

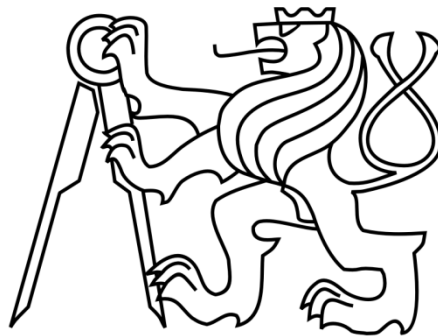
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Regulátor tepelné komory s tepelným čerpadlem

Thermal chamber controller with heat pump



Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka

2018

Bc. Jan Pavlíček

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavlíček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **420062**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Regulátor tepelné komory s tepelným čerpadlem

Název diplomové práce anglicky:

Thermal chamber controller with heat pump

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s principem činnosti a způsobem řízení tepelného čerpadla s možností reverzace. Zaměřte se na možnosti řízení otopné soustavy pomocí elektronických regulátorů. Dále navrhnete tepelnou komoru s tepelným čerpadlem, která bude umožňovat regulaci jak do kladných, tak záporných hodnot teplot [°C] pomocí regulace otáček ventilátoru a výkonu kompresoru. Požadovaná přesnost regulace požadované hodnoty teploty je 5% z celého rozsahu. Regulátor navrhnete jako autonomní procesorovou jednotku s možností propojení s nadřazeným PC pro možnost zadání požadovaného teplotního profilu i přímé změny teploty. Mimo vlastní procesorovou jednotku navrhnete i analogové ochrany proti překročení povolených teplotních limitů. Řešení zpracujte dle pokynů zadavatele práce. Návrh ověřte funkčním vzorkem.

Seznam doporučené literatury:

Dle konzultace s firmou LG System spol. s.r.o., případně vedoucím práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka, katedra teorie obvodů FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **31.01.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 25.5.2018

.....

Podpis

Poděkování

Na úvod bych chtěl poděkovat vedoucímu práce **doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi** za jeho vstřícné konzultace a rady k dokončení této práce a firmě LG System spol. s r.o. za poskytnuté zázemí, prostředky a rady, bez kterých by tato práce nebyla možná.

Anotace

Cílem této práce je návrh a vytvoření plošného spoje a softwarového vybavení regulačního zařízení řízeného vhodným mikroprocesorem ARM, které se stará o udržení teplot od -30 °C do 120 °C v izolované komoře pro testování elektrických přístrojů.

Přístroj řídí klimatizační jednotku a elektrické topení. Jako zpětnovazební členy pro zajištění bezpečného provozu a dodržení stanovené teploty jsou použity odporové teploměry.

Pro uživatelský komfort a snadné nastavení a kalibraci soustavy je součástí přístroje alfanumerický LCD displej, klávesnice a jednoduché intuitivní uživatelské rozhraní.

Klíčová slova: regulace, chlazení, ohřev, regulace teploty, regulace soustavy, měření teploty, ARM

Abstract

The aim of this thesis is to design and create a PCB and program an ARM-based controller that ensures temperatures ranging from -30 to 120 °C in an isolated chamber for testing electrical devices.

The controller drives an air-conditioning and a heating unit. The system contains several resistive temperature sensors, an end-switch and a flow sensor for correct temperature assurance and security purposes.

User comfort is also very important. Therefore, the device also features an alphanumeric LCD with simple and intuitive user interface and keyboard for the user to be able to easily set and calibrate the device.

Key words: regulation, cooling, heating, temperature regulation, system regulation, temperature measurement, ARM

Obsah

Prohlášení	5
Úvod	10
1. Motivace pro konstrukci vlastní klimatizované komory	11
1.1. Dostupná komerční řešení.....	11
1.1.1. Běžně dostupné komory na českém trhu	11
1.1.2. Klimatizované místnosti	12
2. Koncept uspořádání komory	13
2.1. Grafická reprezentace systému	13
2.2. Stručný popis prvků	15
2.2.1. BLDC Driver	15
2.2.2. Klimatizační okruh	15
2.2.3. Elektrické topení	16
2.2.4. Řízení	16
2.2.5. Signalizační prvky	17
2.2.6. Měření teploty v komoře.....	17
2.2.7. Výkonové obvody.....	17
2.2.8. Analogová teplotní ochrana systému	17
3. Vlastní řešení řídicí desky	19
3.1. Procesor.....	19
3.2. Napěťová reference	21
3.3. Teplotní senzory.....	21
3.3.1. Měřené napětí	23
3.3.2. Možnosti vylepšení zapojení	24
3.3.3. Vyhodnocení odporu senzoru	26
3.4. Analogový zesilovač	28
3.5. Driver RS485	28
3.6. MOSFET driver	29
3.6.1. Maximální možné zatížení.....	30
3.7. Ostatní komponenty na PCB.....	31
3.7.1. Ostatní aktivní prvky	31
3.7.2. Pasivní součástky.....	31
3.8. Výroba plošného spoje	33
3.8.1. Známé omyly na PCB.....	33
3.8.2. Možná budoucí vylepšení	34
3.9. Spínání výkonové části	35

3.9.1. SSR – Solid State Relays	35
4. Programové vybavení.....	37
4.1. Nastavení periférií.....	37
4.1.1. Inicializace a použití ADC.....	40
4.1.2. DAC	42
4.1.3. LCD	44
4.1.4. FTM (kanál 0).....	45
4.1.5. PDB Timer.....	46
4.2. PID regulace.....	46
4.2.1. Doplnění regulace dle hodnoty PID.....	49
4.3. Přehled celkového programu.....	50
4.3.1. Topologie menu	50
4.3.2. Začátek programu	51
4.3.3. Nekonečná smyčka	53
4.3.4. Nejdůležitější funkce	55
4.3.5. Regulace dle teplotního profilu.....	58
Závěr	60
SEZNAM OBRÁZKŮ	61
SEZNAM PŘÍLOH	63
Seznam použité literatury	64

Úvod

Jedním ze základních parametrů každého integrovaného obvodu, přístroje, či zařízení je údaj o rozmezí teplot, při kterých je možno je používat. Cílem této práce je sestavit klimatizovanou komoru, která bude schopna v izolované prostoro udržovat teplotu v rozsahu od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro testování různých zařízení.

Motivací pro tuto práci byla idea podrobit systémy navrhované firmou LG Systems spol. s r.o. teplotním zkouškám specifikovaným u jednotlivých použitých elektronických i mechanických prvků a ověření jejich správné funkce při výše uvedených podmínkách. V podstatě se jedná o další důležitý krok zejména směrem ke spolehlivosti zařízení, čímž je míněno hlavně reálné odzkoušení zařízení v těchto teplotních podmínkách – nejen pomocí počítačové simulace nebo prostého ujištění, že pokud mají jednotlivé komponenty při těchto teplotách být funkční, tak musí být v tomto rozsahu funkční i celek.

Kompletní konstrukce takového zařízení by byla finančně i časově velmi náročná, proto je jako základ pro chlazení použita hotová klimatizace, u které bude nahrazeno řízení zcela novým řízením dle vlastního návrhu s vlastním programem a upraveným chladicím okruhem tak, aby bylo možné dosáhnout teploty až $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Část určená pro topení, tj. pro dosažení teploty $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, bude realizována mnohem jednodušeji pomocí elektrického odporového topení spínaného řídicí deskou s MCU pomocí solid state relé.

Při zadání úkolu nebyla přesně specifikována přesnost udržování teploty, jelikož se jedná o velmi specifický úkol. Veškeré výsledky práce včetně schopnosti soustavy udržovat teplotu zadanou uživatelem budou prezentovány v závěru této práce.

1. Motivace pro konstrukci vlastní klimatizované komory

Tato kapitola je věnována odůvodnění záměru této diplomové práce, informacím o dostupných profesionálních klimatizovaných komorách a v neposlední řadě i porovnání očekávaných parametrů v této práci konstruované komory a srovnatelných zařízení nabízených na tuzemském trhu.

1.1. Dostupná komerční řešení

System řešení v této stati není ani zdaleka ojedinělý. Stejně tak jako prakticky v každém odvětví lidského snažení i zde lze najít komerční způsob využití, což vede ke vzniku poměrně velkého trhu.

Hned na úvod je však třeba dodat, že existuje několik různých typů řešení tzv. „klimatizovaných komor“. Jedním z nejpodstatnějších rozdílů oproti komoře řešené v této práci je například doplnění zvlhčovače, resp. odvlhčovače, kterýžto spravuje úroveň relativní vlhkosti.

1.1.1. Běžně dostupné komory na českém trhu

Prvním vyhledaným zástupcem v této kategorii jsou přístroje dostupné ve společnosti Lab-met, konkrétně testovací komora Memmert TTC (model CTC disponuje i regulací vlhkosti). Objem klimatizovaného prostoru je 257 l, časová teplotní odchylka maximálně $\pm 0,5$ °C a prostorová teplotní odchylka maximálně ± 2 °C. Regulace je zajištěna PID regulátorem s fuzzy-logikou a systém disponuje možností provádět až čtyřicet segmentovou teplotní křivku. Samozřejmostí je měření a export dat na PC nebo tiskárnu. Teplotní rozsah -42 °C až 190 °C, příkon maximálně 7 kW. Strmost nárůstu teploty je 10 K/min, pro chlazení pak 3 K/min. Vadou na kráse může být cena, která se vyšplhala v případě modelu TTC 256 na 437 500 Kč. [22, 23]

Jako druhého zástupce jsem zvolil testovací komoru Vötsch VT 4011. Jedná se menší komoru s objemem 110 l a připojením pouze na jednofázovou síť na rozdíl od výše zmíněného zařízení. Teplotní rozsah je v tomto případě -40 °C až 180 °C s časovou i prostorovou odchylkou teploty na přibližně stejné úrovni jako v případě komory TTC. Nárůst i pokles teploty je zde 3,5 K/min, což je dáno nižším příkonem 1,5 kW. V tomto případě je uvedena i maximální teplotní kompenzace (pokud zařízení v komoře vyzářuje teplo), a to 1000 W. [24]

Testovací komora vyvíjená v této práci si neklade za cíle dosáhnout všech parametrů těchto komerčních zařízení, nicméně měla by se těmto alespoň přiblížit. Pro regulaci teploty bude použit také PID algoritmus, jako v případě komory Memmert TTC (pravděpodobně je tato regulace v určité formě použita i u modelu VT 4011, nicméně výrobce tuto informaci neuvádí), avšak v odlehčené formě. Celý vyvíjený systém je pak částečně koncipován jako modulární, jelikož lze připojit různé spínací prvky, úpravou programu doplnit měření teplot více čidly a další.

1.1.2. Klimatizované místnosti

Větším bratrem klimatizovaných komor jsou klimatizované místnosti. V takových prostorách dosahují rozměry a dostupný výkon zcela jiného měřítka. Jako příklad jsem vybral testovací místnosti poskytované anglickou firmou Airedale Air Conditioning. Na internetových stránkách této společnosti lze dohledat celkem tři testovací místnosti s celkovou izolovanou plochou 427 m² (celková plocha areálu je pak 1323 m²), přičemž největší komora má plochu 231 m². Dle jejich vlastních slov se jedná o zařízení světové úrovně, jediné v Anglii a zároveň jedno z nejlepších takových zařízení na celém světě. [1]

Dalším pozoruhodným parametrem je teplotní rozsah, který je možné v testovacích komorách volit od -20 do 50 °C, což je dle mého názoru na tak ohromný prostor velmi úctyhodný rozsah, obzvláště s přihlédnutím k faktu, že největší komora poskytuje rozsah 5 až 50 °C při možném výkonu testovaných zařízení až 2 MW. Tato práce si za cíl sice klade větší teplotní rozsah, nicméně testovaná zařízení jsou uvažována v řadu desítek, maximálně stovek wattů ztrátového tepelného výkonu. [1]

Tyto místnosti jsou určeny například k testování klimatizačních jednotek nebo tepelných čerpadel.

2. Koncept uspořádání komory

Zde je rámcově vysvětleno uspořádání komponent použitých při konstrukci klimatizované komory. Koncepce vychází částečně z uspořádání komerčních klimatizovaných komor, ale zejména je ovlivněna dostupnými prostředky a časovými možnostmi pro tuto práci.

2.1. Grafická reprezentace systému

Na následujícím obrázku je pro lepší představu nakresleno ideové schéma kompletního systému. Zásadní informací zde je, že tento obrázek nepokrývá kompletní zapojení soustavy, nýbrž má pouze velmi názorně a přibližně zprostředkovat koncepci tohoto systému.

Základními prvky klimatizační jednotky jsou kompresor a BLDC driver. Ovládání kompresoru bude zajištěno právě přes zmíněný driver. Řídicí deska by měla ovládat taktéž vnitřní ventilátor na výměníku.

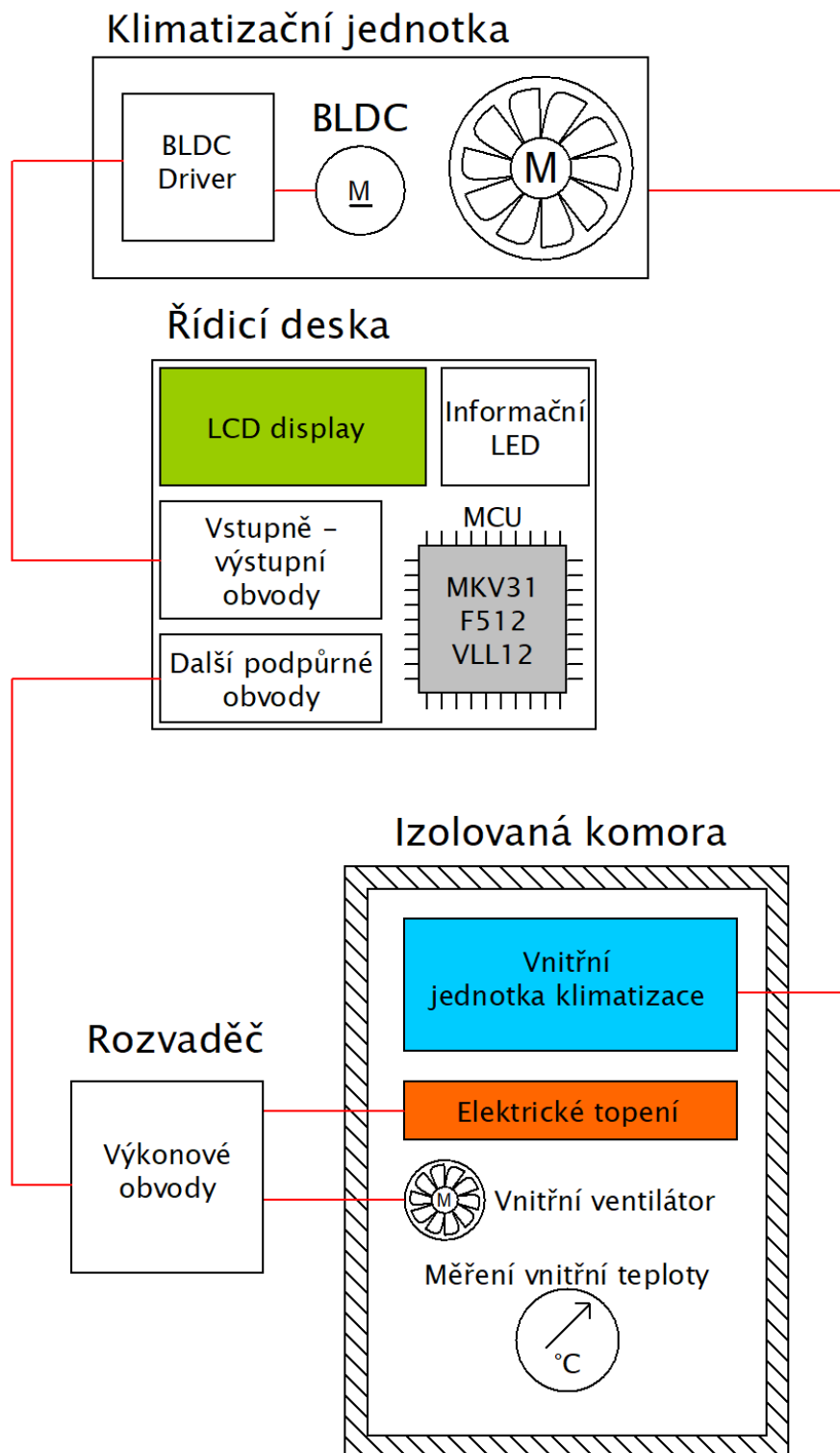
Řídicí deska je podrobně popsána na následujících stranách včetně osazených komponent.

Rozvaděč je již zmíněná plastová rozvodná krabice. V této bude umístěna veškerá ovládací elektronika sestávající z řídicí desky a přidružených výkonových součástek. Chlazení by mělo být zajištěno vhodným ventilátorem s napájecím napětím DC 12 V.

Izolovaná komora bude pravděpodobně sestávat z ocelových desek s polystyrenovou izolací. Z čelní strany by měl být dostatečně velký uzavíratelný otvor pro vkládání testovaných zařízení. Neměla by chybět speciální průchodka pro zavedení napájení testovaného prvku nebo vývodů potřebných čidel.

Vnitřní ventilátor slouží k udržování rovnoměrné teploty v celém objemu komory. Jeho otáčky mohou být řízené např. úhlovým spínáním triaku nebo pomocí periodického zapínání a vypínání.

Pro vnitřní čidlo teploty je použit stejný typ senzoru jako pro ostatní čidla teploty v celém systému – odporové čidlo typu PT1000. Tento senzor a vyhodnocení jeho signálu je podrobně popsáno v následujících kapitolách.



Obrázek 1 - Zjednodušené ideové schéma klimatizované komory a řídicích obvodů

Výše uvedené ideové schéma přibližně odpovídá celkovému uspořádání systému. Vlivem smlouvy o mlčenlivosti nebylo možné použít originální řídicí desku klimatizace, a tím ani již vestavený budič pro BLDC kompresor.

2.2. Stručný popis prvků

Velmi stručně uvádím popis komponent a důvod jejich použití, příp. odkazy na podrobnější vysvětlení obsažené v dalších kapitolách. Ne u všech komponent jsou uvedeny konkrétní modely, nejčastěji proto, že taková informace není zcela relevantní pro tuto práci.

2.2.1. BLDC Driver

Konstrukce budiče pro BLDC motor není součástí této práce – po zevrubném prozkoumání problematiky těchto zařízení bylo jasné, že by s ohledem na časové omezení pro vytvoření tohoto systému nebylo reálné tento budič také samostatně navrhnout. Samozřejmě pokud by se i přes to vlastní budič podařilo zkonstruovat, bylo by nutné ho patřičně podrobit testům před uvedením do normálního provozu. Z těchto důvodů je použit již hotový BLDC driver.

Při zkoumání těchto zařízení se naskytla mimo jiné možnost použít některou z vývojových desek (driverů) reprezentujících možnosti specializovaných čipů od různých výrobců. Ukázalo se však, že téměř neřešitelným problémem je najít takové hotové řešení pro ovládání motorů s napájecím napětím vyšším než 60 V. Z tohoto důvodu nebylo nakonec ani jedno z těchto zařízení použito, jelikož by bylo nutné navrhnout vlastní desku se zmíněným čipem a patřičně ji odzkoušet, případně upravit zapojení a podobně.

2.2.2. Klimatizační okruh

Instalovaná vnitřní jednotka klimatizace představuje originální součást klimatizační jednotky. Jako taková je dostatečně dimenzována na její výkon a je přizpůsobena pro snadnou instalaci a připojení na chladicí okruh, což jsou také hlavní důvody jejího použití. Jedná se ve své podstatě o tepelný výměník, který předává teplo z komory do chladicího okruhu.

Samotná klimatizační jednotka nebyla pro tento záměr speciálně vybrána. Jedná se o „přebytečný“ kus na skladě, protože je také použita. Tato klimatizace je poměrně aktuálním produktem, takže disponuje i možností vytápění. Tato funkce však z časových důvodů návrhu není použita, jelikož by se jednalo o další funkci, kterou je třeba řádně vyzkoušet a provést její měření na základě kterého by bylo nutné upravit software pro regulaci.

V klimatizační jednotce jsou kontrolovány celkem tři teploty – kompresoru, výměníku tepla a výtlačku. Některé další ochranné prvky jsou diskutovány dále v tomto dokumentu, zde bych chtěl zmínit pouze ochranu před nadměrným tlakem v systému chlazení.

Tlak systému je kontrolován na vstupní (nízkotlaké) i výstupní (vysokotlaké) straně kompresoru. V budoucnu je třeba k řídicí desce doplnit adekvátní zpětnou vazbu z těchto presostatů kvůli zabezpečení správné funkce systému a vyvolání příslušné akce (reakce periférií na tuto skutečnost a mimo jiné výpis chyby na LCD) v programu. [25]

2.2.3. Elektrické topení

Elektrické topení je keramická topná spirála, původně určená pro domácí elektrickou troubu. Lze zakoupit mnoho různých druhů těchto těles se širokou škálou výkonů a od velkého množství výrobců. Navíc se jedná o rozšířený a masově prodávaný náhradní díl, což značně snižuje jeho pořizovací cenu a zvyšuje jeho dostupnost. Spínání této topné spirály je zajištěno pomocí SSR.

