

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Systém hydroponického pěstování rostlin

Filip Černý

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.

Studijní program: Kybernetika a robotika

Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černý** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **499149**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systém hydroponického pěstování rostlin

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh a implementace hydroponického systému včetně řídicí jednotky. Při vypracování se řiďte následujícími pokyny:

- 1) Proveďte přehled systémů pro pěstování rostlin v alternativních pěstebních substrátech
- 2) Na základě přehledu navrhnete prototyp nízkonákladového hydroponického systému
- 3) Navrhnete a implementujete programové vybavení pro řízení systému
- 4) Porovnejte výsledek práce s existujícími řešeními

Seznam doporučené literatury:

- [1] RESH, H. M. A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower, 551p. 2013.
[2] SARASWATHI, D., et al. Automation of hydroponics green house farming using IoT. In: 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA). IEEE, 2018. p. 1-4.
[3] CHOWDHURY, Muhammad EH, et al. Design, construction and testing of IoT based automated indoor vertical hydroponics farming test-bed in Qatar. Sensors, 2020, 20.19: 5637

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2023/2024

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji v první řadě vedoucímu práce doc. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za odborné vedení a čas strávený nad mojí prací.

Dále děkuji mé rodině za rady k realizaci neelektronické části projektu, bez kterých by pro mě konstrukce prototypu byla výrazně složitější.

Prohlášení

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

V Praze dne 26. května 2023

Abstrakt

Tato práce uvádí čtenáře do tématu hydroponického pěstování rostlin. Představuje způsoby pěstování, hydroponické substráty, potřeby rostlin a v neposlední řadě možnosti automatizace v tomto odvětví. V druhé části tato práce nabízí prototyp nízkonákladového hydroponického systému, který minimalizuje nároky na finance a množství spotřebované vody. Základem prototypu je řídicí jednotka, skrze kterou je možné automatizovat širokou škálu hydroponických systémů. Tato jednotka je ovládána z grafického uživatelského rozhraní, ke kterému je možné připojit se z mobilního telefonu, počítače či tabletu. Posledním bodem práce je srovnání vyvinutého prototypu s hydroponickými systémy podobného charakteru.

Klíčová slova: hydroponie, automatizace, webservice, mikrokontrolér

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Abstract

This work introduces the reader to hydroponic farming. It covers techniques of cultivation, hydroponic substrates, plant requirements and possibilities for automation in this area. In the second part, this work offers a prototype of a low-cost hydroponic system which minimizes financial needs and the amount of consumed water. The basis of the prototype is a control unit designed to automate a wide range of hydroponic systems. This unit is controlled via graphical user interface, which is useable on mobile phones, computers and tablets. Last point of this work is a comparison of proposed prototype with other similar hydroponic systems.

Keywords: hydroponics, automation, webservice, microcontroller

Title translation: Hydroponic plant growing system

Obsah

1 Úvod	1	7.3.2 Senzor rozpuštěných pevných částí	28
1.1 Motivace	1	7.3.3 Senzor pH	30
1.2 Rozložení práce	2	7.3.4 Čerpadla	31
2 Historie	3	7.3.5 Zdroj napětí	31
3 Způsoby pěstování	5	7.4 Software	32
3.1 Deep water culture	5	7.4.1 Sensory	32
3.2 Nutrient film technique	6	7.4.2 Řízení	33
3.3 Ebb and flow	6	7.4.3 Uživatelské rozhraní	34
3.4 Drip hydroponie	7	7.5 Možné rozšíření	34
3.5 Aeroponie	7	8 Srovnání s existujícími řešeními	37
3.6 Vertikální hydroponie	8	9 Závěr	39
3.7 Aquaponie	8	Literatura	41
4 Substráty	9	Zdroje obrázků	47
4.1 Skelná vata	9	A Plné schéma zapojení	49
4.2 Keramzit	10	B Příložené soubory	51
4.3 Perlit	10	B.1 Adresářový strom	51
4.4 Kokosová kůra	10	B.2 Obsah příložených souborů	51
4.5 Ovčí vlna	11		
4.6 Štěrk	11		
5 Požadavky hydroponicky pěstovaných rostlin	13		
5.1 Živiny	13		
5.2 Voda	15		
5.3 Osvětlení	15		
5.4 Strukturální požadavky	16		
6 Automatizace hydroponických systémů	19		
6.1 Řídicí jednotka	19		
6.2 Sensory	19		
6.2.1 pH senzor	20		
6.2.2 EC senzor	20		
6.3 Spínání zátěží	20		
6.3.1 Relé	21		
6.3.2 Tranzistor	21		
6.3.3 H-můstek	21		
7 Prototyp hydroponického systému	23		
7.1 Popis systému	23		
7.2 Konstrukce	23		
7.2.1 Nádoby	24		
7.2.2 Trubky	25		
7.2.3 Těsnění	26		
7.3 Elektronika	26		
7.3.1 Mikrokontrolér	26		

Obrázky

2.1 Gerickeho rajčata [56].	3	7.14 Vývojový diagram běhu programu řešícího zalévání a dávkování hnojiva a pH-.	33
3.1 Schéma fungování DWC [57].	5	7.15 Obrazovka uživatelského rozhraní.	34
3.2 Schéma fungování NFT [57].	6		
3.3 Schéma fungování EAF [57].	6		
3.4 Schéma fungování drip [57].	7		
3.5 Schéma fungování aeroponie [57].	7		
4.1 Skelná vata.	9		
4.2 Keramzit.	10		
4.3 Perlit.	10		
4.4 Kokosová kůra.	10		
4.5 Ovčí vlna.	11		
4.6 Štěrk.	11		
5.1 Vliv pH na dostupnost živin pro rostlinu [16].	14		
5.2 Závislost vstřebávání chlorofylů na vlnové délce světla [58].	16		
6.1 Schéma fungování elektromechanického relé [59].	21		
6.2 Ideové schéma H-můstku [60].	22		
7.1 Schéma prototypu hydroponického systému.	24		
7.2 Boční pohled na prototyp automatického hydroponického systému.	24		
7.3 Rezervoár.	25		
7.4 Záplavová vana.	25		
7.5 Potravinářská trubka.	25		
7.6 Potravinářská průchodka.	25		
7.7 Blokový diagram zapojení elektroniky v řídicí jednotce.	26		
7.8 Pohled na zapojení řídicí jednotky.	27		
7.9 Pinout vývojové desky použité jako řídicí jednotka [61].	28		
7.10 Graf závislosti výstupu AD převodníku na napětí na jeho vstupu [62].	28		
7.11 Graf závislosti TDS na napětí na výstupu senzoru.	29		
7.12 Vizualizace kalibrace pH senzoru.	31		
7.13 Schéma zapojení použitého regulátoru napětí.	32		

Tabulky

8.1 Přehled rozdílů mezi navrženým prototypem a ostatními řešeními z akademické sféry.	38
---	----

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

Hydroponie je způsob pěstování rostlin za použití roztoku živin namísto tradiční půdy. V posledních letech můžeme pozorovat zvýšený zájem o automatizaci a zefektivňování zemědělství daný neustále rostoucí světovou populací [1]. Lidé také stále více upřednostňují lokálně pěstované plodiny. Hydroponické systémy jsou ve srovnání s tradičním zemědělstvím automatizovatelné velmi dobře, a mají proto potenciál výrazně zvýšit efektivitu a produktivitu pěstování rostlin pro lidskou konzumaci a to v podstatě kdekoliv na světě. Další nespornou výhodou hydroponie je výrazné snížení míry plýtvání vodou, to má za následek větší ekonomičnost i ekologičnost produkce. Díky těmto výhodám umožňuje hydroponie lokální pěstování zeleniny v podmínkách, které jsou pro tradiční zemědělství velice nepříznivé. Příkladem je oblast Perského zálivu, kde vysoké teploty a nízký úhrn srážek vytváří pro rostliny nepřátelské prostředí. [2]. Hydroponické systémy zároveň vyžadují méně hnojiv, čímž dále zefektivňují rostlinnou výrobu.

V současné době je již značná část trhu pokryta produkty hydroponie a trh s hydroponicky pěstovanými plodinami nadále roste [3]. V hydroponických sklenicích se pěstují mimo jiné rajčata, jahody, saláty, bylinky a ostatní zelené listové potraviny a to včetně sezóny, kdy tyto plodiny nelze pěstovat tradičním způsobem.

Podobně jako v ostatních odvětvích lidské produkce, je i v hydroponickém pěstování rostlin trendem automatizace. Pro bezproblémový chod hydroponického systému je třeba pravidelně provádět měření parametrů živného roztoku a na základě výsledků případně upravovat jeho složení. Dále je třeba monitorovat osvětlení, teplotu v neposlední řadě činnost čerpadel zajišťujících tok vody. Všechny tyto úkony je v dnešní době možno plně automatizovat pomocí běžně dostupných součástek. Nejde přitom pouze o šetření lidské práce a o prevenci chyb. V ideálním případě má totiž přesnost senzorů a řídicích systémů za následek zdravější a tudíž plodnější rostliny. Automatizace otevírá možnosti také sběru dat o zdraví rostlin v závislosti na složení živného roztoku. Na základě těchto dat je možné zpřesňovat představu o požadavcích jednotlivých pěstovaných odrůd a tím dále zefektivňovat produkci.

1.2 Rozložení práce

Tato práce se bude zabývat návrhem nízkonákladového automatizovaného hydroponického systému včetně řídicí jednotky. Návrhu bude předcházet rešeršní část práce, která prozkoumá možnosti automatizované hydroponie a ze které vyplynou parametry výsledného systému. Práce je strukturována do kapitol následujícím způsobem.

- **Kapitola 2 - Historie** uvede čtenáře do historického kontextu pěstování rostlin v alternativních pěstebních substrátech a naznačí jakým směrem by se obor mohl vyvíjet dál.
- **Kapitola 3 - Způsoby pěstování** představí techniky hydroponického pěstování rostlin a vyhodnotí jejich výhody a nevýhody.
- **Kapitola 4 - Substráty** popíše substráty používané při pěstování rostlin mimo tradiční zeminu a srovná jejich přednosti i nedostatky.
- **Kapitola 5 - Požadavky hydroponických systémů** vytvoří přehled požadavků rostlin pro jejich zdravý a bezproblémový růst.
- **Kapitola 6 - Automatizace hydroponických systémů** se bude zabývat automatizací hydroponických systémů. Zaměří se na používané senzory a možnosti spínání ovládaných zátěží pomocí řídicí jednotky.
- **Kapitola 7 - Prototyp hydroponického systému** představí navržený prototyp nízkonákladového hydroponického systému vhodného pro domácí pěstování. Zabývat se přitom bude volbou komponentů, zapojením elektroniky, použitým softwarem a nakonec uživatelským rozhraním.
- **Kapitola 8 - Srovnání s existujícími řešeními** srovná výsledný prototyp s podobnými řešeními z akademické i komerční sféry.

Kapitola 2

Historie

Přestože se o hydroponii v masových informačních kanálech začalo mluvit teprve poměrně nedávno, sahají její kořeny tisíce let do historie. Koncept pěstování rostlin ve vodě lze vystopovat již ve starověkém Egyptě a Mezopotámii, kde zemědělci pěstovali plodiny v živinami nasycených údolích řek. Bájně visuté zahrady Semiramidiny, které byly zavlažovány systémem do sebe stékajících kanálů, bývají dokonce řazeny mezi sedm divů světa [4]. V Mezopotámii ale starověká hydroponie nekončí, Aztékové údajně využívali výhod hydroponie od 10. století n.l., Číňané pak od 13. století n.l. [5].

První publikaci věnující se pěstování rostlin bez půdy vydal Anglický filosof Francis Bacon roku 1627 [6]. V návaznosti na jeho dílo se hydroponie stala bodem zájmu pro další učence té doby. Roku 1699 John Woodward objevil, že rostliny rostou lépe ve vodě znečištěné zeminou. Ve druhé polovině devatenáctého století již bylo lidstvu známo, jaké podmínky rostliny potřebují k prospívání v prostředí bez hlíny. Vynález moderní hydroponie bývá připisován Dr. William F. Gericke, profesoru na Kalifornské univerzitě v USA. Gericke ve dvacátých letech minulého století provedl sérii experimentů, kde vědecky ověřil, že rostliny lze pěstovat za absence půdy, pouze v roztoku hnojiv [7]. Gericke také jako první použil slovo hydroponie a dal tak celému oboru jméno. Nedokázal možnosti hydroponie však jen laboratorně, sám úspěšně vypěstoval rajčata dosahující výšky přes sedm metrů, což dokazují fotografie z dobových novin na obrázku 2.1. Jeho systém však nebyl připraven na komerční nasazení, protože stále potřeboval příliš mnoho údržby, než aby mohl generovat zisk. Na Gerickeho výzkum navázali v roce 1938 vědci ze stejné univerzity Dennis Hoagland



Obrázek 2.1: Gerickeho rajčata [56].

a Daniel Arnon svým dílem *The Water Culture Method for Growing Plants without Soil* [8]. Tato publikace je považována za klíčovou pro rozvoj oboru a některé poznatky o živných roztocích z ní jsou používány dodnes.

