

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Břinčil** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **397835**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Bezdrátové komunikace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Řídicí jednotka pro ovládání a monitorování pěstebních podmínek

Název diplomové práce anglicky:

Control unit for controlling and monitoring of growing conditions

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši dostupné literatury týkající se řízení a monitorování podmínek pěstebního prostředí. Vyberte vhodné senzory pro vícebodové monitorování teploty, intenzity osvětlení, vlhkosti, CO₂, PH, EC a dalších nutných environmentálních veličin.
2. Realizujte hardware řídicí jednotky s využitím platformy RaspberryPi, vyhodnocovacích obvodů pro senzory a akčních členů pro ovládání ventilace, topení a dávkování.
3. Naprogramujte firmware řídicí jednotky, tak aby umožňoval čtení sensorových dat a jejich ukládání do cloudové platformy/serveru, ovládání akčních členů pomocí vhodných algoritmů k udržení vhodných podmínek pro pěstování, dálkový přístup a update firmwaru. Naprogramujte software pro čtení a zobrazení dat z několika řídicích jednotek.
4. Otestujte řídicí jednotku v reálném pěstebním prostředí, analyzujte a diskutujte naměřená data a proveďte optimalizaci řídicích algoritmů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] https://www.heliospectra.com/sites/default/files/viridian_heliospectra_company_report_4_20_15.pdf
- [2] <https://www.ijert.org/view-pdf/277/plant-growth-monitoring-system>
- [3] http://www.nasa.gov/pdf/164449main_spinoff_06.pdf (str. 64)
- [4] http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/meals_ready_to_eat
- [5] <https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/1630/10chan.pdf?sequence=1>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

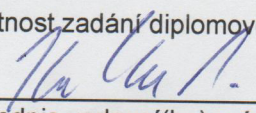
Ing. Pavel Kulha Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

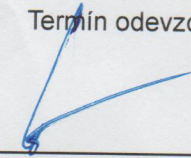
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **04.10.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **25.05.2018**


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE



Diplomová práce

Řídicí jednotka pro ovládání a monitorování pěstebních podmínek

Bc. Tomáš Břinčil

Vedoucí práce: Ing. Pavel Kulha, PhD.

8. ledna 2017

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, jímž je Ing. Pavel Kulha, PhD., za čas který mi věnoval a řadu podnětných připomínek k návrhu důležitých částí systému senzorů, jimiž mi pomohl k vypracování této práce.

Děkuji všem lidem z BARu za jejich myšlenky, za to že jsou a za materiální podporu bez které by tato práce nemohla vzniknout.

Také bych chtěl touto formou poděkovat Martině Velechovské ze zahradnictví Bášť, která mi pomohla pochopit základní principy fungování a potřeb rostlin a umožnila mi měřit klíčové veličiny v podnikových sklenících.

Dále děkuji také svému zaměstnavateli a rodině, kteří našli pochopení pro akademickou činnost a mé zapálení pro tvorbu diplomové práce v průběhu celého roku 2016.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 46 odst. 6 tohoto zákona tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou, a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla, a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu), licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 8. ledna 2017

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

© 2017 Tomáš Břinčil. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Břinčil, Tomáš. *Řídicí jednotka pro ovládání a monitorování pěstebních podmínek*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2017.

Abstrakt

Tato práce se zabývá možnostmi pěstování v umělých podmínkách s menší či větší mírou automatizace v závislosti na podmínkách pěstebních prostor. Předmětem diplomové práce je zpracovávání dat kritických pro monitoring pěstebních podmínek jako jsou: intenzita světla, teplota, vlhkost, úroveň CO₂. Dále se aplikují běžně známé praktiky pěstování rostlin do regulování akčních členů pro ovládání osvětlení, klimatizace, dotace CO₂. . . .

Klíčová slova Rostlina, umělé podmínky, pěstování, automatizace, luxmetr, teploměr, vlhkoměr, CO₂, regulátor, on-off

Abstract

This MA thesis deals the growing options in artificial environments with a higher or lesser degree of automation, depending on the conditions of the growing area. The thesis evaluates the data which is crucial for monitoring of growing conditions, such as light intensity, temperature, humidity and CO₂ levels. Furthermore, widely known growing practices are applied to the regulation of actuators in order to control lighting, air conditioning and CO₂ ratios. . . .

Keywords Flower, artificial conditions, growering, automation, luxmeter, thermometer, humidity sensor, CO₂, regulator, on-off

Obsah

Úvod	3
1 Rozbor pěstebních podmínek	5
1.1 Pěstování v přirozených podmínkách	5
1.2 Pěstování v umělých podmínkách	5
1.3 Vstupní periferie a měření parametrů pěstebního prostředí . . .	10
1.4 Ovládání akčních členů	15
2 Srovnání existujících řešení na trhu umělého pěstování	23
2.1 Průmyslové systémy AVID	23
2.2 Hobby systém Suzan	25
2.3 Hobby systém GROWDUINO	26
3 Návrh vlastního řešení	27
3.1 Vývojová platforma	27
3.2 1. Testovací zařízení	28
3.3 2. Umělé podmínky pro pěstování papriček	28
3.4 3. Regulované prostředí skleníku	30
3.5 4. Chillistation	34
4 Regulace pěstebních podmínek	49
4.1 Regulace vlhkosti půdy	49
4.2 Regulace teploty	51
4.3 Regulace světelných podmínek v pěstebním boxu	54
4.4 Regulace CO ₂ v pěstebním boxu	56
4.5 Ukázka řízení více akčních členů	59
Závěr	61
Literatura	63

A Srovnání referenčních salátů	67
B Webové rozhraní Chillistaion serveru	71
C Chillistation interface	75
D Obsah přiloženého CD	77

Seznam obrázků

1.1	Závislost absorpčních schopností chloroplastů na vlnové délce [1]	8
1.2	Blokový diagram sběrnice 1-Wire [2]	10
1.3	DHT22 kombinované čidlo teploty a vlhkosti vzduchu [3]	11
1.4	Pouzdro barometrického čidla a teploměru BMP180 [4]	11
1.5	Sensor vlhkosti půdy s předzesilovačem [5]	12
1.6	Relativní citlivost BH750 na části světelného spektra [6]	13
1.7	Senzor oxidu uhličitého ve vzduchu MH-Z19 [7]	14
1.8	Optický senzor kvality ovzduší Sharp GP2Y1010AU0F [8]	14
1.9	Vlevo modul senzoru PH, vpravo modul senzoru EC	15
1.10	Deska ovládacích relé pro spínání zásuvek [11]	16
1.11	Přímotop značky ECG TV 25 o příkonu 2000 W [12]	16
1.12	Potrubní ventilátor CANFAN RUCK 160 [13]	17
1.13	ponorné čerpadlo HEISSNER [14]	18
1.14	Graf závislosti průtoku na výšce vodního sloupce na výstupu čerpadla [10]	18
1.15	LED 300 W panel OEM výrobce z Čínské provincie [15]	19
1.16	Redukční ventil s průtokoměrem a solenoidovým ventilem	22
2.1	pěstební systém AVID [16]	24
2.2	Pěstební systém Suzan [17]	25
2.3	Pěstební systém Growduino [18]	26
3.1	Prototyp části zapojení na nepájivém poli	28
3.2	Regulační prvky pěstebního boxu	29
3.3	Pohled na CFL výbojku a papričky	29
3.4	Sestava skleníku s přímotopem, odtahem vzduchu a čerpadlem.	31
3.5	Řídicí logika a reléové pole pro ovládání přímotopu a odtahu vzduchu	32
3.6	Rostliny jako testovací vzorek ve skleníku	32
3.7	Blokové schéma dílčích částí Chillistation	34
3.8	Pohled na uspořádání a konstrukci Chillistation	35

3.9	Pohled na vnitřní uspořádání a konstrukci Chillistation	35
3.10	Detail Chillistation interface	36
3.11	Stromová struktura měřených hodnot	40
3.12	Stavový diagram ovládání pěstebních podmínek v boxu	42
3.13	Blokové schéma Chillistation serveru	44
3.14	Pohled na hydroponní systém v pěstebním boxu	46
3.15	Pohled na LED panely a vzduchotechniku	47
4.1	Graf závislosti vlhkosti půdy ve skleníku a spínání závlahy na čase	50
4.2	Graf závislosti teploty ve skleníku a ovládání ventilace na čase	51
4.3	Graf závislosti teploty v pěstebním boxu a ovládání ventilace na čase	53
4.4	Graf závislosti teploty ve skleníku a ovládání ohřevu na čase	54
4.5	Graf závislosti intenzity světla v pěstebním boxu a ovládání osvětlení na čase	55
4.6	Impulsní odezva koncentrace oxidu uhličitého v pěstebním boxu na sepnutí ventilu při průtoku 5 l/min	56
4.7	Impulsní odezva koncentrace oxidu uhličitého v pěstebním boxu na sepnutí ventilu při průtoku 1 l/min	57
4.8	Graf závislosti koncentrace CO ₂ v pěstebním boxu a ovládání dávkování na čase	58
4.9	Graf ukazující závislosti podmínek na více akčních členech	59
A.1	Pohled na zaklíčená semínka z pařníku v 4. dni pěstování	67
A.2	Pohled na sazeničky v 1. týdnu pěstování	68
A.3	Porovnání referenčních salátů v 3. týdnu pěstování	68
A.4	Porovnání referenčních salátů ve 4. týdnu pěstování	69
A.5	Detail kořenového systému referenčního salátu z umělého prostředí	69
B.1	Úvodní stránka Chillistation serveru, přehled všech měřených veličin s denní statistikou	72
B.2	Měřená veličina, denní, týdenní a měsíční statistika	73
C.1	Layout desky plošných spojů Chillistation interface	75
C.2	Schéma Chillistation interface	76

Seznam tabulek

1.1	Parametry ventilátoru CANFAN RUCK 160	17
1.2	Parametry LED panelu 300W	19
1.3	Parametry LED diod panelu 300W	20

Seznam zkratek

CO₂ Oxid uhličitý

SPI Serial Peripheral Interface

A/D Analog to Digital

I²C Inter-Integrated Circuit

PH Potential of Hydrogen

EC Electric conductivity

OEM Original Equipment Manufacturer

BNC Bayonet Neill Concelman connector

HPS High Pressure sodium

MH Metal halid

ARM Acorn RISC Machine

USB Universal serial BUS

GUI Graphical user interface

MQTT MQ Telemetry Transport

GPIO General-purpose input/output

CFL Compact fluorescent lamp

Úvod

V dnešní době existuje v pěstování zeleniny trend přesouvat ho z přirozeného prostředí do prostředí s umělými podmínkami pro růst vegetace. Evropa díky své geografické poloze a klimatickým podmínkám je jedním z největších pěstitelů zeleniny na světě. Pro jižní země je typické venkovní pěstování, ale pod vlivem moderních metod pěstování a nových poznatků se zemědělská produkce čím dál více přesouvá do velkých hal s umělými podmínkami pro pěstování, což je typické pro země jako Nizozemsko a Belgie, kde je běžné celosezónní pěstování nejen zeleniny ale i okrasných rostlin – tulipány, tak typické pro Holandsko.

Pokud rostlina nemá přirozené prostředí pro růst, je potřeba tyto podmínky co nejvěrněji napodobit, což je cílem této diplomové práce, která řeší komplexní problematiku pěstování rostlin v umělých podmínkách. Zabývá se nutriční potřebou rostlin pro jejich vývoj, řeší důležité aspekty umělého prostředí, jako jsou teplota, vlhkost, osvětlení a jiné vlivy na růst. Dále řeší vhodné senzory a metodiky měření pro sledování těchto podmínek a jejich ovládání pomocí navrženého regulačního systému pod označením Chillistation.

Úkolem této diplomové práce je navržení funkčního řešení, hardwaru a aplikování řídicích algoritmů do reálného prostředí. Vše pak v celku umožní sledovat kritické hodnoty pěstebního prostředí, regulovat je a zaznamenávat je z více zařízení napříč sítí.

Vývoj diplomové práce zahrnuje čtyři fáze, a to vývojové prostředí, umělé prostředí pro pěstování chilli papriček, regulování pěstebních podmínek ve skleníku a nakonec systém Chillistation pro pěstování v uzavřeném prostoru.

Cíle práce:

- Navrhnout hardware řídicí jednotky s využitím platformy Raspberry Pi
- Realizovat hardware pro propojení senzorů s platformou Raspberry Pi
- Naprogramovat firmware pro čtení senzoru na Raspberry Pi
- Ovládat akční členy pro změny podmínek v pěstebním prostředí
- Naprogramovat službu odesílající data pomocí MQTT protokolu
- Připravit serverovou platformu pro ukládání dat pomocí MQTT protokolu do MySQL
- Naprogramovat aplikaci pro zobrazení grafů z hodnot vyčtených z MySQL
- Otestovat řízení v reálných podmínkách
- Porovnat výsledky pěstování v umělých podmínkách

Rozbor pěstebních podmínek

Rostliny mají své potřeby a je rozdíl mezi pěstováním v přirozených a v umělých podmínkách. Důležité je pochopit potřeby rostlin pro jejich zdravý růst. Tyto potřeby je nutné vnímat jako měřitelné parametry pěstebního prostředí, je třeba zvolit vhodné senzory a pro ovládání parametrů pěstebního prostředí také zvolit vhodné spotřebiče. Každý další odstavec je důležitý pro pochopení regulace pěstebních podmínek.

1.1 Pěstování v přirozených podmínkách

Přírodní pěstování probíhá v přirozeném prostředí nebo zemině s příměsí humusu. Perioda světla je dána denním cyklem podle slunovratu. Rostliny rostou tak, jak byly geneticky nakódovány v rámci možností daného prostředí, které nemusí být z dnešního pohledu vždy efektivní. Jednoleté rostliny končí svůj životní cyklus na podzim, kdy se krátí denní perioda světla.

1.2 Pěstování v umělých podmínkách

Pěstování v umělých podmínkách je většinou více sofistikované pěstování v přirozených podmínkách ve skleníku nebo pěstebním prostoru bez ohledu na venkovní světelné podmínky. V drtivé většině se dnes z ekonomických důvodů používá místo zeminy hydroponní systémy, takže rostlina si bere živiny prakticky přímo z vody.

Za ideálních podmínek, kdy má rostlina k dispozici kvalitní závlivu, periodu světla a čerstvý vzduch není nutné k růstu a květenství nic dalšího a tyto podmínky můžeme simulovat v laboratoři, na zaoceánské lodi nebo na oběžné dráze.

1.2.1 Teplota

Ideální teplota vzduchu pro pěstování zeleniny vyskytující se běžně v našich podnebných podmínkách, je v rozmezí 24° C až 28° C přes den. V rozmezí 18° C až 26° C by měla být teplota během noci, kdy rostlina spí. Teplota má velký vliv na správné fungování fotosyntézy.

Snižování teploty vzduchu rostlin je pod lampami velmi ekonomicky náročné zvláště v zemích, kde jsou průměrné denní teploty u horní meze ideálních teplotních podmínek. Pod lampami se teplota zvyšuje světelnou radiací z výbojek a je nutné počítat s klimatizačními jednotkami nebo jiným způsobem chlazení.

Pokud rostlina má nízké teploty, nedojde ke správnému nastartování procesu fotosyntézy a rostlina nestačí produkovat potřebnou energii pro svůj růst. To se projevuje chudší stavbou rostliny a slabšími stonky. V důsledku jsou rostliny postižené nízkou teplotou menší v porovnání s rostlinami, které neměly z nízkých teplot šok.

Naopak, pokud jsou teploty vysoké, rostlina není schopná živiny rozvádět buněčnou strukturou a hyne. V hydroponních systémech je při zvýšených teplotách vysoké riziko kořenové hniloby, která vznikne přemnožením hub, žijících běžně v kořenových systémech v symbióze s rostlinou.

Prevencí kořenové hniloby je umělé vysazení houby *Trichoderma* do kořenového systému. Tato houba je predátor ostatních hub, ale neškodí tolik kořenovému balu. Nasazení *Trichodermy* se stalo běžným úkonem u rajčat a salátů.

1.2.2 Vlhkost vzduchu a půdy

Vlhkost vzduchu je potřeba udržovat zejména na začátku životního cyklu rostliny co nejvyšší. U rajčat a salátů se drží relativní vlhkost vzduchu při zasazení semen po dobu několika dnů u hodnoty 90 %. Ve fázi pozdějšího růstu, zpravidla několik týdnů od vyklíčení, když ještě nejsou vidět plody rostliny, stačí úroveň relativní vlhkosti 70–80 %. Ve finále životního cyklu, nejčastěji poslední měsíc, se relativní vlhkost zase snižuje aby se předešlo hnilobě na plodech, protože rostlina ke konci životního cyklu ztrácí na vitalitě a oslabuje svůj organismus, stává se náchylnější na vnější vlivy.

