



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

NÁVRH SOLÁRNÍHO ZAVLAŽOVÁNÍ PRO TROPICKÝ SKLENÍK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Rastislav Straňák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Rastislav Straňák

ID: 220856

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Návrh solárního zavlažování pro tropický skleníku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou solárního zavlažování, s podmínkami tropického skleníku a nastudujte potřebnou literaturu. Změňte podmínky pro provoz fotovoltaického zařízení. Navrhněte jednoduché solární zavlažování s případnou možností rozšíření o další funkce (např. detekce vlhkosti půdy, automatická regulace, rozprašování atd.) podle požadavků zadavatele. Navržené zařízení sestrojte a otestujete jeho funkčnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cieľom tejto diplomovej práce je vytvoriť solárny zavlažovací systém pre tropický skleníček spadajúci pod organizáciu Lužánky – středisko volného času. Práca sa najprv venuje skúmaniu súčasného stavu skleníčku, ako aj viacerým možnostiam jeho automatizácie v súvislosti s generovaním elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Navrhnuté zariadenie pozostávajúce z dosky plošných spojov je napájané zo solárneho panelu, pričom disponuje externými perifériami ako umelé osvetlenie či zavlažovanie mlžením. Súčasťou práce je otestovanie funkčnosti jednotlivých elektrických obvodov, kompletného zariadenia v skleníčku, ako aj jeho vplyvu na klimatické podmienky.

Kľúčové slová

solárne zavlažovanie, skleníček, automatizácia, fotovoltika, akumulátor, klimatické podmienky

Abstract

The aim of this master's thesis is to create a solar irrigation system for a tropical greenhouse under the organization Lužánky – středisko volného času. The work initially focuses on examining the current state of the greenhouse as well as various possibilities for its automation in relation to generating electricity from renewable sources. The proposed device, consisting of an integrated circuit board, is powered by a solar panel and includes external peripherals such as artificial lighting and mist irrigation. The thesis also includes testing the functionality of individual electrical circuits, the complete device in the greenhouse, as well as its impact on climatic conditions.

Keywords

solar irrigation, greenhouse, automation, photovoltaics, accumulator, climatic conditions

Bibliografická citácia

STRAŇÁK, Rastislav. *Návrh solárneho zavlažování pro tropický skleníek*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160078>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Kristýna Jandová.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

| | |
|------------------------------------|--|
| Meno a priezvisko študenta: | <i>Rastislav Straňák</i> |
| VUT ID študenta: | 220856 |
| Typ práce: | <i>Diplomová práca</i> |
| Akademický rok: | 2023/24 |
| Téma záverečnej práce: | <i>Návrh solárneho zavlažování pro tropický skleníky</i> |

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, vyslovene som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 22. mája 2024

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcej diplomovej práce Ing. Kristýne Jandovej, Ph.D. za aktívnu odbornú a pedagogickú pomoc a za poskytnuté rady pri spracovávaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: 22. mája 2024

podpis autora

Obsah

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 12 |
| 1. LUŽÁNECKÝ SKLENÍK..... | 13 |
| 1.1 ŠTRUKTÚRA..... | 13 |
| 1.2 KLIMATICKÉ PODMIENKY | 14 |
| 2. MOŽNOSTI AUTOMATIZÁCIE VYBRANÉHO SKLENÍKU | 16 |
| 2.1 VZDIALENÝ PRÍSTUP..... | 16 |
| 2.1.1 Vnútorná komunikácia..... | 16 |
| 2.1.2 Vonkajšia komunikácia..... | 16 |
| 2.2 MÉRANIE VLASTNOSTÍ PROSTREDIA | 17 |
| 2.3 ZAVLAŽOVANIE | 19 |
| 2.3.1 Kvapkové zavlažovanie | 19 |
| 2.3.2 Rozprašovanie..... | 20 |
| 2.4 CHLADENIE | 21 |
| 2.5 IMPLEMENTÁCIA UMELÉHO OSVETLENIA | 22 |
| 3. GENEROVANIE A SKLADOVANIE ELEKTRICKEJ ENERGIE | 24 |
| 3.1 FOTOVOLTIKA | 24 |
| 3.1.1 Princíp funkcie solárneho článku..... | 24 |
| 3.1.2 Ekvivalentný obvod..... | 29 |
| 3.1.3 Parametre solárnych článkov | 30 |
| 3.1.4 Solárny panel..... | 32 |
| 3.1.1 Typy solárnych panelov | 32 |
| 3.2 ELEKTROCHEMICKÝ AKUMULÁTOR | 33 |
| 3.2.1 Princíp funkcie Li-ion článku..... | 33 |
| 3.2.2 Materiály elektród..... | 35 |
| 3.2.3 Druhy konštrukcií..... | 38 |
| 4. ZÁKLADY SYSTÉMU SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA..... | 40 |
| 4.1 ROZBOR BLOKOVEJ SCHÉMY..... | 40 |
| 4.2 VÝPOČET ENERGETICKEJ NÁROČNOSTI..... | 42 |
| 4.2.1 Riadiaci systém | 42 |
| 4.2.2 Umelé osvetlenie | 44 |
| 4.2.3 Manažment vody..... | 44 |
| 4.2.4 Súhrn predpokladov energetickej náročnosti..... | 46 |
| 4.3 VÝBER FOTOVOLTICKÉHO PANELU | 46 |
| 4.4 VÝBER LI-ION ČLÁNKU..... | 47 |
| 4.5 PREDPOKLADY SOLÁRNEJ SEBESTAČNOSTI..... | 51 |
| 5. ELEKTRICKÝ NÁVRH..... | 53 |
| 5.1 SPRÁVA NAPÁJANIA..... | 53 |
| 5.1.1 MPPT regulátor..... | 53 |
| 5.1.2 Pasívny balancér Li-ion článkov..... | 57 |
| 5.1.3 Manažment napájania nižších úrovní | 58 |
| 5.2 RIADIACI SYSTÉM | 59 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.3 | VÝSTUPNÉ PERIFÉRIE..... | 61 |
| 5.4 | DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV..... | 62 |
| 5.5 | TESTOVANIE ELEKTRICKÝCH OBVODOV | 64 |
| 5.5.1 | MPPT regulátor..... | 64 |
| 5.5.2 | Balancéry akumulátoru..... | 70 |
| 5.5.3 | Napätové prevodníky..... | 70 |
| 5.6 | FINALIZÁCIA DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV | 72 |
| 6. | PROGRAMOVANIE..... | 74 |
| 6.1 | KONTROLNÁ ČASŤ PROGRAMU | 74 |
| 6.1.1 | Rozbor zdrojového kódu | 75 |
| 6.2 | HLAVNÝ PROGRAM..... | 75 |
| 6.2.1 | Rozbor zdrojového kódu | 77 |
| 7. | ZLOŽENIE A INŠTALÁCIA V SKLENÍKU | 79 |
| 7.1 | ZLOŽENIE ZARIADENIA | 79 |
| 7.2 | INŠTALÁCIA V SKLENÍKU | 83 |
| 8. | TESTOVANIE ZARIADENIA | 89 |
| 8.1 | TEST CYKLU NABÍJANIA..... | 90 |
| 8.2 | TEST PREBITIA A PODBITIA AKUMULÁTORU | 91 |
| 8.3 | TEST SVIETENIA LED PÁSU | 92 |
| 8.4 | TEST OCHRANY ZAVLAŽOVANIA..... | 94 |
| 8.5 | TEST KLIMATICKÝCH PODMIENOK | 95 |
| 9. | FINANČNÁ NÁKLADNOSŤ PROJEKTU..... | 97 |
| 9.1.1 | Náklady na jednotku | 97 |
| 9.1.2 | Odhad nákladov vývoja..... | 98 |
| 10. | ZÁVER..... | 100 |

ZOZNAM OBRÁZKOV

| | |
|---|----|
| Obrázok 1 Lužánecký skleník..... | 13 |
| Obrázok 2 Približný pôdorys Lužáneckého skleníku v milimetroch | 14 |
| Obrázok 3 Test klimatických podmienok v skleníku v priebehu jedného dňa..... | 15 |
| Obrázok 4 Vizualizácia vzdialeného ovládania | 17 |
| Obrázok 5 Základný princíp funkčnosti kapacitného senzora vlhkosti..... | 18 |
| Obrázok 6 Bezdrôtový merač vlastností prostredia T-Higrow | 19 |
| Obrázok 7 Schéma zavlažovania mlžením | 20 |
| Obrázok 8 Pôdorys skleníku s vyznačením vzdušných prúdov a umiestnením trysiek | 22 |
| Obrázok 9 Graf závislosti relatívnej efektivity fotosyntézy na vlnovej dĺžke žiarenia [12] | 23 |
| Obrázok 10 Koncept solárneho článku | 24 |
| Obrázok 11 Pásová štruktúra a) izolant b) polovodič c) kov | 25 |
| Obrázok 12 Jednorozmerný model PN prechodu s približným vyznačením koncentrácie nosičov náboja a OPN..... | 27 |
| Obrázok 13 Pásový diagram PN prechodu so zobrazením difúzneho napätia..... | 29 |
| Obrázok 14 Náhradný obvod ideálneho solárneho článku..... | 30 |
| Obrázok 15 Náhradný obvod reálneho solárneho článku | 30 |
| Obrázok 16 Volt ampérová charakteristika solárneho článku s pridaním výkonovej charakteristiky [24]. | 31 |
| Obrázok 17 Štruktúra solárneho panelu [25] | 32 |
| Obrázok 18 Princíp funkcie lítium-iónového článku..... | 34 |
| Obrázok 19 Vizualizácia interkalácie iónov lítia do vrstvenej štruktúry grafitu..... | 36 |
| Obrázok 20 Vizualizácia interkalácie iónov lítia do spinelovej štruktúry LTO..... | 36 |
| Obrázok 21 Vizualizácia interkalácie iónov lítia do olivínovej štruktúry LiFePO ₄ | 38 |
| Obrázok 22 Štruktúra cylindrického Li-ion článku [38]..... | 39 |
| Obrázok 23 Blokové schéma solárneho zavlažovacieho systému | 41 |
| Obrázok 24 Elektromagnetický ventil | 45 |
| Obrázok 25 Senzor prietoku kvapalín..... | 45 |
| Obrázok 26 Solárny panel Solarfam SZ-70-36M | 46 |
| Obrázok 27 Nameraná A-V charakteristika..... | 47 |
| Obrázok 28 Článok v meracom stanovisku pri vybijacom prúde 2 C..... | 49 |
| Obrázok 29 Grafická závislosť napätia a teploty článku INR21700-P42A od kapacity pri vybijaní menšími prúdmi | 50 |
| Obrázok 30 Grafická závislosť napätia a teploty článku INR21700-P42A od kapacity pri vybijaní vyššími prúdmi | 51 |
| Obrázok 31 Zjednodušený synchronný step-down menič | 53 |
| Obrázok 32 Zapojenie MPPT regulátora | 55 |
| Obrázok 33 Pasívny balancér Li-ion článkov | 57 |
| Obrázok 34 Schéma zapojenia obvodov vytvárajúcich 5 V a 3,3 V okruh..... | 58 |
| Obrázok 35 Blokové schéma ESP32-C3-MINI-1..... | 59 |
| Obrázok 36 Schéma zapojenia ESP32-C3-MINI-1-H4 | 60 |
| Obrázok 37 Schéma komunikačného prevodníku..... | 60 |
| Obrázok 38 Schéma zapojenia budiča ventilu a LED pásu | 61 |
| Obrázok 39 Primárna strana dosky plošných spojov | 63 |
| Obrázok 40 Sekundárna strana dosky plošných spojov | 64 |
| Obrázok 41 CAD model osadenej dosky plošných spojov | 65 |
| Obrázok 42 Predný pohľad na povrch DPS po teplotnej analýze | 66 |
| Obrázok 43 Bočný pohľad na prierez DPS po teplotnej analýze | 66 |

| | |
|--|----|
| Obrázok 44 Predný pohľad na povrch DPS po teplotnej analýze s chladičmi | 67 |
| Obrázok 45 Bočný pohľad na prierez DPS po teplotnej analýze s chladičmi | 67 |
| Obrázok 46 Test MPPT regulátora bez pasívnych chladičov | 68 |
| Obrázok 47 Test MPPT regulátora s pasívnymi chladičmi | 69 |
| Obrázok 48 Balancér akumulátoru na DPS | 70 |
| Obrázok 49 Graf závislosti výstupného napätia a teploty 5 V zdroja od prúdu | 71 |
| Obrázok 50 Graf závislosti výstupného napätia a teploty 3,3 V zdroja od prúdu | 71 |
| Obrázok 51 Fotka 5 V a 3,3 V zdroja z termokameri pri maximálnej záťaži | 72 |
| Obrázok 52 Osadená a zapájaná DPS | 73 |
| Obrázok 53 Kontrolná časť algoritmu | 74 |
| Obrázok 54 Hlavná časť algoritmu | 76 |
| Obrázok 55 Modul zavlažovania | 79 |
| Obrázok 56 LED pás v hliníkovom profile | 80 |
| Obrázok 57 Solárny panel zo zadnej strany | 80 |
| Obrázok 58 DPS s článkami z bočnej strany | 81 |
| Obrázok 59 DPS zapojená v plastovom puzdre | 82 |
| Obrázok 60 Bočný pohľad na zariadenie | 82 |
| Obrázok 61 Umiestnenie solárneho panelu | 83 |
| Obrázok 62 Nainštalovaný zavlažovací modul | 84 |
| Obrázok 63 Nainštalované a zapnuté trysky | 85 |
| Obrázok 64 Zapnutá tryska z blízka | 85 |
| Obrázok 65 Vypnutý LED pás | 86 |
| Obrázok 66 Bezdrôtový merač T-Higrow a zobrazenie výstupného panela | 86 |
| Obrázok 67 Ukážka webového rozhrania | 87 |
| Obrázok 68 Zariadenie zapojené v skleníku | 87 |
| Obrázok 69 Pohľad na skleník z vrchu [50] | 88 |
| Obrázok 70 Testovacia stanica | 89 |
| Obrázok 71 Graf závislosti napätia akumulátoru od času, test cyklu | 90 |
| Obrázok 72 Graf závislosti napätia akumulátoru od času, test prebitia | 91 |
| Obrázok 73 Graf závislosti napätia akumulátoru a stavu LED pásu od času, test podbitia | 92 |
| Obrázok 74 Graf závislosti napätia akumulátoru a stavu LED pásu od času, test LED pásu | 92 |
| Obrázok 75 Programy LED pásu 1 až 4 | 93 |
| Obrázok 76 Grafické zobrazenie závislosti prietoku a stavu ventilu od času | 94 |
| Obrázok 77 Jedna perióda zavlažovania, test klimatických podmienok | 95 |
| Obrázok 78 Test klimatických podmienok v skleníku v priebehu jedného dňa po nainštalovaní solárneho zavlažovacieho systému | 96 |
| Obrázok 79 Koláčový graf zobrazujúci percentuálne rozdelenie ceny solárneho zavlažovacieho systému | 98 |

ZOZNAM TABULIEK

| | |
|--|----|
| Tabuľka 1 Porovnanie parametrov elektród Li-ion článkov | 37 |
| Tabuľka 2 Porovnanie parametrov jednotlivých mikrokontrolérov..... | 43 |
| Tabuľka 3 Prehľad spotreby s uvedením rýchlostí prenosu..... | 43 |
| Tabuľka 4 Parametre solárneho panelu SZ-70-36M..... | 47 |
| Tabuľka 5 Všeobecné parametre Li-ion akumulátorov [44]..... | 48 |
| Tabuľka 6 Parametre INR21700-P42A [45]..... | 48 |
| Tabuľka 7 Výsledky testovania MPPT regulátora..... | 68 |
| Tabuľka 8 Výsledky testu pasívneho balansovania | 70 |
| Tabuľka 9 Osem najdrahších položiek | 97 |

ÚVOD

Systém využívania slnečného žiarenia pre generovanie elektrickej energie prešiel v priebehu posledných desiatok rokov rozsiahlymi zmenami. S postupne narastajúcou účinnosťou cena solárnych systémov klesala, a to najmä kvôli technologickému pokroku v procese výroby. Následkami týchto faktorov prebehla postupná implementácia solárnych panelov do viacerých odvetví priemyslu. Solárne panely sa začali taktiež využívať v poľnohospodárskom odvetví, s ktorým sú spojené komerčné skleníky a skleníky určené pre výskum, vzdelávanie alebo pestovanie rastlín.

Tropické skleníky sú stavby so špecifickými klimatickými podmienkami pre pestovanie širokého spektra, zväčša tropických rastlín. Medzi hlavné vlastnosti vnútorného prostredia patrí vysoká vlhkosť a teplota, ktorými sa simuluje ich prirodzené prostredie. Výhoda využitia solárnych panelov v skleníku tkvie v možnosti vytvorenia ostrovného systému, vďaka čomu je možné skleníky stavať aj v neobývaných lokalitách bez prístupu k elektrickej sieti. Generovanú elektrickú energiu je potom možné využiť na zavlažovanie rastlín, čím sa eliminuje fyzická námaha potrebná na klasický spôsob zavlažovania kŕhlou. Automatizované zavlažovanie, napríklad mžčením alebo použitím kvapkovej závlahy, je kompaktné, šetrí vodu a dokáže efektívne zvyšovať vlhkosť vzduchu či pôdy.

Možnosť návrhu, vytvorenia a implementácie solárneho zavlažovania vznikla na základe dohody s príspevkovou organizáciou Lužánky – středisko volného času Brno, ktorá prevádzkuje skleník s tropickými rastlinami v Lužáneckom Parku v Brne. Stavba skleníku už teraz využíva viaceré technológie podporujúce udržateľnosť a ekológiu. Solárne zavlažovanie s možnosťou využitia algoritmov pre automatizáciu tohto procesu, ako aj vzdialený prístup ku klimatickým podmienkam v skleníku, by mohlo ešte viac rozšíriť rozsah využitia obnoviteľných zdrojov elektrickej energie.

1. LUŽÁNECKÝ SKLENÍK

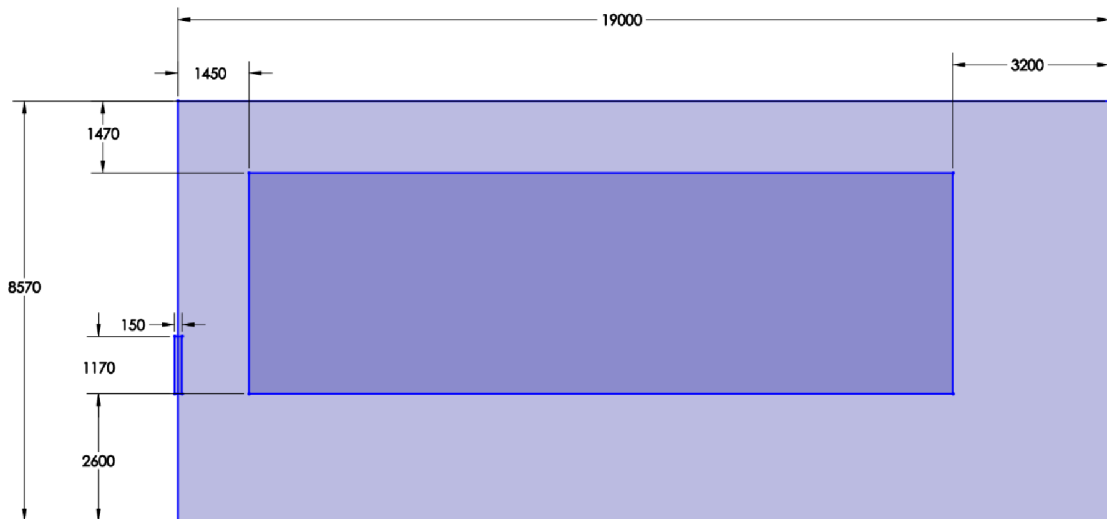
Lužánecký skleník, ďalej aj LUSK, je environmentálne a polytechnické vyučovacie centrum, ktoré sa nachádza v Parku Lužánky, v mestskej časti Brno-stred. LUSK bol zrekonštruovaný v roku 2019 [1] a spravovaný je príspevkovou organizáciou Lužánky – stredisko voľného času Brno. Ako väčšina moderných stavieb, aj LUSK využíva technológie podporujúce udržateľnosť a ekológiu, medzi ktoré sa radí napríklad čiastočne zelená strecha, zber dažďovej vody na polievanie rastlín alebo ohrev vody pomocou solárnych panelov. Naopak, vnútro skleníku ponúka viaceré možnosti pre implementáciu technologických prvkov, ako je napríklad automatizované zavlažovanie alebo vzdialený prístup k údajom o teplote či vlhkosti vzduchu.



Obrázok 1 Lužánecký skleník

1.1 Štruktúra

Hlavnou výsadou všetkých skleníkov je schopnosť udržiavania špecifického vnútorného prostredia vhodného na pestovanie rôznych druhov tropických rastlín. To je dosiahnuté najmä základnou štruktúrou, ktorá je v LUSKu tvorená oceľový rámom a presklenými stenami. Ako vidieť na obrázku 2, do skleníku sa vstupuje z ľavej strany cez dvere umiestnené v pravej polovici priečkovej steny. Obsah miestnosti činí približne 163 m², pričom v strede sa na ploche s obsahom 65 m² nachádza hlavná časť s tropickými rastlinami. Po širšom okraji pravej časti, ako aj cez stred miestnosti, sú umiestnené kletky s tropickými zvieratami žijúcimi v, pre nich, prirodzenom klimatickom prostredí.



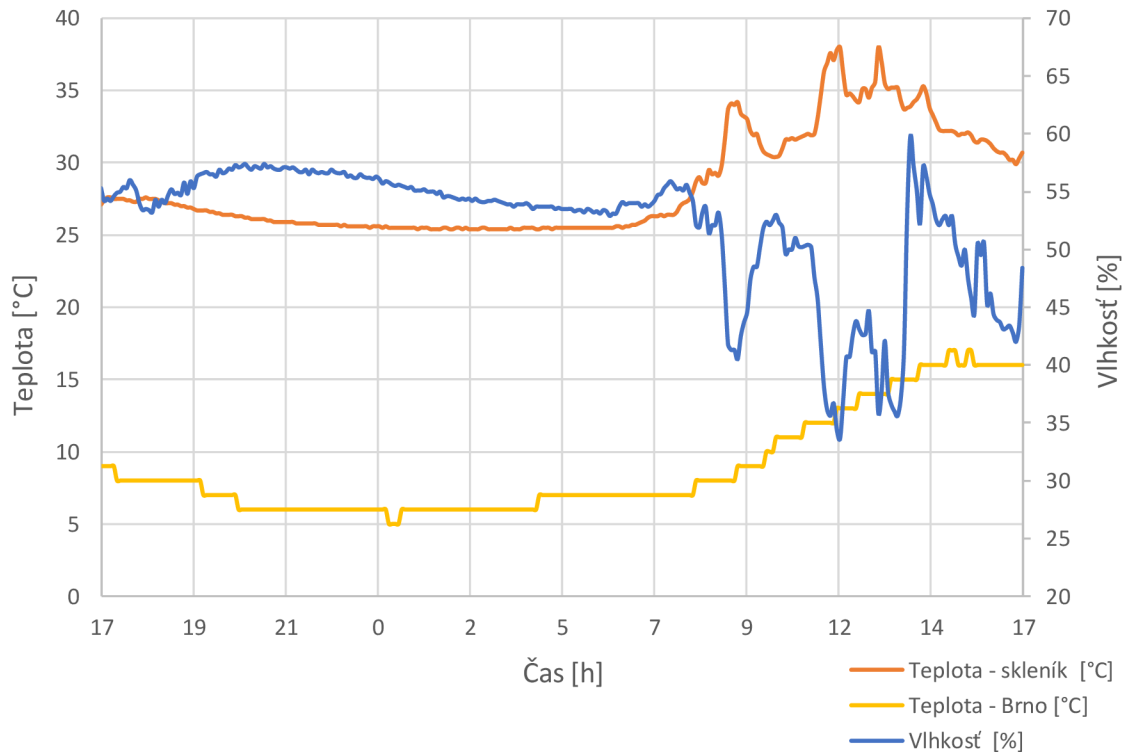
Obrázok 2 Približný pôdorys Lužaneckého skleníku v milimetroch

1.2 Klimatické podmienky

Primárnymi faktormi ovplyvňujúcimi klimatické podmienky v skleníku sú teplota, vlhkosť a úroveň osvetlenia. Úroveň osvetlenia, alebo inak intenzita svetla počas dňa, je daná štruktúrou stavby a jej schopnosťou prepúšťať čo najviac svetla do vnútorných priestorov. V snahe o automatizáciu ju nie je možné navýšiť a prípadná potreba jej obmedzenia by si vyžadovala rozsiahle investície do inštalácie automatizovaných roliet na presklenú strechu budovy. Vnútorná teplota je faktor, ktorý je možné ovplyvniť aj bez priameho zásahu do štruktúry. Ideálny rozsah teplôt v skleníku je v rozmedzí 24 °C až 29 °C cez deň, a 20 °C až 24 °C v noci [2], pričom je potrebné dosiahnutie čo najväčšej konzistentnosti bez enormných teplotných výkyvov. Vlhkosť, ako druhý jednoduchšie ovplyvniteľný faktor prostredia, by sa mala pohybovať v rozmedzí 60 – 80 %. Čím tropickejší charakter majú zasadené rastliny, tým vyššia úroveň vlhkosti by mala v skleníku byť.

Za účelom získania reálnych údajov o teplote a vlhkosti bolo prevedených niekoľko meraní za použitia senzoru AM2301, ktorý meria teplotu v rozmedzí -40 °C až 80 °C s presnosťou ± 1 °C a vlhkosť v rozsahu 0-99 % RH s presnosťou ± 3 % RH [3]. Meranie vždy prebiehalo po dobu dvadsiatich štyroch hodín, v strede miestnosti, vo výške približne 1,5 metra nad zemou. Ako vidieť na obrázku 3, meranie začalo o 17-tej hodine, kedy bola teplota v skleníku približne 27 °C a vlhkosť 54 % RH. V priebehu noci oba parametre klesali až do siedmej hodiny ráno, kedy začalo na skleník svietiť slnko a zároveň sa v ňom začali pohybovať zamestnanci. Paralelne so stúpajúcou teplotou v Brne stúpala od rána aj teplota v skleníku, pričom vlhkosť vplyvom vzniknutých vzdušných prúdov z otvárania dverí v korelácii s netesnosťami stavby a pohybom zamestnancov klesala. Pred deviatou hodinou ráno senzor zaznamenal prvé výraznejšie zníženie teploty pri odpovedajúcom náraste vlhkosti. Táto skoková zmena oboch

parametrov bola primárne výsledkom vetrania miestnosti a polievania rastlín, po ktorom sa do priestoru uvoľňovalo zvýšené množstvo molekúl vody. Zalievanie prebiehalo len za pomoci krhly bez využitia plošného zalievania hadicou alebo iného druhu rozprašovania. Počas dňa cyklus zalievania prebehol ešte raz, a to v časovom rozmedzí 12-tej až 14-tej hodiny. Maximálna teplota v skleníku bola 38 °C a vlhkosť 60 % RH, zatiaľ čo teplota v Brne dosiahla 17 °C. Výsledky merania mohli byť ovplyvnené dopadom slnečného žiarenia priamo na senzor čiernej farby, ako aj jeho polohou.



Obrázok 3 Test klimatických podmienok v skleníku v priebehu jedného dňa

Z nameraných údajov vyplýva, že teplota v skleníku presahuje definovaný rozsah teplôt aj v časoch, keď vonkajšia teplota nedosahuje ani 20 °C. Vplyvom manuálneho zavlažovania s krlou sa vlhkosť v miestnosti dá zvýšiť, avšak až maximálna nameraná vlhkosť spadala do potrebného rozsahu pre tropické rastliny.

2. MOŽNOSTI AUTOMATIZÁCIE VYBRANÉHO SKLENÍKU

Táto kapitola sa bude venovať jednotlivým možnostiam automatizácie skleníku s tropickými rastlinami, ich popisu, možnostiach implementácie, výhodám a nevýhodám. V posledných rokoch sa automatizácia a autonómnosť skleníkov stáva čoraz populárnejšou témou v oblasti skleníkového poľnohospodárstva, a to najmä vďaka mnohým výhodám, ktoré ponúka. Automatizované systémy môžu ušetriť čas, náklady a prácu zamestnancom, a to napríklad prebratím úloh ako zavlažovanie či hnojenie. Taktiež môžu poskytnúť prístup k dátam o rôznych faktoroch prostredia, ako sú teplota, vlhkosť vzduchu, osvetlenie či koncentrácia CO₂.

2.1 Vzdialený prístup

Základom automatizácie tropických skleníkov je vzdialený prístup a ovládanie. Ovládanie na diaľku sa stalo bežným pomocníkom v mnohých domácnostiach, avšak do poľnohospodárskeho, alebo aj záhradného priemyslu, ešte úplne nepreniklo. Tento systém umožňuje monitorovanie, ovládanie a kontrolu podmienok prostredia v reálnom čase z celého sveta pomocou webového rozhrania alebo aplikácie.

2.1.1 Vnútoraná komunikácia

Význam vnútornej komunikácie spočíva v prepojení všetkých senzorov, kontrolérov a ovládačov skrz jeden alebo viacero komunikačných protokolov s hlavným mikrokontrolérom, ktorý je v pozícii správcu jednotlivých koncových aplikácií. Medzi možné protokoly bezdrôtovej komunikácie sa radí Wi-Fi, Bluetooth či LoRa. Káblová komunikácia môže byť sprostredkovaná skrz I2C alebo UART protokol. Hlavnou prednosťou Wi-Fi je prenos veľkých objemov dát pri zachovaní rýchlosti pripojenia. V priestoroch bez pripojenia na internet, do vzdialenosti približne 10 metrov, je možné využiť Bluetooth sieť. Na veľké vzdialenosti (až do 15 kilometrov [4]) je možné využiť LoRa protokol, avšak za cenu malého objemu a nízkej rýchlosti prenášaných dát, čo by pre účely nekomerčného skleníku malo byť dostačujúce.

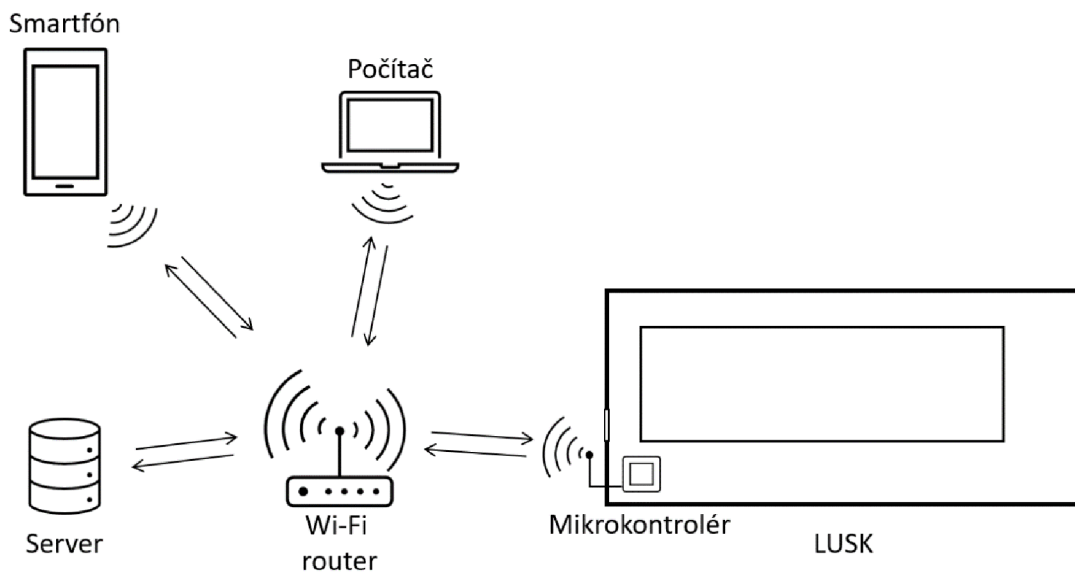
2.1.2 Vonkajšia komunikácia

Na prepojenie skleníku s okolitým svetom je najpraktickejšie využiť pripojenie na internet cez Wi-Fi sieť. Wi-Fi router predstavuje zariadenie vytvárajúce bezdrôtovú sieť, pričom každému zariadeniu, ktoré sa na túto sieť pripojí prideli unikátnu IP adresu. Na zabezpečenie spoľahlivej komunikácie je využívaný TCP/IP protokol. TCP protokol je

zodpovedný za rozdelenie dát do jednotlivých paketov, zatiaľ čo IP protokol smeruje jednotlivé pakety do koncových cieľov [5].

Pre posielanie dát používateľ odošle príkaz cez sieť do routeru. Z toho sa dáta cez zadanú koncovú IP adresu prepošlú do mikrokontroléru, ktorý ich dekóduje, spracuje a ďalej pošle cez vybraný komunikačný protokol do, napríklad, zavlažovacej jednotky na druhej strane skleníku. Komunikácia funguje aj spätne, kedy je mikrokontrolér rovnakou cestou schopný dáta poslať do smartfónu alebo webovej stránky.

Často využívaným praktickým medzi krokom je možnosť posielat' a ukladať dáta z mikrokontrolérov, webových stránok alebo mobilných zariadení na server tak, ako to zobrazuje obrázok 4. Server tropického skleníka môže obsahovať program na analýzu dát z jednotlivých senzorov a databázu na ich ukladanie. Webová stránka alebo aplikácia prepojená so serverom môže byť nastavená tak, aby dostávala pravidelné aktualizácie so spracovanými dátami, ktoré na server prišli z mikrokontroléru. Tieto dáta potom môže pre používateľa zobrazovať a taktiež môže poskytovať možnosť upraviť rôzne nastavenia, ako môže byť zapnutie či vypnutie jednotlivých systémov v skleníku. Aplikácia môže tiež odosielať upozornenia používateľovi, ak sa niektoré hodnoty, napríklad teploty vzduchu, dostanú mimo zadaný rozsah. Podobne, i keď menej prakticky, môže fungovať posielanie e-mailov z webovej stránky pri podobných udalostiach.

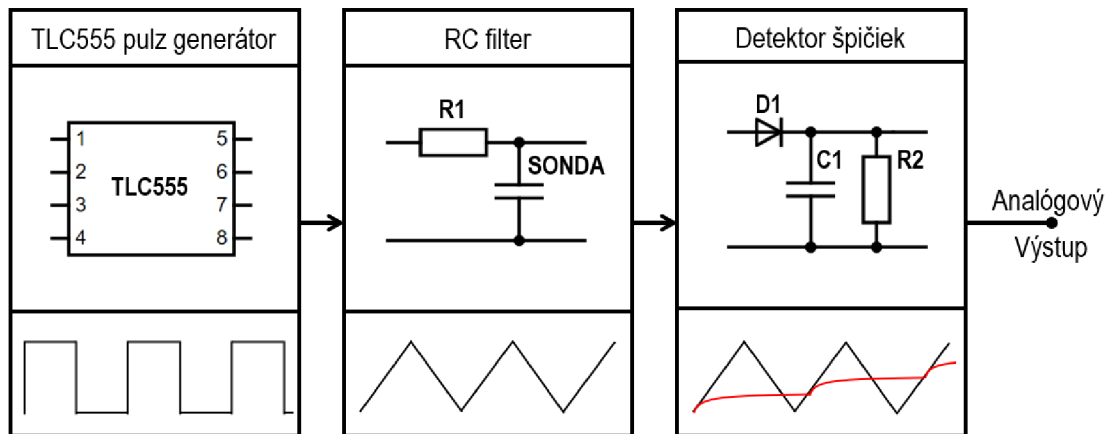


Obrázok 4 Vizualizácia vzdialeného ovládania

2.2 Meranie vlastností prostredia

Medzi najdôležitejšie parametre pre nekomerčné skleníky patrí teplota, vlhkosť vzduchu a vlhkosť pôdy pod tropickými rastlinami. Tieto parametre je možné merať pomocou viacerých typov senzorov, z nich najpoužívanejšie sú senzory využívajúce

kapacitný senzor vlhkosti a termistor pre meranie okolitej teploty. Termistory predstavujú druh rezistoru, ktorého hodnota sa mení vzhľadom na okolitú teplotu. Hodnota teplotného súčiniteľa môže byť buď kladná (PTC), kedy hodnota odporu so stúpajúcou teplotou narastá, alebo záporná (NTC), kedy naopak klesá. Medzi ich vlastnosti patrí vysoká teplotná citlivosť. Medzi nevýhody sa radí obmedzený teplotný rozsah merania, rádovo v stovkách °C, ktorý môže byť problémom pre meranie vo vysoko-teplotných aplikáciách, ktorými avšak skleníky nie sú.

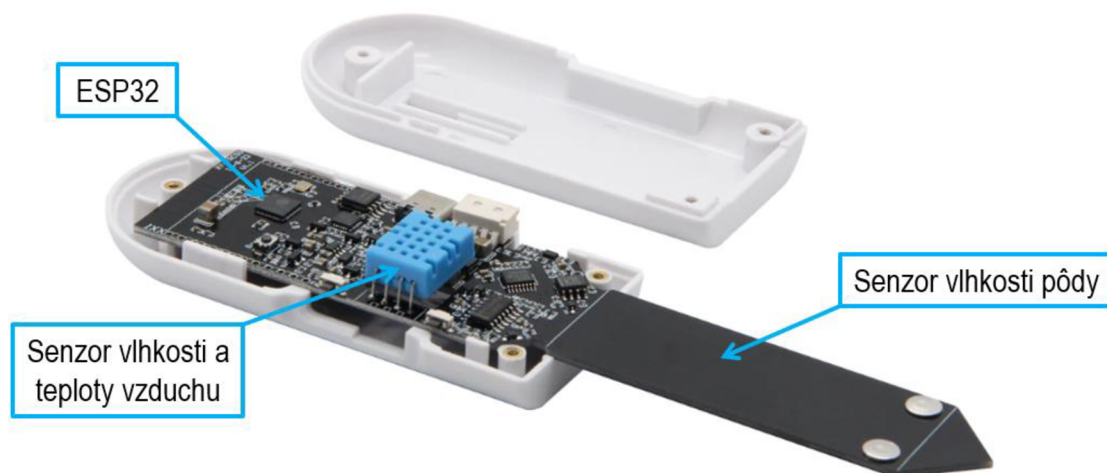


Obrázok 5 Základný princíp funkčnosti kapacitného senzora vlhkosti

Na druhej strane kapacitný senzor meria relatívnu vlhkosť vzduchu snímaním zmien kapacity spôsobených usádzaním atómov vody na polymérnom filme sondy. Ako ukazuje obrázok 5, senzor vlhkosti obvykle začína obvodom univerzálneho časovača TLC555, ktorý vďaka spôsobu zapojenia tvorí pulzný signál určitej frekvencie, typicky okolo 1,5 MHz. Tento signál vstupuje do RC filtra s pevne danou hodnotou rezistoru, pričom hodnota kapacity kondenzátora odzrkadľuje zmeny elektrického náboja v dielektriku sondy, ktorá je tvorená zmenou vlhkosti vzduchu alebo pôdy. Ďalej nasleduje zapojenie detektoru špičiek, v ktorom je trojuholníkový signál z RC filtra privedený na usmerňovaciu diódu, skrz ktorú sa nabíja paralelne zapojený kondenzátor určujúci analógovú hodnotu na výstupe celého zapojenia. Analógová hodnota sa následne spracováva analógovo-digitálnym prevodníkom zvyčajne sa nachádzajúcim na vstupno-výstupnom pine koncového mikrokontroléru. Kapacitné senzory vlhkosti merajú vlhkosť s presnosťou jednotiek percent, majú nízku spotrebu energie, dlhú životnosť a nepodliehajú korozívnym účinkom, čo je ich hlavná výhoda oproti stále používaným odporovým senzorom vlhkosti.

Základom automatizovaného systému je periodické meranie vlastností prostredia. Nevýhodou nekomerčného skleníku s tropickými rastlinami je ich časté premiestňovanie a zvýšený pohyb osôb a detí v danom priestore, kvôli čomu nebude vo finálnej aplikácii možné použiť senzory teploty a vlhkosti fyzicky spojené so zariadením káblom. Riešenie ponúka spoločnosť LILYGO a ich bezdrôtový merač vlastností prostredia T-Higrow.

Podľa zvolenej konfigurácie disponuje zariadenie senzorom vlhkosti a teploty vzduchu, kapacitným senzorom vlhkosti pôdy a čipom ESP32, ktorý umožňuje zariadenie programovať, a taktiež mu umožňuje bezdrôtovo komunikovať s vybratým serverom skrz Wi-Fi rozhranie. Medzi komponenty patrí aj Li-ion akumulátor o kapacite 200 mAh, ktorý zabezpečí prevádzku zariadenia. Celková dĺžka prevádzky počas jedného nabitia bude potom najmä závisieť od frekvencii merania jednotlivých parametrov a ich posielaním na predom určenú IP adresu.



Obrázok 6 Bezdrôtový merač vlastností prostredia T-Higrow

2.3 Zavlažovanie

Ručné zavlažovanie rastlín patrí k najnáročnejším úlohám, či už po fyzickej stránke pri prenášaní krhly s vodou alebo po časovej kvôli veľkému počtu zavlažovacích jednotiek. Správne prevedeným automatizačným procesom môže byť ľudská práca čiastočne alebo aj úplne odstránená. Pre skleníky veľkosťou podobnou LUSK-u existujú dve možnosti automatizovaného zavlažovania. Prvým je kvapkové zavlažovanie sprostredkované hadicami s dierkami a druhým rozprašovanie, počas ktorého sa vlhkosť prenáša vzduchom.

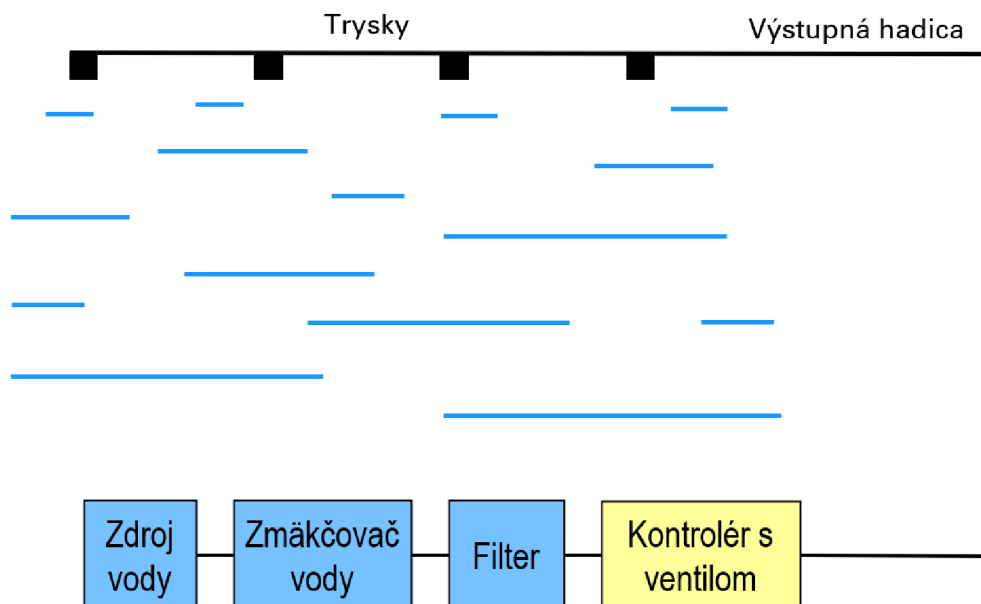
2.3.1 Kvapkové zavlažovanie

Kvapkové zavlažovanie predstavuje systém rozvodov vody cez špeciálne hadice s dierkami, vďaka ktorým je voda dodávaná priamo ku koreňom rastlín. Jedná sa o účinný a hlavne efektívny spôsob zavlažovania, ktorý minimalizuje straty vzniknuté vyparovaním a zalievaním nepoužívaných častí pôdy. Kvapková závlaha môže byť navrhnutá tak, aby dodávala presné množstvo vody a živín jednotlivým rastlinám. Jej nevýhoda spočíva v pomerne veľkom počte hadíc a v časovej náročnosti ich premiestňovania pri zmene rozostavenia rastlín, k čomu v skleníkoch, ktoré nie sú komerčne využívané, môže dochádzať pomerne často.

