Bakalářská práce

České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Systém automatického zavlažování pokojových květin

Karim Al Reyahi
Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.
Květen 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Al Reyahi Karim**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Systém automatického zavlažování pokojových květin**

Pokyny pro vypracování:

1. Zvolte vhodnou konfiguraci systému pro automatické zavlažování několika pokojových květin (zdůvodněte volbu senzorů, aktuátorů, řídicí jednotky, komunikace).
2. Vytvořte jednoduchý matematický model pro vlhkost půdy v květináči.
3. Navrhněte vhodný regulátor a tento ověřte simulacemi i laboratorním experimentem.

Seznam odborné literatury:

[1] T. Syrovátka, Pěstování květin, orchidejí, zeleniny a hub v samozavlažovacích truhlících. Grada, 2012.
[2] F. T. Brown, Engineering System Dynamics: A Unified Graph-Centered Approach, 2. vydání. CRC Press, 2006.

Vedoucí: Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 4. 2016

Poděkování

Děkuji především mému vedoucímu práce, panu Ing. Zdeňku Hurákovi, Ph.D., za pomoc při tvorbě práce a doporuření některých, pro mě do té doby neznámých komponentů, použitých v tomto projektu. Také bych chtěl poděkovat pánům Aleši Kapicovi a Ing. Martinu Samkovi za pomoc při realizování síťové komunikace.

Děkuji také katedře řídicí techniky FEL ČVUT za neomezenou podporu při zajišťování součástek nutných pro realizaci projektu a také své rodině za podporu a cenné rady při realizaci práce.

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, 20. května 2016

.....

Abstrakt

Cílem tohoto projektu je návrh a realizace systému pro automatické zavlažování pokojových rostlin s možností dálkového monitoringu veličin prostředí květin přes internet pro jejich zobrazování na webové stránce. Pro Wi-Fi přenos dat je využit modul ESP8266, jehož parametry jsou vzhledem k pořizovací ceně nejpřijatelnější. Část systému včetně nádržky vody, nacházející se u květináče, je realizována tak, aby ji bylo možné přemístit k jinému květináči dle potřeby. Proto bylo nutné jako napájecí zdroj zvolit akumulátor.
Součástí této práce je také tvorba vazebních grafů pro příjem, transport a výdej vody v různých částech rostliny. Na základě vazebních grafů a fyzikálních principů je sestrojen matematický model celého cyklu zavlažování rostliny v závislosti na podmínkách jejího umístění. Za pomoci matematického modelu je navržený regulátor udržující optimální vlhkost zeminy. V závěru práce jsou návrhy pro případná rozšíření projektu.

Klíčová slova: automatické zavlažování, pokojové rostliny, ESP8266, matematický model, regulace

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.

Abstract

The main goal of this project is the design and realization of automatic irrigation system for houseplants with an opportunity to remotely (on the webpage) observe the units of the environment surrounding plants. The Wi-Fi data transfer is managed by the module ESP8266, which has the best parameters considering its cost. There is also the possibility to relocate the part of the system with tank, which is located near the flowerpot. Due to this feature there is an accumulator used as a power supply.
Creation of the bond graphs for water intake, transport and evapotranspiration is also part of this thesis. A math model considering the plant local conditions of the whole irrigation cycle physical principles is created according to the bond graphs. With the help of math model, there is a regulator, which maintains the optimal soil moisture. In the end of this thesis there are some suggestions for possible future upgrades of the project.

Keywords: automatic irrigation, houseplants, ESP8266, automatic, math model, regulation

Obsah

1 Úvod **1**
1.1 Požadavky kladené na systém . . . 1
1.2 Motivace a způsob realizace 1

2 Zavlažování pokojových květin **3**
2.1 Manuální zavlažování 3
2.2 Samozavlažovací květináče a kapilární jev 3
2.3 Automatické zavlažování 4

3 Hardware **5**
3.1 Blokové schéma systému 5
3.2 Řídicí jednotky 6
3.2.1 Raspberry Pi 6
3.2.2 Wi-Fi modul ESP8266 7
3.3 Použité senzory 9
3.4 Napájecí zdroje 10
3.5 Aktuátory 12
3.6 Ochranné a signalizační obvody . 12
3.6.1 Hlídač napětí akumulátoru . . 12
3.6.2 Snímač přetečení misky květináče 13
3.6.3 TTL logika zapojení NAND . 14

4 Matematický model systému **17**
4.1 Model přítoku vody do květináče 17
4.2 Model absorpce a vypařování vody z květináče 18
4.2.1 Absorpce vody do zeminy . . . 18
4.2.2 Transport a vypařování vody z rostliny 20

5 Simulace a návrh regulátoru **23**
5.1 Simulace matematických modelů 23
5.2 Experimentální část 25

6 Software **29**
6.1 NodeMCU a jazyk Lua 29
6.1.1 Programy pro sběr dat ze senzorů 29
6.2 Webové rozhraní 30
6.2.1 Tvorba webové stránky 30
6.2.2 SQL databáze 32

7 Realizace projektu **33**
7.1 Návrh PCB 33
7.2 Návrh nádržky se stojanem 34
7.3 Rozmístění senzorů 35

8 Závěr **37**

A Literatura **39**

B Seznam použitých zkratek **41**

C Elektrické schéma obvodu **43**

D Podklady pro PCB **45**

E Obsah přiloženého CD **47**

Obrázky

2.1 Kapilární jev[3] 4

3.1 Blokové schéma zapojení systému 6
3.2 Wi-Fi modul ESP8266 typu ESP-07 8
3.3 Senzory pro měření teploty, vlhkosti vzduchu a měření hladiny vody 9
3.4 Senzor pro měření vlhkosti zeminy YL-69 s převodním modulem YL-38 10
3.5 Hlídač napětí akumulátoru 13
3.6 Snímač přetečení misky květináče 14
3.7 Zapojení NAND logiky TTL . . . 15

4.1 Přítok vody z nádržky s vazebním grafem 18
4.2 Absorpce vody do zeminy s vazebním grafem 19
4.3 Transport a vypařování vody v rostlině s vazebním grafem 22

5.1 Blokové schéma simulace 24
5.2 Simulace vypařování vody z květiny se zaléváním 24
5.3 Měření vlhkosti zeminy 25
5.4 Aproximace průběhu 5.3b 26
5.5 Vlhkost zeminy při zalévání zespoda 27

6.1 Vzhled webové stránky 31
6.2 Databáze naměřených hodnot u květináče 32

7.1 Osazená deska plošného spoje . . 34
7.2 Stojan s nádržkou 35

Tabulky

3.1 Přehled různých typů modulu ESP8266 [25] 8
3.2 Technické parametry senzorů . . . 10
3.3 Parametry použitých stabilizátorů napětí 11
3.4 Tabulka hodnot logické funkce NAND 14

4.1 Veličiny Penman-Monteithovy rovnice 20

Kapitola 1

Úvod

V této bakalářské práci se zabývám řešením a zdokonalením způsobu zavlažování pokojových rostlin za účelem zvýšení komfortu uživatele a přehledu o podmínkách rostlin v domácnosti.
Okrasná rostlina má nezastupitelné místo v našem životě, protože je to jediný přirozený prostředek pro zkvalitnění prostředí interiéru. Každá rostlina má konkrétní požadavky na spotřebu vody, a to například podle druhu rostliny, velikosti listů, kořenů, dle fáze vývoje a klimatických podmínek umístění rostliny. Také roční období ovlivňuje spotřebu vody rostlinou. V zimě, kdy je růst rostliny pomalejší, je třeba zalévat výrazně méně než na jaře a v létě, kdy rostlina roste a kvete. Při zalévání rostlin bychom měli vzít v úvahu výše uvedené faktory, bez ohledu na způsob zalévání.

1.1 Požadavky kladené na systém

Optimální automatický systém by měl splňovat následující požadavky:

- Zajistit vodu rostlinám včas a v potřebném množství bez zásahu uživatele.
- Instalace distribučních hadic pro rozvod vody a elektrických napájecích obvodů musí být bezpečná pro uživatele a neměla by příliš narušovat estetický vzhled rostlin v domácnosti.
- Systém by měl fungovat co nejdéle bez zásahu uživatele.
- Systém by měl poskytnout uživateli základní informace o stavu zavlažování

1.2 Motivace a způsob realizace

Hlavní motivace byla ušetřit uživateli čas strávený manuálním zavlažováním, zajistit optimální množství vody potřebné pro rostliny, a zároveň dálkově poskytnout uživateli potřebné informace o prostředí, ve kterém se nachází květiny. Použití tohoto systému z velké části zbavuje uživatele starostí, zda-li byly jeho rostliny zality a zároveň odpadá nutnost fyzické přítomnosti při

zalévání. Pomocí použitých senzorů, modelů spotřeby vody rostlinou a programů systém stanoví, kdy potřebuje rostlina zalít a dodá takové množství vody, které rostlina potřebuje. Další výhodou systému je bezdrátový přenos informací o prostředí květin na webový server, který je dostupný na konkrétní internetové stránce.
Důležitou část systému tvoří bezdrátový Wi-Fi modul a senzory s elektromagnetickým ventilem napájené z akumulátoru, umístěného v bezprostřední blízkosti modulu, čímž odpadá nutnost propojení květináčů dlouhými vodiči vedenými místností, kterých by se chtěl každý zbavit. Každý květináč je zaléván z odnímatelné lokální nádržky umístěné spolu s elektronikou v přenosném stojanu.
Zobrazení informací na webové stránce zprostředkovává miniaturní počítač pracující jako prostředník s nízkou spotřebou a širokou škálou využití. Díky tomuto počítači a serveru je uživatel schopen přes internet získat informace o květinách i v případě, že je vzdálen od domácnosti.

Kapitola 2

Zavlažování pokojových květin

2.1 Manuální zavlažování

Nejrozšířenějším a zároveň nejstarším způsobem zavlažování rostlin je do dneška klasický způsob zalévání konví shora či zespod květináče. Tento způsob zavlažování vždy vyžaduje znalost specifických požadavků rostlin a podle těchto požadavků je třeba zalévat a tím se i časově přizpůsobit potřebám rostlin.
Nevýhodou této metody je riziko přemokření, případně vyschnutí rostlin z neznalosti pěstitele a nutná fyzická přítomnost při zalévání.

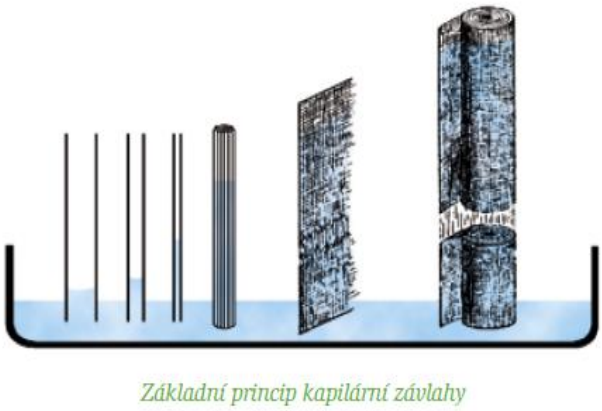
2.2 Samozavlažovací květináče a kapilární jev

Před objevem samozavlažovacích květináčů a různých typů zavlažování se používal pro zalévání pokojových rostlin jednoduchý, ale účinný způsob. Knot, který dobře saje vodu. Princip tohoto řešení spočívá v použití kapilárního jevu. Na základě tohoto principu používají samozavlažovací květináče skelné nebo polypropylénové pletivo jako knot (kapiláru), který přivádí vodu ze zásobní nádoby pod květináčem do nádoby se zeminou a květinami. Voda ze spodní nádoby nepřetržitě stoupá do horní nádoby pomocí jednoho, čtyř nebo i více knotů.

Kapilární jev je vlastnost tekutin, která umožňuje tekutině samovolně vzlínat v úzké trubici (kapiláře), která je ponořena do tekutiny. Jedná se o interakci dvou sil, kohezních sil molekul tekutiny a adhezních sil mezi tekutinou a povrchem trubice. V případě vody, kde jsou adhezní síly větší, než síly kohezní, nastává kapilární elevace, tedy vzlínání tekutiny směrem vzhůru proti zemské přitažlivosti. Výška, které může voda v kapiláře dosáhnout, je nepřímo úměrná poloměru kapiláry, hustotě vody a přímo úměrná povrchovému napětí vody. Tento jev je základem příjmu a distribuce živin v rostlině pomocí kořenů.

Závlaha knoty zajistí namísto občasného nárazového zalévání spojitý přesun vody, což je pro rostliny nejblíže k přírodním podmínkám.
Výhodou je nízká cena a možnost zvolit počet knotů dle velikosti květináče.

Nevýhodou knotové metody je nepřesný odhad, kolik vody rostlina spotřebuje.



