



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

AUTOMATICKÁ HYDROPONICKÁ MIKROFARMA PRO PĚSTOVÁNÍ ROSTLIN

AUTOMATIC HYDROPONIC MICROFARM FOR PLANT CULTIVATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Peter Takács

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Peter Takács

ID: 221023

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Automatická hydroponická mikrofarma pro pěstování rostlin

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je navrhnout a realizovat hardware a software pro existující hydroponickou mikrofarmu. Navržené zařízení musí obsahovat napájecí obvody, řídicí jednotku, řízení ohřevu a vzduchování živného roztoku, osvětlení s možností regulace intenzity, senzory PH, EC, teploty vody a okolí. Navržený systém má být schopen podle naměřených hodnot a fáze růstu rostli doplňovat potřebné živiny do roztoku. Systém bude možné dálkově řídit, vyčítat hodnoty a sledovat růst rostlin skrz webové rozhraní. Při nutnosti externího zásahu bude posílat upozornění na zadanou emailovou adresu.

1. Proveďte literární rešerši a internetový průzkum, změřte se na automatizované pěstování rostlin pomocí vertikálních a horizontálních hydroponických systémů.
2. Vyberte vhodnou mikroprocesorovou platformu pro řízení navrženého systému.
3. Navrhněte schéma zapojení a desku plošných spojů pro systém.
4. DPS realizujte a oživte.
5. Vytvořte firmware a webové rozhraní pro komunikace se systémem.
6. Elektroniku implementujte do existující hydroponické mikrofarmy.
7. Ověřte celkovou funkčnost zařízení.
8. Sepište diplomovou práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JOHNSON, Hunter. Hydroponics: a guide to soilless culture systems. California: Division of Agricultural Sciences, University of California, 1977, 1977.

[2] Hydroponics. IntechOpen, 2012. ISBN 9535103865.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 15.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, 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

Táto práca sa zaoberá implementáciou návrhu hardvéru a softvéru pre existujúcu hydroponickú mikrofarmu. Práca obsahuje rešerš literatúry a internetu zameranú na automatizované pestovanie rastlín. V práci sú opísané a porovnané rôzne typy bezpôdnych pestovateľských systémov. Riešia sa všeobecné požiadavky na rastliny a diskutuje sa o týchto požiadavkách. V práci je opísané aj inštrumentácia pomocou špecifických komponentov. Systém zahŕňa riadiacu jednotku, ovládanie ohrevu a prevzdušňovania živného roztoku, nastaviteľné osvetlenie a snímače pH, EC a teploty vody a okolia. Okrem toho sa diskutuje o výhodách a nevýhodách dvoch vybraných mikroprocesorových jednotiek. Ďalej je v práci opísaná aj činnosť mikrokontroléra, ktorý riadi jednotlivé komponenty. Táto práca stručne opisuje všeobecné zapojenie jednotlivých komponentov a obsahuje schémy zapojenia a dosku plošných spojov. Táto práca opisuje program firmvéru a funkcie webového rozhrania, ktoré slúži na interakciu so systémom. Okrem toho je vybavený funkciami diaľkového ovládania a monitorovania prostredníctvom webového rozhrania s e-mailovými upozoreniami pre potreby externých zásahov. Súčasťou tejto práce je aj implementácia elektroniky z hľadiska montáže a kalibrácie.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Hydropónia, Aeropónia, Aquapónia, NFT, DFT, EC, pH, CO₂, VOC, LED osvetlenie, fotoreceptory, fotosyntéza, živiny, Raspberry PI, ESP32, Firmvér, Webové rozhranie, Automatické dávkovanie, Kalibrácia

ABSTRACT

This thesis deals with the implementation of hardware and software design for an existing hydroponic micro-farm. The thesis includes a literature and internet search focused on automated plant cultivation. A description of different types of soilless cultivation systems is given in the thesis. General plant requirements are addressed and these requirements are thoroughly discussed. Instrumentation using specific components is also described in the thesis. The system integrates a control unit, heating and aeration controls for the nutrient solution, adjustable lighting, and sensors for pH, EC, and adjustable water and ambient temperature. In addition, the advantages and disadvantages of two selected microprocessor units are discussed. Further, the operation of the microcontroller that controls the individual components is also described in the thesis. This thesis briefly describes the general circuitry of each component and includes circuit diagrams and the schematic of a printed circuit board. This thesis describes the program of the firmware and the functions of the web interface used to interact with the system. Additionally, it features remote control and monitoring capabilities via a web interface, with email alerts for external intervention needs. This thesis also includes the implementation of the electronics in terms of assembly and calibration.

KEYWORDS

Hydroponics, Aeroponics, Aquaponics, NFT, DFT, EC, pH, CO₂, VOC, LED lightning, photoreceptors, photosynthesis, nutrients, Raspberry PI, ESP32, Firmware, WebGUI, Automatic dosing, calibration

TAKÁCS, Peter. *Automatická hydroponická mikrofarma pro pěstování rostlin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024, 84 s. Diplomová práce. Vedúci práce: Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Peter Takács
VUT ID autora: 221023
Typ práce: Diplomová práca
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečnéj práce: Automatická hydroponická mikrofarma pro pěstování rostlin

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím 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 vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať svojmu vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Zoltánovi Szabóovi, PhD. za jeho odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 13 |
| 1 Inšpirácia | 14 |
| 1.1 História hydroponie | 14 |
| 1.2 Dnešná situácia | 14 |
| 1.3 Porovnanie bezpôdnych pestovateľských systémov | 15 |
| 1.3.1 Typy bezpôdnych pestovateľských systémov | 17 |
| 1.4 Požiadavky na pestovateľský systém | 19 |
| 1.4.1 Svetelné požiadavky rastlín | 19 |
| 1.4.2 Všeobecné požiadavky rastlín na živiny | 22 |
| 1.4.3 Teplotné požiadavky rastlín | 23 |
| 1.4.4 Kvalita vzduchu | 24 |
| 1.4.5 Predpríprava pestovania <i>Capsicum annuum</i> | 25 |
| 2 Inštrumentácia a návrh zariadenia | 28 |
| 2.1 Všeobecný popis jednotlivých prvkov | 28 |
| 2.1.1 Aktuátory a riadené výstupné zariadenia | 28 |
| 2.2 Konkretizácia výstupných prvkov | 31 |
| 2.2.1 LED osvetlenie | 32 |
| 2.2.2 Akváriové čerpadlo | 35 |
| 2.2.3 Kompresor na prevzdušňovanie vodného roztoku | 35 |
| 2.2.4 Ohrievač vody | 35 |
| 2.2.5 Peristaltické čerpadlá | 35 |
| 2.2.6 Ventilátory | 36 |
| 2.3 Konkretizácia senzorov | 36 |
| 2.3.1 Kapacitné senzory hladiny hnojiva | 36 |
| 2.3.2 Plavákový senzor hladiny roztoku | 37 |
| 2.3.3 Snímač koncentrácie prchavých látok vzduchu | 38 |
| 2.3.4 Snímač na meranie koncentrácie CO ₂ vo vzduchu | 39 |
| 2.3.5 Senzor teploty a vlhkosti vzduchu | 39 |
| 2.3.6 Teplomer vodného roztoku | 40 |
| 2.3.7 Senzor vodivosti | 40 |
| 2.3.8 Senzor pH | 41 |
| 2.3.9 Webkamera | 41 |
| 2.4 Riadiaca jednotka | 42 |
| 2.4.1 Vývojová doska | 42 |
| 2.4.2 Úlohy riadiacej jednotky | 44 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Schéma zapojenia | 47 |
| 3.1 | Zapojenie vstupných komponentov systému | 47 |
| 3.2 | Zapojenie aktuátorov a výstupných komponentov systému | 49 |
| 4 | Firmware | 51 |
| 4.1 | Mapovanie GPIO pinov | 52 |
| 4.2 | Manuálny režim | 53 |
| 4.2.1 | Dávkovanie v manuálnom režime | 53 |
| 4.3 | Automatický režim | 53 |
| 4.3.1 | Automatické dávkovanie | 54 |
| 4.3.2 | Varovanie užívateľa cez e-mail | 54 |
| 4.4 | Nezávislá časť programu | 54 |
| 4.4.1 | Meranie vodivosti a pH vody | 55 |
| 5 | Webové rozhranie | 56 |
| 5.1 | Zobrazenie nameraných dát | 56 |
| 5.2 | Nastavenia parametrov a riadenie výstupov | 56 |
| 5.3 | Systémové hlásenia a záznam aktivít | 57 |
| 5.4 | Všeobecná príručka pre užívateľov webového rozhrania | 57 |
| 5.4.1 | Každodenná prevádzka | 58 |
| 5.4.2 | Meranie pH a EC vody | 59 |
| 5.4.3 | Odstránenie systémových chýb | 59 |
| 5.5 | Prístup k webovému rozhraniu lokálne | 60 |
| 5.6 | Prístup k webGUI prostredníctvom internetu | 61 |
| 6 | Montáž a overenie funkčnosti | 62 |
| 6.1 | Porovnanie konektorov a svorkovnic | 62 |
| 6.2 | Umiestnenie senzorov a výstupných zariadení | 62 |
| 6.3 | Kalibrácia frekvencie pulzných vstupov ovládačov krokových motorov | 63 |
| 6.4 | Kalibrácia snímača pH vody | 64 |
| | Záver | 66 |
| | Literatúra | 67 |
| | Zoznam symbolov a skratiek | 72 |
| | Zoznam príloh | 74 |
| A | Mikrokontrolér ESP32 | 75 |
| A.1 | Pinout ESP32 | 75 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| B | Namerané spektrálne odozvy svetelných zdrojov | 76 |
| B.1 | Spektrum osvetlení miestnosti | 76 |
| B.2 | Nameraná spektrálna odozva červených LED pásov | 77 |
| B.3 | Nameraná spektrálna odozva červeného laseru | 77 |
| C | Prepájací modul Raspberry Pi | 78 |
| C.1 | Schéma zapojenia | 78 |
| C.2 | Doska plošných spojov | 79 |
| D | Generovaný PWM signál | 80 |
| E | Dávkovacie množstvá | 81 |
| F | Webové rozhranie | 82 |
| G | Obsah priloženého média | 84 |

Zoznam obrázkov

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Komerčné vnútorné vertikálne farmy | 15 |
| 1.2 | Pestovanie zemiakov v aeroponickom systéme | 16 |
| 1.3 | Pestovanie šalátu na plávajúcej doske z polystyrénu na jazierku | 17 |
| 1.4 | Pestovanie šalátu v systéme NFT | 18 |
| 1.5 | Komerčné LED osvetlenie pre rastliny | 20 |
| 1.6 | Absorpčné schopnosti fotoreceptorov rastlín | 21 |
| 1.7 | Balík zmesi živín <i>TriPart®</i> | 22 |
| 1.8 | Dávkovacia tabuľka produktov <i>Terra Aquatica</i> | 23 |
| 1.9 | Vzťah medzi koncentráciou CO ₂ vo vzduchu a fotosyntézou | 24 |
| 1.10 | Funkčná úloha rastlinných prchavých organických látok | 26 |
| 1.11 | <i>Capsicum annuum</i> štyri až šesť týždňov po vyklíčení | 27 |
| 2.1 | Odhalený vodný kanál jedného poschodia hydroponického systému. | 28 |
| 2.2 | Polystyrénová plocha s vreckami na rastliny. | 29 |
| 2.3 | Fotka EC sondy zblízka | 31 |
| 2.4 | Nameraná spektrálna odozva bežného LED pásu teplej bielej farby | 32 |
| 2.5 | Spektrálna odozva bielej varianty LED pásu | 33 |
| 2.6 | Kompletizované LED osvetlenie | 34 |
| 2.7 | Kapacitný snímač namontovaný pomocou lepiaceho prostriedku | 37 |
| 2.8 | Prierez plavákového snímača hladiny typu NO | 38 |
| 2.9 | Snímač teploty <i>DS18B20</i> v kompaktnom puzdre | 40 |
| 2.10 | Diagram zapojenia systému. | 45 |
| 3.1 | Základné zapojenie vstupných komponentov | 48 |
| 3.2 | Typické zapojenie pre čip ADS1115. [46] | 49 |
| 3.3 | Základné zapojenie výstupného komponentu, napríklad LED pásu. | 50 |
| 4.1 | Elektrické schéma jedného reléového obvodu. [47] | 51 |
| 4.2 | GPIO piny na 40-pinovom headeri Raspberry Pi.[21] | 52 |
| 5.1 | Bočný panel webového rozhraní | 57 |
| 5.2 | Nastavenie dátumu sejby | 58 |
| 5.3 | Nastavenie dávkovacieho intervalu | 59 |
| 5.4 | Nastavenie dĺžky hodinových prevádzkových intervalov | 60 |
| 6.1 | Charakteristika pH senzora | 65 |
| A.1 | Pinout ESP32 | 75 |
| B.1 | Namerané spektrum svetelných zdrojov v miestnosti | 76 |
| B.2 | Nameraná spektrálna odozva červeného LED pásu | 77 |
| B.3 | Nameraná spektrálna odozva červeného laseru | 77 |
| C.1 | Zapojenie Raspberry Pi | 78 |
| C.2 | Vrchná vrstva dosky plošných spojov | 79 |

| | | |
|-----|---|----|
| C.3 | Spodná vrstva dosky plošných spojov | 79 |
| D.1 | Softvérom generovaný 5000 Hz PWM signál šírkou 90 % na výstupe Raspberry PI. | 80 |
| E.1 | Interpolované priebehy dávkovania a povolené rozsahy vodivosti vy- počítané firmvérom. | 81 |
| F.1 | Nastavenie dávkovaných množstiev podľa nastavenej fázy „preflowe- ring“ pomocou posuvníkov vo webovom rozhraní v manuálnom režime. | 82 |
| F.2 | Nastavenie intervalov rastových fáz pomocou dvojpozičných posuvní- kov v automatickom režime. | 83 |

Úvod

Hydroponické pestovanie, ktoré je revolučnou metódou pestovania rastlín sa stalo udržateľným riešením pre moderné poľnohospodárstvo. Táto práca sa zaoberá návrhom, testovaním a implementáciou elektronických systémov pre existujúcu hydroponickú mikrofarmu s cieľom automatizovať pestovateľské činnosti.

Hlavným prínosom tejto metódy pestovania je, že eliminuje potrebu zeminy. Prináša revolúciu v poľnohospodárskych postupoch priamym sprostredkovaním potrebných živín do vody. Vo vode minerály sa rozpustia relatívne rýchlo. Po krátkom miešaní sa celková koncentrácia jednotlivých minerálov stabilizuje a bude konzistentná všade rovnako vo vode.

V tejto práci sa zameriavame na vývoj automatizovaného hydroponického systému mikrofarmy umiestneného vo vnútornom, teplotne regulovanom prostredí. Automatizácia uľahčuje monitorovanie rastu rastlín v reálnom čase a umožňuje posielat upozornenia v núdzových prípadoch a vykonávať potrebné opatrenia.

Práca pozostáva z historického prehľadu vývoja hydroponie, kontextualizácie jej súčasného významu a analýzy rôznych systémov pestovania bez pôdy. Identifikujú sa požiadavky na účinný hydroponický systém vrátane osvetlenia, dodávky živín, regulácie teploty a kvality vzduchu. Ďalšia časť práce tvorí návrh hardvéru, kde sa venuje výberu vhodných senzorov a iných riadených komponentov. Taktiež je diskutovaný výber vhodnej riadiacej jednotky.

Následne sa práca venuje návrhu schémy zapojenia a dosky plošného spoja pre pripojenie všetkých komponentov k riadiacej jednotke. V práci je opísaný aj implementovaný firmvér pre zvolenú riadiacu jednotku, ktorá pravidelne zbiera údaje zo senzorov a ovláda jednotlivé pripojené zariadenia, ktoré sú pre našu farmu nevyhnutné. Definovali a opísali sme jednotlivé programové sekvencie pre manuálny aj automatický režim.

Práca sa zaoberá aj vývojom používateľsky priateľského webového rozhrania na manuálne ovládanie a plánovanie v automatickom režime. Táto práca sa zaoberá aj ovládaním riadených výstupných zariadení v manuálnom režime. V prípade automatického režimu sa rozoberá nastavenie časovačov. V tejto kapitole je podrobne opísaný aj spôsob zobrazovania nameraných senzorových dát. Súčasťou tejto kapitoly je aj návrh systému, ktorý bol vytvorený s cieľom upozorniť používateľa prostredníctvom e-mailu v kritických prípadoch. Jedna podkapitola tejto kapitoly obsahuje príručku pre používateľa, v ktorej sú opísané najdôležitejšie funkcie systému.

Posledná kapitola sa zaoberá kalibráciou pH senzora a kalibráciou dávkovacích krokových motorov a všeobecnými aspektami montáže.

1 Inšpirácia

V tejto kapitole rozoberieme zadanie úlohy, zoznámime sa s existujúcimi riešeniami hydroponických mikrofariem a navrhujeme riešenie jednotlivých bodov úlohy. Najprv si popíšeme, čo hydroponia vlastne je.

1.1 História hydroponie

Prvé poznatky o bezpôdnom záhradníčení sa objavili už skôr, ale až na začiatku 20. storočia začali vedci premýšľať o jeho potenciálnych prínosoch. Wilhelm Knop objavil, ktoré minerálne soli sú v roztoku nevyhnutné, a jeho experimenty dokázali potenciálne výhody hydroponického pestovania. Hydroponia je revolučný a moderný spôsob pestovania rastlín. [1]

1.2 Dnešná situácia

V súčasnosti sa väčšina hydroponického pestovania vykonáva v kontrolovanom prostredí, ako je skleník alebo uzavretá komora s umelým osvetlením. Hydroponické pestovateľské systémy sa líšia v dizajne, prevádzkových charakteristikách a spoľahlivosti. Vo všeobecnosti sú drahšie a zložitejšie na prevádzku, ako väčšina iných pestovateľských metód. Na väčších farmách, ako je vidieť na obrázku: 1.1 tieto kľúčové procesy vykonávajú počítače. Na takej farme sa používa obrovské množstvo senzorov, ktoré merajú vlhkosť, pH, úroveň svetla a úroveň CO₂. Namerané dáta sa spracúvajú pomocou počítačových algoritmov, ktoré sledujú údaje a určujú najlepšie podmienky pre pestovanie zdravých plodín. Hoci počiatočné náklady môžu byť vysoké, hydroponia môže byť vysoko zisková, ako spôsob pestovania plodín. Hlavnými nevýhodami hydroponie sú vysoké kapitálové náklady, častý výskyt koreňových chorôb a nedostatok živín v roztoku.[9] [11]

Bezpôdne pestovateľské systémy ponúkajú nielen možnosť šetrenia vodou a pestovania bez pôdy, ale aj možnosť využitia mestských oblastí, ako sú napr. obytné strechy, na produkciu potravín v tesnej blízkosti spotrebiteľov. Z hľadiska ekonomickej životaschopnosti, udržovateľnosti a súčasného rozvoja sú najdôležitejšie bezpôdne poľnohospodárske systémy: hydroponia, akvapónia a vertikálne poľnohospodárstvo.[2]

Pestovanie v interiéri alebo pestovanie chránené inými štruktúrami pomáha optimalizovať podmienky pestovania rastlín. To uľahčuje ochranu rastlín pred škodcami alebo nepriaznivými poveternostnými podmienkami. Úroveň ochrany, kontroly a riadenia sa môže pohybovať od lacného prístrešku na poli až po skleníky alebo kompletné systémy záhradníctva s kontrolovaným a riadeným prostredím. Rozdiely

vo výnosoch priaznivých pre hydroponiu môžu byť spôsobené účinnou reguláciou výživy, efektívnym využívaním vodného roztoku a rastlinných živných prvkov, ako aj vyššou hustotou výsadby. Porovnania výnosov hydroponického pestovania oproti konvenčnému poľnému pestovaniu môžu byť klamlivé, nakoľko pri porovnaní je veľké množstvo externých faktorov, ktoré ovplyvňujú výsledky. Pri porovnaní za rovnakých podmienok prostredia sú výnosy zvyčajne podobné. [2] [9]

1.3 Porovnanie bezpôdných pestovateľských systémov

Hydropónia sa delí na niekoľko podskupín. Pri aeropónii sa nepoužíva žiadne pestovateľské médium. Ide o metódu pestovania, pri ktorej sa rastliny upevnia v otvoroch polystyrénových dosiek a ich korene sú zavesené vo vzduchu pod doskou. Nepužíva sa žiadna pôda, namiesto toho sa roztok nastrieka priamo na korene rastlín, čo maximalizuje príjem živín. Aeroponické pestovanie sa zvyčajne realizuje v budovách, v chránených prostrediach a používa sa pre nízkolistovú zeleninu, ako je šalát, špenát atp. [2]



Obr. 1.1: Komerčné vnútorné vertikálne farmy. [11]

Aeropónia a hydroponia sa často navzájom porovnávajú, pretože pri oboch metódach musí vodný roztok obsahovať vysokú koncentráciu živín. V skutočnosti sú

tieto metódy v princípe odlišné. U hydroponii sa používa väčšinou namiesto pôdy nejaký typ substrátu, ktorý absorbuje vodu a zabezpečuje, aby sa korene vedeli zachytiť. U aeropónie sa voda strieka na korene, ktoré visia vo vzduchu a rastlina je uchytená pri stonke. Výhodou aeropónie je, že pri koreňoch bude vždy dostatok kyslíka. U aeroponických systémoch sa rozprašuje jemný živný roztok na korene. Čím jemnejšie, tým bude lepšia výkonnosť rastliny. Zloženie živného roztoku sa upraví na základe času a frekvencie vystavenia koreňov živnému roztoku. Najčastejšie sa táto metóda používa pre rastliny, pri ktorých je koreň dôvodom zberu rastliny. Ako je vidieť aj na obrázku 1.2, aeropónie umožnia pestovanie aj napr. zemiakov. [2] [9]



Obr. 1.2: Pestovanie zemiakov v aeroponickom systéme [12]

Akvaponický systém je založený na kombinácii vodných živočíchov a rastlín na udržanie stabilného a prirodzeného vodného prostredia. Kombinuje hydroponickú kultúru rastlín s akvakultúrou v uzavretom vodnom cykle. Podstatou akvapónie je, že potrebné živiny sa prirodzene vyrovnávajú. Hydroponia funguje v čistom, človekom vytvorenom prostredí, zatiaľ čo akvapónia napodobňuje fungovanie prirodzeného ekosystému. Konštrukcia akvaponického systému je náročnejšia na dizajn, prácu a náklady. Je potrebné zrealizovať filtračné systémy a zrealizovať akvárium pre samotné ryby. Na internete je pomerne jednoduché nájsť celé návody, ktoré sa zaoberajú návrhom, údržbou a dosiahnutými výsledkami, ako je vidieť na obrázku: 1.3. Výhoda je, že v zavedenom akvaponickom systéme je potrebné monitorovať hodnoty pH a dusíka iba raz týždenne a hladiny dusičnanov iba raz za mesiac v dôsledku prirodzenej rovnováhy týchto prvkov. [2]

Pri hydroponických kultivačných systémoch sa rastliny zakoreňujú v anorganickom substráte. Potom ich korene v substráte sú spolu s živným roztokom buď zalievané priamo alebo použitím systému kvapkovej závlahy. U hydroponii je prúdenie zvyčajne nepretržité, avšak niektoré systémy prerušujú prúdenie na niekoľko minút každú hodinu, aby sa zabezpečilo dostatočné prevzdušnenie koreňových systémov. Väčšinou sa na prevzdušňovanie používa ďalšie čerpadlo, ktoré prebubláva vzduch do živného roztoku. Ďalším dôvodom, prečo tento systém hydroponického pestovania nie je vhodný na komerčné využitie, je pomerne vysoká spotreba vody a chemikálií. Hydroponický systém vyžaduje výmeny živného roztoku, každých 5-10 dní. [3] [9]



Obr. 1.3: Pestovanie šalátu na plávajúcej doske z polystyrénu na jazierku. [10]

1.3.1 Typy bezpôdných pestovateľských systémov

NFT (nutrient film technique) je technika, kde živný roztok steká kanálom obsadeným koreňmi rastlín. Táto technika umožňuje širokú škálu prispôbení. V porovnaní s inými hydroponickými systémami má systém NFT tieto hlavné výhody: nižšie náklady na inštaláciu, jednoduchá obsluha a sterilizácia zariadenia a úspora vody

a živín vďaka uzatvorenému systému recyklácie. Systémy NFT môžu mať menej negatívny vplyv na životné prostredie, pretože pri vylievaní použitej vody používajú menej živín a pesticídov. Okrem toho tieto systémy umožnia efektívnejšie využitie plochy na pestovanie, ako je vidieť na obrázku: 1.4. Jedna nevýhoda je, že keď sa koreňová hmota zväčšuje, živný roztok bude mať tendenciu pretekať nad alebo okolo koreňovej hmoty, čo výrazne ovplyvní výkonnosť rastlín.[8] [9] [13]



Obr. 1.4: Pestovanie šalátu v systéme NFT. [13]

DFT (deep film technique), alebo DWC (deep water culture) je metóda, kde sa pestuje vo vode alebo plávajúce na hladine vody. V tomto systéme živný roztok vytvorí vrstvu 50 až 20 cm, kde sú korene ponorené. [8]

Tretou možnosťou je pestovanie rastlín v substrátoch. Tento systém využíva črepníky, rúrky vyplnené murivom alebo iným inertným materiálom, ako je piesok, kamene rôznych typov, vermikulit, perlit, minerálna vlna, fenolová pena a iné zlúčeniny na podporu rastliny. Živný roztok preniká cez tieto materiály a následne sa odvádza na dno nádoby a vracia sa do nádrže na roztok na recirkuláciu. Udržiavaním konštantnej hladiny živného roztoku (alebo vody) obsadia korene tú časť zakoreňovacieho média, kde je rovnováha medzi obsadenou vodou a vzduchom. Medzi hlavné výhody tejto metódy možno zaradiť rovnomernú výživu, dobré vetranie, ľahké ukotvenie rastlín a viac času na opravy v prípade porúch systému. Nevýhodou boli najväčšie náklady na zariadenia a údržbu v porovnaní s NFT.[8] [9]

1.4 Požiadavky na pestovateľský systém

Každá rastlina má svoje ideálne podmienky v závislosti od fázy rastu, v ktorej sa práve nachádza. Našou úlohou je navrhnúť softvér a hardvér zariadenia, ktoré riadi prostredie, v ktorom môžu rastliny rásť s minimálnym zásahom človeka. Ďalej musí systém odosielať namerané údaje o prostredí a upozorniť správcu systému v kritických situáciách.