Distribuci vyvinutého tepla zajišťuje ventilátor umístěný v klimatizované komoře. Stejně jako v případě topné jednotky se jedná o náhradní díl do domácí elektrické trouby, což opět znamená velký výběr, snadnou dostupnost a nízkou cenu. Většina těchto ventilátorů je odolná do teplot přesahujících 250 °C, což bohatě vyhoví požadavkům na tuto komoru.

2.2.4. Řízení

Jedná se o nové „srdce“ celého systému, které slouží k řízení, regulaci a dohledu nad celým procesem udržování vnitřní teploty v izolované komoře. Nejsložitější částí práce s ním je návrh PCB s potřebnými komponenty, dále naprogramování řízení klimatizační jednotky s BLDC motorem a v neposlední řadě program samotné regulace teploty v komoře.

Konkrétní použitý jednočip je produktem bývalé firmy Freescale, nyní NXP, MKV31F512VLL12. Nejen, že bylo k dispozici poměrně velké množství těchto procesorů samostatně, ale také vývojová deska TWR-KV31F120M osazená právě tímto čipem.

Vývojová deska TWR mimo jiné umožňuje přímé připojení k PC pomocí USB – má integrovaný programátor i debugger. Zejména tato funkce byla velmi příhodná pro testování funkčnosti separátních částí naprogramovaného kódu před pořízením vlastního programátoru, sestavením vlastní řídicí desky a nahráním programu do této.

Další obrovskou výhodou této vývojové desky je množství připravených příkladů (example projektů), umožňujících velmi snadné a rychlé nastavení všech potřebných periférií procesoru pomocí kopírování již odzkoušeného oficiálního kódu. Toto ušetřilo mnoho času jinak stráveného s příručkou Application Notes pro tento čip a při hledání informací u dalších zdrojů.

Pro úplnost je zjevně dobré dodat, že použitý procesor není přímo určen pro stanovený účel. Jedná se o čip vyvinutý k řízení různých typů motorů včetně zavedené zpětné vazby. Po zohlednění všech dostupných periférií (množství GPIO pinů, počet a rychlost AD převodníků, možnosti multiplexování každého vývodu pro jeho případné využití k jinému účelu apod.) a jeho velkého výpočetního výkonu však bylo zřejmé, že zcela jistě vyhoví požadavkům i v tomto systému.

Více v podkapitole „3.1 Procesor“ a „Program“, kde jsou rozebrány nejdůležitější použité periférie a vlastní části programu řízení klimatizační jednotky a celé regulace teploty v komoře.

2.2.5. Signalizační prvky

Základní informace jsou uživateli zprostředkovány pomocí červených a zelených svítivých diod. Každá dioda může zastupovat v podstatě jednu periférii nebo oznamuje jednu událost a jejich přesný popis včetně rozmístění na řídicí desce je uveden dále.

Podrobnější informace o stavu zařízení poskytuje dvouřádkový displej. Jeho funkcí je nejen informovat uživatele o aktuálním stavu, ale také zobrazení informací pro základní ovládání celého systému včetně nastavení převodních konstant AD převodníků aj. samozřejmě včetně obvyčejného nastavení požadované teploty a zahájení jejího udržování. To vše je rovněž možné zařídit přes MODBUS, ovšem nemožnost ovládat systém bez připojení k PC by značně omezila jeho univerzálnost.

2.2.6. Měření teploty v komoře

Vnitřní teplota v izolované komoře je, jako ve zbytku zařízení, měřena odporovým teplotním čidlem PT1000. Kvůli lepší odolnosti vůči elektromagnetickému rušení je, jako i v několika dalších místech, použit diferenční vstup AD převodníku.

Podrobný popis použitých teplotních senzorů a měření jejich odporu je uveden v podkapitolách „3.3 Teplotní senzory“ a „Program“

2.2.7. Výkonové obvody

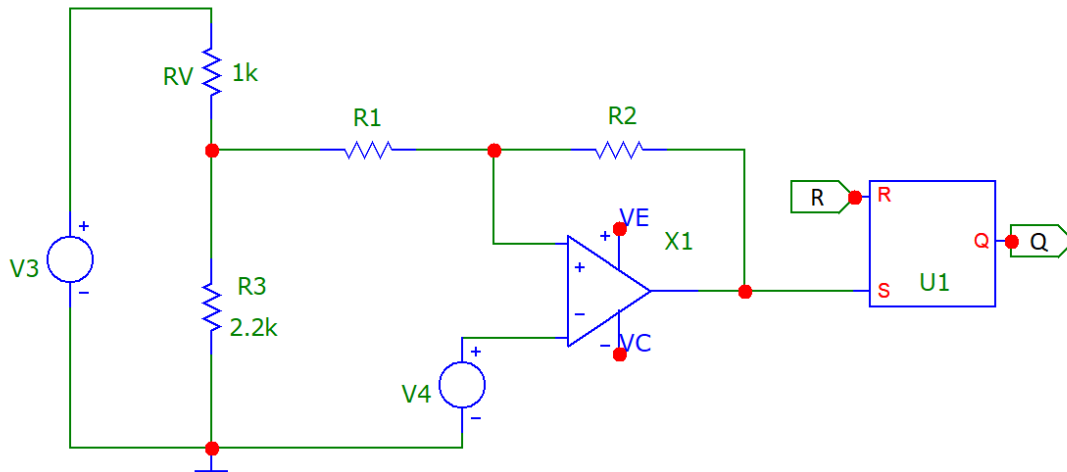
V této podkapitole se výkonovými obvody myslí téměř výhradně SSR (Solid State Relays – Relé bez mechanických částí), která jsou umístěna v rozvaděči.

Rozvaděč bude konstruován standardně z plastové rozvodné krabice s průchodkami pro vodiče. Vnitřní komponenty jsou určeny pro spínání výkonových externích komponent, a to klimatizační jednotky, elektrického topení a ventilátoru uvnitř izolované komory. Vnitřní prostor rozvaděče je tedy vybaven SSR relátky pro často spínané vývody, elektromagnetickými relé pro dlouhodobě sepnuté periferie a ventilátorem zajišťujícím dostatečné chlazení těchto součástí.

Tento rozvaděč rovněž bude obsahovat zdroj DC 12 V, 5 A pro napájení celé řídicí desky s procesorem, chladicího ventilátoru a případně také některých ventilů v klimatizační jednotce.

2.2.8. Analogová teplotní ochrana systému

Při provozu takto komplexního systému nelze vyloučit selhání některého z komponentů (procesor, čidla a jiné). Z tohoto důvodu zde uvádím možné řešení tohoto problému pomocí dalších teplotních čidel v kombinaci s jednoduchým komparátorem a klopným obvodem.



Obrázek 2 - Komparátor s hysterezí a ofsetem

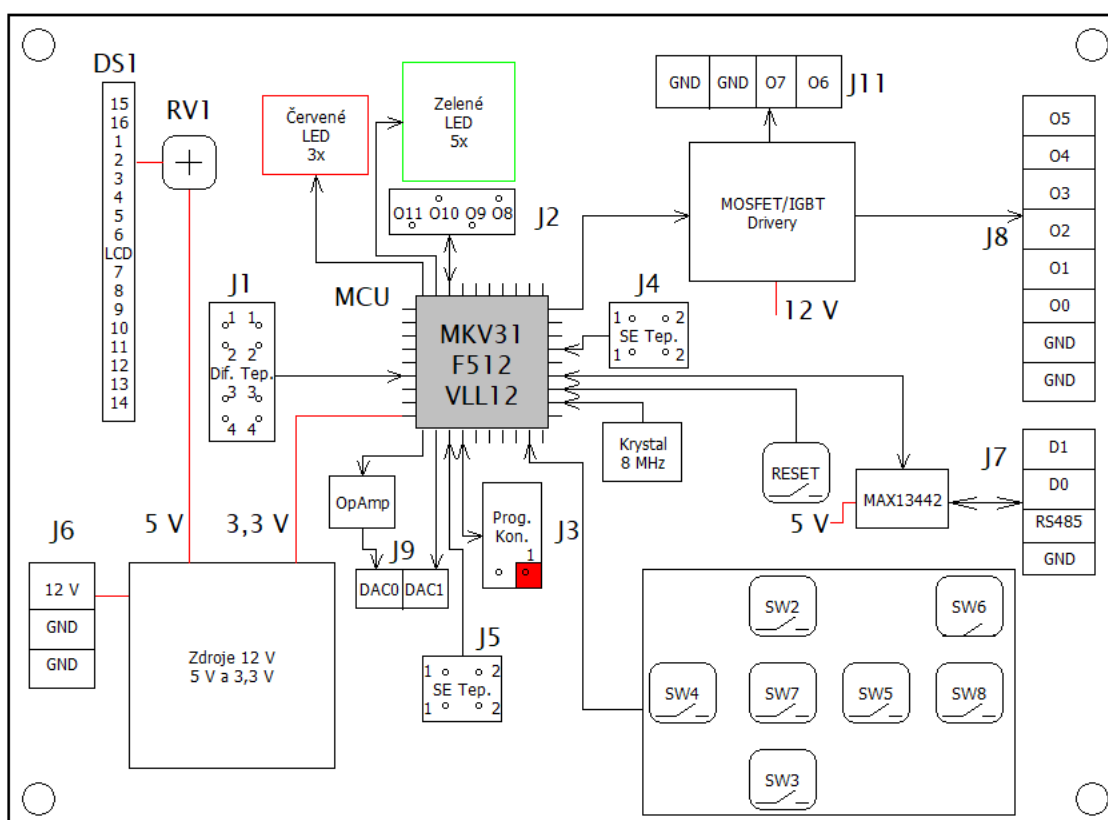
Takto zapojený komparátor může být v soustavě obsažen několikrát, a to na každém místě, kde je riziko překročení teploty. Teplotní senzor je reprezentován odporem RV s nominální hodnotou $1\text{ k}\Omega$. Mezi referenčním odporem R3 a teplotním senzorem je snímáno rozdělené napětí V3. Odporů R1 a R2 v kladné zpětné vazbě, stejně tak jako napětí V4, je nutné zvolit dle požadované hystereze a ofsetu, resp. teploty, při které je vyhlášena chyba a druhé teploty, při níž je vstup „S“ navrácen do logické 0. Vstupní odpor OZ R1 musí být zároveň dimenzován tak, aby nezatěžoval referenční odpor R3.

Klopný SR obvod slouží k udržení informace o překročení teploty. Tato informace je dostupná na výstupu „Q“. Přes tento výstup by mělo být zajištěno odpojení patřičných komponent, aby nedošlo k jejich poškození. Vstup klopného obvodu „R“ může být ovládán například pomocí tlačítka a slouží k vynulování chybového stavu soustavy. Tento vstup může být ovládán i procesorem, který zároveň musí mít zabezpečenou zpětnou vazbu z výstupu „Q“, aby byl o případné chybě informován.

3. Vlastní řešení řídicí desky

Kapitola „Použité komponenty“ obsahuje stručný popis veškerého použitého hardwaru pro řídicí desku a zdůvodňuje jeho použití. Již v minulých kapitolách bylo řečeno, že některé komponenty jsou použity z důvodu aktuální dostupnosti, nikoliv naprosté vhodnosti pro daný účel. Taková situace nastala i v případě některých následujících periférií.

Na obrázku níže je vyobrazena zjednodušená topologie celé řídicí desky. Toto schéma by mělo zajistit lepší přehled o rozložení komponent na PCB. Na konci podkapitoly 3.7 je fotografie téměř osazené desky.



Obrázek 3 - Zjednodušená orientační topologie řídicí desky

3.1. Procesor

Základním kamenem celého řízení je procesor od již odprodané firmy Freescale, nyní tedy NXP, Kinetis KV31F512VLL12. Tento MCU je původně určen pro řízení elektrických motorů, proto mimo jiné disponuje celkem dvaceti kanály PWM na čtyřech nezávislých časových základnách. Pro účely této práce je tedy tato funkce téměř nevyužitá, nicméně jak již bylo řečeno dříve, jedná se o procesor, se kterým má firma LG Systems zkušenosti a také byla schopna tyto procesory okamžitě poskytnout včetně vývojové desky. [2]

Dále je procesor vybaven zcela dostatečným počtem ADC. Celkem se jedná pouze o dva 16bitové kanály, avšak jejich vstupy je možno přepínat – multiplexovat

na mnohem vyšší počet pinů. Dle informací v datovém listu je efektivní počet bitů obou těchto převodníků minimálně 11,4 při SE konverzi, což by mělo pro měření teploty v tomto systému zcela postačovat. Při diferenčním měření je pak ENOB drobně navýšeno na hodnotu 11,9 bitů. Z tohoto důvodu je v programu použito pouze 12bitové rozlišení a dle následujících rovnic je možné psát, že rozlišení takového převodu je: [2]

Počet možných hodnot N při počtu bitů převodníku $M = 12$: [3]

$$N = 2^M = 2^{12} = 4096, \quad (3.1)$$

což znamená rozlišení převodníku pro N možných hodnot: [3]

$$R = \frac{V_{ref}}{N} = \frac{3,3}{4096} \cong 0,000806 \text{ V}, \quad (3.2)$$

kde R je rozlišení převodníku [V], V_{ref} je referenční napětí [V], resp. rozdíl referenčního napětí převodníku a jeho zemního potenciálu (v tomto případě je zemní potenciál 0 V, což ve výsledku znamená referenční napětí 3,3 V). Rozlišení převodníku je tedy přibližně 0,806 mV. V dalších kapitolách bude vysvětleno, jaký vliv má tato hodnota na převod teploty z odporového čidla.

K dispozici je i 12bitový DAC převodník, který bude použit jako ovládací výstup pro BLDC driver (jeden kanál je zapojen do vstupu operačního zesilovače pro dosažení rozsahu výstupního signálu 0 až 10 V DC). Rozlišení tohoto převodníku je totožné jako rozlišení ADC vysvětlené na předchozích řádcích. [2]

Výsledné napětí zmiňovaného DAC kanálu je tedy „vynásobeno“ konstantou 3 pomocí operačního zesilovače tak, aby při referenční hodnotě 3,3 V bylo dosaženo výstupu V_{out} :

$$V_{out} = V_{DAC} \cdot k = 3,3 \cdot 3,0 = 9,9 \text{ V}, \quad (3.3)$$

kde V_{out} je výstupní napětí z operačního zesilovače [V], V_{DAC} je napětí výstupu DAC procesoru [V] a k je konstanta zesílení operačního zesilovače [-] nastavená odporovou sítí na hodnotu 3.

Ovládání ostatních periférií a datových linek je možné pomocí až 70 GPIO. Procesor samozřejmě disponuje dalšími moduly pro komunikaci i zabezpečení chodu, pro příklad hlídání chodu programu (watchdog), ovšem vzhledem k omezenému času na zpracování tohoto projektu jsou prozatím nevyužité. [2]

Pouzdro procesoru je tzv. 100 LQFP, tedy 100vývodové pouzdro s roztečí vývodů 0,5 mm. Celý čip má potom rozměry 14 x 14 mm. Stejně jako zbytek komponent byl na desku pájen ručně včetně nanášení pájecí pasty. Budoucím čtenářům, které by rovněž mohlo něco takového, jako je pájení tohoto pouzdra ručně, napadnout, mohu pouze vzkázat, že to není příliš dobrý nápad. Nakonec se po zdlouhavé a náročné práci celý čip zdá být funkční a bez svodů, nicméně samotné pájení bylo skutečným utrpením. [2][3]

3.2. Napěťová reference

Při zmínce o AD převodníku je nutné dodat také informaci o použité napěťové referenci. Po zvážení možností budoucího použití vyvinuté desky byla zvolena reference 3,3 V, tedy stejná jako napájecí napětí. Tato hodnota byla vybrána zejména kvůli napěťovému rozkmitu teplotních čidel (uvedeno dále), pro který by například hodnota reference 1,1 V již nebyla dostatečná.

Konkrétní použitý model je od firmy Analog Devices s označením ADR3433 (poslední dvě číslice označují výstupní referenční napětí – nutno vydělit deseti). Tyto reference se pyšní přesností až 0,1 %, nízkým příkonem a možností použití i v lékařských zařízeních. [4]

Výstupní proud je v tomto případě pouhých 10 mA, nicméně pomocí jednoduchého výpočtu zjistíme, že i při použití teplotních senzorů PT1000 a referenčních odporů hodnoty 2,2 kΩ vychází na jedno teplotní čidlo proud: [4]

$$I_{tep} = \frac{V_{ref}}{R_{tep}} = \frac{3,3}{3200} = 0,00103, \quad (3.4)$$

kde I_{tep} je proud jednoho čidla [A], V_{ref} je referenční napětí přiložené na čidlo [V] a R_{tep} je celkový odpor teplotního čidla (součet referenčního odporu 2200 Ω a odporu čidla při teplotě 0 °C, dle technického listu 1000 Ω). Jednoduchým výpočtem:

$$I_{celk} = 8 \cdot I_{tep} = 0,00825, \quad (3.5)$$

pak získáme celkový proud I_{celk} [A], který je potřebný při zapojení osmi těchto čidel současně. Je zřejmé, že i při snížení odporu při vyšších teplotách zbývá drobná proudová rezerva, bez ohledu na fakt, že reálně použito bude pouze šest těchto čidel.

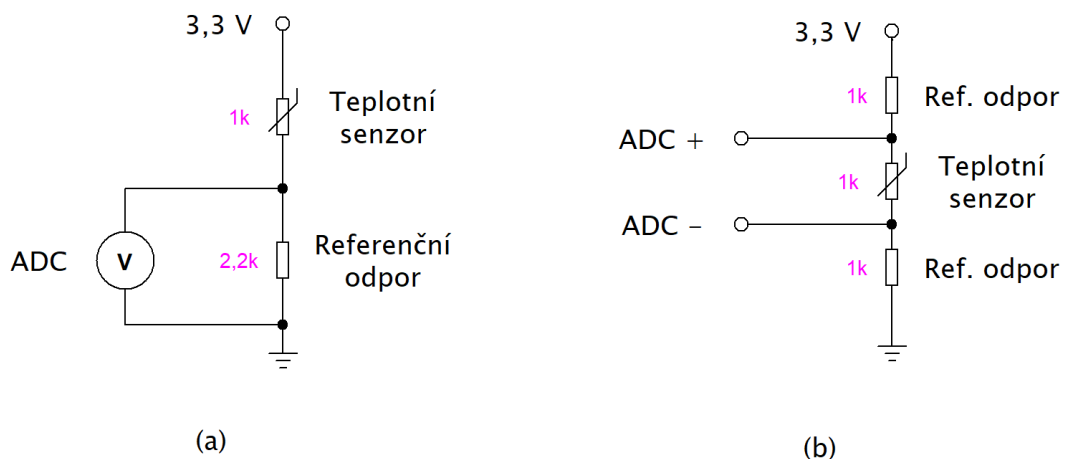
3.3. Teplotní senzory

Zde jsou opět použity komponenty, které již byly k dispozici, respektive tento typ senzorů, PT1000, byl použit v klimatizační jednotce a v rámci udržení počtu rozdílných

komponent na minimum jsou použity senzory se stejnými parametry. Jedná se o platinové senzory typu RTD, tj. jejich odpor je závislý na teplotě.

Teplotní čidla PT1000 jsou velmi dobře použitelná díky své linearitě. Navíc mají dostatečný odpor pro použití při napájení z použité napěťové reference. Dle technického listu [5] se v předpokládaném rozsahu jejich odpor pohybuje mezi hodnotami 882,2 Ω při teplotě -30 $^{\circ}\text{C}$ a 1460,7 Ω při 120 $^{\circ}\text{C}$. [5]

Vzhledem k přesnosti AD převodníku použitého ARM není nutné signál z čidla dále zesilovat. Čidlo umístěné v klimatizované komoře je zapojeno jednoduše (SE) viz následující obrázek (a), zatímco bezpečnostní čidla v klimatizaci jsou kvůli možnému rušení z výkonových obvodů zapojena diferenčně (b).



Obrázek 4 – ukázka zapojení vstupů ADC - (a) SE, (b) diferenční

Je nutné dodat, že výše uvedené zapojení je skutečně realizováno, nicméně kvůli rušení zejména na frekvenci 50 Hz jsou ještě obě zapojení doplněna o rezistory a kapacitory tak, aby tvořily filtry typu dolní propust s časovou konstantou RC přibližně 20 ms. Tato časová konstanta odpovídá úhlové rychlosti 50 s^{-1} , což odpovídá frekvenci přibližně 8 Hz, na které je pokles zisku o 3 dB, takže na frekvenci 50 Hz se již jedná o pokles přes 10 dB. Hodnoty vypočteny dle:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, \quad (3.6)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (3.7)$$

kde ω_0 je úhlová rychlost [s^{-1}], f_0 je zlomový kmitočet [Hz], R je velikost odporu [Ω] a C je velikost kapacitoru v RC článku.