Obrázek 2.1: Kapilární jev[3]

2.3 Automatické zavlažování

Do této kategorie můžeme zařadit širokou škálu systémů zavlažování, které se liší podle účelu, rozsahu použití a způsobu regulace zásobování vodou. Nejjednodušší je automatický systém s programovatelným časovým spínačem, který zajišťuje zavlažování v konkrétním čase, podle předem nastaveného časového intervalu s možností periodického opakování .
Výhodou je nižší pořizovací cena oproti lépe vybaveným systémům, nevýhodou je neschopnost zajistit rostlinám optimální množství vody.
Systém je bez zpětné vazby, která by korigovala chování systému. Vyspělejší verze automatického systému zavlažování (ASZ) používá řídící jednotku, která na základě programu a signálů z různých senzorů vlhkosti, teploty, srážek apod. ovládá elektromagnetické ventily příp. čerpadla vody tak, aby rostliny dostaly tolik vody, kolik potřebují.
Vrcholem vývoje ASZ jsou takové systémy, které se navrhují na míru s větším zastoupením automatizace, bezdrátové komunikace s řídícím počítačem a možností dálkového ovládání pomocí mobilních aplikací.
Příkladem můžou být výrobky firmy Parrot, která vyrábí jak samozavlažovací květináče[17], tak i modul[21], osazený senzory, který odesílá data o prostředí květináče do mobilní aplikace. Levnějším řešením můžou být tzv. DIY projekty z různých stránek typu Hackaday[22] nebo Instructables[23], které ale nemusí být tak propracované, jako výrobky firmy Parrot.
Výhodou ASZ je poskytnutí rostlinám vodu vždy, když ji právě potřebují a uživateli největší komfort, nevýhodou je vyšší pořizovací cena.

Kapitola 3

Hardware

Tato kapitola slouží pro popis vstupních a výstupních obvodů systému, způsobu jejich návrhu, pricipu funkce použitých senzorů a také jejich provzních podmínek. V úvodu je celý systém zobrazen blokovým schématem, které obecně popisuje celý systém. V druhé části kapitoly jsou rozebrány řídicí jednotky Raspberry Pi a ESP8266 s použitými senzory u květináče. Třetí část popisuje volbu napájecích zdrojů - akumulátoru a napěťových stabilizátorů společně s aktuátory, které ovládají ventil při zalévání květináče. Poslední část kapitoly obsahuje popis ochranných a signalizačních obvodů. V příloze je zobrazeno celkové elektrické schéma zapojení obvodu.

3.1 Blokové schéma systému

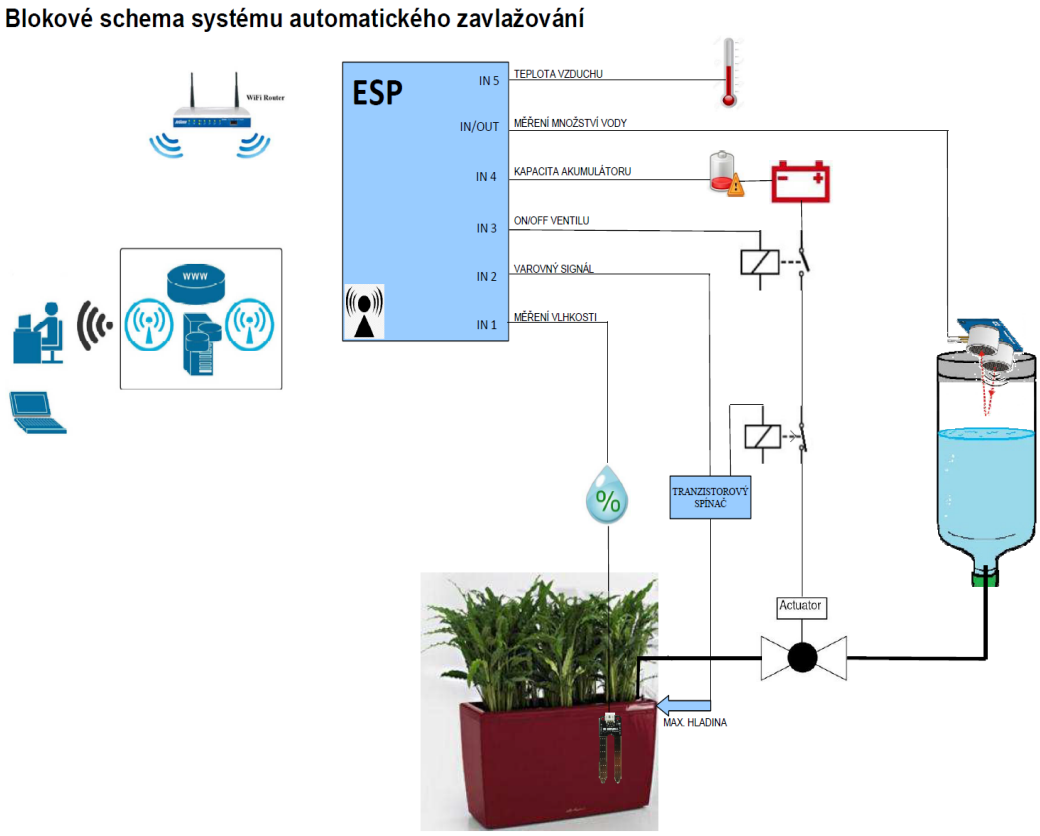
Blokové schéma na obr.3.1 zjednodušeně popisuje celý systém. Hlavní část systému slouží Wi-Fi modul ESP8266, který přijímá a zpracovává signály vstupních obvodů:

- Měření teploty a vlhkosti okolního vzduchu
- Procentuálního měření hladiny vody v nádržce
- Snímání stavu akumulátoru
- Přetečení vody v misce květináče
- Měření vlhkosti zeminy

Kromě vstupních obvodů ESP ovládá výstupní obvody:

- Spínání vodního ventilu
- Úspory spotřeby energie

Na blokovém schématu není znazorněný obvod pro převodník RS-232 to USB, který slouží k programování modulu a zobrazení výstupu programů ESP na počítači. Nezávisle na práci ESP je navržen ochranný obvod, který zabraňuje přetečení vody v misce pod květináčem v případě, že selže celý proces ovládání ventilu. Dalším obvodem, nezávisle fungujícím na ESP, je obvod signalizující nízký stav akumulátoru.



Obrázek 3.1: Blokové schéma zapojení systému

3.2 Řídicí jednotky

Dvě hlavní části systému tvoří Wi-Fi modul ESP8266, který slouží pro bezdrátový přenos dat získaných ze senzorů u květináče. Tyto data jsou poté posílány do mini počítače Raspberry Pi, jehož funkce je uchovávání získaných dat v databázi a přeposílání aktuálních, naposledy naměřených dat na cílový webový server.

3.2.1 Raspberry Pi

Raspberry Pi (RPi) je malý počítač s rozměry 85x56mm, osazený procesorem ARM, který je kompatibilní s různými distribucemi operačního systému Linux, a dokonce i Windows 10. Velký plus RPi spočívá v tom, že jsou operační systém, programy a data umístěny na microSD kartě, tedy není třeba velký harddisk pro ukládání dat - doporučená velikost SD karty je od 4 GB. RPi má vstupy/výstupy pro různá komunikační rozhraní (ethernet, USB, HDMI, audio výstup 3,5 mm) a také několik I/O pinů, na které lze připojit různá zařízení přímo (např. senzory, moduly...). Vzhledem k jeho malé velikosti nemá zobrazovací médium, ale přes výše zmíněná rozhraní (USB, HDMI) ho lze

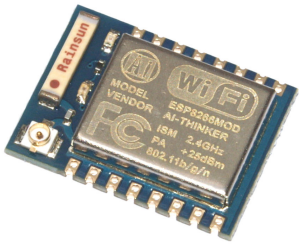
připojit na monitor, příp. televizor. Jiným způsobem zobrazení je softwarové řešení, tj. pomocí SSH připojení je možné komunikovat s RPi přes příkazovou řádku operačního systému, případně po stažení speciálních programů (např. Xming) je možné také zobrazit „obrazovku“ RPi na počítači, ze kterého se na RPi připojuji – není třeba dalších kabelů.
Další obrovskou výhodou RPi je tzv. Open Source software (tedy otevřený a volně šiřitelný zdrojový kód) a široká základna uživatelů po celém světě, kteří řeší společně problémy, které se mohou vyskytnout při práci s RPi.
V tomto projektu je RPi použito jako komunikační mezičlánek mezi Wi-Fi modulem ESP8266 a serverem, na kterém jsou zobrazeny hodnoty parametrů naměřených senzory u květináče (vlhkost zeminy, teplota, stav vody v nádržce, stav akumulátoru...).

3.2.2 Wi-Fi modul ESP8266

ESP8266 (ESP) je bezdrátový modul, který plní funkci příjmu různých vstupních dat a poté je buď přepošle dále na internet, případně zpracuje a na základě nahraného programu vyšle signály do výstupních obvodů. ESP obsahuje flash paměť menší velikosti, která se liší dle použitého typu, od 512 KiB (cca 524 KB) do 4 MiB (cca 4194 KB). Vestavěný 2.4 GHz vysílač a přijímač podporuje bezdrátové Wi-Fi standardy 802.11 b/g/n.
Modul ESP odebírá při svém napájecím napětí 3.3 V v normálním módu bez internetové komunikace cca 70 mA. Velmi praktické jsou proto možnosti uvést ESP do 3 různých režimů úspory energie - sleep módy.
První možnost je vypnutí obvodu zajišťujícího Wi-Fi připojení, tzv. modem sleep mode, při kterém je odběr modulu okolo 15 mA. Další dva módy jsou velmi podobné. Light-sleep mode ještě navíc od předchozího módu úspory energie omezuje činnost procesoru, a tak se výsledná spotřeba pohybuje kolem 1 mA. Nejvýznamnější úspory energie lze docílit použitím tzv. deep-sleep módu. Veškerá činnost procesoru je omezena na minimum a jediný obvod, který je zapnutý, je obvod reálného času, který zajišťuje následné probuzení modulu podle nastavení v programu. Spotřeba v deep-sleep módu je minimální, pouhých 10 μA, avšak toto je pouze teoretická hodnota, prakticky byla naměřena hodnota 60μA. Za účelem největší úspory energie je v tomto systému použit deep-sleep mód. Podrobnější informace o celkové spotřebě jsou v kap.3.4
ESP se vyrábí ve 12 typech, z nichž nejvíce používané jsou typy ESP-03, ESP-07 a ESP-12, každý typ má své specifické vlastnosti (přehled uvádí tabulka 3.1). Všechny moduly mají piny na RS-232 to USB převodník pro komunikaci s počítačem (nahrávání nového firmware a programů, sledování výstupů nahraných programů na sériovém monitoru). V tomto projektu je použit typ ESP-07, protože má 1 analogový vstup, který je nezbytný pro přesné určení hodnot při měření vlhkosti zeminy, blíže v sekci 3.3. Mimo jednoho analogového vstupu má ESP-07 také 9 tzv. GPIO pinů [1]. Díky

[1] GPIO je zkratka pro "General-purpose input/output". V překladu tedy tento pin může sloužit jak pro vstup, tak i pro výstup Wi-Fi modulu

takovému počtu GPIO pinů je možné ovládat až 9 výstupů nebo čerpat data z několika senzorů (ne každý senzor obsazuje pouze jeden pin, např. ultrazvukový senzor obsadí 2 piny, viz. 3.3).



Obrázek 3.2: Wi-Fi modul ESP8266 typu ESP-07

Významnou součásti modulu je jeho firmware. Stejně jako u RPi je i ESP založeno na Open Source software. Jelikož se jedná o zařízení, které bylo poprvé uvedeno na trh v roce 2014, nejsou všechny chyby ještě opraveny, přesto, některé verze již fungují téměř bez problémů. Použitý firmware je popsán v kap.6

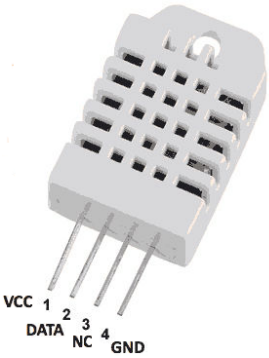
Typ senzoru	Rozměry ŠxV [mm]	Velikost flash [KiB]	Počet GPIO	Analogový pin
ESP-01	14.3 x 24.8	512 - 1024	3	ne
ESP-02	14.2 x 14.2	512 - 1024	3	ne
ESP-03	17.4 x 12.2	512	7	ne
ESP-04	14.7 x 12.1	512	7	ne
ESP-05	14.2 x 14.2	512	0	ne
ESP-06	14.2 x 14.7	512	7	ne
ESP-07	22.0 x 16.0	512 - 1024	9	ano
ESP-08	17.0 x 16.0	512	7	ne
ESP-09	10.0 x 10.0	1024	6	ne
ESP-10	14.2 x 10.0	1024	0	ne
ESP-11	17.3 x 12.1	1024	6	ne
ESP-12	24.0 x 16.0	4096	9	ano

Tabulka 3.1: Přehled různých typů modulu ESP8266 [25]

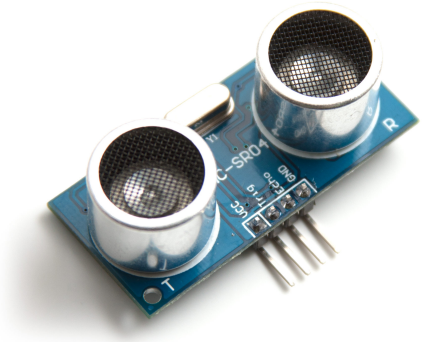
3.3 Použité senzory

Pro měření okolních podmínek v místnosti je použitý senzor **DHT-22**. Pomocí kapacitního senzoru vlhkosti a termistoru měří jak teplotu okolí, tak i relativní vlhkost vzduchu v místnosti. DHT-22 má 4 piny viz. obr.3.3a. Dva krajní piny slouží pro napájení senzoru (VCC a GND), druhým (DATA) se přenáší naměřené hodnoty a třetí, označený jako NC, není zapojený.
Výhodou tohoto široce používaného senzoru je především to, že pro obě naměřené hodnoty stačí pro připojení k řídicí jednotce pouze 1 datový pin a relativně přesné měření ($\pm 0.5°C$ pro měření teploty a $\pm 2\%$ pro měření vlhkosti) vzhledem k jeho ceně.