Pred vytvorením konkrétneho plánu si musíme určiť, aké sú konkrétne ideálne podmienky pre rastliny. Stanoviť si všeobecné podmienky je náročné. Vo väčšine prípadov splnenie podmienok náročnejších rastlín zaručuje aj splnenie podmienok tých menej náročných. V prípade vždy je možnosť neskôr zmeniť nastavenie pre daný systém. Ako prvé sme si najprv vybrali jednu konkrétnu chilli papričku, *Capsicum annuum* (Paprika ročná), ktorá je vo vnútorných podmienkach pomerne náročná na pestovanie. Určité požiadavky aj všeobecné platia pre všetky rastliny, avšak snažili sme si vytvoriť inštrumentáciu, ktorá spĺňa všetky podmienky *Capsicum annuum*.

1.4.1 Svetelné požiadavky rastlín

Svetlo je jedným z najdôležitejších environmentálnych faktorov, ktoré určujú rast a vývoj rastlín. Rôzne intenzity svetla ovplyvňujú výnos a obsah kapsaicínu v chilli papričkách. Fotosyntéza sa vykonáva prostredníctvom rôznych druhov foto receptorov. Fotosyntézu ovplyvňuje intenzita svetla a spektrálne zloženie, tvorbu biomasy a výnosu prostredníctvom modifikácie primárnych a sekundárnych metabolických dráh. Aplikácia technológie LED (light-emitting diode) pri pestovaní rastlín urýchlila výskum vplyvu svetelného toku a vlnovej dĺžky na metabolizmus rastlín. Dnes sú už dostupné aj komerčne vyrobené LED osvetlenia, ako je vidieť na obrázku 1.5. Tieto osvetlenia sú špeciálne určené na pestovanie rastlín. [14] [23]

Pred objavením LED sa najčastejšie používali sodíkové výbojky. Dnes už poznáme, že „spaľuje“ listie rastlín. Vyžaruje príliš veľké množstvo infračerveného svetla a oproti LED osvetleniam sú energicky neefektívne. Výhodou LED osvetlenia je to, že vďaka nízkej prevádzkovej teplote môže rastlina narásť až do vzdialenosti 15 až 30 cm od diód. To umožňuje zachovanie vertikálneho priestoru. [15]

Fotosynteticky aktívne žiarenie je termín používaný na opis svetla, ktoré aktivuje fotoreceptory rastlín. Toto žiarenie je definované ako svetlo medzi vlnovými dĺžkami 400nm-700nm. Najdôležitejšie fotoreceptory sú: β -karotén, chlorofyl a, chlorofyl b. Ako aj na obrázku 1.6 je vidieť, celková aktivácia však zahŕňa oveľa širšie spektrum. Sem patria ďalšie fotoreceptory, ako sú: zeaxantín a antokyanín. Tieto receptory spĺňajú iné dôležité funkcie pre rastliny v súvislosti s fotosyntézou. Do rozsahu ne-

patri ultrafialové a infračervené žiarenie. Ultrafialové žiarenie vo všeobecnosti prispieva k degradácii buniek, zatiaľ čo vlnové dĺžky dlhšie, ako 700 nm sa obvykle považujú za nedostatočnú energiu na aktiváciu fotosyntetických reakcií. [15] [16]

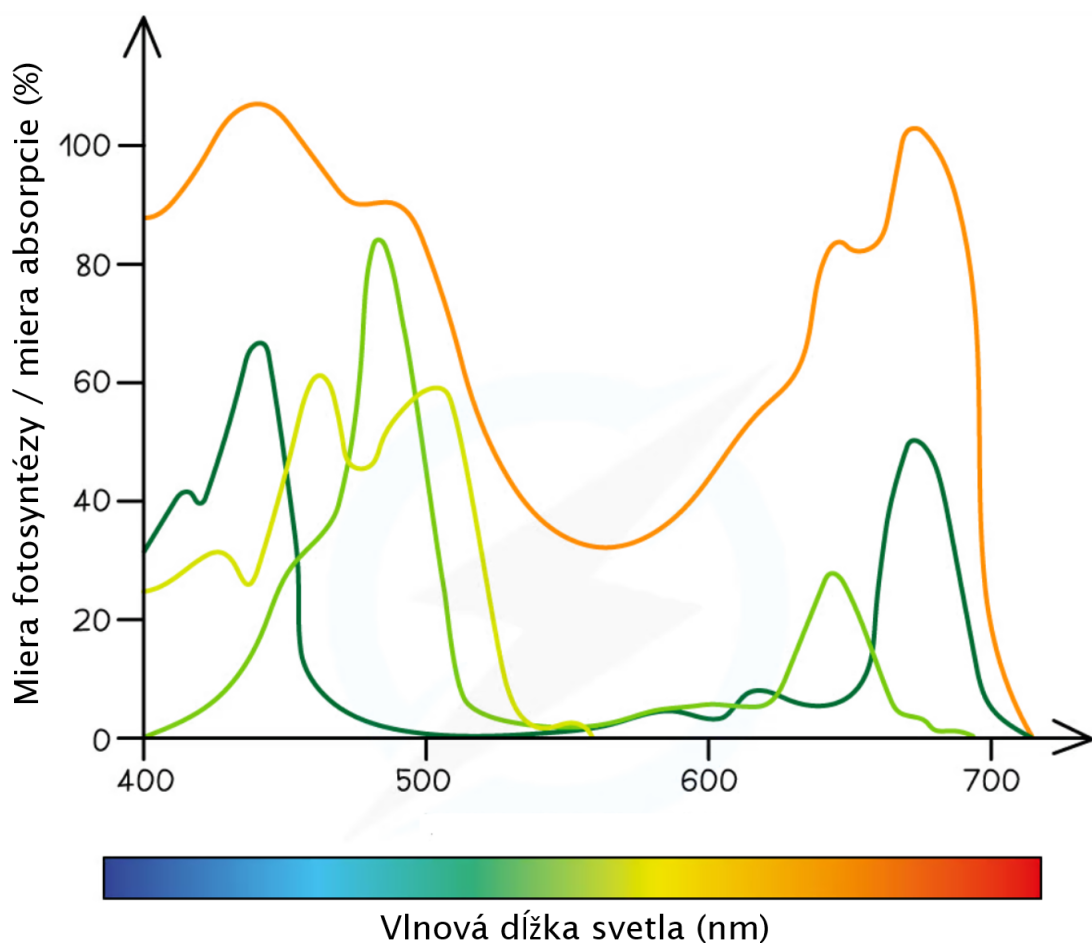
Hlavné svetelné faktory určujúce daný morfológický alebo fyziologický parameter neboli u mnohých druhov rastlín identifikované. Ešte menej informácií je dostupných o tom, ako rôzne druhy LED osvetlenia ovplyvňujú jednotlivé metabolické dráhy. Keďže slnečné svetlo má široké spektrum, ideálne by bolo zostaviť osvetlenie, kde sú biele, červené a modré LED diódy v pomere 65:20:15 v proporciách modrá:zelená:červená, čo dáva celkovú intenzitu svetla asi 13000 lumenov na jeden meter štvorcový. Vysoká intenzita svetla s kompletným spektrálnym zložením poskytne najväčší výnos. [14]



Obr. 1.5: Komerčné LED osvetlenie pre rastliny. [23]

Antioxidačná schopnosť rastlín koreluje hlavne s množstvom modrej, zelenej a červenej zložke svetla. Avšak množstvo modrého svetla má negatívny vplyv na výšku rastlín a produkciu zelenej hmoty, ale má taktiež pozitívny vplyv na ovocnú hmotu a úrodu. Červené žiarenie je najúčinnnejšie absorbovaná oblasť elektromagnetického spektra, takže produkcia biomasy je najvyššia pri vysokom pomere červeného svetla. Zatiaľ čo najvyššia produkcia ovocia je dosiahnuteľná pri vysokom podiele modrého svetla. Ukázalo sa, že nízke množstvo modrého svetla (pri nízkej intenzite

svetla s červenými dominantnými spektrami) stimuluje produkciu zelenej hmoty, zatiaľ čo dostatočné množstvo modrého svetla môže zvýšiť výnos. Svetelná závislosť flavonoidov a antioxidačnej aktivity v plodoch vykazovala pozitívnu koreláciu s množstvom modrého svetla. Čas kvitnutia u chilli papričiek sa urýchli pri vysokej intenzite svetla s vysokým množstvom modrých a zelených zložiek a kladne pôsobí aj červené svetlo s vlnovou dĺžkou viac, ako 700 nm. Taká hlboko červená farba pôsobí na rastlinu spôsobom, že rastlina vyprodukuje listy s širšou plochou a tmavšou zelenou farbou. Zelené žiarenie bolo spočiatku ignorované v skorých záhradníckych aplikáciách LED. Zelená farba patrí medzi najmenej efektívne absorbované pri fotosyntéze. Zelené svetlo je však tiež dôležité. Práve táto vlastnosť umožňuje, aby sa fotóny týchto vlnových dĺžkach prenikli aj na spodné listiny. [14] [15]



Obr. 1.6: Absorpčné schopnosti fotoreceptorov rastlín. Žltá: β -karotén, tmavozelená: chlorofyl a, svetlozelená: chlorofyl b, oranžová: celková fotosyntéza [17]

V skleníkoch a v prostredí s prirodzeným svetlom sú chilli papričky často zatienené aby sa chránilo pred slnečným žiarením. Červená farba plodov chilli papričiek

pochádza hlavne z kapsantínu a kapsorubínu. Mierna intenzita svetla a vyšší podiel červeného svetla môžu stimulovať ich akumuláciu. Svetlo však nie je hlavným faktorom pri kontrole biosyntézy karotenoidov počas dozrievania plodov. Možno konštatovať, že použitie vhodného LED osvetlenia môže byť alternatívnym spôsobom, ako zvýšiť úrodu. [14]

1.4.2 Všeobecné požiadavky rastlín na živiny

Základnými zložkami bežného hnojiva sú dusík, fosfor a draslík. Mimo toho rastliny potrebujú aj stopové prvky, ako železo, zinok, meď, mangán, bór, chlór, atď.

Existujú komerčne pripravené zmesi všetkých potrebných prvkov, ktoré sa jednoducho rozpustia vo vode na prípravu živného roztoku. Tieto zmesi sú dostupné v rôznych koncentráciách a pomeroch prvkov. Každá zmes obsahuje rovnaké zložky, ale v mierne odlišných pomeroch. Žiadna receptúra nie je nevyhnutne najlepšia pre všetky rastliny na svete, ale väčšina je schopná poskytnúť potrebnú výživu. [3]











Obr. 1.7: Balík zmesi živín *TriPart*[®] [18]

Z dôvodu jednoduchosti a efektivity sme zvolili zmesi *TriPart*[®] od *Terra Aquatica*. Ako môžeme vidieť na obrázku 1.7, hnojivo je rozdelené do 3 zložiek: Grow,

Bloom, Micro. Všetky tri sa používajú súčasne už od prvej fáze a konkrétne údaje dávkovania sú vidieť na obrázku 1.8.

Často sú odporúčané špeciálne receptúry pre konkrétnu rastlinu na základe výskumov, špecifikované pre konkrétne klimatické podmienky a kvalitu vody. Odporúča sa každé dva týždne pripraviť čerstvý roztok z koncentrátov s periodickým dopĺňaním. Takýto systém predpokladá, že počas krátkej doby používania zostane v roztoku vždy dostatočné množstvo živín, pokiaľ sa pravidelne pridá potrebný čerstvý koncentrát. Toto je uskutočniteľný postup, ktorý sa s určitým úspechom používa. Avšak pri tomto postupe sú niektoré živiny zbytočne premrhané. Alternatívou je predĺžené používanie roztoku po dobu niekoľkých týždňov, prípadne mesiacov. Táto metóda si však vyžaduje dôkladné pravidelné monitorovanie, aby sa predišlo nedostatkom alebo prebytkom živín. [3]

| |  Hydro |  Coco |  1st roots |  1st true leaves |  Growing |  Pretlowing |  Flowering |  Final Part® Ripening |  Flash Clean® |
|------------------------|---|--|---|---|---|--|---|--|--|
| ● TriPart Grow | 0,5ml/L | 1ml/L | 1,8ml/L | 2ml/L | 0,8ml/L | - | - | | |
| ● TriPart Micro | 0,5ml/L | 1ml/L | 1,2ml/L | 2ml/L | 1,6ml/L | - | - | | |
| ● TriPart Bloom | 0,5ml/L | 1ml/L | 0,6ml/L | 1,5ml/L | 2,4ml/L | - | - | | |
| EC (mS) | 0,3 - 0,6 | 0,8 - 1,2 | 1,3 - 1,8 | 1,8 - 2,0 | 1,4 - 2,2 | 1,4 - 2,6 | - | | |

Obr. 1.8: Dávkovacia tabuľka produktov *Terra Aquatica*. [18]

1.4.3 Teplotné požiadavky rastlín

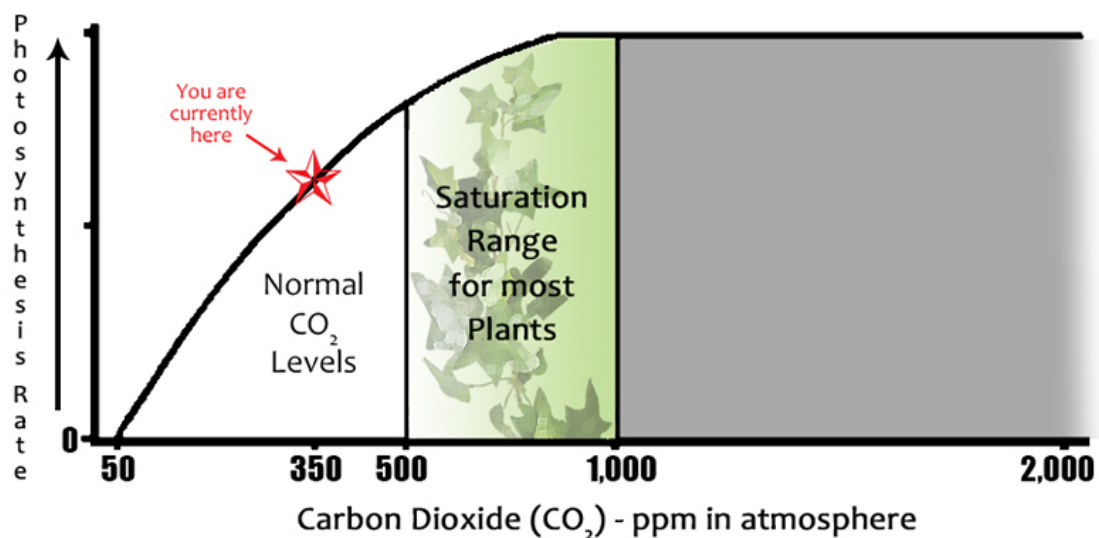
Teplota živného roztoku ovplyvňuje príjem vody a živín rastlinou. Teplota živného roztoku má tiež vplyv na fotosyntetické schopnosti rastlín. Vysoká teplota roztoku (35 °C) vyvolá účinky krátkodobé aj dlhodobé. Krátkodobou sa prostredníctvom zníženia viskozity vody aktivuje príjem vody a živín. Z dlhodobého hľadiska sa zníži rozpustnosť kyslíka, zatiaľ čo enzymatická oxidácia fenolových zlúčenín v tkanivách kožnej epidermy a kôry sa zvýši. Teplota živného roztoku má priamy vzťah k množstvu kyslíka spotrebovaného rastlinami a inverzný vzťah ku kyslíku v ňom rozpustenému. Teplota vzduchu by mala byť medzi 21 až 26 °C počas dňa a 15 až 21 °C v noci.[4] [6][9]

Každý rastlinný druh má minimálnu, optimálnu a maximálnu teplotu pre rast, čo si vyžaduje implementáciu vykurovacích alebo chladiacich systémov na vyrovnanie teploty živného roztoku. Teplota živného roztoku by nikdy nemala byť nižšia,

ako teplota okolitého vzduchu, najmä v systémoch, kde sú korene rastlín vystavené prerušovaným náporom veľkého objemu živného roztoku. Vo všeobecnosti platí, že pri vyšších teplotách je príjem vyšší a naopak. [4] [9]

1.4.4 Kvalita vzduchu

Koncentrácia oxidu uhličitého, teplota a vlhkosť vzduchu ovplyvňuje fotosyntézu. Rastlinné bunky „vdychujú“ CO_2 na použitie počas fotosyntézy a „vydychujú“ kyslík, keď mňajú energiu, čím odstraňujú uhlík z atmosféry. Existuje teda priamy vzťah medzi CO_2 a fotosyntézou. Priemerná koncentrácia CO_2 v atmosfére je pri bežných podmienkach asi 350 – 400 ppm (parts per million), čo je aj označené na obrázku 1.9. [6]



Obr. 1.9: Vzťah medzi koncentráciou CO_2 vo vzduchu a fotosyntézou. [6]

Rastliny v hydroponických systémoch dokážu pomerne rýchlo absorbovať všetok dostupný CO_2 . Nízka hladina oxidu uhličitého môže viesť k pomalšiemu rastu a menším výnosom. Ak je miestnosť často prevetraná, nebude potrebné umelo pridať ďalší CO_2 , pretože čerstvý vzduch bude prichádzať stále dovnútra (a akýkoľvek prebytok kyslíka uhličitého sa aj tak vyvetrá). [6]

Rastliny dýchajú cez malé prieduchy v listoch takzvané stómy. Rastliny používajú transpiráciu (vypúšťajú vodnú paru cez svoje prieduchy), ako metódu vlastného ochladenia. Pokiaľ je rastlina príliš horúca, dýchanie môže spôsobiť stres zo straty vody. Vtedy prieduchy sa uzavrujú a tým sa zastaví aj príjem CO_2 . Príliš vysoká

vlhkosť vzduchu znemožní rastline dýchanie, čo môže spôsobiť ešte väčší stres. Nadmerná vlhkosť podporuje aj tvorbu plesní a šírenie iných chorôb. Ideálny rozsah relatívnej vlhkosti vzduchu je okolo 50 až 85%. [6]

Okrem snímania koncentrácie CO₂, môže byť užitočné snímať aj množstvo prchavých organických zlúčenín (VOC) v blízkosti rastlín. Rastliny emitujú širokú škálu prchavých organických látok na prilákanie opelovačov, ako reakciu na biotický a abiotický stres, viď obrázok 1.10. Uvoľňovanie prchavých organických látok je pre rastliny účinným spôsobom komunikácie, ale prchavé organické látky plnia aj iné dôležité funkcie. Je to spôsob, akým pôsobia na okolitý svet. [7]

Kvetinové vône zvyčajne uvoľňuje každá rastlina prostredníctvom individuálne vyvinutých prírodných mechanizmov. Vzorky kvetinovej vône v priestore vykazujú prítomnosť tisícov chemických zlúčenín patriacich do siedmich hlavných tried zlúčenín. Množstvo a charakter VOC uvoľňovaných z vegetatívnych častí rastlín a koreňov sa môže dramaticky zmeniť, keď sú rastliny vystavené stresu. Snímaním množstva VOC vo vzduchu je možné identifikovať napríklad aj pri fáze rastu. [7]

Ako obranný mechanizmus môžu rastliny uvoľňovať špecifické VOC. Vystavenie VOC môže zvýšiť produkciu obranných látok v listoch. To môže spustiť reťazovú reakciu medzi jednotlivými rastlinami. Množstvo a charakter VOC uvoľňovaných z vegetatívnych častí rastlín a koreňov sa môže dramaticky zmeniť, keď sú rastliny vystavené stresu. [7]

1.4.5 Predpríprava pestovania *Capsicum annuum*

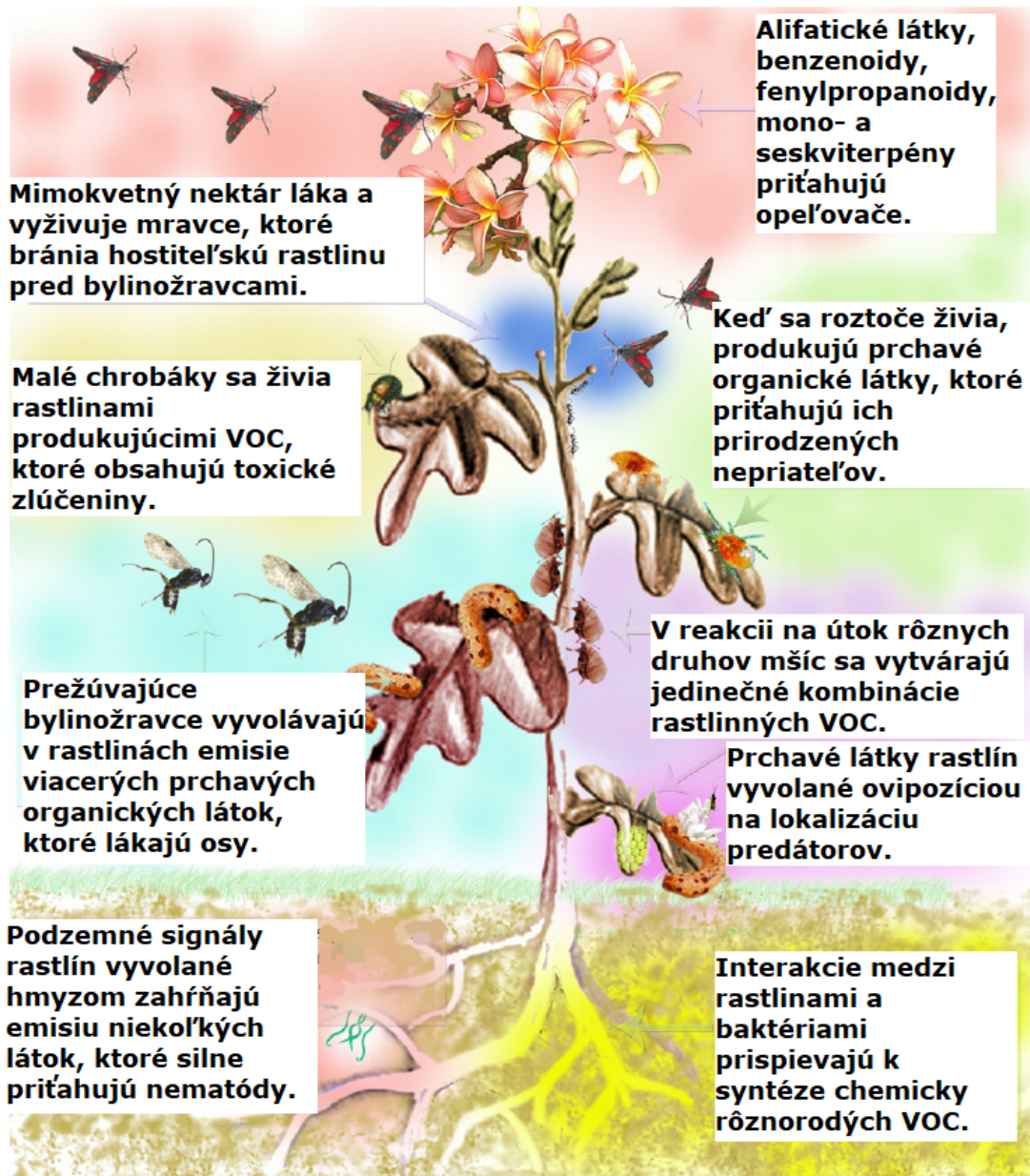
Ako prvé sme semená zasadili do pôdneho substrátu a následne sme ich nechali vyklíčiť. Pretože jednotlivé semená začali klíčiť s odstupom dvoch týždňov, výšky jednotlivých rastlín boli drasticky odlišné, ako je vidieť aj na obrázku 1.11. U tohto druhu chilli papriky to môže znamenať radikálne väčší príjem živín, pokiaľ porovnáme relatívny príjem najstaršej a najmladšej rastliny.