3.3.1. Měřené napětí

Teplotní senzor a referenční odpor (dva referenční odpory v případě diferenčního měření) tvoří jednoduchý napěťový dělič. Se zanedbáním vstupního odporu převodníku můžeme pro zapojení SE psát, že napětí při minimální očekávané teplotě bude následující:

$$U_{max} = U_{ref} \cdot \frac{R_{ref}}{R_{ref} + R_{Tmin}} \doteq 2,355, \quad (3.8)$$

kde U_{max} je maximální měřené napětí AD převodníku [V] při minimálním odporu teplotního čidla ($882,2 \Omega$ při $-30 \text{ }^\circ\text{C}$), U_{ref} je napětí z $3,3 \text{ V}$ reference [V], R_{ref} je referenční odpor [Ω] a R_{Tmin} je odpor teplotního čidla při $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ [Ω].

Dále tedy pro minimální napětí lze psát, že:

$$U_{min} = U_{ref} \cdot \frac{R_{ref}}{R_{ref} + R_{Tmax}} \doteq 1,983, \quad (3.9)$$

kde R_{Tmax} je odpor teplotního čidla při $120 \text{ }^\circ\text{C}$ [Ω].

Celý teplotní rozsah je tedy $150 \text{ }^\circ\text{C}$ v rozsahu měřeného napětí $0,372 \text{ V}$. Podílem těchto dvou čísel získáme koeficient $2,48 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Tato hodnota je přibližně třikrát vyšší než rozlišení ADC (přibližně $0,806 \text{ mV}$) při 12bitovém režimu, tj. při průměrování hodnot z více převodů může být teplota měřena s přesností na méně než $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro tuto aplikaci je toto zcela vyhovující.

Diferenční měření pak probíhá velmi obdobně. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že převodník získá hodnoty napětí ze vstupů „ADC+“ a „ADC-“ téměř v jednom časovém okamžiku. Tyto hodnoty jsou od sebe následně odečteny, čímž je dosaženo odstranění souhlasného rušení na přívodních vodičích teplotního senzoru. Při uvedeném zapojení tato hodnota nemůže být záporná. Pokud by se tak stalo, je vyhlášena příslušná chyba.

Zřejmě není nutné zde popisovat napěťový dělič se třemi odpory, proto uvádím pouze výsledné hodnoty. Při minimálním odporu čidla (teplota $-30 \text{ }^\circ\text{C}$) je očekávané napětí na něm přibližně **1,01 V**, při nejvyšší ($120 \text{ }^\circ\text{C}$) pak tato hodnota stoupne na **1,393 V**. Tento rozdíl oproti předchozím výsledkům je dán faktem, že napětí není měřeno na referenčním odporu, nýbrž na čidle samotném. Referenční odpory navíc mají celkově hodnotu $2 \text{ k}\Omega$ oproti předchozím $2,2 \text{ k}\Omega$.

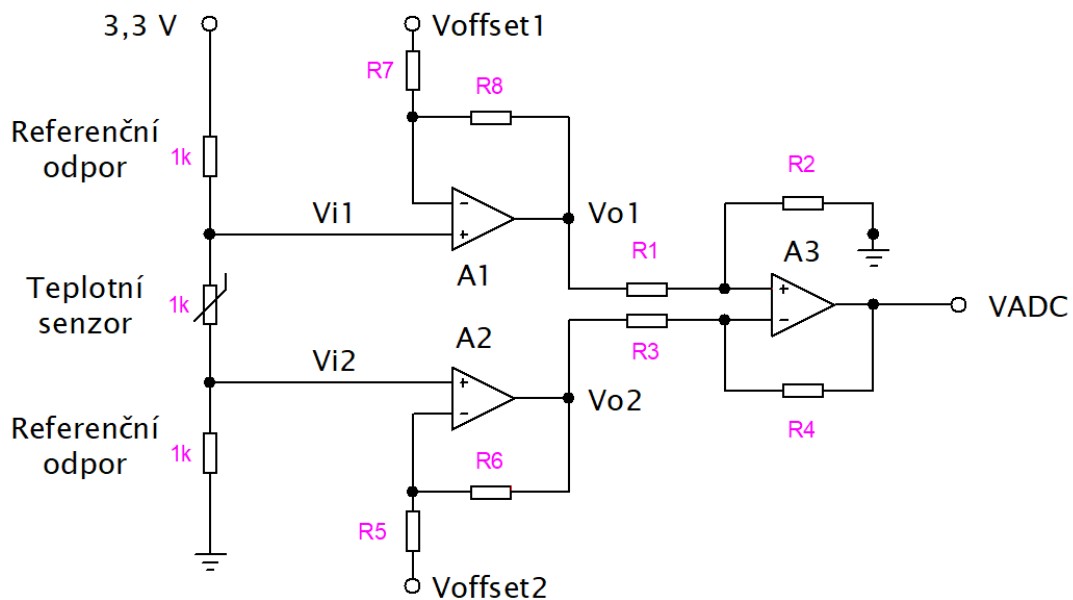
Aplikace v tomto konkrétním systému nevyžaduje extrémně přesné měření teploty, už jen z důvodu velkého zpoždění soustavy i samotných čidel. Při měření teploty procesorem tímto způsobem nastává problém, že zjištěná hodnota může být oproti reálné teplotě zpožděna až o několik vteřin. Tento efekt je umocněn zejména v samotné

klimatizované komoře, kde je čidlo umístěno ve volném prostoru a přenos tepla na něj je zprostředkován plynným médiem a je tedy méně účinný.

3.3.2. Možnosti vylepšení zapojení

Jednou z možností stabilnějšího a přesnějšího měření odporů je tzv. čtyřvodičové zapojení. Tuto metodu zde nebudu dále rozebírat, jelikož v této práci není použito a současně je možné na toto téma získat obrovské množství informací v jiných zdrojích. Místo tohoto řešení jsem zvolil podrobný rozbor speciálního zapojení s operačními zesilovači.

Ačkoliv není následující zapojení realizováno, tuto podkapitolu považuji za velmi zajímavou, zejména pro teoretické budoucí použití. Jako možné řešení pro zvýšení přesnosti, lepšímu odrušení vstupů z čidel a zvýšení citlivosti měření navrhuji následující zapojení s operačními zesilovači:



Obrázek 5 – Měření napětí na odporu pomocí operačních zesilovačů

Operační zesilovač A3 s výstupem přivedeným do převodníku v tomto případě slouží k eliminaci souhlasného rušení pomocí vhodného zapojení odporové sítě a k obnovení intenzity signálu na rozkmit 0 až 3,3 V, což zabezpečí lepší rozlišení teploty. Zesílení je nutno zvolit tak, aby byl pro předpokládaný teplotní rozsah využitý celý rozsah referenčního napětí. Zesilovače A1 a A2 jsou přítomny kvůli vstupnímu odporu celé sestavy, resp. slouží pro oddělení vstupu, aby nebyl zatěžován, a zejména kvůli eliminaci „offsetu“ teplotního čidla způsobeného referenčním odporem zapojeným mezi čidlo a zemní potenciál.

Problémem bohužel zůstává závislost na přesnosti poměru odporů R_6/R_5 a R_8/R_7 zesilovačů A1, A2 a poměry R_2/R_1 a R_4/R_3 zesilovače A3 pro nastavení správného

zesílení a zároveň dokonalého odstranění souhlasného rušení. Pokud však bude rušení zcela odstraněno, není již nutné používat rozdílové vstupy ADC. Další úlohou je přesné nastavení „offsetu“ tak, aby ve stanoveném rozsahu teplot začínal výstup OZ na hodnotě 0 V. Pro výstupní napětí zesilovače A2 lze psát: [6]

$$V_{o2} = G \cdot V_{i2} + (1 - G) \cdot V_{offset1}, \quad (3.10)$$

kde V_{o2} je výstupní napětí OZ A2 [V], G je zisk zapojení s OZ, tj. poměr výstupního ku vstupnímu napětí OZ, ($G = 1 + R_6/R_5$) [-], V_{i2} je vstupní napětí do jeho neinvertujícího vstupu [V] a $V_{offset1}$ je vhodně nastavené napětí dle zvoleného teplotního rozsahu [V].

Napětí $V_{offset1}$ nastavíme dle rovnice nahoře pro $V_{o2} = 0$ a pro zvolený zisk například pomocí odporového děliče z napájecího napětí. Takto vypočtené napětí V_{offset} je pak nutné přepočítat i pro zesilovač A1, aby byl rozdíl těchto výstupních napětí při minimálním odporu teplotního senzoru skutečně 0 V.

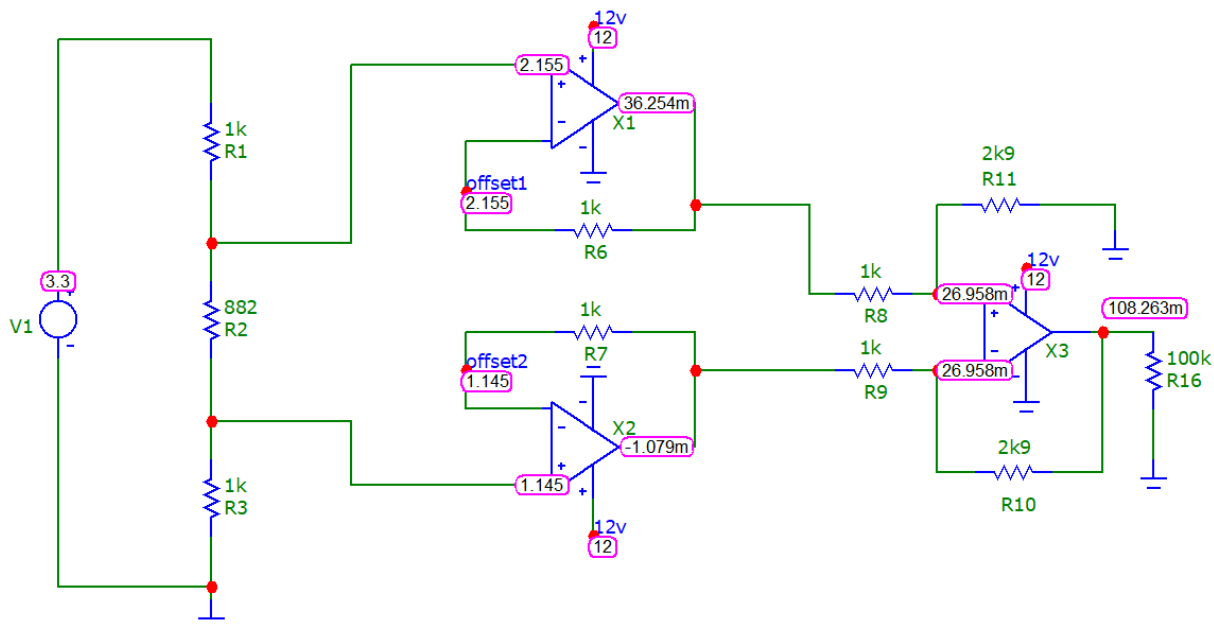
Pro celkové výstupní napětí V_{ADC} pak při volbě $R_1 = R_3$ a $R_2 = R_4$ platí známý vztah:

$$V_{ADC} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{o2} - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{o1}, \quad (3.11)$$

Výstup z OZ A3 je dále možné opatřit filtrem a případnou další chybu způsobenou vlivem vstupních klidových proudů nebo vstupní napěťové nesymetrie řešit softwarově přepočtem přímo v programu MCU.

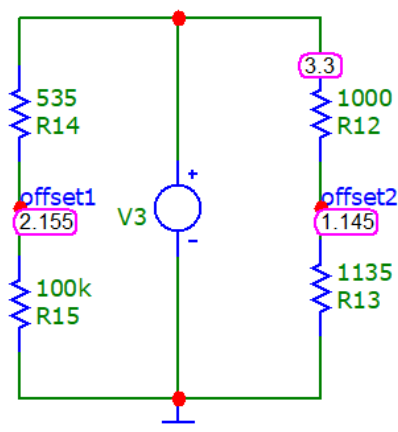
Pro ověření funkčnosti zapojení byl vytvořen obvod v simulačním software Micro-Cap 11. Zcela zásadní informací je, že toto zapojení je v teorii velmi dobré, nicméně pro dosažení požadovaných parametrů v reálném světě zcela nepoužitelné. Naprosto největším problémem je dosažení přesných hodnot odporů a jejich poměrů, popřípadě takové kombinace odporů, aby bylo dosaženo patřičného zesílení, přitom byla zachována funkce obvodu. Hodnoty součástek v následujících schématech mluví samy za sebe.

Nejschůdnějším řešením by pak bylo použití potenciometrů namísto některých nestandardních odporů. Tyto by vyřešily problém speciálních hodnot rezistorů. Problémem však jsou zcela neúměrně nároky na zabraný prostor povrchu DPS, případně velké finanční nároky, pokud by byly použity miniaturní SMD potenciometry.



Obrázek 6 – Výstupní napětí při minimálním odporu teplotního čidla

Simulace „Dynamic DC“ při použití „ideálních“ operačních zesilovačů a minimálním odporu teplotního čidla poskytuje výstupní napětí 106 mV. Při uvažování neideálních OZ by byla volba odporové sítě ještě ztížena. Výsledné napětí pro maximální hodnotu odporu čidla je pak dle simulace s těmito hodnotami rezistorů 3,03 V. Pro úplnost je na obrázku níže uvedeno zapojení sloužící k nastavení napětí $V_{offset1}$ a $V_{offset2}$.



Obrázek 7 – Jednoduché napěťové děliče pro nastavení napětí offsetu

3.3.3. Vyhodnocení odporu senzoru

Již bylo zmíněno výše, že tato teplotní čidla mají lineární závislost odporu na teplotě. Hodnotu jejich odporu lze stanovit podle standardu IEC 751 dle Callendar-Van Dusenovy rovnice: [8]

$$R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3], \quad (3.12)$$

kde R_T je odpor platinového senzoru [Ω] při teplotě T [$^{\circ}\text{C}$], R_0 je odpor senzoru [Ω] při teplotě 0°C , koeficienty A , B a C jsou konstanty stanovené reálným měřením odporu senzoru při několika teplotách. Pro naprosto přesné stanovení odporu (resp. v konečném důsledku teploty) je nutné tyto koeficienty zjistit pro každý senzor. Tento fakt je způsoben vlivem výrobních nedokonalostí, což vede k tomu, že koeficienty se mohou pro každé čidlo lišit.

Pro úplnost uvádím následující rovnice sloužící pro výpočet koeficientů A , B a C : [9]

$$A = \alpha + \frac{\alpha\delta}{100}, \quad (3.13)$$

$$B = -\frac{\alpha\delta}{100^2}, \quad (3.14)$$

$$C = -\frac{\alpha\beta}{100^4}, \quad (3.15)$$

ve kterých získáme konstanty α , β a δ pomocí měření odporu čidla při různých teplotách dle: [9]

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 + R_0}, \quad (3.16)$$

$$\beta = \text{konst. pro } T < 0^{\circ}\text{C}, \text{ pro } T > 0^{\circ}\text{C } \beta = 0, \quad (3.17)$$

$$\delta = \frac{R_0[1 + \alpha(260)] - R_{200}}{4,16 \cdot R_0 \cdot \alpha}, \quad (3.18)$$

Konstanta β je zjištěna empiricky. Zde je zřejmé, že pokud konstanta $\beta = 0$, tak koeficient $C = 0$, což znamená, že pro teploty nad 0°C lze rovnici $R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3]$, (3.12) zjednodušit na: [9]

$$R_T = R_0 (1 + AT + BT^2), \quad (3.19)$$

Několikrát již bylo zmíněno, že pro tuto aplikaci není takto přesné měření teploty nezbytné, proto je v programu rovnice $R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3]$, (3.12) zcela zjednodušena na lineární funkci vypočítanou dle hodnot odporů uvedených v technickém listu:

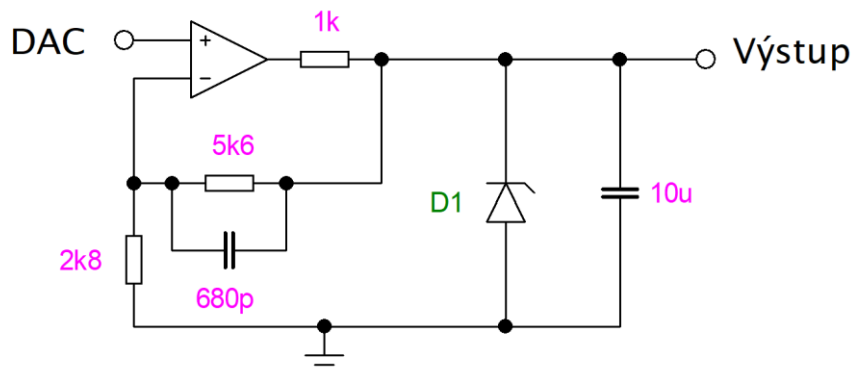
$$R_T = 3.839 \cdot T + K, \quad (3.20)$$

kde R_T je odpor teplotního senzoru [Ω] při dané teplotě T [$^{\circ}\text{C}$] a K je odpor čidla [Ω] při teplotě 0°C ($1000\ \Omega$).

Pro úplnost je třeba dodat, že body použité pro výpočet koeficientů v rovnici $R_T = 3.839 \cdot T + K$, (3.20) byly zvoleny pro teplotu 0°C a 120°C . Tímto například pro teplotu 50°C vypočítáme odpor $1191,96\ \Omega$. Takovým přístupem vznikne chyba čínicí hodnotu odporu o $2,04\ \Omega$ nižší, než je uvedená katalogová ($1194\ \Omega$), což odpovídá chybě zjištění teploty méně než 1°C (citlivost odporu senzoru odpovídá přibližně $3,9\ \Omega/^{\circ}\text{C}$).

3.4. Analogový zesilovač

Operační zesilovač je v analogovém zesilovači použit pouze jeden a slouží pro zesílení výstupního napětí z DAC procesoru na rozsah 0 až 10 V. Přesně vypočtená hodnota je uvedena v podkapitole „Procesor“ výše. Principiální zapojení je uvedeno níže. Výstup je opatřen ochranným transilem D1 a kondenzátorem o velikosti $10\ \mu\text{F}$ sloužícím pro filtraci případných nežádoucích rychlých změn výstupního napětí. Odpor velikosti $1\ \text{k}\Omega$ je zařazen na výstup OZ kvůli jeho ochraně při sepnutí transilu D1 proti nadměrnému proudu. Tento rezistor je zařazen do zpětné vazby, aby neovlivňoval výstupní odpor celého zapojení (jeho velikost je vydělena vratným rozdílem zesilovače).



Obrázek 8 - Schéma zapojení analogového zesilovače pro DAC

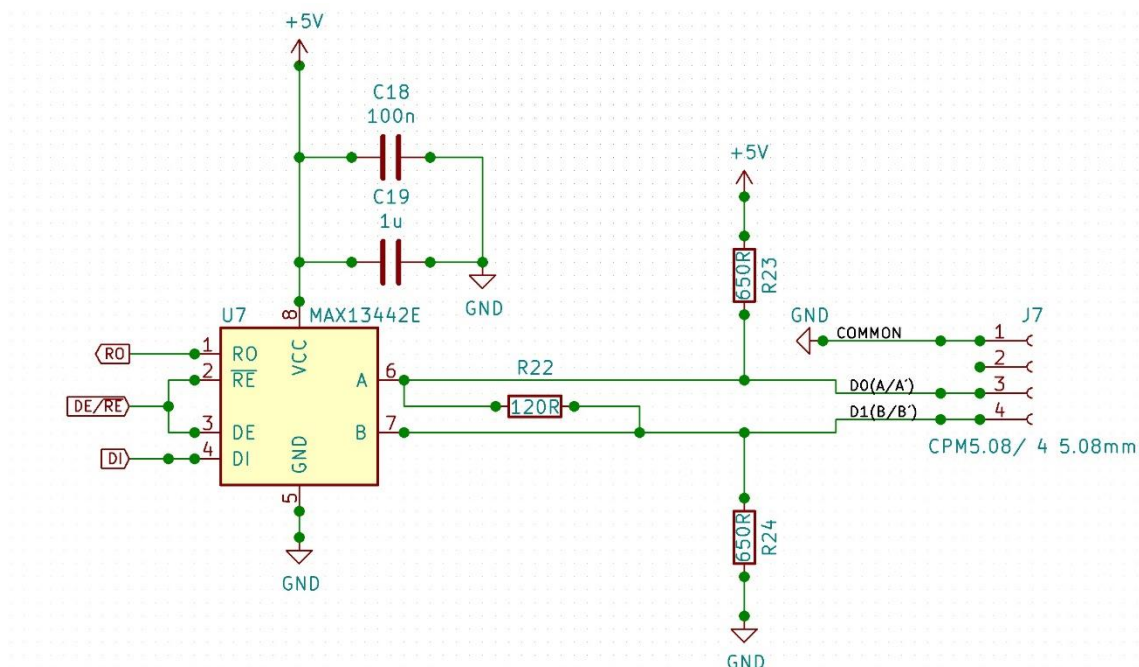
Konkrétní použitý model OZ je OPA170 od firmy Texas Instruments. Jedná se o standardní operační zesilovač s nízkým offsetem typicky $0,25\ \text{mV}$, šířkou pásma $1,2\ \text{MHz}$, nízkým šumem $19\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a vstupními klidovými proudy v řádu jednotek pikoampérů. [7]

3.5. Driver RS485

Jedním z požadavků firmy byla implementace alespoň hardwarové části rozhraní RS485. K tomuto účelu byl vybrán specializovaný čip od Maxim Integrated **MAX13442E**. Tento je vybaven ochranami proti přepětí na vývodech ± 15 kV a ± 80 V při chybě na komunikačních linkách a řízenou rychlostí přeběhu sloužící k eliminaci vyzařovaného rušení a odrazů na lince. V neposlední řadě nechybí taktéž proudová ochrana výstupu. [10]

Rychlost komunikace dosahuje až 250 kbps (související model MAX13443E slouží pro rychlejší komunikaci, která může dosahovat až 10 Mbps). Maximální počet zařízení na lince je 128, napájení je stanoveno na 5 V. [10]

Připojení čipu k MCU je taktéž realizováno přímo na hlavní desce s procesorem. Schéma zapojení komunikační linky je uskutečněno dle standardu uvedeného v [11] a doporučeného zapojení v [10]. Zmíněné schéma je vykresleno na následujícím obrázku. Dle požadavků jsou použity všechny tři odpory na linkách a jsou připájené natrvalo.



