

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2023

Bc. Filip Seč



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

CHYTRÝ HYDROPONICKÝ SYSTÉM

SMART HYDROPONIC SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Seč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Beneš

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Filip Seč

ID: 230656

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Chytrý hydroponický systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je realizovat HW a SW hydroponického systému, jež bude možné dálkově řídit a vyčítat hodnoty z webového rozhraní.

1. Seznamte se s problematikou hydroponie, rozeberte druhy hydroponie z hlediska použití, rozeberte výhody a nevýhody jednotlivých druhů hydroponie.
2. Seznamte se s mikrokontrolery, které využijete pro hydroponický systém a jednotlivé senzory.
3. Navrhněte schématické zapojení a desku plošných spojů pro systém.
4. DPS realizujte a oživte navržené moduly a naprogramujte jednotlivé moduly.
5. Navrhněte komunikaci s webovým rozhraním pro čtení dat a případné řízení systému.
6. Ověřte celkovou funkčnost zařízení a porovnejte s produkty/řešením dostupným na trhu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 26.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Beneš

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 bakalárska práca sa zaoberá realizáciou chytrého hydroponického systému s možnosťou vzdialeného riadenia a monitorovania cez webové rozhranie. Hlavným cieľom práce je navrhnúť a implementovať hardvérové a softvérové komponenty pre tento systém.

V rámci práce je dôležité oboznámiť sa s problematikou hydroponie a preskúmať rôzne druhy hydroponických systémov a ich použitie. Zameranie sa tiež bude venovať analýze výhod a nevýhod jednotlivých druhov hydroponie.

Ďalším krokom je oboznámenie sa s mikrokontrolérmi a senzormi, ktoré budú využité v rámci hydroponického systému. Na základe toho navrhne schematické zapojenie a dosku plošných spojov (DPS) pre systém.

Po navrhnutí hardvéru nasleduje jeho realizácia a oživenie navrhnutých modulov. V tejto fáze je potrebné naprogramovať jednotlivé moduly, aby boli schopné komunikovať a spracovávať dáta.

Dôležitým krokom je návrh komunikácie s webovým rozhraním, ktoré umožní čítanie dát a riadenie systému. Týmto spôsobom bude možné monitorovať hydroponický systém na diaľku.

V závere práce overujeme celkovú funkčnosť systému a porovnáваме ju s existujúcimi komerčnými riešeniami dostupnými na trhu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydropónia, Chytrý Hydroponický systém, Automatizácia, ESP32, Doska Plošných Spojov, IoT, MQTT, Hardvér, Softvér, Node-RED.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the implementation of a smart hydroponic system with the capability of remote control and monitoring via a web interface. The main objective of the work is to design and implement hardware and software components for this system.

Within the scope of the work, it is important to familiarize oneself with the issues of hydroponics and explore various types of hydroponic systems and their usage. Focus will also be given to the analysis of the advantages and disadvantages of individual types of hydroponics.

The next step involves getting acquainted with microcontrollers and sensors that will be used within the hydroponic system. Based on this, we will design a schematic connection and a printed circuit board (PCB) for the system.

After designing the hardware, the implementation follows, along with bringing the designed modules to life. At this stage, it is necessary to program the individual modules so that they are able to communicate and process data.

An important step is the design of communication with the web interface, which will enable data reading and system control. In this way, it will be possible to monitor the hydroponic system remotely.

At the conclusion of the work, we verify the overall functionality of the system and compare it with existing commercial solutions available on the market.

KEYWORDS

Hydroponics, Smart Hydroponic System, Automation, ESP32, Printed Circuit Board, IoT, MQTT, Hardware, Software, Node-Red.

SEČ, Filip. *Chytrý hydroponický systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 87 s. Semestrální práce. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Beneš

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Filip Seč
VUT ID autora: 230656
Typ práce: Semestrální práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Chytrý hydroponický systém

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

POĎAKOVANIE

Rád by som úprimne poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Lukášovi Benešovi, za jeho cenné rady, pripomienky, odborné vedenie, príjemný prístup a ochotu počas celého vedenia práce.

Vďaka patrí aj mojim najbližším, ktorý pri mne stáli a podporovali ma v tomto náročnom čase.

Obsah

Úvod	16
1 HYDROPÓNIA	17
1.1 História	17
1.2 Výhody a nevýhody hydroponie	18
1.3 Hydroponické systémy	19
1.3.1 Pasívny systém (Wick system)	19
1.3.2 Zaplavenie a odvodnenie (Flood and Drain / Ebb and Flow)	19
1.3.3 NFT: Metóda živnej vrstvy	20
1.3.4 Vodná kultúra	20
1.3.5 Drip system: Kvapková závlaha	20
1.3.6 Aeropónia	21
1.4 Pestovateľské Substráty	22
1.4.1 Rockwool	23
1.4.2 Expandované ílové granuláty (keramzit)	23
1.4.3 Kokosové vlákno	23
1.4.4 Perlit	24
1.4.5 Rašelinový mach	24
1.5 Živný roztok	25
1.5.1 Voda	25
1.5.2 Živiny	27
1.6 Koncept a funkcia hydroponického systému	28
2 HARDVÉR	30
2.1 Mikrokontrolér (MCU)	30
2.1.1 RP2040	30
2.1.2 ESP8266	31
2.1.3 ESP32	33
2.1.4 STM32	34
2.2 Výber mikrokontroléru	35
2.3 Senzory	36
2.3.1 Snímač vzduchu	37
2.3.2 Snímač svetla	38
2.3.3 Senzor pH	38
2.3.4 Senzor EC	40
2.4 Aktuátory	41
2.4.1 Peristaltické čerpadlo	42

2.4.2	Vodné čerpadlo	42
2.4.3	Solenoidové ventily	43
2.4.4	Krokové motory	43
2.4.5	DC motory	44
2.5	Dizajn hardvéru	44
2.5.1	Bloková schéma hardvéru a jeho opis	44
2.5.2	Podsystem napájania	44
2.5.3	Podsystem periférie	46
2.5.4	Príklad ovládania pre peristaltické pumpy	46
2.5.5	Riadiaci podsystem	47
2.5.6	Podsystem EC a pH sondy	50
2.5.7	Konektory pre senzory teploty a vlhkosti vzduchu	52
2.6	Druhý návrh prototypu pre automatizovaný hydroponický systém	53
2.6.1	Napájacia časť obvodu	53
2.6.2	Ovládanie pre solenoidové ventily	56
2.6.3	Ovládanie pre peristaltické pumpy	57
2.6.4	Ovládanie pre pumpy s monitorovaním prúdu	58
2.6.5	Mikrokontrolér a logické výstupy	59
2.7	Porovnanie návrhov	60
2.8	Návrh dosky plošných spojov	61
3	NÁVRH SOFTVÉRU A TECHNOLOGIÍ	66
3.1	Systémová architektúra internetu vecí	66
3.1.1	Sietový zásobník IoT	67
3.1.2	Komunikačné modely pre IoT	69
3.1.3	MQTT	70
3.1.4	Programovací jazyk C	71
3.1.5	Programovací jazyk Python	71
3.2	Programovanie jednotlivých modulov	72
3.3	Zber a spracovanie dát	74
4	Návrh ochrannej a montážnej skrinky	75
5	Zhodnotenie a porovnanie funkčnosti zariadenia	77
5.1	Zhodnotenie systému	77
5.2	Porovnanie systému s dostupnými riešeniami na trhu	77
6	ZÁVER	79
	Literatúra	82

Zoznam obrázkov

1.1	Pôda v porovnaní s hydroponiou[6]	18
1.2	Hydroponické systémy[10]	22
1.3	Substráty, ktoré možno použiť v bezpôdnych systémoch.	25
1.4	Návrh hydroponického systému.	28
1.5	Diagram zobrazuje vzťahy medzi systémom a jeho okolím. Cieľom je poskytnúť prehľad o tom, ako systém komunikuje so svojim okolím a aké sú tieto vzťahy.	29
2.1	Rozloženie pinov pre mikrokontrolér RP2040, ktorý je v puzdre QFN-56[16]	31
2.2	Rozloženie pinov pre mikrokontrolér ESP8266, ktorý je v puzdre QFN-32[22]	32
2.3	Rozloženie pinov pre mikrokontrolér ESP32, ktorý je v puzdre QFN-39[18]	33
2.4	Rozloženie pinov pre mikrokontrolér STM32, ktorý je v puzdre QFN-36[19]	34
2.5	Porovnanie mikrokontrolérov RP2040, ESP8266, ESP32 a STM32	35
2.6	Príklad komunikácie senzoru DHT22 s MCU [20].	37
2.7	Blokový diagram senzoru BH1750[21]	38
2.8	Principiálna schéma pH sondy	39
2.9	EC sonda využitá v projekte	42
2.10	Hlava peristaltickej pumpy[25].	43
2.11	Principiálna schéma prvej verzie napájacieho modulu	45
2.12	Príklad ovládania pre solenoidové ventily	46
2.13	Obojsmerný tranzistorový spínač pre krokové motory	47
2.14	Príklad H-mostíka	47
2.15	FTDI ovládač	48
2.16	Príklad pripojenia pre ESP32	49
2.17	Príklad mikrokontroléru ESP32 s logickými výstupmi a dekodérom.	49
2.18	Príklad signálového zosilňovača	50
2.19	Príklad obvodu pre EC sondu	51
2.20	Príklad pripojenia senzorov	52
2.21	Nová schéma zapojenia pre napájaciu časť.	54
2.22	Transformátorová a usmerňovacia časť obvodu.	55
2.23	Príklad schémy zapojenia pre ovládanie solenoidových ventilov	56
2.24	Príklad simulácie ovládacieho obvodu pre peristaltické pumpy v programe falstad.	58
2.25	Príklad schémy zapojenia pre ovládanie peristaltických púmp.	59

2.26	Príklad schémy zapojenia pre ovládanie púmp s monitorovaním prúdu	60
2.27	Stará a nová doska plošných spojov	61
2.28	Príklad rozostupu napájacej a signálovej trasy	62
2.29	Príklad viacbodového uzemnenia	63
2.30	Príklad lokálneho kondenzátora	64
3.1	Trojúrovňová architektúra IoT [35]	67
3.2	Protokoly sieťového zásobníka IoT [37]	68
3.3	Príklad komunikácie MQTT založenej na Publisher/Subscriber modeli	70
3.4	Diagram implementácie riadiaceho softvéru.	73
3.5	Schéma komunikácie medzi uzlami a modulmi.	74
3.6	Schéma komunikácie medzi uzlami a modulmi.	74
4.1	3D model krabičky.	76
4.2	3D model krytu pre krabičku.	76
5.1	Produkt HydroBot[45]	78

Zoznam tabuliek

Seznam výpisů

Úvod

Hydroponické pestovanie rastlín je moderná metóda pestovania rastlín, ktorá umožňuje pestovanie bez použitia tradičnej pôdy. V tomto inovatívnom systéme sa rastliny pestujú vo vodných roztokoch, ktoré obsahujú všetky potrebné živiny pre ich rast a vývoj. Hydroponické pestovanie reprezentuje efektívne využitie priestoru a minimalizáciu plytvania zdrojmi, čím významne prispieva k dosiahnutiu potravinovej bezpečnosti. Kontrolované prostredie poskytuje optimálne podmienky pre rast a vývoj rastlín, súčasne minimalizuje používanie chemikálií, čo vedie k vylepšeniu kvality plodín a zároveň redukuje negatívne dopady na životné prostredie. Hydroponické pestovanie predstavuje významný a perspektívny prístup v oblasti udržateľnej poľnohospodárskej výroby, ktorý efektívne adresuje narastajúce výzvy potravinovej produkcie v súlade s rastúcou svetovou populáciou.

Automatizácia hydroponického systému zlepšuje kontrolu a efektivitu pestovania rastlín. S presnejším monitorovaním a riadením parametrov ako teplota, vlhkosť a dodávka živín sa dosahuje optimálne prostredie pre rast. Automatizácia tiež znižuje manuálnu prácu, umožňuje diaľkový prístup a výrazne zvyšuje presnosť a pohodlie pri pestovaní.

1 HYDROPÓNIA

V roku 2021 žilo 55% svetovej populácie v mestských oblastiach, pričom sa očakáva, že toto číslo vzrastie do roku 2050 až o 13%. Ak sa tak stane, bude potrebné premeniť 593 miliónov hektárov pôdy na poľnohospodársku pôdu, aby sa uspokojili odhadované kalorické požiadavky populácie. Okrem toho zaznamenávame alarmujúci pokles hladiny podzemných vôd, menej pracovných síl a šírenie škodcov, čo predstavuje vážne hrozby [1]. Jedným z riešení týchto problémov je pestovanie rastlín pomocou hydroponie. Tá by zvýšila produkciu potravín pri využití menšieho množstva poľnohospodárskej pôdy, tiež umožňuje pestovať rastliny kdekoľvek na svete v akomkoľvek ročnom období, bez ohľadu na počasie, dostupnosti či kvality pôdy, a okrem toho je možné vďaka pokročilým technológiám znížiť spotrebu vody až o 70% [2].

Hydropónia je metóda pestovania rastlín bez pôdy, pri ktorej sú korene rastlín zavlažované živinovým roztokom. Táto metóda pestovania umožňuje rastlinám priamo absorbovať potrebné živiny z vody, čo vedie k rýchlejšiemu rastu a vyššej úrodnosti v porovnaní s tradičným pestovaním v pôde. Hoci sa môže zdať, že tento efektívny a ekologický spôsob pestovania je vynálezom modernej doby, má pomerne dlhú históriu, ktorá siaha až do starovekých civilizácií [1] [3].

1.1 História

Prvé zmienky o hydroponickom pestovaní sú spojené so starovekými civilizáciami, ako sú Babylón, Egypt a Čína. Tieto civilizácie už využívali metódy pestovania rastlín bez pôdy alebo v minimálnej pôde, čo predstavuje základy dnešnej hydroponie. Jedným z najznámejších príkladov starovekého hydroponického pestovania sú visuté záhrady Babylóna. Tieto záhrady boli postavené na terasách a využívali zavlažovací systém, ktorý privádzal vodu z rieky Eufrat. Visuté záhrady v Babylone patria medzi sedem divov starovekého sveta [4]. V starovekom Egypte sa pri pestovaní rastlín využívali metódy, ktoré sa dajú považovať za predchodcov hydroponie. Dôkazom o používaní hydroponie Egypťanmi sú maľby v chráme Deir el Bahari, ktoré ukazujú, že už pred 4000 rokmi sa Egypťania pokúšali prenášať a pestovať stromy vo veľkých kvetináčoch pomocou hydroponie [5]. Medzi prvé objavy novoveku, ktoré prispeli k objasneniu záhady pestovania rastlín vo vode bez prítomnosti zeminy sa zaraďuje objav Jana van Helmeta zo 16. storočia. Ten so svojim objavom dokázal, že rastliny prijímajú živiny z vody. Ďalšie pokusy dokázali nutnosť prítomnosti makro a mikro živín vo vodnom roztoku. Toto bol počiatok nutričného poľnohospodárstva. V nasledujúcich rokoch si vedecká obec uvedomila potenciál

nutrikultúry a v roku 1930 prišiel vedec W.F Gericke z Kalifornie s komerčným názvom, hydroponia. Slovo hydroponia pochádza z gréckeho spojenia dvoch slov: hydro („voda“) a ponos („práca“), čo doslova znamená „práca vody“ [3].

1.2 Výhody a nevýhody hydroponie

Pokiaľ nahradíme pôdu vodou pri pestovaní rastlín, zdá sa to byť len malou zmenou v porovnaní s tradičným pestovaním rastlín v pôde. Avšak táto zmena prináša významné výhody, ktoré sa prejavia v konečnom výsledku. Nahradením pôdy vodou dosiahneme vyššiu koncentráciu živín, čo vedie k zlepšenému rastu a výnosu. Pri pestovaní v pôde sú rastliny často vystavené vodnému stresu z dôvodu zlej štruktúry pôdy, slabšiemu spojeniu medzi rastlinou a pôdou, nízkou kapacitou zadržiavania vody. Ďalším problémom je neefektívne využívanie vody. Veľa vody sa stráca hlbokým presakovaním okolo rastliny a tiež odparovaním z povrchu pôdy. Tento problém nemusíme vôbec riešiť pri hydroponickom pestovaní. Rastlina nezažíva žiadny stres z nedostatku vody. Okrem iného nám tento prechod z pôdy do vody ponúka možnosť úplnej automatizácie systému spojenej so zníženými nákladmi na pracovnú silu[6].

Hydroponia nám poskytuje určitú mieru versatility, a to možnosťou indoorového pestovania. Neobmedzuje nás ročné obdobie ako pri pestovaní v exteriéri, kde sú rastliny závislé od prostredia v ktorom sa nachádzajú.

Pôda	Hydroponia
⊕ komplexnejšie množstvo živín, minerálnych látok a stopových prvkov	možnosť automatizácie ⊕
⊕ prospešné baktérie	minimum škodcov ⊕
⊕ nižšie prvotné náklady	menšia náročnosť na priestor ⊕
⊕ nedochádza k rýchlym chemickým zmenám	rýchlejší rast a väčšia odolnosť rastliny ⊕
⊖ dlhšie vegetačné obdobie	zložitosť a náročnosť na údržbu a prevádzku ⊖
⊖ znížený prístup kyslíka ku koreňom	vysoké vstupné náklady ⊖
⊖ obmedzená kontrola škodcov	závislosť na elektrickej energii spojená so zvýšenou spotrebou ⊖

Obr. 1.1: Pôda v porovnaní s hydroponiou[6]

1.3 Hydroponické systémy

Hydropónia nie je o zložitosti systému, ale práve o jeho jednoduchosti, čo predstavuje jednu z jeho najväčších výhod. Pri konštrukcii tohto systému sa treba zamerať na niekoľko základných atribútov: K nim patrí:

1. Podporný systém
2. Pestovateľské nádoby
3. Odtokové kanáliky
4. Hadičky na prívod živín
5. Zásobník na vodu
6. Čerpadlo

Jednotlivé časti je možné prepojiť viacerými spôsobmi. To je jedným z kritérií, na základe ktorých je možné rozdeliť hydroponické systémy do kategórií. Najčastejším delením je rozdelenie podľa stavebných prvkov a spôsobu, akým je dodávaná voda a živiny rastlinám[3].

V rámci našej práce postupne predstavujeme jednotlivé hydroponické systémy, ktoré sú kategorizované na základe týchto uvedených kritérií.

1.3.1 Pasívny systém (Wick system)

Toto je jedna z najlacnejších a zároveň najjednoduchších metód hydroponického pestovania. Nevyžaduje využitie čerpadla ani elektrickej energie. Pre tento systém postačuje aj jeden zásobník. V tomto systéme je rastlinný kontajner umiestnený na vrchu zásobníka s vodou a živinami. Rastlinné knôty, respektíve korene rastlín sú ponorené v živnom roztoku, z ktorého absorbujú potrebné živiny. Tie vyživujú a zvlhčujú rastlinné médium. Pestovateľské médium je potrebné pravidelne preplachovať, aby sa predišlo tvorbe rias alebo prebytočnému nahromadeniu minerálov [7].

1.3.2 Zaplavenie a odvodnenie (Flood and Drain / Ebb and Flow)

Tento typ je obľúbený u domácich pestovateľov. Médium, ktoré obsahuje korene sa zaplavuje v časových intervaloch. Prúd vody obohatenej o živiny zabezpečuje čerpadlo z hlavnej nádrže, ktorá je opäť umiestnená pod pestovateľským substrátom. Voda sa potom vracia do hlavnej nádrže cez gravitačné prepádové potrubie. Tento cyklus zavlažovania a odvodňovania sa opakuje pravidelne. Základný princíp spočíva v tom, že voda v nádrži je na rovnakej úrovni ako v pestovateľských nádobách. Keď voda v nárazovej nádrži dosiahne určitú úroveň, aktivuje sa čerpadlo. Tým sa voda vráti do hlavnej nádrže. Keď klesá voda v nádrži, klesá aj voda v pestovateľských

nádobách. Tento systém je o niečo nákladnejší, pretože je potrebných viac súčiastok. Jeho najväčšou nevýhodou je riziko prepletenia koreňovej sústavy [8].

1.3.3 NFT: Metóda živnej vrstvy

Metóda Nutrient Film Technique (NFT) je ideálne pre malé, rýchlo rastúce rastliny. Pestovateľské priehradky sú umiestnené na nádrži v ktorej sa nachádza voda obohatená o živiny. Čerpadlo prečerpáva vodu do samostatných rastových kanálikov. Skrz tieto kanáliky môže voda pretekať. Cez otvor prevísajú korene rastlín, ktoré sú uložené v košíku na zásobníku. V spodnej časti žliabku prúdi obohatená voda ku ktorej majú korene rastliny prístup. Táto voda sa čerpá nahor cez trubicu ku koncu rastového kanálika. Cez naklonený žlab prúdi voda, ktorá sa vracia odpadovou trubicou druhým koncom. Korene kapilaritou nasávajú živný roztok. Metóda je efektívna iba v prípade presného merania prietoku. Z dôvodu stálosti prietoku musí byť čerpadlo neustále činné. Pri tomto systéme sú korene viac vystavené pôsobeniu kvapaliny. Z uvedeného dôvodu je dôležité, aby boli monitorované hodnoty teploty a vlhkosti. Ak tak neurobíte, korene by mohli vyschnúť alebo sa zamokriť, čo by mohlo mať za následok stratu celej úrody [9].

1.3.4 Vodná kultúra

Vodná kultúra je jednou z metód hydroponického pestovania, ktorá sa vyznačuje jednoduchosťou a nízkymi počiatočnými nákladmi, vďaka čomu sa stala veľmi obľúbenou alternatívou v komerčnom poľnohospodárstve na veľkokapacitné použitie, ale aj u menších pestovateľov. Pri tejto metóde sa využíva jedna hlavná nádrž, v ktorej sú umiestnené rastliny spolu s vodou obsahujúcou živiny. Niektorí pestovatelia používajú vzájomne prepojené pestovateľské nádrže a voda medzi nimi cirkuluje. Vodná kultúra umožňuje priame a efektívne dodávanie živín koreňom rastlín, čím poskytuje optimálne podmienky pre ich rast a vývoj. Táto metóda tiež umožňuje jednoduchú kontrolu a úpravu parametrov ako pH a koncentrácia živín vo vodnom roztoku, čo umožňuje presné riadenie a optimalizáciu životného prostredia pre rastliny[3].



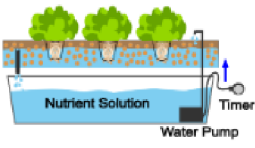
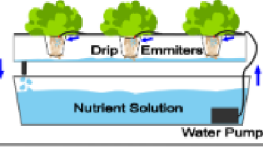
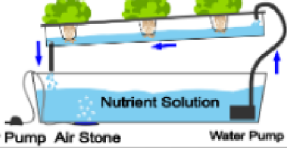
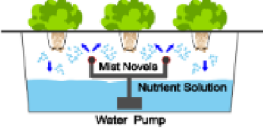
1.3.5 Drip system: Kvapková závlaha

Drip systém je jednou z najpoužívanejších hydroponických metód, ktorá ponúka efektívne dodávanie vody a živín na korene rastlín. Voda so živinami pomaly kvapká na korene rastliny, ktoré sa nachádzajú v pestovateľských vaničkách. Práve preto je vhodný pre rastliny s väčšou koreňovou sústavou a často sa využíva v horúcich podnebiach s obmedzeným zásobovaním vodou. Umožňuje presné kvapkanie vody a

živín na korene rastlín v rastlinných vaničkách. Pomalý tok kvapiek umožňuje presné dávkovanie, čo je veľmi dôležité pre optimálny rast a vývoj rastlín. Drip systém tak minimalizuje plytvanie vody a umožňuje individuálne prispôsobenie dávok vody a živín pre každú rastlinu. Tento systém vyžaduje dve nádrže. Prvá z nádrží slúži k vhodnému umiestneniu koreňov rastlín na pestovateľskom médiu. Druhá z nádrží obsahuje čerpadlá s živným roztokom. Je potrebné aby boli prítomne aspoň dve čerpadlá. Jedno slúži k čerpaniu vody bohatej na živiny a druhé prevzdušňuje vodu [3].

1.3.6 Aeropónia

Aeroponika je moderný hydroponický systém, ktorý sa v posledných rokoch stal populárnym v oblasti vertikálneho poľnohospodárstva. Tento systém je založený na pestovaní rastlín vo vzduchu bez použitia pôdy. Korene rastlín nie sú vo vode, ale prevísajú do vzduchu, ktorý je bohatý na kyslík. Kľúčovým prvkom aeroponického systému je pestovateľská nádrž, ktorá obsahuje vodu s živinami a čerpadlo. Toto čerpadlo postrekuje korene rastlín malými dávkami živinového roztoku. Nádrž musí byť správne nastavená, aby udržiavala optimálnu vlhkosť a zabezpečovala neustály prísun čerstvého kyslíka pre korene. Je tiež dôležité, aby nádrž bola vzduchotesná, aby sa zabránilo vniknutiu škodcov. Dodávka elektrickej energie je tiež kľúčová, pretože v prípade výpadku môžu obnažené korene rýchlo vyschnúť. Spôsob postreku možno nastaviť rôznymi spôsobmi. Každý systém bude meniť veľkosť kvapiek v postreku na základe voľby čerpadla. Môže sa jednať o vysokotlakové alebo nízkotlakové čerpadlo. Čím vyšší tlak, tým väčšie kvapôčky. Najmenšie kvapôčky poskytuje mlhovač [9].

Zložitosť	Hydroponický systém	Výhody	Nevýhody
Wick systém		<ul style="list-style-type: none"> • Cenovo dostupné • Nízka údržba • Žiadne čerpadlo na živiny 	<ul style="list-style-type: none"> • Obmedzený prístup kyslíka • Pomalší rast • Žiadna recirkulácia živín • Náchylnosť na rast rias
Deep water culture		<ul style="list-style-type: none"> • Najlacnejší z aktívnych systémov • Jednoduché nastavenie • Žiadne čerpadlo na živiny • Spoľahlivý 	<ul style="list-style-type: none"> • Riziko hniloby koreňov • Pomalší rast • Hladina vodného roztoku musí byť v súlade s dĺžkou koreňov • Musí sa často dopĺňať zásobník
Ebb and flow		<ul style="list-style-type: none"> • Cenovo dostupné • Nenáročná údržba • Prebytočný živný roztok recirkuluje 	<ul style="list-style-type: none"> • Náchylnosť na rast rias • Technické poruchy môžu viesť k strate úrody
Drip method		<ul style="list-style-type: none"> • Prebytočný živný roztok recirkuluje • Dostatočný prítok kyslíka 	<ul style="list-style-type: none"> • Náchylnosť na upchávanie • Náchylnosť na rast rias • Vyžaduje pravidelné čistenie
Nutrient-Film technique		<ul style="list-style-type: none"> • Prebytočný živný roztok recirkuluje • Dostatočný prítok kyslíka • Efektívne využitie priestoru 	<ul style="list-style-type: none"> • Náročnejšie monitorovanie • Technické poruchy môžu mať za následok stratu úrody
Aeroponics		<ul style="list-style-type: none"> • Maximálna absorpcia živín • Prebytočný živný roztok recirkuluje • Dostatočný tok kyslíka • Priestorovo efektívne 	<ul style="list-style-type: none"> • Náchylnosť na upchávanie • Technické poruchy môžu mať za následok stratu úrody • Nevýhnutnosť špičkovej technológie • Časová náročnosť • Nevhodné pre husté živiny a prísady na organickej báze

Obr. 1.2: Hydroponické systémy[10]

1.4 Pestovateľské Substráty

Aj keď rastliny rastú v košíčkoch zo sieťoviny, potrebujú podporu na udržanie svojej váhy, ktorú poskytuje pestovateľský substrát. Pestovateľské substráty, ktoré sú k dispozícii v širokom spektre od inertných po biologicky odbúrateľné a od prírodných po syntetické, slúžia na podporu rastu koreňov a udržanie rastliny na mieste. Pre správne fungovanie je dôležité, aby vhodné médium malo správne fyzikálne vlastnosti, ako je hustota a priepustnosť, ktoré umožnia zadržiavať a odvádzať vodu [3].

