



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

**Systém pro temperování PPFC kultivačních
komor mimo temperovaný inkubátor**

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: Petr Kočiš

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Roman Matějka

Kladno 2016

Katedra biomedicínské techniky

Akademický rok: 2015/2016

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: **Petr Kočiš**
Obor: Biomedicínský technik
Téma: **Systém pro temperování PPFC kultivačních komor mimo temperovaný inkubátor**
Téma anglicky: Heating system for PPFC chamber for outside of used incubator

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhněte samostatně fungující systém pro temperování parallel-plate kultivačních komor (PPFC) na 37°C mimo kultivační inkubátor (např. ve fluorescenčním nebo konfokálním mikroskopu využívající adaptér na 96 jamkovou desku). Vytvořte vhodnou elektroniku, senzorku a ovládací firmware. Zařízení umístěte do vhodné přístrojové krabice, přičemž dbejte na ergonomii při experimentálním použití. Zařízení ověřte jednak laboratorně a jednak při buněčných experimentech s endotelem nebo kokulturou endotelu a kmenových buněk).

Seznam odborné literatury:

- [1] Lanza, R., Langer, R., Vacanti, J., Principles of Tissue Engineering, ed. 3rd Edition , Elsevier Academic Press, 2007, ISBN 978-0123706157
- [2] John G. Webster. , The measurement, instrumentation and sensors handbook, ed. (The Electrical engineering handbook series), Boca Raton : CRC Press, 1999, ISBN 9780471676003

zadání platné do: 30.09.2017
Vedoucí: Ing. Roman Matějka
Konzultant: Ing. Jana Štěpanovská

.....
vedoucí katedry / pracoviště

.....
děkan

V Kladně dne 22.02.2016

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Systém pro temperování PFFC kultivačních komor mimo temperovaný inkubátor* vypracoval samostatně. Veškerou použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne

.....

Petr Kočíš

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Technologické agentuře ČR za podpoření práce grantem TA04011345 Cévní protézy o malém průměru osídlované endotelovými a kmenovými buňkami kostní dřevě v bioreaktoru. Dále děkuji svému vedoucímu Ing. Romanu Matějkovi za cenné připomínky a rady při vypracování práce.

Název bakalářské práce:

System pro temperování PPFC kultivačních komor mimo temperovaný inkubátor

Abstrakt:

Bakalářská práce se věnuje návrhu a výrobě systému pro temperování PPFC kultivačních komor, který lze použít v mikroskopu s adaptérem na 96 jamkovou misku. V práci jsou popsány sériově vyráběné systémy pro danou aplikaci, jimiž je vyvinutý produkt inspirován. Podrobně je popsána kompletní elektronická i mechanická část zařízení, včetně firmwarového vybavení. Experimentální část se věnuje ověřování funkčnosti systému, a to laboratorně a při buněčných experimentech. Výsledkem je funkční prototyp, jenž udržuje blízké okolí komory na jedné ze tří nastavitelných teplot. V práci jsou diskutovány vlastnosti přístroje, způsoby vylepšení a možnosti dalšího vývoje.

Klíčová slova:

topení, teplotní senzor, kultivační komora

Bachelor's Thesis title:

Heating system for PPFC chamber for outside of used incubator

Abstract:

This thesis deals with the design and construction of a heating system for PPFC chambers. The dimensions of the system allow it to be used in a microscope with the adaptor for 96 hole plate. The system is inspired by several serial products, which are described in the publication. Further, the detailed description of an electronic and mechanical solution and firmware can be found. The experimental part engages in verification of a proper function. The outcome of the thesis is a working prototype of the system, which keeps a close environment of the chamber on a stable temperature. The required temperature is easily adjustable. Finally, the properties of the product are discussed, including proposals of improvement.

Key words:

heating, temperature sensor, cell cultivation chamber

Obsah

1	Úvod	8
2	Teoretické základy práce	9
2.1	Současný stav a přehled topných systémů pro kultivační komory	9
2.1.1	PPFC.....	9
2.1.2	Topný rám	10
2.1.3	Vytápěný kryt.....	12
2.2	Cíle práce	13
3	Metody.....	14
3.1	Konstrukce topného systému	14
3.1.1	Konstrukce topného adaptéru.....	15
3.1.2	Konstrukce řídicí jednotky	19
3.1.3	Řídicí modul	20
3.1.4	Modul pro napájení topného adaptéru.....	22
3.1.5	Modul pro zpracování signálu z termistorů.....	24
3.1.6	Modul se spínaným zdrojem	29
3.1.7	Uživatelské rozhraní.....	30
3.1.8	Konstrukční uspořádání.....	33
3.2	Firmware	33
3.2.1	Vyčítání signálu z termistorů	34
3.2.2	Výpočet teploty	35
3.2.3	Regulace vytápění	37
3.2.4	Topné programy	37
3.2.5	LCD displej	38
4	Výsledky.....	39
4.1	Funkce přístroje.....	39
4.2	Laboratorní a experimentální ověření	39
4.2.1	Laboratorní ověření	39
4.2.2	Experimentální ověření	42
5	Diskuze	44
6	Závěr.....	46
	Seznam použitých zdrojů	47
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek	50
	Seznam příloh	51

Seznam použitých symbolů a zkratek

PPFC	parallel plate flow chamber
POC	perfusion open and closed
I ² C	inter-integrated Circuit
GND	ground
PWM	pulse-width modulation
SPI	serial peripheral interface
USART	universal synchronous/asynchronous receiver and transmitter
NC	no connection
RST	reset
LCD	liquid crystal display
LED	light-emitting diode
USB	universal serial bus
PGA	programmable-gain amplifier
A/D	analogově-digitální
V _{DD}	kladné napětí
V _{SS}	záporné napětí
PC	personal computer
HUVEC	human umbilical vein endothelial cells