Obrázek 9 – Schéma zapojení driveru pro rozhraní RS485

Vývody RE a DE jsou elektricky propojeny. Při řízení komunikace tyto vývody není nutné ovládat separátně, takže tímto krokem došlo k usnadnění ovládání a ušetření jednoho vývodu procesoru. Implementace protokolu MODBUS je popsána v podkapitole „Program“.

3.6. MOSFET driver

EL7457 je velmi rychlý spolehlivý driver určený zejména pro kapacitní zátěže. Jedná se o čip schopný pracovat jako spínač až do rychlosti 40 MHz. Výrobce se pyšní velmi rychlou náběžnou hranou 12 ns pro 1 nF zátěž. V této aplikaci nejsou takové parametry

zcela směrodatné, nicméně pro budoucí použití lze takový driver použít i pro propagaci hodinového signálu. [12]

Na řídicí desce jsou umístěny celkem dva uvedené budiče. Každý tento budič disponuje čtyřmi kanály vstup-výstup. V době dokončování této práce je z těchto použito celkem 5 – jmenovitě se jedná o ovládání ventilátoru uvnitř komory, signál PWM pro škrtkový ventil klimatizace, ovládání rozdělovacího ventilu, spínání elektrické topné spirály a ovládání větráčku v rozvaděči.

3.6.1. Maximální možné zatížení

Dle technického listu EL7457 je zatěžování čipu omezeno teplotou křemíku, která nesmí přesáhnout hodnotu 125 °C. Výkonové ztráty lze vypočítat dle: [12]

$$PD = (V_S \cdot I_S) + \sum_1^4 (C_{INT} \cdot V_S^2 \cdot f) + (C_L \cdot V_{OUT}^2 \cdot f), \quad (3.21)$$

kde PD jsou výkonové ztráty [W], V_S je rozdíl napětí na napájecích pinech [V], I_S je klidový napájecí proud [A] maximálně 3 mA, C_{INT} je interní kapacita [F] maximálně 80 pF, f je frekvence spínání zátěže [Hz], C_L je kapacita zátěže na výstupu [F] a V_{OUT} je rozdíl napětí na výstupu log. 1 a 0 [V], v tomto případě platí $V_S = V_{OUT}$.

Driver v našem případě neslouží pro rychlé spínání, proto celý člen za sumou ztrácí smysl a důležitá je pouze první část rovnice. Na tyto drivery budou na separátní desce připojeny tranzistory MOSFET, jejichž kapacita hradla není vyšší než 1 nF, což dle grafu v technickém listu odpovídá napájecímu proudu 2 mA na jeden kanál. Tato hodnota však platí pro spínání na frekvenci 100 kHz a při použití budičů pro jednoduché sepnutí nebo vypnutí periferie je proud odebírán právě pouze při tomto sepnutí, čímž dochází k eliminaci i prvního členu rovnice a pro zvolenou kapacitní zátěž není třeba výkonové ztráty počítat.

Pro úplnost doplňuji ještě informace k výkonovým ztrátám kvůli možnému budoucímu použití driverů jako vysokorychlostních spínačů. Dle technického listu je nutné pro správnou volbu pouzdra driveru dopočítat odhadovanou teplotu křemíku dle:

$$T_{JMAX} = T_{MAX} + \theta_{JA} \cdot PD, \quad (3.22)$$

kde T_{JMAX} je teplota křemíku [°C] maximálně 125 °C, T_{MAX} je nejvyšší předpokládaná okolní teplota a θ_{JA} je tepelný odpor křemíku vůči okolí [KW⁻¹] (kombinace PCB a pouzdra). [12]

Za zmínku jistě stojí fakt, že v technickém listu má být v rovnici $T_{JMAX} = T_{MAX} + \theta_{JA} \cdot PD$, (3.22) parametr θ_{JA} odečten z grafu, který však v datasheetu není vyobrazen (datasheet viz zdroj [12], FN7288 Rev 4.00 January 26, 2012).

3.7. Ostatní komponenty na PCB

Přes zdánlivou jednoduchost celé řídicí desky se na ní nachází poměrně velké množství dalších součástek. Není účelem rozebírat dopodrobna například použité regulátory napětí a jejich zapojení, nicméně považuji za vhodné zbylé prvky alespoň jmenovitě i s krátkým komentářem zmínit. PCB je osazeno prakticky výhradně součástkami pro SMD montáž.

3.7.1. Ostatní aktivní prvky

Na desce je větší množství zelených a červených informačních LED. Jelikož je použit pouze dvouřádkový displej, informace na něm zobrazené jsou tímto velmi omezené, a právě tento handicap by měly osazené diody kompenzovat.

Celkem je osazeno 5 zelených a 3 červené diody. Zelené diody slouží jako nepřetržitý zdroj informací o správné funkci/zapnutí jednotlivých komponent, zatímco červené mají doplňovat oznámení o chybových stavech. Diody jsou zapojeny na napětí 3,3 V přes odpor 1,2 k Ω do procesoru, jsou tedy zapínány v logické 0 procesorem.

Posledními aktivními prvky jsou regulátory napětí. Konkrétně se jedná o 5 V regulátor TLE 4284 DV50 od Infineon Technologies, 3,3 V regulátor LD1117S33 od STMicroelectronics a 3,3 V napěťová reference ADR3433 od Analog Devices.

Všechny použité regulátory a napěťová reference mají velmi jednoduché zapojení na PCB – obvykle je spojen vstupní napěťový pin paralelně s jedním keramickým kondenzátorem (v případě TLE 4284 DV50 minimálně 100 nF) a výstupní pin s o něco větším kapacitorem (v případě TLE 4284 DV50 10 μ F s ESR mezi 0,1 a 10 Ω kvůli stabilitě). [14]

Původní záměr byl napájet desku ze zdroje 24 V, na desce by se pak nacházel regulátor s výstupním napětím 12 V (napájení 12 V driverů) a za ním regulátory 5 a 3,3 V s další 3,3 V referencí pro teploměry. Bohužel vybrané tranzistory (určené pro spínání malé indukční zátěže) schopné sepnout napětí až 30 V byly zcela nedostupné, proto takové zapojení ztratilo smysl. Místo 12 V regulátoru je tedy zapojena propojka a celá deska je napájena ze spínaného zdroje 12 V.

3.7.2. Pasivní součástky

Nejpočetnějším zástupcem v této skupině jsou odpory a kondenzátory. Jejich naprostá většina byla vybrána v pouzdru 0805 kvůli úspoře místa na desce při zachování možnosti pájet tyto komponenty ručně. Část kapacitorů je pak elektrolytických a dle doporučení v technických listech bylo použito i několik tantalových (pouzdra velikosti C).

Připojení externích periférií k desce je realizováno pomocí konektorů se zámkem a roztečí vývodů 5,08 mm. Pro odporová čidla teploty a výstup DAC jsou pak přichystány standardní piny (bez zámků) s roztečí 2,54 mm. Velkou chybou v návrhu bylo snažit se tyto piny použít v provedení SMD. Dostupnost těchto pinů

s takovou roztečí není příliš dobrá, což vedlo k použití upravených pinů THT s úhlem zahnutí vývodů 90° .

Bohužel se ukázalo, že takto připájené piny nedrží příliš dobře na ploškách DPS. Pro normální funkci (tím se myslí, že po prvním zapojení teploměrů a ostatních prvků do řídicí desky se dále nebudou odpojovat a nebude s nimi od té chvíle pohybováno) by měly být dostatečně odolné, nicméně pro příště by určitě bylo dobré použít klasické piny THT zaletované přímo do PCB.

Na desce je dále připojeno množství ochranných transilů a diod. Transily jsou 15voltové obousměrné a jsou připojeny paralelně k výstupům z 12 V budičů a na výstup DAC pro dodatečnou ochranu. Dvě z ochranných diod brání proti zápornému přepětí dva výstupy s tranzistory určené k připojení malé indukční zátěže. Poslední ochranná dioda je zapojena paralelně k napájecímu napětí, slouží tedy jako ochrana proti prepólování celé desky. Samozřejmě se při takovém řešení předpokládá použití napájecího zdroje s ochranou proti zkratu.

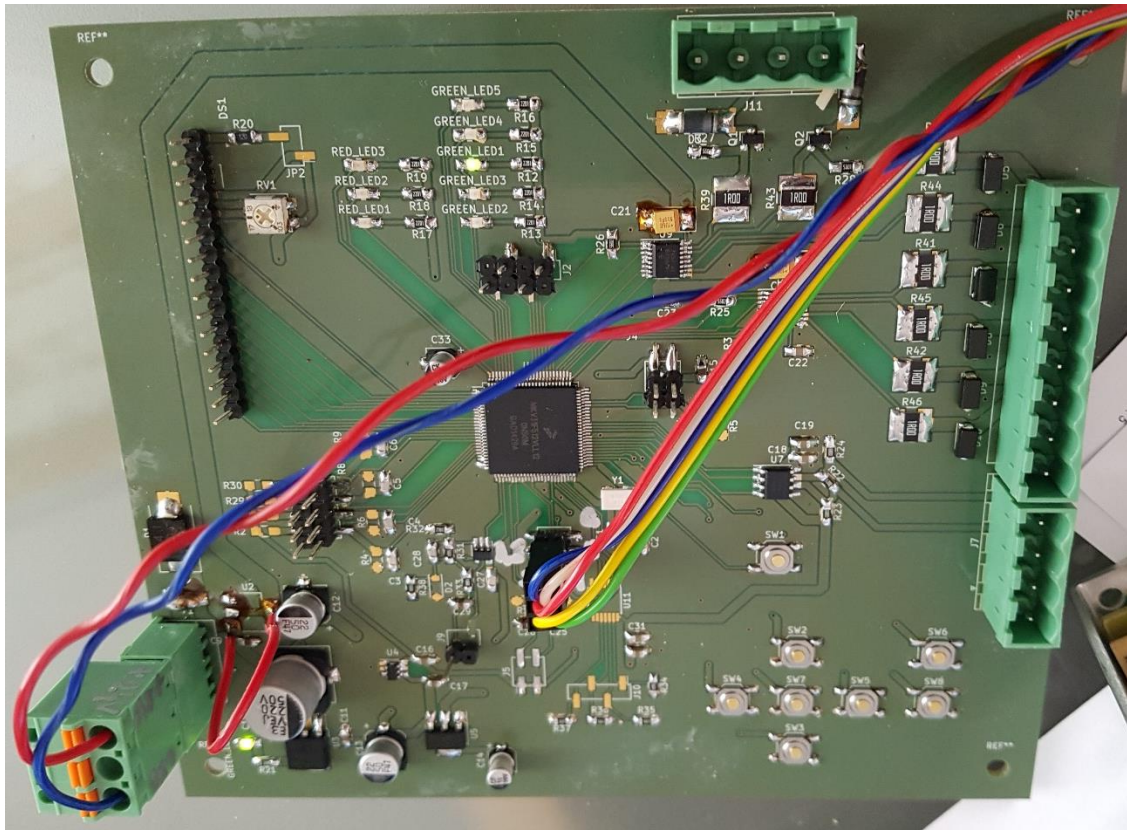
Uživatelskými ovládacími prvky jsou zejména použité mikropínače. Tyto slouží k navigaci v menu zařízení apod. s tím, že by se vzhledem k implementaci komunikace přes protokol MODBUS nemělo jednat o hlavní ovládání, nýbrž o jakousi záložní variantu. Dále je na desce umístěn miniaturní SMD potenciometr, ten však slouží pouze k nastavení kontrastu LCD modulu a dle mých vlastních zkušeností z bakalářské práce je dostačující tento potenciometr jednou nastavit na vyhovující kontrast a není nutné dlouhodobě toto nastavení upravovat.

Na závěr této kapitoly doplňuji obrázek téměř kompletně osazené desky s již připojeným programátorem a napájením (místo 12 V regulátoru je již zde použita propojka, takže deska je napájena 12 V ze spínaného zdroje). V levém dolním rohu je připojena dioda na výstup regulátoru 5 V indikující jeho správnou funkci a ve střední části nahoře lze vidět svítící zelenou diodu sepnutou procesorem po nahrání a spuštění prvního programu.

Levá dolní část desky tedy obsahuje napájecí konektor s ochrannou diodou, veškeré napěťové regulátory a referenci. Vpravo od nich je umístěn operační zesilovač (zde ještě nesprávně zapojen a umístěn přímo na desce) a úplně vpravo ovládací tlačítka a konektory pro periferie.

Střední části dominuje procesor, vpravo od něj je umístěn čip zprostředkující rozhraní RS485 s konektorem a vlevo od procesoru piny připravené pro odporová čidla (celkem čtyři diferenční vstupy, zde ještě chybí referenční odpory).

Pravá horní část je obsazena 12 V budiči s ochrannými diodami a odpory. Zcela v horní části je poslední konektor sloužící k připojení indukční zátěže – na tyto konektory jsou připojeny několikrát zmiňované tranzistory s ochrannými diodami. Nalevo od těchto komponent se nacházejí informační zelené a červené LED. Poslední část úplně vlevo je osazena konektorem pro dvouřádkový displej s miniaturním potenciometrem nastavujícím kontrast LCD.



Obrázek 10 - Téměř kompletně osazená řídicí deska

Konektor pro LCD je tvořen jednořadými THT piny a je připájen klasicky skrz PCB, takže na rozdíl od ostatních pinů zde nehrozí poškození při jeho odpojování.

3.8. Výroba plošného spoje

Výroba plošného spoje byla zadána do firmy PragoBoard s.r.o. Neodmyslitelnou součástí tedy bylo vygenerování potřebných podkladů pro výrobu – masky horní a spodní vrstvy mědi, nepájivých masek a popisků. Zpracování desky je velmi kvalitní a proti výrobě tak nelze mít nejmenších výhod.

3.8.1. Známé omyly na PCB

Několik chyb již bylo zmíněno – nefunkčnost 12 V zdroje, záměna pouzdra operačního zesilovače a nevhodné SMD připojovací piny s roztečí 2,54 mm. Přestože je deska celkově funkční, bohužel se nejedná o jediné problémy na ní.

Zprv bych chtěl poukázat na PWM výstup s 12 V budičem připojeným na malý tranzistor. Zde je zajímavé, že z procesoru lze výstup PWM bezproblémově naměřit, zatímco již na výstupu 12 V budiče žádný signál není. Prozatím se nepodařilo najít příčinu toho jevu, nicméně, pokud se ani v budoucnu nepodaří odhalit původ problému, jako vhodné řešení lze doporučit použít jiný funkční výstup 12 V budiče – při orientační zkoušce výstupů se ty bez připojených tranzistorů zdály být plně funkční.

Další odhalený nedostatek souvisí opět se zmíněným PWM výstupem, týká se ovšem i dalších výstupů. Při návrhu bylo uvažováno použití interních pull-up resp. pull-down rezistorů v procesoru. Ukázalo se však, že při aplikaci pinu jako PWM zřejmě tyto interní komponenty nejsou k dispozici, což znamená, že při softwarovém odstavení zmíněné PWM regulace je výstup ve stavu vysoké impedance.

Tento problém má tedy řešení pouze softwarové (s ohledem na rozteč vývodů MCU a celkově malé rozměry desky je nemyslitelné dodatečné připojení odporu na pin), a tím je neustále aktivovaný časovač zajišťující PWM. Pokud tedy není výstup na příslušném pinu žádoucí, je nutné nastavit střihu PWM na 0 %, nikoliv vypnout zmíněný časovač.

Jiným řešením je místo integrovaného PWM použít časovač pouze pro odměřování časového úseku a odpovídající pin jako standardní GPIO, který se bude v závislosti na zadané střídě nastavovat do logické jedničky nebo nuly. Elektronické ventily obvykle neumožňují použití vyšší ovládací frekvence než jednotky stovek Herzů, takže by rychlost procesoru pro tento účel byla zcela dostatečná. Samozřejmě by takové ovládání muselo probíhat přímo v přerušení časovače, nikoliv v hlavní smyčce programu. Jednalo by se tak o jakési pseudo-PWM s možností použít interní pull-up/pull-down rezistor procesoru.

3.8.2. Možná budoucí vylepšení

Již v minulé podkapitole bylo zmíněno, že pro zajištění kvalitnějšího návrhu by bylo vhodné použít externí pull-up nebo pull-down rezistory, a to na všech předpokládaných výstupech. Následující návrhy souvisí s možností vylepšit zapojení po důkladném otestování této desky a případnou výrobou nového PCB již se značnými vylepšeními.

Jedním z nejdůležitějších aspektů je ochrana vnějších obvodů proti zkratu. Nejlepším řešením by pravděpodobně bylo použití driverů, které již tuto funkci nají integrovánu a obvykle postačí jeden rezistor snímající sepnutý proud, případně použití tranzistorů se snímacím emitorem.

Procesor také disponuje skutečně úctyhodným počtem vývodů, na nichž lze měřit analogový signál, čímž by bylo možné použít větší množství teploměrů pro snímání teploty některých zatěžovaných komponent a lépe je tak chránit proti zničení.

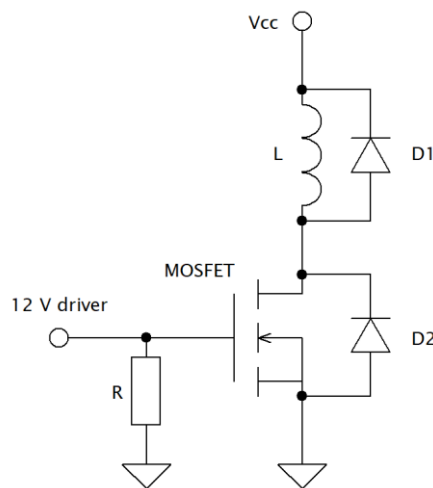
Díky stále poměrně vysokému počtu nepoužitých vývodů lze také zavést množství zpětných vazeb – kontroly, zda je výstup, jež má být sepnut, skutečně sepnutý. Reálně by tak jednalo zřejmě o řadu dalších snímacích rezistorů, případně jiných vhodných senzorů napojených na procesor. Ten následně vyhodnocuje, jestli je kontrolovaná součástka po pokynu uvést ji do provozu skutečně aktivní.

Dalším velmi vhodným zlepšením by bylo použití OLED displeje namísto stávajícího dvouřádkového LCD s informačními diodami. Použité MCU disponuje dostatečným výkonem a obsluha grafického displeje s dotykovou vrstvou by pro něj neměla být velkou výzvou. Takové řešení by při použití vhodného rozhraní navíc ušetřilo množství vývodů procesoru, zejména s ohledem na použité 8vodičové připojení LCD (jak již bylo naznačeno, celkem je na současné desce použito pro LCD a informační LED 18 vývodů MCU).

Jedním z menších vylepšení by také mohlo být doplnění měřicích bodů na desku. Tento nedostatek se projevil při kontrole výstupu PWM. Signál nyní musí být měřen přímo na vstupu 12 V driveru, což je vzhledem k jeho rozměrům prakticky špatně proveditelný, a z hlediska způsobení možného zkratu nebezpečný, úkol.

3.9. Spínání výkonové části

Navržená deska disponuje celkem šesti ovladatelnými výstupy 12 V driverů. Pravděpodobně nejschůdnějším řešením ovládní komponent vyžadující vyšší proudy bude vytvoření další „výkonové“ desky, která pojme šestici MOSFET tranzistorů s ochrannými prvky a chlazením. Jednoduché schéma zapojení pro ovládní indukční zátěže (může být např. relé) obsahující pull-down rezistor R a ochrannou diodu D1 proti zápornému přepětí při vypínání zátěže L:



Obrázek 11 - Jednoduchý spínač indukční zátěže

Toto zapojení je možné doplnit o některá dříve zmiňovaná vylepšení, zejména snímač proudu tranzistorem (může se skládat z měřicího rezistoru a OZ), který poskytne informaci o skutečném sepnutí zátěže a zároveň může být využit jako ochranný prvek proti přetížení tranzistoru.