Našťastie jednotlivé životné fázy tejto papriky väčšinou trvajú dostatočne dlho, aby tento rozdiel bol zanedbateľný v neskorších fázach, teda po presadení do hydroponického systému. Po piatich týždňoch boli korene dostatočne dlhé na presadenie rastlín do nášho hydroponického systému.

Náš pestovateľský systém je vertikálneho typu. Pri vertikálnom pestovaní sa rastliny zvyčajne pestujú vo vrstvách alebo poschodiach, aby sa maximalizoval priestor a účinnosť. Každá vrstva predstavuje samostatnú horizontálnu vrstvu, v ktorej sa pestujú rastliny. Preto možno počuť, že ľudia označujú jednotlivé úrovne alebo poschodia vertikálnej farmy ako "vrstvy" alebo "úrovne".

Používa sa vodný kanál znázornený na obrázku 2.1, ktorá umožňuje rozvod tečúcej vody ku každej rastline v jednom poschodí hydroponického systému. Systém je

navrhnutý tak, aby zabezpečil, že každá rastlina dostane konzistentný a regulovaný prísun vody bohatej na živiny. Pomáha metodickéj a účinnej distribúcii vody, čím zabezpečuje, že každá rastlina pozdĺž úrovne dostáva dostatočnú hydratáciu a živiny na optimálny rast.



Obr. 1.10: Funkčná úloha rastlinných prchavých organických látok. [7]

Rastliny sa potom umiestnia do otvorov alebo vreciek v polystyréne, viď obrázok 2.2, ktorá pláva na vode, takže ich korene visia do vody bohatej na živiny, zatiaľ čo zvyšok rastliny zostáva nad hladinou. Materiál, ktorý sa v hydroponických systémoch umiestňuje na hladinu vody sa často označuje ako "plávajúce rafty" alebo

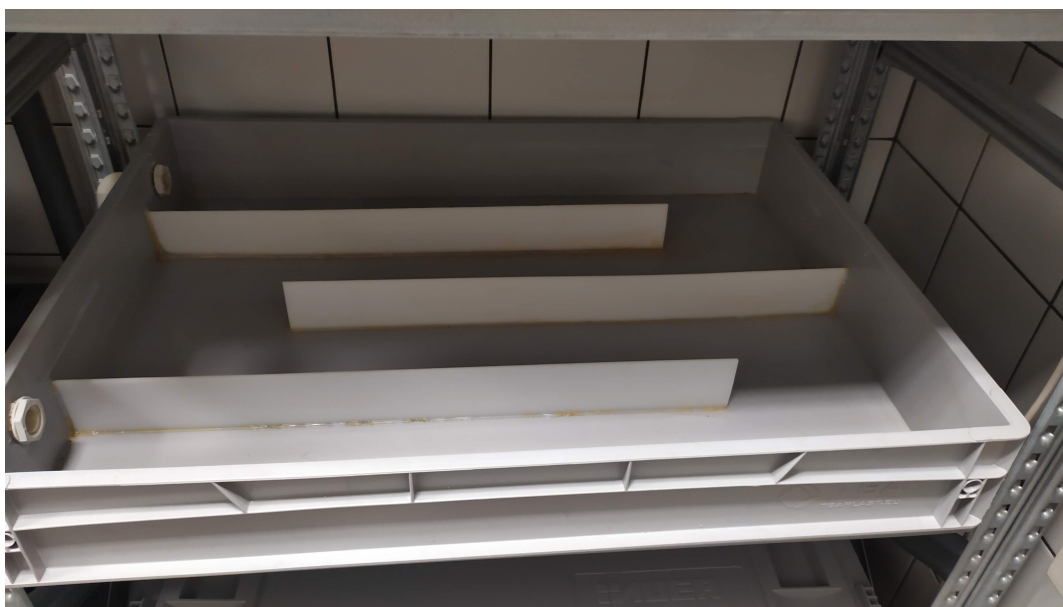
"plávající dosky". Tieto rafty sú zvyčajne vyrobené zo plávajúcich materiálov, ako je polystyrén, penové dosky alebo iné ľahké materiály, ktoré im umožňujú udržať sa na vodnej hladine. Táto metóda sa bežne používa v hydroponickej technike známej ako Deep Water Culture (DWC) alebo hlboká vodná kultúra.



Obr. 1.11: *Capsicum annuum* štyri až šesť týždňov po vyklíčení

2 Inštrumentácia a návrh zariadenia

Jednotlivé prvky systému možno rozdeliť do dvoch základných skupín, snímače a akčné členy. Akčné členy slúžia na reguláciu osvetlenia a dávkovanie živín. Senzory sú na druhej strane dôležité, pretože poskytujú spätnú väzbu o systéme. Zbierané dáta budú ďalej posielané riadiacou jednotkou na webový server. Najprv si popíšeme, úlohy a všeobecné funkčnosť jednotlivých prvkov. Potom si vyberieme konkrétne súčiastky, ktoré vyhovujú našim požiadavkám a popíšeme si ich špecifikácie a elektronické a neelektronické vlastnosti a charakteristiky.



Obr. 2.1: Odhalený vodný kanál jedného poschodia hydroponického systému.

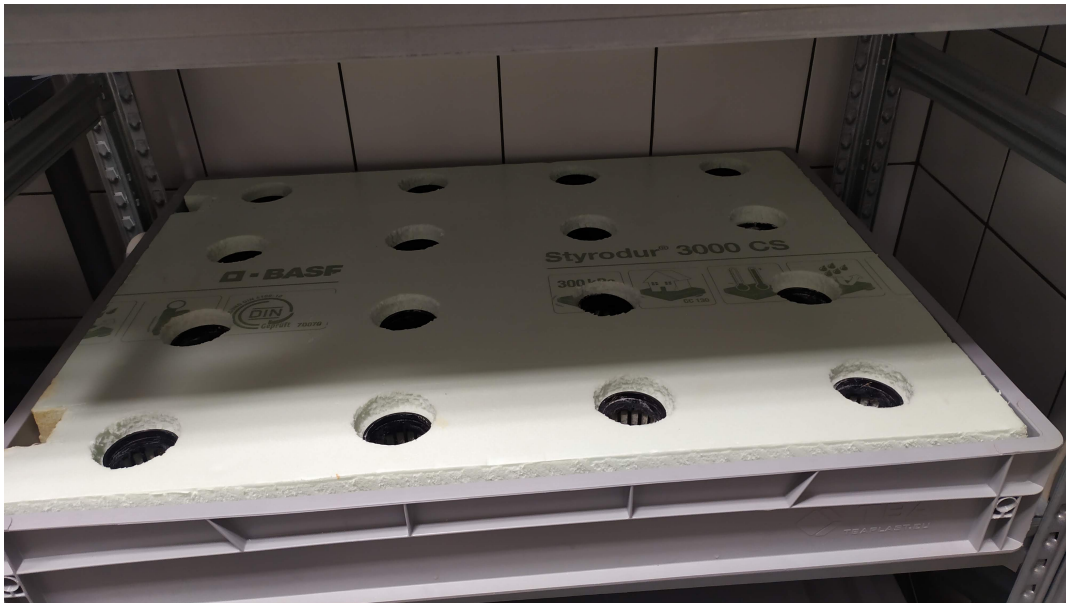
2.1 Všeobecný popis jednotlivých prvkov

Táto podkapitola opisuje všeobecné úlohy a tiež požiadavky na jednotlivé riadené a vstupné komponenty systému. Popíšeme, aké kritériá by mali komponenty spĺňať na základe potrieb rastlín.

2.1.1 Aktuátory a riadené výstupné zariadenia

- **LED osvetlenie** - všetky rastliny potrebujú fotosyntézu. LED osvetlenie bude slúžiť, ako náhrada slnečného žiarenia. Oproti žiarovke vyžaruje rádovo menej svetla v infračervenom pásme. Žiarovky produkujú teplo, čo zbytočne ohrieva listy rastlín.

- **Akváriové čerpadlo** - rastliny rastúce v hydroponii vyžadujú okrem vody a živín dodávaných v rastových roztokoch aj prísun kyslíka ku koreňom. Bez neustáleho prevzdušňovania sa hydroponický systém stáva anaeróbnym a obmedzuje rast takmer všetkých druhov rastlín. Tento systém zachováva pravidelné premiešavanie rastového roztoku opakovaným prečerpávaním do pestovateľskej nádoby a následným odtečením prebytočného roztoku. [5]



Obr. 2.2: Polystyrénová plocha s vreckami na rastliny.

- **Kompresor na prevzdušňovanie vodného roztoku** - Prevzdušňovanie roztoku a čerpanie roztoku cez systém je možné vykonať pomocou jedného kompresoru. Tento typ kompresoru vytvára konštantný vzdušný tlak a je výhodný z dôvodu nízkych nárokov na údržbu.
- **Ohrievač vody** - rastliny potrebujú teplejšiu vodu, a to hlavne v počiatočných fázach rastu. Vykurovacie teleso premieňa elektrickú energiu na teplo prostredníctvom elektrického odporu. Pomocou jedného vykurovacieho telesa je možné udržiavať teplotu roztoku v ideálnych rozsahoch v závislosti od rastovej fázy rastlín. [4]
- **Peristaltické čerpadlá** - jednotlivé prvky hnojiva je potrebné dávkovať v rôznych množstvách s presnosťou na jednotky ml. Na tento účel sú ideálne peristaltické čerpadlá. Len ich maximálny prietok môže byť pri určitých aplikáciách obmedzujúci. Ich výhodou je, že umožňujú aj presné dávkovanie po kvapkách a celkovo sú veľmi presné. Zároveň čo je kľúčové, že nemajú žiadny kontakt medzi kvapalinou a mechanikou čerpadla, lebo sa nevytvoria žiadne chemické reakcie medzi materiálmi čerpadla a dávkovanej kvapaliny.

- **Ventilátor** - pohyb vzduchu je prospešné z niekoľkých dôvodov pre rastliny. Mierne rýchly vietor urýchľuje výmenu oxidu uhličitého, rastlinám vyrastú silnejšie stonky a pomáha znižovať riziko chorôb.

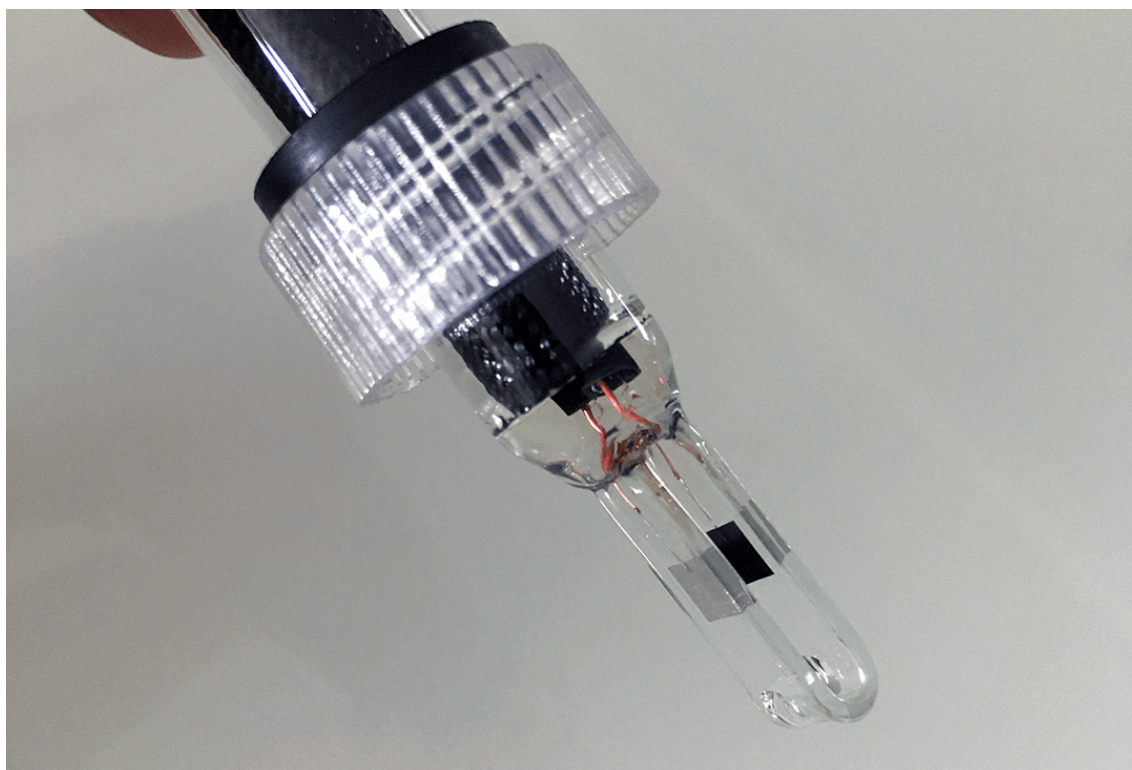
Senzory:

- **Senzor hladiny hnojiva** - Senzor na indikáciu nedostatku hnojiva. V prípade nedostatku systém hlási užívateľa.
- **Senzor hladiny roztoku** - Senzor na indikáciu hladiny roztoku vo veľkej nádrži. Pre náš systém postačí diskretný senzor s dvomi stavmi. Ak hladina roztoku poklesne pod určitý úroveň, bude stav hlásený.
- **Senzor koncentrácie CO₂ vzduchu** - zber údajov o kvalite vzduchu v okolí rastlín.
- **Senzor teploty, a vlhkosti vzduchu** - zber údajov o kvalite vzduchu a v okolí rastlín.
- **Senzor teploty vodného roztoku** - monitorovanie teploty živného roztoku. Slúži aj, ako spätná väzba k ohrievaniu.
- **EC sonda** - celková iónová koncentrácia rozpustených solí určuje rast, vývoj a produkciu rastlín. Iónová koncentrácia v roztoku pôsobí osmotickým tlakom, čo je koligatívnou vlastnosťou živných roztokov. Nepriama metóda merania osmotického tlaku živného roztoku je meranie elektrickej vodivosti (EC), index koncentrácie soli, ktorý definuje celkové množstvo solí v roztoku. Čím viac je minerálnych solí rozpustených v roztoku, tým má väčšiu vodivosť. Ióny spojené s vodivosťou sú Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , OH^- . Je potrebné poznamenať, že touto metódou nie je možné merať koncentráciu jednotlivých živín zvlášť. [4]

Vodivosť sa zvyčajne meria v mikrosiemensoch alebo mili-siemensoch na centimeter. Vodivosť (Siemens) je meraná cez špecifikovanú vzdialenosť (1 cm), ktorá je začlenená do jednotiek (S/cm). Ak privedieme napätie do dvoch kovových vodičov, ktoré sú od seba vzdialené, je možné zmerať odpor vody, ktorý je opakom vodivosti. Elektrická vodivosť je citlivá na zmeny teploty a postupne klesá v kovovom vodiči, čím dlhšie sondou preteká prúd. EC sonda je aktívny prvok, ktorý si vyžaduje, aby sa na ňu priviedlo budiacie napätie na meranie. Ako materiál elektród sa väčšinou používa platina a zvyčajne sú od seba vzdialené presne o cm, ako je vidieť aj na obrázku 2.3. Jednosmerné napätie spôsobuje polarizáciu a chemickú degradáciu elektród. Preto sa používa striedavé napätie frekvenciou 1 až 20 kHz. [24]

- **pH sonda** - Rôzne rýchlosti vyčerpania NH_4^+ a NO_3^- budú mať za následok zmenu pH rastového roztoku. Nedodržovanie ideálnych hodnôt pH môže byť nebezpečné pre rastliny. Rastliny zvyčajne uprednostňujú mierne kyslejší

roztok. Vo všeobecnosti je rozsah pH navrhovaný pre väčšinu hydroponických roztokov medzi 5,8 a 6,5. Na druhej strane pri nízkom pH prevláda Al ako trojmocný kation Al^{3+} , ktorá je toxická pre rastliny. [5] [9]



Obr. 2.3: Fotka EC sondy zblízka. Na fotke sú viditeľné obidve platínové elektródy, ktorých plocha a vzdialenosť boli presne kalibrované výrobcom. [24]

- **Webkamera** - poskytuje obrázky aktuálneho štádia rastu. Je užitočné mať fotografický záznam rastlín v kritickom stave etapy vývoja, takže, je potrebné viesť denný foto záznam. Ďalším využitím je meranie rýchlosti rastu pomocou počítačového videnia. Rast možno kvantifikovať meraním nárastu zelených pixelov softvérom. Vyhodnotenie rýchlosti rastu je možné aj výpočtom priemernej výšky rastlín a porovnať s predošlými priemernými výškami. Ale touto metódou si nemerame rast bočných vetiev. Na získanie zmysluplného vizuálneho záznamu je dôležité umiestniť kameru kde náhľad na rastliny je čo najväčší. [9]

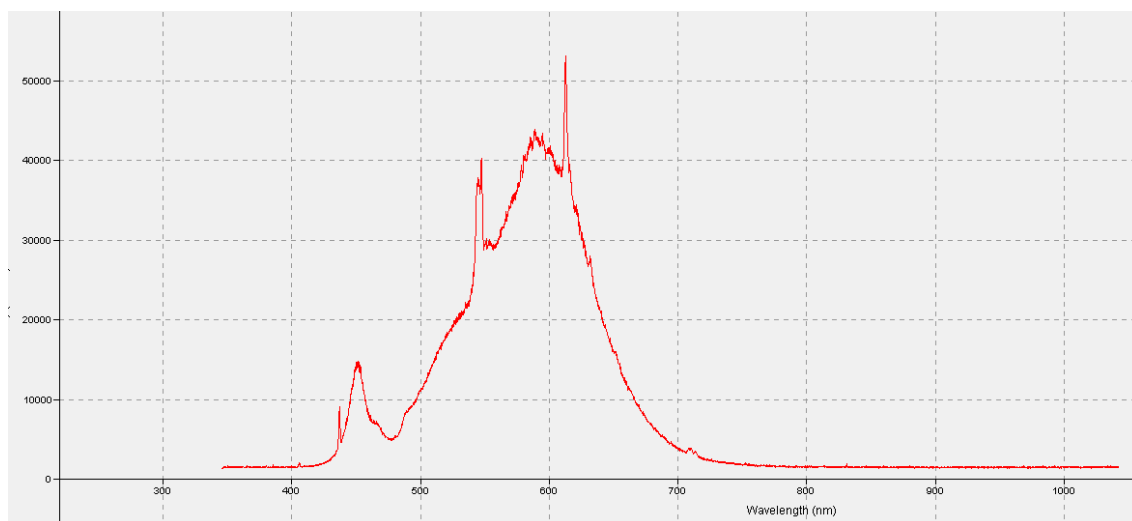
2.2 Konkretizácia výstupných prvkov

Tu opíšeme špecifikácie konkrétnych komponentov používaných na osvetlenie, cirkuláciu vodného roztoku, dávkovanie potrebných živín, ohrev vodného roztoku, pre-
vzdušňovanie vody a vetranie vzduchu okolo rastlín.

2.2.1 LED osvetlenie

Výber vhodných osvetľovacích prvkov je kritický pre hydroponické pestovateľské systémy. Na zabezpečenie dostatočných svetelných intenzít pre najdôležitejších vlnových dĺžok (viď kapitolu 1.4.1), budeme potrebovať viacero typov LED osvetlení.

Zvolili sme postup, že sme si namerali spektrálnu odozvu jedného LED pásu, typu *SB3-600* a následne sme zistili, ktoré vlnové dĺžky treba doplniť. Na meranie sme použili spektrometer *OceanOptics USB4000*. Výsledok merania je možné vidieť na obrázku 2.4. Na základe meraní sme zistili, že by bolo vhodné rozšíriť spektrum osvetlení o červené svetlo s vlnovou dĺžkou 600 až 700 nm, a spektrum vylepšiť pridaním ďalšieho typu neutrálneho bieleho LED pásu.



