



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍDICÍ SYSTÉM PRO REGULACI A MONITOROVÁNÍ TEPLOTY

TEMPERATURE CONTROL AND MONITORING SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Mitter

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Martin Mitter

ID: 206281

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí systém pro regulaci a monitorování teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Definujte požadavky na řízení a monitorování teploty ve skříni pro domácí datové úložiště.
2. Navrhnete koncepci řídicího systému, který by udržoval optimální teplotu pro datové disky. Je požadováno topení i chlazení. Dále je požadováno zaznamenávat teplotu ve skříni a záznamy archivovat. Zvolte vhodné snímače teploty, topné a chladicí členy. Nakreslete blokové schéma zařízení.
3. Navrhnete mikroprocesorový systém pro řízení teploty ve skříni. Zvolte vhodný mikrokontrolér, nakreslete obvodové schéma zapojení a stanovte hodnoty jednotlivých součástek.
4. Mikroprocesorový systém realizujte a oživte.
5. Vytvořte programové vybavení pro mikrokontrolér a odlaďte jej.
6. Ověřte funkčnost zařízení a vyhodnotte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Kreidl, M. MĚŘENÍ TEPLITY - senzory a měřicí obcody. BEN. Praha 2015.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem řešení pro udržení a monitorování optimální teploty pro domácí datové úložiště. Účelem této práce je co nejvíce prodloužit životnost pevných disků v datovém úložišti. Práce v první řadě věnuje pozornost tomu, co vlastně je optimální teplota pro dlouhodobou životnost disků a jak ji korektně měřit. Na základě zjištěných poznatků z teorie a z testu prototypu řešení vznikne finální návrh vestavěného systému, který tuto práci zastane.

Abstract

This work is dealing with the design for maintaining and monitoring optimal temperature for home-based data center. The purpose of this work is to prolong the life of hard drives in data center for as long as possible. First of all, the attention is given to establishing what the optimal temperature for maintaining long-live of hard drives is and how to correctly measure it. Based on the knowledge obtained from theory and from the prototype testing the final design of embedded system for maintaining this function is created.

Klíčová slova

Datové úložiště, pevný disk, měření teploty, vestavěný systém, návrh DPS, STM32

Keywords

Data center, hard drive, temperature measurement, embedded system, PCB design, STM32

Citace

MITTER, Martin. *Řídicí systém pro regulaci a monitorování teploty*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126891>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Tomáš Macho.

Řídicí systém pro regulaci a monitorování teploty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Tomáše Macha. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Martin Mitter
8. 6. 2020

Obsah

1	Úvod	1
2	Definice požadavků	2
2.1	Optimální teplota	2
2.1.1	Výzkum firmy Seagate	2
2.1.2	Výzkum firmy Google	3
2.2	Požadavky na řízení	4
2.3	Požadavky na monitoring	4
3	Koncepce řídicího systému	5
3.1	Tepelně izolovaná komora	5
3.2	Akční člen chlazení	7
3.3	Akční člen vytápění	7
3.4	Regulace teploty	8
3.4.1	PID/PSD regulace	8
3.4.2	Dvoustavová regulace	9
3.4.3	Třístavová regulace	9
3.5	Snímače teploty	10
3.6	Snímače proudu	10
3.7	Uživatelské rozhraní	11
3.8	Logování dat	11
3.9	Test konceptu	11
3.10	Blokové schéma konceptu	15
4	Návrh mikroprocesorového systému	17
4.1	Mikrokontrolér	17
4.2	Měření teploty	19
4.3	Měření proudu	20
4.4	Ovládání akčních členů	22
4.5	Komunikační a informační rozhraní	23
4.6	LAN připojení	24
4.7	Napájení	24
4.8	Výstupy návrhu	25
4.9	Rozpiska součástek	28
5	Programové vybavení	29
5.1	Firmware mikrokontroléru	29
5.2	Server	31
6	Realizace systému	32
6.1	Výroba DPS	32
6.2	Osazení DPS	32
6.3	Oživení	33

6.4	Estetické zakončovací práce.....	33
7	zhodnocení výsledků.....	36
7.1	Přesnost měření teploty.....	36
7.2	Regulace teploty.....	37
8	Závěr.....	38
	Literatura	39
	Seznam příloh.....	41

Seznam obrázků

Obr. 1	Graf distribuce průměrných teplot a selhání [2]	3
Obr. 2	Hodnoty AFR pro průměrné teploty disků [2]	4
Obr. 3	Stará lednice přetvořená na serverovnu	6
Obr. 4	Akční člen pro vytápění.....	8
Obr. 5	Rozložení serverovny pro test konceptu.....	12
Obr. 6	Odezva systému na jednotkové skoky.....	13
Obr. 7	Závislost mezi teplotou disků a jejich okolím.....	14
Obr. 8	Blokové schéma finálního návrhu	16
Obr. 9	Rozložení pinů mikrokontroléru vytvořené v programu STM32CubeMX	18
Obr. 10	Schéma zapojení mikrokontroleru	19
Obr. 11	Schéma propojení teplotních senzorů.....	20
Obr. 12	Teplotní snímač MCP9808 na DPS firmy ADAFRUIT	20
Obr. 13	Schéma zapojení jednoho kanálu pro měření proudu	22
Obr. 14	Připojení snímače otevření dveří k systému	22
Obr. 15	Reléový modul	23
Obr. 16	Schéma komunikačního a informačního modulu	24
Obr. 17	Schéma napájecího obvodu	25
Obr. 18	Pohled na spodní stranu hlavní řídicí DPS	25
Obr. 19	Pohled na horní stranu hlavní řídicí DPS	26
Obr. 20	Pohled na horní stranu komunikační a informační DPS	26
Obr. 21	Pohled na spodní stranu komunikační a informační DPS	26
Obr. 22	Schéma hlavní řídicí desky	27
Obr. 23	Vývojový diagram počáteční inicializace mikrokontroléru	30
Obr. 24	Vývojový diagram průběhu obsluhy rutiny	30
Obr. 25	Ukázka automaticky vygenerovaného grafu	31
Obr. 26	Osazená hlavní řídicí deska	33
Obr. 27	Řídicí a spínací modul usazený v instalační krabici.....	34
Obr. 28	Komunikační a informační modul s displejem.....	34
Obr. 29	Vnitřní uspořádání hotové serverovny.....	35
Obr. 30	Umístění komunikačního a informačního panelu.....	35
Obr. 31	Graf odchylek měření teploměrů vůči referenčním měřidlům.....	37
Obr. 32	Regulovaná teplota uvnitř serverovny za 24h.....	37

Seznam tabulek

Tab. 1	Spojitost mezi teplotou okolí a průměrnou dobou poruchy [1]	2
Tab. 2	Stručný výpis z tabulky použitých součástí	28
Tab. 3	Odchyly měření teploměrů vůči referenčním měřidlům (vše °C)	36

1 ÚVOD

Potřeba uchovávání větších objemů elektronických dat, ať už pro zálohování počítačových systémů, ukládání bezpečnostních kamerových záznamů, ukládání fotodokumentace, či za jiným účelem, vede soukromé subjekty a malé a střední komerční podniky k nákupu a instalaci vlastních datových cloudových úložišť.

Tato „laciná“ komerční řešení ovšem v drtivé většině zajišťují pouze čtení a zápis dat na disky a jejich systémovou správu. Již se ovšem nezajímají o zajištění optimálního prostředí pro tato paměťová úložiště, která by zajistila dlouhodobý spolehlivý a ideálně i bezúdržbový chod systému po pokud možno co nejdelší dobu.

Za účelem nápravy tohoto nešvaru je navržen vestavný systém malé serverovny, který pojme všechny potřebné datové disky i s obslužnými systémy. Pro tyto disky následně zajistí optimální teplotu a pomocí sítě LAN bude na server logovat dodržování těchto parametrů.

Práce se zabývá problematikou určení optimálních parametrů pro datové disky, které by zabránili snižování jejich životnosti, jak těchto podmínek docílit a udržet je.

Celý vestavný systém lze rozdělit na tři nejdůležitější části. Těmi jsou termoizolační box s akčními členy, uživatelské rozhraní s displejem a řídicí a spínací jednotka. Řízení celého systému zajišťuje mikrokontrolér STM32F302CBTx od firmy STMicroelectronic. Ten nejprve získá údaje o situaci vni a vně termoizolační komory pomocí tří teplotních snímačů MCP9808, tyto hodnoty vyhodnotí, zobrazí je na uživatelském rozhraní a na jejich základě obsluhuje akční členy pomocí reléového modulu. Všechna naměřená data jsou na konci tohoto cyklu odeslána na server pomocí Wi-Fi modulu ESP8256

Obslužný firmware systému je realizován kódem v jazyce C. Pro obsluhu mikrokontroléru je využita knihovna HAL (Hardware Abstract Layer), taktéž vyvíjena firmou STMicroelectronic. Nastavení teplotních parametrů vni termoizolační komory je uloženo v paměti typu FLASH, a skrze uživatelské rozhraní systému lze tyto parametry měnit za běhu programu.

Programové vybavení pro server bylo vytvořeno v jazyce Python. Ten zajišťuje logování všech naměřených dat a aktuálního nastavení systému do souboru typu TSV (Tab-Separated Values) pro případnou pozdější kontrolu, či jinou práci s těmito daty. Taktéž dokáže automaticky generovat graf naměřených hodnot pro rychlou kontrolu.

2 DEFINICE POŽADAVKŮ

Prvním krokem pro vytvoření jakéhokoliv zařízení je definovat si, co od hotového výrobku vlastně očekáváme a jak toho plánujeme dosáhnout. Nejinak je tomu i v této práci.

Náš systém bude umístěn v nezatepleném půdním prostoru, kde se teplota mění od cca 60 °C v létě po minusové teploty v zimě. Je tedy třeba zajistit tepelnou izolaci mezi vnějším prostředím a datovými disky. Uvnitř takto izolovaného prostředí je třeba udržovat kontrolovanou optimální teplotu. Z tohoto požadavku plyne, že musíme disponovat akčními členy pro topení i chlazení.

Pro dálkový dohled nad zařízením a vyhodnocení trendů naměřených hodnot v systému, bude zařízení ukládat naměřená data do externího úložiště.

2.1 Optimální teplota

Jak je obecně známo, jeden z největších vlivů na životnost disků má teplota. To je naštěstí pro nás veličina, kterou lze relativně snadno regulovat a měřit. Protože však není proveditelné, abychom sami bez velikých finančních nákladů a roků výzkumu určit ideální teplotu pro nejdelší možnou životnost disků, přistoupili jsme k získání této hodnoty ze studií materiálů výzkumu firem Seagate [1] a Google [2]. [9]

2.1.1 Výzkum firmy Seagate

V této práci autor zkoumá spojitost mezi teplotou okolí a průměrnou dobou mezi poruchami (MTBF – mean time between failure) udávanou v hodinách. Pro nás se jako nejzajímavější jeví tabulka Tab. 1, ze které jasně vyplývá, že se zvyšující se teplotou okolí, dochází ke zkracování průměrné doby mezi poruchami - tj. disky se častěji kazí. Na základě těchto dat tedy můžeme předpokládat, že optimální teplota okolí pro disk se pohybuje okolo 25 °C [1] [9].

Tab. 1 Spojitost mezi teplotou okolí a průměrnou dobou poruchy [1]

Temp (°C)	Acceleration Factor	Derating Factor	Adjusted MTBF
25	1.0000	1.00	232,140
26	1.0507	0.95	220,533
30	1.2763	0.78	181,069
34	1.5425	0.65	150,891
38	1.8552	0.54	125,356
42	2.2208	0.45	104,463
46	2.6465	0.38	88,123
50	3.1401	0.32	74,284
54	3.7103	0.27	62,678
58	4.3664	0.23	53,392
62	5.1186	0.20	46,428
66	5.9779	0.17	39,464
70	6.9562	0.14	32,500

2.1.2 Výzkum firmy Google

Zatímco předchozí výzkum se opíral o relativně malý vzorek 500 disků, a vypomáhal si matematickými analýzami pro predikci chování, pracovníci Googlu problematiku spolehlivosti disků uchopili jinak. Využili svůj přístup k obrovským datacentrům a analyzovali data získaná ze S.M.A.R.T. senzorů disků. Na základě zjištěných dat potvrdili spojitost mezi úmrtností disků a jejich provozní teplotou. Co je ovšem překvapivé, je fakt, že tato spojitost nebyla při vysokých teplotách tak markantní jako bylo tvrzeno předchozími výzkumy a výrobci. Dalším překvapivým zjištěním bylo, jak moc naopak disky trpí při podchlazování. Zjištěná data si můžete prohlédnout na přiložených grafech (Obr. 1 a Obr. 2). Získaná data vyhodnocují ve svém výzkumu na základě průměrné roční míry selhání (AFR – Annualized failure rate). Z uvedených grafů tedy vyplývá, že jako nejvýhodnější se jeví udržení teploty disků v rozmezí 35 – 40 °C. [9]

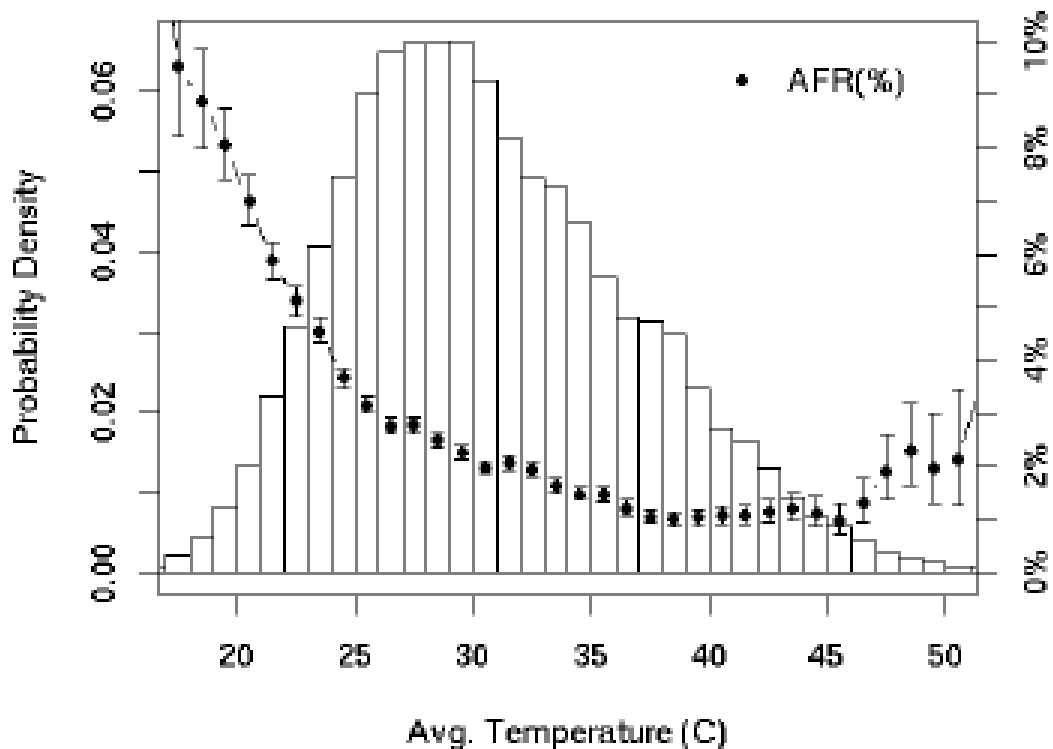


Figure 4: Distribution of average temperatures and failure rates.

Obr. 1 Graf distribuce průměrných teplot a selhání 39[2]

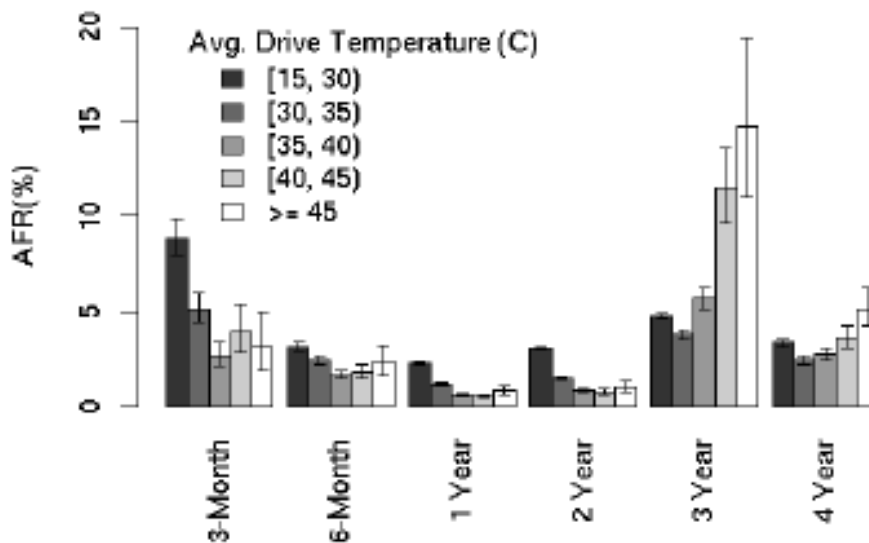


Figure 5: AFR for average drive temperature.