Během druhé světové války byla moderní hydroponie nasazena ve větším měřítku [9]. Zprvu zásobovala čerstvou zeleninou americké vojáky, postupně se ale rozšířila také do komerční sféry v mnoha zemích světa. Nyní je hydroponie používána k pěstování ovoce, zeleniny, okrasných květin, lékařského konopí a mnoha dalších plodin. Hydroponický trh navíc neustále roste. Po celém světě vznikají skleníky, ve kterých je hydroponický přístup k zemědělství doplněn o automatizaci, čímž vzniká velmi efektivní proces rostlinné výroby.

I do budoucna můžeme předpokládat rostoucí zájem o toto odvětví. Vesmírné agentury investovaly do výzkumu pěstování plodin bez půdy velké množství peněz i úsilí a lze tak předpokládat, že i první lidé na Marsu budou jíst produkty hydroponie [10].

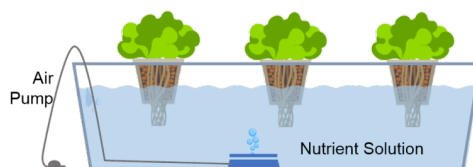
Kapitola 3

Způsoby pěstování

Všechny hydroponické systémy sdílí několik společných charakteristik, jde hlavně o absenci půdy, zasazení rostliny do alternativního substrátu a o distribuci živin skrze roztok s nutrienty. Právě v realizaci distribuce živin se systémy liší nejvíce. Dalším nezanedbatelným rozdílem mezi způsoby hydroponického pěstování je recyklace vody. Některé systémy totiž mají výhodu možnosti recyklace vody, což má jasné ekonomické i ekologické benefity. Různé pěstební techniky mají různá specifika a hodí se tak pro různé plodiny. Uvažujeme-li aktivní hydroponické systémy, tedy jen ty, ve kterých je na rozdíl od pasivních zapotřebí elektronických součástí, můžeme je klasifikovat do pěti kategorií [11]. Nad rámec těchto kategorií je uvedena vertikální hydroponie a aquaponie. Tyto způsoby pěstování se do jisté míry kryjí se základní pěticí, ale mají každý významná specifika, která je třeba zmínit. Způsoby pěstování jsou ilustrovány na obrázcích 3.1–3.5.

3.1 Deep water culture

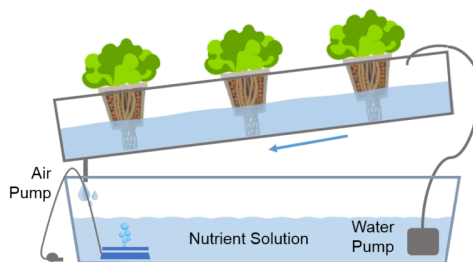
Jde o pěstování rostlin v plovoucím úchytu přímo na hladině roztoku s živinami. DWC vyniká poměrem jednoduchosti a efektivity, vodu není třeba nijak cirkulovat, stačí udržovat vhodné hodnoty nutrientů v kádích, ve kterých jsou ponořené kořeny. Voda musí být neustále ovzdušňována podobně, jako je tomu například v akváriích pro ryby, aby se předešlo uhnívání kořenů. I tak je ale technika DWC vhodná hlavně pro malé a hlavně rychle rostoucí rostliny, jako je například hlávkový salát. Větší rostliny omezuje i přes ovzdušňování problém s uhníváním kořenů.



Obrázek 3.1: Schéma fungování DWC [57].

3.2 Nutrient film technique

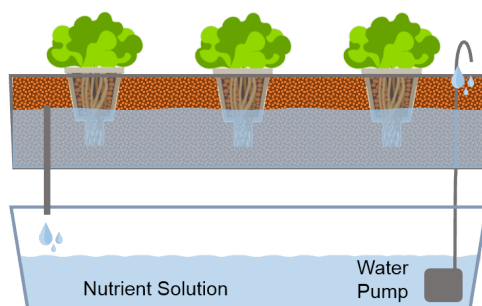
Jak název (z aj. technika vrstvy živin) napovídá, jde o způsob pěstování rostlin s kořeny ponořenými v tenké vrstvě roztoku s optimálním zastoupením nutrientů potřebných k růstu dané rostliny. Vrstva roztoku neustále proudí, čímž zajišťuje dostatek kyslíku i živin pro kořeny. NFT je vhodná spíše pro menší rostliny, které nemají příliš rozsáhlé kořenové systémy. Ty totiž mohou v krajním případě až ucpat celý systém a tím zabít ostatní pěstované plodiny.



Obrázek 3.2: Schéma fungování NFT [57].

3.3 Ebb and flow

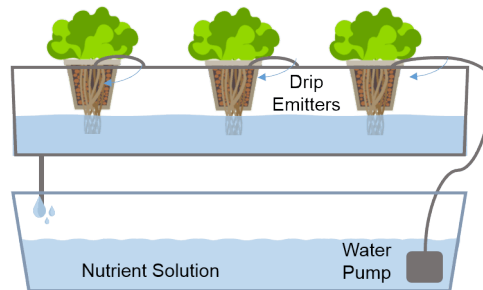
Na rozdíl od NFT a DWC funguje EAF v cyklu. Květináče s plodinami v substrátu jsou v pravidelných intervalech naplněny vodou s rozpuštěnými živinami. Kořeny si tak mohou vzít potřebnou vláhu a nutrienty, které rostliny potřebují k životu. Po uplynutí stanoveného intervalu je voda vypuštěna zpět do rezervoáru a cyklus se opakuje. Chvilky bez vody dávají kořenům dostatečný čas pro přísun vzduchu, který je nezbytný pro prevenci uhnívání kořenů. Tato technika má nad výše zmiňovanými výhodou možnosti pěstování takřka neomezeně velkých rostlin. EAF systém je také možné zprovoznit s poměrně nízkými náklady a funguje i v malém měřítku. Některé EAF systémy využívají gravitace a principu spojených nádob, jiné sázejí na přečerpávání pomocí dalších čerpadel. V závislosti na zvoleném řešení je potřeba jedno až dvě čerpadla. Nevýhodou EAF je neefektivní využití substrátu a náchylnost k nežádoucímu růstu řas v rezervoáru.



Obrázek 3.3: Schéma fungování EAF [57].

3.4 Drip hydroponie

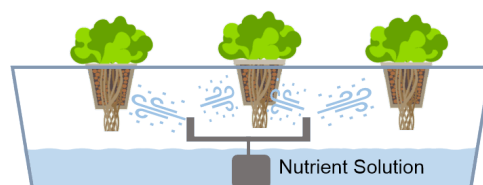
Hydroponické systémy typu drip mají stejně jako ostatní systémy rezervoár s živným roztokem. Z tohoto rezervoáru jde podobně jako od ostatních trubka. Tato trubka se větví do několika hadiček, z nichž každá má na starost zavlažování právě jedné rostliny. Voda může proudit ve vymezených intervalech, jako je tomu u EAF, ale některé systémy využívají konstantního toku, jako je tomu u NFT. Záleží na potřebách konkrétní rostliny a také na rychlosti vysychání zvoleného substrátu. Drip hydroponie je obzvláště vhodná pro větší rostliny, jako jsou rajčata, papriky nebo fazole. Pro malé rostliny jsou vhodnější jiné popsané techniky. Nevýhodou drip je náchylnost systému k ucpávání hadiček malými kousky hnojiv, kořenů či substrátů.



Obrázek 3.4: Schéma fungování drip [57].

3.5 Aeroponie

Na rozdíl od ostatních jmenovaných nevyžaduje aeroponie přímé ponoření kořenů do živného roztoku. Namísto ponoření sází aeroponie na ostříkávání kořenů rostlin roztokem s nutrienty, což má za výhodu lepší okysličení kořenů. Kvalitně zkonstruovaný aeroponický systém je velmi výnosný a nepříliš náchylný k chybám. Kořeny mohou z jemných kapek velmi efektivně vstřebávat živiny. Mezi nevýhody aeroponického systému se řadí složitější implementace a vyšší cena spojená s potřebným materiálem.



Obrázek 3.5: Schéma fungování aeroponie [57].

■ 3.6 Vertikální hydroponie

Současným trendem v pěstování rostlin za absence půdy je vertikální hydroponie. Rostliny jsou v trubkovitých nádobách pod sebou zavlažovány konstantním či časovaným proudem vody podobně, jako je tomu u technologie drip. Někdy je namísto proudu vodu použito trysky, čímž vzniká aeroponický systém. Tento způsob pěstování je maximálně efektivní v prostoru a osvětlení. Zásadní nevýhodou vertikální hydroponie je pořizovací cena systému a nemožnost pěstování větších rostlin. Pro zelené listnaté plodiny je však vertikální hydroponie perfektní.

■ 3.7 Aquaponie

Aquaponie je spíš odnoží hydroponie. Jde o jakousi symbiózu rostlin a ryb. Ryby žijící v rezervoáru totiž svým odpadem hnojí rostliny. Toto řešení je poměrně náročné na implementaci. Je třeba přísně oddělit rezervoár od zbytku systému tak, aby se rybám nepodařilo dostat k rostlinám nebo do jiné části vodního vedení. Aquaponie vzbuzuje také etickou otázku, vzhledem k nedostatečnému životnímu prostoru ryb. Z hlediska ekologie jde však o bezkonkurenční řešení, jelikož rostliny jsou pěstovány za použití čistě organického hnojiva, které by jinak bylo nevyužito. Nevýhodou je, že hnojivo produkované rybami má nestálé složení a není vhodné pro všechny druhy rostlin.

Kapitola 4

Substráty

Přesto, že definičním rysem hydroponie je absence půdy, potřebuje téměř každý hydroponický systém nějaký substrát, který poskytne kořenům nutnou strukturu a zasadí rostlinu do systému. V současné době existuje těchto substrátů celá řada. Liší se původem, konzistencí, prodyšností, mírou zadržování vody, udržitelností a dalšími faktory. V závislosti na těchto vlastnostech je pak daný materiál vhodný k pěstování určité skupiny rostlin za použití jistých pěstebních technik. Hydroponie nespolehá na živiny obsažené v hlíně, proto může být substrátem pro použití v hydroponii takřka jakýkoliv materiál. Základní vlastnosti hydroponického substrátu jsou inertnost, schopnost zadržovat vodu a v neposlední řadě schopnost propouštět ke kořenům vzduch. Substráty jsou vyobrazeny na ilustračních obrázcích 4.1–4.6.

4.1 Skelná vata

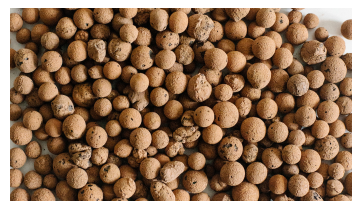
Jeden z nejpoužívanějších substrátů v hydroponii je skelná vata. Tento uměle vyrobený materiál má takřka perfektní vlastnosti zejména pro pěstování malých plodin a pro růst sazenic. Skelná vata je mimo jiné vhodná pro saláty a bylinky, tedy plodiny, které jsou velmi často pěstovány hydroponicky. Používá se i při pěstování větších rostlin, nicméně pouze ve fázi sazenice. Jakmile rostlina povyroste, je přesazena do jiného substrátu, ať už s nebo bez původního kusu skelné vaty. Mezi výhody tohoto materiálu patří struktura vhodná pro kořeny rostlin, schopnost zadržení dostatečného množství vody, nereaktivnost a zdravotní nezávadnost, cena a s ní spojená efektivita produkce. Nevýhodou skelné vaty je její neekologičnost a nebezpečí podráždění kůže pěstitele.



Obrázek 4.1: Skelná vata.

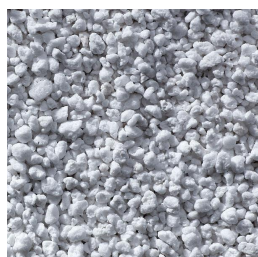
4.2 Keramzit

Keramzit, neboli umělé kamenivo, je podobně jako skelná vata původně stavební materiál. Má ale také velmi dobré vlastnosti pro hydroponii a je v ní proto používán. Tyto kuličky z tepelně zpracovaného jílu jsou inertní (byť ne do stejné míry jako skelná vata), pH-neutrální a poskytují kořenům rostlin podporu podobnou kamenité půdě. Byť je keramzit uměle vyrobený materiál, je snadno recyklovatelný a v přírodě rozložitelný a proto ekologický. Mezi nevýhody keramzitu se řadí vyšší cena, která může ve větším měřítku nepříjemně prodražovat produkt, a hmotnost v nenasyceném stavu. Kuličky keramzitu totiž plavou dokud nenasáknou potřebné množství vody.