3.9.1. SSR – Solid State Relays

Pokud uvažujeme použití solid state relé namísto elektromagnetických, teoreticky by mělo být možné spínat takové relé přímo z výstupu 12 V driveru, nicméně takový přístup rozhodně není doporučený. Avšak díky velmi malému proudu nutnému ke spínání SSR je možné připojit na výstupy driverů tranzistory ve značně nižší výkonové kategorii. Obvyklá proudová spotřeba SSR se pohybuje v řádu desítek miliampérů.

Kvůli finanční stránce věci rozhodně nelze zapomenout na součástku zvanou triak. Při použití takového spínacího prvku s patřičným obvodem může být cena celkového zapojení řádově nižší.

Jako příklad jsem vybral spínací obvod od Fairchild Semiconductor Corporation MOC3061. Jedná se již o starší součástku (proto také ještě firma Fairchild), ovšem stále funkční a pro tento účel jistě použitelnou. V případě modelu MOC3063 by dokonce teoreticky mělo být spínání možné přímo z MCU, jelikož je spínací napětí optického spínače maximálně 1,5 V a spínací proud 5 mA. [21]

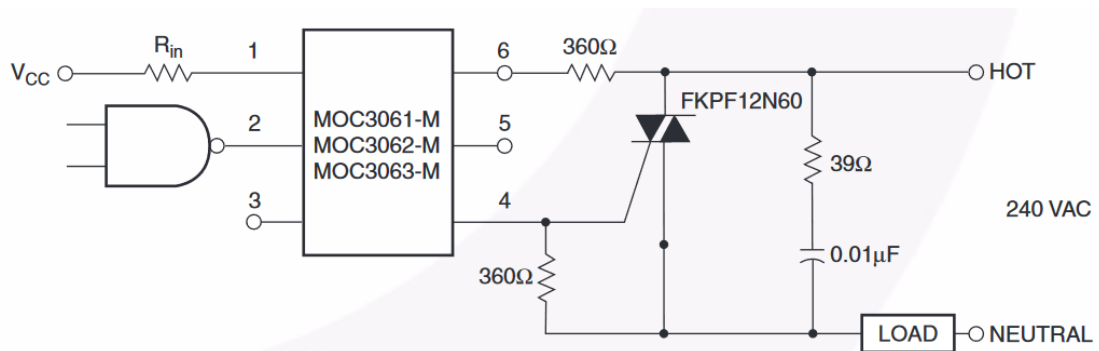


Figure 10. Hot-Line Switching Application Circuit

Obrázek 12 - Doporučené zapojení MOC3061 [21]

Ze schématu poskytnutého výrobcem je zřejmé, že při současné ceně tohoto IO cca 20 Kč a ceně spínacího triaku přibližně na stejné úrovni je toto řešení oproti hotovému SSR (řádově stokoruny) značně nižší.

Při použití tohoto spínacího prvku v kombinaci s detektorem průchodu nulou by také bylo možné poměrně jednoduše zkonstruovat regulaci pomocí úhlu sepnutí řízenou procesorem namísto spínání relé po určitou dobu v periodě o řádu desítek vteřin. Detektor nuly posílá pulz do vstupu procesoru, který tuto informaci zpracuje a při detekci sestupné hrany tohoto pulzu odměřuje čas pomocí časovače dle zvoleného úhlu sepnutí. Po stanovené době vyšle MCU pulz na „gate“ pro sepnutí triaku – toto je třeba opakovat v každé půlperiodě, jelikož se triak při průchodu nulou automaticky vypíná.

4. Programové vybavení

Návrh řídicí desky je pouze jednou částí této práce a jistě by nebyla kompletní bez odpovídajícího programu, jež tuto desku bude ovládat. V této kapitole je kompletně popsána činnost programu včetně inicializace proměnných, nastavení potřebných interních periférií procesoru a ovládání celého systému. Hlavními částmi programu jsou:

- Nastavení všech požadovaných periférií procesoru (ADC, DAC, časovače apod.)
- Ovládání a výpis informací na LCD
- Nastavení počátečního stavu výstupů na prvky celého řízeného klimatizačního okruhu
- Uživatelské rozhraní zprostředkující přístup ke konstantám použitým v procesu a k regulaci
- Implementace protokolu MODBUS
- Sekvence pro první spuštění klimatizace a její případnou odstávku
- Samotný proces regulace teploty v komoře

Již bylo několikrát zmíněno, že celý systém je řízen procesorem od bývalé firmy Freescale, KV31F512VLL12. Nyní se již jedná o společnost NXP, která vývojářům poskytuje své vlastní vývojové prostředí MCUXpresso IDE. V tomto vývojovém prostředí a v přidruženém programu MCUXpresso Config Tools byl vytvořen celý program regulátoru.

Vzhledem ke svým zkušenostem zejména z bakalářské práce jsem k programování zvolil jazyk C. Jedná se o velmi jednoduchý, přitom komplexní programovací jazyk, který je například v komunitě amatérských programátorů velmi rozšířen, což zajišťuje velké množství informací volně k dispozici na internetu.

Velká rozšířenost jazyka C je dána i tím, že mnoho výrobců jednočipů poskytuje vývojová prostředí zvládající jazyky Assembler, C a C++. Assembler je však zejména pro začínajícího programátora obvykle příliš nesrozumitelný a v jazyku C++ lze běžné funkce těchto procesorů obvykle programovat zcela totožně jako v jazyce C.

4.1. Nastavení periférií

Stejně tak jako v případě procesorů AVR, i zde je možnost veškeré interní periferie nastavovat pomocí bitů v příslušných registrech. Procesory ARM jsou však obvykle značně složitější než AVR, kvůli čemuž je namísto tohoto způsobu přímo v knihovnách poskytovaných výrobcem implementována řada funkcí zjednodušujících tuto úlohu.

Uživatel takto obvykle pouze do připravené funkce vepíše název požadované periferie, jakým způsobem ji chce inicializovat a případně pomocí další funkce tuto periferii spustí nebo vypne. Samotná inicializace je, obzvláště v případě komplexnějších periférií (například FlexTimer, jehož příklad bude uveden dále), provedena strukturou obsahující jednotlivé proměnné ovlivňující funkci dané periferie.

Nastavení je dále zjednodušeno tím, že zmíněná struktura je v již poskytnutých knihovnách přichystána a lze ji uvést do určitého počátečního stavu pomocí dodané funkce z knihovny.

Tato struktura může obsahovat i poměrně velké množství proměnných, a to navíc různých typů. Hodnoty, které se do těchto proměnných ukládají mohou být například několik obyčejných čísel bez znaménka.

Z velké části je inicializace periférií procesoru zajištěna pomocí automaticky vygenerované části programu podpůrným nástrojem MCUXpresso Config Tools. Až na některé drobné nedostatky (jako je třeba nefunkční automaticky vygenerovaný zápis pro nastavení pull-up nebo pull-down rezistorů na vstupech) je zápis vytvořený programem funkční, proto je téměř beze změn použit v programu k této práci. Nastavení počátečního stavu po zapnutí systému je pak uskutečněno dle ukázkových projektů.

Pro úplnost – program Config Tools zjevně poskytuje i možnost vygenerovat příslušný zápis pro inicializaci pinů tak, aby měly i patřičný počáteční stav, nicméně při řešení této práce se mi osvědčilo tuto inicializaci provést vlastnoručně dle zápisů v ukázkových projektech, jak je zmíněno výše.

Dle automaticky vytvořených souborů programem MCUXpresso Config Tools je k uživatelskému názvu každého pinu přidělen požadovaný fyzický vývod MCU – jeho port, číslo pinu a další atributy.

V následujících podkapitolách je pro lepší představu o funkci programu uvedeno několik vysvětlujících diagramů.

Zde nyní uvádím příklad nastavení jednoho kanálu FTM – speciální nastavení kvůli zapnutí PWM výstupu pro expanzní ventil klimatizace. Nastavení je převzato a upraveno z ukázkového příkladu `ftm_simple_pwm`.

1. Použití knihovny s připravenými funkcemi pro ovládání FTM

```
#include "fsl_ftm.h"
```

2. Nyní v hlavičkovém „header“ souboru nastavení pinů definujeme vlastní názvy pro tuto periférii (třetí časovač FTM3 a pin číslo 83 – PORTC11, tedy kanál 7)

```
#define PERIF_OUT_07_PERIPHERAL FTM3  
#define PERIF_OUT_07_CHANNEL 7
```

3. Nyní další definice pro správnou funkci – hodinový signál pro časovač, případně další přejmenované konstanty pro přerušení (není použito)

```
#define FTM_SOURCE_CLOCK3 CLOCK_GetFreq(kCLOCK_BusClk)  
#define FTM_INTERRUPT_NUMBER FTM3_IRQn  
#define FTM_LED_HANDLER FTM3_IRQHandler  
#define FTM_CHANNEL_INTERRUPT_ENABLE  
kFTM_Chnl7InterruptEnable
```

```
#define FTM_CHANNEL_FLAG kFTM_Chnl7Flag
```

4. Inicializace struktur s parametry a nahrání některých vlastních parametrů do těchto struktur

```
// Struktura pro nastavení PWM
ftm_chnl_pwm_signal_param_t ftmParam;
ftmParam.chnlNumber = PERIF_OUT_O7_CHANNEL;
ftmParam.level = pwmLevel;
ftmParam.dutyCyclePercent = updatedDutycycle;
ftmParam.firstEdgeDelayPercent = 0U;

// Druhá struktura pro FTM a její inicializace
ftm_config_t ftmInfo;
FTM_GetDefaultConfig(&ftmInfo);
ftmInfo.prescale = kFTM_Prescale_Divide_1;

// Nyní již samotná inicializace pomocí funkcí z knihovny
FTM_Init(PERIF_OUT_O7_PERIPHERAL, &ftmInfo);
FTM_SetupPwm(PERIF_OUT_O7_PERIPHERAL, &ftmParam, 1U,
kFTM_CenterAlignedPwm, 200U, FTM_SOURCE_CLOCK3);
```

Proměnná `pwmLevel` pouze udává, jestli je PWM aktivní v logické 0 nebo 1, `updatedDutycycle` je proměnná udávající požadovanou střídu výstupu (hodnota 0 až 100).

Ve funkci `FTM_SetupPwm()` vyjadřuje hodnota `200U` číslo bez znaménka a jedná se o požadovanou frekvenci výstupu PWM signálu. Funkce samotná zařizuje správný přepočítání ze zdroje hodin, aby tato frekvence odpovídala skutečnosti.

5. Na závěr již zbývá jen aktivovat hodinový signál pro zahájení výstupu PWM

```
FTM_StartTimer(PERIF_OUT_O7_PERIPHERAL, kFTM_SystemClock);
```

6. Pokud by bylo z jakéhokoliv důvodu potřeba používat přerušování, je možné ho aktivovat pomocí další funkce

```
FTM_EnableInterrupts(PERIF_OUT_O7_PERIPHERAL,
                     FTM_CHANNEL_INTERRUPT_ENABLE);
EnableIRQ(FTM_INTERRUPT_NUMBER);
```

7. Dále je potřeba aktualizovat střídu dle požadavku. Z příkladu `ftm_simple_pwm` je nutné provádět úkon takto:

```
// Vypnutí výstupu
```



```

FTM_UpdateChnlEdgeLevelSelect (PERIF_OUT_07_PERIPHERAL,
PERIF_OUT_07_CHANNEL, 0U);
// Nahrání nové střídy do registru
FTM_UpdatePwmDutycycle (PERIF_OUT_07_PERIPHERAL,
PERIF_OUT_07_CHANNEL, kFTM_CenterAlignedPwm,
updatedDutycycle);
// Programový trigger pro aktualizaci registrů
FTM_SetSoftwareTrigger (PERIF_OUT_07_PERIPHERAL, true);
// Opětovné zapnutí výstupu PWM
FTM_UpdateChnlEdgeLevelSelect (PERIF_OUT_07_PERIPHERAL,
PERIF_OUT_07_CHANNEL, pwmLevel);

```

Takto by mělo vypadat celé ovládání PWM výstupu včetně změny jeho střídy. Tento příklad jsem vybral zejména z toho důvodu, že se jedná pravděpodobně o nejsložitější inicializovanou periférii, zejména pokud přihlédneme ke způsobu aktualizace střídy.

4.1.1. Inicializace a použití ADC

Převodník AD, jak již bylo zmíněno výše, slouží k získávání údajů o teplotě na různých místech celé sestavy. Jeho inicializace je opět prováděna pomocí výrobcem připravených funkcí zjednodušujících tento proces. Převodníky jsou v procesoru k dispozici dva – je nezbytné na požadovaných vstupech procesoru zkontrolovat, který z nich je možné na pin nalinkovat. Zde jsou použity jak SE, tak diferenční vstupy.

Inicializace těchto dvou zcela rozdílných vstupů je však ve skutečnosti prakticky totožná a je pouze důležité v programu správně přepnout z SE na diferenční vstup. Tato operace je vykonána opět pomocí rutiny a následně je zvolen požadovaný kanál. Při inicializaci ADC je použita poskytnutá funkce pro autokalibraci dle příkladu `simple_adc`.

Získávání hodnot z převodníku je pak pro všechny SE kanály totožné. Inicializací nastavíme 12bitové rozlišení převodu. To znamená teoretické výstupní hodnoty 0 až 4096 pro SE kanály. V případě diferenčních vstupů je rozlišení 13bitové, třináctý bit je však pouze znaménko. Diferenční vstupy měří napětí na obou svých přiřazených pinech a následně zjištěná napětí od sebe odečtou. Tím je také přesnost měření o 6 dB lepší (dvojnásobně). [2]

V předchozí kapitole jsou uvedena výsledná napětí pro minimální a maximální předpokládanou teplotu v komoře, a to jak pro SE, tak pro diferenční kanály. Také bylo uvedeno rozlišení převodníku s referencí 3,3 V. Kombinací těchto údajů můžeme psát následující teoretické hodnoty převodu těchto teplot:

Pro kanály SE:

$$A_{SEM_{ax}} = \frac{U_{Max}}{R} = \frac{2,355}{0,000\,806} = 2923, \quad (4.1)$$

kde A_{SEMax} je teoretický číselný výstup převodníku [-] při maximálním předpokládaném napětí U_{Max} na vstupu (referenčním rezistoru) [V] a R je rozlišení ADC [V]. Minimální hodnota napětí pak teoreticky vykazuje číselnou hodnotu **2461**. Vstupy SE z důvodu jejich připojení na referenční odpor, nikoliv čidlo samotné, vykazují pro minimální odpor čidla maximální hodnotu napětí.

Pro diferenční vstupy:

Zde je situace mírně odlišná. Napětí měří procesor přímo na odporovém teploměru, což otáčí směrnici hodnot ADC vůči teplotě oproti vstupům SE. Maximální číselná hodnota zde odpovídá maximální teplotě a teoreticky by měl převodník zobrazit číslo **1729**, při minimální teplotě toto číslo klesne na **1253**.

Výsledné hodnoty obou způsobů měření použijeme pro získání koeficientů lineární funkce, aby bylo možné přepočítávat hodnotu převodu na teplotu. První krok spočívá ve vytvoření voltmetru, což lze provést jednoduchým přepočtem hodnoty ADC.

$$V_{ADC} = A \cdot R, \quad (4.2)$$

kde V_{ADC} je napětí na převodníku [V], A je číselný výstup převodníku [-] a R je rozlišení převodníku (cca 0,805 mV). Tato rovnice platí jak pro vstupy SE, tak pro diferenční. Pro použití rovnice $R_T = 3.839 \cdot T + K$, (3.20) je však zapotřebí zjištěné napětí přepočítat na odpor čidla. Přepočet je stanoven úpravou rovnice napěťového děliče se zanedbáním vstupního odporu převodníku.

$$R_{TSE} = \frac{V_{ref}}{V_{ADC}} \cdot R_{ref} - R_{ref}, \quad (4.3)$$

kde R_{TSE} je odpor teplotního senzoru v zapojení SE [Ω], V_{ref} je referenční napětí děliče [V], V_{ADC} je napětí na vstupu SE převodníku [V] a R_{ref} je velikost referenčního odporu [Ω].

Situace je u diferenčních vstupů obdobná, pouze měříme napětí přímo na teplotním senzoru. Po úpravě tedy získáme rovnici:

$$R_{TD} = \frac{R_{ref}}{\frac{V_{ref}}{V_{ADC}} - 1}, \quad (4.4)$$

R_{TD} je odpor teplotního senzoru v rozdílovém zapojení, hodnota R_{ref} je v tomto případě $2\text{ k}\Omega$ (R_{ref} je součet dvou $1\text{ k}\Omega$ referenčních odporů), V_{ADC} je rozdíl napětí na $ADC+$ a $ADC-$ vstupech diferenčního převodníku [V].

Tímto způsobem získáme hodnotu odporu čidla při dané teplotě a výpočet této teploty získáme pro SE i diferenční zapojení úpravou rovnice $R_T = 3,839 \cdot T + K$, (3.20). Program tedy obsahuje výraz pro přepočtení určené hodnoty odporu na teplotu:

$$T = \frac{R_T - K}{3,839}, \quad (4.5)$$

kde T je teplota čidla [$^{\circ}\text{C}$] při vypočteném odporu senzoru R_T [Ω] a K je odpor senzoru při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1\text{ k}\Omega$).

Program při každém průchodu hlavní nekonečnou smyčkou převádí hodnotu pouze jednoho SE nebo jednoho diferenčního kanálu, aby nedocházelo ke zbytečnému zpomalování v této smyčce (při každém převodu se čeká na jeho dokončení). Zpoždění je způsobeno nastavením převodníku na pomalé měření zároveň s nastavením děliče kmitočtu, aby byla zajištěna dostatečná přesnost převodu.

Získávané hodnoty jsou ukládány do paměti a jakmile je u některého ze vstupů dosaženo desátého převodu, získané hodnoty z tohoto vstupu jsou sečteny a vyděleny deseti. Tímto průměrováním je odstraněna další část možného rušení a taktéž zvýšena přesnost měření.

Již bylo několikrát zmíněno, že časová prodleva takového postupu je zcela irelevantní, jelikož v těchto procesech je změna teploty na čidlo přenášena se značnou prodlevou až v řádu několika vteřin. Při postupném přepínání jednotlivých kanálů a jejich desetinásobné průměrování je doba zpracování hodnot a získání relevantního výsledku otázkou pouze několika milisekund, což znamená řádově rychlejší odezvu, než je ta u přenosu tepla.

Počet průměrovaných hodnot je samozřejmě možné jednoduše měnit, čímž lze získat optimální poměr mezi časem nutným pro aktualizaci teploty v paměti procesoru a přesností měření.

4.1.2. DAC

Převodník DA zajišťuje ovládání BLDC kompresoru. Výstup 0 až $3,3\text{ V}$ je přiveden na neinvertující operační zesilovač – viz kapitola 3.4. Požadované napětí je tedy zesíleno třikrát tak, aby bylo možné dosáhnout napětí téměř až 10 V . Toto napětí je již přímo ovládacím napětím pro BLDC driver.

Úroveň 10 V odpovídá výkonu kompresoru 100% a tento výkon je možné velmi jemně regulovat díky 12bitovému rozlišení výstupního převodníku (cca $0,805\text{ mV}$ stejně jako v případě ADC).

Dle instrukcí je v programu, pokud je chod čerpadla nutný, zkontrolováno několik teplotních čidel (na kompresoru, jeho výtlaku a teplota výparníku). Pokud není zjištěn žádný problém, je nejprve kompresor zapnut na 15 % výkonu. Zároveň je expanzní ventil zcela uzavřen (ovládán pomocí PWM, počáteční nastavení střídá 5 %). Poté je zahájena zbylá část sekvence prvního spuštění klimatizace:

- 1) Pět minut provozu s výše uvedeným nastavením
- 2) Zvyšování výkonu kompresoru po dobu 15 minut až na výkon cca 98 %
- 3) Po této době již zahájení regulace teploty v komoře – nejprve pomocí střídá expanzního ventilu, pokud toto nestačí, tak následuje snižování výkonu kompresoru.

Počáteční výkon zhruba 15 % odpovídá hodnotě 600 zapsané do registru převodníku ($600 \cdot 0,000\ 806 = 0,483$, po zesílení tedy přibližně 1,45 V). Tato hodnota je v registru ponechána po dobu pěti minut. Časové úseky jsou odměřovány pomocí FTM časovače s příslušným přerušením.

Jakmile uplyne žádaných 5 minut, dochází ke změnám v registru. Celkový čas pro náběh výkonu kompresoru by měl být 15 minut. Změna výkonu by neměla být příliš velká, proto bylo vybráno celkem 100 kroků při jeho zvyšování. Jednoduchým výpočtem zjistíme, že při 100 krocích je nutné zvýšit výstup každých 9 vteřin, a to o hodnotu 35:

$$z = \frac{t}{k}, \quad (4.6)$$

Kde z je počet vteřin na jeden krok, t je celkový čas [s] ($15 \cdot 60 = 900$ s) a k je celkový počet kroků [-].

Hodnotu 35 získáme dle:

$$krok = \frac{N - N_0}{k}, \quad (4.7)$$

kde N je počet hodnot převodníku při 12bitovém rozlišení [-] (celkem 4096 hodnot) a N_0 je počáteční hodnota převodníku [-] (600). Celkem tedy stokrát zvýšíme převodní hodnotu o 35 během 15 minut, což vede k výslednému číslu $600 + 100 \cdot 35 = 4100$. Poslední hodnota je pro převod příliš vysoká, což by vedlo k chybě v procesoru, proto je poslední hodnota podmínkou snížena na nejvyšší přípustnou, tedy 4095.