Obr. 2 Hodnoty AFR pro průměrné teploty disků [2]

2.2 Požadavky na řízení

Z předchozí podkapitoly vyplívá, že systém by měl teoreticky udržovat vnitřní teplotu serverovny na hodnotě 25 °C, což by mělo odpovídat vnitřní teplotě disků 35-40 °C. Při testu koncepce systému (kapitola 3), byl zpozorován trend, kdy skutečná teplota disků je o cca 8 °C vyšší než teplota vzduchu v lednici. Tímto jsme tedy ověřili, že teoretické hodnoty získané z výzkumů si přibližně odpovídají. Při nastavené teplotě uvnitř lednice na 29 °C (teo. 25 °C) a hysterezi 0,5 °C dosahujeme teploty disků cca 35-36°C (teo. 35-40 °C). Tyto hodnoty budeme tedy brát jako závazné a návrh z nich bude vycházet. [9]

2.3 Požadavky na monitoring

Po systému primárně vyžadujeme logovat časovou a datumovou značku, teploty naměřené vni a vně tepelněizolační komory, hodnoty nastavených parametrů teploty, stav dveří a údaje o stavu sepnutí akčních členů. Datumovou značku ve formátu YYYY/MM/DD a časovou značku ve formátu hh:mm:ss přiřadí k naměřeným datům server, ostatní hodnoty mu budou zaslány námi vyrobeným systémem. Hodnoty je vhodné zasílat na server po každém cyklu systému. Pokud tedy z jakéhokoliv důvodu dojde k narušení komunikace, jsme schopni určit, kdy přesně k tomuto výpadku došlo. Všechny tyto hodnoty budeme ukládat do tsv (Tab-Separated Values) souboru, který lze jednoduše zpracovávat pomocí libovolného tabulkového či databázového procesoru a který je také, na rozdíl od csv souboru, dobře čitelný v textových editorech.

Pro rychlý přehled, bude monitoring doplněn o možnost automatického vykreslení všech naměřených hodnot na časovou osu.

3 KONCEPCE ŘIDÍCÍHO SYSTÉMU

Celý systém bude navržen silně modulární. Tato koncepce, ač ne tak elegantní jako centralizovaný systém na jediné dps, zajistí snadnou údržbu zaměnitelností jednotlivých dílů, sníží náklady na výrobu, a usnadní ožívování hotového systému.

Velkou výhodou takto postaveného systému, také budou jeho snadné úpravy a rozšíření a případné snadné přizpůsobení již navrženého systému pro zcela jinou aplikaci.

3.1 Tepelně izolovaná komora

Tepelně izolovaná komora musí zejména splňovat tyto parametry. Její minimální vnitřní rozměr bude 300x300x300 mm daný rozměry datového úložiště, a záznamového zařízení pro bezpečnostní kamery. K tomu musí komora disponovat dostatečným prostorem pro umístění akčních členů a případně i místem pro rozšíření o další zařízení. Je třeba zajistit mechanickou odolnost vůči vnějším vlivům a pohodlný přístup do komory. Velkou výhodou bude zajištění estetického vzhledu celé komory.

Jako první možnost připadalo v úvahu použití polystyrenové lednice pro převoz ryb. Ač by pravděpodobně tato možnost dostačovala, nebyli jsme s tímto řešením spokojeni. Polystyren takto samotný navíc ani plně nesplňuje požadavek na mechanickou odolnost.

Jako další možnost bylo zváženo vytvoření malé skříně ze dřeva a tu následně zaizolovat pomocí polystyrenových desek. Tato možnost se jevila jako nejvhodnější, začali jsme tedy s přípravami na její realizaci. Během těchto příprav jsme ovšem objevili elegantnější a navíc již hotové řešení. Jednalo se o cestovní lednici do auta.

Komora z ní vyrobená by splňovala minimální požadavky na rozměry. Plastová skořepina by citlivá zařízení uvnitř dostatečně chránila i po stránce mechanické. Jako bonus, je navíc cestovní lednice již z výroby vybavena chladícím členem pracujícím na principu peltierova článku. Další postup v tomto směru ovšem překazila silná nevole otce, který se s lednicí nedokázal rozloučit. Bylo tedy třeba koupit cestovní lednici novou, nebo přijít s jiným lepším řešením. Nechtěje plýtvat peněžitými prostředky na nevyzkoušené řešení, bylo rozhodnuto vydat se jinou cestou.

Jako nejlepším, nejlevnějším a nejelegantnějším řešením se ukázalo nahrazení cestovní lednice, lednicí kuchyňskou. Zdarma tedy byla opatřena vyhozená lednice Gorenje o objemu 290l z místní prodejny s elektrozařízeními, kterou zde někdo zanechal k ekologické likvidaci. Lednici sice nesla známky opotřebení, ale jevila se čistá a udržovaná. Tímto krokem jsme získali pěknou velice prostornou a tepelně izolovanou komoru. Lednice je vybavena i velice příhodným

policovým systémem, který usnadnil integrování veškerých datových rozvodů a zařízení, které byly do podkroví svedeny a jejich přehledné uspořádání.

Jako velická výhoda se také jeví fakt, že lednice má na dveřích těsnění, takže při jejich zavření je celá komora poměrně kvalitně vzduchotěsně utěsněná. Díky tomu nemůže docházet k tepelné výměně s okolním prostředím, což by mělo za následek narušení řízení. Tohoto faktu je možno v budoucnu využít při rozšiřování funkcionality o detekci požáru, kdy by se celá komora dala při poplachu vyplnit inertním plynem, jenž by požár zadusil.

Pro větší pohodlí při práci na zařízení byla lednice rozšířena o dodatečné osvětlení pomocí LED pásků, napájených z interního rozvodu 12V, které jsou připevněny po obou bočních stranách lednice.



Obr. 3 Stará lednice přetvořená na serverovnu

3.2 Akční člen chlazení

Pro snížení teploty uvnitř komory bylo pomýšleno na několik možných řešení. Jako jedno z nich se nabízelo soustředěné foukání vzduchu pomocí ventilátoru kolem disků. Tato možnost není příliš efektivní, jelikož dokáže teplotu snížit pouze o několik málo stupňů. V uzavřeném izolovaném systému se navíc bude teplo stejně časem hromadit.

Jako další možnost se nabízelo využití peltierova článku. Toto řešení se již jeví jako mnohem příhodnější, jelikož lze tepelnou energii získanou ochlazováním vnitřního prostoru předávat do vnějšího okolí. Velikou nevýhodou ovšem je nutnost použití kaskády těchto článků pro efektivní snížení teploty při velikých tepelných rozdílech a jejich bídná účinnost.

Zaradovali jsme se tedy poté, co jsme získali starou lednici jakožto tepelně izolační box. Součástí této lednice je totiž kompresorem poháněný chladicí člen.

Ten funguje na principu změny skupenství chladiva. Kompresor vtlačuje chladivo v plynném skupenství do tepelného výměníku (dlouhá tenká kovová trubice). Zde se zvýší tlak chladiva, to zkapalní a předává svou přebytečnou tepelnou energii do okolí. Chladivo se následně dostává do výparníku (trubice s větším průřezem než výměník). Zde se prudce sníží tlak a kapalina se začne vypařovat. Potřebnou energii na změnu svého skupenství odebere chladivo jako tepelnou energii ze svého okolí. Následně je plyn vháněn zpět do kompresoru a cyklus se začíná opakovat.

Rozhodli jsme se tedy tento integrovaný chladicí člen vyzkoušet. Po připojení ke zdroji elektrické energie ovšem začala lednice hořet. Po uhašení požáru jsme detekovali závadu. Jednalo se o poškozené časové relé kompresoru. Po odstranění této závady začalo chlazení opět fungovat a my tím získali akční člen chlazení.

Měřením bylo zjištěno, že při běhu teče kompresorem efektivní proud 0,76A, což odpovídá spotřebě 174 VA.

3.3 Akční člen vytápění

Prvním možným řešením přitápění uvnitř komory bylo pomocí topné spirály. Tu ovšem není úplně triviální vyrobit a upevnit tak, aby nemohlo dojít k požáru, nebo poškození předmětů v její těsné blízkosti.

Bylo proto rozhodnuto, využít pro vytápění vláknové žárovky, což je odzkoušený, jednoduchý, levný a bezpečný způsob výroby tepla. Při přepálení vlákna žárovky je navíc velmi jednoduché zařídit nápravu pouhou výměnou.

Konkrétně je využito 50 W žárovky firmy REPTI PLANET – Infrared heat, která se běžně prodává pro vyhřívání terárií.



Obr. 4 Akční člen pro vytápění

3.4 Regulace teploty

Pro dosažení optimálních hodnot, které jsou popsány v kapitole 2.2, je potřeba definovat typ řízení.

3.4.1 PID/PSD regulace

Na základě pozorování systému, metody pokus/omyl nebo známých fyzikálních vztahů navrhne vhodnou rovnici řízení regulátoru. Výsledné řízení by za podmínky správně navržených rovnic mělo být nejehospodárnějším a nejpřesnějším typem řízení oproti ostatním možnostem. Nevýhodou ovšem je potřeba spojitého řízení akčních členů (složitější na implementaci, kompresor lednice není vhodné ovládat spojitě) a nutnost přidání snímačů výkonu pro všechna připojená zařízení vni systému. Ta totiž generují vlastní teplo, se kterým bychom museli počítat na základě jejich aktuálního zatížení. Tato rovnice by pak vedla k provádění, oproti ostatním zmíněným metodám, složitých výpočtů uvnitř mikrokontroléru. Jakákoliv změna uspořádání, záměna, odebrání nebo přidání dalších disků či jiných zařízení by navíc měla za následek zneplatnění této rovnice, a ač by se systém pravděpodobně stále požadované hodnotě blížil, již by nedosahoval původních navržených parametrů. Veškeré tyto změny by se tedy museli pokaždé znovu zanalyzovat, vytvořit na jejich základě novou rovnici řízení a tyto nová opravená data znovu nahrát do mikrokontroléru. To je krajně nepraktické a proto jsme se rozhodli k tomuto postupu nepřistoupit.

3.4.2 Dvoustavová regulace

Druhou a mnohem vhodnější možností je využití dvoustavové regulace. Ta se zakládá na skokovém přepínání mezi 100% výkonem dvou akčních členů, v závislosti na tom, zda je hodnota pod nebo nad požadovanou hodnotou. Výhodou je velká univerzálnost této metody (nezáleží na změně ve vnitřním uspořádání serverovny), nízká cena hardwarového provedení (postačuje jedno přepínací relé) a jednoduchá implementovatelnost do softwaru. Nevýhodou této metody ovšem je, že je stále jeden z akčních členů v provozu a odebírá tak energii. V momentě, kdy navíc měřená hodnota dosáhne hodnoty požadované, systém začne kmitat mezi svými dvěma stavy, což může vést k rychlému a předčasnému opotřebení přepínacího prvku (relé). Z tohoto důvodu jsme se rozhodli nevyužít ani tento způsob regulace.

3.4.3 Třístavová regulace

Pro jednoduchost a univerzálnost metody dvoustavové regulace jsme se rozhodli využít způsobu řízení, který z této metody vychází – třístavové regulace

Dvoustavová regulace je rozšířena o třetí možný stav, ve kterém jsou oba akční členy skokově vypnuty (0% výkonu). Díky tomu zavádíme do systému pásmo necitlivosti, neboli hystereze, které zabrání rychlým oscilacím jako u dvoustavového typu řízení. Její hodnota určuje, o kolik se musí naměřená hodnota od hodnoty nastavené vzdálit, než se příslušný akční člen sepne. Po dosažení požadované hodnoty dochází zpět k přepnutí do inertního stavu. Nevýhodou tohoto typu řízení je nestálost a nepřesnost regulované veličiny vůči nastavené hodnotě, daná velikostí hystereze. Jak ovšem vyplývá z teoretických poznatků o optimální teplotě, pro zachování životnosti disku nám postačuje držet se v pásmu 35-40 °C, a tudíž nám tato nevýhoda nepřekáží., což tento typ řízení pro náš systém činí nejlepší volbou a bude proto použit.

Předpis pro třístavové řízení (δ je hystereze):

$$\text{akčních členů} = \begin{cases} \begin{matrix} \text{topení 0\%} \\ \text{chlazení 100\%} \end{matrix} & \text{pro } T_{\text{naměřeno}} > (T_{\text{požadovaná}} + \delta) \\ \begin{matrix} \text{topení 0\%} \\ \text{chlazení 0\%} \end{matrix} & \text{pro } (T_{\text{požadovaná}} + \delta) > T_{\text{naměřeno}} > (T_{\text{požadovaná}} - \delta) \\ \begin{matrix} \text{topení 100\%} \\ \text{chlazení 0\%} \end{matrix} & \text{pro } T_{\text{naměřeno}} < (T_{\text{požadovaná}} - \delta) \end{cases} \quad (1)$$

3.5 Snímače teploty

Pro měření teploty se většinou využívá senzorů na principu změny rezistivity materiálu při změně teploty. Jako sledovaný materiál se používají kovy (Pt, Cu), nebo polovodiče (PTC, NTC). Externím zdrojem elektrické energie se na senzoru vynutí úbytek napětí, ten se pomocí AD (analog to digital) převodníku kvantifikuje a následným přepočtem jsme schopni určit měřenou teplotu.

Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost vlastního přesného AD převodníku pro každý senzor, a zajištění kvalitního vedení, které bude přesnost senzoru ovlivňovat jen minimálně. Pro náš systém předpokládáme měření teploty na třech místech. Měření venkovní teploty a měření teploty nahoře a dole ve vnitřních prostorech serverovny (kompenzace nerovnoměrně rozloženého tepla). Protože by byla potřeba pro měření těchto hodnot tří AD převodníků (kterými mikrokontrolér nedisponuje), rozhodli jsme se vydat jinou cestou.

Pro měření teploty využijeme tři teplotních snímačů MCP9808. Jedná se o integrovaný obvod, který sám zajistí změření teploty a její následný převod na digitální číslo. Naměřenou hodnotu můžeme pro mikrokontrolér získat přes sběrnici I2C. Každému snímači je možné nastavit tří bitovou adresu, takže lze pomocí dvou vodičů jedné sběrnice komunikovat až s 8 snímači. Deklarované rozlišení snímače je $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C/b}$ a typická přesnost $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Snímač měří v rozsahu napětí od -40 do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. [3]

Tyto parametry budou pro naši aplikaci naprosto dostatečné.

3.6 Snímače proudu

Použití akčních členů vybízí k implementaci snímačů, které by dohlíželi na jejich korektní chod a dokázali tedy uživatele informovat o problému s nimi dříve, než se celý systém dostane mimo optimální parametry.

Správný chod akčních členů budeme vyhodnocovat na základě měření proudu jimi protékajícího. K tomu využijeme proudový transformátor TA12-100, určený pro měření střídavého harmonického proudu v rozsahu od 0 do 5 A. Převodový poměr transformátoru je 1000:1 ($5\text{ A}=5\text{ mA}$) [6]

Proud procházející sekundárním vinutím vytvoří na snímacím rezistoru úbytek napětí, to kvantifikujeme pomocí AD převodníku a výpočtem určíme hodnotu proudu protékající skrze snímač.

Pro dohled na akční členy naprosto postačuje znát jen přibližné hodnoty protékajících proudů. Od systému tedy není očekávána vysoká přesnost měření,

3.7 Uživatelské rozhraní

Jako vhodné se jeví vybavit systém sérií ukazatelů, které by umožňovali informovat uživatele o aktuálním dění v celém systému. Tyto ukazatele je potřeba umístit vně termoizolační komory, aby se uživatel mohl informovat o stavu systému, aniž by narušil jeho izolovanost vůči vnějšímu prostředí.

Úvahou jsme dospěli k závěru, že pokud se systém dokáže s uživatelem dorozumívat pomocí informačního rozhraní, pak jen rozšířením systému o několik tlačítek, můžeme zařízení učinit značně univerzálnějším a doplnit jej o funkci změny požadovaných parametrů za běhu programu. Toto rozšíření učiní testování systému značně pohodlnější, aniž by se výrazně projevilo na ceně finálního produktu.

Pro komunikaci s uživatelem bude systém vybaven následovně:

- a) 1x červeno-zelená LED, pro detekci stavu systému (zelená OK, červená error)
- b) 2x červená LED pro indikaci stavu regulace (první LED chlazení, druhá topení)
- c) 1x LCD display 2x16 znaků, I2C komunikace
- d) 4x tlačítko (menu/set/+/-)

3.8 Logování dat

Byla by hloupost naměřená data bez užitku zahodit a je proto nutné zařízení rozšířit o funkci logování dat. Jelikož uvnitř naší serverovny již datová úložiště a server máme, přímo se nabízí, data uchovávat právě zde. Pro přenos dat na server tedy plánujeme využít síť LAN.