Dalším použitým senzorem je ultrazvukový senzor **HC-SR04**, který měří vzdálenost horní hladiny vody v nádržce od senzoru. Skládá se z vysílače a přijímače, krystalového oscilátoru a mikrokontroléru s dalšími potřebnými elektronickými prvky pro správnou funkci mikrokontroléru. Senzor funguje na principu sonaru, po obdržení spouštěcího signálu od řídicí jednotky na pin (Trig) vysílá vysokofrekvenční pulz a poté čeká, až se odrazí od překážky. Po přijetí vysílaného pulzu změní pin Echo svou logickou úroveň na HIGH na dobu, úměrnou vzdálenosti měřeného objektu.
Tento senzor je velice levný, přesný a kvůli tomu, že funguje i při měření odrazu pulzu od hladiny vody, tak je velmi vhodným prostředkem pro měření hladiny vody v nádržce.



(a) : Senzor teploty a vlhkosti DHT-22

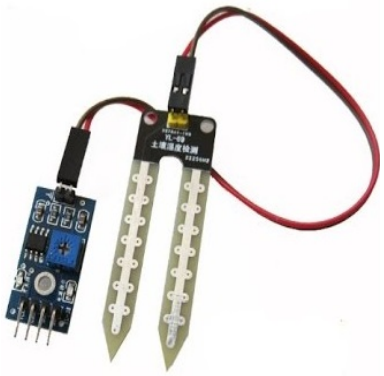


(b) : Ultrazvukový senzor HC-SR04

Obrázek 3.3: Senzory pro měření teploty, vlhkosti vzduchu a měření hladiny vody

Poslední, třetí použitý senzor, je senzor pro měření vlhkosti zeminy, **YL-69**. Je rozdělený na 2 části. První část tvoří dvě elektrody, které se umístí do zeminy. Elektrody jsou připojeny na modul YL-38, jehož využití je možné i u jiných senzorů, protože jsou na něj elektrody napojeny přes 2 pinový konektor. Tvoří ho potenciometr, AD převodník a komparátor LM393 s operačními zesilovači. Potenciometrem lze nastavit citlivost komparátoru, který za pomoci

AD převodníku vytvoří digitální výstup signalizující buď logickou 0 (není překročena nastavená prahová hodnota), nebo logickou 1.
Druhým možným výstupem modulu je analogová hodnota, která zprostředkovává hodnoty v rozlišení 10-bit. V případě, že jsou elektrody nezapojeny, je výstup 1023 a naopak, zcela ponořené elektrody ve vodě vrací hodnotu 0. Tímto výstupem lze určit relativní vlhkost zeminy, jejíž dlouhodobý průběh lze zobrazit na grafu s hodnotami. Stručná tabulka s hodnotami pro provoz



Obrázek 3.4: Senzor pro měření vlhkosti zeminy YL-69 s převodním modulem YL-38

senzorů:

Typ senzoru	Napětí	Proudový odběr	Rozsah měření
DHT-22	3.3 - 6 V	2.5 mA	-40 až 80 $°C$
HC-SR04	5 V	15 mA	2 cm až 4 m
YL-69	3.3 - 5 V	4.5 mA	0 až 1023 (10-bit)

Tabulka 3.2: Technické parametry senzorů

3.4 Napájecí zdroje

Pro napájení systému jsou použita 3 různá napětí, $3.3\,V$, $5\,V$ a $12\,V$. Hlavním napájecím zdrojem je $12\,V$ olověný akumulátor (aku) typu NPG1.3-12 s kapacitou. Technické parametry aku jsou: napětí $12\,V$, $1.3Ah$, rozměry 53x97x44 mm, váha 0.6 kg, životnost 300 dobíjecích cyklů při úplném vybíjení.
Akumulátor $12\,V$ slouží pro napájení obvodů elektromagnetického (elmag.) ventilu a $5\,V$ stabilizátoru. Při volbě kapacity akumulátoru hrály roli doba provozu aku na 1 dobíjecí cyklus, možné rozměry a příznivá cena.
Velmi významný vliv na výpočet potřebné kapacity aku má trvalý proudový odběr ESP modulu včetně vstupních a výstupních obvodů. Měřením bylo zjištěno, že ustálený odběr zapnutého ESP modulu s používanými senzory bez elmag. ventilu byl $150mA$. Při zanedbání vlivu teploty okolí a krátkodobých proudových špiček při komunikaci by byla kapacita denního provozu:

$$Q = It = 0.15 \times 24 \;=\; 3.6\ Ah \tag{3.1}$$

Při požadavku na min. 10 denní dobu provozu bez dobíjení by byla nutná kapacita $36Ah$. Akumulátor s takovou kapacitou je z praktických důvodů nepoužitelný, vážil by 11 kg a byl by těžší a možná i větší, než samotný květináč. Pro snížení nároků na akumulátor bylo nezbytně nutné provést opatření s cílem snížení odběru systému z aku na minimum. Z důvodu, že jsou změny veličin prostředí v domácnosti pomalé (teplota, vlhkost), dostačuje měřit veličiny pouze jednou za 4h. K naměření by stačilo uvést ESP do normálního módu a zapnout senzory po dobu 5s, pomocí tranzistorového spínače ovládaného signálem z ESP.

Kromě zkrácení doby zapnutí senzorů bylo nutné také využít výhody provozu ESP v úsporném módu, deep-sleep módu. Při provozu ESP v tomto módu bylo naměřeno odběru cca $5mA$, 10 denní provoz s tímto odběrem by vyžadoval kapacitu:

$$Q = 0.005 \times 24 \times 10 \ = 1.2 \ Ah \tag{3.2}$$

Celkový proudový odběr systému se zapnutým ventilem byl $430mA$. Za předpokladu, že bude systém zalévat maximálně jednou denně po dobu 30s, by byla pro provoz ventilu na 10 dní třeba kapacita 0.04 Ah.
Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že aku s kapacitou $1.3Ah$ stačí pro provoz celého systému v úsporném režimu po dobu min. 10 dní.
Pro dobíjení aku byla doporučena nabíječka olověných akumulátorů typu H-Tronic AL800 s charakteristikou I/U. Je vybavena ochranou proti zkratu, přetížení a přebití aku. Nabíječka je určena pro Pb aku s kapacitou 1.2 - 63 Ah.
Druhým napájecím zdrojem je $5\,V$ stabilizátor typu L78S05, který slouží pro napájení senzorů, stabilizátoru $3.3\,V$ a $5\,V$ relé. Během provozu je velký rozdíl mezi vstupním $12\,V$ a $5\,V$ výstupním napětím stabilizátoru při odběru $430mA$ (ztráty $0.43A\times\ 7\,V$ = cca $3\,W$). Tyto ztráty výrazně zahřívají stabilizátor, proto je se stabilizátorem použit pasivní chladič.
Třetím napájecím zdrojem je $3.3\,V$ stabilizátor pro napájení Wi-Fi modulu ESP. Tento modul je velmi citlivý na kolísání napětí. K pokrytí náhlých proudových během komunikace je použit kondenzátor o velikosti $1000\mu F$.

Typ stabilizátoru	Max.vstupní napětí	Výstupní napětí	Max.výstupní proud
L78S05	$35\,V$	$5\,V$	$2A$
LF33CV	$40\,V$	$3.3\,V$	$0.5A$

Tabulka 3.3: Parametry použitých stabilizátorů napětí

3.5 Aktuátory

Aktuátor je zařízení, které na základě obdrženého povelu od systému propustí vodu z nádržky do misky květináče. V tomto projektu jako aktuátor zavlažovacího systému slouží elmag. ventil s těmito parametry:

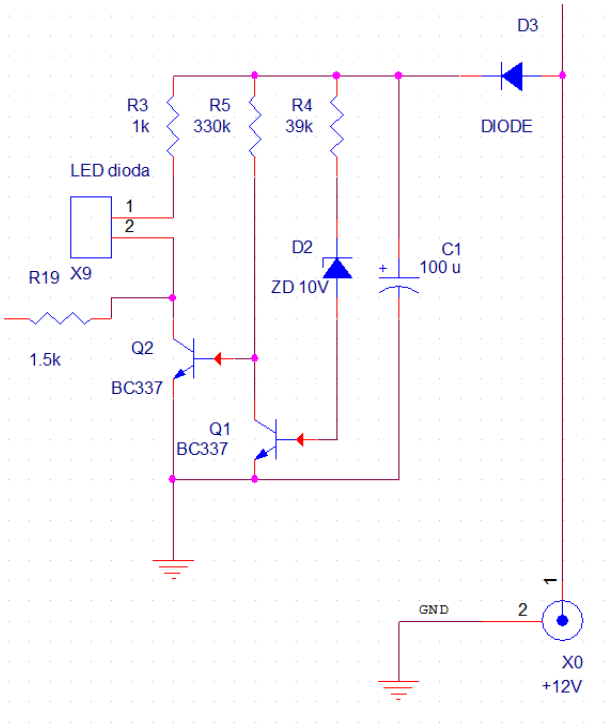
- Jmenovité napětí $12\,V$ DC
- Jmenovitý proud $100mA$
- Rozměry (délka x průměr) = 62 x 24 mm
- Průměr otvorů pro vývod vody = 5 mm
- Maximální tlak 2.75 bar

Při výběru ventilu byl kladen důraz na malou spotřebu a co nejmenší rozměry. Ovládání ventilu přímo z modulu ESP nebylo možné, protože výstup z ESP může spínat zátěž s maximálním proudem $70mA$ a napětím $3.3\,V$. Proto bylo ovládání ventilu z ESP realizováno za pomoci tranzistoru a $5\,V$ relé.

3.6 Ochranné a signalizační obvody

3.6.1 Hlídač napětí akumulátoru

Životnost použitého akumulátoru (aku) se liší v závislosti na provozních podmínkách, a to hlavně při nabíjení/vybíjení. Pro optimální zacházení s aku je nutné sledovat napětí aku a upozornit uživatele včas na nutnost dobíjení aku. Prahová hodnota napětí, u které je doporučeno opět dobít aku, byla podle výrobce stanovena na $10.8\,V$. Pokles napětí k $10.5\,V$ vede k procesu hlubokého vybití aku. Takto vybitý aku se musí ihned dobít, v opačném případě hrozí, že bude nenávratně poškozen (u gelových aku přibližně po 2 týdnech hlubokého vybití). Pro tento účel bylo využito zapojení 3.5.
Samotný akumulátor nemá žádný vestavěný indikátor vybití, a proto je v zájmu prodloužení životnosti akumulátoru navržený obvod, který sleduje svorkové napětí akumulátoru a v případě poklesu pod hodnotu $10.8\,V$ signalizuje potřebu dobití pomocí LED diody umístěné u květináče a signálem do ESP pro zobrazení na webové stránce.

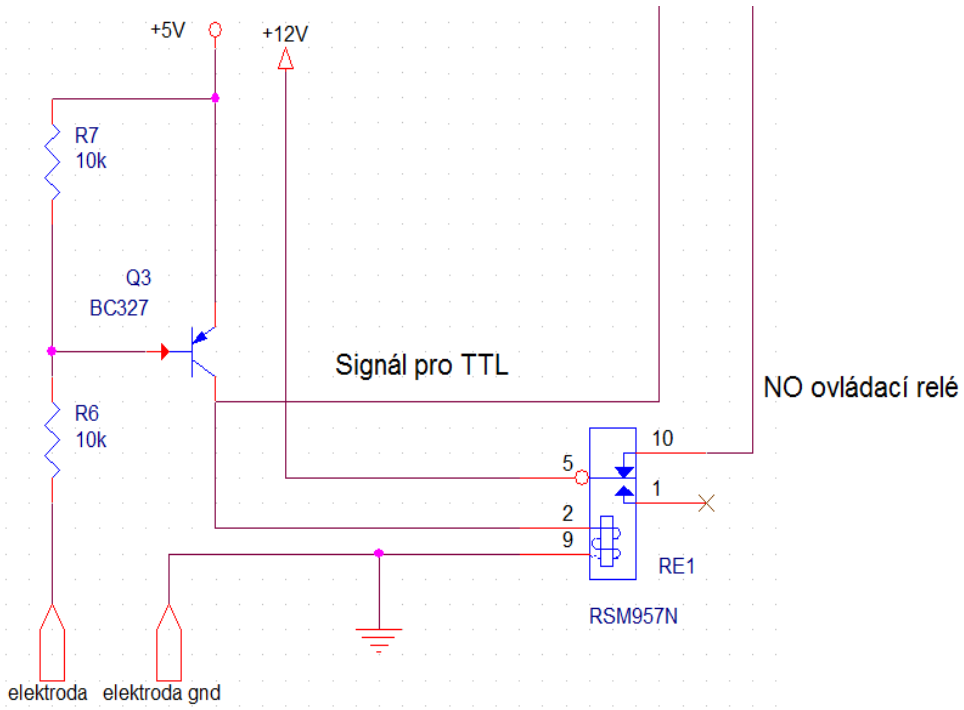


Obrázek 3.5: Hlídač napětí akumulátoru

Obvod je chráněný proti přepólování diodou D3, v případě, že je napětí vyšší než 10.8 V [24], je tranzistor Q1 otevřen, v opačném případě se Q1 zavře a otevře tranzistor Q2, který zajistí rozsvícení červené LED diody. Rozsvícení diody zároveň zajistí signál pro informování ESP pomocí TTL obvodu.