1 Úvod

Komory pro dynamickou kultivaci umožňují in vitro zkoumat účinky stimulace způsobené proudící kapalinou na buňky v jejich přirozeném prostředí. Významný je zejména výzkum na endotelových buňkách kardiovaskulárního systému, které jsou vystaveny namáhání způsobeným krví, jež je omývá. Namáhání vytváří u buněk specifickou odezvu, která se může projevit jejich nesprávnou funkcí. V případě zmíněných buněk může mít špatná funkce fatální účinky vyvolávající kardiovaskulární onemocnění. Aby bylo vytvořeno přirozené prostředí zkoumaných buněk, je nutné udržovat uvnitř komory určitou teplotu. Tato podmínka musí být dodržena i během mikroskopování komory. Mikroskop však disponuje pouze omezeným prostorem. V současné době nabízí topné systémy, které jsou kompatibilní s mikroskopy, několik výrobců. K dostání jsou dvě různá technická řešení. Prvním případem je topný rám, do kterého je komora vkládána. Principem temperování je nejčastěji průchod elektrického proudu odporovým vodičem. Druhým řešením je vzduchotěsný průhledný kryt přes invertovaný mikroskop, v němž cirkuluje filtrovaný vzduch ohřátý v externím zařízení na nastavenou teplotu. Systém vyvíjený v rámci této práce má za úkol ohřívat konkrétní specifickou komoru. Dosavadním řešením temperování při kultivaci buněk je umístění komory do inkubátoru. Mikroskopování buněk stimulovaných proudící kapalinou prozatím není možné kvůli absenci vyhovujícího topného systému.

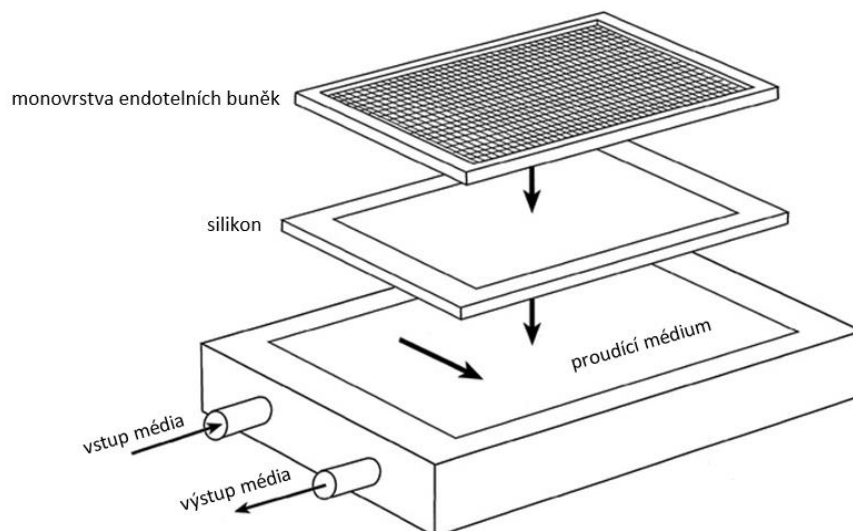
2 Teoretické základy práce

2.1 Současný stav a přehled topných systémů pro kultivační komory

2.1.1 PPFC

PPFC (parallel plate flow chamber) je kultivační komora, jež umožňuje in vitro zkoumat účinky stříhového namáhání na endotelové buňky. Namáhání je způsobeno laminárním prouděním kultivačního média. Aplikace namáhání způsobuje u buněk specifickou odezvu, dochází k modulaci jejich fenotypu a biomechanických charakteristik. Jedná se např. o zarovnání aktinu filamentů do směru proudění média, zvýšení tuhosti buňky nebo změny v topografii povrchu.

Podstatný je výzkum účinku stříhového namáhání na endotelové buňky kardiovaskulárního systému. Buňky, jež tvoří hranici mezi cirkulující krví a cévou, jsou konstantně namáhány. Špatná funkce těchto buněk je považována za počátek řady kardiovaskulárních onemocnění. [1]



Obrázek 1: Schéma PPFC. Převzato a upraveno z [2].

Na světovém trhu jsou nabízena dvě řešení topných systémů pro kultivační komory při mikroskopování. Prvním případem je topný rám, jenž komoru objímá. Druhým způsobem je vytápění vzduchotěsného průhledného krytu, který obklopuje celý mikroskop včetně komory.

2.1.2 Topný rám

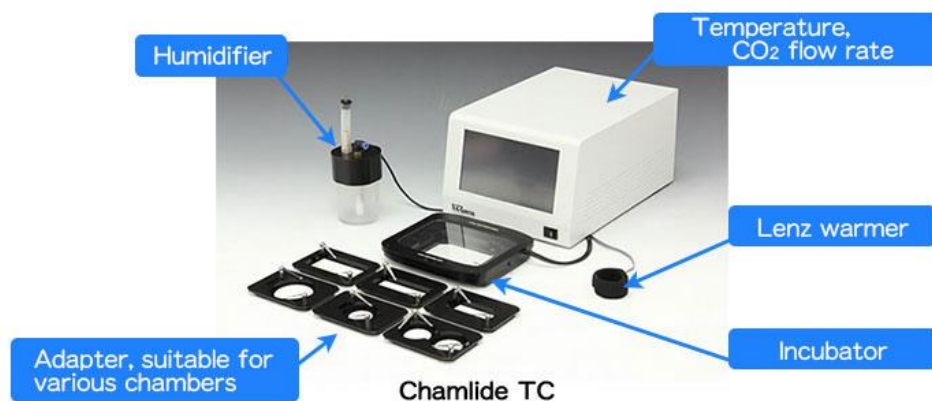
Rám pro vytápění kultivačních komor během pozorování v invertovaném mikroskopu nabízejí například společnosti PeCon GmbH (Erbach, Německo), KYODO INTERNATIONAL INC. (Kanagawa-ken, Japonsko), Warner Instruments, LLC (Hamden, USA). Adaptéry jsou zpravidla vyrobeny z kovu s vysokým obsahem hliníku. Principem topení je většinou Jouleovo teplo, existují však i řešení na základě Peltierova článku nebo cirkulace temperované tekutiny.