V případě, že je kompresor třeba odstavit, tj. nebude delší dobu používán nebo chceme celý proces ukončit, je nutné expanzní ventil naopak na maximum otevřít a zároveň postupně snižovat výkon kompresoru. Tento postup je v programu samozřejmě taktéž implementován.

DAC převodník v této aplikaci žádnou jinou funkci nemá, přesto je jeho druhý kanál vyveden na desku pro případ budoucího využití.

4.1.3. LCD

Použitý dvouřádkový displej, stejně tak jako naprostou většinu podobných, obsahujících řadič HD44780, je nutné nejprve inicializovat sekvencí příkazů a čekacích dob. Prakticky kromě vstupů a výstupů (v této práci pouze výstupů – z displeje tedy nelze číst) je to první periferie, která je v programu aktivována, aby bylo možné na něj vypisovat důležité informace. Počáteční sled příkazů je obvykle popsán v technickém listu včetně možných dalších funkcí velmi podrobně a předpokládám, že není nutné zde celý postup vysvětlovat.

Displej je tedy v programu aktivován zcela standardně. Implementovány jsou dále funkce pro výpis řetězce („string“) a pro umístění kurzoru na požadované místo na displeji. Dále je použita funkce pro mazání displeje. Tato funkce vyžaduje poměrně dlouhou čekací dobu minimálně 1,52 ms. Což je způsobeno tím, že program do displeje sice pouze pošle jednoduchý příkaz, nicméně displej funguje tak, že po přijetí tohoto příkazu veškeré zobrazované pozice změní na mezeru (prázdný znak), což vyžaduje čas. Čekací doby jsou zajištěny pomocí FTM0 časovače, viz následující podkapitola. [15]

Důležitým úkolem je výpis čísel na displej. Displej přijímá pouze číselné hodnoty reprezentující znaky, tedy ASCII kód. Pokud bychom na displej chtěli vypsát číslici 97, místo ní by se objevil znak „a“. Číslo je tedy nutné nejprve převést na řetězec pomocí relevantního algoritmu a teprve následně vypisovat na LCD. K tomuto účelu je použita nestandardní knihovná funkce itoa(). Tato funkce vyžaduje odkaz na pole, do kterého je převedeno požadované číslo, zmíněné číslo a informaci o požadovaném základu (obvykle desítkový), ve kterém má číslo být převedeno.

Standardní funkce přímo vyvinutá k tomuto účelu je sprintf(), případně snprintf() zabezpečující nepřetečení paměti. Jedná se o standardizované funkce jazyka C. V této práci vlivem celkově poměrně malého kódu sice není takový přístup nutný, nicméně zásadní rozdíl mezi sprintf a itoa je ve velikosti obsazené programové paměti. Zatímco jakmile byt jen jednou použijeme funkci sprintf, velikost kódu nabyde přibližně o 2 kB, v případě itoa je tato velikost řádově menší. To je jeden z důvodů proč se právě itoa mnohdy používá namísto standardních funkcí. Funkce sprintf() a obdobné jsou navíc poměrně komplexní, což dává další výhodu funkci itoa() – je rychlejší s ohledem na strojový čas.

V případě potřeby výpisu desetinných čísel je obvykle v knihovně stdlib.h k dispozici funkce dtostrf(). Opět se nejedná o standardní funkci, ovšem stejně jako v případě itoa znamená její použití značné ušetření místa v paměti. Tato funkce vyžaduje stejné vstupní proměnné jako itoa, pouze namísto údaje o číselném základu je stanovena minimální délka výstupního řetězce a je navíc přítomna informace o požadované přesnosti – počtu čísel za desetinnou čárkou. [17]

Zjevně knihovna poskytnutá pro MCUXpresso IDE tuto funkci z nějakého důvodu neobsahuje. Dle návodu např. [18] je však možné velmi snadno naprogramovat obdobnou funkci. Jelikož se jedná pouze o informativní výpis na LCD, je použita

jednodušší metoda – zaprvé převedeme požadované číslo pomocí funkce itoa(), následně od našeho čísla odečteme pouze jeho celou část, zbytek vynásobíme dle požadovaného počtu desetinných míst a opět převedeme pomocí itoa(). Tyto výsledky pomocí funkce pro operace s řetězcem doplníme o desetinnou čárku a spojíme dohromady. Celá funkce tedy může vypadat takto: [18]

```
ftoa(float cislo, char * str)
{
    char * str2 [10]; // Pomocný string s dostatečnou
    velikostí
    itoa(cislo, str, 10); // Proměnná str je definována
    globálně
    strcat(str, ","); // Doplnění desetinné čárky
    do prvního stringu
    uint32_t i = (f - (int)f) * 10; // Zbytek po odečtení
    vynásobíme například deseti - pro informaci postačuje
    jedno desetinné místo - a uložíme do nové pomocné
    proměnné i
    itoa(i, str2, 10); // Zde vytvoříme druhý string,
    obsahující v tomto případě jedno desetinné místo
    strcat(str, str2); // Spojení obou stringů - proměnná
    str nyní obsahuje celou část čísla cislo, desetinnou
    čárku a jedno desetinné místo za ní - takto vytvořené
    číslo lze vypsát přímo na LCD
}
```

Tato funkce byla implementována a s úpravami reálně vyzkoušena. Dle testování je schopna převést kladná i záporná čísla s jedním desetinným místem, a to poměrně rychle. Na LCD nebyly zaznamenány žádné problémy, je pouze potřeba na číslo vyhradit dostatečný prostor a případně za ním vypsát několik mezer, aby při snižování počtu digitů nedocházelo k nežádoucímu jevu, kdy na LCD zůstane předchozí číslice na posledním místě. Pokud toto neošetříme, můžeme pak na displeji vidět např. „24,85“, pokud předchozí zobrazená hodnota byla kupříkladu „102,5“.

4.1.4. FTM (kanál 0)

Časovač FTM byl již několikrát zmíněn. Jedná se o velmi komplexní periférii, která má u použitého procesoru celkem čtyři samostatné kanály (čísla 0 až 3). Kanál 0 je použit pro odměřování časových prodlev pro správnou funkci displeje a je zapínán softwarově, a to pouze pokud je potřeba nějakou z těchto prodlev právě měřit.

Jakmile je zapotřebí odměřit některý čekací čas, je časovač pomocí knihovní funkce nastaven a spuštěn. Následně se čeká na načítání volatily vlajky (proměnné) pomocí přidruženého přerušení na požadovanou hodnotu (v obsluze přerušení je k proměnné každým průchodem přičtena jednička). Tato vlajka je v přerušení měněna po uplynutí stanovené doby dle nastavení FTM. Dle předepsaných čekacích dob se kontroluje načítání určité hodnoty. V současné chvíli je časovač nastaven na přetečení při 10 μ s, takže pokud potřebujeme čekat pouze 37 μ s, čekáme až proměnná nabyde hodnoty 4. Tyto intervaly se pohybují od desítek mikrosekund po jednotky milisekund.

Zmiňovaná vlajka, stejně tak jako, dle doporučení, veškeré proměnné použité v přerušeních, musí být typu volatile. Je to dáno tím, že překladač v rámci šetření přístupů do paměti při překládání kódu může, pokud není proměnná stanovena jako typ volatile, uložit původní hodnotu této proměnné do registru a tím vynechat neustálou kontrolu její hodnoty. To pak může způsobit, že čekací smyčka `while(a)` bude nekonečná, protože proměnná `a` při příchodu do smyčky byla log 1, a přestože je kdesi v přerušení následně nastavena na log. 0, program už tuto skutečnost nezjistí, protože její aktualizovanou hodnotu v paměti již nekontroluje. [16]

4.1.5. PDB Timer

PDB Timer neboli programmable delay block, je časovač speciálně určený pro odměřování čekacích úseků. Stejně jako většina periférií MCU je velmi univerzální, takže ho lze použít kupříkladu ve spojení s ADC převodníky apod. a může být spuštěn hardwarově. [2]

Tento časovač je zde použit pro načítání vteřin. Jednou za vteřinu program při přetečení čítače vstoupí do přerušení, kde je několik podmínek, dle kterých jsou pak následně nastavovány proměnné reprezentující uplynulý čas. Časovač je softwarově znovu spuštěn na konci tohoto přerušení.

Tím, že není čítač spuštěn při každém požadavku na odměření času, nýbrž běží téměř kontinuálně, se může měnit informace o první uplynulé vteřině, respektive první „vteřina“ jakéhokoliv aktivovaného čítání může být kratší. Z tohoto důvodu není časovač použit pro odměřování přesných časových úseků, ale pouze pro přibližné odměřování. Také při tomto nastavení nesmí být použit pro načítání jedné vteřiny. Pro tento účel může být nastaven například časovač FTM2.

Další možností pro přesné měření času by bylo vynulovat hodnotu v registrech PDB čítače při požadavku na měření. To by však mohlo mít za následek nechtěnou změnu doby čítání pro jiné funkce právě z důvodu použití přerušení tohoto časovače pro poměrně velké množství jiných proměnných reprezentujících uplynulý čas.

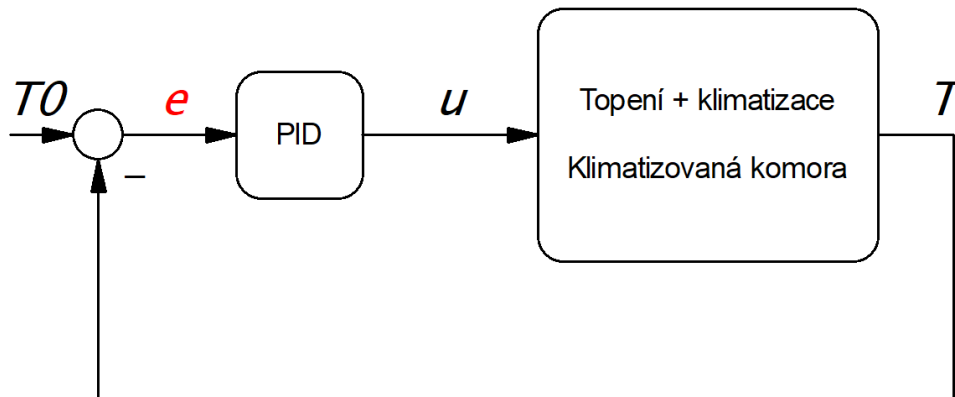
4.2. PID regulace

PID regulace je jedním z nejpoužívanějších principů řízení téměř libovolné soustavy. V teorii se jedná o matematický výpočet skládající se celkem ze čtyř složek: [19]

- 1) Proporcionální – první ze složek reprezentuje rozdíl požadovaného stavu a aktuálního stavu soustavy.
- 2) Integrovní – tato složka bere v úvahu minulé stavy soustavy, resp. sčítá rozdíly požadované a reálné hodnoty v čase.
- 3) Derivační – třetí složka vypočítá „budoucí“ chování soustavy na základě změny předchozího a současného skutečného stavu soustavy za daný časový okamžik.

- 4) Výsledek – výsledná hodnota je funkcí všech tří předchozích hodnot. Vypočítané P, I a D hodnoty jsou v tomto kroku vynásobeny odpovídajícími koeficienty pro každou z nich a sečteny, čímž získáme číselný výsledek odpovídající současnému stavu soustavy.

Celý systém s PID regulátorem a jednou měřenou veličinou, na základě které probíhá regulace, lze popsat poměrně jednoduchým schématem. [19]



Obrázek 13 - Schematické znázornění smyčky soustavy s PID regulací

Klimatizovaná komora je regulována dle výstupu u z PID regulátoru. Výstup u je vypočítán na základě poskytnuté požadované teploty TO a jejího rozdílu oproti aktuální teplotě soustavy T . Tento rozdíl je označen písmenem e .

PID regulátor byl úspěšně naprogramován na základě kódu poskytnutého společností Atmel (dokumentace tohoto kódu je zdroj [19]). Poskytnutý kód je určen zejména pro MCU ATtiny, proto byl částečně předělán, zejména kvůli možnosti použití proměnných typu float.

Nejdůležitější část programu PID regulátoru, výpočet hodnot P, I a D a jejich výsledný součet, zde uvádím pro lepší představu o řízení soustavy pomocí tohoto algoritmu:

```
// Zprvė zjistíme odchylku aktuální a požadované teploty
error = setPoint - processValue;
// Následuje výpočet jednotlivých složek
p_term = P_Factor * error;
i_term = I_Factor * sumError;
d_term = D_Factor * (lastProcessValue - processValue);
// Na závěr vypočítáme celkovou hodnotu PID
pid = (p_term + i_term + d_term);
```

V tomto případě by se zápis výše uvedený dal označit jako jakýsi pseudokód, který reprezentuje výpočet použitý v programu, nicméně sám o sobě není funkční. Program je také již v původní verzi od společnosti Atmel doplněn o podmínky chránící proti přetečení proměnných.

Tato opatření byla samozřejmě ponechána, nicméně pro správnou funkci regulátoru je zapotřebí stanovit nejen meze kvůli přetečení velikosti proměnných, ale zároveň taktéž meze dané zpracovatelností výsledku. Pro představu – proměnné typu float mohou dosahovat velikosti až $3,4 \cdot 10^{38}$, což není hodnota, se kterou by se dalo reálně počítat. Z tohoto a dalších důvodů je zapotřebí omezit na příhodnou velikost zejména integrační složku a také celkový výsledek funkce.

Dalším velmi důležitým úkolem je stanovit správně koeficienty P, I a D s ohledem na regulovanou soustavu. Při dokončování této práce nebyla soustava k dispozici, nicméně na následujících alespoň teoreticky. Koeficienty lze stanovit například pomocí metody kritického zesílení regulátoru (Ziegler-Nicholsova metoda). [20]

Zde řešíme uzavřený regulační obvod:

- 1) Nejprve položíme konstanty I a D rovny nule.
- 2) Následuje měření odezvy regulované soustavy při požadavku na změnu teploty (v případě komory v této práci bude situace složitější – je k dispozici topení a chlazení, z nichž má každé zcela jiné parametry) za zvyšování konstanty P až do doby, kdy se regulovaná soustava chová jako oscilátor na mezi stability.
- 3) Dle výstupních oscilací tímto způsobem zjistíme kritické zesílení K_c (velikost konstanty P při kmitání na mezi stability) a periodu kmitání T_c . [19][20]

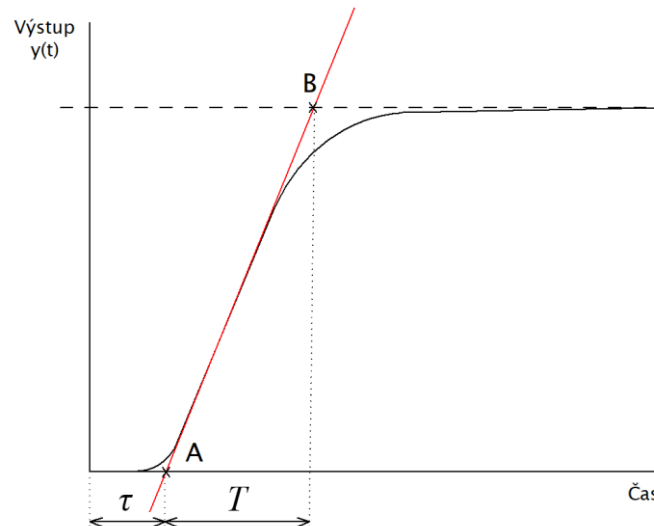
Výsledkem tohoto postupu je stanovení nových konstant P, I a D pomocí Ziegler-Nicholsovy tabulky. Konstanty: $P = 0,65 \cdot K_c$, $I = 0,5 \cdot T_c$, $D = 0,12 \cdot T_c$. [19]

Je zřejmě vhodné dodat, že tento způsob, ač stále dle mnoha zdrojů funkční, obvykle poskytuje výsledky s cca 25 % překmitem a je nutné konstanty dále „donastavit“ tak, aby byla soustava regulována korektně. Tento postup je také již řadu let vylepšován. Mnohokrát bylo zmíněno, že soustava při dokončování této práce nebyla k dispozici, proto považuji za zbytečné dále teoreticky rozebírat vhodnost či nevhodnost různých přístupů, jelikož výsledek nelze prakticky ověřit. [20]

Další možností je stanovit konstanty PID pomocí odezvy teploty v komoře na jednotkový skok (sepnutí topné spirály nebo chlazení). Ze zjištěného průběhu odezvy na jednotkový skok získáme parametry systému, který lze popsat například jako systém prvního řádu: [26]

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}, \quad 4.8$$

kde K je statický zisk soustavy a parametry τ a T získáme grafickou metodou z odezvy na jednotkový skok – vyneseme tangentu v inflexním bodu odezvy – τ je časové zpoždění soustavy (čas od počátku jednotkového skoku do průniku tangenty a osy x , tj. bodu A) a T je časový rozdíl tohoto průniku a průniku tangenty s asymptotou maximální hodnoty odezvy, tj. bodem B . V grafu je znázorněna také strmost R . Zdroj [26] pak dále popisuje extrakci konstant PID z těchto parametrů. [26]



Obrázek 14 - Určení parametrů systému z časové odezvy na jednotkový skok [26]

Zdroj [26] je již starší a ač stále platný, tak v dnešní době by bylo vhodnější postupovat trochu odlišně. Z odezvy na jednotkový skok bychom časovou derivací získali impulzní odezvu. Jelikož je odezva systému dána konvolucí impulzní odezvy škálované řídicím signálem v jednotlivých časových okamžicích, vytvoříme takto digitální model soustavy a tento podrobíme simulacím v kombinaci s modelem PID regulátoru. Při správném zjištění odezvy systému a korektní reprezentaci PID regulátoru by mělo být stanovení jeho správných konstant otázkou několika simulací. [27]

System prezentovaný v této diplomové práci je specifický tím, že obsahuje nejen topení, ale i klimatizaci. Každá z těchto soustav má také vlastní charakteristiku. Tím se celý problém komplikuje a pravděpodobně bude nutné stanovit konstanty jak pro funkci topení tak chlazení odlišně a v programu implementovat takové řízení, které bude korektně kombinovat oba systémy.

4.2.1. Doplnění regulace dle hodnoty PID

Program je v současné době nastaven tak, že se jak pro topení tak pro chlazení předpokládá určitá číselná hranice regulátoru PID, která udává teoretický maximální kladný a záporný výstup PID regulátoru a představuje potřebu zapnout topení/chlazení na maximální výkon. Její velikost je třeba reálným měřením stanovit na patřičnou hodnotu. Za potřeby topení je hodnota PID kladná, pokud je nutné chladit, je hodnota záporná.

V případě topení je regulace rozdělena do šesti stupňů. Při maximálním požadovaném výkonu bude topení zapnuto neustále. Jakmile se hodnota PID začne snižovat k nulové hodnotě, je zahájeno periodické vypínání topné spirály. Například pro interval hodnoty PID 400 až 200 spirála po dobu 5 vteřin topí a následujících 15 vteřin zůstane vypnuta. Stejně jako v případě maximální hranice, i tyto intervaly a střidu spínání topení je nutné naprogramovat dle reálné soustavy. Za použití spínacího triaku by výkon topení byl regulován pomocí úhlu sepnutí jak bylo uvedeno v podkapitole 3.9.1.

Ovládání kompresoru je větší výzvou. Zprv lze regulovat škrticí ventil pomocí změny PWM a zadruhé výkon samotného kompresoru dle rychlosti otáčení pomocí výstupu ADC. Pro jednoduchost je prozatím v jednotlivých intervalech nastavována pouze hodnota PWM. Změna výkonu kompresoru má zcela zásadní vliv na plynulost regulace a její možné zlepšení, nicméně při absenci hotové soustavy je nemožné odhadovat jaký konkrétní vliv toto nastavení bude skýtat, proto není prozatím změna hodnoty ADC implementována. Výkon kompresoru je tedy po prvním spuštění (cca 20 minut) nastaven na 97 % nominální hodnoty a v regulaci je měněna pouze střída PWM signálu expanzního ventilu.

Regulace PWM dle hodnoty PID je implementována takovým způsobem, aby nedocházelo ke skokovým změnám. Při požadavku na změnu střídy v regulaci je načítána proměnná odměřující jednu vteřinu. Dle stavu této proměnné a aktuální hodnoty střídy je po jednotkách procent střída zvyšována nebo snižována.

Zde se opět jedná o teoretické vylepšení řízení teploty v komoře a bez praktického ověření lze jen těžko odhadovat, do jaké míry bude přínos tohoto řešení kladný.

4.3. Přehled celkového programu

V příloze 1 k této práci je zkopírována hlavní část programu – celkem přes 2000 řádků kódu. Nepovažuji za vhodné do tohoto hlavního textu kopírovat větší části kódu, proto tato podkapitola obsahuje pouze stručné pojednání o programu doplněné několika stavovými diagramy a vysvětlující text.