Měření vlhkosti půdy je důležité u systému s automatizovaným zaléváním. Důležité jsou souvislosti vlhkosti půdy s množstvím rozpuštěných solí umělé výživy v substrátu a vlastností materiálu samotného substrátu. Některé substráty vyžadují více vody na svůj objem než jiné. Bývá tím zpravidla perlit nebo kokos, tedy substráty, které se používají jako tzv. inertní a samy o sobě nejsou zdroji živin. Naopak živné půdy obsahují velké množství humusu, a proto není potřeba přidávat tolik vody k zavlažení.

Zeminy a rockwool udrží zpravidla 80–90 % svého objemu vody. Naopak perlit jen 22–26% a kokosová vlákna pouze 33–44 %.

1.2.3 Světelné podmínky

Sluneční paprsky jsou základním předpokladem pro fungování fotosyntézy. Bez správného spektra světla, intenzity a periodického denního cyklu není možné aby se rostlina zdravě vyvíjela.

Fotosyntetická asimilace je složitý vnitřní proces, při kterém biomechanismy mění přijatou energii světelného záření na chemickou energii. Fotosyntéza probíhá v chloroplastech rostlin a dalších eukaryotických organizmů. Průběh můžeme rozdělit na dvě části. Pigmenty nejdříve zachytí světelné záření a získají z něj energii pro následující děj k rozkladu vody a uvolnění kyslíku.[19]

Hluboko v genetické informaci je zakódován mechanismus, který na základě poměru délky světla a tmy v denních periodách řídí životní cyklus rostliny. Na začátku léta je delší perioda světla než tmy v denním cyklu, na podzim se zkracuje. Aby rostlina udržela svou reprodukci, snaží se ukončit životní cyklus (za předpokladu, že jde o tzv. jednoletou rostlinu) těsně před začátkem podzimu, kdy se podmínky pro růst začínají zhoršovat a blíží se období, ve kterém by rostlina uhynula.

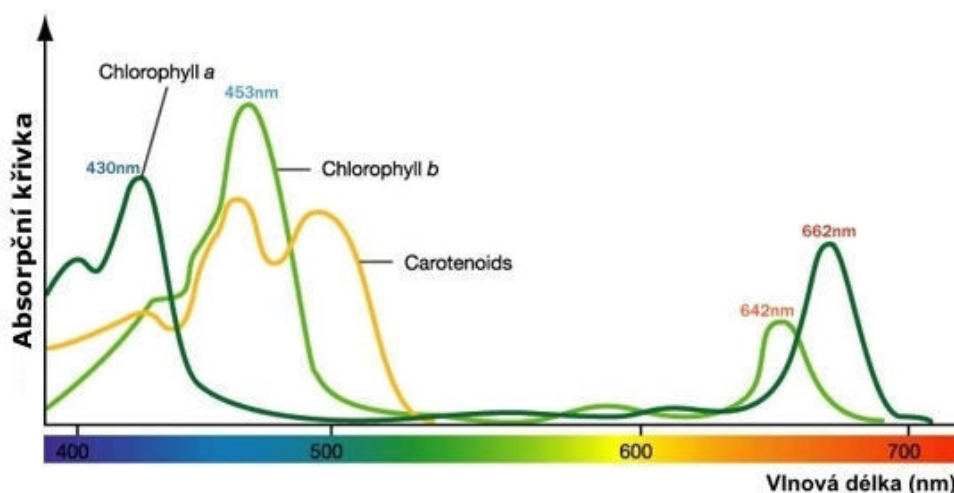
Tohoto efektu využíváme při plně umělém pěstování v uzavřených prostorech nebo laboratoři. Pouhou změnou periody dokážeme rostlině říct, ve které fázi růstu nebo květu se nachází. Pěstování tedy není závislé na ročním období a můžeme pěstovat bez ohledu na vnější světelné podmínky.

Procesy uvnitř rostliny reagují různě na rozdílné vlnové délky světelného spektra pod kterým rostou. Nejdůležitější je spektrum o vlnové délce 440 nm až 480 nm a 650 nm až 680 nm. Kratší vlnová délka je důležitá v růstové fázi a delší vlnové délky jsou důležité v květové fázi, kdy probíhají složité procesy a přeměny v organismu rostliny.

Slunce vyzařuje spektrum v celém viditelném spektru i mimo něj. Vlnová délka 315 - 400 nm způsobuje správnou pigmentaci, zesiluje listovou strukturu a přispívá k hubení škůdců žijících v bezprostřední blízkosti rostliny. 440-470 nm je neefektivněji vstřebávané spektrum důležité pro správný květ. Nejdůležitější jsou vlnové délky 439 nm a 469 nm. 510 nm je nezajímavé spektrum, jedná se o zelenou barvu a chlorofyl s ní nedokáže nijak nakládat. 610 nm nepřináší stejně jako 510 nm žádný benefit pro chlorofyl ale je efektivně zpracováván phycoerytinem a phycocyaninovými receptory. 640 - 640 nm je spektrum důležité pro květovou fázi. Dominantní vlnové délky jsou 642 a 667 nm. 740 nm je vlnová délka, kde se uplatňuje Emerson Enhancement efekt, na který reagují chloroplasty v buněčné struktuře.[20]

Všechny tyto vlnové délky jsou přirozeně zastoupeny ve vlnovém spektru slunce a pokud chceme simulovat v laboratorních podmínkách slunce je nutné všechny tyto vlnové délky zastoupit v potřebné intenzitě.

Pro zefektivnění umělého pěstování se z energetického hlediska vynechává zelené světelné spektrum, se kterým rostliny neumí hospodárně nakládat.



Obrázek 1.1: Závislost absorpčních schopností chloroplastů na vlnové délce [1]

1.2.4 Oxid uhličitý

Běžný obsah oxidu uhličitého ve vzduchu je kolem 400 ppm. V dávných dobách byly tyto hodnoty mnohem vyšší, avšak v posledních tisíciletích je flóra po celém světě v takovém zastoupení, že díky fotosyntéze všech rostlin se úroveň CO₂ stabilizovala na dnešní hodnotě.

Pokud se rostlinám zvýší úroveň oxidu uhličitého, urychlí se proces fotosyntézy a rostliny produkují více kyslíku, můžeme tedy hovořit o jakési autoregulaci úrovně oxidu uhličitého v atmosféře naší Země.

V umělých podmínkách je možné zvýšit intenzitu osvětlení, ale samotné toto zvýšení nepřinese větší výnos plodů rostliny. Aby fotosyntéza fungovala lépe, je potřeba zvýšit nejen intenzitu světla ale i úroveň oxidu uhličitého, který je jedním z důležitých vstupních prvků fotosyntézy.

Úroveň oxidu uhličitého je možné zvyšovat až na úroveň 1200–1500 ppm tím se zvýší výsledný výnos plodů až o 20–24 %, rostlina snese vyšší teploty o 3–5°C aniž by to na ní mělo negativní vliv.

Pokud uměle zvýšíme úroveň oxidu uhličitého je žádoucí snížit relativní vlhkost o 7–15 %, aby se rostlině lépe dýchalo.[21]

1.2.5 Kyselost prostředí a koncentrace živin

Rostliny stejně jako jiné živé organismy na Zemi potřebují pro svůj život přijímat živiny. Jako primární biogenní prvky označujeme dusík (N), fosfor (P) a draslík (K) a kyslík s uhlíkem, které dokáže rostlina přijímat ze vzduchu.

Kromě N-P-K složek hnojiv respektive umělých živin je potřeba rostlinám dodat i stopové prvky síry, vápníků a jiných prvků, které běžně označujeme

jako mikroprvky.

1.2.6 Dusík

Dusík, to je například amoniak (NH_3), močovina ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) nebo dusičnan amonný (NH_4NO_3), je zodpovědný za růst rostliny, tvorbu proteinů, aminokyselin a hlavně chlorofylu, který je nezbytný pro fotosyntézu.[22]

1.2.7 Fosfor

Fosfor je rostlinám opět dostupný pouze ve formě sloučenin a díky němu správně funguje reprodukční systém, protože je v DNA a RNA všech živých organismů. Rostlinu udržuje vitální a pomáhá při rozvoji kořenového systému, díky kterému dokáže rostlina vstřebat lépe větší množství živin. Fosfor také stojí za většími plody. Při nepřirozeně velkém množství fosforu u rajčat pozorujeme nepřirozené zbarvení a velké vodovaté plody.[22]

1.2.8 Draslík

Draslík rostlinám přidáváme v podobě oxidu draselného, je zodpovědný za tvorbu karbohydrátů a proteinu. Stojí za vitalitou rostlin, zvyšuje odolnosti proti nemocem a infekcím.

Všechny tyto prvky a mnohé další si rostlina v přirozeném prostředí bere z půdy, v níž roste. Pokud však chceme podpořit výnos rostliny nebo pěstovat rostlinu v umělém prostředí, je potřeba věnovat zvýšenou pozornost úrovni těchto prvků kolem kořenových systémů.

Při hydroponním pěstování měříme salinitu vody, tzv. EC (electric conductivity), což není nic jiného než vodivost vody vyjádřená v SI jednotkách siemens na metr (S/m). Deionizovaná voda má hodnotu 0 S/m, typická hodnota ideální úrovně vodivosti v hydroponních systémech se pohybuje od 0,7 do 2 mS/cm.

Kromě salinity vody je důležité udržovat i správnou kyselost, ať už substrátu pro pěstování, nebo vody v hydroponních systémech pro správné fungování příjmu živin do organismu rostliny. Jako lidské tělo má svou přirozenou hodnotu PH 5,5, rostlina má svou přirozenou hodnotu prostředí za ideálních podmínek v rozmezí PH 5 až PH 6. Pokud rostlina nemá vhodnou úroveň PH, dochází k omezenému příjmu živných prvků.[23]

1.3 Vstupní periferie a měření parametrů pěstebního prostředí

Senzory pro snímání důležitých parametrů byly vybírány primárně s ohledem na užitnou hodnotu, kdy poměr cena / výkon hrál důležitou roli vzhledem k počtu měřicích senzorů. Jedná se většinou o vývojové kity nebo dobře dostupné senzory s nutnými diskrétními součástkami na desce plošných spojů.

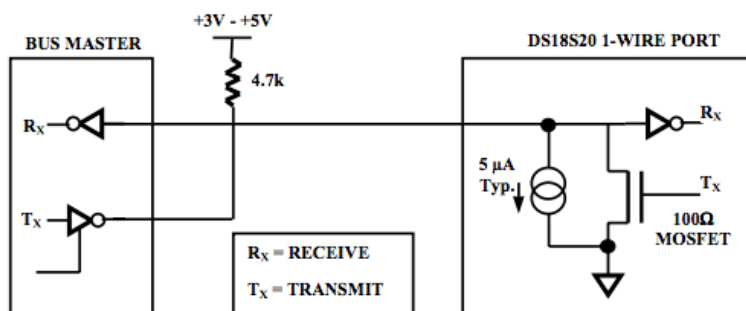
1.3.1 DS18S20 - teploměr

Digitální teploměr od výrobce Dallas semiconductor s rozsahem měřených teplot $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Doba potřebná ke čtení hodnoty po sběrnici 1-Wire je do 750 ms a je čtena jako 9bitové slovo. Čidlo je ve standardním „tranzistorovém” pouzdře TO-92.

Výhodou použití tohoto senzoru při naší aplikaci je velice jednoduché rozšíření počtu senzorů. Každý integrovaný obvod obsahuje unikátní sériové číslo představující adresu na sběrnici 1-Wire, pomocí něhož je možné více čidel na jedné sběrnici jednoznačně identifikovat.

Senzor se připojí na 1-Wire sběrnici jedním digitálním vstupem/výstupem a dva vodiče slouží pro napájení 3–5,5 V. Je možné využít i parazitního napájení, které představuje připojení přes pull-up rezistor přímo na datový vodič. Celá sběrnice 1-Wire jednoho nebo více senzorů může být tvořena pomocí pouze dvou vodičů.

Senzor také umožňuje uživatelsky nastavit dva alarmy na překročení horního, nebo spodního limitu teploty. Na sběrnici se dá vyslat příkaz, na který přijde odpověď z čidel majících spuštěný alarm bit v paměti. Není nutné tedy pro určité aplikace nepřetržitě číst teploty všech čidel, ale stačí sledovat, zda na některém z čidel nebyl spuštěn alarm. Tímto se dá docílit větší efektivity využití sběrnice při velkém počtu čidel. [2]

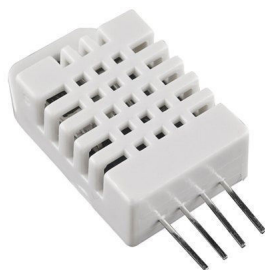


Obrázek 1.2: Blokový diagram sběrnice 1-Wire [2]

1.3.2 DHT22 (DHT11) - teploměr a vlhkoměr vzduchu

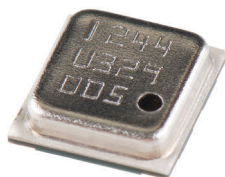
Kombinované digitální čidlo DHT22 slouží pro měření teploty v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti 0–100 %. Měřicím prvkem je polymerový kondenzátor. Přesnost měření teploty je $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesnost měření vlhkosti je $\pm 2\text{ }%$. Tento senzor je oproti ds12b20 mnohem rychlejší a odezva na změny teplot je mnohem pružnější.

Výhodou senzorů s čipem AM2302 je, že jsou z výroby individuálně kalibrovány ve speciální klimatické komoře. Jednak je prováděna výstupní kontrola, zda čidlo správně funguje, a také je přímo do čipu AM2302 uložen kalibrační koeficient, který může být pro různé série senzorů v závislosti na výrobních podmínkách rozdílný. Tím je dosaženo maximální možné přesnosti. [3]



Obrázek 1.3: DHT22 kombinované čidlo teploty a vlhkosti vzduchu [3]

1.3.3 BMP180 - barometrický senzor

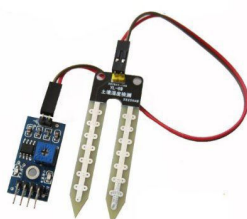


Obrázek 1.4: Pouzdro barometrického čidla a teploměru BMP180 [4]

Je kombinovaný piezo-rezistivní senzor tlaku a teploty vzduchu od firmy BOSCH. Je primárně určen pro měření v mobilních zařízeních, proto je vybaven I₂C sběrnici, která velmi usnadní implementaci a má velmi malý odběr. Provozní teploty jsou $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro přesné měření je nutné držet teploty v rozsahu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odběr senzoru je v řádech jednotek μA . Přesnost tlakového senzoru je $\pm 12\text{ Pa}$, což odpovídá změně nadmořské výšky $\pm 17\text{ cm}$. Teplotní senzor má přesnost $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Senzor je primárně určen k měření nadmořské výšky v mobilních zařízeních, my jej můžeme použít v páru s druhým senzorem pro měření rozdílu tlaku mezi vnějším a vnitřním prostorem určeným pro umělé pěstování, a to kvůli kontrole podtlaku - správné cirkulace vzduchu. [4]

1.3.4 YL-69 - senzor vlhkosti půdy



Obrázek 1.5: Sensor vlhkosti půdy s předzesilovačem [5]

Senzor vlhkosti půdy je zapojen s napětovým komparátorem LM393 a má dva výstupy, jeden analogový a druhý digitální, bohužel ale dvoustavový. Digitální výstup sepne po dosažení stejného napětí na komparátoru jak z napětového děliče elektrody, tak děliče nastavitelného potenciometrem.

Pro naše účely byl použit osmikanálový A/D převodník MP3208 s rozlišením 12 bit, který dokáže převést analogový výstup z přípravku pro měření vlhkosti půdy a přes SPI sběrnici je možné tuto hodnotu předat v digitální podobě Raspberry Pi. A/D převodník byl zvolen osmikanálový pro možné budoucí rozšíření buď senzory pro měření vlhkosti půdy, nebo jinými senzory s analogovým výstupem.

Hodnoty na napětovém děliči jsou různé u různých elektrod a při testování bylo dosahováno různých výsledků u různých substrátů (černá zem, muškátový substrát, kokosová vlákna).

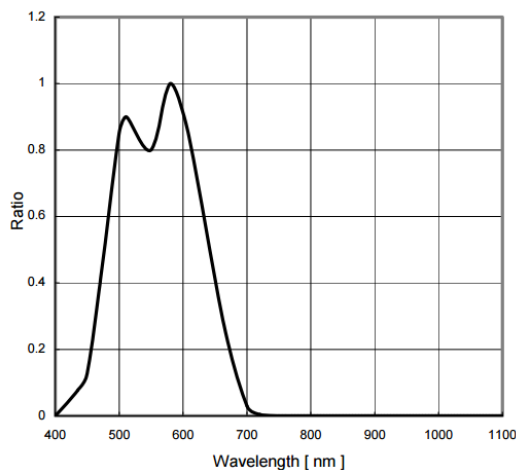
Analogový výstup při napájecím napětí 3,3 V ukazuje 3,3 V, pokud je mezi elektrodami vzduch. Pokud ponoříme elektrody do kohoutkové vody, napětí klesne na 1,1 V. Takto byla empiricky zvolena stupnice pro určení vlhkosti půdy v rozmezí 0 až 100 %, kdy 0 % představuje vzduch mezi elektrodami a 100 % stav ponořených elektrod do kohoutkové vody.