Základní řada adaptérů The Heating Frame 2000 od společnosti PeCon je určena pro Petriho misky “35” a “60” a pro POC (Perfusion Open and Closed) systémy. Na dně adaptéru je otvor pro mikroskopování, jenž může být překryt krycím sklem. Rám má zabudovaný teplotní senzor. Pro regulaci teploty je potřeba adaptér připojit k externímu zařízení TempController 2000 (PeCon GmbH, Erbach, Německo). Jednotka TempController 2000 obsahuje dva kanály, aby mohla naráz obsluhovat dvě topná zařízení. Je manuálně ovladatelná tlačítky na předním panelu, nebo externě přes USB port. Firmware umožňuje naprogramování osmi různých parametrů, přičemž teplotu je možné nastavit v rozmezí 0 – 60 °C. [3]



Obrázek 2: The Heating Frame 2000 a TempController 2000, převzato z [3]

Produkty společnosti Kyodo (obrázek 4) se od PeConu liší krycím sklem přes temperovanou komoru, které dává vzniknout spíše než rámu malému inkubátoru. Do inkubátoru pasují nástavce na různé druhy komor. Sklo je vyhříváno. To má za důsledek vytápění komory a zároveň zabránění mlžení skla. [4]



Obrázek 3: Topný systém Chamlide TC, KYODO INTERNATIONAL INC., převzato z [4]

Společnost Warner Instruments, LLC popisuje technologii výroby svých topných systémů podrobně. Materiál pro výrobu adaptérů je hliník 6061 - Al (98,68 %), Cu (0,12 %), Mn (1,2 %). Principů vytápění je více. Za nejjednodušší přístup je považován ohřev tekutiny těsně před vstupem do kultivační komory. Je však potřeba minimalizovat vzdálenost mezi místem ohřevu a vstupem do komory, což není vždy realizovatelné. Další princip je obdobný jako u předchozích společností – vytápění komory adaptérem, do něž je komora vložena. Tato metoda je kladně hodnocena pro aplikace, kdy komorou neproudí roztok. Zdrojem tepla může být Jouleovo teplo, Peltierův článek, ohřátá tekutina omývající komoru, nebo ohřátý vzduch. Poslední dva zmíněné principy je možné aplikovat pouze v uzavřených adaptérech. Spolehlivé výsledky generuje systém, kdy je vyhříván rezervoár protékajícího roztoku a zároveň inkubační komora v adaptéru.

Kontrola teploty je u relevantních produktů Warner Instruments, LLC zajištěna dvěma termistory, z nichž první je umístěn v adaptéru a druhý je omýván roztokem. Čidla takto poskytují informace o rychlosti a velikosti topného účinku. K nastavení parametrů slouží externí kontrolní jednotka, jež má obdobné funkce jako např. TempController 2000 společnosti PeCon. [5]



Obrázek 4: Topný systém společnosti Warner Instruments, LLC, převzato z [5]

2.1.3 Vytápěný kryt

Zcela odlišné řešení oproti konkurenčním společnostem nabízí Solent Scientific Limited (Segensworth, UK). Produkt 37° Incubation Chamber (Obr. 5) je vhodný pro invertovaný a konfokální mikroskop. Je kompatibilní s rozličnými inkubačními komorami. Akrylový kryt je vytápěn neustále cirkulujícím zahříváním filtrovaným vzduchem. Topná jednotka je umístěna externě, aby se vibrace z ventilátoru nepřenášely na mikroskop. Teplota uvnitř krytu je nastavitelná v rozmezí 32 – 42 °C. Kryt obsahuje uzavíratelné okénko pro snadnou manipulaci s předměty uvnitř a nastavení mikroskopu. Instalace na mikroskop je snadná a není k ní potřeba žádné nářadí. [6]



Obrázek 5: 37° Incubation Chamber, Solent Scientific Limited, převzato z [6]

2.2 Cíle práce

Cílem práce je navrhnout a zrealizovat systém pro temperování PPFC komory. Tento systém bude:

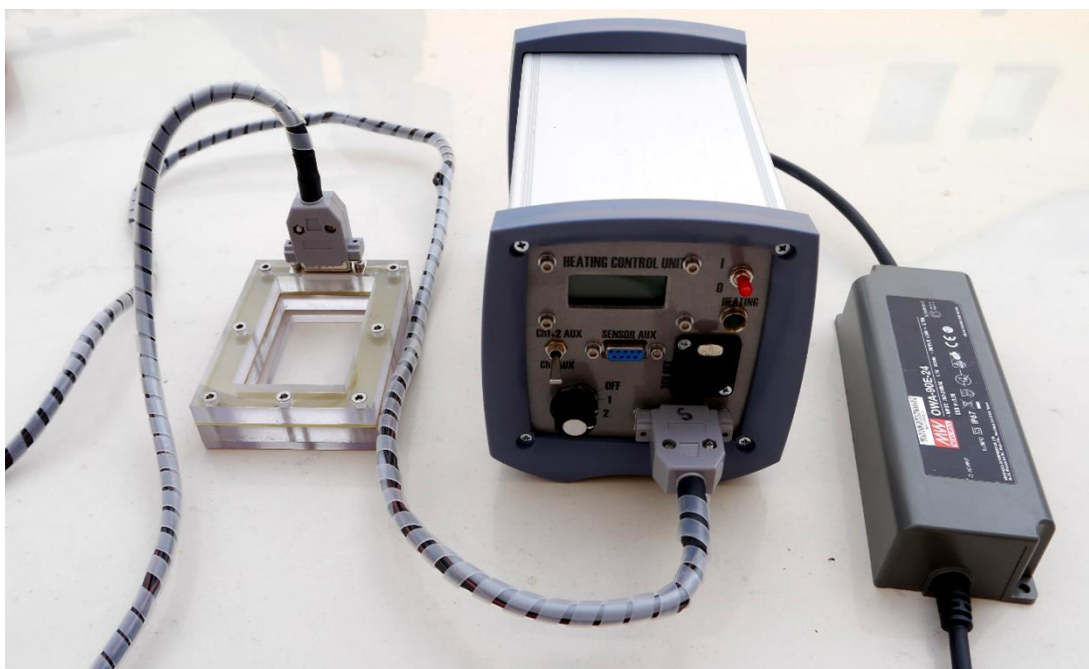
- udržovat nastavitelnou stabilní teplotu v těsném okolí komory,
- aplikovatelný v mikroskopu s adaptérem na 96 jamkovou misku,
- možné ovládat manuálně pomocí tlačítek a vnějším řídicím signálem,
- disponovat řídicími moduly pro dva nezávislé topné adaptéry,
- zobrazovat informace o svém stavu,
- možné snadno přepnout do různých vytápěcích režimů.

Konstrukční řešení musí respektovat základní všeobecné podmínky pro používání prostředků v laboratoři (mechanické provedení, ergonomie, elektrická bezpečnost, možnost dezinfekce). Primárním zdrojem napájení je rozvodná síť 230 V / 50 Hz. Obsluhu přístroje musí zvládnout i neodborná osoba.

3 Metody

Praktická část práce spočívala v návrhu a realizaci hardwarového vybavení, jež je tvořeno topným adaptérem a řídicí jednotkou (viz obrázek 6). Systém byl následně doplněn vhodným softwarem.

3.1 Konstrukce topného systému



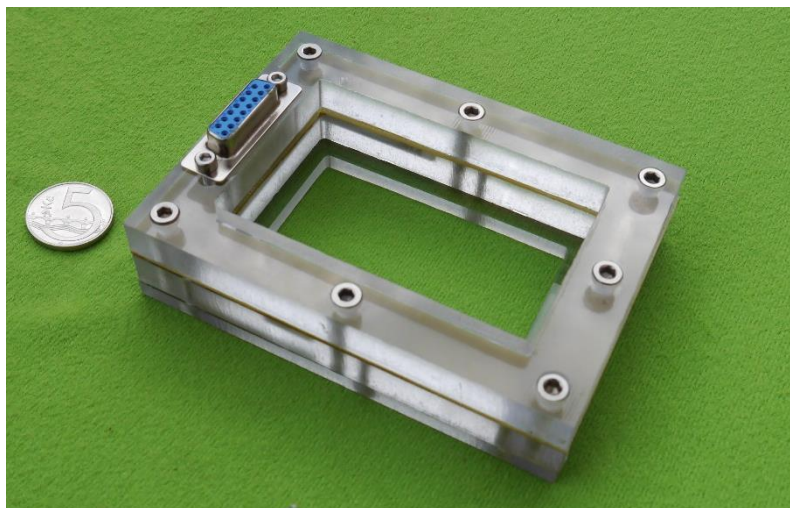
Obrázek 6: Prototyp topného systému

Výchozí koncepce přístroje je následující: Po připojení ke zdroji napětí a zapnutí je otočným spínačem nastavena požadovaná teplota topného adaptéru. Přípravek následně pracuje non-stop ve zvoleném režimu. Informace o aktuální a požadované teplotě se zobrazuje na displeji řídicí jednotky. Omezení manuálního ovládání pouze na zapnutí přístroje a volbu jednoho ze tří režimů vytápění koresponduje s požadavkem na snadnou obsluhu.

Podoba systému je inspirována výrobky popsány v kapitole 2, konkrétně topný prvek v podobě adaptéru, jenž je oddělitelný od komory, a externí řídicí jednotka. Vzhledem k tomu, že má být výrobek určen pro unikátní komoru, je výhodnější vyvinout vlastní systém s konkrétními parametry, než investovat do sériově vyráběného přípravku, jenž je určen i pro jiné aplikace.

Topná část je dimenzována na komoru tvaru kvádru o stranách 50 mm, 80 mm, 20 mm. Komora se skládá z průhledné kultivační části a hliníkové podstavy. Oba díly jsou přibližně stejně vysoké, součet jejich výšek je 20 mm. V hliníkové podstavě je otvor sloužící pro mikroskopování. Do vrchní stěny komory je hadičkami přiváděno kultivační médium, jehož maximální průtok je 100 ml/min. Médium je temperované na požadovanou teplotu jiným systémem. Úkolem této práce je vyvinout systém, který bude minimalizovat tepelné ztráty udržováním blízkého okolí komory na teplotě média. Pro takovou aplikaci je vhodné zvolit pro výrobu adaptéru materiál s velkou tepelnou kapacitou. Optimální výkon topení, aby udrželo konstantní teplotu 37 °C, byl odhadnut na 40 W.

