



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## POČÍTAČOVÉ ŘÍZENÍ KLIMATICKÉ KOMORY

COMPUTERIZED CLIMATIC TEST CHAMBER CONTROL

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Pálka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

BRNO 2017

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**  
Ústav radioelektroniky

**Student:** Bc. Václav Pálka

**ID:** 146920

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Počítačové řízení klimatické komory

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Navrhněte elektronický interface pro počítačové řízení klimatické komory Heraeus. Klimatickou komoru lze řídit pomocí vnějšího systémového konektoru, na kterém jsou veškeré analogové a digitální signály. Navrhněte schéma a desku plošných spojů řídicího modulu komory a proveďte jeho oživení. Připravte firmware pro mikroprocesor. Řídicí modul bude komunikovat s PC prostřednictvím USB a LAN.

Naprogramujte SW pro PC, který bude řídit celou teplotní zkoušku. Pomocí SW bude možné zvolit průběh teplotní zkoušky podle přednastaveného profilu nebo nastavit cyklování mezi teplotami, apod.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Microchip's 32-bit Microcontrollers [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/design-centers/32-bit>.

[2] LIBERTY, J. Naučte se C za 21 dní. 2., aktualiz. vyd. Překlad Josef Pojsl, Karel Voráček. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1583-1.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 16.5.2017

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Vladimír Hubík, Ph.D.

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce pojednává o návrhu a konstrukčním provedení zařízení pro řízení teplotní zkoušky v klimatické komoře Heraeus a tvorbě softwaru pro obsluhu zařízení. Práce podrobně popisuje, jak návrh a konstrukci Interface pro klimatickou komoru, pomocí kterého bude možné spustit automatizovanou testovací sekvenci, tak vývoj firmware a obslužného softwaru pro spuštění teplotního testu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Klimatická komora, mikroprocesor, PIC, Ethernet, Universal Serial Bus, analogově digitální převodník, digitálně analogový převodník, C#, Windows Presentation Foundation, .NET

## **ABSTRACT**

Semester work describes a proposal and the design of the device for controlling the temperature test in a climatic chamber Heraeus and the creation of software for operating equipment. Work describes in detail the design and construction interface for the climate chamber, with which will be able to run automated test sequences and the development of the firmware and the operating software to start the temperature test.

## **KEYWORDS**

Climatic chambre, microprocessor, PIC, Ethernet, Universal Serial Bus, analog-to-digital converter, digital-to-analog converter, C#, Windows Presentation Foundation, .NET

Pálka, V. *Počítačové řízení klimatické komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 36 s., 14 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Počítačové řízení klimatické komory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>ix</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Klimatická komora</b>	<b>2</b>
1.1 Komora Heraeus .....	2
1.1.1 Porty klimatické komory .....	2
1.1.2 Přejíčovové jevy klimatické komory .....	3
<b>2 Konstrukční návrh</b>	<b>5</b>
2.1 Komunikace s PC.....	5
2.1.1 Blokované schéma zapojení zařízení.....	5
2.2 Blokované schéma Interface klimatické komory .....	6
2.3 Návrh interface .....	6
2.3.1 Procesor .....	6
2.3.2 Analogově digitální převodník .....	7
2.3.3 Digitálně analogový převodník.....	9
2.3.4 Ethernet.....	11
2.3.5 USB.....	12
2.3.6 Spínací prvky .....	12
2.3.7 Napájení .....	13
<b>3 Firmware</b>	<b>17</b>
3.1 GPIO .....	17
3.2 Sériové rozhraní .....	17
3.2.1 SPI komunikace obvodu AD5761RBRUZ .....	18
3.2.2 Ovládání obvodu CS5505 .....	20
3.3 USB.....	20
3.4 Ethernet.....	21
3.5 Hlavní smyčka programu.....	23
<b>4 Software pro PC</b>	<b>25</b>

4.1	Okno nastavení připojení .....	25
4.2	Hlavní okno.....	26
4.2.1	Nabídka příkazů .....	27
4.2.2	Automatické získávání dat a export dat .....	28
4.3	Okno graf .....	29
<b>5</b>	<b>TEst a ověření funkce</b>	<b>32</b>
5.1	Simulační přípravek .....	32
5.2	Ověření funkce s klimatickou komorou.....	32
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>36</b>
	<b>Literatura</b>	<b>37</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>38</b>
	<b>Návrh zařízení</b>	<b>39</b>
	Obvodové zapojení Interface klimatické komory .....	39
	DPS Interface klimatické komory – top (strana součástí) .....	44
	DPS Interface klimatické komory – bottom (strana spojů).....	45
	<b>Seznam součástí</b>	<b>46</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Klimatická komora Heraeus VMT 04/140.....	1
Obrázek 2: Průběh ohřevu komory .....	3
Obrázek 3: Průběh ochlazení komory.....	4
Obrázek 4: Blokové schéma zapojení zařízení .....	5
Obrázek 5: Blokové schéma Interface klimatické komory.....	6
Obrázek 6: Blokové schéma AD převodníku CS5505 .....	8
Obrázek 7: Zapojení AD převodníku CS5505.....	9
Obrázek 8: Blokové schéma DA převodníku AD5761RBRUZ .....	10
Obrázek 9: Zapojení Digitálně Analogového převodníku .....	10
Obrázek 10: Zapojení řadiče fyzické vrstvy Ethernetu .....	11
Obrázek 11: Zapojení USB konektoru a ESD ochrany .....	12
Obrázek 12: Zapojení Reléového spínacího obvodu .....	13
Obrázek 13: Zapojení TPS23757.....	14
Obrázek 14: Zapojení měniče LTC1174CS8-3.3 .....	15
Obrázek 15: Zapojení měniče LTC1174CS8-5 .....	15
Obrázek 16: Volba komunikační periferie.....	25
Obrázek 17: Nastavení USB .....	26
Obrázek 18: Nastavení Ethernet .....	26
Obrázek 19: Hlavní okno aplikace.....	26
Obrázek 20: Export dat .....	28
Obrázek 21: Zobrazení grafu pro posledních 10 minut měření .....	30
Obrázek 22: Zobrazení grafu pro poslední hodinu měření .....	30
Obrázek 23: Simulační přípravek .....	32
Obrázek 24: Aktivní klimatická komora .....	33
Obrázek 25: Interface klimatické komory komunikující s komorou a s PC po USB.....	33
Obrázek 26: Hlavní okno při spuštěném měření .....	34
Obrázek 27: Graf poslední hodiny testovacího měření .....	34
Obrázek 28: Graf posledních 10 minut testovacího měření .....	35
Obrázek 29: Zpracované exportované data z měření pomocí grafu v MS Office Excel	35

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Specifikace klimatické komory .....	2
Tabulka 2: Zapojení analogového konektoru klimatické komory .....	2
Tabulka 3: Specifikace procesoru PIC32MX795F512L .....	7
Tabulka 4: Volba kanálu AD převodníku .....	8
Tabulka 5: Formát vstupního posuvného registru obvodu AD5761R.....	18
Tabulka 6: Příkazy pro komunikaci s AD5761R.....	19
Tabulka 7: Nastavení obvodu AD5761R.....	19
Tabulka 8: Konzolové příkazy měřící aplikace .....	20
Tabulka 9: Základní příkazy TCPIP .....	21

# ÚVOD

S nástupem moderní doby a rozkvětem průmyslu, je zákazníky a legislativními opatřeními na výrobce všech zařízení kladen nátlak na zajištění spolehlivosti a dlouhé životnosti prodáváných výrobků, které výrobce často distribuuje do různých částí světa s klimatem odlišným od klimatizovaných výrobních hal. Je tedy nutné ověřit funkci zařízení i v jiných prostředích.

Pro tyto test slouží environmentální testovací komory. Tyto komory umožňují simulovat v uzavřeném prostoru různé klimatické podmínky, které se vyskytují v různých místech světa, kde může být předpokládán užití výrobku, od ledové Tundry až pro vyprahlou Saharu.



Obrázek 1: Klimatická komora Heraeus VMT 04/140

Jedním ze základních typů Environmentálních komor je teplotní komora Heraeus VMT 04/140 (Obrázek 1). Jedná se o starší typ teplotní komory, která ale neumožňuje v aktuální konfiguraci, automatické testy řízené počítačem. Rozšíření funkcí komory o možnost automatických měřících sekvencí či cyklů je cílem této práce.

# 1 KLIMATICKÁ KOMORA

## 1.1 Komora Heraeus

Klimatická komora Heraeus VMT 04/140 je teplotní zkušební komora vyrobená roku 1989. Její teplotní rozsah je  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+180^{\circ}\text{C}$  s odchylkou od zadané teploty  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Komora obsahuje vlastní ovládací interface, který umožňuje nastavení teploty a časovač doby spuštění komory. Samotná zkouška na vliv přechodových jevů na testované zařízení je však již ovládána manuálně obsluhou komory.

Tabulka 1: Specifikace klimatické komory

Výrobce:	Heraeus
Typ:	VMT 04/140
Rok výroby:	1989
Sériové číslo:	33727
Teplotní rozsah [ $^{\circ}\text{C}$ ]:	-40 až +180
Rozměry [mm]:	500x500x500
Příkon [kW]:	2

Samotná klimatická komora obsahuje vstupní a výstupní porty, pomocí kterých lze komoru ovládat z externího zdroje.

### 1.1.1 Porty klimatické komory

Klimatické komory Heraeus VMT v různých specifikacích obsahují různou senzorovou výbavu a rozličné možnosti komunikace. Komora typu VMT 04/140 je vybavena digitálním i analogovým konektorem. Jedná se však o jeden ze základních modelů, který nemá dostupné všechny funkce jako dražší modely. Pro účely řízení teplotní zkoušky využijeme analogový výstup na konektoru X36. Zapojení konektoru uvedené v servisním manuálu klimatické komory Heraeus:

Tabulka 2: Zapojení analogového konektoru klimatické komory

Konektor	Analogový konektor Vstup/výstup			
	Měřená veličina	Fyzikální veličina	Rozsah fyzikální veličiny	Odpovídající napětí [mV]
X36 PIN 1 9	+ -	Aktuální hodnota Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-50/+180	-500/+1800
2 10	+ -	Nastavení teploty Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-50/+180	-500/+1800

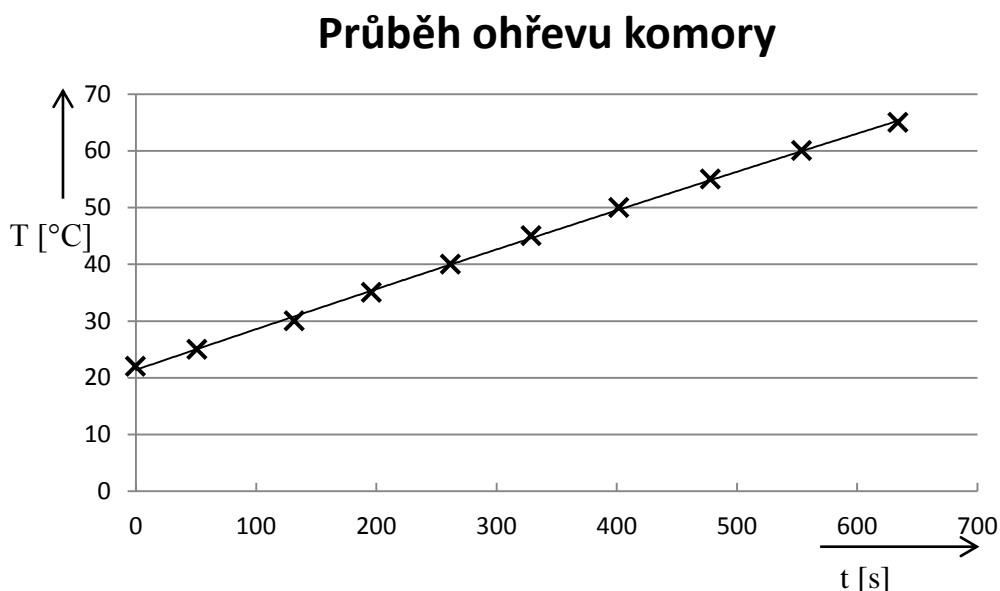
Z výše uvedené tabulky je tedy patrné, že nastavování teploty teplotní zkoušky bude probíhat pomocí nastavení odpovídající hodnoty napětí mezi diferenciálními vstupy konektoru X36 na pinech 2 a 10. Nastavení vhodného napětí bude zajišťovat

Interface klimatické komory. Zařízení bude také měřit jak napětí na pinech 1 a 9 pro zjištění diferenciální hodnoty a přepočtu na aktuální teplotu, tak na pinech 2 a 10 pro ověření správnosti nastavení napětí/teploty.

### 1.1.2 Přejíchodové jevy klimatické komory

Pro korektní nastavení regulační odchylky, se kterou je nutné počítat, je nezbytné ověřit přejíchodové jevy při sepnutí chlazení a ohřevu komory.

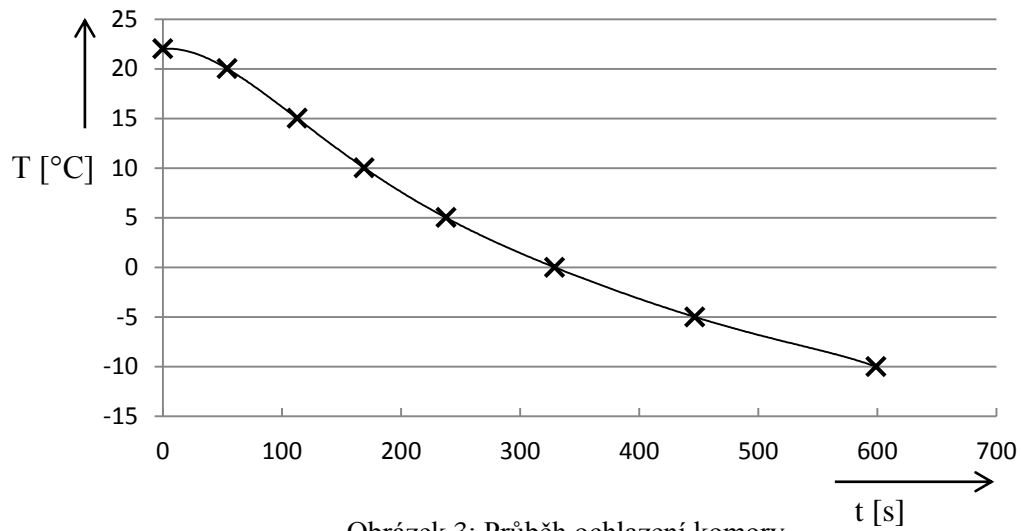
Měření průběhu ochlazení a ohřevu komory probíhalo z počátečního klidového stavu, který odpovídá průměrné okolní teplotě cca 22°C. Po ověření klidové hodnoty teploty v komoře, detekované pomocí integrovaného teplotního čidla Pt100 byla pro ohřevní charakteristiku nastavena maximální nastavitelná teplota +180°C, zatím co pro ochlazovací charakteristiku byla nastavena hodnota minimální, tedy -40°C. Měření probíhalo cca 10 minut.



Obrázek 2: Průběh ohřevu komory

Z výsledného grafu (Obrázek 2) měření průběhu ohřevu klimatické komory je zřetelný téměř lineární průběh od počáteční změny teploty, zatím co při ochlazování komory (Obrázek 3) je patrná vysoká setrvačnost systému při rozběhu chladícího kompresoru a brzká saturace, která nastává již při prvotním ochlazení komory. Jev saturace je pravděpodobně důsledkem malého výkonu kompresoru obsaženého v komoře a následným ohřevem pomocného výměníku teploty chladícího kompresoru.

## Průběh ochlazení komory



Obrázek 3: Průběh ochlazení komory

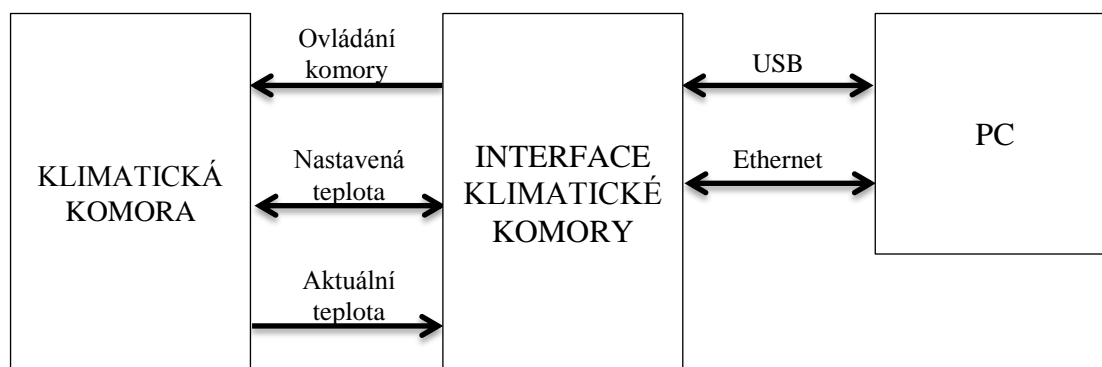
Z dlouhých časových prodlev mezi jednotlivými změnami teploty je patrné, že se jedná o regulační systém s vysokou kapacitou, pro kterou nemá žádná komplexnější regulace efektivní přínos.