Základom automatickej kvapôčkovej závlahy je zdroj vody, v prípade skleníku akumuláčn nádrž s dažďovou vodou, čerpadlo a elektromagnetický ventil ovládaný mikrokontrolérom s pripojením na bezdrtov komunikáciu, napríklad Bluetooth, Wi-Fi alebo LoRa. Ideálny tlak vody pre kvapčkov závlahu sa pohybuje v rozmedzí 69 KPa až 210 KPa. Minimálny tlak vody v domácnostiach je aspon 150 KPa [6], pricom priemern tlak sa pohybuje na úrovni 300 KPa, z čoho vyplýva nutnosť zapojenia regulátora tlaku vody medzi čerpadlo a hadice kvapkovej závlahy. V opačnom prípade by mohlo dôjsť k ich roztrhnutiu.

2.3.2 Rozprašovanie

Druhým spôsobom je zavlažovanie pomocou striekacieho alebo hmlou vytvárajúceho systému, ktor sa v skleníkoch bežne vyuiva a je nm docielen vysok vlhkosť vzduchu. Tento systém pomocou série trysiek alebo jemných rozprašovačov vytvára hmlu, ktor sa kondenzuje na listoch rastlín a pde, pricom im dodáva potrebn vlhkosť a živiny. Medzi výhody tohto typu zavlažovania pat rovnomern distribúcia vody v celom priestore a pri správnom asovan spúšťania udržiavanie stálej úrovne vlhkosti. Hlavnou nevýhodou je mon upchatie trysiek pri zvršenom obsahu rozpustných minerálnych látok (vápnika a horka) vo vode. Z toho dôvodu je potrebn inštalácia zmkovaa vody spoluce s filtrom medzi zdroj vody a pumpu, vďaka čomu bude z vody odstrnen vek časť nežiadúcich minerálnych látok, ako aj drobných ast, ktoré by mohli časom zaniest zavlaovc systém. I keď trysky simulujú vlhkosť tropických pásiem, tak nie dažde, kvôli čomu by fyzick polievanie nemohlo by úplne vynechan. Mon usporiadanie je zobrazen na obrázku 7.



Obrázok 7 Schéma zavlažovania mlžením

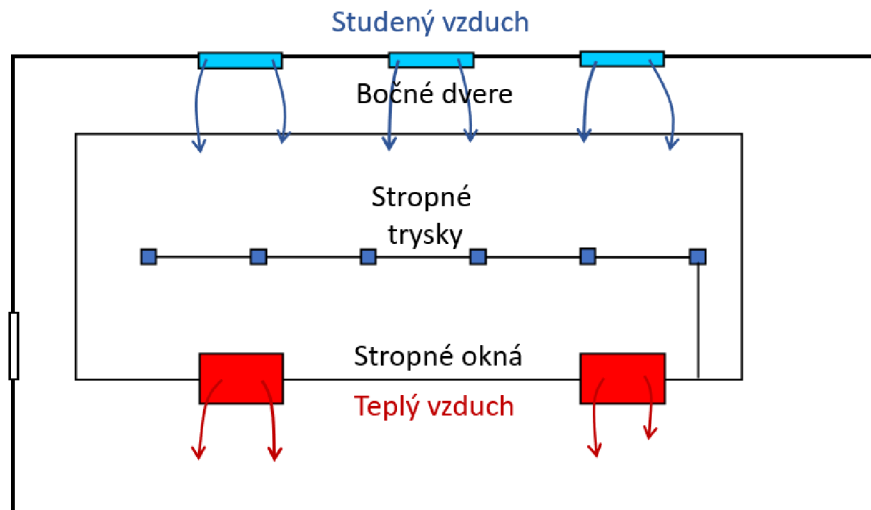
2.4 Chladenie

Teplota v Lužáneckom skleníku presahuje odporúčané hodnoty, pričom vlhkosť prostredia ich naopak nedosahuje. Výsledkom je veľmi teplé a suché prostredie najmä v letných mesiacoch od mája do augusta, ktoré môže byť pre rastliny škodlivé. Jedným z možných, cenovo dostupných spôsobov regulácie teploty pri zvýšení vlhkosti prostredia, pričom nebude zabránené vniku slnečného žiarenia (použitie strešných rolíet), je použitie systému hmly s otvormi na prívod a odvod vzduchu.

Základným princípom chladenia miestnosti pomocou vody je premena citel'ného tepla na latentné teplo vyparenej vody [7]. V skleníku bola v minulosti nainštalovaná stropná hadica s tryskami pre rozstrekovanie vody pre ušetrenie práce zamestnancov. Avšak časom sa zistilo, že rozstrekové kvapôčky nezvyšujú tak vlhkosť vzduchu, ako skôr simulujú prudký dážď, ktorý pri zapínaní viac krát do dňa ničí ich listy. Tento systém navyše zanechával viditeľné vrstvy vody na všetkých horizontálne položených veciach a podlahe, čo mohlo z dlhodobého hľadiska spôsobiť škody a ohroziť bezpečnosť. Využitie nainštalovanej hadice s výmenou obyčajných trysiek za vysoko-tlaké trysky pre tvorbu hmly by mohlo vplyvom zvýšenia vlhkosti simulovať tropické prostredie rastlín, znížiť teplotu a pritom nespôsobovať materiálne škody. Rýchlosť voľného pádu kvapiek hmly (s priemerom približne 10 mikrometrov [8]) je v porovnaní s klasickými kvapkami veľmi pomalá, ich počet je niekoľko násobne väčší a váha zas menšia, vďaka čomu sú tieto častice jednoducho prenášané vzdušnými prúdmi. Drobné častice hmly počas ich existencie prijímajú citel'né teplo prostredia, čoho výsledkom je vysoká miera vyparovania vody, čo spôsobí zvýšenie vlhkosti v kombinácii s odvodom tepla vzduchovými prúdmi, vďaka čomu je možné dosiahnuť zníženie teploty v skleníku.

Pre fungovanie tohto systému je nutné zabezpečiť správne vetranie miestnosti. Prívod vzduchu by mal byť sprostredkovaný vetračnými otvormi alebo oknami na úrovni podlahy, odvod zas oknami v blízkosti strechy. Vyššia efektívnosť chladenia môže byť dosiahnutá inštaláciou ventilátorov na zvýšenie objemu prívodu studeného vzduchu a odvodu teplého vzduchu do vonkajšieho prostredia skrz strešné otvory. V aktuálnom technickom vybavení je avšak možná len prirodzená ventilácia skrz dve strešné okná v úlohe odvodu vzduchu a trojici dverí v úlohe prívodu studeného vzduchu tak, ako to zobrazuje obrázok 8.

Po inštalácii trysiek vytvárajúcich hmlu by vzhľadom na pôdorys skleníku mala byť hlavne v strednej časti zabezpečená spoľahlivá výmena teplého vzduchu za studený. Problém môže nastať v celej pravej a ľavej okrajovej časti, kde vzduchové prúdy nebudú tak silné a objemovo veľké, kvôli čomu tam môžu vzniknúť miesta s vyššou teplotou ako bude teplota v správne vetraných častiach.



Obrázok 8 Pôdorys skleníku s vyznačením vzdušných prúdov a umiestnením trysiek

2.5 Implementácia umelého osvetlenia

Vďaka prenikaniu slnečného žiarenia skrz presklenú strechu budovy majú hlavne v letných mesiacoch rastliny vyhovujúce podmienky pre proces fotosyntézy sprevádzaný prirodzeným rastom. Problém nastáva v mesiacoch zimných, kedy tieto tropické rastliny potrebujú prijať väčšie množstvo fotónov, než im priemerný počet hodín slnečného žiarenia na vrchole zimy v strednej Európe môže poskytnúť, a to 2,5 h. Umelé osvetlenie je schopné kompenzovať tento nedostatok prirodzeného svetla, a tak zabezpečiť optimálne podmienky pre fotosyntézu rastlín.

Na trhu s umelým osvetlením pre poľnohospodárske aplikácie dominujú svetelné diódy, ďalej aj led, a to hlavne kvôli stále klesajúcej cene, napredujúcim technologickým inováciám a nízkej spotrebe elektrickej energie. V minulosti boli využívané napríklad sodíkové výbojky, medzi ktorých výhody sa radila dlhá životnosť, avšak za cenu obmedzeného farebného indexu či náročnej regulácii intenzity svetla. Komerčne sú využívané najmä dva druhy led. Prvými sú úzkopásmové LED produkujúce konkrétnu farbu svetla, ako je napríklad modrá alebo červená. Druhými sú biele LED svetlá, ktoré buď produkujú širší rozsah vlnových dĺžok spolu tvoriacich biele svetlo alebo produkujú svetelné žiarenie vo vlnových dĺžkach modrého až UV svetla, ktorého svetelný tok je následne konvertovaný do bielej farby fosforovým filmom [9]. Trendom posledných rokov sú adresovateľné led, ktorých hlavnou výhodou je možnosť nezávislého nastavenia jednotlivých svetelných diód v reťazci. Programovaním reťazca je potom možné vytvárať svetlo v rôznych farbách a intenzitách. Tieto vlastnosti môžu byť výhodné pre testovanie reakcie rastlín na svetlo viacerých vlnových dĺžok alebo aj mixov ich rozličných pomerov bez nutnosti fyzickej zmeny aparatury. Na rozdiel od tradičných LED svetiel obsahujúcich len pin pre napájanie (VCC) a zem (GND), adresovateľné LED obsahujú jeden či už interný alebo externý integrovaný obvod spracúvajúci dáta. Dátový tok obsahuje

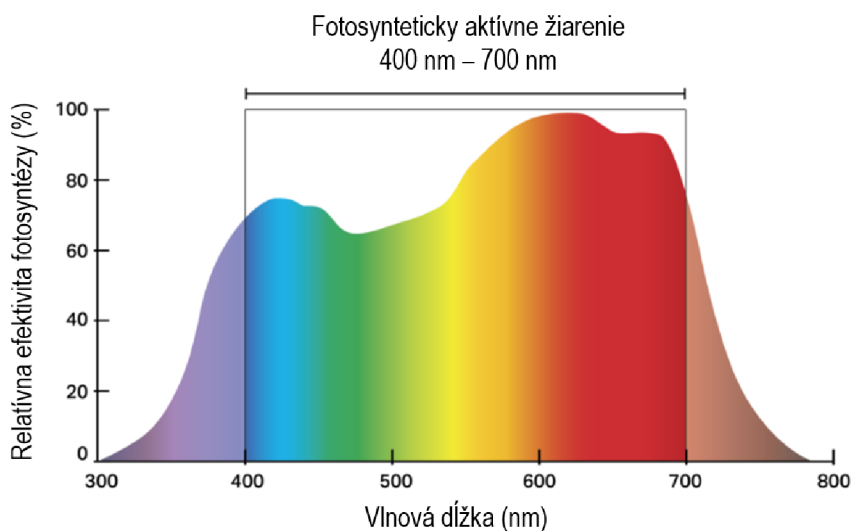
informácie o adrese LED v reťazci, výstupnej farbe vyžarované svetla ako aj jeho intenzite. Na ich prijímanie a následné posielanie k ďalším častiam reťazca slúžia piny DIN a DOUT. Jedným z predstaviteľov môže byť napríklad LED typu WS2812B.

V priebehu fotosyntézy chlorofyl nachádzajúci sa v listoch rastlín absorbuje energiu fotónov, ktorá je následne využitá v rôznych chemických procesoch sprostredkujúcich rast rastlín. Vzhľadom na efektivitu premeny elektrickej energie na svetlo, hustotu svetelného toku fotónov a spektrum fotosynteticky aktívneho žiarenia sa na umelé osvetlenie pestovania rastlín primárne využíva jedna z troch hlavných farebných kombinácií.

Prvou je fialové svetlo tvorené zo 75 % až 90 % červenými LED a z 25 % až 10 % modrými led. Ako ukazuje obrázok 9, relatívna intenzita fotosyntézy je najvyššia v oblasti červeného spektra a najnižšia v oblasti zelených vlnových dĺžok. Navyše, efektivita premeny elektrickej energie na fotónový tok je taktiež najvyššia pre vlnové dĺžky v oblasti červeného spektra. Výsledkom týchto dvoch faktorov je veľmi rýchly rast, na ktorý sa rastliny nestíhajú adaptovať a celkový výsledok umelého osvetlenia je potom kontraproduktívny. Z toho dôvodu sa do kompozície pridávajú modré led, ktoré na vývoj rastliny pôsobia opačne a tým pádom zvyšujú kompaktnosť celého systému.

Druhou variantou je ružové svetlo pozostávajúce z červených a bielych led. Tieto štruktúry sú zväčša menej efektívne, avšak vyžarované spektrum je príjemnejšie pre ľudské oko, čo môže zvyšovať efektivitu práce napríklad pri kontrole rastlín.

Poslednou komerčne využívanou variantou je biele svetlo. Všeobecne je táto možnosť využívaná najmä kvôli výrazne nižšej cene čisto bielych LED pásov, ktorých technológia sa môže od výrobcu k výrobcovi líšiť. Efektivita fotosyntézy a tým pádom aj celého zariadenia je nižšia ako pri fialovom, aj ako pri ružovom nasvetlení rastlín. [11]



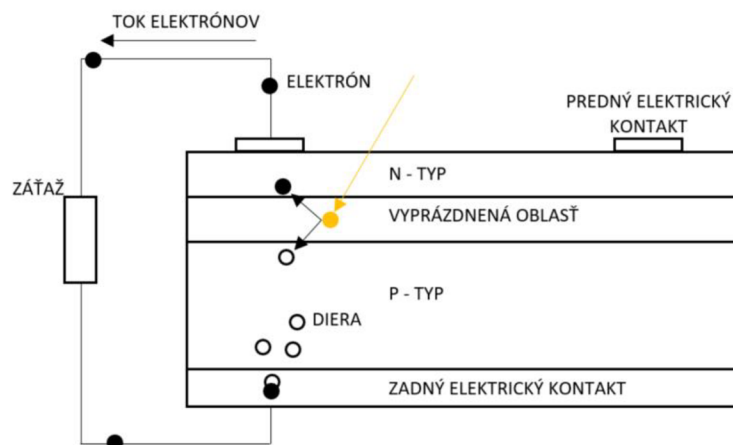
Obrázok 9 Graf závislosti relatívnej efektivity fotosyntézy na vlnovej dĺžke žiarenia [12]

3. GENEROVANIE A SKLADOVANIE ELEKTRICKEJ ENERGIE

Koncept moderných skleníkov je postavený na využívaní obnoviteľných zdrojov. Medzi najpoužívanejšie obnoviteľné zdroje elektrickej energie sa radia solárne panely, a to hlavne z dôvodu postupného zvyšovania účinnosti a znižovania ich ceny za posledných desať rokov [13]. Vygenerovaná elektrická energia nie je vždy priamo použitá na napájanie elektrického zariadenia. Z toho dôvodu ju je vhodné dočasne uložiť do nabíjateľných akumulátorov.

3.1 Fotovoltika

Fotovoltika predstavuje spôsob generovania elektrickej energie za využitia solárnych článkov a energie slnečného žiarenia. Ak na solárny článok dopadne elektromagnetické žiarenie so správnym množstvom energie, tak jej predaním dokáže excitovať elektrón z valenčného pásma, ktorý sa potom môže podieľať na vytváraní elektrického prúdu [14] tak, ako to zobrazuje obrázok 10.



Obrázok 10 Koncept solárneho článku

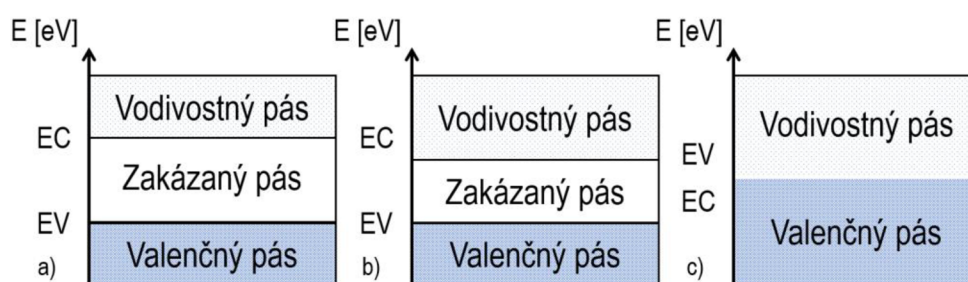
Súbor sériovo prepojených solárnych článkov sa nazýva solárny panel, ktorý je základným blokom fotovoltického systému.

3.1.1 Princíp funkcie solárneho článku

Princíp solárneho článku je opísaný fotoelektrickým javom, v ktorom fotón s určitou energiou interaguje s hmotou. Fotóny, ako kvantá energie prechádzajúce priestorom majú nenulovú frekvenciu, vzhľadom na ktorú tvoria elektromagnetické žiarenie v určitom spektre, napríklad v jeho viditeľnej časti. Energia fotónov je teda priamoúmerne závislá na ich frekvencii podľa Planck-Einsteinovho vzťahu [15]:

$$E_{\text{fotón}} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}. \quad (1)$$

Po dopade fotónu na látku môže nastať proces uvoľnenia elektrónu z atómového obalu danej látky. Rozlišujeme dva druhy fotoelektrického javu, vonkajší a vnútorný. Vonkajší fotoelektrický jav popisuje dej, pri ktorom sú dopadom elektromagnetického žiarenia na kov elektróny uvoľnené do okolitého prostredia. Tieto elektróny sú následne nazývané fotoelektrónmi. Fotoelektrický jav pozorovaný napríklad u solárnych článkoch sa nazýva vnútorný. Aj počas tohto deja elektrón prijme energiu fotónu a môže byť excitovaný z valenčného pásma atómu, avšak nie do okolitého priestoru, ale ostáva v štruktúre látky [16].



Obrázok 11 Pásová štruktúra a) izolant b) polovodič c) kov

Na obrázku 11 sú znázornené pásové štruktúry jednotlivých typov vodičov. Valenčný pás je u izolantov plne obsadený elektrónmi, a na prekonanie zakázaného pásu je potrebná energia $W_g > 3$ eV (diamant 5,47 eV [17]). I keď môže nastať situácia, počas ktorej bude dopadom fotónu elektrón excitovaný, no vplyvom jeho pomerne vysokej energie sa vo valenčnom páse dostane do vysoko nestabilného stavu, kedy vplyvom silnej elektronegativity izolantov nastane rýchla rekombinácia späť do pásu valenčného. U polovodičov je šírka zakázaného pásu menšia (germánium 0,66 eV, kremík 1,12 eV [18]) a vplyvom dodania energie môže dochádzať k preskokom elektrónov do pásma vodivostného. Valenčný a vodivostný pás sa u kovov prekrýva, čiže dochádza k voľnému pohybu elektrónov v celom objeme látky.

Pri fotoelektrickom jave je energia látke dodávaná dopadom elektromagnetického žiarenia. Časť žiarenia sa pri dopade odrazí, a časť vnikne do materiálu, tento pomer závisí ako od vlnovej dĺžky fotónového toku λ , tak od reflexivity (odrazivosti) povrchu. V priebehu absorpcie klesá tok fotónov so vzdialenosťou od povrchu vzhľadom na absorpciu daného materiálu. Absorpciou fotónu nastane predanie jeho energie štruktúre materiálu. Pokiaľ dochádza k interakcii fotónov s kmitajúcou mriežkou, dôjde k zvýšeniu jej energie, čoho následkom je zvýšenie teploty. Pri interakcii s kovalentnou väzbou môže dôjsť k uvoľneniu elektrónu z valenčného pásu, a to len ak je splnená podmienka minimálnej energie fotónu, ktorá musí byť väčšia ako šírka zakázaného pásu:

$$E_{\text{fotón}} = h \cdot f > W_g. \quad (2)$$

Týmto prejde elektrón do excitovaného stavu a v páse vodivostnom sa podieľa na vedení elektrického prúdu. Ako ukazuje obrázok 11, so vznikom každého excitovaného elektrónu vzniká na jeho pôvodnom mieste prázdne miesto – diera, ktorá sa taktiež podieľa na vedení elektrického prúdu. Ak má fotón energiu vyššiu, ako je energia zakázaného pásu, tak môže dôjsť k čiastočnej absorpcii, počas ktorej je časť energie absorbovaná elektrónom a zvyšok sa rozptýli na kmitajúcej mriežke materiálu. V prípade, že je energia fotónu nedostatočná, tak môže byť zachytený na poruchách mriežky alebo prejde cez polovodič bez akejkoľvek interakcie [19].

Počet viazaných elektrónov vo valenčnom páse polovodiča je rádovo oveľa vyšší, ako ich počet v páse vodivom. Preto pri konštantnej teplote neustále prebieha generácia elektrónov do pásu vodivostného, ozn. G . Zároveň neustále prebiehajú rekombinácie elektrónov v páse vodivostnom so vzniknutými dierami v páse valenčnom, ozn. R . Termodynamická rovnováha nastáva, ak sa počet rekombinovaných nosičov rovná počtu nosičov generovaných [20]. Potom medzi koncentráciou elektrónov a dier platí vzťah:

$$n_i^2 = n_0 \cdot p_0 = B \cdot T^3 \cdot e^{\left(-\frac{W_g}{k \cdot T}\right)}, \quad (3)$$

kde n_i je koncentrácia voľných nosičov v termodynamickej rovnováhe, n_0 koncentrácia voľných elektrónov, p_0 koncentrácia dier, B materiállová konštanta, k Boltzmannova konštanta a T termodynamická teplota v kelvinoch.

Dopadom žiarenia na povrch polovodiča je termodynamická rovnováha porušená. Vplyvom absorpcie fotónov sa vo vodiči zvýši koncentrácia elektrónov a dier z ich pôvodných hodnôt n_0 a p_0 o koncentráciu nerovnovážnych nosičov Δn , a to ako:

$$n = n_0 + \Delta n, \quad (4)$$

$$p = p_0 + \Delta p = p_0 + \Delta n. \quad (5)$$

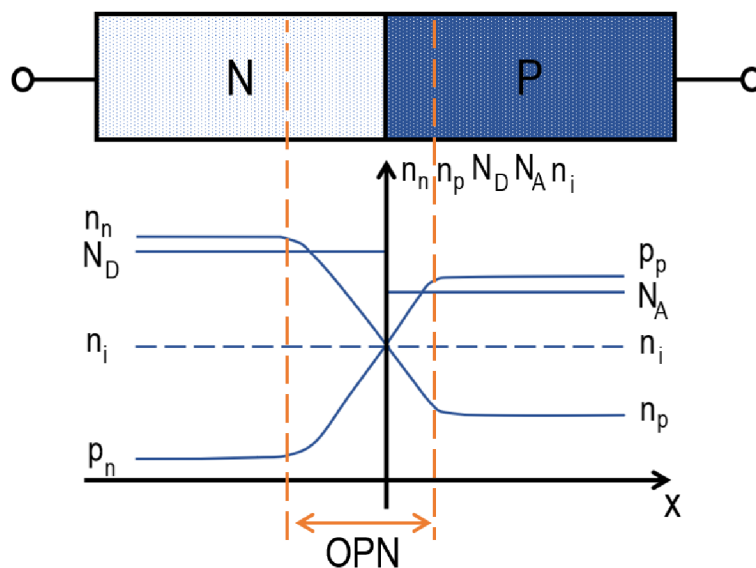
Koncentrácia nerovnovážnych nosičov bude o to vyššia, čím väčšie množstvo fotónov interaguje s polovodičovým materiálom, kvôli čomu neustále dochádza k porúšaniu termodynamickej rovnováhy, ktorú sa materiál snaží udržať. Pravdepodobnosť rekombinácie, R , je potom priamoúmerná koncentrácii voľných elektrónov n , voľných dier p a pravdepodobnosti rekombinácie r ako [21]:

$$R = n \cdot p \cdot r. \quad (6)$$

Existujú 2 hlavné rekombinačné procesy. Prvým je priamy prechod elektrónu z pásu vodivostného do pásu valenčného, v ktorom rekombinuje s dierou. Pravdepodobnosť rekombinácie menšinových nosičov stúpa s rastúcou koncentráciou nosičov väčšinových. Tento proces sa nazýva medzipásmový rekombinačný prechod a vyskytuje sa najmä u polovodičov s priamou pásovou štruktúrou (napr. Bór). Druhým je rekombinácia skrz

rekombinačné centrá, ktoré sa nachádzajú v zakázanom páse polovodičov. Centrá sú tvorené prímiesami alebo poruchami kryštálovej mriežky. V tomto type rekombinácie diera preskočí do rekombinačného centra a vyčká zoskok elektrónu z vodivostného pásu. Dej môže prebehnúť aj v reverznom poradí. Pravdepodobnosť rekombinácie potom stúpa s polohou rekombinačného centra k stredu zakázaného pásu a taktiež s celkovou koncentráciou centier [20].

Vlastný polovodič, napríklad čistý kremík, je prirodzene schopný generovať a rekombinovať nosiče elektrického náboja. Avšak rozdiel v ich koncentrácii sa vždy približuje k nule, a tým pádom vo vlastnom polovodiči nevzniká rozdiel potenciálov. Pre vznik elektrického potenciálu, ktorý sa v prípade solárnych článkov označuje fotovoltické napätie, je nutné vytvoriť nehomogénnu štruktúru, a to napríklad priložením nevlastného polovodiča typu P a N tak, aby na rozhraní vznikol PN prechod (nehomogénnu štruktúru vytvára napríklad aj kontakt polovodič-kov). Štruktúra vlastného polovodiča je homogénna, v prípade kremíku tvorená len jeho vlastnými atómami. Nevlastný polovodič vzniká dopovaním atómov iných prvkov, typicky donormi alebo akceptormi. Ak má kremík 4 valenčné elektróny, tak vzhľadom na neho je donorom fosfor, ktorý má valenčných elektrónov 5 a akceptorom bór s 3 valenčnými elektrónmi [22]. Dopovanie zvyšuje koncentráciu voľných elektrónov alebo dier, a taktiež môže zvýšiť alebo znížiť energiu zakázaného pásu.



Obrázok 12 Jednorozmerný model PN prechodu s približným vyznačením koncentrácie nosičov náboja a OPN

Voľné elektróny z blízkosti PN prechodu difundujú do oblasti typu P, pričom za sebou nechávajú kladný priestorový náboj tvorený teraz už ionizovanými prímiesovými atómami. Rovnaká reakcia sa uskutoční s dierami z oblasti prechodu na strane P, ktoré rekombinujú do oblasti typu N. Po krátkom čase vznikne v okolí PN prechodu oblasť priestorového náboja (ďalej OPN) tvoriaca energetickú bariéru, ktorá zabráni ďalšiemu

prechodu majoritných nosičov. Potom osvietením PN prechodu a jeho prepojením s vonkajším obvodom vzniká fotovoltický článok. Jednorozmerný model PN prechodu s vyznačením väčšinových – n_n , p_p a menšinových nosičov – n_p , p_n je zobrazený na obrázku 12.

Dopadom elektromagnetického žiarenia na polovodič PN sú generované nerovnovážne nosiče difundujúce smerom k prechodu. Nosiče generované mimo OPN musia k prechodu so silným elektrickým polom difundovať. Tieto nosiče tvoria prúdovú hustotu $J_P(\lambda)$ a $J_N(\lambda)$. Ak počas prechodu rekombinujú, tak sa už ďalej nepodieľajú na tvorbe fotovoltického napätia. Prúdová hustota nosičov generovaných v OPN je potom označovaná ako $J_{OPN}(\lambda)$ a výsledná prúdová hustota fotovoltického článku $J_{FV}(\lambda)$ je daná súčtom jednotlivých zložiek. Ak vlnová dĺžka dopadajúceho elektromagnetického žiarenia nesplňuje podmienku monochromatickosti, tak jej výsledná hodnota je upravená integrálom skrz spektrum dopadajúcich vlnových dĺžok ako:

$$J_{FV}(\lambda) = J_{OPN}(\lambda) + J_P(\lambda) + J_N(\lambda), \quad (7)$$

$$J_{FV} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} J_{FV}(\lambda) d\lambda. \quad (8)$$

Hustota stavov vo valenčnom páse polovodiča typu P je označovaná ako N_V , koncentrácia akceptorov ako N_A ($N_A = p_p$). Poloha Fermiho hladiny W_F je potom daná ako [21]:

$$W_{FP} = W_V - kT \cdot \ln\left(\frac{N_A}{N_V}\right), \quad (9)$$

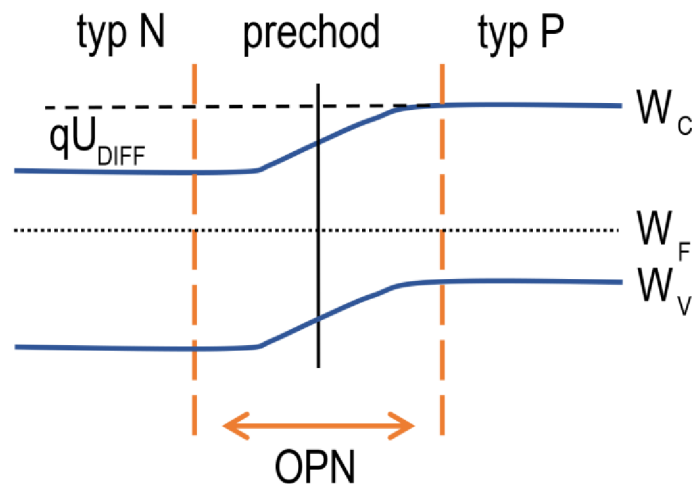
kde W_V značí energiu valenčného pásu. Hustota stavov vo vodivostnom páse polovodiča typu N je označovaná ako N_C , koncentrácia donorov ako N_D ($N_D = n_n$). Poloha Fermiho hladiny je potom daná vzťahom [21]:

$$W_{FN} = W_C + kT \cdot \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right), \quad (10)$$

kde W_C značí energiu vodivostného pásu. Na PN prechode v termodynamickej rovnováhe vzniká jedna spoločná Fermiho hladina W_F ako rozdiel energií $W_{FN} - W_{FP}$, vzhľadom na čo vzniká energetická bariéra, ktorej veľkosť je možné vyjadriť ako difúzny potenciál [20]:

$$U_{Dif} = \frac{W_{FN} - W_{FP}}{q} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right), \quad (11)$$

kde q predstavuje elementárny náboj elektrónu rovný $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.



Obrázok 13 Pásový diagram PN prechodu so zobrazením difúzneho napätia

V mieste kontaktu polovodičového prechodu dochádza vplyvom gradientu koncentrácie nosičov k difúzii majoritných elektrónov z oblasti typu N do oblasti typu P. Vplyvom vnútorného elektrického poľa zároveň dochádza k driftu minoritných elektrónov z oblasti P do oblasti typu N. V prípade termodynamickej rovnováhy je výsledný prúd nulový. Po priložení vonkajšieho napätia sa termodynamická rovnováha poruší a vzhľadom na priloženú polaritu sa potenciálová bariéra buď zvýši alebo zníži. Ak je kladný pól napätia priložený na typ P, tak sa výška bariéry zníži a difúzny prúd elektrónov z N do P prevyšuje prúd driftový. Zároveň dochádza aj k vychýleniu jednotného pomeru majoritných a minoritných dier, kedy difúzny prúd majoritných dier z oblasti P do N prevyšuje prúd driftový. Výsledný prúd elektrónov je možné popísať podľa vzťahu:

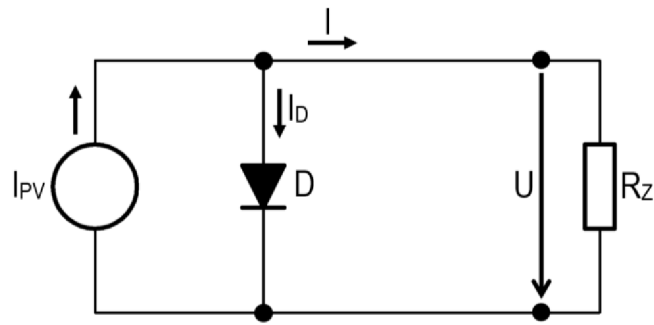
$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (12)$$

kde I_0 je saturačný prúd PN prechodu a U priložené napätie na PN prechode.

3.1.2 Ekvivalentný obvod

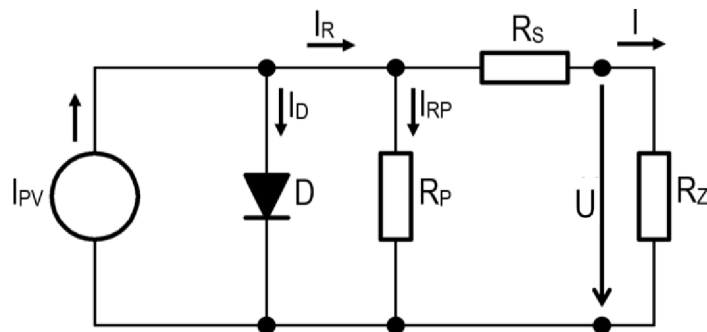
Pre bližšie skúmanie správania solárneho článku, primárne jednotlivých zložiek jeho elektrických parametrov, je možné využiť niektorý z modelov náhradných obvodov. Keďže je solárny článok tvorený PN prechodom, tak by ho v ideálnom prípade bolo možné interpretovať ako paralelné zapojenie prúdového zdroja a diódy v priepustnom smere. V tomto zapojení prúdový zdroj substituuje prúd generovaný elektromagnetickým žiarením dopadajúcim na článok a dióda PN prechod so špecifickou VA charakteristikou. Ako je možné vidieť na obrázku 14, k zapojeniu je paralelne pripojený rezistor R_Z predstavujúci externú záťaž. Ak na výstupných svorkách nie je pripojená externá záťaž, tak napätie na výstupe bude maximálne možné = napätie na prázdno. Po zapojení záťaže bude rezistorom prechádzať zaťažovací prúd, ktorého veľkosť bude determinovaná ako

intenzitou osvetlenia článku, tak veľkosťou samotnej záťaže. Výstupný výkon článku bude potom závisieť od hodnoty výstupného napätia a zaťažovacieho prúdu.



Obrázok 14 Náhradný obvod ideálneho solárneho článku

Presnejšiu aproximáciu solárneho článku je možné dosiahnuť pridaním ďalších prvkov obvodu. Ako bolo ukázané na obrázku 12, prúd generovaný v OPN PN prechodu prechádza na výstupné kontakty skrz materiály jednotlivých zberníc. Medzi používané materiály patrí striebro, meď alebo rôzne zliatiny kovov, ktoré v žiadnom prípade nemajú nulovú rezistivitu. Pridaním sériového odporu R_S potom môžeme simulovať vnútorný odpor článku. Druhým prvkom je skratový odpor R_P pripojený paralelne k dióde, ktorý reprezentuje jej straty [23]. Modifikácia ideálneho solárneho článku je schematicky zobrazená na obrázku 15.



Obrázok 15 Náhradný obvod reálneho solárneho článku

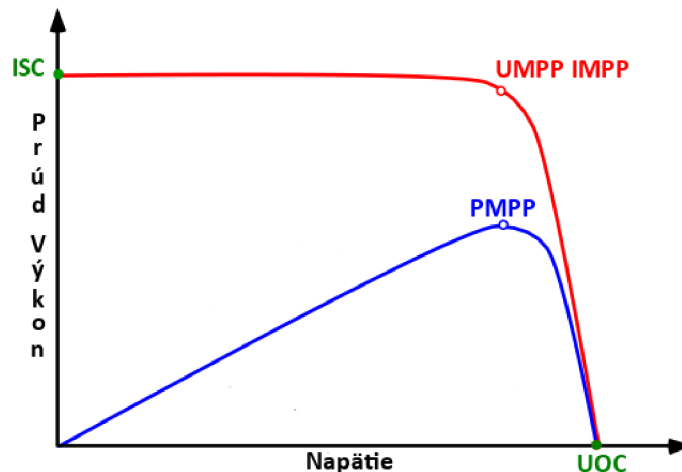
3.1.3 Parametre solárnych článkov

Vlastnosti solárneho článku determinujú základné vlastnosti solárneho panelu. Vzhľadom na požadovanú veľkosť solárneho panelu môže počet článkov dosahovať rôznych hodnôt, typicky 36 až 72. Veľkosť solárneho panelu avšak nie je kľúčovým faktorom pri výbere konkrétneho typu, kde okrem technológie výroby je potrebné zohľadniť aj technologické parametre tak, aby boli vyhovujúce v koncovej aplikácii. Medzi dôležité technologické parametre solárnych článkov sa radí:

- Menovitý výkon – vyjadruje sa vo wattoch, pričom sa typicky udáva hodnota P_{MPP} (Power at Maximum Power Point). Tento parameter udáva množstvo elektrickej

energie, ktorú je solárny článok (v prípade solárneho panelu sumarizácia výkonu všetkých článkov) schopný vyrobiť pri maximálnej intenzite slnečného žiarenia.

- Menovité napätie – je napätie menovitého výkonu solárneho článku vo voltoch. Označuje sa ako U_{MPP} .
- Menovitý prúd – je elektrický prúd pri menovitom výkone solárneho článku v ampéroch alebo miliampéroch. Označuje sa ako I_{MPP} .
- Volt ampérová charakteristika – neoznačuje jednu hodnotu, ale grafickú závislosť generovaného prúdu na napätí článku. Zvyčajne obsahuje aj krivku výkonu v závislosti na napätí tak, ako to zobrazuje obrázok 16. Pokiaľ článok nie je zaťažný externým spotrebičom, je na jeho kontaktoch merané napätia na prázdno U_{OC} . Pri skrate výstupných svoriek je meraný prúd na krátko I_{SC} . Medzi týmito maximálnymi hodnotami sa nachádza bod maximálneho výkonu P_{MPP} .



Obrázok 16 Volt ampérová charakteristika solárneho článku s pridaním výkonovej charakteristiky [24]

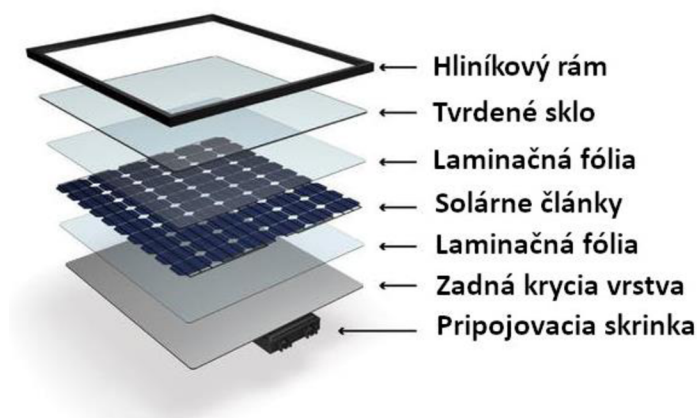
- Napätie naprázdno – predstavuje napätie na svorkách bez pripojenej záťaži, označuje sa ako U_{OC} a typicky dosahuje hodnoty okolo 0,6 V na článok.
- Prúd na krátko – je hodnota prúdu pri skratovaní výstupných svoriek solárneho článku, označujeme ho ako I_{SC} . Pri uvážení článku s malým sériovým odporom je jeho hodnota priamoúmerná intenzite ožiarenia, čiže prúdu generovaného PN prechodom.
- Činiteľ plnenia – označovaný ako FF (Fill Factor) udáva pomer medzi maximálnym skutočným a maximálnym teoretickým výkonom článku. Maximálny teoretický výkon je daný súčinom U_{OC} a I_{SC} . Maximálny skutočný výkon je obmedzený vlastnosťami a kvalitou PN prechodu, pričom typicky dosahuje 80 % teoretického výkonu.
- Účinnosť – vyjadruje pomer medzi výstupným výkonom fotovoltického článku a intenzitou dopadajúceho žiarenia. Udáva sa v percentách a typicky dosahuje hodnoty okolo 20 %.

- Teplotný koeficient výkonu – predstavuje zmenu výkonu solárneho článku pri zmene okolitej teploty. Udáva sa v percentuálnom poklese výkonu na jeden stupeň Celzia. V zimnom období, kedy okolitá teplota dosahuje nižších hodnôt, výkon solárnych článok stúpa, a to najmä z dôvodu nižšieho odporu PN prechodu. V letných mesiacoch nastáva opačná situácia a vnútorný odpor dosahuje hodnôt vyšších, čoho následkom je zníženie výstupného výkonu.

3.1.4 Solárny panel

Solárny panel je tvorený súborom sériovo prepojených solárnych článok, ktoré sú pred vonkajšími vplyvmi chránené viacerými vrstvami ochranných materiálov. Životnosť solárnych panelov je ovplyvnená najmä postupnou degradáciou týchto komponentov. Dĺžka záruky, teda predpokladaná dĺžka nezávadného života výrobku, sa vzhľadom na výrobcu pohybuje v rozmedzí 10 až 30 rokov. Neodvratným faktom je, že efektívnosť solárnych panelov každým rokom klesá o približne 0,5 % až 1 %. Z toho vyplýva, že pri výbere správnych materiálov jednotlivých komponentov môže solárny panel po 30-tich rokoch života dosahovať účinnosť 70 %. Medzi hlavné ochranné komponenty sa radí:

- Hliníkový rám – zvyšuje štrukturálnu pevnosť panelu, ako aj jeho odolnosť voči klimatickým vplyvom a vplyvom manipulačným počas montáže.
- Tvrdené sklo – chráni solárne články pred mechanickým poškodením, napríklad vplyvom dopadu krúpov alebo iných pevných objektov.
- Laminačná fólia – zabraňuje vniknutiu vlhkosti do vnútorných priestorov panelu. Taktiež tvorí prechodnú vrstvu medzi tvrdeným sklom a súborom článkov.
- Zadná krycia vrstva – spolu s hliníkovým rámom tvorí základ štrukturálnej pevnosti panelu, pričom slúži aj ako vrstva na odvod tepla zo solárnych článok.



Obrázok 17 Štruktúra solárneho panelu [25]

3.1.1 Typy solárnych panelov

Na trhu existujú viaceré druhy solárnych panelov. Podľa technológie výroby ich delíme na kryštalické a tenkovrstevné. Kryštalické panely sú vyrobené z kryštalického

kremíku a rozdeľujú sa na panely monokryštalické a polykryštalické. Tenkovrstevné panely sú vyrábané technológiou nanášania tenkej vrstvy amorfného kremíku. Taktiež existujú peroskitové panely, ktorých hlavným negatívom je obsah olova. Vzhľadom na aktuálnu dostupnosť solárnych panelov na trhu, ekonomickú efektivitu projektu a výpočet energetickej náročnosti budú v ďalších úvahách rozoberané len panely polykryštalické a monokryštalické.

Monokryštalické panely sa skladajú zo série monokryštalických článkov kremíku vyrobených Czochralského metódou. Výroba začína u kremičitého piesku (SiO_2), ktorý sa vytriedi v termickej reakcii s uhlíkom (2C) a vznikne čistý kremík (Si) a oxid uhľnatý (2CO). Tento kremík je očistený na úroveň metalurgickej čistoty. Následne je splyný s trichlórsilanom, čím sa odstráni veľká časť ostávajúcich nečistôt. Po opätovnom skondenzovaní vznikne polykryštalický kremík. Monokryštalita sa dosahuje roztavením polykryštalického kremíku a následným vyťahovaním taveniny s pomocou zárodka kremíku monokryštalického. Postupným vyťahovaním vzniká kremíkový ingot. Po jeho očistení a narezaní vzniknú tzv. wafer, pláty ingotu. Očistením, testovaním, narezaním a dotovaním waferu (vytvorením PN prechodu) vznikajú monokryštalické solárne články čiernej farby. Kryštalografickú orientáciu monokryštalického kremíku tvoria usporiadané atómy v kryštalovej mriežke, vďaka čomu ich účinnosť dosahuje približne 20 % [26].