3.1.1 Konstrukce topného adaptéru



Obrázek 7: Prototyp topného adaptéru

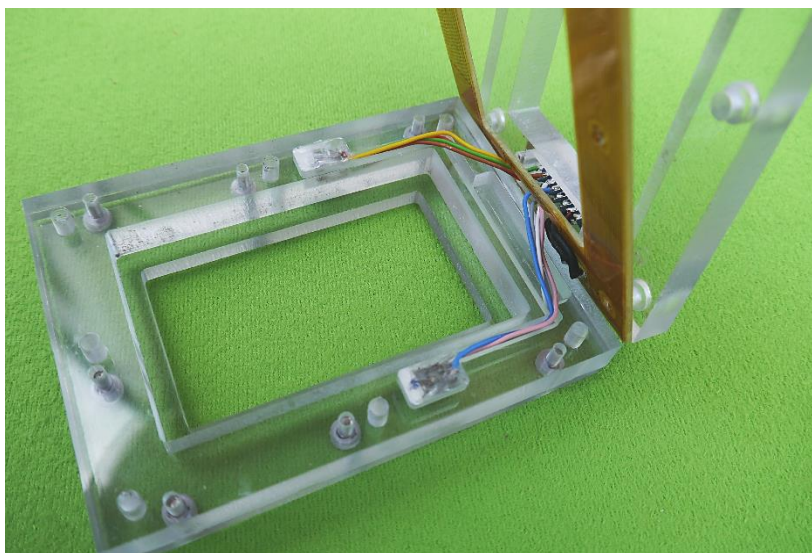
Adaptér byl navržen a zhotoven podle následujících požadavků: Maximální rozměr základny 86 x 128 mm (rozměr 96 jamkové misky). Konstrukce nesmí přesáhnout přes spodní ani vrchní stěnu komory, aby byl zachován průhled pro mikroskopování. Zároveň nesmějí být omezeny hadičky s kultivačním médiem procházející vrchní stěnou.

Prototyp adaptéru byl vyroben CNC frézku podle modelu v programu Autodesk Inventor Professional 2016 (Autodesk, Inc., San Rafael, USA). Za materiál byl z finančních důvodů zvolen polykarbonát. Na základě zkušeností s prototypem bude v budoucnu zhotovena optimalizovaná hliníková verze.

Adaptér je složen z vlastního těla, topného prvku, teplotních čidel a konektoru. Tělo sestává ze tří horizontálně naskládaných dílů. Vrchní a prostřední díl jsou rozměrově identické a mezi jejich styčné plochy je vložena topná deska. Vrchní díl obsahuje konektor, prostřední díl teplotní senzory. Spodní díl obsahuje menší výřez než zbylé dvě části, čímž vytváří dno adaptéru s dostatečně velkým prostorem pro mikroskopování.

Vrchní a prostřední díl mají tvar obdélníkového prstence s rozměry $112 \times 82 \times 10$ mm a výřezem 82×52 mm. Tloušťka materiálu, jenž objímá komoru, je 15 mm. Oba díly jsou spojeny sedmi nerezovými šrouby $M4 \times 16$. Takto vysoký počet šroubů byl zvolen proto, aby nedocházelo k ohýbání materiálu v důsledku různé rychlosti prohřívání obou částí. Spodní díl je rovněž prstenec. Vnější rozměry jsou totožné s rozměry ostatních dílů, výška je 5 mm a výřez je o 5 mm z každé strany menší než výřez zbylých částí. Tím je vytvořeno dno adaptéru, které zamezuje propadnutí komory skrz prstenec. Spojení s prostředním dílem je zajištěno sedmi šrouby $M3 \times 10$.

Vrchní díl obsahuje konektor D-sub s 15 piny, který slouží pro připojení k řídicí jednotce. Na konektor jsou vedeny vodiče z termistorů a topné desky. Situace je znázorněna na obrázku 8.

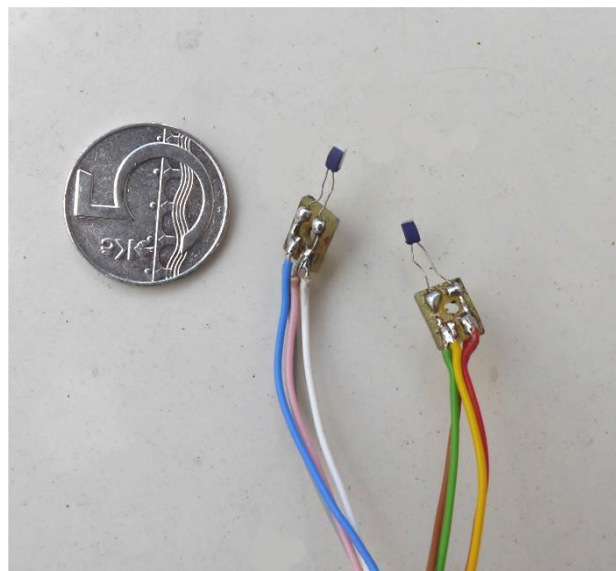


Obrázek 8: Uspořádání vodičů uvnitř adaptéru

Prostřední díl obsahuje 5 mm hluboký manipulační výřez. Jsou v něm uložena dvě teplotní čidla a příslušné kabely. Přenos tepla z adaptéru k sensorům je

zajištěn teplovodivou kontaktní pastou Dow Corning 340 (Dow Corning S. A., Seneffe, Belgie), jež obsahuje množství tepelně vodivých oxidů kovů, má nízkou tekutost a vysokou tepelnou stabilitu. Zbylý prostor obdélníkového výřezu okolo senzorů je vyplněn lepidlem Dow Corning 732. Jedná se o silikonový tmel, který se vytvrzuje do formy houževnaté a pružné pryže. Má izolační vlastnosti a je vhodný pro aplikace do 265 °C [7]

V aplikaci jsou použity termistory PT1000. Tento typ čidel byl zvolen kvůli své lineární závislosti odporu na teplotě a kvůli vhodné citlivosti. Z důvodu maximalizování přesnosti jsou čidla zapojena čtyřvodičově. Realizace zapojení je provedena přes plošný spoj, který pasuje do výřezu v prostředním díle adaptéru. Situace je znázorněna na obrázku 9.