Pokud má být naše platforma univerzální, je třeba nechat na uživateli kalibraci, a proto budeme pracovat s výstupem ze senzoru vlhkosti půdy jako hodnotou napětí a vytvoříme profil pro převod na vlhkost pro nám známé čidla vlhkosti půdy. [5]

1.3.5 BH750 - luxmetr

Pro měření intenzity světla je použit světelný senzor BH750 s rozsahem měření 0–65535 lx s přesností ± 1 lx. Data jsou posílána po I2C sběrnici ve dvou bytech, rozlišení je tedy 16 bitů. Senzor pracuje ve dvou režimech, režim s vyšší rychlostí měření má nižší rozlišení, pro naše potřeby je zcela vyhovující i pomalejší rychlost odměru intenzity světla s vyšší přesností.

Senzor je vybrán kvůli své citlivosti na spektrum 1.6, které je víceméně shodné se spektrem vlnových délek světla, na které chloroplasty reagují fotosyntetickými jevy. Senzor může sloužit jako jednoduchý indikátor zapnutí umělého osvětlení nebo může sloužit i jako relativně přesný měřič intenzity světla. [6]



Obrázek 1.6: Relativní citlivost BH750 na části světelného spektra [6]

1.3.6 MH-Z19 - senzor oxidu uhličitého ve vzduchu

Senzor plynného oxidu uhličitého pracuje na principu nedisperzního infračerveného záření - NDIR, obsahuje vestavěný teploměr pro automatickou kompenzaci měření. Má jak digitální, tak analogový výstup. Pro naše účely využíváme digitálního výstupu v podobě UART komunikace na virtuální sériové sběrnici Raspberry Pi.

Rozsah měření oxidu uhličitého je 0–5000 ppm s přesností měření ± 50 ppm. Doba potřebná pro naběhnutí senzoru do pracovního režimu je 3 minuty. [7]

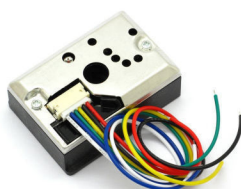


Obrázek 1.7: Senzor oxidu uhličitého ve vzduchu MH-Z19 [7]

1.3.7 Optický senzor kvality ovzduší Sharp GP2Y1010AU0F

Optický senzor kvality ovzduší pracuje na principu sledování odraženého světla od prachových částic osvětlených LED zdrojem světla.

Senzor pracuje s periodou měření 10 ms, respektive vzorkovací frekvencí 100 Hz. Výstupní napětí v pracovním bodě je lineárně závislé na prachových částicích v otvoru senzoru. Dokáže měřit v rozsahu 45-400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [8], přičemž zákonný maximální limit v ČR je 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (Nejvyšší roční průměr znečištění ovzduší byl naměřen v roce 2002 v Ostravě, činil 10,26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, v Praze 2 v Legerově ulici činil 5,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.) [24]



Obrázek 1.8: Optický senzor kvality ovzduší Sharp GP2Y1010AU0F [8]

1.3.8 PH a EC moduly pro měření salinity a kyselosti vody

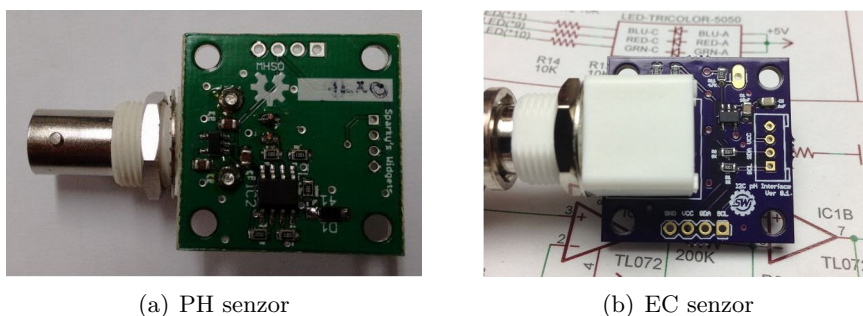
Jak bylo v předchozích odstavcích řečeno, pokud budeme chtít pěstovat rostliny v umělém prostředí a místo půdních substrátů budeme kořenové systémy udržovat v hydroponních systémech, je potřeba monitorovat i vlastnosti živného roztoku.

Nejdůležitější hodnoty roztoku jsou salinita (EC), která nepřímo vyjadřuje obsah živin NPK složek vázaných na soli ve vodě. A neméně důležitá je pro nás hodnota PH vody. Kořenové systémy jsou schopné přijímat živiny, jen pokud se PH pohybuje v určitých hranicích.

Moduly pro měření PH a EC vody obsahují BNC konektor pro připojení vodotěsné hlavice senzoru. Výstup je z A/D převodníku na I²C sběrnici předáván v rozlišení 12 bit.

Modul PH je potřeba pro přesné měření zkalibrovat pomocí dvou etalonů o rozdílných nabufferovaných hodnotách PH, nejčastěji PH4 a PH7.

Sonda se vloží do kalibračního roztoku PH4 a zaznamená se hodnota načtená z převodníku, stejný postup se opakuje pro PH7. Přímka mezi těmito body je linearizována a používá se pro převod hodnot z A/D převodníku na hodnoty PH. Podobný postup kalibrace se provádí i u sondy pro EC [9][10]



(a) PH senzor

(b) EC senzor

Obrázek 1.9: Vlevo modul senzoru PH, vpravo modul senzoru EC

1.4 Ovládání akčních členů

Mezi výstupy Chillstation patří šest spínaných zásuvek typu E a F, které umožní přímé ovládání zařízení regulující pěstební podmínky, mezi něž patří osvětlovací lampy, klimatizační ventilátory, zavlažovací čerpadla, spínací solenoid elektromagnetického ventilu pro dávkování CO₂.

Pro spínání je použit komerční modul osmi relé, primární cívky jsou galvanicky oddělené od vstupů pomocí optočlenů. Každé relé má stavovou LED signalizaci.

1. ROZBOR PĚSTEBNÍCH PODMÍNEK



Obrázek 1.10: Deska ovládacích relé pro spínání zásuvek [11]

1.4.1 Elektrický přímotop ECG TV 25

Elektrický přímotop značky ECG o příkonu 2000 W byl použit v druhé testovací fázi ve skleníku pro ohřev vzduchu. Pro správnou funkčnost regulovaného systému bylo zapotřebí vyřadit z funkce vestavěný termostat a zafixovat regulátor výstupního výkonu proti nechtěnému přenastavení při manipulaci s přímotopem v prostorách skleníku. Původně obsahoval dva otočné ovladače.

První otočný ovladač byl s aretací ve čtyřech polohách, v první poloze byl přímotop vypnut, v druhé poloze se spínala termostatem jedna topná spirála, ve druhé poloze se spínaly dvě topné spirály a ve třetí poloze běžel přímotop na plný výkon 2000 W se třemi zapnutými spirálami.

Druhý otočný ovladač sloužil k otáčení bimetalového termostatu pro spínání přímotopu při poklesu na danou teplotu. Bohužel otočný spínač neobsahoval stupnici ocejchovanou údaji o teplotě, ale pouze informativní piktogramy značící, kde je spínaná teplota nejvyšší a kde nejnižší. [12]



Obrázek 1.11: Přímotop značky ECG TV 25 o příkonu 2000 W [12]

1.4.2 Radiální ventilátor CANFAN RUCK 160

Pro potřeby odtahu vzduchu z pěstebního prostředí byl pořízen průmyslový radiální ventilátor, který se běžně používá v průmyslových klimatizacích. Jeho výhodou je praktické uspořádání vstupu a výstupu v jedné ose a možnost uchycení díky proloženým železným profilům.

Potrubní ventilátor má negativně zahnuté lopatky, integrovanou tepelnou pojistku, ventilátorová jednotka je vyvážená ve 2 rovinách v souladu s G 2,5 DIN ISO 1940, je vyroben z odolného materiálu PA6 GF 15 RAL 7035, má interně zapojený kondenzátor, stator má protikorozní ochranu – galvanické zinkování a rotor má bezúdržbová kuličková ložiska s vysokou životností. [13]



Obrázek 1.12: Potrubní ventilátor CANFAN RUCK 160 [13]

Tabulka 1.1: Parametry ventilátoru CANFAN RUCK 160

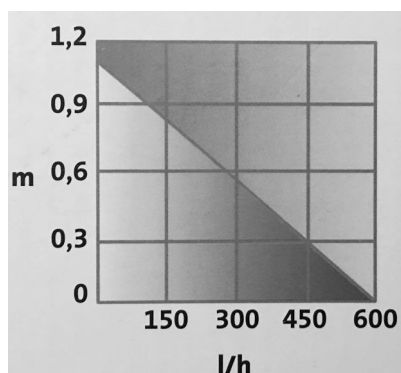
Napětí:	230 V
Proud:	0,23–0,28 A
Hladina akustického tlaku:	63 dB(A)
Průtok vzduchu:	480 m ³ /hod
Příkon:	65 W
Maximální teplota:	70°C
Průměr příruby:	160 mm
Hmotnost:	2,8 kg

1.4.3 Vodní čerpadlo HEISSNER HSP600-00

Vodní čerpadlo HEISSNER HSP600-00 bylo použito pro zalévání skleníku. Jde o hobby čerpadlo určené do zahradních jezírek pro vodní efekty. Toto čerpadlo bylo zvoleno, protože je přímo určeno pro ponor do lehce znečištěné vody. [14]



Obrázek 1.13: ponorné čerpadlo HEISSNER [14]



Obrázek 1.14: Graf závislosti průtoku na výšce vodního sloupce na výstupu čerpadla [10]

1.4.4 LED zdroj světla pro umělé pěstování

Pro simulaci přirozených světelných podmínek se běžně při umělém pěstování používají výbojky typu MH a HPS, jejichž použití je dnes běžná záležitost. V poslední době se dostává trend LED boomu i do světa pěstování a je možné sehnat z Číny různé světelné panely o různých konfiguracích.

Pro vyzkoušení bylo použito šest identických panelů o deklarovaném příkonu 300 W.



Obrázek 1.15: LED 300 W panel OEM výrobce z Čínské provincie [15]

Tabulka 1.2: Parametry LED panelu 300W

Počet LED	100 ks
Nominální výkon LED	3 W
Deklarovaný výkon panelu	300 W
Příkon panelu	141 W
Rozměry	300 x 166 x 55 mm

Reálný příkon LED panelu je 141 W, oproti udávaným parametrům prodejce se značně liší. Uvnitř panelu jsou dva zdroje proudu pro každou polovinu LED panelu. Výhodou tohoto zapojení je možnost v případě poruchy vyměnit zdroj proudu, který je běžně k sehnání.

Každá LED má paralelně zapojenou zenerovu diodu, takže v případě poruchy jedné LED nepřestane svítit celý sloupec kvůli sériovému zapojení.

Dalším ochranným prvkem jsou dva ventilátory o průměru 120 mm, které ze zadní části panelu odsávají teplý vzduch a vyfukují ho do nejbližšího prostoru kolem zařízení.

1. ROZBOR PĚSTEBNÍCH PODMÍNEK

Panel se skládá z různých LED diod podle vlnových délek. Bohužel výrobce ani distributor nemá k dispozici list s konkrétním uspořádáním, dle kódu na LED se dá ale dohledat konkrétní výrobce nebo alespoň informace. Zastoupení vlnových délek je v tabulce 1.3

Tabulka 1.3: Parametry LED diod panelu 300W

Počet	Barva
4 ks	390 - 400 nm
20 ks	440 - 4500 nm
20 ks	450 - 460 nm
20 ks	600 - 610 nm
18 ks	620 - 630 nm
2 ks	650 - 660 nm
2 ks	720 - 730 nm
2 ks	bílá 3500 K
2 ks	bílá 6000 K

1.4.5 Dávkování CO₂

Pro dotování pěstebního prostředí oxidem uhličitým je použita tlaková lahev s redukčním ventilem s tlakoměrem, průtokoměrem a jemným ladicím redukčním ventilem. Výstup soustavy je otevírán a uzavírán elektromagnetickým ventilem na 230 V.

Tlaková lahev pojme 6 kg oxidu uhličitého v kapalném skupenství. Lahev je pronajata od společnosti Linde technoplyn, která se stará o pravidelné tlakové zkoušky a funkčnost lahve. Tlakoměr orientačně zobrazuje zbývající množství plynu v lahvi. Plná 6kg lahev má plnění minimálně 50 bar. S ubývajícím množstvím plynu klesá i tlak v lahvi.

Důležitým aspektem při používání tlakové lahve na CO₂ je teplota prostředí, ve které se lahev nachází. Stlačený oxid uhličitý je velmi citlivý na teploty. Při teplotách k 50 °C dosahuje tlak v lahvi takových hodnot, že může dojít k upuštění přetlakovým ventilem.



Obrázek 1.16: Redukční ventil s průtokoměrem a solenoidovým ventilem

Srovnání existujících řešení na trhu umělého pěstování

Dnešní trh nenabízí tolik hotových produktů pro pěstitele do domácích podmínek. U většiny řešení je uživatel do značné míry izolován od algoritmů pro ovládání a nastavení detailních parametrů systému, pomocí nichž by dokázal přizpůsobit řídicí systém danému prostředí nebo potřebám konkrétních rostlin.

Tato hotová řešení jsou pro jednotlivce finančně nedostupná. Firmy staví tato řešení v průmyslových objektech velkopěstitelům na klíč.

2.1 Průmyslové systémy AVID

AVID Growing System z kanadského Ontaria představuje v dnešní době nejznámější komerční systém pro pěstování rostlin, který se vyvážá do celého světa. Je to mezi pěstiteli uznávané a funkční řešení s mnoha referencemi, obzvláště od pěstitelů chilli papriček a šlechtěného konopí pro medicínské účely.

Prostředí pro kořenový systém je aeroponického typu, kořeny nejsou ani v substrátu, ani ve vodě, ale pouze v zatměném prostoru a živiny se pro nejlepší efektivnost rozprašují ve formě areosolu přímo na kořenový systém.

Pro osvětlení se používají vysokotlaké HPS a MH výbojky, které jsou dostatečně odzkoušené praxí a jejichž spektrum téměř dokonale odpovídá potřebám rostlin. MH výbojka je určena pro vegetativní fázi a HPS výbojka pro fázi květu. Výbojky jsou na motorizovaných kulisách, kterými se dá vertikálně manipulovat pro zvolení ideální výšky nad vršky rostlin.

Řešení má i přehledovou kameru, kterou se dá uzavřený prostor sledovat. Podobné systémy se používají na lodích při dlouhých zaoceánských plavbách nebo expedicích za severní polární kruh. Pokud si kuchyně vyžaduje čerstvé saláty a byliny, není jiná možnost, než je při několikaměsíčních plavbách pěstovat přímo na lodích. Orientační cena je \$30 000 USD. [16]

2. SROVNÁNÍ EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ NA TRHU UMĚLÉHO PĚSTOVÁNÍ



Obrázek 2.1: pěstební systém AVID [16]

2.2 Hobby systém Suzan



Obrázek 2.2: Pěstební systém Suzan [17]

Suzan je polský produkt, původně komunitní projekt s otevřeným kódem, který je nyní zkomercializován a prodáván hobby pěstitelům do nenáročného domácího prostředí.

Kromě základních veličin jako teplota a vlhkost dokáže monitorovat úroveň CO₂ ve vzduchu, spínat umělé osvětlení, větrání nebo solenoidový dávkovač pro CO₂ z tlakových lahví.

Kromě ovládacího prvku přímo u zásuvky je možné připojit Suzan do sítě a provádět nastavení a monitoring vzdáleně z aplikace v počítači nebo z chytrého telefonu. Kromě hlavní zásuvky se spínáním silových okruhů je k dispozici značné množství rozšíření.

Samotné řešení představují pouze ovládací prvky bez prostoru k pěstování a spotřebičů. Orientační cena je 14 000 Kč. [17]

2.3 Hobby systém GROWDUINO



Obrázek 2.3: Pěstební systém Growduino [18]

Growduino má nejbližší k cíli diplomové práce, jde o tuzemský produkt primárně určený hobby pěstitelům pro ovládání pěstebních podmínek v uzavřených prostorech nebo sklenících. Konstruktivně je growduino řešené umístěním veškerého vybavení do plastového boxu tak, aby se elektronické obvody chránily před vnějšími vlivy.