DPS mikrokontroléru bude připravena pro připojení kabelového modulu s RJ45 HR911105A a bezdrátového Wi-Fi modulu ESP8266

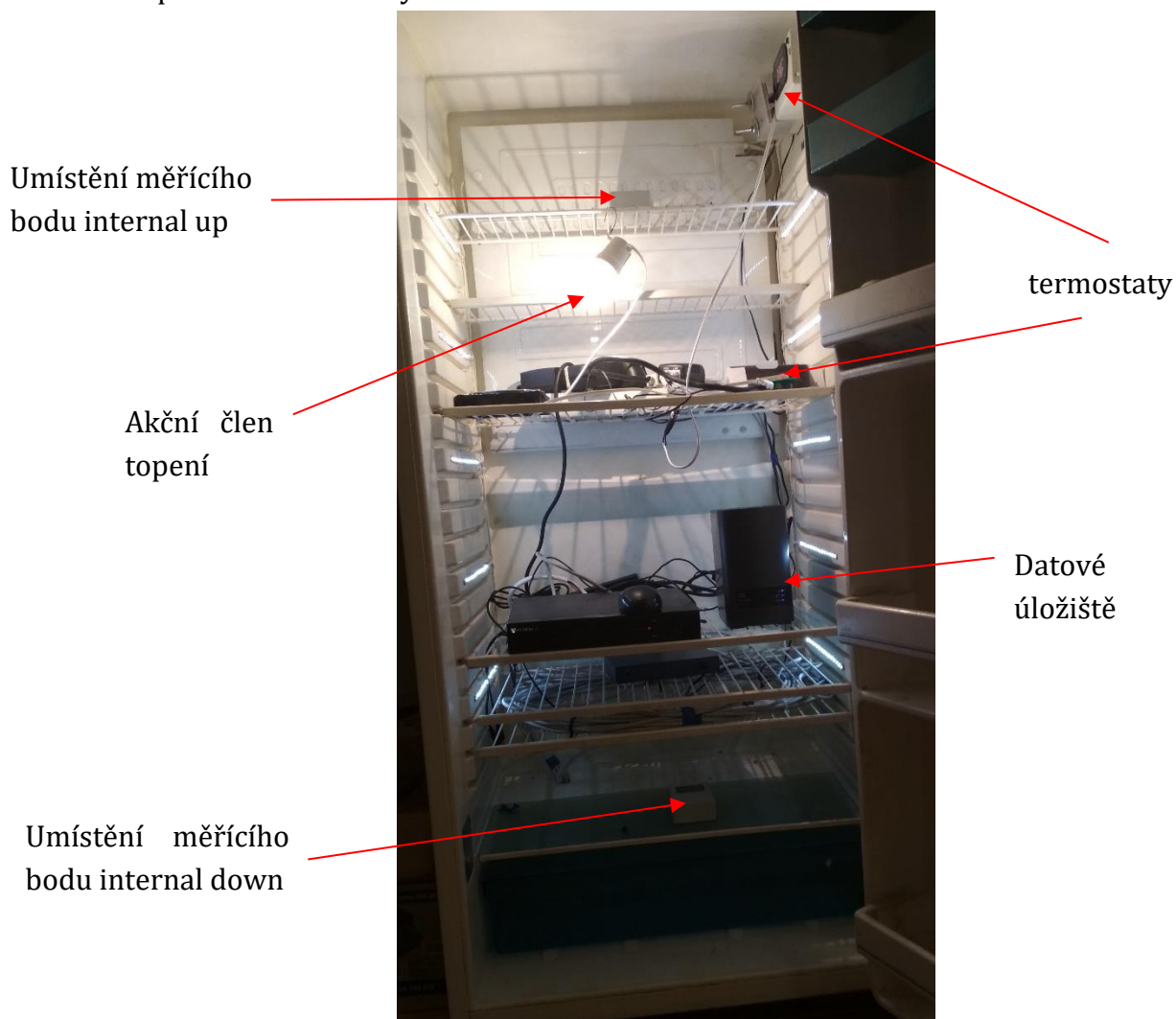
Pro komunikaci se serverem budeme preferovat Wi-Fi modul, jelikož zajišťuje galvanické oddělení našeho systému od ostatních citlivých zařízení, a v současné době není ve switchi žádný volný konektor.

3.9 Test konceptu

Pro vyzkoušení parametrů systému a chování akčních členů, dříve než začneme s návrhem, jsme sestavili testovací zapojení. To obsahuje skříň serverovny a oba akční členy, ale namísto námi navrženého regulátoru, použijeme dočasně k jejich řízení dva komerčně vyráběné moduly digitálních termostatů (každý akční člen má vlastní)

Ty se dají nastavit od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, a jsme tak schopni uvnitř komory nastavit a udržet téměř libovolnou teplotu. Každý termostat je vybaven vlastním NTC měřicím teploměrem. Hysterezi spínání můžeme nastavit od $0,5$ do $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takto zapojený systém je již schopen částečně plnit svou funkci, a proto jsme do

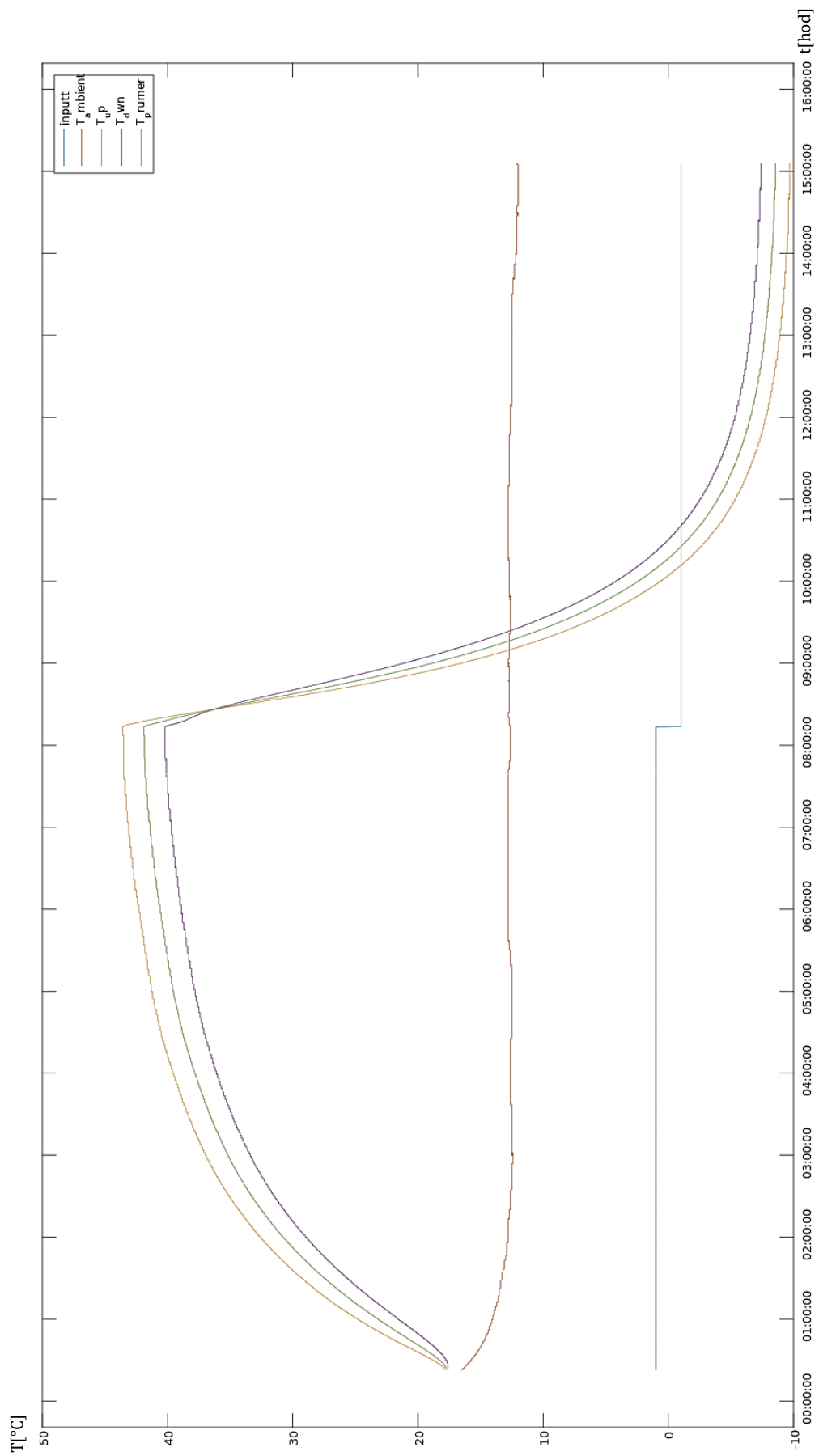
lednici přesunuli datové úložiště natrvalo. Až bude vyroben finální systém, vymění se pouze řídicí obvody.



Obr. 5 Rozložení serverovny pro test konceptu

Pro odladění správného chování nastavené teploty jsme určili 3 měřící body, na které jsme umístili teplotní data-logery firmy COMET S0110E, který má deklarovanou nejhorší přesnost $\pm 0,8$ °C. Ve vnitřním prostoru teplotní komory jsou umístěny dvě záznamová zařízení. Jedno nahoře, druhé dole, třetí data-logger je umístěn mimo lednici a slouží pro zaznamenávání okolní teploty v místnosti.

Abychom získali představu o odezvě systému a o limitech, které jsme schopni nastavit, provedli jsme měření odezvy na jednotkový skok pro oba akční členy. Z grafu Obr. 6 můžeme vidět, že systém je schopen dosáhnout jakoukoliv teplotu v rozmezí od $-8,55$ °C do 42 °C, a není ovlivňován okolní teplotou. (Soubor s naměřenými hodnotami je kvůli počtu hodnot přiložen pouze elektronicky) Grafickou metodou jsme odhadli časovou konstantu τ topného členu na 1h 45min a chladícího členu na 1h 15min.

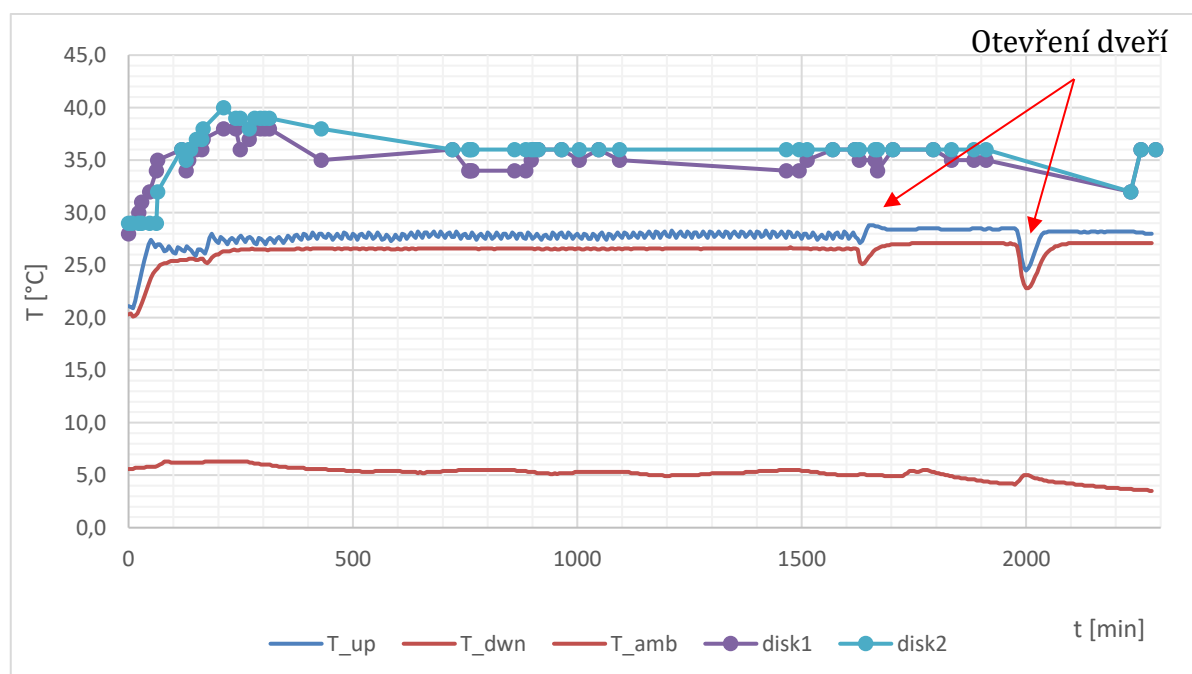


Obr. 6 Odezva systému na jednotkové skoky

Z dalšího grafu (Obr. 7) můžeme vypožorovat chování systému v optimálním režimu. Průběhy teplot disk1 a disk2 jsou data získaná ze S.M.A.R.T. dat disků. Při vyhodnocování těchto dat je třeba mít na paměti, že tyto data jsou naměřena s rozlišením na celé stupně a jedná se proto spíše o orientační hodnoty. V čase $t = 500$ min jsme zkoušeli různé konfigurace nastavení, než bylo dosaženo nejlepších parametrů.

Dá se odpozorovat trend, kdy skutečná teplota disků je o cca $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšší než teplota vzduchu v lednici. Tímto jsme tedy ověřili, že teoretické hodnoty získané z výzkumů si odpovídají. Při nastavené teplotě uvnitř lednice na $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ (teo. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) a hysterezi $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosahujeme teploty disků cca $35\text{-}36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (teo. $35\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Rovněž můžeme z naměřených dat vypožorovat, že dvoustavová regulace s hysterezí naprosto postačuje, k udržení konstantní teploty. [9]



Obr. 7 Závislost mezi teplotou disků a jejich okolím

3.10 Blokové schéma konceptu

Na základě poznatků z teoretické přípravy a z práce na prototypu můžeme přistoupit k návrhu finálního vestavného systému. Obr. 8 znázorňuje blokové schéma navrženého systému.

Můžete si povšimnout, že celý systém je silně modulární a univerzální. Lze jej tedy aplikovat do širokého spektra použití. Zjistíme-li, v kterémkoli okamžiku, že je pro nás určitý blok redundantní, stačí příslušný blok odpojit, nebo ho vůbec nepřipojit a ušetřit tak na ceně.

Systém komunikuje s okolím pomocí tří hlavních rozhraní. Přímo pomocí displeje, signálních led a ovládacích tlačítek, nepřímo pomocí sítě LAN a pro debug vysílá zprávy o svém stavu skrze UART rozhraní. Pro připojení do sítě LAN bude systém přichystán pro komunikaci skrze dva možné moduly. První z nich bude zajišťovat připojení systému přímo do sítě pomocí ethernet kabelu (nebudeme využívat ani implementovat, jedná se jen o přípravu pro budoucí rozšíření). Druhý modul se k síti bude připojovat prostřednictvím Wi-Fi. Skrze LAN síť potom celé zařízení komunikuje se serverem, který se postará o uložení záznamů na disk.

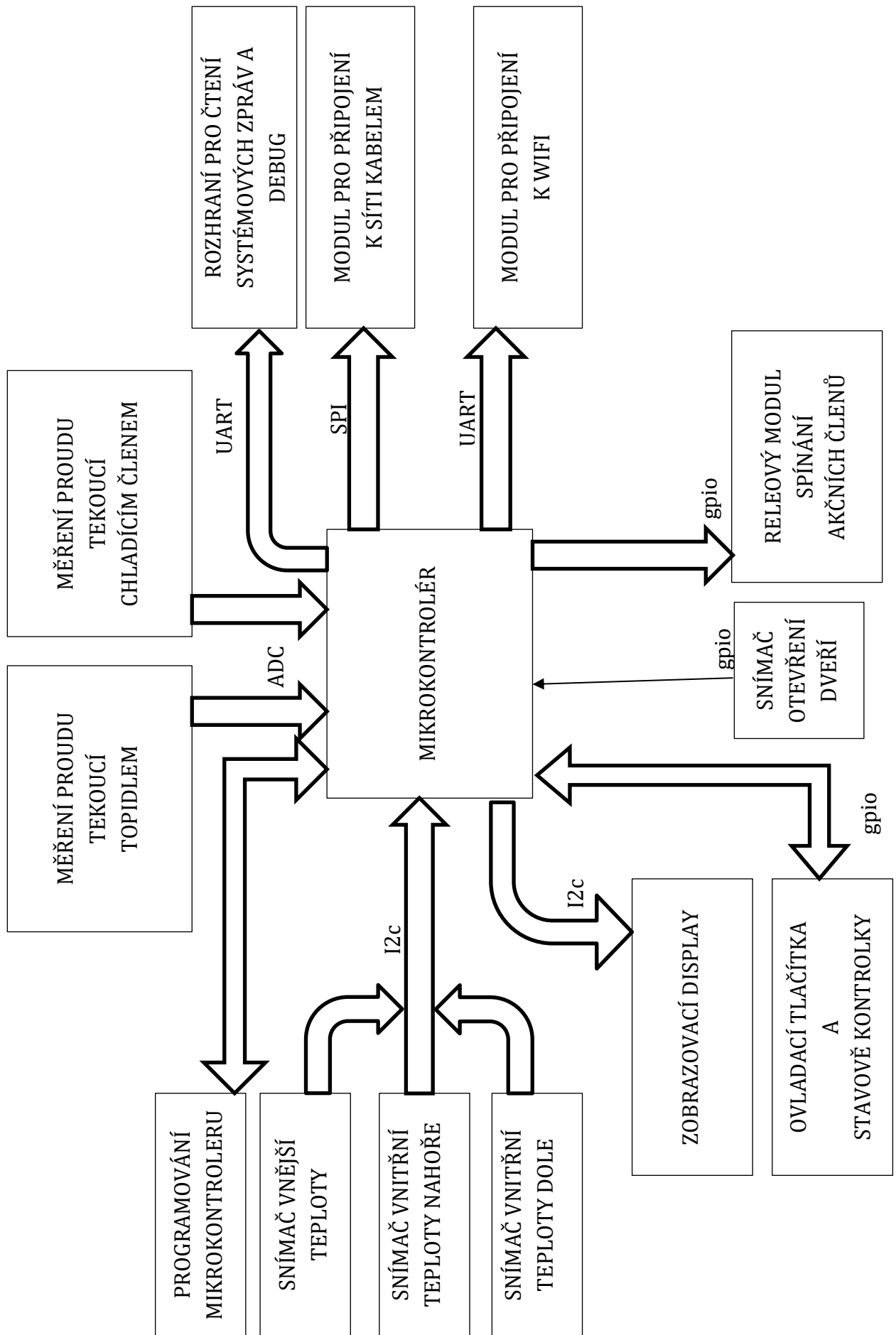
Na displeji můžeme kontrolovat aktuální teplotu nebo měnit požadovanou teplotu v systému. Bude-li si to situace žádat, lze možnosti displeje rozšířit o téměř libovolný výpis.