Obrázek 4.2: Keramzit.

4.3 Perlit



Obrázek 4.3: Perlit.

Perlit je vulkanické sklo běžně se vyskytující v přírodě, které při vysokých teplotách výrazně zvětší svůj objem. Výsledek je lehká kamenitá drť. Díky nízké hustotě a ceně má perlit opět využití ve stavebnictví i hydroponii. Nízkou hmotnost lze zároveň považovat za nevýhodu, protože kvůli ní perlit ve vodě plove. Podobným způsobem je vyráběn další podobný materiál používaný v hydroponii - vermikulit. Vermikulit je minerál, který podobně jako perlit při vysokých teplotách tvoří lehké kamínky. Na rozdíl od perlitu zadržuje více vody a živin. V hydroponii se setkáváme s mícháním těchto dvou substrátů, protože vzájemně doplňují své kladné vlastnosti.

4.4 Kokosová kůra

Kokosová kůra je plně přírodní zbytkový materiál, který vzniká potravinářskou produkcí. Navzdory intuici však jde o jeden z méně ekologických materiálů používaných v hydroponii. Zpracování kokosové kůry zahrnuje její vymývání velkým množstvím vody, čímž dochází k její kontaminaci. K výrobě metru čtverečního kokosové kůry vhodné pro pěstování rostli je zapotřebí tři až šest hektolitrů vody [12]. Další nevýhodou jsou špatné podmínky pracovníků zabývajících se zpracováním kokosové kůry pro aplikaci v zemědělství. I přes tyto nevýhody je kokosová kůra často používána místo skelné vaty. Při



Obrázek 4.4: Kokosová kůra.

hydrataci se několikrát zvětší a dá tak kořenům rostlin velmi dobré strukturální podmínky, navíc velmi dobře zadržuje vodu – je to tedy prvotřídní hydroponický substrát [13].

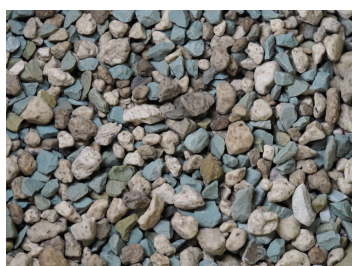
4.5 Ovčí vlna

Ovčí vlna má několik kvalit vhodných pro pěstování rostlin. Jde o přírodní obnovitelný materiál, který je navíc snadno rozložitelný v přírodě a proto ekologický. Vlna dobře nasává a uchovává vlhkost i živiny, navíc je pórézní, což zaručuje dobrou cirkulaci vzduchu [14]. Existuje studie, ve které sklizeň okurek pěstovaných v ovčí vlně předčila sklizně pěstované v rašelině, kokosové kůře, perlitu a skelné vatě [15].



Obrázek 4.5: Ovčí vlna.

4.6 Štěrk



Obrázek 4.6: Štěrk.

Štěrk je ve většině částí světa snadno dostupný a levný. Je snadné ho vyčistit a používat pro pěstování opakovaně. Není však zdaleka vhodný pro každý systém nebo plodinu. Štěrk je ve srovnání s ostatními substráty používanými v hydroponii velmi těžký a velmi málo zadržuje vodu. Je ho proto třeba zalévat velmi často.

Kapitola 5

Požadavky hydroponicky pěstovaných rostlin

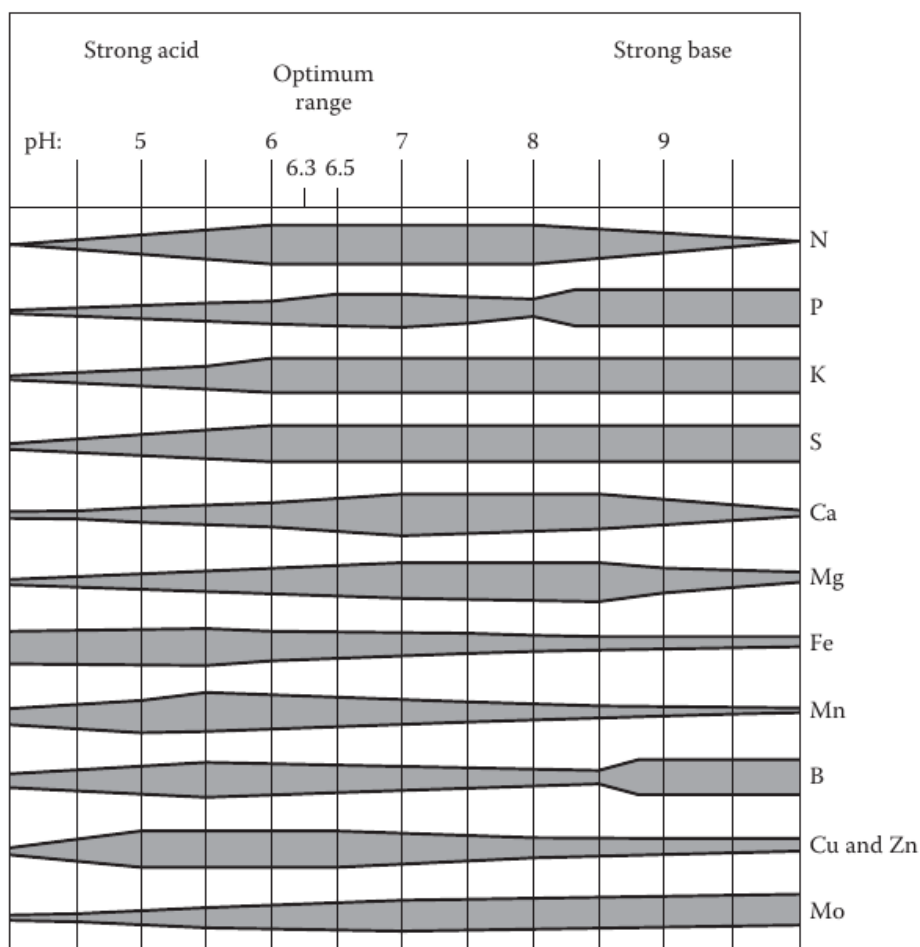
Podobně jako rostliny pěstované způsobem v půdě, mají i hydroponicky pěstované rostliny určité požadavky. Jde zejména o dostatek živin, světla a vhodný prostor, do kterého je možné zapustit kořeny. Každý pěstovaný druh má samozřejmě individuální požadavky v závislosti na velikosti, schopnosti zadržovat vodu, rozsahu kořenového systému atp.

5.1 Živiny

Nároky hydroponických rostlin na živiny jsou do velké míry shodné s tradičně pěstovanými rostlinami. Každá rostlina potřebuje makronutrienty a mikro-nutrienty, z nichž některé jsou pro jejich život nutné a jiné ne [16]. Kromě látek dostupných z hnojiva či půdy jde o kyslík a oxid uhličitý. V největším množství rostliny z hnojiva čerpají dusík, fosfor a draslík. Z těchto tří elementů také pramení původ tzv. NPK poměru, který je často uváděn na běžně dostupných hnojivech. Každý druh rostlin v každé ze svých růstových fází vyžaduje specifické složení dostupných živin. Většina rostlin preferuje během vegetativní fáze převahu dusíku v poměru cca. 3-1-1 a převahu zbývajících dvou prvků během kvetení v poměru cca. 1-3-3.

Nedostatek základních živin ve vodě logicky vede k jejich nedostatku v organismu pěstované rostliny. To má za následek vadnutí, pomalejší růst a další nežádoucí jevy. I opak, tedy příliš velká koncentrace živin, není pro růst rostliny vhodný, protože vede k chemickému poškození kořenů rostlin. Vhodné koncentrace jsou pro jednotlivé druhy hledány empiricky na základě zkušeností pěstitelů nebo skrze rozbor vysušených tkání rostlin [17]. Většina živných roztoků se míchá na koncentrace mezi 1,000 a 2,500 ppm [7]. Konkrétní složení roztoku, tedy poměr živin, závisí na pěstované rostlině. Existují však standardizovaná složení živných roztoků, jako je například tzv. Hoagland solution [8].

Nicméně bohužel nestačí udržovat koncentraci vhodného hnojiva, vstřebávání živin totiž může nepříznivně ovlivněno hned několika nežádoucími jevy. Zásadní vliv na vstřebávání nutrientů má hladina pH, tedy kyselost či zásaditost vody [16]. Optimální hladina pH leží zpravidla někde mezi 6 a 7 pH, dle



Obrázek 5.1: Vliv pH na dostupnost živin pro rostlinu [16].

druhu pěstované rostliny. Na obrázku 5.1 je graf zobrazující vliv hodnot pH na dostupnost živin pro kořeny rostlin. Důležité je také zmínit, že voda nemá oproti půdě kationtovou výměnnou kapacitu [18], takže změny koncentrací živného roztoku mohou být výrazně rychlejší.

V hydroponii bývá většinou monitorována pouze vodivost živného roztoku, ze které lze odhadnout množství hnojiva ve vodě, ale už ne jeho přesné složení. Stejně jako v konvenčním zemědělství poměr živin musí dodržet Liebigův zákon minima [19], který říká, že růst organismu je limitován tím prvkem, kterého je největší nedostatek [17]. Dále může mezi živinami docházet k antagonismu, což v praxi znamená, že přebytek některého prvku blokuje vstřebávání jiného, méně koncentrovaného prvku [20].

Hnojiva používaná v hydroponii mohou být organická či anorganická. Hlavním lákadlem organických hnojiv je ekonomická, ale také ekologická výhodnost. Mají ale bohužel mnoho vad, které vedou minimálně k důkladnému zvážení jejich nasazení v produkci. Mezi tyto vady se řadí proměnlivé chemické složení, možnost přenosu choroby skrze živočišný produkt, malé části blokující

potrubí, degradace hnojiva v čase, nepříjemný odér atp. Za jistých okolností je ale i tak možné použít organická hnojiva společně nebo přímo namísto anorganických hnojiv [21].

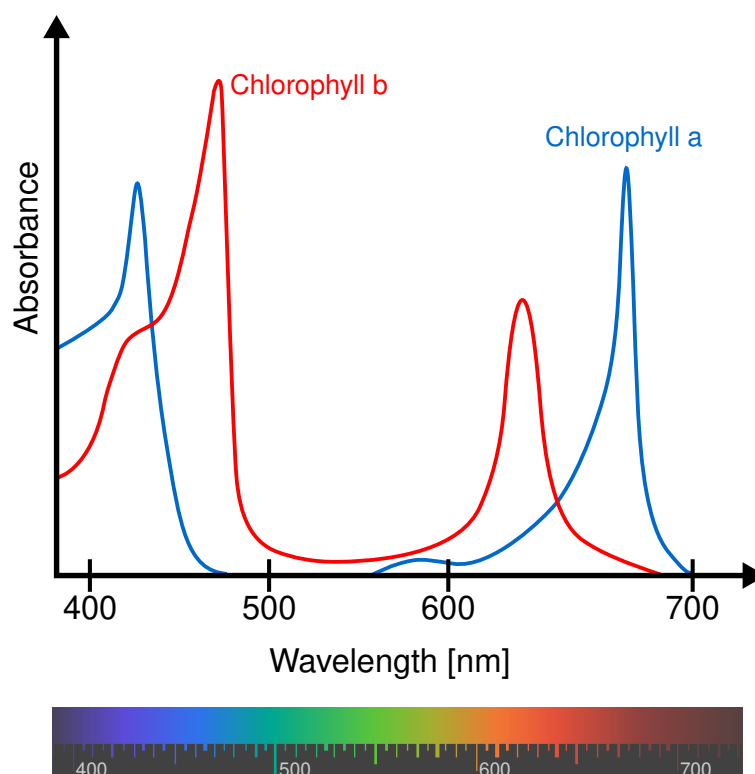
5.2 Voda

Voda je z podstaty věci součástí každého hydroponického systému, to však neznamená, že by jí neměla být věnována pozornost. V závislosti na tvrdosti vody dochází ke zkreslení měření vodivosti a tím pádem k chybě při odhadu koncentrace hnojiva. Destilovaná voda nemá v ideálním případě žádné rozpuštěné pevné části, tedy naměříme hodnotu 0 ppm. Standardně kvalitní vody se pohybuje v rozsahu 101 - 300 ppm a voda horší kvality (většinou za zvýšeného obsahu vodního kamene) dosahuje rozmezí 301 - 600 ppm [22]. Voda použitá v hydroponii by proto měla být v první řadě co nejčistší. Mezi běžná znečištění vody patří sůl, chlór, těžké kovy a další látky běžně obsažené v kohoutkové či dešťové vodě [23]. Ideální, ale neekonomickou, volbou pro hydroponii je tak destilovaná voda. I běžně dostupnou kohoutkovou vodu, například Pražskou [24], je však možné úspěšně použít, případně jí vyčistit snadno dostupnými nástroji. Opomenout nesmíme ani okysličení vody, které je nezbytné pro správnou funkci kořenového systému rostlin [25]. K provzdušnění vody bývají v hydroponii používány akvaristické kompresory či nějaká část systému, kde voda volně proudí za přítomnosti vzduchu.