## 2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

### 2.1 Komunikace s PC

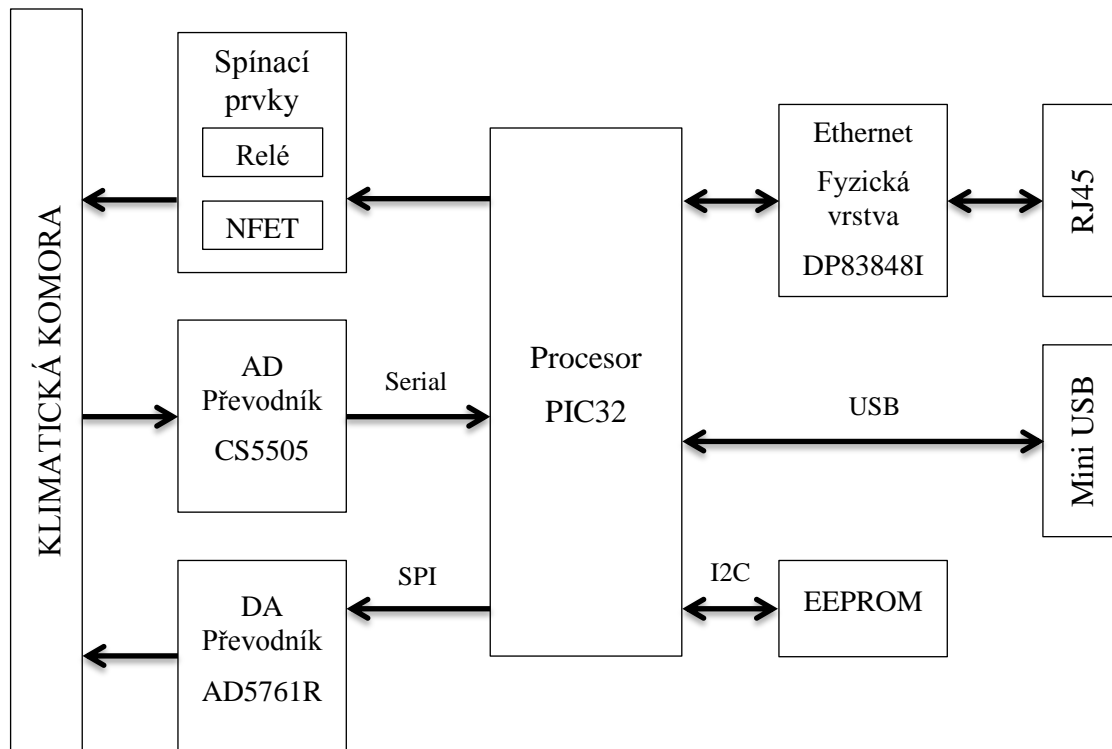
Interface klimatické komory je samostatná řídicí jednotka, která umožňuje komunikaci s počítačem, který obsahuje řídicí program, jenž dohlíží na celý průběh testu. Komunikace probíhá pomocí sběrnice USB a Ethernet.

#### 2.1.1 Blokové schéma zapojení zařízení



Obrázek 4: Blokové schéma zapojení zařízení

## 2.2 Blokové schéma Interface klimatické komory



Obrázek 5: Blokové schéma Interface klimatické komory

## 2.3 Návrh interface

### 2.3.1 Procesor

Vzhledem ke komplexnosti zadání je vhodné zvolit procesor, který je vybaven potřebnými periferiemi. Pro zjednodušení návrhu je vhodné zvolit procesor, který již implementuje periferie:

- Ethernet,
- USB,
- I2C,
- SPI,

kteřé jsou využity pro komunikaci s dalšími zařízeními. Jako primární napájecí napětí bylo zvoleno +3,3V, které umožňuje volbu ze široké škály procesorů. Zúžení výběru procesorů bylo docíleno volbou použitím procesoru rodiny mikrokontrolerů PIC32 výrobce Microchip.

Jako vhodný procesor pro aplikaci v zařízení byl zvolen PIC32MX795F512L, který disponuje následujícími parametry:



Tabulka 3: Specifikace procesoru PIC32MX795F512L

Maximální rychlost [MHz]	80
Paměť programu [kB]	512
RAM [kB]	128
Pomocná flash [kB]	12
Teplotní rozsah [°C]	-40 až 105
Rozsah napájecího napětí [V]	2,3 až 3,6
SPI	4
I2C	5
USB	Full Speed device/Host/OTG
CAN	2
Ethernet	10/100 Ethernet MAC podporující MII/RMII rozhraní
A/D kanály	6
Rozlišení A/D převodníku [bit]	10
PWM	5
16-bit časovač	5
I/O Piny	85

I když procesor samotný obsahuje AD převodník, tak v této aplikaci nemůže být použit, protože procesor nezvládá zpracovat záporně polarizované napětí na svých pinech. Je tedy nutné použít externí AD převodník.

### 2.3.2 Analogově digitální převodník

U řízení klimatické komory je zapotřebí přesně snímat nastavenou i aktuální teplotu. Údaje o teplotě představuje diferenciální analogový signál, který se pohybuje v rozmezí -500 mV až 1800 mV. Tyto hodnoty přímo reprezentují aktuální a nastavenou teplotu podle vztahu:

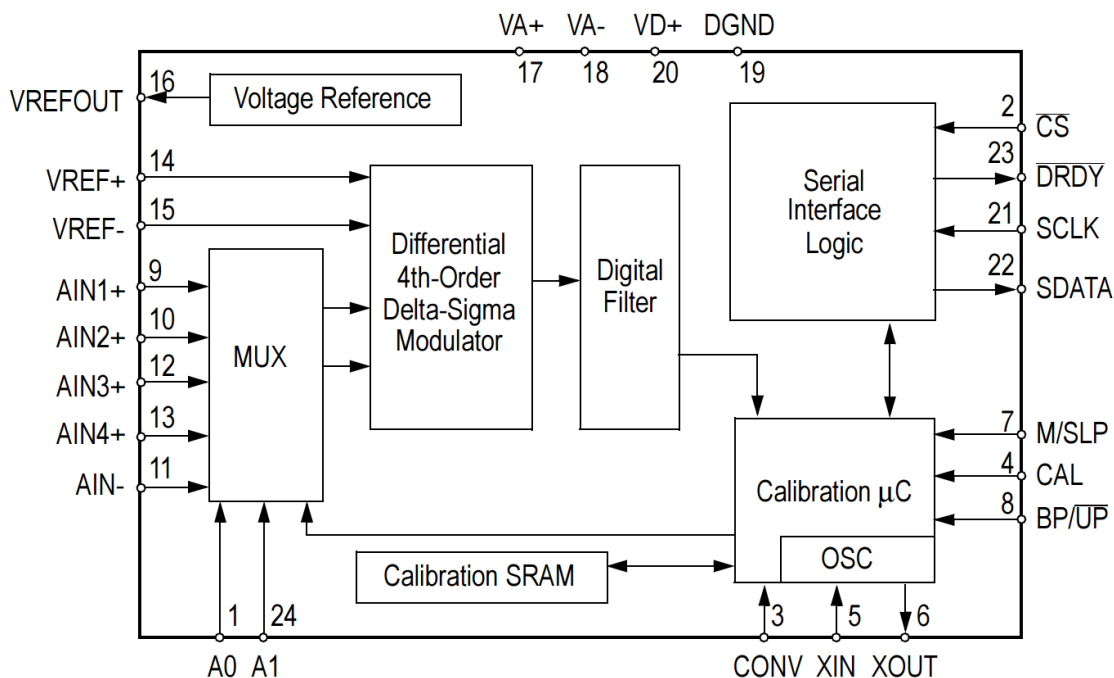
$$T_{MES} = 100 \cdot U_{ADC}, \quad [^{\circ}\text{C}; \text{V}] \quad (2.1)$$

kde  $U_{ADC}$  představuje hodnotu diferenciálního napětí na vstupu převodníku a  $T_{MES}$  určuje hodnotu teploty odpovídající hodnotě napětí.

Požadovaný převodník musí splňovat následující požadavky:

- Diferenciální vstupy
- Záporné napětí na vstupech
- Vysoká přesnost
- Vhodné napájecí požadavky
- Vícekanálový
- Vhodné komunikační rozhraní

Všechny výše uvedené požadavky pro aplikaci v Interface klimatické komory splňuje integrovaný obvod společnosti Cirrus Logic CS5505-ASZ. Tento obvod obsahuje čtyř-kanalový, 16 bitový Sigma-Delta převodník (viz Obrázek 6).



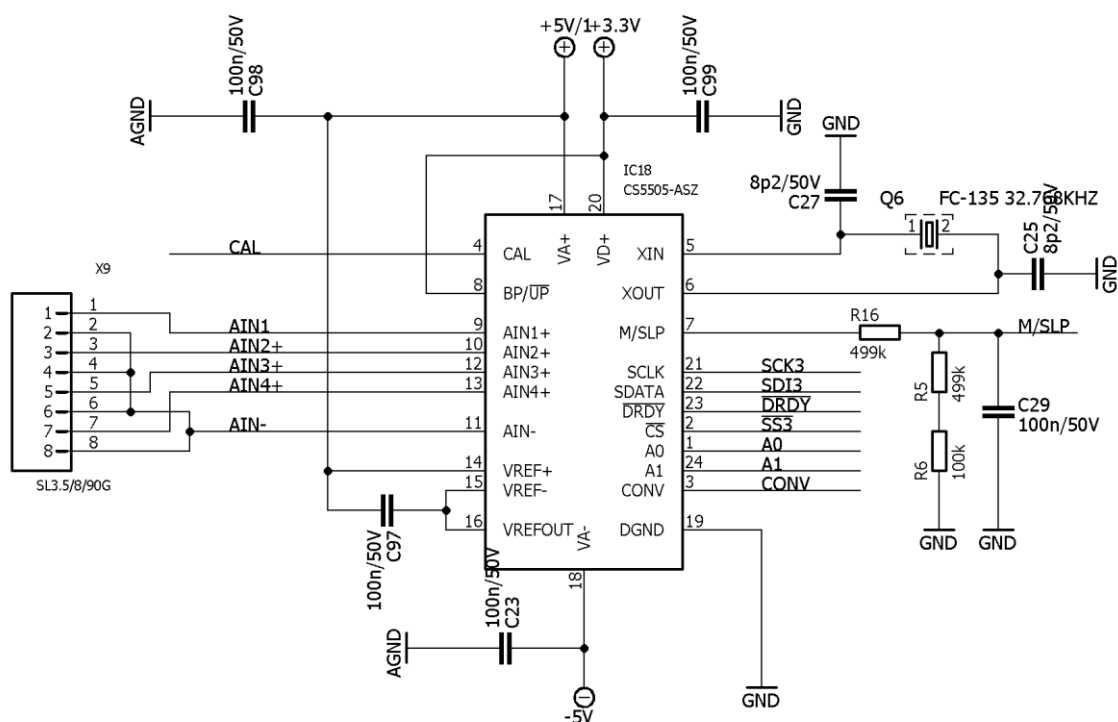
Obrázek 6: Blokové schéma AD převodníku CS5505 (převzato z [2])

Integrovaný obvod umožňuje přepínání aktivního vstupu pomocí vnitřního multiplexoru řízeného vstupy A0 a A1. Jednotlivé stavy jsou definovány tabulkou:

Tabulka 4: Volba kanálu AD převodníku

A1	A0	Adresa kanálu
0	0	AIN1
0	1	AIN2
1	0	AIN3
1	1	AIN4

Časování převodníku je zajištěno pomocí připojeného krystalu, který zajišťuje funkci převodníku i bez časování z procesoru. Pro výčet dat je možné použít jak časování z krystalu, tak časování z procesoru. Převodník CS5505 umožňuje kalibraci vnitřního převodníku pro přesné odečítání hodnoty vstupního napětí.



Obrázek 7: Zapojení AD převodníku CS5505

Obvodové zapojení (Obrázek 7) analogově digitálního převodníku je přizpůsobeno potřebám Interface klimatické komory. Pro napájení je zvoleno bipolární napájení  $\pm 5V$  pro analogovou část s použitím integrovaného napěťové reference 2,5V a 3,3V pro digitální a komunikační část obvodu. Komunikační pin M/SLP je nutné vhodně ošetřit pro volbu módu komunikace a nastavení funkce uspaní obvodu. Filtrační kondenzátory a krystal hodinového signálu byly zvoleny dle doporučených hodnot uvedených v technické dokumentaci obvodu[2].

### 2.3.3 Digitálně analogový převodník

Pro správné nastavení teploty je zapotřebí přesně nastavit diferenciální napětí na vstupu klimatické komory. Toto napětí se musí pohybovat v rozmezí  $-500$  až  $+1800$  mV. Nastavenou teplotu reprezentuje napětí přímo podle vztahu:

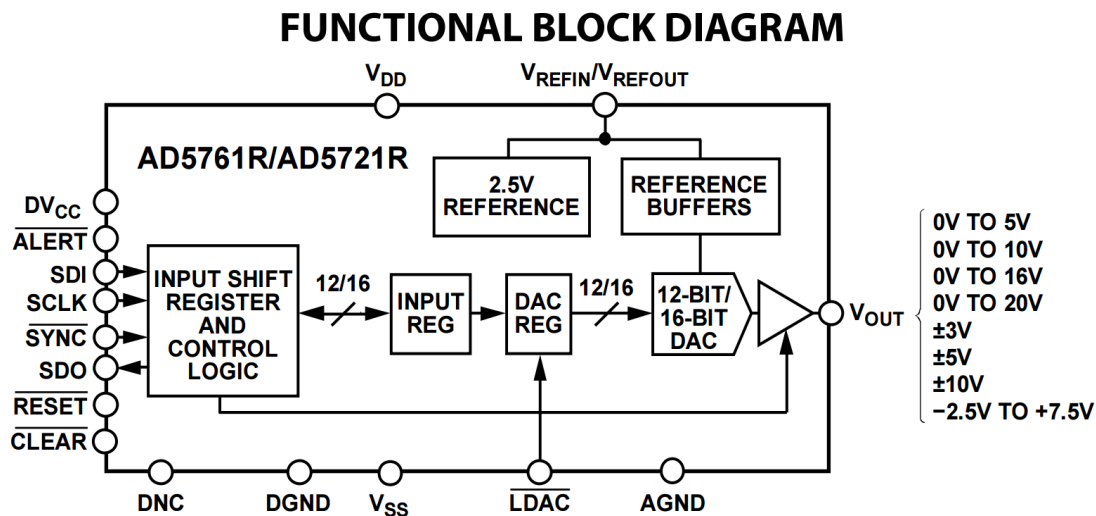
$$U_{DAC} = \frac{T_{SET}}{100}, \quad [V; ^\circ C] \quad (2.2)$$

kde  $T_{SET}$  představuje hodnotu nastavené teploty na převodníku a  $U_{DAC}$  určuje hodnotu diferenciálního napětí odpovídající hodnotě nastavené teploty.

Požadavky na převodník:

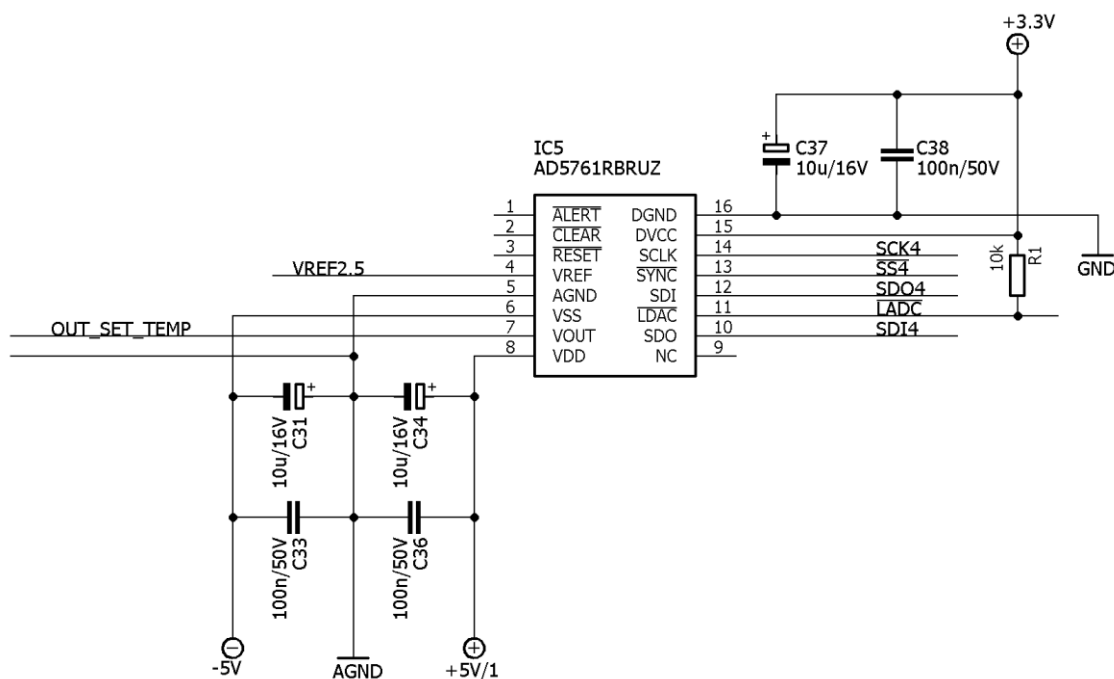
- Rozsah nastavitelného napětí alespoň  $-0,5V$  až  $1,8V$
- Vysoká přesnost v oblasti použití
- Vhodné napájecí požadavky
- Vhodné komunikační rozhraní

Všechny výše uvedené požadavky splňuje digitálně analogový převodník firmy Analog Devices AD5761RBRUZ.



Obrázek 8: Blokové schéma DA převodníku AD5761RBRUZ (převzato z [3])

Obvod AD5761RBRUZ (Obrázek 8) je 16 bitový programovatelný AD převodník komunikující pomocí SPI sběrnici, pomocí které se nastavuje hodnota výstupního napětí a také umožňuje softwarově nastavit výstupní rozsah napětí.