1.4.1 Rockwool

Rockwool, respektíve kamenná vlna je materiál používaný v hydroponickom pestovaní ako pestovateľské médium pre rastliny. Je to umelý substrát, ktorý sa vyrába z bazaltovej horniny (stuhnutej lávy), ktorá sa skvapalňuje pri teplote 1500 °C a potom sa vytláča do vlákien. Výsledkom je teda vláknitá hmota, ktorá je mierne alkalická, ale inertná a nerozkladá sa. S 95% podielom pórov má dobrú schopnosť zadržiavať vodu. Musí sa upraviť pH v rozmedzí 7 až 8,5 pred výsevom alebo výsadbou nasýtením kyslým živným roztokom, aby sa dosiahlo optimálne pH. Kamenná vlna na hydroponiu nie je rovnaká ako tá, ktorá sa používa ako izolačný materiál. Je hustejšia a kompaktnjšia. Rockwool je cenovo dostupné a ľahko zaobstarateľné hydroponické pestovateľské médium s dlhou životnosťou. Je chemicky inertné, a teda neovplyvňuje pH vodného roztoku ani obsah živín. Je to vynikajúce médium pre systém Ebb and Flow. Hoci ide o veľmi obľúbené a štandardné médium používané v hydroponii, v posledných rokoch došlo k poklesu jeho používania najmä z dôvodu obáv o životné prostredie. Ďalším dôvodom je dráždenie pokožky a pľúc [11].

1.4.2 Expandované ílové granuláty (keramzit)

Ďalším pestovateľským médium je keramzit. Ľahkosť a vysoká pórovitosť tohto expandovaného ílového kameniva ho robí extrémne vhodným substrátom pre hydroponické systémy. Výroba tohto kameniva sa uskutočňuje pomocou expandácie ílových granúl, čo zvyšuje jeho objem a vytvára otvory na povrchu, ktoré umožňujú vode prenikať a zadržiavať sa v pórovitom substráte. Tieto substráty majú neutrálnu pH a je ich možné opakovane používať. Je najčastejšie používaný v domácich hydroponických systémoch a je najvhodnejšie pre rastliny s kliešťovými koreňmi. Jeho výhodou je aj schopnosť rýchleho schnutia, čo umožňuje krátke prestávky počas zavlažovacieho cyklu, čím znižuje závislosť od čerpadiel a umožňuje nepretržitú prevádzku. Ďalšou výhodou je nízka vstrebávanosť iónov zo živného roztoku. Medzi nevýhody tohto substrátu patrí jeho potenciálne zvýšenie pH roztoku. Keramzit je flexibilný, univerzálny a chemicky inertný, čo umožňuje presnejšiu kontrolu nad živinovým prostredím pre rastliny a jeho trvalosť a opakovateľná použiteľnosť prispievajú k udržateľnosti v hydroponických systémoch [3] [14].

1.4.3 Kokosové vlákno

Kokosové vlákno je materiál získaný zo škrupiny kokosového orecha s vynikajúcou pórovitosťou a vzdušnosťou. Je populárne pretože má schopnosť udržiavať optimálnu

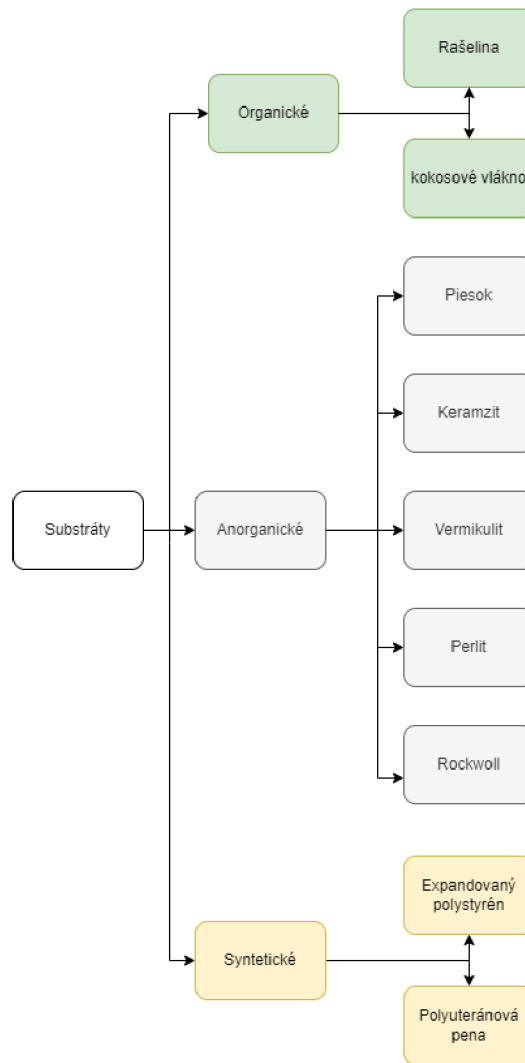
vlhkosť, umožňuje pohyb vzduchu koreňmi a ponúka dostatočnú podporu pre rastliny. V súčasnosti sa tento substrát považuje za hlavný substrát využívaný v skleníkoch, predovšetkým vďaka tomu, že ide o udržateľnú poľnohospodársku technológiu. Jeho to prírodné a obnoviteľné médium, ktoré má neutrálnu pH, čo znamená, že nemá výrazný vplyv na pH roztoku ani obsah živín. To umožňuje pestovateľom lepšiu kontrolu nad živinovým prostredím a presnejšiu manipuláciu s pH hladinami. Existuje však aj niekoľko nevýhod. Kokosové vlákno sa časom môže znižovať a strácať objem. Je nevyhnutné často dodávať živiny vo forme živného roztoku, pretože samo neobsahuje veľa živín pre rastliny. Okrem toho, ak sa kokosové vlákno príliš dlho udržiava vo veľmi vlhkom prostredí, môže sa stať náchylným na rast plesní [15].

1.4.4 Perlit

Perlit je spoľahlivý pestovateľský substrát často používaný v hydroponickom záhradníctve. Vzniká z vulkanických hornín, ktoré sú expandované pri vysokých teplotách. Jeho pórovitá štruktúra poskytuje vynikajúcu odvodňovaciu schopnosť a zároveň udržiava primeranú vlhkosť pre rast koreňov rastlín. Táto vlastnosť perlitu prispieva k prevencii prebytočnej vlhky a hnitia koreňov. Je veľmi ľahký a neobsahuje choroboplodné zárodky vďaka procesu zahrievania pri vysokých teplotách. Hrubšie častice v rozmedzí 2 až 3 mm sú pre hydroponiu najlepšie, pretože nezadržiavajú vodu. Perlit neobsahuje žiadne živiny a má pH 6,0 - 8,0 [12].

1.4.5 Rašelinový mach

Rašelinový mach je substrát, ktorý pozostáva z bahenného rastlinstva v čiastočnom rozklade. Tieto rastliny dokážu prosperovať vo vlhkých prostrediach s nízkym obsahom živín. Jeho pH sa pohybuje v rozmedzí 4,0 až 4,5. To predstavuje kyslé prostredie, ktoré je neprijateľné pre väčšinu rastlín. Rašelinový mach má vysokú schopnosť zadržiavať vodu, čo je jednou z jeho hlavných výhod. Ďalšou výhodou tohto rastového média je schopnosť uvoľňovať vodu len vtedy, keď ju rastliny potrebujú, čím sa zabraňuje vyplavovaniu živín a chráni sa pôda pred stvrdnutím. Na druhej strane, nevýhodou je príliš veľká absorpcia živného roztoku [3].



Obr. 1.3: Substráty, ktoré možno použiť v bezpôdnych systémoch.

1.5 Živný roztok

V tejto časti uvediem základné informácie o živnom roztoku, ktorý je súčasťou hydroponického systému. Následne sa pozrieme zblízka na dôležité parametre vody, ktoré je nevyhnutné sledovať pri pestovaní rastlín metódou hydroponie. K týmto parametrom patrí pH, alkalita, tvrdosť a salinita. V závere rozoberiem živiny potrebné pre rast rastliny. Získané poznatky potom ďalej využijeme pri výbere parametrov, ktoré je vhodné monitorovať a automatizovať [13].

1.5.1 Voda

Voda má výnimočné vlastnosti, ktoré zabezpečujú život na zemi. K týmto vlastnostiam patrí zmena objemu z tuhého skupenstva na kvapalné, pričom v tuhom

skupenstve má voda väčší objem. Pre chemické reakcie je dôležité jej zloženie: H₂O, teda jeden atóm kyslíku a dva atómy vodíku. Atómy vodíku sú voľné viazané na kyslík čo zabezpečuje voľnú výmenu atómov s inými substanciami. K tomu dopomáha aj elektrický náboj vody. Ten sa tvorí vďaka rozdielnej veľkosti molekúl vody. Pri pestovaní výlučne vo vode je dôležité sledovať jej parametre ako sú: pH, alkalita, tvrdosť a salinita [3].

pH

Skratkou pH označujeme silu vodíku vo vode. Znamená to v akom pomere sú nabité častice vody. Dá sa povedať, že sa jedná o hojdačku kde na jednej strane je kladne nabitý vodík H⁺ a na druhej záporne nabitý hydroxid OH⁻. Ak sú v rovnováhe, tak je roztok neutrálny. V opačnom prípade je buď zásaditý alebo kyslý. Optimálne pH pre hydroponické pestovanie sa pohybuje v rozmedzí 5,5 až 6,5. Kontrola pH je dôležitá, pretože príliš nízke alebo príliš vysoké pH môže mať negatívny vplyv na dostupnosť živín pre rastliny. Regulácia pH sa často dosahuje použitím kyseliny fosforečnej alebo hydroxidu draselného. Dôležité je pravidelne monitorovať a prispôsobiť pH podľa potrieb rastlín a živného prostredia [3].

Alkalita

Alkalita je významným pojmom v chemickej analýze a monitorovaní kvality vody a roztokov. Jedným z dôležitých aspektov alkality je kyselinová neutralizačná kapacita, ktorá poskytuje informácie o množstve kyseliny potrebnej na dosiahnutie neutrálneho pH v roztoku. Kyselinová neutralizačná kapacita je meradlom stability pH a vyjadruje schopnosť látky alebo roztoku neutralizovať pridanú kyselinu. Pre jej stanovenie je potrebné poznať množstvo kyseliny, ktoré je potrebné pridať do roztoku, aby sa dosiahlo neutrálne pH [3].

Tvrdosť

Ióny vápnika a horčíka sú častice, ktoré sú zodpovedné za tvrdosť vody. Ich pomer tiež ovplyvňuje zvýšenie pH roztoku, ale neplatí tu priama úmera. Práve preto sa odporúča objednať si minerálnu analýzu vody. K zdravému rastu potrebujú rastliny veľké množstvo vápnika, avšak jeho množstvom by sme sa mali začať zaoberať až pri extrémnych hodnotách. V takom prípade sa neodporúča použiť zmäkčovadlo, pretože len vymeníme vápnik za draslík čo je oveľa horšie riešenie. Ďalšou zásadou je využívanie prípravkov korešpondujúcich s množstvom vápnika vo vode. Vyššie zmienené parametre vody spolu do veľkej miery korelujú. Napríklad pridaním kyseliny do vody, zmeníme pH ale nie jej alkalitu [3].

Salinita

Salinita je miera obsahu soli v určitom prostredí, v našom prípade vo vode. Môže sa udávať buď v promile alebo elektrickou vodivosťou. Čistá voda nie je vodivá a tým pádom má nekonečný odpor. V momente kedy sa začnú vo vode rozpúšťať soli, dochádza k výmene elektrickej energie a voda sa stáva vodivou. Z toho vyplýva, že čím viacej soli sa vo vode rozpustí tým bude jej vodivosť väčšia. V praxi to nie je tak jednoduché, pretože nie všetky soli vedú elektrinu rovnako. Preto poznáme len približné množstvo rozpustených solí vo vode [3].

1.5.2 Živiny

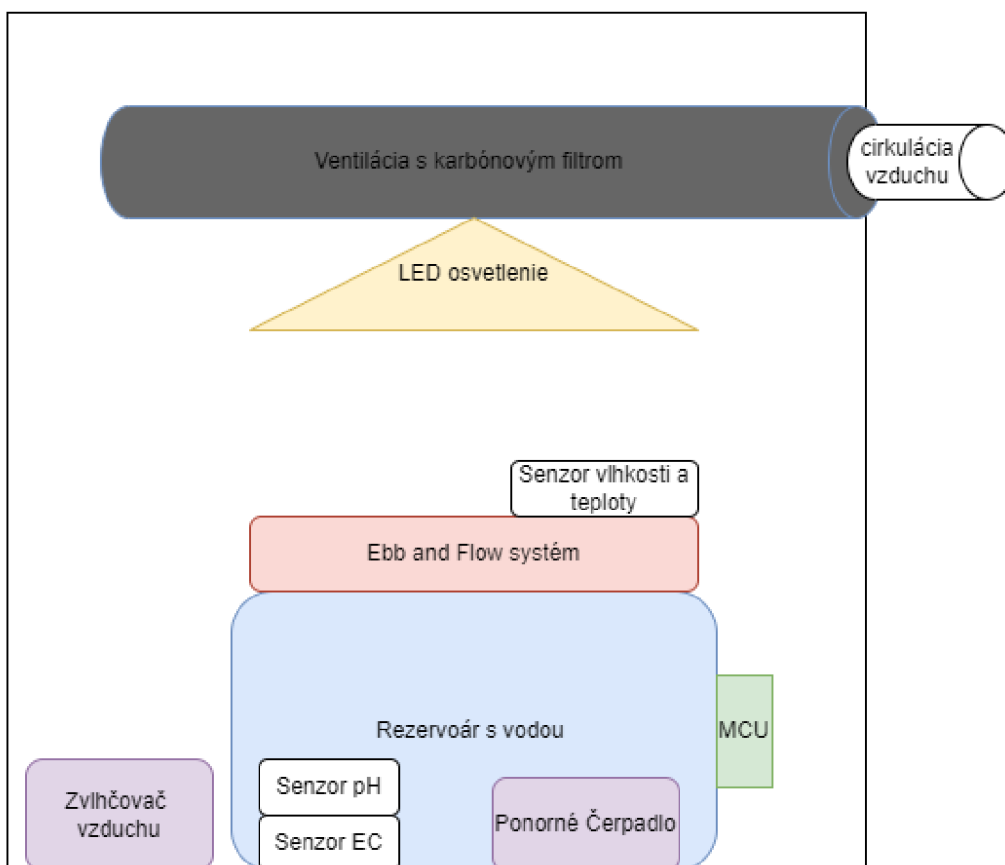
Pri hydroponických systémoch sa nevyužíva zemina a práve preto musia byť živiny pridávané do vody. Jedná sa hlavne o minerálne látky, ktoré rastlina bežne príma z pôdy. Výber týchto živín a ich správny pomer je kľúčový pre návrhu hydroponického systému. Rastliny potrebujú niekoľko základných prvkov, ktoré sú absorbované rastlinou skrz korene alebo cez póry na listoch. K najpotrebnejším prvkom patrí uhlík, kyslík a vodík. Je nevyhnutné ich monitorovať a vyvážiť. Ak tomu tak nie je, môže dôjsť k nedostatku oxidu uhličitého. Ďalšie prvky na pestovanie hydroponických rastlín, sú dusík, fosfor a draslík, ktoré sú obsiahnuté v živných zmesiach hnojív. Rovnováha týchto prvkov sa označuje aj ako N-P-K zmes. Medzi ďalšie dôležité prvky patria vápnik, horčík a síra. Prvky ako zinok, meď, bór, železo, molybdén, chlór, mangán, sú len zriedkavo deficitné [3].

Aby mali rastliny všetko, čo potrebujú, používa sa špeciálne hnojivo pre hydroponické pestovanie. Tieto hnojivá sú tvorené pre konkrétne plodiny, preto treba byť ostražitý pri výbere správneho hnojiva.

Hnojivá sú dostupné vo forme tekutých alebo granulovaných živných zmesí. Tekuté hnojivá majú ľahkú aplikáciu, zatiaľ čo granulované sú cenovo výhodnejšie a jednoduchšie skladovateľné. Zmesi hnojív sa ďalej delia podľa rastových štádií rastlín na vegetatívne a kvitnúce zmesi. Posledným parametrom pri výbere hnojiva je zdroj materiálu na jeho tvorbu. Existujú organické a syntetické hnojivá, pričom organické majú pomalšie uvoľňovanie živín a syntetické sa rýchlejšie rozpúšťajú. Organické hnojivá sú vhodné pre systémy s opakovaným použitím živného roztoku, ale majú nižšiu rozpustnosť a môžu spôsobiť upchatie systému. Syntetické hnojivá sa rýchlejšie uvoľňujú a častejšie sa používajú v hydroponických systémoch. Pri výbere hnojiva je dôležité dodržiavať odporúčané koncentrácie a rovnováhu minerálov, aby rastlina nedostávala nedostatok živín [3].

1.6 Koncept a funkcia hydroponického systému

V tejto časti práce sa detailne zameriame na návrh hydroponického systému a jeho funkčných komponentov. Návrh systému na obrázku 1.4 je umiestnený vo vnútri špeciálneho stanu určeného pre pestovanie rastlín, ktorý poskytuje optimálne podmienky pre ich rast a vývoj. Na základe informácií získaných z podkapitoly 1.3, ktorá sa zaoberá druhmi hydroponických systémov, sme sa rozhodli vytvoriť univerzálny automatizovaný systém, ktorý by dokázal spĺňať požiadavky väčšiny hydroponických systémov.

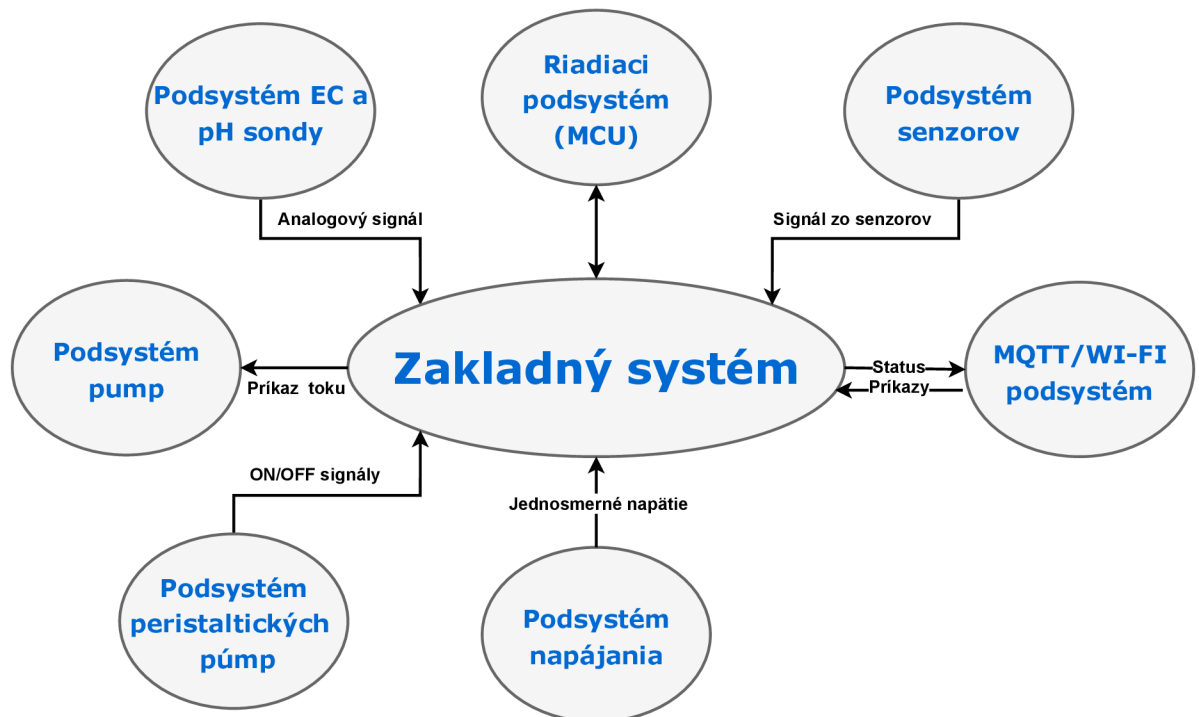


Obr. 1.4: Návrh hydroponického systému.

Systémové osvetlenie je riešené pomocou LED komplexu, ktorý je umiestnený mimo dosky ale nie je bezprostrednou súčasťou prevedenia nášho systému. V prípade použitia LED komplexu riadeného našim systémom, by ho bolo možné pripojiť na expander alebo digitálny pin nášho obvodu. V tomto návrhu je zahrnutý aj karbónový filter ktorý je umiestnený priamo na ventilačnom systéme spolu s LED osvetlením. Tento komplex je strategicky umiestnený na strope stanu nad rastlinami, čo zaisťuje optimálnu cirkuláciu vzduchu a rovnomerné rozloženie svetla.

Pri tomto systéme je voda z hlavného rezervoára prečerpávaná do nádrže pomocou integrovaného vodného čerpadla. Ďalšie cirkulovanie vody je zabezpečené odtokom nastaveným na úroveň rastlín, čo umožňuje efektívne využitie vody. Systém je navyše vybavený senzormi na pravidelné meranie EC a pH hodnôt. Tieto merania môžu byť vykonávané s rôznymi intervalmi, napríklad každých niekoľko minút až hodín. V prípade potreby je možné pomocou solenoidov pridávať vodu, hnojivo a kyselinu na udržanie požadovanej hladiny kvapaliny, EC a pH. Stan je ďalej vybavený senzorom vlhkosti a teploty typu DHT22. Okrem toho sme v tomto návrhu zahrnuli aj zvlhčovač vzduchu, ktorý prispieva k optimalizácii podmienok pre rast rastlín.

Jednotlivé súčasti návrhu systému sme rozdelili do viacerých podsystemov, ktoré tvoria základný systém. Toto rozdelenie môžeme vidieť na obrázku 1.5. K jednotlivým podsystemom sme v kapitole 2 pristupovali z hardvérového hľadiska a v kapitole 3 zase po softvérovej stránke.



Obr. 1.5: Diagram zobrazuje vzťahy medzi systémom a jeho okolím. Cieľom je poskytnúť prehľad o tom, ako systém komunikuje so svojím okolím a aké sú tieto vzťahy.

2 HARDVÉR

Táto kapitola opisuje hardvérovú časť projektu a poskytuje informácie o výbere komponentov pre jednotlivé podsystémy tvoriace systém ako aj ich implementáciu spojenú s návrhom DPS (Doska Plošných Spojov). Za týmto účelom sme využili programy určené k návrhu (KiCad) a simulácií (Falstad) obvodov. Súčasťou tejto kapitoly je aj opis výroby regulačnej časti napájania. V poslednej časti sa venujeme porovnaniu prvého a druhého prototypu z hľadiska funkčnosti a základným pravidlám pri návrhu DPS.

2.1 Mikrokontrolér (MCU)

Táto časť sa bude venovať jednočipovým a dvojčipovým počítačom (mikrokontrolérom), t. j. RP2040, ESP8266, ESP32 a STM32. Tieto mikrokontroléry boli vybrané kvôli ich oblube v komunite inžinierov, ich spoľahlivosti a dokumentácii. Ďalšou výhodou je, že sú pomerne lacné a jednoduché na používanie. Po uvedení podrobných informáciách o RP2040, ESP8266, ESP32 a STM32 a vysvetlení rozdielov medzi nimi sa budeme venovať dôvodom výberu konkrétneho mikrokontroléru pre našu prácu.

V tejto časti sa zameriame na špecifikácie mikrokontrolérov RP2040, ESP8266, ESP32 a STM32. Tieto mikrokontroléry boli vybrané na základe ich širokej oblube v technickej komunite, spoľahlivosti a dostupnosti kvalitnej dokumentácie. Okrem toho sú tieto mikrokontroléry cenovo dostupné a jednoduché na použitie, čo prispieva k ich atraktivite. Po detailnom prehľade a porovnaní jednotlivých charakteristík a funkcií mikrokontrolérov RP2040, ESP8266, ESP32 a STM32, sa budeme zaoberať argumentáciou pre výber konkrétneho mikrokontroléra určeného na realizáciu nášho projektu.

2.1.1 RP2040

RP2040 je výkonný mikrokontrolér od spoločnosti Raspberry Pi, ktorý je navrhnutý pre vývoj vstavaných systémov a IoT aplikácií.

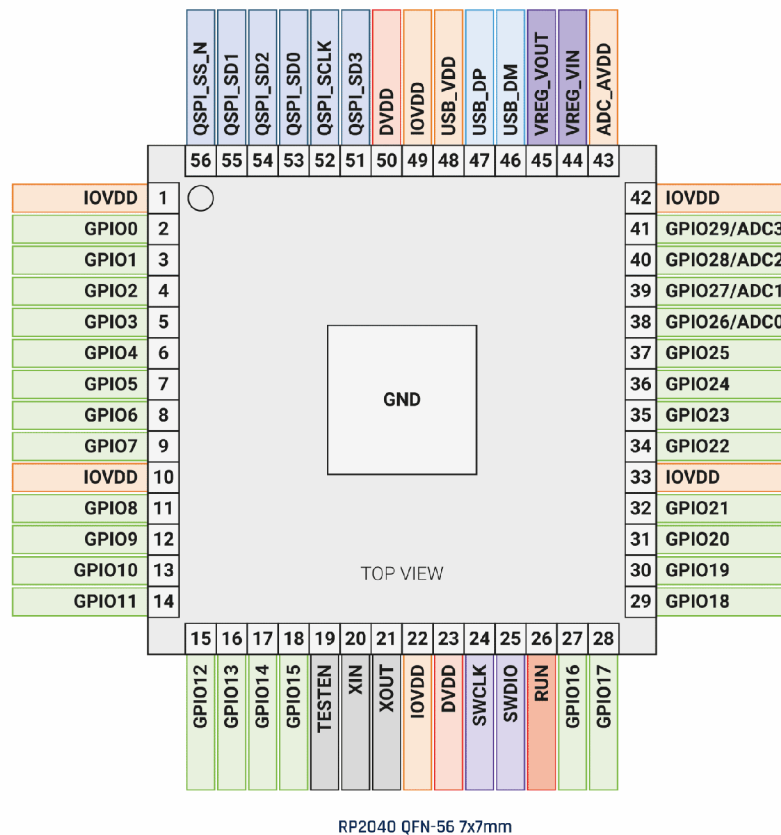
Jadro RP2040 je založené na dvojjadrovom 32-bitovom ARM Cortex-M0+ procesore, ktorý môže pracovať s taktovou frekvenciou až 133 MHz. Tento procesor je ideálny pre aplikácie, ktoré vyžadujú vysokú výkonnosť a nízku spotrebu energie.

