

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor: 7. Zemědělství, potravinářství, lesní a vodní hospodářství

Automatický skleník

Petr Štourač

Brno 2020

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

AUTOMATICKÝ SKLENÍK

AUTOMATIC GREENHOUSE

AUTOR Petr Štourač

ŠKOLA Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská, příspěvková organizace

KRAJ Jihomoravský

ŠKOLITEL Mgr. Miroslav Burda

OBOR 7. Zemědělství, potravinářství, lesní a vodní hospodářství

Brno 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma *Automatický skleník* jsem vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Miroslava Burdy a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném změně.

V Brně dne: _____

Petr Štourač

Poděkování

Děkuji svému školiteli Mgr. Miroslavu Burdovi za obětavou pomoc, podnětné připomínky a hlavně nekonečnou trpělivost, kterou mi během práce poskytoval. Dále děkuji Kateřině Jelínkové za kontrolu gramatické správnosti a Mgr. Jaroslavu Smékalovi za korekce anglických textů.

Tato práce byla provedena za finanční podpory Jihomoravského kraje.



Anotace

Zahradničení je dnes naprosto běžnou zájmovou činností. Mnoho lidí mající takovou zálibu je ovšem velmi časově vytížených. Kromě práce se musí starat mnohdy i o rodinu a na péči o rostliny jim často jednoduše nezbývá čas. Jedním z těchto lidí je i můj táta, který mě inspiroval k vytvoření PROTOPlantu - systému pro snadnou a levnou automatizaci skleníku.

Cílem práce je vytvořit univerzální a dostupný systém pro automatizaci skleníku, který by usnadnil péči o rostliny časově vytíženým lidem.

Klíčová slova

automatizace skleníku, ESP32, PROTOPlant, automatizace, open-source hardware, open-source software

Annotation

Gardening is a very common hobby today. However, many people who like this activity doesn't have enough time for it. Beside work, they have to take care of their families and after this, they don't have any time to take care of plants. My dad is this kind of man. And that inspired me to create PROTOPlant - system for easy and cheap greenhouse automation.

Keywords

greenhouse automation, ESP32, PROTOPlant, automation, open-source hardware, open-source software

Obsah

Úvod	9
1 Motivace	11
2 Konkurence	12
2.1 Průmyslová řešení	12
2.2 „Kutilská“ řešení	13
2.3 Srovnání s PROTOPlantem	13
3 Funkce PROTOPlantu, aneb „Co to všechno umí?“	15
3.1 Funkce řídící jednotky	16
3.2 Funkce dalších modulů	16
4 Jednotlivé moduly PROTOPlantu	18
4.1 Řídící jednotka (PPCU)	18
4.2 Přídavné moduly PROTOPlantu	18
4.2.1 Komunikační a napájecí modul - CIPM	20
4.2.2 Modul měření vlhkosti půdy - SHSM	20
4.2.3 Modul rozšíření senzoriky - SEM	20
4.2.4 Modul řízení čerpadel - PCM	21
4.2.5 Modul vzdáleného ovládání - RCM	21
4.2.6 Uložení řídící elektroniky	21
5 Vývoj	23
5.1 PROTOPlant 1.0 až 4.0 (tzv. legacy verze)	23

5.1.1	Verze 1.0	23
5.1.2	Verze 2.0	24
5.1.3	Verze 3.0 a další	24
5.2	PROTOPlant verze 5.0	25
6	Dlouhodobé testování	26
6.1	Testování napájení solární energií	26
6.2	Průběh testů	27
6.3	Výsledky testů	27
7	Úspora energií dosažená s pomocí PROTOPlantu	28
8	Dostupnost a distribuce PROTOPlantu	29
8.1	Případové studie	30
8.1.1	Malý skleník s užitkovými rostlinami	30
8.1.2	Středně velký skleník s okrasnými rostlinami	30
Závěr		33
Přílohy		34
A Elektronika a tištěné spoje		34
A.1	PPMB32 – Základní deska	34
A.2	PPSB - Desky se senzory teploty a vlhkosti	37
A.3	Senzorika	38
A.3.1	DS18B20	38
A.3.2	DHT22	38
B Software základní desky		40
B.1	Sdílené knihovny	40
B.2	Datové sběrnice	41
B.3	Komunikace mezi řídící jednotkou a jednotlivými moduly	43
B.4	Bezdrátová komunikace	43
B.5	Kabelová komunikace a RS-485	43

C Software dalších modulů	44
D Zvláštní stavy	45
E Obrazové přílohy	46
Literatura	51
Seznam obrázků	52
Seznam tabulek	53

Úvod

Zahradničení je dnes naprosto běžnou zájmovou činností. Mnoho lidí majících takovou zálibu je ovšem velmi časově vytížených. Kromě práce se musí starat mnohdy i o rodinu a na péči o rostliny jim často jednoduše nezbývá čas. Jedním z těchto lidí je i můj táta, který mě inspiroval k vytvoření PROTO-Plantu - systému pro snadnou a levnou automatizaci skleníku.

Cílem této práce je vytvořit univerzální a dostupný systém pro automatizaci skleníku, který by usnadnil péči o rostliny časově vytíženým lidem.

Systémy pro takovouto automatizaci dnes existují, jsou ovšem určené primárně pro velkozemědělství, nikoli pro člověka, který ve skleníku pěstuje několik druhů zeleniny pro sebe proto, aby ji nemusel kupovat v obchodě, nebo který vlastní menší skleník s okrasnými rostlinami.

Samozřejmě, na internetu existuje spousta návodů, jak si nějaký takový „systém“ vyrobit za pomoci Arduina, nepájivého pole a páru drátků. Takové řešení se mi ovšem nezdá příliš univerzální a pracující lidé nemají mnohdy čas si takto hrát. Zároveň pro sestavení něčeho takovového potřebují mít určité znalosti v elektrotechnice.

Kromě toho jsem chtěl, aby bylo možno systém v budoucnu připojit k internetu a sledovat jej tak například z dovolené, případně měnit nastavení.

Při vytváření práce jsem si dal za cíl, aby byl systém:

- kompletně open-source
- levný
- modulární

- snadný na ovládání

- univerzální

Dalším z cílů tohoto projektu je úspora energií (elektřina, voda), které lze díky automatizaci dosáhnout. V průběhu práce jsem systém nazval **PROTOPlant**.

Kapitola 1

Motivace

K nápadu vytvořit PROTOPlant mě dovedl můj otec, který má zálibu v pěstování orchidejí. Má na ně i velký skleník, na který ovšem z pracovních důvodů nemá příliš času. Napadlo mne tedy, že je jistě mnoho dalších lidí, kteří jsou na tom s časem velmi podobně, jako můj otec.

Nejdříve jsem přemýšlel pouze nad regulací teploty otevíráním oken. Později přibylo i zavlažování a nakonec jsem se rozhodl, že z tohoto nápadu udělám komplexní systém i s připojením k internetu.

V minulém roce jsem na systému začal pracovat intenzivně a účastnil se s ním i loňského ročníku SOČ. To mě motivovalo na něm dále pracovat a rozvíjet jej.

Kapitola 2

Konkurence

Potenciální konkurenci PROTOPlantu jsem rozdělil do dvou kategorií:

- průmyslová řešení
- podomácku vytvořená „kutilská“ řešení

2.1 Průmyslová řešení

Systémy spadající do této kategorie vyznačují se především tím, že jsou:

- určena primárně pro velkozemědělství
- drahá
- vyráběna na zakázku (nejsou tedy příliš univerzální)
- nedostupná pro běžné zákazníky

Tato řešení jsou většinou řízena pomocí PLC, tedy průmyslových kontrolérů, která jsou povětšinou velmi drahá a náročná na programování. Dodávají je společnosti, které se touto problematikou přímo zabývají a systémy dodávají na zakázku velkým podnikům.