5.3 Osvětlení

Nároky na světlo je jeden ze směrů, ve kterém je pěstování hydroponických rostlin v zásadě stejné jako pěstování rostlin v hlíně v umělém prostředí. Je tedy možné úspěšně pěstovat rostliny i bez použití umělého světla, ale pokud chceme dosáhnout optimálních sklizní, je vhodné osvětlení rostlin uměle regulovat. Ve venkovním prostředí rostliny dostávají v průměru 8 hodin denního světla, v umělém prostředí to ale může v závislosti na rostlině být 12 až 18 hodin, aby byla sklizeň maximální [26]. Možností realizace umělého osvětlení je hned několik, v zásadě se liší produkovaným barevným spektrem, intenzitou světla, pořizovací cenou a cenou provozu. Nejčastější zdroje světla používané jako umělé osvětlení rostlin jsou LED, zářivky a HID (High-intensity discharge) [27]. Studie srovnávající efektivitu pěstování pod červenými a modrými LED a pod zářivkami ukázala, že rostliny pěstované pod LED mají srovnatelnou váhu stonku za současného ušetření zdrojů v podobě elektřiny [28]. Zdroje světla jsou zpravidla ještě doplněny o reflektivní povrchy, které slouží k odrazení světla, čímž zefektivňují využití energie.

Světlo má různé vlnové délky, které mají vliv na růstové procesy rostlin. Nezbytnou částí fotosyntézy je absorpce chlorofylů, ty se nejlépe vstřebávají z modrého a červeného světla. Naopak většinu zeleného světla rostliny odráží a proto je vidíme zeleně [29]. Na obrázku 5.2 je graf absorpce chlorofylů v závislosti na vlnové délce světla.



Obrázek 5.2: Závislost vstřebávání chlorofylů na vlnové délce světla [58].

Rostliny vyžadují v závislosti na růstovém cyklu různé světelné podmínky podobně jako požadují různé složení hnojiva. Modré světlo je vhodné zdůraznit během vegetativní fáze růstu, zatímco červené světlo by mělo být dominantní během kvetení a zrání plodů. Kvalitní umělé osvětlení by ale přesto mělo zasahovat do všech viditelných vlnových délek světla a simulovat tak roční období, ve kterém rostlina roste v přírodě [29].

5.4 Strukturální požadavky

Stejně jako rostliny v hlíně potřebují i hydroponické rostliny vhodné místo k zapuštění kořenů, případně k růstu. Tyto požadavky jsou značně individuální v závislosti na konkrétní rostlině, přesto lze popsat podobnosti. Záleží zejména na velikosti dané rostliny, rozsahu kořenového systému a na tom, zda je rostlina popínavá. Menší rostliny, jako je například salát, přežijí bez problému i za absence substrátu v systémech DWC, oproti tomu velké rostliny jako jsou rajčata či konopí potřebují vhodný substrát, který nabídne útočiště

rozsáhlejším kořenovým systémem a dovolí rostlině držet svou váhu vzpřímeně. Právě rostliny s většími kořeny mohou v systémech, jako je NFT způsobovat problémy, protože může dojít k ucpání příliš malého potrubí. Samostatnou kapitolou strukturálních požadavků jsou popínavé rostliny, jako například fazole, které mimo jiné vyžadují vhodnou konstrukci, po které mohou růst vzhůru za světlem. Všechny rostliny by měly pro tvorbu zdravých kořenů mít dostatečný prostor pod sebou.

Kapitola 6

Automatizace hydroponických systémů

V automatizaci leží budoucnost zemědělství a proto je to i v hydroponii velmi aktuální a důležité téma. Za pomoci senzorů a čerpadel bývá automatizováno zejména zalévání rostlin, míchání roztoku živin a osvětlení, tedy hlavní úkony prováděné mezi sadbou a sklizní. Systémy mohou být za účelem online monitorování připojeny k internetu v rámci konceptu IoT. Naměřená data mohou následně sloužit k další optimalizaci složení roztoku a časů zalévání.

6.1 Řídicí jednotka

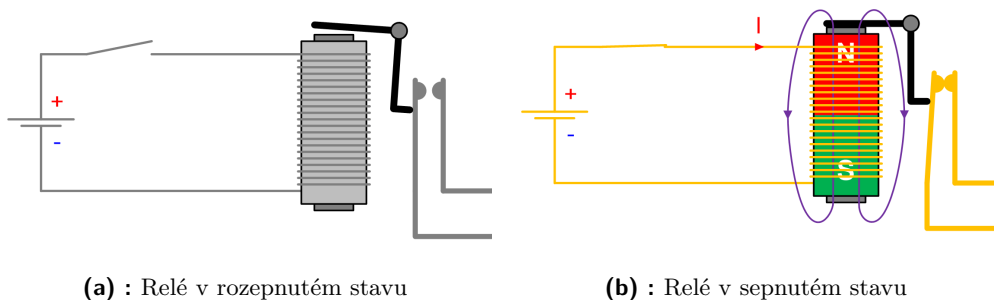
Řídicí jednotkou může v hydroponickém systému být v podstatě jakýkoliv mikrokontrolér či mikropočítač splňující požadavky na I/O. Výpočetní výkon procesoru zařízení není většinou třeba uvažovat, protože zpravidla není zapotřebí provádět výpočetně náročnější úkony. Hlavními kritérii pro výběr je proto zejména dostupnost, cena a efektivita. Populární volbou řídicí jednotky v hydroponickém systému menšího rozsahu je ekosystém Arduino. Dále jsou často používána zařízení ESP32, Raspberry Pi, STM32 a další. Výhodné jsou mikrokontroléry se zabudovanou bezdrátovou komunikací Wi-fi, která pak může být jednoduše použita k propojení systému s okolním světem. Dále je vhodné, aby řídicí jednotka v hydroponickém systému měla analogově-číslicový převodník (ADC), běžná komunikační rozhraní, jako je SPI (Serial peripheral interface), I2C (Inter-integrated circuit), UART (Universal asynchronous receiver-transmitter), a schopnost generovat signál pulsně šířkové modulace (PWM). ADC a komunikační rozhraní jsou potřebné pro čtení dat ze senzorů. PWM může být použita k regulaci výkonu osvětlení nebo čerpadel.

6.2 Senzory

V hydroponickém systému je nezbytné periodicky měřit složení živného roztoku. K tomu účelu se používají senzory elektrické vodivosti a senzory pH. Tyto parametry je často vhodné měřit v systému na více místech, protože promíchání roztoku nemusí být ideální. Naměřená data slouží v první řadě ke zpětnovazebnímu řízení složení roztoku, ale druhotně mohou být také uklá-

6.3.1 Relé

Relé je elektrotechnický spínač složený z elektromagnetu a mechanismu, který při aktivaci elektromagnetu sepne kontakty, a tím uzavře řízený obvod. Proces sepnutí relé je na obrázku 6.1. Na rozdíl od polovodičů umožňuje relé galvanicky oddělit řídicí a řízený obvod. Mezi další výhody relé patří vysoká pracovní teplota a schopnost spínat stejnosměrný i střídavý proud. Naopak mezi nevýhody relé patří nižší spínací rychlost a opotřebení kontaktů [33].



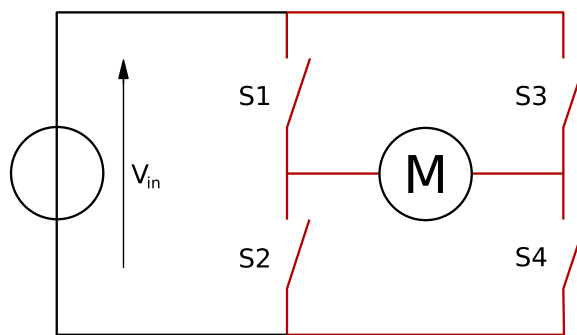
Obrázek 6.1: Schéma fungování elektromechanického relé [59].

6.3.2 Tranzistor

Tranzistor je jednoduchá polovodičová součástka složená z dvojice PN přechodů. Může mimo jiné sloužit také jako digitální spínač. Tranzistory lze rozdělit dle veličiny, na kterou reagují. Bipolární tranzistory jsou řízeny proudem tekoucím do báze, zatímco unipolární tranzistory jsou řízeny napětím na gate [34]. Tranzistory se dále dělí dle použitých PN přechodů. Hlavní výhoda tranzistorů oproti relé je možnost spínání o vyšší frekvenci. To umožňuje mimo jiné řízení výkonu skrze PWM signál. Další výhodou tranzistorů je absence pohyblivých částí. Mezi nevýhody tranzistorů oproti relé patří nižší spínané napětí a nutnost při návrhu obvodu brát v potaz možnost saturace tranzistoru [33].

6.3.3 H-můstek

H-můstek je jednoduchý obvod složený ze čtyř spínačů. Velmi často bývá používán pro ovládání motorů, protože mimo schopnosti regulovat výkon dokáže také otáčet polaritu el. proudu dodávaného zátěži [34]. K jeho konstrukci jsou v praxi použity relé či tranzistory. H-můstek lze složit z diskrétních součástek nebo použít hotový integrovaný obvod (například L298N od firmy STM).



Obrázek 6.2: Ideové schéma H-můstku [60].

Ze schématu na obrázku 6.2 je zřejmé, že polarita napětí na motoru při sepnutí spínačů S1 a S4 je opačná oproti sepnutí spínačů S3 a S2. Při současném sepnutí spínače S1 a S2 nebo S3 a S4 dojde ke zkratu.

Kapitola 7

Prototyp hydroponického systému

Hlavním cílem této práce je na základě rešerše vytvořit prototyp hydroponického systému, který je vhodný pro domácí hydroponické pěstování rostlin. Přitom je kladen velký důraz nejen na co nejúplnější automatizaci, ale také na co nejnižší náklady na celé řešení. Výsledný systém by měl být schopen v domácím prostředí produkovat čerstvou zeleninu či ovoce po celý rok. Kvůli ceně a velikosti systému je škála plodin omezená, nicméně stále velmi široká.

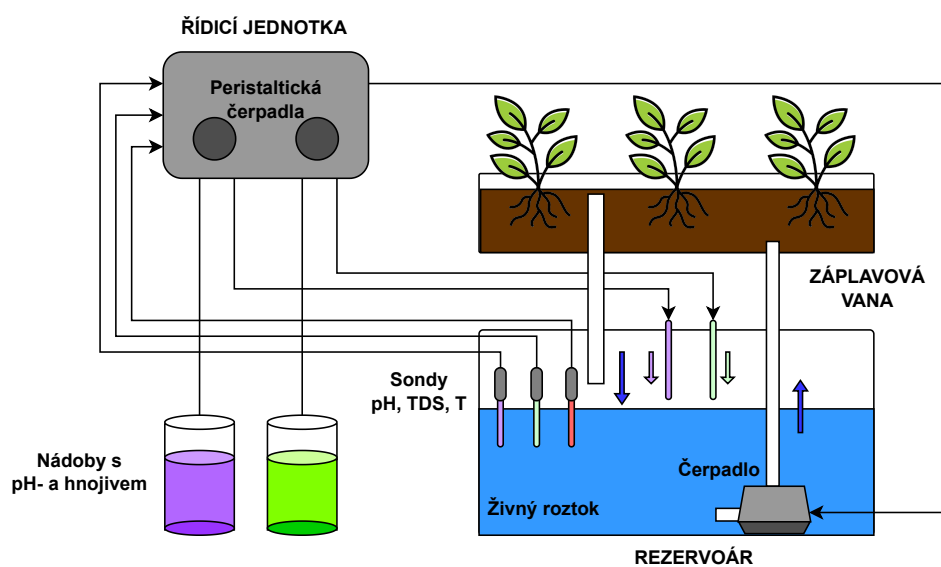
7.1 Popis systému

Po zvážení možností stanovených rešerší byl pro prototyp vybrán způsob pěstování EAF, který je vhodný pro malé prostory. Navíc nevyžaduje čerpadlo s vysokým průtokem, ani drahé konstrukční materiály, čímž v ceně poráží sofistikovanější systémy NFT a vertikální hydroponie. Jako substrát bylo vybráno umělé kamenivo, neboli keramzit, který je v malém množství poměrně levný, velmi dobře dostupný a navíc šetrný k přírodě. Samozřejmostí jsou jeho příznivé vlastnosti pro růst zemědělských plodin. Pro demonstraci funkce systému v něm bude pěstován hlávkový salát.