Výroba polykryštalických článkov je rovnaká, avšak len do bodu splnenia čistého kremíku s trichlórsilanom. Následne nie je polykryštalický kremík roztavený v tavnej peci pre vyťahovanie monokryštalického ingotu, ale naliaty do formy. Vo forme sa nechá vychladnúť a stuhnúť. Po stuhnutí je očistený a rozrezaný na wafer v tvare štvorcov. Wafer sú ešte raz očistené, a po dotovaní a umiestení elektród vzniká polykryštalický článok. Hlavnou výhodou panelov z polykryštalického kremíku je nižšia cena a životnosť rovnajúca sa kremíku monokryštalickému. Nevýhodou je nižšia účinnosť, približne na úrovni 15 % [26], ktorá je zapríčinená náhodnou orientáciou kryštalografickej štruktúry.

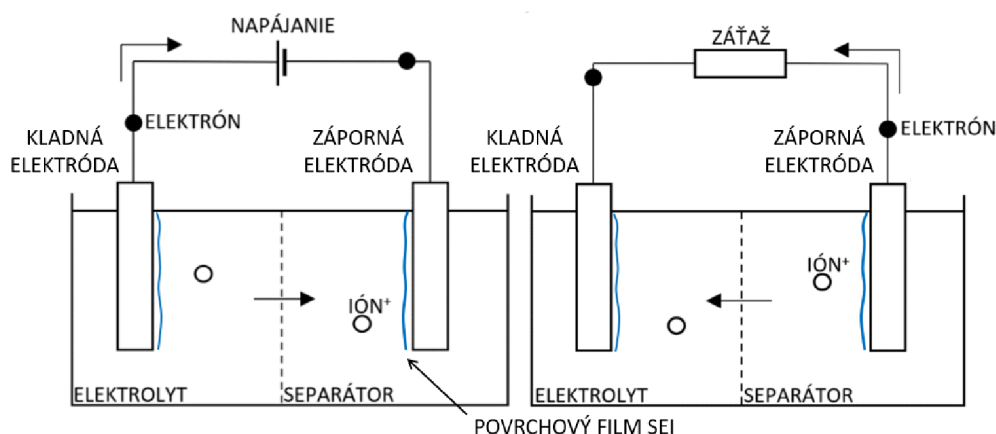
3.2 Elektrochemický akumulátor

Elektrochemický akumulátor je komponent, ktorého hlavným účelom je ukladanie elektrickej energie, napríklad zo solárnych panelov, pre jej neskoršie využítie podľa potreby. Na súčasnom trhu je možné nájsť veľké množstvo typov akumulátorov, ktoré sa od seba líšia ako chemickým zložením, tak aj nominálnym napätím či hustotou uložennej energie. Predsa jeden typ akumuláčnym článkov trhu dominuje a jeho percentuálne zastúpenie sa neustále zvyšuje. Jedná sa o lítium-iónové články. Medzi dôvody ich obľuby a stále rozširujúceho sa výskumu patrí vysoká energetická hustota, praktická bezúdržbovosť, nízka miera samo-vybijania, ako aj klesajúca tržná cena [27].

3.2.1 Princíp funkcie Li-ion článku

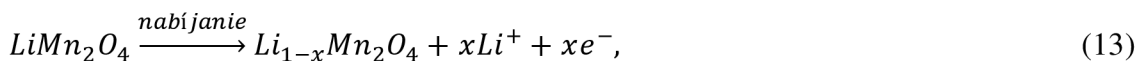
Podľa koncepcie aplikácie sú Li-ion akumulátory zložené z jedného alebo viacerých

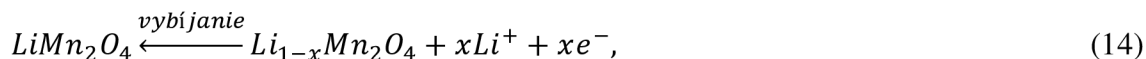
článkov, každý článok obsahuje kladnú elektródu (napríklad oxid kovu a lítia), zápornú elektródu (napríklad grafit) a separátor (polyetylén a polypropylén) napustený kvapalným elektrolytom. Elektrolyt je tvorený zo solí lítia rozpustených v polárnych rozpúšťadlách. Separátor je tvorený mikroskopickými dierami, ktoré zabraňujú priamemu kontaktu kladnej a zápornej elektródy, alebo inak katódy a anódy, a taktiež bráni prechodu elektrónov vnútorným priestorom článku.



Obrázok 18 Princíp funkcie lítium-iónového článku

Princíp fungovania Li-ion akumulátorov je zobrazený na obrázku 18. Popísať ho je možné interkalačným procesom, počas ktorého sa lítiové ióny z elektrolytu včleňujú a extrahujú zo štruktúry kladnej elektródy do štruktúry elektródy zápornej bez teoretickej potreby materiálu. Zanedbaním externých vplyvov, ako napríklad teploty alebo prúdového zaťaženia, je hlavným faktorom ovplyvňujúcim celkovú životnosť článku postupná únava materiálu kladnej elektródy. V ktorej dochádza počas procesu cyklovania k objemovým zmenám, čoho následkom je postupné zníženie pružnosti a strata kapacity. Presun kladných iónov je určený zmenou elektrického náboja v článku, kedy v procese vybíjania je medzi elektródami zapojená záťaž a elektróny prechádzajú vonkajším obvodom zo zápornej elektródy na kladnú. Tým pádom na zápornej elektróde prebieha oxidácia – valenčné elektróny sa uvoľňujú a na kladnej elektróde redukcia – elektróny sa prijímajú. Vplyvom presunu elektrónov sa kladné ióny taktiež premiestňujú na kladnú elektródu, avšak vnútorným priestorom. V prípade nabíjania článku sa tieto reakcie opačne a kladné ióny prechádzajú z kladnej elektródy na zápornú. Nabíjanie a vybíjanie článku je možné zjednodušené popísať aj chemickými reakciami na kladnej a zápornej elektróde. Ako kladná elektróda bol určený lítium mangán oxid, z ktorého sa počas nabíjania uvoľňuje x kladných iónov lítia a elektrónov. Zápornou elektródou je grafit, ktorý počas nabíjania začleňuje do svojej štruktúry x kladných iónov lítia a elektrónov. Kladná elektróda:





Záporná elektróda:



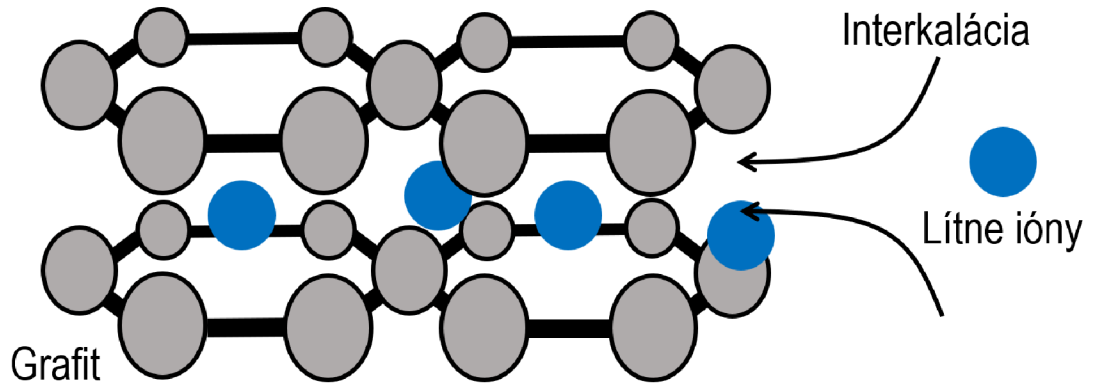
I keď je prenos iónov elektrolytom označovaný ako bezstratový proces, tak pri prvých elektrochemických reakciách iónov so zápornou elektródou sa na rozhraní elektrolyt-elektroda vytvorí pasivačná SEI vrstva (Solid Electrolyte Interface). Lítium vytvárajúca SEI vrstvu už potom nie je elektrochemicky aktívne, kvôli čomu dochádza k nevratnému zníženiu kapacity. Význam SEI vrstvy spočíva v ochrane elektródy pred ďalšou reakciou s elektrolytom, vďaka čomu je zvýšená stabilita lítium-iónového systému. Pri zvýšenej teplote článku sa SEI vrstva rozkladá, čo je sprevádzané exotermickou reakciou. V prípade úspešného ochladenia je potom batéria zachránená a jediným negatívnym následkom bude zníženie kapacity v dôsledku opätovného vytvorenia SEI vrstvy. Pokiaľ však nedôjde k schladeniu článku, tak pri teplote približne 120 °C nastáva reťazová reakcia zvaná thermal runaway, ktorá začína rozpadom SEI vrstvy, čím sa odhalí reaktívne rozhranie medzi elektrolytom a elektródou. Ak teplota nie je znížená, tak pri dosiahnutí 150 °C sa separátor rozloží, čoho následkom je priamy kontakt medzi jednotlivými elektródami. Ďalším stúpaním teploty pribúdajú exotermické reakcie, ktorých následkom je požiar a možný výbuch článku, kedy teplota presiahne 600 °C [28].

3.2.2 Materiály elektród

Materiály elektród svojimi vlastnosťami ovplyvňujú správanie celého článku. V ideálnom prípade by sme chceli dosiahnuť čo najvyššiu kapacitu a napätie, pri čo najnižšej cene a ekologickej záťaži. Avšak reálnu kapacitu článku určuje materiál s najnižšou mernou kapacitou, vysoký potenciálový rozdiel môže spôsobiť celkovú nestabilitu a pre priblíženie sa ideálnym vlastnostiam musia byť použité dráhy a vzácne kovy, ako aj kovy toxické alebo nejakým spôsobom neeticky ťažené. Použité materiály článkov potom určujú vyváženosť alebo nevyváženosť jednotlivých parametrov tak, aby boli dosiahnuté vlastnosti pre cieľovú skupinu využitia.

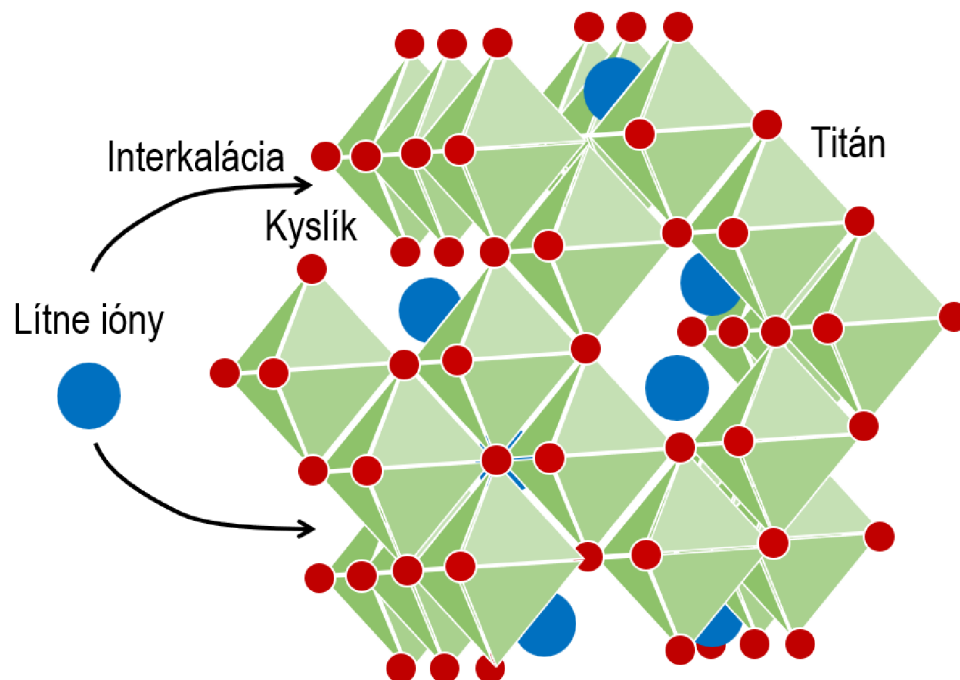
Záporné elektródy Li-ion článkov, ktoré počas vybijania oxidujú (anóda) a nabíjania redukujú svoje oxidačné číslo (katóda), pracujú na princípe už spomínanej interkalácie – interkalačné elektródy. Najpoužívanejšou zápornou elektródou je syntetický alebo prírodný grafit (LiC_6). Medzi dôvody jeho používania patrí nízky potenciál voči lítiu (0,1 V), vysoká hustota energie (372 mAh/g) a stabilita v širokom rozsahu teplôt a napätí. Zásadná je aj nízka cena. Grafit sa skladá z rovinných hexagonálnych vrstiev uhlíkových atómov, ktoré vytvárajú vrstvenú štruktúru. V priebehu interkalácie sa ióny lítia postupne

umiestňujú do stredov paralelných šesťuholníkových vrstiev, kde na ne nepôsobia Van der Waalsove sily [29]. Grafické zobrazenie interkalácie do grafitu je možné vidieť na obrázku 19.



Obrázok 19 Vizualizácia interkalácie iónov lítia do vrstvenej štruktúry grafitu

Druhým často využívaným materiálom pre záporné elektródy je lítium titán oxid ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO). Jedná sa o keramický materiál, ktorého hlavnou výhodou je štruktúralna a teplotná stabilita pri cyklovaní, aj pri vysokých záťažoch. Nevýhodou môže byť vyššie napätie voči lítiu (1,55 V), ako aj vyššia cena či nižšia energetická hustota (175 mAh/g). Rozdiel v jednotlivých vlastnostiach je zapríčinený ako iným prvkovým zložením, tak rozličnou kryštalografickou orientáciou. Na rozdiel od grafitu má lítium titán oxid spinelovú štruktúru. Spinelová štruktúra je tvorená kryštálmi v kubickej sústave tvorenej pravidelnými osemstenmi [30] tak, ako zobrazuje obrázok 20.



Obrázok 20 Vizualizácia interkalácie iónov lítia do spinelovej štruktúry LTO

Kladná elektróda počas vybijania zvyšuje svoje oxidačné číslo, čiže prijíma elektróny a dochádza v k redukcii. V priebehu nabíjania oxiduje, čiže uvoľňuje elektróny. Medzi komerčne používané kladné elektródy sa radí lítium kobalt oxid (LiCoO_2), lítium mangán oxid (LiMn_2O_4), lítium železo fosfát (LiFePO_4) a lítium nikel oxid (LiNiO_2). U týchto materiálov je včleňovanie iónov do štruktúry opäť možné popísať interkalačným procesom. Komerčne je potom možné vyrobiť rôzne druhy kladných elektród podľa potreby koncovej aplikácie, ktoré sa zvyčajne líšia pomerom niklu, mangánu a kobaltu. Porovnanie niektorých parametrov je uvedené v tabuľke 4.

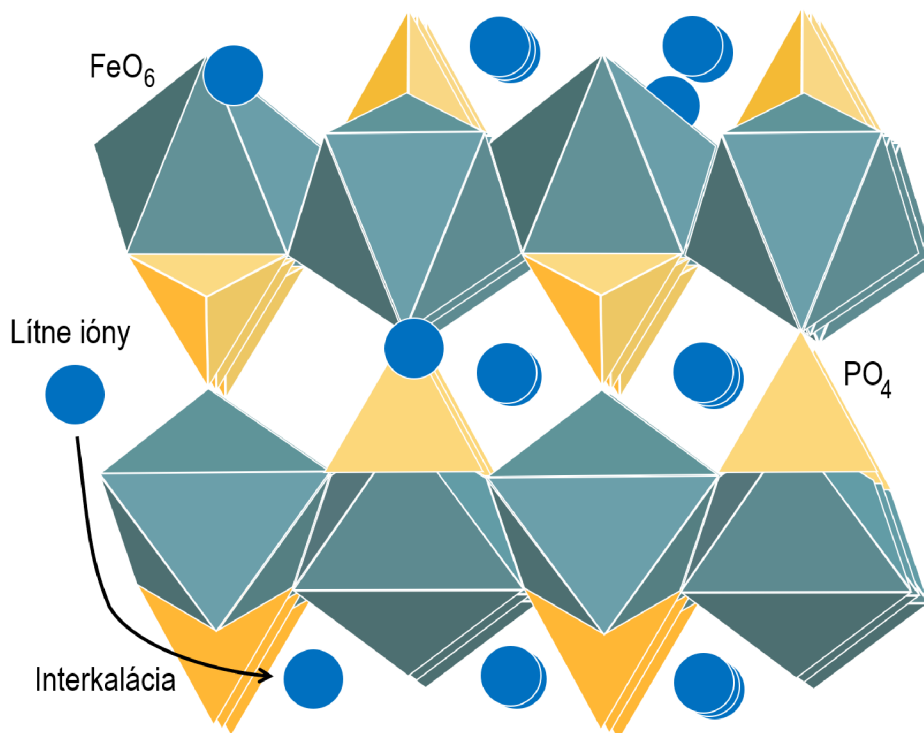
Tabuľka 1 Porovnanie parametrov elektród Li-ion článkov

| Materiál katódy | Energetická hustota [Wh/kg] | Kapacita [mAh/g] | Priemerné napätie [V] |
|---------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------|
| LiCoO_2 | 260 | 274 | 3,88 |
| LiMn_2O_4 | 140 | 148 | 4 |
| LiFePO_4 | 160 | 170 | 3,4 |
| LiNiO_2 | 210 | 275 | 3,8 |

Lítium kobalt oxid tvorí vrstvenú štruktúru, pričom dosahuje teoretickú kapacitu až 274 mAhg^{-1} , reálnu približne 140 mAhg^{-1} . Rozdiel medzi teoretickou a reálnou kapacitou je odôvodniteľný stratami energie vplyvom strát ohmických či vplyvom strát prekonávania energetických bariér v článku. Medzi výhody patrí vysoké priemerné napätie spoločne s energetickou hustotou. Primárnou nevýhodou je teplotná nestabilita, a to najmä pri zvýšenej teplote [31]. Súčasná ťažba kobaltu, ako vzácneho prvku, sa navyše spája s environmentálnymi problémami, ako aj s porušovaním ľudských práv.

Lítium mangán oxid interkaluje ióny lítia do spinelovej štruktúry. Dosahuje vyššie priemerné napätie ako LiCoO_2 , vyššiu teplotnú stabilitu a dlhšiu životnosť. Medzi jeho nevýhody sa radí nižšia hustota energie na jednotku objemu. LiMn_2O_4 je vyrobený z bežne dostupných kovov, čo uľahčuje jeho recykláciu [32]. Využitie môže nachádzať v rôznych aplikáciách, v ktorých je dôležitá bezpečnosť a životnosť akumulátora ako napríklad automobilový alebo zdravotnícky priemysel.

Lítium železo fosfát tvorí olivínovú štruktúru, vďaka ktorej disponuje vysokou stabilitou a odolnosťou voči teplu. V olivínovej štruktúre LiFePO_4 tvorí tesne uzavreté šesťuholníkové kyslíkové pole FeO_6 , ktoré zdieľa okraje aj plochy oktaedrov PO_4 [33]. Grafické zobrazenie usporiadania je možné nájsť na obrázku 21. Medzi jeho ďalšie vlastnosti patrí nízka pravdepodobnosť rozkladu pri vysokých teplotách a spoločne s nízkou cenou predstavuje vhodnú zlúčeninu napríklad pre ukladanie energie z fotovoltaických elektrární v domácnostiach, v ktorých nie je potreba šetriť miestom. Medzi ďalšie výhody sa radí stabilná vybijacia charakteristika. Negatívum spočíva v nízkom nominálnom napätí.



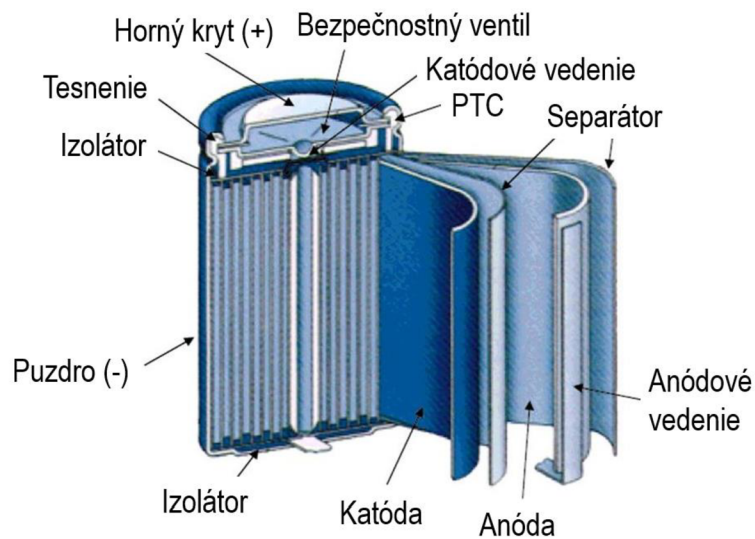
Obrázok 21 Vizualizácia interkalácie iónov lítia do olivínovej štruktúry LiFePO_4

Lítium-nikel oxid má vysokú energetickú hustotu, ktorá je opäť spojená s vrstvenou štruktúrou [34]. Priemerné napätie je podobné s LiCoO_2 , avšak LiNiO_2 sprevádza rýchly pokles kapacity, nestabilita a taktiež zložitá syntéza, ktorá navyšuje jeho cenu.

3.2.3 Druhy konštrukcií

Lítium-iónové akumulátory sa vyrábajú v troch základných prevedeniach, a to v cylindrickom, prismaticom a v tzv. pouch konštrukcii. Pouch konštrukcia sa skladá z viacerých článkov v sendvičovej štruktúre, ktorá je obalená do ochrannej vrstvy tvorenej laminovaným nylónom, hliníkom a polypropylénom [35]. Vďaka ľahkej konštrukcii je dosiahnutá nízka váha a vysoká efektívnosť využitia priestoru, čo je spoločne s možnosťou umiestnenia viacerých článkov do jedného puzdra jej najväčšia výhoda. Nevýhoda spočíva v chýbajúcom pevnom obale a v objemových zmenách v priebehu používania. Uvážením aj ďalších vplyvov okrem problematického upevnenia, ako je napríklad teplota v skleníku nie je táto konštrukcia vhodná pre finálnu aplikáciu v zariadení solárneho zavlažovania. Prismatická konštrukcia je vonkajším tvarom podobná pouch konštrukcii, vnútorným usporiadaním zas cylindrickému článku. Rozdiel s pouch batériou spočíva v materiáli obalu, ktorý je z pravidla pevnejší, a vo väčšine prípadov z hliníku [36]. Negatívom je opäť postupné nafukovanie a možný problém uchytania batérie v zariadení aj cez efektívne využitie priestoru. Tento typ konštrukcie je využívaný napríklad v mobilných telefónoch a spája sa s ním horšia regulácia teploty, ako aj kratšia životnosť. V zariadení, v ktorom nehrá hlavnú úlohu minimalizácia objemu, ako je napríklad zariadenie solárneho zavlažovania, dáva najväčší zmysel

využitie článkov s cylindrickou konštrukciou. Tieto články sú na trhu najdostupnejšie a zväčša aj ekonomicky najvýhodnejšie. Sú jednoduché na výrobu, majú dlhú životnosť a dobrú mechanickú stabilitu tvorenú obalom z poniklovanej oceli. Vnútro tvoria pásy anódy, separátoru a katódy stočených do rolky, pričom kladný kontakt je vyvedený k vrchnému viečku a záporný k opačnému koncu článku tak, ako to zobrazuje obrázok 22. Cylindrické články navyše obsahujú niekoľko ochranných prvkov, ako sú napríklad bezpečnostné prieduchy na kladnom póle článku, membránové tesnenie alebo PTC termistor, ktorý pri nadmernej teplote, zväčša vyvolanej nezodpovedajúcim prúdovým zaťažením, odpojí prívod prúdu a počká, kým sa teplota opäť neznižuje [37].



Obrázok 22 Štruktúra cylindrického Li-ion článku [38]

4. ZÁKLADY SYSTÉMU SOLÁRNEHO ZAVLAŽOVANIA

Táto kapitola popisuje koncept zariadenia tak, ako bol odsúhlasený s organizáciou LUSK. Nachádza sa v nej jeho rozdelenie v blokovej schéme a výpočet energetickej náročnosti pre výber solárneho panelu a akumulátoru.

Automatizovaný systém solárneho zavlažovania by mal byť schopný neustále poskytovať možnosť zapnutia zavlažovania za účelom dosiahnutia definovaných hodnôt vlhkosti a teploty a tieto dáta zamestnancom zobrazovať. Dôležitá bude aj možnosť implementácie umelého osvetlenia pre predĺženie aktívneho času fotosyntézy rastlín v dosahu elektromagnetického žiarenia. Využívanie solárnych panelov, ako zdroja elektrickej energie bude musieť byť navrhnuté tak, aby aj v noci alebo za oblačného počasia boli akumulátory schopné pokryť výpadok napájania. Na rozdiel od solárneho zavlažovania vonkajších priestorov, kedy napríklad vplyvom prudkého dažďu nastane výpadok napájania pri výpadku napájania v skleníku bude jedinou možnosťou návrat k manuálnemu zavlažovaniu kŕhlou bez možnosti kontroly jednotlivých parametrov.

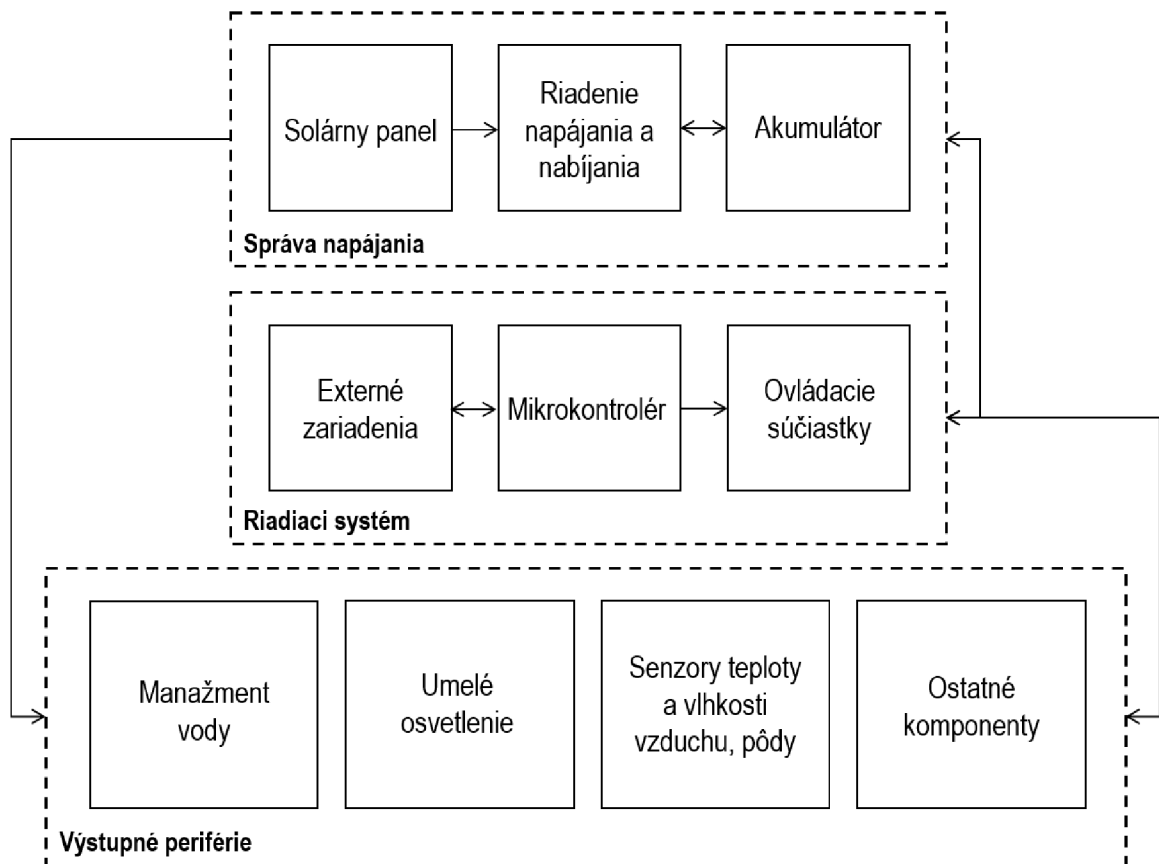
4.1 Rozbor blokovej schémy

Blokové schéma, ako funkčný diagram elektrotechnického zariadenia, bude pozostávať z troch základných blokov, ktorými sú správa napájania, riadiaci systém a výstupné periférie.

Správa napájania spracováva a manažuje elektrickú energiu vygenerovanú zo solárneho panelu, ktorú rozdeľuje medzi nabíjanie akumulátoru a napájanie zvyšku zariadenia. Jedným z komponentov bloku riadenia napájania a nabíjania je pasívny balancér akumuláčnych článkov, ktorý sníma napätie jednotlivých článkov v sériovom zapojení, kedy pri detekcii článku s vyšším napätím prebytočnú energiu presúva do záťaže, kde sa premieňa na teplo až do doby vyrovnania napätia s ostatnými článkami. Druhým komponentom je MPPT regulátor, ktorý sleduje bod maximálneho výkonu solárneho panelu, čím zabezpečuje maximálne využitie potenciálu solárnej energie. Medzi ďalšie prvky sa môžu radiť komponenty ako step-down konvertory zabezpečujúce vytvorenie jednotlivých pracovných úrovní napätia.

Primárnym komponentom riadiaceho systému je mikrokontrolér, ktorý sleduje a riadi všetky procesy v solárnom zavlažovacom systéme. Pri voľbe mikrokontroléru bude potrebné zvoliť typ umožňujúci aj bezdrôtový spôsob komunikácie, ktorá v budúcnosti môže byť využívaná pre posielanie a získavanie dát z externých zariadení. Následne sem patria ovládacie súčiastky, pomocou ktorých mikrokontrolér zapína a vypína komponenty z výstupných periférií. Môžu sa sem radiť napríklad tranzistory. Poslednou časťou riadiaceho systému sú komunikačné prevodníky zabezpečujúce správne úrovne napätia pre komunikácie mikrokontroléru s výstupnými perifériami.

Medzi výstupné periférie sa riadia všetky súčiastky a komponenty prevádzajúce alebo sa podieľajúce na vykonávaní funkcií potrebných pre činnosť solárneho zavlažovania. Súbor blokov pozostáva z manažmentu vody, do ktorého sa radí elektromagnetický ventil a prietokomer. Ďalej umelé osvetlenie a taktiež senzory teploty a vlhkosti. Ostatné komponenty zahrňujú napríklad signalizačné LED diódy na hlásenie chyby systému alebo stavu batérie či tlačidlo na zapnutie/vypnutie zariadenia.



Obrázok 23 Blokové schéma solárneho zavlažovacieho systému

V obrázku 23 sú taktiež naznačené smery komunikácie a prechodu energie medzi aj v jednotlivých blokoch. Správa napájania napája celý systém, zatiaľ čo v jej vnútri sa energia prelieva cez blok napájania, riadenia a nabíjania. Riadiaci systém kontroluje stav napätia akumulátora a ovláda výstupné periférie. Z vnútorného hľadiska celý riadiaci systém ovláda mikrokontrolér podľa vlastného programu. Kedy na základe vstupného nastavenia od používateľa kontroluje potrebné parametre a po inicializácii zavlažovania, napríklad stlačením externého tlačidla, spustí ventil. Výstupné periférie potom posielajú riadiacemu systému dáta o prietoku a jeho periodickým kontrolovaním je potom táto činnosť zabezpečená a plne kontrolovaná.

4.2 Výpočet energetickej náročnosti

System solárneho zavlažovania s implementáciou dodatočných technológií, ako je napríklad umelé osvetlenie bude na svoju plynulú prevádzku vyžadovať určité množstvo elektrickej energie. Kvantifikovaním spotreby pre napájanie všetkých zmýšľaných elektrických komponentov pri štandardnej prevádzke zariadenia bude možné určiť a vybrať konkrétne druhy solárnych panelov a akumuláčnych článkov tak, aby bola dodržaná energetická a ekonomická efektívnosť celého systému. Výpočet celkovej spotreby sa bude odrážať od troch hlavných častí projektu. Prvým bude spotreba radiaceho systému, čiže spotreba mikrokontroléru a ostatných ovládacích súčiastok na doske plošných spojov. Druhým, a taktiež energeticky najnáročnejším prvkom bude umelé osvetlenie a poslednou časťou manažment vody, pričom oba prvky spadajú do bloku výstupných periférií.

4.2.1 Riadiaci systém

Jadrom každého radiaceho systému, ktorý ovláda, monitoruje a spracúva dáta v elektronických zariadeniach je mikrokontrolér. Energetická náročnosť mikrokontrolérov, napríklad od všeobecne známych spoločností ako STMicroelectronics alebo Espressif Systems, je kľúčovým hľadiskom pri návrhu vstavaných systémov pre IoT aplikácie. Tieto mikrokontroléry sú zvyčajne navrhnuté s ohľadom na nízku spotrebu energie, čo je dosiahnuté optimalizáciou architektúry, periférnych funkcií a taktiež rôznych energetických režimov, ako je napríklad režim spánku. Režim spánku predstavuje naprogramovaný stav, v ktorom je mikrokontrolér nečinný a na základe zvoleného módu spánku je buď len z časti aktívny alebo úplne vypnutý a jeho energetická náročnosť klesá na zanedbateľné minimum.

Pre výber mikrokontroléru, ktorý disponuje všetkými potrebnými funkciami, a taktiež má čo najnižšiu spotrebu elektrickej energie budú porovnané 4 často používané mikrokontroléry pre IoT aplikácie s následným výberom najvhodnejšej varianty.

Ako je možné vidieť v tabuľke 2, mikrokontrolér NRF52840 neobsahuje Wi-Fi rozhranie [39], a preto bude v nasledujúcich úvahách vynechaný. Nasledujúce 3 mikrokontroléry majú dostatočne výkonné procesory, ako aj veľkosti flash a RAM pamäte pre konečnú aplikáciu. Rozhrania, či už bezdrôtové alebo fyzické sú prakticky bez rozdielu. Prvým kritickým bodom je povolený teplotný rozsah, ktorý je u Raspberry Pi Pico W o 20 °C nižší, než u zvyšných dvoch komponentov. Rozmerovo najkompatibilnejší je mikroprocesor ESP32-C3-MINI-1-H4 [40]. Druhým kritickým bodom je spotreba elektrickej energie v rôznych režimoch zariadenia. Prvým parametrov je režim spánku, v tabuľke sú zobrazené hodnoty pre light sleep režim s pripojením na Wi-Fi, v ktorom nadobúda najnižšie hodnoty mikrokontrolér STM32WB55CEU6 [41]. Raspberry Pi Pico W má napájacie napätie 5 V [42] a aj z toho dôvodu, i keď sa jedná skôr o vývojovú dosku, dosahuje porovnateľné hodnoty so zvyšnými mikrokontrolermi.

Mikrokontrolér ESP32-C3-MINI-1-H4 má najvyššie čísla prúdu v tomto režime, no stále v rádoch μA , čo na konečný výsledok nebude mať zásadný vplyv. Behom bežného používania sa jednotlivé čísla približne zhodujú. Maximálny výkon so zapnutím prenášania dát skrz Wi-Fi ukazuje výrazné rozdiely medzi jednotlivými mikrokontrolérmi.

Tabuľka 2 Porovnanie parametrov jednotlivých mikrokontrolérov

| Mikrokontrolér | STM32WB55CEU6 | ESP32-C3-MINI-1-H4 | NRF52840 | Raspberry Pi Pico W |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Výrobca | STMicroelectronics | Espressif | Seeed Studio | Raspberry |
| Procesor | Dvojjadrový ARM Cortex-M4 | jednojadrový ARM Cortex-M33 | trojjadrový ARM Cortex-M4 | dvojjadrový ARM Cortex-M0+ |
| Frekvencia procesoru | 64 MHz | 240 MHz | 64 MHz | 133 MHz |
| Pamäť | 512 kB flash 128 kB RAM | 4 MB flash 320 kB RAM | 1 MB flash 256 kB RAM | 2 MB flash 264 kB RAM |
| Wi-Fi | 802.11a/b/g/n/ac | 802.11b/g/n | X | 802.11b/g/n |
| Bluetooth | LE | LE | 5.4 | LE, 5.2 |
| Ďalšie rozhrania | UART, SPI, I2C, ADC, DAC | UART, SPI, I2C, ADC, DAC | UART, SPI, I2C, ADC, DAC | UART, SPI, I2C, ADC, DAC |
| Teplotný rozsah [°C] | -40 až 105 | -40 až 105 | -40 až 125 | -20 až 85 |
| Rozmery [mm] | 48 x 48 | 13 x 16,6 | 21 x 17,5 | 51 x 21 |
| Napájacie napätie [V] | 1,71 až 3,6 | 3 až 3,6 | 2,2 až 3,6 | 3 až 5,5 |
| Režim spánku [μA] | 8 | 350 | 6,5 | 40 |
| Bežné používanie [mA] | 12,2 | 15 | 5,5 | 10 |
| Max. výkon [mA] | 118 | 45 | 43 | 54 |

Ako je zobrazuje tabuľke 3, maximálna rýchlosť prenosu pre STM32WB55CEU6 je 20 Mbps, pričom už pri tejto rýchlosti spotrebúva až 118 mA. Raspberry Pi Pico W a ESP32-C3-MINI-1-H4 dosahujú približne 60 mA.

Tabuľka 3 Prehľad spotreby s uvedením rýchlostí prenosu

| | Rýchlosť transferu dát [Mbps] | Spotreba energie [mA] |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Raspberry Pi Pico W | 64 | 55 |
| ESP32-C3-MINI-1-H4 | 50 | 65 |
| STM32WB55CEU6 | 20 | 118 |

Vzhľadom na vyššie uvedené informácie bude najkompatibilnejším mikroprocesorom pre solárne zavlažovanie ESP32-C3-MINI-1-H4 od spoločnosti Espressif Systems. Reálna spotreba bude závisieť od nastavenia programu a vyťaženia procesoru. Spotrebu pri prenose dát ovplyvní aj nastavený výkon vysielacza, vzdialenosť medzi vysielacom a prijímačom, a taktiež objem prenášaných dát. Výpočet energetickej náročnosti bude založený na údajoch v tabuľke 2. Uvažovaných je 22 hodín v normálnom režime a 2 h v režime maximálneho výkonu. Potom sa potrebná elektrická energia vypočíta ako:

$$E_{norm} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = 3,3 \cdot 0,015 \cdot 22 = 1,09 \text{ Wh} \quad (17)$$

$$E_{max} = 3,3 \cdot 0,1 \cdot 2 = 0,66 \text{ Wh} \quad (18)$$

$$E_{sum} = 1,09 + 0,66 = 1,75 \text{ Wh.} \quad (19)$$

Spoločne s ostatnými komponentami na doske plošných spojov, ako je napríklad step-down konvertor na 3,3 V alebo niekoľko kontrolných led, by nemala energetická spotreba presiahnuť 5 Wh v priebehu jedného dňa.

4.2.2 Umelé osvetlenie

Organizácia Lužánky požaduje implementáciu štyroch metrov LED pásov s dobou svietenia aspoň 3 h denne. Tri dodatočné hodiny denného svetla potom vyprodukujú 1095 extra hodín na fotosyntézu pre rastliny umiestnené v blízkosti osvetlenia počas jedného roka. Tento čas by mohol byť prínosný najmä v zimných mesiacoch s typicky neskorým východom a skorým západom slnka.

Aktivity LUSK-u nespočívajú len v pestovaní tropických rastlín, ale aj v organizovaní detských krúžkov a táborov zameraných na prírodovedeckú a technickú činnosť. Práve preto by bolo vhodné vybrať LED pás s adresovateľnými LED diódami, kedy by prepínaním rôznych módov osvetlenia mohol byť vzbudený záujem o budúce štúdium technických smerov, ako aj zvýšená atraktivita skleníku, resp. jeho krúžkov. Z dostupných produktov s dostatočnou dokumentáciou je vhodná skupina LED pásov pod označením WS28xx. Posledné 2 čísla označujú rady, ktoré sa od seba líšia ako umiestnením integrovaného obvodu pre dekódovanie dát, tak aj rozsahom napájacieho napätia. Štvormetrový pás s hustotou LED 60 kusov na meter predstavuje výkon, ktorý by pri nižších napájacích napätiach mohol vykazovať pomerne vysoké prúdy spôsobujúce teplotné namáhanie dosky plošných spojov ako aj výrazné teplotné straty. Najvyššie napájacie napätie, a to 12 V, s interným integrovaným obvodom predstavuje rada WS2815. Podľa dátového listu je jeho spotreba 17,1 mA na jednu LED [43], čo predstavuje 4,1 A pre 240 LED v 4 metroch pásu. Výkon potrebný pre pokrytie 3h svietenia je potom:

$$E_{3h} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = 12 \cdot 4,1 \cdot 3 = 147,6 \text{ Wh} \quad (20)$$

Potrebný výkon, a tým pádom aj celková spotreba elektrickej energie sa bude líšiť vzhľadom na nastavenú farbu. Avšak pri výpočtoch k dosiahnutiu energetickej sebestačnosti je vhodné počítať s maximálnymi možnými výkonmi jednotlivých častí, čím sa docieli bezpečná prevádzka vo všetkých možných stavoch zariadenia.

4.2.3 Manažment vody

Manažment vody bude primárne tvorený z dvoch častí vyžadujúcich elektrickú energiu. Prvým bude elektromagnetický ventil pre spúšťanie zavlažovania a druhým merač prietoku vody. Elektromagnetické ventily sú zariadenia používané najmä na

riadenie toku kvapalín, pričom existujú aj modifikácie využívané na riadenie toku plynov. Princíp funkčnosti spočíva v elektromagnetickej cievke a ventilovom mechanizme. Po pripojení ventilu na zdroj o dostatočnom napätí a výkone elektrický prúd prechádza cez cievku elektromagnetu, čím vytvára magnetické pole priťahujúce pohyblivú časť ventilu, vďaka ktorej ventil ostáva počas napájania otvorený. Po vypojení napájania sa ventil vráti do pôvodnej polohy. Na obrázku 24 je zobrazený ventil, ktorý je od výroby trvale nepriechodný a tento stav je možné zmeniť priložením napätia 12 V, pričom spotreba prúdu je približne 320 mA. Zavlažovanie, využívané aj vo funkcii chladenia miestnosti, by podľa dohody malo byť zapnuté približne 2 hodiny denne, a to najmä v krátkych intervaloch. Energetická spotreba potom vychádza:

$$E_{2h} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = 12 \cdot 0,32 \cdot 2 = 7,68 \text{ Wh} \quad (21)$$



Obrázok 24 Elektromagnetický ventil

Na druhú stranu, senzor prietoku kvapaliny, zobrazený na obrázku 25, využíva Hallov jav, pri ktorom sa magnetický rotor vo vnútri senzoru otáča priamoúmerne rýchlo s rýchlosťou prietoku kvapaliny, kedy toto otáčanie zaznamenáva snímač, ktorý na základe prietoku moduluje striedu pulzného signálu na výstupnom pine.