Obr. 2.4: Nameraná spektrálna odozva bežného LED pásu teplej bielej farby

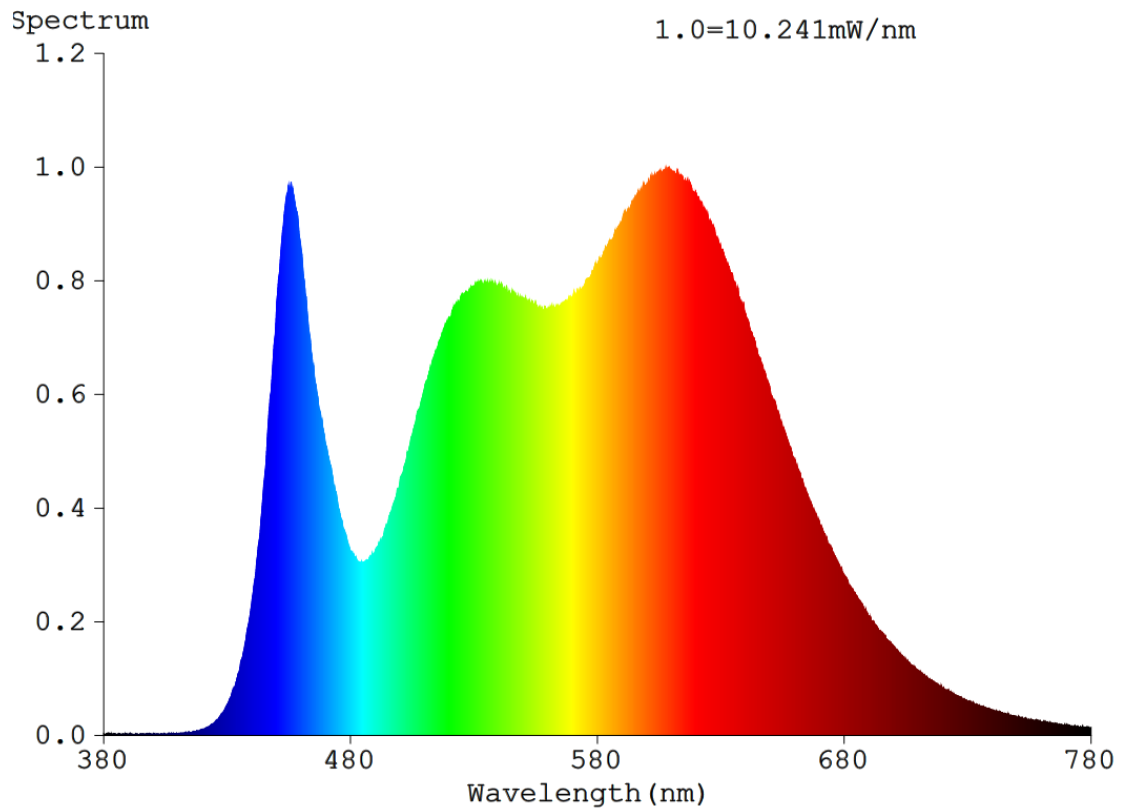
Typické charakteristiky LED pásov je možné nájsť v [15]. Meranie bolo ovplyvnené aj svetlom okolia. Špičky viditeľné na obrázku 2.5 sú viditeľné aj na nasledujúcom obrázku, ktorý je súčasťou prílohy tohto dokumentu v podkapitole B.1.

Špecifikácie LED pásu teplej bielej farby:

- Farebná teplota: 2700-3200 K
- Svietivosť: 2000 lm/m
- Príkon: 20 W/m
- účinnosť: 100 lm/W
- Počet LED na meter: 120
- Životnosť: až 50 000h

Teplota farby od 2700 až 3200 K je pôsobené spektrom vyžiareného svetla. Dominantnú farbu svetla možno vyčítať aj z našich meraní, kde je vidieť, že najväčšia

svetelná intenzita je medzi 525 a 650 nm, pozri obrázok 2.5. Jeho dominantná vlnová dĺžka sa nachádza u 585 nm. [25]



Obr. 2.5: Spektrálna odozva bielej varianty LED pásu. [27]

Špecifikácie LED pásu neutrálnej bielej farby:

- Farebná teplota: 4000 K
- Svetivosť: 1800 lm/m
- Príkon: 20 W/m
- účinnosť: 90 lm/W
- Počet LED na meter: 120
- Životnosť: až 50 000 h

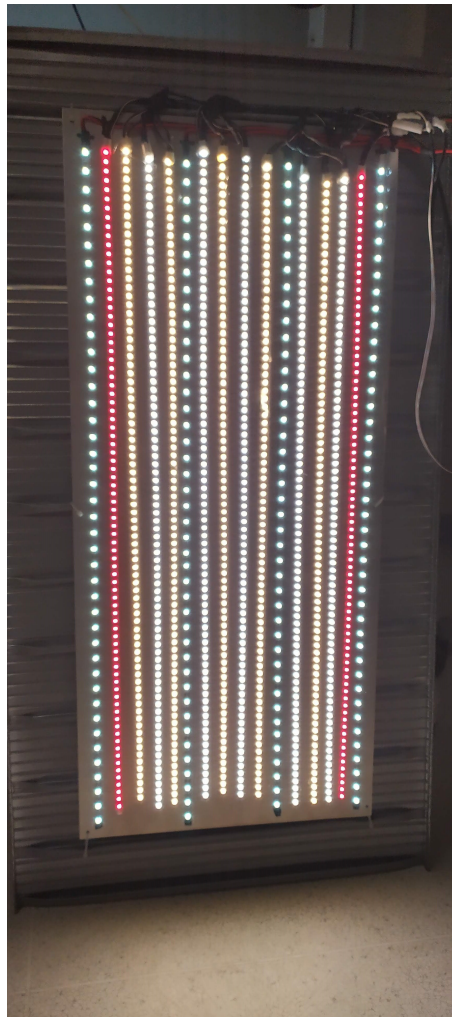
Samotná teplota farby vám o spektre veľa nepovie, ale môžeme predpokladať, že neutrálna biela bude mať o niečo vyššie množstvo modrej ako teplá biela. Predpokladáme, že použitím súboru teplej bielej a neutrálnej bielej dosiahneme dostatočnú intenzitu svetla na najdôležitejších vlnových dĺžkach. Najvhodnejšie je, ak sa nad rastliny striedavo nainštalujú teplé biele a neutrálne biele LED pásy, viď obrázok 2.6. [26]

Červená farba len doplní celkové svetelné spektrum osvetlenia Jeho nameranú spektrálnu odozvu možno nahliadnuť v prílohe v podkapitole B.3.

Špecifikácie LED pásu červenej farby

- Dominantná vlnová dĺžka: 630 nm
- Príkion: 12 W/m
- Počet LED na meter: 60
- Životnosť: až 50 000 h

Tieto červené LED pásy sa používajú na aktiváciu fotoreceptorov na začiatku dňa. Červené svetlo má najnižšiu frekvenciu a v prírode sa objavuje, ako prvé na obzore. Bude sa používať na napodobnenie prechodu medzi dňom a nocou. Implementácia tejto činnosti je podrobnejšie popísaná v podkapitole 2.4.2. [27]



Obr. 2.6: Kompletizované LED osvetlenie. Striedavo nalepené studené biele a teplé biele LED pásy a dva červené LED pásy na krajoch.

2.2.2 Akváriové čerpadlo

Vybrali sme čerpadlo, ktoré sa bežne používa na aktívne filtrovanie akváriovej vody. Budeme ho používať na obeh vody, t. j. na cirkuláciu vodného roztoku v celom systéme. S príkonom 15 W pri napájaní zo siete 230 V AC dosahuje maximálny prietok až 600 l/h. [28]

2.2.3 Kompresor na prevzdušňovanie vodného roztoku

Na prevzdušňovanie sme vybrali kompresor s vysokým výkonom. Jeho maximálny prietok je až 360 l/h a jeho elektrický príkon je 3,6 W pri napájaní zo siete s 230 V striedavého napätia. [29]

2.2.4 Ohrievač vody

Vyhrievanie vodného roztoku bude realizované pomocou jedného ponorného ohrievača. Súčasťou tohto prvku je aj termostat, je možné ho nastaviť na konkrétnu teplotu, ktorú nikdy neprekročí. Jeho maximálny vyhrievací výkon je 250 W pri napájaní zo siete 230 V striedavého napätia. Dokáže zohriať vodu až na 35 °C. [30]

2.2.5 Peristaltické čerpadlá

Peristaltické čerpadlo pracuje na princípu pamäti materiálu. Hadica čerpadla je vyrobená z pružného materiálu, ktorý sa striedavo stláča a uvoľňuje. Počas pomalého otáčania rotora dochádza k postupnej deformácii hadice, pričom sa v hadici uzavrie malý objem kvapaliny, ktorá je potom vytláčaná z hadice pred lopatku v smere otáčania lopatky, následne sa za lopatkou vytvorí podtlak, ktorý vedie k opätovnému nasávaniu čerpanej kvapaliny. Prečerpávanie prebieha v smere otáčania čerpadla. Certifikované peristaltické čerpadlo značky Kamoer je vhodné pre chemický a potravinársky priemysel.[31]

Samotný peristaltický mechanizmus poháňa krokový motor. Na riadenie jednotlivých krokových motorov budeme potrebovať aj ovládače (drivery).

Vybrali sme si ovládač HY-DIV268N-5A. Na realizáciu dávkovacieho systému potrebujeme peristaltické čerpadlá a ovládače samostatne pre všetky tri zložky živín.

Špecifikácie krokového motora:

- Napájacie napätie: 12V
- Výkon: 5W
- Prietok: 19 až 100 mL/min
- Hadička: PharMed® BPT

2.2.6 Ventilátory

Výkonné ventilátory by mali zaručiť dostatočné prúdenie vzduchu. Pre tento účel sme vybrali 120 x 120 mm ventilátor, ktorý sa bežne používa v počítačových zostavách.

Špecifikácie:

- Pracovné napätie: 12V
- Príkion: 5.4 W
- Prietok ventilátorov: 183.8 m³/h
- Počet otáčok: 3100 ot./min
- Motor ventilátoru: DC motor

Montáž niekoľkých ventilátorov oproti sebe zabezpečuje správne premiešavanie vzduchu na jednej polici. [33]

2.3 Konkretizácia senzorov

Tu si popíšeme špecifikácie konkrétnych senzorov, ktorých sme vybrali na meranie hladiny kvapalín, kvality vzduchu a kvalitu živného roztoku.

2.3.1 Kapacitné senzory hladiny hnojiva

Na detekciu nedostatku hnojiva sme vybrali bezkontaktný kapacitný senzor *XKC-Y25-T12V*. [34]

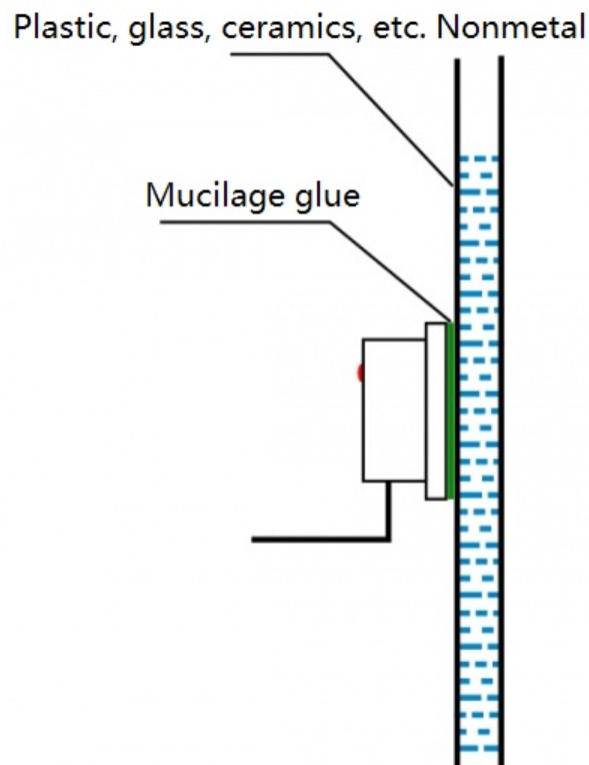
Pomocou týchto senzorov môžeme zistiť hladinu hnojiva bez toho, aby sme boli v kontakte s kvapalinou. Pripojením citlivej časti senzora, ktorá predstavuje jednu izolovanú elektródu, k povrchu plastovej fľaše od hnojiva sa vytvorí kondenzátor. Kapacitný snímač hladiny sleduje zmenu kapacity.

Môžeme teda snímať dva stavy. Ak je hladina hnojiva nad alebo pri umiestnenom snímači, nameraná kapacita bude vyššia, ako prahová hodnota. Program ho vyhodnotí, ako logickú 1. Druhá podmienka nastane, ak hladina už dostatočne klesla pod úroveň snímača. Vtedy nameraná kapacita bude nižšia, ako prahová hodnota. V tomto prípade program vyhodnotí stav, ako logickú nulu.

Špecifikácie:

- Pracovné napätie: 5 až 24 V DC
- Spotreba prúdu: 5 mA
- Výstupné napätie: 0 V až pracovné napätie.
- Výstupný prúd: 1 až 50 mA
- Maximálna hrúbka steny fľaše: 13 mm.
- Stupeň ochrany krytom: IP67

Na dosiahnutie konzistentného merania by mal byť senzor umiestnený priamo na stene fľaše, aby sa maximalizovala jeho citlivosť. Na tento účel sa bežne používa silné rastlinné lepidlo, viď obrázok 2.7, ale puzdro sa dá namontovať aj na povrch pomocou dodatočne vyrobených konštrukcií. [34]

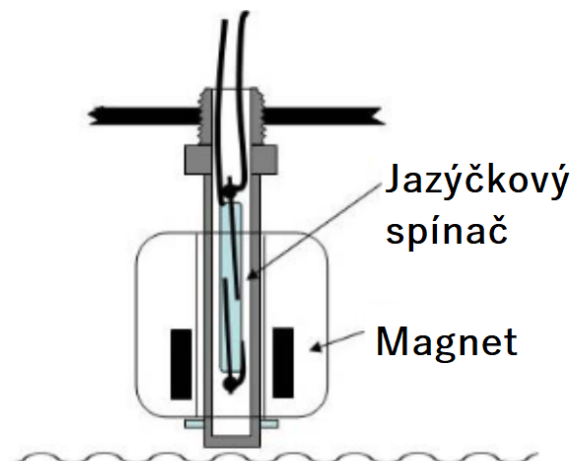


Obr. 2.7: Kapacitný snímač namontovaný pomocou lepiaceho prostriedku. [34]

2.3.2 Plavákový senzor hladiny roztoku

Na zisťovanie hladiny vodného roztoku sme vybrali plavákový snímač hladiny. Tento snímač sa chová, ako štandardný spínač. Takýto spínač ovláda elektrický obvod buď otvorením, alebo uzavretím slučky. Samotný plavák obsahuje permanentný magnet, ktorý spína jazýčkový kontakt, viď obrázok 2.8.

Dve polohy umožňujú zapnutie a vypnutie jazýčkového relé. Keď hladina kvapaliny stúpa, plavák sa pohybuje spolu s ňou, čím sa magnet dostane do polohy, v ktorej sa priťahuje a uzatvára vnútorný jazýčkový spínač, čím sa uzatvorí obvod. [35] [36]



Obr. 2.8: Prierez plavákového snímača hladiny typu NO. [36]

Pomocou tohto snímača môžeme ľahko zistiť, dosiahnutie vysokej alebo naopak nízkej hladiny v nádobe s kvapalinou. To sa dá dosiahnuť umiestnením snímača na dno alebo na vrch nádrže. [35]

2.3.3 Snímač koncentrácie prchavých látok vzduchu

Na zbieranie dát o kvalite vzduchu sme zvolili senzor *SGP40*. Tento čip je vybavený komunikačným rozhraním I2C a poskytuje údaje o kvalite vzduchu v interiéri s kompenzáciou vlhkosti a teploty.[41]

Výrobca Sensirion odporúča používať čipom poskytnutý signál (vlhkosťou kompenzovaný) *SRAW_VOC*, ktorý sa získa prostredníctvom algoritmu vyvinutého spoločnosťou. Tento algoritmus automaticky upravuje svoj výstup podľa nameranej vlhkosti a mapuje všetky hodnoty VOC na stupnici indexu VOC v rozsahu od 1 do 500 bodov indexu VOC. [41]

Špecifikácie:

- Rozsah VOC indexu: 0-500
- Rozsah výstupu: 0 - 1000 ppm
- Časová odozva: < 10 s

Pomocou tohto snímača budeme môcť merať len samotnú koncentráciu prchavých organických zlúčenín a nebudeme môcť určiť príčiny nárastu alebo poklesu emitovaných prchavých organických látok. V našom prípade potrebujeme používateľa informovať len vtedy, keď dôjde k nejakým drastickým zmenám.

2.3.4 Snímač na meranie koncentrácie CO₂ vo vzduchu

Ďalším ukazovateľom kvality vzduchu je koncentrácia CO₂. Na monitorovanie koncentrácie CO₂ v ovzduší sme zvolili snímací modul SCD30. Tento merací modul komunikuje s hlavnou výpočtovou jednotkou prostredníctvom rozhrania I2C. Tento senzor by mal zlepšiť náš prehľad o kvalite vzduchu v blízkosti rastlín. [37]

Špecifikácie:

- Rozsah meranej CO₂: 0-40000
- Presnosť: 400 - 10000 ppm
- Časová odozva: 20 s

Modul je vhodný len na použitie v interiéri. Modul obsahuje aj integrovaný teplomer a je vybavený funkciou samoohrevu na ideálnu prevádzkovú teplotu snímacieho čipu a možno ho automatizovať tak, aby sa sám vykonal kalibráciu nastavením teplotného posunu. Tento modul obsahuje aj snímač na meranie vlhkosti, ale my budeme zbierať len údaje o koncentrácii CO₂ vo vzduchu. [37]

2.3.5 Senzor teploty a vlhkosti vzduchu

Na meranie vlhkosti a teploty vzduchu sme vybrali merací modul so snímačom *BME280*, ktorý meria aj atmosférický tlak a teplotu a vlhkosť vzduchu. Výhodou týchto meracích modulov je, že namerané údaje možno získať prostredníctvom rozhrania I2C. [38]

Špecifikácie:

- Napájacie napätie: 1,8V až 3,6V DC
- Rozsah meraného tlaku: 300 až 1100hPa
- Presnosť meraného tlaku: ± 1 hPa
- Rozsah meranej vlhkosti: 0 až 100 %
- Presnosť meranej vlhkosti: ± 3 %
- Rozsah meranej teploty: -40 až +85°C
- Presnosť meranej teploty: ± 1 °C

Čítanie údajov sa vykonáva sériovým čítaním od 0xF7 do 0xFE (teplota, tlak a vlhkosť). Údaje sa čítajú v 20-bitovom formáte bez znamienka pre tlak aj teplotu a v 16-bitovom formáte bez znamienka pre vlhkosť. [38]

2.3.6 Teplomer vodného roztoku

Na meranie teploty vodného roztoku sme vybrali snímač *DS18B20*. Tento snímač komunikuje prostredníctvom *1-Wire* zbernice, ktorá podľa definície vyžaduje len jednu dátovú linku (a zem) na komunikáciu s mikroprocesorom. [39]

Špecifikácie:

- Teplotní rozsah: -55 až +125 °C
- Presnosť: $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$
- Napájacie napätie: 3,0-5,5V

Jeho digitálny výstup eliminuje potrebu konverzie analógových hodnôt na digitálne. Takáto kompaktná konštrukcia puzdra, viď obrázok 2.9, zaručuje odolnosť a lepšiu stabilitu nameraných hodnôt.



Obr. 2.9: Snímač teploty *DS18B20* v kompaktnom puzdre. [40]

2.3.7 Senzor vodivosti

Na meranie vodivosti sme vybrali snímač *SEN0244* od DFRobot. Tento senzor ne-meria priamo vodivosť, ale meria celkový obsah rozpustených pevných látok (TDS). TDS udáva, koľko miligramov rozpustných pevných látok je rozpustených v jednom litri vody. Vo všeobecnosti platí, že čím vyššia je hodnota TDS, tým viac rozpustných

pevných látok je rozpustených vo vode a tým menej čistá je voda, alebo v našom prípade koncentráciu rozpustených solí.[42]

Sonda TDS je vodotesná, možno ju ponoriť do vody na dlhodobé meranie. Budiacim médiom je striedavý prúd, ktorý môže zabrániť polarizácii sondy a predĺžiť jej životnosť, pričom pomôže zvýšiť stabilitu výstupného signálu.[42]

Špecifikácie:

- Vstupné napätie: 3,3 až 5,5 V
- Výstupné napätie: 0 až 2,3 V
- Pracovný prúd: 3 až 6 mA
- Rozsah meranej koncentrácie TDS: 0 až 1000 ppm
- Presnosť meranej koncentrácie: $\pm 10\%$

Obvykle sa hodnota TDS rovná polovici hodnoty elektrickej vodivosti, t. j: $TDS = EC / 2$. Na kalibráciu je potrebný kvapalný roztok so známou elektrickou vodivosťou alebo hodnotou TDS, napríklad štandardný roztok s vodivosťou 1413 μ S/cm. Po prepočítaní na hodnotu TDS je to približne 707 ppm. Podľa návodu je možné vykonať kalibráciu snímača s akoukoľvek látkou so známou vodivosťou. [42]

2.3.8 Senzor pH

Na meranie pH vodného roztoku sme zvolili sondu *E-201-C-9*. Aby sme boli schopný vykonať merania, budeme potrebovať aj dosku *PH-4502C* na úpravu signálu.

Takýto modul umožňuje nastavenie hodnoty výstupného napätia pre hodnotu pH 7 pomocou trimra, ktorý sa nachádza priamo na module. Tento snímač je potrebné kalibrovat pomocou kalibračných roztokov aspoň raz za šesť mesiacov alebo v prípade ak sa údaje už príliš odchyľujú od očakávaných hodnôt. [43]

Špecifikácie:

- Napájacie napätie: 5V
- Rozsah meranej pH: 0 až 14
- Presnosť meranej pH: $\pm 0,1\%$
- Čas merania: ≤ 1 min

Táto sonda nieje určená na dlhodobé neprerušované meranie kvality vody. Pri takmer neutrálnych hodnotách môže jedno meranie trvať až 6 minút. Ďalej, v kontajneri by sa nemalo nachádzať žiadne elektrické zariadenie pod elektrickým napätím. Akýkoľvek malý únik elektrického napätia môže spôsobiť chybu pri meraní. [43]

2.3.9 Webkamera

Na zbieranie snímok sme vybrali kameru CMOS senzorom *OV5647*. Tento snímač už obsahuje niektoré užitočné základné funkcie, ako napr.: automatické riadenie

expozície (AEC), automatické vyváženie bielej (AWB), automatický pásmový filter (ABF) a automatická kalibrácia úrovne čiernej (ABLCL). [44]

Špecifikácie:

- Napájacie napätie: 2,6 až 3,0V
- Vstupno-výstupné napätie: 1,7 až 3,0 V
- Maximálna prenosová rýchlosť obrazu (za sekundu): 15 snímok pri maximálnom rozlíšení, 30 snímok pri rozlíšení 1080p
- Maximálne rozlíšenie: 2592 x 1944 (5 Mpixel)

Aby sa zabránilo blikaniu obrazu pri svetelnom zdroji riadenom PWM, integračný čas možno nastaviť v krokoch celočíselných násobkov periódy svetelného zdroja.[44]

2.4 Riadiaca jednotka

Potrebuje riadiaci prvok systému, ktorý dokáže ovládať akčné členy, zbierať namerané dáta z jednotlivých snímačov a posilať dáta na webový server, ktorý bude nepretržite prístupný pre užívateľov.

Potrebuje mikrokontrolér s Wi-Fi modulom, ktorý dokáže komunikovať s webovým serverom. Ďalej mikroprocesor musí mať dostatočný výkon a množstvo pamäte na webovú komunikáciu. Ideálne je vybrať mikrokontrolér, ktorý je podporovaný komunitou s volne upravovateľnými knižnicami a nízkou základnou cenou.