Aby bylo zařízení galvanicky odděleno od akčních členů, které fungují na síťovém napětí, budeme je ovládat prostřednictvím relé modulu. Děje, které systém řídí, jsou velmi pomalé a nevyžadují spínání velkých proudů, neměl by se zde tedy objevit žádný problém.

Systém bude také doplněn o měření proudu pro oba akční členy. Tímto způsobem můžeme jednoduše monitorovat spotřebu akčních členů a hlavně můžeme kontrolovat i jejich „zdraví“ Pokud tedy například praskne vlákno žárovky, systém to sám zjistí a může si teoreticky přes server požádat o nápravu. Stejně tak pokud by došlo k zadření kompresoru lednice, může ho systém okamžitě odpojit.

Dalším kontrolním vstupem je spínač zavření dveří. Tento vstup můžeme logovat a data použít pro větší přehlednost při vykreslování průběhů teplot.

Posledním blokem připojeným k mikrokontroleru jsou teploměry. Na základě předešlých měření při testu konceptu předpokládáme použití tří. Není to ovšem nutností, a odhadujeme, že celý systém by bylo možno řídit i jen s jedním, ač za cenu snížené přesnosti. [9]



Obr. 8 Blokové schéma finálního návrhu

4 NÁVRH MIKROPROCESOROVÉHO SYSTÉMU

System bude navržen dle koncepce diskutované v předchozí kapitole. Pro návrh schématu a tvorbu DPS bude využito programu KiCad, který disponuje užitečnou funkcí vytvoření 3D modelu.

4.1 Mikrokontrolér

Pro správný chod systému je nezbytně nutné vybrat správný mikrokontrolér.

Prvním krokem v honbě za určením toho správného, je určit, kolika bitový mikrokontrolér budeme potřebovat. Protože se předpokládá, že budeme provádět větší množství výpočetních operací a že budeme pracovat s čísly většími než 255, můžeme zahrnout všechny 8b varianty mikrokontrolérů. 16b mikrokontroléry by sice pravděpodobně postačovali, nicméně stále by bylo třeba mít se na pozoru, aby při některých matematických výpočtech nedošlo k přetečení registrů. Navíc nejsou tolik rozšířené a jejich pořizovací cena bývá srovnatelná s 32b typy. Na základě těchto poznatků, jsme se rozhodli vybrat mikrokontrolér právě z této poslední skupiny.

Dalším, neméně důležitým rozhodnutím je vybrat výrobce/typ. Nejrozšířenějšími možnostmi jsou mikrokontroléry ATMEL, PIC a STM. My se rozhodli využít mikroprocesor STM, díky jejich rostoucí popularitě a možnosti debugování programu při běhu přímo na čipu.

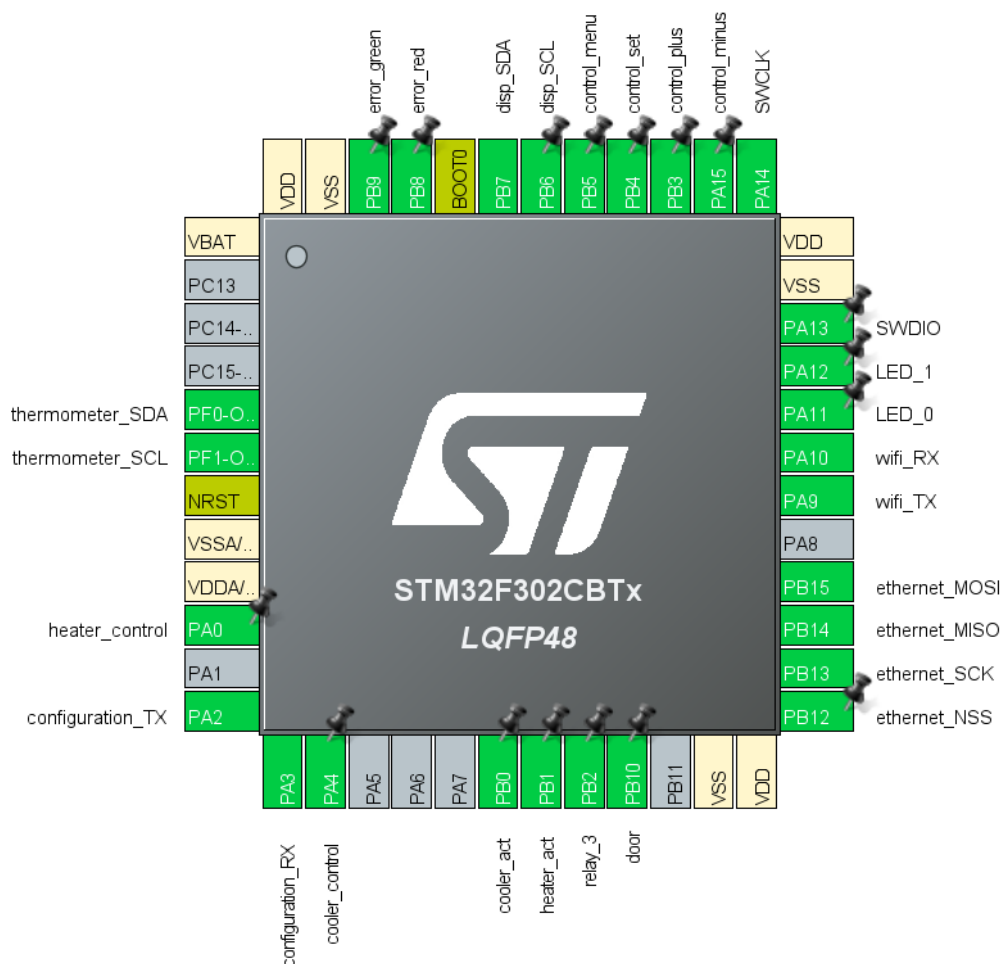
Když už známe výrobce a typ architektury, je nutné určit počet potřebných vývodů a komunikačních rozhraní. Také je potřeba zohlednit potřebu AD a DA převodníků. Výběr nám velmi usnadní použití programu STM32CubeMX, který je vyvíjen firmou STMicroelectronics právě pro práci s jejich mikrokontroléry. Po založení nového projektu vybereme záložku „MCU selector“ a vyspecifikujeme zde naše požadavky. Software nám vybere všechny mikrokontroléry, které je splňují. Po nahlédnutí do blokového schématu (Obr. 8), zjistíme, že potřebujeme alespoň dva AD převodníky, dvě I2C rozhraní, dvě rozhraní UART, jedno rozhraní SPI a 10 GPIO pinů. Jako pouzdro čipu jsme vybrali LQFP48. Na vnitřní paměti nemáme žádné speciální požadavky, jelikož nebudeme pracovat s žádnými rozsáhlými datovými strukturami. Můžeme tedy vybrat nejmenší možné paměti, u kterých se předpokládá nejnižší cena. Na základě takto vyfiltrovaných dat jsme jako náš mikrokontrolér vybrali STM32F302CBTx. [23][22][21][20][19]

Po vybrání mikrokontroleru z nabídky nám software zobrazí pohled na pouzdro čipu, a my můžeme jednotlivým vývodům přidělit funkci a pojmenovat si je. Toto je velmi užitečný nástroj, jelikož nám umožňuje kontrolovat rozložení vývodů pro následnou tvorbu DPS.

Na záložce „Clock configuration“ si můžeme nastavit vnitřní rozvody hodinového signálu a v případě že nám vnitřní oscilátor nepostačuje, můžeme určit

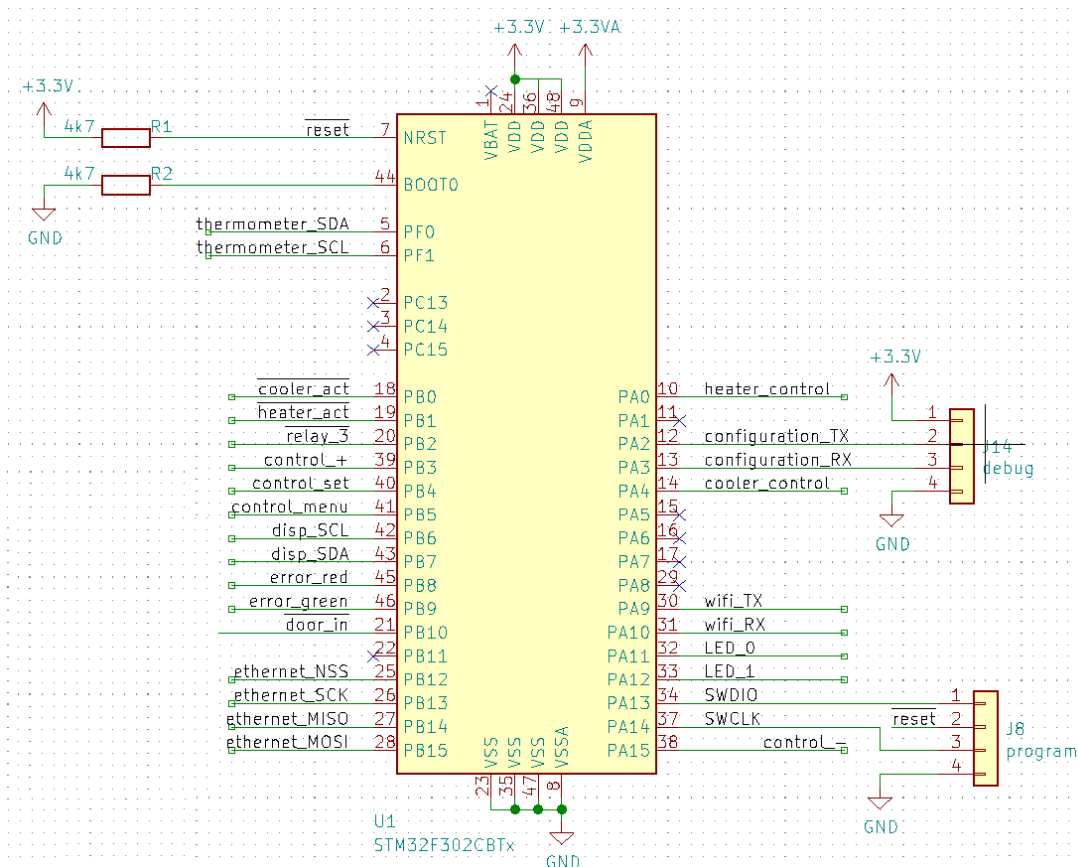
potřebné parametry externího zdroje hodinového signálu. Jelikož námi řešený systém nevyžaduje žádné speciální nastavení, použijeme interní oscilátor.

Další užitečnou vlastností pro vývoj DPS je možnost aktivace interních pull up/pull down rezistorů jednotlivých GPIO pinů. My jsme se je ovšem rozhodli nevyužít a zařízení jsme vybavili rezistory externími.



Obr. 9 Rozložení pinů mikrokontroléru vytvořené v programu STM32CubeMX

Když již máme piny rozloženy, je na čase začít kreslit obvodové schéma. Ke správné funkci, musíme čipu přivést napájení +3,3V a GND ze zdroje. Každý napájecí pin VDD je potřeba vybavit vlastním filtračním kondenzátorem. Jejich hodnotu určíme na základě zkušeností na 100 nF (minimální U 5 V). Jako další je třeba připojit negovaný reset NRST pomocí pull up rezistoru k napájení a skrz pull down rezistor přizemnit vývod BOOT0. Hodnoty obou rezistorů určíme na základě zkušeností na 4,7 k Ω (bez výkonové ztráty). Pro zajištění větší přesnosti AD převodníků, nepojíme vstup referenčního napětí VDDA s napájecím napětím VDD, ale obvod rozšíříme o zdroj přesného referenčního napětí. Pak již jen stačí jednotlivé piny podle Obr. 9 připojit ke konektorům pro jednotlivé moduly, a vyvést konektor pro programování a debugging.

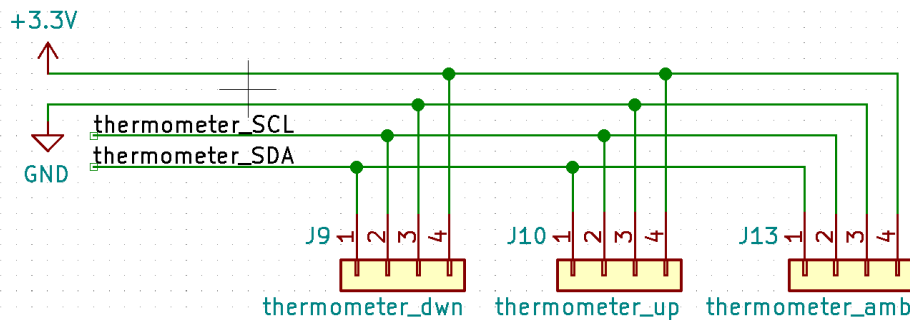


Obr. 10 Schéma zapojení mikrokontroleru

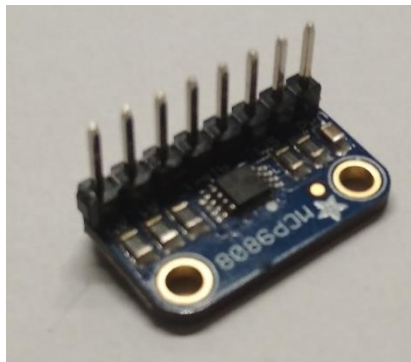
4.2 Měření teploty

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (3.5), původní myšlenkou bylo využití platinových, nebo NTC snímačů. Použití těchto druhů snímačů by ovšem vyžadovalo použití mikrokontroléru s velkým množstvím ADC, nebo použití externího ADC. Vzhledem ke skutečnosti, že vybraný mikrokontrolér nedisponuje dostatečným počtem těchto převodníků a externímu převodníku jsme se snažili vyhnout, bylo rozhodnuto použít precizního teplotního senzoru MCP9808 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, který komunikuje přes I2C a dovoluje na jednu sběrnici umístit až 8 teploměřů.

Protože je potřeba umístit senzory daleko od sebe, nelze je integrovat na hlavní řídicí DPS. Výroba speciální DPS je ovšem nákladná a proto jsme použili již hotové komerční řešení firmy ADAFRUIT, které stačí k řídicí desce připojit jen pomocí konektoru přes prodlužovací vodiče. Senzory komunikují po sběrnici a nevyžadují žádné zvláštní pomocné obvody. Na DPS senzoru je třeba propojením potřebných adresních pinů A0-A2 s napájecím pinem (DPS vybavena pull down rezistory, netřeba přizemňovat) nastavit adresu zařízení. Pak již jen postačuje paralelně propojit připojovací konektory, přivést na ně napájecí napětí 3,3V a GND, a datové vodiče propojit s mikrokontrolerem.



Obr. 11 Schéma propojení teplotních senzorů



Obr. 12 Teplotní snímač MCP9808 na DPS firmy ADAFRUIT

4.3 Měření proudu

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (3.6), pro měření proudu bude využito proudového transformátoru TA12-100 [6] (ve schématu připojen skrze konektor `i_trans_x`). Ten umožňuje měřit proud spotřebičem při síťovém napětí, ale přitom mít měřicí systém galvanicky oddělen.

Provláčením ovládaného fázového vodiče skrze transformátor, začne proud tekoucí tímto vodičem (primární vynutí) vynucovat tok N (parametr proudového transformátoru, v našem případě platí $1/1000$) násobku tohoto proudu skrze sekundární vynutí. Pokud tedy k tomuto vynutí připojíme tzv. „sence rezistor“ (snímací rezistor) začne protékající proud vytvářet na tomto rezistoru úbytek napětí. Tento úbytek změříme AD převodníkem a za pomoci matematického přepočtu můžeme určit hodnotu proudu tekoucího do spotřebiče.

Při návrhu sence rezistoru je třeba znát rozsah proudů, které budeme měřit, jaký maximální úbytek napětí na rezistoru můžeme AD převodníkem detekovat a jaké je rozlišení AD převodníku.