Obrázok 25 Senzor prietoku kvapalín

Prevádzkové napätie modelu YF-S201 zobrazeného na obrázku 13 je 5 V, pričom jeho spotreba dosahuje 15 mA. Energetická spotreba prietokomeru potom vychádza:

$$E_{8h} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = 5 \cdot 0,015 \cdot 2 = 0,15 \text{ Wh} \quad (22)$$

4.2.4 Súhrn predpokladov energetickej náročnosti

Po deduktívnom výbere vhodného mikrokontroléru a uvážení dosky plošných spojov bola určená denná spotreba riadiaceho systému na úrovni 5 Wh. Energeticky najnáročnejšou časťou celého zariadenia je štvormetrový LED pás, ktorý bude mať aj pri napájaní na 12 V dennú spotrebu 147,6 Wh. Spotreba systému pre manažment vody sa skladá z dvoch častí, a to spotreby elektromagnetického ventilu, 7,68 Wh a prietokomeru, 0,15 Wh. Sumarizácia jednotlivých výsledkov činí dennú elektrickú spotrebu približne 160 Wh. Pre jej pokrytie bude potrebné akumulovať primerane podobnú kapacitu v akumulátore, kedy pri uvažovanom výkone panelu od 50 do 80 W bude aj v krátke zimné dni zabezpečený plynulý chod zariadenia.

4.3 Výber fotovoltického panelu

Vzhľadom na výpočet energetickej náročnosti by sa mal výkon fotovoltického panelu pohybovať na úrovni 50 až 80 wattov. Po uvážení výrobných materiálov v predchádzajúcej podkapitole, požadovaného výkonu a aktuálnej dostupnosti na trhu bol vybraný model SZ-70-36M od spoločnosti Solarfam.

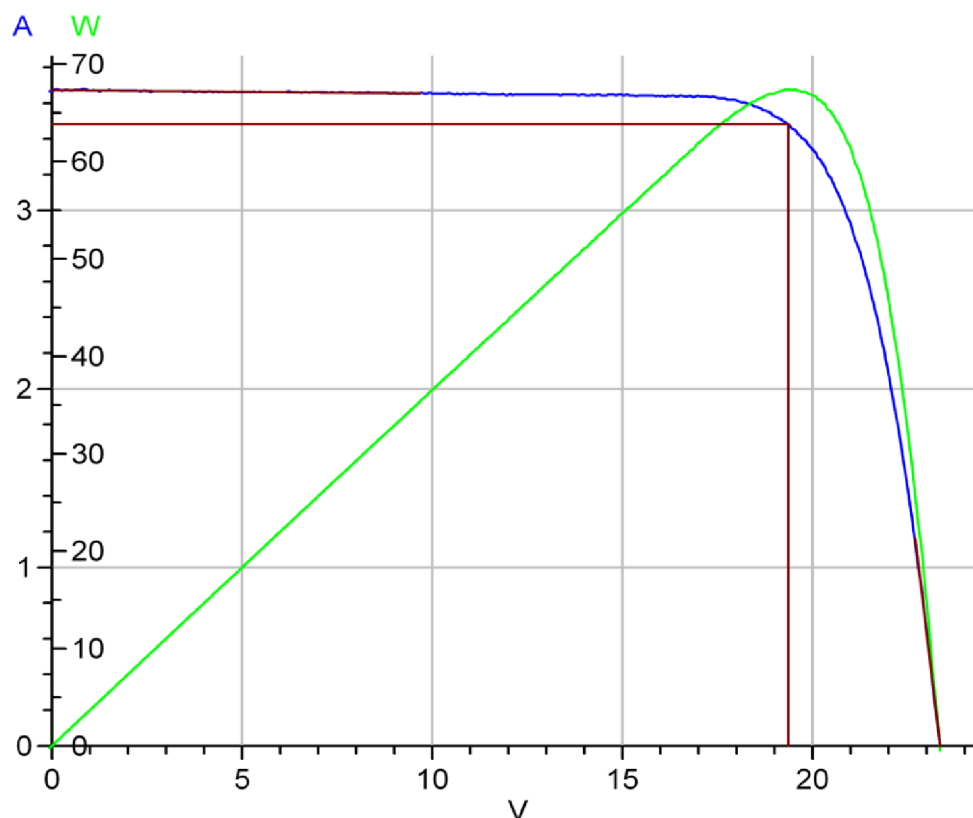


Obrázok 26 Solárny panel Solarfam SZ-70-36M

Jedná sa o monokryštalický panel o výkone 70 W s rozmermi 105 x 35 cm. Pre pokrytie približnej dennej spotreby 160 Wh bude potrebných 2,3 h maximálneho výkonu. V oblasti Brna je mesiac s najnižšou priemernou dobou trvania slnečného svitu december, a to 41,8 h. Doba slnečného svitu avšak nepredstavuje trvanie dna, respektíve noci. Priemerná dĺžka dňa v decembri je 8 hodín, čo predstavuje aktívnu dĺžku výroby elektrickej energie, i keď pri zníženom výkone. Počet aktívnych hodín bude taktiež závisieť od umiestnenia panelu v areáli skleníku. Uvedené údaje solárneho panelu boli overené premeraním volt-ampérovej charakteristiky v akreditovanom pracovisku. Ako je možné vidieť v tabuľke 4, výrobcom stanovený výkon je v skutočnosti o 2,58 W nižší, napätie o niekoľko percent vyššie a prúd nižší. Grafické zobrazenie nameraných veličín je potom možná nájsť na obrázku 27.

Tabuľka 4 Parametre solárneho panelu SZ-70-36M

| | Uvedené hodnoty | Namerané hodnoty |
|-----------------------|-----------------|------------------|
| Menovitý výkon [W] | 70 | 67,42 |
| Menovité napätie [V] | 18,7 | 19,37 |
| Napätie naprázdno [V] | 22,1 | 23,35 |
| Menovitý prúd [A] | 3,74 | 3,48 |
| Prúd na krátko [A] | 4,01 | 3,67 |
| Efektivita [%] | - | 18,45 |



Obrázok 27 Nameraná A-V charakteristika

4.4 Výber Li-ion článku

Existuje veľké množstvo cylindrických Li-ion článok líšiacich sa použitými materiálmi anódy, katódy a elektrolytu. Podľa použitého materiálu a štruktúry disponujú jednotlivé druhy špecifickými hodnotami parametrov ako napríklad nominálne napätie, kapacita, energetická hustota, špecifický výkon či miera samo-vybíjania. Pri voľbe vhodného akumulátora pre tropický skleník je dôležité zohľadniť aj parametre ako teplotný rozsah, či odolnosť voči prostrediu s vysokou vlhkosťou a teplotou. Pre zachovanie dlhodobej bezpečnosti a funkčnosti bude najvhodnejším riešením umiestniť hlavný akumulátor mimo miestnosť tropického skleníku.

Tabuľka 5 Všeobecné parametre Li-ion akumulátorov [44]

| | |
|--------------------------|------------|
| Nominálne napätie [V] | 3,6 |
| Teplotný rozsah [°C] | 5 - 45 |
| Cyklická životnosť [-] | 500 – 5000 |
| Efektivita [%] | 95 |
| Hustota energie [Wh/kg] | 120 – 180 |
| Samovybíjanie [%/mesiac] | 5 |

Vzhľadom na výpočet energetickej náročnosti systému a nominálne napätie Li-ion článku je zrejmé, že sa bude jednať o sériové zapojenie troch článkov, na ktorom výstupe bude 12 V. Potreba sériového zapojenia plynie z napätia solárneho panelu, ako aj z napájacieho napätia LED pásu či ventilu, ktoré činia 12 V. Vzhľadom na kapacitu vybraného článku bude nutné paralelne zapojiť dve alebo tri série. Tretím parametrom výberu bude maximálna hodnota vybíjacieho prúdu, a to hlavne z dôvodu hrozby teplotného namáhania, ktorá môže byť jednoducho umocnená vplyvom prúdovej záťaže v kombinácii so zvýšenou teplotou prostredia.

Na základne uvedených požiadavkov je jedným z možných a na trhu dostupných riešení článok INR21700-P42A od spoločnosti Molicel.

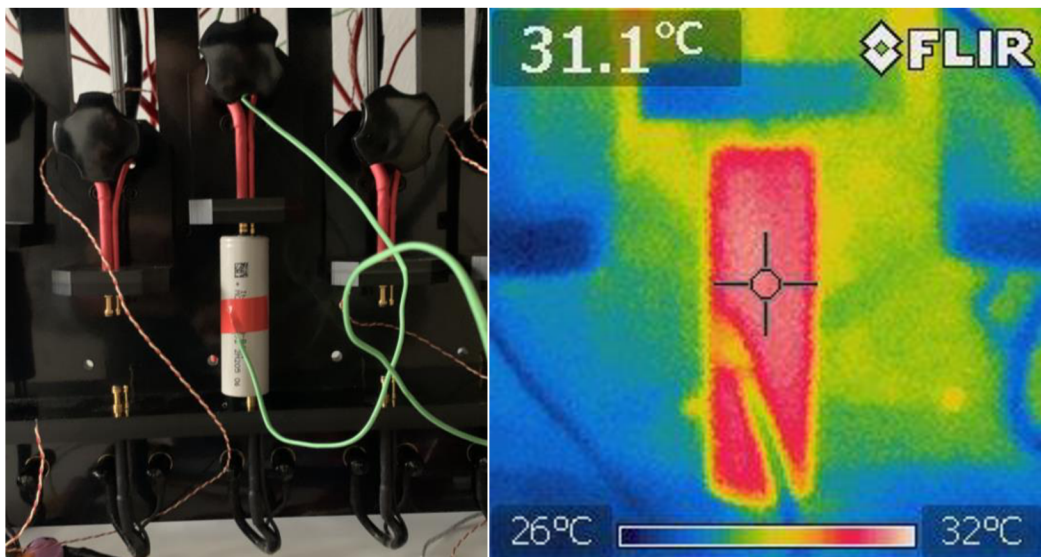
Tabuľka 6 Parametre INR21700-P42A [45]

| | |
|------------------------|--|
| Nominálne napätie [V] | 3,6 |
| Minimálne napätie [V] | 2,5 |
| Kapacita [mAh] | Typicky 4200 mAh 15,5 Wh Minimum 4000 mAh 14,7 Wh |
| Nabíjací prúd [A] | 4,2 |
| Vybíjací prúd [A] | 45 |
| Efektivita [%] | 95 |
| Teplota nabíjania [°C] | 0 až 45 |
| Teplota vybíjania [°C] | -40 až 60 |

Vybraný článok sa nachádza v cylindrickom puzdre 21700 s kapacitou 4200 mAh pri vybíjacom prúde až 45 A. Maximálny vybíjací prúd zaručuje teplotu článku vo výrobcom určenom intervale aj pri zvýšenej teplote v skleníku. Na základe popisu elektródových materiálov je možné určiť materiál zápornej elektródy, ktorý bude vzhľadom na nominálne napätie grafit. Materiálové zloženie kladnej elektródy bude pravdepodobne kompozit z lítia, niklu, mangánu, kobaltu a oxidu v bližšie nešpecifikovanom pomere ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$). Tento odhad je odôvodnený vybíjacím prúdom, vysokou kapacitou, ako aj širokým rozsahom nabíjajúcich a vybíjajúcich teplôt, ktoré sú uvedené v tabuľke 6. Štruktúra pozostávajúca z troch paralelne prepojených sérií, pričom každú sériu tvoria 3 články naznačuje kapacitu až 12600 mAh pri akumulovanom výkone 139,5 Wh. Výpočet

energetickej náročnosti predpokladá dennú spotrebu do 160 Wh. Z ohľadom na výkonu panelu 70 W a rozložením dôb zapnutia LED pásu na viac časových intervalov v priebehu dňa bude pravdepodobne možné svietiť aj viac, ako 3 hodiny denne.

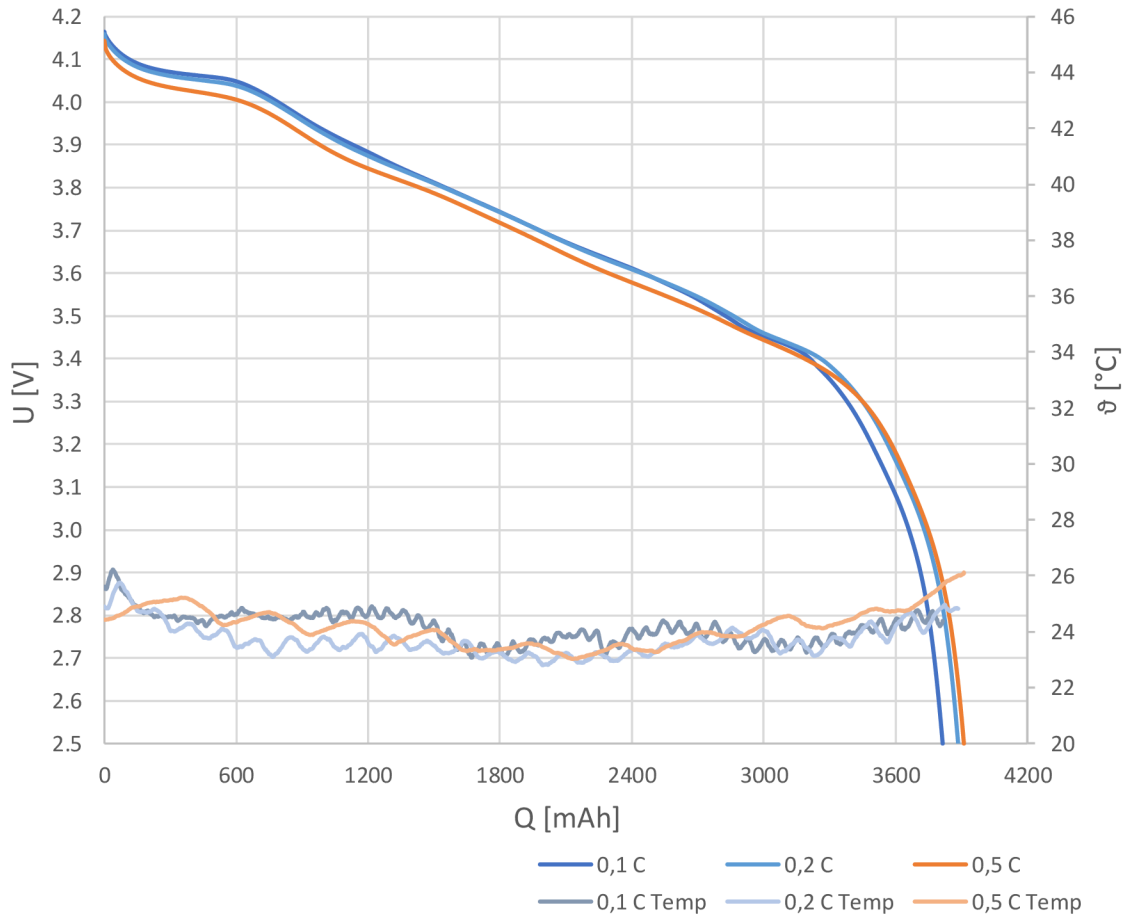
Pre overenie parametrov z dátového listu bola v rámci tejto práce meraná vybíjacia charakteristika vybraného článku pri viacerých úrovniach výstupnej záťaže. Vybíjacia charakteristika je jedným zo základných ukazateľov stavu zdravia a vlastností batérie, ktorá všeobecne ukazuje napätie článku v čase pri jeho nabíjaní (typicky do 4,2 V) a vybíjaní (do minimálneho napätia), spravidla konštantným prúdom rôznych veľkostí. Doprovodným javom prúdového zaťaženia je už spomínaný vznik tepla. Prúdové zaťaženie je označované ukazateľom C-rate, ktorý popisuje zaťaženie batérie v pomere k jej celkovej kapacite. To napríklad znamená, že plne nabitá 3 Ah batéria by pri vybíjaní prúdom 1 C mala poskytnúť prúd 3 A po dobu 1 h.



Obrázok 28 Článok v meracom stanovisku pri vybíjacom prúde 2 C

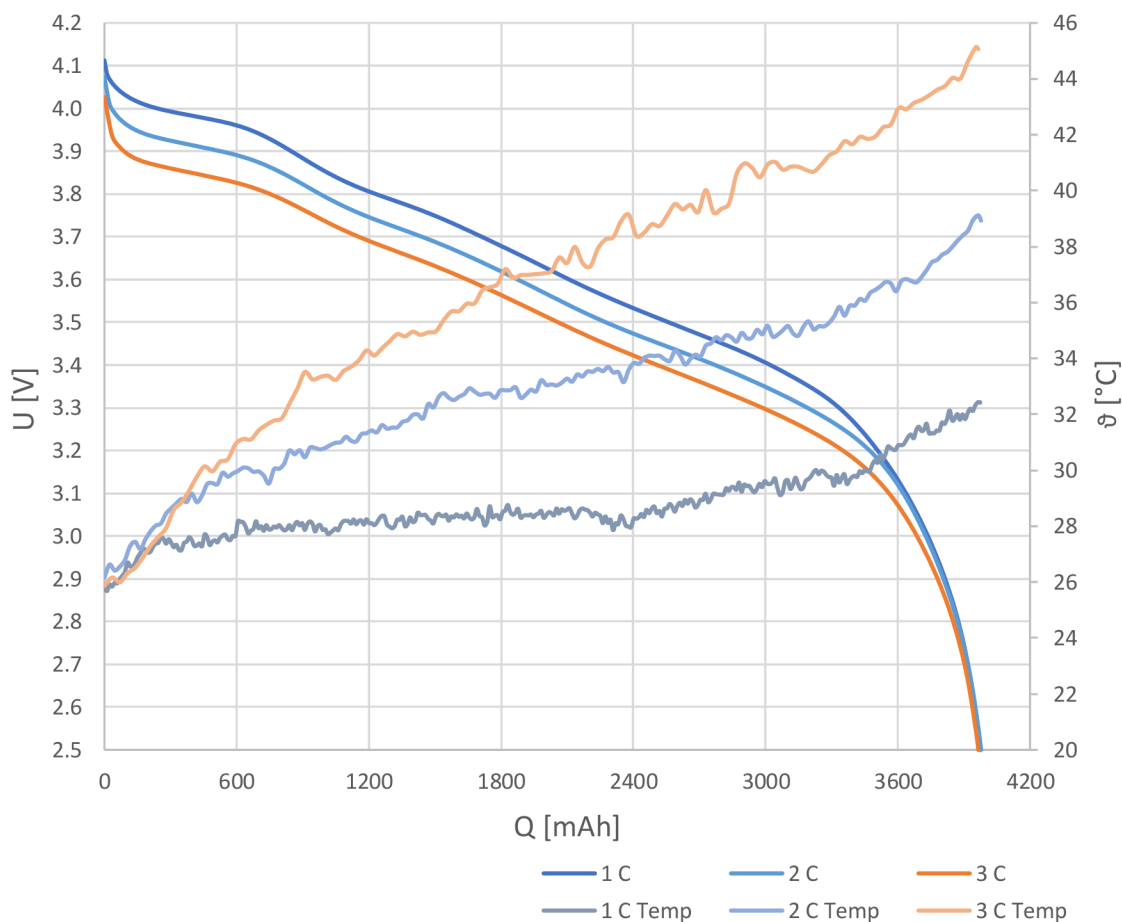
Ako je možné vidieť na obrázku 28, pri testovaní bol článok vložený do meracej stanice, pričom bol na jeho povrch prichytený termočlánok. Parametre testu boli nastavené v programe BT Lab. Radili sa medzi ne veličiny ako úroveň nabíjacieho a vybíjacieho prúdu, minimálneho a maximálneho napätia, či rôzne časové konštanty, ako napríklad doba oddychu článku po nabití na požadované napätie. Celkovo boli prevedené 2 testy pozostávajúce vždy z troch nabíjaco/vybíjacích cyklov. V prvom súbore cyklov bol článok vystavovaný nižším odberovým prúdom na predpokladanej úrovni zaťaženia v koncovom zariadení. Konkrétne boli merané hodnoty 0,1 C, 0,2 C a 0,5 C. Druhý súbor testov sledoval skôr teplotnú odozvu článku na vyššie prúdové zaťaženia v hodnotách 1 C, 2 C a 3 C. Článok bol vždy nabíjaný prúdom 1 C na maximálne napätie, po čom sa 10 minút počkalo a nasledovalo vybíjanie až na spodnú napäťovú úroveň 2,5 V adekvátnym vybíjacím prúdom.

Ako zobrazuje obrázok 29, vybíjacie charakteristiky jednotlivých cyklov sú približne rovnaké, rozdiel nastáva až pri nižších napätiach, kedy charakteristika s hodnotou vybíjacieho prúdu 0,1 C (0,42 A) dosahuje o približne 100 mAh nižšiu kapacitu, a to 3812 mAh. Teplota článku dosahovala približne 24 °C, čo zaručuje štruktúrnu stabilitu akumulátora pri jeho používaní v skleníku.



Obrázok 29 Grafická závislosť napätia a teploty článku INR21700-P42A od kapacity pri vybíjaní menšími prúdmi

Vybíjanie článku prúdmi do 3 C (12,6 A) je zobrazené na obrázku 30. Výsledky cyklovania kapacitu zjednotili na približne 4000 mAh. Avšak táto kapacita je viazaná k vyšším vybíjacím prúdom. Teplota, sprevádzajúca jednotlivé cykly dosiahla maximálne 45 °C, a to na konci vybíjania najvyšším prúdom. Táto teplota stále spadá do povoleného rozsahu z dátového listu. Vyššie záťažové prúdy (4 C a viac) by už s najväčšou pravdepodobnosťou vyžadovali aktívne chladenie článku, napríklad ventilátorom alebo priechodom chladiacej kvapaliny. Snímka z termokamery na obrázku 28 ukazuje teploty článku zhruba v jednej tretine vybíjacieho cyklu pri záťažovom prúde 2 C. Rozloženie teploty sa zdá byť homogénne, čo naznačuje dobrý stav meraného článku. Zelený pásik prechádzajúci skrz prednú časť tela je priložený termočlánok.



Obrázok 30 Grafická závislosť napätia a teploty článku INR21700-P42A od kapacity pri vybíjaní vyššími prúdmi

4.5 Predpoklady solárnej sebestačnosti

Súhrn energetickej náročnosti systému predpokladá dennú spotrebu na úrovni 160 Wh, pričom majoritnú časť, 147,6 Wh, tvorí LED pás. Vybraný solárny panel s výkonom 67,42 W by pri nepretržitej prevádzke dokázal spotrebu spoľahlivo pokryť. Avšak za oblačného počasia, v zimných mesiacoch či v noci by zariadenie nebolo schopné prevádzky. Z toho dôvodu boli vybrané články INR21700-P42A, ktoré budú v koncovom zariadení zapojené do trojsérie zloženej z 3 x 3-troch paralelne zapojených článkov. V zaťažovacích charakteristikách na obrázkoch 29 a 30 bola nameraná nominálna kapacita článku v rozsahu od 3800 do 4000 mAh pri vybíjaní do napätia 2,5 V. No vzhľadom na minimálne napätie vybraných LED diód WS2815, 9,5 V, a spoľahlivé spínanie ventilu bude musieť byť minimálne dovolené napätie akumulátoru programovo obmedzené na 10 V (3,33 V článok). Uložená kapacita pri rozsahu napätia od 4,20 do 3,33 V by podľa nameraných charakteristík mohla byť približne 3300 mAh. V tomto režime bude akumulátor schopný ponúknuť 9900 mAh, alebo aj 118,8 Wh. Pri plnom výkone solárneho panelu, s prihliadnutím na teplotné či spínacie straty, by mala

byť energia uložená v akumulátore dobitá za približne 1 h a 40 minút, čiže 100 minút.

Bez pripojeného solárneho panelu by malo zariadenie v plnom režime vydržať približne 18 z 24 hodín jedného dňa. Ak sa nebude zapínať LED pás a spotreba zariadenia bude na predpokladanej úrovni 12,4 Wh denne, tak 118,8 Wh v akumulátore tento čas predĺži na skoro 10 dní. Ak by sa LED pás zapol raz denne na 30 minút, za ktoré by sa vždy spotrebovalo 24,6 Wh energie, tak by akumulátor vydržal napájať zariadenie 3 dni.

Za predpokladu 3 hodín plného výkonu solárneho panelu denne, pričom je zrejmé, že toto číslo bude cez letné obdobie vyššie a v zimnom nižšie, by solárny panel mohol v priemere dodať 202 Wh energie. Čo by v priebehu jedného dňa vyšlo na pokrytie spotreby zariadenia plus 3 hodiny a 51 minút svietenia LED pásu.

Minimálny počet hodín plného výkonu pre splnenie zadávajúcich podmienok, a to aspoň 3 hodín svietenia a 2 h zavlažovania, by mal solárny panel dodávať plný výkon aspoň po dobu 2 h a 22 minút v priebehu jedného dňa. Približne 150 minút plného výkonu by nemal byť problém dosiahnuť ani v zimných mesiacoch.

5. ELEKTRICKÝ NÁVRH

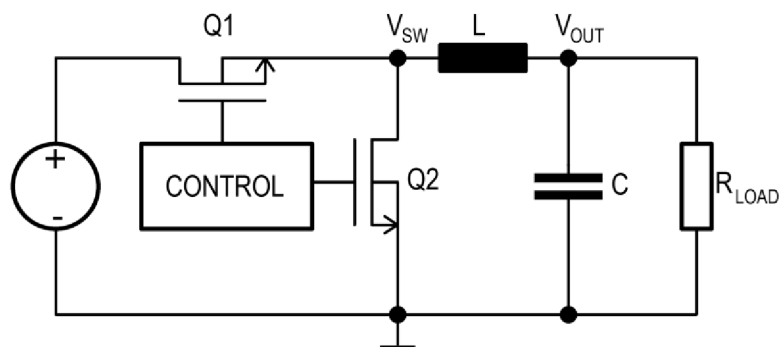
Elektrický návrh solárneho zavlažovania sa bude odvíjať od blokového diagramu zobrazeného na obrázku 23, ako aj od ostatných parametrov a vybraných komponentov určených v predchádzajúcej kapitole.

5.1 Správa napájania

Správa napájania je zodpovedá za premenu a ukladanie elektrickej energie. Skladá sa zo solárneho panelu SZ-70-36M, ktorého nameraný menovitý výkon dosahuje 67,42 W, menovité napätie 19,37 V a menovitý prúd 3,48 A. Výstup solárneho panelu vstupuje do MPPT regulátoru, ktorý vytvára akumulátorom regulované pracovné napätie 12 V. Akumulátor tvorený z deviatich Li-ion článkov je z tohto obvodu napájaný, pričom z dlhodobého hľadiska sa o vyvažovanie hodnôt napätia medzi jednotlivými článkami stará pasívny balancér. Články sú typu INR21700-P42A od spoločnosti Molicel s nominálnym napätím 3,6 V a využiteľnou kapacitou približne 3300 mAh. Zabezpečenie napájania riadiaceho systému a výstupných periférií sprostredkovávajú napäťové prevodníky vytvárajúce 5 V a 3,3 V okruh.

5.1.1 MPPT regulátor

Regulátory MPPT sa používajú na optimalizáciu výkonu solárnych panelov. Princíp spočíva v udržaní výstupného napätia na optimálnom bode tak, aby bol generovaný prúd zodpovedajúci maximálnemu výkonu solárneho panelu pri danom stupni osvetlenia. MPPT regulátor je možné vytvoriť ako synchronný step-down menič so zavedenou spätnou väzbou zo vstupu, teda z napätia solárneho panelu.

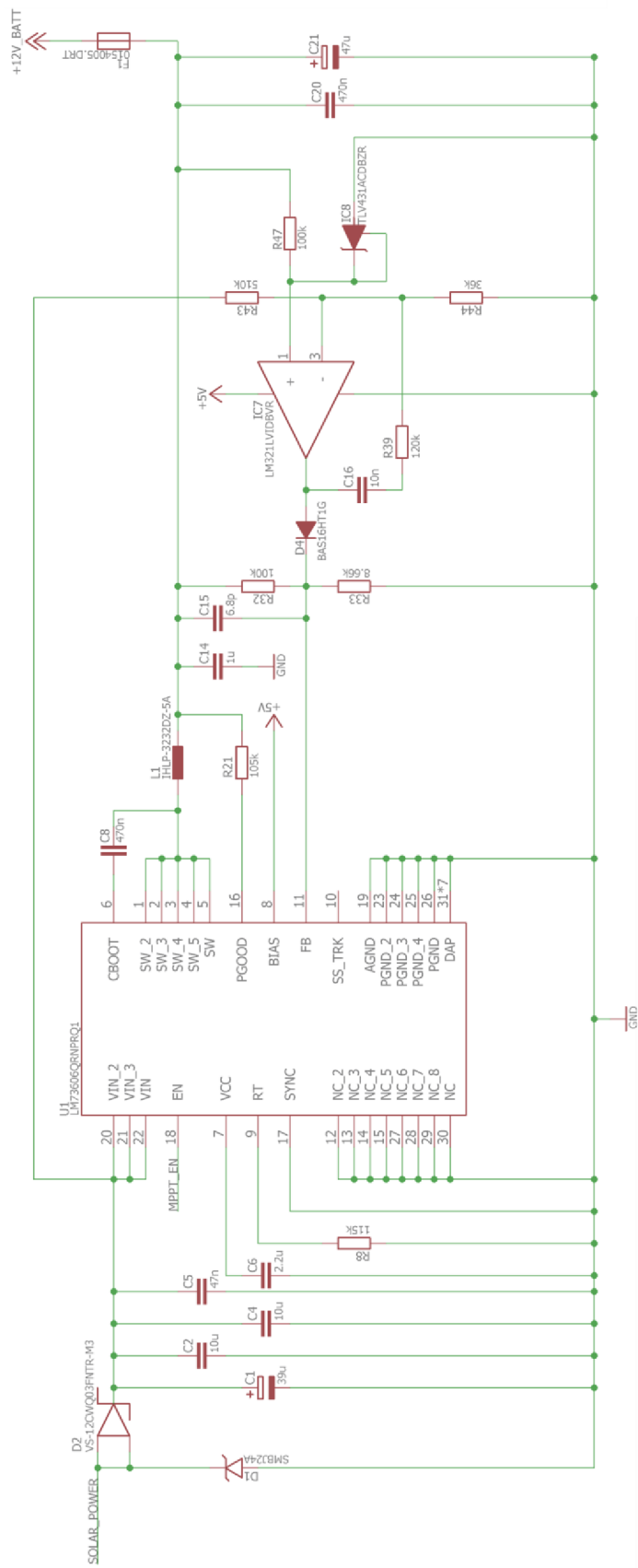


Obrázok 31 Zjednodušený synchronný step-down menič

Synchronný step-down menič, rovnako ako asynchronný, dodáva na výstup nižšie napätie, ako je napätie vstupné. U synchronného meniča je namiesto diódy použitý špecificky riadený MOS tranzistor, na ktorom je oproti dióde v asynchronnom meniči menší úbytok napätia, čo vedie k minimalizácii strát. Ako je vidieť na obrázku 31, v zjednodušenom zobrazení obsahuje synchronný step-down menič 2 výkonové PMOS

tranzistory, kontrolnú jednotku a externú cievku s kondenzátorom. Jadro funkcie spočíva v synchronnom spínaní tranzistorov tak, aby bolo zabezpečené regulované výstupné napätie. Počas pripojenia napájacieho napätia a zopnutia Q1 je tranzistor Q2 vypnutý, vďaka čomu sa postupne zvyšuje prúd cievkou a kondenzátor sa nabíja. Keď sa Q1 vypne a Q2 zapne, tak prúd cievkou klesá a kondenzátor sa postupne vybíja. Tento priebeh sa opakuje s určitou periódou, ktorá ovplyvňuje množstvo uloženej energie počas jedného cyklu, a tým pádom aj potrebnú veľkosť hodnoty cievky. Nastaviteľným parametrom je hodnota výstupného napätia, ktorú je možné nastaviť pomocou spätnoväzobného pinu (ďalej FB pin), ktorý je obvykle určený odporovým deličom z výstupného napätia. Maximálne výstupné napätie je potom obmedzené veľkosťou napätia vstupného. Tretím parametrom je pracovný cyklus, ktorý zodpovedá pomeru výstupného a vstupného napätia. Ak je pracovný cyklus rovný 1, tak tranzistor Q1 je trvalo otvorený a vstupné napätie sa rovná výstupnému. Pracovný cyklus 0,5 potom napríklad znamená, že výstupné napätie je rovné polovici napätia vstupného.

Pre udržanie MPP napätia solárneho panelu je nutné zaviesť spätnú väzbu na vstup meniča. Toho je možné dosiahnuť napríklad pomocou dodatočného operačného zosilňovača. Neinvertujúci vstup operačného zosilňovača je zapojený na referenčný zdroj napätia a invertujúci na vstupné napätie MPPT bloku skrz odporový delič. Výstup zosilňovača je skrz diódu zapojený do spätnoväzobného pinu meniča. Ak kvôli veľkému prúdovému odberu akumulátoru dôjde k zníženiu vstupného napätia fotovoltického panelu, tak signál do FB pinu spôsobí obmedzenie výkonu meniča tak, aby nedošlo k poklesu vstupného napätia pod hodnotu U_{MPP} . Kompletné zapojenie MPPT regulátora je možné vidieť na obrázku 32. Z ľavej strany na pravú sa v mieste výstupu fotovoltického panelu nachádza paralelne zapojená TVS dióda SMBJ24A značky Littelfuse chrániaca zapojenie pred prepätím. Sériovo je na vstupe zapojená usmerňovacia Schottkyho dióda, ktorá zabráni spätnému prechodu prúdu z akumulátora do panelu. Ďalej je v zapojení niekoľko vstupných kondenzátorov, ktoré minimalizujú možné vplyvy premenlivých podmienok a vyhladzujú vstupný prúd do synchronného step-down meniča LM73606-Q1. Vybratý menič má maximálne vstupné napätie 36 V, čo je o 12,65 V viac, ako namerané napätie naprázdno FV panelu. Nastaviteľné výstupné napätie od 1 do 34 V s maximálnym výstupným prúdom 6 A [46]. Uzemnením SYNC pinu bol zvolený auto mód, kedy zariadenie pracuje v režime kontinuálneho vedenia v pulzne frekvenčnej modulácii (PFM), čím je dosiahnutá vyššia účinnosť. Počas PFM môže byť dosiahnutá maximálna spínacia frekvencia určená hodnotou rezistoru na RT pine, ktorá je v tomto prípade podľa datasheetu nastavená na 350 kHz rezistorom R8 s hodnotou 115 k Ω . V neposlednom rade pripojením EN pinu na riadiaci obvod zapojenia vznikla možnosť vypínať a zapínať MPPT regulátor podľa potreby zariadenia.



Obrázok 32 Zapojenie MPPT regulátora

Na pravej strane schematickej značky je umiestnených 5 spínaných výstupov sériovo pripojených na cievku, ktorej indukčnosť bola vypočítaná podľa vzťahu z katalógového listu ako:

$$L = \frac{(V_{IN}-V_{OUT}) \cdot D}{f_{SW} \cdot I_{Lripple}} = \frac{(V_{IN}-V_{OUT}) \cdot (V_{OUT}/V_{IN})}{f_{SW} \cdot r \cdot I_{LMAX}} = \frac{(23,35-12,45) \cdot (12,45/23,35)}{350 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \cdot 6} = 9,22 \mu H, \quad (23)$$

kde hodnota vstupného napätia je rovná nameranému napätiu panelu na prázdno, výstupné napätie maximálnemu napätiu troch sériovo zapojených Li-ion článkov, f_{SW} je spínacia frekvencia, D pracovný cyklus, r je rovné pomeru zvlnenia prúdu induktorom a I_{LMAX} maximálnym prúdom obvodu, a to 6 A. Vzhľadom na vypočítanú hodnotu a dostupnosť na trhu bola určená veľkosť 10 μH .

Ako vidieť na obrázku 33, k sériovo zapojenej cievke je paralelne pripojený výstupný kondenzátor C21, ktorého kapacita bola vypočítaná podľa vzťahu z dátového listu:

$$C > \frac{1}{(f_{SW} \cdot r \cdot \Delta V_{OUT}/I_{OUT})} \cdot \left[\left(\frac{r^2}{12} \cdot (1 + D') \right) + (D' \cdot (1 + r)) \right], \quad (24)$$

$$C > \frac{1}{(350 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 12,6/4)} \cdot \left[\left(\frac{0,3^2}{12} \cdot \left(1 + \left(1 - \frac{12,6}{23,35} \right) \right) \right) + \left(\left(1 - \frac{12,6}{23,35} \right) \cdot (1 + 0,3) \right) \right],$$

$$C > 15 \mu F.$$

Vzhľadom na aproximáciu minimálnej hodnoty kapacity výstupného kondenzátoru bola zvolená veľkosť 47 μF .

Maximálne výstupné napätie 12,45 V (4,15 V na článok) bolo určené zvolením hodnôt odporového deliča tvoreného rezistormi R26 a R27, ktorých výstup je pripojený na spätnoväzobný pin. Hodnota R26 bola podľa dátového listu odhadnutá na 100 k Ω , vzhľadom na ktorú bola vypočítaná hodnota R27 ako:

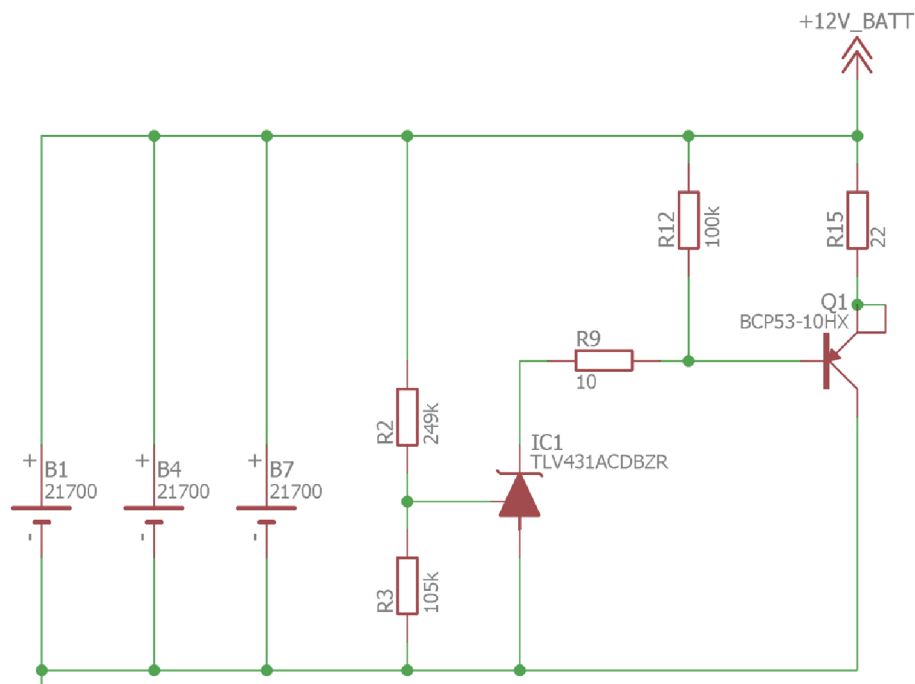
$$R_{27} = \frac{V_{FB}}{V_{OUT}-V_{FB}} \cdot R_{26} = \frac{1,006}{12,45-1,006} \cdot 100 \cdot 10^3 = 8,66 k\Omega, \quad (25)$$

Podľa dostupnosti na trhu bola zvolená hodnota rezistoru R27 na úrovni 8,66 k Ω , pričom v zapojení budú použité rezistory s presnosťou pod 1 %.

Ako operačný zosilňovač vo spätnej väzbe bol vybraný LM321LVIDBVR. Neinvertujúci pin bol pripojený na napätovú referenciu TLV431ACDBZR, ktorá poskytuje referenčné napätie 1,24 V. Invertujúci pin je skrz odporový delič pripojený na vstupné napätie. Deliaci pomer je nastavený na prekročenie referenčného napätia, a to po prekročení U_{MPP} na vstupe meniča. Potom operačný zosilňovač reguluje hodnoty FB pinu tak, aby bol na vstupe udržaný bod maximálneho výkonu. Posledným komponentom v zapojení je poistka od spoločnosti Littelfuse. Implementácia poistky zvyšuje bezpečnosť zariadenia, a to jeho odpojením od solárneho panelu v prípade výskytu chybného stavu, skratu alebo iného zlyhania systému.

5.1.2 Pasívny balancér Li-ion článkov

Funkcia pasívneho balancéra spočíva v udržiavaní rovnováhy napätia medzi jednotlivými článkami v akumulátore, čím zabraňuje ich prebitiu. Po dosiahnutí maximálneho napätia článku sa prebytočná energia spotrebováva na paralelne zapojenom rezistore do vtedy, kým sa nedobijú aj zvyšné články a prúd zo synchronného step-down meniča neklesne na nulu. Podľa výpočtu energetickej náročnosti systému bude akumulátor tvorený tromi sériami troch paralelne prepojených článkov. Každá séria skladajúca sa z 3 článkov bude potom regulovaná jedným pasívnym balancérom.



Obrázok 33 Pasívny balancér Li-ion článkov

Schéma zapojenia pasívneho balancéra použitého v obvodech solárneho zavlažovacieho systému je zobrazená na obrázku 33. Balancér je tvorený napäťovou referenciou TLV431, odporovým deličom a PNP tranzistorom v kombinácii s vyvažovacím rezistorom. TLV431 začne viesť prúd v momente dosiahnutia napätia 1,24 V na referenčnom pine, čo vzhľadom na odporový delič a referenciu nastane v moment nabitia článkov na úroveň 4,18 V. Vtedy sa vďaka prepojeniu s ostatným obvodom spoľahlivo otvorí aj PNP tranzistor BCP53-10HX a rezistor R15 začne vďaka rozdielu potenciálov spotrebovávať prebytočnú energiu o približnom stratovom výkone:

$$P_{R15} = U_{R15} \cdot I_{R15} = \frac{U_{R15}^2}{R_{15}} = \frac{(U_{bat} - U_{EC})}{R_{15}} = \frac{(4,18 - 0,805)^2}{22} = 0,52 \text{ W}, \quad (26)$$

Konštantný stratový výkon 0,52 W by z dlhodobého hľadiska mohol spôsobiť degradáciu vyvažovacieho rezistoru. Avšak, ako je vidieť v predchádzajúcej kapitole, maximálne napätie MPPT regulátora je stanovené na 4,15 V, vďaka čomu nebude po

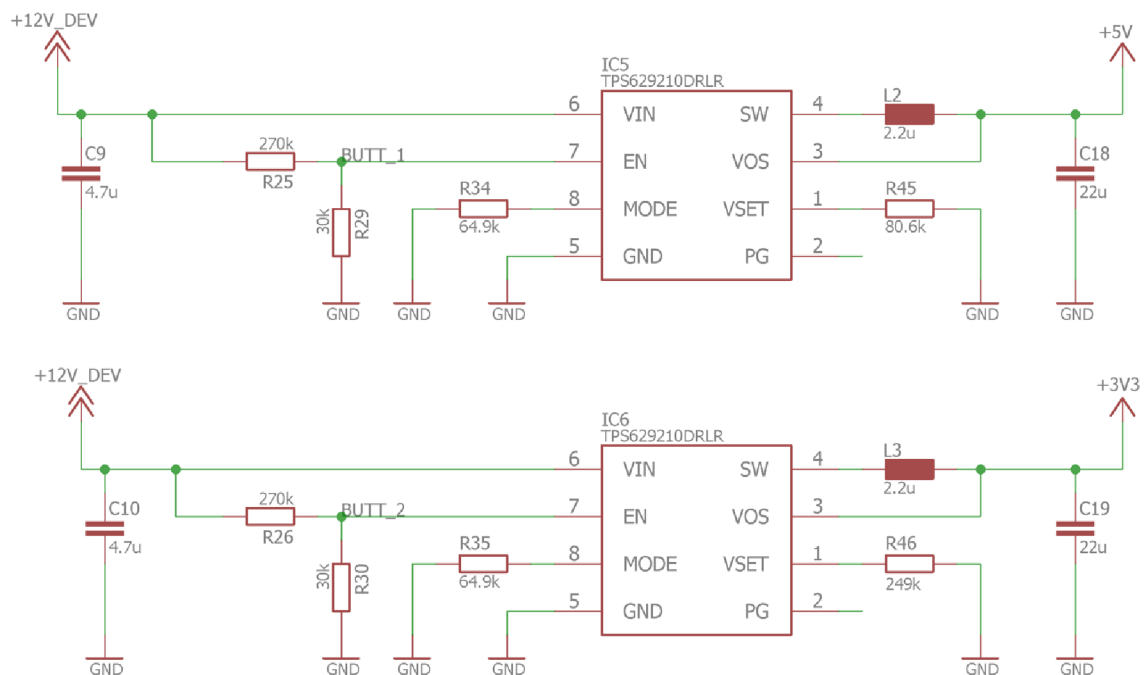
nabití článkov MPPT regulátor generovať žiadny prúd ani v prípadoch, keď bude panel stále osvetlený. Tým pádom nedôjde k zbytočnému namáhaniu rezistoru R15 a zvolením väčšieho puzdra, napríklad 3015, bude zaistená jeho dlhodobá životnosť.