2.2 „Kutilská“ řešení

Jsou vytvořena lidmi, kteří elektrotechnice rozumí a mají čas na to si s elektronikou takto hrát. Taková řešení většinou jsou:

- neuniverzální, lidé si je vytváří přímo pro sebe
- časově nákladná na výrobu
- nevhodná pro osoby, které nemají zkušenosti v elektrotechnice

2.3 Srovnání s PROTOPlantem

Pro srovnání PROTOPlantu a těchto dvou kategorií jsem sestavil tabulku 2.1.

	Průmyslová řešení	„Kutilská“ řešení	PROTOPlant
Dodání	Výroba na zakázku	„Vyrob si sám“	Možnost sestavení přímo doma, nebo dodání hotového systému
Cena	Drahá (> 10 000 Kč)	Levná (< 10 000 Kč)	Kompromis cena - výkon (již od 2 500 Kč)
Ovládání	Komplexní	Jednoduché (většinou)	Jednoduché
Konektivita	Většinou ethernet	Často Wi-Fi	Wi-Fi, Bluetooth, možnost přidání podpory Ethernetu
Řízení	PLC	Většinou Arduino	ESP32
Modularita	Ano	Ne	Ano
Univerzálnost	Ano	Ne	Ano
Open-source	Ne	Většinou ano	Ano

Tabulka 2.1: Tabulka srovnání PROTOPlantu a jiných řešení.

Dodání – udává způsoby, jak si lidé mohou dané řešení opatřit. Průmyslová, ani „kutilská“ řešení nejsou k dostání jako již hotový produkt, zatímco PROTOPlant **ano**.

Cena – srovnání cen jednotlivých řešení. Průmyslová řešení jsou komplexní, ovšem velmi drahá. „Kutilská“ jsou pravým opakem, ovšem nemají tolik funkcí, jako PROTOPlant, nebo řešení průmyslová. PROTOPlant má vše,

co běžný majitel skleníku potřebuje, za rozumnou cenu.

Ovládání – složitost/jednoduchost ovládání daného systému. PROTOPlant je navržen tak, aby jeho ovládání zvládnul každý. Naopak průmyslová řešení mnohdy vyžadují proškolení personálu. Řešení „kutilská“ dokáže mnohdy ovládat pouze člověk, který si dané řešení navrhnu.

Konektivita – zda systém disponuje možností propojení s okolním světem. Průmyslovým standardem je dnes ethernet, tudíž většina průmyslových řešení je vybavena právě jím. PROTOPlant nativně podporuje Wi-Fi a Bluetooth a je možno jej rozšířit o podporu Ethernetu. „Kutilská“ řešení jsou většinou vybavena Wi-Fi.

Řízení – řídící jednotka daného řešení. PLC jsou velmi drahá a jejich programování vyžaduje školení. Arduino je levné, ovšem jeho funkce jsou velmi omezené. ESP32 je výkonný procesor za rozumnou cenu, který nativně podporuje Wi-Fi a Bluetooth.

Kapitola 3

Funkce PROTOPlantu, aneb „Co to všechno umí?“

V této kapitole se pokusím rozebrat funkce řídící jednotky a dalších přídavných modulů. Jednotlivé funkce jsou přehledně vyobrazeny na schématu E.3. Mezi nejdůležitější funkce PROTOPlantu patří:

- možnost řízení ventilace pomocí otevírání oken, nebo ventilátorů
- řízení zavlažování
- měření teploty a vlhkosti vzduchu
- měření vlhkosti půdy
- možnost vytápění
- podpora Wi-Fi - možnost sledování stavu skleníku přes internet, nebo pomocí mobilní aplikace (funkce zatím ve vývoji)
- možnost přidání funkce řízení osvětlení

3.1 Funkce řídící jednotky

Řídící jednotka, neboli PPCU je zároveň i základním modulem celého systému. Sama o sobě je schopna vykonávat spoustu funkcí. Její schopnosti se pak dají ještě více rozšířit dalšími moduly. Mezi nejdůležitější funkce patří:

- dva víceúčelové výstupy pro připojení např. čerpadel, aktuátorů ovládajících okna, ventilátorů a jiných spotřebičů
- možnost připojení až 30-ti senzorů pro měření teploty (viz kapitola A.3.1)
- 6 volných víceúčelových pinů pro připojení jakýchkoliv dalších periferií (senzory půdní vlhkosti, řízení osvětlení atp.)
- možnost připojení k internetu
- LCD displej pro zobrazování naměřených hodnot

3.2 Funkce dalších modulů

Jak jsem již zmínil, s pomocí přídavných modulů se dají funkce PPCU ještě více rozšířit. Nutno ovšem poznamenat, že některé moduly jsou stále ve vývoji, jiné zatím ve stádiu konceptu.

Modul RCM (viz Kapitola 4.2.5) přidává možnost PROTOPlant vzdáleně ovládat a měnit nastavení z pohodlí domova. Díky tomu není potřeba pro změnu nastavení systému opouštět obývací pokoj a chodit do skleníku.

Modul PCM (viz Kapitola 4.2.4) je určen pro přidání dalších výstupů pro připojení čerpadel. Díky tomu je možno zavlažovat každou část skleníku nezávisle na sobě použitím samostatných čerpadel. Zároveň je díky němu možno kontrolovat hladinu vody v nádrži (pokud tedy skleník nějakou má).

Modul SEM (viz Kapitola 4.2.3) slouží k připojení dalších senzorů, respektive rozšíření pokrytí senzorikou ve větších sklenících. V menších sklenících je PPCU schopna svojí senzorikou dostatečně pokrýt celý prostor.

Modul SHSM (viz Kapitola 4.2.2) přidává možnost připojení senzorů pro měření vlhkosti půdy na několika místech současně.

Kapitola 4

Jednotlivé moduly PROTOPlantu

PROTOPlant je modulární systém - není tedy jedním velkým celkem se všemi funkcemi přímo zaintegrovanými. V této kapitole se zaměřím na podrobný popis jednotlivých modulů.

4.1 Řídící jednotka (PPCU)

PPCU, neboli řídící jednotka je hlavním modulem celého systému. Samotné PPCU tvoří elektroinstalační box s krytím IP65. Na přední části se nachází ovládací panel s LCD displejem a ovládacími tlačítky. Z bočních stran jsou instalovány vodotěsné průchody pro provlečení kabelů.

Uvnitř se nachází základní deska (viz Kapitola A.1) a zdroj napájení.

4.2 Přídavné moduly PROTOPlantu

Kromě samotné řídící elektroniky je možno PROTOPlant rozšířit i o přídavné moduly. Na vývoji těchto modulů se zatím stále pracuje. Těchto modulů existuje hned několik:

- Komunikační a napájecí modul (CIPM - Communication Interface and

Power Module – modul potřebný pro drátové připojení ostatních modulů, viz Kapitola 4.2.1)

- Napájecí rozdělovač (PSpl - Power Splitter)
- Modul určený pro měření půdní vlhkosti (SHSM - Soil Humidity Sensorics Module – modul vybavený senzory pro měření vlhkosti půdy, viz Kapitola 4.2.2)
- Modul rozšíření pokrytí senzorikou (SEM - Sensorics Expansion Module – modul pro zvýšení počtu senzorů připojených k PROTOPlantu, viz Kapitola 4.2.3)
- Modul ovládání čerpadel (PCM - Pump Control Module – modul pro sledování hladiny vody v nádrži a ovládání čerpadla, viz Kapitola 4.2.4)
- Modul vzdáleného ovládání (RCM - Remote Control Module – modul pro připojení vzdáleného ovládacího panelu, viz Kapitola 4.2.5)

Zjednodušené schéma zapojení a funkce jednotlivých modulů naleznete na Obrázek E.3.