RP2040 ponúka rozsiahle možnosti konektivity, vrátane UART, SPI a I2C rozhraní. Navyše, obsahuje až 26 všeobecne použiteľných I/O pinov, čo umožňuje ľahké pripojenie k rôznym perifériám.

Čo sa týka pamäte, RP2040 je vybavený 264 kB SRAM, čo je oveľa viac, než je bežné pre mikrokontroléry v tejto triede. Ďalej, tento mikrokontrolér podporuje až 16 MB externého flash úložiska.

RP2040 tiež zahŕňa ďalšie vlastnosti ako napríklad podporu pre USB 1.1, 4 kanály DMA a hardvérovú podporu pre realizáciu vlastných periférií pomocou PIO blokov.

Vďaka svojej výkonnosti, flexibilita a dostupnosti podpory, RP2040 je vhodný pre široké spektrum vývojových projektov, od jednoduchých vstavaných systémov až po pokročilé IoT zariadenia.



Obr. 2.1: Rozloženie pinov pre mikrokontrolér RP2040, ktorý je v puzdre QFN-56[16]

2.1.2 ESP8266

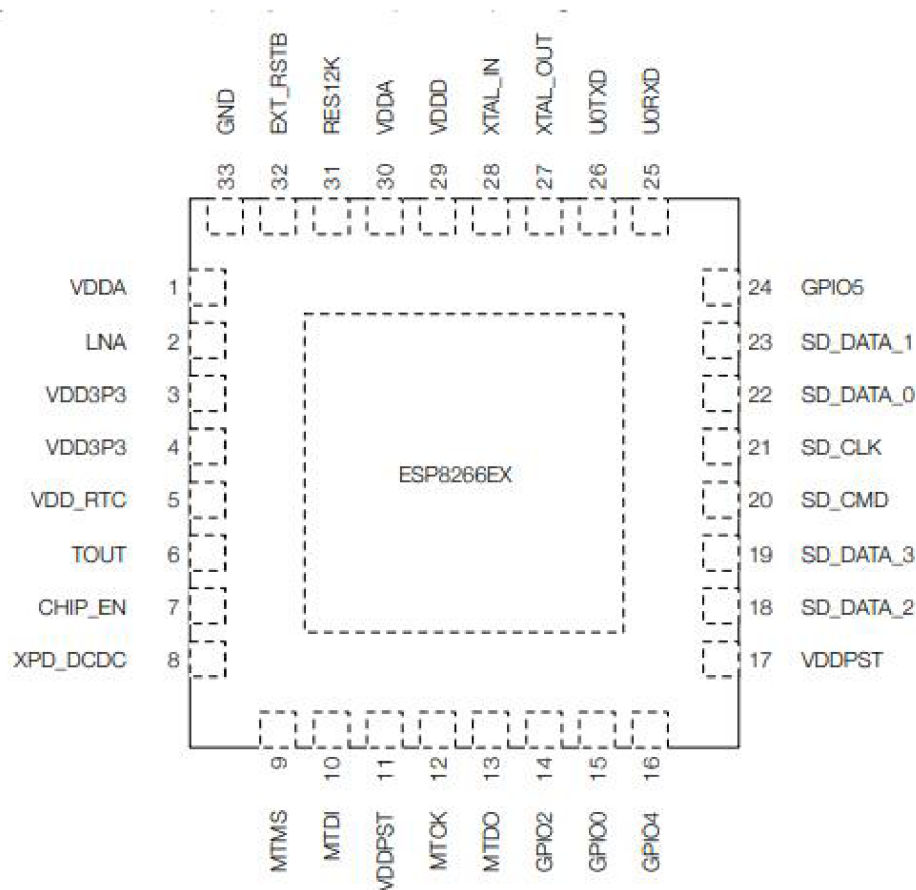
ESP8266 je vysoko výkonný mikročip od spoločnosti Espressif, ktorý je obzvlášť populárny v oblasti Internetu vecí (IoT) kvôli svojej integrovanej Wi-Fi konektivitě a nízkym nákladom.

Tento mikročip je postavený na Tensilica Xtensa LX106, 32-bitovom procesore, ktorý môže pracovať s taktovou frekvenciou až do 160 MHz.

Z hľadiska konektivity je ESP8266 vybavený integrovaným Wi-Fi modulom, ktorý podporuje štandard IEEE 802.11 b/g/n. Wi-Fi modul môže pracovať v rôznych režimoch, vrátane režimu prístupového bodu, stanice alebo oboch súčasne.

ESP8266 má integrovanú pamäť, ktorá zahŕňa 32 kB inštrukčnej pamäte pre cache, 80 kB pre dáta a 16 kB pre inštrukcie v SRAM. Okrem toho niektoré varianty ESP8266 obsahujú externú flash pamäť s veľkosťou až do 4 MB.

Ďalšie vlastnosti ESP8266 zahŕňajú PWM (pulzná šírková modulácia), I2C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface) rozhrania, rovnako ako ADC (Analog-to-Digital). Taktiež je možné programovať ESP8266 v rôznych vývojových prostrediach, vrátane Arduino IDE a NodeMCU.



Obr. 2.2: Rozloženie pinov pre mikrokontrolér ESP8266, ktorý je v puzdre QFN-32[22]

2.1.3 ESP32

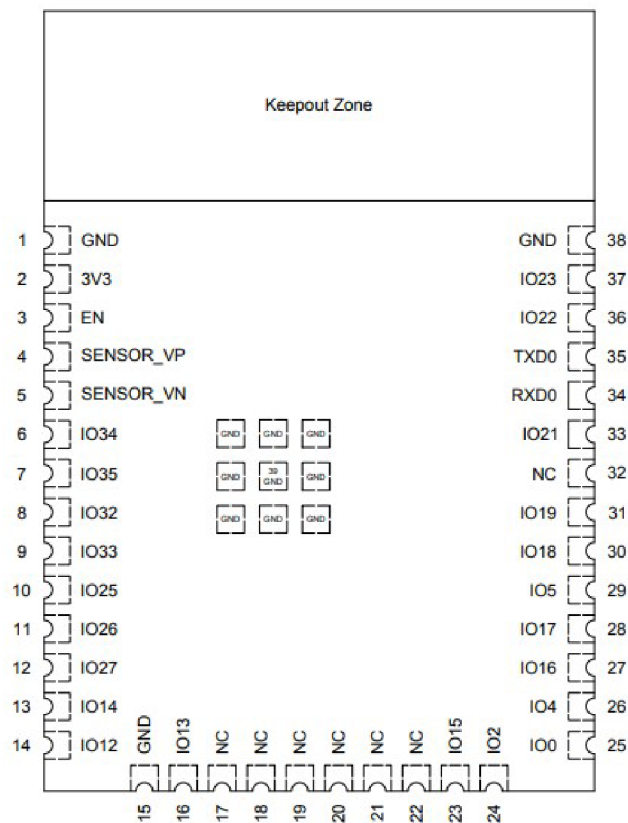
ESP32 je výkonný a cenovo dostupný mikroprocesor, ktorý vyniká svojou integráciou Wi-Fi a Bluetooth Low Energy (BLE) modulov. Jeho výkonný dvojjadrový procesor s frekvenciou až 240 MHz spolu s 48 všeobecne použiteľnými pinmi zaručujú široké spektrum použitia.

Wi-Fi modul v ESP32 je navrhnutý s podporou štandardu IEEE 802.11 a ponúka flexibilitu v režimoch prevádzky - ako prístupový bod, klient alebo hybridný režim ako prístupový bod a stanica. Procesor s 32-bitovou architektúrou pritom zabezpečuje vysokú výkonnosť systému.

Pokiaľ ide o pamäť, ESP32 je vybavený 512 kB SRAM a 448 kB ROM. Okrem toho podporuje aj externé flash úložisko s typickou kapacitou 4 MB.

Čo sa týka výstupov, všetky piny umožňujú generovanie PWM signálu. Ďalšou flexibilnou vlastnosťou je schopnosť softvérovo meniť piny pre SPI a I2C rozhrania.

Takýto komplexný a univerzálny mikroprocesor ako ESP32 sa stáva ideálnym riešením pre mnoho projektov v oblasti Internetu vecí (IoT) a inteligentných zariadení, ktoré vyžadujú spoľahlivú a výkonnú platformu s integrovanými bezdrôtovými komunikačnými modulmi.



Obr. 2.3: Rozloženie pinov pre mikrokontrolér ESP32, ktorý je v puzdre QFN-39[18]

2.1.4 STM32

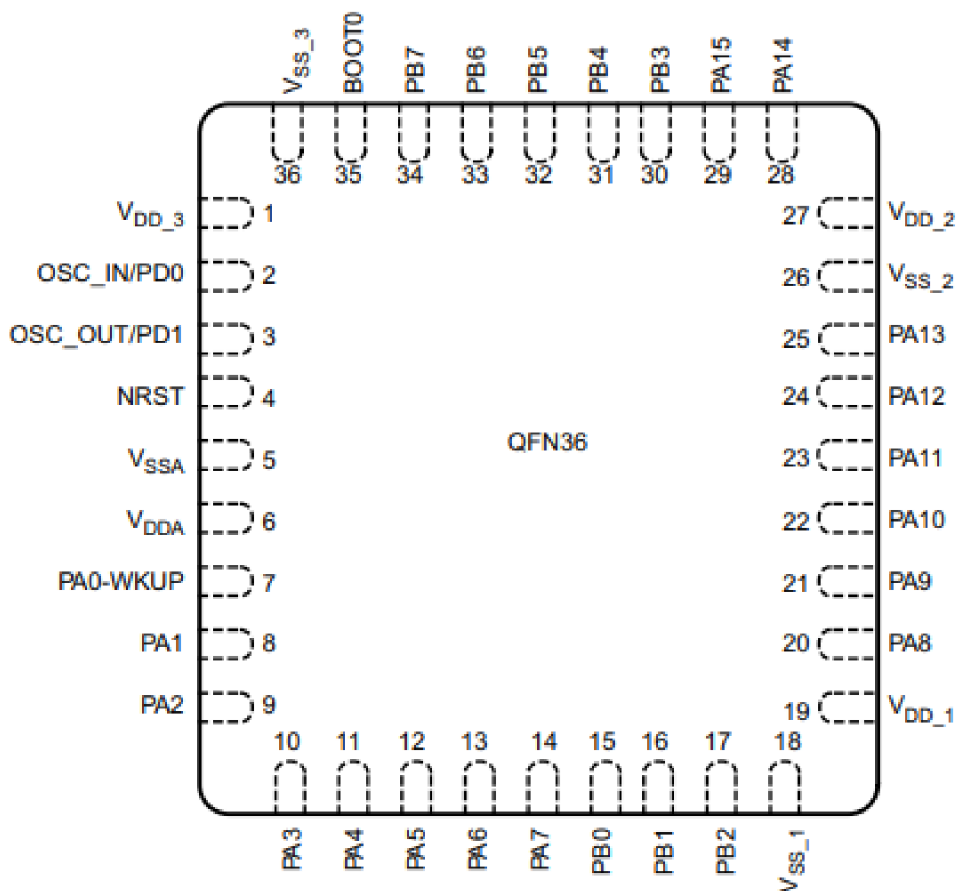
STM32 je rodina mikrokontrolérov od STMicroelectronics, postavená na 32-bitových ARM procesoroch. Tieto mikrokontroléry sú známe svojou efektívnosťou a flexibilitou, s rôznymi variantami prispôbenými pre rôzne aplikácie.

Jedným z hlavných výhod STM32 je jeho schopnosť pracovať pri taktových frekvenciách až do 480 MHz, v závislosti od modelu. Mikrokontroléry sú vybavené jedno alebo viacjadrovými procesormi.

STM32 poskytuje širokú škálu možností pripojenia vrátane SPI, I2C, UART a USB periférií. Niektoré modely tiež zahŕňajú bezdrôtové moduly ako Bluetooth a Wi-Fi.

Pokiaľ ide o pamäť, STM32 mikrokontroléry zvyčajne obsahujú integrovanú flash pamäť v rozsahu od 16 kB až do 2 MB a SRAM od 20 kB až do 1 MB, v závislosti od konkrétneho modelu. Niektoré modely tiež podporujú externé pamäťové rozhrania.

STMicroelectronics ponúka vývojové dosky a softvérové knižnice, ktoré uľahčujú vývoj a testovanie aplikácií pre STM32. Mikrokontroléry STM32 sú široko používané v rôznych aplikáciách, vrátane IoT, embedded systémov a priemyselných aplikácií.



Obr. 2.4: Rozloženie pinov pre mikrokontrolér STM32, ktorý je v puzdre QFN-36[19]

2.2 Výber mikrokontroléru

Funkcia	RP2040	ESP8266	ESP32	STM32 (rôzne)
Výrobca	Raspberry Pi	Espressif	Espressif	STMicroelectronics
CPU jadro	2x ARM Cortex-M0+	Tensilica Xtensa LX106	2x Tensilica Xtensa LX6	ARM Cortex-M0/M3/M4/M7 (rôzne)
Taktovej rýchlosti	Do 133 MHz	80 MHz (160 MHz pretaktovaný)	Do 240 MHz	Rôzne (do 480 MHz)
Flash pamäť	Externá (do 16 MB)	512 KB - 4 MB (externá)	448 KB (externá do 16 MB)	Rôzne (do 2 MB)
RAM	264 KB	96 KB (80 KB dostupných)	520 KB	Rôzne (do 1 MB)
GPIO piny	26	17	36	Rôzne (do 168)
ADC kanály	3	1 (10-bitový)	18 (12-bitový)	Rôzne (do 40)
Komunikačné rozhrania	UART, SPI, I2C, USB 1.1	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C, CAN, Ethernet, IrDA	UART, SPI, I2C, CAN, USB, Ethernet, IrDA, SDIO
Wi-Fi	Nie	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	Nie (k dispozícii prostredníctvom externých modulov)
Bluetooth	Nie	Nie	Bluetooth 4.2 / BLE	Nie (k dispozícii prostredníctvom externých modulov)
Napájacie napätie	1,8 - 5,5 V	3,0 - 3,6 V	2,7 - 3,6 V	Rôzne (1,8 - 5,5 V)
Prevádzková teplota	-40°C do 85°C	-40°C do 125°C	-40°C do 125°C	-40°C do 85°C (k dispozícii rozšírený rozsah)
Funkcie riadenia napájania	Napätový regulátor, programovateľné IO	Režimy spánku	Režimy spánku, detektor poklesu napätia	Režimy spánku, napätový regulátor, detektor poklesu napätia

Obr. 2.5: Porovnanie mikrokontrolérov RP2040, ESP8266, ESP32 a STM32

Samotné porovnávanie jednotlivých mikrokontrolérov v tabuľke nám poskytuje jasnejší obraz o ich špecifikáciách a vlastnostiach. Na základe tohto porovnania sme sa rozhodli použiť ESP32 v našom projekte automatizácie hydroponického systému.

ESP32 ponúka niekoľko výhod, ktoré ho robia ideálnym pre tento projekt. Jednou z týchto výhod je vysoký výkon a rýchlosť procesoru, ktorý je dvojjadrový a môže pracovať s taktovou frekvenciou až 240 MHz. Ďalšou výhodou je integrovaná podpora pre Wi-Fi a Bluetooth, čo umožňuje bezproblémové pripojenie k sieťovým zariadeniam a perifériám, ako sú senzory a akčné prvky.

V prípade našej práce, ESP32 poskytuje dostatočný počet výstupov a vstupov

na pripojenie rôznych senzorov a akčných prvkov, ktoré sú nevyhnutné pre riadenie hydroponického systému.

Okrem toho, ESP32 poskytuje aj možnosti pre priame pripojenie senzorov a meraní, ako sú pH sondy, elektrická vodivosť (EC) sondy, odporové senzory a senzory teploty a vlhkosti. Vzhľadom na to, že hydroponické pestovanie sa zameriava na udržiavanie riešenia na cieľovej EC a pH úrovni, tieto priame pripojenia zaručujú presnejšie a rýchlejšie merania a úpravu parametrov v porovnaní s použitím indikátorov alebo manuálnych metód.

Zhrnutie týchto výhod ESP32 nám umožňuje riadiť a monitorovať celý hydroponický systém a poskytuje široké možnosti pre pripojenie rôznych periférií a senzorov. To nám umožňuje získať údaje v reálnom čase a následne optimalizovať a automatizovať rast rastlín, čím zlepšíme kvalitu a výnos plodín. Okrem toho, vďaka integrovanej podpore pre Wi-Fi, možno ovládať tento systém z akéhokoľvek miesta a pomocou ľubovoľného zariadenia s pripojením na internet.

2.3 Sensory

V oblasti elektrotechniky je senzor definovaný ako zariadenie, ktoré sleduje a meria určité vlastnosti okolia a následne poskytuje informácie o týchto vlastnostiach v podobe elektrických výstupov, ako napríklad analógové alebo digitálne napätie alebo prúdový výstup. Pre hydroponické systémy sú k dispozícii rôzne typy senzorov a technológií, ktoré umožňujú meranie rôznych parametrov prostredia, ktoré sú kritické pre rast rastlín.

Pri výbere senzorov pre hydroponický systém je dôležité zvážiť požiadavky na meranie rôznych parametrov, ako sú pH, EC, teplota, vlhkosť a podobne. Medzi najbežnejšie technológie senzorov patrí meranie pH a EC pomocou iontových senzorov, meranie teploty pomocou termistorov alebo termopár a meranie vlhkosti pomocou kapacitných senzorov.

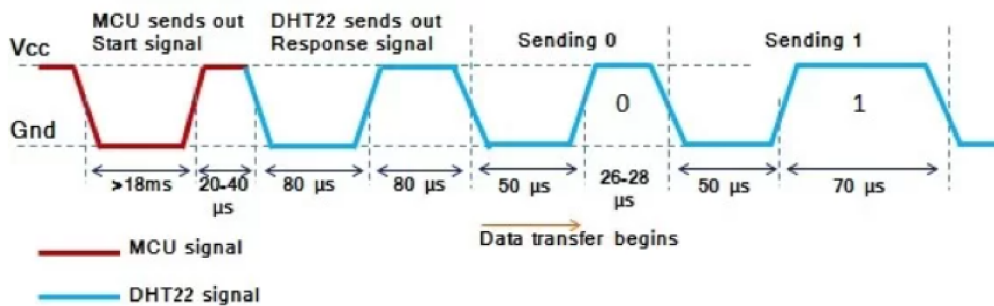
Okrem toho, je dôležité zvážiť aj rôzne typy metód prenosu údajov z environmentálnych senzorov. Na trhu sú k dispozícii rôzne typy senzorových rozhraní, ako sú I2C, SPI alebo UART, ktoré umožňujú prenos údajov do mikrokontroléra alebo iného zariadenia.

Výstup zo senzorov môže byť v rôznych formátoch, vrátane analógového napätia alebo prúdu, ako aj digitálnych signálov prostredníctvom rôznych rozhraní. Preto je dôležité zvoliť senzor, ktorý je kompatibilný s daným mikrokontrolérom a ktorý poskytuje požadovaný typ výstupu.

V rámci hydroponického systému je použitie senzorov kritické pre úspešný rast rastlín. Preto je potrebné dôkladne zvážiť výber senzorov a ich správne zapojenie do systému, aby sa zabezpečilo presné a spoľahlivé meranie parametrov prostredia.

2.3.1 Snímač vzduchu

DHT22, známy aj ako AM2302, je senzor teploty a vlhkosti. Komunikuje prostredníctvom jednoduchého jednovodičového protokolu, ktorý je špecifický pre tento senzor. Komunikácia medzi DHT22 a mikrokontrolérom (MCU) sa skladá z dvoch častí - signálu inicializácie od MCU a odozvy od DHT22. Priebeh tejto komunikácie, môžeme vidieť na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Príklad komunikácie senzoru DHT22 s MCU [20].

Signál inicializácie MCU: Na začiatku komunikácie MCU generuje úvodný signál a nastaví dátový pin na nízku úroveň (GND) na dobu najmenej 18 milisekúnd. Potom MCU nastaví dátový pin naspäť na vysokú úroveň (VCC), a potom čaká na odozvu od DHT22. Prechod z nízkej na vysokú úroveň trvá od 20 do 40 mikrosekúnd.

Odozva DHT22: Po obdržaní signálu inicializácie DHT22 odpovie signálom potvrdenia. Začne nízkou úrovňou, ktorá trvá 80 mikrosekúnd, potom vysokou úrovňou, ktorá tiež trvá 80 mikrosekúnd. Po signále potvrdenia DHT22 začne vysielat dáta.

Dáta sú vysielané vo forme 40 bitov: prvých 16 bitov predstavuje meranú vlhkosť, nasledujúcich 16 bitov predstavuje meranú teplotu a posledných 8 bitov je kontrolný súčet pre overenie správnosti dát.

Pre každý z týchto bitov je definovaná doba, počas ktorej je dátový pin na vysokej úrovni. Nízka úroveň pred každým bitom trvá 50 mikrosekúnd, ale vysoká úroveň sa líši: pre logickú 0 je to približne 26-28 mikrosekúnd, pre logickú 1 je to približne 70 mikrosekúnd.

Ukončenie komunikácie: Po prenose 40 bitov dát senzor DHT22 nastaví dátový pin na nízku úroveň na 50 mikrosekúnd a potom ho vráti na vysokú úroveň. Ak MCU chce čítať ďalšie dáta, musí zopakovať celý proces inicializácie.

VCC je napájací pin a je pripojený k napájaniu (3-5 V), GND je uzemňovací pin

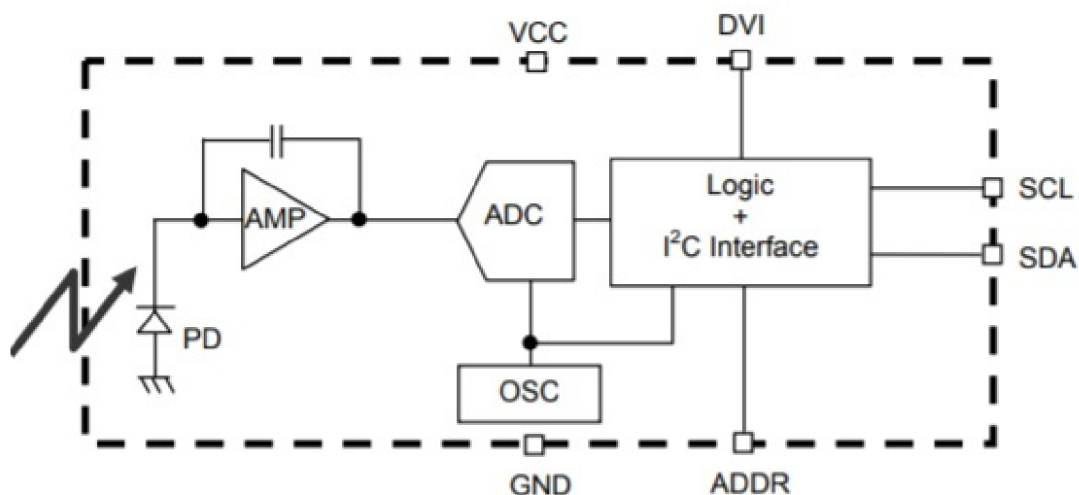
a je pripojený k zemi. Dátový pin je pripojený k jednému z digitálnych pinov MCU, ktorý podporuje vstupný/výstupný mód [20].

2.3.2 Snímač svetla

BH1750 je digitálny snímač okolitého svetla, ktorý využíva fotodiódu na snímanie svetla a jeho premenu na elektrickú energiu. Je ľahko prepojitelný s mikrokontrolérom pomocou komunikačného protokolu I²C a spotrebúva veľmi málo prúdu. Opamp v senzore prevádza prúd z fotodiódy na napätie a ADC sa používa na prevod analógových hodnôt na digitálne hodnoty LUX.

Senzor má tri režimy merania a dokáže zapisovať intenzitu svetla na škále od 0 do 65535. Má malú odchýlku merania a pracuje v širokom rozsahu teplôt. Snímač je k dispozícii ako 5-pinový integrovaný obvod a vyžaduje napájanie 2,4 V - 3,6 V.

Okrem toho senzor BH1750 nezávisí na zdroji svetla a má funkciu filtrácie šumu. Vzhľadom na svoje malé rozmery a jednoduché pripojenie je to ideálny senzor pre monitorovanie intenzity svetla v aplikáciách hydroponie[21].

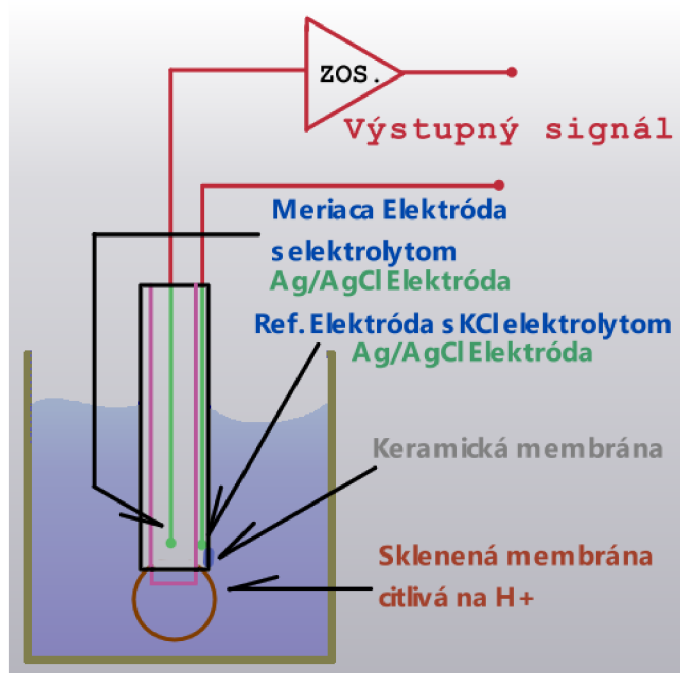


Obr. 2.7: Blokový diagram senzoru BH1750[21]

2.3.3 Senzor pH

Mieru koncentrácie vodíkových iónov v tekutine reprezentuje pH (power of hydrogen). Najbežnejšou metódou merania pH je potenciometrické meranie pH pomocou senzorov. Tieto senzory fungujú tak, že vytvárajú elektrické napätie, ktoré je úmerné

koncentracii vodíkových iónov v kvapaline. Ako je možné vidieť na obrázku 2.8 tak senzory pH majú dve základné súčasti: pH citlivú elektródu a referenčnú elektródu.