Obrázek 9: Zapojení Digitálně Analogového převodníku

Zapojení digitálně analogového převodníku (Obrázek 9) je zvoleno jako zjednodušené. Všechny odpojené vstupy obsahují vnitřní pull-up či pull-down rezistory a je možno je obsluhovat i softwarově. Zapojení filtračních kondenzátorů je odvozeno

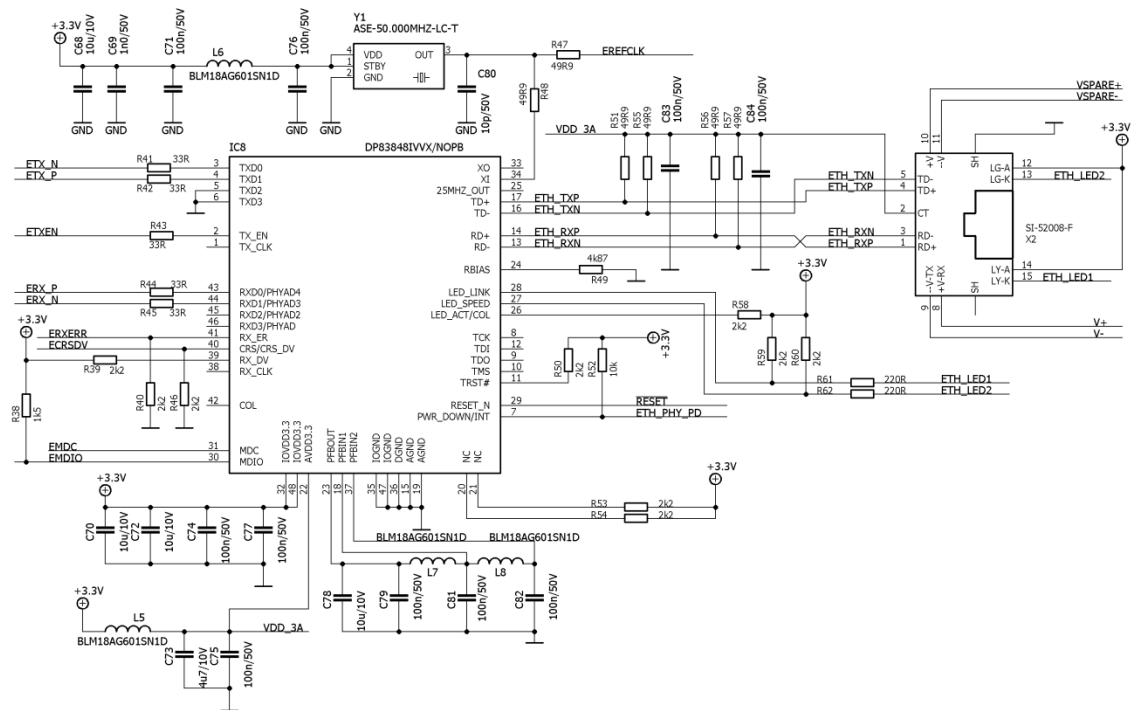
z doporučeného zapojení uvedeného v technické dokumentaci obvodu [3].

Do obvodu je připojena externí napěťová reference 2,5V tvořená pomocí obvodu REF3325. Tato externí reference slouží jako záloha v případě, že vnitřní reference obvodu nebude schopna přesně nastavit výstupní napětí.

Výstup z převodníku je připojen na napěťový sledovač tvořen operačním zesilovačem AD8691AKSZ-R2, aby nebyl příliš proudově namáhán či ovlivňován vnitřními obvody klimatické komory.

### 2.3.4 Ethernet

Zvolený procesor PIC32MX795F512L-80V obsahuje řadič sítě Ethernet, avšak vyžaduje externí obvod pro vytvoření fyzické vrstvy. Jako vhodný obvod byl zvolen obvod DP83848I, který splňuje všechny požadavky a je podporován vývojovými knihovnami MPLAB Harmony, které implementuje software pro práci s procesory PIC 32 od Microchipu.



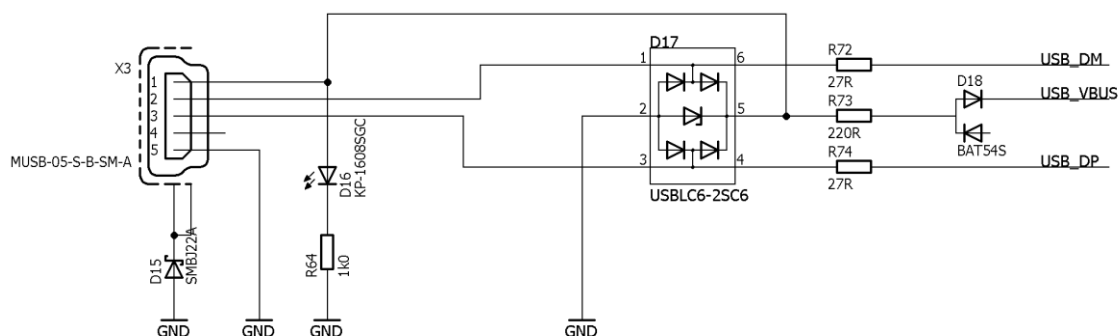
Obrázek 10: Zapojení řadiče fyzické vrstvy Ethernetu

Obvod DP83848I splňuje standardy IEEE 802.3: 10BASE-T i 100BASE-TX a má zvýšenou tepelnou a ESD ochranu. Připojení obvodu k procesoru je pomocí 3.3V MAC rozhraní podporujícího MII/RMII(Media Independent Interface/Reduced Media Independent Interface) (viz Obrázek 10). Obvod je řízen oscilátorem 50MHz, který je nutno použít při připojení k procesoru pomocí RMII standartu. Pro správnou funkci je nezbytné připojit napájecí zpětnovazební kondenzátory na piny PFBOU a PFBIN1, PFBIN2. Tato zpětná vazba vyžaduje umístění 10 $\mu$ F a 0,1 $\mu$ F kondenzátorů mezi její jednotlivé piny. Důležitou součástí návrhu samotné desky je ošetření datových vodičů TXD(0,1) a RXD(0,1). Jedná se o diferenciální vodiče a je vhodné při návrhu desky

plošných spojů se věnovat jejich správnému vedení a shodné délky obou párů. Z toho to důvodu byl obvod fyzické vrstvy umístěn co nejblíže procesoru. Při větších vzdálenostech by se již mohlo projevovat rušení vzniklé okolními periferiemi vzhledem k použití pouze dvouvrstvé desky plošných spojů místo výrobcem doporučené čtyřvrstvé. Obdobně je nutné ošetřit datové vodiče  $TD_{\pm}$  a  $RD_{\pm}$  mezi konektorem a obvodem fyzické vrstvy. Zde je však mimo jiné nutné umístit  $49.9\Omega$ , 1% ukončovací rezistory a  $0,1\mu F$  odrušovací kondenzátory svedené k zemnicí vrstvě. Další zapojení obvodu a ostatních komponent potřebných pro jeho správnou funkci je odvozeno z doporučení v technické dokumentaci[6] a aplikačních poznámkách k obvodu.

### 2.3.5 USB

Procesor PIC32MX795F512L-80V obsahuje integrovaný řadič USB ON-THE-GO (OTG) a podporuje standard USB 2.0 s použitím minima externích komponent. Pro připojení k PC je zařízení vybaveno konektorem USB typ mini B. Pro ochranu vnitřních periferií zařízení byl USB konektor připojen přes obvod USBLC6-2, který slouží jako ESD ochrana. Použitý obvod obsahuje podporu pro USB 2.0 a splňuje specifikace dle IEC 61000-4-2 level 4.

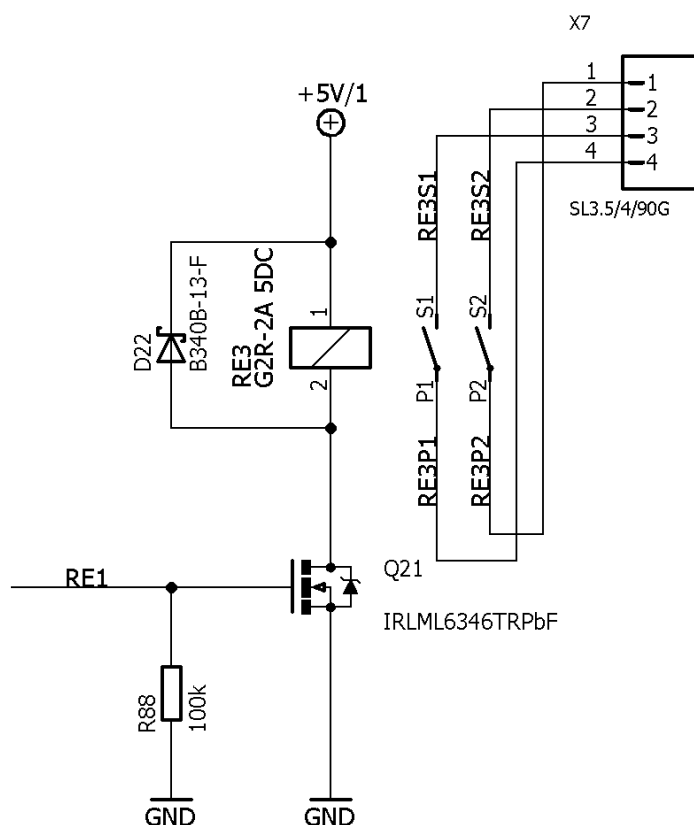


Obrázek 11: Zapojení USB konektoru a ESD ochrany

Pro indikaci připojeného USB zařízení slouží LED dioda, která signalizuje přítomnost externího napětí na konektoru.

### 2.3.6 Spínací prvky

Klimatická komora disponuje vnějším vstupem pro spínání klimatické komory, proto je Interface klimatické komory vybaven několika spínacími prvky pro spouštění ohřívacího či chladicího cyklu. Zařízení je vybaveno třemi duálními reléovými spoji G2R-2A, které jsou ovládány 5V logikou, proto je nutné jej připojit přes řídicí tranzistor IRLML6346 (viz Obrázek 12), který je řízen 3,3V logikou a ochrání procesor před případnými proudovými špičkami, které nezvládne odfiltrovat dioda zapojená paralelně k cívce, vznikajícími při spínání a rozpínání relé, které jsou způsobeny proudovými změnami na jeho cívce. Tyto relé zvládnou proudové zatížení až 5A při 250V.



Obrázek 12: Zapojení Releového spínacího obvodu

Pro případ spínání nesilových nízkonapěťových obvodů je Interface klimatické komory vybaven tranzistory typu NDS352AP, které jsou zapojeny jako spínací prvky přes oddělovací tranzistorovou síť ULN2803A.

### 2.3.7 Napájení

Pro správnou funkci všech periférií zařízení Interface klimatické komory je nutné zajistit vhodné a stabilní napájení. Jako zdroj příkonu pro celé zařízení bylo zvoleno napájení po ethernetové síti (Power Over Ethernet - POE), které má možnost být napájeno i z externího zdroje, v případě, že zařízení nebude připojeno k síti umožňující používat tuto funkcionalitu.

V případě použití POE zdroje či připojení externího napájení je toto napětí stabilizováno na primárních 5V, které se dále pomocí měničů transformuje na potřebné napětí, která se využívají v zařízení:

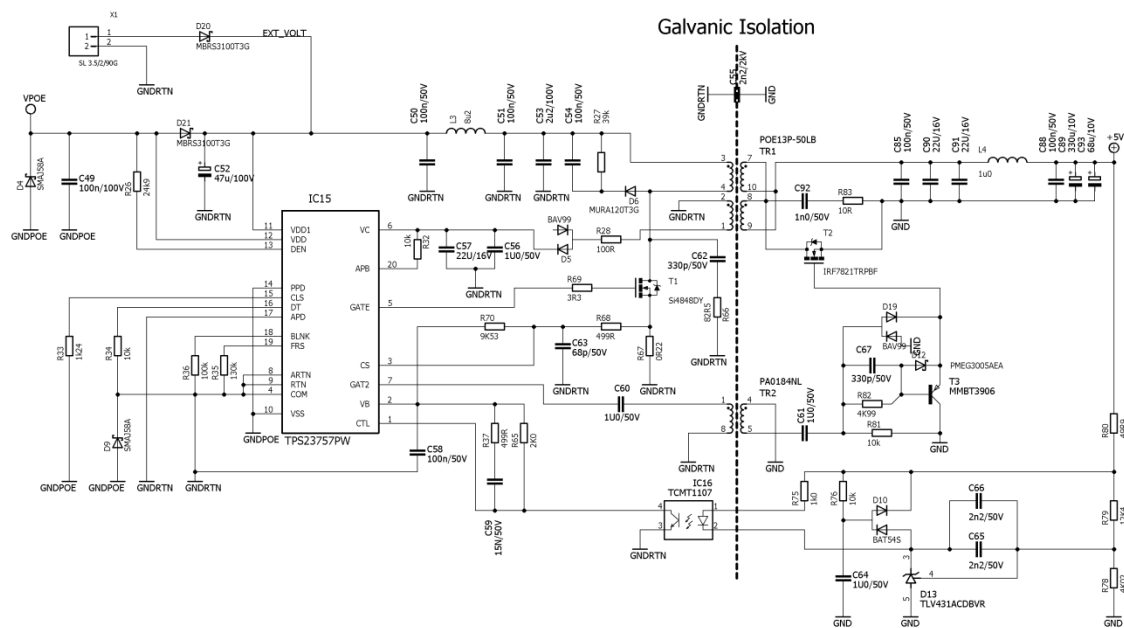
- +5V,
- -5V,
- +3,3V,
- +2,5V.

#### **Větev: +5V**

5V větev je stabilizována pomocí integrovaného obvodu TPS23757, který slouží jako efektivní POE řadič a DC/DC kontrolér

Power over Ethernet (POE) je efektivní způsob napájení koncových síťových zařízení. Jeho použití je zvláště výhodné u síťových prvků, které nemají velký příkon (jednotky/desítky Wattů) a není tedy nutné je přímo připojovat do elektrické sítě. Jako příklad použití POE jsou typicky IP kamery, či wifi routry.

Toto zařízení bude primárně napájeno z externího zdroje a POE je zde umístěna jako vhodná alternativní možnost napájení vzhledem k použití sběrnice Ethernet. Protože dle normy IEEE 802.3af je napětí přenášené pomocí Ethernetové linky 48V je nutné použít integrovaný obvod spravující napájení. V zařízení použitým obvodem je TPS23757, který spravuje napájení jak pomocí POE, tak z externího zdroje. Pracovní rozsah vstupních napětí je 9,3V až 57V.



Obrázek 13: Zapojení TPS23757

Vstupní napětí z POE zdroje je nejdříve usměrněno pomocí ideálního diodového můstku tvořeného tranzistory typu MOSFET PSMN040-100MSE řízeného pomocí řadiče LT4321UF. Následně je pomocí obvodu TPS23757 přes galvanickou izolaci stabilizován na hodnotu +5V. Zapojení (Obrázek 13) externího zdroje napětí je nastaveno jako za chodu nezaměnitelné, avšak je možné obvod TPS23757 zapojit do konfigurace, kdy je možné při chodu zařízení plynule měnit zdroj napájení. Tato konfigurace je ale mnohem sofistikovanější a v tomto konkrétním případě nepotřebná.

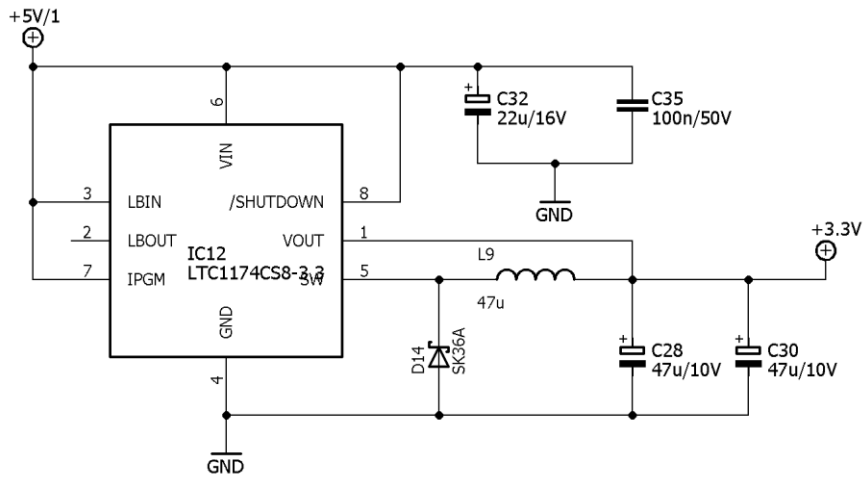
Spínání celého zařízení je do obvodu zařazeno na úrovni přechodu +5V větve k dalším měničům a perifériím. Pro tuto funkci je do obvodu zařazen integrovaný obvod TPS22965. Jedná se o spínací integrovaný obvod s nízkým odporem při sepnutí, který dosahuje 16mΩ, a zvládá kontinuální proud až 6A. Na desce je integrován přepínač a jsou zde vyvedeny i piny pro připojení externího spínače umístěného například na krytu zařízení.

### Větev +3,3V

Jako primární napájecí a komunikační napětí je zvoleno napětí 3,3V, protože zvolený



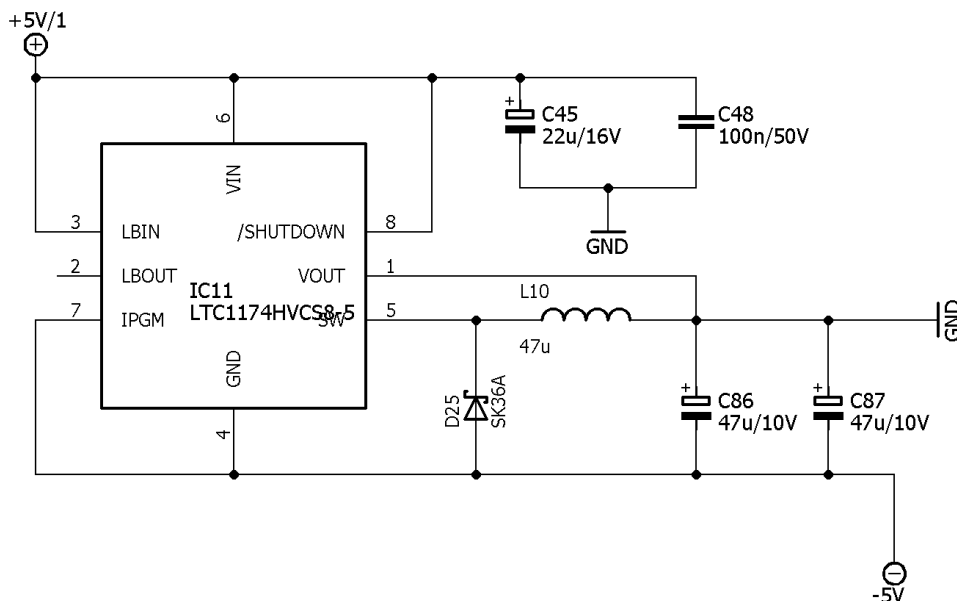
procesor a periférie komunikují s napětím 3,3V. Toto napětí je stabilizováno pomocí DC/DC měniče napětí LTC1174CS8-3.3. Jedná se o měnič s fixním výstupním napětím o hodnotě 3,3V. Hlavní výhodou obvodu je snadná implementace s použitím minima externích součástek, nízké ztráty a vysoká efektivita až 94%.