Nehledě na konkrétní výběr parametrů projektu je ale v celé práci snaha o vytvoření co nejobecnější řídicí jednotky, která je po umístění do rezervoáru teoreticky schopná automatizovat libovolný systém. Stačí změnit spínací cyklus čerpadla a je možné ovládat třeba NFT nebo drip systém, v jehož rezervoáru jsou sondy a výstupy peristaltických čerpadel řídicího systému. Na obrázku 7.1 je schéma navrženého prototypu, na obrázku 7.2 je fotografie výsledku.

7.2 Konstrukce

Základní konstrukce prototypu se skládá z dvou pevných plastových nádob, několika trubek a průchodek. Následující sekce slouží k jejich bližšímu popisu.



Obrázek 7.1: Schéma prototypu hydroponického systému.



Obrázek 7.2: Boční pohled na prototyp automatického hydroponického systému.

7.2.1 Nádoby

Jako základ konstrukce prototypu hydroponického systému slouží dvě bedny z potravinářského plastu HDPE (High density polyethylen). Obě bedny mají shodný půdorys, ale liší se hloubkou. Konkrétní rozměry jsou vyznačeny na

obrázcích 7.3 a 7.4. Horní bedna, neboli záplavová vana, je místem růstu samotných rostlin, je naplněna keramzitem a v pravidelných intervalech zaplavována. Záplavová vana je položena na desce sedící na dolní bedně, která zajišťuje elevaci potřebnou k samovolnému výlevu vody a také pomáhá distribuovat hmotnost vody, aby nedošlo k prasknutí dna bedny. Hlubší bedna slouží jako rezervoár vody. Deska položená na rezervoáru navíc funguje jako víko, čímž pomáhá k omezení výparu ze systému a k prevenci růstu řas v rezervoáru díky omezení přístupu světla ke stojaté vodě.



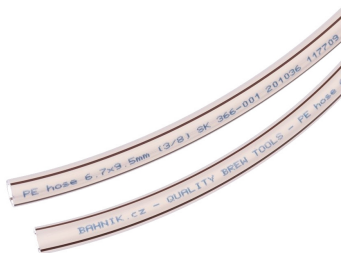
Obrázek 7.3: Rezervoár.



Obrázek 7.4: Záplavová vana.

7.2.2 Trubky

Bedny jsou spojeny dvěma trubkami rozdílného průměru. Trubky jsou z potravinářského plastu polyethylenu a jsou běžně používány ve výčepních zařízeních. Na obrázku 7.5 je pro ilustraci fotografie použité trubky. Tlustší trubka slouží jako přepad určující výšku vodní hladiny v horní bedně při zaplaveném stavu. Jakmile vodní hladina dosáhne této výšky, začne přebytečná voda z horní nádoby proudit zpět do dolní. Tento proces nejen udrží nastavenou výšku hladiny, ale má hned dvě další funkce. Proudící voda je okysličená, což je pro správný vývoj rostlin zásadní a za absence přepadu by bylo nutné použít vzduchového čerpadla podobně jako třeba v akvaristice. Další výhodou proudící vody je zamíchání dávkovaného hnojiva a pH-, které by alternativně muselo být řešeno dalším čerpadlem či motorem. Druhá tenčí trubka má za úkol dopravit vodu poháněnou čerpadlem z rezervoáru do záplavové vany. Na rozdíl od přepadové trubky ústí hned na dně horní nádoby, což má jednu praktickou výhodu. Voda, kterou je po konci záplavového cyklu třeba vypustit zpět do rezervoáru může díky gravitaci protéct čerpadlem zpět. Toto řešení šetří potřebu instalace elektromagnetického ventilu. Na horní otvory trubek jsou z důvodu ochrany čerpadla před ucpaním nainstalovány filtry z umělé textilie.



Obrázek 7.5: Potravinářská trubka.



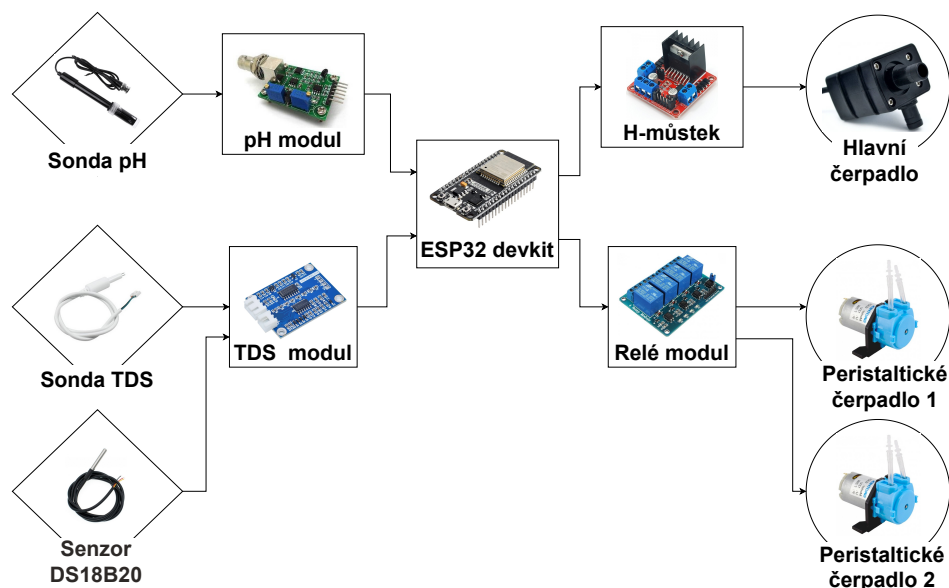
Obrázek 7.6: Potravinářská průchodka.

7.2.3 Těsnění

Velkou výhodou a také jedním z hlavních důvodů zvolení výčepních trubek pro rozvod vody v prototypu je, že tyto pevné trubky je možné uchytit do rychlospojkových průchodek běžně používaných v potravinářství. Při doplnění o silikonová těsnění vytvářejí tyto průchodky vodotěsný spoj trubky s nádobou a předchází tak nechtěným únikům vody. Použitá průchodka je na obrázku 7.6.

7.3 Elektronika

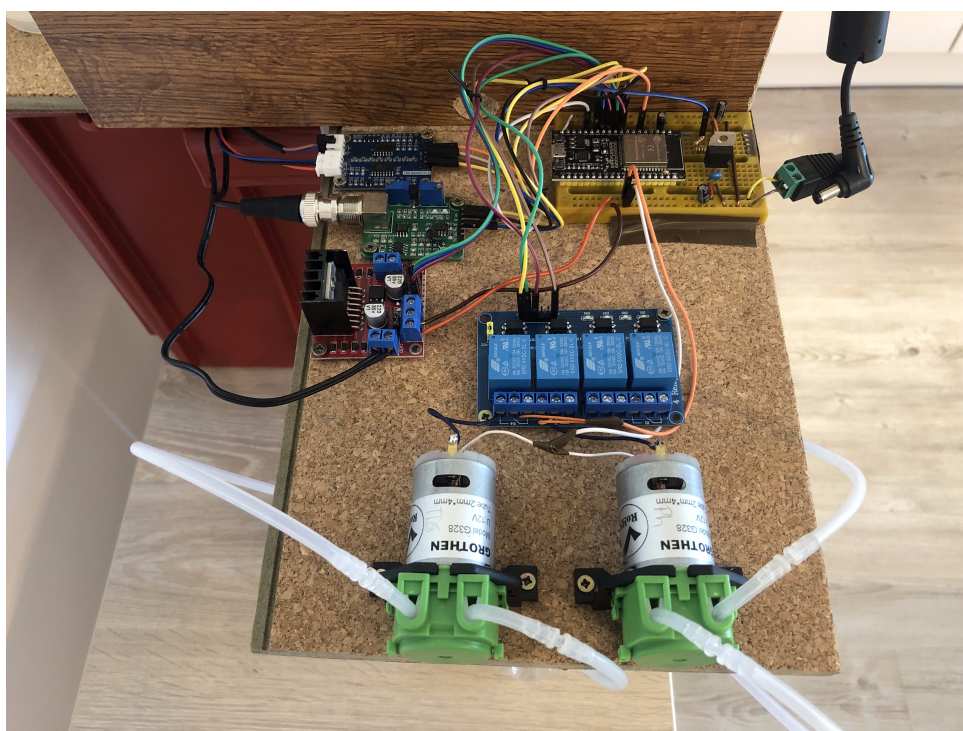
Elektronika je stěžejní částí této práce. V této sekci jsou zdokumentovány všechny zvolené součástky a jejich zapojení. Na obrázku 7.7 je blokový diagram zapojení elektronických součástí. Na obrázku 7.8 je fotografie celého zapojení.



Obrázek 7.7: Blokový diagram zapojení elektroniky v řídicí jednotce.

7.3.1 Mikrokontrolér

Jako řídicí jednotka pro prototyp automatizovaného hydroponického systému byla vybrána vývojová deska DOIT ESP32 DEVKIT V1 Board, která je osazena mikrokontrolérem ESP-WROOM-32 od firmy Espressif. Tato deska je oproti konkurenčnímu Arduinu výrazně levnější, ale zároveň zahrnuje širší škálu funkcionalit. Níže jsou popsány základní parametry této desky, na obrázku 7.9 je rozložení pinů desky [32].

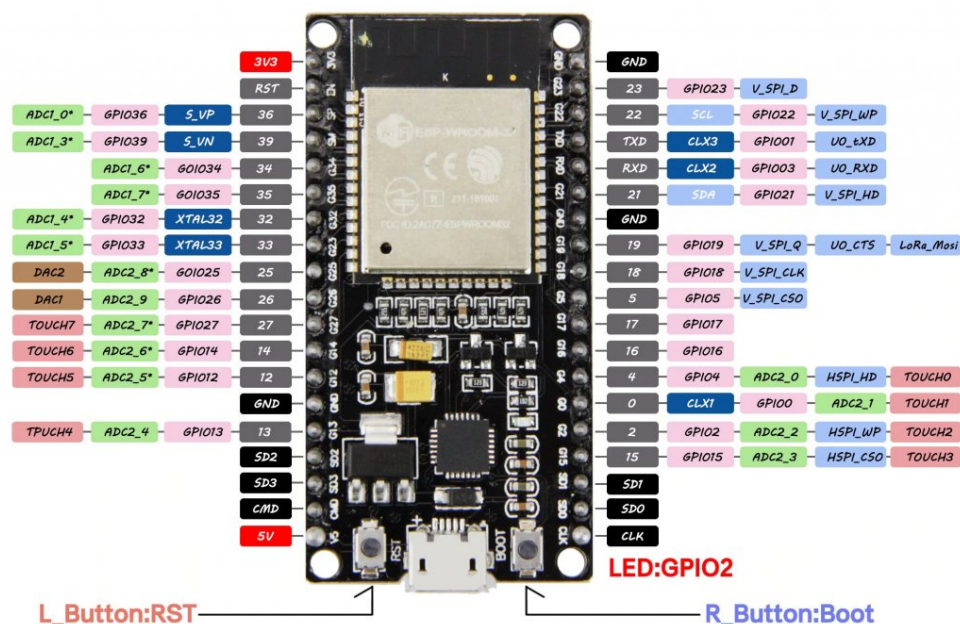


Obrázek 7.8: Pohled na zapojení řídicí jednotky.

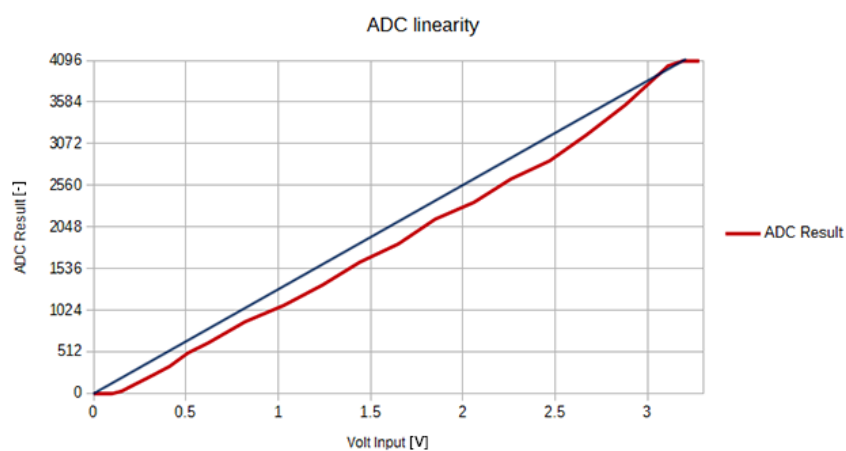
Základní parametry vývojové desky:

- Frekvence CPU 80 až 240 MHz,
- programová flash 4 MB,
- SRAM 520 kB,
- bezdrátová komunikace Wi-Fi a Bluetooth,
- komunikační rozhraní 3xUART, 3xSPI, SDIO, 2xI2C, 2xI2S, IR,
- rozhraní vstupně-výstupní 34xGPIO, 18xADC, 2xDAC, PWM,
- obvod reálného času s odděleným oscilátorem 32 kHz,
- různé režimy nízké spotřeby.