Growduino, jak už název napovídá, je postavené na klonech vývojových desek Arduino a celé snímání, ovládání pěstebních podmínek a uživatelské prostředí je řízeno osmibitovým procesorem řady ATmega. Pro pěstitele přináší komfort snadného nastavení přes webové rozhraní, spoustu pokročilých funkcí známých spíše od průmyslových řešení a rychlou odezvu vývojového týmu. Orientační cena je 15 000 Kč. [18]

Návrh vlastního řešení

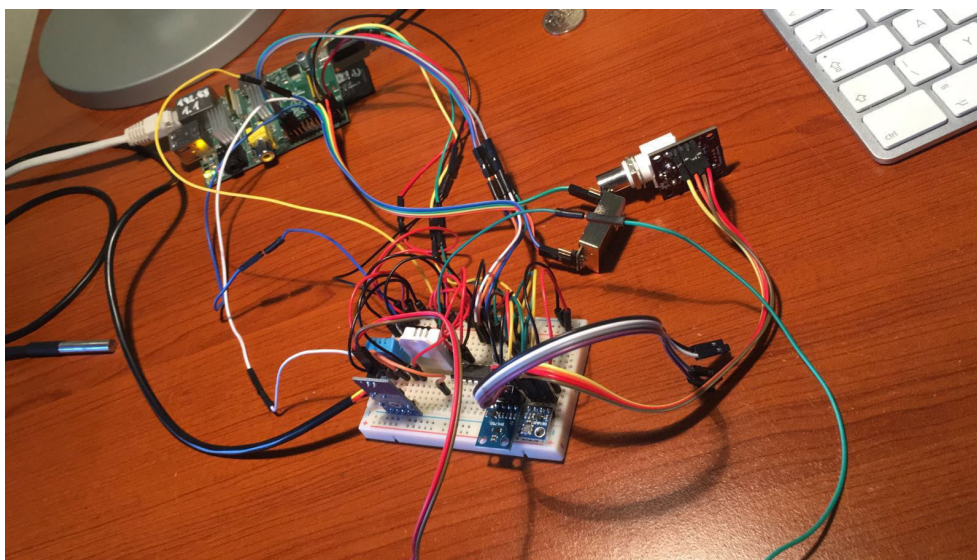
Protože existující řešení jsou nedostupná a uzavřená, byla snaha systém Chillistation sestavit z běžně dostupných senzorů a hardwarových platforem a volně šiřitelného kódu nepodléhajícího komerčním licencím. Díky tomu je možné nabídnout otevřenou platformu jako základ ovládání a monitorování pěstebního prostředí, která může být do značné míry přizpůsobena individuálním podmínkám.

3.1 Vývojová platforma

Pro vývoj byla zvolena deska Raspberry Pi, tedy úsporný ARM procesor, ale s běžnými periferiemi známými ze stolních počítačů (ethernet, USB) a navíc rozšířený o sběrnice známé spíše ze světa 8bit jednočipů jako SPI a I²C.

- 1.2GHz 64-bit quad-core ARMv8 CPU, SOC802.11n Wireless LAN / Bluetooth 4.1
- 1GB RAM
- 4 USB porty
- 40 GPIO včetně sběrnice UART, SPI, I²C
- HDMI port, Ethernet port
- Micro SD slot

Operační systém je zvolen GNU/Linux v distribuci Debian upravený a udržovaný přímo pro vývojové desky Raspberry Pi, liší se od běžné distribuční větve zejména implementovanými ovladači pro rozšiřující sběrnice a nenáročným grafickým prostředím, které je možné použít i na takto relativně nevýkonné platformě. Avšak Chillistation nepotřebuje grafické rozhraní a díky vysokoúrovňovým programovacím jazykům jako Python a skriptovací jazyk



Obrázek 3.1: Prototyp části zapojení na nepájivém poli

BASH je možné vývoj řídit po síti připojením přes SSH tunel úpravou souborů přímo v adresářové struktuře operačního systému bez potřeby kompilace zdrojových kódů a nahrávání do desky - to oproti práci s běžnými jednočipy výrazně urychlí prototypování a samotný vývoj.

GNU/Linux, BASH, Python, PHP, MySQL a všechen další software, který je použit v této práci, je otevřeně licencován a je možné ho použít bez omezení i pro komerční účely.

3.2 1. Testovací zařízení

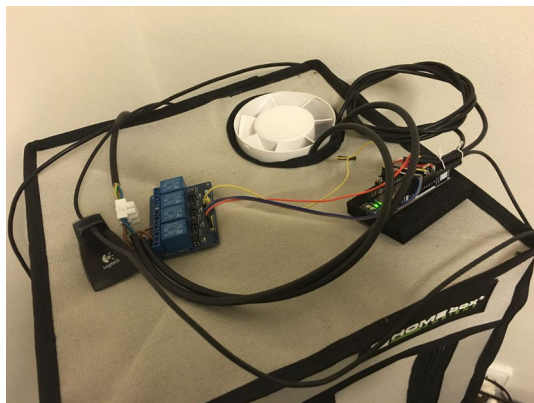
Testování a ladění senzorů k ověření správné funkčnosti všech připojených čidel a periférií probíhalo kvůli častým změnám zapojení a změnám připojení k GPIO sběrnici Raspberry Pi na nepájivém poli. Pokud se dané zapojení osvědčilo, bylo zakresleno do schématu, z něhož v poslední fázi vývoje vznikla deska Chillstation interface. Fáze testování probíhala bez nasazení v reálném prostředí.

3.3 2. Umělé podmínky pro pěstování papriček

K prvnímu reálnému nasazení testovacího zařízení došlo u papriček v pěstebním boxu o rozměrech 30 x 30 x 60 cm. K umělému osvětlení byla použita CFL výbojka s příkonem 50 W se světelným spektrem pro růstovou fázi rostlin.

3.3. 2. Umělé podmínky pro pěstování papriček

Do skříně byl umístěn radiální ventilátor, který reguloval jednoduchým ON/OFF regulátorem odtah teplého vzduchu ze stanu a tím vnitřní teplotu rostoucí díky teplu z CFL výbojky. Dalším regulovaným výstupem byla CFL výbojka, která simulovala denní periodu světla.



Obrázek 3.2: Regulační prvky pěstebního boxu



Obrázek 3.3: Pohled na CFL výbojku a papričky

Objevil se zásadní nedostatek v malém objemu vzduchu ve skříně, díky tomu byla odezva systému tak rychlá, že se změny teploty projevily prakticky ihned po spuštění větráku k odtahu teplého vzduchu.

Papričky během dvou týdnů dorostly do takové velikosti, že musely být přesazeny mimo stan. Bylo tedy brzy opuštěno od malého pěstební boxu a s blížícím se létem 2016 byl zrealizován větší pěstební prostor. Díky pěstebnímu boxu se povedlo ověřit několik zásadních principů ovládní teploty uvnitř uzavřeného prostoru pro pokračování práce na regulátoru a připojení Chillistation do sítě.

3.4 3. Regulované prostředí skleníku

Druhým testovacím prostředím byl skleník vystavěný v květnu 2016 přímo pro potřeby testování systému Chillistation. Zde bylo cílem ověřit ovládní více akčních členů, regulování teploty v uzavřeném prostoru a další vstupní periferie pěstebnímu systému.

Jde o malý skleník z polypropylenového dutinkového materiálu, který je odolný proti povětrnostním vlivům. Základ skleníku je ze ztraceného bednění do hloubky 50 cm a na něm jsou obvodové železné profily. Stavba betonového základu probíhala dvě odpoledne a stavba samotného skleníku pak celý víkend za pomoci celé rodiny. Žádné speciální úpravy kromě držáku na radiální ventilátor a vykroužení otvoru o průměru 160 mm ve štítu skleníku nebyly zapotřebí.

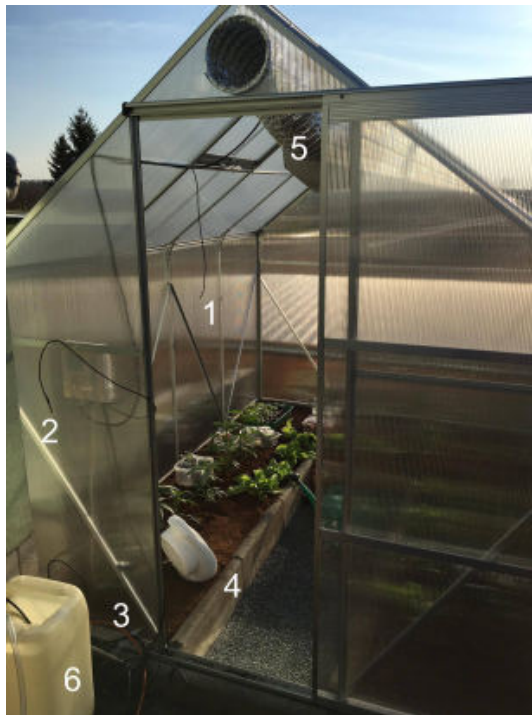
Do systému byl přidán další teploměr pro měření teploty mimo pěstební prostor. Protože bylo zbytečné měřit vlhkost vzduchu mimo prostor skleníku, byl použit samostatný teploměr typu DS18B20. Byl také použit senzor pro měření relativní vlhkosti půdy, respektive její vodivosti typu YL-69. Výstupy systému byl elektrický přímotop, radiální potrubní větrák pro odsávání teplého vzduchu a ponorné čerpadlo pro zalévání skleníku.

Vstupy systému:

- DHT22 (teplota a vlhkost vnitřního prostředí skleníku, č. 1 na obr. 3.4)
- DS18B20 (teplota vnějšího prostředí skleníku, č. 2 na obr. 3.4)
- YL-69 (relativní vlhkost kokosového substrátu ve skleníku, č. 3 na obr. 3.4)

Výstupy systému:

- Elektrický přímotop (pro ohřívání vzduchu ve skleníku, č. 4 na obr. 3.4)
- Radiální ventilátor (pro odtah přehřátého vzduchu ze skleníku, č. 5 na obr. 3.4)
- Ponorné čerpadlo (pro zalévání skleníku z 25l rezervoáru, č. 6 na obr. 3.4)



Obrázek 3.4: Sestava skleníku s přímotopem, odtahem vzduchu a čerpadlem.

Na obrázku č. 3.4 jsou vidět všechny vstupy i výstupy systému včetně řídicí jednotky. Proběhl pokus s PID regulátorem na udržení stálé teploty ve skleníku, ale stávající podmínky a vlastnosti systému znemožnily testování, PID regulátor byl shledán jako nevhodný pro systém s dvoustavovým výstupem.

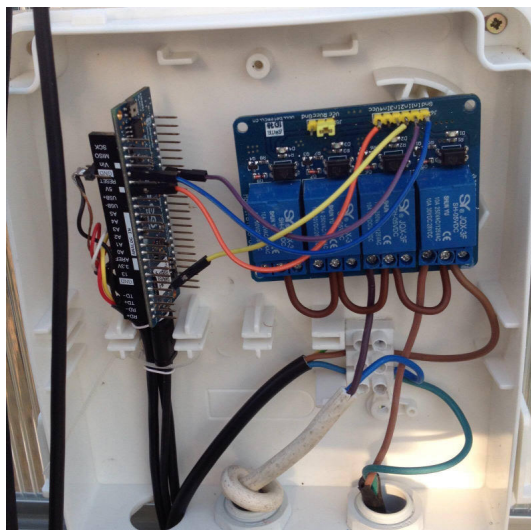
Jako vhodné řešení pro regulaci byl zvolen ON/OFF regulátor s nastavitelnou hysterezí. Ten se osvědčil jak pro regulaci maximálních teplot přes den pomocí ventilátoru na odtah přehřátého vzduchu, tak v noci pro regulaci nejnižších teplot pomocí elektrického přímotopu.

Nastavení podmínek ON/OFF regulátoru je následující.

- Cirkulace vzduchu, respektive odsání teplého vzduchu ze skleníku sepne při teplotě 38 °C a vypne při 32 °C.
- Ohřev vzduchu přímotopem sepne při 13 °C a hystereze 5 °C drží přímotop zapnutý až do 18 °C, pak se vypne.

Vstup systému z čidla na relativní vlhkost půdy YL-69 se nepovedlo během několika dnů žádným způsobem použít na regulaci dávkování závlivky. Je možné, že elektronika čidla neměřila s dostatečnou přesností nebo umístění čidla nebylo zvolené vhodně, ale výstup z čidla ani v jenom případně neodpovídal předpokládaným hodnotám. Empirickým pozorováním a zapisováním

3. NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ



Obrázek 3.5: Řídicí logika a reléové pole pro ovládání přímotopu a odtahu vzduchu



Obrázek 3.6: Rostliny jako testovací vzorek ve skleníku

ručního zalévání byl zvolen následující univerzální algoritmus pro ovládání ponorného čerpadla. Výstup byl nastaven na sepnutí po dobu dvou minut každý den v 20:00 bez ohledu na okolní podmínky. Postup se osvědčil, protože zalévání skleníku není kritické na přesnost.

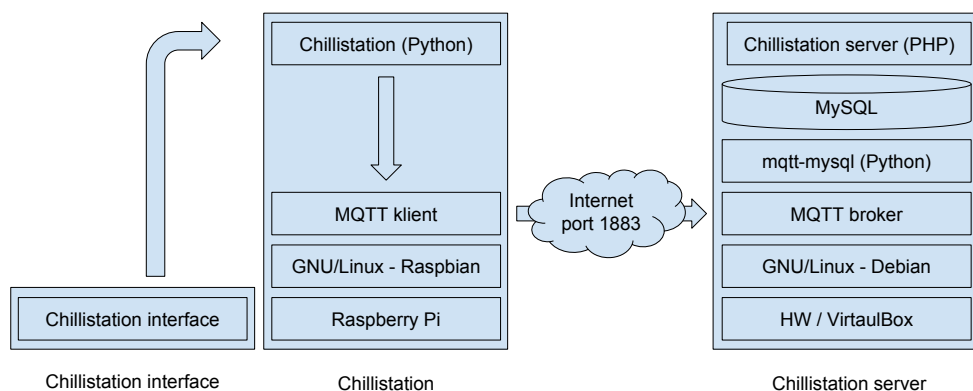
Výsledný užitek regulovaného skleníku nebyl ani tak ve zvýšení výnosu, jako v prodloužení doby, kdy bylo možné ve skleníku pěstovat. V době, kdy se už začínaly objevovat první přízemní mrazíky a venkovní teplota vzduchu klesala k 3-4 °C, ve skleníku teprve dozrávaly poslední okurky a ledový salát.

Bohužel v této fázi nebyly kontinuálně pěstovány referenční rostliny mimo skleník, takže efektivitu řízení pěstebního prostředí není možné přímo porovnat.

3.5 4. Chillistation

Poslední vývojovou fází diplomové práce je Chillistation, celý systém se skládá z následujících dílčích částí:

- Chillistation interface - deska navržená pro propojení čidel s Raspberry Pi;
- Chillistation - Raspberry Pi obsahující program pro lokální řízení pěstebních podmínek a odesílající data na Chillistation Server;
- Chillistation Server - Obsahuje MQTT broker přijímající informace z Chillistation, přijaté hodnoty ukládá do MySQL databáze. O jejich zobrazování se stará aplikace pro webový prohlížeč. Chillistation Server umožňuje distribuování aktualizací a nastavení do Chillistation.



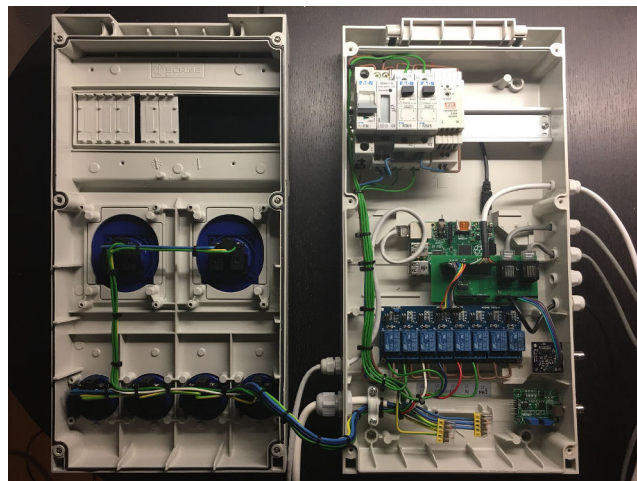
Obrázek 3.7: Blokové schéma dílčích částí Chillistation

Výsledný systém je integrovaný do plastového boxu rozvaděče o krytí IP68, který umožňuje skrytí všech částí Chillistation do jednoho konstrukčního celku. Celý vnitřní obvod boxu je chráněn jističem 16 A a celková spotřeba je měřena 1 DIN modulem pro podružné měření spotřeby elektrické energie pro orientační kontrolu spotřeby systému a možnou statistiku ekonomiky Chillistation. Poslední pozice na DIN liště je obsazena spínaným zdrojem o napětí 5 V a proudem 1 A značky Meanwell. Zdroj napájí Raspberry Pi a má dostatečný výkon pro napájení čidel i spínání relé.