Obrázek 14: Zapojení měniče LTC1174CS8-3.3

### Větev -5V

Pro AD a DA převodníky je nutné přivést diferenciální napájení  $\pm 5V$ , protože potřebujeme pracovat i se zápornými napětími. Jako napěťový inverter byl zvolen integrovaný obvod LTC1174HVCS8-5. Jedná se o obvod stejného typu jako DC/DC měnič pro +3,3V větev, který má obdobné zapojení a parametry. Zapojení LTC1174HVCS8-5 se od LTC1174HVCS8-3.3 liší v zapojení zpětné vazby a polarity výstupu:



Obrázek 15: Zapojení měniče LTC1174CS8-5

### ***Větev +2,5V***

Napětí 2,5V bylo zvoleno jako reference pro obvod AD5761R. Jako stabilizační obvod pro referenční napětí slouží REF3325AIDCKT, který má výhodu v nízkém šumu a přesnosti nastavení požadované referenční hodnoty s nízkou teplotní odchylkou.

## 3 FIRMWARE

Pro návrh softwarového vybavení procesoru integrovaného na desce plošných spojů byl zvolen program MPLAB X Integrated Development Environment (IDE). Jedná se o program pro PC sloužící pro vývoj aplikací pro mikroprocesory Microchip. Konkrétně byla použita verze programu 3.51, která se v průběhu programování jevila jako nejstabilnější.

Pro snadnější implementaci rozhraní Ethernet a USB je pro sestavení programu využito rozšíření, pro MPLAB X IDE, MPLAB Harmony. Jedná se o plně integrovanou vývojovou platformu pro mikrokontroléry PIC32. MPLAB Harmony obsahuje sadu konfigurovatelných knihoven pro obsluhu periférií integrovaných v procesorech PIC32. Jedná se o flexibilní plně integrovatelnou platformu pro vývoj firmwaru procesoru PIC32, která se snaží stavět program na bázi modulů. V době tvorby této práce na této platformě probíhá neustálý vývoj, a proto byla použita pro tvorbu firmwaru verze MPLAB® Harmony Integrated Software Framework v1.07.01.

### 3.1 GPIO

Jednoduché periferie jako jsou indikační LED a spínací prvky desky jsou ovládané přímo pomocí programovatelných pinů procesoru. Pro správnou funkci jednotlivých pinů je zapotřebí nastavit jejich funkci a hodnotu.

```
//Nastavení masky pro výstupní porty LED
SYS_PORTS_PIN_DIRECTION pinDir;
pinDir = SYS_PORTS_DIRECTION_OUTPUT;
PORTS_DATA_MASK LEDMask = (PORTS_DATA_MASK)0x0006;

//Nastavení portu jako výstupní
SYS_PORTS_DirectionSelect(PORTS_ID_0, pinDir, PORT_CHANNEL_C,
LEDMask);

//Zapsání logické hodnoty 0 na pin C1
PLIB_PORTS_PinClear( PORTS_ID_0, PORT_CHANNEL_C, PORTS_BIT_POS_1);
```

Pomocí GPIO pinů jsou na desce ovládány všechny spínací prvky, které jsou osazeny na desce, indikační LED a piny převodníků, jenž neslouží pro komunikaci (např.: LADC). Jejich spínání probíhá v závislosti na fázi programu a příchozím požadavku z PC, které komunikuje skrze USB či Ethernet.

### 3.2 Sériové rozhraní

Převodníky DA a AD použité na Interface klimatické komory komunikují pomocí sériové komunikace. Obvod AD převodníku CS5505 komunikuje pomocí specifické sériové komunikace, která vychází z SPI. Obvod AD5761RBRUZ pro komunikaci využívá protokol SPI.

### 3.2.1 SPI komunikace obvodu AD5761RBRUZ

SPI (Serial Peripheral Interface) je sériové rozhraní užívané ke komunikaci mikroprocesoru s ostatními integrovanými obvody, které jsou vybaveny touto sběrnicí. Komunikace probíhá po společných sběrnicích pro více zařízení, přičemž jednotlivá zařízení jsou volena pomocí dalšího vodiče.

Příklad programu pro komunikaci po SPI s použitím PLIB knihovny:

```
//zvolení periferie
APP_SPI_CS_SELECT();

//vyčištění bufferů
PLIB_SPI_ReceiverOverflowClear ( SPI_ID_4 );
PLIB_SPI_BufferClear(SPI_ID_4);

//zapsání dat pro odeslání (8 bitů)
PLIB_SPI_BufferWrite(SPI_ID_4, temp_datax.tosend[0]);

//vyčkání na odeslání a přijetí dat
while (PLIB_SPI_TransmitBufferIsFull(SPI_ID_4));
while (PLIB_SPI_ReceiverFIFOIsEmpty(SPI_ID_4));

//vyčtení dat
temp_datax.answer[0] = PLIB_SPI_BufferRead( SPI_ID_4 );

//deselekce periferie
APP_SPI_CS_DESELECT();
```

Z příkladu komunikace je vidět jak probíhá komunikace po sběrnicí. Pro zahájení komunikace je nejdříve nutné zvolit zařízení, se kterým plánujeme komunikovat. Následně je vhodně vyčistit buffery, které se mohly v průběhu běhu programu zaplnit neurčitými daty. Po vyčištění bufferů můžeme postoupit k zápisu dat do periferie. Posléze vyčkáváme na odeslání dat a následně zaplnění bufferu přijímače, který potom vyčteme.

Sběrnice SPI je v zařízení použita pro komunikaci s integrovaným obvodem AD5761RBRUZ, který slouží jako DA převodník. Integrovaný obvod umožňuje časování sběrnicí SPI až do hodnoty 50MHz pro zápis a 33 MHz pro čtení. Pro komunikaci je v projektu nastavena hodnota 1MHz.

Pro správnou funkci obvodu je nutné nastavit vnitřní registry. Obvod je vybaven 24-bitovým posuvným registrem, kdy bit MSB je přenášen jako první. Vstupní posuvný registr má definovanou posloupnost, která je vyobrazena v tabulce 5.

Tabulka 5: Formát vstupního posuvného registru obvodu AD5761R (převzato z [3])

MSB								LSB
DB23	DB22	DB21	DB20	DB19	DB18	DB17	DB16	DB[15:0]
X	X	X	0	Adresa registru				Data pro zápis do registru

Adresy jednotlivých vnitřních registrů obvodu AD5761R jsou definovány jako 4-bitové adresní hodnoty. Jednotlivé adresy jsou definovány následující tabulkou:

Tabulka 6: Příkazy pro komunikaci s AD5761R (převzato z [3])

Adresa registru				Příkaz
DB19	DB18	DB17	DB16	
0	0	0	1	Zápis do vstupního registru
0	0	1	0	Aktualizace hodnoty registru DA převodníku ze vstupu
0	0	1	1	Zápis hodnoty přímo do DA registru převodníku
0	1	0	0	Zápis do nastavovacího registru
0	1	1	1	Programový reset dat
1	0	0	1	Deaktivace čtení registrů
1	0	1	0	Přečtení vstupního registru
1	0	1	1	Přečtení registru DA převodníku
1	1	0	0	Přečtení nastavovacího registru
1	1	1	1	Úplný programový reset

Po aktivaci zařízení proběhne inicializace, jejíž součástí je nastavení nastavovacího registru převodníku AD5761R, kde je nutné nastavit parametry a funkci zařízení. Při nastavení zařízení, kdy je změněn rozsah výstupních napětí, je nutné provést úplný programový reset (viz. Tabulka 6) ještě před zápisem hodnoty do nastavovacího registru. V nastavovacím registru je možné mimo rozsahu výstupních hodnot nastavit například povolení přesahu nastavených napěťových mezí, typ binárního zápisu záporných hodnot napětí u bipolárního rozsahu napětí, teplotní ochranu či aktivaci interní reference napětí. Konkrétní nastavení použité pro funkci Interface klimatické komory je definováno následující tabulkou:

Tabulka 7: Nastavení obvodu AD5761R

Napětí po vyčištění výstupního bufferu (CLEAR voltage)	Střední hodnota rozsahu
Povolení 5% přesahu	Nepovoleno
Bipolární rozsah	Přímý binární kód
Teplotní ochrana vypnutím (>150°C)	Povoleno
Vnitřní napěťová reference	Povoleno
Napětí při spuštění	Střední hodnota rozsahu
Výstupní rozsah napětí	-3V až 3V

Nastavení periferie probíhá v inicializační fázi programu. V hlavní smyčce programu poté probíhá na žádost PC, či fáze cyklu, zápis aktuální hodnoty napětí a následná aktivace výstupu. Nastavené výstupní napětí je definováno podle vzorce:

$$V_{OUT} = V_{REF} \times \left[ \left( m \times \frac{D}{65536} \right) - c \right], \quad (3.1)$$

kde  $V_{OUT}$  je výstupní napětí,  $V_{REF}$  je referenční napětí,  $D$  je dekadický ekvivalent hodnoty zapsané do registru DAC. Konstanty  $m$  a  $c$  jsou definovány podle nastaveného rozsahu výstupních hodnot. Pro rozsah  $\pm 3V$  jsou to hodnoty  $m=2,4$  a  $c=1,2$ .

Pro aktivování výstupu slouží pin  $\overline{\text{LADC}}$ , který je připojen jako GPIO pin. Pro aktivaci je nutné nastavit jej na logickou hodnotu 0. Aktivaci výstupu lze provádět i pomocí softwarové aktivace výstupního registru.

### 3.2.2 Ovládání obvodu CS5505

Obvod CS5505 obsahuje sériové rozhraní, které je odvozené ze standardu SPI. Avšak umožňuje pouze vyčítat měřené hodnoty. Pro nastavení jednotlivých operací slouží několik vstupních pinů (viz. Obrázek 6 a Obrázek 7). Do procesoru jsou připojeny piny CAL – soužící pro kalibraci, M/SLP – sloužící pro volbu hodin signálu SCLK, CONV-sloužící pro potvrzení kalibrace a piny A0,A1 – sloužící pro nastavení vstupního multiplexoru.

Po připojení napájení převodník CS5505 inicializuje probouzení, které trvá 1800 hodinových cyklů. Následně pokud je pin CAL a CONV aktivní (logická úroveň 1) přejde do stavu kalibrace, která trvá 3246 hodinových cyklů a následně přejde do stavu připravenosti. Po aktivaci pinu CONV obvod zahájí konverzi analogové hodnoty napětí. Konvertovaný vstup se volí pomocí nastavovacích pinů A0 a A1, které řídí vstupní multiplexor. Stav A0 a A1 jsou pro jednotlivé vstupy zaznamenány v Tabulka 4. Po dokončení konverze, které trvá 1622 hodinových cyklů, přejde pin  $\overline{\text{DRDY}}$  do logické úrovně 0, čímž inicializuje, že byl aktualizován sériový registr.

Vyčítání aktuální hodnoty může probíhat ve dvou módech, které se liší použitím vnitřních či externích hodin sériové linky. Volba módu probíhá pomocí pinu M/SLP. Pokud je pin M/SLP připojen na digitální zemi, je zvolen mód, který pro komunikaci využívá externí časování sběrnice.

Vyčítaná hodnota napětí je 16 bitová. Její rozmezí se pohybuje v bipolárním módu od hodnoty  $-V_{\text{REF}}$  po  $+V_{\text{REF}}$ , což je v tomto konkrétním případě  $\pm 2,5\text{V}$ . Rozlišení měřené hodnoty při 16 bitech je pro 1 LSB 76mV.

## 3.3 USB

Sběrnice USB slouží spolu se sběrnici ethernet ke komunikaci zařízení s počítačem. Hardwarově je sběrnice připojena přímo k portu na procesoru. Pro komunikaci s počítačem je zvolena funkce USB, jako CDC Com port zařízení, na které je připojena systémová konzole procesoru, která obsahuje předem definované příkazy pro možnost ovládání karty bez obslužné aplikace.

Tabulka 8: Konzolové příkazy měřicí aplikace

<b>Příkaz:</b>	<b>Příklad použití</b>	<b>Funkce:</b>
help	help	Vypíše nápovědu
set_temp	set_temp 20.5	Nastaví teplotu na výstup (v °C, desetinná tečka)
set_temp_cyklus	set_temp_cyklus -20 30	Přidá měřicí cyklus (teplota v °C, čas v minutách, desetinná tečka)
read_temp	read_temp	Vypíše aktuální stav teplot
set_out	set_out RE1	Aktivuje výstup (RE1-3, LED1-2)

clear_out	clear_out RE1	Deaktivuje výstup (RE1-3, LED1-2)
start	start	Spustí měření
start_cyklus	start_cyklus	Spustí předem nastavený měřicí cyklus
stop	stop	Zastaví měření
reset_karta	reset_karta	Provede vyresetování karty (zastaví měření a vyčistí nastavené cykly)
run_time	run_time	Vypíše dobu spuštění karty

Tabulka 8 obsahuje pouze základní příkazy pro práci s Interface klimatické komory, které jsou uživatelsky využitelné při přístupu bez obslužné aplikace. Zařízení dále obsahuje integrované příkazy pro práci s periferií ethernet, je tedy možné pomocí konzole například nastavit jinou IP adresu zařízení. Základní příkazy pro práci s ethernetem obsahuje následující tabulka:

Tabulka 9: Základní příkazy TCPIP

<b>Příkaz:</b>	<b>Příklad použití</b>	<b>Funkce:</b>
help tcpip	help tcpip	Vypíše nabídku nápovědy pro ethernet
netinfo	netinfo	Vypíše informace o parametrech připojení
setip	setip PIC32INT 192.168.0.8 255.255.255.0	Změní IP adresu zařízení (zvolený interface, IP adresa, maska)

USB CDC Com port má následující vlastnosti:

- komunikační rychlost: 9600 baud,
- parita: ne,
- datová délka: 8 bit,
- počet stop bitů: 1 bit.

Je tedy možné se k Interface klimatické komory jednoduše připojit například pomocí volně dostupného programu PuTTY.

### 3.4 Ethernet

Sběrnice ethernet co do složitosti programu pro obsluhu předčí všechny předešlé periferie a byla hlavním důvodem, proč jsou pro tvorbu programu použity knihovny a konfigurátor MPLAB Harmony. Pomocí Harmony je možné jednoduše nastavit a inicializovat komunikaci s čipem fyzické vrstvy, který dále samostatně zpracovává data a komunikaci po síti. Pro správnou funkci periferie je nezbytné nakonfigurovat nejdříve interní radič ethernetu a nakonfigurovat externí fyzickou vrstvu na použitý typ DP83848. Po té je nutné nakonfigurovat vlastní obslužné knihovny obsažené v Harmony pro TCPIP. Zde je zapotřebí nastavit vhodnou IP adresu (v defaultní konfiguraci jde o IPv4: 192.168.1.10 s maskou 255.255.255.0) a připojení k síti, povolit UDP a TCP/IP příkazy pro systémovou konzoli, kterou obsluhuje USB. Po správném nastavení konfigurátoru MPLAB Harmony je samotná obsluha periferie relativně jednoduchá.

Pro potřeby komunikace pomocí ethernetu je zvolen způsob komunikace přes UDP pakety, které mají pevně danou strukturu pro data přijaté:

```
typedef struct
{
    float        teplota;
    uint16_t     doba;
}protokol_read_data;

typedef enum
{
    rekni_data           =0x01,
    nastav_teplotu      =0x02,
    nastav_teplotu_cyklu =0x03,
    spust_mereni        =0x04,
    spust_cyklus         =0x05,
    zastav_mereni       =0x06,
    reset_dat           =0xff
}protokol_prikaz;

typedef struct
{
    protokol_prikaz      typ;
    protokol_read_data   temp;
}Prijata_data_protokol;
```

obdobně tak pro data odeslané:

```
typedef struct
{
    float        set_temp;
    float        actual_temp;
    uint16_t     posledni_cyklus;
    uint16_t     aktualni_cyklus;
    uint8_t      informace;
                //0,0,0,0,0,Spusteno_cyklus,spusteno,dokonceno
}protokol_send_data;

typedef enum
{
    nic           =0x00,
    posli_data    =0x10,
    prikaz_prijat =0x20,
    prikaz_chyba  =0xf0
}protokol_prikaz_answer;

typedef struct
{
    protokol_prikaz_answer typ;
    protokol_send_data     temp;
}Odesilane_data_protokol;
```

Tyto struktury jsou poté transformovány na bytová pole, které jsou odesílány a přijímány pomocí UDP paketů. Komunikace s Interface klimatické komory probíhá takovým způsobem, že program vyčkává na příchozí komunikaci, která se ukládá do výše definované struktury a po přijetí se předává ke zpracování. Zpracování probíhá



pomocí vyhodnocení příkazu dle definice enum `protokol_prikaz`, zde se zároveň generuje odpověď, která se předá zpět programu. V případě, že program nevyžaduje navrácení dat, nejsou tyto data odeslány, ale pro udržení soudržnosti a délky datového paketu jsou místo datových hodnot do odpovědi dosazeny nuly. Při komunikaci je nezbytné hlídat, zda je komunikace korektně otevřena.

```
switch (ServerState)
{
    case SERVER_STATE_OPENING_SERVERS:
    {
        serverSocket=TCPIP_UDP_ServerOpen(IP_ADDRESS_TYPE_IPV4,60001,0);
        if (serverSocket != INVALID_SOCKET)
            ServerState = SERVER_STATE_CONNECTING_SERVERS;
        break;}
    case SERVER_STATE_CONNECTING_SERVERS:
    {
        if (TCPIP_UDP_IsConnected(serverSocket))
            ServerState = SERVER_STATE_SERVING_CONNECTION;
        break;}
    case SERVER_STATE_SERVING_CONNECTION:
    {
        if(TCPIP_UDP_GetIsReady(serverSocket)!=0)
        {
            int rxd = TCPIP_UDP_ArrayGet(serverSocket, (uint8_t*)
                &prijate, sizeof(prijate));
            odeslat = Proved_prikaz(&prijate, rxd);
            TCPIP_UDP_Discard(serverSocket);
            if (!TCPIP_UDP_PutIsReady(serverSocket) == 0)
            {
                TCPIP_UDP_ArrayPut(serverSocket, (uint8_t*)&odeslat,
                    sizeof(odeslat));
                TCPIP_UDP_Flush(serverSocket);
            }
        }
        break;}
}
```

Na výše uvedeném příkladu kódu je část cyklu starajícího se o příjem a odeslání dat. Aplikace se nejdříve pokusí otevřít komunikaci na portu 60001. Poté dochází k ověření komunikace a následnému čekání na příchozí UDP paket, který je uložen do struktury. Tato přijatá struktura je vyhodnocena funkcí `Proved_prikaz`, která vygeneruje odpověď, která je odeslána opět ve formě bytového pole.