3.6.2 Snímač přetečení misky květináče

Pro případ selhání software při zalévání, případně kontaktu relé, ovládající ventil, byl navržen samostatně fungující obvod s relé a tranzistorovým spínačem. Tento obvod nuceně vypne ventil při dosažení hladiny vody určitého bodu nastaveného pod okrajem misky květináče. Pomocí dvou elektrod, které jsou umístěny na hlídané úrovni je ovládán PNP tranzistor Q3, který je sepnutý v případě, že voda dosáhne této úrovně (spojí obě elektrody uzemněním). Po sepnutí tranzistoru se automaticky aktivuje relé RE1 a svým rozpínacím kontaktem odpojí napájení +12V od ventilu. Při aktivaci relé RE1 je ESP informováno pomocí zapojení TTL obvodu, které na tento stav upozorní na webové stránce.



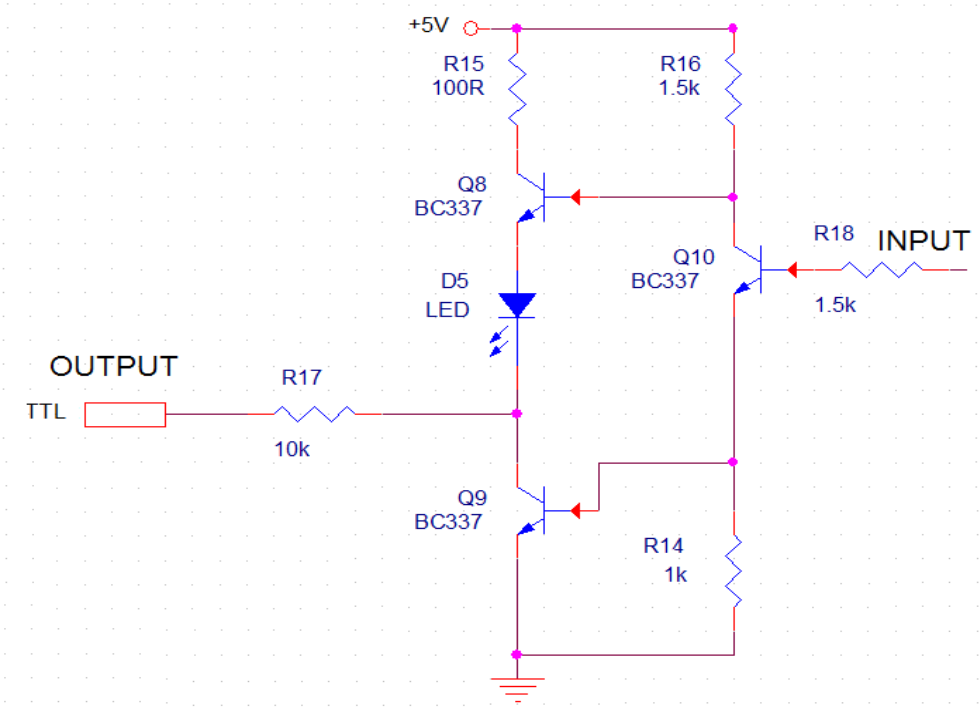
Obrázek 3.6: Snímač přetečení misky květináče

3.6.3 TTL logika zapojení NAND

Při rozhodování pro použití zapojení TTL NAND[26] byly uvažovány 2 podmínky. První podmínka je, že napětí signálu na vstupu ESP nesmí překročit $3.3\,V$. Jelikož je napětí signalizačních obvodů $5\,V$, mohlo by se za určitých okolností dostat na vstupní pin modulu a mohlo by modul zničit. Druhá podmínka, která byla určena zapojením vstupních obvodů do ESP na konkrétní piny je, že pro sledování změny logických úrovní je třeba provádět přerušení stálé logické úrovně "HIGH" (U<$3.3\,V$) na "LOW" (U<$0.7\,V$). Při zapojení logické funkce NAND je třeba 2 vstupů. Z tabulky 3.4 je zřejmé, že jediná situace, kdy je výstup funkce NAND roven logické 0, je, když jsou oba dva vstupy (A i B) rovny logické 1 (odpovídající napětí "HIGH"). V ostatních případech zůstává výstup zapojení na logické úrovni 1.

Vstup A	Vstup B	Výstup (A NAND B)
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

Tabulka 3.4: Tabulka hodnot logické funkce NAND



Obrázek 3.7: Zapojení NAND logiky TTL

Originální zapojení funkce NAND má na vstupu, který zde tvoří báze NPN tranzistoru Q10, víceemitorový NPN tranzistor, kde každý emitor tvoří jeden vstup logické hodnoty. V tomto případě bylo zapojení modifikováno na jednoemitorovou variantu, tedy logický invertor NOT. Pokud je na vstupu napětí "HIGH", je tranzistor Q10 sepnutý, ve větvi odporů R16 a R14 se vytvoří dělič napětí, který sepne zbývající tranzistory Q8 a Q9. Na výstupu, který vede přes pull-up rezistor R17 do ESP, je hodnota logické 0. Při vstupu "LOW"se obvod chová opačně, na výstupu je hodnota logické 1.
Z hlediska výstupního napětí obvodu přispívá ke snížení napájecí hodnoty $5\,V$ na napětí, které je příznivé pro ESP, LED dioda D5 a tranzistorový přechod Q8. Výstupní napětí lze vypočítat jako:

$$U_{OUT_{HI}} = VCC - U_{Q8} - U_{LED} \doteq 5 - 0.7 - 1.8 \doteq 2.5\ V \qquad (3.3)$$

Tato hodnota je již příznivá pro modul ESP a nepohybuje se blízko hranice napětí mezi stavy HIGH a LOW, a tak je jednoznačně rozpoznatelná.

Kapitola 4

Matematický model systému

Celý systém je rozdělen na dvě části. První část představuje přítok vody do květináče z rezervoáru přes hadici a elektromagnetický ventil. Druhá část popisuje samotný proces absorpce a vypařování vody z květináče. Tvorba matematického modelu systému vychází z teoretických i experimentálních poznatků o příjmu a spotřebě vody v rostlině v závislosti na veličinách popisující prostředí (teplota a relativní vlhkost ovzduší i zeminy atd.). Tento matematický model slouží jako základ pro návrh regulátoru zalévání rostliny.

4.1 Model přítoku vody do květináče

Při modelování přítoku vody do květináče je nutné uvažovat vliv následujících prvků[2]:

- Zobecněná poddajnost C, která popisuje systém rezervoáru
- Zobecněný rezistor R, za předpokladu laminárního proudění kapaliny, ovlivněný odporem stěny hadice

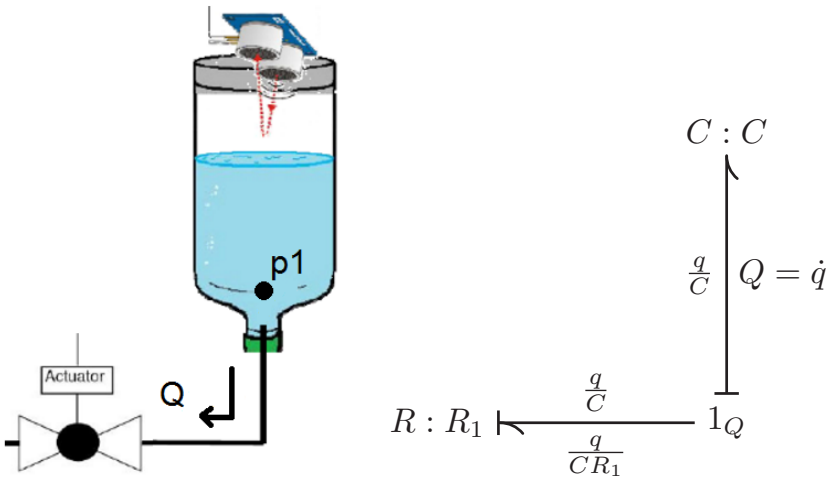
Na obr.4.1a jsou označeny význačné tlaky (p_1) a objemové průtoky (Q_1). Poté je z výše uvedených vlivů sestrojen vazební graf s kauzalitou. Vztahy pro zobecněnou poddajnost a zobecněný rezistor[2]:

$$C = \frac{A}{\rho g}, \tag{4.1}$$

kde A je plocha podstavy nádrže, ρ hustota vody a g je známá konstanta pro tíhové zrychlení a

$$R_1 = \frac{8\mu l}{\pi r^4}, \tag{4.2}$$

kde μ je viskozita vody ($0.00102\ Pa\ s$) , l značí délku hadice a r je vnitřní poloměr hadice



(a) : Přítok vody z nádržky **(b) :** Zjednodušený vazební graf přítoku vody z nádržky

Obrázek 4.1: Přítok vody z nádržky s vazebním grafem

Dle obr.4.1b vazebního grafu s kauzalitou je rovnice pro zobecněný tok (objemový průtok vody) Q následující:

$$Q = \frac{q}{CR_1} \tag{4.3}$$

Po dosazení vztahů (4.1) a (4.2) do vztahu (4.3) je Q :

$$Q = \frac{\rho g \pi r^4}{8 \mu l A} q \qquad [m^3 s^{-1}] \tag{4.4}$$

Jiným způsobem lze napsat vztah (4.4) pomocí sdružené konstanty $k_N = \frac{\rho g \pi r^4}{8 \mu l A}$ jako:

$$\frac{dq}{dt} = k_N q \tag{4.5}$$

Tento vztah je vyjádřením stavového popisu přítoku vody z nádržky s jedním stavem q, který značí objem přitečené vody do misky květináče.

4.2 Model absorpce a vypařování vody z květináče

V této části je modelování složitější. Model je rozdělen na 2 části:

1. Absorpce vody do zeminy
2. Transport a vypařování vody z rostliny

4.2.1 Absorpce vody do zeminy

Absorpce vody do zeminy je způsobena kapilárním jevem. Pro maximální dosažitelnou výšku, do které může vystoupat voda pomocí kapilárního jevu, platí podle [4] vztah:

$$l_c = \frac{2\sigma cos(\omega)}{r\gamma} \qquad [m] \tag{4.6}$$

σ značí konstantu pro povrchové napětí vody ($72.75 \times 10^{-3} Nm^{-1}$), r je poloměr kapiláry , ω je úhel dotyku vody a stěny kapiláry, závisí na typu půdy (dle[8] je pro zeminu podobnou substrátu v květináči typický úhel $\omega = 15°$) , γ je měrná tíha vody ($\gamma = 9810\ Nm^{-3}$).

Rychlost vsakování vody do zeminy směrem vzhůru je dána vztahem z [4]:

$$v = k_s \frac{l_c - l}{l} \qquad [ms^{-1}], \tag{4.7}$$

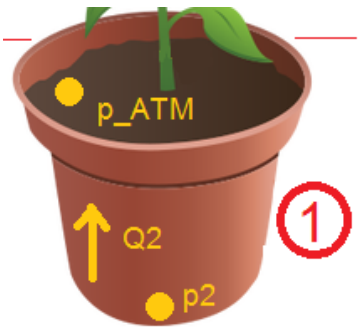
kde k_s je hydraulická vodivost zeminy, (dle [7] pro substráty pokojových rostlin $K_s \doteq 0.1\ cm\ min^{-1}$]), l je výška vody ve spodní části květináče.

Objemový průtok vody (Q_2) závisí na ploše podstavy květináče (S) a na výše uvedeném vztahu pro rychlost vsakování vody do zeminy(4.7), tedy:

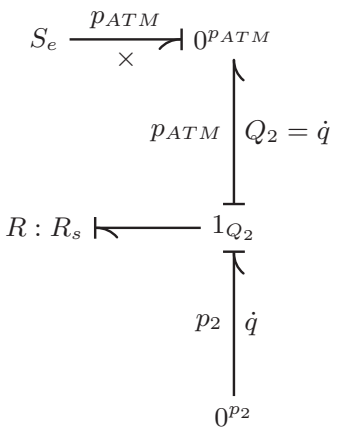
$$Q_2 = Sv \qquad [m^3 s^{-1}] \tag{4.8}$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že absorpce vody do zeminy je nejvíce ovlivněna strukturou zeminy v květináči. Vlivy teploty, čistoty vody a okolního tlaku mají na absorpci malý vliv.

Vazební graf pro první část uvažuje atmosférický tlak na povrchu zeminy v květináči. Největší vliv na odpor zeminy má hydraulická vodivost (k_s) neboli hydraulický odpor ($R_s = \frac{1}{k_s}$) .