Na DIN liště jsou dva stykače spínající zásuvky č. 1 a č. 2, které jsou určeny k ovládání spotřebičů s vyšším příkonem nebo vysokotlakých výbojek, které se vyznačují indukční zátěží. Stykače relé by se mohly spéct a přestat řádně fungovat.



Obrázek 3.8: Pohled na uspořádání a konstrukci Chillistation



Obrázek 3.9: Pohled na vnitřní uspořádání a konstrukci Chillistation

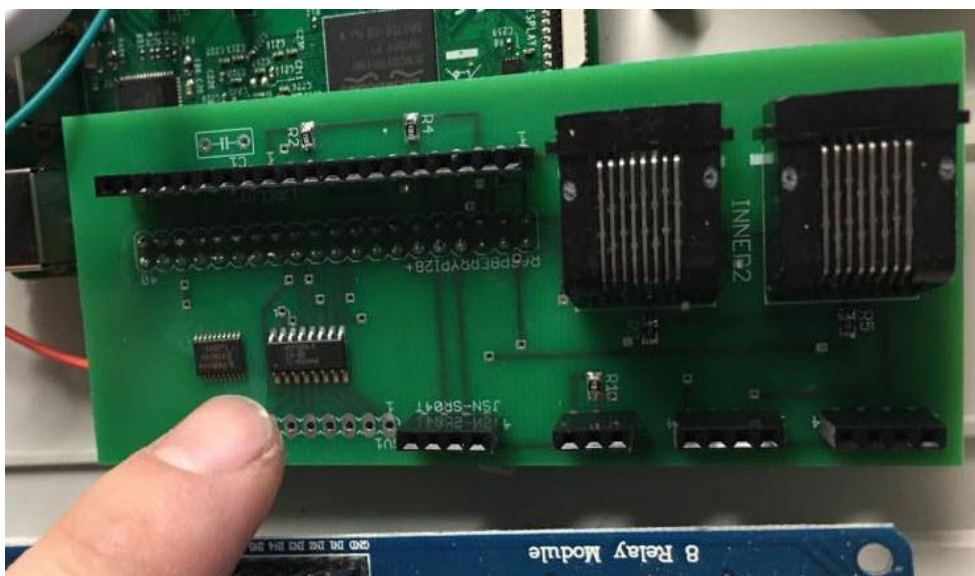
Na distanční sloupcích jsou umístěny tři základní součásti Chillistation.

- Chillistation interface - rozšíření pro Raspberry Pi umožňující komunikaci s čidly
- Chillistation - Raspberry Pi
- 6 relé zásuvek

Na obrázku č. ?? je blokové schéma systému Chillistation. Chillistation interface je deska spojující všechna čidla a propojující Raspberry Pi, které odesílá data na Chillistation server a ovládá výstupní desku s relé.

3.5.1 Chillistation interface

Chillistation interface je vstupní branou systému, umožňuje Raspberry Pi komunikovat se všemi čidly. Výstupem pak je vzdálený monitorovací Chillistation server a lokální deska 6 relé spínající zásuvky.



Obrázek 3.10: Detail Chillistation interface

Návrh desky probíhal už na základě předešlých dvou zkušeností, deska musí být jednoduchá, musí umožňovat jednoduchou výměnu čidel a musí umožnit rychlé propojení s Raspberry Pi. Navíc deska obsahuje A/D sigma-delta převodník, který může rozšířit Chillistation o další funkce.

Schéma interface bylo kresleno na základě doporučených zapojení výrobce a běžně aplikovaných postupů při návrhu desky.

Propojení s Raspberry Pi je pomocí 2x40 dutinkového pinu, který zároveň slouží jako nosný prvek pro desku plošných spojů. Propojení s čidly obsahující pouze DHT22 senzor je realizováno UTP kabelem a konektorem typu RJ-45, toto řešení bylo zvoleno kvůli dobré dostupnosti spotřebního materiálu. Pro propojení s ostatními čidly je využito běžných dutinkových konektorů.

Deska plošných spojů je dvouvrstvá se zelenou nepájivou maskou, byla v jednom exempláři vyrobena na zakázku ve společnosti Pragoboard. Prázdná plocha je vyplněna zemnicí rovinou. Schéma a layout jsou v Příloze C.

Napájení sensorů je řešeno přímo z Raspberry Pi přes GPIO header. Napájecí zdroj je dostatečně dimenzován, aby dokázal napájet všechna čidla. Blokovací a odrušovací kondenzátory nebyly použity, protože jsou již obsaženy v napájecích obvodech Raspberry Pi a mohlo by se to negativně projevit na stabilitě celého systému.

3.5.2 Chillistation

Funkce programů Chillistation se dá rozdělit na tři základní části, které tvoří programové vybavení Raspberry Pi:

- Čtení dat ze senzorů;
- Odesílání dat na Chillistation server;
- Řízení pěstebních podmínek.

3.5.3 Čtení dat ze senzorů

První a nejdůležitější je vyčítání dat ze senzorů, které jsou připojeny pomocí Chillistation interface desky k Raspberry Pi. Každý senzor je jednou za minutu vyčítán jedním programem v adresáři chillistation/sens, pokud je na jedné sběrnici více čidel, jsou hodnoty vypsané pro lepší přehlednost individuálně na každý řádek. Výstupem programu je přirozené číslo s desetinnými místy oddělené desetinou tečkou, bez jednotek.

Každý senzor má vlastní program v souboru nesoucím kódové označení čidla výrobcem součástky. Pro vyčítání dat z čidel je použit skriptovací jazyk Python. Většina čidel je dostupných na sběrnici I2C nebo přes SPI. Pomocí Python skriptu je provedeno vyčtení, a pokud to senzor vyžaduje, tak i přepočítání hodnot na jednotky, se kterými se dá dál pracovat - senzory s analogovým výstupem.

K některým čidlům jsou dostupné velmi dobře zpracované knihovny, jako například ke kombinovanému čidlu teploty a vlhkosti DHTT22, kde k vyčtení hodnoty ze senzoru stačí jeden řádek kódu. Jediné, co je potřeba nastavit jako parametr konstruktoru, je verze čidla a číslo GPIO pinu, na kterém se nachází datový vodič k senzoru. Knihovna si sama ověří dostupnost senzoru, integritu dat a vrátí hodnotu v desítkové soustavě a daném řádu jednotek.

```
import Adafruit_DHT as dht
#inner
innger_h,innger_t = dht.read_retry(dht.DHT22, 18)
print '{0:0.1f} {1:0.1f}'.format(innger_t, innger_h)
#inner2
innger2_h,innger2_t = dht.read_retry(dht.DHT22, 21)
print '{0:0.1f} {1:0.1f}'.format(innger2_t, innger2_h)
#outer
outer_h,outer_t = dht.read_retry(dht.DHT22, 16)
print '{0:0.1f} {1:0.1f}'.format(outer_t, outer_h)
```

Naopak k některým senzorům neexistují knihovny a jejich vyčítání může být pro nezkušeného programátora komplikované. Takovým příkladem může

3. NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

být kód pro vyčítání dat po sériové lince UART ze senzoru pro koncentraci oxidu uhličitého.

```
import serial
import time
#for rpi3 use ttyS0 instead of ttyAMA0
def mh_z19():
ser = serial.Serial('/dev/ttyAMA0',
    baudrate=9600,
    bytesize=serial.EIGHTBITS,
    parity=serial.PARITY_NONE,
    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
    timeout=1.0)
while 1:
    result=ser.write("\xff\x01\x86\x00\x00\x00\x00\x79")
    s=ser.read(9)
    #debug purpose
    #for c in s:
    #print hex(ord(c))
    if s[0] == "\xff" and s[1] == "\x86":
    return {'co2': ord(s[2])*256 + ord(s[3])}
    break
if __name__ == '__main__':
    value = mh_z19()
    print value["co2"]
```

Komunikace je o to složitější, že nestačí jen číst data ze sériové linky, ale je potřeba poslat konfigurační sekvenci před čtením dat a ty je pak nutné ještě správně zpracovat, aby výsledkem byla hodnota ve správných jednotkách.

3.5.4 Odesílání dat z čidel

V kořenovém adresáři chillistation/ se nachází dávkový soubor napsaný ve skriptovacím jazyce Bash, který zavolá všechny programy na vyčítání čidel z adresáře chillistation/sens a hodnoty odešle na Chillistation server.

```

#!/bin/bash
#mh-z19 runtime
sudo systemctl stop serial-getty@ttyAMA0.service

node="1"
ip="178.77.226.101"
DIR="/home/pi/chillistation/sens"

#bh1750
sens1="$(python $DIR/bh1750.py)"
mosquitto_pub -h $ip -t "?node/$node/in/lamp/lux" -m $sens1

#bmp180
sens2="$(python $DIR/bmp180.py)"
mosquitto_pub -h $ip -t "?node/$node/?in/air/presure" -m $sens2

...

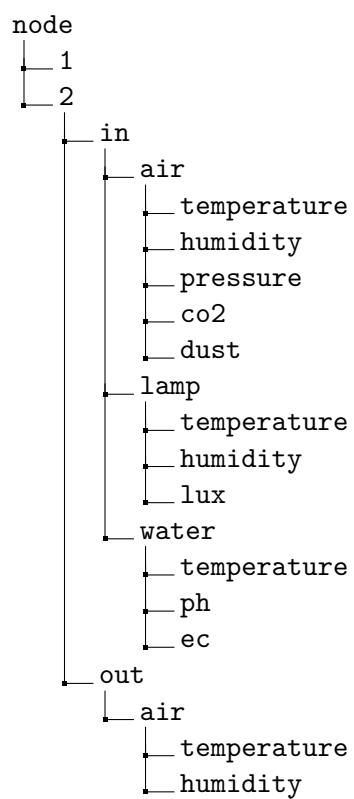
#ec
sens13="$(cat /tmp/mcp3208 | cut -f3 -d$'\t')"
mosquitto_pub -h $ip -t "?node/$node/?in/water/ec" -m $sens13

```

Pro odesílání dat na Chillistation server se používá MQTT protokol. Každé Chillistation má svůj jednoznačný identifikátor, dle kterého se na Chillistation serveru identifikuje. Pod tímto identifikátorem pak odesílá naměřené hodnoty do MQTT struktury dat patrné na Obr. 3.11

Výhodou tohoto způsobu je nízká náročnost na šířku přenosového pásma. Změřený objem dat na síťovém prvku v cestě mezi Chillistation a Chillistation serverem je 25 paketů na L3 síťové vrstvě a celkem 1500 bytů dat. Oproti ostatním komunikačním protokolům je v hlavičkách paketů minimum informací, které by zbytečně zvětšovaly přenesený objem dat nepotřebnými informacemi. Oproti běžnému modelu, kdy centrální prvek dotazuje jednotlivé zdroje informací, je zvolen opačný způsob, tedy Chillistation vyčte lokální hodnoty ze sensorů a odešle je na Chillistation jako centrální prvek, tzv. push informací. Pokud se nepovede navázat spojení MQTT, klient se postará o opětovné zaslání dat po obnově spojení se serverem.

3. NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ



Obrázek 3.11: Stromová struktura měřených hodnot

3.5.5 Řízení pěstebních podmínek

Řízení pěstebních podmínek provádí skript v souboru chillistation/cron.sh a jde o soubor podmínek, které dle naměřených údajů a nastavených proměnných vyhodnotí stav a nastaví relé, respektive výstupní zásuvky pro změnu pěstebních podmínek.

Démonizování bash skriptů nebo psaní služeb v Pythonu se neukázalo jako vhodné z důvodu dostupnosti služby a stability systému. Špatné spuštění programu nebo jeho pozastavení by mohlo mít fatální důsledky pro rostliny, je potřeba pro jejich ovládání program dobře otestovat a zvolit nejstabilnější řešení.

```

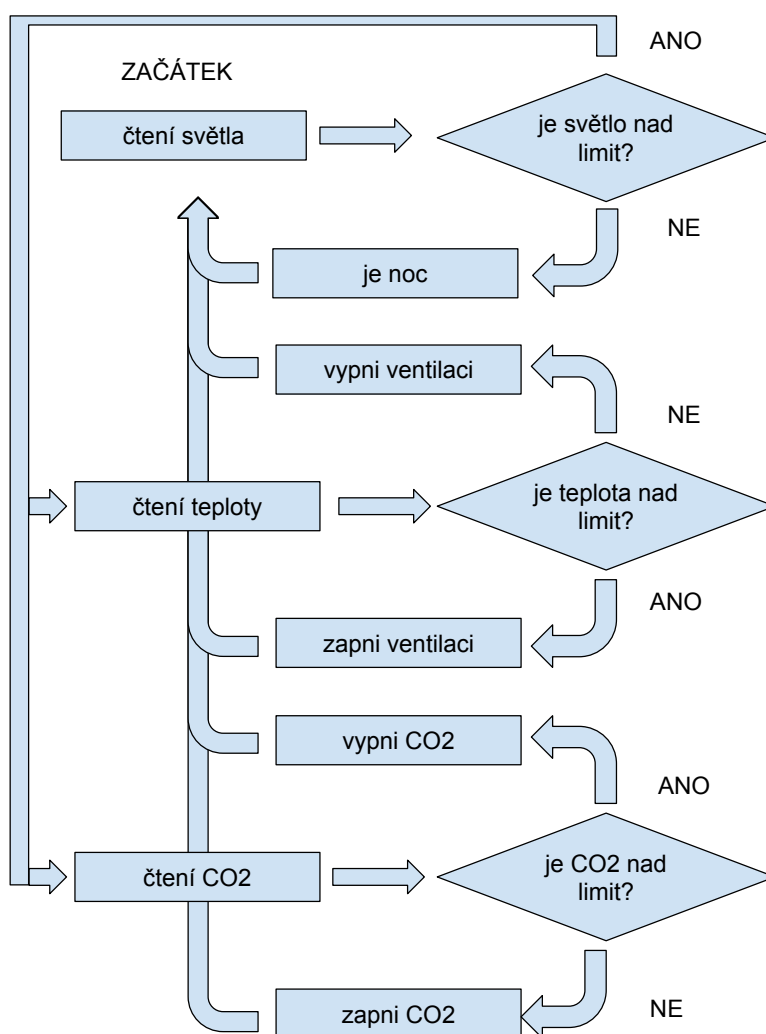
if [ $lux -ge $day_limit ]
then
echo "$date - It is DAY because lux intensity: $lux is higher\
than limit $day_limit lux"
gpio -g write $intake_gpio 1 #set intake off

if [ $temp_inner -ge $temp_max ] #temperature condition
then
gpio -g write $temp_gpio 0
echo "$date - Outtake has been set ON due to\
temp: $temp_inner"
outtake_flag=1
else
gpio -g write $temp_gpio 1
echo "$date - Outtake has been set OFF due to\
temp: $temp_inner"
outtake_flag=0
fi

if [ $goal -ge $co2 ] #co2 condition
then
gpio -g write $co2_gpio 0
echo "$date - CO2 solenoid has been set ON due to\
CO2 level: $co2"
co2_flag=1
else
gpio -g write $co2_gpio 1
echo "$date - CO2 solenoid has been set OFF due to\
CO2 level: $co2"
co2_flag=0
fi

```

3. NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ



Obrázek 3.12: Stavový diagram ovládní pěstebních podmínek v boxu

Kód programu zjistí, jestli je pěstební den, nebo noc podle intenzity osvětlení v pěstebním prostoru. Pokud je den, zkontroluje teplotu vnitřního prostředí a úroveň CO₂. Pokud je teplota vysoká, spustí se odtah z pěstebního prostředí. Pokud je úroveň CO₂ nízká, připustí se z tlakové láhve. Avšak jestliže je noc, vypne se dávkování CO₂ a spustí se ventilace pěstebních prostor.

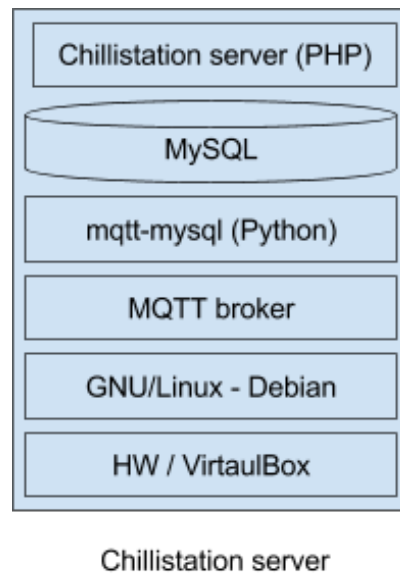
Stačí tedy určit periodu osvětlení a Chillstation se postará o teploty, správné větrání a úroveň oxidu uhličitého.