2.4.1 Vývojová doska

Vývojová doska je základom vstavaných systémov. v projektoch IOT sú vývojové dosky výpočtové jednotky, ktoré navzájom komunikujú. Tu potrebujeme len jednu vývojovú dosku, ktorá dokáže vykonať všetky jednotlivé malé úlohy.

ESP32-DevKitC-32U

Táto malá vývojová doska je založená na ESP32 vyrobená spoločnosťou *Espressif*. Hlavné výhody a funkcie tohto mikrokontroléra:

- Stavany Wi-Fi modul - uľahčuje pripojenie k bezdrôtovým sieťam(2,4 GHz pásmo).
- Dvojjadrový procesor Xtensa® LX6 (32-bit) - schopný multitaskingu. Teoreticky môžeme zbierať údaje a komunikovať so serverom súčasne bez výrazného zníženia výkonu.
- Bohatá sada komunikačných rozhraní - tento mikrokontrolér umožňuje okrem Wi-Fi aj komunikáciu cez Bluetooth, čo môže byť užitočné pre rôzne aplikácie. Má tiež rôzne možnosti vstupu/výstupu, vrátane pinov GPIO, UART, SPI

a I2C. Má dokopy 26 použiteľných GPIO (General Purpose Input/Output) pinov použiteľných na rôznych účelov, pričom Raspberry PI Model B+ má len 24.

- Schopnosť prevádzkovania webového serveru - spomenuli sme si, že potrebujeme čítať vstup z webového servera. ESP32 môže prevádzkovať webový server, ktorý mu umožňuje obsluhovať webové stránky a spracovávať HTTP požiadavky. Bolo by možné aj posilať e-mailové upozornenia a mikrokontrolér by vedel reagovať na povely užívateľov.
- **ESP32-WROOM-32U** je široko dostupný a cenovo výhodný, vďaka čomu je pre náš projekt ideálny.
- Veľká komunita a široko dostupná dokumentácia, zdroje a návody.
- ESP32 je možné naprogramovať pomocou Arduino IDE.
- Platforma ESP32 je navrhnutá na open-source softvéri, ktorý poskytuje transparentnosť a flexibilitu, a umožňuje úpravy podľa potreby.

ESP32 je cenovo výhodný SoC (system on a chip) s nízkou spotrebou energie a funkciami Wi-Fi a Bluetooth v dvoch režimoch. Túto vývojovú dosku je možné napájať aj s 3,3V, aj s 5V napájaním. Základný diagram dosky **ESP32-DevKitC-32U** s popísanými kontaktami je dostupný v prílohe A.1. Niektoré z nich majú viacero funkcií (napr. PWM, I2C, SPI, UART atď.). 16 z nich je možné použiť, ako analógový vstup. [19] [20] [22]

Raspberry PI Model B+

Raspberry Pi je séria lacných jednodoskových počítačov veľkosti kreditnej karty, ktoré možno používať na rôzne účely, napríklad na učenie sa programovania, spúšťanie základných počítačových aplikácií a vytváranie projektov typu "urob si sám". Hlavné výhody a dôvody, prečo sme práve vybrali túto vývojovú dosku:

- tento malý počítač má zabudovaný ethernetový port a je vybavený zabudovaným Wi-Fi modulom, čo uľahčuje pripojenie k sieti.
- Jeho pinový konektor má 40 pinov, z ktorých 26 je voľne použiteľných, ako pin GPIO.
- *Raspberry Pi* má vo všeobecnosti vyšší výpočtový výkon v porovnaní s *ESP32*. Vďaka tomu je vhodnejší na úlohy, ktoré si vyžadujú značný výpočtový výkon, multitasking alebo spustenie plnohodnotného operačného systému.
- Na týchto systémoch beží plnohodnotný operačný systém (napríklad Raspbian alebo *Raspberry Pi OS*). Je možné spustiť rôzne distribúcie *Linuxu*, takže je vhodný pre širokú škálu softvéru a vývojových nástrojov. To nám umožňuje spúšťať rôzny softvér vrátane webových serverov, databáz a ďalších aplikácií.
- *Raspberry Pi* má veľkú a aktívnu komunitu, čo znamená, že je k dispozícii

množstvo online zdrojov, fór a návodov na riešenie problémov a vývoj.

- Na *Raspberry Pi* je možné programovať pomocou rôznych programovacích jazykov vrátane jazykov Python, C a C++ a spustiť spustiteľné súbory.
- má hardvérovú podporu pre SPI a I2C, čo umožňuje jednoduché prepojenie so zariadeniami, ktoré používajú tieto protokoly. Okrem toho možno na *Raspberry Pi* nakonfigurovať piny GPIO na rôzne účely.
- využíva rozsiahly softvérový ekosystém vrátane vopred pripravených balíkov, knižníc a nástrojov, ktoré môžu zjednodušiť vývoj a použiť toto zariadenie, ako stolný počítač, alebo server.
- *Raspberry Pi* má zabudované funkcie videa a zvuku.

Je vybavený procesorom, pamäťou, portami USB, portom HDMI a ďalšími komponentmi. *Raspberry Pi* možno pripojiť k displeju a používať, ako samostatný počítač. V porovnaní s *ESP32* je výhodnejšie implementovať naše funkcie na tomto počítači, ak plánujeme hostovať server, chceme bezproblémové pripojenie k internetu a zároveň chceme na serveri ukladať údaje. [21] [22]

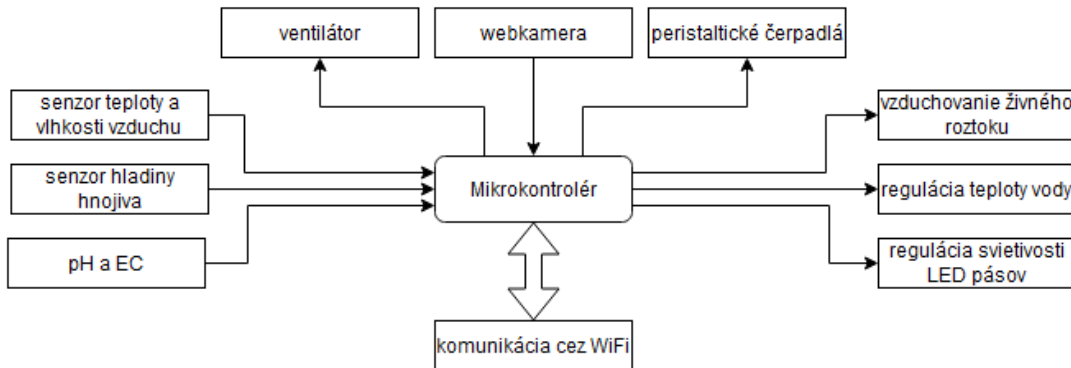
2.4.2 Úlohy riadiacej jednotky

V hydroponických systémoch majú kľúčovú úlohu riadiace jednotky. Zbierajú dáta pomocou snímačov, vykonávajú výpočty a prevody hodnôt, aktivujú a deaktivujú akčné členy, v prípade regulujú a riadia výstupy jednotlivých prvkov. Je možné zahrnúť jednotlivé úlohy do stavov a podmieniť ich vykonanie. Základné zapojenie jednotlivých prvkov je možné predstaviť, ako jeden hlavný prvok, teda mikrokontrolér prepojené s všetkými prevádzanými prvkami, kde smer šípok naznačuje smer na výmenu dát a signálov medzi externými zariadeniami a mikrokontrolérom, viď obrázok 2.10. Všetky úlohy vykonané riadiacou jednotkou je možné definovať, ako inštrukcie.

Základné inštrukcie sú napríklad: nameraj teplotu a vlhkosť vzduchu, prepočítaj inžinierske hodnoty od pH a EC senzorov na reálne, zapni ventilátory, nastav svetelnú intenzitu LED osvetlení na 50%, atď. Najdôležitejšie pre náš systém je však časovanie. Definície parametrov podľa času. Hovoríme teda o podmienení inštrukcií podľa času. Takýto systém bude mať jeden hlavný prevádzkový stav a vedľajšie stavy rozdelené do intervalov:

- **Hlavný prevádzkový interval** - tu sa bude snažiť systém dosiahnuť čo najviac rastu. Intenzita LED osvetlení bude v ideálnych podmienkach blízko k maximu. Čerpadlo živného roztoku bude v prevádzke spolu so vzduchovým kompresorom. Teplota vody bude systém udržiavať vo vyšších hodnotách a ventilátory sa budú točiť na vyššie otáčky. Dĺžka hlavnej prevádzky sa bude líšiť na základe od rastovej fázy rastliny.

U *Capsicum annuum* v prvotných fázach je ideálne aby denná fotosyntéza trvala čo najviac hodín. V neskorších fázach sa priebežne zníži počet hodín hlavnej prevádzky.



Obr. 2.10: Diagram zapojenia systému.

V začiatkových a konečných hodinách dňa rastliny potrebujú viac červeného svetla na vyše, tento časový úsek nazveme „hraničný interval“. Navyše, každú hodinu je dôležité dodržiavať „fotosyntetické prestávky“.

- **Hraničný interval** - Pred prvou hodinou hlavného prevádzkového intervalu sa bude používať len červené svetlo, intenzita sa bude neustále zvyšovať a po 30 minútach bude svietiť plnou intenzitou. Potom počas druhej polovice hodiny budeme priebežne zvyšovať intenzitu bieleho svetla, až do začiatku hlavného prevádzkového režimu. Hodina po poslednej hodine hlavného prevádzkového intervalu bude prebiehať podobne, najprv sa zníži intenzita bieleho svetla a potom červeného svetla. Implementácia a realizácia prechodov medzi stavmi môže byť pre rastliny prospešná a v reakcii na ňu môžu dosiahnuť väčšiu šírku listov a zvýšiť množstvo fotoreceptorov. [15] [16]
- **Fotosyntetická prestávka** - Koncom každej hodiny „Hlavnej prevádzky“ sa na 10 minút stlmia všetky osvetlenia. To dovoľí aby rastlina vytvorila cukry, ktoré rastlina využije na rast a dodá potrebné energie na prežitie. Nevykonávanie takýchto malých prestávok môže spôsobiť stres pre rastlinu. Navyše, prestávky v fotosyntéze pomáha v potlačení nepomerných príjmov živín. Stresy z nepretržitého intenzívneho svetla môže pôsobiť, že rastlina bude uprednostňovať drasticky veľké pomery len konkrétnych živín a zanedbá príjem ostatných tiež dôležitých minerálnych solí. [5]
- **Mimo prevádzkový interval** - Tento stav slúži na emuláciu nočných hodín. Žiadne svetlo dovoľuje rastlinám sa regenerovať a vytvoriť potrebné cukry. Bez vykonania fotosyntézy sa rastlina neprijíma živiny a vyrovnáva nerovnosti

v jeho cirkulačnom systéme. V tomto stave nie je potrebné miešať živný roztok v systéme, ale korene naďalej potrebujú prevzdušňovanie, preto necháme kompresor zapnutý. Systém prevzdušňovania dodáva do vodného roztoku potrebný kyslík a oxid uhličitý, pričom hlavný zásobník živín sa musí aj počas noci miešať v systéme bez prestávky, keďže je od jednotlivých poschodí oddelený a prepojený potrubím.

3 Schéma zapojenia

V tejto kapitole si popíšeme elektrické zapojenia jednotlivých komponentov. Vývoj dosky s plošnými spojmi, na rozdiel od pripájania jednotlivých modulov pre každý komponent väčšieho zariadenia má mnoho výhod.

Dosky plošných spojov umožňujú kompaktnú integráciu komponentov, čím sa znižuje celková veľkosť zariadenia.

Na doske plošných spojov možno komponenty pripojiť priamo, čím sa minimalizuje počet káblových prepojení. Znižuje sa tak pravdepodobnosť uvoľnených spojení, rušenia signálu a iných problémov, ktoré môžu vzniknúť pri pripájaní jednotlivých modulov.

V našom prípade sú však všetky vstupné a výstupné prvky určitým spôsobom modulárne. Všetky komponenty nie je možné integrovať na jednu dosku plošných spojov a ani by to nemalo zmysel. Je potrebné venovať pozornosť tomu, že všetky komponenty majú svoje ideálne umiestnenie a podmienky, ktoré je potrebné rešpektovať.

Snímače kvality vzduchu napríklad by mali byť umiestnené na takých miestach, kde je zaručené dostatočné prúdenie vzduchu. Teplotné snímače vody by mali byť umiestnené tak, aby neboli blízko ohrievača vody atď. Naš plošný spoj zaručí lepšie prepojenie všetkých komponentov a modulov.

3.1 Zapojenie vstupných komponentov systému

Väčšina senzorov komunikuje digitálne s mikrokontrolérom, a to cez zbernicu I2C. Linky SCL a SDA sú pripojené ku všetkým zariadeniam na zbernici I2C, viď obrázok 3.1. Každý senzor potrebuje navyše svoje napájanie a spoločný zem s mikrokontrolérom.

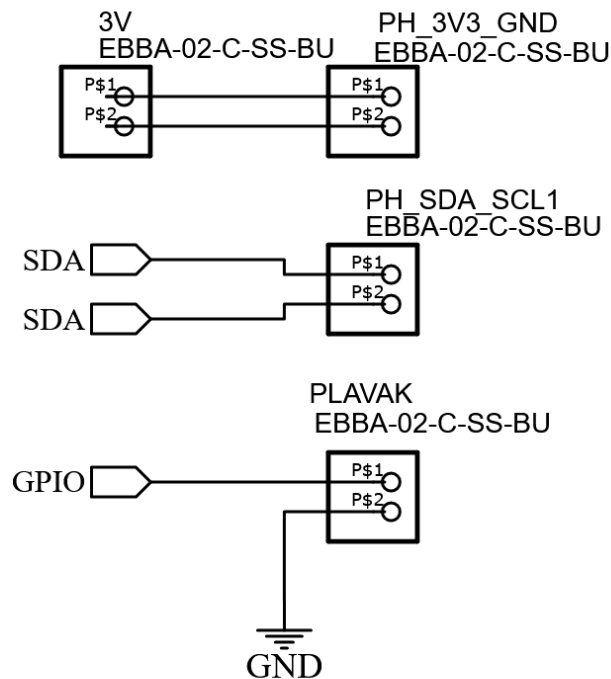
Plavákový snímač hladiny, ktorý sa používa pre vodnú nádrž, v princípe funguje ako spínač. Máme obvod spájajúci náš pin GPIO so zemou, keď sa uzavrie obvod, bude čítať LOW. Musíme použiť vstavaný odpor "pull-up", aby sa pri otvorení implicitne nastavil na stav HIGH.

Senzor vodivosti a pH vody nekomunikujú digitálne s našou počítačovou jednotkou, ale ich namerané hodnoty musíme odčítať, ako analógové napätia. V tom prípade fungujú ako analógovo analógové prevodníky. Naša výpočtová jednotka Raspberry Pi nemá zabudovaný analógovo-digitálny prevodník. To znamená, že budeme musieť používať A/D prevodník. Pre tento účel sme zvolili integrovaný obvod *ADS1115*.

Špecifikácie A/D prevodníka podľa technickej dokumentácie [46] sú nasledovné:

- Napájacie napätie: 2,0 až 5,5V
- Vstupno-výstupné napätie: 0 až 5,5V
- Architektúra: Delta-Sigma
- Rozhranie: I2C
- Počet kanálov: 4
- Vzorkovacia rýchlosť: 860vzorkov/sekúnd
- Rozlíšenie: 16 bitové

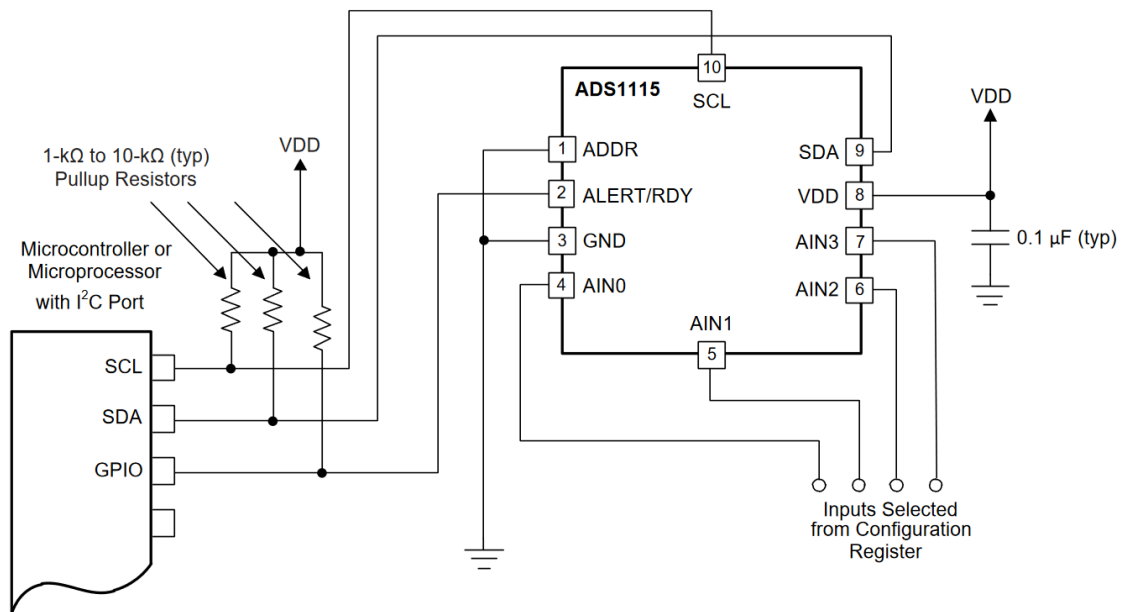
Absolútne maximálne merateľné napätie je $V_{DD} + 0,3 \text{ V}$. Ak zariadenie pracuje pri napätí 3,3V, maximálne napätie, ktoré možno bezpečne merať, je 3,6V. Rozsah nad touto hodnotou je v podstate neplatný. Výstupné napätia meracích modulov EC a pH sondy sa nachádzajú medzi 0 až 3,3V.



Obr. 3.1: Základné zapojenie vstupných komponentov, napríklad CO₂ senzoru a plavákového hladinového snímača k mikrokontroléru a napájaniu.

Jeho zapojenie sme zhotovili podľa typického zapojenia čipu *ADS1115*, ktoré je možné nájsť v technickej dokumentácii, viď obrázok 3.2 [46]. Na pinoch I2C sú paralelne umiestnené 10 K ohmové pull-up rezistory. Kontakty ALERT a ADDR sa nepoužívajú, preto sme ich pripojili k zemi. Medzi pinom VDD a GND je umiestnený kondenzátor s kapacitou 1 μF , ktorý slúži ako stabilizačný, decoupling kondenzátor.

Namerané napätia zo sensorových modulov sme pripojili k analógovým vstupom A/D prevodníku.



Obr. 3.2: Typické zapojenie pre čip ADS1115. [46]

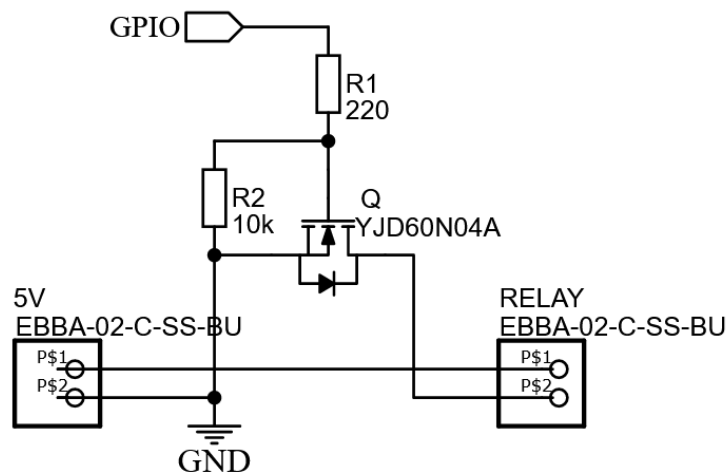
3.2 Zapojenie aktuátorov a výstupných komponentov systému

V našom prípade väčšina akčných členov a ostatných výstupných komponentov sú spínané reléovými modulmi. U LED pásov pre dosiahnutie variabilného jasú mikrokontrolér nespína výstupy priamo, ale pomocou MOSFET tranzistoru *YJD60N04A* vid obrázok 3.3.

Pri takomto zapojení pomocou jedného výstupu mikrokontroléru sme schopný spínať uzemnenie individuálne pre jednotlivé obvody. V tomto prípade je to obvod NO. Toto zapojenie nám umožňuje riadiť elektrický výkon priamo pomocou impulzovej šírkovej modulácie.

Na ovládanie krokových motorov sa odporúča použitie 5 V logiky. Na dosiahnutie daných otáčok musí mikrokontrolér spínať kontakt PUL s danou frekvenciou. To je možné dosiahnuť presne rovnakým zapojením. Na regulátoroch je tiež kontakt ENABLE, ktorý možno použiť na deaktiváciu motora. Ak nie je pripojené žiadne napätie, chod motora je povolený.

Na ovládanie výkonných akčných zariadení sme použili moduly s relé *SRD-05VDC-SL-C*. Zapnutím relé sa zmení poloha kontaktu a druhý kontakt bude prepojený. Použili sme NC zapojenie, teda zapnutím relé sa obvod pripojeného zariadení rozpojí. To nám zaručuje, že čerpadlo a kompresor budú zapnuté aj v prípade poruchy mikrokontroléra. V prípade vykurovacieho telesa možno maximálnu teplotu obmedziť aj pomocou potenciometra umiestneného priamo na vykurovacom telese.



Obr. 3.3: Základné zapojenie výstupného komponentu, napríklad LED pásu.

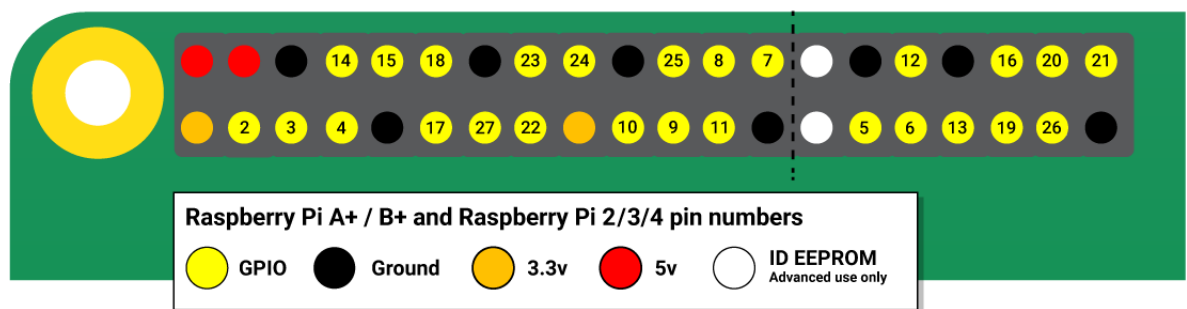
Reléové moduly môžu byť spínané bežnou 5 V logikou, t. j. môžu byť ovládané priamo mikrokontrolérom. Náš mikrokontrolér má maximálny výstup 3,3 V a pri tomto napätí nie je zaručená plná funkčnosť, preto sme museli použiť MOSFET tranzistory pri spínaní výstupov pomocou relé. Samotné spínanie relé je realizované pomocou zabudovaných optočlenov a bipolárnych tranzistorov, ktoré sú súčasťou reléových modulov, viď obrázok 4.1. [45]

Optočlen PC817, ktorý sa tu používa, je vybavený LED diódou a fototranzistorom. Takže po pripojení napájania na tento obvod sa na LED diódu dostane napätie a rozsvieti sa. Toto svetlo zapne fototranzistor a zapne sa optočlen. Výstup vychádzajúci z tohto optočlenu aktivuje tranzistor 2N3904 NPN tým, že dostane prúd na svoju bázu a tým je riadené relé. Celkový obvod je možné nájsť v prílohe v kapitole C.

pravdepodobné, že k tomu raz za čas dôjde, aj keď zabezpečíme častejšie čítanie údajov zo snímača teploty mikrokontrolérom. Nie je teda potrebné implementovať prerušenia a poradie priorít pre jednotlivé udalosti, stačí program rozdeliť na tri hlavné časti: manuálny režim, automatický režim a na časť nezávislú od nastaveného režimu, ktorá sa vykonáva neustále.