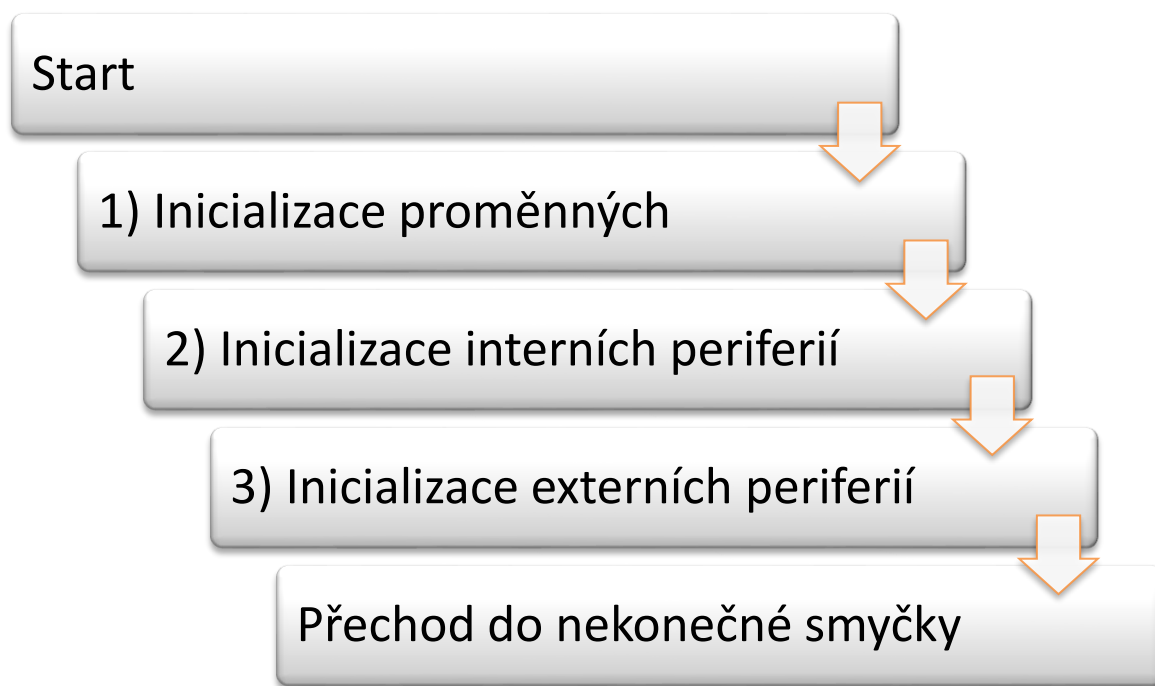
4.3.1. Topologie menu

Celý koncept programu je založen na proměnné „menu“. Tato proměnná je v programu nastavována uživatelem, případně nastane-li chyba, tak i samotným programem. Proměnná menu svojí hodnotou udává informaci o tom, ve které části se má program nacházet. Tato část je poté programem neustále procházena, čemuž musí být kód přizpůsoben.

Pro uživatele je nejviditelnější částí tohoto chování výpis informací na displej. Snadnou orientaci zajišťuje výpis patřičných řetězců na dvouřádkové LCD. Obvykle se jedná o krátkou informaci o stavu zařízení s pokynem, co má uživatel udělat. Původně mělo být nejen přes displej možné měnit vnitřní konstanty procesu. Bohužel z časových důvodů není implementováno použití paměti flash, takže zmíněné konstanty prozatím měnit nelze.

4.3.2. Začátek programu

Na obrázku níže je stylizovaný začátek programu – část před hlavní smyčkou. V tomto úseku jsou provedeny veškeré nezbytné operace před uvedením desky do základního stavu – inicializace proměnných, periférií a podobně.



Obrázek 15 - Základní struktura programu

- 1) Inicializací proměnných se v tomto případě myslí vyhrazení místa v paměti MCU pro veškeré proměnné používané programem, tj. konstant přepočtu AD a DA převodníku, pomocné proměnné pro tyto i další výpočty nebo rozhodovací funkce, textové hlášky pro výpis na LCD displej a podobné.
- 2) Interní periferie zde znamenají zejména GPIO (všeobecné digitální vstupy a výstupy), AD převodník, u kterého je provedena také automatická kalibrace, DA převodník, FTM časovač (měření různých časových úseků, zprostředkování PWM regulace) a v neposlední řadě také aktivace potřebných přerušení k daným perifériím. Všechny tyto funkční bloky jsou nastaveny dle doporučení (dle výrobcem připravených ukázkových/example projektů – a otestovány zvlášť na vývojové desce TWR-KV31F120M.
- 3) Základní deska také disponuje některými externími perifériemi. Mezi tyto se řadí např. LCD displej, který vyžaduje aktivaci správnou sekvencí příkazů v čase a až poté je možno jej používat pro textový výpis.

Dále jsou to výkonové budiče pro periferie s vyšší spotřebou, případně ovládané vyšším napětím (zde hlavně budič na napětí DC 12 V, resp. také spínání zařízení vyžadujících napětí až DC 24 V pomocnými tranzistory na desce, které jsou také

ovládány právě tímto 12 V budičem), pro něž je potřeba správně nastavit GPIO procesoru a stanovit jejich počáteční stav.

K dispozici je také integrovaný obvod pro komunikaci na rozhraní RS485 (příprava k implementaci protokolu MODBUS), řada zelených a červených informačních LED diod a uživatelských tlačítek sloužících k navigaci v nabídce systému, nastavení požadované teploty a při vývoji mimo jiné i k zadávání jiných parametrů nebo přímé ovládání výstupů.

Inicializace GPIO: Díky velmi inteligentnímu automaticky generovanému záznamu pro každý pin není nutné, pokud by to bylo potřeba, v programu přepisovat zvlášť jednotlivé názvy tam, kde byly použity, ale stačí přepsat některý z výše zmíněných atributů v hlavičce souboru vývodů (Název jmenovaného souboru je pin_mux.h Jedná se hlavně o port pinu, jeho číslo, nebo i další atributy, díky kterým je možné snadno „přepojit“ například výstup pro elektrické topení s daným uživatelským názvem na zcela jiný fyzický pin procesoru).

Samotná inicializace je pak provedena i s nastavením počátečního stavu tak, aby periferie byly po zapojení napájení ve vypnutém stavu.

AD převodník: Dle příkladu (projekt ovládání AD převodníku simple_adc) a technického listu procesor disponuje také automatickou kalibrací této periferie. Kalibrace je proto v programu též použita. Jak již bylo napsáno výše, program aktualizuje hodnotu z AD převodníku každým průchodem programem – aby byla tato informace zcela přesná, je nutné dodat, že zejména kvůli možnému rušení jednotlivých kanálů a díky dostatečné rychlosti procesoru je tato hodnota nasčítána přes více průchodů programem a následně zprůměrována. [2]

Celkem čtyři AD vstupy jsou zapojeny jako diferenční. Tyto vstupy mají trochu jiné možnosti nastavení, nicméně celková koncepce je téměř totožná s SE (single-ended) vstupy s tím rozdílem, že by mělo být z principu takového zapojení odstraněno elektromagnetické rušení indukované na přívodních vodičích. Vzhledem k dostatečně rychlé konverzi je ovšem výsledek pro jistotu průměrován totožně s ostatními vstupy.

Samotná funkce pro zahájení konverze je pak naprogramována v hlavičce hlavního programu. Tato rutina jako vstupní hodnotu přijímá požadovaný kanál AD převodníku a jejím výstupem je hodnota převodu. Veškeré zjištěné hodnoty z AD převodníků jsou uloženy v proměnných typu unsigned integer. Hlavní program pak tyto hodnoty přičítá k minulým hodnotám a, pokud je dosaženo požadovaného počtu převodů, tyto hodnoty zprůměruje.

Průměrná hodnota z AD převodníků je pak poskytnuta funkci pro výpočet reálné odpovídající teploty. Tato funkce obsahuje zjištěnou matematickou rovnici a pomocí ní převádí hodnotu AD převodu na teplotu. Kvůli zachování přesnosti i pod jeden celý stupeň Celsia jsou výsledné teploty uloženy jako proměnné typu float.

DA převodník: Tento je použit pro nastavení otáček kompresoru přes externí budič. Na hlavní desce je umístěn operační zesilovač pro zesílení výstupního signálu na 10 V, tj.

hodnota výstupu je nastavitelná od 0 do 10 V při napětí dodané procesorem 0 až 3,3 V. Samotná periferie je pak nastavena dle příkladu (projekt simple_dac), a to opět přímo v hlavním programu.

Časovač: Již výše byl zmíněn tzv. FTM (FlexTimer) časovač, který má celkem 20 kanálů. Každý tento kanál má různé funkce a je schopen například přímo ovládat fyzické výstupy procesoru. V této práci to však s výjimkou zmíněného PWM kanálu není třeba. Tento velmi komplexní modul je tedy použit, ale až na zmíněnou výjimku pouze pro softwarové odměřování časových úseků tam, kde je potřeba. [2]

Při odměření požadovaného časového úseku je vyvoláno přerušení, které následně nastavuje příslušnou proměnnou, jež je následně zpracována hlavním programem a je provedena odpovídající operace. V některých případech může být obsluha zajištěna přímo ve funkci přerušení.

Nastavení jednotlivých kanálů je provedeno v hlavním programu opět dle příkladu (projekt ftm_timer).

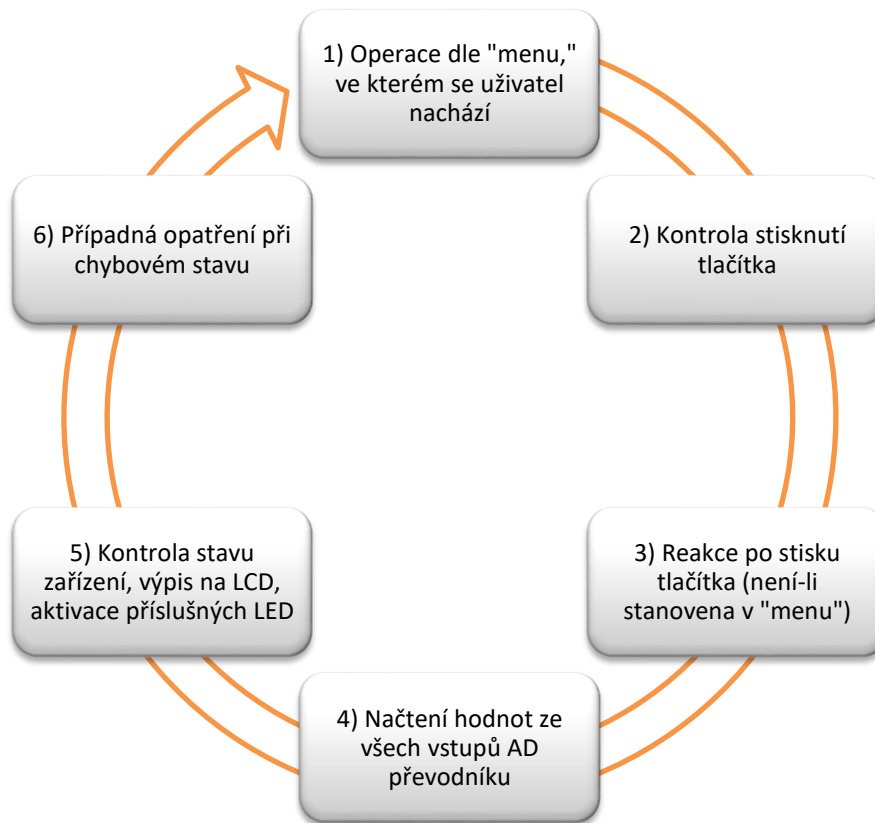
Pro některé účely může být použit také jiný modul (PDB – Programmable delay block nebo PIT – Periodic interrupt timers). PDB je použito pro odměřování delších časových úseků pro ovládání kompresoru a jeho činnost je indikována zelenou diodou LED3.

MODBUS: Zde uvádím jako separátní periferii, nicméně v podstatě se jedná o GPIO se speciální inicializací. Softwarově pak v budoucnu bude zajištěna komunikace s PC, aby pomocí něj bylo možné zařízení ovládat a například posílat posloupnost teplot pro komoru. Jelikož se jedná o komunikační rozhraní, v tomto případě bude jeho obsluha zajištěna pomocí přerušení.

Celkem se principiálně jedná o dvě přerušení – první je vyvoláno změnou logické úrovně na vstupním pinu a zapisuje 8 bitů přijaté informace ze vstupu. Tyto byty jsou následně vloženy do delší posloupnosti a jakmile je jejich počet dostatečný, program zavolá druhé přerušení, které v této posloupnosti vyhledává známý kód.

4.3.3. Nekonečná smyčka

Nekonečná smyčka programu zajišťující samotnou funkci zařízení je podrobněji popsána dále včetně několika stavových diagramů a popisu jednotlivých funkcí a částí programu.



Obrázek 16 - Stručná struktura nekonečné smyčky programu

- 1) Program je pro snazší orientaci rozdělen na více částí, které mají své přidělené číslo („topologie menu“, ne zcela přesně lze označit jako pořadí) a text pro výpis informací na LCD. Samotné LCD je pouze dvouřádkové. Každý řádek má pouze 20 znaků, což znamená, že bylo potřeba vypisované informace zkrátit, ovšem se zachováním jejich významu a dodržením určitého smysluplného řádu. Kompletní blokové schéma nabídky je vyobrazeno na následujících stranách.

Tato „menu“ jsou přímo spojená s funkcí zařízení – zejména pak pro uživatele nejdůležitější menu, ve kterém nastaví požadovanou teplotu uvnitř komory a zahájí udržování této teploty stiskem tlačítka.

Pomocí interní proměnné „menu“ (integer bez znaménka) je tedy stanovena část programu, v níž se uživatel právě nachází. Každá taková část programu obsahuje výpis informací na LCD a na základě akcí uživatele se rozhoduje o setrvání v tomto menu, aktualizaci některé proměnné, přechodu do jiného menu, nebo další relevantní akci.

- 2) Stejně tak jako v případě bodu 4) je doba odezvy tlačítek, podobně jako teploty, z pohledu procesoru v tomto konkrétním případě pomalá, proto není ani jedna z těchto funkcí zajištěna přes přerušování.

Program pouze v jednom bodě nekonečné smyčky kontroluje vstupy a postupně provádí AD převod na všech kanálech. Následně veškeré získané hodnoty vyhodnocuje, předává funkcím dále do programu a pokračuje ve smyčce dle

požadavků. V této konkrétní práci se nepředpokládá delší průběh smyčkou než několik milisekund, proto je také takové řešení možné.

- 3) Dle stavu procesorového vstupu příslušného tlačítka během několika průběhů nekonečné smyčky je v případě jeho stisknutí/podržení provedena příslušná akce.

Právě pomocí vyhodnocení stavu z několika průběhů programu je zaručen tzv. softwarový debouncing. Debouncing je ošetření vstupu z tlačítek tak, aby procesor nereagoval na nežádoucí zákmity, které jsou vždy přítomné při stisknutí tlačítka.

Pozn. Dalším možným řešením by byl hardwarový debouncing. Velmi zkratkovitě popsáno – k tlačítku se v takovém případě paralelně připojí kapacitor k zemi, který svými vlastnostmi vzniklé zákmity při stisku vyhladí.

- 4) Viz bod 2) – Každým průběhem programu jsou kontrolovány všechny použité AD vstupy, tzn. teplota na různých místech zařízení, a aktualizována jejich odpovídající hodnota v programu. Tyto hodnoty jsou v podobě proměnných předány dalším funkcím a na základě vyhodnocení těchto funkcí jsou poté prováděny další akce.

Taková akce může spočívat pouze ve výpisu teploty na LCD, případně ale také vyhlášení chybového stavu a odstavení zařízení v případě překročení některé z kontrolovaných teplot nad/pod přípustnou mez.

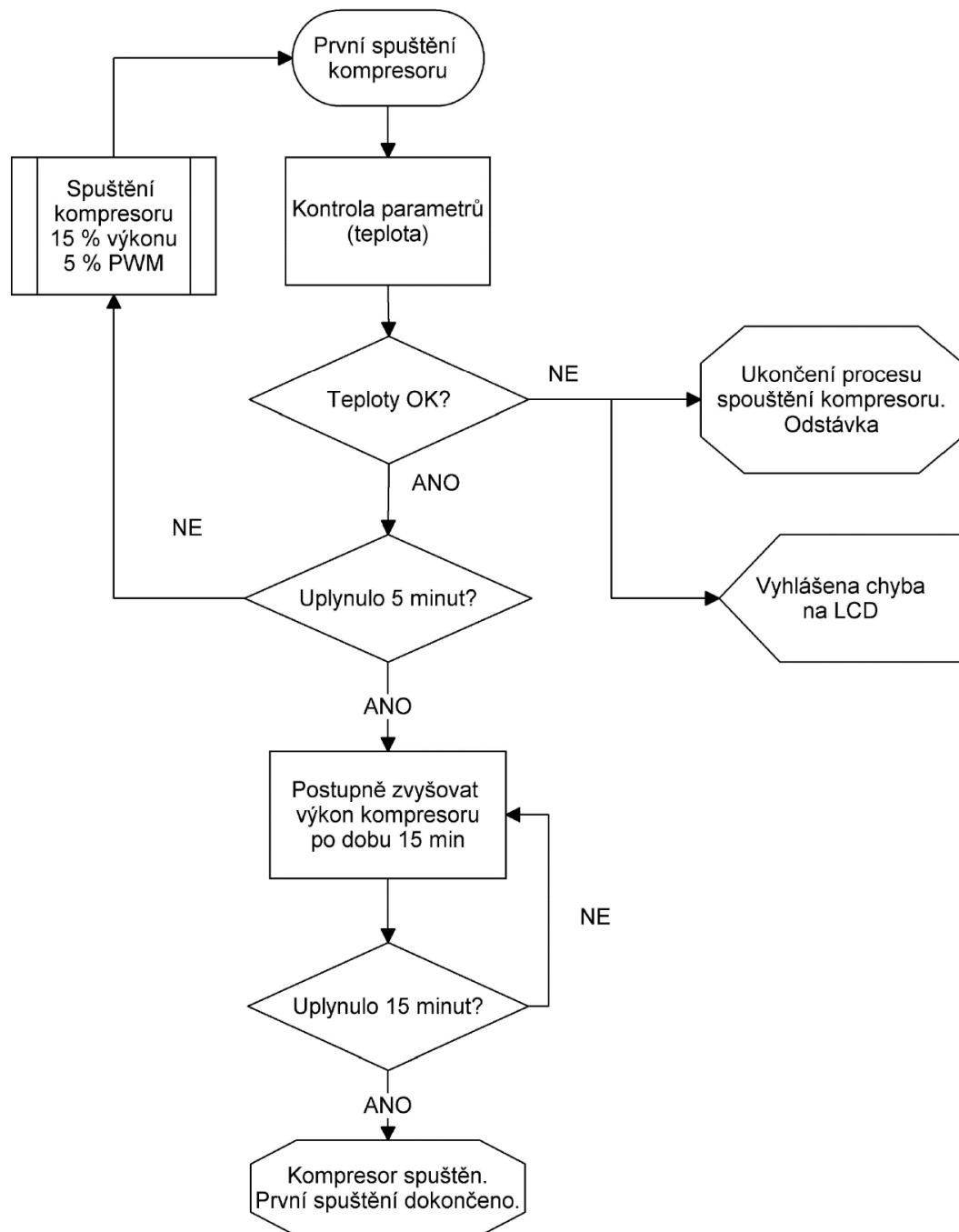
- 5) Dle stavu GPIO jsou zapnuty/vypnuty příslušné informační diody, nebo je proveden výpis na LCD displej.
- 6) Tento bod se týká ochrany zařízení před nechtěným poškozením. Zejména ve fázi vývoje budou implementovány procedury tak, aby nedošlo například k zapnutí kompresoru, pokud má zařízení topit (a výpis chyby na LCD/zapnutí chybové LED) apod. Při následném běžném provozu (po odstranění počátečních chyb ve vývoji) bude v tomto bodu prováděna kontrola kupříkladu přílišné teploty některých komponent, absence oběhu kapaliny v chladícím okruhu a podobné, jak bylo zmíněno v bodě 4).

Při detekci chybového stavu dojde dle závažnosti chyby k výpisu na LCD, případně zastavení celého systému (a opět výpis chyby na LCD/zapnutí chybové LED). Každá taková chyba tedy musí mít stanovenou závažnost a také časovou prodlevu, po které bude možné systém opět uvést do provozu.

4.3.4. Nejdůležitější funkce

Zde jsou popsány nejdůležitější části programu. Jmenovitě se jedná o spuštění kompresoru a jeho odstavení (regulace byla probrána výše). Dále je v této sekci uveden vývojový diagram popisující celkové chování programu. Považuji za nepotřebné uvádět digramy kódů řízení LCD nebo převodu ADC, který byl popsán výše, a podobných naprogramovaných funkcí.