Pro naše zařízení jsme měřením zjistili (viz. 3.2), že nejvyšší efektivní ustálená hodnota proudu má hodnotu $0,76\text{ A}$, což odpovídá maximální hodnotě $1,075\text{ A}$ (2). Při sepnutí bude ovšem náběhový proud několikanásobně vyšší, a je tedy vhodné nechat si rezervu. Pro zajištění co nejvyšší univerzálnosti našeho

výrobku a máje na paměti, že námi použité 12b AD převodníky mají velkou citlivost, rozhodli jsme se využít celého rozsahu proudového transformátoru tj. 0-5 A. Z toho vyplývá, že maximální proud tekoucí skrze sence rezistor bude 5 mA (3).

Maximální snímatelné napětí AD převodníkem je dáno hodnotou referenčního napětí (3,3 V). Je ovšem potřeba myslet na to, že AD převodníkem měříme okamžitou hodnotu úbytku napětí na rezistoru, které bude mít harmonický průběh. To znamená, že polovinu doby bude na rezistoru napětí záporné, které neumíme změřit. Abychom toto eliminovali, přičteme k úbytku napětí na rezistoru polovinu referenčního napětí pomocí odporového děliče napětí. Pokud pak nastavíme sence rezistor tak, aby maximální proud na něm vyvolal napětí rovno polovině referenčního napětí, začnou se okamžité hodnoty přičítat/odčítat k napětí na děliči a ADC dokáže měřit zápornou půlvlnu jako hodnoty menší než polovina referenčního napětí.

Když už jsme tedy zjistili všechny potřebné hodnoty, můžeme pomocí vzorce (4) určit hodnotu sence rezistoru na 330 Ω . Nejvyšší možný výkonový úbytek je 8,25mW-> použijeme R0805. Jelikož hodnota tohoto rezistoru bude použita jako přepočtení konstanta, je potřeba použít rezistor s nízkou tolerancí (0,1 %). Dělič napětí bude tvořen dvěma rezistory 1 k Ω (výkonová ztráta 2,72 mW -> R0805). Pro co nejvyšší přesnost měření oba s co nejmenší výrobní tolerancí (0,1%)

Protože zkrat na spotřebiči by měl za následek vyvolání obrovského proudového nárazu, který by teoreticky mohl poškodit mikrokontrolér, doplnili jsme zapojení pro měření proudu ještě o ochranu obousměrnou TSV (transient voltage suppression) diodu uclamp 3301d. Ta dokáže tyto výkyvy pohltit, a zařízení ochránit.

Přepočet veličin pro harmonický průběh:

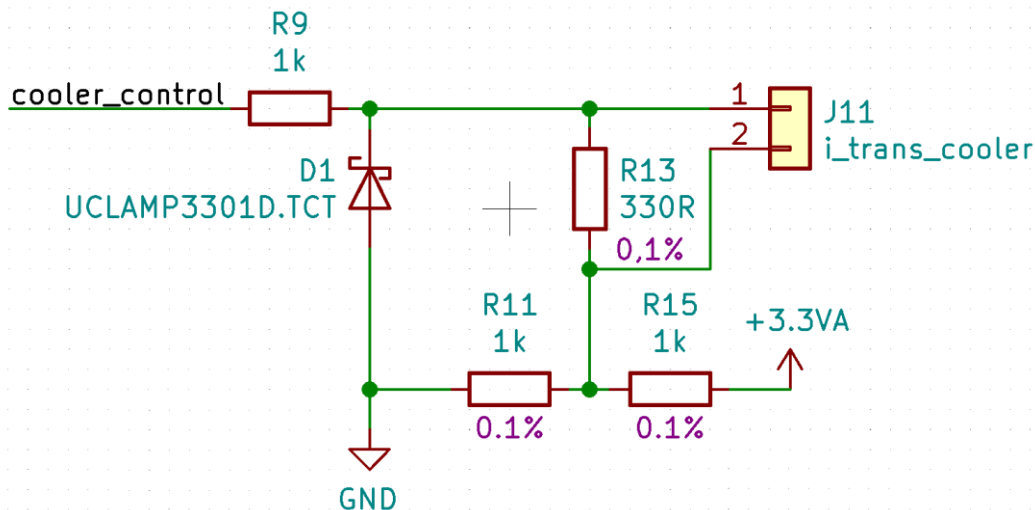
$$veličina_{maximální} = veličina_{efektivní} \cdot \sqrt{2} \quad (2)$$

Vztah mezi měřeným proudem ($I_{m\check{r}en\check{y}}$) a proudem tekoucím sekundárním vynutím proudového transformátoru (I_{sence}):

$$I_{sence} = I_{m\check{r}en\check{y}} \cdot N \quad (3)$$

Výpočet sence rezistoru (R_{sence}) pro proudový transformátor; nejvyšší hodnota proudu rezistorem- $I_{sence-max}$ (5 mA), referenční napětí- U_{ref} (3,3 V):

$$R_{sesn} = \frac{\frac{1}{2}U_{ref}}{I_{sence - max}} = \frac{\frac{3,3}{2}}{5 \cdot 10^{-3}} = 330 \Omega \Rightarrow 330R (E12) \quad (4)$$

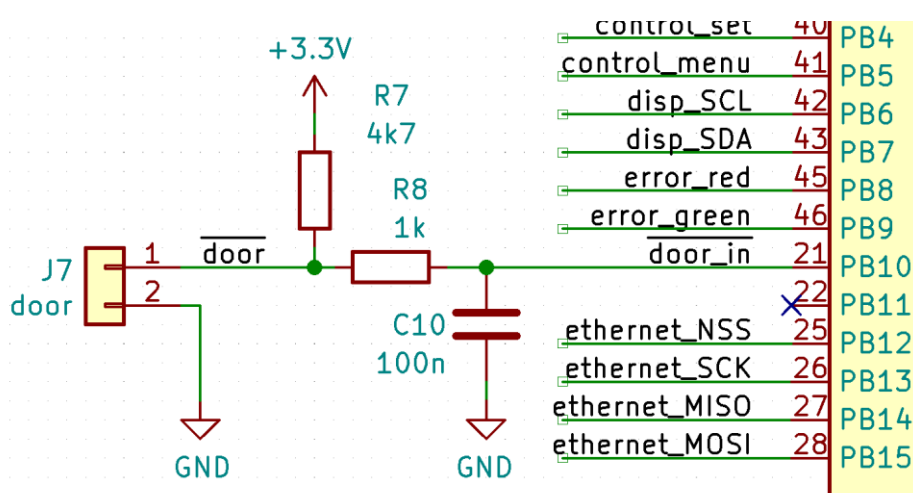


Obr. 13 Schéma zapojení jednoho kanálu pro měření proudu

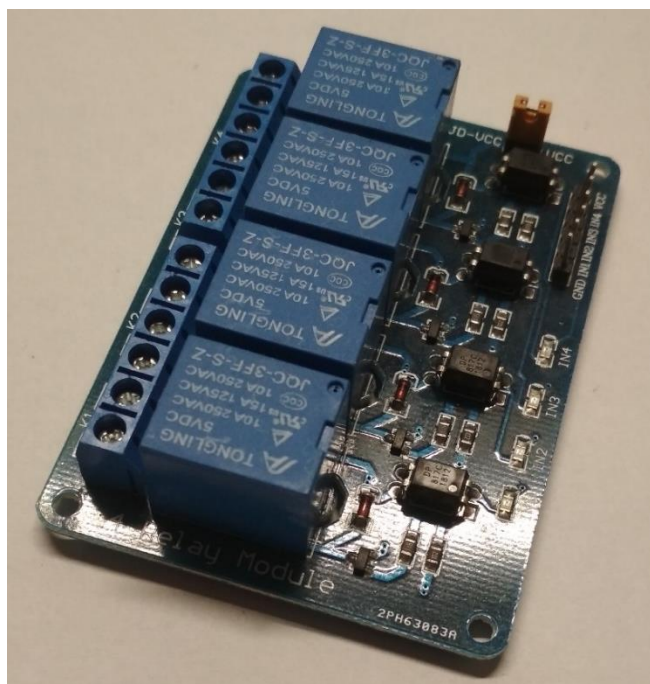
4.4 Ovládání akčních členů

Pro ovládání akčních členů bude sloužit čtyř-kanálový opticky izolovaný reléový modul [10]. Tento modul zajistí galvanicky oddělené spínání akčních prvků. První dva kanály jsou využity pro spínání akčních členů, třetí relé je ponecháno do rezervy.

Poslední relé je využíváno pro rozsvícení osvětlení uvnitř serverovny při otevření dveří. Rozpínač (ve schématu konektor-door), který slouží jako senzor, je připojen mezi zemí a reléovým modulem. Současně je skrze ochranný rezistor 1 k Ω , připojen na vstup mikrokontroléru. Tento vstup je pomocí pull up rezistoru 4,7 k Ω připojen na napájecí napětí, a snímač tak komunikuje pomocí inverzní logiky. Pro potlačení záchvěvy napětí snímače otevření dveří, je ke vstupu mikrokontroléru připojen filtrační kondenzátor 100 nF.



Obr. 14 Připojení snímače otevření dveří k systému



Obr. 15 Reléový modul

4.5 Komunikační a informační rozhraní

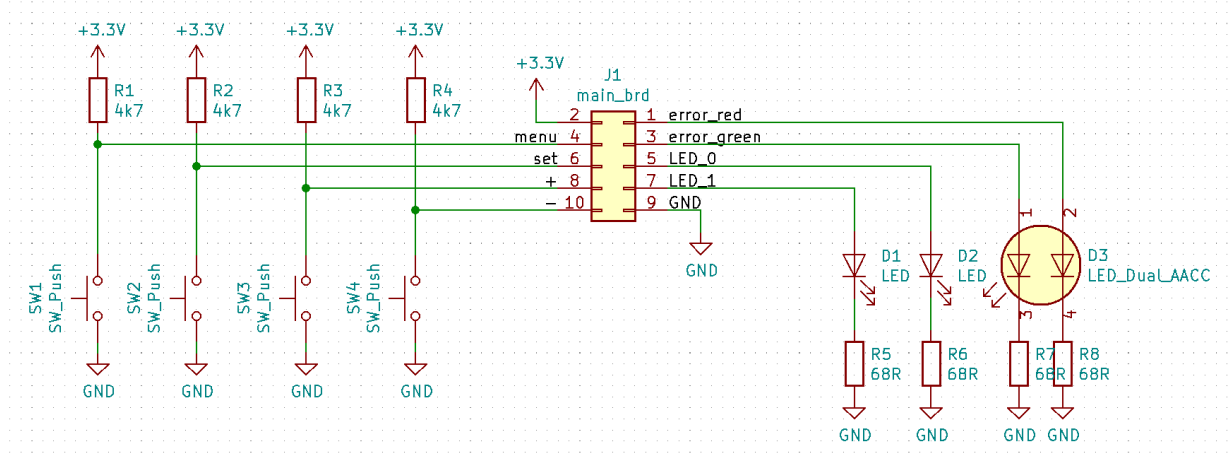
System bude vybaven pro komunikaci s uživatelem LCD displejem 2x16 znaků. Data pro zobrazení se posílají pomocí I2C sběrnice. Modul vyžaduje napájení +5 V.

Zároveň navrhne DPS, která tuto komunikaci rozšíří o 2 indikační LED sepnutí chladícího a topného akčního prvku, a dvoubarevnou stavovou LED (červená/zelená), která bude signalizovat správný chod nebo poruchu systému. Na této DPS bude také čtyř tlačítková klávesnice (menu, set, +, -), pomocí které může předávat uživatel systému pokyny.

Všechna tlačítka jsou připojena skrz pull up rezistory 4,7 k ω na napájecí napětí. Mikrokontrolér je vybaven pro každý vstup ochranným rezistorem 1 k ω , filtrační kondenzátory proti záchvěvům tlačítek nebyli použity, ošetří se softwarově. Hodnoty předřadných rezistorů byly stanoveny pomocí rovnice (5) na 68 ω (výkonová ztráta 40 mW -> R0805).

Výpočet hodnoty předřadného rezistoru pro omezení proudu Led (úbytek napětí na LED- U_f (2 V), proud tekoucí LED- I_f (20 mA), napájecí napětí- U_{cc} (3,3 V))[3] [5]:

$$R = \frac{U_{cc} - U_f}{I_f} = \frac{3,3 - 2}{20 \cdot 10^{-3}} = 65 \Omega \Rightarrow 68R (E12) \quad (5)$$



Obr. 16 Schéma komunikačního a informačního modulu

4.6 LAN připojení

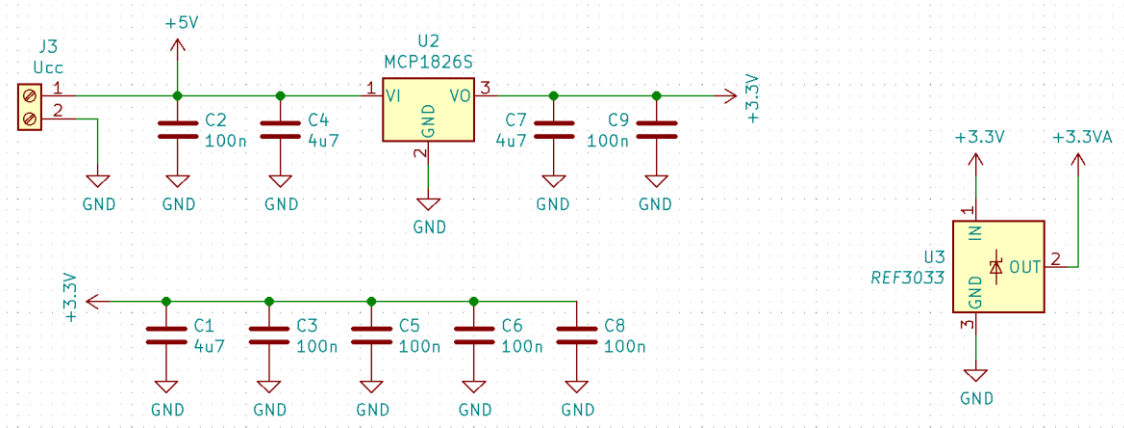
Pro připojení do sítě LAN je systém primárně vybaven Wi-Fi modulem ESP8266. Modul komunikuje s mikrokontrolérem pomocí USART. Dle informací z katalogových listů [12][13][14][15], vyžaduje modul napájecí napětí +3,3V a aby se spustil, je třeba propojit piny reset a chip enabled s napájecím napětím

Jakožto sekundární možnost připojení k síti LAN (pomocí ethernet kabelu), přichystáme našemu zařízení konektor pro připojení modulu HR911105A. Ten ovšem my nebudeme používat, ani připojovat. S mikrokontrolérem by komunikoval pomocí SPI rozhraní.

4.7 Napájení

Elektrická energie pro chod zařízení je dodávána následovně. Je využito připojovacího síťového kabelu původní lednice. Uvnitř serverovny je k tomuto kabelu připojen pomocí wago svorek pro slané vodiče jako prozatímní řešení prodlužovací kabel s pěti zásuvkami. Zároveň jsou zde připojeny k síťovému rozvodu akční členy, které pak ale prochází reléovým modulem. Do zásuvky prodlužovacího kabelu je připojen síťový napaječ 5V, 1A, který přes šroubovací svorkovnici napájí celý systém. Na DPS, se takto získané napětí převádí pomocí step down měniče MCP1826S na hodnotu 3,3 V. Podle specifikace katalogového listu [16] se napětí před a za měničem filtruje pomocí kondenzátorů hodnoty 100 nF a 4,7 uF. Tyto dva zdroje poté napájí celý systém.