(a) : Absorpce vody do zeminy



(b) : Vazební graf absorpce vody zeminou

Obrázek 4.2: Absorpce vody do zeminy s vazebním grafem

4.2.2 Transport a vypařování vody z rostliny

Za předpokladu, že proudění vody ve stonku je laminární (částice vody se pohybují vedle sebe), kapalina proudí malou rychlostí v úzké trubici (stonku) a hustota kapaliny je konstantní, lze objemový průtok kapaliny aproximovat podle Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění kapaliny v trubici kruhového průřezu[6]:

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\mu}\frac{\Delta p}{l} \qquad [m^3 s^{-1}] \tag{4.9}$$

μ představuje dynamickou viskozitu vody($0.00102\ Pa\ s$), l je délka stonku a r je jeho poloměr. Rozdíl tlaků Δp je mezi tlaky p_3 a p_4 ve vazebním grafu na obr.4.3b

Velké množství vody, které rostlina přijímá, se totiž po proběhnutí fotosyntézy zpět vypaří do vzduchu (transpiruje). Transpirace je velmi významným jevem probíhajícím v rostlině. Transpirace se dělí na 3 druhy: stomatární, na které se aktivně podílí stomata (průduchy) na listech, kutikulární, prováděná celým povrchem listů a lenticelární, způsobená velmi malými otvory ve stonku.
Při modelování vypařování je zohledněna pouze stomatární transpirace, protože se podílí přibližně na 80-90% celkové transpirace. Pro získání objemového průtoku (J) vypařené vody z rostliny je použita Penman-Monteithova [11] rovnice:

$$J = S\frac{\left(sR_n + \frac{\rho C_p VPD}{r_a}\right)}{\lambda\left[s + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)\right]} \qquad [m^3 s^{-1}] \tag{4.10}$$

Veličina	Význam	Jednotka
S	celková plocha listů	m^2
s	křivka tlaku nasycené vodní páry viz.(4.12)	PaK^{-1}
R_n	radiační bilance	Wm^{-2}
ρ	hustota vzduchu při dané teplotě a tlaku	kgm^{-3}
C_p	měrná tepelná kapacita vzduchu (=1012)	$Jkg^{-1}K^{-1}$
VPD	rozdíl tlaků vodní páry [2]	Pa
r_a	aerodynamický odpor viz.(4.15)	sm^{-1}
λ	měrné skupenské teplo vypařování vody (=2,26)	$MJkg^{-1}$
γ	psychrometrická konstanta (=66)	PaK^{-1}
r_s	povrchový odpor rostliny	sm^{-1}

Tabulka 4.1: Veličiny Penman-Monteithovy rovnice

[2] VPD je tzv. "Vapour pressure deficit", tedy rozdíl mezi tlakem nasycené vodní páry $e_s(T)$ a skutečným naměřeným tlakem vodní páry závislým na okolní teplotě a relativní vlhkosti vzduchu (RH) $e_a(T, RH)$. $VPD = e_s(T) - e_a(T, RH)$ $[Pa]$

Tato rovnice je sice složitým, ale velmi spolehlivým teoretickým odhadem celkové bilance vypařování vody z rostliny. Radiační bilance je obtížně měřitelná, ale dle [5] se její hodnoty pohybují v řádech jednotek $MJm^{-2}den^{-1}$

Křivka tlaku nasycené páry podle [12] byla experimentálně určena jako vztah závislý na teplotě okolního vzduchu (T [$^\circ C$]). Pro tlak nasycené páry platí vztah:

$$e_s(T) = 0.6108e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} \qquad [Pa] \tag{4.11}$$

$$s = \frac{4098e_s(T)}{(T+237.3)^2} \qquad [Pa^\circ C^{-1}] \tag{4.12}$$

Pro výpočet VPD je třeba znát ještě aktuální tlak vodní páry[5]:

$$e_a(T, RH) = \frac{e_s(T_{min})\frac{RH_{max}}{100} + e_s(T_{max})\frac{RH_{min}}{100}}{2} \qquad [Pa] \tag{4.13}$$

Protože je teplota ve výše uvedených vztazích dosazována ve stupních Celsia a ve vztahu 4.10 jsou ostatní tepelně závislé veličiny v Kelvinech, je nutné převést teplotu ze stupňů Celsia do Kelvinovy stupnice:

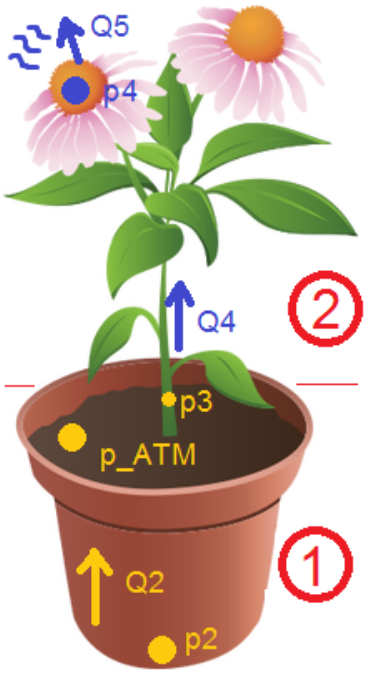
$$T_{(K)} = T_{(^\circ C)} + 273.15 \tag{4.14}$$

Pro malé rychlosti vzduchu (zde se jedná o pokojové rostliny) lze použít vztah pro aerodynamický odpor dle [13]:

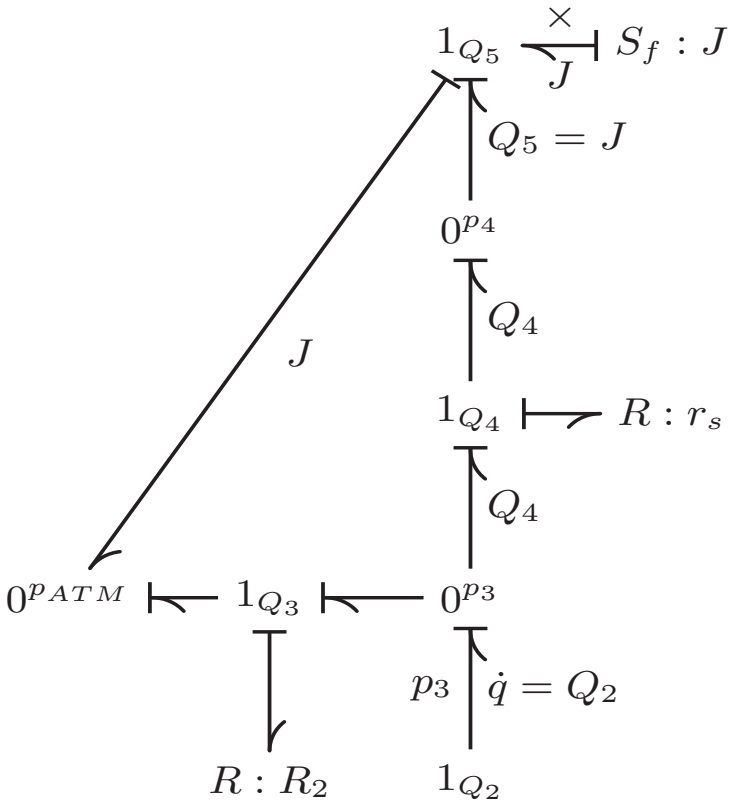
$$r_a = 4.72\frac{\left[ln\left(\frac{z_w-d}{z_{om}}\right)\right]^2}{\kappa^2 f(U_2)} \qquad [sm^{-1}], \tag{4.15}$$

kde $f(U_2)$ značí funkci pro rychlost větru (U_2). Pro výše zmíněnou podmínku o malé rychlosti vzduchu má tvar $f(U_2) = 1 + 0.54U_2$, κ je tzv. Von Kármánova konstanta ($\kappa = 0.41$ [$-$]), z_w je výška, kde se měří rychlost větru, z_{om} je parametr drsnosti povrchu listů, typicky aproximován jako $z_{om} \doteq 0.01\times$ výška rostliny [m] a d je efektivní výška porostu (0.7 - 0.8)$\times$ výška rostliny [m]

Poslední neznámý parametr rovnice (4.10) je povrchový odpor rostliny r_s, závislý na intenzitě osvětlení, který byl odhadován v [9] jako 2 konstantní hodnoty: 70 sm^{-1} ve dne a 200 sm^{-1} v noci.
Úbytek vody v rostlině popisuje Penman-Monteithova rovnice(4.10)pro evapotranspiraci rostliny. Tato rovnice má mnoho závislých faktorů, avšak pro simulaci byly zvoleny hodnoty, které se blíží podmínkám, ve kterých bývá rostlina pěstována. Pro přesnost by bylo třeba vyjádřit rovnici v závislosti na teplotě, a to i maximální a minimální denní hodnotě, stejně jako vlhkosti vzduchu. Obecně ale menší změny teploty a vlhkosti způsobí pouze velmi malou změnu objemového průtoku. Proto jsou v simulaci nastaveny hodnoty pro teplotu mezi $15 - 25^\circ C$ a pro relativní vlhkost je zvoleno pásmo $30 - 50\%$. Po dosazení těchto hodnot je úbytek množství reprezentován konstantním průběhem.



(a) : Vyznačené veličiny pro vazební graf, zdroj obr.:[10]



(b) : Vazební graf transportu a vypařování vody

Obrázek 4.3: Transport a vypařování vody v rostlině s vazebním grafem

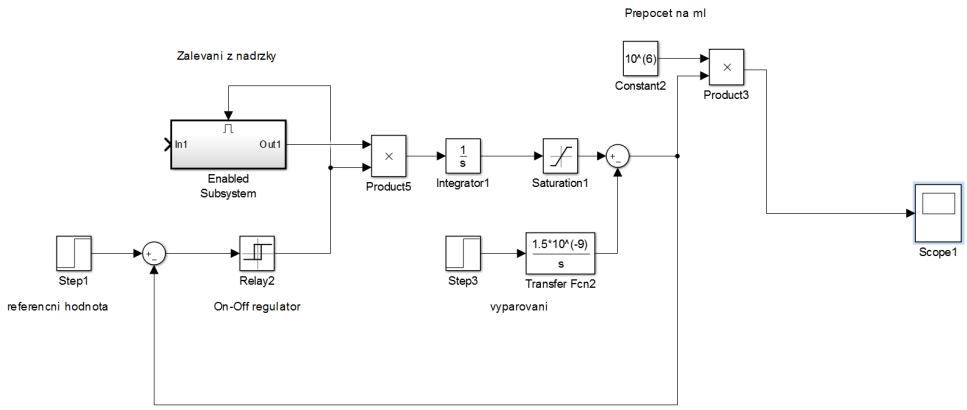
Kapitola 5

Simulace a návrh regulátoru

Simulace procesu zavlažování, která začíná přítokem vody do misky květináče a končí absorpcí a vypařováním vody rostlinou, slouží k ověření obecného popisu procesu pomocí matematického modelu. Regulátor v tomto projektu není realizován na základě matematického modelu (tzv. model-based design), ale je navrhovaný na základě experimentů na konkrétní rostlině.
Při návrhu regulátoru v simulacích bylo počítáno s přibližnými hodnotami, popsanými převážně v kap.4. Regulátor je zvolen nejjednoduššího typu, tzv. On-Off[1] (řízení pomocí relé). Tento regulátor má pouze 2 výstupní hodnoty, a to stavy zapnuto a vypnuto. Dle výstupu regulátoru a potřeby rostliny je poté spuštěný elmag. ventil. Zároveň je realizace tohoto regulátoru pro projekt přijatelná, není nutné umístit speciální moduly navíc pro přepočítání hodnot. Vzhledem k pomalým změnám v květináči (absorpce a vypařování vody je přibližně 150 ml/den, v závislosti na velikosti rostliny) není třeba často sledovat veličiny a provádět jemné akční zásahy.

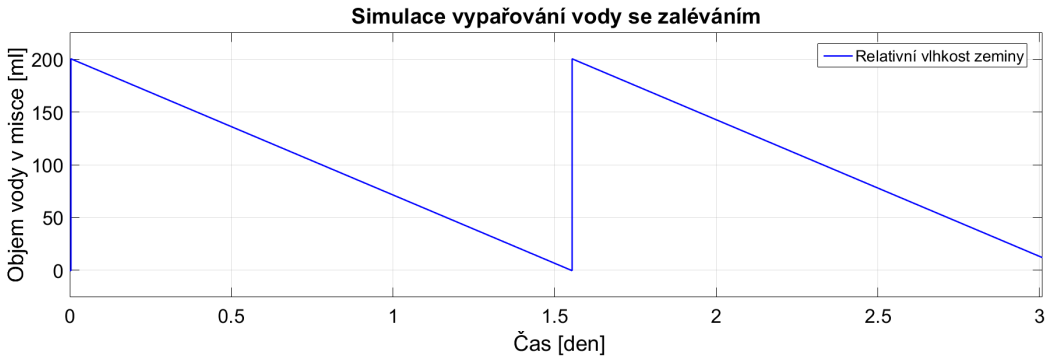
5.1 Simulace matematických modelů

Za použití senzorů se měří pouze teplota, relativní vlhkost, vlhkost zeminy a množství vody v nádržce. Nejdůležitějším senzorem je senzor vlhkosti zeminy, který na základě množství vody v zemině (vodivost zeminy) stanoví relativní vlhkost zeminy. Se zjednodušením se dá konstatovat, že je relativní vlhkost zeminy z velké části závislá na objemu vody v misce, druhu zeminy v květináči a objemu zeminy v květináči. Pro různé rostliny bývají použity různé typy zeminy různých objemů. Proto je velmi obtížné získat obecný vztah platný pro simulaci relativní vlhkosti zeminy. Při simulaci je z praktických důvodů sledován objem vody v misce květináče.



Obrázek 5.1: Blokové schéma simulace

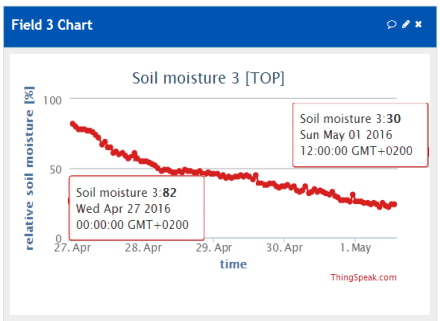
Zalévání z nádržky je ze vztahu (4.5) umístěno v podsystému, který je aktivován pouze tehdy, je-li zapnuto relé. V ostatním případě probíhá pouze konstantní úbytek vody způsobený absorpcí a vypařováním z rostliny. Výsledek simulace je pro přehlednost převeden na jednotky ml/den. Vzhledem k širokému časovému rozpětí simulace (cca 3 dny), není vidět proces zalévání, který je krátký, a proto je na grafu simulace zobrazen jako strmá hrana. Jako referenční hodnota je zvolena hladina 200 ml, která stačí uvažované rostlině pro přibližně 1.5 dne.