Takto vypadá výpis logu zachycující sepnutí dávkování CO₂ v důsledku poklesu koncentrace pod 900 ppm.

...
00:25:04 - CO2 solenoid has been set OFF due to CO2 level: 1030
00:26:04 - It is DAY, lux intensity: 25779 is higher thanlimit 500 lux
00:26:04 - Outtake has been set OFF due to temp: 28
00:26:04 - CO2 solenoid has been set ON due to CO2 level: 892
00:27:07 - It is DAY,lux intensity: 25645 is higher than limit 500 lux
00:27:07 - Outtake has been set OFF due to temp: 29
00:27:07 - CO2 solenoid has been set OFF due to CO2 level: 1393
...

3.5.6 Chillistation server

Chillistation server vznikl ve virtuálním prostředí VirtualBox, základem je GNU/Linuxová distribuce Debian. Protože cloudové služby jsou dnes velice populární, serverovou část je možné distribuovat jako .vmdk soubory virtuálního disku pro virtuální servery a jejich nasazení je otázkou několika okamžiků.



Obrázek 3.13: Blokové schéma Chillistation serveru

3.5.7 MQTT

MQTT je velice jednoduchý a nenáročný protokol na portu 1883 modelu „publish-subscribe“. Je vyvinut původně pro internet věcí, šetří přenosové pásmo a vyznačuje se vysokou robustností. Základními účastníky komunikace je publisher, subscriber a broker. Slouží k posílání dat z Chillistation na Chillistation server.

- Broker je server, který umožňuje komunikaci mezi publisherem a subscriberem.
- Publisher je v našem případě Chillistation, připojí se na broker a odesílá naměřené informace.
- Subscriber je mqtt-mysql démon, který se na Chillistation serveru lokálně připojí na broker a čeká na nově příchozí zprávy, jakmile přijde nová zpráva, uloží ji do MySQL databáze.

3.5.8 Ukládání dat z Chillistation

Nejdůležitější službou Chillistation serveru je démon napsaný v jazyce Python v domovském adresáři uživatele `mqtt-mysql.py`, tento program se spouští na pozadí při spuštění serveru.

`mqtt-mysql` proces se připojí jako subscriber na lokální službu MQTT brokeru a všechny MQTT zprávy přijaté serverem na portu 1883 ukládá do relační databáze MySQL. Data ukládá v takové podobě, v jaké přišly na server, pouze je označí časovou známkou.

Nad MySQL databází jsou pohledy filtrující data pro každý senzor. Data je možné filtrovat i v aplikační vrstvě třeba před zobrazením grafu, ale vzhledem k jejich velkému množství a snaze udělat Chillistation maximálně robustní bylo zvoleno právě toto řešení.

3.5.9 Grafy měřených hodnot

Webová aplikace psaná ve skriptovacím jazyce PHP využívá JavaScriptového frameworku Google Charts pro zobrazení dat z MySQL databáze. Pro každé čidlo se volá pohled uložený v MySQL databázi, ten vrátí potřebná data, PHP aplikace vygeneruje HTML stránku a ta uživateli pomocí CanvasJS zobrazí graf měřených hodnot.

Na úvodní obrazovce Chillistation serveru je denní statistika všech měřených veličin s denní statistikou. Po rozkliknutí konkrétní veličiny se otevře přehled denní, týdenní a měsíční statistiky. Detail v Příloze B.

Seznam veličin, které jsou monitorovány a ukládány na Chillistation server:

- vnitřní teplota vzduchu [°C] (DHT22)
- vnitřní vlhkost vzduchu [%] (DHT22)
- vnitřní tlak vzduchu [Pa] (bmp 180)
- koncentrace CO2 [ppm] (mh-z19)
- koncentrace prachových částic [ug/m3](sharp)
- teplota vzduchu v prostoru LED panelů [°C] (DHT22)
- vlhkost vzduchu v prostoru LED panelů [%] (DHT22)
- intenzita osvětlení v pěstebním prostoru [lux] (bh750)
- teplota zálivky [°C] (ds18b20)
- kyselost zálivky [Ph] (PH modul)
- salinita zálivky [uS/m] (EC modul)
- venkovní teplota vzduchu [°C] (DHT22)
- venkovní vlhkost vzduchu [%] (DHT22)

3.5.10 Aktualizace Chillistation

Aktualizace Chillistation je možné provést pomocí dávkového souboru chillistation/update.sh, který se jednou denně stahuje z každé Chillistation a může obsahovat bashové skripty pro změny na každém

Chillistation. Každé Chillistation se pomocí vnitřního plánovače úloh denně dotáže na vzdálený soubor, stáhne jej a spustí jej pod superuživitelem. Přenos je šifrovaný a ověření probíhá na základě ověření veřejného klíče Chillistation na Chillistation serveru.

Pomocí této pravidelné aktualizace je možné poslat příkaz pro aktualizování operačního systému, aktualizaci knihoven pro senzory nebo třeba na dálku provést zásah do konfigurace parametrů prostředí.

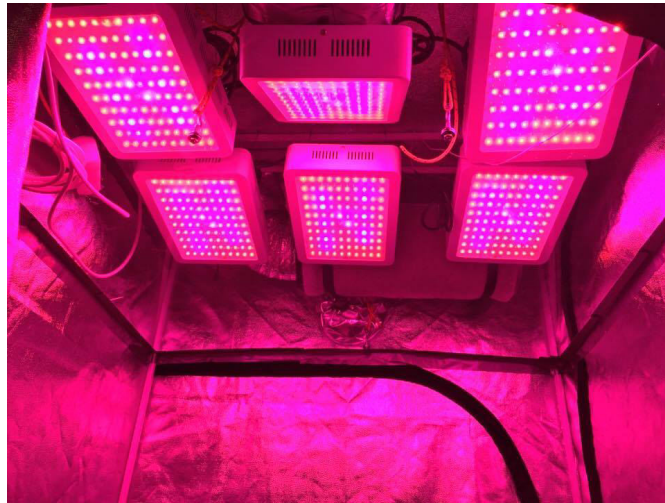
3.5.11 Testovací prostředí Chillistation

Pro ověření celého systému bylo zapotřebí sestavit vhodné prostředí, kde bylo Chillistation otestováno. Pěstební box o rozměrech podstavy 1x1 m a výšce 2 m má otvorem o průměru 100 mm pasivní přítah čerstvého vzduchu. Pro odtažení přehřátého vzduchu přes průduchy polykarbonátové desky slouží radiální ventilátor, ten je spínán při překročení limitní teploty v pěstebním prostoru. Na celé vnitřní stěně boxu je napařen hliník, který odráží světlo a teplo.



Obrázek 3.14: Pohled na hydroponní systém v pěstebním boxu

V pěstebním boxu je umístěn hydroponní systém se šesti květináčky, kde jsou sazeničky salátu. Květináč pojme 40-60 l zálivky s výživou pro rostliny. Otvorem v horní části jsou vedeny kabely pro teploměr a čidla PH a EC. Tlaková lahev pro oxid uhličitý je umístěna v rohu pěstebního prostoru a hadička s tryskou ústí před cirkulačním ventilátorem.



Obrázek 3.15: Pohled na LED panely a vzduchotechniku

LED panely jsou umístěny v počtu šesti kusů na stropě pěstebního boxu. Od pěstebního prostoru je prostor LED panelů kvůli tepelné izolaci oddělený průhledným polykarbonátem.

Regulace pěstebních podmínek

V této kapitole jsou detailně rozebrána měření zaznamenaná při regulování pěstebních podmínek pomocí algoritmů Chillistation. Některé regulované podmínky, jako je například udržování teploty pěstebního prostředí, jsou měřeny dvakrát, a to jednou v prostředí skleníku, podruhé v pěstebním boxu. Měřená je vždy hodnota zpětné vazby, respektive senzoru pro danou veličinu a výstup regulátoru, který dvoustavově ovládá akční člen – vypnuto, zapnuto.

4.1 Regulace vlhkosti půdy

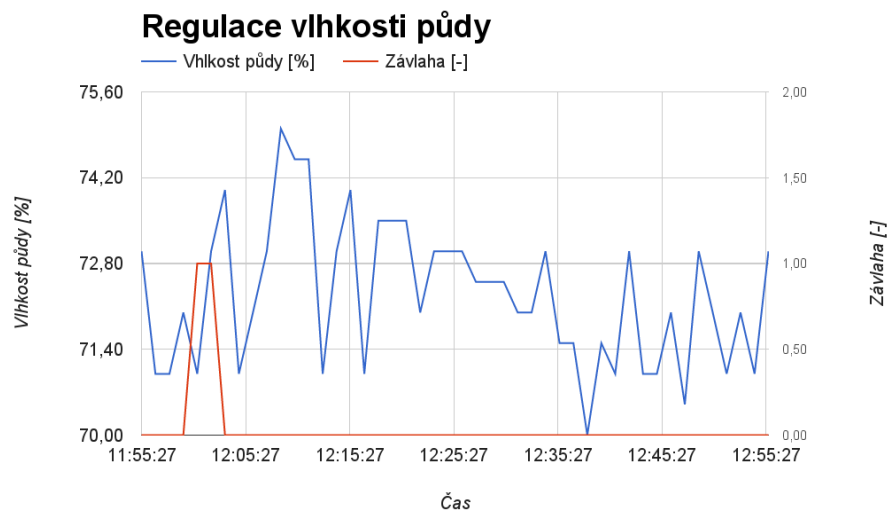
Závlaha je řešena 1" PVC hadicí dlouhou 6 m, umístěnou 10-15 cm hluboko do vrstvy kokosového substrátu ve skleníku, který tvoří pěstební médium v celkové výšce 30-40 cm. Hadice je po 30 cm perforovaná 1mm otvory, kterými po natlakování vytéká zálivka. Hadice je přímo napojena na ponorné čerpadlo ponořené v 25l barelu, vzdálený konec je utěsněn záslepkou. Po sepnutí čerpadla dojde k natlakování závlahového systému a rovnoměrnému zavlažení kokosového substrátu.

Regulace vlhkosti půdy měla probíhat na základě měření dat ze senzoru YL-69, který měří vodivost půdy, respektive přepočtem její relativní vlhkost. Bohužel nebylo možné měřená data nijak interpretovat, což bylo způsobeno buď chybným umístěním senzoru vlhkosti, nebo nefunkčním senzorem. Z grafu na Obr. 4.1 je patrné, že zavlažení není zpětnou vazbou ze senzoru vlhkosti půdy jednoznačně rozpoznatelné.

Empirickým pozorováním a zapisováním hodnot při zalévání skleníku bylo po týdenním zalévání vyzorováno, že pro dostatečné zavlažení stačí mít ponorné čerpadlo puštěné dvě minuty denně. Po konzultaci se zahradnicí byl stanoven čas závlahy v trvání dvou minut na 20:00, aby rostliny nepodlehly šoku změnou vlhkosti půdy během dne, kdy v nich probíhají energeticky náročné děje.

Crontab patří mezi systémové nástroje většiny GNU/Linuxových distribucí, pomocí prvních pěti pozic každého řádku se určuje, kdy se bude příkaz

4. REGULACE PĚSTEBNÍCH PODMÍNEK



Obrázek 4.1: Graf závislosti vlhkosti půdy ve skleníku a spínání závlahy na čase

na daném řádku periodicky spouštět. První pozice značí minutu, druhá pozice hodinu, třetí den v měsíci, čtvrtá pozice měsíc a poslední den v týdnu.

Spínání pomocí GNU/Linux nástroje crontab

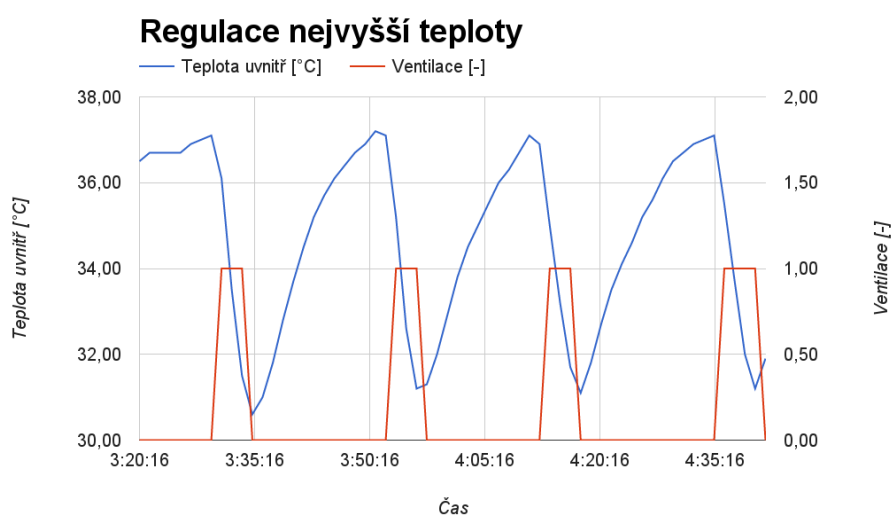
```
0 20 * * * gpio set 8 0 # v 20:00 sepne rele na GPIO 8  
2 20 * * * gpio set 8 1 # v 20:02 vypne rele na GPIO 8
```

4.2 Regulace teploty

Snahy o regulaci teploty už byly úspěšné, vysoké teploty v pěstebním prostředí jsou regulovány ventilací přehřátého vzduchu mimo prostor rostlin. Nízké teploty jsou regulovány ohřátím vzduchu u rostlin.

4.2.1 Regulace nejvyšších teplot ve skleníku

Vzduchový okruh je u skleníku i pěstebního boxu otevřený, v náročných umělých podmínkách jako třeba na oběžné dráze může být vzduchový okruh uzavřený. Nám tyto nenáročné podmínky umožňují relativně levně regulovat vysoké teploty, a to odsáním teplého vzduchu pryč mimo prostor rostlin. Stojí nás to pouze energii spotřebovanou ventilátorem, není potřeba klimatizačních jednotek jako u okruhů uzavřených. Jako nejvyšší teplota ve skleníku byla stanovena hodnota 38 °C. Teplota je měřena kombinovaným čidlem DHT22 v prostoru skleníku. Čidlo je volně zavěšeno přibližně v polovině výšky skleníku, aby bylo zaručeno měření teploty tak, jak ji vnímají okolní rostliny.



Obrázek 4.2: Graf závislosti teploty ve skleníku a ovládání ventilace na čase

Následující ukázka kódu řeší hysterezi ON/OFF regulátoru. Kdyby regulátor neměl hysterezi, spínání by probíhalo s mnohem kratší periodou, což by v důsledku mohlo vést ke snížení životnosti ventilátoru.

```
temp_high=38
temp_low=32
```

```
temp_inner=$(cat /www/cc/sens/in/temp/1);

if [ $temp_inner -ge $temp_high ] then
    echo 0 > /www/cc/sens/out/relay/1
fi

if [ $temp_low -ge $temp_inner ] then
    echo 1 > /www/cc/sens/out/relay/1
fi
```

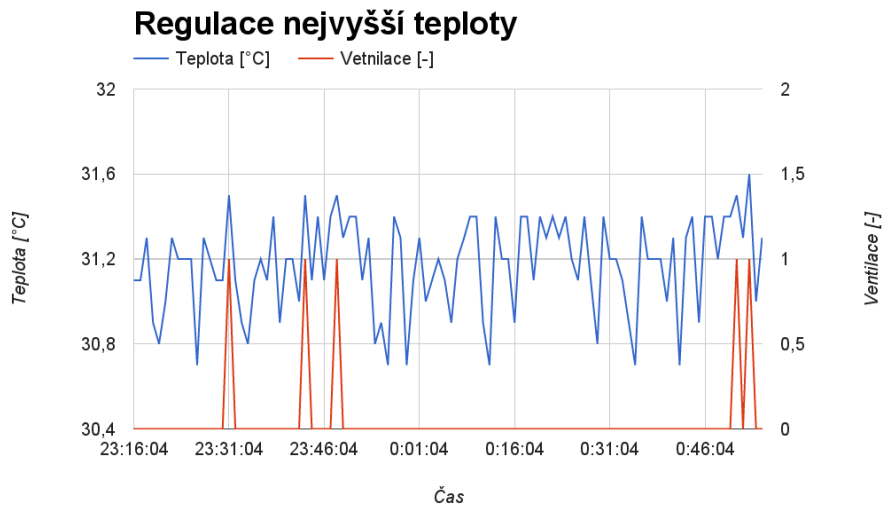
Regulátor zapne ventilátor k odsátí teplého vzduchu při teplotě 38 °C a čeká, dokud teplota neklesne pod hranici 32 °C, poté se ventilátor vypne. Při těchto parametrech je průměrná teplota i v nejteplejších letních dnech pro rostliny snesitelná.