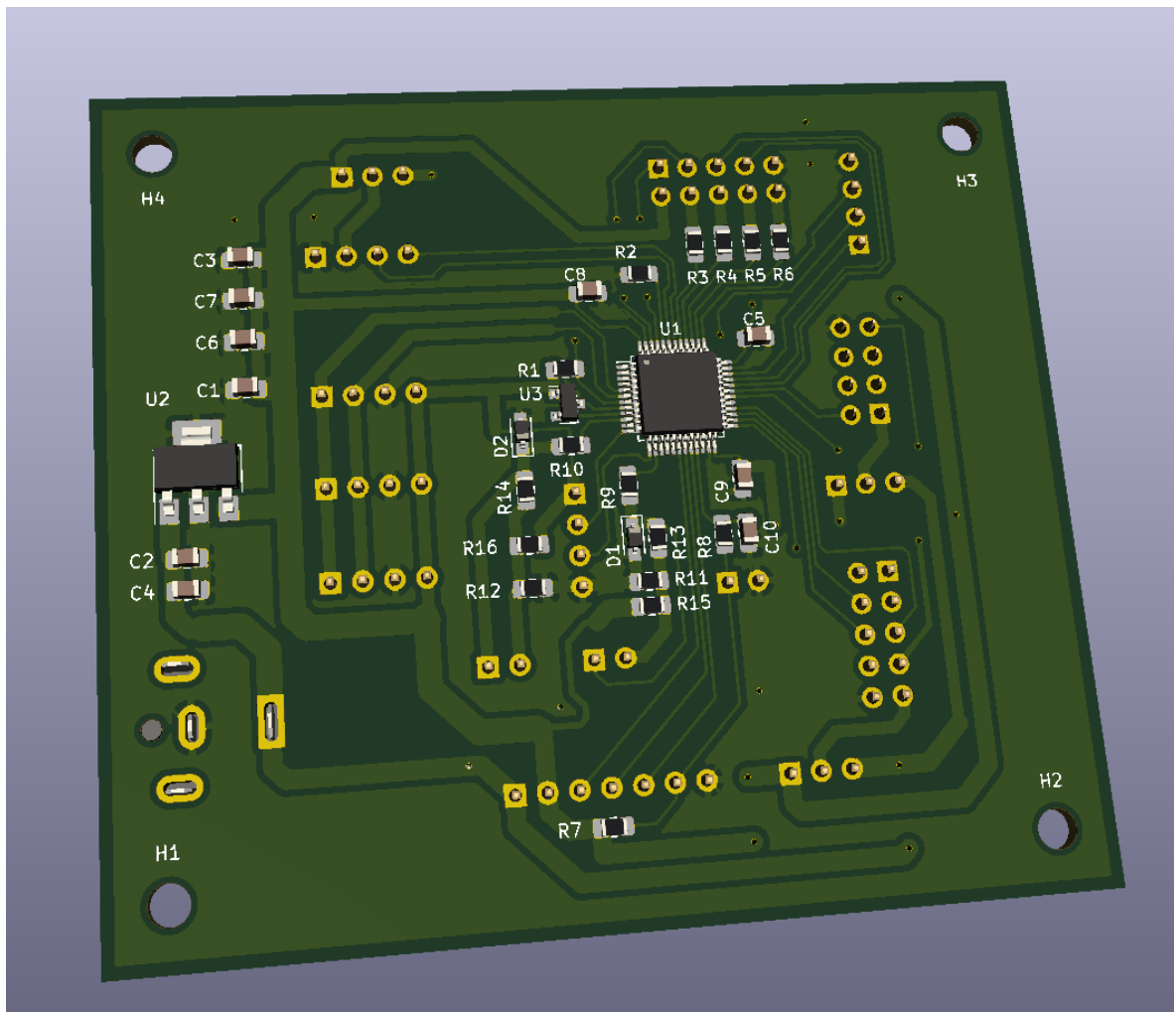
Pro poskytnutí přesného referenčního napětí použitého při měření proudu, je použito referenčního zdroje napětí REF3033 [17].



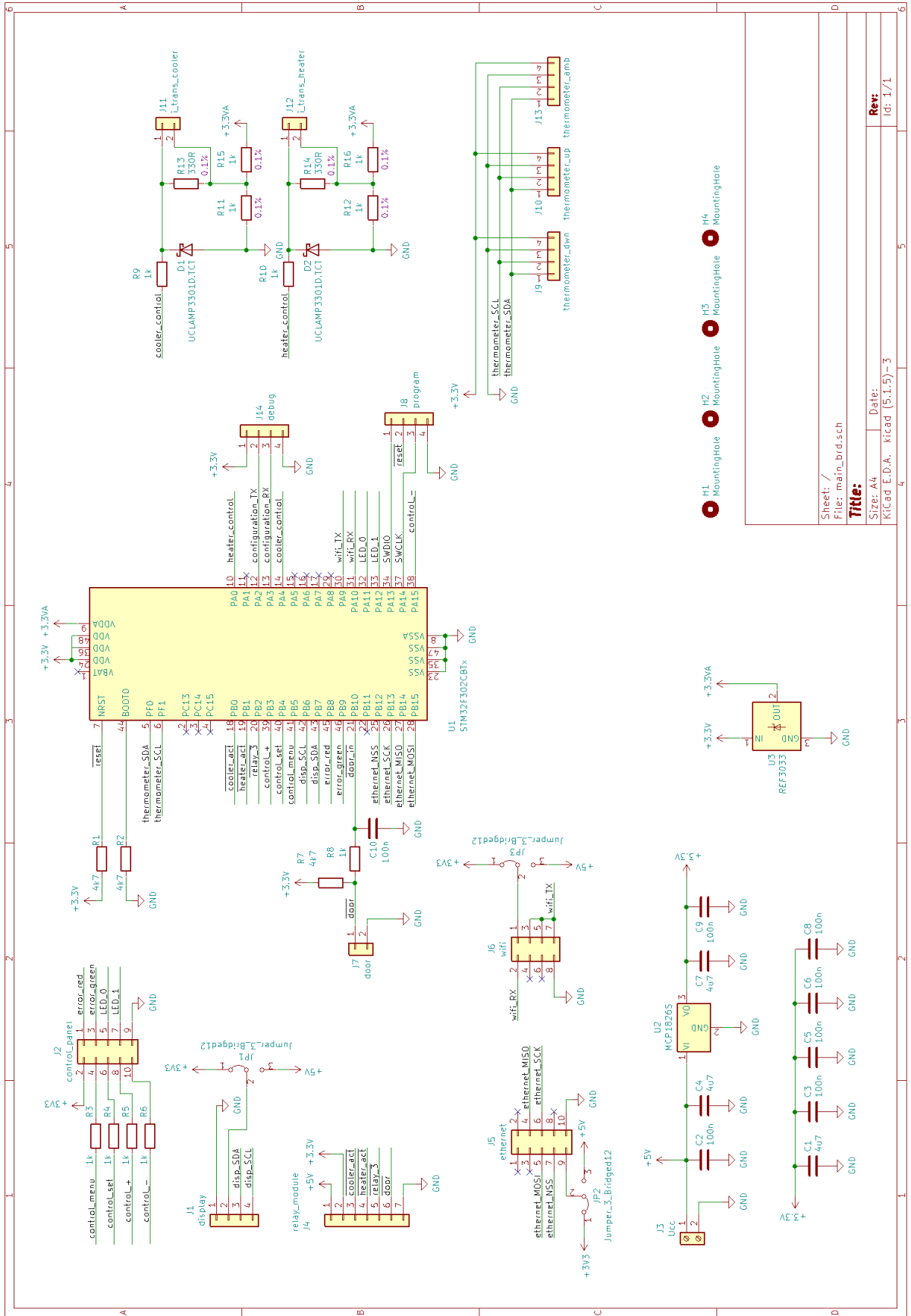
Obr. 17 Schéma napájecího obvodu

4.8 Výstupy návrhu

Jelikož plány cest DPS nedisponují dostatečnou ilustrační hodnotou, přikládám zde pouze 3D modely návrhu DPS vygenerované programem KiCad. Plány PCB pro výrobu a osazovací plán je doložen v příloze na konci tohoto dokumentu.



Obr. 18 Pohled na spodní stranu hlavní řídicí DPS



4.9 Rozpiska součástek

Tab. 2 Stručný výpis z tabulky použitých součástek

typ	hodnota	označení	ks
D	červená	LH R974-LP-1	2
D	červená+zelená	LTST-C155GEKT	1
R	68R	0805S8J0680T5E	4
R	330R	AR05BTCW3300	2
R	1k	AR05BTCW1001	4
R	1k	0805S8J0102T5E	7
R	4k7	0805S8J0472T5E	2
C	100n	CL21B104KBCNNNC	7
C	4u7	CL21A475KPFNNNG	3
C	3,3V	MCP1826S-3302E/DB	1
uP		STM32F302CBTx	1
reference	3,3V	REF3033AIDBZT	1
transil	3,3V	UCLAMP3301D.TCT	2
SW		PTS645SH50SMTR92 LFS	4
J	5,5x2,1mm	4840.2202	1
dutinová lišta	2x04	DS1023-2*4S21	1
koliková lišta	2x05	ds1021-2-5sf11	3
koliková lišta	1x04	DS1021-1*4SF1-1	6
koliková lišta	1x03	DS1021-1*3SF1-1	3
koliková lišta	1x02	DS1021-1*2SF1-1B	3
umber		JUMPER-B	3
I transformátor	1/1000	TA12-100	1
modul	teploměr	MCP9808	3
modul	LCD 16X2 Znaků	IIC I2C Display LCD 1602 16X2 Znaků LCD Modul Modrý	1
modul	SPI to ethernet	Ethernet LAN modul	1
modul	UART to wifi	ESP8266 ESP-01	1
modul	rele_modul	4ch rele modul	1
DC zdroj	5V/3A	SYS1449-1505	1

5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

5.1 Firmware mikrokontroléru

Firmware pro obsluhu mikrokontroléru je napsán v jazyku C. Software využívá knihovny HAL (Hardware Abstract Layer), kterou pro své mikrokontroléry vyvíjí společnost STMicroelectronic. Tato knihovna zajišťuje abstrakci nad registry mikrokontroléru pomocí API (Application programming interface) což značně zjednodušuje práci při vývoji.

K počítači se mikrokontrolér připojuje pomocí nástroje ST-LINK (v současnosti již 3 verze), který kromě programování mikrokontroléru zajišťuje i možnost lazení programu přímo na čipu.

Pro prvotní inicializaci firmwaru využijeme konfigurace, kterou jsme již vytvořili v programu STM32CubeMX (4.1). Program na základě těchto parametrů vygeneruje základní nosný kód, ve kterém zařídí přidání HAL knihovny a inicializaci všech specifikovaných rozhraní.

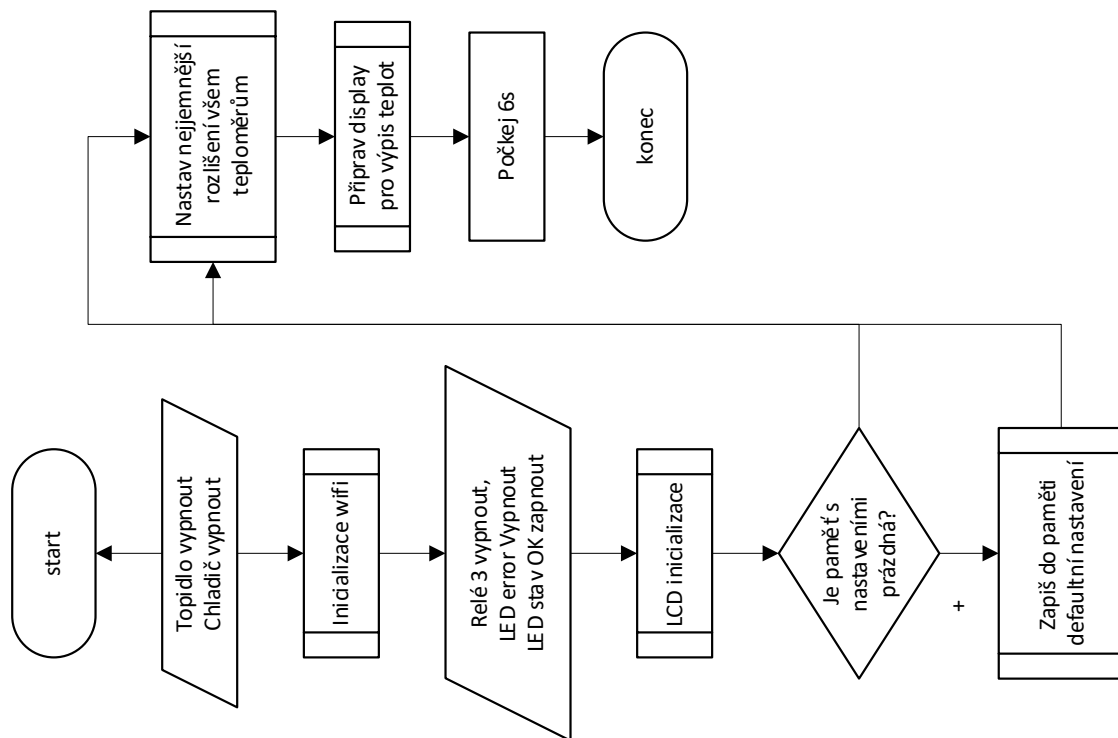
Pro přenos programu do mikrokontroléru, a pro možnost procházet vnitřní paměť mikrokontroléru použijeme program firmy STMicroelectronic STM32CubeProgrammer.

Abychom odlišili námi vytvořený kód od kódu generovaného prostředím STM32CubeMX, používáme soubor main pouze k volání našich funkcí. Při startu voláme inicializační funkci `Temperature_control_and_monitoring_system_init`, a jakmile se dostaneme do nekonečné smyčky `while`, voláme obslužnou rutinu `Temperature_control_and_monitoring_system`, která zajišťuje funkci našeho systému. Pro obsluhu lcd displeje používáme knihovnu „i2c lcd“ [18], jelikož není potřeba objevovat již objevené. Pro obsluhu teplotních senzorů MCP9808 [3] jsme vytvořili knihovnu vlastní.

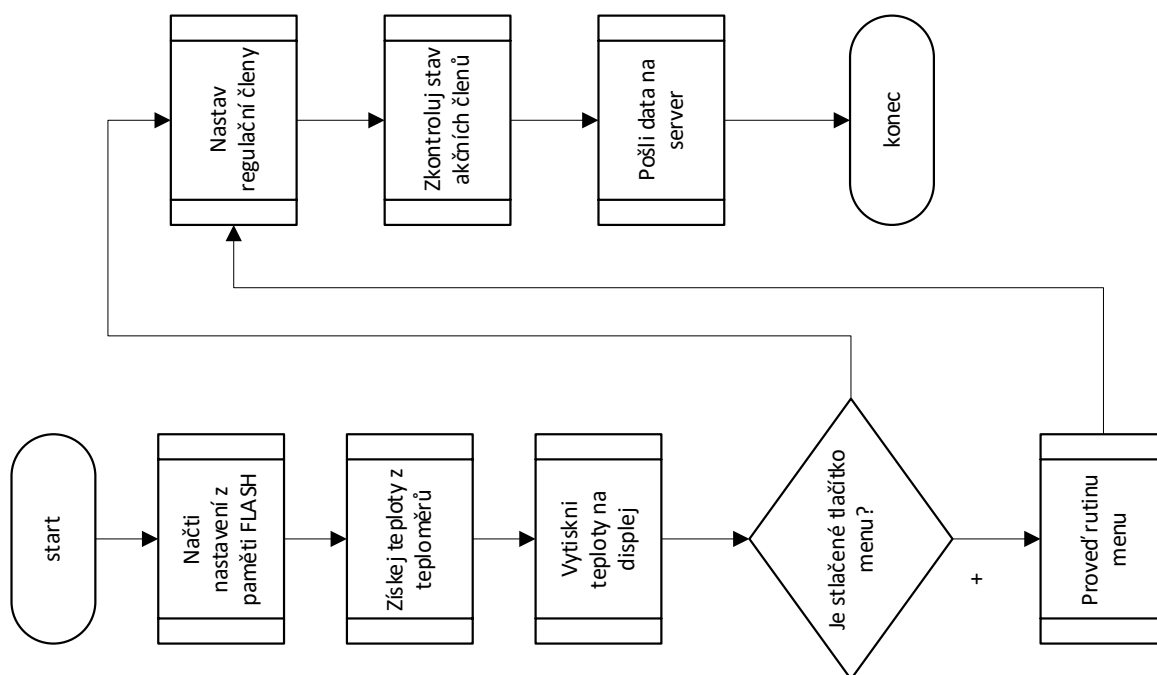
Před prvním nahráním firmwaru do mikrokontroléru je potřeba v hlavičkovém souboru `Temperature_control_and_monitoring_system.h` doplnit na řádky 89-91 SSID (jméno Wi-Fi), PASSWORD (heslo pro připojení k Wi-Fi) a SERVER_IP (IP adresa stroje, na kterém běží server). Žádné jiné úpravy se již po uživateli nevyžadují.

Pokud by si uživatel přál změnit parametry řízení (nastavená teplota, horní/dolní hranice hystereze) Může toto provést kdykoliv za běhu programu v nabídce menu do kterého se uživatel dostane podržením tlačítka „menu“. Tlačítka „+“/“-“, listujeme mezi jednotlivými položkami. Výběr/potvrzení provedeme tlačítkem „set“, tlačítkem „menu“ se můžeme kdykoliv vrátit zpět. V případě že nebude žádné tlačítko stlačeno po dobu 15 s, systém menu automaticky opustí.

Během celého běhu programu komunikuje systém z uživatelem pomocí stavových diod a displeje. Po celou dobu navíc vysílá skrze debug (rozhraní UART) zprávy o aktuálním dění v systému.