Nevýhodou zvoleného mikrokontroléru je nelinearita AD převodníku, která by mohla nepříznivě ovlivnit měření senzory s analogovým výstupem. V prototypu ale senzory neměří v mezních hranicích rozsahu, ve kterém se nelinearita projeví nejvíce, takže jí není třeba věnovat zvláštní pozornost. Na obrázku 7.10 je graf zobrazující zmíněnou nelineární závislost.



Obrázek 7.9: Pinout vývojové desky použité jako řídicí jednotka [61].



Obrázek 7.10: Graf závislosti výstupu AD převodníku na napětí na jeho vstupu [62].

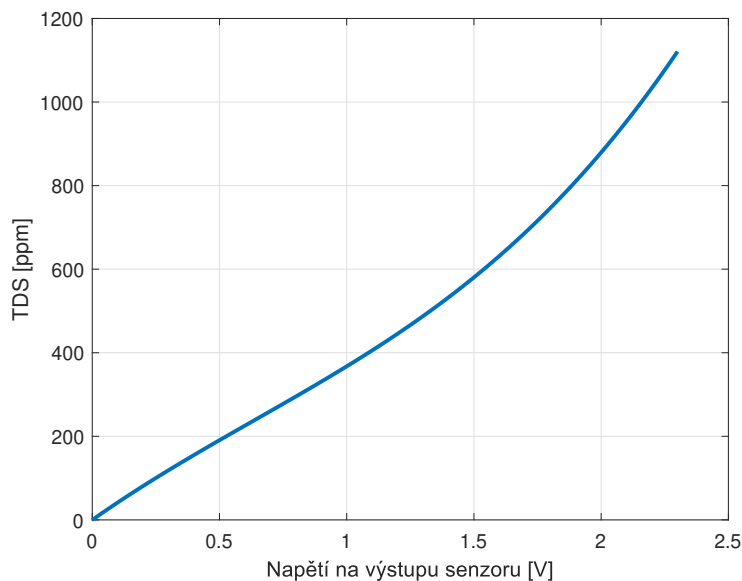
7.3.2 Senzor rozpuštěných pevných částí

K měření koncentrace hnojiva v rezervoáru prototypu hydroponického systému slouží TDS senzor. V rámci nízkonákladovosti projektu byl vybrán velmi levný senzor určený původně pro měření čistoty vody. Senzor má rozsah měření 0–1000 ppm a přesnost měření $\pm 5\%$ F.S. při teplotě 25 °C. Je možné ho bez problému použít v hydroponii, pouze za určitého omezení. Senzor má

totiž rozsah nevyhovující některým rostlinám vyžadujícím vyšší koncentraci hnojiva v živném roztoku. Senzor má výstup od 0 do 2,3V. Rovnice pro výpočet hodnoty TDS udávaná prodejcem je

$$y \approx 66,71x^3 - 127,93x^2 + 428,7x, \quad (7.1)$$

kde y odpovídá hodnotě TDS v ppm a x odpovídá napětí na výstupu senzoru ve voltech. Na obrázku 7.11 je pro ilustraci graf této závislosti.



Obrázek 7.11: Graf závislosti TDS na napětí na výstupu senzoru.

Měření TDS je teplotně závislé [35], proto je výhodné, že modul umožňuje připojení digitálního senzoru DS18B20 [36], pomocí kterého můžeme přesně měřit teplotu živného roztoku a tu následně použít k teplotní kompenzaci výstupu senzoru TDS za použití vztahu

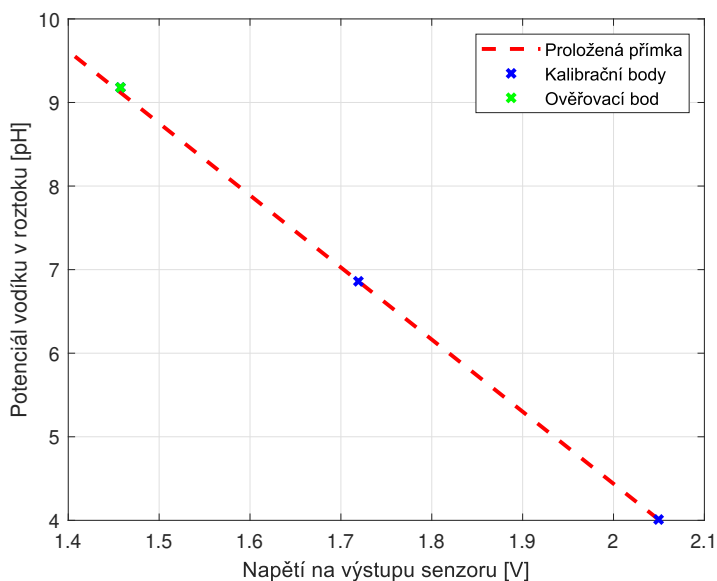
$$U_{komp} = \frac{T + 25}{50} \cdot U_{out} \text{ [V]}, \quad (7.2)$$

kde U_{komp} je kompenzované výstupní napětí ve voltech, U_{out} je nekompenzované výstupní napětí ve voltech a T je teplota ve °C.

Pro zpřesnění měření je senzor vhodné zkalibrovat. Nejprve je třeba změřit senzorem kalibrační roztok známé elektrické vodivosti, zvolen byl roztok o EC 1,413 mS/cm, což odpovídá 706,5 ppm. Vzhledem k tomu, že salát vyžaduje k prosperování 560-840 ppm, je tento kalibrační bod vhodnou volbou. Naměřená hodnota je pak využita k výpočtu korekčního koeficientu

$$K = \frac{TDS_{std}}{TDS_{meas}} \text{ [-]}, \quad (7.3)$$

kde TDS_{std} je hodnota TDS kalibračního roztoku a TDS_{meas} je naměřená hodnota TDS. Tímto koeficientem jsou poté násobeny naměřené údaje, aby



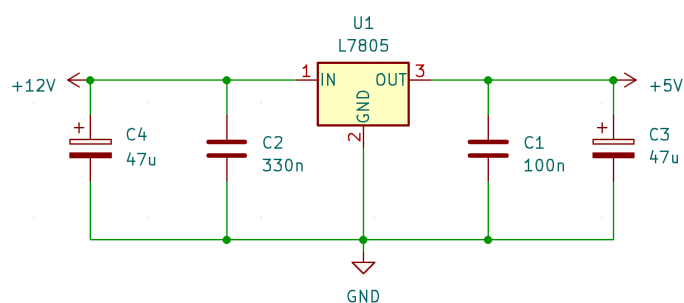
Obrázek 7.12: Vizualizace kalibrace pH senzoru.

7.3.4 Čerpadla

Hlavními akčními zásahy v prototypu je trojice čerpadel. Jedno čerpadlo je ponorné s bezkartáčovým DC motorem a zajišťuje napouštění záplavové vany. Zbýlá čerpadla jsou peristaltická s kartáčovým DC motorem a slouží k dávkování hnojiva a pH-. Ponorné čerpadlo je vodotěsné dle normy IP68, má průtok až 240 l/hod a odběr proudu maximálně 400 mA. Peristaltická čerpadla mají průtok až 2,34 l/hod a odebírají maximálně 200 mA. Všechna čerpadla jsou napájena 12 V. Průtok dávkovacích čerpadel není třeba regulovat, protože je dostatečně malý, aby k řízení složení roztoku stačilo pouze vypnout/zapnout čerpadla po určitý čas. Tato čerpadla jsou spínána dvojicí relé, která jsou napojena na mikrokontrolér. Oproti tomu napouštěcí čerpadlo je spínáno H-můstkem L298N, který umožňuje pomocí PWM regulovat výkon čerpadla. Lze díky tomu systém napustit v přesně vyladěné rychlosti, která vyhovuje jeho požadavkům.

7.3.5 Zdroj napětí

V prototypu je jako zdroj napětí použit spínaný zdroj ze starého vyřazeného notebooku. Zdroj má výstup 12 V a výkon až 50 W, což bohatě stačí pro napájení celého systému, který má odběr vždy menší než 2 A. Přímou z 12 V jsou napájena čerpadla, ale vývojová deska s mikrokontrolérem a všechny senzory jsou napájeny pomocí regulátoru napětí L7805. Regulátor je zapojen s kondenzátory pro větší stabilitu, konkrétní zapojení ukazuje obrázek 7.13.



Obrázek 7.13: Schéma zapojení použitého regulátoru napětí.

7.4 Software

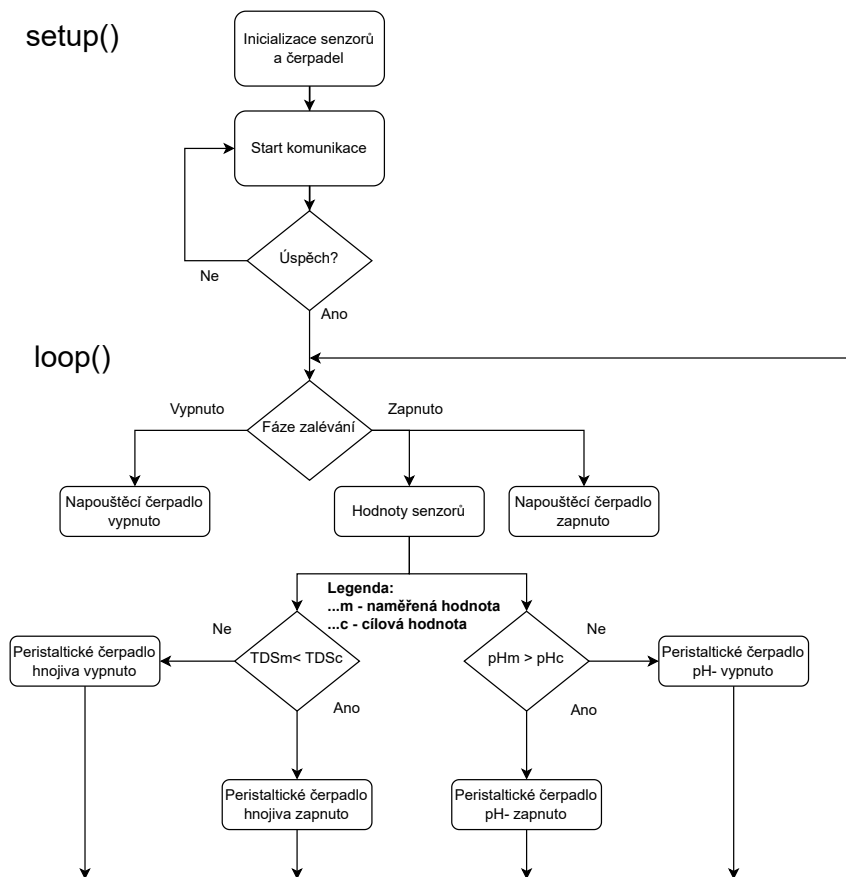
Software je implementován v jazyce C/C++ za použití prostředí platformIO [37]. Program pro časování zalévání a pro řízení složení živného roztoku je navržen neblokujícím způsobem. Grafické uživatelské rozhraní je realizováno pomocí asynchronního webového serveru. K tvorbě programu byly využity knihovny

- **OneWire.h** [38] a **DallasTemperature.h** [39] ke čtení dat z digitálního senzoru teploty,
- **AsyncTCP.h** [40] a **ESPAsyncWebServer.h** [41] k tvorbě asynchronního webového serveru,
- **ESP32Time.h** [42] k snazšímu využití funkcionality RTC v ESP32.

Na obrázku 7.14 je vývojový diagram běhu programu. Vývojový diagram zahrnuje pouze zásadní části programu bez UI, tedy inicializaci, zalévání a dávkování. Diagram pro přehlednost vizualizuje běh programu pouze během dne. Během noci totiž neprobíhá zalévání a tudíž ani míchání roztoku. Ověření denního času po úvodním nastavení probíhá pomocí obvodu reálného času zabudovaného v použitém mikrokontroléru.

7.4.1 Senzory

Kód pro čtení dat se senzorů pH a TDS samozřejmě implementuje procesy čtení senzorů popsané v podsekcích 7.3.2 a 7.3.3. Mimo to ale ještě provádí statistické zpracování naměřených dat, aby bylo dosaženo větší přesnosti měření. V 10 ms intervalech je do pole načteno deset hodnot napětí, následně jsou tyto hodnoty seřazeny vzestupně. Dvě hodnoty na obou koncích seřazeného pole nejsou použity. Ze zbylých šesti hodnot je vypočten aritmetický průměr, který odpovídá stabilnější hodnotě napětí na pinu. Výstup digitálního teplotního senzoru je načítán pomocí výše zmíněných knihoven.