4.2.2 Regulace nejvyšších teplot v pěstebním boxu

Díky většímu počtu teplotních senzorů, které má Chillstation k dispozici, je možné získat lepší přehled o vnitřních teplotách v pěstebním boxu. Pro potřeby prostředí udržovat hladinu oxidu uhličitého a maximální teplotu bylo potřeba zvolit kompromis. Buď budeme mít dobře větraný pěstební prostor od přehřátého vzduchu a zároveň oxidu uhličitého, nebo budeme mít nevětraný prostor s vysokou koncentrací oxidu uhličitého, ale rostliny uhynou v důsledku vysokých teplot. Proto byla zvýšena průměrná teplota vzduchu na 31 °C, tedy nejvyšší možnou hodnotu, kterou rostliny snášejí, aby nebylo potřeba tak často odvětrávat prostor a bylo naopak možné udržet požadovanou koncentraci oxidu uhličitého.

Teplota ze senzoru DHT22 vykazuje určité zašumění výstupu, ale bez vlivu na funkčnost regulace vnitřní teploty. Následující ukázka kódu kódu ON/OFF regulátoru pro ventilování pěstebního boxu.

```
#temperature condition
if [ $temp_inner -ge $temp_max ]
    then
        gpio -g write $temp_gpio 0
        echo "$date - Outtake has been set ON \
        due to temp: $temp_inner"
        outtake_flag=1
    else
        gpio -g write $temp_gpio 1
        echo "$date - Outtake has been set OFF \
        due to temp: $temp_inner"
        outtake_flag=0
    fi
```



Obrázek 4.3: Graf závislosti teploty v pěstebním boxu a ovládání ventilace na čase

Experimentálně bylo zjištěno, že pokud se vypne vnitřní ventilátor v pěstebním boxu, který slouží na promíchání vzduchu, teploty měřené senzorem DHT22 se skokovitě nemění. Ventilátor uvnitř boxu mísí vzduch tak, aby nevznikaly stojaté oblasti přehřátého vzduchu. Pokud by se ukázalo, že vlivem zašumění hodnot regulátor nefunguje správně, bylo by vhodné teploty průměrovat, ovšem regulace je takhle plně funkční.

4.2.3 Regulace nejnižších teplot ve skleníku

Aby se pěstební sezóna dala prodloužit do podzimních měsíců, je možné se vyvarovat přízemních mrazů a nízkých teplot během noci temperováním pěstebního prostředí. V našem případě se o ohřev vzduchu stará obyčejný přímotop o příkonu 2 kW. Aby se zvýšila teplota vzduchu ve skleníku, stačí sepnutí přímotopu na pár minut. Regulace se povedla opět obyčejným ON/OFF regulátorem. Aby se předešlo častému spínání, byla nastavena hystereze, tím se přímotop méně namáhá častým zapínáním a vypínáním.

```
temp_high=18
temp_low=13

temp_inner=$(cat /www/cc/sens/in/temp/1);

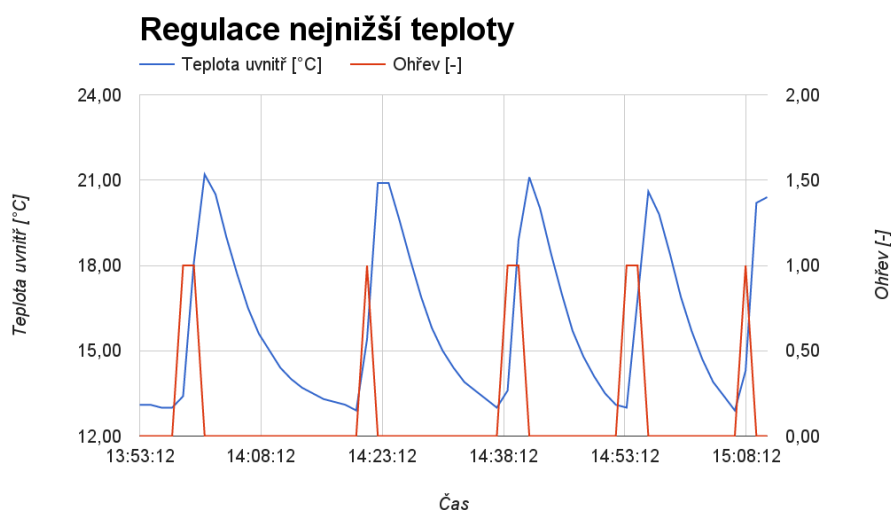
if [ $temp_inner -ge $temp_high ] then
```


4. REGULACE PĚSTEBNÍCH PODMÍNEK

```
    echo 0 > /www/cc/sens/out/relay/2
fi

if [ $temp_low -ge $temp_inner ] then
    echo 1 > /www/cc/sens/out/relay/2
fi
```

Při poklesu teploty pod 13 °C sepne přímotop a je sepnutý, dokud teplota nepřekoná hranici 18 °C, pak je přímotop vypnut a opět musí teplota klesnout pod hranici 13 °C, aby byl znovu zapnut.



Obrázek 4.4: Graf závislosti teploty ve skleníku a ovládání ohřevu na čase

Rostliny vnímají změnu teploty s velkou setrvačností, průměrná teplota se pak drží nad 15 °C, což není úplně ideální podmínka, ale je nutné brát v potaz i ekonomické náklady na elektrickou energii, kterou se skleník vytápí. Hranice 15 °C není ideální, ale rostliny nehynou. Pokud by kritériem byla pouze pěstební podmínka bez kontextu spotřeby el. energie, stačí přenastavit proměnný algoritmus.

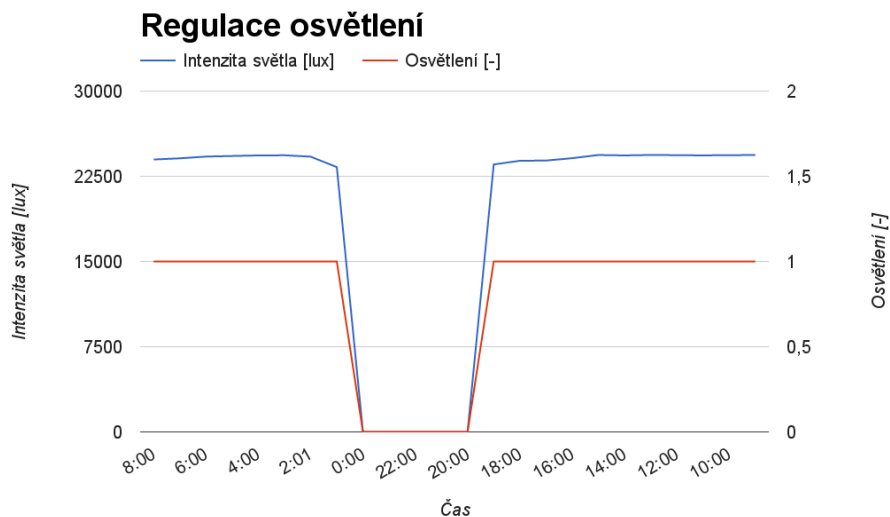
4.3 Regulace světelných podmínek v pěstebním boxu

Spínání LED panelů pro umělé osvětlení v pěstebním boxu je bez zpětné vazby. Aby rostliny netrpěly šokem z měnící se periody, je potřeba dodržovat

4.3. Regulace světelných podmínek v pěstebním boxu

pravidelné zapínání a vypínání světel. Pro ovládání je opět použita služba crontab.

```
0 0 * * * gpio set 13 0 # v 00:00 sepne rele na GPIO 13
0 18 * * * gpio set 13 1 # v 18:00 vypne rele na GPIO 13
```



Obrázek 4.5: Graf závislosti intenzity světla v pěstebním boxu a ovládání osvětlení na čase

Osvětlení pod LED panelem je velmi intenzivní, protože senzor je umístěn v bezprostřední blízkosti osvětlovací plochy. Z grafu je patrné, že reakce LED panelu je na signál akčního členu okamžitá. LED panely se vyznačují konstantním výkonem v celé periodě dne.

4.4 Regulace CO₂ v pěstebním boxu

Zvýšení úrovně oxidu uhličitého při umělém pěstování je svatý grál mezi hobby pěstiteli. Ve velkém měřítku se nepoužívá, protože jeho distribuce a regulace není úplně triviální. Pokud se jedná o velké skleníky průmyslového typu, oxid uhličitý se pro podporu výnosu při pěstování nepoužívá vůbec.

Regulace za pomoci senzoru není složitá, přičemž je srovnatelná s regulací teploty. Pěstební prostor je potřeba mít velice dobře utěsněný. Oxid uhličitý je těžší než vzduch, takže se drží při zemi. Kořeny pro svůj dobrý vývoj potřebují kyslík, takže nechat oxid uhličitý klesnout ke kořenům je nežádoucí, kromě dávkování je tedy nutné vyřešit i jeho správnou cirkulaci, což se běžně řeší běžným ventilátorem.

Aby oxid uhličitý neunikal ven mimo pěstební prostor, před jeho aplikací se odsávacím ventilátorem vytvoří podtlak a poté se oxid uhličitý dávkuje v potřebném množství.

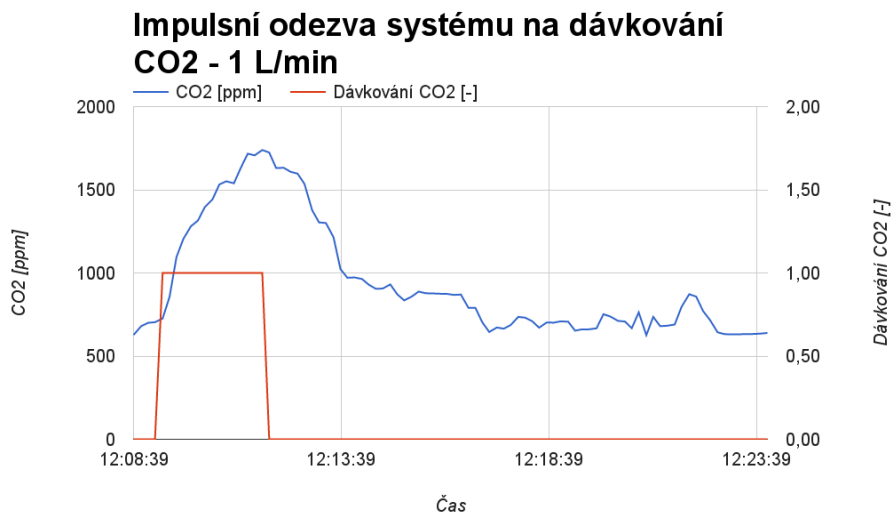
Pro nastavení správného dávkování bylo potřeba provést měření impulsní odezvy na ovládání ventilu na tlakové lahvi.

Měření probíhalo za podmínek, ve kterých se už tři týdny pěstovaly saláty. Světla byla rozsvícená a ventilace teplého vzduch vypnutá. Z grafu je patrná běžná koncentrace okolního prostředí kolem 500 ppm, ventil byl nastaven na vypnutí po dosažení koncentrace 1700 ppm, protože vyšší koncentrace než 2000 ppm by nemusela vyhovovat rostlinám.



Obrázek 4.6: Impulsní odezva koncentrace oxidu uhličitého v pěstebním boxu na sepnutí ventilu při průtoku 5 l/min

Při nastaveném průtoku 5 l/min se koncentrace oxidu uhličitého v pěstebním boxu zvyšovala velkou rychlostí a nebylo možné výslednou koncentraci přesně regulovat, protože minimální perioda sepnutí je jedna minuta.



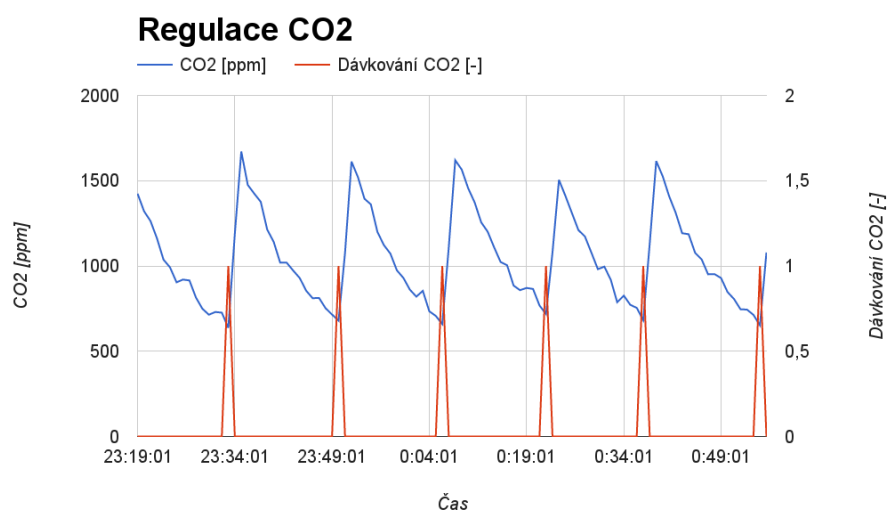
Obrázek 4.7: Impulsní odezva koncentrace oxidu uhličitého v pěstebním boxu na sepnutí ventilu při průtoku 1 l/min

Při snížení průtoku plynného oxidu uhličitého z 5 l/min na 1 l/min bylo dosaženo stejné koncentrace o tři minuty později, ale díky nižší strmosti růstu koncentrace je možné ji lépe regulovat.

Na základě předešlých měření byl navržen ON/OFF regulátor, který řídí koncentraci oxidu uhličitého v pěstebním boxu.

```
#co2 condition
if [ $goal -ge $co2 ]
then
    gpio -g write $co2_gpio 0
    echo "$date - CO2 solenoid has been set ON \
    due to CO2 level: $co2"
    co2_flag=1
else
    gpio -g write $co2_gpio 1
    echo "$date - CO2 solenoid has been set OFF \
    due to CO2 level: $co2"
    co2_flag=0
fi
```

4. REGULACE PĚSTEBNÍCH PODMÍNEK



Obrázek 4.8: Graf závislosti koncentrace CO₂ v pěstebním boxu a ovládání dávkování na čase

Z grafu je patrné, že dopouštění oxidu uhličitého je potřeba opakovat nejméně čtyřikrát do hodiny a většinou stačí nejkratší perioda sepnutí, tj. 1 minuta. Redukční ventil a dávkovací ventil jsou nastaveny tak, aby při sepnutí byl průtok oxidu uhličitého z tlakové láhve 1 l/min.

4.5 Ukázka řízení více akčních členů

Chillistation umí na základě intenzity světla detekovat, zda je v pěstebním prostoru den, nebo noc na základě intenzity osvětlení. Hraniční limit je nastaven na 500 lx.

Pokud je intenzita osvětlení nižší, je noc. V tomto režimu je dávkování CO₂ vypnuté a je zapnutý odtah z pěstebního boxu pro lepší cirkulaci vzduchu.

Pokud je Chillistation v režimu dne, je cirkulace zapnuta, dokud nestoupne teplota v pěstebním boxu nad nastavený limit a dávkování CO₂ sepne, pokud koncentrace klesne pod nastavený limit. Tím jsou zaručeny ideální podmínky.



Obrázek 4.9: Graf ukazující závislosti podmínek na více akčních členech

Na Obr. 4.9 je zachycen okamžik, kdy v 10:00 jsou vypnuty LED panely osvětlení, do té doby funguje v téměř pravidelných intervalech dávkování CO₂ a zapnutí ventilace při vystoupení teploty nad 31 °C.

Po 10:00. hodině je vidět, jak v důsledku vypnutých panelů klesá vnitřní teplota pěstebního boxu a zároveň je vypnuté dávkování CO₂, přičemž jeho koncentrace také klesá.

Závěr

Během diplomové práce se povedlo studiem dostupné literatury a lidských zdrojů získat přehled o potřebách rostlin pro jejich pěstování. Byly vybrány vhodné senzory pro sledování kritických veličin pěstebních podmínek. Byla zrealizována tři měřicí prostředí, poslední zároveň sloužilo pro otestování možnosti pěstování salátu v umělých podmínkách pro porovnání s běžným pěstováním. V měřicích prostředích byla provedena měření, na jejichž základě byl sestaven řídicí algoritmus pro ovládání pěstebních podmínek pro Chillistation.

Byla navržena a zrealizována deska Chillistation interface umožňující připojení všech čidel k Raspberry Pi, které bylo vybavené potřebným softwarem pro čtení dat ze senzorů, ovládání pěstebních podmínek a odesílání dat na Chillistation server, kde byla data po celou dobu zaznamenávána. V minutových krocích je možné zobrazit historii všech senzorů a akčních členů ze všech připojených Chillistation.

Celkové náklady systému Chillistation přesáhly částku 25 000 Kč, ale představují kompletní řešení pěstování v umělých podmínkách. Pokud bychom Chillistation porovnali s dostupnými produkty na trhu, tak za poloviční náklady dostaneme jen řídicí jednotku bez senzorů nebo o něco komplexnější systém omezený nedostatečně dimenzovanou platformou.