4.1 Mapovanie GPIO pinov

Vstupné a výstupné piny boli adresované pomocou ich GPIO adres, ktoré môžete vidieť na obrázku 4.2. Ktorýkoľvek z pinov GPIO možno v softvéri označiť ako vstupný alebo výstupný pin a používať ho na rôzne účely.



Obr. 4.2: GPIO piny na 40-pinovom headeri Raspberry PI.[21]

My sme ich nastavili nasledujúcim spôsobom:

- Plavákový senzor hladiny - GPIO 5 s integrovaným Pull-up rezistorom
- Kapacitný senzor hladiny - GPIO 6 s integrovaným Pull-up rezistorom
- Biele LED osvetlenie prvého poschodia - GPIO 13
- Červené LED osvetlenie prvého poschodia - GPIO 16
- Biele LED osvetlenie druhého poschodia - GPIO 18
- Červené LED osvetlenie druhého poschodia - GPIO 17
- ovládač 1. krokového motora - GPIO 23
- ovládač 2. krokového motora - GPIO 24
- ovládač 3. krokového motora - GPIO 25
- Akvarijné čerpadlo GPIO 19
- Kompresor na prevzdušňovanie roztoku GPIO - 20
- Vyhrievač vody GPIO - 21
- Ventilátory - GPIO 22

Schéma číslovania pinov GPIO nie je v číselnom poradí. Na doske sú prítomné piny GPIO 0 a 1 (fyzické piny 27 a 28), ale sú vyhradené na rozšírené použitie. Raspberry

Pi má 4 hardvérové piny pre PWM: GPIO 12, GPIO 13, GPIO 18, GPIO 19. Softvérovo je možné aplikovať PWM na všetky piny GPIO, ale s obmedzenou frekvenciou. [21]

4.2 Manuálny režim

Hlavnou myšlienkou je, že používateľ môže individuálne ovládať všetky hardvérové výstupné komponenty a nastavovať ľubovoľné parametre. Užívateľ tu môže napríklad zapínať/vypínať LED svetlá druhého poschodia a meniť ich elektrický výkon v percentuálnych hodnotách.

Tieto parametre a príkazy sú vždy načítané na začiatku tejto časti. Príkazy typu „zapni“ sú lokálne uložené ako binárne hodnoty v *.json* súboroch. Pre firmvér sú tieto súbory určené len na čítanie. Z takéhoto súboru sa načíta aj používateľom zvolená *fáza rastu*, používateľom odhadnutý *progres* v rámci zvolenej fázy rastu a zadaná *percentuálna veľkosť dávky*.

4.2.1 Dávkovanie v manuálnom režime

Načíta sa prvá hodnota zo súboru príznakov a ak je „True“, spustí sa výpočet špecifických dávok každého dávkovaného prvku a tým sa spustí dávkovacia sekvencia. Dávky sa vypočítajú podľa vzorca:

$$d_i(\text{progress, size}) = \left(d_{i,z} + \frac{\text{progress}}{100} \times (d_{i,z+1} - d_{i,z}) \right) \times \frac{\text{size}}{100} \quad (4.1)$$

Kde " $d_{i,v}$ " je vypočítaná relatívna dávka v mililitroch na liter, „ i “ je index troch prvkov TriPart®, „ z “ je index zvolenej fázy a „ $z+1$ “ je index ďalšej fázy, "progress" a "size" sú užívateľom zadané hodnoty. Priebeh vypočítaných hodnôt dávok je možné si pozrieť v prílohe v kapitole E.

Po výpočte všetkých troch relatívnych dávok sa tieto dávky prepočítajú na absolútne hodnoty. Keďže vieme, že naša nádrž na vodu má objem 40 litrov, stačí vynásobiť relatívnu hodnotu objemom v litroch.

4.3 Automatický režim

V automatickom režime sa osvetlenie, ventilátory, čerpadlo a kompresor riadia podľa času nastaveného používateľom. Pol hodinou pred nastavením časom sa zapnú len červené svetlá. S tým sa napodobňuje východ slnka, teda hraničný interval spomenuté v kapitole 2.4.2.

4.3.1 Automatické dávkovanie

V automatickom režime sa dávkuje podľa intervalu nastaveného používateľom. Program zistí, koľko dní uplynulo od posledného dávkovania, a ak je to viac ako nastavená hodnota intervalu, začne sa dávkovacia sekvencia.

Užívateľ môže nastaviť aj začiatky a dĺžky šesť fáz od "1st roots" až po "ripening". Všetky fázy majú svoje dávkované hodnoty také, ako aj v manuálnom režime. Tieto hodnoty pochádzajú z oficiálnych dávkovacích tabuliek, ktoré je možné nahliadnuť na obrázku 1.8. Program v automatickom režime zabezpečí lineárny prechod medzi rastovými fázami pomocou výpočtu:

$$d_i(\text{progress}) = \frac{1}{n} \sum_{f=1}^n \left(d_{i,f} + \frac{\text{progress}_f(\text{days})}{100} \times (d_{i,f+1} - d_{i,f}) \right) \quad (4.2)$$

kde „f“ označuje fázu, „d“ je dávka, „n“ je počet aktuálne aktívnych fáz a „progress“ sa počíta zvlášť pre danú fázu podľa vzorca:

$$\text{progress}_f(\text{dni}) = \frac{\text{days} - \text{start}_f}{\text{end}_f - \text{start}_f} \quad (4.3)$$

kde „days“ sú dni, ktoré uplynuli od začiatku rastu, „start“ a „end“ určujú začiatky a dĺžky fáz udávané v dňoch. Okrem toho treba mať na pamäti, že interpolácia sa počíta len pre tie fázy, ktoré sú aktívne, t. j. ktoré sú z intervalu „začiatok“ a „koniec“.

4.3.2 Varovanie užívateľa cez e-mail

Používateľ musí aspoň raz za mesiac vymeniť vodu v nádrži na vodu. Preto by mal byť používateľ pred každým automatickým dávkovaním upozornený. Navrhli sme dva typy upozornení: 24 hodín pred a hodinu a pol pred dávkovaním, aby užívateľ nezabudol vymeniť vodu hodinu pred dávkovaním.

Upozornenie sa pošle na nastavenú e-mailovú adresu nasledujúcim spôsobom. Prihlási sa na SMTP server gmail.com. Používa sa jedna vopred vytvorená e-mailová adresa a takzvaný „app password“, ktorý je určený špecificky pre dané zariadenie. Potom sa pošle daná preddefinovaná správa na nastavenú adresu.

4.4 Nezávislá časť programu

Tu sa vykonávajú rutiny, ktoré nezávisia od nastaveného režimu. Samozrejme, inicializácia premenných a komunikačných zberníc sa tiež vykonáva nezávisle od nastaveného režimu, ale všetko sa vykonáva ešte pred vstupom do superslučky.

V superslučke sa vykonáva meranie teploty vody a zapínanie/vypínanie ohrievača. Okrem toho sa tu merajú aj všetky údaje zo snímačov a zaznamenávajú sa

každých 5 minút, všetky okrem merania vodivosti a pH. Z dôvodu obmedzenej životnosti nemôžeme mať sondy vodivosti a pH nepretržite vo vode. Preto sme pre tieto snímače vymysleli samostatné režimy merania.

4.4.1 Meranie vodivosti a pH vody

Keď je jeden z používateľom nastavených príznakov „True“, spustí sa postup merania vodivosti alebo pH vody. Odporúča sa umiestniť sondu vodivosti alebo pH do vody tesne pred meraním. Meranie ktorejkoľvek z týchto dvoch hodnôt trvá približne minútu. Pri meraní vodivosti je potrebné pre väčšiu presnosť zpriemerovať viac meraní, preto sa za minútu vykoná len 20 meraní. Zatiaľ čo v prípade merania pH vody môžeme zaznamenať až 100 nameraných bodov.

5 Webové rozhranie

Na implementáciu rozhraní sme použili framework *Streamlit*. Tento framework umožňuje zobrazenie nameraných dát zo sensorov a ponúka nástroje, vďaka ktorým môže užívateľ ľahko a rýchlo nastaviť systém podľa potreby. V našom návrhu sme webové rozhranie rozdelili na štyri stránky, ktoré možno vybrať pomocou prepínacích tlačidiel na bočnom paneli. Tieto rôzne stránky slúžia na: zobrazenie údajov, riadenie výstupov, zobrazenie systémových údajov a náhľad farmy prostredníctvom webovej kamery. Program webového rozhrania je tiež rozdelený na tieto štyri časti a v danom okamihu je aktivovaná len tá, ktorá je potrebná pre aktuálne zvolenú stránku.

5.1 Zobrazenie nameraných dát

Na stránke "Recorded sensor data" je možné zobraziť namerané údaje zo snímačov a tiež je možné spustiť sekvenciu merania vodivosti a pH vody. Framework *Streamlit* nám umožňuje zobraziť údaje pomocou grafu *Altair*. Tento balík sme si vybrali najmä preto, že má kompatibilitu s formátom JSON. Grafy vykreslené pomocou tejto knižnice možno podľa potreby zväčšovať pomocou kolieska myši a prechádzaním kurzorom myši po dátových bodoch sa hodnota zobrazí s vyššou presnosťou. Nakoniec *Altair* umožňuje nastaviť deskriptory grafu a tiež zobrazovať mriežku pre zlepšenie prehľadnosti. V spodnej časti tejto stránky sa nachádza tlačítko, ktoré znovu načíta celú stránku, čím sa prípadne načítajú aj nové namerané dáta.

5.2 Nastavenia parametrov a riadenie výstupov

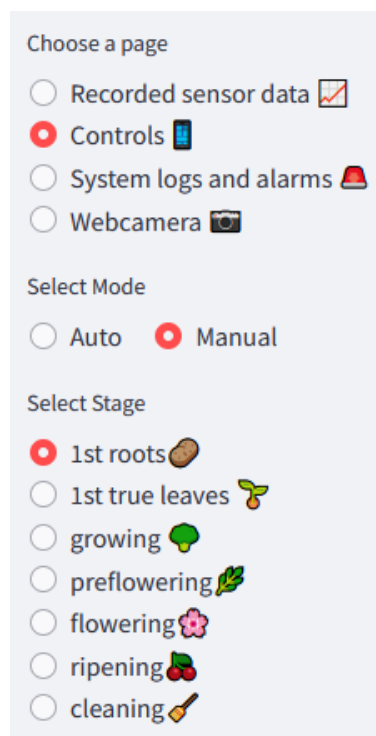
Po zvolení stránky "Controls" objaví sa aj možnosť výberu režimu na bočnom paneli. Po zvolení režimu "Manual" je možnosť zvoliť si aj fázu rastu podľa ktorého sa bude dávkovať, viď obrázok 5.3.

V manuálnom režime je možné pomocou posuvníkov nastaviť veľkosť dávky a odhadovaný progres vo vybranej fáze. Užívateľ môže tiež vidieť, ako sa menia veľkosti dávok jednotlivých prvkov. Nižšie sa nachádzajú tlačidlá na zapnutie/vypnutie jednotlivých výstupných prvkov, nastavenie ich parametrov pomocou posuvníkov a je možnosť nastavenia cieľovej teploty vody.

Ak používateľ zvolí režim „Auto“, má možnosť nastaviť dátum zasiatia, pod tým je zobrazený aktuálny priebeh aktívnych fáz a v prípade, že chce používateľ zmeniť začiatok alebo dĺžku rastových fáz, je to možné pomocou dvojpohových posuvníkov. Nižšie je možné nastaviť interval dávkovania a časovače jednotlivých prvkov. Je možné nastaviť cieľovú teplotu vody aj v automatickom režime. Snímky z webového rozhrania si môžete pozrieť v prílohe v kapitole F.

5.3 Systémové hlásenia a záznam aktivít

Všetky systémové chyby a nedávne aktivity môžete zobrazit kliknutím na položku „Systémové protokoly a alarmy“. V prípade protokolov a alarmov sa zobrazí aj dátum a čas zaznamenania.



Obr. 5.1: Bočný panel webového rozhraní po prepnutí do manuálneho režimu pomocou prepínacích tlačítok.

Ako systémové chyby sa počítajú odpojené snímače a poškodené alebo chýbajúce súbory. Zaznamenávajú sa aj užívateľské aktivity aj pre nastavené parametre. To môže byť užitočné pre užívateľa mať prehľad o predošlých nastavení.

V prípade je možné záznamy zmazať. Na tejto stránke je tiež možnosť nastaviť cieľovú e-mailovú adresu, na ktorú sa budú posielat varovania pred automatickým dávkovaním.

5.4 Všeobecná príručka pre užívateľov webového rozhrania

Už sme opísali funkcie webového rozhrania, ale v tejto podkapitole zhrnieme najdôležitejšie nastavenia automatického režimu, ktoré budú užitočné pri každodennej prevádzke. Najprv opíšeme naše odporúčané nastavenia a všeobecný návod na meranie

pH a vodivosti vody. Potom preberieme systémové chyby, ktoré sa môžu vyskytnúť v mimoriadnych situáciách, a spôsoby ich opravy alebo odstránenia.

5.4.1 Každodenná prevádzka

Na stránke "Controls" v režime "Auto" sa odporúča nastaviť dĺžky rastových fáz podľa potrieb rastliny. Ak používateľ usúdi, že skutočný "progress"predbieha alebo zaostáva za plánovaným nastaveným, je možné upraviť dátum sejby, ako je aj vidieť na obrázku 5.2. Prispôsobenie posuvníkov jednotlivých intervalov rastových fáz by si vyžadovalo modifikovať aktuálnu fázu, ako aj nasledujúce rastové fázy. Úpravou dátumu sa len posúva celkový progres a nie je potrebné posúvať posuvníky fáz rastu jeden po druhom, ako je vidieť aj na obrázku F.2.

Controls

This page allows the user to modify the controls and settings

Date of seed starting

2024/04/01

Set the date

Obr. 5.2: Nastavenie dátumu sejby sa nachádza priamo v hornej časti stránky "Controls" v režime "Auto".

Ak je z nejakého dôvodu potrebné vymeniť vodu a/alebo nadávkovať novú dávku, používateľ má možnosť posunúť dávkovací interval na hodnotu, ktorá spustí okamžité dávkovanie, ako je vidieť na obrázku 5.3. V tomto prípade sa užívateľ nemusí zaoberať množstvom dávok, len opticky skontroluje, či sú rastliny v plánovanej fáze. U nastavení intervalu automatického dávkovania posúvaním posuvníka užívateľ okamžite vidí, ako sa mení čas zostávajúci do nasledujúceho dávkovania. Ak sa zostávajúce dni zobrazujú napr. ako -1 deň a systém hlási, že nastavením tejto hodnoty by sa dávkovacia rutina mohla spustiť okamžite, stačí kliknúť na tlačidlo "Set new dosing frequency" a počkať, kým sa dávkovanie neskončí.

Druhá možnosť je, že používateľ nastaví režim na "Manuálny" až do doby trvania dávkovania a podľa potreby nastaví ľubovoľnú hodnotu dávky, ako je vidieť aj na obrázku v prílohe v kapitole F. Tu je tiež možné znížiť percento dávkovaných živín pomocou posuvníka " Dosage size " (Veľkosť dávky). Treba však poznamenať,

že v manuálnom režime musí užívateľ na bočnom paneli vybrať danú fázu rastu, čo je vidieť na obrázku 5.3 v prílohe.

V rámci týchto nastavení je možné zmeniť aj cieľovú teplotu ohrievača. Mikrokontrolér zapne relé, ak je rozdiel medzi požadovanou a skutočnou teplotou väčší ako 0,5 °C. V skutočnosti by mal používateľ skontrolovať nastavenú cieľovú teplotu aj priamo na vykurovacom telese, pozri podkapitolu 2.2.4, a či je snímač teploty vodného roztoku správne umiestnený.

Nutrient dosing

Set the frequency of nutrition supplementation (days)



-1 days until the scheduled dosing

 Resetting the dosing frequency to 8 days will trigger a nutrient dosing procedure soon!

Set new dosing frequency

Obr. 5.3: V režime "Auto" sa dávkovací interval nastaví pomocou jedného posuvníka a nastavenie sa uloží kliknutím na tlačidlo "Set new dosing frequency".

5.4.2 Meranie pH a EC vody

Na stránke "Recorded sensor data" (Zaznamenané údaje zo snímačov) je tiež možnosť spustiť meranie nových hodnôt pH a vodivosti. Stlačením tlačidla "Measure EC" (Meranie EC) alebo "Measure pH" (Meranie pH) sa spustí meranie, ktoré môže trvať až niekoľko minút. Po dokončení merania webové rozhranie upozorní používateľa, že boli namerané nové údaje, a následne obnoví stránku, po ktorej sa zobrazia nové namerané hodnoty.

5.4.3 Odstránenie systémových chýb

V prípade, že komunikácia so snímačom počas merania niekoľkokrát zlyhala a všetko je prepojené so svorkami na doske plošných spojov, jediným riešením môže byť obnovenie komunikácie. V takom prípade stačí odpojiť napájanie *Raspberry PI* a po krátkej dobe ho znova pripojiť, čím sa celý systém reštartuje, ale uložené nastavenia sa nestratia.

V prípade poruchy jednotlivých výstupných komponentov nie je možné problém zistiť pomocou webových rozhraní. Odporúča sa nastaviť nulový prevádzkový interval pre daný výstupný komponent v režime "Auto", ako je vidieť na obrázku 5.4, kým sa chyba neodstráni, v prípade stačí výstup vypnúť v manuálnom režime. Po odstránení všetkých chýb je možné vymazať protokoly chýb a alarmov na stránke "System logs and alarms" (Systémové protokoly a alarmy) pomocou tlačidla "Clear alarms" (Vymazať alarmy).

Timers

Set the power on cycle lengths in minutes

Ventilators On ratio (min/h)



Water pump On ratio (min/h)



Compressor On ratio (min/h)



Obr. 5.4: V režime "Auto" je možné nastaviť dĺžku hodinových prevádzkových intervalov. Tieto tri posuvníky umožňujú užívateľovi nastaviť, koľko minút má byť výstupné zariadenie zapnuté a koľko minút má byť vypnuté počas jedného hodinového intervalu.

5.5 Prístup k webovému rozhraniu lokálne

Autori frameworku *Streamlit* nám tiež umožňujú prepojiť náš *GitHub* spolu so skriptom v jazyku python obsahujúcim celý program webGUI s rozhraním Streamlit a zobrazíť ho na World Wide Web pomocou vopred vygenerovaného odkazu.

V tomto prípade sa dátové súbory už nenachádzajú na *Raspberry PI*, ale na *GitHub*. Preto by sme museli pravidelne sťahovať nastavené údaje z internetu pre firmvér a v prípade nahrať nové údaje na *GitHub*, aby ich bolo možné zobrazíť pomocou webového rozhrania. To nám môže spôsobiť oneskorenie pri načítavaní a ukladaní správ/údajov a ďalšie komplikácie v prípade výpadku internetu. Možno konštatovať, že mať firmvér a webové užívateľské rozhranie so všetkými dátami lokálne na

Raspberry PI je skôr nutnosť ako preferencia.

Implementáciou systému, v ktorom je skript *webGUI* umiestnený lokálne spolu so všetkými súbormi, sme odstránili problémy spojené s rýchlosťou prenosu a stratou internetového pripojenia. Jediným zostávajúcim problémom je obmedzenie dosahu dostupnosti len na lokálnu sieť.

Streamlit poskytuje pripojenie prostredníctvom lokálnej adresy cez porty 8501, 8502, 8503. Pri spustení skriptu *webGUI* je možné nastaviť aj trvalé číslo portu. My sme definovali port servera 8502, aby bol prístup k nemu jednoduchší. Pri štarte *raspberry OS* sa teda spustí zvlášť shell skript, ktorý spustí firmvér, a ďalší shell skript, ktorý spustí *Streamlit webGUI* skript s nastaveným pevným komunikačným portom.

Ak chceme k tejto lokálnej adrese pristupovať cez globálny web, musíme lokálnu adresu nejakým spôsobom sprístupniť globálnemu webu. Na tento účel sme vybrali aplikáciu s názvom *Ngrok*.

5.6 Prístup k webGUI prostredníctvom internetu

Ngrok je multiplatformová aplikácia, ktorá vytvára bezpečné tunely pre zariadenie localhost. Umožňuje vývojárom vystaviť miestny server na internet. Pomocou aplikácie *Ngrok* môže používateľ pristupovať k webovému rozhraniu cez internet.

Ngrok umožňuje vývojárom používať vopred vygenerované názvy domén, ktoré môžeme použiť na presmerovanie komunikácie, ak máme v aplikácii na miestnom serveri nastavený správny autentifikačný kľúč. Implementovali sme teda shell skript spúšťajúci aplikáciu *Ngrok* definujúci parametre, ako je autentifikačný kľúč, port, IP adresa, prípadne doménové meno prepojené vytvoreným tunelom, ktorý sa spúšťa pri každom spustení operačného systému.

6 Montáž a overenie funkčnosti

V tejto kapitole porovnáme metódy prepojenia elektrických obvodov. Zmapujeme umiestnenie fyzických zariadení na konštrukcii. V jednej podkapitole tiež podrobnejšie opisujeme kalibráciu pulzujúceho signálu ovládajúceho krokových motorov a kalibráciu senzorov pH a vodivosti vody.

6.1 Porovnanie konektorov a svorkovnic

Na pripojenie obvodov sa bežne používajú svorkovnice, svorky a konektory. Pomocou svorkovnice môžeme vodiče kedykoľvek jednoducho pripojiť a odpojiť, a to bez nutnosti spájkovania. Ak konce drôtov obalíme spájkovacím cínom, treba svorky po niekoľkých hodinách testovania a prevádzky skontrolovať a prípadne znovu naskrutkovať. [48]

Všeobecne sa svorkovnica používa na prepojenie vnútorných a vonkajších vodičov dosiek s plošnými spojmi (PCB) a svorka sa používa na prepojenie vonkajších vodičov. Existujú svorkovnice a svorky skrutkové aj bezskrutkové. Konektory môžu byť aj skrutkové alebo bezskrutkové, ale hlavnou výhodou je väčší počet vodičov. Konektory sa zvyčajne používajú na vytváranie dočasných spojení.[48]

Bežný konektor je komponent, ktorý spája dve aktívne zariadenia na prenos signálov a elektrického prúdu. Konektor má dve časti, a to zástrčku a konektor. Existuje široká škála typov konektorov, ktorá odráža širokú škálu ich použitia. Použili sme konektory pre senzory, ktoré komunikujú prostredníctvom I2C, ale na prepojenie senzorových modulov s plošnými spojmi sme použili svorkovnice.[48]

6.2 Umiestnenie senzorov a výstupných zariadení

Po prepojení jednotlivých komponentov sme overili funkčnosť jednotlivých komponentov a celého systému, a to hardvéru aj softvéru.