Obr. 2.8: Principiálna schéma pH sondy

Obe elektródy pozostávajú z kovového drôtu zaveseného v stabilnom neutrálnom roztoku elektrolytu. Referenčná elektróda udržiava stabilné referenčné napätie a uzatvára elektrický obvod s pH citlivou elektródou tým, že umožňuje malému množstvu iónov prúdiť z roztoku referenčného elektrolytu do procesnej kvapaliny cez malý pórovitý otvor nazývaný referenčný spoj. Ph citlivá elektróda má na svojom hrote malú banku, ktorá je vyrobená z pH citlivého skla. Elektrické napätie na banke sa mení v závislosti od koncentrácie vodíkových iónov v okolitej procesnej kvapaline. Ak je koncentrácia vodíkových iónov vyššia na vonkajšej strane sklenenej banky ako na vnútornej strane, vzniká kladné napätie, čo znamená, že proces je kyslý. Ak je koncentrácia vodíkových iónov na vonkajšej strane sklenenej banky nižšia ako na vnútornej strane, vzniká záporné napätie, čo znamená, že proces je zásaditý. Ak je koncentrácia vodíkových iónov rovnaká na každej strane sklenenej banky, napätie je nulové, čo znamená, že proces má neutrálne pH 7. Pomocou Nernstovej rovnice sme schopný vypočítať pH meranej kvapaliny z rozdielu napätí medzi pH citlivou elektródou a referenčnou elektródou.

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln(a) \quad [26] \quad (2.1)$$

Kde:

- E - elektrochemický potenciál
- E_0 - štandardný elektrochemický potenciál
- R - univerzálna plynová konštanta
- T - teplota v kelvinoch
- n - počet elektrónov prenesených počas reakcie
- F - Faradayova konštanta
- a - aktivita iónu v roztoku

Na základe vypočítaného elektrochemického potenciálu je možné vypočítať pH roztoku pomocou základnej rovnice pre pH:

$$pH = -\log [H^+] [26] \quad (2.2)$$

Kde $[H^+]$ je koncentrácia vodíkových iónov v roztoku.

Presnosť merania pH sondy je daná vyššie uvedenými špecifikáciami, pričom nulový bod je nastavený na hodnotu 7,0 pH. Reakcia pH sondy je rýchla, meranie prebieha v priebehu niekoľkých sekúnd až minút.

V našom prípade využívame na pripojenie pH sondy konektor BNC pripojený káblom dlhým 80 cm. Celková dĺžka sondy je 150 mm a priemer sondy je 12,5 mm.

Na správne meranie pH je dôležité pravidelne kalibrovať pH sondy pomocou štandardných kalibračných roztokov.

2.3.4 Senzor EC

Na meranie obsahu živín vo vodnom roztoku sa v systéme používa snímač elektrickej vodivosti (EC senzor). Elektrická vodivosť materiálu predstavuje schopnosť prenášať elektrický náboj. Jednotka SI pre elektrickú vodivosť je $[S/m]$ (siemens na meter). EC senzor nedisponuje schopnosťou merania obsahu jednotlivých živín v roztoku, ale zvyšujúca sa prítomnosť živín a minerálov vo vodnom roztoku zvyšuje schopnosť prenášať elektrický náboj, t. j. znižuje odpor. Vonkajšie elektródy sa použijú na meranie odporu vo vodnom roztoku, a tak sme schopný vypočítať EC. Aby sa zabránilo polarizácii kvapaliny, ktorá sa má merať, mal by sa použiť AC (striedavý prúd), aby sa získali čo najpresnejšie údaje. Pri rýchlom meraní je však možné pomocou DC (jednosmerného prúdu) vykonať toto meranie bez toho, aby mala polarizácia výrazný vplyv.

Vzťah EC kvapaliny a teploty má približne lineárny vzťah, pričom pri náraste teploty o jeden stupeň Celzia dochádza približne k 2 % nárastu EC. Obsah živín v roztoku je nemenný aj v prípade keď sa úroveň EC môže meniť v závislosti od teploty. Aby sme mohli definovať referenčný interval pre EC (vhodný pre konkrétnu

rastlinu) , vypočítame ekvivalent EC pri 25 °C. Ekvivalent EC sa vypočíta z:

$$EC_{25} = \frac{EC_t}{1 + a(t - 25)} \quad (2.3)$$

Kde:

- EC_{25} je hodnota elektrickej vodivosti pri teplote 25°C,
- EC_t je meraná hodnota elektrickej vodivosti pri teplote t ,
- a kompenzačný faktor, ktorý je bežne nastavený na $0.019\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,
- t je aktuálna teplota, pri ktorej je meraná hodnota elektrickej vodivosti [27, 28, 29].

Hodnotu EC kvapaliny možno vypočítať podľa nasledujúceho vzorca:

$$EC = K \cdot G \quad (2.4)$$

Kde G je vodivosť, ktorá je rovnaká ako inverzná hodnota meranej rezistivity a K je konštanta článku elektrickej sondy. Konštantu článku možno vypočítať z:

$$K = \frac{d}{A} \quad (2.5)$$

Kde d je vzdialenosť medzi sondami a A je efektívna plocha sondy. Výpočet efektívnej plochy je náročný na výpočet a práve preto je vhodnejšie odmerať odpor v referenčnej kvapaline už so známou hodnotou EC [30].

V našom projekte využijeme elektródu s platinovou čiernou farbou na kontaktoch. To predstavuje dostatočne veľkú efektívnu plochu, čo by malo viesť k zníženiu miery polarizácie elektródy a tak isto chybového odporu v sérii. Na obrázku 2.9 môžeme vidieť konkrétnu EC sondu.

2.4 Aktuátory

V tejto časti sú podrobne opísané jednotlivé aktuátory, ktoré sú použité v hydroponickom systéme. Tieto zahŕňajú peristaltické čerpadlá, vodné čerpadlá, solenoidové ventily, krokové motory a DC motory. Každý aktuátor je nevyhnutný pre funkčnosť a účinnosť hydroponického systému.



Obr. 2.9: EC sonda využitá v projekte

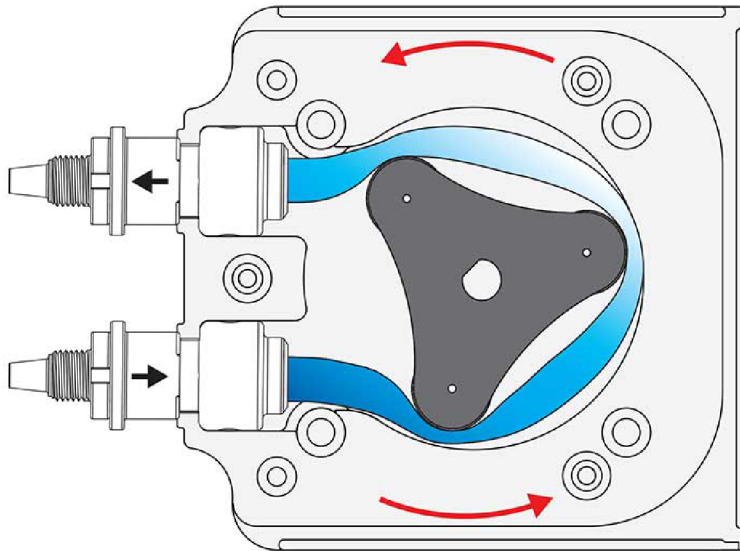
2.4.1 Peristaltické čerpadlo

Taktiež známe pod názvom peristaltická pumpa, je to typ objemového čerpadla. Jeho schopnosť čerpania presných objemov sa využíva hlavne pri dávkovaní akváriových chemikálií. Mechanizmus ktorý stojí za schopnosťou čerpania kvapaliny tvorí rotor motora ktorý tlačí na valčeky vo vnútri hlavice. Vďaka vyoseniu valčekov od osi rotora dochádza k tlačeniu kvapaliny po dávkach v smere rotácie.

Prečerpávaná kvapalina v žiadnom bode neprichádza do styku s mechanickými časťami čerpadla, vďaka čomu môžeme čerpať kyseliny alebo roztoky solí bez rizika korózie. Ďalšou výhodou peristaltickej pumpy je schopnosť vytvoriť značný tlak až o veľkosti 207 kPa. Túto jej schopnosť využijeme k vstrekovaniu hnojiva do rezervoáru s vodou. Ďalším dôležitým parametrom je presnosť oboch čerpadiel kvôli tomu aby nedávkovali viaceré čerpadlá rozdielne množstvá hnojiva do systému. Rýchlosť čerpadla môžeme ovládať zmenou frekvencie riadiaceho signálu so štvorcovým priebehom.

2.4.2 Vodné čerpadlo

Väčšina hydroponických systémov vyžaduje vodné čerpadlo za účelom prečerpávania vody medzi rezervoárom a pestovacou nádržou. Náš návrh je dimenzovaný buď na 12VDC vodné pumpy, alebo na 230V pumpy ovládané 12V relé napojeným na výkonný konektor. Automatické odčerpávanie sa s naším návrhom dá najlepšie vyriešiť použitím sifónu, funkcia je podobná takzvanému “poháru pre lakomca“.



Obr. 2.10: Hlava peristaltickej pumpy[25].

2.4.3 Solenoidové ventily

Jedná sa o elektromechanický ventil, ktorý v našom projekte predchádza pretečeniu kvapaliny cez peristaltické pumpy v stave vypnutia. Tieto ventily riadime pomocou 12V spínaných signálom z ESP32. Ako vyplýva z názvu, telo ventilu bude tvorené cievkou. V jej jadre sa nachádza trubka s pohyblivým uzatváracím piestom, ktorý sa pri indukovanom elektromagnetickom poli cievky buď pohne smerom dole a tým pádom uzavrie ventil, alebo sa pohne smerom hore a otvorí ventil. Vyššie zmienený postup sa týka priamo ovládaných ventilov, ktoré majú výhodu využitia za nižšieho tlaku a kapacity podsystému. Solenoidové ventily tak využívajú elektrický prúd k premenne na lineárny pohyb. V prípade presného vyhotovenia pumpy tieto solenoidy nie sú potrebné, avšak pri dávkovaní pH pomocou peristaltických púmp by mohli dôjsť k úniku kvapaliny, čo by mohlo znamenať oveľa väčší posun na Ph škále ako je vyžadovaný logikou.

2.4.4 Krokové motory

Krokový motor je druh motora na striedavý prúd, ktorý využíva veľké množstvo permanentných magnetov po obvode rotora so striedavou polaritou a určitý počet cievok (väčšinou 2 alebo 4). Narozdiel od bežného DC motora s kefkami, krokový motor sa vždy pri privedení prúdu na cievky otočí len do polohy, kde je príťažlivá magnetická sila cievky na najbližšiu časť magnetu najväčšia. To ynamená, že privádzaním štvorcového symetrického napätia na cievky motora dosiahneme prerušovaný pohyb s otočením vždy o určitý uhol a s frekvenciou rovnajúcou sa frekvencii signálu.

Takto môžeme ovládať rýchlosť presnejšie a spoľahlivejšie ako u kefkového DC motora. Nevýhodou je značne komplexnejší riadiaci obvod, takzvaný H-mostík, ktorý prepína smer toku prúdu cez cievku. Tento obvod je riadený tranzistormi, ktoré sa musia otvárať a zatvárať s istou dobou, kedy sú všetky tranzistory uzavreté. Táto doba sa nazýva mŕtva zóna a takisto vyžaduje ďalšie komponenty. To kladie otázku, či vyššia presnosť ovládania otáčok stojí za komplexnejší obvod.

2.4.5 DC motory

Pre náš druhý návrh sme sa rozhodli nahradiť krokové motory v úlohe pohonu peristaltických púmp jednoduchšími a úspornejšími DC motormi. Vďaka tomu sme mohli použiť pre ovládanie obvodu peristaltických púmp značne jednoduchší obvod.

2.5 Dizajn hardvéru

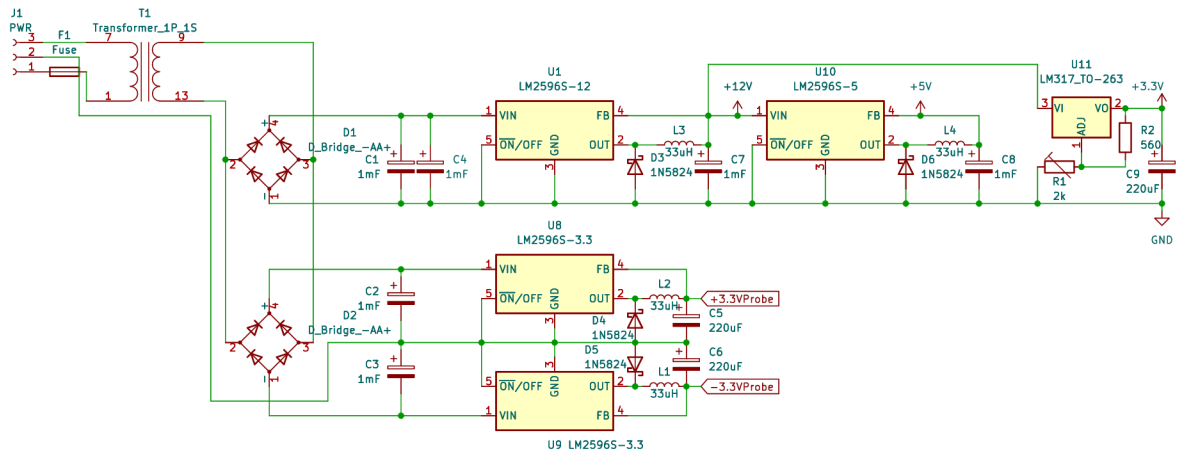
Obsahom tejto časti bude opis postupu návrhu dosky plošných spojov. Tento postup sa dá rozdeliť do dvoch celkov. Prvý celok sa zaoberá teoretickou rovinou jednotlivých modulov, z ktorých je tvorená výsledná schéma, v ktorej implementujeme jednotlivé funkcionality súčiastok opísaných v sekciách 2.3 a 2.4. V druhom celku vychádzame už z hotovej schémy, ktorú prevádzame do fyzickej formy, pričom je potrebné zohľadniť niekoľko kľúčových faktorov, ktoré ovplyvňujú ich funkciu a výkon.

2.5.1 Bloková schéma hardvéru a jeho opis

K vizualizácii hardvérovej časti projektu využijeme blokovú schému, ktorá je abstrakciou reálneho zapojenia systému. Bloková schéma popisuje akým spôsobom sú prepojené jednotlivé moduly a ako medzi sebou komunikujú. Celý systém je napájaný cez 12V adaptér. Toto napätie je potrebné previesť na 5V a následne na 3,3V, nakoľko jednotlivé moduly pracujú na nižších napätiach. Toho docielime pomocou transformátora, usmerňovača prúdu a regulátora napätia.

2.5.2 Podsystem napájania

V rámci tejto podkapitoly zdokumentujeme napájací modul nášho hydroponického systému. Opíšeme jeho návrh, prepojenie ako aj samotnú integráciu do systému. V nasledujúcich podkapitolách zhrnieme požiadavky a špecifikácie jednotlivých súčastí modulu ako aj jeho dokumentáciu. Obrázok nižšie zobrazuje schému zapojenia napájacej časti obvodu.



Obr. 2.11: Principiálna schéma prvej verzie napájacieho modulu

Transformátor Prvým krokom napájania je konverzia napätia zo siete na nižšiu hodnotu. K tomuto slúži transformátor, ktorý vďaka elektrickej indukcií “prevádza“ napätie z 230V na 12V. Primárne vinutie transformátora je na fázu siete pripojené sériovo cez poistku a spínač, ktorý slúži ako hlavné ovládanie napájania. Z dôvodu použitia zosilňovača na signál z pH sond bolo nutné použiť ešte jeden, symetrický zdroj na 3,3V. Transformačná jednotka tejto vetvy napájania pozostáva z dvoch identických 6V transformátorov s primárnymi vinutiami zapojenými paralelne a sekundármi sériovo s opačnou polaritou. Toto zapojenie vytvára na spojení sekundárov zem a na ich druhých koncoch striedavé napätie 6V s tým, že jedna strana je od tej druhej fázovo posunutá o 180 stupňov.

Graetzove mostíky Toto zapojenie diód slúži ako prvý krok usmerňovania striedavého prúdu zo sekundárneho vinutia transformátora. Pri našom symetrickom zdroji sme využili vlastnosť Graetzovho mostíka, ktorá vytvára kladné a záporné napätie. Vďaka tomu bolo možné dosiahnuť symetrické napájanie použitím uzemňovacieho kolíka na spojení transformátorov, čo má za efekt symetrické jednosmerné napätie o hodnote 9 V na opačných stranách diódového mostíka. Transformátor na 12 V má vlastný mostík, avšak tento má len stranu uzemnenia a stranu 16,9 VDC. Táto hodnota vychádza zo vzťahu medzi priebehom striedavého napätia a jeho vrcholovou hodnotou. V prípade sínusovej vlny je pri 12 V RMS (Root Mean Squared) vrcholová hodnota rovná RMS napätiu vynásobenému odmocninou z dvoch, čiže circa 16,9 Voltov. Toto je dôležité, nakoľko diódový mostík usmerňuje vrcholové napätie, nie jeho RMS napätie.

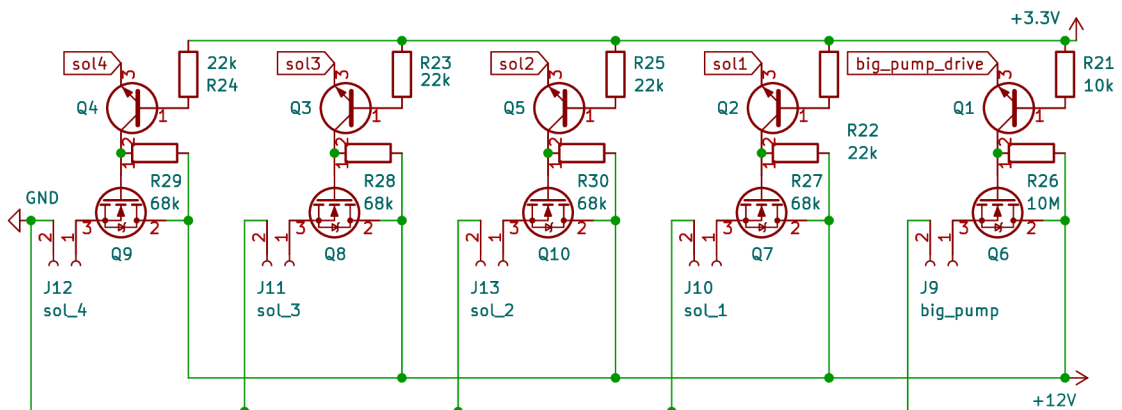
Regulácia napätia Projekt vyžaduje niekoľko poklesov napätia, aby správne fungoval. Pokles z neregulovaných 17V na 12V a následne na 5V zabezpečujú dva BUCK regulátory. Návrh obvodu je nastavený pomocou komponentov a hodnôt

komponentov na základe odporúčaní od TI. Symetrické napätie 3,3 V zabezpečuje Zenerový tranzistorový regulátor, ktorý tiež obsahuje červenú LED na kladnej linke, slúžiacu ako indikátor napájania.

2.5.3 Podsystem periférie

K časti ovládacieho modulu sa zaraďujú automatizačné podsystemy slúžiace k riadeniu čerpadla, peristaltických púmp, sekundárnych čerpadiel a solenoidových ventilov. Jednotlivé časti obvodu si popíšeme v nasledujúcich podkapitolách, kde si ozrejníme ich funkciu spolu s dôvodmi zaradenia do systému.

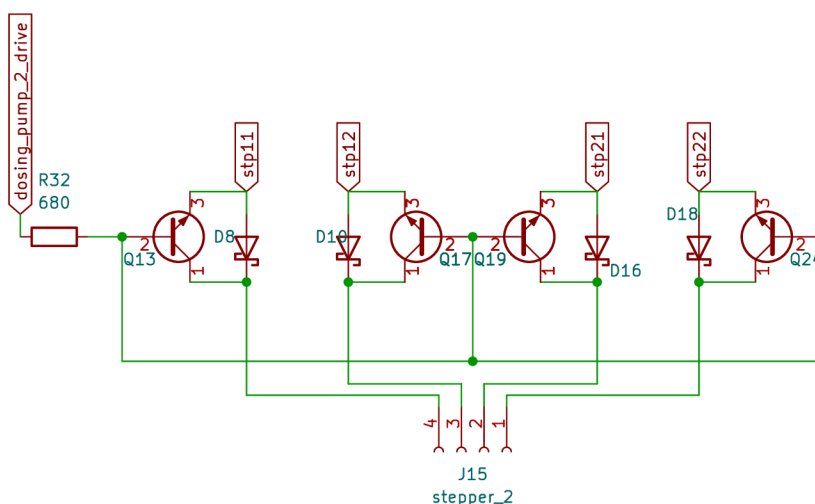
Ovládania pre solenoidové ventily V našom projekte je nevyhnutné dodávať potrebné živiny do hlavného rezervoáru s vodou za účelom udržania pH a koncentrácie hnojiva v rovnováhe. K tomuto účelu sme sa rozhodli implementovať schému so zapojením solenoidových ventilov spolu s peristaltickými pumpami. Ventily tu plnia funkciu predchádzania pretekaniu živín do hlavného rezervoáru keď sú peristaltické pumpy vypnuté. Ovládame ich pomocou výkonového N-MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) tranzistora, ktorý je ovládaný signálovým BJT NPN tranzistorom BC547.



Obr. 2.12: Príklad ovládania pre solenoidové ventily

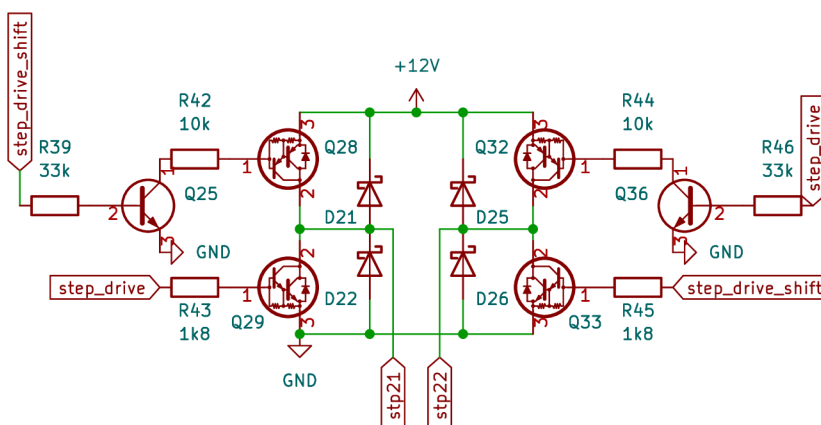
2.5.4 Príklad ovládania pre peristaltické pumpy

Prečerpávanie živín zo zásobníkov do rezervoáru je zabezpečené štyrmi peristaltickými pumpami poháňanými krokovými motormi, ktorých najväčšou výhodou na



Obr. 2.13: Obojsmerný tranzistorový spínač pre krokové motory

toto využitie je ich veľký krútiaci moment, vďaka ktorému môžu tlačiť tekutiny vo flexibilnej hadičke vedenej po ich obvode s enormným tlakom a stabilitou aj pri viskóznějších látkach. Ako už bolo vyššie spomenuté, tieto motory využívajú zapojenie tranzistorov známe ako H-mostík. Tieto mostíky máme len dva, jeden pre každú cievku a krokové motory ich zdieľajú. To, ktorá pumpa momentálne pracuje, ovláda obojsmerný tranzistorový spínač na konektore pre každý motor.



Obr. 2.14: Príklad H-mostíka

2.5.5 Riadiaci podsystem

V tomto module dochádza k prijímaniu informácií, ich následnému vyhodnocovaniu, rozhodovaniu a napokon posielaniu príkazov ovládacej časti. Funkčne je rozdelený

na päť častí: MCU (microcontroller Unit) a logické výstupy k ovládacej časti, signálové zosilňovače k Ph sondám, ovládanie EC sond, konektory pre senzory teploty a vlhkosti vzduchu a konektor pre komunikáciu s doskou.

Rozhranie pre programovanie MCU

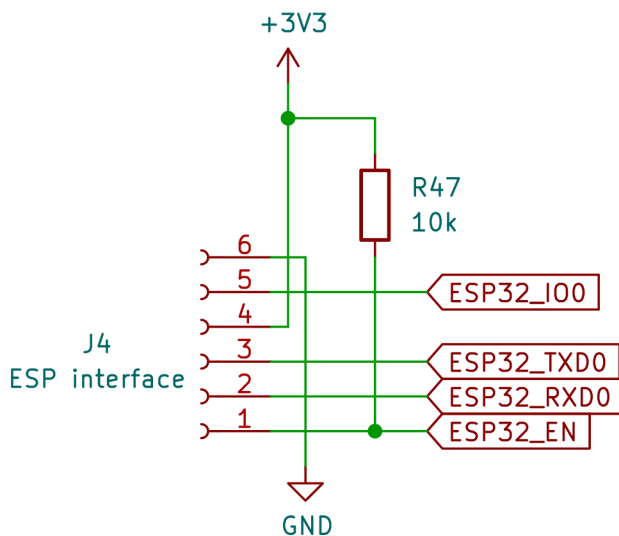
S cieľom umožniť prístup k programovaciemu rozhraniu, doska obsahuje port so zbernicovou hlavičkou. Aby sa zredukovali náklady, obvod pre konverziu USB na UART nie je priamo integrovaný na doske. Najčastejšie používanými ovládačmi pre konverziu USB na UART sú tie od spoločnosti FTDI. Na obrázku 2.15, môžeme vidieť príklad ovládača CP2102 STC, ktorý využívame v našej práci.



Obr. 2.15: FTDI ovládač

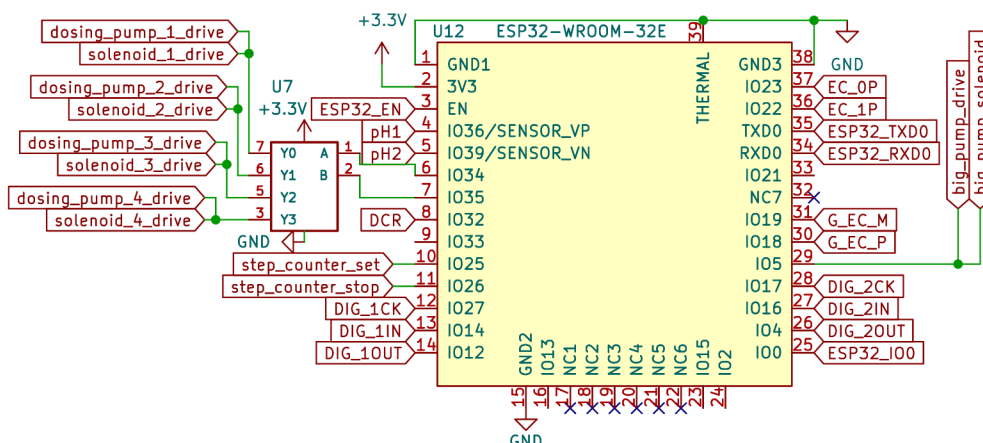
Z dokumentácie ESP32: “esptool.py môže automaticky vstúpiť do zavádzača na mnohých doskách pomocou stavových línií modemu RTS a DTR na automatické prepínanie GPIO a EN.”[23]

Pripojenia sú potom smerované nasledovne:



Obr. 2.16: Príklad pripojenia pre ESP32

Po vyhodnotení získaných informácií mikrokontrolér zasiela logické príkazy časti ovládania periférií. Konkrétne posíla signály hlavnej pumpy, solenoidom a peristaltickým pumpám. Keďže v našom projekte chceme šetriť počet použitých pinov MCU, rozhodli sme sa implementovať dekodér za účelom rozšírenia možných výstupov. Hlavnú pumpu ovláda cez jeden pin, pri ktorom platí, že ak je logická hodnota na pine vysoká, pumpa beží. Obdobne sa ovládajú aj solenoidy, ich piny sú zhodné s ovládacími pinmi príslušných peristaltických púp. Peristaltické pumpy majú okrem ovládacích pinov aj pin pre ovládací signál. Tento pin generuje štvorcový signál s určenou frekvenciou 200 Hz.