Funkcia rezistoru R9 spočíva aj v ochrane TLV431 pred neočakávaným výskytom vyšších prúdov, ktorých zdrojom môže byť napríklad testovanie obvodu. Pull-up rezistor R12 potom určuje logický stav báze PNP tranzistoru v momentoch, keď je napäťová referencia zavretá a logický stav by nebol exaktne určený.

5.1.3 Manažment napájania nižších úrovní

Najvyššia generovaná úroveň napätia je z okruhu akumulátora v kombinácii s MPPT regulátorom, a to 12 V. Avšak okrem umelého osvetlenia pracujú všetky komponenty z bloku riadiaceho systému a výstupných periférií na 5 V alebo 3,3 V úrovni, čo vytvára potrebu implementácie step-down meničov.

Podobne ako v obvode MPPT regulátora, aj tu bol použitý integrovaný obvod synchronného step-down meniča. Jedná sa o typ TPS629210DRLR od spoločnosti Texas Instruments, ktorý pomocou VSET pinu umožňuje nastaviť výstupné napätie v rozsahu 0,4 až 5,5 V, pričom rozsah vstupného napätia je 3 až 17 V. Maximálny výstupný prúd je 1 A. Vzhľadom na dátový list bola určená veľkosť cievky na 2,2 μ H a kondenzátoru na 22 μ F. Výstupné napätie 5 V je nastavené rezistorom na VSET pine v hodnote 80,6 k Ω , výstupné napätie 3,3 V zas rezistorom v hodnote 249 k Ω . Schému zapojenia oboch obvodov je možné vidieť na obrázku 35.

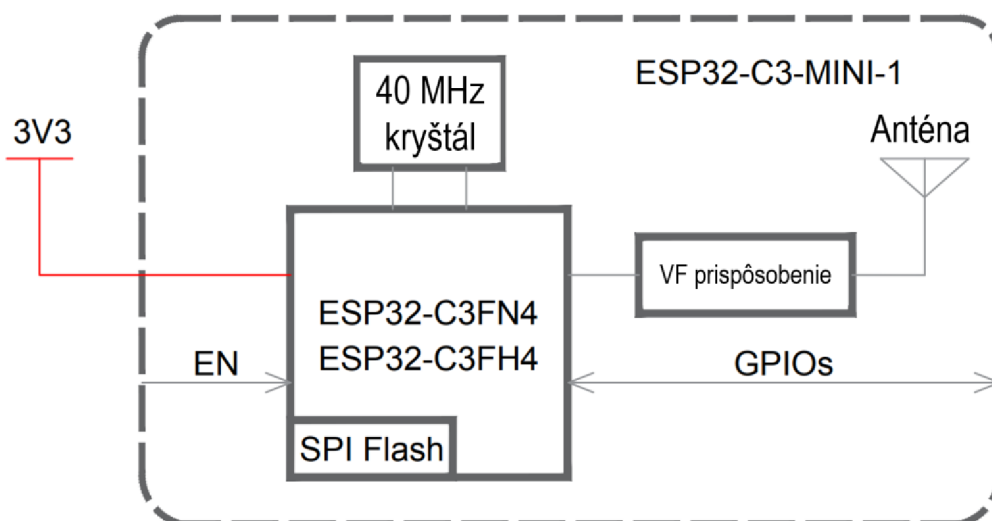


Obrázok 34 Schéma zapojenia obvodov vytvárajúcich 5 V a 3,3 V okruh

Ochranným prvkom zapojení je funkcia UVLO, ktorá vyradí oba integrované obvody z prevádzky pri prekročení minimálneho napätia akumulátora. Vzhľadom na odporový delič na EN pinoch dôjde k ich odpojeniu pri napätí akumulátora 8,7 V (2,9 V na článok).

5.2 Riadiaci systém

Hlavnou časťou riadiaceho systému je mikrokontrolér ESP32-C3-MINI-1-H4 od spoločnosti Espressif Systems. Základný čip mikrokontroléru je ESP32-C3FN4, ktorý v kombinácii s vnútorným rozhraním riadi svoje vstupno-výstupné piny, spracováva dáta a riadi dianie v zariadení solárneho zavlažovania. Medzi parametre vybraného mikrokontroléru sa radí napájacie napätie v rozsahu 3 až 3,6 V, maximálna prevádzková teplota 105 °C, integrovaná flash pamäť 4 MB či anténa pre rádiové pásmo 2,4 GHz.

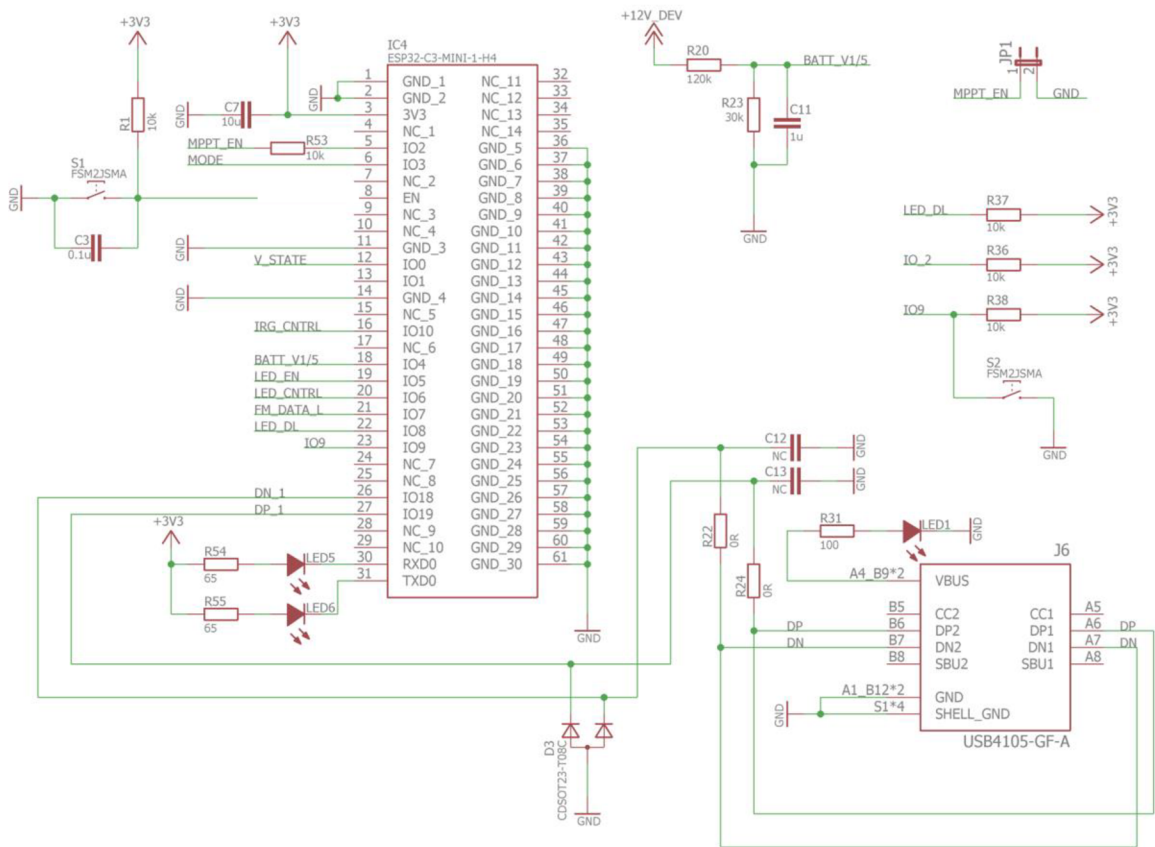


Obrázok 35 Blokové schéma ESP32-C3-MINI-1

Bloková schéma na obrázku 36 zobrazuje vzájomné prepojenie komponentov modulu ESP32-C3-MINI-1. 3V3 označuje napájacie napätie a EN povoloovací pin. Ďalej sa na obrázku nachádza anténa s modulom pre vysokofrekvenčné prispôsobenie jej impedancie. GPIO ako vstupno-výstupné piny a základný čip ESP32-C3FN4 s SPI Flash pamäťou.

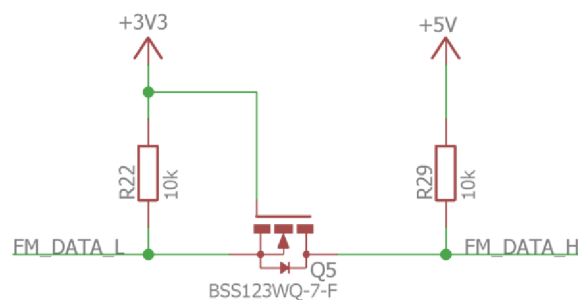
Ako ukazuje obrázok 37, výstupné piny mikrokontroléru sú využité buď ako riadenia výstupných periférií, monitorovanie správy napájania alebo na programovanie pomocou prepojenia s počítačom skrz USB-C konektor. Pre ochranu voči elektrostatickým výbojom a prechodovým javom je na spojoch DN a DP opäť použitá ochranná dióda CDSOT23-T08C. Príkladom správy napájania môže byť GPIO pin 4, na ktorom ESP32 číta napätie batérie z odporového deliča R24/R30, ktorý je taktiež zobrazený na obrázku 36. Vzhľadom na navrhnuté hodnoty odporov bude pri plne nabitom akumulátore (4,15 V na článok) napätie na vstupnom pine 2,49 V. Riadenie periférií sprostredkuje napríklad vstupný GPIO pin 7, na ktorý je pripojený spoj FM_DATA_L (Flowmeter Data

Low) prenášajúci dáta o veľkosti prietoku vody od prietokomeru v skleníku. Ako bolo popísane v podkapitole 4.2.3, napájacie napätie prietokomeru je 5 V, z čoho vyplýva potreba zavedenia komunikačného prevodníku.



Obrázok 36 Schéma zapojenia ESP32-C3-MINI-1-H4

Funkcia prevodníku spočíva v zapojení NMOS tranzistoru spoločne s párom pull-up rezistorov pre každý kanál. V tomto prípade, ak z prietokomeru (FM_DATA_H) príde bit v logickej úrovni 0, tak hodnota FM_DATA_L bude z dôvodu paralelne zapojenej diódy NMOS tranzistoru taktiež 0. Rovnaký princíp je potom použitý počas programovania LED pásu, avšak tu prevodník mení úroveň dát z 3,3 V na 12 V, kedy sa logickou nulou na source pine tranzistor zopne a nula sa prenesie na druhú stranu. Komunikačný prevodník je zobrazený na obrázku 37.

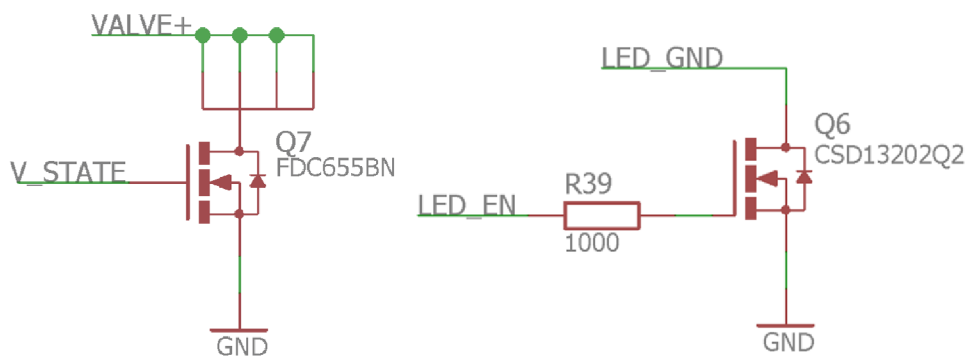


Obrázok 37 Schéma komunikačného prevodníku

5.3 Výstupné periférie

Medzi výstupné periférie patrí LED pás, ventil na prietok vody, prietokomer, signalizačné LED diódy, ako aj ovládací panel, skrz ktorý je možné nastaviť režim zariadenia. Z pohľadu obvodov na doske plošných spojov bolo potrebné navrhnuť rozhranie pre spínanie elektromagnetického ventilu a napájania LED pásu.

Pre spínanie elektromagnetického ventilu a prietokomeru bol vybraný NMOS tranzistor FDC655BN od spoločnosti onsemi. Ako je možné vidieť na obrázku 39, jedná sa o jednoduché zapojenie pozostávajúce z pripojenia výstupu týchto dvoch súčiastok na drain pin, zeme na source pine a V_STATE vetvy z ESP32 na gate. Privedením log 1 na gate tranzistoru sa prepoja výstupy so zemou, vďaka čomu sa ventil a prietokomer zopnú a môže skrz modul ovládania zavlažovania tiecť voda. V prípade výskytu chyby počas presunu vody bude možné ventil a prietokomer jednoducho vypnúť. Pričom pri výskyte chyby priamo v zariadení prestane vďaka poistke fungovať buď celá 12 V vetva alebo vďaka funkcii UVLO oba step-down meniče. V každom prípade dôjde k prerušeniu napájania ventilu, vďaka čomu nemôže nastať jeho nepretržitá prevádzka a ohrozenie bezpečnosti skleníku.



Obrázok 38 Schéma zapojenia budiča ventilu a LED pásu

Zapínanie a vypínanie LED pásu bolo taktiež navrhnuté s využitím NMOS tranzistoru, kedy je LED pás neustále napájaný z akumulátora, avšak jeho zem sa so zemou dosky prepojí až v momente logickej úrovne 1 na výstupnom pine LED_EN z mikrokontroléru. Vzhľadom na dátový list tranzistoru [47], bude pri napätí 3,3 V na gate pine R_{DS} približne 8 m Ω . Pri predpokladanom prúde LED pásom 4,1 A bude stratový výkon nadobúdať hodnotu:

$$P_{DNMOS} = U \cdot I = I^2 \cdot R_{DS} = 4,1^2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 0,135 \text{ W}. \quad (27)$$

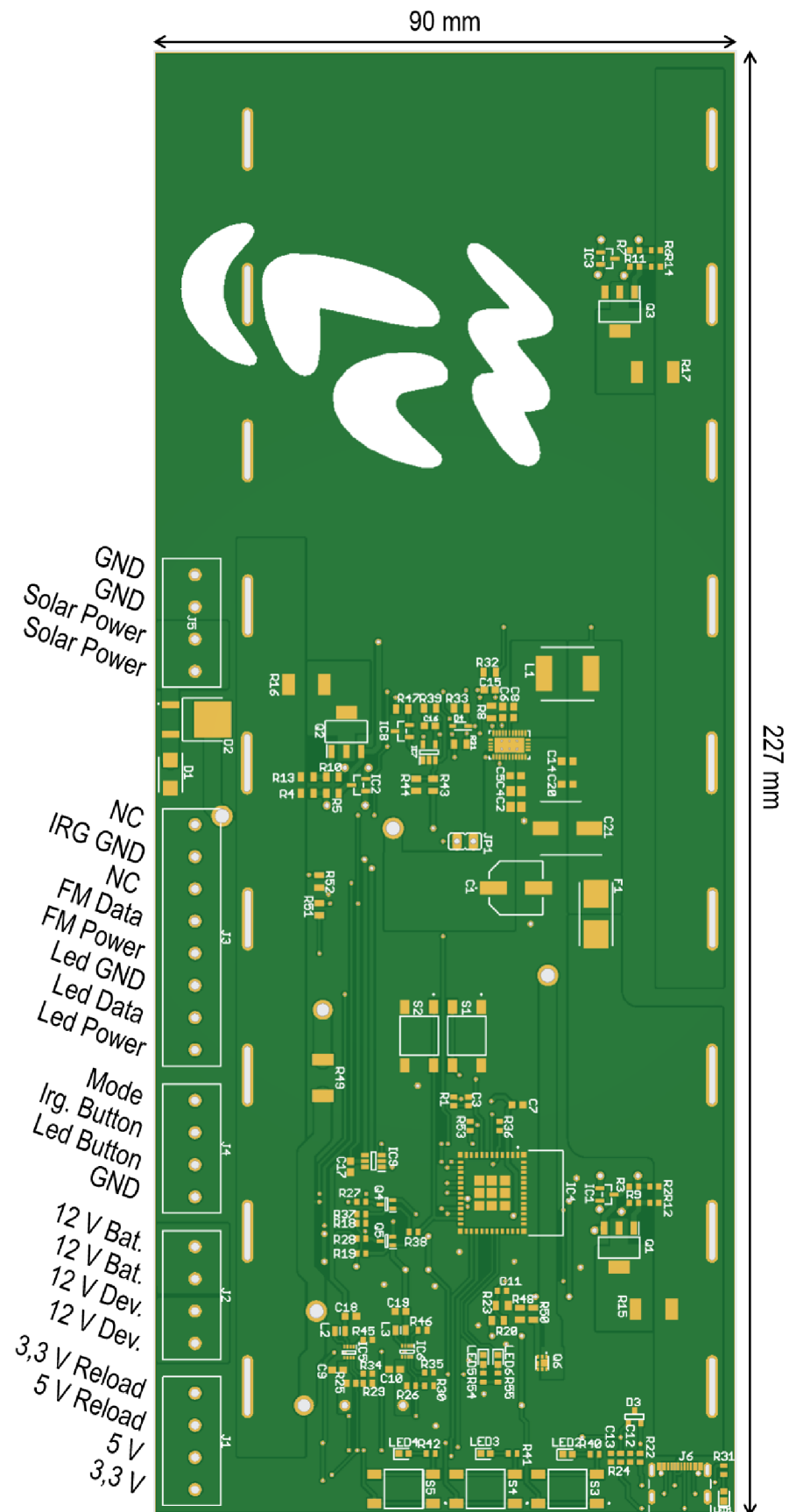
Maximálny stratový výkon vybraného tranzistoru je 2,7 W, čo predstavuje dostatočnú rezervu aj pri viac, ako hodinovom zapnutí LED pásu.

5.4 Doska plošných spojov

Vzhľadom na elektrické obvody bola ako ich ucelený nosič navrhnutá doska plošných spojov (ďalej DPS). Jedná sa dvojvrstvovú DPS s rozmermi 227 x 90 mm, ktorej základ tvorí materiál FR4 s povrchovou úpravou HASL. Medzi základné piliere návrhu sa radilo využitie oboch vrstiev dosky a prepojení aby bola docielená čo najvyššia prehľadnosť. Strategické rozmiestnenie komponentov tak, aby tie, ktoré vykazujú stratové teplo neboli vo vzájomnej blízkosti a aby, ak to bolo možné, boli umiestnené medzi článkami, čím sa minimalizuje hrozba prenosu tepla a ich degradácie. Taktiež boli dodržané zásady návrhu dosiek plošných spojov, medzi ktoré sa radí napríklad optimalizácia signálových tratí, umiestnenie kondenzátorov čo najbližšie k vstupom a výstupom integrovaných obvodov, alebo aj celková testovateľnosť DPS.

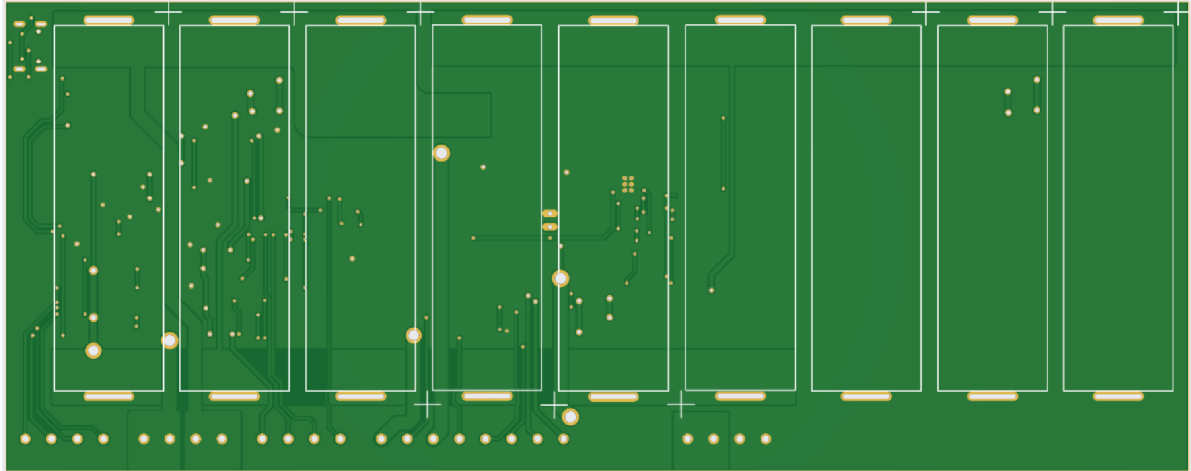
Na primárnej strane DPS, ktorá je zobrazená na obrázku 39, sú umiestnené všetky komponenty z elektrického návrhu. Z pravej strany na ľavú je na doske najprv umiestnený USB-C konektor pre programovanie zariadenia a jeho prípadnú komunikáciu s počítačom pri priebežnej kontrole funkčnosti. Pod ním sa nachádzajú tlačidlá S3 až S5, ktoré po stlačení rozsvietia kontrolné LED diódy napojené postupne na 12 V, 5 V a 3,3 V. Step-down prevodníky vytvárajúce tieto napäťové úrovne sú umiestnené vľavo od LED diód. Ďalej sa na DPS nachádza mikrokontrolér ESP32 a v jej približnom strede je umiestnený MPPT regulátor a jeho pridružené obvody. V dolnej časti dosky sa nachádzajú konektory pre pripojenie dosky k zvyšku zariadenia, a taktiež Schottkyho dióda D2 a ochranná dióda D1. Pozdĺž vrchnej strany a približne centimeter nad spodnou stranou sa nachádzajú THT otvory na 12 sériovo-paralelne zapojených článkov INR21700-P42A, ku ktorým je vždy pripojený jeden pasívny balancér. Na ľavej strane dosky je umiestnené logo SVČ Lužanky.

Na obrázku 39 sa nachádza aj popis konektorov J1 až J5. Konektor J1 obsahuje okrem napäťových zdrojov dva reload sloty, ktoré sú v zariadení spojené s enable pinom jednotlivých napäťových referencií a skrz externý spínač pripojené priamo na 12 V z akumulátora. Pomocou tohto spínača je potom po aktivácii funkcie UVLO možné uviesť zariadenie späť do prevádzky. Externý spínač bude vyvedený aj z konektoru J2, cez ktoré sa prepojí akumulátor a výstup MPPT so zvyškom DPS, a tým pádom ním bude možné zariadenie zapínať a vypínať. Keďže 8-pinový konektor J3 pozostáva z napájacích, dátových a uzemňovacích pinov, tak slúži pre správu LED pásu, ventilu a prietokomeru. Konektor J4 obsahuje najmä vývody pre tlačidlá a spínače slúžiace na zvolenie módu zariadenia (manuálny alebo autonómny), ovládania zavlažovania a zapnutia jedného z možných programov LED pásu. Pomocou posledného konektoru zariadenia, J5, je do dosky plošných spojov privedený elektrický signál zo solárneho panelu. Vzhľadom na jeho výkon bol za účelom minimalizácie prechodového odporu a možného tepelného namáhania jednotlivých spojov pridaný jeden slot ako ku kladnej, tak k uzemňovacej vetve.



Obrázok 39 Primárna strana dosky plošných spojov

Sekundárna strana dosky plošných spojov pozostáva len z jednotlivých článkov tak, ako to je možné vidieť na obrázku 40.



Obrázok 40 Sekundárna strana dosky plošných spojov

5.5 Testovanie elektrických obvodov

Navrhnutie elektrických obvodov a dosky plošných spojov si vyžaduje následné overenie funkčnosti jednotlivých blokov. Medzi významné časti sa radí MPPT regulátor zodpovedný za spracovanie elektrického signálu, balancér článkov udržiavajúci maximálnu hodnotu nabitia a obvody vytvárajúci jednotlivé napäťové úrovne.

5.5.1 MPPT regulátor

Spracovanie elektrickej energie zo solárneho panelu je energeticky najnáročnejší proces v zariadení, ktorý na doske plošných spojov spracováva synchronný step-down menič LM73606-Q1. Pri jeho výkonových tranzistoroch, Q1 a Q2, dochádza k spínacím a vodivostným stratám [48]. Spínacie straty sú významné najmä u Q1, pretože v okamihu zopnutia je jeho U_{DS} rovné U_{IN} . Spínacie straty Q2 je možné zanedbať, keďže v priebehu jeho zopnutia je U_{DS} limitované priepustným napätím paralelnej body diódy, ktoré sa pohybuje okolo 0,7 V. Spínacie straty pre tranzistor Q1 je potom možné vypočítať ako [49]:

$$\Delta I_L = t_{on} \cdot V_{IN} / L = 60 \cdot 10^{-9} \cdot 19,37 / 10 \cdot 10^{-6} = 116 \text{ mA}, \quad (28)$$

$$P_{SW} = \frac{V_{IN} \cdot f_{SW}}{2} \left[\left(I_{OUT} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot t_{on} + \left(I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot t_{off} \right], \quad (29)$$

$$P_{SW} = \frac{19,37 \cdot 350 \cdot 10^3}{2} \left[\left(3,48 - \frac{0,116}{2} \right) \cdot 60 \cdot 10^{-9} + \left(3,48 + \frac{0,116}{2} \right) \cdot 70 \cdot 10^{-9} \right] = 1,54 \text{ W}$$

kde ΔI_L je hodnota vrchol-vrchol zvlneného prúdu, L indukčnosť cievky, V_{IN} napätie na vstupe integrovaného obvodu, I_{OUT} výstupný prúd, f_{SW} spínacia frekvencia a t_{on} , t_{off}

predstavujú časové dĺžky zopnutých alebo rozopnutých tranzistorov. Vodivostné straty je možné vyjadriť ako [49]:

$$P_{CON} = P_{CONQ1} + P_{CONQ2} \quad (30)$$

$$P_{CON} = D \cdot \left(I_{OUT}^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \right) \cdot R_{DS(ON)1} + D' \cdot \left(I_{OUT}^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \right) \cdot R_{DS(ON)2}, \quad (31)$$

$$P_{CON} = \frac{12,45}{19,37} \cdot \left(3,48^2 + \frac{0,116^2}{12} \right) \cdot 53 \cdot 10^{-3} + \left(1 - \frac{12,45}{19,37} \right) \cdot \left(3,48^2 + \frac{0,116^2}{12} \right) \cdot 31 \cdot 10^{-3},$$

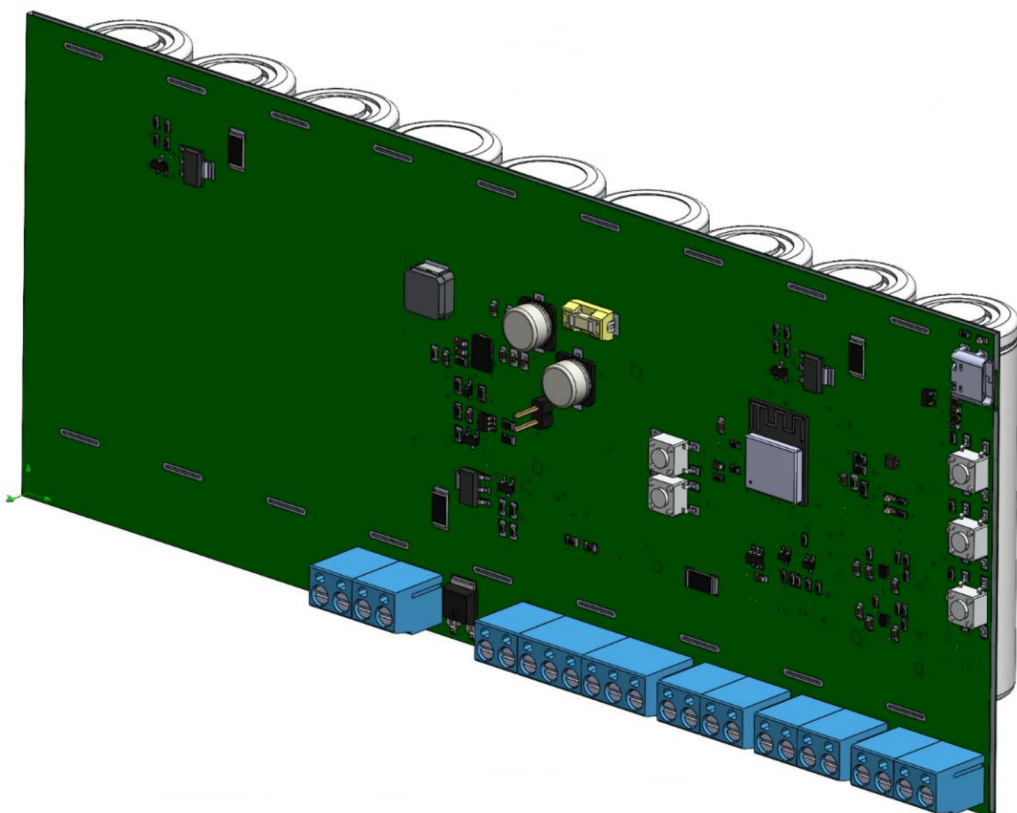
$$P_{CON} = 0,55 \text{ W}$$

kde D je strieda signálu a $R_{DS(ON)}$ odpor medzi drain a source pinom konkrétneho tranzistoru v zopnutom stave. Celkové straty na LM73606-Q1 potom budú:

$$P_{TOT} = P_{SW} + P_{CON} = 1,54 + 0,55 = 2,09 \text{ W}. \quad (32)$$

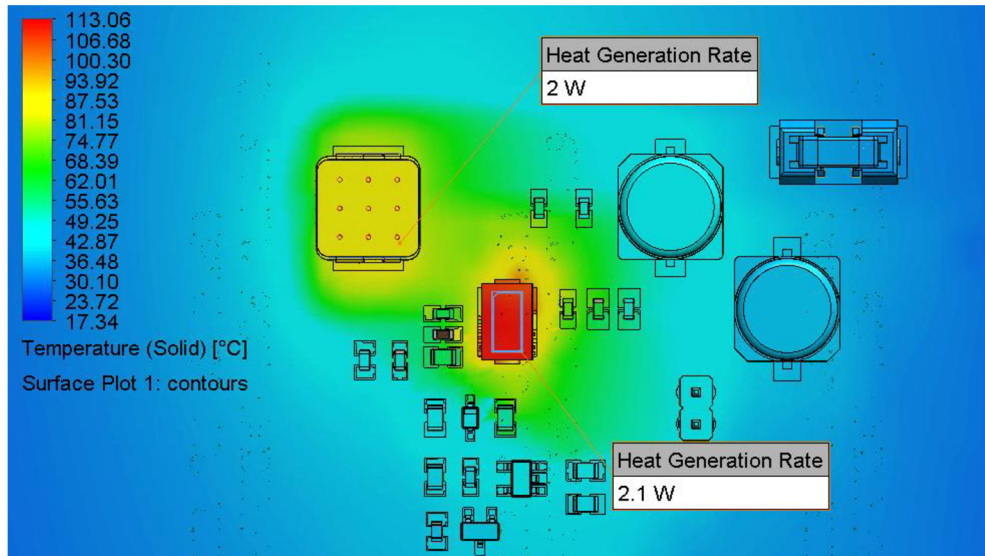
I keď integrovaný obvod LM73606-Q1 zo spodnej strany disponuje chladiacou plôškou, tak celkové straty 2,09 W si z najväčšou pravdepodobnosťou budú vyžadovať dodatočné opatrenia pre dlhodobú teplotnú stabilitu.

Pre vizualizáciu výkonovej straty MPPT regulátoru bol s využitím programu SolidWorks, na základe dát o DPS vygenerovaných z programu Eagle, vytvorený CAD model osadenej dosky plošných spojov tak, ako je to možné vidieť na obrázku 41.



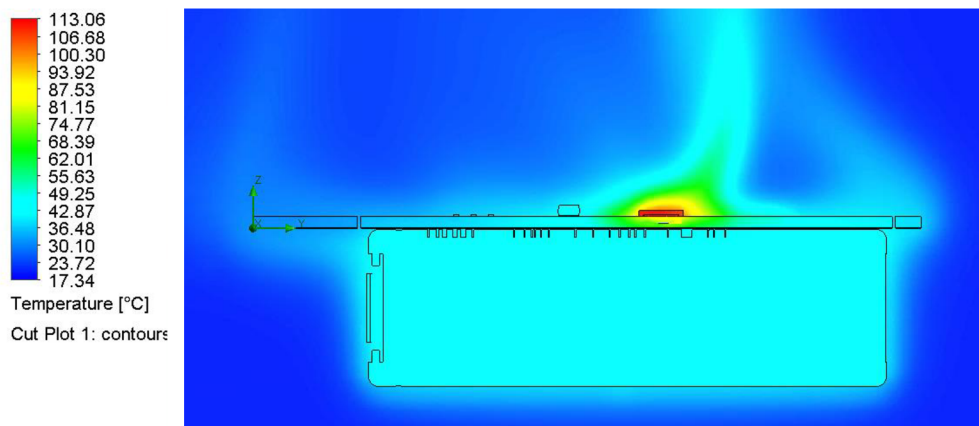
Obrázok 41 CAD model osadenej dosky plošných spojov

Následne bola pomocou modulu Flow Simulation, integrovaného do programu SolidWorks, nastavená simulácia modelu. Medzi niektoré z parametrov patrila okolitá teplota, jemnosť siete, či materiály jednotlivých komponentov. Po vložení stratových výkonov regulátoru a cievky bol prevedený výpočet, ktorý sledoval konvergenciu ich teplôt až do ustálenia v bode, ktorý ukazuje obrázok 42.



Obrázok 42 Predný pohľad na povrch DPS po teplotnej analýze

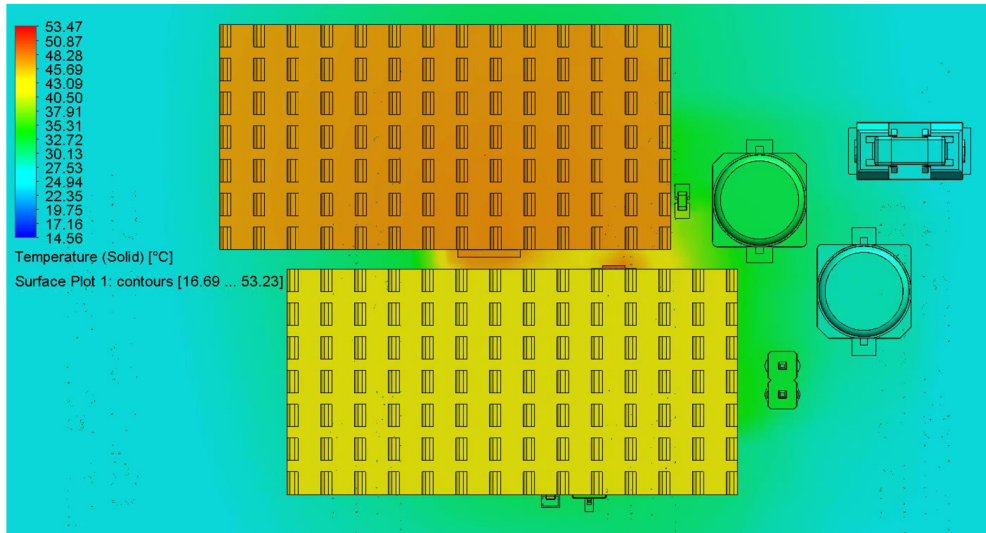
Maximálna teplota 113 °C, alebo aj teplota jej blízka, by mohla nie len poškodiť integrovaný obvod, ale ohroziť bezpečnosť celého zariadenia. Z horizontálneho pohľadu na obrázku 44 je zrejmé, že časť stratového tepla sa uvoľňuje smerom do priestoru, avšak zvyšok sa stráca do dosky plošných spojov. Protiľahlý Li-ion článok síce nie je priamo pod regulátorom, no aj napriek tomu sa ohrieva cez DPS a v simulácii dosahuje teplotu až 49 °C, zatiaľ čo zvyšné články majú 23 °C.



Obrázok 43 Bočný pohľad na prierez DPS po teplotnej analýze

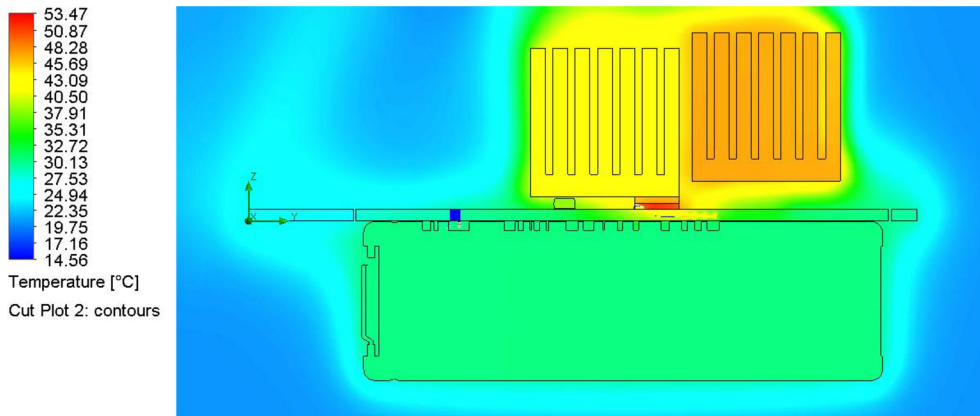
V snahe zvýšiť odvod stratového tepla boli do simulácie pridané dva pasívne chladiče. Rozmery chladičov sú 40 x 20 mm podstava a 20 mm výška, materiál je hliník. Po

prepočítaní výsledkov, ktoré sú zobrazené na obrázku 44 sa teplota integrovaného obvodu znížila na 53 °C, ktoré by ani z dlhodobého hľadiska nemohli pri trvale plnom výkone solárneho panelu poškodiť obvod alebo spôsobiť nebezpečenstvo.



Obrázok 44 Predný pohľad na povrch DPS po teplotnej analýze s chladičmi

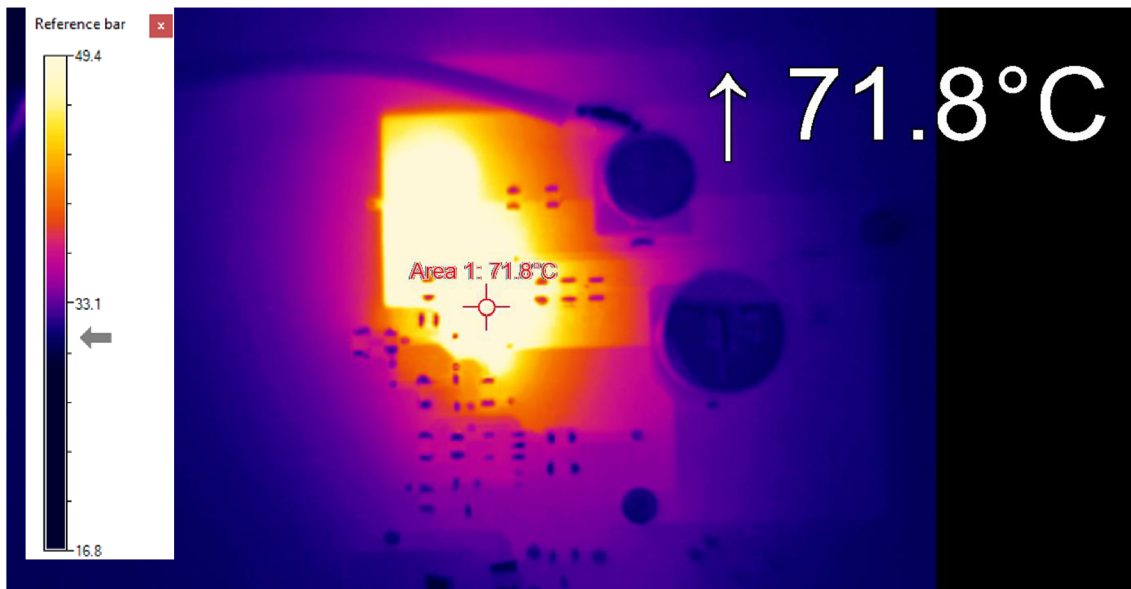
Teplota protiľahlého článku sa znížila na približne 36 °C, čo značí pokles o 13 °C oproti teplote bez aplikovaných chladičov. Vzhľadom na simuláciu bude teplota jedného Li-ion článku počas plného výkonu zariadenia o 13 °C vyššia ako teplota zvyšných článkov (23 °C). Tento teplotný rozdiel by mohol znížiť jeho životnosť, avšak z dlhodobého hľadiska by funkčnosť zariadenia nemala byť ohrozená.



Obrázok 45 Bočný pohľad na prierez DPS po teplotnej analýze s chladičmi

Po odladení teplotného manažmentu MPPT modelu v CAD programe nasledovalo testovanie na fyzickej DPS. Testovacia stanica sa stávala z elektrického zdroja simulujúceho solárny panel, osadenej dosky plošných spojov a z externe pripojeného akumulátora tvoreného 3 sériovo zapojenými články INR21700-P42A, ktoré boli počas testu pripojené na výstup DPS. Výstup zdroja do vstupu MPPT modulu činil 22 V, pričom

výstupný prúd bol postupne škálovaný od 0 po 3,5 A. Po zapnutí zdroja, pred pripojením akumulátora, nadobudlo nezaťažené výstupné napätie 12,44 V (vypočítané 12,45 V). Po pripojení akumulátora výstupné napätie nadobudlo úroveň článkov a vstupné 19,15 V, ktoré sa taktiež nachádza v kolene A-V charakteristiky solárneho panelu zobrazenej na obrázku 27. V prvej fáze testu neboli použité pasívne chladiče, a ako je možné vidieť na obrázku 46, teplota integrovaného obvodu vystúpila na 72 °C, kedy bol test predbežne ukončený.