Napájení přídavných modulů je prováděno ve čtyřech režimech.

- napájení přímo z řídící jednotky
- napájení z externího zdroje přes CIPM
- napájení přes PSpl
- napájení každého modulu odděleně

Napájení přímo z řídící jednotky je možno použít pouze tehdy, když je připojen maximálně jeden modul a to z důvodu, aby bylo zabráněno podpětí celého systému. Modul je takto připojen přímo k napájecímu okruhu A řídící jednotky (viz Kapitola A.1).

Použití externího zdroje připojeného k CIPM je použitelné v případě, kdy uživatel upřednostňuje kabelovou komunikaci mezi moduly a řídící jednotkou. Při napájení v tomto režimu je počet připojitelných modulů omezen pouze výkonem zdroje napájení připojeného k CIPM. Na vstupní napájecí svorkovnici je připojen externí zdroj. Kromě dvou kabelů pro komunikaci jsou na výstupu připojeny i napájecí kably od jednotlivých modulů.

Napájení přes PSpl funguje na velmi podobném principu, jako předchozí varianta. K PSpl je na vstupní svorkovnici připojen externí zdroj napájení. Na výstupních svorkovnicích jsou připojeny napájecí kably jednotlivých modulů. Tato metoda je určena primárně pro bezdrátovou komunikaci mezi řídící jednotkou a moduly.

Napájení každého modulu odděleně je nejjednodušší metoda napájení. Každý z modulů je připojen vlastním kabelem přímo k napájecímu zdroji. Primárně je určena pro bezdrátovou komunikaci mezi jednotlivými moduly.

4.2.1 Komunikační a napájecí modul - CIPM

Tento modul funguje jako propojovací uzel mezi řídící jednotkou a vsemi přídavnými moduly. Dále slouží pro připojení externího napájení pro jednotlivé další moduly (viz Kapitola 4.2).

4.2.2 Modul měření vlhkosti půdy - SHSM

Modul určený pro připojení senzorů měřících vlhkost půdy. Tento modul je zatím stále ve stádiu konceptu.

4.2.3 Modul rozšíření senzoriky - SEM

Modul určený pro zvýšení pokrytí prostoru skleníku přidáním dalších environmentálních senzorů. Pro malé, případně středně velké skleníky není tento modul potřebný. Ve velkých sklenících již své uplatnění najde vzhledem k tomu,

že je vybaven vlastní řídící elektronikou a jediným omezením je dosah zvoleného způsobu komunikace s řídící jednotkou.

4.2.4 Modul řízení čerpadel - PCM

Valná většina zahrádkářů má pro svůj skleník i nádrž na vodu. Tento modul je určen pro sledování hladiny vody v ní a případné spínání čerpadla, které má za úkol v nádrži vodu doplňovat.

4.2.5 Modul vzdáleného ovládání - RCM

Byl vytvořen pro zjednodušení nastavení a ovládání PROTOPlantu. Skládá se ze dvou částí. Komunikační části, kterou lze připojit k základní desce PROTOPlantu a ovládacímu panelu. Uživatel ovládacího panelu nainstaluje na zeď přímo v domě a může díky němu vzdáleně ovládat celý PROTOPlant přímo z pohodlí domova.

4.2.6 Uložení řídící elektroniky

Řídící elektronika (základní deska, řadiče, kabeláž atp.) je uložena v průmyslových elektroinstalačních boxech s krytím IP65 (*úplná prachotěsnost a odolnost proti tryskající vodě* [2]). Vyvedení kabelů z těchto boxů je řešeno s pomocí kabelových průchodek se stejnou úrovní krytí.

Upevnění řídící elektroniky do těchto boxů je řešena díly vytisknutými na 3D tiskárně z materiálu PET-G. Ten jsem zvolil pro jeho odolnost a nehygrofilnost.

Konstrukci pro upevnění tvoří zpravidla 2 části:

- montážní deska
- kabelový unašeč

Montážní deska je největší částí celého držáku. Na spodní straně se nachází drážky pro správné umístění do boxu. Z jedné z bočních stran se nachází

drážky pro umístění kartuše se silikagelem. Ze strany směřující do volného prostoru boxu se nacházejí výstupky, které se zasunou do drážek v montážní desce pro zdroj. Na horní straně jsou umístěny otvory pro připevnění základní desky a drážky pro upevnění kabelových unašečů.

Kabelové unašeče jsou částí složenou z více menších dílů. Jejich úkolem je upevnění kabelů do větších svazků pro vyšší přehlednost.

Kapitola 5

Vývoj

Za dobu vývoje PROTOPlant prošel můj systém spoustou velkých změn. Vývoj byl započat začátkem roku 2018. Za tu dobu vyšlo již několik verzí softwaru i hardwaru.

5.1 PROTOPlant 1.0 až 4.0 (tzv. legacy verze)

Původní verze PROTOPlantu byly celkem 4 stabilní a několik vývojových. Tyto 4 stabilní verze jsou ve zkratce popsány níže.

5.1.1 Verze 1.0

Nejstarší funkční verze PROTOPlantu, založená na Arduinu DUE. Jeho software tvořilo jedno, stále se opakující vlákno. Nevýhodou tohoto postupu bylo nepřesné časování některých úkonů způsobeném používáním blokujících operací. Tato verze byla pouze shluk kabelů, přes které byly k Arduinu připojeny jednotlivé moduly senzorů. Byla schopna pouze měřit teplotu a s pomocí relátek ovládat aktuátory, které následně otevíraly, nebo zavíraly okna. Inverze polarity napájení byla řešena použitím třech relé. Dvou, která křížově spínala kladný pól napájení aktuátorů a třetího, který připojoval zemnící vodič. Toto zapojení nebylo zcela ideální, vzhledem k nutnosti použití tří

relé a tedy i velkému úbytku napětí. Použité Arduino bohužel další vývoj nepřežilo.

5.1.2 Verze 2.0

Největší změnou oproti předchozí verzi byl přechod z Arduina na ESP32 devkitC. Software byl kompletně přepsán a blokující funkce odstraněny. Díky tomu běžel software mnohem plynuleji. Co se týče hardwaru, tato verze již používala první prototyp základní desky, který byl osazen na univerzálním tištěném spoji. Zároveň jsem přidal podporu LCD znakového displaye, na který se vypisovaly naměřené hodnoty ze senzorů a různé stavové hlášky. Během vývoje této verze jsem také systém začal nazývat PROTOPlant.

5.1.3 Verze 3.0 a další

Tato verze byla v minulém roce prezentována na okresním kole SOČ. Kromě několika prototypů základní desky, které se při jejím vývoji vystřídaly, došlo i k mnohým změnám ve funkci celého PROTOPlantu. Doposud používaná relé, kterými PROTOPlant spínal aktuátory, bylo nutno nahradit jiným řešením. Důvodem k tomu byl jejich příliš velký úbytek napětí, který způsoboval podpětí celé řídící elektroniky. Hledal jsem tedy způsob, jak vyřešit spínání aktuátorů tak, aby byl napěťový úbytek co nejmenší. Nakonec jsem objevil H-můstky VNH2SP30. Ty umožňují kromě regulace výstupního napětí velmi jednoduše obracet polaritu výstupů. Pro zjednodušení zapojení při testování jsem využíval Monster Moto Shield, na kterém jsou tato VNH osazena hned dvě. Proto mne napadlo využít druhé VNH jako víceúčelový výstup, ke kterému lze připojit čerpadlo, elektromagnetický ventil, případně jiná zařízení. V softwaru přibyla podpora tlačítek a menu zobrazované na LCD displeji, přes které se dalo měnit nastavení systému za chodu. Dále jsem PROTOPlant uzavřel do průmyslového elektroinstalačního boxu s krytím IP67. Do výka boxu jsem nainstaloval LCD displej a ovládací tlačítka.