Obr. 2.17: Príklad mikrokontroléru ESP32 s logickými výstupmi a dekodérom.

2.5.6 Podsystem EC a pH sondy

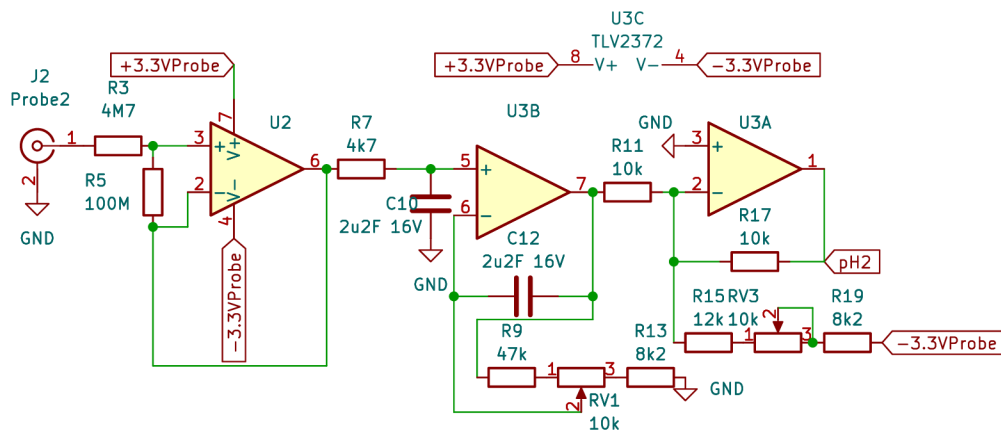
Ovládanie pH sondy

V zapojení pH sondy sa používajú kľúčové prvky ako vstupný bufferový zosilňovač, operačné zosilňovače pre nastavenie zosilnenia a posunu, RC filter a ďalšie. Tieto prvky spolu tvoria integrovaný systém, ktorý efektívne meria a prevádza hodnoty pH na analógové napätie pre ďalšie spracovanie.

Obvod je založený na princípe zosilňovania/offsetu s vysoko impedančným vstupom. Jeho hlavným účelom je previesť rozsah napätia bežnej pH sondy (medzi -0,414 pri pH 14 a 0,414V pri pH 0) na niečo, čo môže byť ľahko čítané z prístroja, napríklad 0-140mV. Vysoká vstupná impedancia pH metra je kľúčová, pretože pH sondy majú vysokú výstupnú impedanciu, takže musíme použiť ešte vyššiu vstupnú impedanciu pre pH sondu.

Vstup do obvodu je konektor BNC J2, ktorý je umiestnený priamo na doske. Po vstupnej fáze nasledujú dva operačné zosilňovače pre zosilnenie a offset. U3B, RV1 a príslušné rezistory R9 a R13 tvoria obvod zosilnenia. Po fáze zosilnenia nasleduje fáza offsetu postavená okolo U3A. Tento operačný zosilňovač mení výstupný rozsah predchádzajúcich fázy +/-2V na rozsah 0-4V.

Keď je dosiahnutý výstup U3A, hodnota pH sa lineárne mení v rozsahu od -3,3 do 3,3V, čo zodpovedá zmene pH od 0 do 14. Ak sa signál má použiť počítačom (prostredníctvom ADC), potom je potrebné prispôbiť dynamiku výstupu tomu, čo môže ADC merať[24].



Obr. 2.18: Príklad signálového zosilňovača

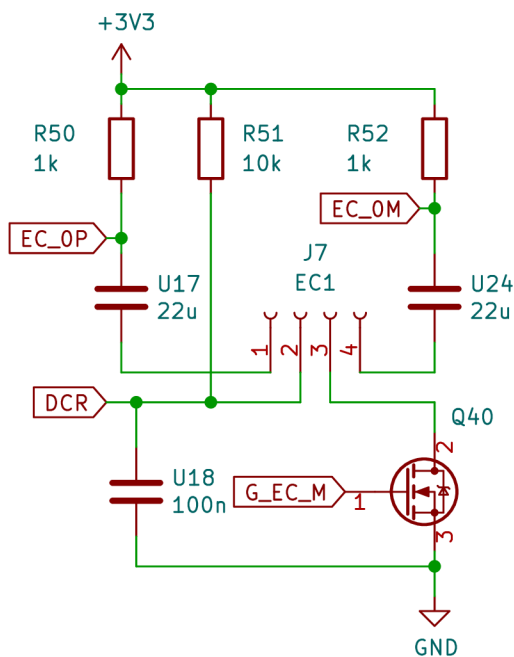
Ovládanie pre EC sondu EC (elektrická vodivosť) sonda je zariadenie určené na meranie elektrickej vodivosti v roztokoch. Naše zariadenie má dva priame rozhrania k EC sonde, ktoré čítajú hodnoty okolo 1000 μS .

Na ovládanie EC sondy používame metódu merania napätia. Obe strany EC elektródy sú prostredníctvom 1K rezistorov pripojené k +3V3, takže oba konce sú voči zemi obvodu na +3V3, t.j. 0 V diferenciálne.

Na meranie EC nastavíme jednu stranu na zem cez N-MOSFET a potom meriame napätie na druhej strane. Tým vytvárame delič napätia medzi známym 1k rezistorom a neznámym odporom pod testom. Potom opakujeme proces pre druhú stranu, čím obnovujeme nulové DC napätie cez elektródu, aby sme zabránili polarizácii.

EC elektroda je tiež AC-spojená cez keramické kondenzátory o hodnote 22 μF , čo zaručuje nulové DC napätie aj v prípade, ak by softvér nefungoval správne alebo ak by rezistory neboli dokonale zhodné. Dôležitejšie je, že DC predstavuje vysokú impedanciu, takže EC elektroda nezkratuje pH elektródy ponorené do rovnakej vzorkovacej nádoby.

Predpokladajúc EC okolo 2 mS/cm a konštantu bunky okolo 1 cm, dostávame hodnotu časovej konštanty pre vysoko priepustný filter okolo 4 ms, čo je oveľa pomalšie ako náš merací interval 500 μs . Elektrolytické kondenzátory nemôžu byť použité na toto AC-spojenie, pretože únikový prúd je príliš vysoký. Takýto spôsob riadenia a merania EC sondy umožňuje presné a spoľahlivé meranie elektrickej vodivosti v rôznych roztokoch.

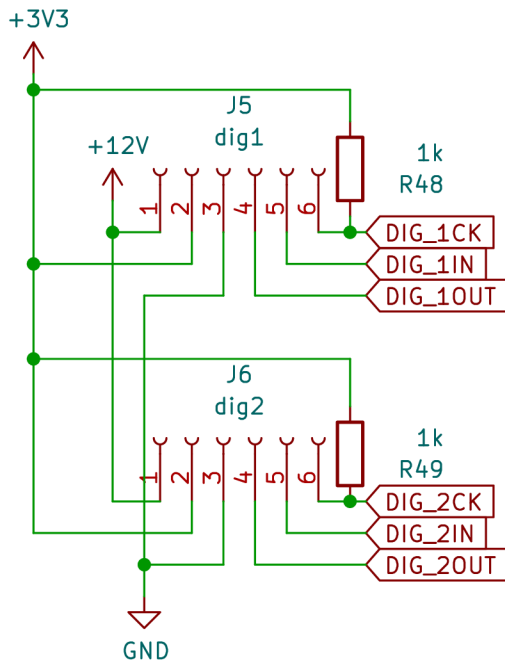


Obr. 2.19: Príklad obvodu pre EC sondu

2.5.7 Konektory pre senzory teploty a vlhkosti vzduchu

S cieľom merania teploty vzduchu a vlhkosti je potrebné pripojiť senzor AM2301 na jeden z dvojradových konektorov (2x3) podľa nasledujúceho schémy: čierne vedenie k zemi (GND), červené vedenie ku kladnej vývodu napätia (+3V3), a žlté vedenie k digitálnemu výstupu (DIG_1OUT). Výsledky merania sú potom vrátené vo forme stupňov Celzia pre teplotu a percentuálneho podielu relatívnej vlhkosti (RH) pre vlhkosť.

Je dôležité poznamenať, že v prípade použitia dlhých vedení môže byť potrebné pridať tzv. pull-up rezistor medzi červeným a žltým vedením. To je nevyhnutné z dôvodu eliminácie vplyvu vstavaného pull-up rezistoru v ESP32, ktorý by mohol narušiť správnu funkciu senzora, ak by vedenia boli príliš dlhé. Bez použitia externého pull-up rezistoru by sme totiž dostali iba hodnotu definovanú vstavaným pull-up rezistorom na čipe ESP32, čo by mohlo viesť k nepresnostiam v meraní.



Obr. 2.20: Príklad pripojenia senzorov

2.6 Druhý návrh prototypu pre automatizovaný hydroponický systém

Po prvotných skúsenostiach a poznatkoch získaných z implementácie prvého návrhu, sme sa rozhodli vytvoriť druhý, vylepšený návrh prototypu pre náš automatizovaný hydroponický systém. Cieľom tohto druhého návrhu je odstrániť nedostatky identifikované v prvom návrhu, a zároveň optimalizovať výkonnosť a efektivitu systému.

V tejto kapitole prejdeme detaily tohto druhého návrhu, vrátane jeho elektrickej a hardvérovej konfigurácie, možností riadenia a implementácie rôznych senzorov a modulov. Tiež sa budeme zaoberať jeho výhodami a potenciálnymi nevýhodami v porovnaní s prvým návrhom.

2.6.1 Napájacia časť obvodu

Pri druhom návrhu sme sa rozhodli z rozmerových dôvodov rozdeliť napájaciu časť na dva obvody:

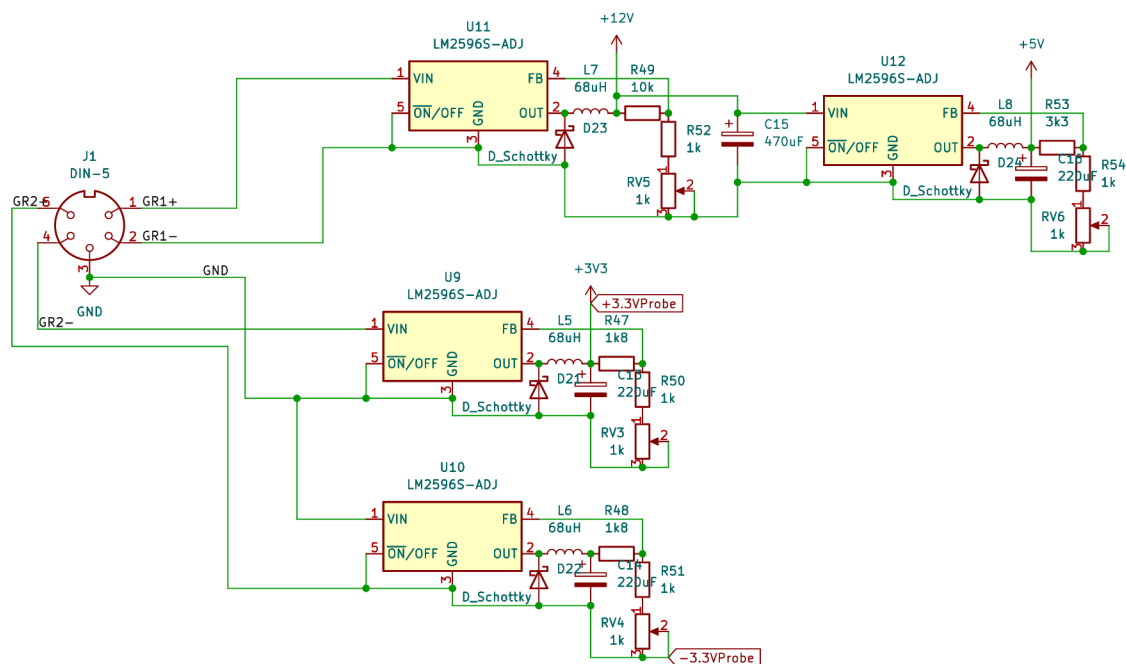
1. transformátorová a usmerňovacia časť
2. regulačná časť

Regulačná časť

Centrálnou súčasťou regulačnej časti sú buck konvertory LM2596, ktoré sú zodpovedné za reguláciu napätia na požadované hodnoty (+3.3 VDC, -3.3 VDC, 12 VDC, 5 VDC, 12 VDC). Tieto konvertory sú monolitické integrované obvody, ktoré poskytujú všetky aktívne funkcie pre step-down (buck) spínací regulátor, schopný pohonu 3-A zaťaženia s vynikajúcou líniovou a zatažovacíu reguláciou.

Tieto konvertory pracujú na prepínacej frekvencii 150 kHz, čo umožňuje použitie menších filtrovacích komponentov, ako by bolo potrebné pri regulátoroch s nižšou prepínacou frekvenciou. Vďaka minimálnemu počtu externých komponentov sú tieto regulátory jednoduché na použitie a zahŕňajú internú frekvenčnú kompenzáciu a pevný oscilátor.

Výstupy týchto konvertorov sú ďalej spracované pomocou Schottkyho diódy, kondenzátora a cievky, ktoré spolu tvoria frekvenčný filter. Tento LC filter je navrhnutý tak, aby vylúčil alebo minimalizoval šum a vysokofrekvenčné rušenie, ktoré by mohlo pochádzať z konvertorov. Vďaka tomu je možné dosiahnuť "čisté", regulované DC napätie, ideálne pre napájanie citlivých častí hydroponického systému. Výsledkom je robustnejší obvod, ktorý je menej náchylný na rušenie, a teda vedie k stabilnejšiemu a efektívnejšiemu fungovaniu celého systému.



Obr. 2.21: Nová schéma zapojenia pre napájaciu časť.

Transformátorová a usmerňovacia časť

Cieľom tohto projektu bolo premeniť striedavé napätie 230 V na jednosmerné napätie, ktoré by sa viac približovalo požadovanému napätiu pre dané zariadenie. Okrem toho sme museli vytvoriť symetrické napájanie pre zosilňovač pH sondy. S týmito cieľmi na mysli sme navrhli diskretnú schému, ktorá sa skladá z troch transformátorov - prvý s hodnotou 12 V a druhé dva s hodnotou 6 V. Napätia generované týmito transformátormi boli usmerňované dvojicou Graetzových mostíkov.

Symetrické napájanie sme dosiahli delením druhého Graetzovho mostíka a pripojením dvoch kondenzátorov sériovo, pričom ich spojovací bod sme spojili so zemou vytvorenou stredovým vývodom sekundárneho vinutia 6V transformátorov, teda na kábel, ktorý ich prepája. Tieto kondenzátory, každý s hodnotou 1 mF, slúžili na vyhladenie výstupného napätia zdroja. Medzi hlavnou doskou a zdrojom sa nachádza ešte jedna doska so zenerovými tranzistorovými regulátormi, ako aj s LED signalizujúcou napätie na 3,3V linke. Tento napájací zdroj prináša napätie na hlavnú dosku prostredníctvom piatich žíl kábla, ktorý bol na hlavnej doske pripojený pomocou 2,54 mm pinovej konektorovej päťice.

Plošný spoj pre túto dosku sme vytvorili vyvolávaním chloridom železitým. Na túto metódu sme použili obyčajný, jednostranný cuprexit, ktorý sme najprv vyleštili

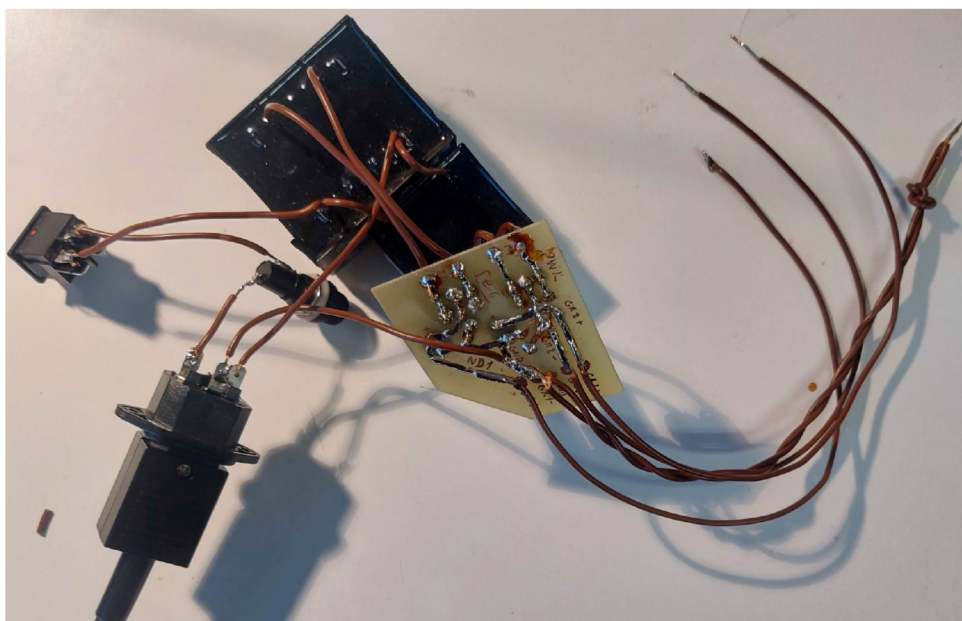
a odmastili pomocou hubky na riad nasiaknutej izopropylalkoholom. Po tomto bode bolo potrebné dbať na to aby sa medenej vrstvy nikto nedotýkal.

Ďalším krokom bol návrh umiestnenia komponentov. Pozície nožičiek komponentov sme rozvrhli nakreslením spájkovacích plôch. Tieto plochy sme podľa schémy prepojili nakreslením cestičiek centrofixou.

V tomto bode bol dizajn plošného spoja dokončený a nasledovalo leptanie dosky. Vyššie spomenutý chlorid železitý sme nahriali na teplotu cca. 50 stupňov za účelom urýchlenia chemického procesu. Tento chemický proces spôsobuje rozpustenie medenej vrstvy nechránenej fixou za vzniku chlóru a vodíka, preto musí byť tato reakcia vykonaná v dobre vetranej miestnosti alebo vonku. Chlorid železitý je pomerne silne hygroskopické farbivo, preto bolo potrebné pri manipulácii s ním použiť ochranné rukavice z nitrilu. Spoj sme priebežne kontrolovali a reakciu ďalej urýchlňovali prelievaním roztoku v reakčnej nádobe. Celkovo reakcia zabrala asi 10 minút. Jej výsledkom bol plošný spoj, ktorého cestičky boli stále prikryté fixou.

Tento plošný spoj sme umyli od prebytočného roztoku pod studenou tečúcou vodou, vrstvu fixky sme odstránili pretrením izopropylou hubkou a spoj sme znova umyli vodou a vysušili. Týmto procesom sme vyleptali plošný spoj.

Následne sme pomocou ručnej vrtačky vyvrtali diery pre nožičky komponentov a káble. Pri osadzovaní komponentov sme potiahli cínom aj všetky cestičky, kvôli ochrane medených cestičiek pred oxidáciou ako aj za účelom zväčšenia prierezu obsahu cestičiek. Po osadení komponentov sme úspešne oživil túto dosku a odmerali napätia, ktoré boli o 1 V vyššie ako nominálne hodnoty. Výsledné zapojenie aj s poistkou a spínačom môžeme vidieť na obrázku 2.22.



Obr. 2.22: Transformátorová a usmerňovacia časť obvodu.

2.6.2 Ovládanie pre solenoidové ventily

Pri výpočte potrebných hodnôt pre správne fungovanie solenoidových ventilov sme postupovali niekoľkými krokmi. V prvom rade sme určili parametre MOSFET tranzistora SI2302, ktorý slúži na riadenie ventilov. Tieto parametre sú:

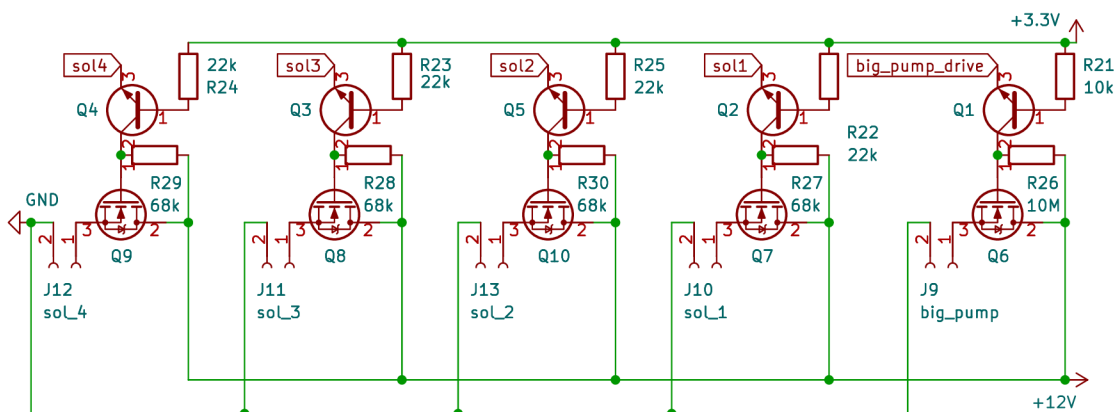
- Maximálne napätie (V_{ds}): 20V
- Maximálny prúd (I_d): 4.3A
- Maximálny výkon (P_d): 1.2W
- Vodivosť ($R_{ds(on)}$): 25mOhm pri 4.5V a 3.6A

Tieto údaje sme získali priamo z dátového listu tranzistora[31].

Následne sme určili napätie a prúd, ktoré budú potrebné pre správne fungovanie solenoidových ventilov. Tieto hodnoty sú 12V a 1A. Na základe týchto údajov sme určili, že MOSFET tranzistor SI2302 je schopný riadiť solenoidové ventily ako aj pumpy a čerpadlo, pretože jeho maximálne napätie a prúd sú vyššie ako napätie a prúd potrebné pre nich.

Na ochranu tranzistora a solenoidových ventilov sme sa rozhodli použiť Zenerovu diódu. Táto dióda limituje napätie na jej hodnotu Zenerovho napätia. Ak napätie na vstupe prekročí túto hodnotu, dióda sa otvorí a začne prepúšťať prúd, čím sa znižuje napätie na výstupe. Hodnotu Zenerovho napätia sme určili na základe maximálneho napätia tranzistora a napätia potrebného pre solenoidové ventily.

Nakoniec sme určili hodnotu rezistora pripojeného ku Gate pinu tranzistora. Tento rezistor umožňuje riadenie tranzistora pomocou PWM signálov z ESP32 a MCP23017. Hodnotu tohto rezistora sme určili na základe maximálneho prúdu, ktorý môže tranzistor preniesť, a napätia PWM signálu.



Obr. 2.23: Príklad schémy zapojenia pre ovládanie solenoidových ventilov

2.6.3 Ovládanie pre peristaltické pumpy

Peristaltické pumpy sú dôležitým prvkom tohto systému, ktoré nám umožňujú presne dávkovať tekutiny potrebné pre rast rastlín. Systém využíva štyri 12V, 0.25A výstupy určené pre peristaltické dávkovacie pumpy s analógovým napätovým ovládaním. Za týmto účelom sme navrhli obvod ktorý by bol schopný tieto pumpy ovládať.

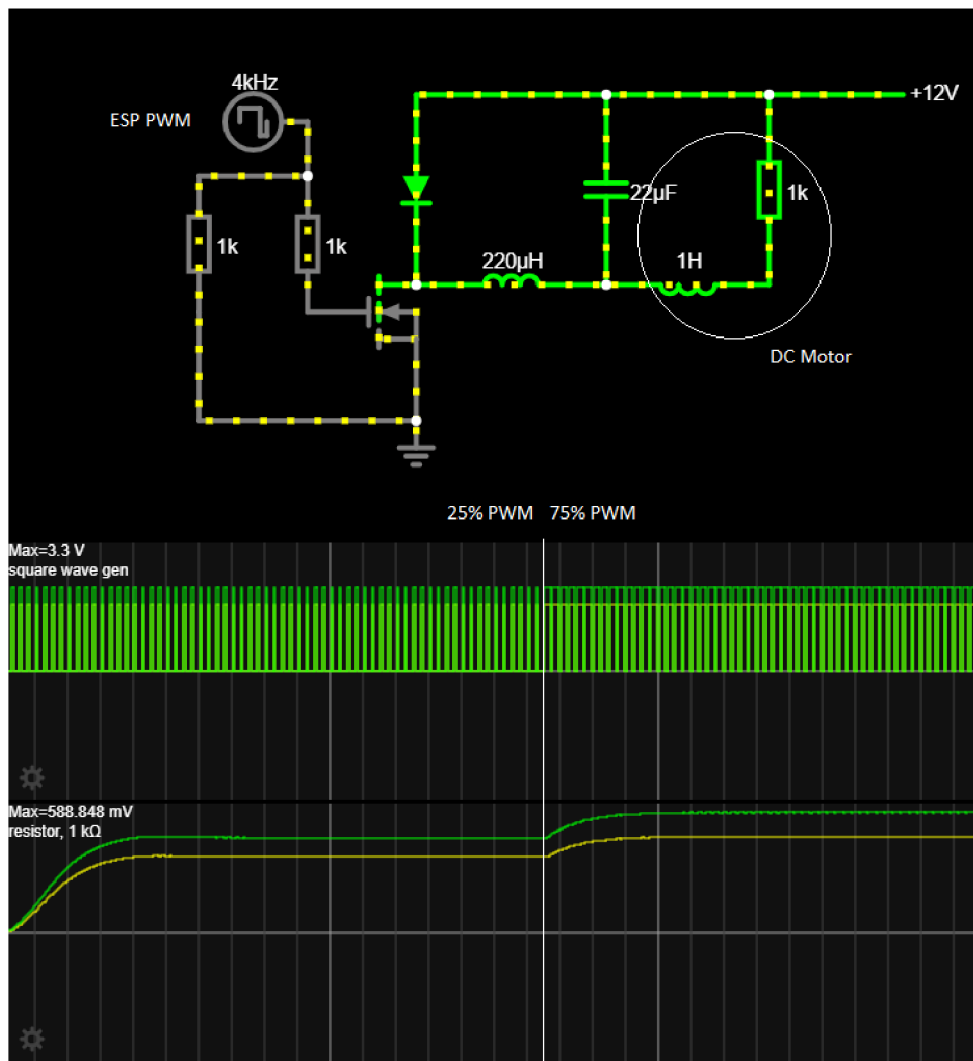
Pre tento obvod predstavuje ESP32 zdroj PWM signálov pre riadenie púmp. ESP32 je vhodný pre túto úlohu vďaka svojim vstavaným PWM výstupom a schopnosti generovať rôzne modulácie na základe programovateľnej logiky.

PWM signály z výstupov mikrokontroléra sa posielajú na N-kanálový MOSFET tranzistor. MOSFET slúži ako spínač, ktorý sa otvára a zatvára podľa signálu z mikrokontroléra. Zdroj MOSFETu je pripojený na spoločnú zem, zatiaľ čo Drain (stok) je pripojený k anóde Schottkyho diódy a LC obvodu.