Obr. 23 Vývojový diagram počáteční inicializace mikrokontroléru



Obr. 24 Vývojový diagram průběhu obsluhy rutiny

5.2 Server

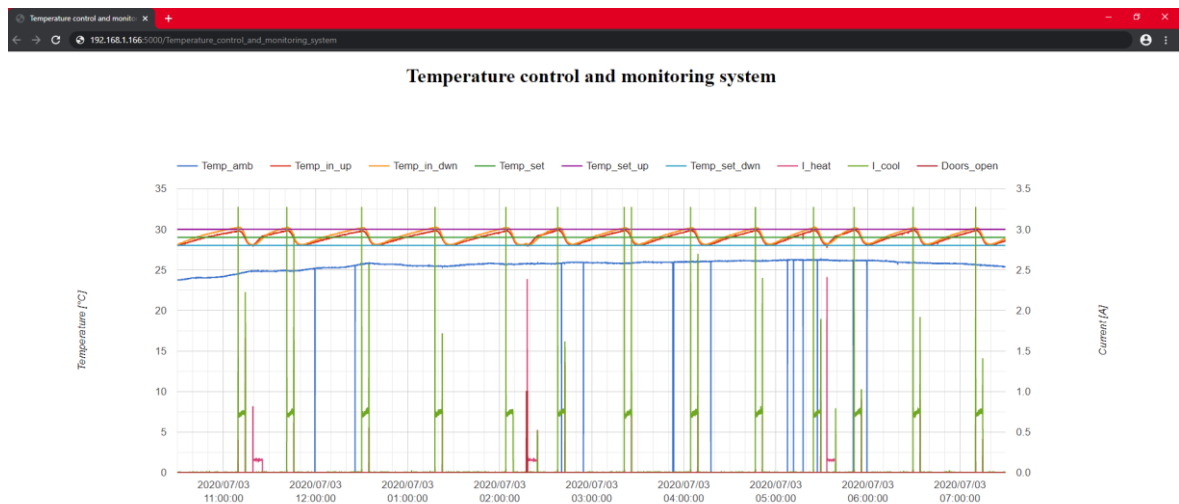
Program obsluhy serveru je vytvořen v jazyce Python, verzi 3 a běží na Raspberry Pi. Použitím modulu Flask vytvoříme server, který je schopen přijímat a zpracovávat požadavky, které přijme skrze port 5000.

Mikrokontrolér pravidelně na tento port skrze Wi-Fi posílá na server požadavek „/Temperature_control_and_monitoring_system/give_data“, který doplní o parametry Tamb, TinUp, TinDwn, Tset, Hup, Hdwn, Iheat, Icool, doors, Tscale a Iscale, kterými předává serveru všechny potřebné hodnoty.

Server tyto hodnoty z požadavku načte a zpracuje je. Zpracované hodnoty se doplní o časovou a datumovou hlavičku a zapíše se na konec tsv souboru, který si specifikujeme v proměnné „log_file“. Než vrátí server odpověď ve tvaru „data přijata YYYY/MM/DD hh:mm:ss“ zapíše si ještě data na konec bufferu „data_log“.

Tohoto bufferu, ve kterém jsou uložena všechna data, které server získal od svého zapnutí, poté využíváme pro vytvoření automaticky generovaného grafu. Ten se generuje jako odpověď na požadavek „/Temperature_control_and_monitoring_system“ ze šablony „tcms.html“ která je umístěna ve složce templates.

Šablona vytváří graf typu line chart pomocí nástroje Google charts. Pro generování grafů je nutné, aby byl server připojen k internetu.



Obr. 25 Ukázka automaticky vygenerovaného grafu

6 REALIZACE SYSTÉMU

6.1 Výroba DPS

Existovalo několik možností jak zařídit vytvoření DPS. Metodou, kterou používáme nejčastěji pro výrobu prototypových desek plošných spojů je metoda nažehlování. Její princip spočívá ve vytisknutí zrcadlově invertovaných cest plošného spoje pomocí laserové tiskárny na voskovaný nebo lesklý papír. Na čistou a odmaštěnou kuprexitovou desku umístíme takto vytištěné cesty. Papír následně přikryjeme vrstvou tkaniny, která pomáhá lépe roz distribuovat váhu, a působením tepelného zdroje (žehličky) přeneseme toner z papíru na vrstvu mědi. Přebytkovou měď, která není krytá tonerem, odstraníme v leptacím roztoku. Z desky odstraníme toner, vyvrtáme potřebné díry a DPS je hotová. Tento způsob má problém s výrobou vícevrstevných DPS, jelikož je obtížné docílit zákrytu mezi vrstvami. Zdálo by se, že proto tato metoda nelze použít pro výrobu naší hlavní řídicí desky. Opak je ale pravdou. Při návrhu jsme na toto mysleli, a druhá vrstva lze nahradit sérií drátových propojek. Přesto jsme tuto metodu nepoužili, kvůli příliš jemným cestám v návrhu, které by se nemuseli správně přenést při přežehlování z papíru.

Druhou a asi nejrozšířenější metodou je výroba DPS osvitem. Vrstva cest DPS vytiskneme na průhlednou fólii. Tu v temné komoře umístíme na speciálně upravenou kuprexitovou desku, která je pokryta fotocitlivým materiálem. Na desku svítíme zdrojem UV záření, čímž dojde k poškození fotocitlivé cesty v místech, kde ji nepřekrývá folie s cestou. Tyto ozářené části následně smyjeme speciálním roztokem. Deska umístíme do leptacího roztoku, který odstraní vrstvu mědi v místech, která již nejsou chráněna fotocitlivou vrstvou. Takto vyrobenou DPS na potřebných místech vyvrtáme a DPS je hotová. Protože ovšem nevlastníme zdroj potřebného UV záření, nevyužili jsme ani této metody.

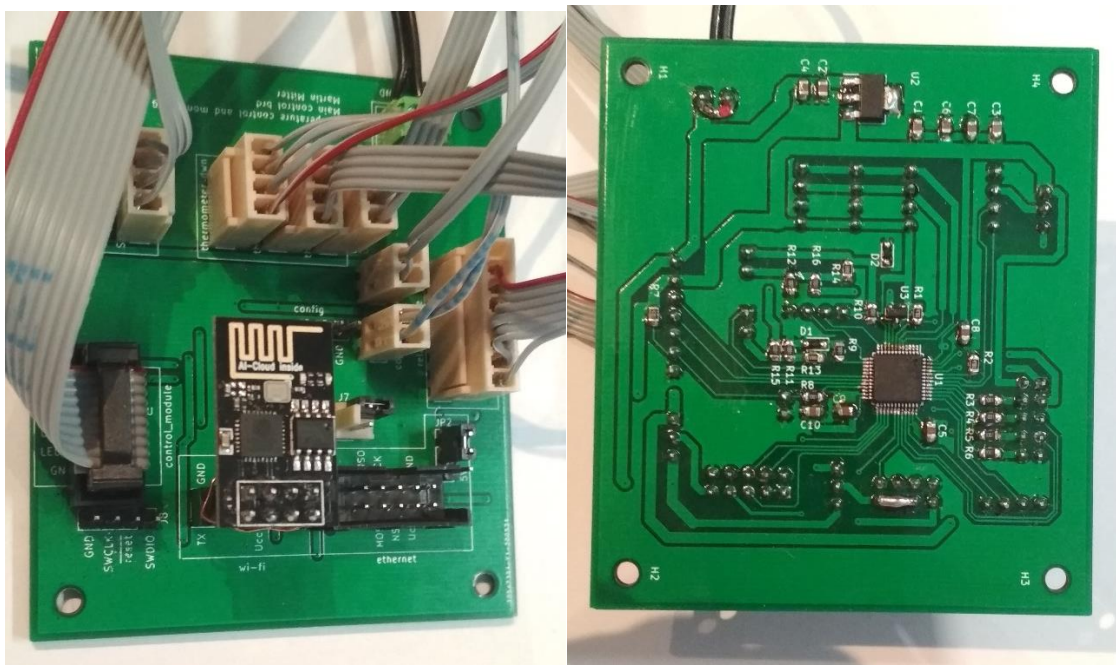
Pro zajištění profesionálně vypadajících DPS, které budou disponovat nepájivou vrstvou a vrstvou popisů, rozhodli jsme se využít služeb firmy JLCPCB. Ta se na profesionální úrovni zabývá exkluzivně výrobou DPS. V programu KiCad vygenerujeme z hotového návrhu soubory typu gerber, ty předáme JLCPCB, a nám zásilkovou službou přijdou již hotové desky.

6.2 Osazení DPS

Osazení DPS lze provést dvěma způsoby. Pokud si při výrobě desek u JLCPCB přikoupíme i výrobu tzv. „stencil“ folie, můžeme ji při osazení využít. Fólii přiložíme na DPS, zarovnáme ji a pak otvory ve folii přetřeme pájecí pastou. Fólii opatrně sejmem. Součástky rozložíme po DPS tak, aby se vývody přilepili o pastu. V zapékací troubě potom desku zapečeme, což roztaví pájecí pastu a všechny

součástky připájí. Je si potřeba dávat pozor, abychom nezapékali součástky obsahující plast, protože by mohlo dojít k jejich zničení.

Protože nedisponujeme potřebným vybavením, nepoužili jsme první metodu a namísto toho jsme osadili obě DPS ručně pomocí mikropáječky.



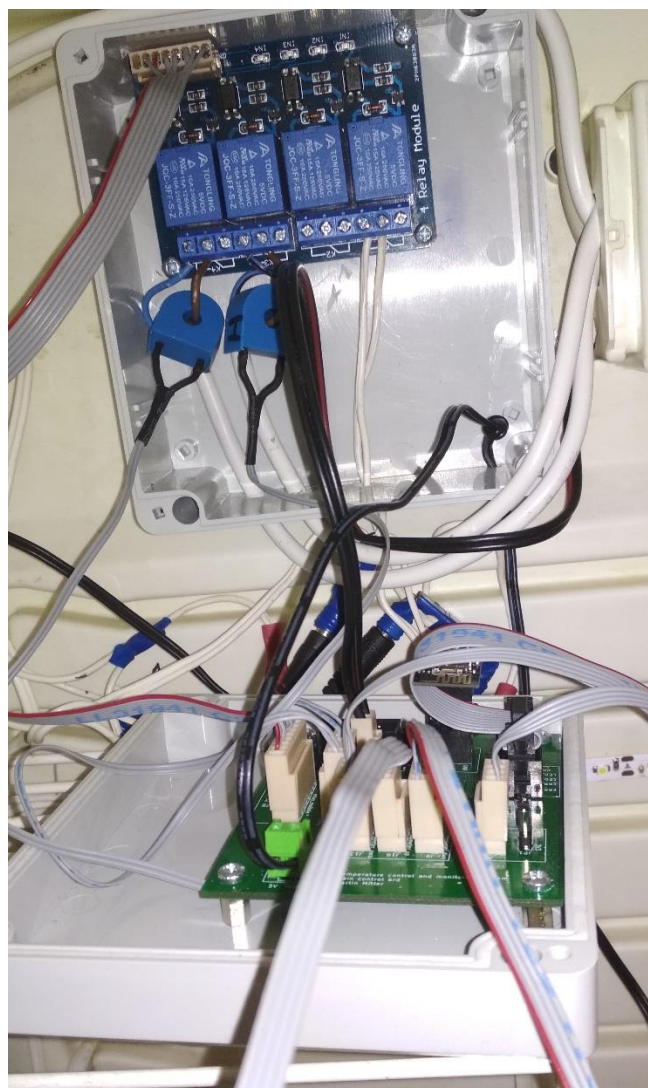
Obr. 26 Osazená hlavní řídicí deska

6.3 Oživení

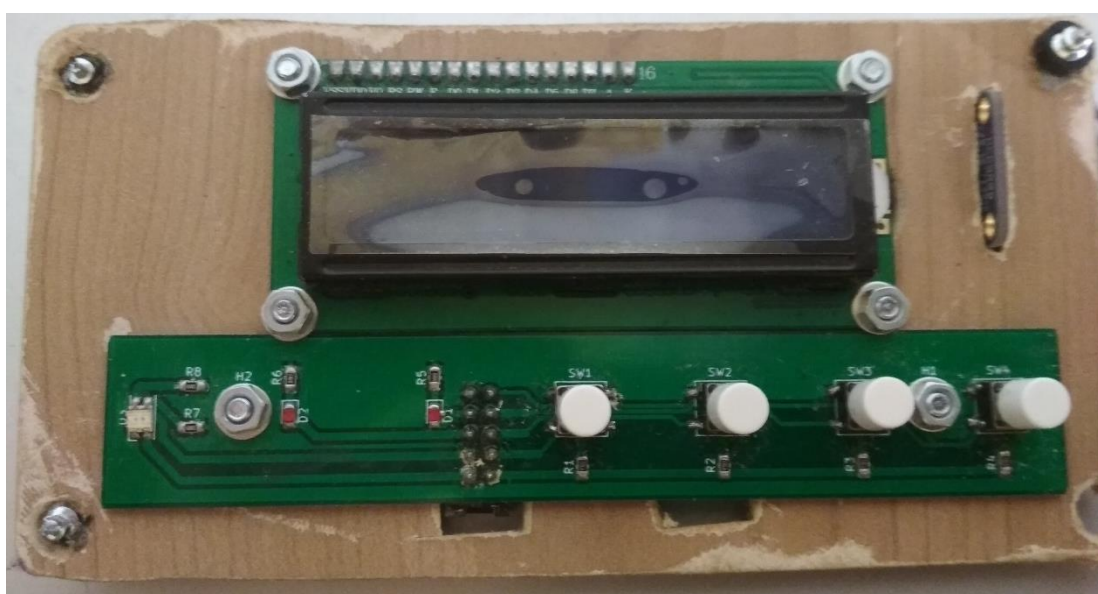
Je vhodné mikrokontrolér osazovat na desku až jako poslední součástku. Než ho totiž připájíme, je potřeba provést kontrolu správnosti osazení DPS. Připojíme DPS ke zdroji elektrické energie. Pomocí multimetru zkontrolujeme, zda step down měnič a zdroj referenčního napětí dodávají 3,3 V. Následně provedeme kontrolu napěťových děličů v obvodu měření proudu. Musí na nich být úbytek napětí 1,65 V. Nyní už jen stačí zkontrolovat, zda se LED diody na komunikační a informační DPS rozsvítí po připojení zdroje napětí +3,3 V k příslušným pinům. Pokud všechny tyto kroky splníme, s největší pravděpodobností je deska správně osazena a můžeme připájet mikrokontrolér.

6.4 Estetické zakončovací práce

Moduly a desky, u kterých je to možné vsadíme do instalačních krabic. Všechny potřebné prvky propojíme mezi sebou vodiči. Do mikrokontroléru nahrajeme program. Celý systém zasadíme do serverovny a vyzkoušíme jeho funkčnost.



Obr. 27 Řídicí a spínací modul usazený v instalační krabici



Obr. 28 Komunikační a informační modul s displejem

Instalační
krabice
s řídicím
systémem



Obr. 29 Vnitřní uspořádání hotové serverovny



Obr. 30 Umístění komunikačního a informačního panelu

7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po spuštění Řídicího systému pro regulaci a monitorování teploty jsme započali jeho pozorování. Na základě poznatků, které jsme pozorováním získali, jsme ověřili funkčnost zařízení. Abychom však mohli vyhodnotit dosažené výsledky, je potřeba určit si referenční hodnotou, vůči které tyto výsledky budeme vztahovat.

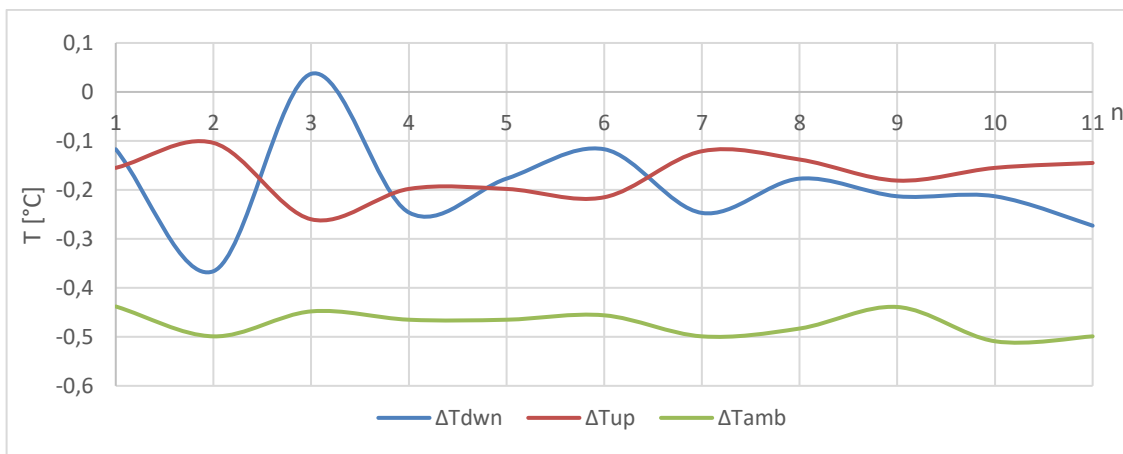
7.1 Přesnost měření teploty

Abychom mohli určit přesnost měření teploty, bylo by zapotřebí využít testovací komory, která by zvládla udržet konstantní teplotu v celém svém objemu a velmi přesného referenčního měřidla, vůči kterému bychom mohli námi naměřené hodnoty porovnávat

Jelikož však takovouto technologií nedisponujeme, bylo třeba přijít s náhradním řešením. Naše testování spočívalo v použití teplotních datalogerů firmy COMET jakožto referenčních měřidel a jejich umístění co nejbližší našim vlastním snímačům. Ze zjištěných hodnot (Obr. 31, Tab. 3) můžeme určit, že odchylka našich snímačů teploty nabývá hodnoty do 0,5 °C, typicky se ovšem pohybuje kolem hodnoty 0,2 °C, což je pro náš systém naprosto vynikající.