Defaultní nastavení ethernetového portu:

- IP Adresa: 192.168.1.10,
- maska sítě: 255.255.255.0,
- komunikační UDP port: 60001.

### 3.5 Hlavní smyčka programu

Hlavní struktura programu je díky použití MPLAB Harmony řešena z velké části jako neblokující vyčkávající na povolení obsluhy dané periferie nebo přerušení. Její rozdělení je na inicializační část, která probíhá po startu a při které jsou nastaveny všechny komunikační periferie, GPIO piny a je řádně nakonfigurován DA převodník. Jakmile proběhne inicializační část, program skončí v hlavní smyčce programu.

V hlavní smyčce programu probíhají následující funkce:

- volání funkce pro příjem a vyhodnocení UDP paketu,
- vyčítání dat AD převodníku (každých 400ms pro jednotlivý kanál),
- zápis dat do DA převodníku,
- spouštění a zastavování měření,
- kontrola probíhajícího cyklu,
- vyhodnocení teplotní odchylky pro cyklické měření.

Všechny funkce, které neprobíhají každý cyklus, vyčkávají na svou aktivaci, která probíhá pomocí vnitřních logických proměnných.

## 4 SOFTWARE PRO PC

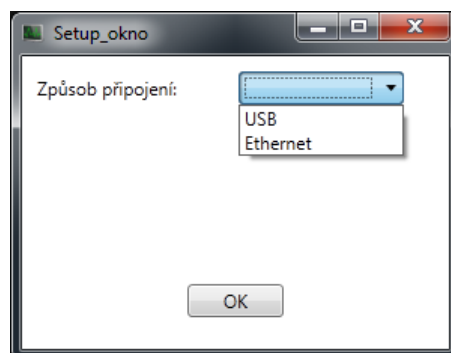
Vhodný obslužný program je, co se týká funkčnosti, neméně důležitá součást tvorby Interface klimatické komory. Musí splňovat požadavky na jednoduchou obsluhu personálem, který nezná detaily o komunikaci a hardwaru celého produktu.

Pro vývoj tohoto softwaru byl zvolen vývojový nástroj Microsoft Visual Studio 2015. Vzhledem k mým nulovým zkušenostem s vývojem aplikací pro PC jsem po prostudování dostupných materiálů a konzultaci s kolegou zvolil práci s aplikací typu WPF (Windows Presentation Foundation). Jedná se o aplikaci pro tvorbu grafické rozhraní, jenž je součástí knihoven C# .NET, tedy nástupce staršího Windows Forms. Aplikace pracuje s verzí .NET frameworku 4.5.2, je tedy nutné jej mít nainstalovaný aby bylo možné spustit aplikaci.

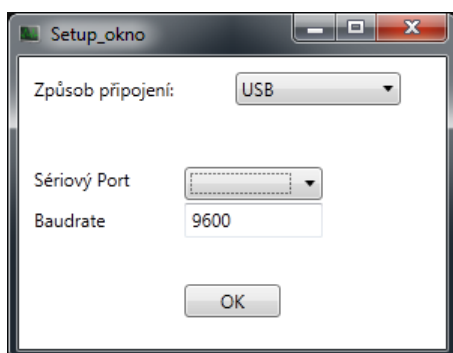
Cílem pro tvorbu obslužné aplikace bylo vytvořit jednoduchou a přitom plně funkční aplikaci. Proto aplikace obsahuje jedno hlavní obslužné okno s možností vyvolání okna nastavení, zobrazení grafu a export dat.

### 4.1 Okno nastavení připojení

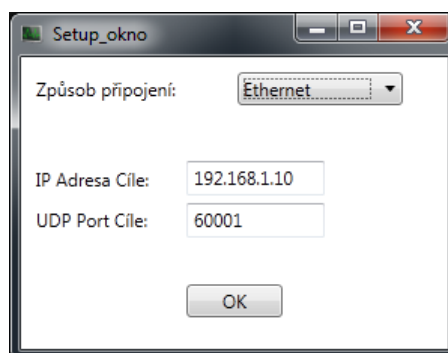
Po spuštění aplikace se uživateli jako první zobrazí okno, které jej vyzve ke zvolení komunikační periferie. Aplikace pro komunikaci s Interface klimatické komory vyžaduje zvolení aktuálně používané periferie s vhodnými parametry. Jakmile dojde ke zvolení vhodné periferie, zobrazí se v okně (Obrázek 16) další možnosti nastavení pro danou periferii. Pro periferii USB (Obrázek 17) se zobrazí volba rychlosti komunikace a zvolení správného sériového portu, který musí být po připojení k zařízení pomocí USB vygenerován. V případě, že počítač neobsahuje sériové porty, tak program vypíše chybové hlášení. Nastavení periferie Ethernet (Obrázek 18) vyžaduje správné nastavení IP adresy a komunikačního UDP Portu. Všechny hodnoty jsou defaultně předvyplněné dle defaultních hodnot používaných zařízením.



Obrázek 16: Volba komunikační periferie



Obrázek 17: Nastavení USB

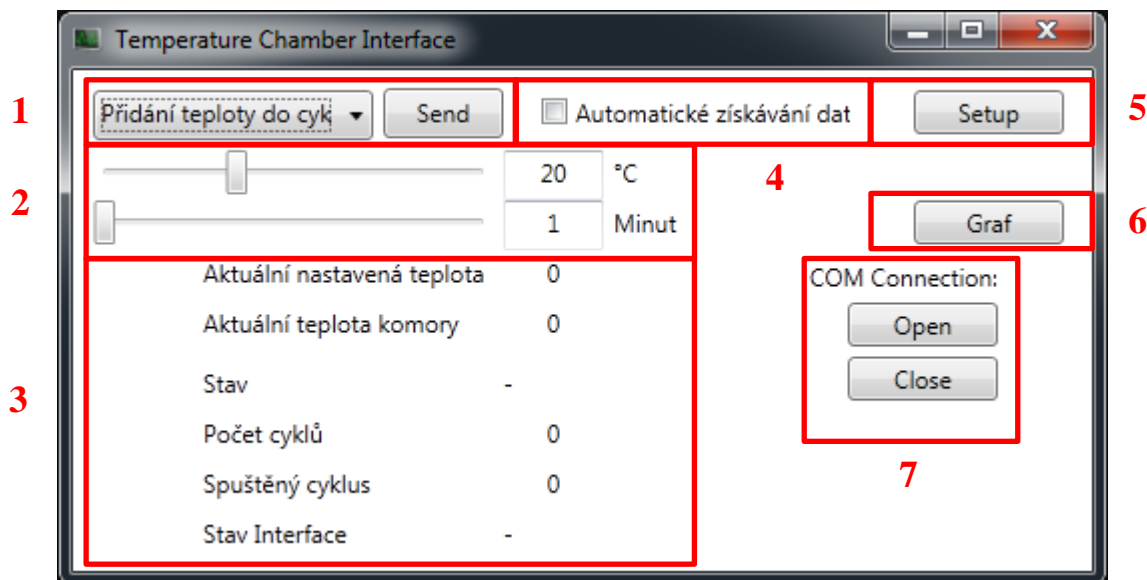


Obrázek 18: Nastavení Ethernet

Nabídku nastavení je možné zavřít stisknutím tlačítka OK, které aktivuje hlavní okno. Pokud bylo nastavení provedeno chybně či neúplně, nebude možné komunikovat. Okno nastavení je kdykoli dostupné z hlavního okna aplikace pomocí stisknutí tlačítka *Setup* (Obrázek 19 => 5). Aplikace umožňuje změnu komunikační periferie za běhu programu bez přerušení měřicího cyklu.

## 4.2 Hlavní okno

Hlavní okno (Obrázek 19) je pomyslným mozkiem celé aplikace. Na jeho pozadí probíhá zpracování všech příkazů a vyhodnocení změřených hodnot.



Obrázek 19: Hlavní okno aplikace

Okno obsahuje několik hlavních ovládacích prvků, které jsou rozebrány v následujících kapitolách. Všechny hlavní prvky jsou vždy přítomny pro ovládání zařízení. Pouze nastavení teploty a času (Obrázek 19 => 2) a ovládání COM portu (Obrázek 19 => 7) bývají skryté a zobrazují se pouze v případě, že je uživatel potřebuje

v případech, kdy nastavuje teplotu a čas, nebo používá připojení pomocí USB, kdy je nutné ručně toto připojení otevřít.

### 4.2.1 Nabídka příkazů

Základní funkcí hlavního okna je komunikace s klimatickou komorou. K tomu slouží nabídka příkazů (Obrázek 19 => 1), která obsahuje příkazy pro komunikaci se zařízením a jeho nastavení:

- Získání dat,
- Nastavení teploty,
- Přidání teploty do cyklu,
- Spustit měření,
- Spustit měřicí cyklus,
- Zastav měření,
- Reset.

#### ***Získání dat***

Při volbě získání dat zůstává skrytá nabídka nastavení teploty a času měření (Obrázek 19 => 2). Příkaz se potvrdí stisknutím tlačítka *Send*. Pro jeho korektní vykonání musí být správně nastavena komunikace a v případě zvolení USB musí být otevřený komunikační port pomocí tlačítka *Open* (Obrázek 19 => 7). Jakmile je příkaz vykonán a přijata odpověď tak se aktualizují hodnoty informací o stavu napětí a měření (Obrázek 19 => 3). Potvrzení korektního přijetí je signalizováno změnou položky *Stav* na hodnotu *Data přijaty*.

#### ***Nastavení teploty***

Nastavení teploty probíhá pomocí textového boxu a posuvníku (Obrázek 19 => 2), který se při zvolení příkazu *Nastavení teploty* zobrazí. Při potvrzení tlačítkem *Send* proběhne okamžité odeslání teploty, která se přímo zapíše na výstup teplotní komory. Potvrzení přijetí příkazu probíhá změnou položky *Stav* (Obrázek 19 => 3) na hodnotu *Příkaz přijat*.

#### ***Přidání teploty do cyklu***

Oproti nastavení teploty se při zvolení příkazu *Přidání teploty do cyklu* zobrazí i druhý posuvník s textovým boxem (Obrázek 19 => 2), který umožňuje nastavení doby setrvání klimatické komory na nastavené teplotě. Při potvrzení se požadovaná teplota přidá do bufferu měření, který bude proveden při spuštění měřicího cyklu. Potvrzení přijetí příkazu probíhá změnou položky *Stav* (Obrázek 19 => 3) na hodnotu *Příkaz přijat* a změnou hodnoty *Počet cyklů* na aktuální hodnotu signalizující počet zapsaných cyklů měření.

#### ***Spustit měření***

Příkaz *Spustit měření* provede pouze aktivaci klimatické komory. Předpokladem správné funkce je předem nastavená teplota měření pomocí příkazu *Nastavení teploty*. Potvrzení přijetí příkazu probíhá změnou položky *Stav* (Obrázek 19 => 3) na hodnotu *Spusteno*.

#### ***Spustit měřicí cyklus***

Spuštění měřicího cyklu se provádí pomocí příkazu *Spustit měřicí cyklus*. Příkaz spustí

měření, kdy se provede postupné nastavení všech dříve zapsaných měřících cyklů. Doba měření se začne odčítat až při dosažení požadované teploty. Potvrzení přijetí příkazu probíhá změnou položky *Stav* (Obrázek 19 => 3) na hodnotu *Spusteno-cyklus*.

### ***Zastav měření***

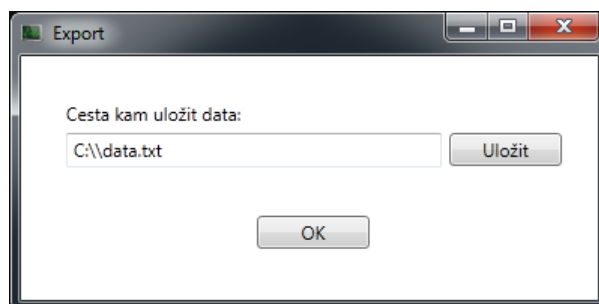
Zastavení měření provede pouze deaktivaci klimatické komory. Na jejím vstupu stále zůstávají nastavení předchozí teploty. Potvrzení přijetí příkazu probíhá změnou položky *Stav* (Obrázek 19 => 3) na hodnotu *Prikaz prijat*.

### ***Reset***

V případě aktivace příkazu *Reset* proběhne deaktivace všech měřících cyklů, teplota komory se nastaví na 20°C a proběhne odstranění všech dříve zadaných měřících cyklů. Potvrzení přijetí příkazu probíhá změnou položky *Stav* (Obrázek 19 => 3) na hodnotu *Prikaz prijat*.

## **4.2.2 Automatické získávání dat a export dat**

Automatické získávání dat (Obrázek 19 => 4) povoluje cyklickou žádost o data, která se spouští jednou za sekundu. Tyto data se ukládají do interní paměti a slouží pro vykreslení grafu. Tyto data je možné následně exportovat do formátovaného textového souboru (dole Obrázek 20). Export se spouští po ukončení záznamu dat či manuálně z okna grafu.



Obrázek 20: Export dat

Změřené data je možné dále zpracovat pomocí dalších analytických programů jako je například Microsoft Excel, či Matlab. Formát dat je přesně definován, kdy obsahuje hlavičku s informacemi o měření a následně definovaně formátované data:

```
Záznam Temperature Chamber Interface měření  
Datum a čas pořizení: 29.4.2017 14:22:23
```

```
Pozice Nastavena Zmerena
```

```
0 20,6 22,9  
1 20,7 22,9  
2 20,6 22,9  
3 20,6 22,8  
4 41,9 22,9  
5 41,9 22,9  
6 41,9 22,9  
7 41,9 24,8  
8 41,9 29,1  
9 41,9 31,6
```

```
10 41,9 33,2
11 42,0 35,2
12 42,0 36,3
13 41,9 37,8
14 41,9 38,9
15 41,9 40,4
16 42,0 41,2
17 41,9 41,5
18 41,9 41,8
19 41,9 41,9
20 41,9 41,7
```

---Konec záznamu---

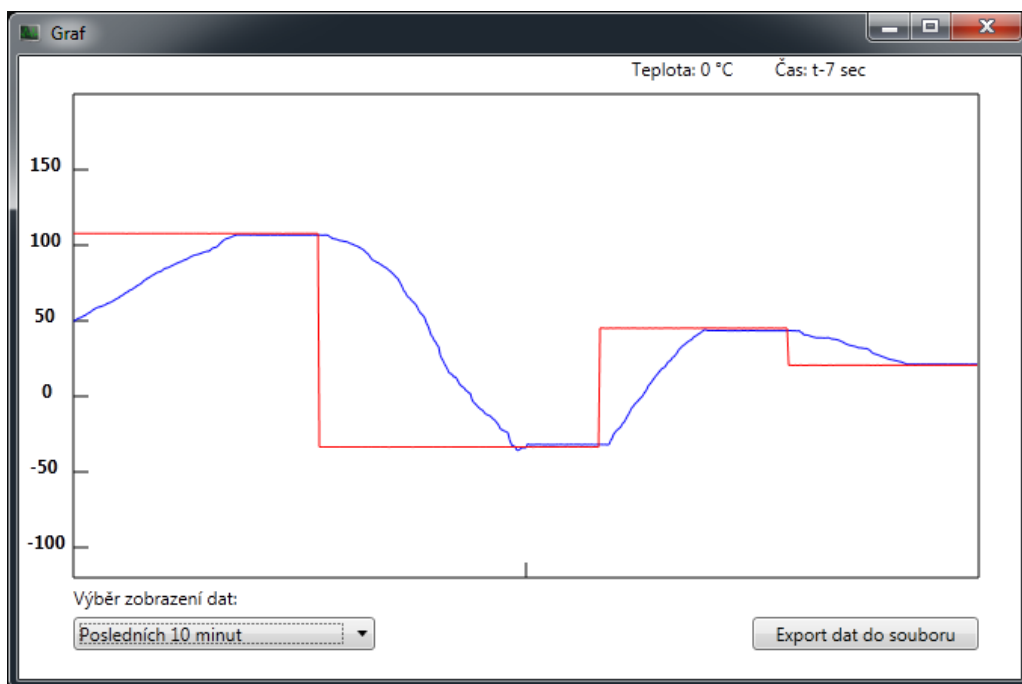
kde *Pozice* odpovídá času měření v sekundách, *Nastavena* reprezentuje hodnotu teploty nastavené ve °C a *Zmerena* dává informaci o teplotě ve °C, která byla v tom okamžiku změřeni opravu přítomná v komoře. Jednotlivé data jsou na zvláštním řádku a jsou odděleny mezerou.