Obrázok 46 Test MPPT regulátora bez pasívnych chladičov

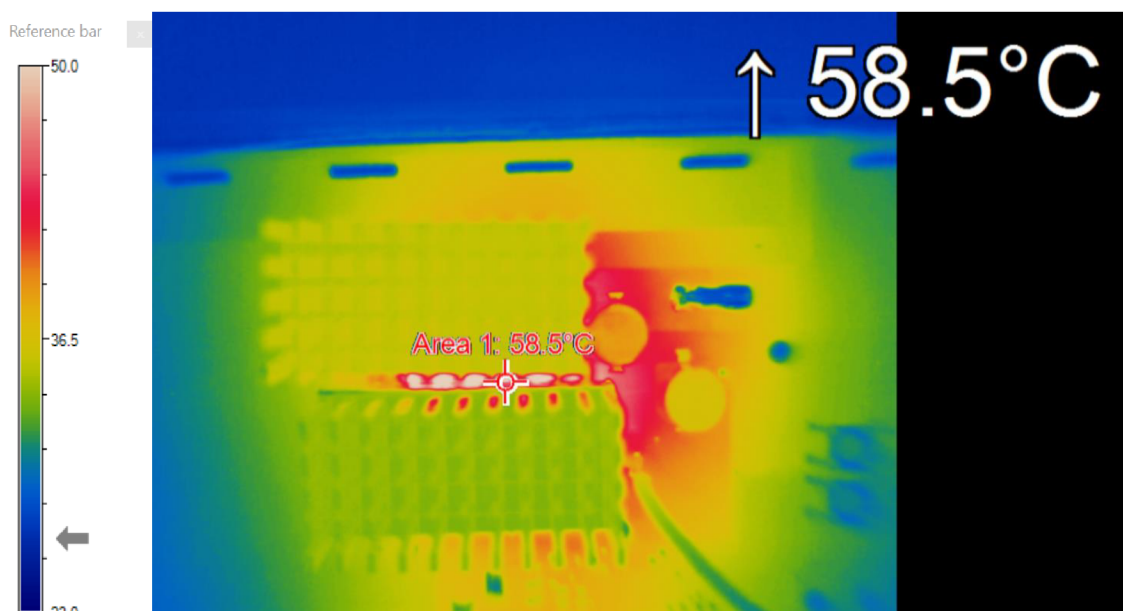
V druhej časti nasledovalo nalepenie pasívnych chladičov a opakovanie testu. Ako je možné vidieť v tabuľke 7, pri maximálnom výstupnom prúde sa teplota po pár minútach ustálila na približne 59 °C.

Tabuľka 7 Výsledky testovania MPPT regulátora

| I_{IN} [A] | U_{IN} [V] | ϑ_{MAX} [°C] |
|--------------|--------------|------------------------|
| 0 | 22 | 23.1 |
| 0.1 | 19.19 | 27.2 |
| 0.5 | 19.19 | 28.6 |
| 1 | 19.21 | 31.2 |
| 1.5 | 19.23 | 35.2 |
| 2 | 19.26 | 41.2 |
| 2.5 | 19.29 | 47.8 |
| 3 | 19.32 | 55.6 |
| 3.5 | 19.33 | 58.8 |

Vďaka drobnej medzere medzi chladičmi, a taktiež jemnému sklonu DPS, dokázala termokamera snímať miesta v tesnej blízkosti oboch testovaných súčiastok tak, ako to je

vidno na obrázku 47. Ustálená teplota o necelých 6 °C vyššia, ako teplota simulovaná, môže byť dôsledkom chyby výpočtu, kde sa napríklad počítalo s konkrétnymi hodnotami $R_{DS(ON)}$, ktoré avšak majú výrobcom povolený určitý rozsah. Ďalej chyby samotnej simulácie, kde vyššia presnosť mohla byť dosiahnutá napríklad podrobnejším nastavením sieťovania (výkonovo a časovo zložitejšia simulácia) alebo podrobnejším nastavením materiálov jednotlivých súčiastok, ktoré boli definované podľa ich majoritnej zložky. Pravdepodobne najväčší vplyv mohol mať samotný fyzický model, v ktorom mohli nastať viaceré chyby. Prvou mohla byť chyba spájkovania, kde by len pomocou röntgenu bolo možné zistiť ako dobre sa uchytila chladiaca ploška zo spodnej strany. Druhou mohla byť chyba presnosti súčiastok, kde je každý, hlavne pasívny komponent vyrobený len s určitou toleranciou. Posledným faktorom ovplyvňujúcim meranie mohla byť samotná presnosť termokamery.

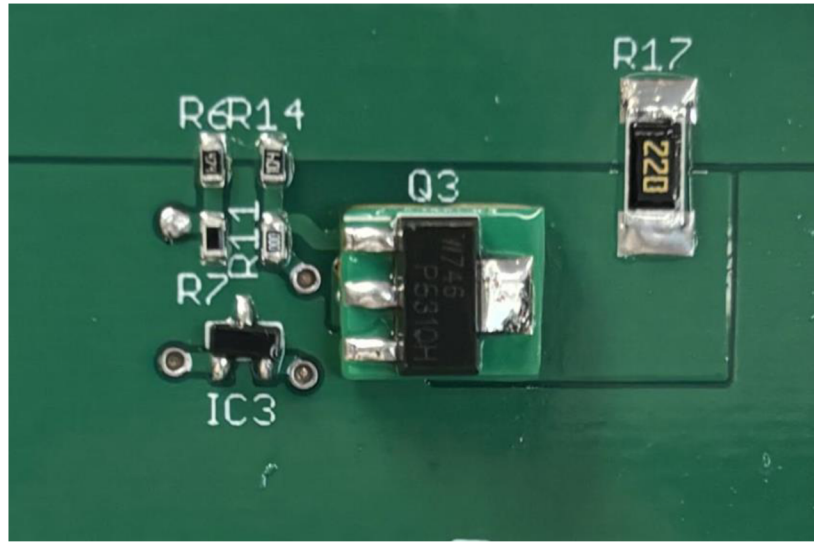


Obrázok 47 Test MPPT regulátora s pasívnymi chladičmi

Maximálna teplota 59 °C by v zariadení zostavenom podľa CAD modulu mohla skrátiť životnosť protiahlého článku. V reálnom zapojení bude optimálna teplota všetkých článkov dosiahnutá ich zapájaním do predpripravených otvorov tak, že sa nebudú priamo dotýkať DPS, ale vznikne medzi nimi vzduchová medzera. Vzduch má nízku teplotnú vodivosť, a preto bude len pár milimetrov priestoru stačiť na zabránenie prenosu stratového tepla. Teplo bude potom môcť prechádzať len cez zapájané kontakty, čo už by nemalo články ovplyvniť.

5.5.2 Balancéry akumulátoru

Počas testovania pasívneho balansovania trojice totožných zapojení primárne pozostávajúcich z PNP tranzistoru, napätového deliča a napätovej referencie TLV431ACDBZR bol odhalený chybný symbol PNP tranzistoru použitý pri návrhu elektrických obvodov. Vzhľadom na výmenu kolektoru a emitoru v zapojení bola navrhnutá a zapájaná redistribučná doska plošných spojov tak, ako to je možné vidieť na obrázku 48.



Obrázok 48 Balancér akumulátoru na DPS

Počas merania bolo nabíjanie článkov simulované škálovaním vstupného napätia z elektrického zdroja, na základe čoho bol sledovaný prúd tečúci obvodom. Ako je možné vidieť z výsledkov zobrazených v tabuľke 8, modul balancéra sa pri dosiahnutí napätia 4,18 V skutočne zopol a začal viesť prúd. K plnému zopnutiu došlo pri vstupnom napätí 4,19 V, čo môže byť dôsledkom odchýlky hodnôt použitých rezistorov.

Tabuľka 8 Výsledky testu pasívneho balansovania

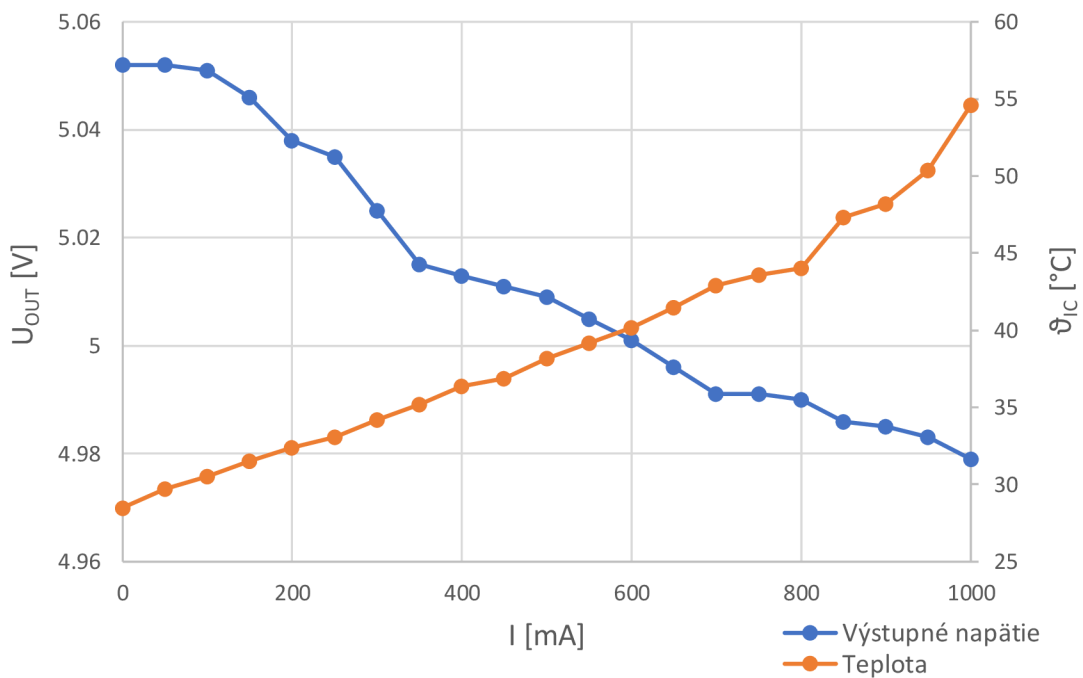
| U_{IN1} [V] | I_1 [mA] |
|---------------|------------|
| 4.16 | 0 |
| 4.17 | 10 |
| 4.18 | 60 |
| 4.19 | 105 |
| 4.20 | 106 |

| U_{IN2} [V] | I_2 [mA] |
|---------------|------------|
| 4.16 | 0 |
| 4.17 | 0 |
| 4.18 | 49 |
| 4.19 | 104 |
| 4.20 | 106 |

| U_{IN3} [V] | I_3 [mA] |
|---------------|------------|
| 4.16 | 0 |
| 4.17 | 11 |
| 4.18 | 72 |
| 4.19 | 107 |
| 4.20 | 107 |

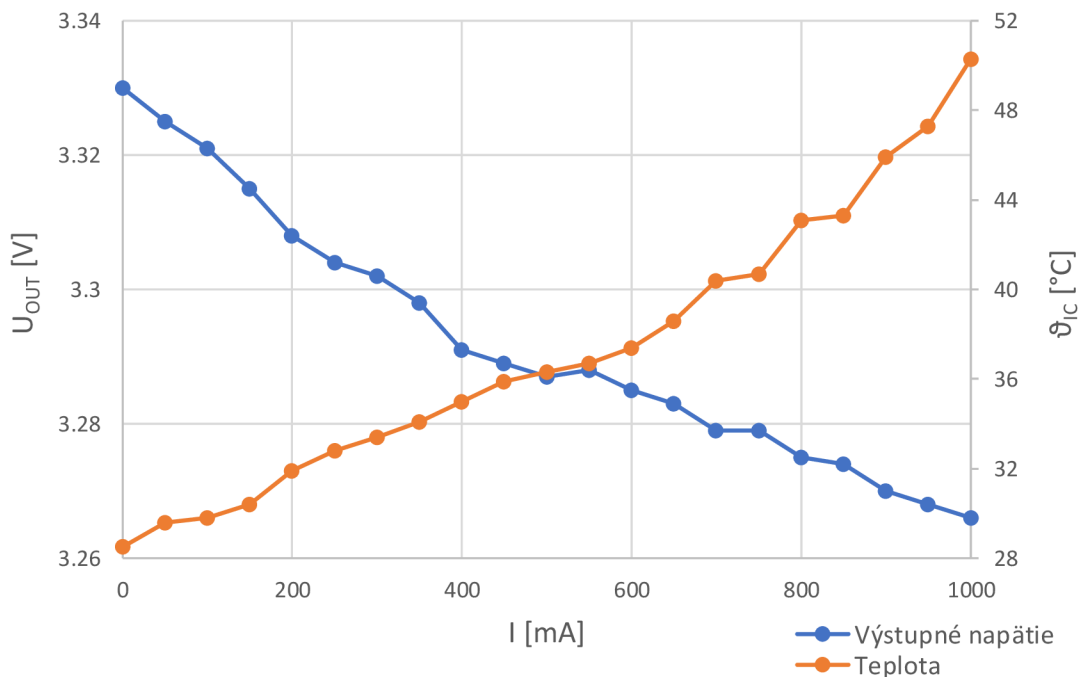
5.5.3 Napätové prevodníky

Oba napätové prevodníky vytvárajúce 5 V a 3,3 V úroveň sú typu TPS629210DRLR. Počas testovania v rámci tejto diplomovej práce bola skúmaná ich teplotná odozva na rôzne úrovne záťaže. Externú záťaž predstavoval potenciometer, vďaka ktorému bolo možné výstupný prúd škálovať od 0 A po 1 A. Teplota bola meraná termokamerou.



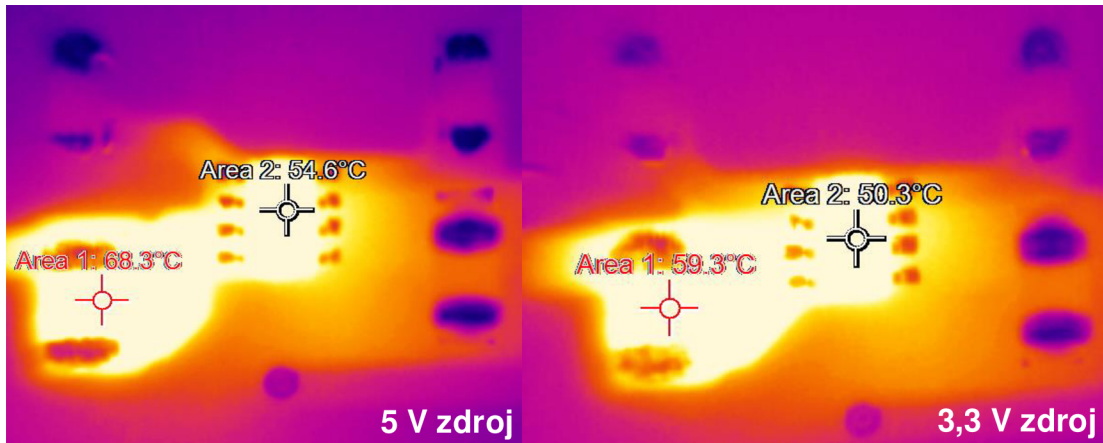
Obrázok 49 Graf závislosti výstupného napätia a teploty 5 V zdroja od prúdu

Ako ukazuje obrázok 49, počas maximálnej záťaže dosiahla teplota 5 V zdroja 55 °C. Predpokladaný prúdový odber sa ale pohybuje len vo vyšších desiatkach miliampérov. Kedy sa integrovaný obvod samovoľne uchladi a vďaka tomu nebude potreba zavádzať dodatočné opatrenia.



Obrázok 50 Graf závislosti výstupného napätia a teploty 3,3 V zdroja od prúdu

Ako ukazuje obrázok 50, počas maximálnej záťaže 3,3 V zdroja dosiahla teplota 50 °C. Testovaný zdroj napája hlavne ESP32, ktorého prúdové odbery budú po väčšinu času do 100 mA. Uvážením dodatočnej spotreby kontrolných LED diód nebude ani pri 3,3 V zdroji potrebné pridávať externé chladiace prvky.



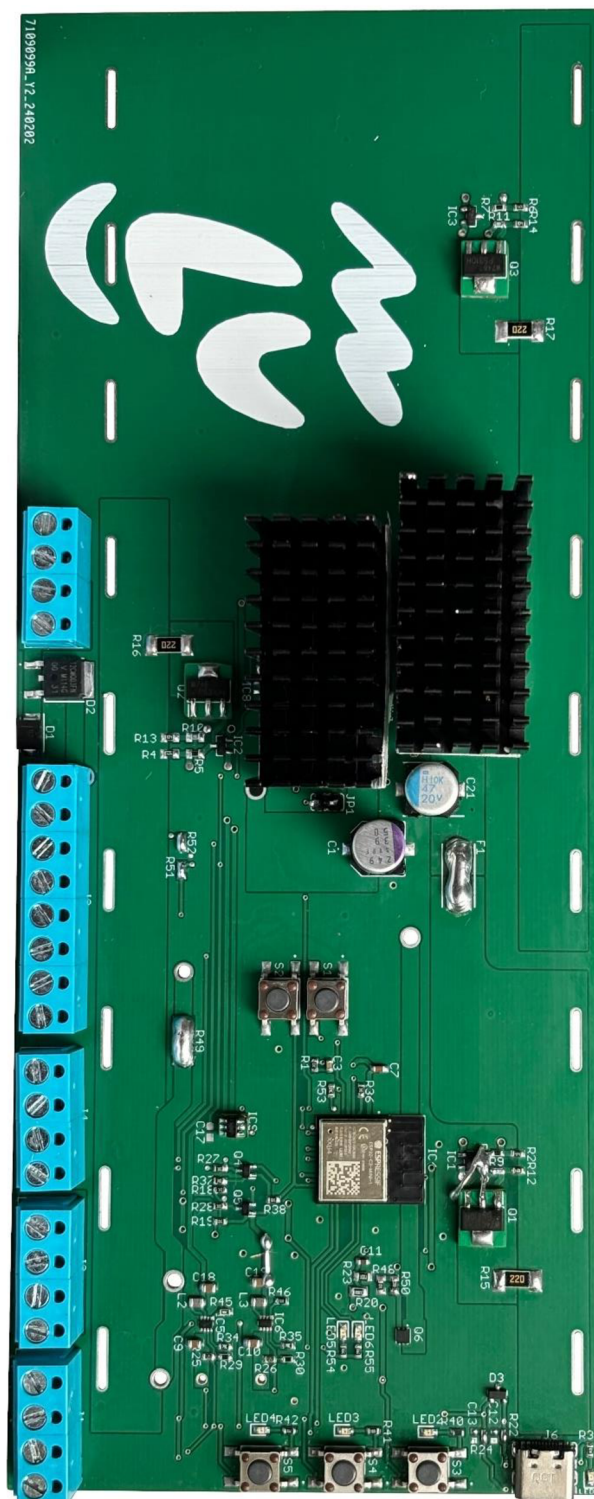
Obrázok 51 Fotka 5 V a 3,3 V zdroja z termokameri pri maximálnej záťaži

Snímanie termokamerou na obrázku 51 taktiež odhalilo, že väčší stratový výkon má v oboch prípadoch použitá cievka. V čase maximálneho výstupného prúdu dosahovala približne o 10 °C vyššiu teplotu než integrovaný obvod, čo by vzhľadom na predpokladané zaťaženie opäť nemalo vytvárať nutnosť pripojenia pasívneho chladiča.

5.6 Finalizácia dosky plošných spojov

Počas testovania elektrických obvodov došlo k niekoľkým úpravám na doske plošných spojov. Prvou, už zmienenou zmenou, bola integrácia pasívnych chladičov na synchronný step-down menič LM73606-Q1 a jeho príslušnú cievku tak, ako to je možné vidieť na obrázku 52. Ďalšou zmenou bola integrácia redistribučných DPS na miesta tranzistorov Q1, Q2 a Q3 z dôvodu presmerovania plošiek na jednotlivé piny. Behom testovania pasívnych balancérov došlo k odtrhnutiu pájivej plôšky spod rezistora R3, čoho následkom bolo externé prepojenie tohto vývodu s výstupom tranzistoru Q1, ako aj s anódou napäťovej referencie TLV431. Redistribučná DPS bola taktiež aplikovaná na tranzistor pod označením IC9, ktorý je umiestnený pod ľavým okrajom ESP32. Dôvodom tejto zmeny bolo vybratie nového integrovaného obvodu splňujúceho predpoklady bezpečného zavlažovacieho systému. Zo zapojenia bola odstránená poistka F1 ktorá, ako bolo zistené počas testovania s termokamerou, zabraňovala prechodu tepla z MMPT bloku ďalej do DPS, čím bola výrazne zvýšená jeho teplota. Namiesto nej bude pridaná poistka na výstup konektoru J2 prepájajúci správu napájania so zvyškom zariadenia skrz spínač. Ak dôjde k skratu, tak roztavením poistky sa odpojí zariadenie od akumulátora, vďaka čomu dôjde k vypnutiu napäťových prevodníkov, následne k vypnutiu ESP32 a uzemneniu GPIO pinu MPPT_EN, ktorý vypne MPPT blok a tým pádom ostane

akumulátor z oboch strán odpojený od zariadenia. Poslednou zmenou bolo prerušenie cesty z výstupu 3,3 V zdroja (IC6) a jeho nahradenie externým prepojením. Dôvodom bolo testovanie 3,3 V vetvy bez nutnosti vypnutia samotného step-down meniča.



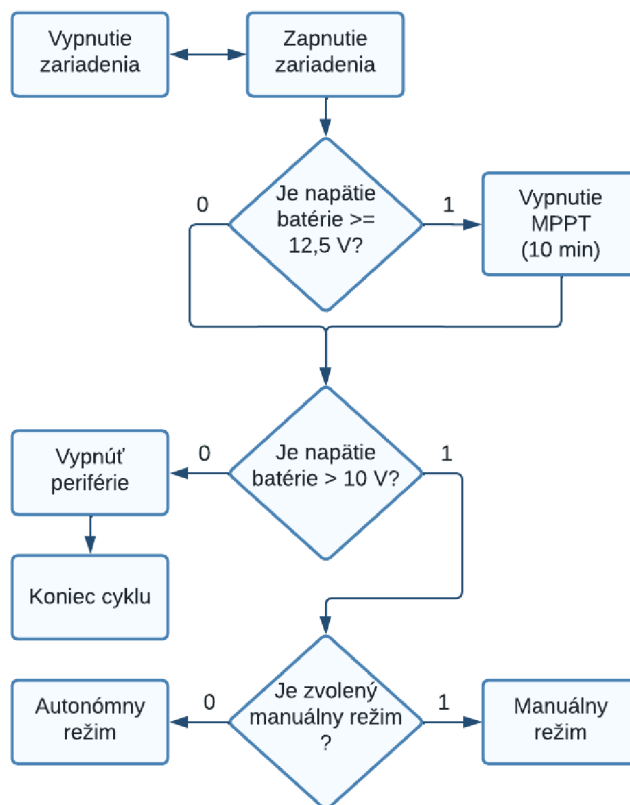
Obrázok 52 Osadená a zapájaná DPS

6. PROGRAMOVANIE

Zvolený mikrokontrolér ESP32 od spoločnosti Espressif Systems je funkčne veľmi flexibilný, vďaka čomu je ho možné programovať viacerými programovacími jazykmi ako napríklad MicroPython či C/C++ vo veľkom počte vývojových prostredí. Vzhľadom na doterajšie skúsenosti bolo pre programovanie zvolené vývojové prostredie Arduino IDE, ktoré využíva prispôbenú syntax a štruktúru jazyka C++.

6.1 Kontrolná časť programu

Jedným z hlavných pilierov návrhu zariadenia je zachovanie bezpečnej prevádzky za všetkých možných okolností. Z pohľadu jednotky solárneho zavlažovania je možné do programu vložiť algoritmy sledujúce kritické parametre, na základe ktorých bude zariadenie rozhodovať o zapnutí alebo vypnutí svojich ďalších častí. Ako je možné vidieť na obrázku 53, po zapnutí zariadenia (zopnutie spínača na konektore J2) algoritmus v každom cykle kontroluje napätie akumulátora. Ak je väčšie ako 12,5 V, tak sa cez uzemnenie GPIO pinu ESP32 na 10 minút vypne MPPT modul. Ak je menšie ako 10 V, tak vypne všetky výstupné periférie. V prípade hodnoty vyššej ako zmienené spodné ohraničenie je na základe zopnutia spínača pripojeného na konektor J4 zvolený režim zariadenia.



Obrázok 53 Kontrolná časť algoritmu

6.1.1 Rozbor zdrojového kódu

Z pohľadu programu sa jedná o loop() funkciu v klasickom syntaxe vývojového prostredia Arduino IDE, ktorá začína vyčítaním hodnoty napätia akumulátoru do globálnej premennej typu float, batt_voltage. Nasledujú dve podmienkové funkcie odzrkadľujúce diagram na obrázku 52. Ak sa splní prvá podmienka, teda napätie bude väčšie ako 12,5 V, tak sa po dobu desiatich minút bude v každom cykle volať funkcia vypínajúca MPPT regulátor. Splnením podmienky o minimálnom napätí bude volaná funkcia mode_declaration(), ktorá sleduje stav spínača a rozhoduje o manuálnom alebo autonómnom móde zariadenia. V opačnom prípade nebude možné prejsť na zvyšok algoritmu a volaním funkcie dev_off() budú všetky periférie vypnuté a cyklus ukončený.

```
void loop() {  
  
    batt_voltage = readBatteryVoltage();  
  
    if (batt_voltage >= 12.5) {  
        MPPT_off();  
    }  
    if (batt_voltage >= 10.0) {  
        mode_declaration();  
    }  
    else {  
        dev_off();  
    }  
}
```

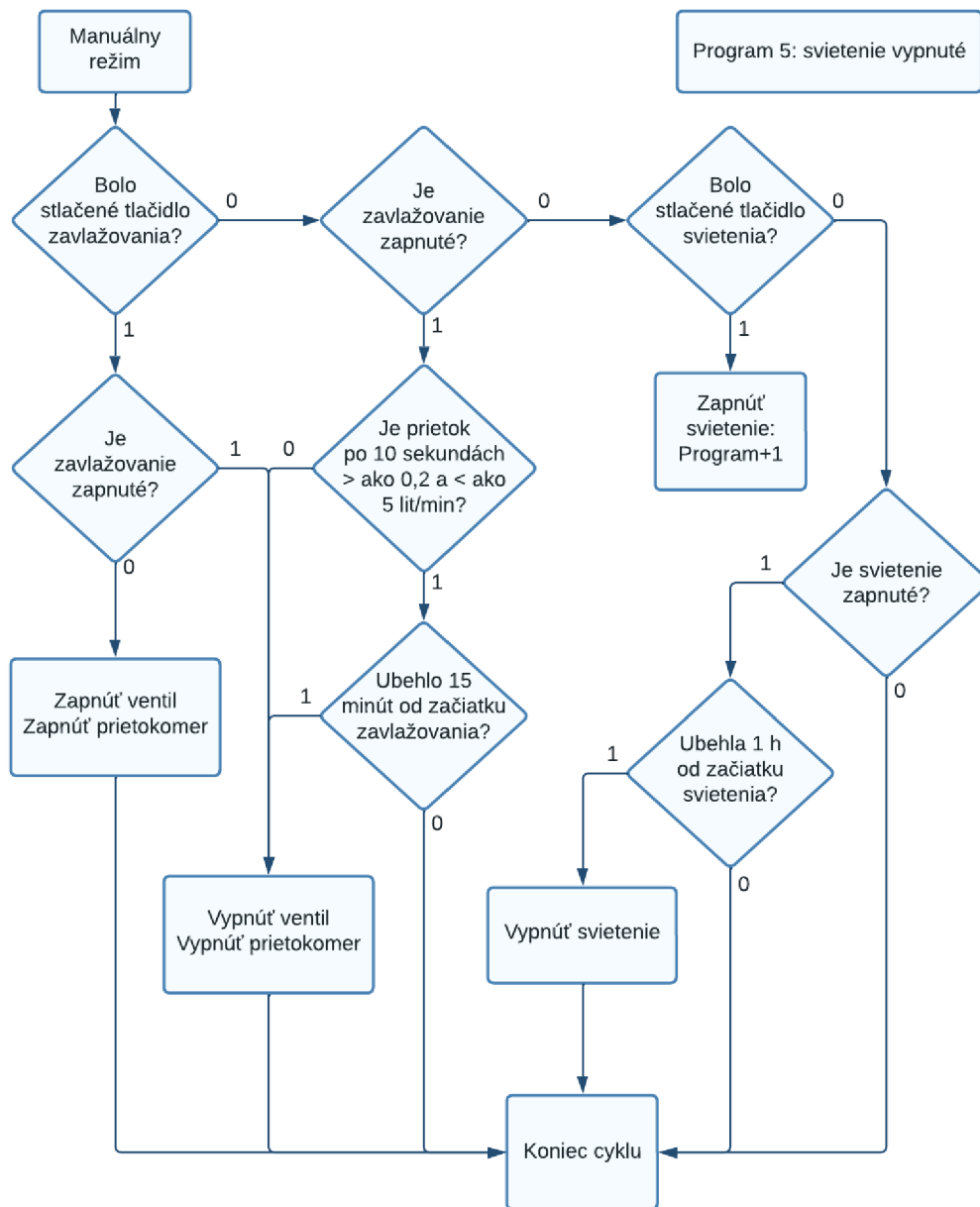
Sledovanie napätia akumulátoru je kľúčovou časťou programu zariadenia, ktorá zabezpečuje celkovú bezpečnosť a znižuje namáhanie jednotlivých článkov. Funkcia readBatteryVoltage() začína definovaním lokálnych premenných a následným čítaním analógovej hodnoty napätia na pine battPin. Ako bolo možné vidieť v popise elektrických obvodov, napätie na tomto pine je znížené deličom v pomere 4:1, preto nasleduje prepočítanie pomocou globálnej premennej conversion_factor_batt. V predposlednom riadku sa nachádza digitálny RC filter, vďaka ktorému je výsledné napätie vyhladené a v poslednom riadku funkciou vrátené.

```
float readBatteryVoltage() {  
    float adc_coef = 0.9;  
    int raw_adc;  
    float raw_voltage;  
  
    raw_adc = analogRead(battPin);  
    raw_voltage = raw_adc * conversion_factor_batt;  
    voltage = (voltage * adc_coef + raw_voltage * (1 - adc_coef));  
  
    return voltage;  
}
```

6.2 Hlavný program

Ak sa cyklus zariadenia dostane do primárnej časti svojej funkcie, tak zariadenie najprv skontroluje, či nebolo stlačené tlačidlo zavlažovania. V prípade pozitívnej spätnej

väzby sa zapne ventil a prietokomer, pričom po desiatich sekundách začne ESP32 periodicky kontrolovať aj prietok vody. Ak bude prietok menší ako 0,2 lit/min alebo väčší ako 5 lit/min, tak sa s najväčšou pravdepodobnosťou niekde v zdroji alebo vo výstupe zavlažovania vyskytla chyba a celý cyklus sa vypne. V opačnom prípade bude ventil a prietokomer zapnutý až do opätovného stlačenia tlačidla alebo do uplynutia prednastaveného času zavlažovania, a to 15 minút. Celý algoritmu je možné vidieť na obrázku 54.



Obrázok 54 Hlavná časť algoritmu

Nasvietenie rastlín bude z dôvodu bezpečnosti (vysoký prúdový odber LED pásu a riziko vypnutia zariadenia) možné zapnúť len v čase vypnutého zavlažovania skleníku. Splnením tejto podmienky sa stlačením tlačidla zapne prvý z piatich prednastavených

programov nasvietenia. Prvý program bude mať pre rastliny najväčší prínos, keďže sa v ňom LED diódy v páse postupne zapnú vo fialovej farbe a ostanú stabilne svietiť po dobu jednej hodiny. Druhý program opäť rozsvieti všetky LED diódy vo fialovej farbe, avšak v móde „dýchania“, čiže ich intenzita sa bude sínusovo v čase zvyšovať a znižovať. V treťom programe je pás rozdelený na 10 rovnakých segmentov, ktoré sa na začiatku pásu rozsvetujú a následne zapínaním a vypínaním LED diód vzniká efekt posunu segmentu až na koniec pásu. Po načítaní celého pásu sa cyklus opakuje. Štvrtý program rozsvieti LED pás do farieb dúhy, ktorá pásom periodicky prechádza. Posledný piaty program všetky LED diódy vypne.

6.2.1 Rozbor zdrojového kódu

Funkcia `manual_mode()` začína zavolaním funkcie `irrigation_control()`, ktorá kontroluje, či nebolo stlačené tlačidlo zavlažovania. Ak bolo, tak globálna premenná typu `bool`, `valveOn`, nadobudne hodnotu `true` a nebude možné zapnúť nasvietenie skleníku. V opačnom prípade sa spustí funkcia `led_control()`, ktorá sníma stav tlačidla a iniciuje zapnutie LED pásu v požadovanom programe.

```
void manual_mode() {
    irrigation_control();

    if (valveOn != true){
        led_control();
    }
    else {
        led_off();
    }
}
```

Vo funkcii `irrigation_control()` je po načítaní lokálnych premenných a prečítaní stavu tlačidla iniciujúceho zavlažovanie vložený prvý `if-else` príkaz, ktorý deteguje zmenu stavu tlačidla na pine `irg_ControlPin` a skrz premennú `irg_en` zapína ventil a prietokomer. Potom nasleduje druhý podmienkový príkaz sledujúci časovú dĺžku zavlažovania, ktorý zavlažovací modul vypne po 15-tich minútach. Ďalšia podmienka ukladá do globálnej premennej `flow` prietok prietokomeru v sekundových intervaloch. Posledný `if` príkaz začne po uplynutí desiatich sekundách od začiatku zavlažovania kontrolovať stav prietoku. Ak prietok presiahne rozmedzie 0,2 až 5 lit/min, tak vypne ventil a prietokomer.

```
void irrigation_control() {

    bool currentButtonStateValve = digitalRead(irg_ControlPin);

    if (currentButtonStateValve == LOW && lastButtonStateValve == HIGH) {
        valveOn = !valveOn;
        if (valveOn) {
            digitalWrite(irg_en, HIGH);
            valveOnTime = millis();
        } else {
            digitalWrite(irg_en, LOW);
        }
    }
}
```

```

}
if (valveOnTime > irgDuration){
    digitalWrite(irg_en, LOW);
    valveOn = 0;
    valveOnTime = 0;
}
if ((millis() - lastFlowMeasureTime >= 1000) ||
    lastFlowMeasureTime == 0) {
    flowmeter_measure();
    lastFlowMeasureTime = millis();
}
if (valveOn && (millis() - valveOnTime >= 10000)) {
    if (flow < 0.2 || flow > 5){
        digitalWrite(irg_en, LOW);
        valveOn = 0;
    }
}
lastButtonStateValve = currentButtonStateValve;
}

```

Prvá časť funkcie `led_control()` opäť skontroluje stlačenie tlačidla, a to zavolaním funkcie `ledButtReading()`, ktorá po jeho stlačení inkrementuje hodnotu globálnej premennej `ledProgramNumber`. Vzhľadom na ňu potom pomocou príkazu `switch` vyberie jeden z programov nasvietenia. Na konci sa príkazom `if` kontroluje ubehnutie času `ledDuration`, po ktorom sa `ledProgNumber` automaticky prepne do programu 5, čiže LED pás sa vypne.

```

void led_control() {
    ledButtReading();
    switch (ledProgNumber) {
        case 1:
            led_program1(strip.Color(255,25,255), 50);
            break;
        case 2:
            led_program2(strip.Color(255,25,255), 12, 10, 250);
            break;
        case 3:
            led_program3(strip.Color(255,25,255), 50);
            break;
        case 4:
            led_program4(25);
            break;
        case 5:
            led_off();
            break;
        default:
            break;
    }
    if ((ledProgramNumber >= 1 && ledProgramNumber <= 4) && millis() -
        lastLedChangeTime >= ledDuration) {
        ledProgramNumber = 5;
    }
    lastButtonState = reading;
}

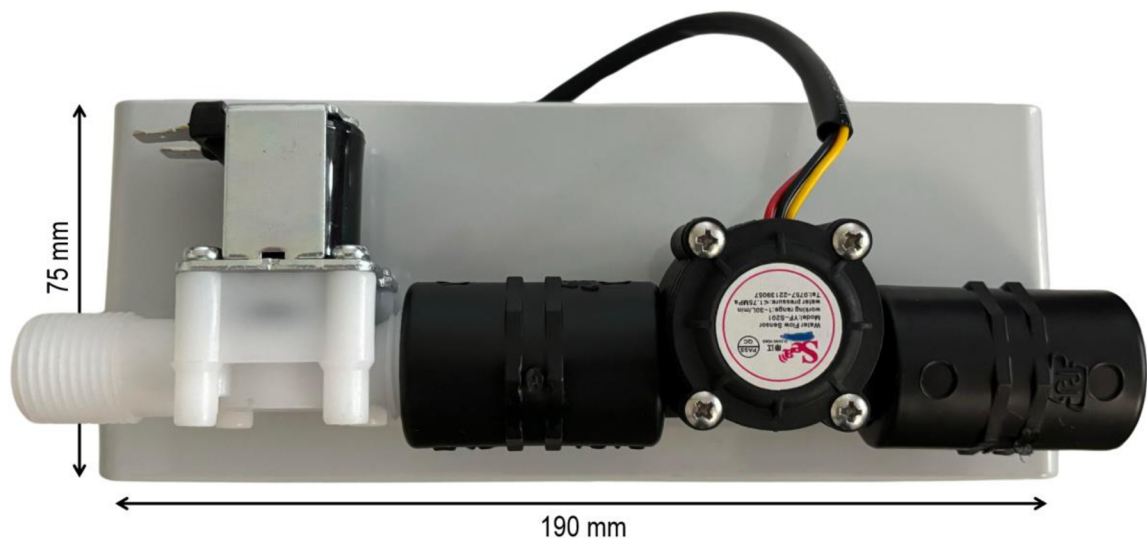
```

7. ZLOŽENIE A INŠTALÁCIA V SKLENÍKU

Po otestovaní funkčnosti elektrických zapojení, ako aj programu zariadenia, bolo vykonané jeho zloženie a inštalácia v skleníku. Základným prvkom finálnej podoby bola zapájaná doska plošných spojov tak, ako ju je možné vidieť na obrázku 52. Zloženie a inštalácia sa ďalej odvíjala od blokovej schémy na obrázku 23, ako aj od ostatných častí štvrtej kapitoly pojednávajúcej a základoch systému solárneho zavlažovania.

7.1 Zloženie zariadenia

Prvou časťou finálneho zariadenia je zavlažovacia jednotka skladajúca sa z prietokomeru a ventilu. Nominálne napätie spínania ventilu je 12 V, prietokomeru 5 V, pričom prietokomer má ešte jeden dátový kábel. Keďže sa zavlažovanie zapína prepojením uzemňovacích káblov so zemou DPS, tak boli z plastového puzdra vyvedené 4 káble. Oba komponenty boli umiestnené v plastovom puzdre, ktoré bolo podľa zdroja vody v skleníku pripevnené na príslušnom mieste. Potrebné bolo taktiež zohľadniť vystavenie puzdra možnému slnečnému žiareniu, a tomu prispôbiť jeho materiál.

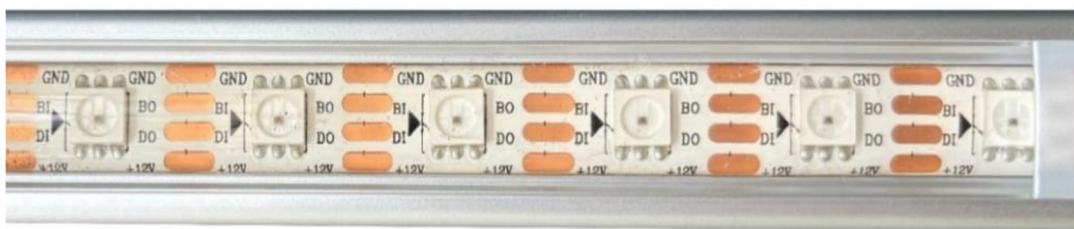


Obrázok 55 Modul zavlažovania

Ako je možné vidieť na obrázku 55, pre modul zavlažovania bolo vybrané plastové puzdro o rozmeroch 190 x 75 x 75 mm. Materiálom je polykarbonát, ktorý sa radí k polymérom a vyznačuje sa najmä dobrou odolnosťou voči UV žiareniu. Na základe štruktúry modulu boli do puzdra z bočných strán vyvrtané dve diery na prechod plastových vývodov a dve menšie diery na prechod káblov. Puzdro disponuje krytím IP65, čiže ochranou proti striekajúcej vode. Avšak, aj kvôli vyvrtaniu dier na bočných stranách, boli kontakty uložené do zmršťovacej bužírky. Ľavá strana ventilu je v tomto zapojení označená ako vstup a pravá strana prietokomeru ako výstup. Ventil aj

prietokomer disponujú otvormi o priemere 1/2". Spojené boli plastovou spojkou s vnútorným závitom, pričom pevnosť spoju dodala aj teflónová páska obmotaná okolo vonkajším závitov a lepidlo na potrubia na báze PVC.

Nasledujúcou časťou zariadenia je štvormetrový LED pás tvorený z LED typu WS2815. Vzhľadom na vlhkosť v skleníku bol zakúpený LED pás s ochrannou fóliou, vďaka ktorej disponuje krytím IP65. Hliníkový profil, ktorý zobrazuje obrázok 56, dodáva zapojeniu mechanickú odolnosť, uľahčuje odvod stratového tepla a vďaka lepivej vrstve zo zadnej strany zjednodušil koncovú implementáciu do priestorov skleníku.



Obrázok 56 LED pás v hliníkovom profile

Pre minimalizáciu strát na vedení bol pre inštaláciu solárneho panelu zvolený a zakúpený medený kábel s prierezom 4 mm². Na obrázku 57 je možné vidieť 10 metrov červeného (+) a čierneho káblu (-) pripojených na panel skrz pár solárnych konektorov MC4. Na obrázku je taktiež vidieť otvory po stranách profilu, ktoré boli využité na prichytenie panelu v koncovej aplikácii.



Obrázok 57 Solárny panel zo zadnej strany

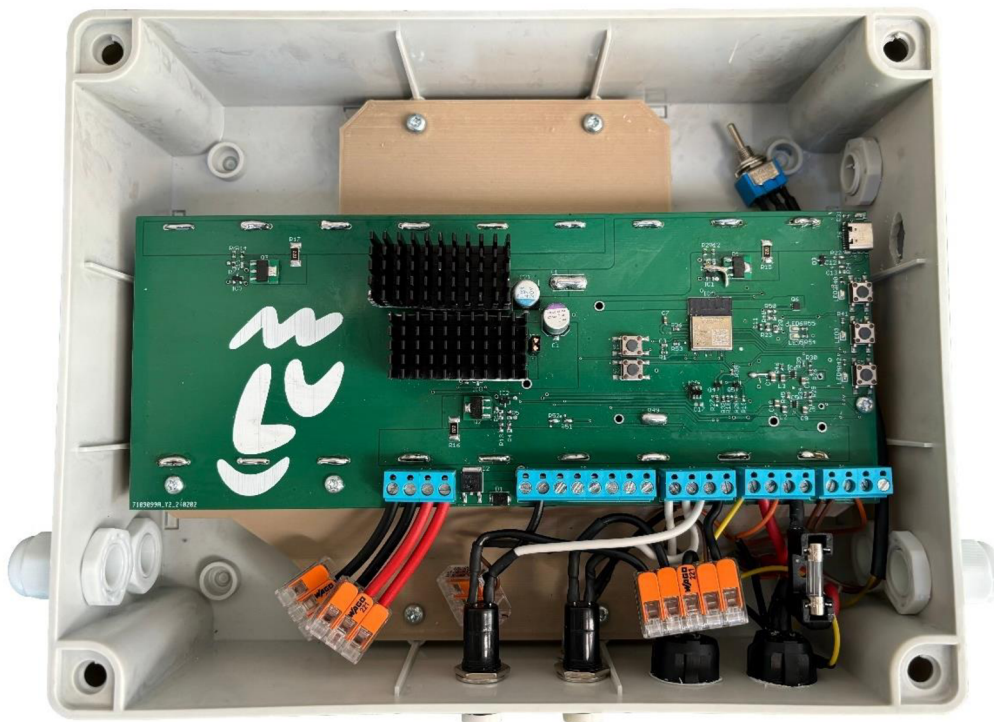
Hlavnou časťou zariadenia je plastové puzdro disponujúce osadenou DPS s príslušnými tlačidlami, spínačmi a konektormi umožňujúcimi pripojenie a ovládanie vonkajších periférií. Okrem rozmerov korešpondujúcim s rozmermi DPS (227 x 90 mm), bol počas výberu puzdra dôraz kladený aj na stupeň ochrany krytia pred vonkajšími vplyvmi, ako aj na samotný materiál.