Obrázek 9: Realizace čtyřvodičového zapojení senzorů

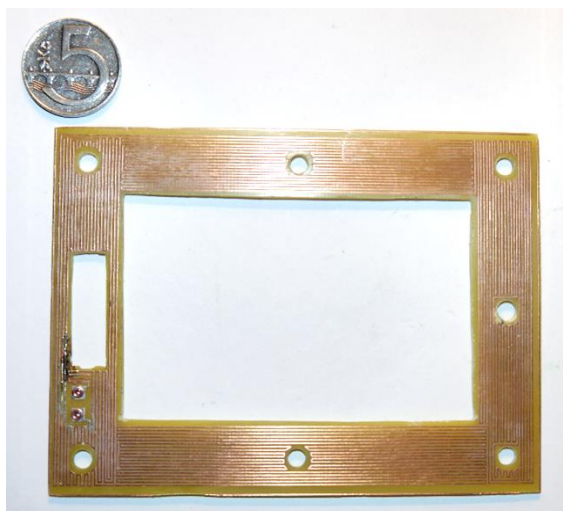
Topným prvkem adaptéru je cuprexitivová deska s vyleptaným meandrem. Deska je umístěna mezi vrchním a prostředním dílem. Tím je zajištěna rovnoměrná distribuce tepla. Deska má za pokojové teploty odpor 12 Ω. Je napájena síťovým 24V zdrojem, podle rovnice (1) skrz ní protéká proud 2 A a podle rovnice (2) je její výkon 48 W.

$$I = U/R \quad (1)$$

$$P = U \cdot I \quad (2)$$

V případě potřeby změny výkonu topení lze do adaptéru sériově nebo paralelně přidat identickou desku, nebo ve stávajícím návrhu desky upravit tloušťku spoje. Tato skutečnost zvyhodňuje použití leptané desky oproti topnému drátu nebo sériově vyráběnému tělesu. Jinou variantou ovlivnění výkonu je úprava firmwaru, tato problematika je popsána v kapitole 3.2.3.

Návrh desky byl učiněn v programu EAGLE 6.5.0 (CadSoft Computer GmbH, Pleiskirchen, Německo). Deska obsahuje několik otvorů. Největší z nich pojímá inkubační komoru. Sedm identických kruhových otvorů propouští šrouby, které spojují vrchní a prostřední díl adaptéru. Skrz obdélníkový otvor v levé části desky procházejí kabely teplotních senzorů a napájení.



Obrázek 10: Topná deska

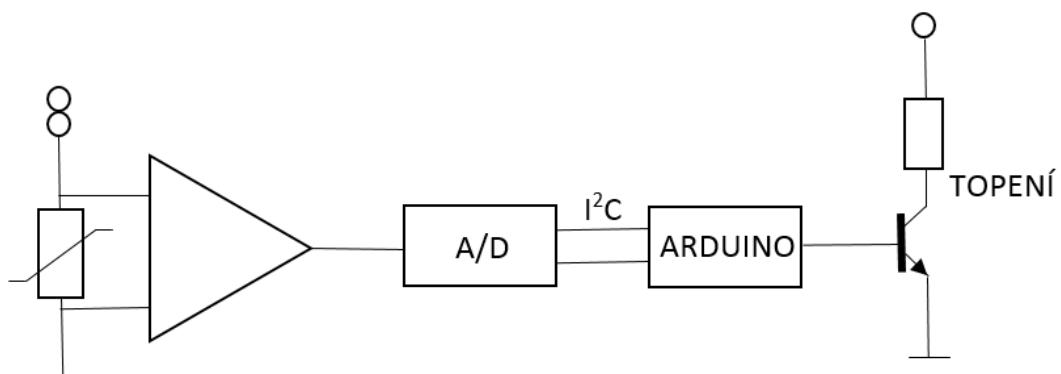
Propojení adaptéru s řídicí jednotkou je zobrazeno na obrázku 6. Je realizováno dvanáctižilovým kabelem, přičemž čtyři žíly napájejí topnou desku a osm žil slouží ke čtyřvodičovému zapojení dvojice termistorů. Signálové vodiče jsou v kabelu od napájecích odstíněny. Topení je napájeno čtyřmi vodiči z důvodu snížení proudu, který protéká jednotlivými piny konektoru. Přímé vyvedení vodičů z adaptéru kabelem bylo zavrhnuto, protože kvůli malým rozměrům těla je nemožné kabel zajistit proti vytržení. Musel by být do adaptéru vlepen, což je nevýhodné z hlediska případných oprav. Nevýhodou konektoru je, že zmenšuje tepelnou kapacitu a narušuje homogenitu vyzářování.