### 4.3 Okno graf

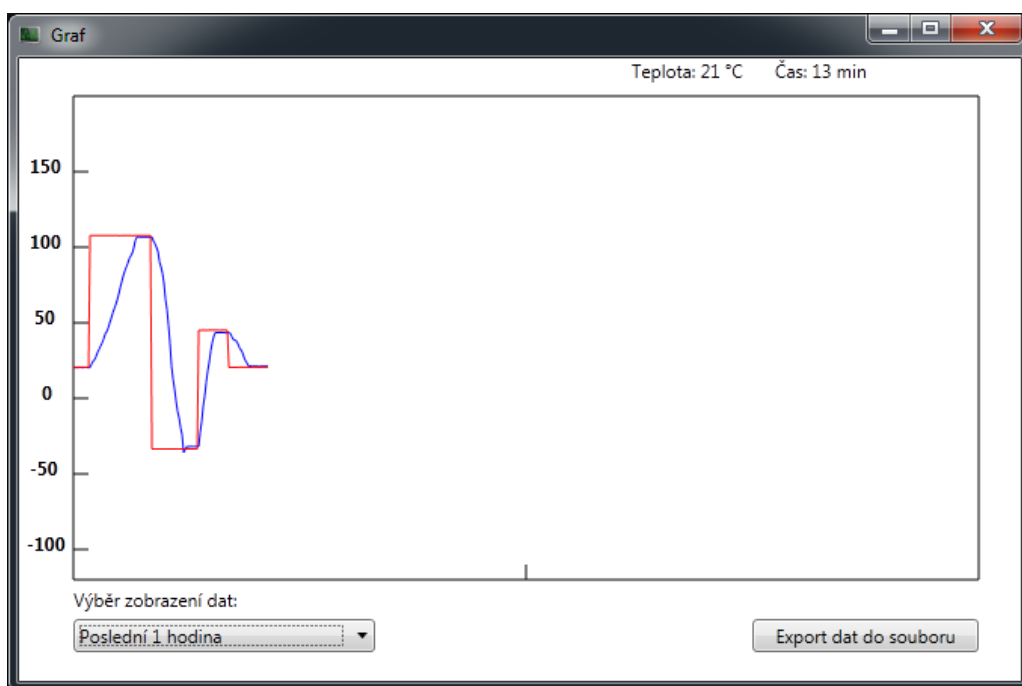
Okno grafu se spouští kliknutím na tlačítko *Graf* (Obrázek 19 => 6). Tento požadavek vyvolá nové okno, které slouží k zobrazení grafu. Pro zobrazení požadovaného grafu je nutné nejprve zvolit požadovaný graf z nabídky:

- Posledních 10minut,
- Poslední hodina,
- Posledních 10 hodin,
- Poslední den

Graf (Obrázek 21) se sám aktualizuje a postupně posouvá, aby zobrazoval pouze poslední platné hodnoty, které jsou průběžně měřeny. V případě, že není k dispozici dostatek dat k vyplnění celého grafu, je graf (Obrázek 22) ve fázi postupného nabývání a po doplnění potřebných dat přejde do fáze postupného odsunu starých hodnot.



Obrázek 21: Zobrazení grafu pro posledních 10 minut měření (použit simulační přípravek - 5.1)



Obrázek 22: Zobrazení grafu pro poslední hodinu měření (použit simulační přípravek - 5.1)

Vpravo nahoře nad obrazovaným grafem (Obrázek 21, Obrázek 22) se zobrazuje hodnota teploty a času, která odpovídá místu nad kterým je umístěn ukazatel polohy myši. Data o času odpovídají aktuálně zobrazovanému grafu. Pokud již graf dosáhl naplnění, přestávají se zobrazovat absolutní hodnoty času, ale čas je zobrazován ve formátu t-x, kde x je rozdíl času od času aktuálního.



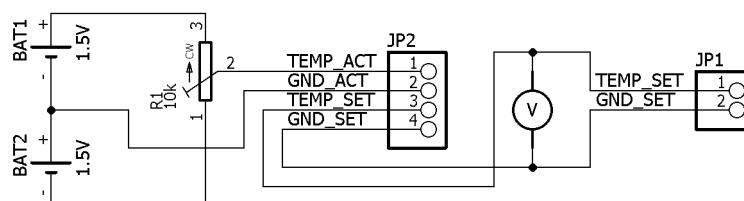
Pomocí tlačítka *Export dat do souboru* se vyvolá nabídka nabízející uložení dat do souboru (viz. 4.2.2, Obrázek 20).

## 5 TEST A OVĚŘENÍ FUNKCE

V průběhu vývoje programu a k ověřování základních funkcí periférií zřízení nebylo nejvhodnější připojovat neověřené zařízení přímo ke klimatické komoře. Z tohoto důvodu byl pro prvotní ověření využit simulační přípravek.

### 5.1 Simulační přípravek

Jedná se o přípravek, který simuluje základní vlastnosti komory a sloužil pro prvotní nastavení funkcí firmwaru pro Interface klimatické komory a počítačového softwaru pro řízení testu.



Obrázek 23: Simulační přípravek

Pomocí přípravku (Obrázek 23) bylo možné simulovat analogový výstup klimatické komory (Tabulka 2: Zapojení analogového konektoru klimatické komory), který udává a nastavuje teplotu pro teplotní zkoušku.

### 5.2 Ověření funkce s klimatickou komorou

Po odladění funkce firmwaru a softwaru na simulačním přípravku, bylo zapotřebí ověřit správnost funkce zařízení s připojenou klimatickou komorou.

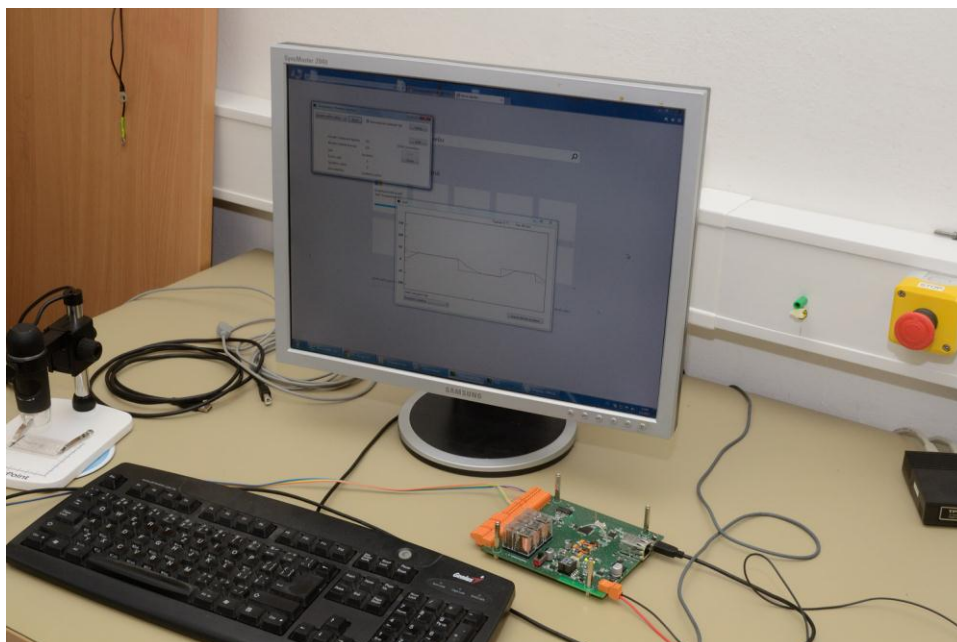
Interface klimatické komory byl pro ověření připojen k analogovému konektoru X36 umístěném na klimatické komoře. Spuštění komory bylo pro ověření zvoleno jako manuální, kdy proběhlo spuštění pomocí tlačítka S1. Toto tlačítko je posléze připojeno k relátku RE1, které spíná cyklus.

Na následujících fotkách a obrázcích (Obrázek 24, Obrázek 25, Obrázek 26, Obrázek 27, Obrázek 28) je zaznamenán průběh a ověření základní funkce Interface klimatické komory.

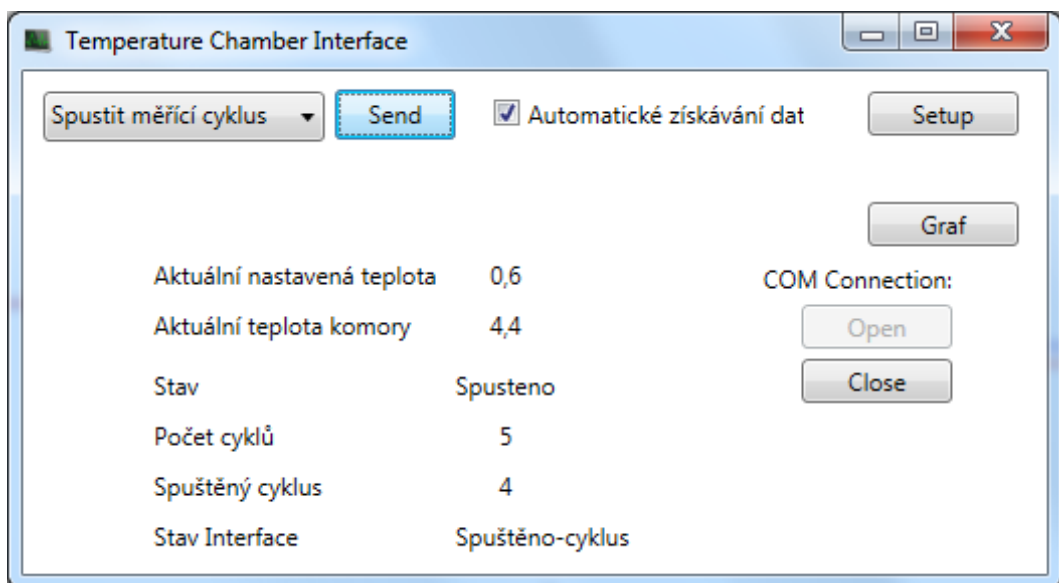


Obrázek 24: Aktivní klimatická komora

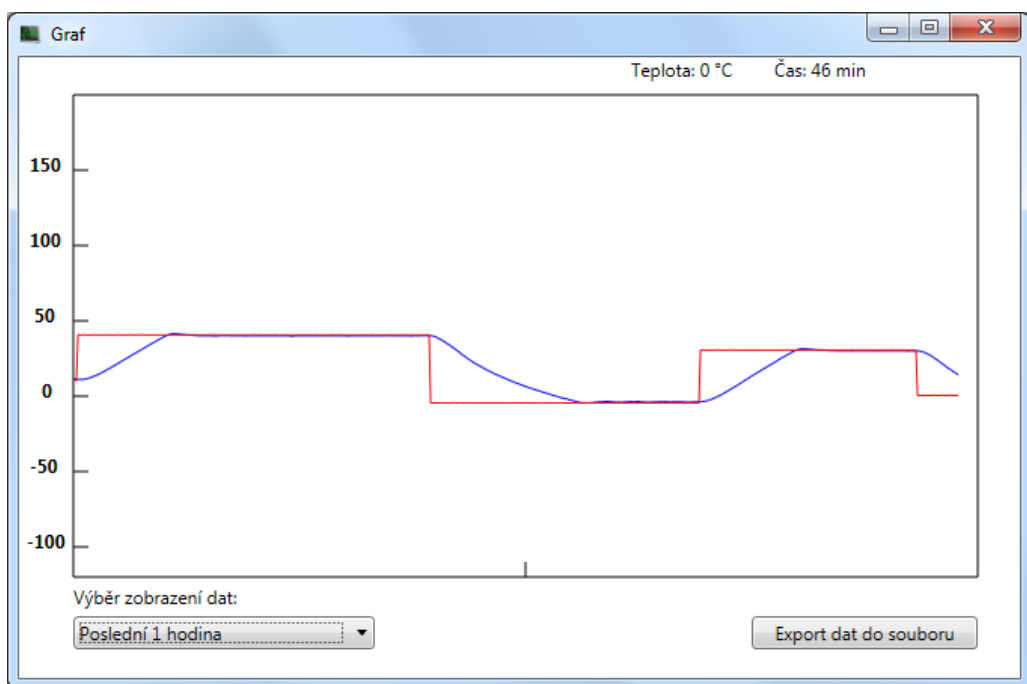
Interface klimatické komory byl v tomto případě připojen k počítači pomocí USB portu. Na následující fotografii je vidět aktivované zařízení se spuštěným řídicím programem, který zaznamenává testovanou sekvenci a zobrazuje grafický výstup pro poslední hodinu měření.



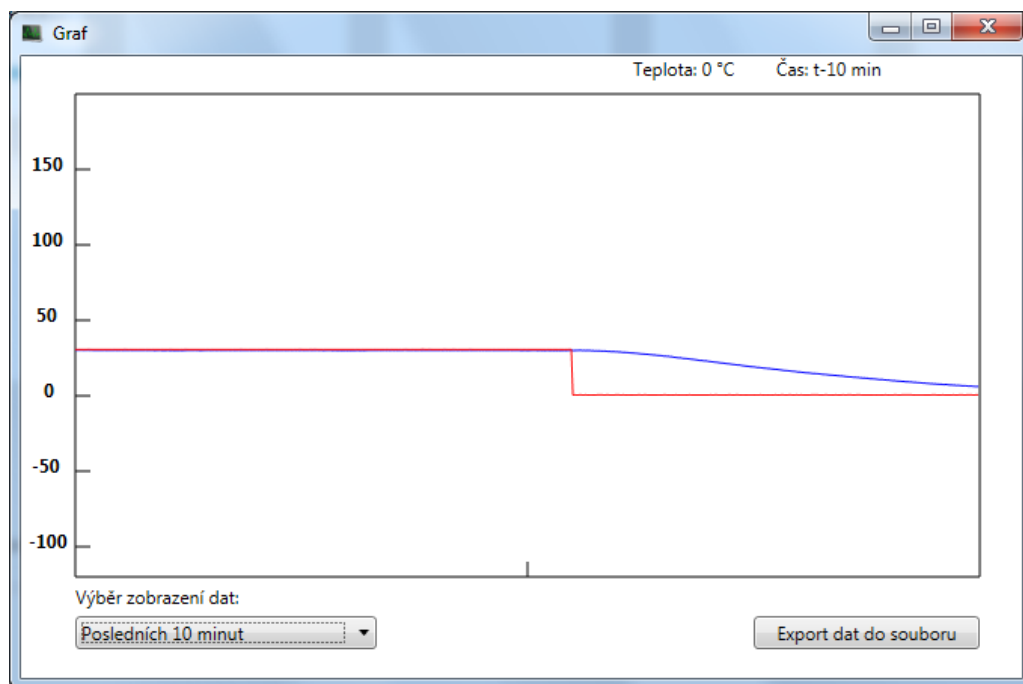
Obrázek 25: Interface klimatické komory komunikující s komorou a s PC po USB



Obrázek 26: Hlavní okno při spuštěném měření

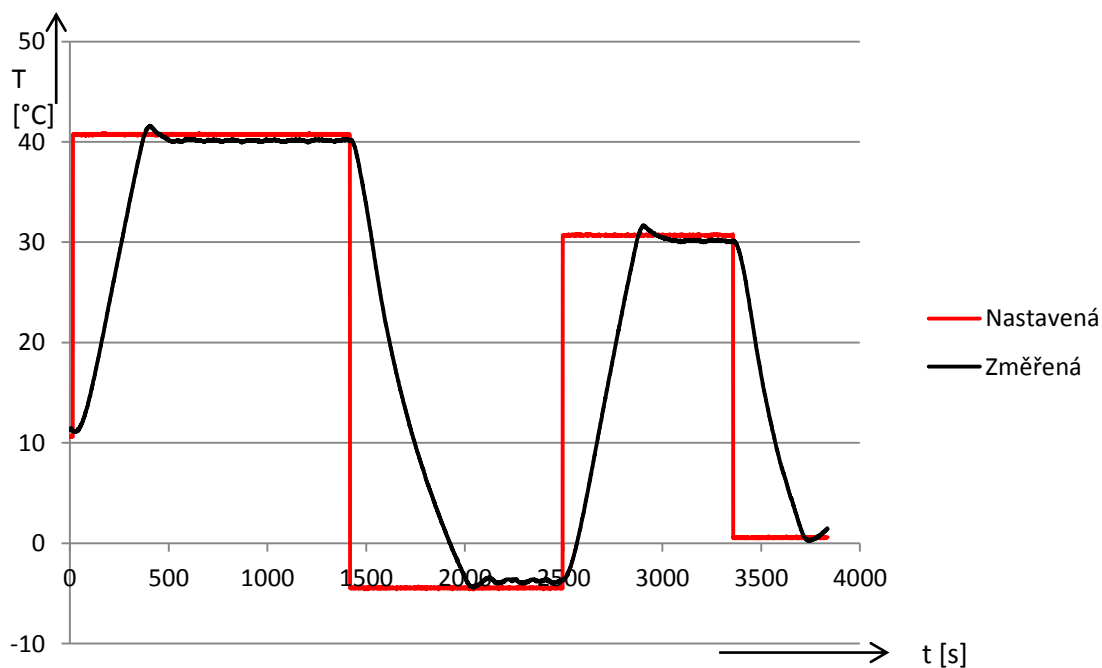


Obrázek 27: Graf poslední hodiny testovacího měření



Obrázek 28: Graf posledních 10 minut testovacího měření

Z měření byl proveden export dat, která byla následně zpracována pomocí MS Office Excel, kdy můžeme vidět porovnání grafu vytvořeného obslužným softwarem (Obrázek 27) a grafu vygenerovaného z exportovaných dat (Obrázek 29). Na podrobnějším grafu lze vidět mírnou odchylku teploty nastavené od měřené. Tato odchylka je způsobena nekorektním měřením nastavené teploty, kdy nebyla měřena na vstupu komory ale na výstupu karty.



Obrázek 29: Zpracované exportované data z měření pomocí grafu v MS Office Excel

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvoření elektronického interface pro počítačové řízení klimatické komory Heraeus a základního obslužného softwaru pro toto zařízení.