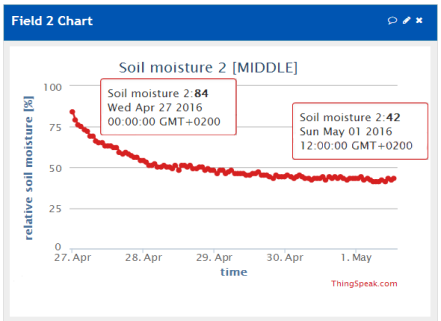
Obrázek 5.2: Simulace vypařování vody z květiny se zaléváním

5.2 Experimentální část

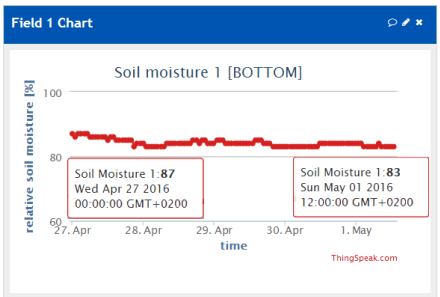
Prvním provedeným experimentem bylo sledování, zda-li má vliv hloubka ponoření senzoru v květináči na naměřených hodnotách. Toto měření bylo provedeno po zalévání květiny klasickým způsobem, shora. Druhé měření bylo provedeno pro zalévání zespoda.



(a) : Senzor těsně pod povrchem květináče



(b) : Senzor uprostřed květináče



(c) : Senzor na dně květináče

Obrázek 5.3: Měření vlhkosti zeminy

Z obr.5.3a a 5.3b je patrný postupný úbytek vlhkosti zeminy, v případě, kdy byl senzor umístěn těsně pod povrchem zeminy, se voda ještě navíc vypařovala z povrchu, a tak byl úbytek rychlejší, než uprostřed květináče.

Naopak na obr.5.3c je vidět, že relativní vlhkost zeminy ve spodní části květináče klesá pouze minimálně, protože voda automaticky klesá dolů vlastní vahou a pod silnou vrstvou zeminy (celý květináč) se voda již nevypaří tak rychle, jako ve vyšších vrstvách. Jediná místa v podstavě květináče, která jsou otevřená, jsou pouze menší otvory pro dýchání zeminy, případně příjem vody z misky, která je umístěna pod květináčem.

Nejdůležitější průběh, tj. uprostřed květináče (obr.5.3b) lze aproximovat systémem prvního řádu bez nuly z odezvy na jednotkový skok. Lze tedy aplikovat $u(t) = 1(t)$, po Laplaceově transformaci $\mathcal{L}^{-1}(u(t)) = \frac{1}{s} = u(s) = \frac{u(\infty)}{s}$. Systém prvního řádu bez nuly je ve tvaru[16]:

$$G(s) = \frac{k}{1+Ts} + o, \tag{5.1}$$

kde k je zesílení systému, T je časová konstanta a o je offset. Systém má offset $o = 84$, proto je nutné posunout začátek průběhu do nuly a pak offset přičíst. Z grafu 5.3b lze alespoň přibližně odečíst požadované hodnoty: $y(\infty) = -42$. Zesílení má hodnotu:

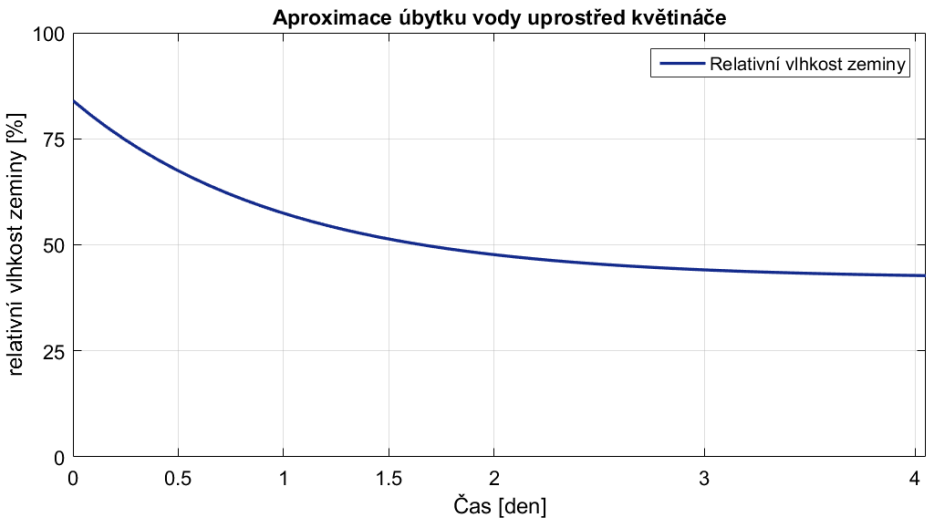
$$k = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{-42}{1} = -42 \tag{5.2}$$

Poté je třeba určit hodnotu $0.63y(\infty)$ a odečíst z grafu časovou konstantu, odpovídající této hodnotě.

$$0.63y(\infty) = -15.54 \tag{5.3}$$

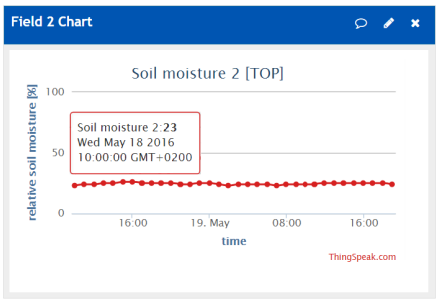
V obr.5.3b je po přičtení offsetu hodnota $y(\infty) \doteq 57.5$, čemuž přibližně odpovídá hodnota $T = 1\ den = 86400\ s$. Výsledný systém 1.řádu má tvar:

$$G(s) = \frac{-42}{1+86400s} + 84 \tag{5.4}$$

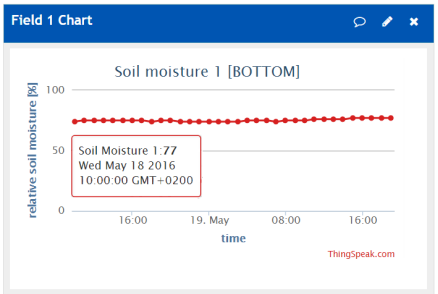


Obrázek 5.4: Aproximace průběhu 5.3b

Druhým experimentem je sledování vlhkosti zeminy po zalití zespoda (z misky pod květináčem). Senzory byly umístěny těsně pod povrch zeminy a na dno květináče. Z naměřených průběhů je zřejmé, že není vhodné umístit senzory do krajních poloh, protože jsou průběhy téměř konstantní, a proto by naměřené údaje nemohly být použity pro řízení procesu zavlažování. Z průběhu 5.3b je zřejmé, že optimální místo pro umístění senzorů pro sledování vlhkosti zeminy je uprostřed hloubky zeminy květináče.



(a) : Senzor těsně pod povrchem květináče



(b) : Senzor ve spodní části květináče

Obrázek 5.5: Vlhkost zeminy při zalévání zespoda

Kapitola 6

Software

Použitý software v tomto projektu tvoří firmware NodeMCU, který zajišťuje chod ESP, a také skripty využívající modul Flask pro Python, který tvoří webovou stránku, zobrazující naměřená data, uložená v SQL databázi. Pro zpracování dat ze senzoru teploty a vlhkosti byla použita volně dostupná knihovna.

6.1 NodeMCU a jazyk Lua

NodeMCU je Open-Source platforma pro internet of things (IoT)[14]. IoT může tvořit každé zařízení, které má přístup na internet, umožňující vzájemně sdílet naměřená data o prostředí. Pomocí IoT s nahranými programy, použitými aktuátory a senzory lze vytvořit tzv. "chytré" věci, např. inteligentní domy nebo dopravní prostředky.
V tomto projektu byla použita verze firmware *nodemcu_20150124.bin* (z 24.1.2015), hlavně proto, že při použití jiných verzí firmware nastávaly problémy při měření teploty a vlhkosti v místnosti.
NodeMCU používá programovací jazyk Lua[19], který je rychlý a jehož programy zabírají málo místa na disku. Lua podporuje datové struktury booleovského typu, čísla (integer i float) a řetězce typu String. Jiné datové struktury, např. pole či seznamy, jsou reprezentovány tabulkou, která je asociativním polem. Lua také podporuje funkce, garbage collector, dynamickou správu paměti a objektové programování.
Programy v jazyce Lua jsou kompilovány do tzv. bytecode (nejsou přímo interpretovány). Bytecode je pak spuštěný na "Lua virtuálním stroji".

6.1.1 Programy pro sběr dat ze senzorů

Pro sběr dat ze senzorů jsou na modulu ESP nahrány 2 programy v jazyce Lua. Prvním programem je převzatá knihovna od Javiera Yáñeze [20] *testdht.lua*. Tento program na začátku vyšle signál do senzoru DHT22 a začne proces komunikace se senzorem. Následně začne DHT22 měřit hodnoty a posílá data na modul ESP. Další část programu zpracovává přijatou bitovou posloupnost a v případě záporné naměřené teploty převede hodnotu na záporné číslo.

Naměřené převedené hodnoty z knihovny využije hlavní program, *init.lua*, ve kterém je pro měření hodnot ze senzorů samostatná funkce pro každé měření. Každá funkce po naměření hodnot tyto hodnoty přepošle na Raspberry Pi do SQL databáze a poté se ESP uvede do deep-sleep módu.
Příklad fragmentu kódu z funkce, měřící teplotu a vlhkost za pomoci již zmíněné knihovny *testdht.lua*:

```
function ReadDHT()
-- import knihovny testdht.lua
    dht=require("testdht")
    dht.read(PIN)
    h=dht.getHumidity()
    t=dht.getTemperature()
    if h==nil then h=0 chck=0 end
    humi=(h/10)
    temp=(t/10)
    print("Humidity:    "..humi.."%")
    print("Temperature: "..temp.." deg C")
-- uvolneni nahrane knihovny
    dht=nil
    package.loaded["testdht"]=nil
-- cast posilani na server
```

V některých funkcích je třeba převádět naměřené hodnoty do procentuální stupnice. V případě měření množství vody v nádržce je počítáno s konkrétní nádržkou (konstantní průřez, prázdná lahev= 0%=24cm). Ultrazvukový senzor vrací hodnoty v cm, a ty jsou přepočítány dle předchozí úvahy.
U senzoru vlhkosti zeminy je výstup číslo mezi 0-1023. Prakticky byla naměřena pro senzor zcela ponořený do vody (vlhkost 100%) hodnota pohybující se okolo 200, a proto je od naměřené hodnoty při přepočtu do procent uvažována tato hodnota (100% = 200 až 0% = 1023).

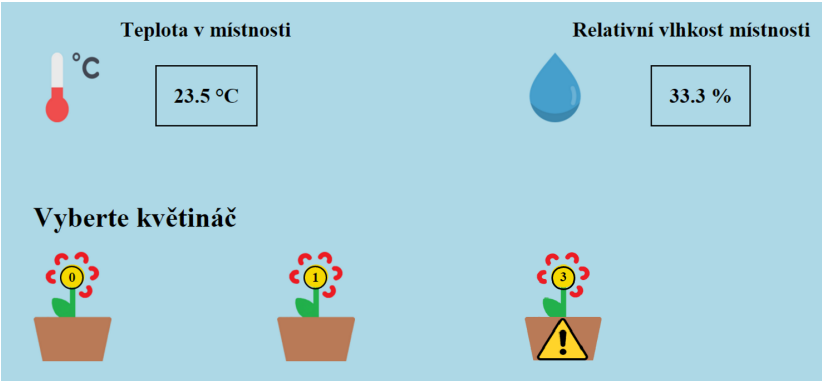
6.2 Webové rozhraní

Webové rozhraní zprostředkovává uživateli naměřené hodnoty ze senzorů tak, aby měl přehled o situaci v případě, že není přítomen v blízkosti květináčů. Na úvodní webové stránce je zobrazena teplota a relativní vlhkost v místnosti, kde jsou květiny umístěny. Dále je na stejné stránce grafický výčet květináčů, u kterých je zapojen Wi-Fi modul ESP a jsou očíslovány. Tyto květináče tvoří tlačítka, která po rozkliknutí přesměrují uživatele na stránku, která je určena konkrétnímu květináči. V případě, že je aktivován ochranný obvod přetečení misky květináče, je ikona květináče opatřena výstražným symbolem.