V prvom kroku zloženia zariadenia boli do DPS pripájané jednotlivé články tak, ako je to možné vidieť na obrázku 58. Dôležitá bola vzduchová medzera aspoň 2 mm, vďaka ktorej bude znížený prenos tepla z MPPT bloku do protiľahlých článkov.



Obrázok 58 DPS s článkami z bočnej strany

Nasledovalo zapojenie DPS do plastového puzdra tak, ako to ukazuje obrázok 59. Pre zariadenie bolo vybrané plastové puzdro s rozmermi 240 x 190 x 90 mm. Avšak rozmerovo vyhovujúce puzdro je vyrobené z materiálu ABS, čiže miesto koncovkej aplikácie musí byť chránené pred priamym slnečným žiarením. Prispieva k tomu aj fakt, že puzdro disponuje priehľadným vrchným krytom z polystyrénu, ktorý na jednej strane umožní rýchlu vizuálnu kontrolu, no pri dlhodobom vystavení slnečnému žiareniu by mohlo nepriaznivo pôsobiť na vnútorné zapojenie. Po stranách krabičky je možné vidieť päť káblových priechodiek s krytím IP66, vďaka čomu do zariadenia neprenikne vlhkosť. V súvislosti so svorkovnicami na DPS, popísanými na obrázku 39, budú priechodky na ľavej strane použité na pripojenie solárneho panelu, spodné priechodky na pravej strane na pripojenie zavlažovacieho modulu a vrchná priechodka na LED pás. Solárny panel bude potom k DPS pripojený cez dvojicu WAGO svoriek, ktoré prepoja 4 mm² káble z panelu vždy s dvoma 2,5 mm² káblami spojenými so svorkovnicou. Pod DPS je taktiež možné vidieť hnedú upínaciu fixtúru, ktorá bola navrhnutá v CAD programe a vytlačená na 3D tlačí. Upínacia fixtúra predstavuje prepojenie medzi puzdrom a DPS. Zo spodnej strany je pomocou ôsmich šróbov M3,5 prichytená k puzdru, zatiaľ čo DPS je na ňu prichytená 3 šróbami M3, ktoré je taktiež možné vidieť na vrchnej strane dosky. V pravom hornom rohu obrázku 59 sa nachádza aj trojpolohový prepínač, na ktorý sú pripojené 3 vodiče. Stredný vodič je cez konektor J2 pripojený na 12 V priamo z akumulátora, pričom bočné vodiče sú skrz konektor J1 pripojené na piny BUTT_1 a BUTT_2. Ak u synchronných step-down meničov na 3,3 V a 5 V dôjde k aktivácii funkcie UVLO, tak ich následné odblokovanie prebehne prepnutím prepínača do jednotlivých polôh a späť. Na spodnej strane je potom možné vidieť poistku a jednotlivé spínače a tlačidlá umožňujúce ovládanie zariadenia.



Obrázok 59 DPS zapojená v plastovom puzdre

Spínače a tlačidlá je taktiež možné vidieť na obrázku 60. Z pravej strany na ľavú sa na puzdre najprv nachádza spínač, ktorý prepojí správu napájania so zvyškom DPS, čiže jeho zopnutím z OFF na ON je možné zariadenie zapnúť a následne vypnúť. Po zapnutí sa taktiež rozsvieti paralelne zapojená LED dióda. Zopnutím druhého spínača (A) si môže užívateľ zapnúť autonómny režim, jeho rozopnutím režim manuálny. V súčasnej fáze vývoja je dostupné manuálne ovládanie. Stlačením prvého tlačidla so symbolom kvapky vody je na 15 minút zapnuté zavlažovanie, čo je opäť možné vizuálne skontrolovať rozsvietením paralelne zapojenej LED diódy. Posledné tlačidlo so symbolom svetla rozsvieti LED pás, pričom jeho opakovaným stláčaním je možné prepínať medzi jednotlivými programami.



Obrázok 60 Bočný pohľad na zariadenie

7.2 Inštalácia v skleníku

Inštalácia spočívala v umiestnení, upevnení a prepojení častí zariadenia do vnútorných alebo vonkajších priestorov skleníku. Pričom dôraz bol kladený na postupné overovanie funkčnosti jednotlivých blokov.

Prvým inštalovaným zariadením bol solárny panel, kde bolo pôvodným zámerom jeho umiestnenie na strechu budovy otočenej skoro presne na západ. Avšak kvôli veľkému rozostupu nosných priečok, ktoré by si vyžadovali ďalšiu investíciu do objemnej nosnej základne, a taktiež s ohľadom na možnosti vonkajších priestorov LUSK-u, bolo pre súčasnú inštaláciu zvolené miesto vedľa skleníku otočené približne na juh.



Obrázok 61 Umiestnenie solárneho panelu

Ako je možné vidieť na obrázku 61, solárny panel bol pripevnený na plot objektu. Z vrchnej strany bol pomocou sťahovacích pásov a otvorov v plechu prichytený priamo na plot, zatiaľ čo zo spodnej strany bol podopretý drevenou konštrukciou, ktorá jeho sklon zväčšila približne na 45°, čo predĺži čas aktívnej výroby elektrickej energie. Jeho geografická lokácia potom v letných mesiacoch umožňuje nasvietenie od približne 7:00 ráno do 17:00 poobedného času. Solárne káble boli kvôli bezpečnosti umiestnené do špirálovitej hadice a následne cez vyvrtaný otvor v stene budovy pretiahnuté do vnútorných priestorov.

Druhým inštalovaným zariadením bola jednotka zavlažovania skladajúca sa z modulu zavlažovania zobrazeného na obrázku 55 a hadice s tryskami. Na rozdiel od počiatočného návrhu na obrázku 8, kde by pozdĺž skleníku viedla jedna hadica po vrchnej priečke miestnosti, boli nainštalované dve paralelne idúce hadice po bočných priečkach viditeľných aj na obrázku 1. Táto zmena priniesla dvojnásobné množstvo vyprodukovanej hmly, ako aj vyššie pokrytie priestoru a väčšiu možnosť modifikácie smerovania trysiek buď priamo na rastliny alebo mimo rastlín – do voľného priestoru. Plocha skleníku s rastlinami má na dĺžku približne 14,5 metra, z toho dôvodu boli použité dve 15 metrov dlhé hadice a jedna prepojovacia hadica natiahnutá cez strop skleníku.

V prvom kroku bol nainštalovaný zavlažovací modul, ktorý je možné vidieť na obrázku 62. V skleníku sa nachádza jeden vývod vody vytvorený priamo pre budúce stropné trysky, čiže finálne umiestnenie bolo týmto faktorom dopredu dané. Trasa vody začína na manuálnom uzávery s červenou bodkou v ľavej spodnej časti obrázku, postupuje cez nefunkčný časovač, ktorý bol nainštalovaný pri prvom pokuse a vytvorenie stropného zavlažovania pred niekoľkými rokmi, ktorý je trvalo zopnutý. Časovač bude v zapojení ponechaný, pretože jeho vstup je kompatibilný s výstupom uzávera a na výstupe má 1/2" závit, čo zjednodušuje pripojenie zavlažovacieho modulu. Prepoj je potom sprostredkovaný hadicou s priemerom 1/2", ktorá sa pripája do boxu pomocou rýchlospojky. Výstup z boxu je taktiež prevedený rýchlospojku zavlažovacej hadici sivej farby vedúcej k jednotlivým tryskám. Na obrázku je taktiež možné vidieť dva káble, ktoré vystupujú zo spodnej strany boxu, ďalej prechádzajú cez škáru v upevnení oceľového nosníku a v jeho vnútornom záhybe pokračujú až k zariadeniu.



Obrázok 62 Nainštalovaný zavlažovací modul

Následne bolo natiiahnutých 38 metroch hadice a nainštalovaných 15 trysiek. 7 z nich na vnútornej strane skleníka a 8 na vonkajšej. Zavlažovanie začína prvou tryskou na ľavej strane obrázku 63, pred ktorou sa na stĺpe nachádza pripojenie na vodu. Potom hadica pokračuje postupne až na koniec skleníku, kde nasleduje premostenie cez strop a hadica natiiahnutá späť. Trysky boli inštalované v šachovnicovom vzore, čiže medzi dvoma tryskami na jednej strane je vždy jedna tryska na strane opačnej. Obrázok 63 taktiež ukazuje zavlažovanie v zapnutom stave. Kedy je možné pozorovať, že niektoré trysky, napríklad prvá na ľavej strane, smerujú priamo na rastliny. Tryska na strane protiľahlej pod sebou, kvôli prestupu svetla skrz sklenenú stenu, rastliny zväčša nemajú, a z toho

dôvodu sú nastavené v smere do priestoru. Z obrázku 63 sa môže zdať, že trysky na ľavej strane produkujú väčšie objemy vody. Avšak tlak vody v rozvodoch skleníku je dostatočný pre zapnutie všetkých trysiek s rovnakým výstupným objemom, pričom voda z trysiek na ľavej strane je viac viditeľná len vďaka prechodu slnečného žiarenia cez strechu budovy v čas vytvorenia fotografie.



Obrázok 63 Nainštalované a zapnuté trysky

Ako ukazuje obrázok 64, trysky sa skladajú z „T“ spojky na pripojenie hadice, kolenového uchytenia a šróbovacej hlavice. Kolenové uchytenie potom dovoľuje natočenie trysky do požadovaného smeru a šróbovaciu hlavicu je možné v prípade upchatia výstupu odmontovať a vyčistiť buď od vodného kameňa alebo aj od fyzických častí. Počas testovania funkčnosti bol nameraný výstupný objem jednej trysky na úrovni približne 100 ml vody za jednu minútu, z čoho vyplýva celkový prietok 1,5 litra vody za minútu u 15-tich trysiek. Množstvo trysiek, ich rozmiestnenie a nasmerovanie bolo pred inštaláciou konzultované a odsúhlasené zamestnancami skleníku.



Obrázok 64 Zapnutá tryska z blízka

Nasledujúcou časťou inštalácie bol 4 metrový LED pás situovaný na dva nosné stĺpy v strede skleníku tak, ako to ukazuje obrázok 65. Nosné stĺpy sú vzdialené približne 2,5 metra. Prepojovacie káble boli natahnuté pozdĺž vrchnej priečky podobne, ako pri zavlažovacom module. Z dvoch metrov pásu na každom stĺpe je jeden meter nalepený vertikálne a jeden pod určitým uhlom. Na nosnej priečke medzi nimi, a taktiež na stole pod nimi, sú zavesené alebo položené rastliny citlivé na dostatočné objemy slnečného žiarenia.



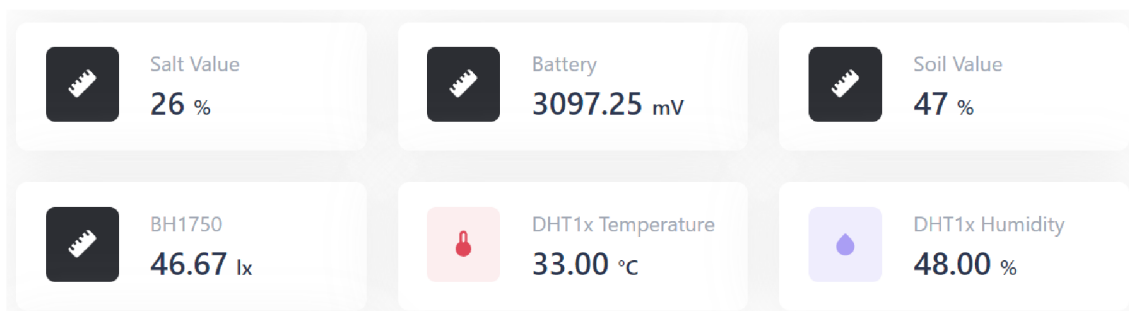
Obrázok 65 Vypnutý LED pás

Posledným výstupným blokom nainštalovaným do priestorov skleníku je meranie vlastností prostredia, ktoré je sprostredkované bezdrôtovým meračom T-Higrow od spoločnosti LilyGo, o ktorom pojednáva podkapitola 2.2. Na obrázku 66 je zobrazené umiestnenie merača T-Higrow v ochrannom puzdre.



Obrázok 66 Bezdrôtový merač T-Higrow a zobrazenie výstupného panela

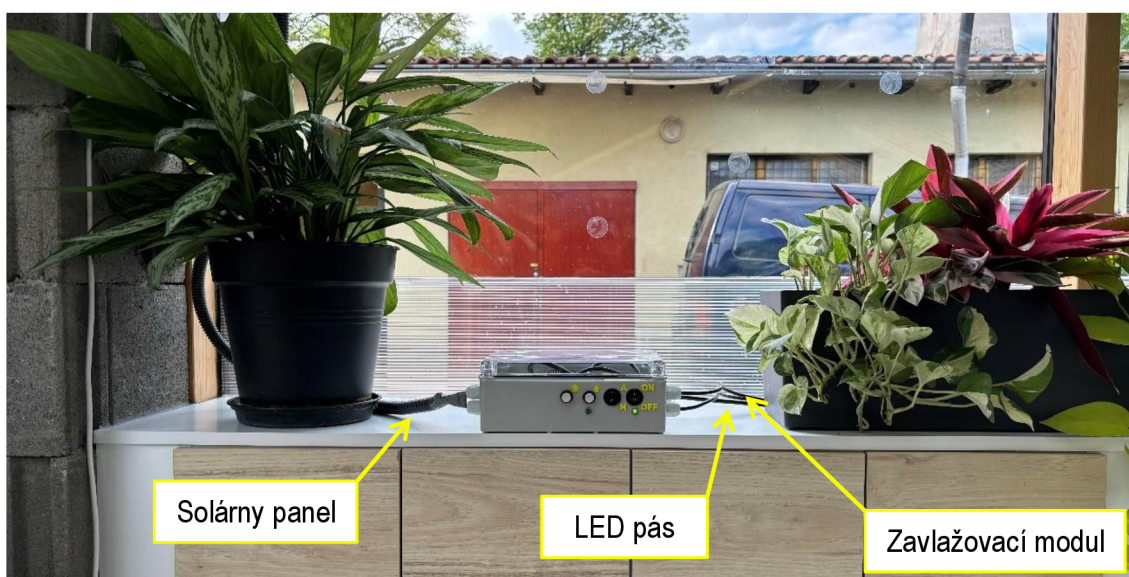
T-Higrow si po zapnutí vytvorí lokálnu Wi-Fi sieť, na ktorú sa používateľ pripojí a následným zadaním IP adresy do webového prehliadača si je schopný prezrieť jednotlivé parametre prostredia. Počas merania a odosielania dát sa zvyšuje spotreba z 200 mAh akumulátora, ktorý v tejto konfigurácii umožní približne 2 h prevádzky. Pre predĺženie aktívneho času bolo výrobcom do bočnej strany implementované tlačidlo, ktorého stlačením sa zariadenie prepne do light spánku, čo minimalizuje úbytok energie na akumulátore. V prípade potreby kontinuálneho merania je možné do protiahlej bočnej strany zapojiť USB-C kábel.



Obrázok 67 Ukážka webového rozhrania

V ukážke z webového rozhrania na obrázku 67 vidno, že T-Higrow meria okrem napätia akumulátora aj parametre prostredia ako vlhkosť pôdy a vzduchu, teplotu v miestnosti či osvetlenie v bode umiestnenia.

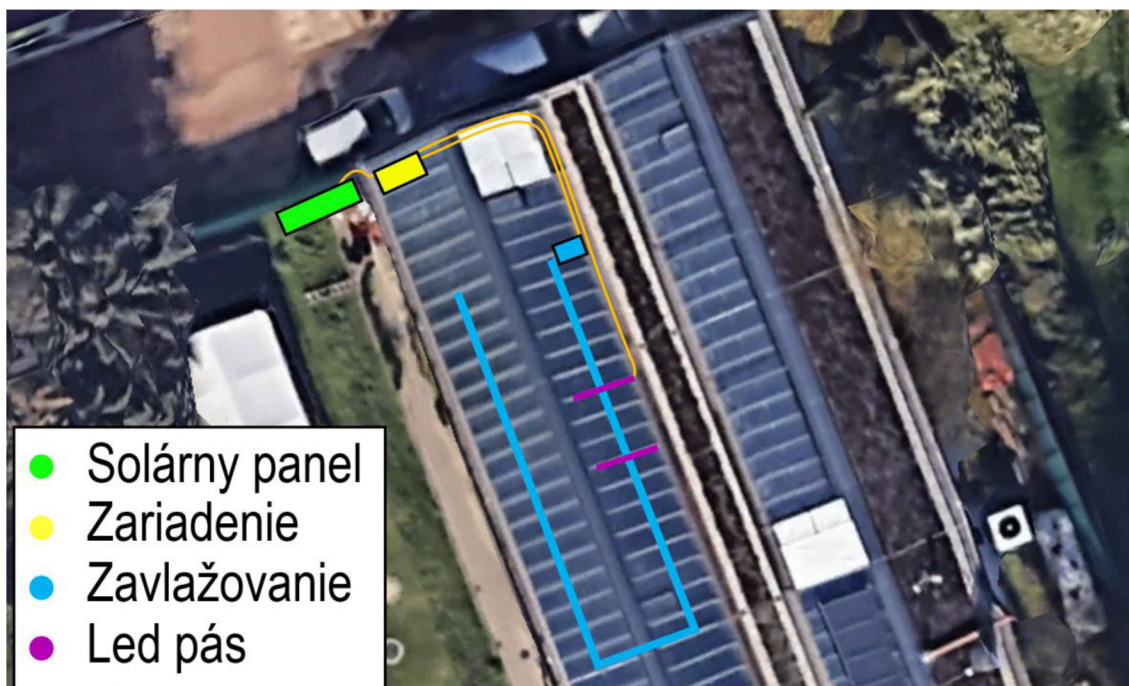
V poslednej časti inštalácie bolo zariadenie umiestnené do priestorov skleníku a prepojené so všetkými výstupnými perifériami podľa návrhu v blokovej schéme v kapitole 4.1.



Obrázok 68 Zariadenie zapojené v skleníku

Ako je možné vidieť na obrázku 68, zariadenie bolo umiestnené na koniec miestnosti skleníka tak, že za stenou po jeho ľavej strane sa nachádza solárny panel. Vzájomná vzdialenosť zhruba 2 metre minimalizuje straty na vedení. Medzi aktívnou plochou skleníku, v ktorej sú umiestnené rastliny a miestom inštalácie zariadenia sa nachádza priestor so šírkou 3,2 metra vyplnený skrinkami, lavicami a stolmi určenými pre výuku jednotlivých krúžkov. Vďaka vzdialenosti od trysiek nebude zariadenie ohrozené vlhkosťou, a keďže sa v tomto priestore nenachádzajú rastliny, tak býva po väčšinu času z vrchnej strany prekrytý strešnými zatemňovacími roletami, ktoré znižujú teplotu okolitého vzduchu. Blízkosť k výuke zas umožní účastníkom jednoducho zapínať zavlažovanie, či vo večerných hodinách zimných mesiacov nasvietenie rastlín. Na obrázku 68 už taktiež vidieť aj všetky káble vstupujúce a vystupujúce zo zariadenia. Celková dĺžka nainštalovaného káblu 4 mm² zo solárneho panelu do zariadenia činila 2 x 4,5 metra, 3 x 2,5 mm² kábel z LED pásu do zariadenia činil približne 25 metrov a dva káble 2 x 2,5 mm² zo zavlažovacieho modulu okolo 10 metrov.

Pre vizualizáciu približného umiestnenia solárneho zavlažovacieho systému bol vytvorený obrázok 69. Na obrázku sa nachádza rozmiestnenie jednotlivých častí v Lužaneckom skleníku. Z ľavej strany na pravú je najprv vidieť zelený blok predstavujúci solárny panel a vedľa neho hlavné zariadenie. Pozdĺž budovy sú umiestnené dva modré pásy predstavujúce zavlažovacie hadice, ktoré sú na konci skleníku skrz strop prepojené. Kolmo na zavlažovacie hadice sú umiestnené dve paralelne súbežné fialové čiary predstavujúce LED pás. Na obrázku sú tmavo žltou farbou vidieť aj elektrické káble natiahnuté v priestoroch skleníku.



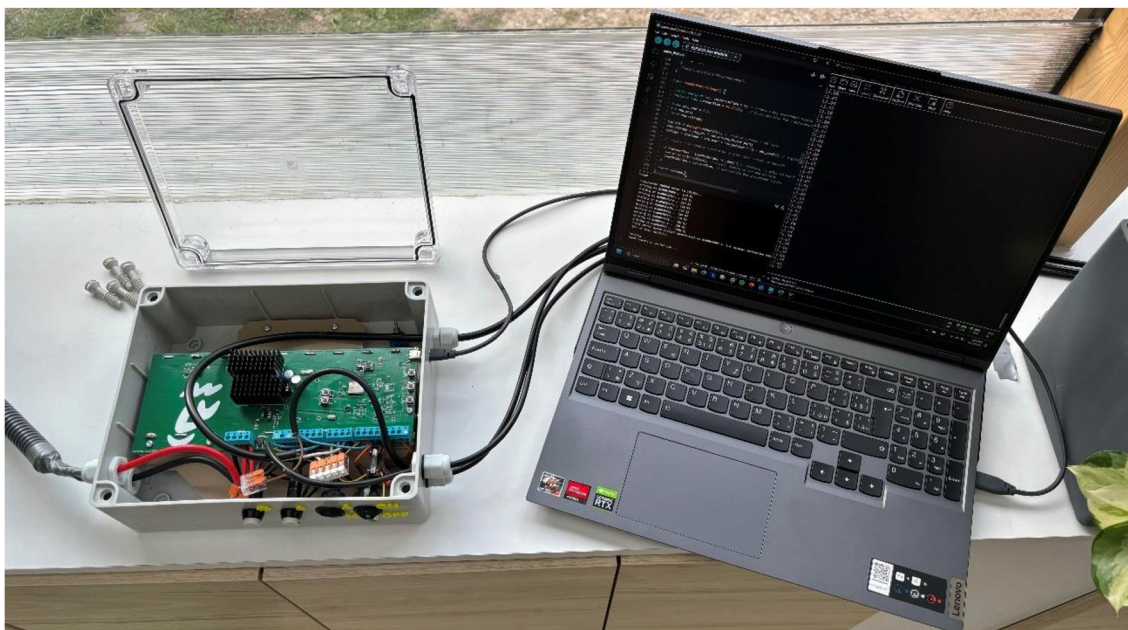
Obrázok 69 Pohľad na skleník z vrchu [50]

8. TESTOVANIE ZARIADENIA

Osadením navrhnutej dosky plošných spojov, nainštalovaním celého zariadenia do priestorov Lužáneckého skleníku a overením jeho funkčnosti z pohľadu elektrických obvodov a činnosti výstupných periférií bola skontrolovaná základná funkčnosť zavlažovacieho systému. Pre overenie všetkých vlastností, ako napríklad ochrana pred prebitím akumulátora alebo ochrana zavlažovania boli v priestoroch skleníku vykonané potrebné testy.

V prvom teste bol meraný jeden cyklus nabíjania akumulátora. Celkový čas by mal korešpondovať s časom vypočítaným v kapitole o predpokladoch energetickej náročnosti systému, a to približne 100 minút. Druhý test overil funkčnosť zdrojového kódu a k nemu prislúchajúcich elektrických obvodov zabezpečujúcich správny napäťový rozsah akumulátora. Merané napätie by sa malo pohybovať v intervale od 10 V do 12,5 V. Nasledujúci test sa zameriaval na LED pás, kde prebehla kontrola svietenia jednotlivých programov, a taktiež kontrola napäťovej odozvy akumulátora na prúdové zaťaženie. Štvrtý test overil odozvu zariadenia na dáta z prietokomeru o nízkom a vysokom prietoku podľa navrhnutého algoritmu z kapitoly šesť. V poslednom teste bolo zopakované meranie klimatických podmienok v priebehu jedného dňa tak, ako to bolo prevedené aj pred nainštalovaním solárneho zavlažovacieho systému.

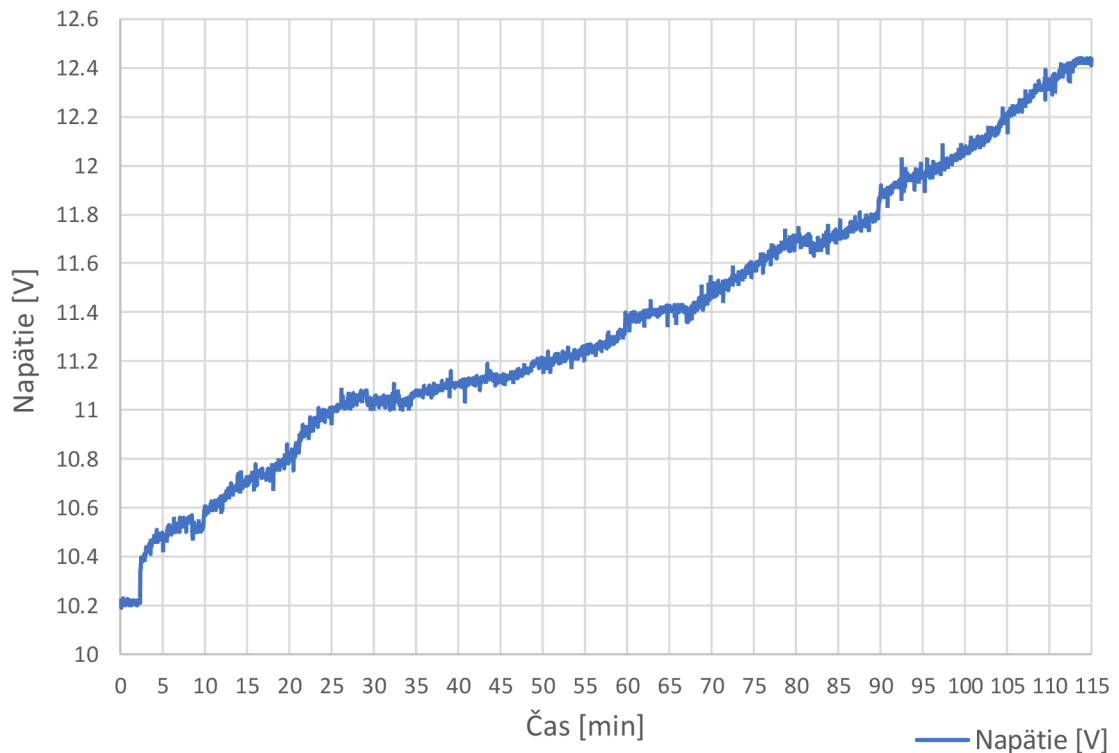
Testovanie prebiehalo na zapojení zobrazenom na obrázku 70, ktoré pozostávalo zo samotného zariadenia a notebooku. Zariadenie vykonávalo zdrojový kód v ktorom meralo, vyhodnocovalo a následne posielalo dáta cez sériovú linku do USB-C konektoru, vedľa ktorého na obrázku 70 svieti LED dióda naznačujúca prepojenie s notebookom.



Obrázok 70 Testovacia stanica

8.1 Test cyklu nabíjania

Cyklus nabíjania značí čas, za ktorý sa akumulátor nabije z minimálnej na maximálnu hodnotu, čiže z 10 V na 12,44 V. V kapitole o energetickej sebestačnosti systému bol tento čas vypočítaný na 100 minút, pričom uvažovaná bola kapacita článku 3300 mAh. Táto kapacita bola viazaná k najnižšiemu povolenému napätiu článku v zariadení, a to 3,33 V (10 V akumulátor). Minimálne napätie bolo dané s ohľadom na výstupné periférie.

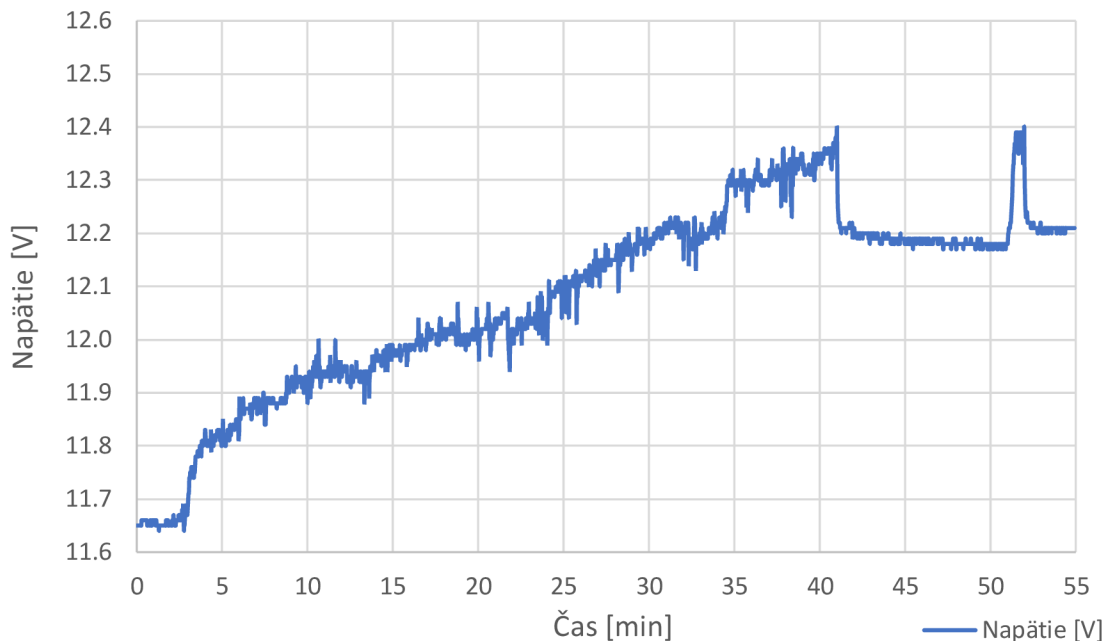


Obrázok 71 Graf závislosti napätia akumulátora od času, test cyklu

Ako ukazuje obrázok 71, počas merania bolo sledované napätie akumulátora a čas od začiatku testu v sekundách, ktoré boli následne prepočítané na minúty. Meranie začalo s napätím približne 10,2 V. Po pripojení konektorov k solárnemu panelu v priebehu druhej minúty napätie stúplo na 10,5 V. Nasledoval jeho postupný nárast až na 11,06 V v 30. minúte, kedy bol výkon panelu znížený vplyvom oblačného počasia. Plne sa rozjasnilo počas 60. minúty. Okrem krátkeho obmedzenia od 83. do 89. minúty už panel fungoval na plný výkon. Po dosiahnutí napätia 12,44 V v 113. minúte sa už ďalší rast napätia nekonal, čo značí správnu funkciu MPPT bloku. Celkový čas nabíjania činil 111 minút, čo je o 11 minút viac, ako čas predpokladaný. Na dosiahnuté výsledky malo vplyv mierne oblačné počasia, ktoré celkový nabíjací cyklus predĺžilo, a taktiež počiatkové napätie akumulátora 10,2 V, ktoré cyklus zas skrátilo. Avšak celkový nabíjací čas je stále v súlade s predpokladaným rozsahom trvania nabíjania.

8.2 Test prebitia a podbitia akumulátoru

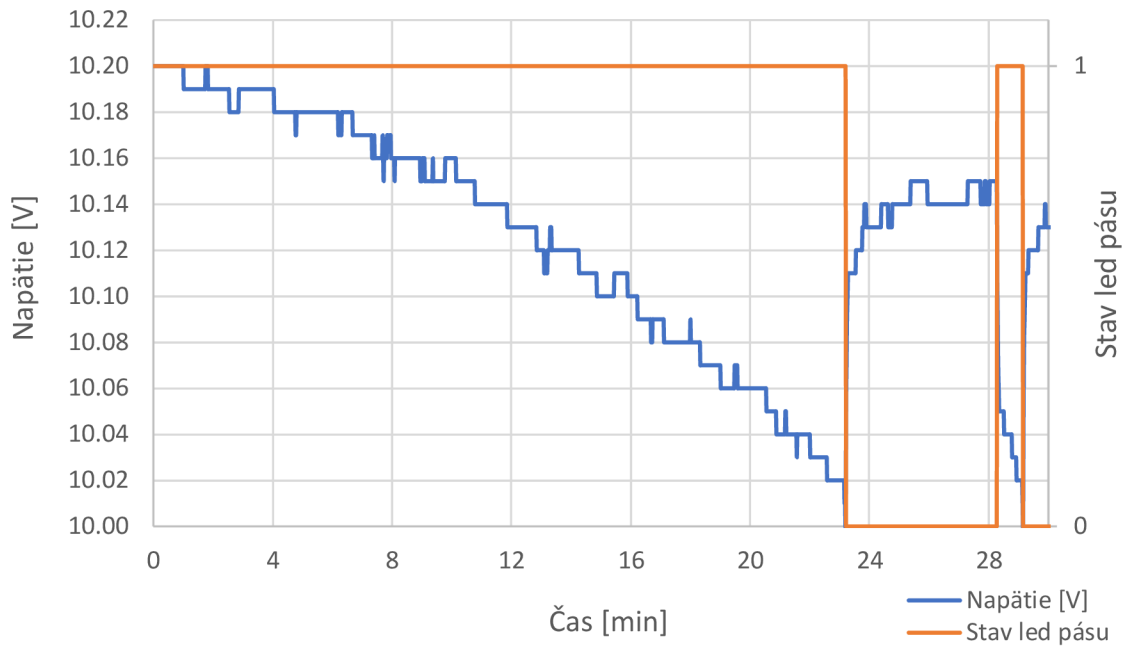
Test prebitia a podbitia akumulátoru je kritický pre jeho celkovú bezpečnosť. Vzhľadom na algoritmus zariadenia zobrazený na obrázku 53, by mal systém pri dosiahnutí hraničného napätia akumulátoru 12,5 V na 10 minút vypnúť MPPT blok. Pri minimálnom napätí by mal zas vypnúť periférie. Z dôvodu eliminácii ďalšieho pájania na DPS s osadenými článkami bola funkcia ochrany pred prebitím otestovaná na nižšom napätí, 12,40 V, a to úpravou riadku v zdrojovom kóde.



Obrázok 72 Graf závislosti napätia akumulátoru od času, test prebitia

Obrázok 72 zobrazuje priebeh testu prebitia akumulátoru. Počiatočné napätie činilo 11,65 V. Po pripojení solárneho panelu stúpalo až na 12,40 V, ktoré dosiahlo v 41. minúte. Po dosiahnutí maximálneho nastaveného napätia ESP32 správne uzemnilo MPPT_EN pin, čím vyplo MPPT modul. Napätie následne kleslo a ustáilo sa v okolí 12,18 V. Po desiatich minútach bol inicializáciou ESP32 MPPT modul opäť zapnutý a celý proces priebehu jeho zapnutia a vypnutia sa zopakoval. Napätie sa potom ustáilo na o niečo vyššej hodnote, zhruba 12,21 V.

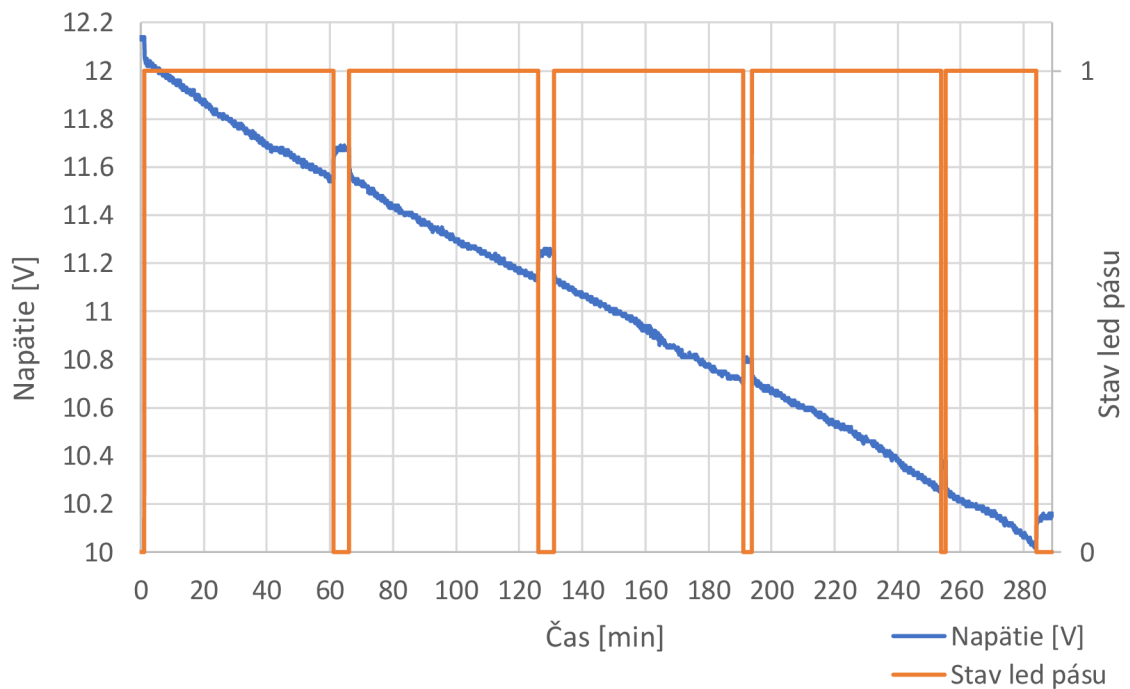
Test podbitia akumulátoru je zobrazený na obrázku 73. Okrem sledovaného napätia akumulátoru bol sledovaný aj stav LED pásu. V zapnutom stave, program 1 až 4, bolo na sériovú linku vypisované číslo 1 a vo vypnutom stave, programe 5, číslo 0. Pre prehľadnosť vizualizácie je zobrazený len čas od napätia 10,20 V. Počas testovania napätie postupne klesalo až do polovice 23. minúty, kedy dosiahlo 10 V. V tento moment ESP32 správne vyplo pás, následkom čoho sa napätie zdvihlo na 10,14 V. Po uplynutí pár minút bol LED pás stlačením externého tlačidla opäť zapnutý, ale po necelej minúte svietenia napätie akumulátora opäť kleslo na 10 V a prebehlo jeho vypnutie.



Obrázok 73 Graf závislosti napätia akumulátoru a stavu LED pásu od času, test podbitia

8.3 Test svietenia LED pásu

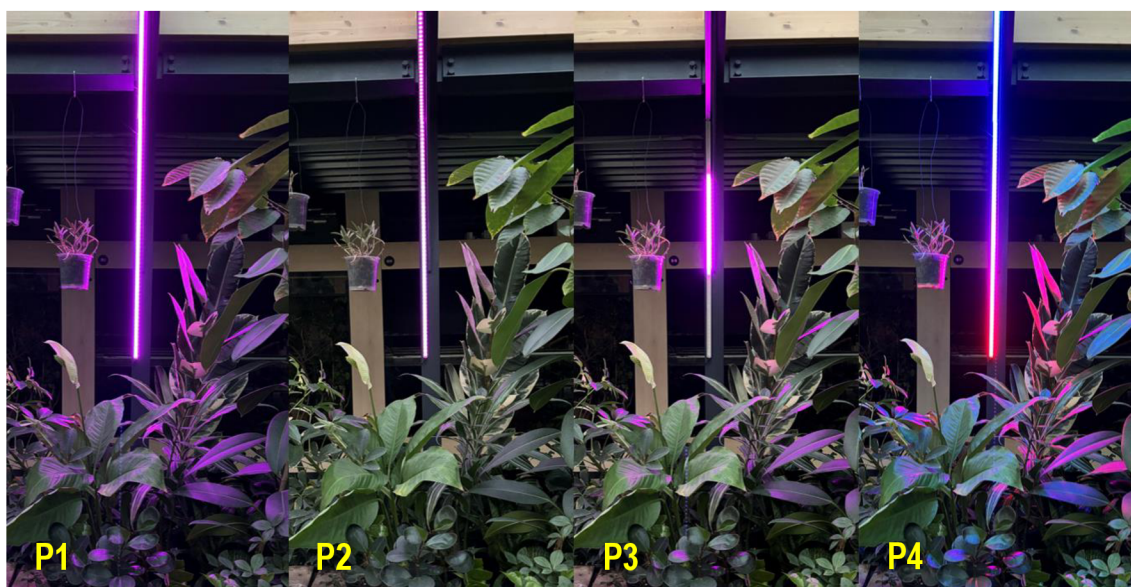
Lužánecký skleník požaduje aspoň 3 h svietenia LED pásu denne, test svietenia LED pásu overí dodržanie tejto požiadavky, ako aj funkčnosť všetkých programov opísaných v rozbere algoritmu zariadenia.



Obrázok 74 Graf závislosti napätia akumulátoru a stavu LED pásu od času, test LED pásu

Doba svietenia je v programe nastavená na jednu hodinu. Počas testu bolo opäť sledované napätie akumulátoru a stav LED pásu. Akumulátor bol najprv nabitý na maximálne napätie, kedy bol solárny panel zo zariadenia odpojený a pri napätí 12,14 V bolo stlačením externého tlačidla inicializované svietenie. Zapnutý bol program jedna, čiže konštantné svietenie, ktoré bude aj počas bežnej prevádzky najviac používané. Počas testu, ktorého výsledky je možné vidieť na obrázku 74, prebehli štyri plné cykly svietenia, pričom celkový čas činil 268 minút. Predpokladaný maximálny čas svietenia z výpočtu energetickej náročnosti bol 145 minút. Rozdiel v nameranom a predpokladom čase tkvie v prúde LED pásu, ktorý je pri svietení fialovou farbou nižší, ako prúd uvedený v dátovom liste. Hodnota prúdu použitá pri výpočtoch bola 4,1 A, zatiaľ čo nameraný prúd sa pohyboval v rozmedzí 2,1 až 2,2 A. Vzhľadom na výsledky testu boli požiadavky LUSK-u splnené a pás môže pri zapojení solárneho panelu svietiť aj viac, ako 3 hodiny denne. To môže byť využité najmä v zimnom období.

V druhej časti testu bol program LED pásu postupne prepínaný od 1 po 5. Prvý program LED pásu postupne rozsvieti a potom ostane konštantne svietiť. Druhý program zvyšuje a znižuje intenzitu svietenia so sínusovým priebehom, čím vytvára efekt dýchania. Tretí program postupne posúva rozsvietené segmenty po páse. Štvrtý program imituje dúhové farby a posledný LED pás vypne.