Tab. 3 Odchylky měření teploměrů vůči referenčním měřidlům (vše °C)

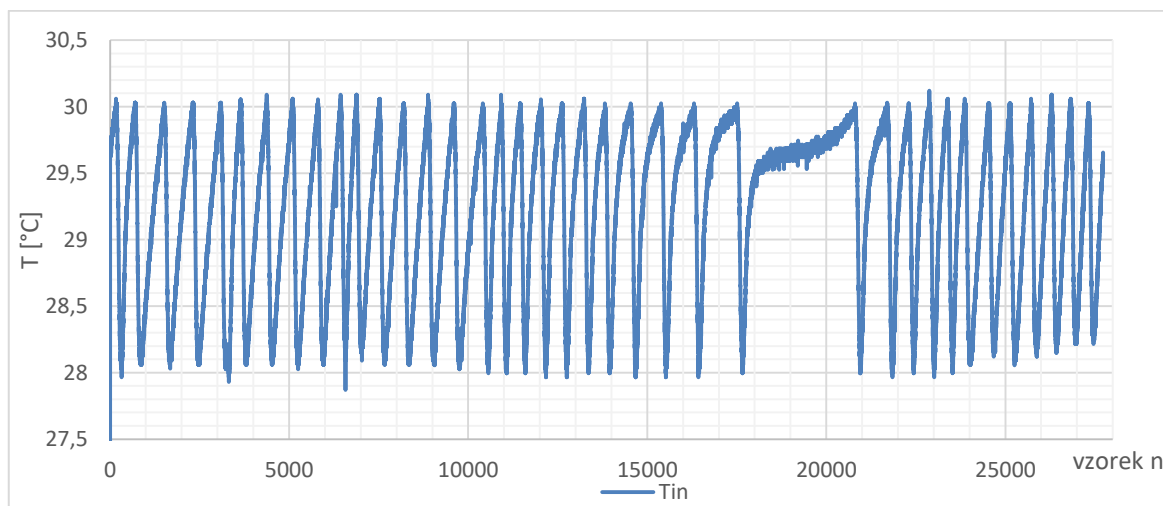
Tdwn_ref	Tdwn	Tup_ref	Tup	Tamb_ref	Tamb	ΔT_{dwn}	ΔT_{tup}	ΔT_{amb}
29,753	29,87	29,655	29,5	25,492	25,93	-0,117	-0,155	-0,438
29,564	29,93	29,664	29,56	25,501	26	-0,366	-0,104	-0,499
29,847	29,81	29,69	29,43	25,552	26	0,037	-0,26	-0,448
29,564	29,81	29,698	29,5	25,595	26,06	-0,246	-0,198	-0,465
29,753	29,93	29,698	29,5	25,655	26,12	-0,177	-0,198	-0,465
29,753	29,87	29,715	29,5	25,604	26,06	-0,117	-0,215	-0,456
29,753	30	29,741	29,62	25,681	26,18	-0,247	-0,121	-0,499
29,753	29,93	29,758	29,62	25,767	26,25	-0,177	-0,138	-0,483
29,847	30,06	29,801	29,62	25,741	26,18	-0,213	-0,181	-0,439
29,847	30,06	29,835	29,68	25,741	26,25	-0,213	-0,155	-0,509
29,847	30,12	29,895	29,75	25,681	26,18	-0,273	-0,145	-0,499



Obr. 31 Graf odchylek měření teploměrů vůči referenčním měřidlům

7.2 Regulace teploty

Pro vyhodnocení úspěšnosti regulátoru nám stačí znát nastavenou hodnotu, kterou se snažil udržet a nastavenou hysterezi. Obr. 32 znázorňuje data získaná za 24 h běhu systému. Během této doby byl regulátor nastaven na 29 °C s hysterezí 1 °C. Z toho vyplývá, že systém se musí udržet v mezích od 28 do 30 °C. Jak je z grafu na první pohled jasné, to náš regulátor zvládl, a nelze tedy mluvit o ničem jiném, než o úspěchu.



Obr. 32 Regulovaná teplota uvnitř serverovny za 24h

8 ZÁVĚR

Definovali jsme požadavky na řízení a monitorování teploty ve skříni pro domácí datové úložiště. Jmenovitě tedy udržení hard disků v rozsahu teplot 35-40 °C, což přibližně odpovídá teplotě ve skříni 29 °C.

Navrhli jsme koncepci řídicího systému, který udržuje optimální teplotu pro datové disky. Nastínili jsme způsob, kterým se budou naměřené hodnoty zaznamenávat a archivovat. Zvolili jsme vhodné snímače teploty, topné i chladící členy. Zajistili jsme vhodnou tepelně izolovanou skříň. Nakreslili jsme blokové schéma zařízení. Koncept zařízení jsme vyzkoušeli pomocí testu. Původní zadání jsme rozšířili o měření proudu do akčních členů, díky čemuž můžeme monitorovat jejich zdravý a počítat jejich spotřebu.

Navrhнули jsme mikrokontrolerový systém pro řízení teploty ve skříni. Zvolili jsme vhodný mikrokontrolér (STM32F302CBTx), nakreslili jsme obvodové schéma zapojení a stanovili jsme hodnoty jednotlivých součástek.

Mikroprocesorový systém jsme zrealizovali a oživily. Při realizaci jsme objevili chybu v návrhu DPS. Na konektoru pro připojení Wi-Fi modulu je prohozen Rx a Tx vodič. Tato chyba byla odstraněna použitím propojky, která tyto kabely kříží do správné polohy. Na tom samém zařízení se objevila i druhá chyba v návrhu, kdy chip enabled nebyl připojen k napájecímu napětí. Pin je naštěstí umístěn na konektoru v sousedství pinu napájecího, a tak stačilo spájet tyto dva piny dohromady.

Vytvořili jsme programové vybavení pro mikrokontrolér a server. Veškerý software byl odlazen.

Ověřili jsme funkčnost zařízení a vyhodnotili jsme dosažené výsledky.

Literatura

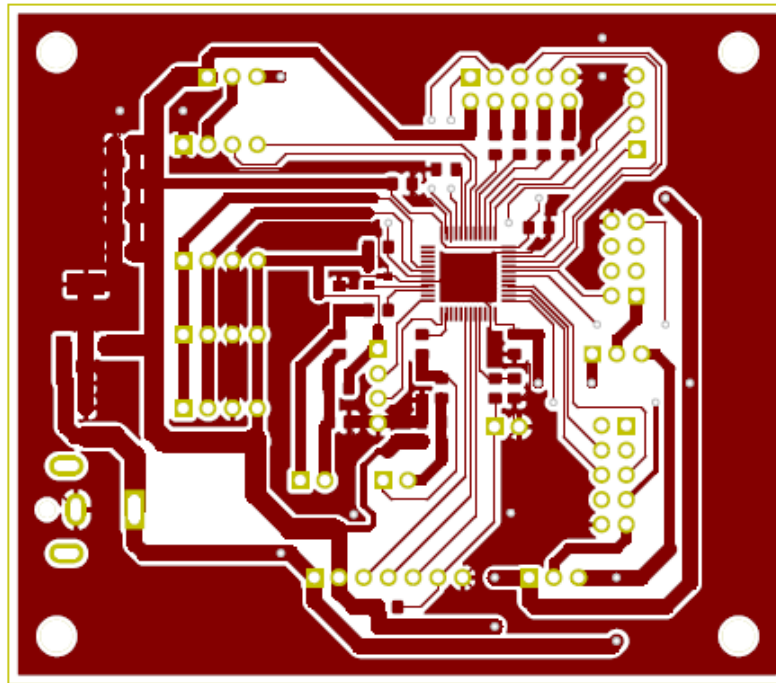
- [1] Cole. Gerry *Estimating drive reliability in desktop computers and consumer electronics systems*. Sea-gate Technology Paper TP-338.1, November 2000
- [2] Eduardo Pinheiro, Wolf-Dietrich Weber and Luiz André Barroso Google Inc. *Failure Trends in a Large Disk Drive Population, 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies* February 2007
- [3] Microchip Technology: *MCP9808 ±0.5°C Maximum Accuracy Digital Temperature Sensor*. 2011.
- [4] LITE ON Technology: *LTST-C155GEKT SMD LED*, Product datasheet
- [5] OSRAM Opto Semiconductors: *LHR974 version 1.0*, Product datasheet
- [6] Yaohuadechang Electronic Co., *Epoxy resin encapsulated precision current transformer TA series TA12*, Product datasheet
- [7] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN, 2005, 239 ISBN 80-7300-145-4
- [8] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [9] MITTER, Martin. *Řídicí systém pro regulaci a monitorování teploty*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122844>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Tomáš Macho.
- [10] Handson Technology: *4 Channel 5V Optical Isolated Relay Module User guide*
- [11] Ai-Thinker: *ESP-12E WiFi Module*. 2015, rev. 1.0.
- [12] Espressif Systems: *ESP8266EX - Datasheet*. 2018, rev. 6.0.
- [13] Espressif Systems: *ESP8266 - Low-Power Solutions*. 2018, rev. 1.4.
- [14] Espressif Systems: *ESP8266 - AT Instruction Set*. 2019, rev. 3.0.1.
- [15] Espressif Systems: *ESP8266 Non-OS SDK API Reference*. 2019, rev. 3.0.1.
- [16] Microchip technology Inc.: *MCP1826/MCP1826S* 2013, revision B, ISBN: 9781620769850
- [17] Texas Instruments: REF3033, SBVS032F, 2008
- [18] Controllerstech: *i2c lcd in stm32*. [Online; navštíveno 4.5.2020] URL <https://controllerstech.com/i2c-lcd-in-stm32/>
- [19] Dudka, M.: *Přístupy k programování STM32*. Říjen 2017, [Online; navštíveno 15.04.2020]. URL <https://www.root.cz/clanky/pristupy-k-programovani-stm32/>
- [20] STMicroelectronic: *STM32F030xC*. Leden 2017, rev. 3.
- [21] STMicroelectronic: *User manual - Description of STM32F0 HAL and low-layer drivers*. Září 2017, rev. 6.
- [22] STMicroelectronic: *STM32CubeMX - Data brief*. Únor 2019, rev. 12.
- [23] STMicroelectronic: *STM32CubeProg - Data brief*. Únor 2019, rev. 4.

- [24] Šandera, J.: *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. Praha: BEN -
technická
literatura, první vydání, 2006, ISBN 80-7300-181-0.

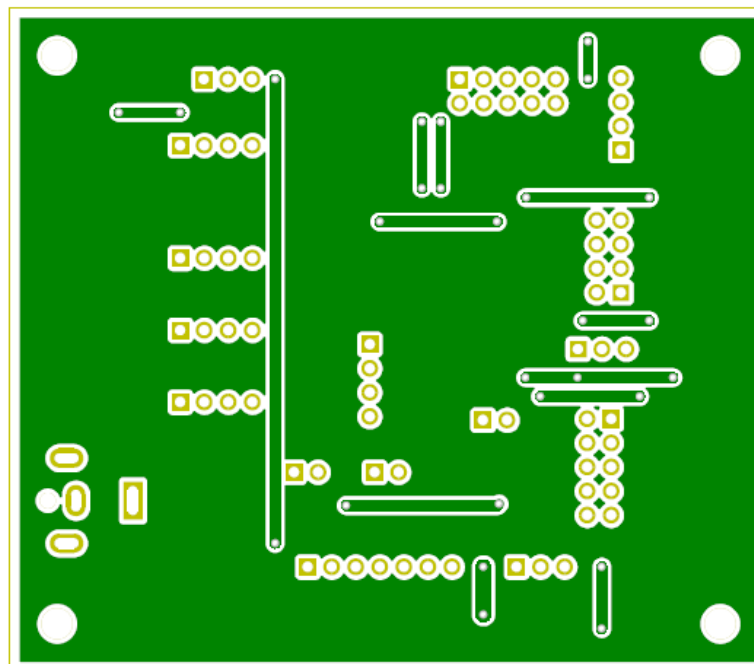
Seznam příloh

Příloha 1. CD/DVD

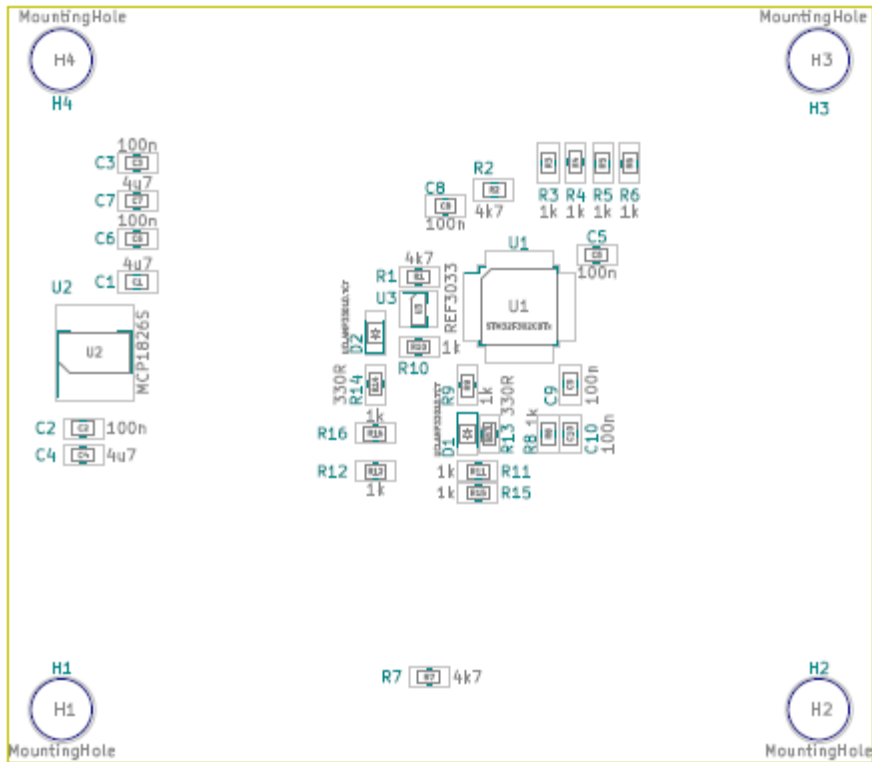
Příloha 2. Podklady pro výrobu PCB



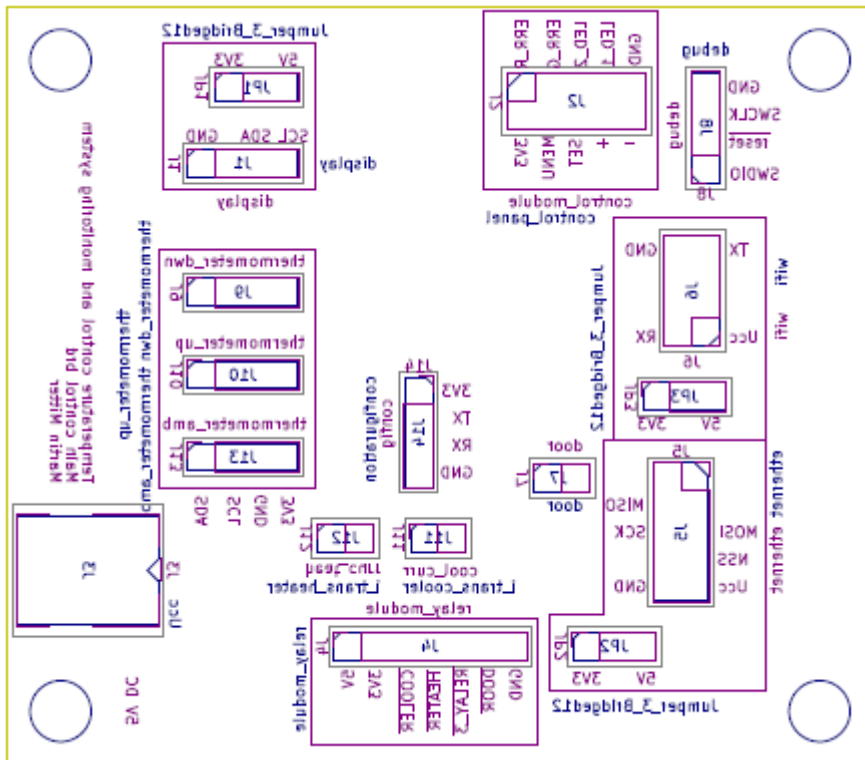
Hlavní PCB pohled zespodu



Hlavní PCB pohled zezhora



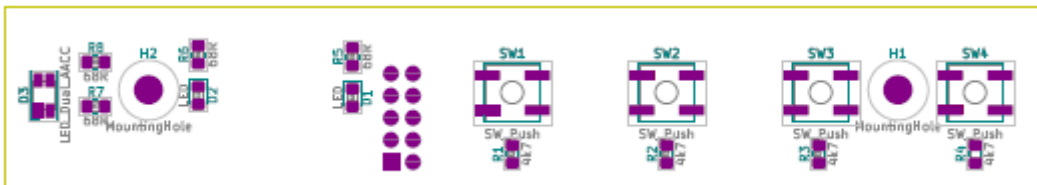
Osazovací plán hlavní PCB pohled zespodu



Osazovací plán hlavní PCB pohled zezhora



Pomocná PCB pohled zezhora



Pomocná PCB Osazovací plán