Obrázek 7.14: Vývojový diagram běhu programu řešícího zalévání a dávkování hnojiva a pH-.

7.4.2 Řízení

Program řídí dvě hlavní funkce prototypu – automatické zalévání a míchání živného roztoku. Zalévání má tři zásadní parametry. Jde o čas vypnutí závlahy, čas zapnutí závlahy a rychlost motoru v čerpadle. Ve smyčce je neustále měřen uplynulý čas a když tento čas přesáhne nastavenou hranici pro klidový čas, sepne se zalévání. Podobný proces hlídá i uplynulý čas zalévání. Po dokončení zalévání se celý cyklus opakuje.

Řízení TDS a pH probíhá vždy pouze pokud je zapnuto zalévací čerpadlo, tedy pokud proudící voda z přepadu neustále míchá obsah rezervoáru. Systém má i přesto velké dopravní zpoždění a poměrně nestálý výstup. K řízení složení roztoku je použita dvojice jednoduchých on-off regulátorů.

Funkčnost implementace řízení složení roztoku byla ověřena experimentálně v malém měřítku. Sonda TDS byla ponořena do čisté vody, načež bylo spuštěno dávkování hnojiva. Čerpadlo přestalo dávkovat hnojivo až po dosažení nastavené meze ppm. Sonda pH byla nejprve ponořena do kalibračního roztoku splňujícího nastavený požadavek na pH a peristaltické čerpadlo dle očekávání nebylo spuštěno. Po přemístění sondy do kalibračního roztoku

značné množství rostlin, které k růstu vyžadují vyšší koncentraci hnojiva v živném roztoku. Aktuálně používaný senzor pH je zase poměrně nepřesný a nehodí se proto pro pěstování rostlin, které jsou na pH citlivé. I nové čerpadlo by odemklo pro hydroponický systém další možnosti. Silné ponorné čerpadlo je schopné vyhnat vodu výše za většího tlaku a je proto vhodné k provozu vertikálního hydroponického systému, který má potenciál být oproti horizontálnímu systému efektivnější co se týče využití prostoru.

Dosažitelnějším rozšířením práce by bylo vylepšení uživatelského rozhraní. Jednak by bylo namístě UI zkrášlit, aby bylo pro uživatele příjemnější, jednak by bylo možné rozhraní rozšířit o další funkce. Například by mohlo jít o ukládání předem definovaných profilů rostlin. Tyto profily by sloužily k rychlému zadání zalévacích cyklů a cílových hodnot ppm a pH. Systém by mohl být doplněn také o videokameru, která by mohla sloužit k vytvoření časosběrného videa růstu rostlin. Jde však spíš o zábavnou než přímo užitečnou funkci. Kamera by také mohla sloužit k online monitoringu systému například v době pracovní cesty uživatele.

Celý systém by mohl být použit ke sběru dat, která by následně byla použita k optimalizaci složení živného roztoku pro konkrétní rostliny v různých fázích jejich růstového cyklu.

Kapitola 8

Srovnání s existujícími řešeními

V komerční i akademické sféře existuje několik více či méně automatizovaných hydroponických systémů. Některé jsou pouze ve fázi vývoje, jiné jsou již dostupné v obchodech. Nabízí se proto srovnání prototypu vytvořeného v této práci a ostatních podobných řešení. Existuje celý vědecký článek zaměřující se na zmínky o automatických hydroponických systémech v akademické literatuře [11]. Pro tuto práci však není účelné takto rozsáhlé srovnání.

Výzkumníci v Indii navrhli řídicí jednotku hydroponického systému pro monitorování a automatické řízení na bázi IoT [43]. Jejich práce na rozdíl od této používá pro zobrazování dat přijatých ze senzorů platformu Blynk [44]. Dále se liší v použitém způsobu pěstování, protože používá NFT místo EAF.

NFT používá i systém navržený kolektivem autorů v Mexiku [45]. Systém má několik osvětlených pater ve kterých rostou plodiny, což přináší zásadní rozdíl oproti systému navrženému v této práci. Výkonné čerpadlo, svítidla a hliníková konstrukce s sebou totiž nesou výrazně vyšší náklady. Za zmínku stojí také, že se autoři pokusili vyladit pro řízení složení roztoku PID regulátor, ale skončili s I a D složkami zanedbatelnými oproti P složce.

Kolektiv autorů z Malajsie navrhl další prototyp hydroponického systému implementujícího NFT. Na rozdíl od prototypu z této práce slouží pouze k monitorování a nikoliv k řízení systému [46]. Specifikum práce [2] je, že byla při návrhu hydroponického systému brána v potaz zeměpisná poloha Perského zálivu. Řešení se soustředí na maximalizaci efektivity zemědělské produkce v nepříznivých podmínkách. Využívá podobně jako předchozí zmiňovaná práce NFT a předpřipravenou platformu pro zobrazování výstupů.

Hydroponickému pěstování rostlin se však nevěnují pouze vědecké články. Je tématem bakalářských prací ve světě, i v České republice. Ve Švédsku dva studenti vytvořili prototyp automatizovaného hydroponického skleníku určeného pro domácí pěstování bazalky [47]. Zajímavé na tomto systému je, že je narušeno od ostatních zmiňovaných uzavřeno. V Česku je třeba zmínit práci studentů z FEL ČVUT. V rámci studentského projektu vznikl na fakultě hydroponický systém. Na základě rozšiřování tohoto systému vzniklo několik bakalářských prací [48][49].

V tabulce 8.1 je přehled základních charakteristik uvedených akademických prací v oblasti automatizovaných hydroponických systémů. MCU je zkratka pro mikrokontrolér. Ř a M v řádku *Automatizace* znamená řízení, respektive

monitorování parametrů živného roztoku v rezervoáru. V posledním sloupci tabulky jsou parametry navrženého prototypu.

	[43]	[45]	[46]	[2]	[47]	[48] [49]	*
Technika	NFT	NFT	NFT	NFT	EAF	EAF	EAF
MCU	ESP8266	ESP32	ESP8266	Arduino	Arduino	Arduino	ESP32
UI	Blynk	Vlastní	Ubidots	Thingspk	Žádné	Vlastní	Vlastní
Osvětlení	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne
Automat.	M	Ř+M	Ř+M	Ř+M	Ř+M	M	Ř+M
Náklady	Nízké	Vysoké	Vysoké	Vysoké	Střední	Střední	Nízké

Tabulka 8.1: Přehled rozdílů mezi navrženým prototypem a ostatními řešeními z akademické sféry.

Jak bylo avizováno výše, existují i komerční automatizované hydroponické systémy. Česká firma Numazon [50] se zaměřuje na automatizaci průmyslových hydroponických a aquaponických systémů. Paralell garden [51] je ambiciózní projekt nabízející domácí i průmyslová řešení automatizace v hydroponii. Navíc je plně open source, ale dokumentace bohužel zatím není příliš kvalitní. Zipgrow [52] je v současné době jedna z neúspěšnějších společností prodávající automatické hydroponické systémy od domácích zahrádek až po vybavení celých skleníků o stovkách metrů čtverečních. Specialitou této firmy jsou vertikální pěstební plochy.

Nakonec stojí za zmínku hydroponické systémy bez elektroniky. Zajímavý je koncept tzv. window farm[53], který ve své diplomové práci rozvíjí studentka FA ČVUT [54]. Autopot [55] je komerčně dostupné EAF řešení spoléhající na gravitaci a občasný zásah pěstitele. V podobných systémech musí pěstitelé systém monitorovat pomocí ručních měřáků pH a EC a parametry živného roztoku regulovat manuálním přidáváním hnojiva či regulátorů pH.

Kapitola 9

Závěr

Cílem práce byl návrh a implementace prototypu hydroponického systému včetně řídicí jednotky. Za účelem návrhu prototypu hydroponického systému bylo zásadní vytvořit rozhraní mezi reálným a technickým světem. Pro vytvoření takového rozhraní bylo třeba nejprve reálný svět poznat a popsat.

Prvním bodem zadání bylo z tohoto důvodu vytvoření přehledu systémů pro pěstování rostlin v alternativních pěstebních substrátech. Práce v kapitolách 1 a 2 uvedla čtenáře do problematiky tématu, vysvětlila motivaci svého vzniku a podala mu základní přehled o historii oboru. V kapitole 3 byly představeny způsoby pěstování používané v hydroponii, v kapitole 4 pak alternativní pěstební substráty. V obou těchto kapitolách byl kladen důraz na srovnání rozdílných přístupů a vyzdihnutí jejich výhod a nevýhod pro nízkonákladové domácí pěstování rostlin. Výsledkem průzkumu byla volba EAF systému za použití keramzitu coby substrátu. Kapitola 5 se zabývala požadavky hydroponických rostlin. Zásadní v ní byly zejména informace o živinách, které rostliny potřebují ke správnému růstu, a o možnostech měření jejich koncentrace ve vodě. V kapitole 6 se práce věnovala automatizaci požadavků stanovených v kapitole 5.

Hlavní částí práce byl samotný návrh prototypu nízkonákladového hydroponického systému. První tři sekce kapitoly 7 popsaly jednotlivé hardwarové části systému. Konkrétně se jednalo o nádoby a trubky z vhodných materiálů, ale zejména o zvolené elektronické součástky. Pro prototyp byl dle zadání navržen také software. V sekci 7.4 bylo popsáno, jak program realizuje čtení senzorů, řízení složení živného roztoku v rezervoáru a také zobrazování uživatelského rozhraní implementovaného formou asynchronního webového serveru. Poslední sekce sedmé kapitoly 7.5 popsala možná rozšíření systému. V první řadě šlo o možnosti rozšíření skrze vylepšení softwaru, v druhé řadě pak o možnosti vylepšení systému skrze finanční investici do kvalitnějších senzorů a umělého osvětlení.

V kapitole 8.1 práce nejprve představila podobné akademické práce a poté je porovnávala s navrženým prototypem. Kapitola představila také několik komerčních produktů, které se věnují automatizovanému hydroponickému pěstování.

Celkově se povedlo splnit také požadavek na *nízkonákladovost* systému. Veškerý použitý materiál vyšel na přibližně 3000,- korun, z čehož skoro

polovinu tvoří cena senzorů. Vhodnou volbou komponentů se povedlo ušetřit zejména na mikrokontroléru a čerpadlech. Výhodou v cenové oblasti bylo také použití potravinářských beden namísto v oblasti oblíbených, ale poměrně drahých, PVC trubek.

Prototyp bude do budoucna sloužit k domácímu pěstování zeleniny. Bude na něm experimentováno se škálou plodin, hnojiv a substrátů. Hlavní výhodou prototypu je univerzálnost řídicí jednotky, kterou bude v případě potřeby možné v budoucnu použít pro jiný systém. Hlavní nevýhodou prototypu je zatím jen poměrně málo otestované řízení složení roztoku. V plánu je jeho testování ve větším měřítku a případné vylepšení zaměřující se zejména na kvalitní promíchání živného roztoku. Prostor pro zlepšení je ale i v dalších směřech, viz. sekce 7.5.



Literatura

- [1] How to feed the world in 2050. Citováno: 2023-05-03. [Online]. Dostupné z: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf.
- [2] M. E. H. Chowdhury, A. Khandakar, S. Ahmed, F. Al-Khuzaei, J. Hamdalla, F. Haque, M. B. I. Reaz, A. Al Shafei, and N. Al-Emadi, "Design, construction and testing of iot based automated indoor vertical hydroponics farming test-bed in qatar," *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5637, Říjen 2020, dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3390/s20195637>.
- [3] R. S. Velazquez-Gonzalez, A. L. Garcia-Garcia, E. Ventura-Zapata, J. D. O. Barceinas-Sanchez, and J. C. Sosa-Savedra, "A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations," *Agriculture*, vol. 12, no. 5, p. 646, Duben 2022, dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture12050646>.
- [4] M. Cartwright. (2018) Hanging gardens of babylon. Citováno: 2023-06-03. [Online]. Dostupné z: https://www.worldhistory.org/Hanging_Gardens_of_Babylon/.
- [5] A. Panwar. (2020) The origins of hydroponics. Citováno: 2023-06-03. [Online]. Dostupné z: <https://www.digit.in/features/sci/digit-mag-the-origins-of-hydroponics-54705.html>.
- [6] F. Bacon and W. Rawley, *Sylva Sylvarum: Or, A Natural History, in Ten Centuries. Whereunto is Newly Added the History Natural and Experimental of Life and Death, Or of the Prolongation of Life*, ser. Early English Books Online / EEBO, 1670, dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=5gU2AQAAMAAJ>.
- [7] W. Gericke, *The Complete Guide to Soilless Gardening*. Prentice-Hall, Incorporated, 1940, dostupné z: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.271694/page/n1/mode/2up>.
- [8] D. R. Hoagland and D. I. Arnon, *The Water-Culture Method for Growing Plants Without Soil*. College of Agriculture, University of California, 1938.