Verze 3.1 byla další ze stabilních verzí zaměřená primárně na opravu softwarových chyb. Tuto verzi jsem v minulém roce prezentoval v krajském kole SOČ. Menu nastavení bylo přeloženo do češtiny a zrychlena navigace v něm. Dále jsem se zaměřil na větší objektivizaci celého kódu a zvýšení plynulosti běhu systému. Na ovládací panel jsem nainstaloval červený kryt s laserem gravírovanými popisky tlačítek.

Verze 3.2 byla prezentována na loňské celostátní přehlídce. Až na menší změny v interní elektronice řídící jednotky neznamenala větší posun ve vývoji.

5.2 PROTOPlant verze 5.0

Při pokračování dalšího vývoje verzemi 4.x jsem dospěl k závěru, že je na čase změnit způsob, jakým PROTOPlant funguje. Rozhodl jsem se tedy kompletně změnit software a přepsat jej celý od začátku. Hardware se také dočkal velmi výrazných změn.

Dal jsem se tedy do vývoje páté verze PROTOPlantu, v čemž pokračuji dále. Místo vývoje dalších prototypů základních desek jsem se rozhodl navrh-nout vlastní tištěné spoje a nechat je vyrábět průmyslově. Dále jsem začal používat dílů vytištěných na 3D tiskárně (především obaly senzorových desek a úchyty pro elektroniku). Software jsem kompletně změnil tak, aby naplno využíval schopnosti více-jádrového procesoru ESP32.

Kapitola 6

Dlouhodobé testování

Již přibližně rok je PROTOPlant spuštěn v našem domácím skleníku s orchidejemi. Během této doby jsem na této jednotce testoval stabilitu a funkčnost celého systému. Zároveň jsem zde pravidelně aktualizoval software a s pomocí této testovací jednotky jsem zjišťoval chyby v softwaru a mohl je průběžně opravovat. Ke dni *10. 2. 2020* je aktuálně instalovanou verzí PROTOPlant v4.9.

6.1 Testování napájení solární energií

Jednotka PROTOPlantu v tomto skleníku je napájena čistě solární energií získávanou ze dvou solárních panelů instalovaných na střeše přilehlého zahradního domku. Přebytečná energie je ukládána do dvou olověných akumulátorů s napětím 12 VDC. Z nich je systém napájen v noci, nebo v počasí se špatnou viditelností.

Díky tomu je tato jednotka **naprosto nezávislá** na dodávce energie z elektrické sítě. Jednotka tedy běží i v případě výpadku energie a její náklady na provoz jsou tedy **nulové**.

Zásobování vodou řeší sběr dešťové vody ze střechy nedalekého rodinného domu do nádrže instalované pod zemí vedle skleníku samotného.

6.2 Průběh testů

Za dobu fungování proběhlo několik testů v kratších i delších obdobích.

Co se týče kratších testů, jejich délka byla v řádech dní či týdnů. Tyto testy probíhaly většinou s cílem testování stability softwaru. V jejich průběhu mnohdy probíhaly různé opravy softwaru, případně nápravy případných hardwarových nedostatků.

Dlouhodobé testy probíhaly většinou s cílem otestovat přesnost senzorů, stabilitu systému či jeho energetickou náročnost. Předpokladem těchto testů bylo použití **stabilní verze softwaru**.

6.3 Výsledky testů

Provedené testy ukázaly, že PROTOPlant je schopen fungovat naprosto samostatně bez potřeby zásahu uživatele i po dobu několika měsíců (bereme-li v potaz pouze dlouhodobé testy viz výše).

Kapitola 7

Úspora energií dosažená s pomocí PROTOPlantu

Díky možnosti napájet PROTOPlant **kompletně s pomocí solární energie** lze ušetřit elektrickou energii. V noci jej lze napájet z baterií, do kterých se přebytková energie ze solárních panelů ukládá. Tento způsob napájení již dlouhou dobu testuji na našem domácím skleníku. O výsledcích se dočtete v oddíle 6.1.

O solárních panelech se obecně ví, že jejich počáteční náklady jsou poměrně vysoké, ovšem existují způsoby, jak ušetřit i v tomto ohledu. Existuje mnoho lidí, kteří prodávají solární panely z druhé ruky například ze zrušených solárních farem. Tyto panely sice mají nižší účinnost, ovšem je otestované, že PROTOPlant dokáží napájet bez problému. Společně s těmito panely se dají zakoupit i použité akumulátory (povětšinou NiCd FERAK). Z vlastní zkušenosti mohu potvrdit, že tyto akumulátory jsou ideální pro skladování energie získané pomocí solárních panelů.

Dále lze díky němu šetřit vodou, protože se vždy zavlažuje pouze ve chvíli, kdy je to potřeba.

Kapitola 8

Dostupnost a distribuce PROTOPlantu

Jak popisují v úvodu, jedním z cílů, který jsem si dal na začátku práce na PROTOPlantu bylo šíření pod licencí open-source. Toto jsem dodržel. Celý software PROTOPlantu je šířen pod licencí MIT, ostatní části (Hardware, atd.) včetně textu této práce je poté pod CC BY-NC-SA 4.0. Co se týče hardwaru, převzatý hardware (senzory, procesor a dalsí moduly) je z licence vyňat. Člověk, který tedy elektrotechnice a programování rozumí si poté může PROTOPlant bez problému sestavit sám v pohodlí domova.

Ovšem stále je obrovské množství lidí, kteří na sestavení PROTOPlantu nemusí mít dostatečné znalosti, nebo nemají čas si jej sestavovat. Z toho důvodu plánuji zahájit výrobu a distribuci mého systému jakožto hotových komponent, které stačí nainstalovat a zapojit. Ke dni *20. 2. 2020* jsem ve fázi, kdy připravuji výrobní podklady jednotlivých komponent, a provádím kroky vedoucí k založení podniku. Již v minulém roce jsem provedl průzkum, který ukázal, že o PROTOPlant by skutečně byl zájem.

8.1 Případové studie

Pro názorný příklad použití PROTOPlantu uvádím konkrétní případové studie.

8.1.1 Malý skleník s užitkovými rostlinami

Zahrádkář pěstující plodiny čistě pro zásobování sebe a své rodiny čerstvou zeleninou vlastní skleník s plochou obdělávané půdy 6x3 metry. Výška skleníku jsou přibližně dva metry, jeho objem je tedy vzhledem k tvaru skleníku **menší, než 36 m³**. Pro dostatečné pokrytí prostoru senzorikou tedy stačí dva senzory teploty (viz kapitola A.3.1) a jeden senzor vzdušné vlhkosti (viz kapitola A.3.2). Vzhledem k obdělávané ploše, stačí použít 4 senzory půdní vlhkosti. Zavlažování je vzhledem k pěstovaným rostlinám řešeno děrovanou hadicí položenou přímo na půdě. Berme v potaz, že zahrádkář chce, aby PROTOPlant otevíral jen jedno okno. Vzhledem k velikosti okna postačí aktuátor s délkou výsuvu 20 cm.

PŠ

Note:

Zde
přibudou
fotogra-
fie
babiččina
skleníku

Položka	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Řídící jednotka	1	1800 Kč	1800 Kč
Aktuátory pro ovládání oken	1	700 Kč	700 Kč
Senzory teploty	2	60 Kč	120 Kč
Senzor vzdušné vlhkosti	1	60 Kč	60 Kč
Senzor půdní vlhkosti	4	25 Kč	100 Kč
Čerpadlo	1	800 Kč	800 Kč
Cena celkem			3580 Kč

Tabulka 8.1: Tabulka s cenovou kalkulací systému pro menší skleník.