3.1.2 Konstrukce řídicí jednotky



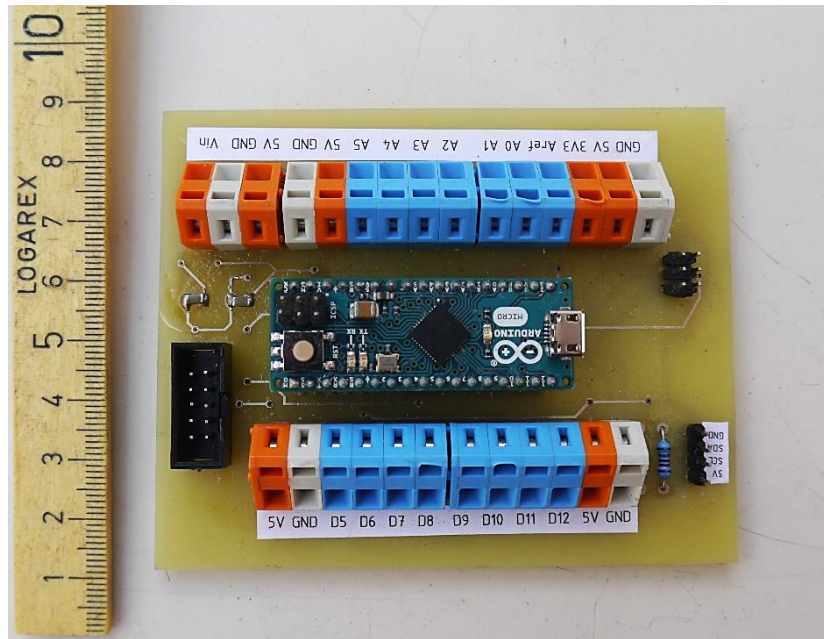
Obrázek 11: Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je tvořena řídicím modulem s mikroprocesorem, dvěma moduly pro zpracování signálu z termistorů, modulem pro napájení topného adaptéru a modulem se spínaným zdrojem. Moduly jsou uloženy v konstrukční krabici, na jejíž panely jsou vyvedeny komponenty uživatelského rozhraní systému. Návrhy všech modulů byly učiněny v programu EAGLE.



Obrázek 12: Blokové schéma řídicí jednotky

3.1.3 Řídící modul



Obrázek 13: Řídící modul

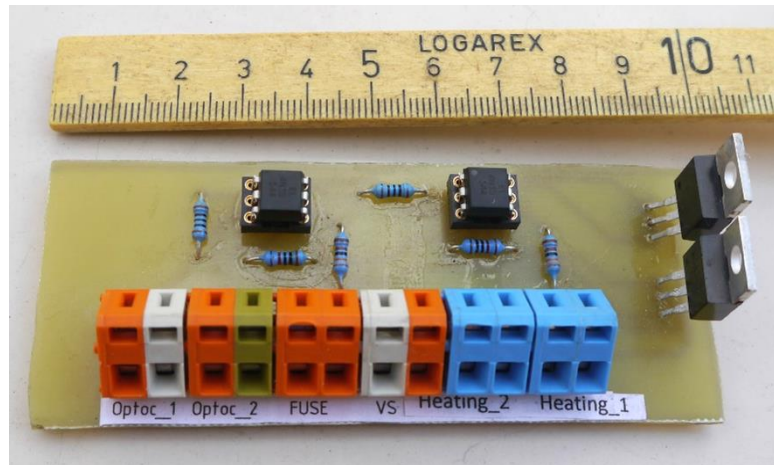
Požadavky na modul jsou: periodické snímání teploty topného prvku, vyhodnocení informace, na základě vyhodnocení sepnout/rozepnout topný obvod, regulace teploty. Pro tuto aplikaci byla za základ modulu zvolena otevřená elektronická platforma Arduino.

Arduino komunikuje pomocí analogových a digitálních pinů, z nichž některé pracují v režimu PWM (Pulse-width modulation). Podporuje I²C (Inter-Integrated Circuit) a SPI (Serial Peripheral Interface). Projekty založené na Arduino mohou komunikovat se softwarem počítače (např. Flash, Processing, MaxMSP). Mikroprocesor Arduina je programován jazykem založeným na jazyku Wiring. [8]

Pro účely topného systému byl především kvůli malým rozměrům zvolen model Arduino Micro, který má 20 digitálních vstupně/výstupních pinů. Je napájen napětím +5 V a programován přes konektor micro USB [8]

V popisované aplikaci je využita pouze část funkcí Arduina, modul byl však z důvodu větší variability využití v budoucnu navržen multifunkčně. Obsahuje specifické konektory na I²C, SPI a USART. Jsou zakomponovány i pull - up rezistory pro I²C. Dále obsahuje konektory Wago 236 pro napájení Arduina v případě odpojení od počítače a práce v samostatném režimu. Na další konektory jsou

3.1.4 Modul pro napájení topného adaptéru



Obrázek 15: Modul pro napájení topného adaptéru

Modul zajišťuje galvanické oddělení výkonového obvodu s topným prvkem od mikroprocesoru a prakticky tento obvod za pomoci dvou tranzistorů spíná a rozepíná.