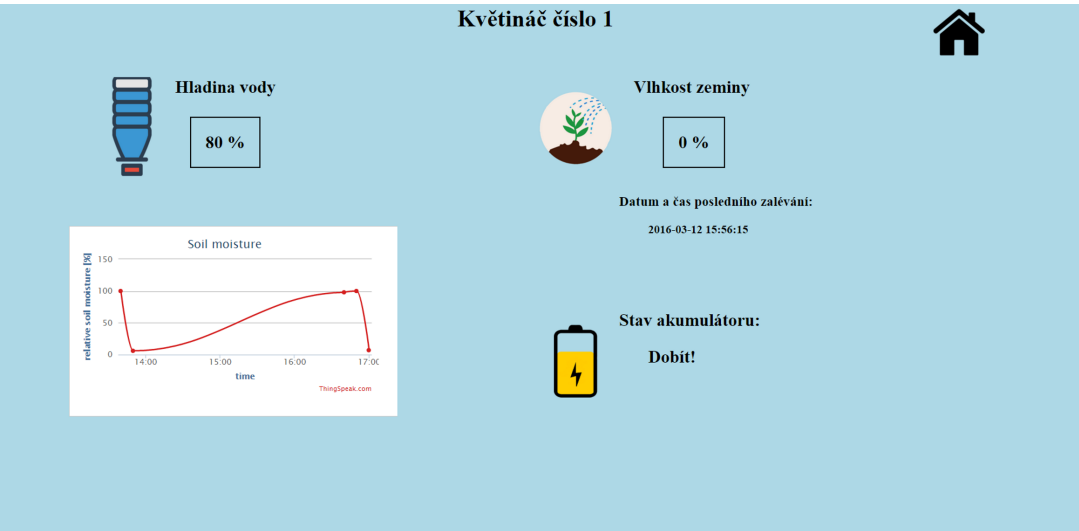
6.2.1 Tvorba webové stránky

Webová stránka je tvořena pomocí modulu Flask[15] pro Python a samotný vzhled stránky je definovaný v HTML souborech.

Flask je malý framework, který je schopen zajistit základní funkce pro běh webové stránky a jeho velká výhoda spočívá v tom, že byl navržený tak, aby byl rozšiřitelný různými doplňky (např. klient pro SQL databáze není ve Flasku předinstalován). To znamená, že si programátor může přizpůsobit Flask přes různá rozšíření tak, aby byly splněny požadavky pro daný projekt. O chod Flasku se starají 2 enginy. Pro spojování, debugování a interface brány webového serveru slouží Werkzeug a pro spojování HTML templatů s funkcí webu je využit Jinja2.
Internetová stránka je složena z několika souborů. Tzv. "templates" tvoří HTML soubory s CSS designem, které určují celkový vzhled stránky. Několik prvků mají ale propojeny se soubory v jazyce Python, jenž zajišťují to, jak má stránka fungovat.



(a) : Úvodní stránka



(b) : Informace o specifickém květináči

Obrázek 6.1: Vzhled webové stránky

Na úvodní stránce se podle dat v databázi zobrazí takový počet květináčů, kolik je modulů ESP, které odesílají data. Symbol květiny v květináči tvoří tlačítko, které přesměruje uživatele na stránku s daty pro konkrétní květináč.

Uvnitř květiny je označeno číslo květináče. Kromě květináčů jsou na úvodní stránce aktuální hodnoty teploty a relativní vlhkosti v místnosti, kde jsou květiny pěstovány.
Stránku s informacemi o květináči tvoří ostatní naměřené hodnoty. Je zde procentuelně zobrazen stav vody v nádržce, ale také graficky, každých 20% objemu vody reprezentuje jeden dílek v obrázku obrácené lahve. Další ikona, která mění svůj vzhled v závislosti na datech, je ikona stavu akumulátoru. V případě, že není nutné dobít akumulátor, je baterie plná a výplň je zelená. Stav, kdy je nutné dobít aku ukazuje obr.6.1b.
Dalším prvkem na stránce je HTML iframe graf, zobrazující průběh vlhkosti zeminy v květináči, který je importován ze stránky Thingspeak.com[18]. Poslední ikona značí aktuální relativní vlhkost zeminy. Pod touto hodnotou je zobrazeno datum, kdy byly květiny naposledy zalévány. Z této stránky se lze vrátit na úvodní stránku pomocí kliku na tlačítko domu v pravém horním rohu.

6.2.2 SQL databáze

Pro uchovávání naměřených dat slouží SQL databáze. Pro přehlednost byla data rozdělena na část u květináče (databáze *kvetinac*) a data o teplotě vzduchu a relativní vlhkosti (databáze temphumi).

datum_a_cas	cisloKvetinace	water_level	akumulator	soilMoist	preteceni	zalevano
2016-05-19 20:55:01	1	66	dobit	55	NE	NE
2016-05-19 20:55:11	2	56	OK	77	ANO	ANO

Obrázek 6.2: Databáze naměřených hodnot u květináče

Na obr.6.2 je zobrazený příklad, jak jsou uchovávány data v databázi *kvetinac*, jsou to signály obvodů u ESP a téměř všechna naměřená data, kromě údajů ze senzoru pro teplotu a vlhkost vzduchu. Tyto data mají samostatnou databázi. V databázi *kvetinac* je celkem 7 sloupců, každý řádek odpovídá jednomu měření. Pro získání aktuálních dat (posledních naměřených) je použit příkaz v Python skriptu komunikujícím s SQL databází:

```
def getKvetinac(cisloKvet):
    sqll= "SELECT * FROM kvetinac WHERE cisloKvetinace=%s
    ORDER BY datum_a_cas DESC LIMIT %d" % (cisloKvet, 1)
    # pokracovani funkce
```

Parametrem této funkce je *cisloKvet*, tedy číslo květináče, ke kterému je třeba získat aktuální data. Ta se pak seřadí v databázi podle data naměření a předají potřebné hodnoty pro zobrazení na webu.

Kapitola 7

Realizace projektu

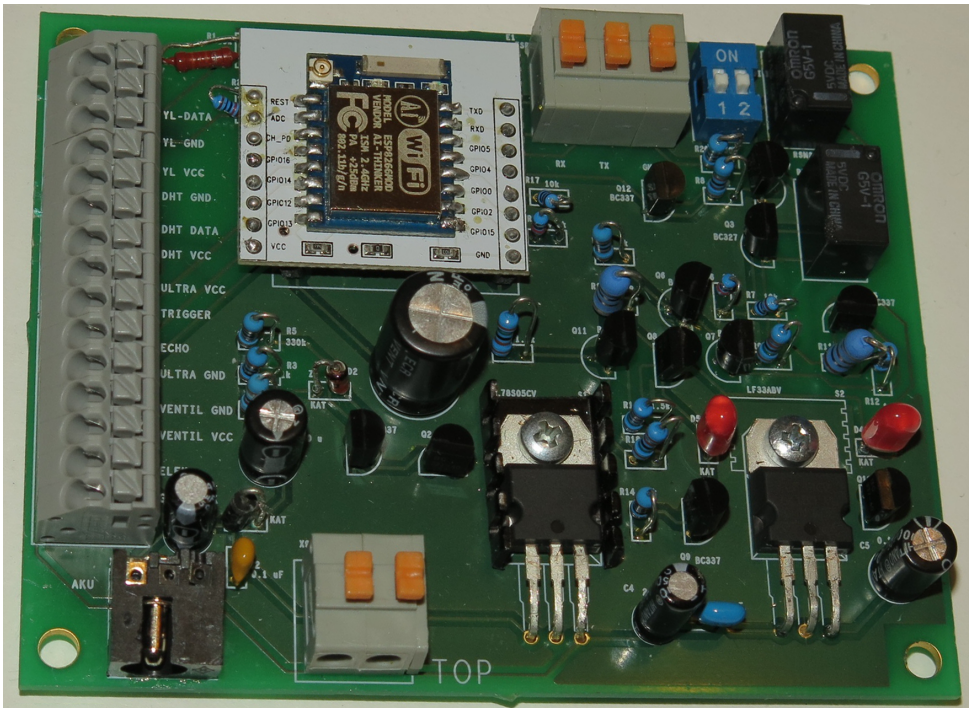
Při realizaci projektu bylo třeba brát v úvahu následující podmínky:

- Bezpečnost při provozu systému
- Nejmenší možné rozměry pro rozmístění přístrojů
- Mobilita a kompaktnost celého systému
- Snadná manipulace a minimální zásah uživatele
- Minimální vliv na vzhled okolí rostliny

Celý systém byl realizován ve 3 identických kusech pro 3 květináče.

7.1 Návrh PCB

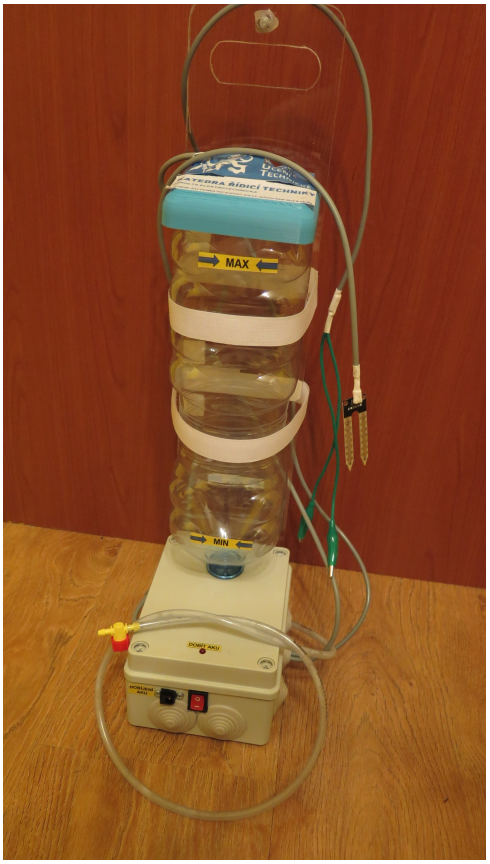
Při návrhu desky plošných spojů (PCB) byl využit program Orcad PCB editor. Vytvořený plošný spoj je dvouvrstvý s rozměry 100x80 mm. Použitý modul ESP není dodáván s paticí/piny. Z tohoto důvodu bylo nutné použít adaptér ve formě malého PCB. Pro snadné připojení externích přístrojů slouží svorkovnice s pružinovými svorkami. Použité součástky na desce nejsou SMD, kvůli rozměru svorkovnic, relé a adaptéru je již vymezena velikost desky, na kterou se vešly i součástky normálních rozměrů.
Napájecí napětí bylo zvoleno bezpečné, $12\,V$ napětí z akumulátoru. Pro dobíjení aku slouží externí konektor s rozpínacím kontaktem, který odpojí napájení PCB v případě nabíjení aku. Podklady použité pro návrh a realizaci PCB jsou v příloze D



Obrázek 7.1: Osazená deska plošného spoje

7.2 Návrh nádržky se stojanem

Jako nádržka vody byla zvolena 2l PET lahev, která je připevněna z boku čirým plexisklem s otvorem pro snadnou manipulaci. Lahev je vertikálně postavena na elektroinstalační krabici (160x120x70 mm) s vysokým krytím a gumovými vývodkami, tvořící základnu stojanu.
Pro větší stabilitu nádržky je použit suchý zip, přichycující nádržku k plexisklu. Krabice slouží také pro uložení akumulátoru, PCB a ventilu. Na krytu krabice je vyvedena červená LED dioda pro lokální signalizaci nutnosti dobíjení aku. Hlavní vypínač celého systému je spolu s napájecím konektorem pro dobíjení umístěn na boku krabice. Víko v horní části nádržky bylo vytvořeno na 3D tiskárně, které zároveň slouží pro umístění ultrazvukového snímače hladiny vody. Pro usnadněnou manipulaci při doplňování vody do nádržky byl navržen malý magnet, sloužící pro uchycení krytu.
Celková hmotnost stojanu s nádržkou bez vody je 1200 g.



Obrázek 7.2: Stojan s nádržkou

7.3 Rozmístění senzorů

Senzor teploty a vlhkosti v místnosti je umístěný pouze u jednoho květináče, a to na boční straně krabice. Senzor vlhkosti zeminy v květináči je doporučeno umístit cca. do poloviny hloubky zeminy v květináči. Pro připojení senzoru slouží 3-žilový kabel v délce, která závisí na vzdálenosti mezi květináčem a stojanem. Ultrazvukový senzor je napevno uložený v krytu nádržky, je připojen 4-žilovým kabelem, připevněným na boku stojanu. Snímač přetečení vody v misce ve formě dvou krokosvorek, bude přichycen k okraji misky ve výšce, určené uživatelem, která je považována za havarijní (optimálně 2 cm pod okraj misky, závisí na okrajích/velikosti misky).
Elektromagnetický ventil je uložen pod hrdlem nádržky a propojen s nádržkou hadicí o průměru 4/7 mm. Z ventilu je vyvedena stejná hadice do misky květináče, doporučuje se zajistit volné připevnění hadice na okraj misky pod květináčem. S ohledem na velikost nádržky a délku provozu bez dobíjení je celý systém navržen pro malé a středně velké květináče.

Kapitola 8

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout a realizovat systém automatického zavlažování pro 3 květináče. Dalším cílem bylo zajištění a provedení dálkového přenosu základních naměřených veličin na webovou stránku, která je přístupná uživateli. Součástí projektu bylo vytvoření matematického modelu pro spotřebu vody rostlinou. Tento model byl využit při simulaci a návrhu regulátoru pro dodané množství vody. Navržený regulátor je nejjednoduššího typu, protože v případě rostlin jsou změny veličin v čase velmi pomalé, a tak není třeba neustále sledovat a provádět akční zásahy.

Při realizaci projektu byly využity takové prvky, které umožňují bezpečný provoz systému a případnou manipulaci, zároveň umožňují realizaci systému s nejmenšími rozměry a náklady. Provedení systému s čirým plexisklem a malou krabicí minimálně narušuje vzhled rostliny a jejího okolí v domácnosti, zároveň použití ventilu místo čerpadla zajišťuje tichý provoz systému. Celý systém je přenosný v kompaktním provedení. Dalším přínosem systému je dálkový přenos naměřených veličin týkající se květináče a jeho okolí, tedy teplota a vlhkost vzduchu, vlhkost zeminy, stav vody v nádržce, upozornění v případě nutnosti dobít akumulátor a také pro případ selhání systému a nekontrolovaného sepnutí ventilu. Tyto informace jsou dostupné uživateli na internetové stránce.