V nasledujúcich krokoch sme upevnili hardvérové komponenty na rám konštrukcie a umiestnili snímače a výstupné komponenty s ohľadom na ochranu a bezpečnosť osôb a funkčnú bezpečnosť. Obvody nízkeho a veľmi nízkeho napätia sme namontovali na strechu konštrukcie mimo potenciálneho kontaktu s osobami. Vodič PE sme priskrutkovali k rámu konštrukcie jednou skrutkou, čím sme uzemnili celú kovovú konštrukciu mikrofarmy.

Na streche konštrukcie sme umiestnili všetky prepojovacie obvody mimo dosahu osôb. Ďalej sa tam nachádza mikrokontrolér, doska plošných spojov prepájajúci mikrokontrolér s ostatnými komponentmi a senzory, ktoré je lepšie umiestniť mimo dosahu vody.

Dávkovacie čerpadlá a dávkované rastlinné živiny sme umiestnili vedľa konštrukcie, kde sú v bezpečí pred vodou a stále blízko nádrže vodného roztoku, aby hadice nemuseli byť príliš dlhé. Čím dlhšie sú hadice, tým viac dávkovanej tekutiny bude potrebné udržať vo vnútri aj v čase, keď sa nedávkuje. Ak by sme chceli zakomponovať do puzdra krokové motory a ich ovládače, musíme dbať aj na teploty, ktoré sa môžu vyskytnúť počas tých niekoľkých minút prevádzky.

Vo veľkej vodnej nádrži sa nachádza akváriové vodné čerpadlo, ktoré musí byť počas prevádzky ponorené vo vode. Podobne aj vykurovacie teleso a kompresor používaný na odvzdušňovanie živného roztoku musia byť ponorené vo vode. Kompresor používaný na prevzdušňovanie vodného roztoku je umiestnený na streche konštrukcie a prevzdušňovanie vodnej nádrže sa realizuje pomocou pneumatických hadíc vedúcich do nádrže. Priame prevzdušňovanie vodného roztoku nám tiež zefektívni miešanie látok v hlavnej nádrži po dávkovaní nových dávok.

6.3 Kalibrácia frekvencie pulzných vstupov ovládačov krokových motorov

Ovládače motorov umožňujú ovládať krokový motor pomocou jedného vstupu PUL. Podľa dokumentácie jeden impulz znamená jeden krok. Naším cieľom bolo nájsť také nastavenie frekvencie, ktoré dávkuje čo najpresnejšie a zároveň relatívne rýchlo. [32]

Postupovali sme nasledovne. Nastavili sme PWM výstup Rasperry s frekvenciou 500 Hz a šírkou impulzu 50 % a sledovali sme rýchlosť krokového motora. Pritom sme skúšali rôzne nastavenia prúdu motorov a veľkosti krokov na ovládačoch. Potom sme postupne zvyšovali PWM frekvenciu na vstupe PUL. Zistili sme, že nad 8 kHz už motor vynechával kroky. Vyskúšali sme kombinácie všetkých veľkostí krokov a nastavení prúdu a dospeli sme k 1/2 kroku, ktorý pri nastavení prúdu 2,5 A vynechal najmenej krokov. Dospeli sme k záveru, že tieto parametre sú najvyhovujúcejšie a odteraz sme používali len tieto parametre.

Väčšie prúdy nemali žiadny dopad na výkonnosť motoru. Jediný dopad mal ešte šírka pulzu. Prišli sme na najlepšiu presnosť pri 90 percentách. Po vypočítaní prietoku sme zistili, že sme mali mať prietok okolo 80 ml/min. Pre lepšiu presnosť sme znížili frekvenciu na 5 kHz, čím sme sa dostali na veľmi presných 50 ml/min. Keďže najväčšie množstvo dávkované môže byť až 2.4 ml/l, do 40 litrového vodného nádrža, čo je 98 ml objemovo, najviac môže trvať dávkovanie skoro 2 minúty. [32][31]

6.4 Kalibrácia snímača pH vody

Tento snímač je potrebné pred prvým použitím kalibrovať. Pod pojmom kalibrácia sme mali na mysli to, že musíme nájsť hodnoty napätia, ktoré zodpovedajú ich hodnotám pH.

Balenie obsahuje jednu pH sondu s konektorom BNC a merací modul, ktorý zosilňuje, upravuje a kompenzuje nameranú hodnotu pomocou teplomera integrovaného na povrchu tohto modulu. V manuálu je možné nájsť všeobecný návod, čo pre bežného používateľa ani nestačí. V príručke sú uvedené presne tri odporúčané hodnoty napätia pre tieto dané hodnoty pH: 4, 7, 10. Na výpočet pH nám odporúčajú použiť lineárnu aproximáciu pomocou týchto troch hodnôt. Vieme však, že charakteristika merania pH nie je lineárna. Ak by sme kalibráciu nepreviedli a použili priamo túto lineárnu funkciu, mohli by sme mať chybu až 1,5 v meranej hodnote pH v rozsahu od 4 do 10. Hodnoty z manuálu a lineárna funkcia sú na obrázku 6.4 vyznačené oranžovou farbou. [43]

Pred kalibráciou je ešte potrebné upraviť offsetové napätie. Ofset sa nastavuje priamo na module pomocou jedného trimra. Vlastnosťou sondy je, že bez offsetu by bol medián hodnôt napätia presne na nule. Takže pri hodnote pH 7 by sme na analógovom výstupe senzorového modulu namerali 0 V. Pri vyššej hodnote pH by sme merali záporné napätie a pri nižších hodnotách pH by sme merali kladné napätie. [43]

Samotná kalibrácia sa vykonáva pomocou troch kalibračných látok s hodnotami pH 4,00, 6,86 a 9,18. Tieto kalibračné látky sú vo forme prášku a na dosiahnutie čo najväčšej presnosti musia byť splnené určité podmienky. Na ich rozpustenie je potrebné použiť 250 ml vody a teplota roztoku musí dosiahnuť 25 °C. Po rozpustení je potrebné len vložiť sondu a sledovať napätie na výstupe meracieho modulu.

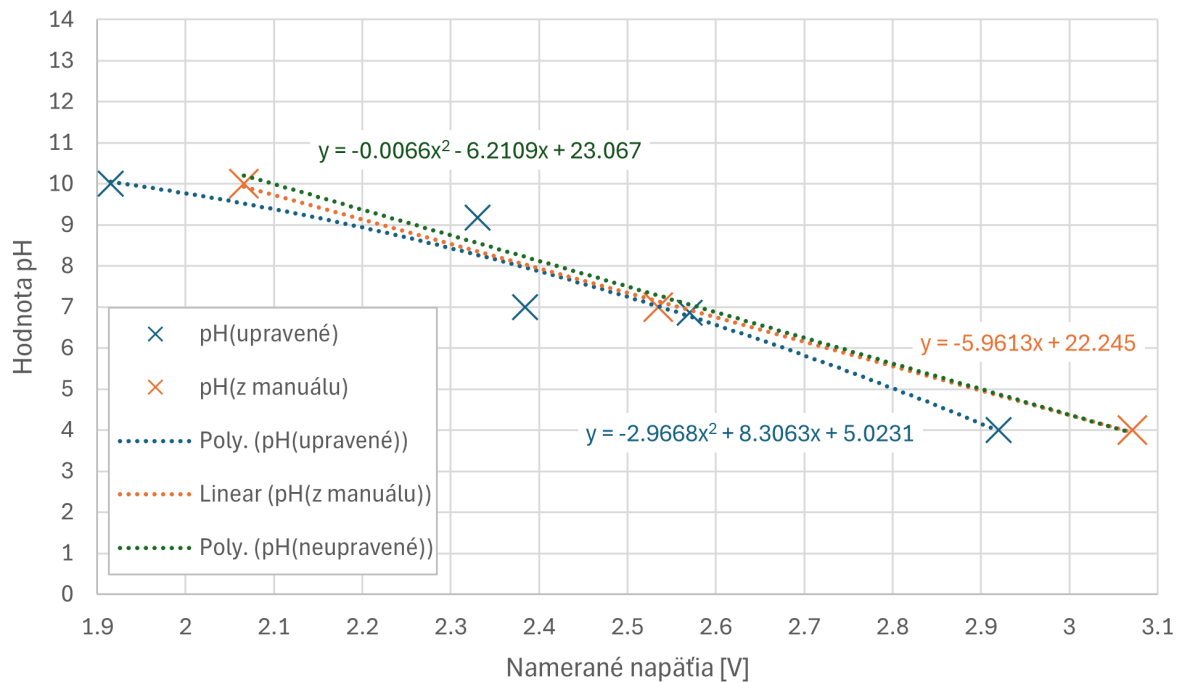
Namerané hodnoty napätia mali rozptyl 0,2 V. Medián a modus nameraných hodnôt mali rovnakú hodnotu, takže môžeme predpokladať, že rozptyl nameraných hodnôt bol spôsobený šumom. Po použití softvérového spriemerovania sme získali ich mediány, ktoré ďalej uvádzame len ako namerané hodnoty. Tieto namerané hodnoty boli nasledovné: 2,92 V, 2,57 V, 2,33 V.

Pre lepšiu presnosť sme použili aj upravené hodnoty z príručky. Upravili sme ich zistením posunu hodnôt pomocou kalibračnej látky pri pH 4,00. Túto hodnotu sme zvolili len preto, lebo sme mali k dispozícii kalibračnú látku s presne takouto hodnotou pH. Odčítaním tohto posunu od troch hodnôt uvedených v návode sme získali nové upravené hodnoty, ktoré teraz môžeme použiť na rozšírenie rozsahu nameraných hodnôt, aby bola kalibrácia presnejšia.

Na základe kalibrácie sme získali matematickú funkciu:

$$y = - 2.9668x^2 + 8.3063x + 5.0231 \quad (6.1)$$

kde "y" predstavuje vypočítanú hodnotu pH a "x" predstavuje napätie namerané na module snímača.



Obr. 6.1: Charakteristika pH senzora. Oranžová farba predstavuje hodnoty z návodu a lineárnu aproximáciu týchto hodnôt pomocou bodkovanej čiary. Zelená bodkovaná čiara predstavuje polynomicnú aproximáciu hodnôt z manuálu s pridaním nami nameraných hodnôt. Modrou farbou sú znázornené upravené hodnoty z návodu a naše hodnoty a ich polynomicná aproximácia bodkovanou modrou čiarou.

Táto aproximácia nám umožňuje programovo konvertovať analógové napätia na hodnoty pH s väčšou presnosťou ako pred kalibráciou. Je dôležité poznamenať, že dosiahnutie vyššej presnosti by si vyžadovalo meranie ďalších etalónových hodnôt. To by nám umožnilo lepšie zmapovať charakteristiku snímačovej sondy.

Záver

Môžeme konštatovať, že sme úspešne splnili všetky ciele práce. Vykonali sme podrobný prieskum histórie hydroponického pestovania a súčasného stavu a podrobne sme porovnali bezpôdne pestovateľské systémy.

Bolo potrebné vybrať vhodnú mikroprocesorovú platformu, ktorá bude slúžiť ako jadro navrhovaného systému. Vybraná platforma musela spĺňať nielen technické požiadavky hydroponického prostredia, ale musela byť aj dostatočne univerzálna na to, aby ju bolo možné v budúcnosti vylepšovať. Na základe dôkladného hodnotenia bola identifikovaná robustná mikroprocesorová platforma, ktorá položila základy pre inteligentné riadenie hydroponického systému. Architektúra systému, ktorá je podrobne opísaná v kapitole č.2, zahŕňa nespočetné množstvo prvkov, od osvetlenia LED a čerpadiel až po sofistikovaný rad senzorov a robustnú riadiacu jednotku.

Navrhli sme schému zapojenia a dosku plošných spojov pre systém. Kapitoly venované schéme zapojenia a zapojeniu na doske podrobne popisujú architektúru a pripojenia, čím zabezpečujú celkové pochopenie funkčných prvkov systému a ich vzájomných závislostí.

Bol navrhnutý firmvér ktorý riadi výstupné zariadenie, komunikuje so senzormi, zbiera merané údaje a koná podľa nastavenia užívateľa. Firmvér dokáže poslať upozornenie na užívateľom zadanú e-mailovú adresu. Úspešne sme vytvorili webové užívateľské rozhranie, ktorý poskytne zobrazenie nameraných dát a umožňuje nastaviť systém. Systémové nastavenia sú uložené lokálne čo umožňuje komunikáciu programu webového rozhrania s firmvérom.

Sme úspešne nakalibrovali snímač pH vody. Na kalibráciu sme použili kalibračné látky a pomocou nameraných charakteristík snímača sme vytvorili polynomickú aproximáciu, pomocou ktorého sme schopný odmerať pH presnejšie a implementovali do firmvéru. Dávkovacie peristaltické čerpadlá sú poháňané krokovými motormi, u ktorých sme našli ideálne parametre na ich ovládanie a presné dávkovanie.

Z hľadiska budúceho výskumu by sa mohli preskúmať možnosti vylepšenia systému, integrácia ďalších senzorov na komplexné monitorovanie životného prostredia a škálovateľnosť pre väčšie aplikácie.

Literatúra

- [1] GERICKE, W.F, 2008. *The Complete Guide To Soilless Gardening*. Kessinger Publishing. ISBN 1436700043, 9781436700047.
- [2] FUSSY, Andre a PAPENBROCK, Jutta, 2022. *An Overview of Soil and Soilless Cultivation Techniques—Chances, Challenges and the Neglected Question of Sustainability - Plants*. 11. ISSN 2223-7747. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/plants11091153>.
- [3] JOHNSON, Hunter, 1980. *SOILLESS CULTURE of Greenhouse Vegetables*. California: Division of Agricultural Sciences, University of California.
- [4] LIBIA, Iris Trejo-Téllez a FERNANDO, Carlos Gomez Merino, 2012. *Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. InTech. ISBN 978-953-51-0386-8. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5772/37578>.
- [5] SHAVRUKOV, Yuri; GENC, Yusuf a HAYES Julie, 2012. *The Use of Hydroponics in Abiotic Stress Tolerance Research. Hydroponics - Standard Methodology for Plant Biological Researches*. InTech. ISBN 978-953-51-0386-8. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5772/35206>.
- [6] WHELAN, Susanna. *Basic Hydroponics Air Quality Controls*. Online. GRO-ZINE. Dostupné z: <https://www.grozone.com/2016/09/30/basic-hydroponics-air-quality-controls/>. [cit. 2023-11-04].
- [7] MAFFEI, M, 2010. *Sites of synthesis, biochemistry and functional role of plant volatiles*. South African Journal of Botany. 76. 612-631. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.03.003>.
- [8] MONTEIRO, Ricardo; CARMO, Pinto Sheila Isabel do; SOARES, Érika Reis a de CARVALHO, Vanessa Andalo Mendes 2012. *Hydroponic Production of Fruit Tree Seedlings in Brazil - A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. InTech. ISBN 978-953-51-0386-8. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5772/38594>.
- [9] JONES, J. Benton, Jr., 2014. *Complete Guide for Growing Plants Hydroponically(1st ed.)*. ISBN 9780429187995 CRC Press.
- [10] GRAHAM, L. *Floating Veggie Raft for Fish Ponds*. Online. In: Instructables. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Floating-Veggie-Raft-for-fish-ponds/>. [cit. 2023-10-24].

- [11] *Greenhouse Update: Large Scale Hydroponics*. Online. In: Saint Louis Science Center. Dostupné z: <https://www.slsc.org/greenhouse-update-large-scale-hydroponics/>. [cit. 2023-10-24].
- [12] *Aeroponics Systems*. Online. Dostupné z: <https://www.jains.com/JainGreenhouse/Aeroponics%20Systems.htm>. [cit. 2023-10-24].
- [13] ANDREWS, Dylan. *How a Vertical Hydroponic System Works*. Online. In: Hammerhead Warehouse Systems - pallet racks, pallet storage and pallet racking. Dostupné z: <https://hammerheadllc.com/how-a-vertical-hydroponic-system-works/>. [cit. 2023-10-24].
- [14] DARKO, Eva; HAMOW, Kamirán A.; MARČEK, Tihana; DERNOVICS, Mihály; AHRES, Mohamed, 2022. *Modulated Light Dependence of Growth, Flowering, and the Accumulation of Secondary Metabolites in Chili*. *Frontiers in Plant Science*. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.801656>.
- [15] DURAZZO, Benjamin D, 2021. *Contemporary applications of light-emitting diodes in horticulture: A review on LED lighting technology and the use of wavelength band and irradiance modulation to study plant photobiology*. Scientific Figure on ResearchGate. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17101.77282>.
- [16] BARNES C; TIBBITS, Theodore W; SAGER, John C; DEITZER Gerald; BUBENHEIM David; KOERNER Gus; BUGBEE Bruce, 1993. *Accuracy of quantum sensors measuring yield photon flux and photosynthetic photon flux*. *HortScience*. Dostupné z: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.28.12.1197>.
- [17] *Absorption Spectra*. Online. In: Save My Exams. Dostupné z: <https://www.savemyexams.com/a-level/biology/cie/22/revision-notes/13-photosynthesis/13-1-photosynthesis-as-an-energy-transfer-process/13-1-5-absorption-spectra-action-spectra/>. [cit. 2023-10-28].
- [18] *TriPart®*. Online. In: Terra Aquatica. Dostupné z: <https://www.terraaquatica.com/mineral-fertiliser-solutions/tripart>. [cit. 2023-10-28].
- [19] *ESP32-WROOM-32D and ESP32-WROOM-32U Datasheet*. Online. In: Espressif Systems. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>. [cit. 2023-10-31]

- [20] *ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide*. Online. In: — ESP-IDF Programming Guide latest documentation. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html#esp32-devkitc-v4-getting-started-guide>. [cit. 2023-11-01].
- [21] *RASPBERRY PI LTD. Raspberry Pi 1 Model B*. Online. Raspberry Pi. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-1-model-b-plus/>. [cit. 2023-12-15].
- [22] *Difference between ESP 32 vs Raspberry pi*. Online. Simply IoT Sensors | IOT blog. Dostupné z: <https://www.simplyiotsensors.com/2023/05/ESP-32-vs-Raspberry-pi.html>. [cit. 2023-12-19].
- [23] *LED Grow Light Results*. Online. In: Growstar shop. Dostupné z: <https://growstars.com/blogs/news/led-grow-light-results>. [cit. 2023-10-31].
- [24] *A review on Seeed Studio pH and EC Sensor Kits – Part 2*. Online. In: E-Tinkers. Dostupné z: <https://www.e-tinkers.com/2020/07/a-review-on-seeed-studio-ph-and-ec-sensor-kits-part-2/>. [cit. 2023-10-31].
- [25] *LED pásek SB3-600, Teplá bílá*. Online. T-LED. Dostupné z: <https://www.t-led.cz/p/led-pasek-sb3-600-vnitri-7501>. [cit. 2023-11-12].
- [26] *HH-S120F008-2835-12 NW WHITE PCB IP20WISVA OPTOELECTRONICS*. Data sheet. TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/hh-40ktg-2835fwna/zdroje-svetlapasy-led/wisva-optoelectronics/hh-s120f008-2835-12-nw-white-pcb-ip20/>. [cit. 2023-11-13].
- [27] *LED pásek SB3-300, Červená*. Data sheet. T-LED. Dostupné z: <https://www.t-led.cz/p/led-pasek-sb3-300-vnitri-7700/07708>. [cit. 2023-11-13].
- [28] *Aqua Nova čerpadlo NPH-600*. CHIHIROSDOSING. Data sheet. INVITAL Rostlinna-akvaria.cz. Dostupné z: <https://www.rostlinna-akvaria.cz/eshop/cerpaci-hlavy/aqua-nova-cerpadlo-nph-600>. [cit. 2023-11-13].
- [29] *Atman vzduchovací motorek JKA-AP7500*. CHIHIROSDOSING. Špecifikácie. INVITAL Rostlinna-akvaria.cz. Dostupné z: <https://www.rostlinna-akvaria.cz/eshop/vzduchovani/atman-vzduchovaci-motorek-jka-ap7500-360-l-hod>. [cit. 2023-11-13].

- [30] *Diversa Thermo Plus 250W*. CHIHIROSDOSING. Špecifikácie. IN-VITAL Rostlinna-akvaria.cz. Dostupné z: <https://www.rostlinna-akvaria.cz/eshop/topeni-do-akvaria/diversa-thermo-plus-250w-topitko>. [cit. 2023-11-13].
- [31] *Kamoer KCM-B146 Peristatické čerpadlo*. Data sheet. Brochure. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1497335/kcm-b146-cerpadlo-peristalticke-s-krokovym-motorem>. [cit. 2023-12-14].
- [32] *Ovládač HY-DIV268N-5A*. Data sheet. 2 phase hybrid stepper motor drive manual. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/datasheet/HY-DIV268N-5A.html>. [cit. 2024-05-09].
- [33] *MEC0251V1-000U-A99SUNON*. Data sheet. TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/mec0251v1-a99/ventilatory-dc-12v/sunon/mec0251v1-000u-a99/>. [cit. 2023-11-24].
- [34] *Non-contact Liquid Level Sensor XKC-Y25-T12V SKU SEN0204*. Wiki. DFROBOT. Dostupné z: https://wiki.dfrobot.com/Non-contact_Liquid_Level_Sensor_XKC-Y25-T12V_SKU__SEN0204. [cit. 2023-11-24].
- [35] *Plovákový senzor vodní hladiny*. Návod. Návodů Drátek. Dostupné z: <https://navody.drateg.cz/navody-k-produktum/plovakovy-senzor-vodni-hladiny.html>. [cit. 2023-12-08].
- [36] *What's the Difference Between a Normally Open and Normally Closed Float Switch?* Online. SMD Fluid Controls. Dostupné z: <https://www.fluidswitch.com/2015/04/21/whats-the-difference-between-a-normally-open-and-normally-closed-float-switch/>. [cit. 2023-12-09].
- [37] *SCD30*. Data sheet. Sensirion, A. G. Smart sensor solutions. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf. [cit. 2024-05-13].
- [38] *BME280*. Data sheet. Bosch Sensortec. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>
- [39] *DS18B20*. Data sheet. Maxim Integrated. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ds18b20.pdf>

- [40] *DS18B20 Digitální vodotěsné čidlo teploty*. Online. Laskakit.cz. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/dallas-digitalni-vodotesne-cidlo-teploty-ds18b20-1m/>. [cit. 2023-12-30].
- [41] *SGP40*. Data sheet. SENSIRION. Dostupné z: <https://sensirion.com/resource/datasheet/sgp40>. [cit. 2023-12-13].
- [42] *Gravity Analog TDS Sensor Meter For Arduino SKU SEN0244*. Manuál. DFRobot Wiki. Dostupné z: https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor____Meter_For__Arduino_SKU__SEN0244. [cit. 2023-12-14].
- [43] *How to use a PH probe and senso*. Manuál. Dostupné z: <https://cdn.awsli.com.br/969/969921/arquivos/ph-sensor-ph-4502c.pdf>. [cit. 2023-12-14].
- [44] *Color CMOS QSXGA (5 megapixel) image sensor with OmniBSI™ technology*. Data sheet. OmniVision Technologies. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/RaspberryPi/ov5647_full.pdf. [cit. 2023-12-15].
- [45] REICHELT ELEKTRONIK GMBH INTERNET TEAM. DEBO RELAIS 4CH. Online. Elektronik und Technik bei reichelt elektronik günstig bestellen. Dostupné z: <https://www.reichelt.com/de/en/developer-boards-relay-module-4-channel-5-v-srd-05vdc-sl-c-debo-relais-4ch-p242811.html>. [cit. 2024-02-11].
- [46] *ADS1115*. Online. TI.com. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/ADS1115>. [cit. 2024-04-11].
- [47] Schéma zapojení relé *SRD-05VDC-SL-C*. Online. EasyEDA. Dostupné z: https://easyeda.com/modules/SRD-05VDC-SL-C_69d21c817fe94afb8c99ecf559f7f30c. [cit. 2024-02-10].
- [48] *What's the Difference Between a Terminal and a Connector?* Online. Dostupné z: <https://www.hitaltech.com/en/news/whats-the-difference-between-a-terminal-and-a-connector/>. [cit. 2024-05-05].