8.1.2 Středně velký skleník s okrasnými rostlinami

Skleník, ve kterém PROTOPlant průběžně testuje je určen pro pěstování orchidejí. Jeho plocha je přibližně 10 x 4 m. Většina rostlin je v květináčích

s molitanem či substrátem zavěšena v prostoru, nebo položena na stole. Teplotní senzory jsou zde použity 4, senzory vlhkosti 3. Vzhledem k tomu, že většina z těchto rostlin je epifytní, nesnášeší trvale vlhkou půdu. Z tohoto důvodu je zavlažování řešeno rozprašovačem umístěným pod stropem skleníku a upraveným nastavením jeho spínání. Neprobíhá tedy tak často.

Položka	Počet kusů	Cena za kus	Cena celkem
Řídící jednotka	1	1800 Kč	1800 Kč
Aktuátory pro ovládání oken	2	900 Kč	1800 Kč
Senzory teploty	3	60 Kč	180 Kč
Senzor vzdušné vlhkosti	2	60 Kč	120 Kč
Senzor půdní vlhkosti	2	25 Kč	50 Kč
Čerpadlo	1	800 Kč	1000 Kč
Cena celkem			4950 Kč

Tabulka 8.2: Tabulka s cenovou kalkulací systému pro větší skleník.



Obrázek 8.1: Exteriér testovacího skleníku



Obrázek 8.2: Interiér testovacího skleníku

Závěr

Záměrem mojí práce bylo vytvořit univerzální systém pro automatizaci skleníku, který je:

- open-source
- levný
- modulární
- snadný na ovládání
- univerzální

Tento cíl se mi podařilo splnit. Lidé, kteří mají zájem si systém vytvořit najdou veškerou dokumentaci, schémata a zdrojový kód na webu www.protoplant.cz.

Díky SOČ jsem se naučil pracovat se softwarem pro návrh PCB Autodesk EAGLE. Zároveň jsem vylepšil své schopnosti v programování a získal spoustu dalších zkušeností v elektrotechnice a s prací na takto komplexních projektech.

Co se týče plánů do budoucna, PROTOPlant budu dále rozvíjet. Mezi mé plány se řadí dokončení rozpracovaných modulů, vylepšování softwaru a implementace vzdáleného sledování stavu skleníku přes internet například z dovolené.

Příloha A

Elektronika a tištěné spoje

Všechny prototypy základních desek PROTOPlantu byly založeny na univerzálních tištěných spojích. Vzhledem k tomu, že jsem po stránce vzhledu i funkčnosti nebyl s takovýmto provedením spokojen, rozhodl jsem se nechat vyrobit vlastní tištěné spoje pro základní desku i senzorové moduly. Díky tomuto jsem se naučil návrhu tištěných spojů a tvorbě výrobních podkladů v programu Autodesk EAGLE.

A.1 PPMB32 – Základní deska

Základní deska je rozdělena do několika částí. Vzhledem k tomu, že umím pájet velmi dobře, rozhodl jsem se pro ruční osazení všech součástek, které byly doposud osazeny pouze na různých modulech připojených k základní desce, včetně procesoru ESP32-WROOM32D. Z důvodu přehlednosti jsem desku rozdělil do několika částí:

- Control (ESP32-WROOM32D a programátor)
- H-power (napájecí obvod a H-můstky)
- SIN (SensorIN - piny pro připojení senzorů)
- POUT (PowerOUT - výstup pro napájení dalších periferií)

- PanCon (PanelConnect - piny pro připojení tlačítek a displeje na ovládacím panelu)
- SelfProt (SelfProtection - senzor teploty a piny pro připojení vnitřního detektoru vody)

Samotná základní deska má dvě verze. Jejich rozdíly jsou vysvětleny níže. Obě verze desky jsou kromě sekce Control osazeny stejným hardwarem, tedy:

- 2x H-můstek VNH2SP30
- regulátory napětí 7805CV-DG od STMicroelectronics
- pinheady pro připojení senzorů, ovládacího panelu a dalších periferií
- svorkovnicemi pro připojení napájecích kabelů a silových výstupů

Kromě dalších součástek je přímo na desce osazen senzor DS18B20 chránící desku před přehřátím. Pokud teplota základní desky překročí 50 °C, automaticky se přeruší veškeré operace a systém přeje do režimu nouzového chlazení (viz kapitola D).

PPMB32-F Kompletní, samostatná deska. Je přímo osazena procesorem ESP32-WROOM32D i programátorem CP2102N. Má nižší profil, tudíž je možné ji použít i v menších prostorech. Integrovaný programátor lze s pomocí jumperů odpojit a přes programovací piny připojit externí. Tuto verzi jsem nazval PPMB32-F (označení F od anglického slova Full - kompletní).

PPMB32-E Vzhledem k tomu, že je PROTOPPlant veřejně dostupný, nebyl jsem si jist, zda by kompletní osazení takto velké desky zvládl i laik. Napadlo mě proto vytvořit i druhou desku, na které by byly osazeny dutinkové lišty pro vsazení vývojové ESP32 DevKitC. Odpadla by tedy nutnost kompletně osazovat sekci Control. Tuto verzi jsem nazval PPMB32-E (označení E od anglického slova Easy - jednoduchý).

Sekce Control Jak již bylo zmíněno, tato část desky zahrnuje modul procesoru ESP32-WROOM32D a programovací obvod. Ten se skládá z převodníku USB-UART CP2102N, tranzistorů SS8050-G (sloužících pro reset procesoru), indikačních LED diod a mikro USB konektoru. Nachází se zde i jumper pro přepínání mezi externím programátorem a programátorem přímo na desce.

Sekce H-power V této části desky se nacházejí H-můstky VNH2SP30 společně s regulátory napětí 7805CV-DG (výstup 5VDC) a LM3940IT-3.3 (výstup 3,3VDC). Na verzi PPMB32-F je dále osazen AMS1117-3.3 pro napájení procesoru.

V dolní části desky se poté nacházejí dva integrované obvody VNH2SP30, z nichž jeden (VNH1) je určen pro ovládání aktuátorů manipulujících s okny a druhý (VNH2) má několik režimů funkce podle připojeného výstupu:

- disabled (výstupy jsou deaktivovány)
- pump (VNH je použito pro spínání čerpadla, případně stykače řídícího čerpadlo)
- heating (VNH je použito pro řízení topné spirály)

Napájení desky je rozděleno do tří okruhů.

Okruh A Tento okruh je určen pro napájení řídící elektroniky. Má celkově 3 části, oddělené s pomocí stabilizátorů napětí. Jejich propojení znázorňuje schéma. Rozsah vstupního napětí pro tento okruh je 7,5 VDC až 18 VDC.

Okruhy V1 a V2 Použity pro oddělené napájení jednotlivých výstupů. Jejich napájecí rozsahy jsou rozepsány v tabulce A.1.

Sekce SIN Sekce s piny pro připojení jednotlivých senzorů. S výjimkou ochranných rezistorů je složena pouze z pinheadů. Jednotlivé piny jsou pro lepší přehlednost označeny přímo na desce a podrobněji popsány v jejím datasheetu.

Parametr	Min.	Max.	Jednotka
Vstupní napětí	5,5	16	V
Výstupní napětí	-	16	V
Výstupní proud	-	30	A
Maximální kontinuální proud	-	14	A

Tabulka A.1: Tabulka napájecích rozsahů napájecích větví VNH1 a VNH2

Sekce POUT Piny pro připojení napájení dalších periferií, modulů, či senzorů. Je připojena k napájecímu okruhu A. Piny jsou rozděleny na části připojené k subokruhům A1 a A2 s napětím 3,3 a 5 VDC.