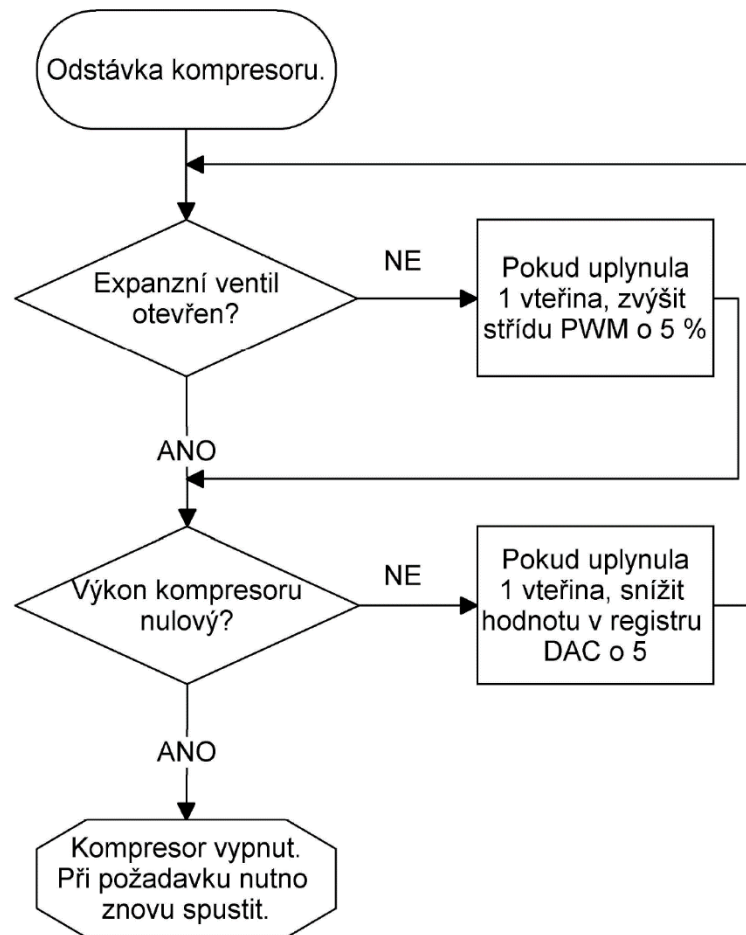
První spuštění kompresoru po připojení systému do elektrické sítě je prováděno celkem po dobu 20 minut. Zahájeno je ihned po požadavku na regulaci (stisk tlačítka OK v menu 0). Při tomto spuštění kompresoru může program ovládat elektrické topení, takže za předpokladu, že je potřeba topit, lze tento pokyn vykonávat a v mezičase připravovat klimatizaci k činnosti pro případ, že bude při regulaci nutné chlazení.



Obrázek 17 - Diagram programu prvního spuštění kompresoru

Diagram prvního spuštění kompresoru také ukazuje, že program kontroluje teploty na chráněných místech klimatizace. Nastane-li chybový stav, je okamžitě zahájena odstávka kompresoru a na displeji vyhlášena příslušná chyba.

Níže je pak diagram odstávky kompresoru. Tato funkce je vyvolávána jak v případě chyby, tak i menu 0. Samozřejmě jsou příslušné proměnné nastavovány tak, aby při spuštění systému nezačal program ihned kompresor vypínat, když už vypnutý je.

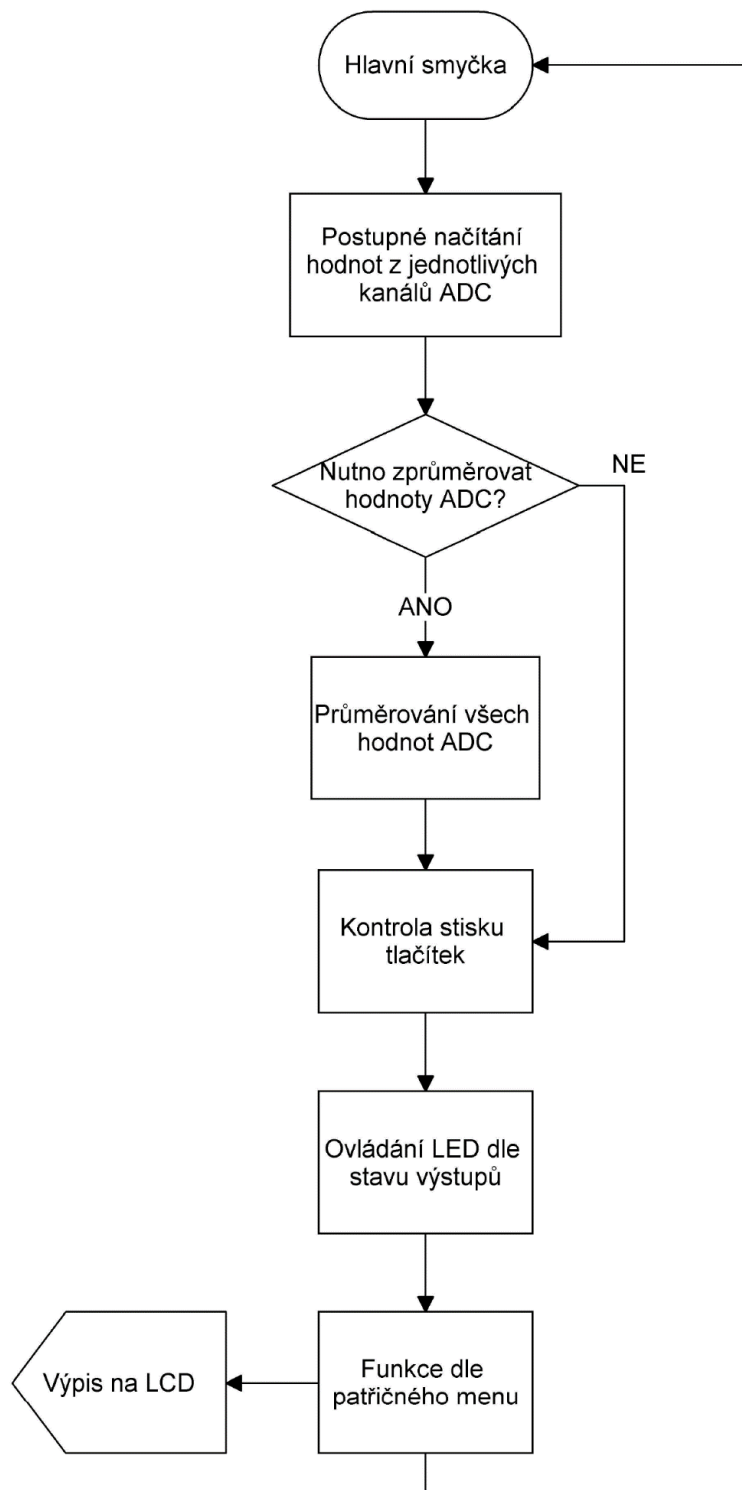


Obrázek 18 - Diagram programu odstávky kompresoru

Po úspěšné odstávce jsou proměnné nastaveny tak, aby bylo možné z programu opět zahájit příslušnou další regulaci.

Na následující straně je vyobrazen diagram hlavní smyčky programu. Každým průchodem programem jsou načítána nová data ze vstupů ADC a při jejich zvoleném počtu zprůměrována. Dále se kontroluje stav tlačítek a ovládají se výstupy LED diod dle stavu zvolených výstupů, případně i vstupů.

Hlavní části programu jsou obsluhovány v jednotlivých „menu“. Tyto funkce obsahují veškeré ovládání periferií a výpis zpráv na LCD.



Obrázek 19 - Diagram hlavní smyčky programu

4.3.5. Regulace dle teplotního profilu

Jedním z požadavků v zadání diplomové práce je udržování teploty dle zadaného profilu. V principu se jedná se o poměrně jednoduše řešitelný problém.

Pokud bychom uvažovali profil o daném počtu úseků, jediné, co pro zdárné řešení potřebujeme, je několik proměnných reprezentujících požadované teploty v jednotlivých úsecích a k nim přidružené proměnné reprezentující čas, po který mají být teploty udržovány.

Odečítání času může být zprostředkováno například posledním nepoužitým kanálem modulu FlexTimer, aby nemohlo dojít k ovlivňování času vlivem případných ostatních pokynů zpracovávaných v přerušení.

Celkové řešení by pak po uživateli vyžadovalo zadání počtu časových úseků, aby program mohl vyhradit odpovídající místo v paměti jak pro teploty, tak pro časové údaje. Následně uživatel zadá jednotlivé teploty a časy a po odstartování regulace bude program automaticky přepínat teploty regulace dle uplynulého času. Vzhledem k množství zadávaných údajů by takové řízení mělo být zcela jistě umožněno přes několikrát zmiňovanou komunikaci MODBUS.

Závěr

V této diplomové práci bylo cílem navrhnout, sestavit a otestovat klimatizační komoru schopnou udržovat vnitřní teplotu s určitou časovou odchylkou v rozmezí teplot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zadaný úkol byl řešen ve spolupráci s firmou LG System spol. s r.o., která úkol zadávala. Při spolupráci bylo dosaženo vyřešení zásadní části celého zařízení, tj. byla fyzicky vytvořena - navržena a vyrobena - řídicí deska s procesorem a vytvořen z větší části potřebný software – řídicí program pro zadanou aplikaci se zadanými parametry.

Řídicí deska je zkompletována a připravena pro řízení zmíněného systému, nicméně je doporučeníhodné na základě dalšího testování vytvořit novou verzi – viz popis výše, např. nevhodné použití SMD pinů a podobně. To platí i pro program, ve kterém prozatím chybí použití paměti flash pro ukládání proměnných mezi spuštěními a komunikace MODBUS.

S ohledem na objektivní překážky během realizace projektu (počáteční nedostupnost zařízení – komora + chladicí systém, pozdržení způsobené nedostupností informací o ovládaní kompresoru – tyto byly postupně získány) nebylo již možné propojit řídicí desku s vlastním systémem komory a ověřit či dle potřeby doladit software, tak jak je výše v práci uvedeno.

Vlivem několika nepředvídatelných překážek ve vývoji nedošlo k propojení desky s vlastním zařízením a tím k praktickému ověření funkčnosti desky a software s řízeným zařízením – klimatizační komorou. Vývoji hardwarové i softwarové části bylo věnováno velké množství času a úsilí a jedná se, alespoň dle testování „naprázdno“, o funkční zařízení připravené na dokončení. Řídicí deska a vyvinutý software (viz popis výše) splňuje základní požadavky zadání pro řízení klimatizační komory.

Navržena a zdárně zkonstruována byla řídicí deska pro toto zařízení včetně realizace SW vybavení, které lze označit za teoreticky funkční včetně PID regulace. Prakticky byla zkompletována a odzkoušena řídicí deska. K ověření funkčnosti celého systému nedošlo zejména kvůli logistickým potížím při konstrukci.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2 - Zjednodušené ideové schéma klimatizované komory a řídicích obvodů ...	14
Obrázek 1 - Komparátor s hysterezí a ofsetem.....	18
Obrázek 3 - Zjednodušená orientační topologie řídicí desky	19
Obrázek 4 – ukázka zapojení vstupů ADC - (a) SE, (b) diferenční.....	22
Obrázek 5 – Měření napětí na odporu pomocí operačních zesilovačů	24
Obrázek 6 – Výstupní napětí při minimálním odporu teplotního čidla	26
Obrázek 7 – Jednoduché napěťové děliče pro nastavení napětí offsetu	26
Obrázek 8 - Schéma zapojení analogového zesilovače pro DAC	28
Obrázek 9 – Schéma zapojení driveru pro rozhraní RS485.....	29
Obrázek 10 - Téměř kompletně osazená řídicí deska	33
Obrázek 11 - Jednoduchý spínač indukivní zátěže.....	35
Obrázek 12 - Doporučené zapojení MOC3061 [21].....	36
Obrázek 13 - Schematické znázornění smyčky soustavy s PID regulací	47
Obrázek 14 - Určení parametrů systému z časové odezvy na jednotkový skok [26]	49
Obrázek 15 - Základní struktura programu.....	51
Obrázek 16 - Stručná struktura nekonečné smyčky programu	54
Obrázek 17 - Diagram programu prvního spuštění kompresoru	56
Obrázek 18 - Diagram programu odstávky kompresoru	57
Obrázek 19 - Diagram hlavní smyčky programu.....	58

SEZNAM ZKRATEK

AD	Analogově – digitální
BLDC.....	Angl. “Brushless Direct Current (Motor)” – “Bezkartáčový stejnosměrný (motor)”
DA.....	Digitálně – analogový
DC.....	Angl. “Direct Current” – “Stejnoseměrný proud”
DPS	Deska plošných spojů
ENOB.....	Angl. “Effective Number of Bits” – “Efektivní počet bitů”
ESR	Angl. “Equivalent Series Resistance” – “Ekvivalentní elektrický odpor”
FTM	FlexTimer časovač
GPIO	Angl. “General Purpose Input Output” – “Všeobecné vstupy a výstupy”
kbps.....	Angl. “Kilobit per second” – “kilobit za vteřinu”
LCD	Angl. “Liquid Crystal Displej” – “Displej s tekutými krystaly”
LED.....	Angl. “Light-Emitting Diode” – “Světlo vyzařující dioda”
MCU	Angl. “Microcontroller Unit” – “Mikroprocesorová jednotka”
MODBUS	Protokol pro komunikaci zařízení
OZ	Operační zesilovač
PC	Angl. “Personal Computer” – “Osobní Počítač”
PCB.....	Angl. “Printed Circuit Board” – “Deska plošných spojů”
PID	Proporcionálně-integračně-derivační regulátor
PWM.....	Angl. “Pulse-Width Modulation” – “Modulace šířky pulzu”
RTD	Angl. “Resistance Temperature Detector” – “Odporový senzor teploty”
SE	Angl. “Single-Ended” – “Jednopolové”
SR	Angl. “Set-Reset” – Druh klopného obvodu
SMD.....	Angl. “Surface Mount Device” – “Součástka pro povrchovou montáž”

SSR	Angl. Solid State Relay – “relé bez pohyblivých částí/polovodičové relé”
THT.....	Angl. “Through-Hole Technology” – “Technologie montáže součástek skrz PCB”
USB.....	Angl. Universal Serial Bus – velmi rozšířené komunikační rozhraní

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Technické údaje a návod k použití řídicí desky pro klimatizovanou komoru

Seznam použité literatury

[1] Test Centre, Environmental Chamber 1 - up to 2MW, Environmental Chamber 2 - up to 500kW, Environmental Chamber 3 - up to 250kW. *Airedale* [online]. Anglie, 2018 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <http://www.airedale.com/web/About-Airedale/Test-Centre.htm>, <http://www.airedale.com/web/About-Airedale/Test-Centre/Environmental-Chamber-1-up-to-2MW.htm>, <http://www.airedale.com/web/About-Airedale/Test-Centre/Environmental-Chamber-2-up-to-500kW.htm>, <http://www.airedale.com/web/About-Airedale/Test-Centre/Environmental-Chamber-3-up-to-250kW.htm>

[2] Datasheet Kinetis KV31F 512KB Flash Rev. 7, 02/2016. *NXP Semiconductors / Automotive, Security, IoT* [online]. -: -, 2016 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/KV31P100M120SF7.pdf>

[3] MICROCONTROLLER DIVISION APPLICATIONS. UNDERSTANDING AND MINIMISING ADC CONVERSION ERRORS. *STMicroelectronics* [online]. -: -, 2003 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/9d/56/66/74/4e/97/48/93/CD00004444.pdf/files/CD00004444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00004444.pdf

[4] Datasheet pro ADR3433 Rev. B ADR3412/ADR3420/ADR3425/ADR3430/ADR3433/ADR3440/ADR3450. *Analog Devices* [online]. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., 2010 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADR3412_ADR3420_ADR3425_ADR3430_ADR3433_ADR3440_ADR3450.pdf

[5] Snímače Pt1000 s teplotním koeficientem $T_k = 3850\text{ppm}/^\circ\text{C}$. *Regmet* [online]. -: -, [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://regmet.cz/download/zapojeni/Pt1000.pdf>

[6] MAS.836 Sensor Technologies for Interactive Environments. *MIT OpenCourseWare* [online]. 2011 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://ocw.mit.edu/courses/media-arts-and-sciences/mas-836-sensor-technologies-for-interactive-environments-spring-2011/readings/MITMAS_836S11_read02_bias.pdf

[7] Datasheet OPAx170 36-V, Single-Supply, SOT553, Low-Power Operational Amplifiers Value Line Series. *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2017 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa170.pdf>

[8] GUREYEV, Vladimir V. a Alexey A. L'VOV. High Accuracy Semiautomatic Calibration of Industrial RTDs. In: *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007* [online]. IEEE, 2007, 2007, s. 1-5 [cit. 2018-03-20]. DOI: 10.1109/IMTC.2007.379291. ISBN 1-4244-1080-0. ISSN 1091-5281. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4258269/>

[9] Callendar-Van Dusen Equation and RTD Temperature Sensors. *Newport Corporation* [online]. -: -, - [cit. 2018-03-20]. Dostupné z:

https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h4b/h16/8797291446302/TN-RTD-1-Callendar-Van-Dusen-Equation-and-RTD-Temperature-Sensors.pdf

[10] Datasheet MAX13442E/MAX13443E/ MAX13444E $\pm 15\text{kV}$ ESD-Protected, $\pm 80\text{V}$ Fault-Protected, Fail-Safe RS-485/J1708 Transceivers. *Maxim Integrated - Analog, linear, & mixed-signal devices* [online]. -: Maxim Integrated Products, 2011 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX13442E-MAX13444E.pdf>

[11] MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02. *The Modbus Organization* [online]. -: Modbus.org, 2006 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: http://www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf

[12] EL7457 40MHz Non-Inverting Quad CMOS Driver. *Intersil* [online]. -: Intersil Americas, 2012 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/el74/el7457.pdf>

[13] SOT407-1 plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 x 14 x 1.4 mm. *NXP Semiconductors | Automotive, Security, IoT* [online]. -: NXP, 2016 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/package-information/SOT407-1.pdf>

[14] Voltage Regulator TLE 4284. *Infineon Technologies: Semiconductor & System Solutions* [online]. -: Infineon Technologies, 2007 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE4284-DS-v02_10-EN.pdf?fileId=5546d46258fc0bc101595f854dfc1f60

[15] NHD-0220GZ-FSW-GBW-LE-E Character Liquid Crystal Displej Module. *Newhaven Displej International* [online]. USA: -, 2016 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/291/NHD-0220GZ-FSW-GBW-LE-E-47398.pdf>

[16] ARM Compiler toolchain Using the Compiler Version 4.1. *ARM Information Center* [online]. -: -, 2011 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.dui0472c/DUI0472C_using_the_arm_compiler.pdf

[17] Conversion functions for double arguments. *AVR Libc Reference Manual* [online]. -: - [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: http://www.microchip.com/webdoc/AVRLibcReferenceManual/group__avr__stdlib_1ga060c998e77fb5fc0d3168b3ce8771d42.html

[18] PAUL. Ftoa() – convert a floating point number to a character array on the Arduino. *Ars Informatica* [online]. -: -, 2016 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.ars-informatica.ca/eclectic/ftoa-convert-a-floating-point-number-to-a-character-array-on-the-arduino/>

[19] AVR221: Discrete PID Controller on tinyAVR and megaAVR devices. *Microchip Technology* [online]. Atmel Corporation, 2016 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-2558-Discrete-PID-Controller-on-tinyAVR-and-megaAVR_ApplicationNote_AVR221.pdf

[20] *Automa* [online]. 2000, (4) [cit. 2018-05-03]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/ziegler-nicholsovo-nastaveni-pid-regulatoru-retrospektiva-2000_04_27697_3105/

[21] MOC3061M, MOC3062M, MOC3063M, MOC3162M, MOC3163M 6-Pin DIP Zero-Cross Phototriac Driver Optocoupler (600 Volt Peak). *Fairchild Semiconductor Corporation* [online]. 2005 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.mouser.com/ds/2/149/fairchild%20semiconductor_moc3061m-325807.pdf

[22] Testovací komory Memmert. *Prodej laboratorní techniky - Labmet.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.labmet.cz/ohrev-ochlazení/klimatizované-komory/testovací-komory-memmert>

[23] Memmert Climate chambers. *Memmert GmbH + Co. KG: Thermal ovens for research & industry* [online]. 2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.memmert.com/fileadmin/products/documents/categories/BR-Climate-Chambers-english-D13643.pdf>

[24] Teplotní zkušební komory. *Testovací a zkušební komory | Kaitrade* [online]. 2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://kaitrade.cz/getFile/id:17626/lastUpdateDate:>

[25] KP/KP-A, přesostaty , standardní provedení. *Danfoss Česká Republika* [online]. 2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://products.danfoss.cz/productrange/refrigeration/pressure-switches-and-thermostats/kp-kp-e-kpu-kp-a-pressure-switches-standard-applications/#/>

[26] YANG ZHI a WANG JINGLING. Auto-tuning of PID parameters based on switch step response. In: *1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems (Cat. No.97TH8335)* [online]. IEEE, 1997, s. 779-782 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.1109/ICIPS.1997.672895. ISBN 0-7803-4253-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/672895/>

[27] LATHROP, Olin. Convolution control. In: *Stackexchange* [online]. 2017 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://electronics.stackexchange.com/questions/27677/how-to-use-measured-step-response-to-tune-control-system?utm_medium=organic&utm_source=google_rich_qa&utm_campaign=google_rich_qa