- [9] W. Sullivan. (1994) Daniel arnon, 84, researcher and expert on photosynthesis. Citováno: 2023-06-03. [Online]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/1994/12/23/obituaries/daniel-arnon-84-researcher-and-expert-on-photosynthesis.html>.
- [10] L. Grush, “How nasa is learning to grow plants in space and on other worlds,” Srpen 2018, citováno: 2023-06-03. [Online]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2018/9/21/17883780/nasa-veggie-plants-space-station-mars-moon-soil-food>.
- [11] F. Modu, A. Adam, F. Aliyu, A. Mabu, and M. Musa, “A Survey of Smart Hydroponic Systems,” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 233–248, 2020.
- [12] R. Pavlis. (2017) Is coir an eco-friendly substitute for peat moss? Citováno: 2023-11-03. [Online]. Dostupné z: <https://www.gardenmyths.com/coir-ecofriendly-substitute-peat-moss/>.
- [13] G. Barrett, P. Alexander, J. Robinson, and N. Bragg, “Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – a review,” *Scientia Horticulturae*, vol. 212, pp. 220–234, 2016, dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030442381630471X>.
- [14] R. Pavlis. (2022) Using Wool As A Growing Medium. Citováno: 2023-11-03. [Online]. Dostupné z: <https://hortiwool.com/blogs/news/using-wool-as-a-growing-medium>.
- [15] M. Komorowska, M. Niemiec, J. Sikora, Z. Gródek-Szostak, H. Gurgulu, M. Chowaniak, A. Atilgan, and P. Neuberger, “Evaluation of sheep wool as a substrate for hydroponic cucumber cultivation,” *Agriculture*, vol. 13, no. 3, p. 554, Únor 2023, dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13030554>.
- [16] H. M. Resh, *A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*, 7th ed. CRC Press, 2013.
- [17] J. Douglas, *Advanced Guide to Hydroponics: (soiless Cultivation)*. Pelham, 1985, dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=hykhAQAAMAAJ>.
- [18] G. Robertson, D. Coleman, C. Bledsoe, and P. Sollins, *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*, ser. Long-Term Ecological Research Network Series. Oxford University Press, 1999, dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=n3FUQdCjSpEC>.
- [19] Wikipedia contributors, “Liebig’s law of the minimum — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2023, [Citováno: 2023-11-03. [Online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Liebig%27s_law_of_the_minimum&oldid=1143020116].

- [20] R. P. J. J. Rietra, M. Heinen, C. O. Dimkpa, and P. S. Bindraban, “Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency,” *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 48, no. 16, pp. 1895–1920, 2017, dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>.
- [21] J. Jones, *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. Taylor & Francis, 2004, dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=ly5XngEACAAJ>.
- [22] A. Vojáček. (2021) Kvalita vody - proč ji měřit? Citováno: 2023-25-04. [Online]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/kvalita-vody-proc-ji-merit.html>.
- [23] Hydroponics Water: A Complete Guide and FAQ. Citováno: 2023-25-04. [Online]. Dostupné z: <https://whyfarmit.com/hydroponics-water/>.
- [24] Vše o vodě - pitná voda. Citováno: 2023-25-04. [Online]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/>.
- [25] 5 Ways To Provide Oxygen To Your Hydroponic Plant’s Roots. Citováno: 2023-25-04. [Online]. Dostupné z: <https://www.nosoilsolutions.com/how-to-oxygenate-water-hydroponic-plants/>.
- [26] C. D’Anna. The Basics of Hydroponic Lighting. Citováno: 2023-29-04. [Online]. Dostupné z: <https://www.thespruce.com/hydroponic-lighting-basics-1939224>.
- [27] Hydroponic Lighting Guide: All About Hydroponic Grow Lights. Citováno: 2023-29-04. [Online]. Dostupné z: <https://blog.growgeneration.com/grow-lights/hydroponic-lighting-guide/>.
- [28] K. Kobayashi, T. Amore, and M. Lazaro, “Light-emitting diodes (LEDs) for miniature hydroponic lettuce,” *Optics and Photonics Journal*, vol. 03, no. 01, pp. 74–77, 2013, dostupné z: <https://doi.org/10.4236/opj.2013.31012>.
- [29] The Ideal LED Grow Light Spectrum for Plants. Citováno: 2023-29-04. [Online]. Dostupné z: <https://bioslighting.com/grow-light-spectrum-led-plants/grow-lighting/>.
- [30] How does a ph probe work? Citováno: 2023-12-05. [Online]. Dostupné z: <https://atlas-scientific.com/blog/how-does-a-ph-probe-work/>.
- [31] How do conductivity meters work? Citováno: 2023-12-05. [Online]. Dostupné z: <https://atlas-scientific.com/blog/how-do-conductivity-meters-work/>.
- [32] Esp32-wroom-32 series datasheet. Citováno: 2023-12-05. [Online]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.

- [33] Relays vs. transistors: Which is the correct choice? Citováno: 2023-12-05. [Online]. Dostupné z: <https://www.ultralibrarian.com/2021/02/09/relays-vs-transistors-which-is-the-correct-choice-ulg>.
- [34] J. Hospodka, *Elektronické obvody, Souhrnný interaktivní výukový materiál elektrických a elektronických obvodů a systémů*. ČVUT FEL, 2023, dostupné z: <https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf>.
- [35] Measuring total dissolved solids. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/instrumentation/conductivity-meter/total-dissolved-solids>.
- [36] Programmable resolution 1-wire digital thermometer. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf>.
- [37] Platformio. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://platformio.org/>.
- [38] P. Stroffregen. Onewire. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire>.
- [39] M. Burton. Arduino-temperature-control-library. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library>.
- [40] me-no-dev. async tcp. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://github.com/me-no-dev/AsyncTCP>.
- [41] me-no-dev. Espasyncwebserver. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer>.
- [42] fbiego. Esp32time. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://github.com/fbiego/ESP32Time>.
- [43] R. G. Mapari, K. B. Bhangale, P. Patil, H. Tiwari, S. Khot, and S. Rane, “An iot based automated hydroponics farming and real time crop monitoring,” in *2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, 2022, pp. 1–5.
- [44] Blynk. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://blynk.io/>.
- [45] H. Ponce, J. Brieva, E. Moya-Albor *et al.*, “Modular iot-based automated hydroponic system,” *OPENAIRE*, 2021, dostupné z: <https://doi.org/10.4236/opj.2013.31012>.
- [46] G. W. Michael, F. S. Tay, and Y. L. Then, “Development of automated monitoring system for hydroponics vertical farming,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1844, no. 1, p. 012024, mar 2021, dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1844/1/012024>.

- [47] K. Lundin and O. Olli, *Automated hydroponics greenhouse: Regulation of pH and nutrients*, 2017, dostupné z: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-226662>.
- [48] V. Truhlařík, *Řízení automatického systému hydroponického pěstování rostlin*, 2022, ČVUT FEL, vedoucí práce doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/101012>.
- [49] M. Kerner, *Automatický systém hydroponického pěstování rostlin*, 2021, ČVUT FEL, vedoucí práce doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/96681>.
- [50] Numazon. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://numazon.cz/>.
- [51] Paralell garden. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://www.paralellgarden.com/>.
- [52] Zipgrow. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://zipgrow.com/>.
- [53] Wikipedia contributors, “Windowfarm — Wikipedia, the free encyclopedia,” citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Windowfarm&oldid=1105573819>.
- [54] M. Faktorová, *Nekonve*, 2020, ČVUT FA, vedoucí práce MgA. Filip Streit Dostupné z: https://www.fa.cvut.cz/galerie/diplomove-prace/2020-0-michaela-system-na-pestovani-rostlin-87150/f5-dp-2020-faktorova-michaela-faktorova_michaela_nekonve.pdf.
- [55] Autopot. Citováno: 2023-15-05. [Online]. Dostupné z: <https://autopot.co.uk/>.

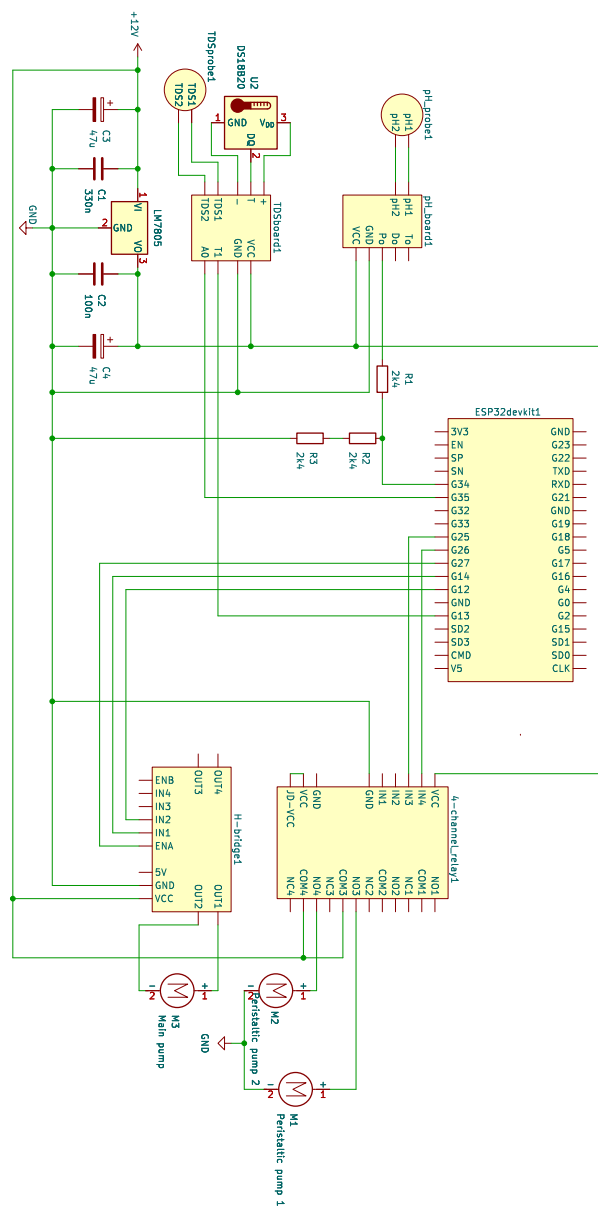


Zdroje obrázků

- [56] Dr. gericke, standing on a ladder, harvests one of his tall tomato plants grown in hydroponics. mrs. gericke stands below with some of the harvest. Citováno: 2023-25-04. [Online]. Dostupné z: <http://www.carbon.org/school/newclass/gericke4.jpg>.
- [57] Hydroponic systems – basic types and how they work differently? Citováno: 2023-25-04. [Online]. Dostupné z: <https://www.leaffin.com/hydroponics-growing-systems/>.
- [58] Wikipedia contributors. Action spectrum — Wikipedia, the free encyclopedia. Citováno: 2023-25-04. [Online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Action_spectrum&oldid=1150311679.
- [59] Cloullin. Relay animation without flyback diode. Citováno: 2023-12-05. [Online]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Relay_animation_without_flyback_diode_.gif. Upraveno.
- [60] C. Buttay. Structure of an h-bridge. Citováno: 2023-12-05. [Online]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H_bridge.svg.
- [61] IoT ESP-WROOM-32. Citováno: 2023-29-04. [Online]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/iot-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-rev-1--cp2102/>.
- [62] H. Cheung. esp32-adc-calibrate. Citováno: 2023-29-04. [Online]. Dostupné z: <https://github.com/e-tinkers/esp32-adc-calibrate>.

Příloha A

Plné schéma zapojení



Příloha B

Přiložené soubory

B.1 Adresářový strom

```
cernyfi6_attachment.zip
├── mcu_code
│   ├── main.cpp
│   ├── main.h
│   └── page.h
└── additional_files
    ├── page.html
    └── plne_schema.png
```

B.2 Obsah přiložených souborů

- **main.cpp** - čtení senzorů, logika zalévání, logika řízení složení roztoku, nastavení asynchronního webservru
- **main.h** - definice konstant, zahrnutí knihoven
- **page.h** - kód stránky UI uložený v proměnné
- **page.html** - kód stránky UI (identický s kódem v proměnné v **page.h**, pouze pro lepší zobrazování a testování, tento kód není nahrán do ESP32)
- **schematic.pdf** - plné schéma zapojení elektroniky ve vektorovém formátu