LC obvod, kombinácia induktora a kondenzátora, je kľúčová pri zmene pulzných signálov z ESP32 na konštantné DC napätie pre pumpy. Hodnoty induktora a kondenzátora musia byť správne zvolené na základe požadovanej frekvencie a fázového posunu, aby sa predišlo nežiaducim osciláciám alebo nestabilite v obvode. Induktancia tlmivky bola stanovená na 220 μH a kapacita kondenzátora na 22 μF . Tieto hodnoty boli zvolené na základe analýzy a simulácie nášho obvodu, ako aj na základe dostupnosti týchto komponentov na trhu. Túto analýzu sme vykonali v programe Falstad ako môžeme vidieť na obrázku 2.24. Grafy v spodnej časti obrázku 2.24 popisujú napätia na vstupe a výstupe obvodu. Na hornom grafe je možné vidieť spočiatku 25 % PWM čo spôsobuje isté napätie na výstupe (dolný graf). V bode označenom bielou deliacou čiarou sme pracovný cyklus PWM signálu zvýšili na 75 % a napätie na výstupe vzrástlo na novú, vyššiu hodnotu. To dokazuje funkčnosť simulovaného obvodu.

Schottkyho dióda predstavuje alternatívnu cestu pre energiu, ktorá má menší odpor ako DC motor. Keď je MOSFET v priepustnom stave, prúd tečie cestou najmenšieho odporu, čo je v našom prípade mimo motora. Keď je MOSFET v nepriepustnom stave, prúd tečie cez DC motor. Vyššie zmienený LC obvod tieto ON/OFF stavy na výkonnej časti vyhladí na analógový signál.

Celkový návrh obvodu zabezpečuje, že PWM signály z ESP32 sú efektívne a bezpečne transformované na konštantné DC napätie pre pohon a riadenie peristaltických púmp.



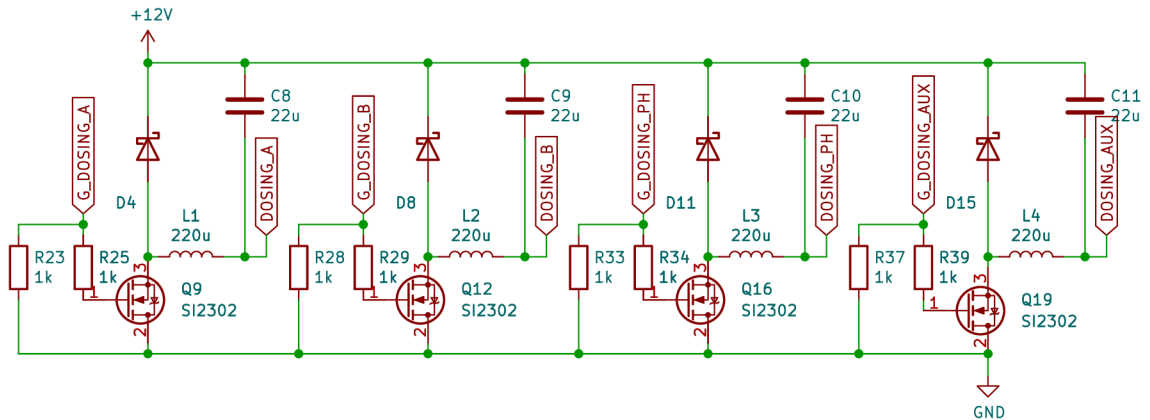
Obr. 2.24: Príklad simulácie ovládacieho obvodu pre peristaltické pumpy v programe falstad.

2.6.4 Ovládanie pre pumpy s monitorovaním prúdu

V našom systéme je integrovaných šesť 12 V, 0,5 A výstupov určených pre pumpy. Tieto výstupy sú navrhnuté tak, aby umožňovali sledovanie prúdu, ktorý preteká cez pumpy.

Toto sledovanie prúdu je realizované pomocou odporu pre detekciu prúdu (tzv. rezistor snímania prúdu). Zemný prúd vracajúci sa z pump preteká cez tento odpor a na ESP32 je pripojený ADC kanál, ktorý meria napätie cez tento odpor.

Meranie prúdu nám umožňuje získať užitočné informácie o stave a fungovaní pump. Napríklad, ak je prúd pumpou výrazne vyšší pri čerpaní vody ako pri čerpaní vzduchu, môžeme týmto spôsobom zistiť kedy bola voda vypumpovaná z nádoby, a to sledovaním poklesu prúdu cez pumpu.



Obr. 2.25: Príklad schémy zapojenia pre ovládanie peristaltických púmp.

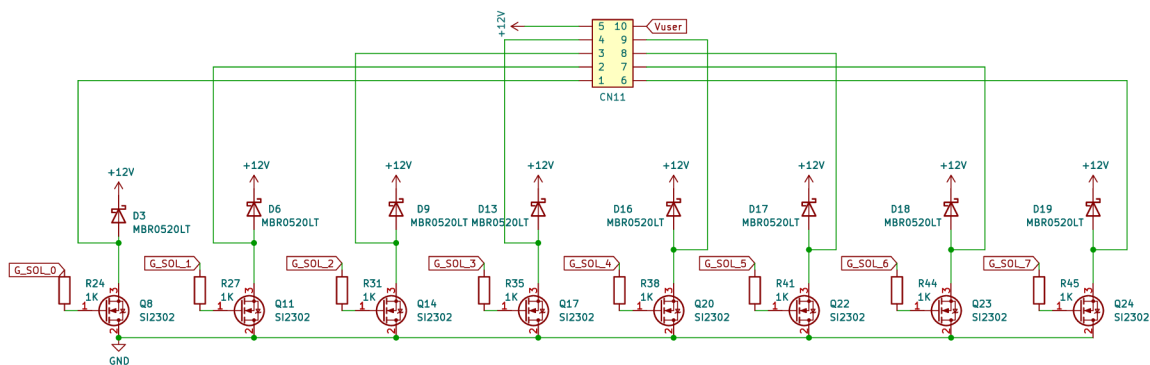
Takisto toto meranie prúdu môže byť použité na monitorovanie "zdravia" púmp, teda na potvrdenie, že je pumpa správne pripojená a funguje pod očakávanou záťažou. Ak by sme napríklad zaznamenali nezvyčajne nízky alebo vysoký prúd, mohlo by to signalizovať problém s pumpou - napríklad jej mechanické poškodenie alebo zlyhanie.

2.6.5 Mikrokontrolér a logické výstupy

V našom druhom návrhu, pre riadenie púmp a solenoidových ventilov, sme sa rozhodli využiť integrovaný obvod MCP23017. Tento obvod je 16-bitový rozširujúci port vstupu/výstupu, ktorý komunikuje pomocou I2C protokolu.

Jeho hlavnou výhodou je, že nám umožňuje rozšíriť počet vstupov a výstupov mikrokontroléra ESP32, a tým riadiť väčší počet zariadení s menším počtom dostupných GPIO pinov na ESP32.

Na vstupy SDA a SCL MCP23017 privádzame PWM signál z ESP32. Tento signál je potom použitý na riadenie púmp a solenoidových ventilov. Týmto spôsobom môžeme presne a flexibilne ovládať tieto zariadenia a prispôbiť ich prácu potrebám nášho hydroponického systému.



Obr. 2.26: Príklad schémy zapojenia pre ovládanie púmp s monitorovaním prúdu

2.7 Porovnanie návrhov

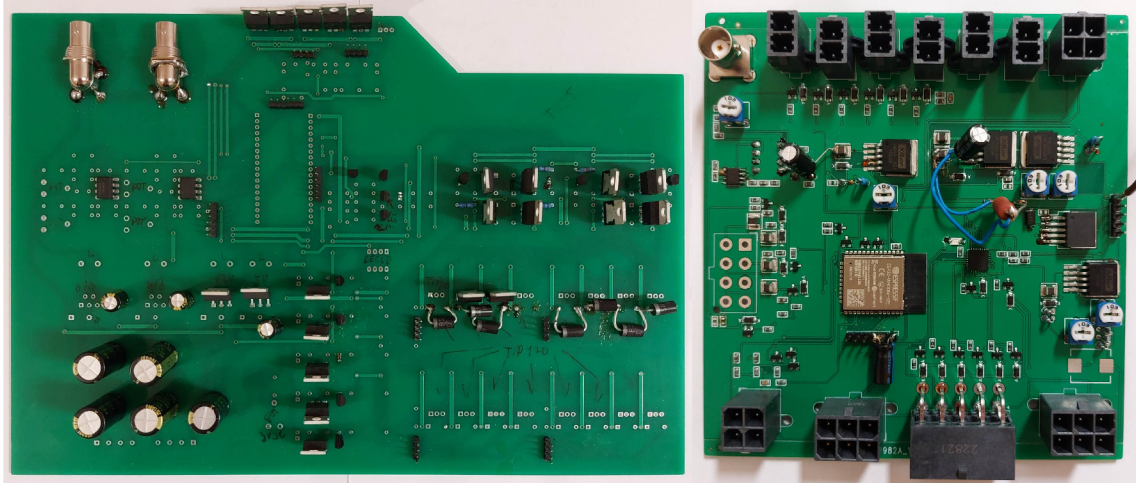
V tejto časti porovnáme dva systémy z pohľadu ich návrhu a funkcionality. Obe tieto implementácie slúžia na riadenie a monitorovanie hydroponického systému, avšak s niekoľkými rozdielmi v ich návrhu a použitých komponentoch.

V prvom systéme je použitý zdroj s výstupnými napätiami +5 VDC, +12 VDC +3,3 VDC, -3,3 VDC. Tento zdroj využíva reguláciu napätia pomocou lineárnych regulátorov, konkrétne LM7805 a LM7812, ktoré sú zároveň vybavené internou termickou ochranou a ochranou pred preťažením. Lineárne regulátory majú jednoduchší návrh, ale môžu byť menej efektívne, pretože prevádzajú prebytočnú energiu na teplo. Druhý systém využíva k regulácii napätia modulárne spínané regulátory (buck konvertory) LM2596, ktoré poskytujú aktívne funkcie pre spínaný regulátor s výkonom a výbornou reguláciou vstupu a výstupu. Tieto konvertory pracujú s frekvenciou prepínania 150 kHz, čo umožňuje použitie menších filtračných komponentov a zaručuje stabilné a čisté regulované DC napätie. Buck konvertory majú vyššiu účinnosť, pretože minimalizujú straty energie na teplo.

Ďalším rozdielom medzi prvým a druhým návrhom je využitie technológií na ovládanie peristaltických púmp, sekundárnych púmp a solenoidových ventilov. Zatiaľ čo prvý návrh využíva krokové motory a jednoduché tranzistory pre ovládanie, druhý návrh využíva DC motory a jednoduchšie riadenie pomocou PWM a MOSFET tranzistorov. Krokové motory v prvom návrhu poskytujú vysokú presnosť a kontrolu, ale sú drahšie a komplexnejšie na ovládanie. DC motory v druhom návrhu sú jednoduchšie a lacnejšie, ale poskytujú menšiu presnosť. V prvom návrhu sme vybrali tranzistory s nesprávnym rozostupom, čo komplikovalo montáž a mohlo by viesť k nesprávnemu fungovaniu alebo poruche systému.

Asi najväčšou zmenou bolo použitie SMD komponentov spolu s THT, čím sme dosiahli značné zmenšenie rozmerov dosky, ako aj výrobnú cenu.

U prvej DPS sme neosadili všetky komponenty, pretože ich rozmiestnenie bolo dosť nepraktické a náročné na montáž, niektoré komponenty mali navyše príliš hrubé nožičky a malý rozstup. Taktiež sme dospeli k záveru, že komplexnosť vyššie uvedeníh obvodov by pravdepodobne znamenala vyššiu poruchovosť a menšiu spoľahlivosť.



Obr. 2.27: Stará a nová doska plošných spojov

2.8 Návrh dosky plošných spojov

Návrh DPS (dosky plošných spojov) je jedným z kľúčových krokov pri vývoji elektronických zariadení. K tomu, aby zariadenie bolo plne funkčné, je nevyhnutné riadiť sa nasledujúcimi zásadami:

- Výber materiálu
- Optimalizácia konštrukcie
- Technika montáže
- Počet vrstiev
- Návrh obrazca plošných spojov

Uvedené zásady spolu súvisia a vzájomne na seba naväzujú. Je tiež dôležité brať do úvahy ekonomické aspekty a navrhovať DPS s ohľadom na elektromagnetickú kompatibilitu (EMC).

V nasledujúcej časti si detailnejšie priblížime tvorbu DPS.

Voľba vhodného polotovaru pre DPS

Prvým krokom bol výber polotovaru známeho ako cuprexit. Pri jeho výbere sme sa zamerali na dve kritériá: hrúbku medenej fólie a počet vrstiev pre našu dosku plošných spojov. Keďže v našom obvode za prevádzkových podmienok neprekračujeme

1 A, zvolili sme štandardnú hrúbku 35 μm a z dôvodu využitia THT, ako aj SMD komponentov sme zvolili dvojvrstvú cuprexitit.

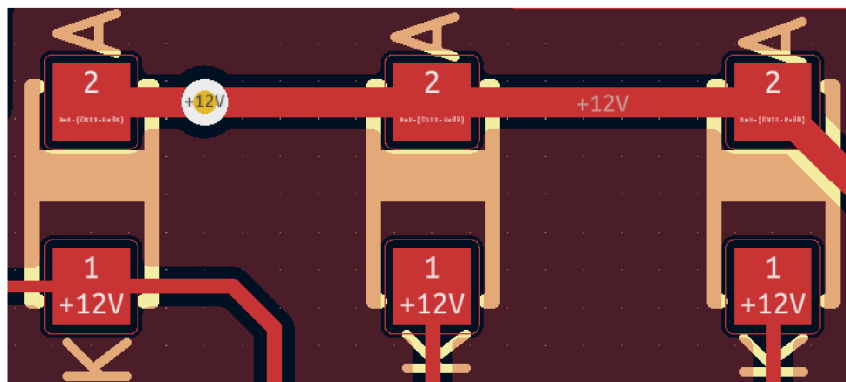
Rozmiestnenie súčiastok, hrúbka a tvar trás

V procese návrhu DPS je dôležité zvážiť umiestnenie komponentov, ako aj trasz, ktoré ich spájajú. Prioritou bola prehľadnosť a funkčná nadväznosť funkčných blokov. Riadili sme sa základnými kritériami pre ich usporiadanie z pohľadu elektrických vlastností:

- Umiestňovanie funkčných blokov a ich elektrických komponentov od vyššej k nižšej frekvenčnej šírke.
- Dôsledné oddelenie obvodov pracujúcich na vysokej a nízkej frekvencii.
- Vzájomné oddelenie jednotlivých funkčných blokov (analogový, digitálny, napájanie).
- Minimálna vzdialenosť medzi komponentami na redukcii prúdových slučiek.
- Umiestňovanie komponentov tak, aby sa minimalizovalo rušenie elektromagnetickým a elektrostatickým poľom.

Pri umiestňovaní komponentov sme začali s tými, ktoré sa neskôr nedali môcť presúvať (konektory, montážne otvory). Tieto definovali rozmery a tvar dosky a určili umiestnenie komponentov podľa funkčných blokov.

Pozície komponentov sme navrhli najprv pre jednotlivé funkčné bloky, ktoré sme potom prepojili. Dbali sme na vyhýbanie sa pravým uhlom a kladeniu napájacích trás do bezprostrednej blízkosti trás signálových. Vysokofrekvenčné trasy, ako napríklad výstupy spínaných regulátorov, sme navrhli čo najkratšie.



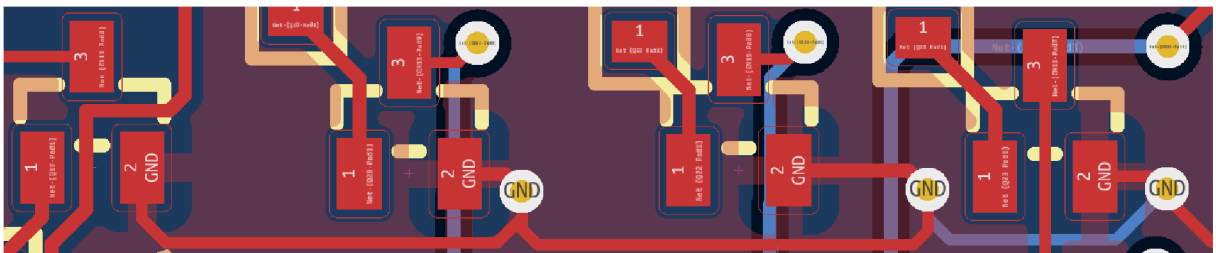
Obr. 2.28: Príklad rozostupu napájacej a signálovej trasy

Ďalším dôležitým bodom návrhu DPS je zosilnenie odolnosti voči elektromagnetickým interferenciám a zabezpečenie ich elektromagnetickej kompatibility (EMC).

Vyššie uvedené tupé uhly trás a krátke vzdialenosti medzi komponentami sú hlavnými technikami zvyšovania EMC, ďalšia možnosť je vyplniť prázdne miesta na DPS medenými plochami, ktoré boli uzemnené. Týmto spôsobom sme vyriešili elektromagnetickú interferenciu a zároveň sme vytvorili uzemňovacie body prakticky po celej doske.

Uzemnenie

Výber vhodného uzemnenia zabezpečuje stabilnú prevádzku bez rušivých signálov. Uzemnenie sa delí na jednobodové a viacbodové. Jednobodové uzemnenie je vhodné pre súčiastky s kmitočtovým spektrom do 1 MHz, ako sú audio aplikácie, napájacie zdroje alebo DC aplikácie. Viacbodové uzemnenie je vhodné pre vysokofrekvenčné obvody a číslicové obvody. Na základe odporúčaní sme využili viacbodové uzemnenie pre tranzistory riadiace čerpadlá a solenoidy. Pre túto časť obvodu sme pripojili uzemnenie každej súčiastky čo najkratším spojom k nízkoimpedančnej vodivej ploche, napríklad k vyššie zmienenej uzemňovacej plochy (GND).



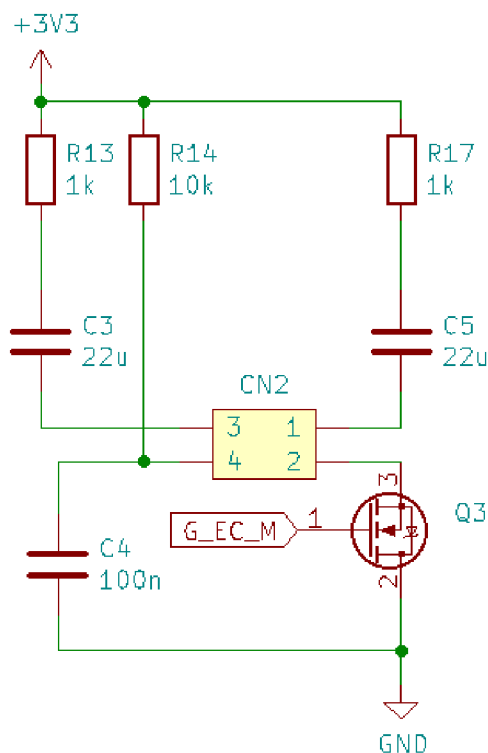
Obr. 2.29: Príklad viacbodového uzemnenia

Blokovanie Napájania

Blokovanie napájania je ďalším riešením nestabilného napájania pri veľkých alebo komplexných doskách. Blokovanie napájania umožňujú blokovacie kondenzátory, pretože dokážu rýchlo reagovať na náhle zmeny spotreby, ktoré sa môžu vyskytovať v rozsahu nanosekúnd až mikrosekúnd.

Blokovacie kondenzátory môžu slúžiť na elimináciu vplyvu parazitných vlastností alebo ako zdroj energie pre jednotlivé bloky.

V poskytnutom príklade obvodu nižšie sa používajú blokovacie kondenzátory na odfiltrovanie DC zložky napätia na EC elektróde.



Obr. 2.30: Príklad lokálneho kondenzátora

SMT (Surface Mounted Technology)

Technika povrchovej montáže (SMT) sa používa v elektronickom priemysle pre montáž SMD (Surface Mounted Devices) súčiastok priamo na dosky s plošnými spojmi. Použitie SMD komponentov v druhej revízii našej dosky SMT prináša výhody, ako zmenšenie rozmeru a hmotnosti dosky, vyššie pracovné frekvencie, rýchlejšie a presnejšie osadzovanie pomocou automatov a zvýšenú spoľahlivosť pri nižšej cene osadených dosiek. Táto technológia výrazne prispieva k miniaturizácii a efektívnosti elektronických zariadení.

3 NÁVRH SOFTVÉRU A TECHNOLOGIÍ

V tejto časti našej práce rozoberieme softvér ako aj technológie spojené s jeho aplikáciou. Sem sa zaraďujú komunikačné protokoly, ukladanie údajov a vhodné programovacie jazyky. To všetko je potrebné na presné naprogramovanie a spustenie mikrokontroléra a následného vývoja návrhu webového servera. Analýza bola vykonaná v oboch týchto oblastiach špecifických pre softvér a informácie uvedené nižšie sumarizujú analýzu jednotlivých oblastí spojenú s možnosťami pre samotnú implementáciu.

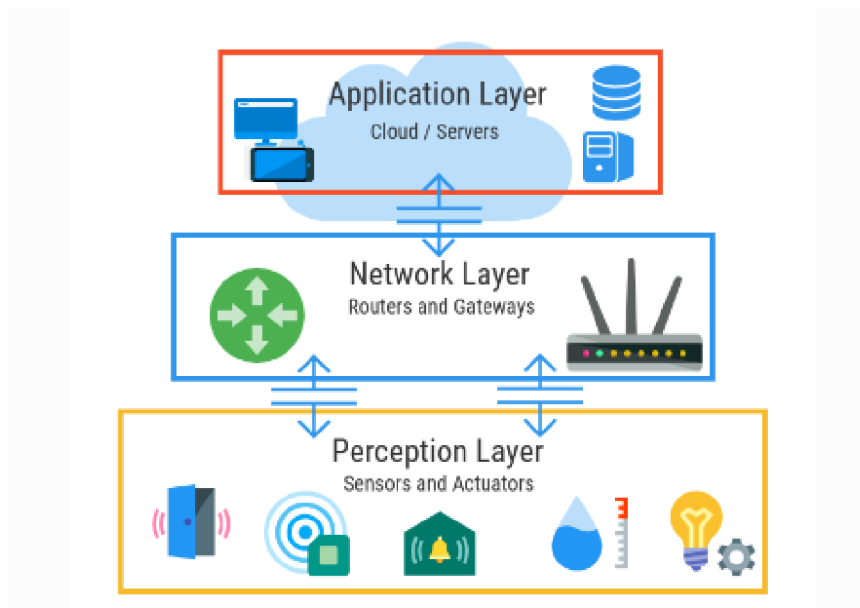
3.1 Systémová architektúra internetu vecí

Pre pojem IoT neexistuje jedna ustálená definícia, ktorá by v sebe zahrnula všetky aspekty. V rámci tejto práce budeme vychádzať z nasledujúcej definície: IoT alebo internet vecí je sieťové prepojenie počítačových objektov, zariadení a snímačov, ktoré navzájom komunikujú bez využitia internetového protokolu. Objekty medzi sebou generujú, vymieňajú a spracovávajú údaje bez toho aby musel zasahovať do tohoto procesu človek [32].

Jedným z hlavných cieľov nášho projektu je návrh architektúry systému IoT, ktorý by umožnil plynulú komunikáciu a synchronizáciu medzi rôznymi zariadeniami v sieti a zároveň zabezpečil, aby bol systém bezpečný, rozšíriteľný a spoľahlivý [33].

Našu architektúru systému IoT môžeme rozdeliť na 3 časti:

1. Vrstva vnímania: táto vrstva zahŕňa všetky fyzické zariadenia a snímače, ktoré zbierajú údaje z nášho systému. Tieto zariadenia zahŕňajú snímače teploty, vlhkosti, sondy a aktuátory. Údaje zozbierané týmito zariadeniami sa odosielajú do sieťovej vrstvy na spracovanie a analýzu.
2. Sieťová vrstva: Táto vrstva zahŕňa komunikačnú infraštruktúru, ktorá spája zariadenia vo vrstve vnímania s aplikačnou vrstvou. Sieť môže byť drôtová alebo bezdrôtová a môže používať rôzne protokoly, napríklad Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee alebo mobilné siete. Údaje zozbierané z vrstvy vnímania sa odosielajú do aplikačnej vrstvy na spracovanie a analýzu.
3. Aplikačná vrstva: Táto vrstva zahŕňa softvér a aplikácie, ktoré spracúvajú a analyzujú údaje získané z vrstvy vnímania. Táto vrstva môže zahŕňať aj cloudové služby, ktoré ukladajú a analyzujú údaje v reálnom čase a poskytujú prístup k údajom a ovládacím rozhraniám pre koncových používateľov [34].