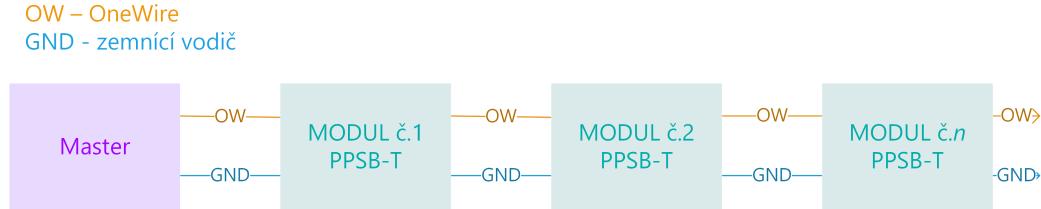
Sekce PanCon Dvanácti-pinový konektor PanCon slouží pro připojení kabelu od hlavního řídícího panelu. Samotný konektor má dva zemnící vývody, dva napájecí (1 x 5 V a 1 x 3,3 V), dva vývody sběrnice I²C a 6 vývodů pro připojení tlačítek a přepínačů. Přesnější zapojení je opět k dispozici v datasheetech jednotlivých desek.

A.2 PPSB - Desky se senzory teploty a vlhkosti

Desky osazené senzory DS18B20[4] (PPSB-T) a DHT22[3] (PPSB-TH). Pro oba typy desek jsem navrhl a s pomocí 3D tisku vyrobil vlastní krabičky.

PPSB-T – deska osazená jedním senzorem DS18B20 [4] zapojeným v režimu parazitního napájení (viz Kapitola A.3.1). V něm je senzor napájen přímo ze sběrnice OneWire, stačí mu tedy pro připojení pouze dva kably (více v [4]). Deska má jednu vstupní a jednu výstupní stranu, senzory se takto daří řetězit.

Vizualizaci desky naleznete na obrázku E.1.



Obrázek A.1: Řetězení desek PPSB-T.

PPSB-TH osazena senzorem DHT22 [3] je schopna měřit vzdušnou vlhkost i teplotu. Více o tomto senzoru naleznete v sekci A.3.2. Narozdíl od PPSB-T tyto desky nelze řetězit. Vizualizace naleznete na obrázku E.2.

A.3 Senzorika

PROTOPPlant primárně podporuje 2 typy senzorů. DS18B20 pro měření teploty a DHT22 schopné měřit vlhkost i teplotu. Dále PROTOPPlant podporuje připojení senzorů vlhkosti půdy pracujících na bázi elektrické vodivosti.

A.3.1 DS18B20

Senzory určené pro měření teploty. Komunikují po sběrnici OneWire (více v [4], str. 4) vytvořené společností Maxim Integrated. Jsou určeny pro teplotní rozsahy -55°C až $+125^{\circ}\text{C}$. V měřícím rozsahu -10°C až $+85^{\circ}\text{C}$ jsou schopny měřit s přesností na $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. K PPCU je možno připojit až 30 těchto senzorů.

A.3.2 DHT22

Čidla, která měří vzdušnou vlhkost i teplotu. Jejich přesnost je $\pm 2\%$ relativní vlhkosti a $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Opakovatelnost měření je poté $\pm 1\%$ relativní vlhkosti a $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Tyto senzory komunikují jednosběrnicově, není tedy možno

je řetězit. K PPCU je možno připojit těchto senzorů až 6. Více viz [3].

Příloha B

Software základní desky

Tato kapitola se zaměřuje na software základní desky PROTOPlantu a detailně popisuje jeho funkci. Na software ostatních modulů se zaměřuje následující kapitola C.

B.1 Sdílené knihovny

Z důvodu usnadnění programování základní desky i ostatních rozšiřujících modulů jsem vytvořil několik sdílených knihoven. V nich je zahrnuto:

- konfigurace systému
- nastavení jednotlivých pinů dle standardního rozložení, vč. možnosti nastavení vlastního
- práce s displayem
- práce s tlačítky
- řízení H-můstků
- ovládání senzorů

Díky těmto knihovnám je většina zdrojového kódu uložena v nich. Koncový uživatel, který se rozhodne software modifikovat, poté pouze v hlavním programu definuje, které moduly spustit a do konfiguračního souboru zapíše nastavení daných modulů.

Konfigurace softwaru Konfigurace softwaru pro jednotlivé verze hardware je řešena pomocí jednoho souboru. Podle toho, jak jsou jednotlivá makra v tomto souboru definována, prekompilátor následně sestaví software přímo pro danou verzi. Část konfiguračního souboru je zobrazena níže. V této části lze nastavit parametry přístupového bodu Wi-Fi, který si PROTOPlant sám vytvoří, sériové linky a displeje.

```
//If wifi credentials not set OR wifi not found,  
//create own AP with these credentials  
#define AP_SSID ProtoPlant  
#define AP_PASSWORD protoplant  
  
#define SERIAL_DEBUGGING      true  
#define SERIAL_BAUDRATE       115200  
  
#define DISPLAY_CONNECTED     true  
#define DISPLAY_ADDRESS        0x27  
#define DISPLAY_TIMEOUT        10000  
#define DISPLAY_COLONS         16  
#define DISPLAY_ROWS            4
```

B.2 Datové sběrnice

PROTOPlant primárně využívá dvě datové sběrnice:

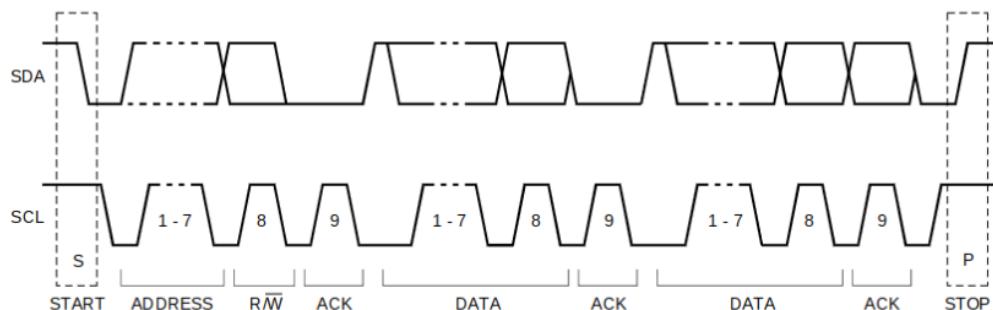
- I²C
- OneWire

Sběrnici I²C používá PROTOPlant pro komunikaci se zařízeními na stejném desce, případně pro řízení LCD displeje instalovaného na řídícím panelu

(připojení přes PanCon).

Princip Na sběrnici je připojeno jedno zařízení jakožto master (řídící) a jedno či více zařízení jako slave (řízená). Tato zařízení jsou navzájem propojena dvěma dráty (proto se I²C někdy přezdívá TwoWire), serial clock (SCL) a serial data (SDA). Každé ze slave zařízení má sedmibitovou adresu (např. 0xE0), která musí být pro každé zařízení na jedné sběrnici odlišná. Některá zařízení mají tuto adresu pevně zapsanou a nelze ji měnit, zatímco u jiných ji lze změnit. Zařízení připojené jako v režimu master tuto adresu nepotřebuje, vzhledem k tomu, že on sám vždy adresuje jen jedno ze zařízení.

Komunikační protokol Za klidového stavu (neprobíhá žádná komunikace) jsou obě linky (SDA i SCL) připojeny nastaveny na HIGH. Jakmile chce master zahájit komunikaci, vyšle takzvaný startovní signál, po kterém následuje adresa daného zařízení, jejíž nultý bit určí, zda chce master číst, nebo zapisovat. Dále následují datové bity. Jakmile jsou všechna data přenesena, vyšle master stop signál, čímž ukončí komunikaci a sběrnice se vrátí do klidu. Rychlosť celého přenosu určuje pulsování linky CLK. Celý proces názorně zobrazuje obrázek B.1.