Samotné zařízení je schopno komunikovat s klimatickou komorou pomocí analogového ovládacího portu na konektoru X36 a spínacích relé. Tyto relé po připojení k vnitřní elektronice komory řídí spouštění měření. Pro generování analogového napěťového signálu na konektoru X36 bylo zařízení osazeno integrovaný DA převodník AD5761R a pro snímání přijatých analogových hodnot byl zvolen AD převodník CS5505. Komunikaci s počítačem obsluhuje zařízení díky portům USB, který umožňuje ovládání zařízení i bez obslužného softwaru pomocí textové konzole, a Ethernet, který umožňuje vzdálené připojení i více klientů. Ethernet může zastávat při připojení PoE zdroje i funkci napájecí. Samotné zařízení disponuje i několika nepoužitými výstupy pro případné rozšiřující ovládacích funkcí klimatické komory (např. aktivace rosného bodu).

Pro ovládání teplotní zkoušky je součástí práce obslužný software pro počítač, který umožňuje řídit teplotní zkoušku, zadávat teplotní cykly a zaznamenávat měřená data pro vykreslování grafů a jejich export k případnému dalšímu zpracování. Tento software umožňuje připojení jak pomocí USB, tak pomocí Ethernetu, mezi kterými můžeme i v průběhu měření přepínat.

# LITERATURA

- [1] Microchip's 32-bit Microcontrollers [online]. [cit. 2016 - 11 - 18]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/design-centers/32-bit>
- [2] CIRRUS LOGIC. *Very Low Power, 16-Bit and 20-Bit A/D Converter* [online]. F7. 2009 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: [https://www.cirrus.com/jp/pubs/proDatasheet/CS5505-06-07-08\\_F7.pdf](https://www.cirrus.com/jp/pubs/proDatasheet/CS5505-06-07-08_F7.pdf)
- [3] ANALOG DEVICES. *Multiple Range, 16-/12-Bit, Bipolar/Unipolar Voltage Output DACs with 2 ppm/°C Reference* [online]. Rev.B. 2016 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5761R\\_5721R.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5761R_5721R.pdf)
- [4] TPS23757: High Efficiency PoE Interface and DC/DC Controller. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TPS23757/technicaldocuments>
- [5] MPLAB® Harmony. In: *Microchip Developer Help* [online]. Microchip Technology, 2016 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://microchip.wikidot.com/harmony:start>
- [6] LIBERTY, J. *Naučte se C za 21 dní. 2., aktualiz. vyd. Překlad Josef Pojzl, Karel Voráček.* Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1583-1.
- [7] DP83848C/I/VYB/YB: QFP Single Port 10/100 Mb/s Ethernet Physical Layer Transceiver. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dp83848i.pdf>
- [8] *Okenní aplikace v C# .NET WPF.* itnetwork.cz - Ajtácká sociální síť a materiálová základna pro C#, Java, PHP, HTML, CSS, JavaScript a další. [online]. Copyright © 2017 itnetwork.cz. Veškerý obsah webu [cit. 29.04.2017]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/csharp/formulare/wpf>
- [9] *Introduction to WPF in Visual Studio 2015. Learn to Develop with Microsoft Developer Network | MSDN* [online]. Copyright © 2017 Microsoft [cit. 29.04.2017]. Dostupné z: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa970268\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa970268(v=vs.110).aspx)

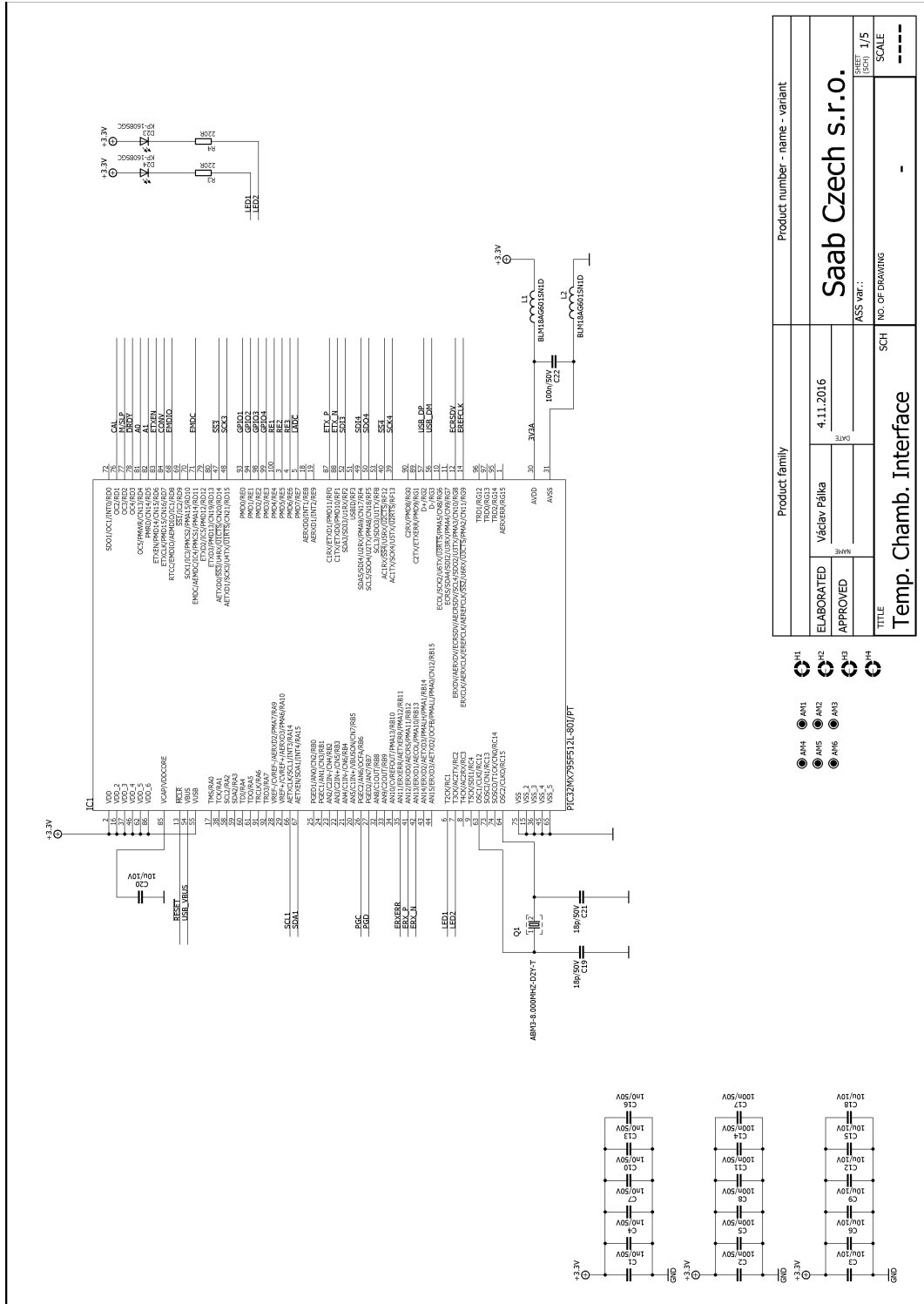
# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

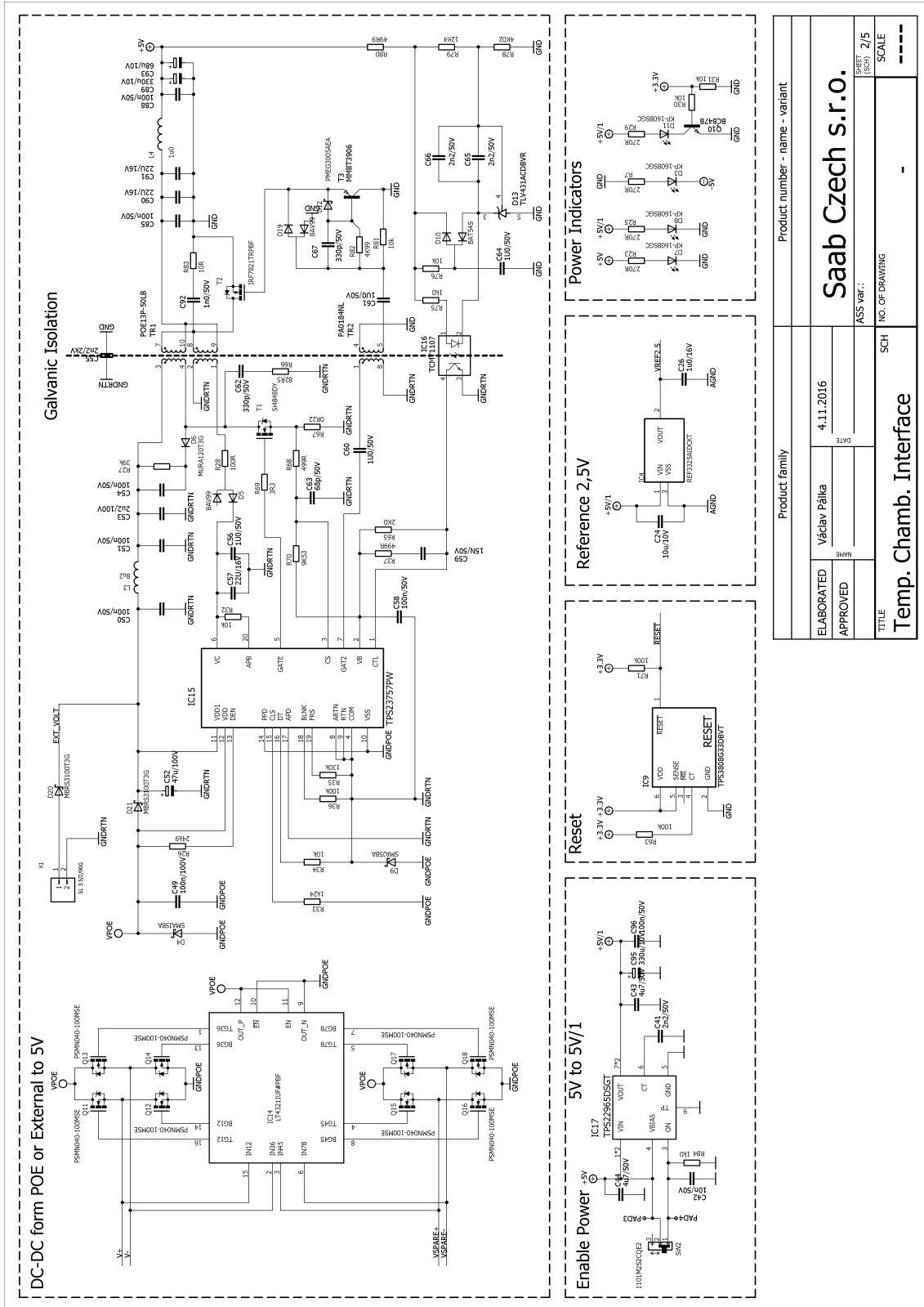
AD	Analogově digitální
CDC	Communications Device Class
DA	Digitálně analogový
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
ESD	Electro Static Discharge (Elektrostatický výboj)
GPIO	General-purpose input/output (Programovatelné vstupy/výstupy)
I2C	Inter-Integrated Circuit
LSB	Least Significant Bit (Nejméně významný bit)
MSB	Most Significant Bit (Nejvíce významný bit)
MII	Media Independent Interface
POE	Power Over Ethernet (Napájení po síti Ethernet)
PC	Personal Computer (Osobní počítač)
RMII	Reduced Media Independent Interface
SPI	Serial Peripheral Interface
USB	Universal Serial Bus.



# NÁVRH ZAŘÍZENÍ

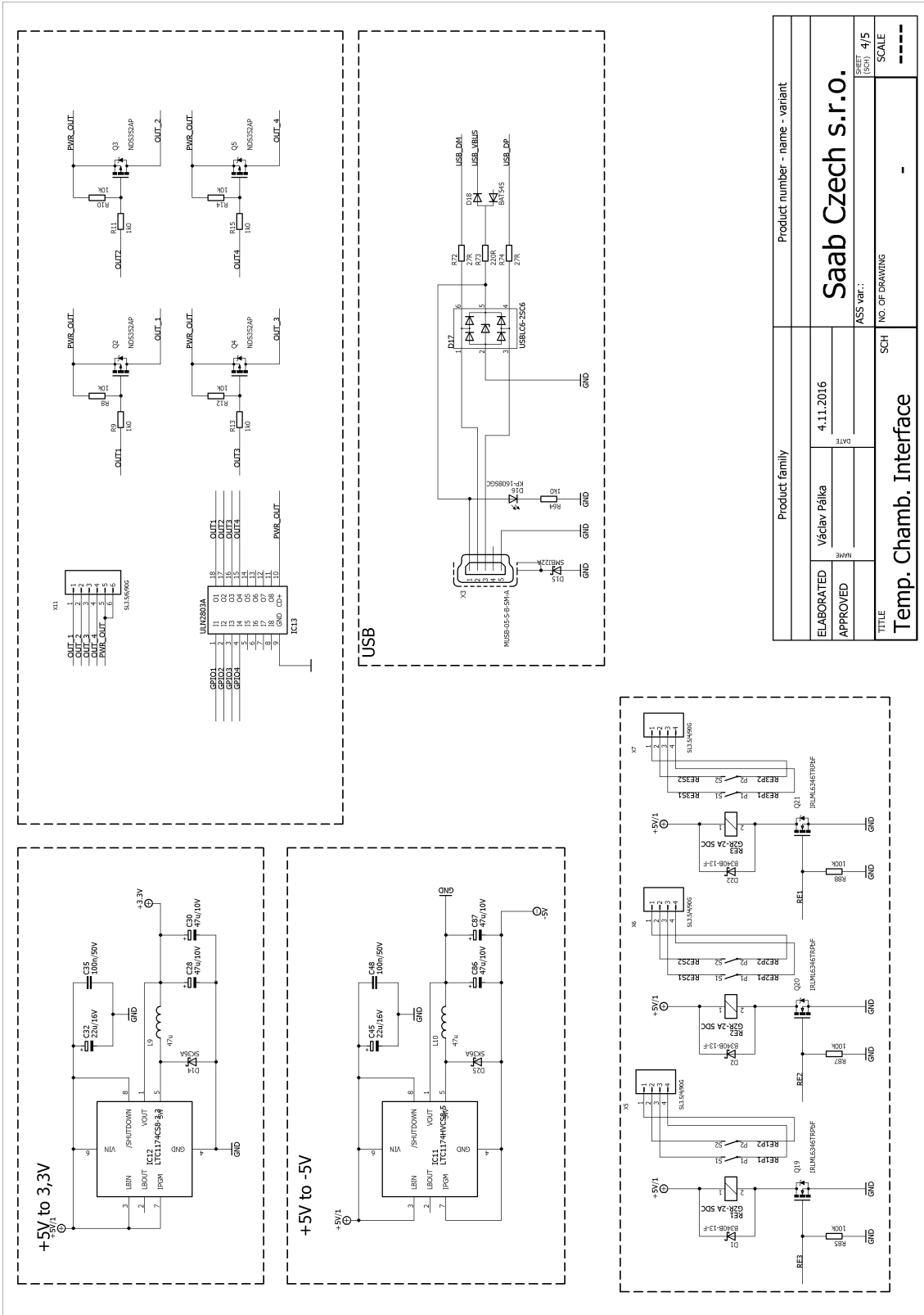
## Obvodové zapojení Interface klimatické komory





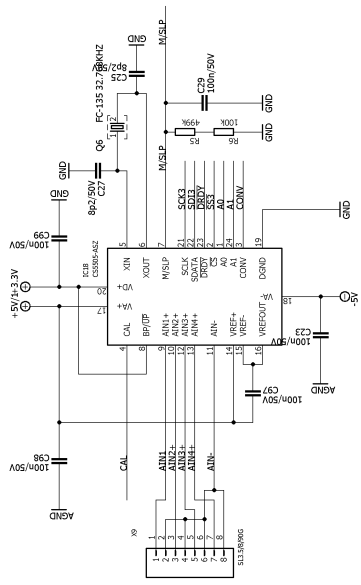
Product family		Product number - name - variant	
ELABORATED	Václav Pálka	DATE	4.11.2016
APPROVED		NO. OF DRAWING	SCH
TITLE	Temp. Chamb. Interface		
	ASS var.:	SHEET (SEP)	2/5
		SCALE	----



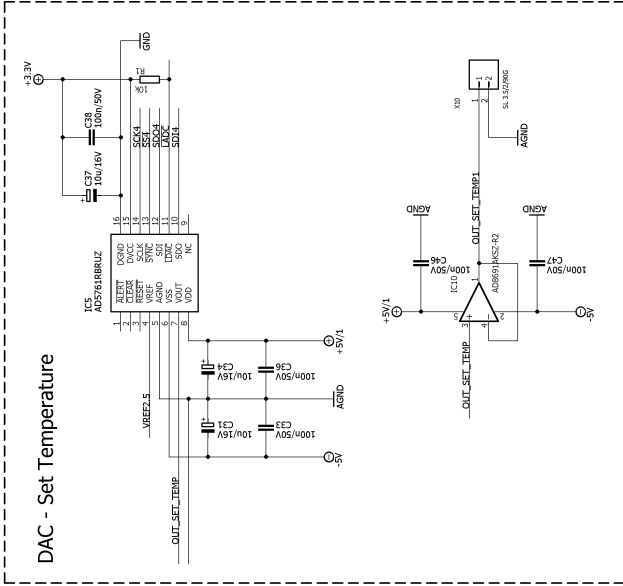


Product family		Product number - name - variant	
ELABORATED	Václav Pálka	DATE	4.11.2016
APPROVED		ASS var.:	4/5
TITLE	Temp. Chamb. Interface	SCH	NO. OF DRAWING
			SCALE
			----