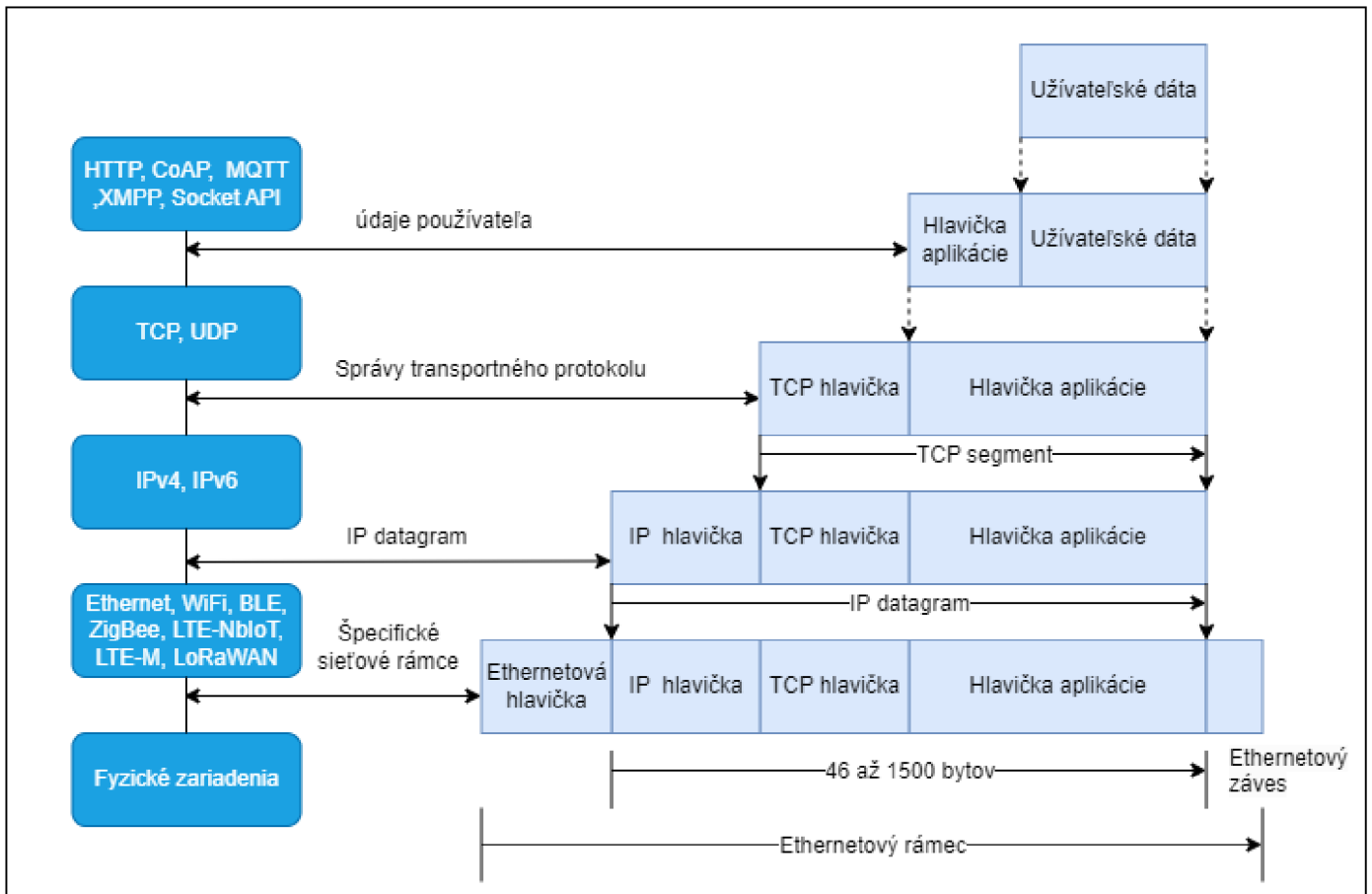
Obr. 3.1: Trojúrovňová architektúra IoT [35]

3.1.1 Sieťový zásobník IoT

Pod pojmom sieťový zásobník internetu vecí máme na mysli niekoľko vrstiev protokolov a technológií ako je tomu pri referenčnom modeli ISO/OSI, ktoré umožňujú komunikáciu medzi zariadeniami internetu vecí a internetom. Sem zaraďujeme nasledujúce vrstvy:

1. **Fyzická a dátová vrstva:** Protokoly v rámci týchto vrstiev sú rozdelené do kategórií na základe typov sietí, ktoré podporujú: LAN, PAN a WAN. Náš projekt spadá pod siete typu LAN pre ktoré sa bežne používajú Ethernet a Wi-Fi, pričom Ethernet je vysoko spoľahlivý a Wi-Fi umožňuje gateway zariadeniam prenášať informácie pomocou rádiových vln cez vysoko-rýchlostné internetové pripojenie.
2. **Sieťová vrstva:** Zariadenia internetu vecí používajú na svoju identifikáciu protokoly IPv4 a IPv6, ale maximálna veľkosť rámca je 127 bajtov, čo si vyžaduje protokoly na kompresiu paketov.
3. **Transportná vrstva:** TCP a UDP sú často používané transportné protokoly v IoT. TCP je založený na spojení a zabezpečuje doručenie každého paketu, zatiaľ čo UDP je bez spojenia a je vhodnejší na komunikáciu v reálnom čase bez tolerancie oneskorenia. Napriek tomu, že TCP je spoľahlivejší, nedokáže sa škálovať na malé dátové prenosy v zariadeniach IoT.
4. **Aplikačná vrstva:** Najbežnejším aplikačným protokolom v tradičnom zásobníku internetových protokolov je HTTP, ktorý je však pre obmedzené zariadenia príliš zložitý. Na riešenie tohto problému boli vytvorené nové protokoly, ako

napríklad CoAP, MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) a XMPP. CoAP je protokol klient-server, ktorý beží na UDP a zjednodušuje rozbor správ. MQTT je odľahčený protokol na zasielanie správ, ktorý využíva paradigmu publish-subscribe (publikácia-odber) na komunikáciu so vzdialenými miestami, ale nemusí byť vhodný na spracovanie v reálnom čase. XMPP sa používa na výmenu štruktúrovaných údajov v reálnom čase [36].



Obr. 3.2: Protokoly sieťového zásobníka IoT [37]

3.1.2 Komunikačné modely pre IoT

Klasické komunikačné modely sa zameriavajú na prenos informácií medzi užívateľmi poprípade užívateľmi a strojmi. V prípade komunikačných modelov IoT dochádza k výmene informácií medzi zariadeniami bez intervencie ľudí. O plynulí chod komunikácie sa starajú rozdielne komunikačné protokoly a kanály, ktoré sú prispôsobené pre IoT zariadenia na základe špecifických požiadaviek ako je automatické riadenie komunikácie a špeciálne formáty a štruktúry dát, ktoré sú optimalizované pre strojové spracovanie [38].

Medzi štyri základné komunikačné modely zaraďujeme:

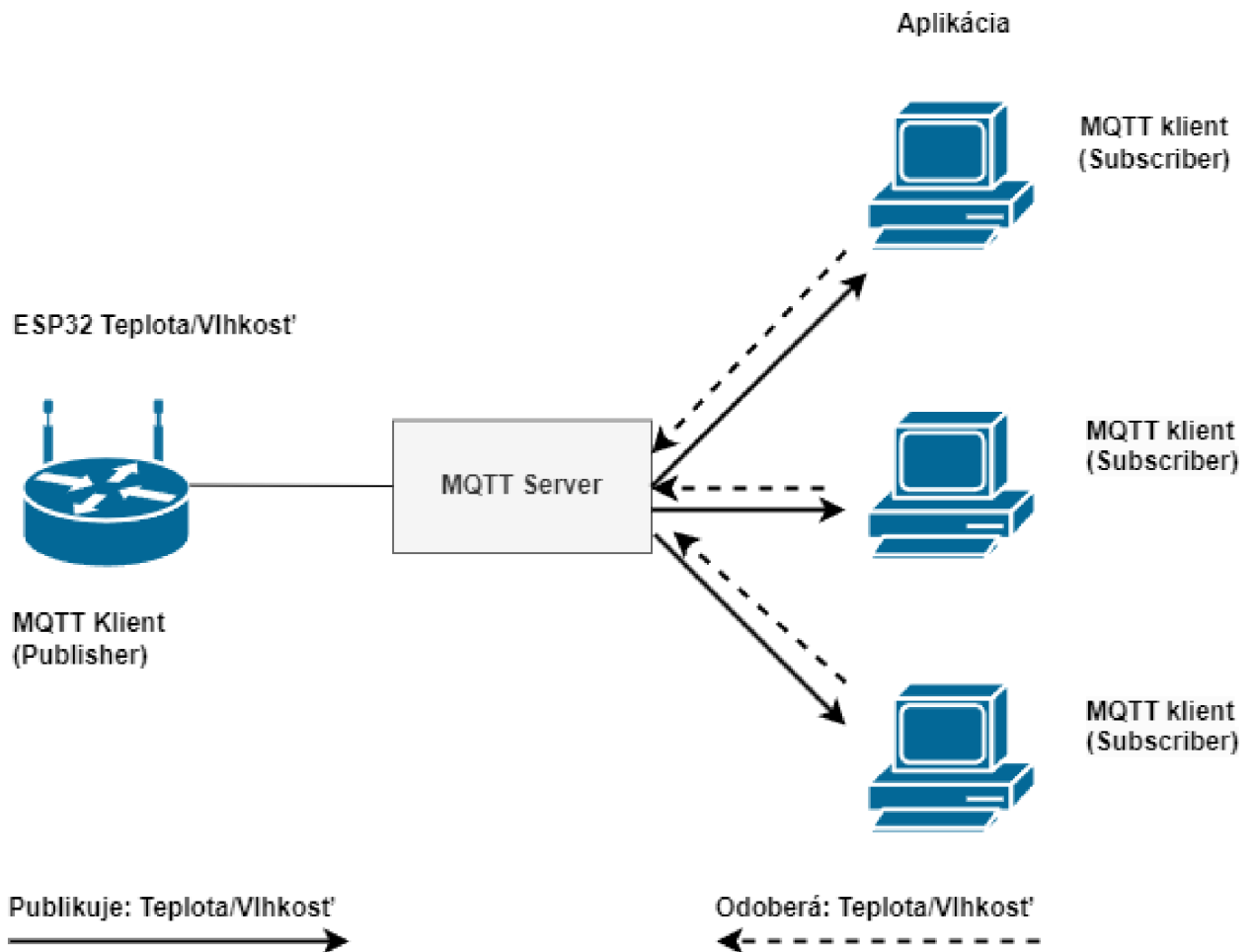
1. Request-RESPonse: Požiadavky sú klientom odosielané na server, ktorý na ne potom reaguje. Keď server prijme požiadavku, rozhodne sa, ako na ňu zareagovať a získa príslušné údaje a zdrojovú reprezentáciu. Následne pripraví odpoveď a klientovi ju pošle.
2. Publish-Subscribe: Ide o komunikačný model, ktorý zahŕňa publishers (vydavatelia), brokers (sprostredkovatelia) a subscribers (odoberatelia). Publisherovia sú zdrojom údajov. Publisherovia posielajú údaje do topicov (tém) spravovaných brokermi. Publishers a subscribers o sebe navzájom nevedia. Subscriberi sa prihlasujú na odber topicov spravovaných brokermi. Keď brokeri dostanú údaje pre topic od publishera, pošlú údaje všetkým subscriberom. Príklad protokolu: MQTT.
3. Push-Pull: Model komunikácie zahŕňa producers (producentov), queues a consumers. Producers posielajú dáta do queues. Producers nemusia poznať consumers. Consumers čerpajú dáta z queues. Queues pomáhajú oddeliť posielanie správ medzi producers a consumers.
4. Exclusive Pair: Exclusive Pair je komunikačný model, ktorý umožňuje plne duplexnú komunikáciu medzi klientom a serverom pomocou trvalého spojenia. Server má vďaka tomu prehľad o všetkých aktívnych spojeniach. Spojenie sa vytvára a zostáva otvorené, kým klient nezašle požiadavku na jeho uzavretie. Po vytvorení spojenia si klient a server môžu navzájom posielat správy [39].

Z vyššie uvedených komunikačných modelov sme sa rozhodli využiť model publish-subscribe, pretože prináša pre náš projekt jednoduchosť, flexibilitu a škálovateľnosť. Dáta môžu byť distribuované v reálnom čase medzi zariadeniami bez ohľadu na ich umiestnenie v sieti. To nám umožňuje rozšírenie projektu o nové zariadenia bez nutnosti zmeny jeho architektúry a súčasne môže byť každé zariadenie publisherom aj subscriberom dát a udalostí, čím sa znižuje záťaž na centrálnej časti siete. Túto architektúru využíva aj protokol MQTT, ktorý sme si aj nakoniec vybrali na samotnú implementáciu prenosu správ medzi ESP32 a raspberry Pi.

3.1.3 MQTT

Open-source protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) je navrhnutý tak aby bol spoľahlivý, efektívny a zároveň nezatažoval sieť. Je určený k monitorovaniu veľkého množstva senzorov a ich dát. Dôvodom výberu klient/server a publisher/subscriber modelu založeného na TCP/IP architektúre je jeho jednoduché škálovanie a distribúcia správ v sieti.

V protokole MQTT existujú tri hlavné prvky: klienti, brokeri a témy. Klienti sú zariadenia, ktoré posielajú alebo prijímajú správy. Broker je prostredník, ktorý zabezpečuje doručovanie správ medzi klientmi na základe preddefinovaných tematických kanálov. Tematické kanály sú virtuálne kanály, ktoré sa používajú na filtrovanie a zoskupovanie správ. MQTT [40]



Obr. 3.3: Príklad komunikácie MQTT založenej na Publisher/Subscriber modeli

V príklade znázornenom na obrázku reprezentuje MQTT klienta na ľavej strane mikrokontrolér ESP32, ktorý publikuje prijaté dáta zo senzorov. Raspberry Pi predstavuje zase MQTT server (broker), ktorý priama sieťové pripojenie spolu s aplikač-

nými správami, ako sú v tomto prípade teplota a vlhkosť od ESP32. MQTT server taktiež spracováva procesy prihlásenia a odhlásenia a posiela tieto údaje klientom MQTT, ktorí sú subscribermi.

Hlavnou úlohou MQTT brokera je prijímať všetky správy od vydavateľov (publishers), spracovávať tieto správy a potom ich distribuovať príjemcom (subscribers), ktorí sa prihlásili k prijímaniu týchto správ.

3.1.4 Programovací jazyk C

Jedným z hlavných dôvodov výberu programovacieho jazyka C pre vývoj programu je jeho výkonnosť a efektivita v porovnaní s ostatnými programovacími jazykmi. Pre našu aplikáciu je práve tento parameter kľúčový, keďže potrebujeme rýchle spracovanie dát spojenú s nízkou úrovňou abstrakcie hardvéru. Práve nízka úroveň abstrakcie nám zabezpečuje presnú kontrolu hardvéru spojenú s optimalizovaním výkonu kódu. Jazyk C je tiež široko používaný a má obrovskú základňu používateľov a knižníc, čo znamená, že programátori majú prístup k veľkému množstvu nástrojov a zdrojov. Okrem toho je C podporovaný na väčšine mikrokontrolérov a mikroprocesorov, vrátane ESP32. Na druhej strane, jazyk C vyžaduje od programátora veľkú pozornosť na detaily a presnosť. Programátor musí byť veľmi opatrný pri práci s ukazovateľmi a alokáciou pamäti, aby sa predišlo chybám, ktoré môžu mať nešťastné následky.

3.1.5 Programovací jazyk Python

Programovací jazyk Python využívame na strane MQTT brokera, ktorým je Raspberry Pi. Python sme sa rozhodli požiť pretože sme dospeli k záveru, že jednoduchosť a univerzálnosť má v tomto projekte prednosť pred rýchlosťou. Raspberry Pi ako malý jednodoskový počítač nám poskytuje možnosť pvytvárať a testovať rôzne aplikácie automatizované systémy. Python je ideálny pre vývoj na Raspberry Pi pretože je to vysokoúrovňový jazyk, ktorý je jednoduchý na naučenie a má množstvo knižníc a modulov, ktoré umožňujú rýchle a jednoduché vývojové cykly. Navyše, Python je multiplatformový jazyk a funguje na mnohých operačných systémoch, ako sú Windows, macOS, Linux a iné. Práve z tohto dôvodu sme sa rozhodli naprogramovať časť softvéru na Raspberry Pi v tomto jazyku.

3.2 Programovanie jednotlivých modulov

V tejto časti sa zameriame na implementáciu riadiaceho softvéru pre hydroponický systém. Popíšeme štruktúru a organizáciu zdrojového kódu, ako aj využité knižnic, frameworku a rozhrania. Riadiaci softvér je navrhnutý na platforme ESP-IDF od spoločnosti Espressif. Pre vývoj softvéru sme sa rozhodli využiť rozšírenie ESP-IDF určené pre VS Code, ktoré poskytuje integráciu funkcií ESP-IDF do vývojového prostredia VS Code. Toto rozšírenie umožňuje vývojárom využívať výhody oboch nástrojov, čo zvyšuje efektivitu a produktivitu pri vývoji IoT aplikácií.

Definícia GPIO pinov a ADC kanálov: V úvode kódu sú definované konštanty, ktoré označujú jednotlivé piny a kanály na zariadení. Definujú sa piny pre meranie pH, elektrickej vodivosti (EC), prúdu, odporu (DCR) a ďalšie vstupno-výstupné piny pre komunikáciu s digitálnymi zariadeniami.

Nastavenie WiFi: Definujú sa konštanty pre pripojenie k WiFi sieti a MQTT témy pre publikovanie teploty a vlhkosti z DHT senzora.

Definovanie premenných: Sú tu definované statické premenné, ktoré slúžia na sledovanie stavov v čase, ako je počet sekúnd do vypnutia čerpadla alebo solenoidu, ale aj hodnoty nastavenia pulzov modulácie (PWM).

Nastavenie GPIO pinov: Funkcia `config_gpio` nastavuje jednotlivé piny na zariadení. Niektoré piny sú konfigurované ako výstupy, iné ako vstupy. Nastavuje sa aj konfigurácia pre ADC meranie na týchto vstupných pinoch.

Nastavenie LEDC (Low-speed PWM) kanálov: Funkcia `config_ledc` nastavuje LEDC kanály, ktoré sú používané na generovanie PWM signálov.

Nastavenie PWM: Funkcia (`set_dosing_pwm`) nastavuje hodnoty pulzovej šírky modulácie (PWM) pre jednotlivé kanály.

Časovanie a sledovanie stavov: Kód ďalej obsahuje logiku pre sledovanie stavov a časovanie, ktoré je implementované pomocou softvérového PWM a časovača.

Nastavenie a spracovanie prúdu: V ďalšej časti kódu sa konfiguruje a spracováva prúd pre pumpu.

Nastavenie a spracovanie elektrickej vodivosti a odporu (DCR): Posledná časť kódu, ktorú ste poskytli, sa zaoberá konfiguráciou a spracovaním hodnôt elektrickej vodivosti (EC) a odporu (DCR).

Implementácia riadiaceho softvéru

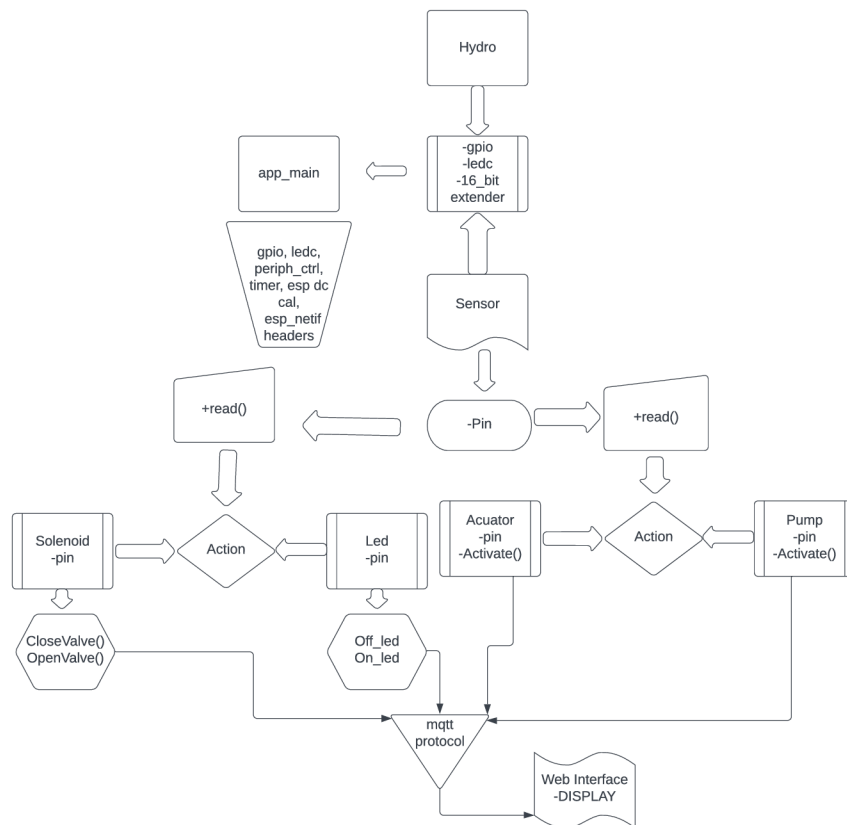
Poskytnutý diagram 3.6 predstavuje implementáciu softvérového rozhrania na riadenie rôznych snímačov a aktuátorov používaných v našom hydroponickom systéme. Podľa diagramu možno identifikovať nasledujúce triedy, vzťahy a interakcie:

1. **Trieda "Hydro":** Predstavuje celkový systém a obsahuje inštancie ostatných

tried. Táto trieda sa stará o konfiguráciu pinov GPIO a nastavenie LEDC pre PWM, ako aj o obsluhu požiadaviek na riadenie aktuátorov.

2. **Trieda "Sensor"**: Predstavuje všeobecný senzor. Má atribút "pin", ktorý definuje GPIO pin, a metódu "read()", ktorá slúži na získanie údajov zo senzora.
3. **Trieda "Actuator"(abstraktná trieda)**: Slúži ako základ pre triedy "Čerpadlo", "Solenoid" a "LED". Obsahuje atribút "pin" a abstraktnú metódu "activate()", ktorú podtriedy môžu prepísať na vykonávanie špecifických akcií.
4. **Trieda "Čerpadlo"**: Je konkrétnou implementáciou triedy "Aktuátor" a reprezentuje čerpadlo. Má metódu "activate()" pre ovládanie čerpadla.
5. **Trieda "Solenoid"**: Je ďalšou konkrétnou implementáciou triedy "Aktuátor" a predstavuje elektromagnetický ventil. Má metódu "activate()" pre ovládanie ventilu.
6. **Trieda "LED"**: Taktiež je konkrétnou implementáciou triedy "Aktuátor" a zobrazuje LED diódu. Obsahuje metódy "on()" a "off()" pre zapínanie a vypínanie LED.

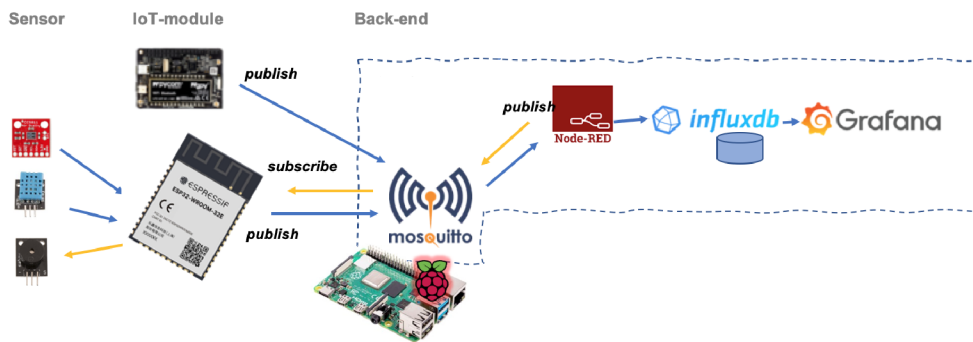
Každá z týchto tried má atribút "pin", ktorý slúži na ovládanie príslušného pinu GPIO.



Obr. 3.4: Diagram implementácie riadiaceho softvéru.

3.3 Zber a spracovanie dát

Dáta, ktoré ESP32 spracúva, nie sú prístupné len preň. V stanovenej frekvencii náš obvod odmeria hodnoty všetkých senzorov, uloží stav všetkých aktuátorov a odošle ich pomocou systému MQTT na jednodoskový počítač Raspberry Pi, ktorý je na rovnakej Wi-Fi sieti. Raspberry Pi funguje ako MQTT maklér, prerozdeľujúc dáta, ktoré dostane od publisherov, svojim subscriberom. Týmto subscriberom je práve Node-RED, internetový IoT uzol. Ten dáta spracuje a prepošle pomocou systému InfluxDB na webovú službu, ktorá vykresľuje grafy hodnôt, ktoré sú do nej odoslané. Táto stránka, Grafana, môže byť prístupná odkiaľkoľvek, no len osobou, ktorá má prihlasovacie údaje. Týmto spôsobom sme vyriešili problematiku sledovania systému na diaľku.



Obr. 3.5: Schéma komunikácie medzi uzlami a modulmi.

```
I (361708) MQTT_EXAMPLE: MQTT_EVENT_DATA
TOPIC=/topic/qos0
DATA=data
I (362328) MQTT_EXAMPLE: MQTT_EVENT_DATA
TOPIC=/topic/qos0
DATA=data
E (370998) DHT: Sensor Timeout

Humidity 36.90 %
Temperature 27.10 degC
```

Obr. 3.6: Schéma komunikácie medzi uzlami a modulmi.

4 Návrh ochranej a montážnej skrinky

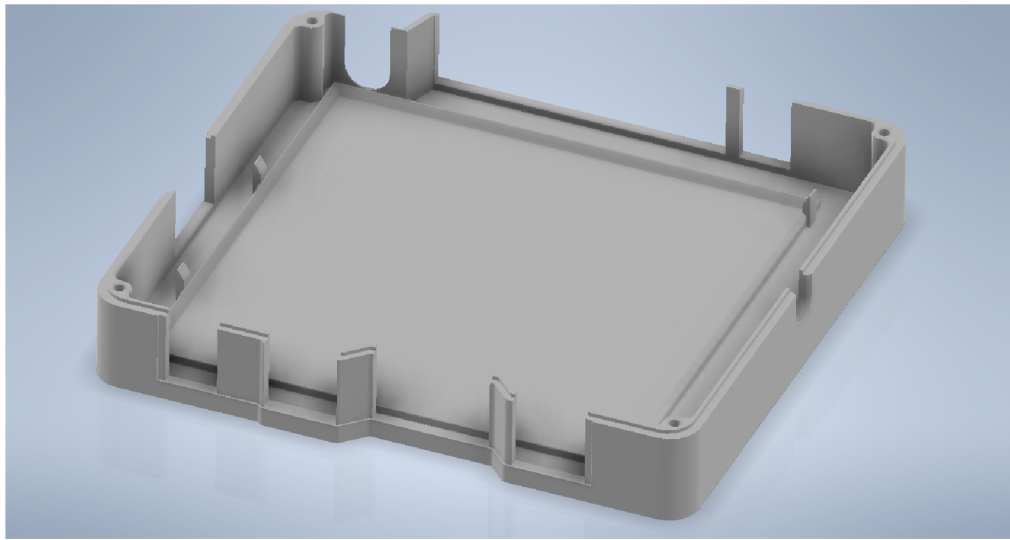
Pri vývoji obvodu pracujúceho v prostredí s vysokou vlhkosťou a blízkosti vody bola prioritou ochrana zariadenia. Z tohto dôvodu sme navrhli v programe Autodesk Inventor ochranné puzdro. Základným materiálom, ktorý sme použili na výrobu ochranného puzdra, bol ABS plast pre jeho pevnosť a odolnosť voči vode. Podľa nasledujúcich rozmerov sme vytvorili puzdro:

- Výška: 29 mm,
- Šírka: 146 mm,
- Dĺžka: 157 mm.

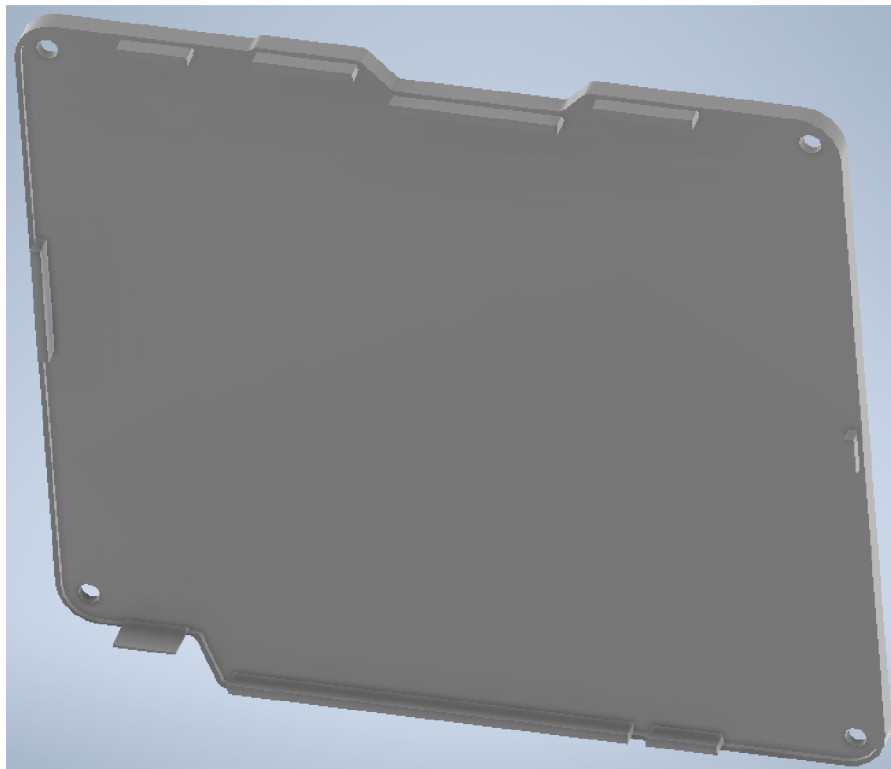
Rozmery tohto puzdra boli určené na základe presahu komponentov mimo dosky, čo zahŕňalo:

- 12,27 mm pre dvojpólové Molex konektory,
- 6 mm pre osempólový Molex konektor,
- 11 mm pre šestpólové Molex konektory,
- 1 mm pre BNC konektor.