Obrázek B.1: Celý datový přenos po I2C sběrnici. Převzato z [1]

Sběrnice OneWire Sběrnici OneWire používá PROTOPlant pro komunikaci s teplotními čidly DS18B20. Více o této komunikační sběrnici v [4].

B.3 Komunikace mezi řídící jednotkou a jednotlivými moduly

PROTOPlant podporuje dva režimy komunikace řídící jednotky s přídavnými moduly:

- bezdrátová komunikace přes Wi-Fi
- kabelová komunikace přes UART (standard RS-485)

B.4 Bezdrátová komunikace

Je vhodná primárně pro malé skleníky v oblastech, kde nehrozí zarušení signálu. Tento způsob komunikace je zatím stále ve vývoji.

B.5 Kabelová komunikace a RS-485

Kabelová komunikace probíhá přes tzv. UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter - univerzální asynchronní přijímač a vysílač). PROTOPlant využívá průmyslový standard RS-485 umožňující komunikaci s pomocí dvojlinky. Opět je zde uplatněn princip master - slave (řídící jednotka je master, ostatní moduly slave). Pro tento způsob komunikace existuje několik protokolů, pro příklad velmi často používaný ModBus, nebo nedávno vytvořený JANUS[7], který používám. Více o principu RS-485 a samotném protokolu v [7, s. 21-25]

Příloha C

Software dalších modulů

Software přídavných modulů je navržen tak, aby k jeho běhu nebyl zapotřebí velký výpočetní výkon. Obecně lze jejich funkci znázornit blokovým diagramem E.4.

Příloha D

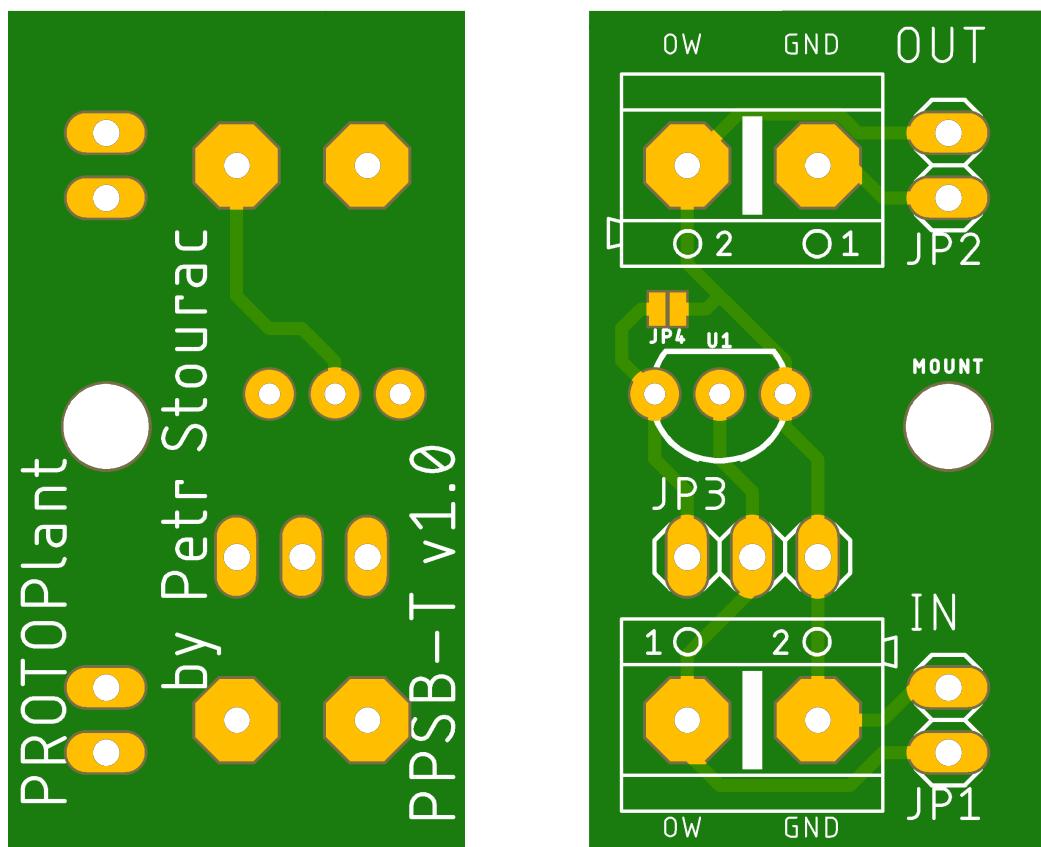
Zvláštní stavy

PROTOPlant má několik zvláštních stavů, ve kterých pracuje v omezeném režimu. Tyto stavы slouží primárně pro zabránění poškození systému.

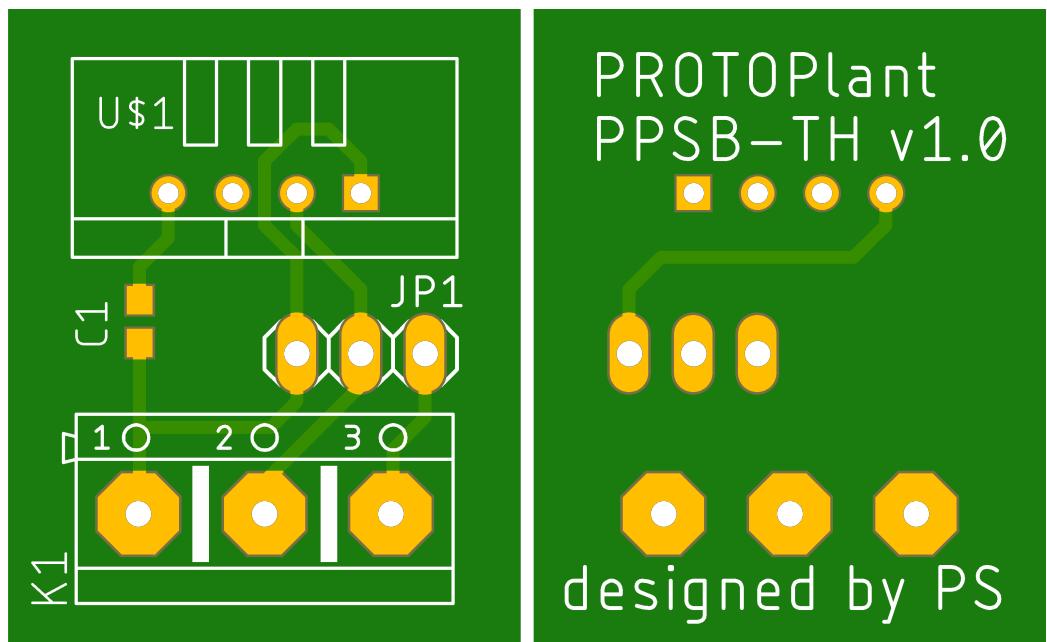
Režim nouzového chlazení Do tohoto režimu přejde systém v případě, že teplotní senzor na základní desce PPCU detekuje přehřívání. Dojde k automatickému vypnutí výstupů řídící jednotky. Poté se systém restartuje, aby vyloučil chybu softwaru. V případě, že softwarovou chybu nedetektuje, vyčká, než se teplota sníží na běžnou provozní hodnotu, kterou průběžně vypočítává z průměrů hodnot naměřených před prudkým nárůstem. Po ochlazení systém pokračuje v normálním chodu, ovšem na displeji zůstane upozornění, že k chybě došlo.