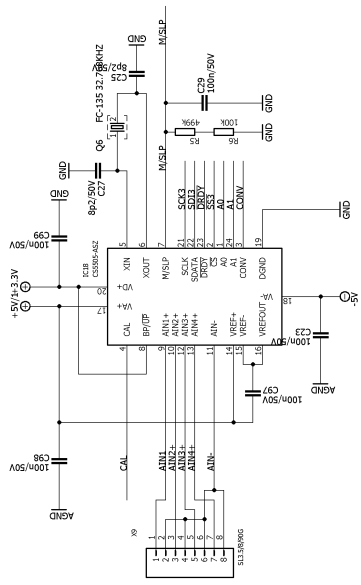
ADC - Actual Temperature



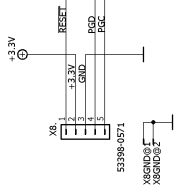
DAC - Set Temperature



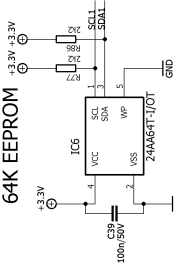
ADC - Set Temperature



JTAG Connection

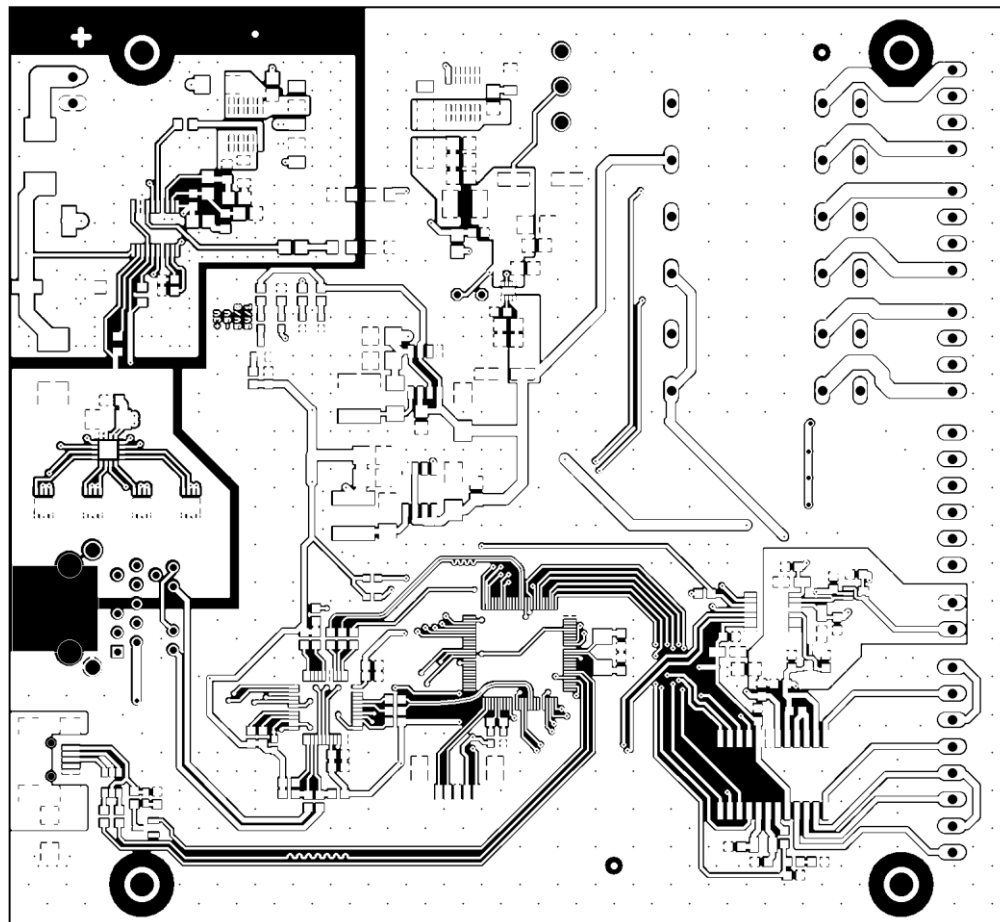


64K EEPROM



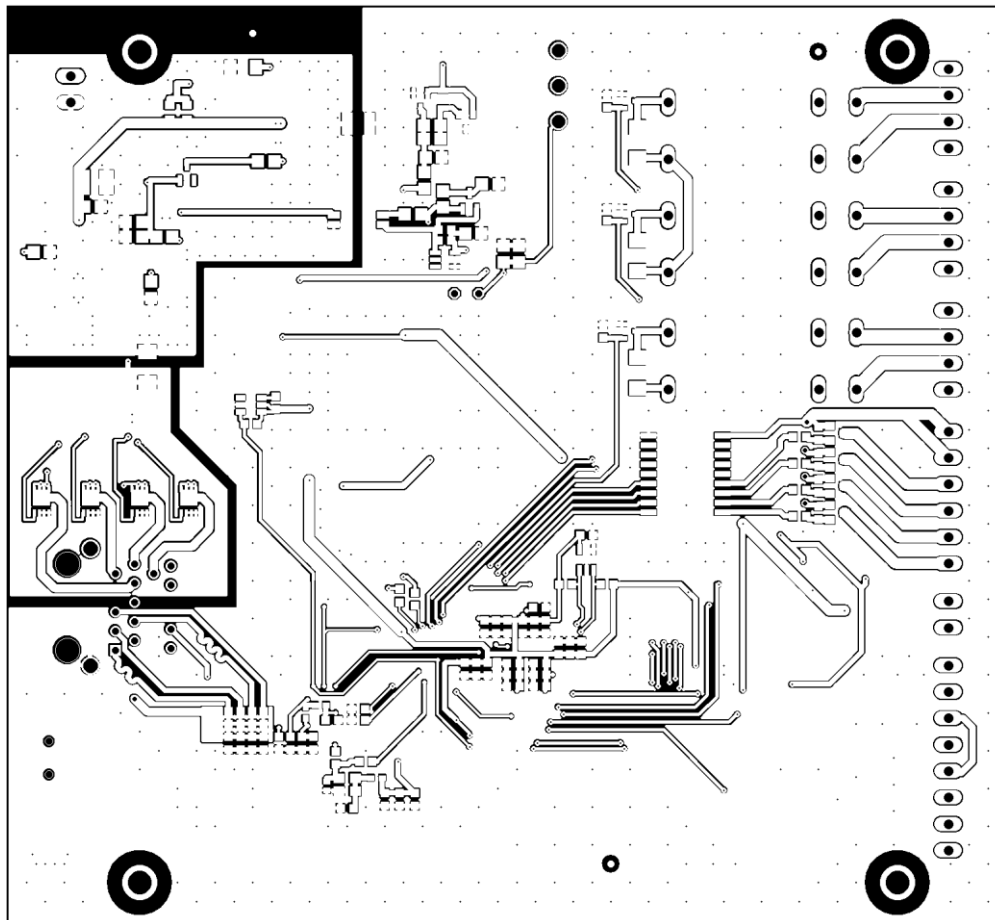
Product family		Product number - name - variant	
ELABORATED	Václav Pálka	DATE	4.11.2016
APPROVED		ASS var.:	
TITLE	Temp. Chamb. Interface	SCH	SHEET (SEP) 5/5
		NO. OF DRAWING	SCALE
		-	----

## DPS Interface klimatické komory – top (strana součástek)



Rozměr desky 133 x 122 [mm], měřítko M1:1

## DPS Interface klimatické komory – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 133 x 122 [mm], měřítko M1:1

## SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	1n0/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C2	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C3	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C4	1n0/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C5	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C6	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C7	1n0/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C8	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C9	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C10	1n0/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C11	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C12	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C13	1n0/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C14	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C15	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C16	1n0/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C17	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C18	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C19	18p/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C20	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C21	18p/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C22	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C23	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C24	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C25	8p2/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C26	1u0/16V	C0603M	Kondenzátor keramický
C27	8p2/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C28	47u/10V	CT3528	Kondenzátor tantalový
C29	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C30	47u/10V	CT3528	Kondenzátor tantalový
C31	10u/16V	CT3216	Kondenzátor tantalový
C32	22u/16V	CT6032	Kondenzátor tantalový
C33	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C34	10u/16V	CT3216	Kondenzátor tantalový
C35	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C36	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C37	10u/16V	CT3216	Kondenzátor tantalový
C38	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický



C39	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C41	2n2/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C42	10n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C43	4u7/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C44	4u7/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C45	22u/16V	CT6032	Kondenzátor tantalový
C46	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C47	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C48	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C49	100n/100V	C0805R	Kondenzátor keramický
C50	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C51	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C52	47u/100V	PANASONIC_G	Kondenzátor elektrolytický
C53	2u2/100V	C1210M	Kondenzátor keramický
C54	100n/50V	C0805R	Kondenzátor keramický
C55	2n2/2kV	C1210R	Kondenzátor keramický
C56	1U0/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C57	22U/16V	C0805M	Kondenzátor keramický
C58	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C59	15N/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C60	1U0/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C61	1U0/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C62	330p/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C63	68p/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C64	1U0/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C65	2n2/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C66	2n2/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C67	330p/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C68	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C69	1n0/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C70	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C71	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C72	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C73	4u7/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C74	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C75	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C76	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C77	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C78	10u/10V	C0603M	Kondenzátor keramický
C79	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C80	10p/50V	C0402M	Kondenzátor keramický
C81	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C82	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C83	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický

C84	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C85	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C86	47u/10V	CT3528	Kondenzátor tantalový
C87	47u/10V	CT3528	Kondenzátor tantalový
C88	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C89	330u/10V	PANASONIC_F	Kondenzátor elektrolytický
C90	22U/16V	C0805M	Kondenzátor keramický
C91	22U/16V	C0805M	Kondenzátor keramický
C92	1n0/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C93	68u/10V	CT3528	Kondenzátor tantalový
C95	330u/10V	PANASONIC_D	Kondenzátor elektrolytický
C96	100n/50V	C0805M	Kondenzátor keramický
C97	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C98	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
C99	100n/50V	C0603M	Kondenzátor keramický
D1	B340B-13-F	DO214AC	Dioda
D2	B340B-13-F	DO214AC	Dioda
D3	KP-1608SGC	603	LED
D4	SMAJ58A	DO-214AC	Dioda
D5	BAV99	SOT23	Dioda
D6	MURA120T3G	DO214AC	Dioda
D7	KP-1608SGC	603	LED
D8	KP-1608SGC	603	LED
D9	SMAJ58A	DO-214AC	Dioda
D10	BAT54S	SOT23	Dioda
D11	KP-1608SGC	603	LED
D12	PMEG3005AEA	SOD323	Dioda
D13	TLV431ACDBVR	SOT95P280X145-5N	IC_Voltage_Ref
D14	SK36A	DO214AC	Dioda
D15	SMBJ22A	DO214AA	Dioda
D16	KP-1608SGC	603	LED
D17	USBLC6-2SC6	SOT23-6	Dioda
D18	BAT54S	SOT23	Dioda
D19	BAV99	SOT23	Dioda
D20	MBRS3100T3G	SMC(CASE403-03)	Dioda
D21	MBRS3100T3G	SMC(CASE403-03)	Dioda
D22	B340B-13-F	DO214AC	Dioda
D23	KP-1608SGC	603	LED
D24	KP-1608SGC	603	LED
D25	SK36A	DO214AC	Dioda
IC1	PIC32MX795F512L-80I/PT	QFP40P1400X1400X120-100N	Procesor
IC4	REF3325AIDCKT	SC70-3	Napěťová reference
IC5	AD5761RBRUZ	TSSOP-16	DA převodník

IC6	24AA64T-I/OT	SOT95P270X145-5N	Paměť
IC8	DP83848IVVX/NOPB	LQFP48	Řadič sběrnice Ethernet
IC9	TPS3808G33DBVT	SOT95P280X145-6N	Zpoždovač resetu
IC10	AD8691AKSZ-R2	SC70	Operační zesilovač
IC11	LTC1174HVCS8-5	SO-8	Napěťový měnič
IC12	LTC1174CS8-3.3	SO-8	Napěťový měnič
IC13	ULN2803A	SO18L	Řadič sběrnice
IC14	LT4321IUF#PBF	QFN-16	Řadič ideálního můstku
IC15	TPS23757PW	SOP65P640X120-20N	Pomocný obvod POE
IC16	TCMT1107	SOP-4	Optočlen
IC17	TPS22965DSGT	DSG-8	Spínač
IC18	CS5505-ASZ	SOIC24	AD převodník
L1	BLM18AG601SN1D	603	Induktor-ferit
L2	BLM18AG601SN1D	603	Induktor-ferit
L3	8u2	6X6X2,5	Induktor
L4	1u0	SIMID1812-T	Induktor
L5	BLM18AG601SN1D	603	Induktor-ferit
L6	BLM18AG601SN1D	603	Induktor-ferit
L7	BLM18AG601SN1D	603	Induktor-ferit
L8	BLM18AG601SN1D	603	Induktor-ferit
L9	47u	5.8X5.2X4.5MM	Induktor
L10	47u	5.8X5.2X4.5MM	Induktor
Q1	ABM3-8.000MHZ-D2Y-T	5X3.2X1.3	Krystal
Q2	NDS352AP	SOT-23	Tranzistor PFET
Q3	NDS352AP	SOT-23	Tranzistor PFET
Q4	NDS352AP	SOT-23	Tranzistor PFET
Q5	NDS352AP	SOT-23	Tranzistor PFET
Q6	FC-135	32.768KHZ	Krystal
Q10	BC847B	SOT23	Tranzistor Bipolar
Q11	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q12	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q13	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q14	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q15	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q16	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q17	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q18	PSMN040-100MSE	LFPK33	Tranzistor NFET
Q19	IRLML6346TRPbF	SOT23	Tranzistor NFET
Q20	IRLML6346TRPbF	SOT23	Tranzistor NFET
Q21	IRLML6346TRPbF	SOT23	Tranzistor NFET
R1	10k	R0603M	Rezistor
R2	0R0	R0805M	Rezistor
R3	220R	R0603M	Rezistor

R4	220R	R0603M	Rezistor
R5	499k	R0603M	Rezistor
R6	100k	R0603M	Rezistor
R7	270R	R0603M	Rezistor
R8	10k	R0603M	Rezistor
R9	1k0	R0603M	Rezistor
R10	10k	R0603M	Rezistor
R11	1k0	R0603M	Rezistor
R12	10k	R0603M	Rezistor
R13	1k0	R0603M	Rezistor
R14	10k	R0603M	Rezistor
R15	1k0	R0603M	Rezistor
R16	499k	R0603M	Rezistor
R23	270R	R0603M	Rezistor
R25	270R	R0603M	Rezistor
R26	24k9	R0805R	Rezistor
R27	39k	R0805R	Rezistor
R28	100R	R0805M	Rezistor
R29	270R	R0603M	Rezistor
R30	10k	R0603M	Rezistor
R31	10k	R0603M	Rezistor
R32	10k	R0805M	Rezistor
R33	1k24	R0805R	Rezistor
R34	10k	R0805M	Rezistor
R35	130k	R0603M	Rezistor
R36	100k	R0603M	Rezistor
R37	499R	R0805R	Rezistor
R38	1k5	R0603M	Rezistor
R39	2k2	R0603M	Rezistor
R40	2k2	R0603M	Rezistor
R41	33R	R0603M	Rezistor
R42	33R	R0603M	Rezistor
R43	33R	R0603M	Rezistor
R44	33R	R0603M	Rezistor
R45	33R	R0603M	Rezistor
R46	2k2	R0603M	Rezistor
R47	49R9	R0603M	Rezistor
R48	49R9	R0603M	Rezistor
R49	4k87	R0603M	Rezistor
R50	2k2	R0603M	Rezistor
R51	49R9	R0603M	Rezistor
R52	10k	R0603M	Rezistor
R53	2k2	R0603M	Rezistor
R54	2k2	R0603M	Rezistor

R55	49R9	R0603M	Rezistor
R56	49R9	R0603M	Rezistor
R57	49R9	R0603M	Rezistor
R58	2k2	R0603M	Rezistor
R59	2k2	R0603M	Rezistor
R60	2k2	R0603M	Rezistor
R61	220R	R0603M	Rezistor
R62	220R	R0603M	Rezistor
R63	100k	R0603M	Rezistor
R64	1k0	R0603M	Rezistor
R65	2K0	R0603M	Rezistor
R66	82R5	R1206M	Rezistor
R67	0R22	R1206R	Rezistor
R68	499R	R0805R	Rezistor
R69	3R3	R0805R	Rezistor
R70	9K53	R0805M	Rezistor
R71	100k	R0603M	Rezistor
R72	27R	R0603M	Rezistor
R73	220R	R0603M	Rezistor
R74	27R	R0603M	Rezistor
R75	1k0	R0805M	Rezistor
R76	10k	R0805M	Rezistor
R77	2k2	R0603M	Rezistor
R78	4K02	R0805M	Rezistor
R79	12K4	R0805M	Rezistor
R80	49R9	R0603M	Rezistor
R81	10k	R0805M	Rezistor
R82	4K99	R0805M	Rezistor
R83	10R	R1206R	Rezistor
R84	1k0	R0805M	Rezistor
R85	100k	R0603M	Rezistor
R86	2k2	R0603M	Rezistor
R87	100k	R0603M	Rezistor
R88	100k	R0603M	Rezistor
RE1	G2R-2A	5DC	Relé
RE2	G2R-2A	5DC	Relé
RE3	G2R-2A	5DC	Relé
SW2	1101M2S2CQE2	1101M2S2	Přepínač
T1	Si4848DY	SOIC-8	Tranzistor NFET
T2	IRF7821TRPBF	SOIC-8	Tranzistor NFET
T3	MMBT3906	SOT23	Tranzistor Bipolar
TR1	POE13P-50LB	POE13P-50LB	Transformátor
TR2	PA0184NL	PA0184NL	Transformátor
X1	SL	3.5/2/90G	Konektor

X2	SI-52008-F	SI-52008-F	Konektor RJ45
X3	MUSB-05-S-B-SM-A	USB_MINIB_MUSB_SM	Konektor USB
X5	SL3.5/4/90G	SL3.5/4/90G	Konektor
X6	SL3.5/4/90G	SL3.5/4/90G	Konektor
X7	SL3.5/4/90G	SL3.5/4/90G	Konektor
X8	53398-0571	53398-05	Konektor
X9	SL3.5/8/90G	SL3.5/8/90G	Konektor
X10	SL	3.5/2/90G	Konektor
X11	SL3.5/6/90G	SL3.5/6/90G	Konektor
Y1	ASE-50.000MHZ-LC-T	3.2X2.5X0.7	Oscilátor