V rozmeroch obvodu sme vyrobili na dne 2 mm vyvýšenie s priestorom pre spodnú stranu. Zvolená hrúbka stien a dna bola zvolená 3 mm za účelom zvýšenia štruktúrálnej pevnosti. Po rohoch skrinky boli vytvorené valčeky s dierou o priemer 3 mm, valčeky majú priemer 6 mm. Ich úlohou je slúžiť ako záchytný bod pre samorezné šruby so zapustenou hlavou, ktorými je prichytené veko skrinky. Na miestach kde sa nachádzajú konektory je stena skrinky o pol milimetra tenšia z dôvodu tolerancie rozmerov. Diery pre konektory sú vytvorené vynechaním časti steny a zhora sú uzavreté výstupkami na veku. Z vetracích dôvodov je možné vetraciu časť vyrobiť vo forme mriežky a pridať chladiace otvory na veko. Po pridaní podložiek na spodnú stranu skrinky by tieto otvorili slúžili na chladenie obvodu pomocou konvekcie vzduchu. Na veku sa dajú vytvoriť dvierka na zjednodušenie údržby. Celý návrh je možné vidieť na obrázku 4.1 a 4.2.



Obr. 4.1: 3D model krabičky.



Obr. 4.2: 3D model krytu pre krabičku.

5 Zhodnotenie a porovnanie funkčnosti zariadenia

V tejto časti našej práce posúdime dosiahnuté výsledky a na základe nich porovnáme naše zariadenie s dostupnými riešeniami na trhu.

5.1 Zhodnotenie systému

Pre účely nášho hydroponického systému sme vyvinuli dve dosky plošných spojov, pričom prvý prototyp v sebe zahŕňal viaceré nedostatky, ktoré sme sa snažili odstrániť pri druhom prototypu. Celkovú funkčnosť sme overili až pri druhom prototypu po oživení obvodov. Ako prvú sme oživil napájaciu časť so zenerovými regulátormi, napätia boli o niečo vyššie než sme očakávali, no stále spadali do rozsahu použiteľnosti.

5.2 Porovnanie systému s dostupnými riešeniami na trhu

Náš systém, DPS s integrovanými vstupmi a výstupmi, ponúka komplexné riešenie pre automatizáciu malých a stredných hydroponických systémov. Existujú viaceré riešenia na trhu zamerané na automatizáciu hydroponických systémov. Tu je porovnanie nášho systému s týmito existujúcimi riešeniami:

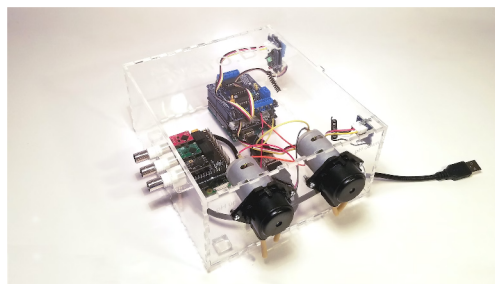
1. **Funkčnosť a rozsah vstupov a výstupov:** Náš systém poskytuje širokú škálu vstupov a výstupov, ktoré umožňujú presné riadenie hydroponického prostredia. Napríklad, máme viacero výstupov pre solenoidové ventily, čerpadlá a peristaltické dávkovacie čerpadlá. Taktiež podporujeme priame rozhrania pre pH sondu, EC sondu, teplotné a vlhkosťové senzory a ďalšie. V porovnaní s niektorými existujúcimi riešeniami, ktoré majú obmedzené vstupy a výstupy, náš systém poskytuje väčšiu flexibilitu a rozšíriteľnosť.
2. **Riadiaci mikrokontrolér:** Naše riešenie je založené na riadiacom mikrokontroléri ESP32, ktorý je známy svojou spoľahlivosťou a výkonom. Tento mikrokontrolér poskytuje stabilné a efektívne riadenie systému. Niektoré existujúce riešenia používajú iné mikrokontroléry, ktoré môžu mať obmedzenú výkonnosť alebo spoľahlivosť.
3. **Ovládateľnosť a kompatibilita:** Náš systém je navrhnutý tak, aby bol ovládateľný cez Wi-Fi a je kompatibilný s rôznymi zariadeniami a programovacími jazykmi. To umožňuje používateľom jednoducho ovládať systém pomocou

MQTT požiadaviek a integrovať ho do existujúcich systémov. Niektoré existujúce riešenia môžu mať obmedzené možnosti ovládania alebo sú viazané na konkrétne ovládacie rozhrania.

4. **Cena a dostupnosť:** Naše riešenie je momentálne dostupné vo forme DPS a súpravy súčiastok, ktoré si používatelia musia sami zmontovať. To môže byť výhodou pre tých, ktorí si želajú cenovo dostupné riešenie a majú záujem o vlastnú montáž. Existujúce riešenia na trhu môžu byť dostupné vo forme hotových produktov, ale ich cena a dostupnosť sa môžu líšiť.

Pre konkrétne porovnanie sme si vybrali produkt HydroBot, ktorý je možné vidieť na obrázku 5.1, ktorý má niekoľko výhod, ktoré ho odlišujú od ostatných zariadení na trhu. Schopnosť bezdrôtovo ovládať neobmedzený počet hardvérových zariadení, možnosť pripojiť HydroBota k spotrebičom ako klimatizácia, ventilátory, zvlhčovače alebo svetlá vo vzdialenosti do 200 stôp[45].

Na druhej strane, náš návrh sa líši od HydroBota vo viacerých aspektoch. Náš systém je zameraný na jednoduchosť a optimalizáciu. Oproti HydroBotu, ktorý je tvorený viacerými integrovanými modulmi, my sme sa sústredili na jedno kompaktné zariadenie, ktoré je špecificky navrhnuté a prispôbené pre účely automatizácie hydroponického systému. Týmto spôsobom sme dosiahli efektívnejšie využitie zdrojov a zníženie nákladov na výrobu. To sa odráža aj na cene, ktorá je pri tomto produkte 650 eur. Na porovnanie je pri našom riešení jednoduchšia softvérová aj hardvérová časť. Napríklad v prípade periférií využíva Hydrobot už navrhnuté a postavené systémy, pričom v našom obvode sú periférie stavané nami a riadené priamo. Toto riešenie nám poskytuje väčšiu flexibilitu ako aj troubleshooting. Celkovo môžeme povedať, že systém HydroBot je v porovnaní s našim riešením estetickjší a funkčnejší avšak koncový užívateľ si priplatí za hardvér, ktorého potenciál nie je využitý naplno.



Obr. 5.1: Produkt HydroBot[45]

6 ZÁVER

V našej bakalárskej práci sme oboznámili čitateľa s problematikou pestovania rastlín pomocou automatizovaných hydroponických systémov. Túto problematiku sme rozdelili do šiestich kapitol, v ktorých sme sa zaoberali hlavnými aj čiastkovými cieľmi. V prvej kapitole sme uviedli základné informácie o hydroponickom spôsobe pestovania rastlín. Získané teoretické poznatky využívame pri návrhu hydroponického systému a samotnej automatizácii. Druhá kapitola sa venuje hardvérovej časti a tretia sa venuje softvérovej časti. Nasledujúca kapitola rieši návrh ochrannej a montážnej skrinky. V piatej kapitole sme sa snažili o zhodnotenie a porovnanie funkčnosti zariadenia. Šiestou kapitolou je záver.

Pri vytváraní hydroponického systému bolo potrebné zvážiť niekoľko premenných. Medzi tieto premenné patrí napríklad koncentrácia živín a aditív vo vode, voľba mikrokontroléra, senzorov a podobne. Pre náš systém sme sa rozhodli vybrať MCU typu ESP32 ako riadiacu jednotku celého systému. Testovaním sme došli k záveru, že táto voľba bola z hardvérového hľadiska správna.

Výber senzorov bol založený na získaných poznatkoch o hydroponii, ako aj na charakteristike nášho obvodu. V prípade EC sondy bol výber komplikovanejší, keďže skoro všetky ponuky, ktoré sme našli, boli predávané ako samostatné ručné jednotky so vstavaným radičom a displejom pre odčítanie hodnôt. Toto bol problém, pretože zakúpenie a vyhodenie riadiaceho obvodu za účelom napojenia samotnej EC sondy pre náš obvod by bolo neekonomické a zbytočne komplikované. Voľba pH sondy bola o niečo jednoduchšia, aj keď riešenie so zosilňovacom signálov nie je najoptimálnejšie. Senzor AM2301, ktorý sme použili na meranie vlhkosti a teploty vzduchu sa neosvedčil, nakoľko pri jednom z meraní na ňom došlo z neznámych príčin ku skratu, ktorý sa prejavil dymom vychádzajúcim spoza ochrannej mriežky a spôsobil nenávratné hardvérové zlyhanie vývojovej dosky ESP32 DEVKIT v4, ktorú sme používali na testovanie spolupráce kódu s perifériami. Keďže sme sa v práci zameriavali skôr na plnohodnotnú dosku plošných spojov a senzory sme potrebovali len na odskúšanie firmveru a funkčnosti kódu, nekládli sme na ich výber až taký dôraz.

Doska plošných spojov bola navrhnutá s dôrazom kladeným na intuitívne a celistvé rozmiestnenie funkčných častí, ergonomické rozmiestnenie a typ konektorov pre periférie a v neposlednom rade na kompaktné rozmery. Bolo potrebné dbať aj na hrúbky trás a veľkosti dierok pre komponenty, ako aj ich spájkovacie plochy. Napriek našej snahe vyrobiť kvalitné zariadenie sme sa spočiatku dopustili viacerých pochybení. Na prvej verzii dosky boli diery pre Schottkyho diódy príliš malé a nemali dostatočný rozstup, diery pre tranzistory v obale TO92 mali spájkovacie plochy príliš blízko seba, čo viedlo k viacerým premosteniam cínom a z dôvodu chyby orezania sa jeden kondenzátor napájacej časti na dosku nedostal. Ďalším problémom boli

prívelké rozmery dosky a príliš komplikovaný obvod riadenia peristaltických pump, ktorý sa skladal z troch funkčných častí a zaberol tretinu priestoru na doske.

Z týchto dôvodov sme sa rozhodli urobiť revíziu dosky. Komponenty, ktoré neboli výkonné, sme vymenili za SMD súčiastky, namiesto pinových patíc sme použili MOLEX MegaFit konektory, namiesto krokových motorov sme použili DC motory, ktoré majú oveľa jednoduchší riadiaci systém. Taktiež sme pridali podporu pre sekundárne pumpy a usmernovací a regulčný obvod sme zariadili na samostatnej doske. Ani táto revízia sa nezaobišla bez menších pochybení. Z dôvodu zle navrhnutého a neprehľadného systému knižníc stop v programe KiCad bol design dosky plošných spojov pomalý a čiastočne chaotický, nakoľko KiCad nedisponuje kvalitnými asociáciami stop DPS a symbolov schém. Ako pokus zjednodušiť proces pridelenia stop k symbolom sme si vytvorili vlastnú knižnicu, v ktorej sme mali uložené stopy podľa kódu puzdra a kvôli našej nižšej expertíze s SMD súčiastkami sme napríklad polarizovanému 220uF kondenzátoru prideliť puzdro 0603, v ktorom kondenzátory s takou kapacitou nie sú vyrábané, čo bolo potrebné vyriešiť naspájkovaním THT súčiastok na príslušné miesta. Pri dvoch z týchto kondenzátorov sa nám podarilo odtrhnúť od dosky spájkovaciú plôšku aj s kusom cestičky, čo sme museli vyriešiť prepojením komponentov pomocou tenkého drôtu. Ďalším problémom bol fakt, že pre niektoré MOLEX MegaFit konektory sme našli len vertikálnu stopu, čo spôsobilo o trochu väčšie rozmery dosky na strane 1x2 konektorov, ako aj potrebu upraviť dizajn skrinky na konektory smerujúce kolmo na dosku. Obvod napájania taktiež nie je efektívny a ďalšia revízia obvodu bude obsahovať jednoduchšiu a kompaktnejšiu napájaciu časť, ktorá bude napájaná 12V jednosmerným napätím zo sieťového adaptéra namiesto troch diskretných transformátorov, a aj tak bude schopná adekvátne napájať všetky súčasti obvodu.

Po skonštruovaní dosiek sme najskôr oživilí dosku zdroja a dosku zenerového regulátora, na ktorom sme odmerali spočiatku vyššie než očakávané hodnoty, ktoré sme dodatočne nakalibrovali na toleranciu 0.05V. Nasledovalo pripojenie 17 voltov na hlavný napájací pin hlavnej dosky z laboratórneho zdroja pre simuláciu usmerneých 12 voltov. Zdroj sme mali nastavený na vypnutie v prípade prekročenia stanoveného prúdu, čo z dôvodu množstva kondenzátorov v regulačnej časti viackrát spôsobilo chybové hlásenie zdroja o skratke. Po prepnutí zdroja na obmedzovanie napätia prúdom sme úspešne dovedli napätie a nakalibrovali regulátory na doske, čím sme dosiahli potrebné napätie 11,98 voltov a 5,25 voltov na príslušných častiach obvodu. Po kontrole kľúčových bodov voltmetrom a po kontrole teploty komponentov sme uzavreli oživenie dosky a považujeme ho za úspešné. Nasledoval pokus o nahranie nášho programu do čipu, čo však bolo sťažené komunikačnými problémami medzi čipom a USB prevodníkom. Zatiaľ sa nám program nepodarilo nahráť z dôvodov uvedených vyššie.

Asi najväčším problémom pre nás bolo pracovať efektívne v oficiálnom prostredí ESP32, ESP-IDF. Toto prostredie nie je najspoľahlivejšie pre začínajúcich vývojárov, nakoľko nie je intuitívne a vyžaduje od používateľa hlboké znalosti programovacieho jazyka C. Zároveň je časovo náročné na prvotnú inicializáciu, keďže vyžaduje inštaláciu viacerých doplnkových balíčkov. Pre nás bolo problematické zoznámiť sa s týmto prostredím, aj keď sme ho spúšťali cez vývojovú platformu Visual Studio Code. Napríklad pre konfiguráciu využíva ESP-IDF menu nastavenia namiesto JSON súborov.

Softvérová časť nášho projektu je rozdelená na tri časti: Riadiacu, komunikačnú a zobrazovaciu. Na mikrokontroléri ESP32 beží program, ktorý zbiera merania z rôznych senzorov, porovnáva ich s dopredu nastavenými hodnotami a vyhodnocuje vhodnú reakciu, napríklad pridaním živín alebo prečerpaním vody. Popri tom merané hodnoty, ako aj stav aktuátorov posiela cez MQTT server na Raspberry Pi, ktoré zasa tieto údaje spracuje a odosle príjemcovi: Node-RED. Tam sú údaje preposlané cez InfluxDB na Grafanu. Na komunikáciu s Raspberry Pi využíva ESP32 Wi-Fi.

Pri návrhu softvérovej časti sme sa nakoniec rozhodli preda len využívať vývojové prostredie ESP-IDF aj napriek jeho relatívne strmé krivke zručnosti. Pre začínajúceho vývojára môže práca s týmto vývojovým prostredím spočiatku predstavovať výzvu. Pre jeho plnohodnotné využívanie je potrebné poznať jazyk C do hĺbky, ako aj dôkladne porozumieť dokumentácii od firmy Espressif. V našom prípade bol toto jeden z dôvodov, prečo sme neboli schopní náš návrh plne implementovať.

Vzhľadom na úspešné naplnenie hlavného cieľa projektu, v budúcnosti by sme mohli zvážiť nasledovné impulzy pre ďalšiu prácu:

- Preskúmať a analyzovať možnosti optimalizácie kódu, aby sme dosiahli efektívnejšie využitie zdrojov mikrokontroléra a zlepšili výkon systému.
- Na základe získaných skúseností z aktuálneho prototypu by sme mohli navrhnúť a vyrobiť vylepšené verzie hardvéru, ktoré by mohli ponúkať zlepšenú spoľahlivosť, kompaktnosť a výkon.
- Pokračovať v testovaní a zhodnotení nášho systému v rôznych podmienkach a prostrediach. Skúmať jeho výkon, spoľahlivosť a dlhodobú udržateľnosť.
- 1 mm pre BNC konektor.

Tieto impulzy môžu slúžiť ako smerovanie pre budúcu prácu a ďalší vývoj nášho hydroponického systému.

Literatúra

- [1] DEBANGSHI, U.: *Hydroponics – An Overview*. Chronicle of Bioresource Management, 5(3), 110-114, 2021. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z URL: http://www.pphouse.org/cbm-article-details.php?cbm_article=43.
- [2] RAI, H. M.; SINGH, M. K.; MISHRA, A. N.: *Hydroponic Agriculture System a Potential Solution to the World's Food Shortage: A Review*. 2022. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z URL: https://www.researchgate.net/publication/361275103_Hydroponic_Agriculture_System_a_Potential_Solution_to_the_World's_Food_Shortage_A_Review.
- [3] TEXIER, W.: *Hydroponie pro každého*. Mama Editions, 2014. [cit. 2023-03-05]. ISBN: 9782845940918.
- [4] HERSHEY, D. R.: *Solution Culture Hydroponics: History & Inexpensive Equipment*. The American Biology Teacher, 56(2), 111-118, 1994. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.2307/4449764>.
- [5] TORABI, M.; MOKHTARZADEH, A.; MAHLOOJI, M.: The Role of Hydroponics Technique as a Standard Methodology in Various Aspects of Plant Biology Researches. In T. Asao (Ed.), *Hydroponics: A Standard Methodology for Plant Biological Researches*, 2012. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z URL: <https://golias.net/akvaristika/docs/Hydroponics%20-%20A%20Standard%20Methodology%20for%20Plant%20Biological%20Researches.pdf>.
- [6] DHOLWANI, S. J.; MARWADI, S. G.; PATEL, V. P.; DESAI, V. P.: Introduction of hydroponic system and its methods. *International Journal for Research Trends and Innovation*, 3(3), 2018. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z URL: <https://www.ijrti.org/papers/IJRTI1803011.pdf>.
- [7] LEE, S.; LEE, J.: Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of hydroponic food production methods. *Scientia Horticulturae*, 195, 206-215, 2015. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.011>.
- [8] GIACOMELLI, G. A.; WEEL, P. A.; BLOK, C.: Ebb and flood nutrient delivery system for sustainable automated crop production. *Acta Horticulturae*, 1296, 1129-1136, 2020. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2020.1296.154>.
- [9] VAN OS, E. A.; GIELING, Th. H.; LIETH, J. H.: Chapter 13 - Technical Equipment in Soilless Production Systems. In: *Soilless Culture* (2nd ed.), M.

- Raviv, J. H. Lieth, & A. Bar-Tal (Eds.), Elsevier, 2019, pp. 587-635. [cit. 2023-03-15]. ISBN: 9780444636966.
- [10] ECOIDEAZ: *Choosing the Right Kind of Hydroponics Systems for your Plants*. 2022. [cit. 2023-03-15]. [online] Dostupné z URL: <https://www.ecoideaz.com/choosing-the-right-kind-of-hydroponics-systems-for-your-plants/> [Accessed 2022-10-07].
- [11] BUSSELL, W. T.; MCKENNIE, S.: Rockwool in horticulture, and its importance and sustainable use in New Zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 32(1), 29-37, 2004. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1080/01140671.2004.9514277>.
- [12] GRILLAS, S.; LUCAS, M.; BARDOPOULOU, E.; SARAFOPOULOS, S.; VOULGARI, M.: Perlite based soilless culture systems: current commercial applications and prospects. *Acta Horticulturae*, (548), 105-114, 2001. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2001.548>.
- [13] AL MESELMANI, M.A.: Nutrient Solution for Hydroponics. In: TURAN, M., ARGIN, S., YILDIRIM, E., GÜNEŞ, A. (eds.) *Recent Research and Advances in Soilless Culture*. IntechOpen, 2022, pp. 17-38. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z URL: <https://www.intechopen.com/chapters/80089>.
- [14] DORDIO, A., CARVALHO, A.: *Constructed wetlands with light expanded clay aggregates for agricultural wastewater treatment*. *Science of The Total Environment*, 463-464, 2013, pp. 454-461. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.052>.
- [15] MARIOTTI, B., MARTINI, S., RADDI, S., TANI, A., JACOBS, D.F., OLIVIERI, J.A., MALTONI, A.: *Coconut Coir as a Sustainable Nursery Growing Media for Seedling Production of the Ecologically Diverse Quercus Species*. *Forests*, 11(5), 2020, article 522. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/5/522>.
- [16] RASPBERRY PI LTD.: *RP2040 Datasheet: A microcontroller by Raspberry Pi*. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>.
- [17] ESPRESSIF SYSTEM: *ESP8266EX Datasheet*. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf.

- [18] ESPRESSIF SYSTEM: *ESP32-WROOM-32E/ESP32-WROOM-32UE Datasheet*. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.
- [19] ST MICROELECTRONICS: *STM32F103CB Datasheet*. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103cb.pdf>.
- [20] Ayyub, I. (2023). PIC16F84A DHT22/AM2302/RHT03 Sensor Proteus simulation. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: <https://pic-microcontroller.com/pic16f84a-dht22am2302-r>.
- [21] ELPROCUS: “*BH1750 Specifications and Applications*.” EIProCus, 2019. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: <https://www.elprocus.com/bh1750-specifications-and-applications/>.
- [22] ESPRESSIF SYSTEM: *ESP8266: A cost-effective and highly integrated Wi-Fi MCU for IoT applications*. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>.
- [23] Espressif, *ESP32 Boot Mode Selection*, 2020. [cit. 2023-04-03] Dostupné z URL: <https://github.com/espressif/esptool/wiki/ESP32-Boot-Mode-Selection>.
- [24] DOUXCHAMPS, D.: *pH meter*. [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: https://damien.douxchamps.net/elec/ph_meter/.
- [25] BLUE-WHITE INDUSTRIES: *Peristaltic Pump Wear Factors*. [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z URL: <https://www.blue-white.com/article/peristaltic-pump-wear-factors/>.
- [26] SKOOG, D. A., HOLLER, F. J., CROUCH, S. R.: *Principles of Instrumental Analysis*. Thomson Brooks/Cole, 2006. [cit. 2023-04-10]. ISBN 978-0495012016.
- [27] HAYASHI, M.: *Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion*. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 96, 2004. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:EMAS.0000031719.83065.68>.
- [28] WITTMAN, M.: *Understanding EC, TDS and PPM*. [online] *Maximum Yield*, 2016. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z URL: <https://www.maximumyield.com/understanding-ec-tds-and-ppm/2/1343>.

- [29] RATCLIFFE, M.: *Three Dollar EC - PPM Meter [Arduino]*. [online] *Hackaday.io*, 2015. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z URL: <https://hackaday.io/project/7008-fly-wars-a-hackers-solution-to-world-hunger/log/24646-three-dollar-ec-ppm-meter-arduino>.
- [30] RADIOMETER ANALYTICAL SAS: *Conductivity Theory and Practice*. France: Radiometer Analytical SAS, 2004. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z URL: <https://www.tau.ac.il/~chemlaba/Files/Theoryconductivity.pdf>.
- [31] Vishay Intertechnology, *Vishay Semiconductors Optocoupler, Phototriac Output, Zero Crossing*, 2023. [cit. 2023-04-10]. [Online]. Dostupné: <https://www.vishay.com/docs/70628/70628.pdf>.
- [32] BASSI, A., LANGE, S.: The Need for a Common Ground for the IoT: The History and Reasoning Behind the IoT-A Project. In: BASSI, A., BAUER, M., FIEDLER, M., KRAMP, T., VAN KRANENBURG, R., LANGE, S., MEISSNER, S. (Eds.). *Enabling Things to Talk: Designing IoT solutions with the IoT Architectural Reference Model*. Cham, Switzerland: Springer, 2013, s. 13-16. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-40403-0_2.
- [33] GLÓRIA, A., CERCAS, F., SOUTO, N.: Comparison of communication protocols for low-cost Internet of Things devices. In: *South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, Kastoria, Greece. 2017, s. 1-6. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8088226>
- [34] MAHMOUD, R., YOUSUF, T., ALOUL, F., ZUALKERNAN, I.: Internet of Things (IoT) Security: Current Status, Challenges and prospective measures. *International Journal for Information Security Research (IJISR)*, 5(4), 336-341. 2015. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7412116>.
- [35] CALIHMAN, A. Architectures in the IoT Civilization. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z URL: <https://www.netburner.com/learn/architectural-frameworks-in-the-iot-civilization/>.
- [36] RAVIDAS, S., LEKIDIS, A., PACI, F., ZANNONE, N.: Access control in Internet-of-Things: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 144, 79-101. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.017>.

- [37] BAKALE, P.: IoT Network Protocol Stack: Gateway to Cloud. LinkedIn. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z URL: <https://www.linkedin.com/pulse/iot-network-protocol-stack-gateway-cloud-priti-bakale>.
- [38] SOURI, A., HUSSIEN, A., HOSEYNINEZHAD, M., NOROUZI, M.: A systematic review of IoT communication strategies for an efficient smart environment. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, e3736. 2019. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1002/ett.3736>.
- [39] THOUTAM, V.: A Comprehensive Review on Communication Enablers and Communication Models of IoT. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, 10(2), 12-18. 2018. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.55529/ijitc.12.12.18>.
- [40] HANES, D., SALGUEIRO, G., GROSSETETE, P., BARTON, R., HENRY, J.: *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*. 1st ed. San Francisco, CA, USA: Cisco Press. 2017. [cit. 2023-04-20]. ISBN: 1587144565.
- [41] SANTOS, R.: *Getting Started with ESP32 Development Board*. Random Nerd Tutorials. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z URL: <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/>.
- [42] BASUMALLICK, Ch.: *What is Raspberry Pi? Everything You Need to Know*. Spiceworks. 2022. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z URL: <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-raspberry-pi/>.
- [43] RICHARDSON, M., WALLACE, S.: *Getting Started with Raspberry Pi*. 3rd ed. United States: Make Community, 2016. [cit. 2023-05-20]. ISBN 978-1-68045-421-8.
- [44] ABEL: *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. Platan, 2000. [cit. 2023-05-20]. ISBN 80-902733-2-7.
- [45] KNIGHT, M.; PATERSON, S.: *HydroBot - Automated Hydroponics*. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z URL: <https://www.kickstarter.com/projects/hydrobot/hydrobot-automated-hydroponics/description>.

Zoznam príloh