Chillistation server navíc oproti dostupným řešením umožňuje sledovat větší počet stanic, takže pro velkopěstitele, kteří mají velké skleníky, je připravené řešení pro sběr informací do jednoho místa. Námětem pro další práci na Chillistation se nabízí pokročilejší práce s daty z více stanic Chillistation, případně ovládání pěstebních podmínek přímo z Chillistation serveru.

Pro ověření realizovatelnosti a praktického přínosu bylo zvoleno porovnávání hmotnosti ledového salátu vypěstovaného přirozenou cestou a salátu vypěstovaného v umělých podmínkách pěstebního boxu.

Salát Grandes Lago118 je vyšlechtěná odrůda ledového salátu doporučená pro nenáročnost pěstování, dalším důvodem byly konzistentní rozměry rostliny, které odpovídaly přímé závislosti na délce růstu, kvalitě nutričních preparátů na výživu rostlin a podmínkách, ve kterých rostlina rostla.

Saláty byly čtyři týdny pěstovány současně ve venkovním prostředí a v pěstebním boxu v umělých podmínkách řízených Chillistation. Oba saláty byly ohodnoceny vizuálně, byla změřena jejich hmotnost a byly subjektivně ohodnoceny po chuťové stránce.

Referenční salát pěstovaný pod širým nebem běžnou metodou vážil po sklizení 37 g, salát pěstovaný v umělých podmínkách vážil 45 g. Vážení probíhalo bezprostředně po vytržení z květináče bez kořenového balu na běžné kuchyňské váze.

Subjektivní hodnocení chuti na slepo probíhalo rozdělením každého referenčního salátu na pět stejně velikých vzorků a bylo servírováno pěti osobám. Výsledek hodnocení, který ze dvou salátů je lepší, vyšlo ve prospěch salátu pěstovaného standardní metodou 4:1. Závěrem hodnocení kvality vypěstovaných salátů nechtě je, že za umělých podmínek je možné vypěstovat minimálně stejně vitální rostliny, ale objem vypěstovaného materiálu není rozhodující, pokud při hodnocení hraje důležitou roli chuť. Celý průběh pěstování včetně průběžných fotografií je zaznamenán v Příloze A.

Literatura

- [1] Šafář, M.: Umělé osvětlení a fotosyntéza. 2013, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.cidly.cz/cz-clanky-1.html>
- [2] Maxim Integrated Products, Inc.: *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. 2015, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [3] Aosong(Guangzhou) Electronics Co.,Ltd.: *AM2302 Product Manual*. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/AM2302.pdf>
- [4] Bosch Sensortec GmbH: *BMP180 Digital pressure sensor*. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMP180-DS000-121.pdf
- [5] Guide for Soil Moisture Sensor YL-69 or HL-69 with Arduino. *Random nerd tutorials [online]*, [cit. 2015-10-31]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-soil-moisture-sensor-yl-69-or-hl-69-with-the-arduino/>
- [6] ROHM Co.. Ltd.: *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC*. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.elechouse.com/elechouse/images/product/Digital20light20Sensor/bh1750fvi-e.pdf>
- [7] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.: *Intelligent Infrared CO2 Module*. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: http://eleparts.co.kr/data/design/product_file/SENSOR/gas/MH-Z19_CO220Manual20V2.pdf
- [8] SHARP: *GP2Y1010AU0F*. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/gp2y1010au_e.pdf

- [9] MINIEC I2C PH INTERFACE. *SPARKYS WIDGET [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <https://www.sparkyswidgets.com/portfolio-item/miniph-i2c-ph-interface/>
- [10] MINIEC I2C EC INTERFACE. *SPARKYS WIDGET [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <https://www.sparkyswidgets.com/portfolio-item/miniec-i2c-ec-interface/>
- [11] SainSmart 8 Channel DC 5V Relay Module for Arduino Raspberry Pi. *SAINS SMART [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.sainsmart.com/8-channel-dc-5v-relay-module-for-arduino-pic-arm-dsp-avr-msp430-ttl-logic.html>
- [12] ECG TV 25. *HEUREKA [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: [SainSmart8ChannelDC5VRelayModuleforArduinoRaspberryPi](http://www.sainsmart.com/8-channel-dc-5v-relay-module-for-arduino-pic-arm-dsp-avr-msp430-ttl-logic.html)
- [13] Ventilátor RUCK/CAN-Fan 160, 460 m³/h, příruba 160mm. *GROWSHOP [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.growshop.cz/product-collection/detail/?url=150737-ventilatory-ruck-rk-rk-l-rk-ls-rkw-l2Fventilator-ruck-rk1603B-480m3-h--a-2163B-160mm>
- [14] HSP600-00. *HEISSNER [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.heissner.de/cz/produkty/rybnickova-cerpadla/efektivna-cerpadla/smartline-teichpumpen-set-outdoor-hsp600-00.html>
- [15] CrxSunny 300W LED Grow Light Full Spectrum for Greenhouse and Indoor Plant Flowering and Growing. *CrxSunny [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.crxsunny.com/product/crxsunny-300w-led-grow-light-full-spectrum-for-greenhouse-and-indoor-plant-flowering-and-growing-11.html>
- [16] AVID Growing Systems. *AVID [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.avidgrowing.com/>
- [17] SUZAN. *Visys [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://visys.pl/wp/produkt/suzan/>
- [18] GROWDUINO. *Growduino enviromental system [online]*, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.growduino.cz/home/growduino.html>
- [19] Wikipedia, o. e.: Fotosyntéza. 2017, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotosyntéza>
- [20] Rajni Govindjee, G.: *Emerson Enhancement Effect in Chloroplast Reactions*. Department of Botany, University of Illinois, první vydání, 1964.

- [21] Ainsworth, E. A.: *Rice production in a changing climate: a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration*. Global Change Biology, první vydání, 2008, ISBN 1642-1650.
- [22] Patten, G. F. V.: *Gardening Indoors: The Indoor Gardener's Bible*. Van Patten Publishing, čtvrté vydání, 2002, ISBN 1878823310.
- [23] Clarke, G.: *Indoor Plants: The Essential Guide to Choosing and Caring for Houseplants*. Reader's Digest, první vydání, 1997, ISBN 0895779218.
- [24] Wikipedia, o. e.: Znečištění ovzduší v Česku. 2017, [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Znečištění_ovzduší_v_C48Cesku

Srovnání referenčních salátů



Obrázek A.1: Pohled na zaklíčená semínka z pařníku v 4. dni pěstování

A. SROVNÁNÍ REFERENČNÍCH SALÁTŮ



Obrázek A.2: Pohled na sazeničky v 1. týdnu pěstování



Obrázek A.3: Porovnání referenčních salátů v 3. týdnu pěstování

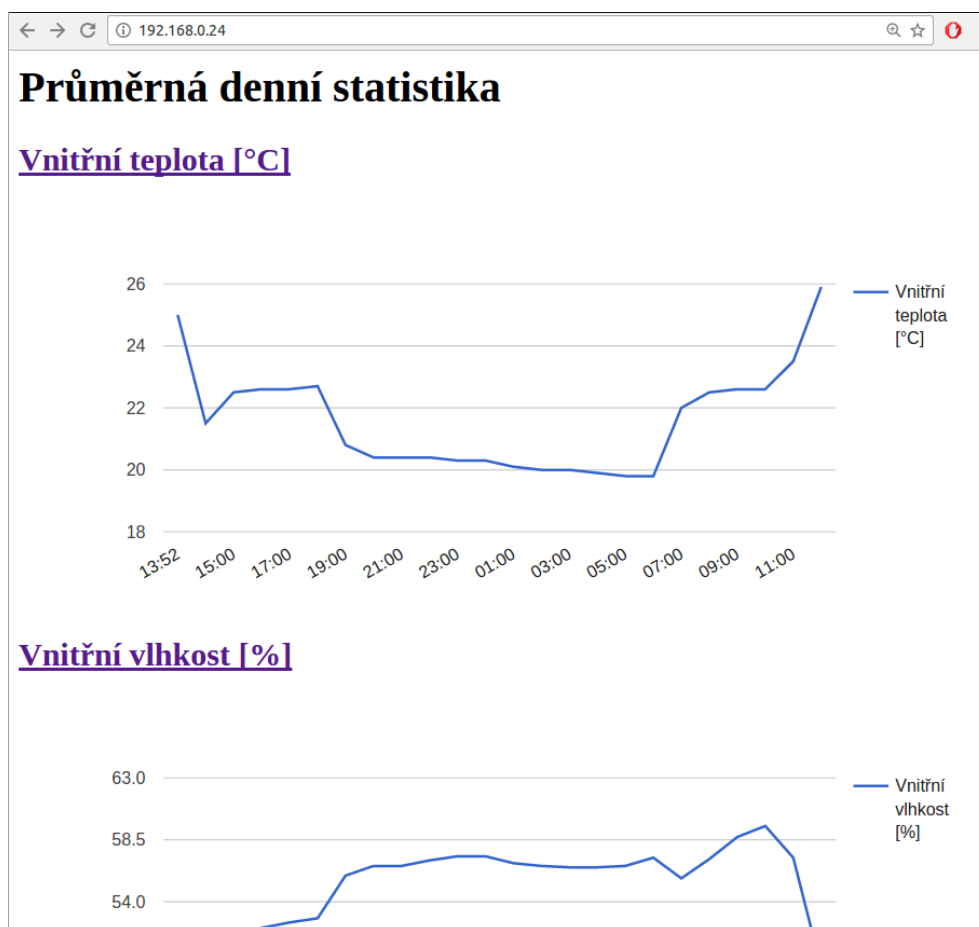


Obrázek A.4: Porovnání referenčních salátů ve 4. týdnu pěstování

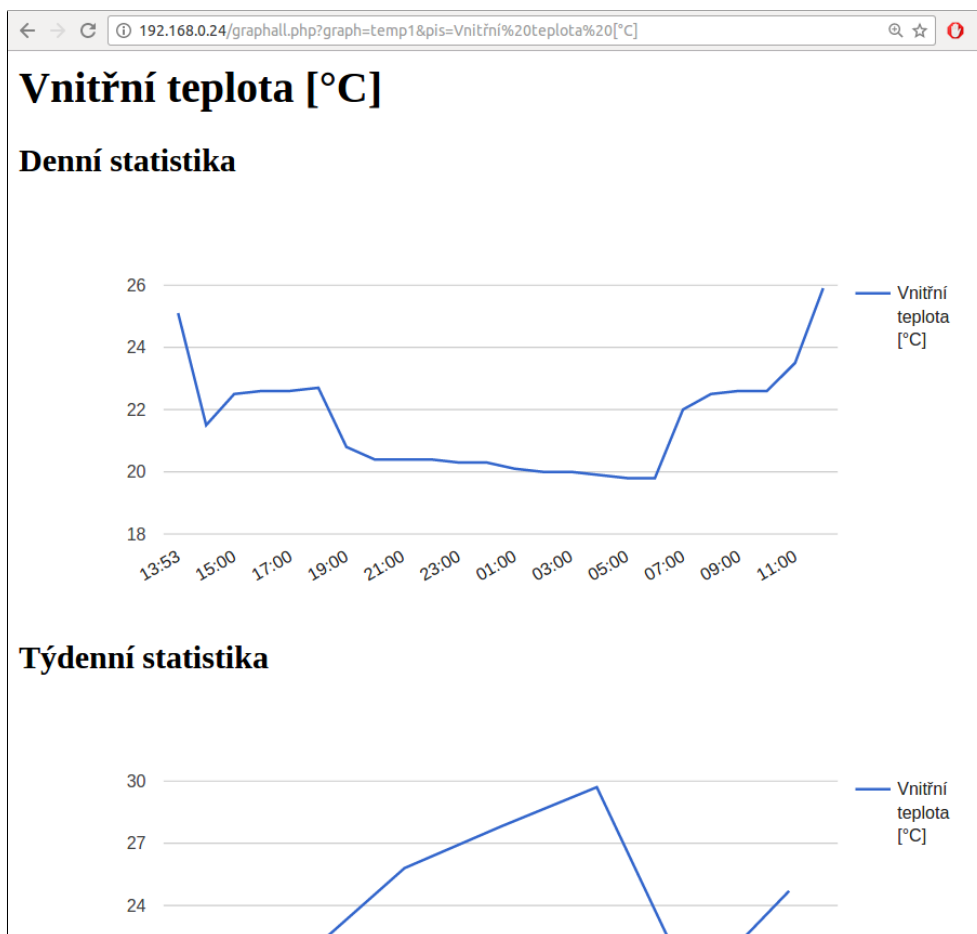


Obrázek A.5: Detail kořenového systému referenčního salátu z umělého prostředí

Webové rozhraní Chillistaion serveru

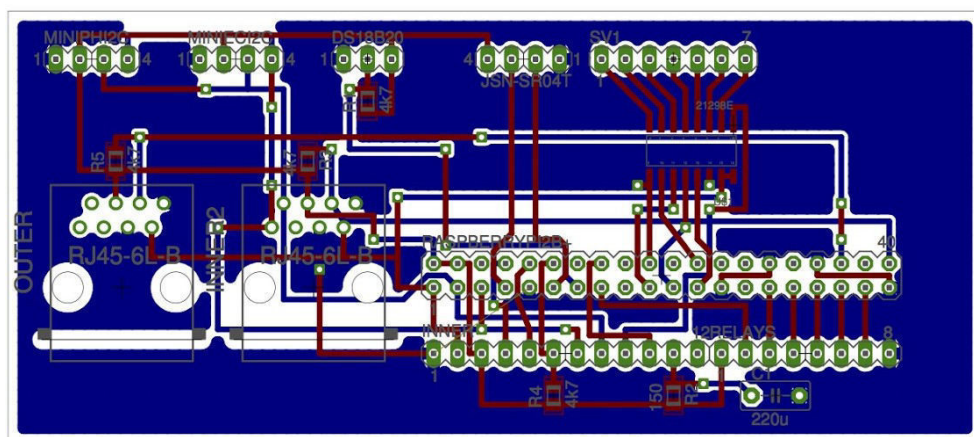


Obrázek B.1: Úvodní stránka Chillistation serveru, přehled všech měřených veličin s denní statistikou



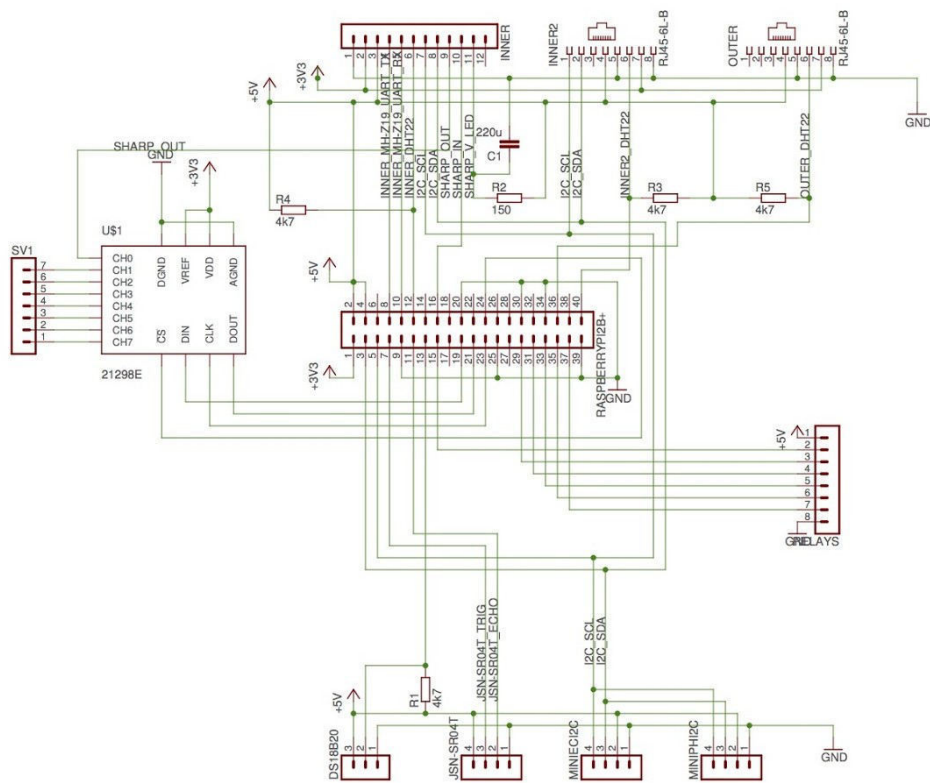
Obrázek B.2: Měřená veličina, denní, týdenní a měsíční statistika

Chillistation interface



Obrázek C.1: Layout desky plošných spojů Chillistation interface

C. CHILLISTATION INTERFACE



Obrázek C.2: Schéma Chillistation interface