Pro případné rozšíření projektu by bylo přínosem například vytvoření mobilní aplikace, která by ještě zvýšila komfort. Při použití tohoto systému pro větší květináče nebo pro delší dobu provozu bez nutnosti dobíjení je vhodné použít akumulátor s větší kapacitou. Jako další rozšíření pro zkvalitnění řízení procesu zavlažování lze využít hodnoty očekávaných teplot a vlhkosti z aktuální předpovědi počasí. Tyto hodnoty mohou např. v případě velkých výkyvů teplot výrazně ovlivnit rychlost spotřeby vody rostlinou. V závislosti na těchto veličinách by poté mohl být modifikován objem dodané vody při zalévání.

Příloha A

Literatura

[1] Gene F. Franklin, J. D. Powell, and Abbas Emami-Naeini, *Feedback control of dynamic systems*, 5th ed., Prentice Hall, 2006.

[2] Forbes T. Brown, *Engineering system dynamics: A unified graph-centered approach*, 2. ed., CRC Press, 2006.

[3] T. Syrovátka, *Pěstován květin, orchidejí, zeleniny a hub v samozavlažovacích truhlících*, Grada, 2012.

[4] H.F. Aghajani, A. Soroush, and P.T. Shourijeh, *An improved solution to capillary rise of water in soils*, International Journal of Civil Engineering **9** (2011), no. 4.

[5] L.S. Pereira D. Raes Allen, R.G. and M. Smith, *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage paper **56** (1998).

[6] V. Avsarkisov, M. Oberlack, and S. Hoyas, *New scaling laws for turbulent Poiseuille flow with wall transpiration*, Journal of Fluid Mechanics **746** (2014).

[7] Jacob Bear, *Dynamics of fluids in porous media*, American Elsevier, 1972.

[8] V. A. Kholodov, N. V. Yaroslavtseva, M. A. Yashin, A. S. Frid, V. I. Lazarev, Z. N. Tyugai, and E. Y. Milanovskiy, *Contact angles of wetting and water stability of soil structure*, Eurasian Soil Science **48** (2015), no. 6, 600–607.

[9] T.R. Oke, *Boundary layer climates*, Routledge, 1987.

[10] Tracey Saxby, *http://ian.umces.edu/normal-ian-symbol-flower-pot.png*.

[11] François Tardieu, Thierry Simonneau, and Boris Parent, *Modelling the coordination of the controls of stomatal aperture, transpiration, leaf growth, and abscisic acid: update and extension of the tardieu-davies model*, Journal of experimental botany **66** (2015), no. 8, p. 2227–2237.

[12] O. Tetens, *Über einige meteorologische Begriffe*, z. Geophys. **6** (1930), s. 297–309.

[13] A. S. Thom and H. R. Oliver, *On Penman's equation for estimating regional evaporation*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society **103** (1977), p. 345–357.

[14] A. McEwen and H. Cassimally, *Designing the Internet of Things*, 1 ed., John Wiley, Sons Inc, Books 24x7 Inc, 2013,2014.

[15] Miguel Grinberg, *Flask web development*, first ed., O'Reilly, 2014.

[16] M.Šebek, *Automatické řízení - přednáška o identifikaci systémů*, http://www.polyx.com/ari/slajdy/Pr-ARI-05-Identification.pdf.

[17] *Automaticky zavlažovaný květináč*, http://www.parrot.com/usa/products/parrot-pot/.

[18] *Grafy naměřených hodnot*, http://www.thingspeak.com.

[19] *Informace o jazyku Lua*, https://cs.wikipedia.org/wiki/Lua.

[20] *Knihovna pro měření teploty a vlhkosti senzorem DHT22*, https://github.com/javieryanez/nodemcu-modules/blob/master/dht22/dht22.lua.

[21] *Modul se senzory ke květináči*, http://www.parrot.com/usa/products/flower-power/.

[22] *Open-source stránka s různými projekty*, https://hackaday.io/.

[23] *Open-source stránka s různými projekty*, http://www.instructables.com/.

[24] *Elektrické obvody*, http://www.elektron.chytrak.cz/?page=hlidac-napeti.

[25] *Fórum pro modul ESP8266*, http://www.esp8266.com/.

[26] *Zapojení logických obvodů ttl*, http://www.electrical4u.com/transistor-transistor-logic-or-ttl/.

Příloha B

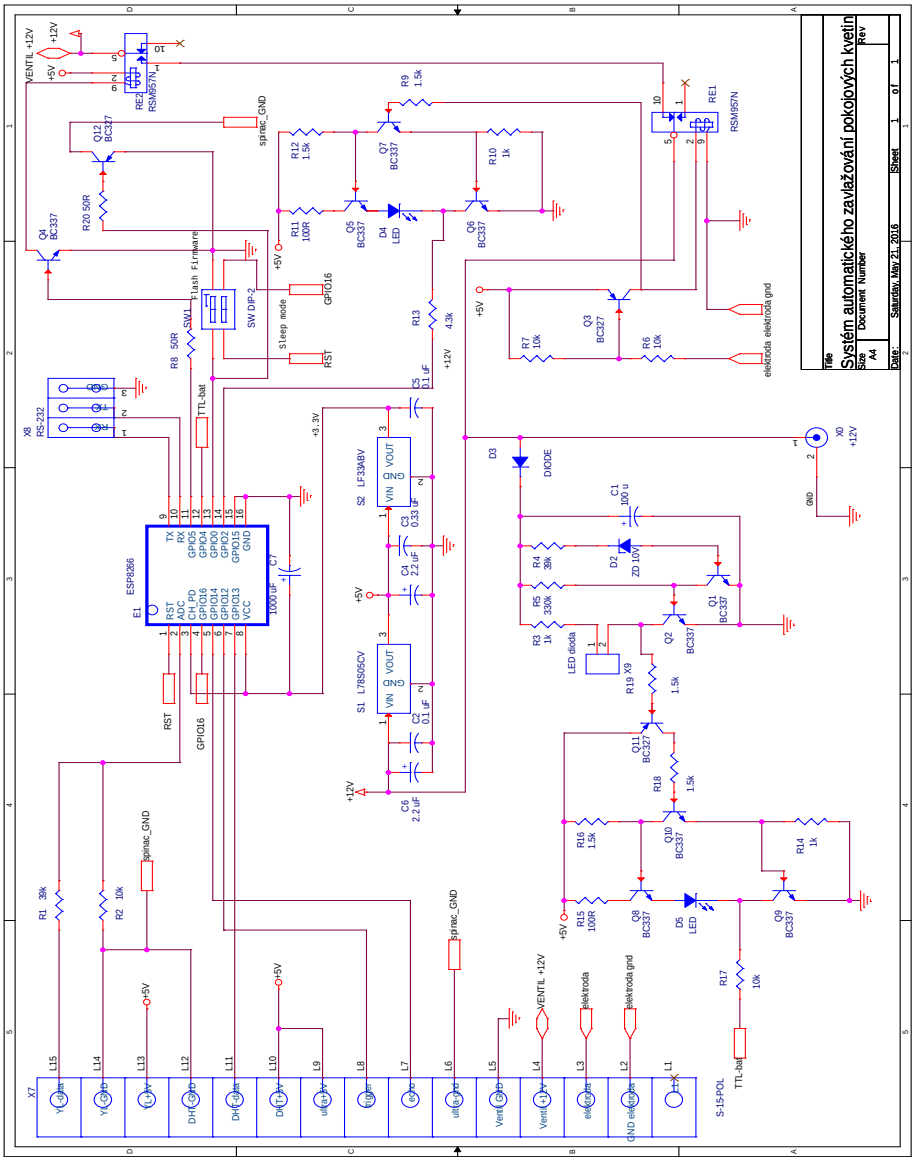
Seznam použitých zkratek

Zkratka	Celý název	Význam
ASZ	Automatický systém zavlažování	
DIY	Do it yourself	Vlastnoručně vyrobený
RH	Relative humidity	Relativní vlhkost vzduchu
VPD	Vapour pressure deficit	Rozdíl mezi tlakem nasycené vodní páry a naměřeným tlakem
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová sběrnice
RPi	Raspberry Pi	
SD	Secure Digital	Paměťová karta
HDMI	Konektor nekomprimovaného obrazového a zvukového signálu v digitálním formátu	High-Definition Multimedia Interface
I/O	Input/Output	Vstupně/výstupní
SSH	Secure Shell	Zabezpečený komunikační protokol
Wi-Fi	Wireless Fidelity	Bezdrátová komunikace v počítačových sítích
GPIO	General-purpose input/output	Multifunkční pin
aku	akumulátor	
elmag.	elektromagnetický	
VCC	Voltage constant current	Kladný pól napájecího napětí
GND	Ground	Zem napájecího napětí
NC	No Connect	Nezapojený pin
NO	Normally open	Spínací kontakt relé
AD	Analogově-digitální	
DC	Direct Current	Stejnosměrný proud

Zkratka	Celý název	Význam
LED	Light emitting diode	Dioda vyzařující světlo
TTL	Transistor Transistor Logic	Tranzistorová logika
IoT	Internet of Things	
HTML	HyperText Markup Language	Jazyk používaný pro tvorbu webových stránek
CSS	Cascading Style Sheets	Jazyk pro zobrazování na webových stránkách
SQL	Structured Query Language	Jazyk pro práci s databázemi
PCB	Printed Circuit Board	Deska plošných spojů
SKD	Surface mount device	Součástka určená pro povrchovou montáž

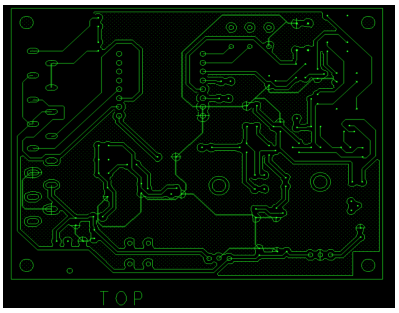
Příloha C

Elektrické schéma obvodu

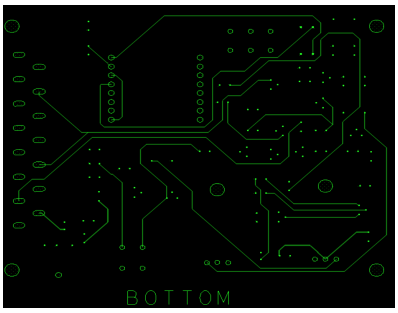


Příloha D

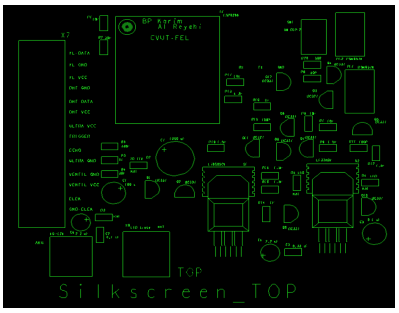
Podklady pro PCB



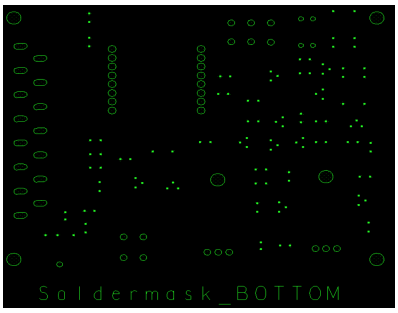
(a) : Strana spojů Top



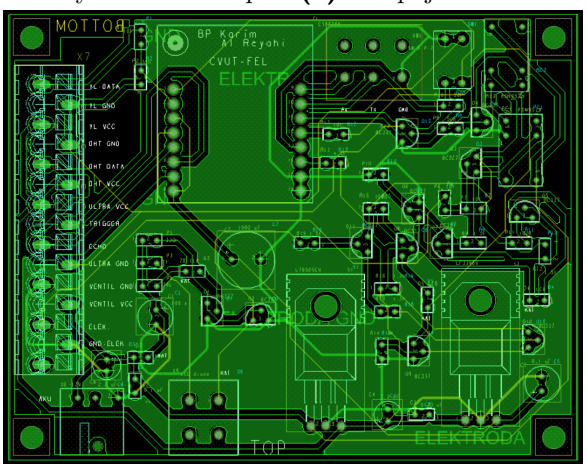
(b) : Strana spojů Bottom



(c) : Potisk desky na straně Top



(d) : Nepájivá maska strany Bottom



(e) : Celkový náhled desky

Příloha E

Obsah přiloženého CD

BAP.pdf	**Elektronická verze bakalářské práce**
ESP	**Firmware ESP a Lua programy**
firmware	Firmware ESP8266
nodemcu_20150124.bin	
Lua	Programy v jazyce Lua
init.lua	
testdht.lua	
web	**Webová stránka**
app	Programy v jazyce Python a html
data.py	
data.pyc	
head.py	
head.pyc	
__init__.py	
__init__.pyc	
mereni.py	
mereni.pyc	
static	Použité ikony na stránce
templates	Vzhled stránky
run.py	Spouštěcí program webového serveru
PCB	**Podklady pro výrobu plošného spoje**
PROJEKT.brd	Navržená deska
schema	
projekt.opj	Elektrické schéma
artworks	Podklady pro výrobu PCB
TOP.art	
BOT.art	
Soldermask_BOTTOM.art	
Silkscreen_TOP.art	
NCDRILL.drl	
MATLAB	**Soubory pro MATLAB a simulink**
img	**Použité obrázky v BAP.pdf**
3D	**Soubory pro 3D tisk**