Zoznam symbolov a skratiek

WebGUI Web Graphical User Interface - Webové grafické používateľské rozhranie

I2C Inter-Integrated Circuit

SCL Serial Clock

SDA Serial Data

SPI Serial Peripheral Interface

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

GPIO General-purpose input/output

CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor

PWM Pulse Width Modulation

NFT Nutrient Film Technique

DFT Deep Flow Technique

EC Electrical Conductivity - elektrická vodivosť

TDS Total Dissolved Solids - celkové rozpustené pevné látky

VOC Volatile Organic Compound - prchavá organická zlúčenina

DFT Deep Flow Technique

CO₂ Carbon dioxide - oxid uhličitý

Ca²⁺ Calcium catione - vápnik katión

Mg²⁺ Magnesium catione - horčík katión

K⁺ Kalium catione - draslík katión

Na⁺ Natrium catione - sodík katión

NH₄⁺ Ammonium catione - amónny katión

Al³⁺ Aluminium catione - hliník katión

NO₃⁻ Nitrate anion - dusičnan anión

SO₄²⁻ Sulphate anion - síran anión

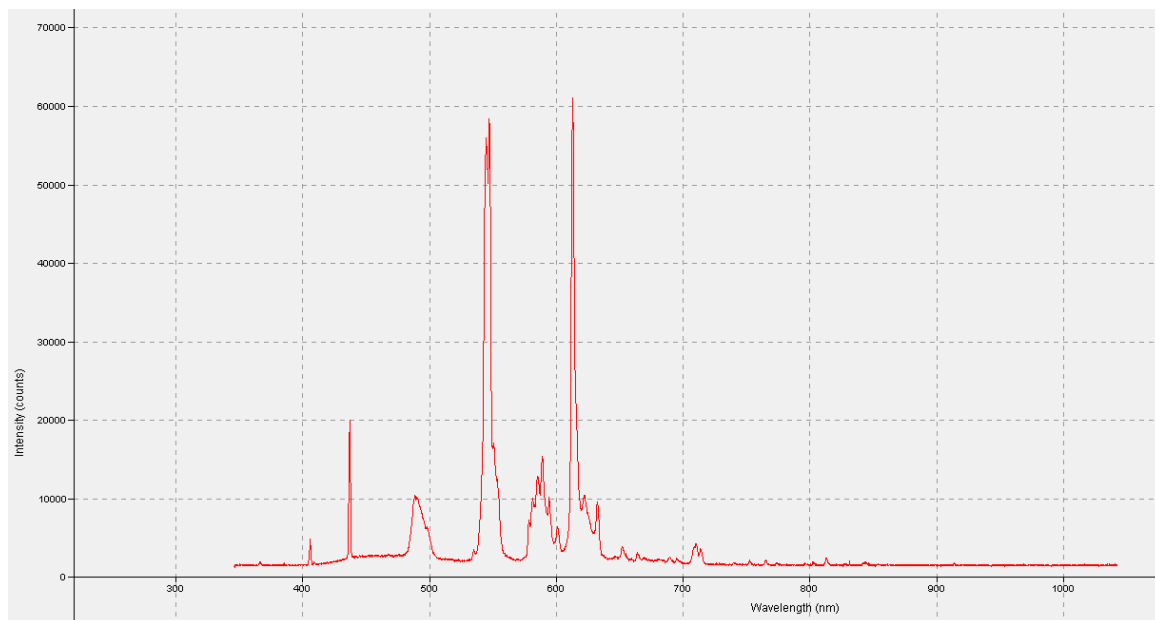
- Cl⁻** Chloride anion - chlorid anión
- HCO³⁻** Hydrogenium carbonas anion - hydrogenuhličitan anión
- OH⁻** hydroxide anion - hydroxid anión

Zoznam príloh

| | | |
|----------|--|-----------|
| A | Mikrokontrolér ESP32 | 75 |
| A.1 | Pinout ESP32 | 75 |
| B | Namerané spektrálne odozvy svetelných zdrojov | 76 |
| B.1 | Spektrum osvetlení miestnosti | 76 |
| B.2 | Nameraná spektrálna odozva červených LED pásov | 77 |
| B.3 | Nameraná spektrálna odozva červeného laseru | 77 |
| C | Prepájací modul Raspberry Pi | 78 |
| C.1 | Schéma zapojenia | 78 |
| C.2 | Doska plošných spojov | 79 |
| D | Generovaný PWM signál | 80 |
| E | Dávkovacie množstvá | 81 |
| F | Webové rozhranie | 82 |
| G | Obsah priloženého média | 84 |

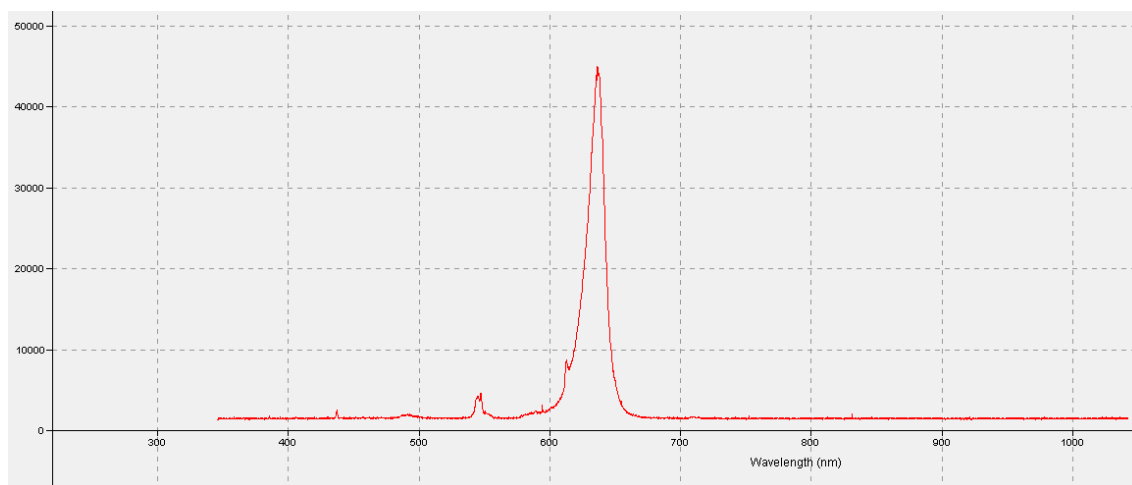
B Namerané spektrálne odozvy svetelných zdrojov

B.1 Spektrum osvetlení miestnosti



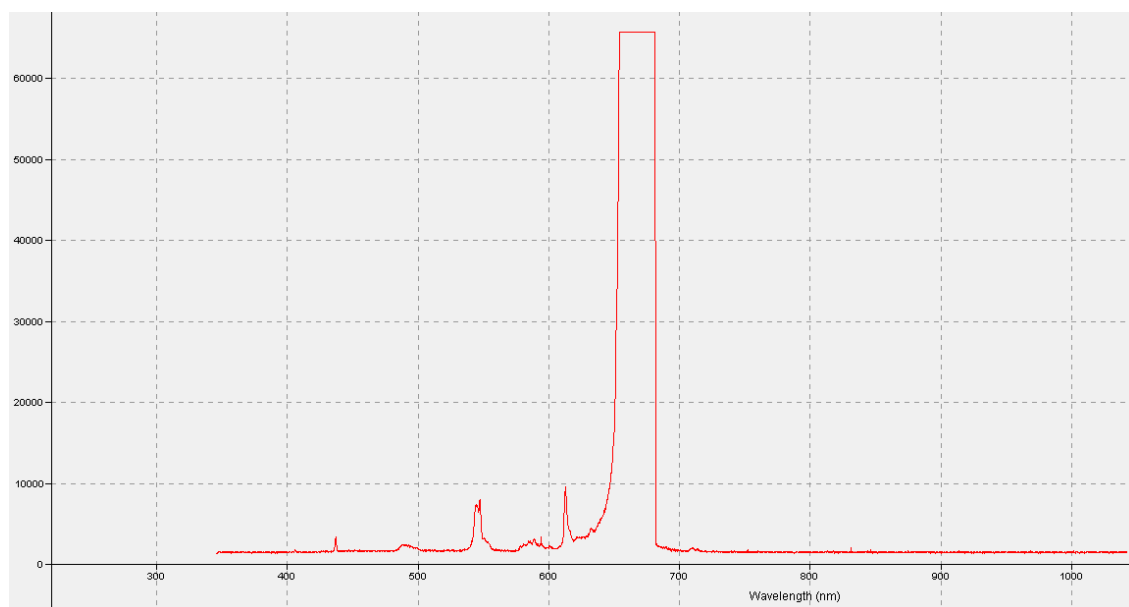
Obr. B.1: Namerané spektrum svetelných zdrojov v miestnosti

B.2 Nameraná spektrálna odozva červených LED pásov



Obr. B.2: Nameraná spektrálna odozva červeného LED pásu

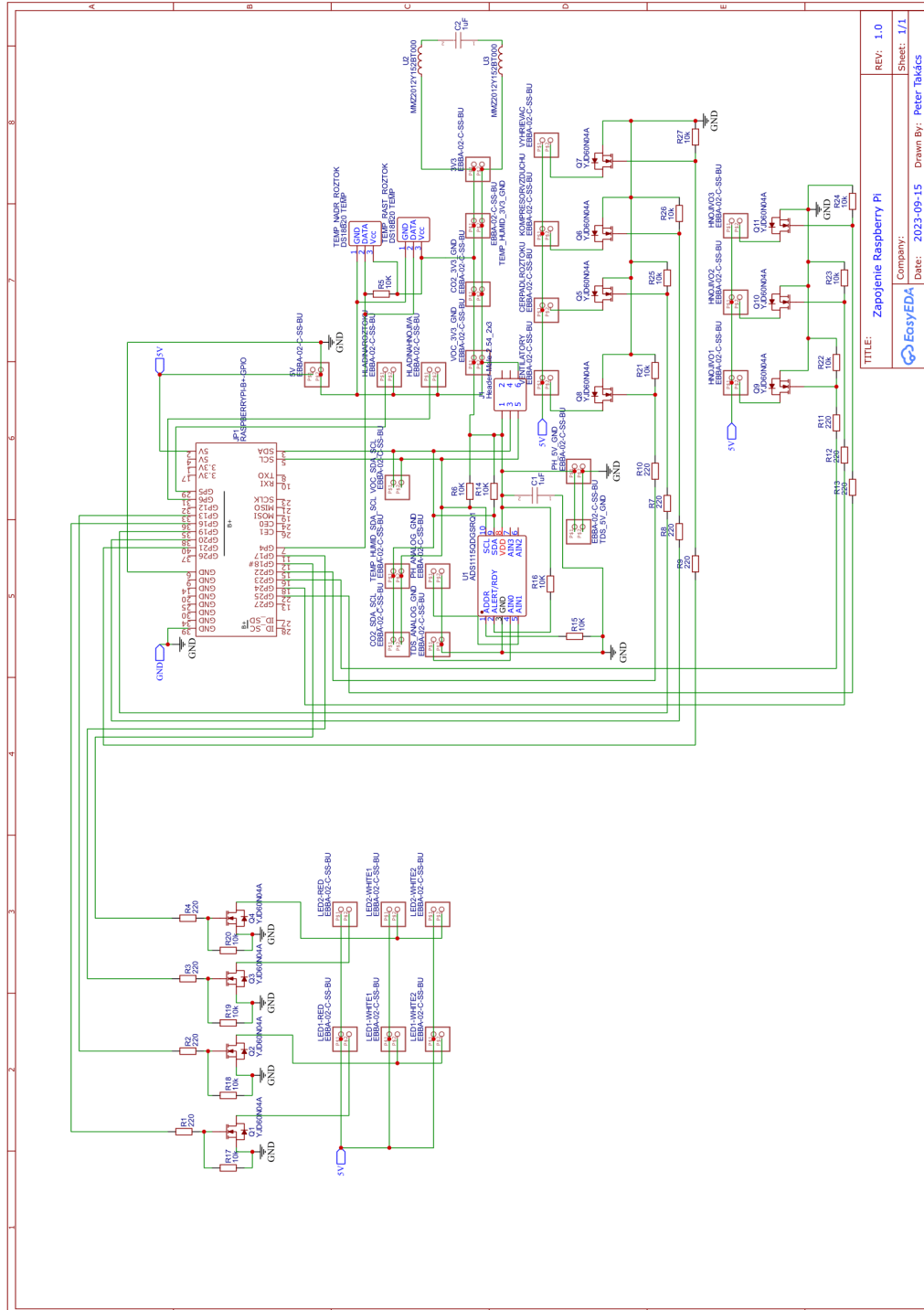
B.3 Nameraná spektrálna odozva červeného laseru



Obr. B.3: Nameraná spektrálna odozva červeného laseru

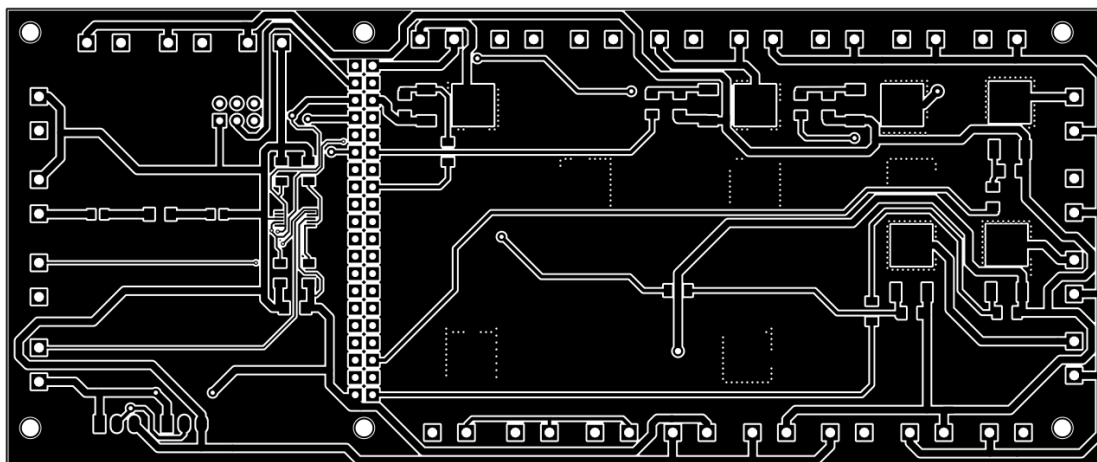
C Prepájací modul Raspberry Pi

C.1 Schéma zapojenia

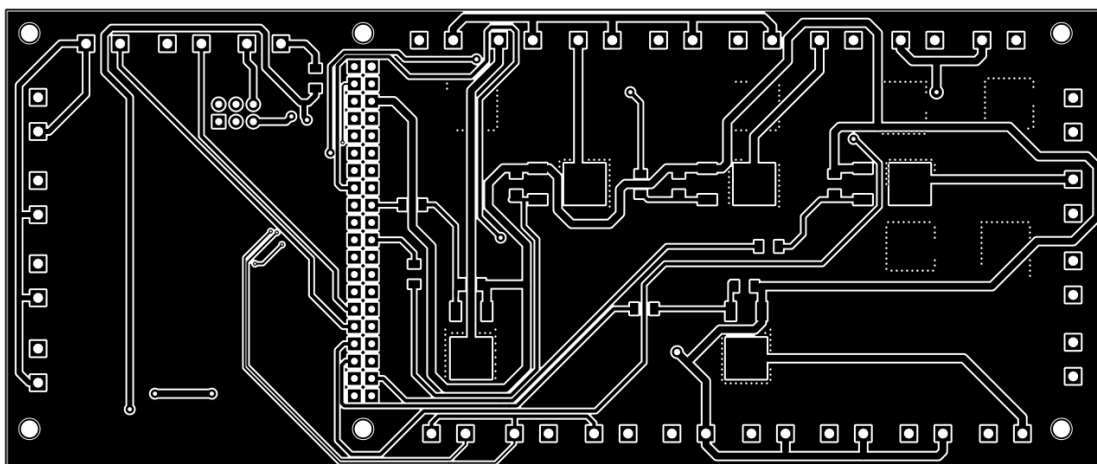


Obr. C.1: Zapojenie Raspberry Pi

C.2 Doska plošných spojov



Obr. C.2: Vrchná vrstva dosky plošných spojov



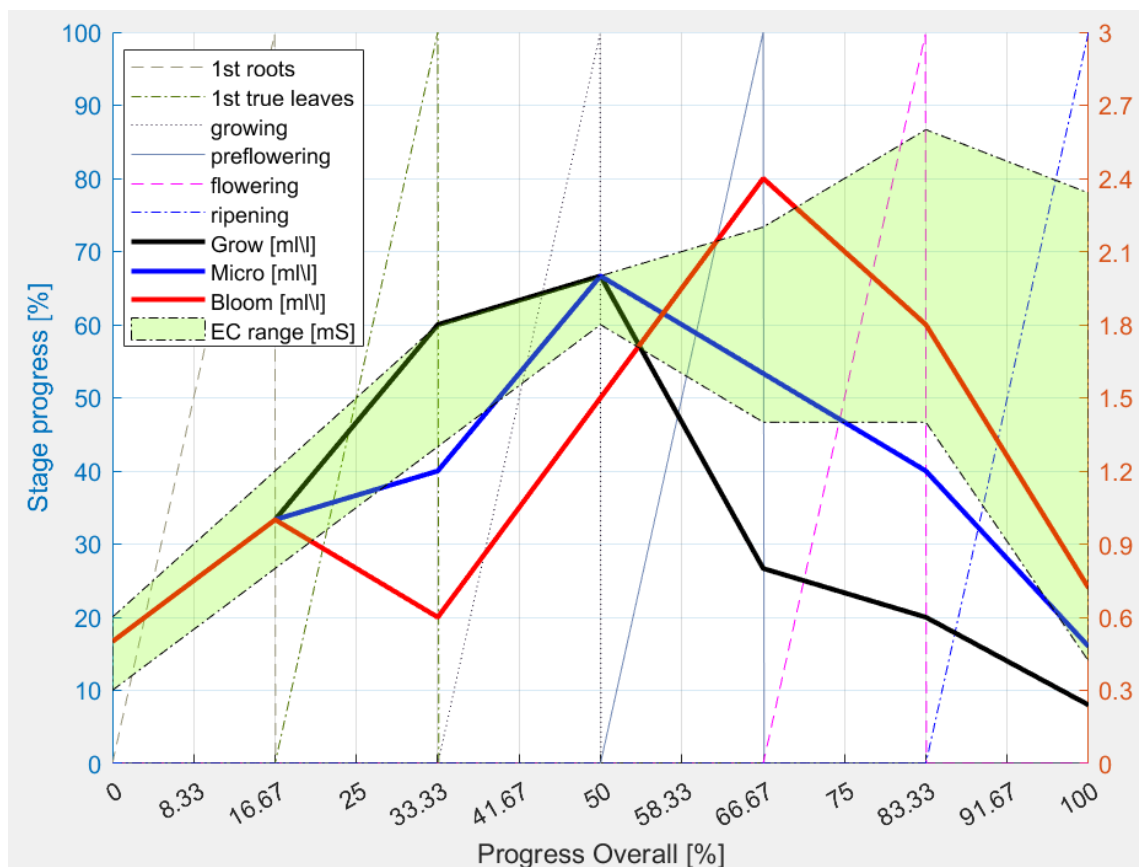
Obr. C.3: Spodná vrstva dosky plošných spojov

D Generovaný PWM signál



Obr. D.1: Softvérom generovaný 5000 Hz PWM signál šírkou 90 % na výstupe Raspberry PI.

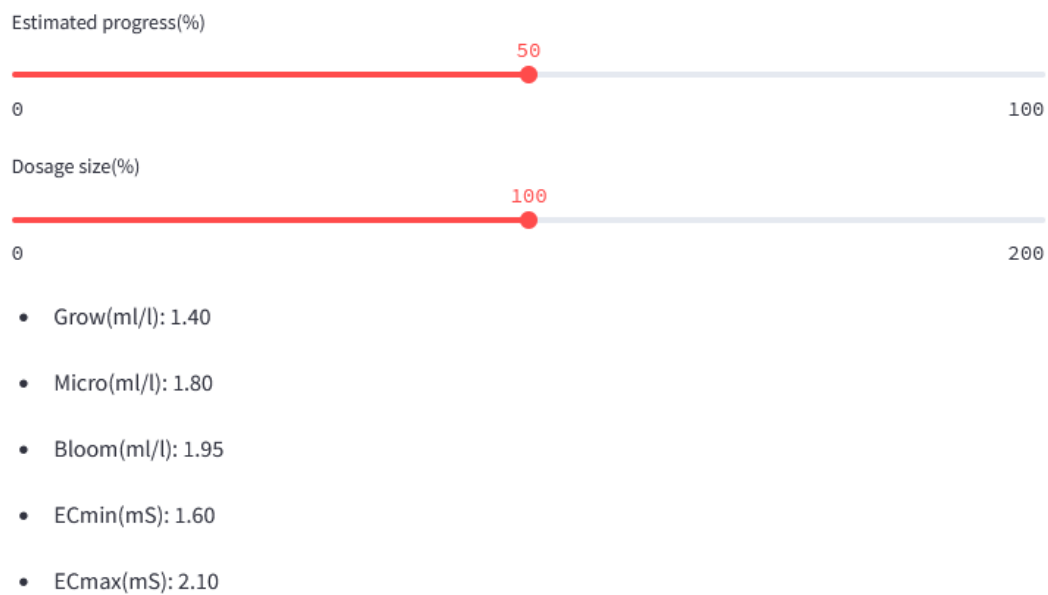
E Dávkovacie množstvá



Obr. E.1: Interpolované priebehy dávkovania a povolené rozsahy vodivosti vypočítané firmvérom.

F Webové rozhranie

preflowering 🌱



Obr. F.1: Nastavenie dávkovaných množstiev podľa nastavenej fázy „preflowering“ pomocou posuvníkov vo webovom rozhraní v manuálnom režime.

growing 🌱

Stage progress: 20.00%

Intervals settings (days)

Elapsed days: 30



Obr. F.2: Nastavenie intervalov rastových fáz pomocou dvojpozičných posuvníkov v automatickom režime.

G Obsah priloženého média

K tlačenej verzii práce je priložená SD karta, ktorá obsahuje:

- priečinok s názvom *farmCodesRaspberry* - obsahuje firmvér, webové rozhranie a ďalšie pomocné súbory
- súbor s názvom *Gerber_MicrofarmVer.zip* - obsahuje súbory potrebné na tlač dosky plošných spojov, ktoré možno nájsť v kapitole C.2
- súbor s názvom *Diplomova_praca.zip* - obsahuje všetky súbory potrebné pre *latexový* projekt, ktorý bol použitý na vytvorenie tohto dokumentu
- súbor s názvom *Diplomova_praca_text_prace.pdf* - ktorý obsahuje text práce vo formáte *.pdf*.