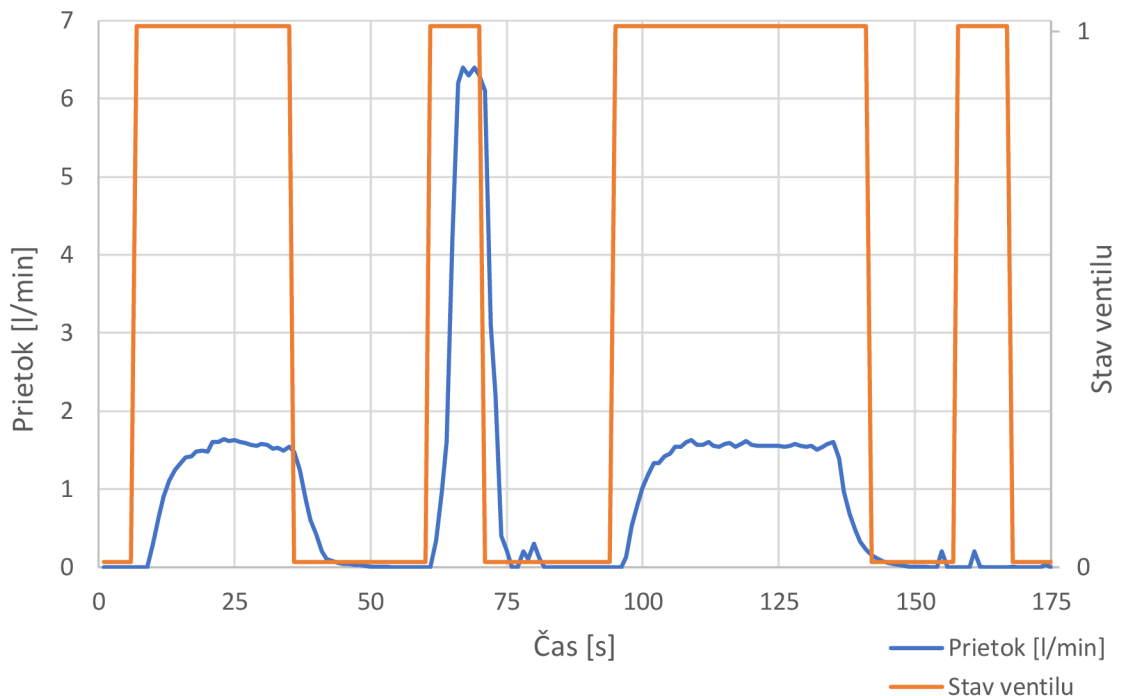


Obrázok 75 Programy LED pásu 1 až 4

Ako ukazuje obrázok 75, funkčnosť prvých štyroch programov bola otestovaná. Prvý program svieti s plnou intenzitou, čo je možné vidieť aj na listoch okolitých rastlín. Druhý práve intenzitu zvyšuje od minima k maximu. Tretí posúva rozsvietený segment skrz 240 LED diód a posledný svieti od červenej po modrú farbu. Piaty program, kedy LED pás nesvieti, je zobrazený na obrázku 65.

8.4 Test ochrany zavlažovania

V teste ochrany zavlažovania boli testované hraničné stavy nainštalovaného systému. Prvý krok pozostával z bezchybného procesu vypnutia a zapnutia sústavy pomocou externého tlačidla, čím sa overila jeho funkčnosť, ako aj správnosť merania údajov prietoku. Druhý krok otestoval stav príliš vysokého výstupného prúdu, kedy bola hadica z trysiek zo zdroja odpojená, čiže voda mohla v plnom prúde vychádzať zo zavlažovacieho modulu (hlavný ventil zdroja bol čiastočne zatvorený). V treťom kroku bol počas zavlažovania zdroj vody pomocou manuálnej páky uzavretý a v poslednom kroku bolo zavlažovanie inicializované, no voda bola uzavretá ešte pred začatím testu.

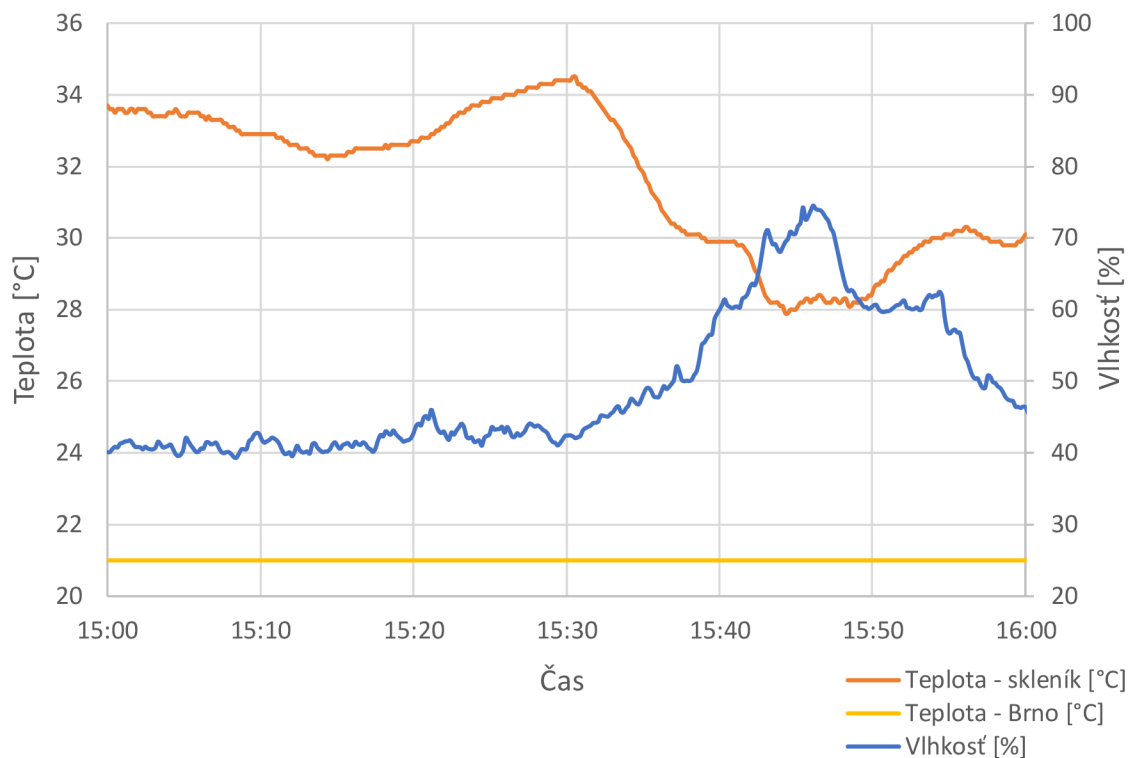


Obrázok 76 Grafické zobrazenie závislosti prietoku a stavu ventilu od času

Počas testu, ktorého grafické zobrazenie je možné vidieť na obrázku 76, bol skrz seriálovú linku sledovaný prietok vody prietokomerom v litroch za minútu a stav ventilu. Po stlačení tlačidla inicializujúceho zavlažovanie v siedmej sekunde merania, prietok vody postupne stúpol na interval od 1,4 po 1,6 litra za minútu, čo zodpovedá predtým fyzicky nameranej hodnote 0,1 litra za minútu z jednej trysky. Trysiek je v skleníku 15. V 35. sekunde bolo tlačidlo opäť stlačené, čo je na priebehu vidieť znížením prietoku k nule. Potom nasledoval test príliš vysokého prúdu, kedy bola zavlažovacia hadica zo zostavy odpojená. Po prvotných desiatich sekundách zariadenie nameralo prietok vyšší, ako je povolená hranica. Odozvou bolo vypnutie ventilu nasledované rýchlym znížením prietoku opäť k nule. V teste nízkeho prietoku bola voda v 134. sekunde vypnutá a po prekročení prietoku 0,2 l/min vypnutý aj ventil. V poslednom teste bol zdroj vody vypnutý a zariadenie po 10 sekundách správne vyplo aj ventil.

8.5 Test klimatických podmienok

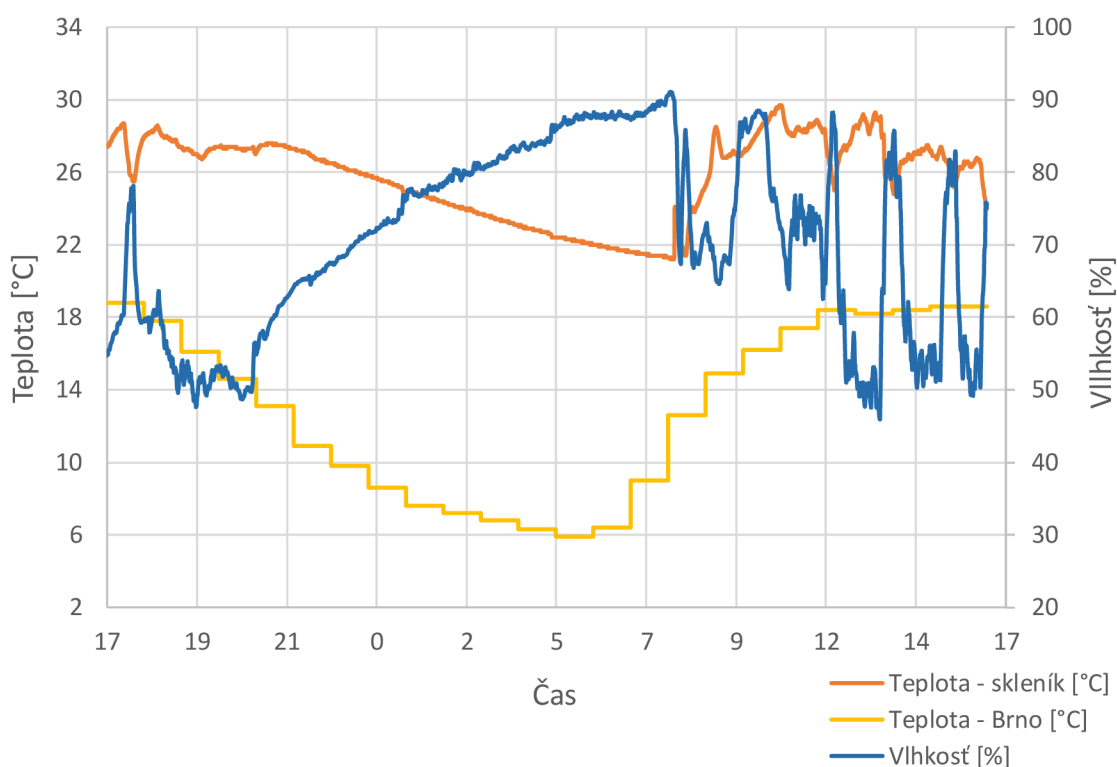
Prvým testom klimatických podmienok, ktorého výsledky sú zobrazené na začiatku diplomovej práce v obrázku 3, bola zistená vysoká teplota a nízka vlhkosť v priestoroch skleníku. V čase merania sa v zariadení zalievalo len ručne pomocou krhly s vodou. Implementáciou solárneho zavlažovacieho systému boli možnosti zavlažovania rozšírené o mlženie tvorené tryskami. Tento proces je možné inicializovať stlačením príslušného tlačidla umiestneného na puzdre zariadenia. Počas druhého testu klimatických podmienok bol najprv zmeraný jeden cyklus zavlažovania, a potom meranie v priebehu jedného dňa. V oboch prípadoch bol senzor AM2301 opäť umiestnený v strede miestnosti, kde meral dáta o teplote a vlhkosti vzduchu.



Obrázok 77 Jedna perióda zavlažovania, test klimatických podmienok

Obrázok 77 zobrazuje jednu periódu zavlažovania mlžením v skleníku, a taktiež vývoj klimatických podmienok pred a po teste. Počas celej hodiny merania bola teplota v Brne 25 °C. Teplota v skleníku začala na 33,7 °C, následne klesla na 32,3 °C a vystúpila na maximálnu hodnotu 34,5 °C v čase 15:30, kedy bolo zapnuté zavlažovanie. Po spustení trysiek boli na základe teoretického popisu chladenia z kapitoly 2.4 pootvárané všetky dvere a okná tak, aby bolo zabezpečené správne vetranie miestnosti. Ako ukazuje obrázok 77, teplota klesla o 6,5 °C až na 28 °C v čase 15:45, kedy sa zavlažovanie automaticky vyplo. Vlhkosť v miestnosti stúpila z počiatočných 25 % RH na maximum 74,53 % RH, ktoré bolo dosiahnuté niekoľko minút po ukončení zavlažovania. Po ukončení testu teplota začala opäť stúpať a vlhkosť klesať.

Jednodenný test klimatických podmienok, zobrazený na obrázku 78, začal o 17-tej hodine poobede, kedy bola teplota v Brne 19 °C, teplota v skleníku 27,5 °C a vlhkosť približne 55 % RH. Zavlažovanie pomocou trysiek bolo v čase zobrazeného merania už niekoľko dní pravidelne zapínané a testované. Zapnuté bolo aj pol hodinu pred začatím merania, čoho následkom je postupné zvyšovanie teploty až do času 17:30, kedy bolo opäť zapnuté a teplota poklesla z 29 °C na 25,5 °C a vlhkosť sa zvýšila zo 60 % RH na 77 % RH. V priebehu noci teplota klesala, avšak na rozdiel od prvých meraní zo začiatku diplomovej práce, vlhkosť stúpala až na 90 % RH. Tento jav bol po uvedení zariadenia do prevádzky pozorovaný pri každom celodennom meraní. Dôvodom pravdepodobne bude postupné vyparovanie vody nie len z rastlín, ale aj z podlahy a ostatných povrchov, ktoré boli pri prvotných meraniach vždy suché. Prví zamestnanci prišli do skleníku o 8:00 hodine ráno druhého dňa, čo je možné pozorovať znížením vlhkosti. V čase 8:20 bol zapnutý prvý cyklus zavlažovania, kedy vlhkosť prudko vzrástla na 85 % RH a teplota opäť poklesla. S postupným nárastom teploty v Brne na 18 °C rástla aj teplota v skleníku. V pokračujúcich priebehoch do 16:30 je cyklus zavlažovania možné pozorovať ešte 4-krát, pričom stále väčším pohybom ľudí po priestoroch LUSK-u sú výkyvy v úrovni vlhkosti výraznejšie. Teplota je počas zapnutia zavlažovania vždy znížená o približne 4 °C. V čase od 11:15 do 12:00, kedy vlhkosť dosahovala 75 % RH prebiehalo ručné polievanie rastlín krlou. Podobný priebeh je možné vidieť aj na obrázku 3.



Obrázok 78 Test klimatických podmienok v skleníku v priebehu jedného dňa po nainštalovaní solárneho zavlažovacieho systému

9. FINANČNÁ NÁKLADNOSŤ PROJEKTU

Finančnú nákladnosť projektu solárneho zavlažovania je vzhľadom na túto diplomovú prácu možné rozdeliť do dvoch podkategórií. Prvou je konečná cena nákladov na 1 kus zariadenia a pojednanie o tom, či bol splnený rozpočet 15 000 Kč odhadnutý a zadaný na začiatku spolupráce. Druhou celková cena vývoja, do ktorej sa rátajú všetky náklady za materiál spojené so zariadením a jeho postupným doladovaním.

9.1.1 Náklady na jednotku

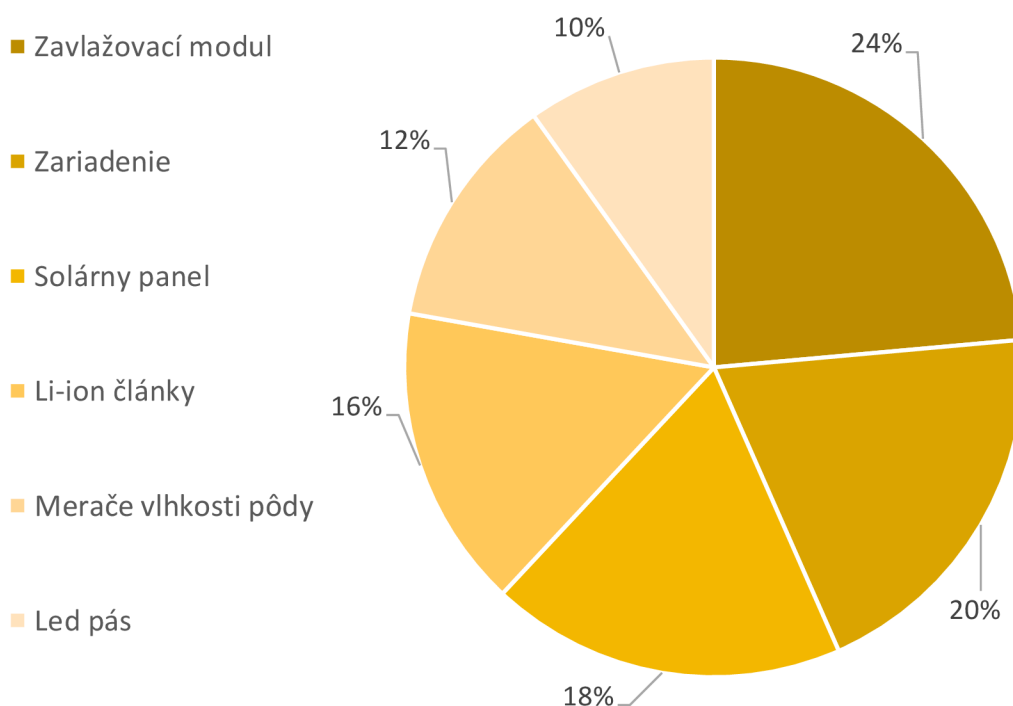
Odsúhlaseným rozpočtom 15 000 Kč boli dopredu určené niektoré ohraničenia ako výkon solárneho panelu, kapacita akumulátora či dĺžka LED pásu. Jedným z cieľov bolo nájsť správny pomer medzi spomenutými komponentami tak, aby bolo zariadenie schopné plynulej prevádzky a zároveň pôsobilo zaujímavo pre zamestnancov, účastníkov každodenných krúžkov či letných táborov. Ako je možné vidieť v podkapitole rozoberajúcej predpoklady energetickej náročnosti, a následne v kapitole o testovaní zariadenia, bol tento cieľ z praktického hľadiska splnený. Výpis finančných nákladov je možné vidieť v tabuľke 9, kvôli veľkému počtu položiek bolo vypísaných 8 najdrahších, pričom celú tabuľku je možné nájsť v prílohe.

Tabuľka 9 Osem najdrahších položiek

| Popis | Cena [Kč] | Množstvo [ks] | Spolu [Kč] |
|--------------------------------------|-----------|---------------|------------|
| INR21700-P42A Li-ion články | 198 | 9 | 1782 |
| Solárny panel 12V/70W | 1450 | 1 | 1450 |
| Lilygo® T-Higrow merač vlhkosti pôdy | 693 | 2 | 1386 |
| Doska plošných spojov + súčiastky | 931 | 1 | 931 |
| Bradas White Line 15 m | 490 | 2 | 980 |
| Káble CYSY 3x1,5 | 16 | 45 | 720 |
| Profil FK FKU11 pre LED 1m | 159 | 4 | 636 |
| WS2815 LED pás DC12V 4m | 365 | 1 | 365 |

Najdrahším komponentom celého zariadenia sú Li-ion články s cenou 198 Kč/kus. Potom nasleduje solárny panel a 2 merače vlhkosti pôdy. Prekvapením bol fakt, že komponenty na inštaláciu LED pásu, tzn. profily, káble, koncovky atď., vyšli v súčte približne 2-krát toľko, ako samotný LED pás. Cena dosky plošných spojov síce predstavuje 931 Kč, avšak jedna neosadená DPS stála len 137 Kč. Zvyšok ceny tvoria jednotlivé komponenty ako integrované obvody či pasívne súčiastky, ktoré sa v malých množstvách predávajú za násobky množstevných cien. Celková cena materiálu na 1 kus zariadenia vyšla približne 11 200 Kč, čím bol splnený cieľ ceny do 15 000 Kč. Z pohľadu komponentov by bolo možné cenu ešte znížiť napríklad použitím článkov s podobnou kapacitou ale nižšími vybíjacími prúdmi.

Ako ukazuje koláčový graf na obrázku 79, v blokovom rozdelení bol najdrahší zavlažovací modul, ktorý spoločne so všetkými hadicami, tryskami a potrebnou kabelážou tvorí 24 % z celkovej ceny. Nasleduje zariadenie zlučujúce dosku plošných spojov, súčiastky na nej, plastové puzdro a všetky káblové priechodky, spínače či tlačidlá spolu tvoriace 20 % z celkovej ceny. Na treťom mieste je solárny panel s konektormi a solárnymi káblami s 18 % ceny. Ďalej 9 Li-ion článkov so 16 % z ceny, dva merače vlhkosti pôdy a klimatických podmienok s 12 % a LED pás s profilmi, záslepkami a prívodnými káblami s 10 % z celkovej ceny jedného zariadenia rovnej 11 200 Kč.



Obrázok 79 Koláčový graf zobrazujúci percentuálne rozdelenie ceny solárneho zavlažovacieho systému

9.1.2 Odhad nákladov vývoja

Aj keď cena za 1 kus zariadenia splnila stanovený cieľ, celkové náklady na vývoj zariadenia sa pohybujú vo vyšších číslach. Príkladom môže byť doska plošných spojov, ktorá stála 137 Kč za kus, avšak minimálne množstvo kusov v objednávke bolo 5 (684 Kč). Navyše, po odhalení chýb prvotného návrhu bolo nutné niektoré obvody upraviť, čo si vyžadovalo zmenu v návrhu elektrických obvodov, ako aj zmenu na doske plošných spojov a objednávku druhej revízie DPS – 5 ks za 684 Kč. Ďalším príkladom môže byť programovanie, ktoré muselo pre technické dôvody začať súbežne s vývojom elektrických obvodov. To si vyžadovalo zostavenie zjednodušenej repliky zariadenia s napájacím zdrojom simulujúcim solárny panel, vývojovej dosky obsahujúcej ESP32 a väčšiny periférií pripojených na nepájivé pole umožňujúce jednoduchú manipuláciu so

zapojeniami. Vďaka zostavenej replike potom boli odhalené nedostatky niektorých zapojení a výstupných komponentov ešte pred objednaním prvej, či následne druhej verzie dosky plošných spojov. Náklady na vývoj zariadenia je celkovo možné odhadnúť na 18 000 Kč.

10. ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo zoznámenie sa s problematikou solárneho zavlažovania a Lužáneckým skleníkom s tropickými rastlinami, ako aj navrhnutie a zostrojenie zariadenia využívajúceho obnoviteľné zdroje elektrickej energie podľa dohody so SVČ Lužánky. Práca sa taktiež zameriava na otestovanie funkčnosti zariadenia a jeho vplyvu na klimatické podmienky v priestoroch skleníku.

V úvode práce boli popísané aktuálne podmienky skleníku a technológie, ktoré skleník využíva pre podporu udržateľnosti a ekológie. Následne boli popísané ďalšie možnosti automatizácie vybraného priestoru. Medzi tie sa radilo napríklad vzdialené ovládanie, chladenie či zavlažovanie, ktoré by aspoň z časti nahradilo manuálne náročné a zdĺhavé polievanie krhlou. Viacnásobné testy klimatických podmienok, trvajúce 24 hodín, potom preukázali vlhkosť a teplotu vnútorných priestorov mimo ideálny rozsah.

Nasledujúca časť sa venovala generovaniu a skladovaniu elektrickej energie tak, aby ostal zachovaný koncept využívania obnoviteľných zdrojov. V rozsahu generovania energie bola popísaná fotovoltika, a to od princípu funkcie solárneho článku po typy solárnych panelov. V časti o skladovaní bol popísaný princíp funkcie elektrochemických akumulátorov typu Li-ion, ako aj používané materiály a ich základné vlastnosti.

Štvrtá kapitola rozoberala základy systému solárneho zavlažovania. Tu boli načrtnuté hlavné funkcie a vytvorená bloková schéma z častí, ktoré by mal tento systém obsahovať. Zobrazená je na obrázku 23. Radí sa medzi ne napríklad mženie tryskami, umelé osvetlenie alebo meranie vlastností prostredia. Nasledoval výpočet energetickej náročnosti systému, v ktorom boli zvolené hlavné komponenty a vypočítaná ich denná spotreba. Nadväzoval súhrn predpokladov energetickej náročnosti zariadenia stanovený na približne 160 Wh. Vzhľadom na energetickú náročnosť bol zvolený a následne na akreditovanom pracovisku zmeraný solárny panel SZ-70-36M s menovitým výkonom 70 W. Pre ukladanie elektrickej energie bol zvolený cylindrický článok Li-ion INR21700-P42A. Na základe merania vybíjajúcich charakteristík bola v zapojení tvorenom deviatimi článkami vypočítaná uložená energia 118,8 Wh. V predpokladoch solárnej sebestačnosti bolo zistené, že po odpojení solárneho panelu a nepoužívaní LED pásu vydrží zariadenie zavlažovať skleník v intervale 2 hodiny denne po dobu 10-tich dní. Zatiaľ čo pri zapnutí LED pásu na 3 hodiny denne bude zariadenie potrebovať aspoň 2 hodiny a 22 minút plného výkonu vybraného solárneho panelu.

Ďalšia časť práce sa venovala elektrickým obvodov, doske plošných spojov a programu zariadenia. Návrh začal blokom správy napájania, ktorá bola rozdelená do MPPT regulátoru, zobrazeného na obrázku 32, pasívneho balancéra Li-ion článkov a manažmentu napájania nižších napäťových úrovní. Nadväzovali obvody pre riadiaci systém tvorený mikrokontrolérom ESP32, ktorý je možné vidieť na obrázku 36.

Vzhľadom na zapojenie bola navrhnutá dvojvrstvová doska plošných spojov o rozmeroch 227 x 90 mm, ktorej primárnu stranu tvoria všetky súčiastky a sekundárnu Li-ion články. V ďalšej časti rozoberajúcej testovanie elektrických obvodov bol najprv pomocou CAD simulácie odladený teplotný manažment MPPT bloku. Potom prebehlo overenie funkčnosti napäťových prevodníkov a pasívnych balancérov, ktorých výsledky je možné nájsť v tabuľke 8. Na obrázku 52 je zobrazená osadená a zapájaná DPS. Programovanie bolo rozdelené do dvoch častí, a to časti kontrolnej a časti hlavného programu, v ktorých bol vždy najprv popísaný algoritmus a potom zodpovedajúca časť zdrojového kódu.

Nasledujúce kapitoly sa sústredili na zloženie, inštaláciu a testovanie zariadenia v skleníku. Pričom bolo uvedené aj finančné zhodnotenie projektu. V zložení zariadenia je možné na obrázku 59 vidieť zariadenie umiestnené v puzdre. Ďalej bola popísaná inštalácia jednotlivých častí, ako aj ich umiestnenie. Vizualizáciu je možné nájsť na obrázku 69. Testovanie zariadenia začalo testom cyklu nabitia zobrazenom v grafickej závislosti na obrázku 71. V ktorom bol nameraný čas 111 minút korešpondujúci s časom vypočítaným. Test prebitia a podbitia akumulátora ukázal správne rozhodovanie systému o vypínaní jednotlivých blokov zariadenia. Následný test svietenia LED pásu odhalil jeho znížený prúdový odber z predpokladaných 4,1 A na 2,2 A, čoho príčinou bude pravdepodobne zvolená farba svietenia. Na obrázku 75 sú taktiež zobrazené programy LED pásu. Predposledný test ochrany zavlažovania overil správnosť rozhodovania zariadenia pri meraní hraničných podmienok prietoku. Opakovaný test klimatických podmienok s pravidelným zapínaním zavlažovania zas ukázal zníženie teploty a zvýšenie vlhkosti vzduchu v skleníku, ktoré sú teraz bližšie k ideálnym rozsahom. Grafické zobrazenie je možné nájsť na obrázku 78. Vo finančnom zhodnotení boli vypočítané náklady na jeden kus solárneho zavlažovania na úrovni 11 200 Kč, čím bol dodržaný rozpočet 15 000 Kč.

S ohľadom na súčasný stav môže byť budúci vývoj zariadenia zameraný z pohľadu hardvéru na vývoj MPPT bloku, pri ktorom by ďalšie zlepšenie teplotného manažmentu mohlo byť dosiahnuté použitím synchronného step-down meniča s externými tranzistormi zväčšujúcimi možnú plochu chladenia. Zatiaľ čo zo strany softvéru tkvie príležitosť v integrácii vzdialeného ovládania a implementácii kontinuálne merajúceho senzora teploty a vlhkosti, kedy by na základe dát mohol byť spustený autonómny režim s cieľom dosiahnutia ideálnych klimatických podmienok.

LITERATÚRA

- [1] LUSK Lužánecký skleník [online]. Brno: Statutární město Brno, 2018 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://skleniky.luzanky.cz/obecne-info/>
- [2] RABBI, Barkat, Zhong-Hua CHEN a Subbu SETHUVENKATRAMAN. Protected Cropping in Warm Climates: A Review of Humidity Control and Cooling Methods [online]. 17 July 2019, 5, Table 1 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: doi:10.3390/en12142737
- [3] AM2301 datasheet [online]. Guangdong, China: AOSONG, 2023 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.haoyuelectronics.com/Attachment/AM2301/AM2301.pdf>
- [4] LoRa® [online]. Kalifornia: SEMTECH, 2023 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://loro-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/loro-and-lorawan/>
- [5] TCP/IP Internet protocols. Encyclopedia Britannica [online]. Chicago, Illinois, USA: Encyclopædia Britannica, 2023, 2023 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/TCP-IP>
- [6] Tlak vody ve vodovodním řádu. REDED [online]. Praha: FLOW SYSTEM GROUP, 2023, 2001 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.reded.cz/slovnik-pojmu/tlak-vody-ve-vodovodnim-radu/>
- [7] ARBEL, A., O. YEKUTIEL a M. BARAK. Performance of a Fog System for Cooling Greenhouses. In: Journal of Agricultural Engineering Research [online]. Zvázok 72. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1999, s. 129-136 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021863498903511?via%3Dihub>
- [8] BARTOK, John W., Jr. Mist and Fog Equipment for Propagation. The University of Massachusetts Amherst [online]. 2009 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/fact-sheets/mist-fog-equipment-for-propagation>
- [9] OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. LED Basics. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/ssl/led-basics>. [cit. 2023-11-26].
- [10] CIRCUIT GEEKS. How to Control WS2812B Addressable RGB LEDs using Arduino. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.circuitgeeks.com/ws2812b-addressable-rgb-led-strip-with-arduino/>. [cit. 2023-12-28].
- [11] RUNKLE, ERIK. Purple vs. Pink vs. White LED Fixtures. Online. S. 1. Dostupné z: <https://www.canr.msu.edu/floriculture/uploads/files/purplepinkwhiteleds.pdf>. [cit. 2023-11-26].
- [12] MASHKOV, Petko Hristov; BELOEV, Hristo Ivanov; GYOCH, Berkant Seydali; KANDILAROV, Rostislav Yuriev a PENCHEVA, Tamara Grigorievna. LED

- equipment for light influence on photosynthesis investigations. Online. 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET). 2017, s. 1-4. ISBN 978-1-5386-1753-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ET.2017.8124352>. [cit. 2023-11-26].
- [13] STATISTA. Average installed cost for solar photovoltaics worldwide from 2010 to 2022. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/809796/global-solar-power-installation-cost-per-kilowatt/>. [cit. 2023-12-28].
- [14] AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. How a Solar Cell Works. Online. 2014. Dostupné z: <https://www.acs.org/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html>. [cit. 2023-12-17].
- [15] EWT. E=hf. Online. Energy Wave Theory. 2023. Dostupné z: <https://energywavetheory.com/equations/ehf/>. [cit. 2023-12-02].
- [16] Study of the Photoelectric effect and “measurement” of the Planck constant. Online, Laboratory experiment. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2021. Dostupné z: https://planck.fel.cvut.cz/praktikum/downloads/navody_en/planck.pdf. [cit. 2023-12-17].
- [17] YANG, Hongchao; MA, Yandong a DAI, Ying. Progress of structural and electronic properties of diamond: a mini review. Online. S. 2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/26941112.2021.1956287>. [cit. 2023-12-17].
- [18] COLINS, Peter J. Simple measurement of the band gap in silicon and germanium. Online. American Journal of Physics. Roč. 1980, č. 48, s. 198 - 199. Dostupné z: https://homepage.physics.uiowa.edu/~fskiff/Physics_132/New%20Lab%20Manual/int_lab_man/pdfs/collings.pdf. [cit. 2023-12-17].
- [19] FINSTERLE, Tomáš. Diagnostika degradace fotovoltaických článků a modulů. Online, Disertační práce, vedoucí Vítězslav Benda. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2021. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/93944/F3-D-2021-Finsterle-Tomas-Disertace%20Finsterle-1.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [cit. 2023-12-17].
- [20] KAZELLE, Jiří; LIEDERMANN, Karel; JIRÁK, Josef; HAVLÍČEK, Svatopluk; VANĚK, Jiří et al. Elektrotechnické materiály a výrobní procesy skriptum. Vysoké učení technické v Brně. 2018, s. 43 - 49. [cit. 2023-12-03].
- [21] JIRÁK, Josef; AUTRATA, Rudolf; LIEDERMANN, Karel; ROZSVÍVALOVÁ, Zdenka a SEDLÁŘIKOVÁ, Marie. Materiály a technická dokumentace skriptum. Vysoké učení technické v Brně. Roč. 2018, s. 82 - 86.
- [22] BOUŠEK, Jaroslav; KOSINA, Petr a MOJROVÁ, Barbora. Elektronické součástky skriptum. Vysoké učení technické v Brně. Roč. 2015, s. 20 - 22. [cit. 2023-12-03].

- [23] MASTNÝ, Petr; DRÁPELA, Jiří; MIŠÁK, Stanislav; MACHÁČEK, Ján; RADIL, Lukáš et al. Princip funkce fotovoltaického článku. In: Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, s. 62 - 65. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [24] ARIZONA STATE UNIVERSITY. IV Curve. Online. HONSBURG, Christiana a BOWDEN, Stuart. PV Education. 2019. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>. [cit. 2023-12-17].
- [25] HA, Tim. The elephant in the room: Can the solar industry go circular? Online. Eco-Business. 2020. Dostupné z: https://www.eco-business.com/news/the-elephant-in-the-room-can-the-solar-industry-go-circular/?fbclid=IwAR2wEb4wYEEY16ntJLi7MHGf4UshRbY2K08kEZ0xNV5KB1pVyNx_CcvRyhnI. [cit. 2023-12-17].
- [26] ETTAH, Emmanuel; EKAH, Ukoette; OYOM, Everest a AKONJOM, Nsed. Performance Analysis of Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in a Semi-Arid Region. Online. 2021, s. 12 - 13. ISSN 2319-6734. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Ukoette-Ekah/publication/353298856_Performance_Analysis_of_Monocrystalline_and_Polycrystalline_Solar_Panels_in_a_Semi-arid_Region/links/6161d2f0ae47db4e57b59bd4/Performance-Analysis-of-Monocrystalline-and-Polycrystalline-Solar-Panels-in-a-Semi-arid-Region.pdf. [cit. 2023-12-17].
- [27] STATISTA. Lithium-ion battery price worldwide from 2013 to 2023. Online. Statista. 2023. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/>. [cit. 2023-12-17].
- [28] FENG, Xuning; ZHENG, Siqi; REN, Dongsheng; HE, Xiangming; WANG, Li et al. Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database. Online. Applied Energy. 2019, roč. 246, s. 53-64. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.009>. [cit. 2023-12-17].
- [29] MATSUNAGA, Toshiyuki; TAKAGI, Shigeharu; SHIMODA, Keiji; OKAZAKI, Ken-ichi; ISHIKAWA, Yoshihisa et al. Comprehensive elucidation of crystal structures of lithium-intercalated graphite. Online. Carbon. 2019, roč. 142, s. 513-517. ISSN 00086223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.071>. [cit. 2023-12-17].
- [30] YAN, Hui; ZHANG, Ding; QILU; DUO, Xi a SHENG, Xianliang. A review of spinel lithium titanate (Li₄Ti₅O₁₂) as electrode material for advanced energy storage devices. Online. Ceramics International. 2021, roč. 47, č. 5, s. 5873. ISSN 02728842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.241>. [cit. 2023-12-17].
- [31] ANTOLINI, E; ZHANG, Ding; QILU; DUO, Xi a SHENG, Xianliang. LiCoO₂: formation, structure, lithium and oxygen nonstoichiometry, electrochemical

- behaviour and transport properties. Online. Solid State Ionics. 2004, roč. 170, č. 3-4, s. 159-171. ISSN 01672738. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.04.003>. [cit. 2023-12-17].
- [32] ABOU-RJEILY, John; BEZZA, Ilham; LAZIZ, Noureddine Ait; AUTRET-LAMBERT, Cecile; SOUGRATI, Moulay Tahar et al. High-rate cyclability and stability of LiMn₂O₄ cathode materials for lithium-ion batteries from low-cost natural β-MnO₂. Online. Energy Storage Materials. 2020, roč. 26, s. 423-432. ISSN 24058297. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.11.015>. [cit. 2023-12-17].
- [33] DONG, Y.Z.; ZHAO, Y.M.; DUAN, H.; AUTRET-LAMBERT, Cecile; SOUGRATI, Moulay Tahar et al. Crystal structure and lithium electrochemical extraction properties of olivine type LiFePO₄. Online. Materials Chemistry and Physics. 2011, roč. 129, č. 3, s. 756-760. ISSN 02540584. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.04.076>. [cit. 2023-12-17].
- [34] RAO, Tian; GAO, Peng; ZHU, Zimeng; WANG, Shan; BEN, Liubin et al. Structural, electrochemical, and Li-ion diffusion properties of Mg&Mn dual doped LiNiO₂ cathode materials for Li-ion batteries. Online. Solid State Ionics. 2022, roč. 376, s. 1 - 8. ISSN 01672738. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2022.115860>. [cit. 2023-12-17].
- [35] PARK, Bo Keun; JEONG, Yeon Kyeong; YANG, So Yeon; KWON, Soyeon; YANG, Jin Hyeok et al. Deterioration behavior of aluminum pouch film used as packaging materials for pouch-type lithium-ion batteries. Online. Journal of Power Sources. 2021, roč. 506, s. 1 - 2. ISSN 03787753. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230222>. [cit. 2023-12-17].
- [36] LANDINI, S.; LEWORTHY, J. a O'DONOVAN, T.S. A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-Ion Cells. Online. Journal of Energy Storage. 2019, roč. 25, s. 9 - 10. ISSN 2352152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100887>. [cit. 2023-12-17].
- [37] YAO, Xingyan; PECHT, Michael a KONG, Lingxi. Reliability of Cylindrical Li-ion Battery Safety Vents. Online. Chongqing Engineering Laboratory for Detection Control and Integrated System. China: Chongqing Technology and Business University, 2017. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997792>. [cit. 2023-11-30].
- [38] BANKOLE, Oluwatosin Emmanuel; GONG, Chunxia a LEI, Lixu. Battery Recycling Technologies: Recycling Waste Lithium Ion Batteries with the Impact on the Environment In-View. Online. Journal of Environment and Ecology. 2013, roč. 4, č. 1, s. 17. ISSN 2157-6092. Dostupné z: <https://doi.org/10.5296/jee.v4i1.3257>. [cit. 2023-12-17].
- [39] NORDIC SEMICONDUCTOR. NRF52840 Product Specification. Online. 2019. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.1.pdf. [cit. 2024-01-05].

- [40] ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32C3MINI1 datasheet. Online. 2022. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-mini-1_datasheet_en.pdf. [cit. 2024-01-05].
- [41] STMICROELECTRONICS. STM32WB55xx Datasheet Rev 16. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wb55cc.pdf>. [cit. 2024-01-05].
- [42] RASPBERRY PI LTD. Raspberry Pi Pico W datasheet. Online. 2023. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>. [cit. 2024-01-05].
- [43] WS2815 Intelligent control LED integrated light source. Online. S. 2 - 3. Dostupné z: <https://www.led-stuebchen.de/download/WS2815.pdf>. [cit. 2023-11-27].
- [44] Lithium-Ion Battery [online]. Brusel: European Association for Storage of Energy, 2016, 1 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_LiIon.pdf
- [45] Molicel Product Data Sheet Lithium-ion rechargeable battery, model INR21700-P42A. Online. In: S. 1. Dostupné z: <https://www.molicel.com/wp-content/uploads/INR21700P42A-V4-80092.pdf>. [cit. 2023-11-30].
- [46] TEXAS INSTRUMENTS. LM7360x-Q1 3.5-V to 36-V, 5-A or 6-A Synchronous Step-Down Voltage Converter. Online. 2017, 2021. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7360-q1.pdf?ts=1703957575349&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM73606-Q1%252Fpart-details%252FLM73606QRNPRQ1. [cit. 2023-12-31].
- [47] TEXAS INSTRUMENTS. CSD13202Q2 datasheet. Online. 2018. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd13202q2.pdf?ts=1704465626548&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F. [cit. 2024-01-05].
- [48] LAKKAS, George. MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency. Online. Roč. 2016. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf>. [cit. 2024-04-19].
- [49] LM5146-Q1 100-V Synchronous Buck DC/DC Controller With Wide Duty Cycle Range. Online. Texas Instruments. 2018, s. 30. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5146-q1.pdf>. [cit. 2024-04-19].
- [50] ALPHABET INC. Google Maps. Online. 2024. Dostupné z: <https://maps.app.goo.gl/3prDsJWnRmt4qmf39>. [cit. 2024-05-20].

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

| | |
|----------------------------------|---|
| FEKT | Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií |
| VUT | Vysoké učení technické v Brně |
| LUSK | Lužánecký skleník |
| CO ₂ | Oxid uhličitý |
| Wi-Fi | Wireless Fidelity |
| LoRa | Long Range |
| UART | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| IP | Internet Protocol |
| PTC | Positive Temperature Coefficient |
| NTC | Negative Temperature Coefficient |
| Li-ion | Lítium-ión |
| MPPT | Maximum Power Point Regulator |
| OPN | oblasť priestorového náboja |
| FF | Fill Factor |
| SiO ₂ | Oxid kremičitý |
| C | Uhlík |
| Si | Kremík |
| 2CO | Oxid uhoľnatý |
| LED | Light Emitting Diode |
| SEI | Solid State Interface |
| LiC ₆ | grafit interkalovaný lítiom |
| LTO | Lítium Titán Oxid |
| LiFePO ₄ | Lítium Železo Fosfát |
| LiNiO ₂ | Lítium Nikel Oxid |
| LiCoO ₂ | Lítium Kobalt Oxid |
| LiMn ₂ O ₄ | Lítium Mangán Oxid |
| RAM | Random Access Memory |
| IoT | Internet Of Things |
| PMOS | P-type Metal Oxide Semiconductor |
| NMOS | N-type Metal Oxide Semiconductor |
| FB | FeedBack |
| FV | Fotovoltický |
| ABS | Akrylonitrilbutadiénstyren |

Symboly:

| | | |
|------------|-------------------------------------|-----------------|
| E | energia | (J) |
| h | Planckova konštanta | (-) |
| f | frekvencia | (Hz) |
| λ | vlnová dĺžka | (m) |
| c | rýchlosť svetla | (m/s) |
| W_g | šírka zakázaného pásu | (eV) |
| G | generácia elektrónov | (m^{-3}) |
| n_i | koncentrácia voľných nosičov | (m^{-3}) |
| p | koncentrácia dier | (m^{-3}) |
| n | koncentrácia elektrónov | (m^{-3}) |
| k | Boltzmanova konštanta | ($J.K^{-1}$) |
| T | termodynamická teplota | (K) |
| Θ | termodynamická teplota | ($^{\circ}C$) |
| Δn | koncentrácia nerovnovážnych nosičov | (m^{-3}) |
| R | pravdepodobnosť rekombinácie | (%) |
| J | prúdová hustota | ($A.m^{-2}$) |
| P | výkon | (W) |
| W | práca | (Wh) |
| U | napätie | (V) |
| I | prúd | (A) |
| q | elementárny náboj elektrónu | (C) |
| Q | kapacita | (mAh) |
| L | indukčnosť | (H) |
| C | kapacita | (F) |
| D | pracovný cyklus | (-) |
| R | elektrický odpor | (Ω) |

ZOZNAM PRÍLOH

| | |
|--|------------|
| PRÍLOHA A - ELEKTRONICKÁ PRÍLOHA..... | 110 |
|--|------------|

Príloha A - Elektronická príloha

Elektronická príloha obsahuje dokumentáciu k doske plošných spojov vytvorenú v programe CadSoft Eagle 7.7.0. Schémy obvodov a zapojenia je taktiež dostupná vo formáte PDF, pričom výrobné podklady dosky plošných spojov sú dostupné vo forme Gerber dát. Obsiahnuté sú aj jednotlivé 3D modely s nastavením Flow simulácií, ktoré boli vytvorené a prevedené v programe SolidWorks 2020, zdrojový kód z vývojového prostredia Arduino IDE vo formáte INO, a taktiež dáta z jednotlivých testov vynesené do Excel súborov z balíku Microsoft Office 2024, uložené vo formáte xlsx.