Příloha E

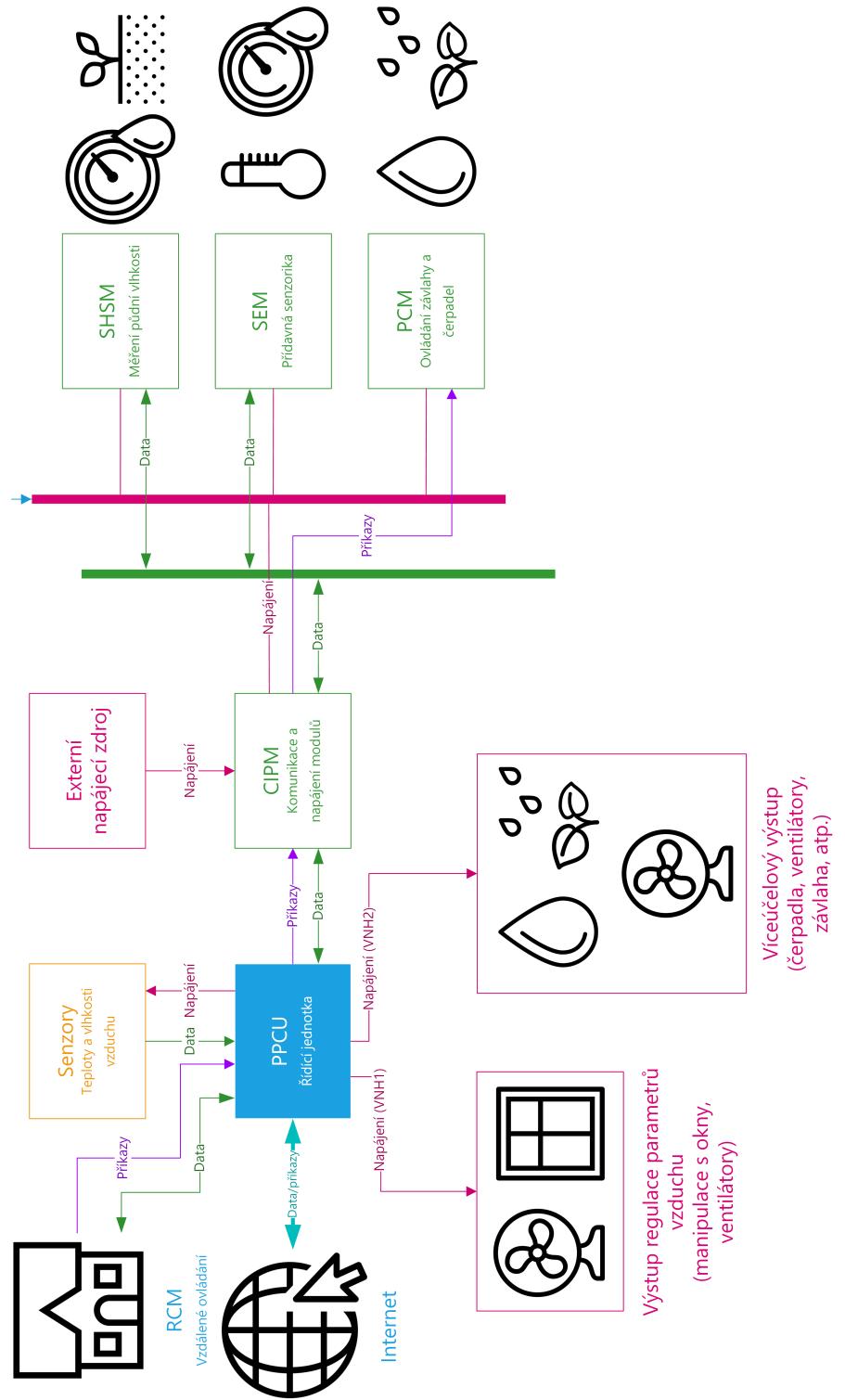
Obrazové přílohy



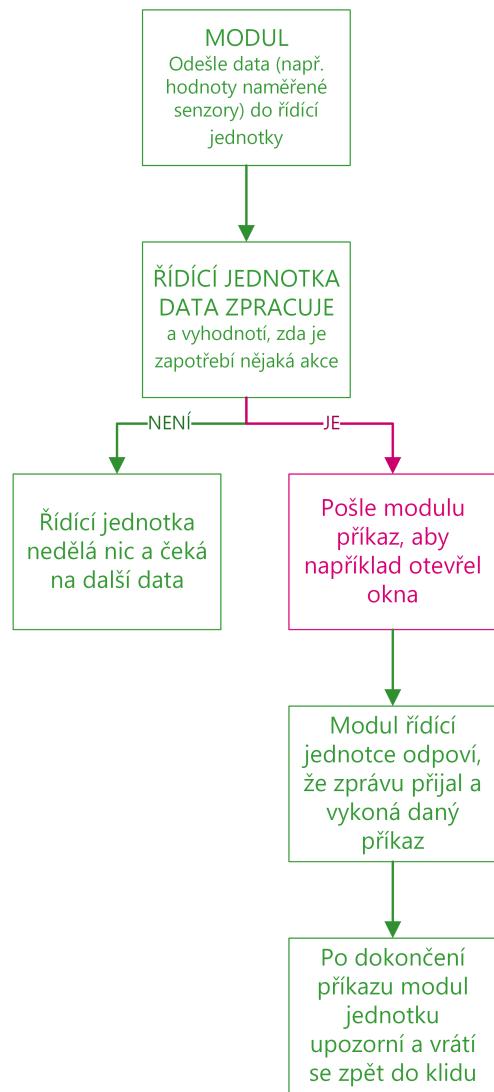
Obrázek E.1: Vizualizace PPSB-T (horní strana vpravo, dolní vlevo)



Obrázek E.2: Vizualizace desky PPSB-TH (horní strana vlevo, dolní vpravo)



Obrázek E.3: Schéma zapojení a funkce jednotlivých modulů



Obrázek E.4: Blokový diagram komunikace řídící jednotky a přídavného modulu

Literatura

1. NXP SEMICONDUCTORS. *I2C-bus specification and user manual* [online] [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
2. THE ENCLOSURE COMPANY LTD. *IP Rated Enclosures Explained* [online] [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.enclosurecompany.com/ip-ratings-explained.php>.
3. AOSONG ELECTRONICS CO.,LTD. *DHT22 datasheet* [online] [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.
4. MAXIM INTEGRATED. *DS18B20 datasheet* [online] [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
5. STMICROELECTRONICS. *L78xx datasheet* [online] [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/41/4f/b3/b0/12/d4/47/88/CD00000444.pdf/files/CD00000444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000444.pdf>.
6. STMICROELECTRONICS. *VNH2SP30-E datasheet* [online] [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.elecrow.com/download/VNH2SP30%20Datasheet.pdf>.

7. ROHLÍNEK, Tomáš. *Modulárni stavba soutěžních robotů*. 20. února 2020.
Dostupné také z: [https://github.com/haberturdeur/Janus_Text/
blob/master/text.pdf](https://github.com/haberturdeur/Janus_Text/blob/master/text.pdf). Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola
Brno, Sokolská, příspěvková organizace.

Seznam obrázků

8.1	Exteriér testovacího skleníku	32
8.2	Interiér testovacího skleníku	32
A.1	Řetězení desek PPSB-T.	38
B.1	Celý datový přenos po I2C sběrnici. Převzato z [1]	42
E.1	Vizualizace PPSB-T (horní strana vpravo, dolní vlevo)	46
E.2	Vizualizace desky PPSB-TH (horní strana vlevo, dolní vpravo)	47
E.3	Schéma zapojení a funkce jednotlivých modulů	48
E.4	Blokový diagram komunikace řídící jednotky a přídavného modulu	49

Seznam tabulek

2.1	Tabulka srovnání PROTOPlantu a jiných řešení.	13
8.1	Tabulka s cenovou kalkulací systému pro menší skleník.	30
8.2	Tabulka s cenovou kalkulací systému pro větší skleník.	31
A.1	Tabulka napájecích rozsahů napájecích větví VNH1 a VNH2 .	37