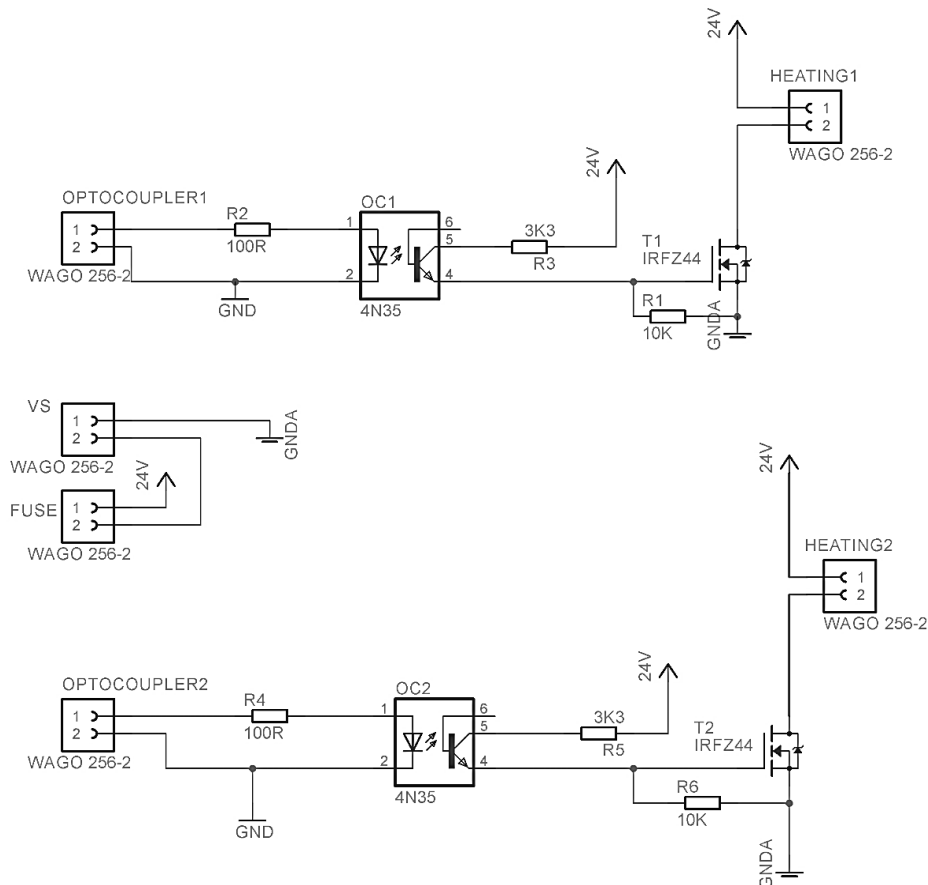
Deska obsahuje dvě sady následujících součástek: optotranzistor 4N35, MOSFET IRFZ44 a konektory Wago 236. Dvě sady jsou přítomny z toho důvodu, aby mohly být řídicí jednotkou napájeny dva různé adaptéry současně. Pokud nebudou obě sady využity naráz, slouží jedna jako záloha v případě závady v první. V takové situaci stačí pouze přepojit vodiče na jiné konektory, není nezbytné měnit celý modul.

Signály vstupující na desku jsou: 5 V z Arduina a 24 V ze síťového zdroje. 5V signál na vstupu optočlenu spíná obvod napájený 24 V, z kterého je odvedeno dostatečně velké napětí na sepnutí výkonového tranzistoru. Sepnutím MOSFETU dochází k zahájení vytápění.

Optotranzistor 4N35 disponuje následujícími vlastnostmi: minimální vstupní napětí 1,2 V, maximální vstupní napětí 6 V, maximální vstupní proud 50 mA, maximální napětí kolektor – emitor 70 V, maximální proud kolektorem 50 mA. Plní dvě funkce – odděluje Arduino od výkonového obvodu a přivádí v sepnutém stavu 24 V na výkonový MOSFET, čímž ho spíná. Před vstupem a kolektorem se nacházejí rezistory omezující proud na hodnotu menší než 50 mA. [9]

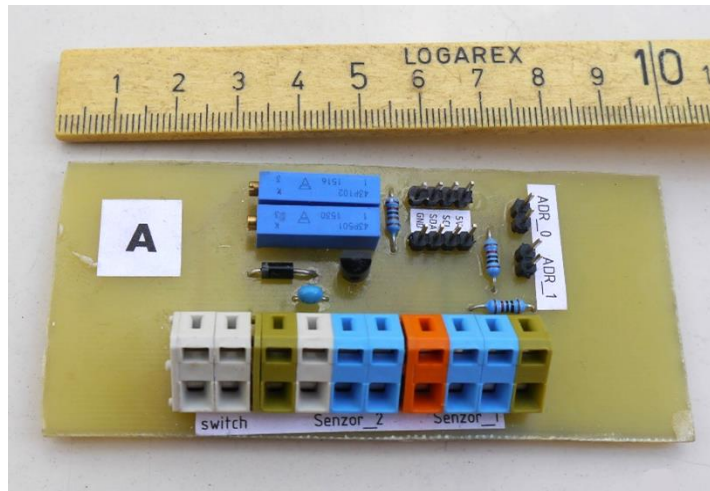
MOSFET IRFZ44 spíná výkonový obvod topného systému, který je napájen napětím 24 V a je dimenzován na maximální nominální proud 3 A. Jedná se o MOSFET s indukovaným N-kanálem. Má odpor $0,018 \Omega$, což je pro aplikaci dostatečně nízká hodnota. Chladič tranzistoru je přesto připevněn šroubkem k vnitřní stěně šasi kvůli zvětšení chladicího účinku. Na chladič je vyveden drain, proto je od stěny oddělen slídovou podložkou a použitý šroubek je plastový. Prahové napětí na bázi, které tranzistor plně otevře, je podle katalogového listu 16 V, maximální napětí 20 V. Napětí na bázi je přivedeno z napěťového děliče a má hodnotu 18 V. Maximální napětí kolektor – emitor 55 V a proud kolektorem 49 A s rezervou stačí pro danou aplikaci. [10]

Napětí 24 V na modul dodává síťový zdroj OWA-90E-24 (Mean Well Enterprises Co. Ltd., Taipei, Taiwan). Na desku je vedeno přes pojistku, jež je uložena v zadním panelu šasi.



Obrázek 16: Schéma modulu pro napájení topného adaptéru

3.1.5 Modul pro zpracování signálu z termistorů



Obrázek 17: Modul pro zpracování signálu z termistorů

Základem modulu je zesilovač s A/D převodníkem MCP3428 (Microchip Technology Inc., 2355 West Chandler Blvd, USA). Tento integrovaný obvod zesiluje a vzorkuje signál z čidel adaptéru. Signál je následně přenášen na řídicí modul přes I²C.

Zesílení čipu je programovatelné na hodnoty jedna, dva, čtyři a osm. Obsahuje čtyři kanály, z nichž jsou v aplikaci využity dva, a to pro připojení termistorů. A/D převodník může být naprogramován na 16 (15 vzorků/s), 14 (60 vzorků/s) nebo 12 bitů (240 vzorků/s). Zabudovaná napěťová reference 2,048 V umožňuje diferenciální vstup v rozsahu $\pm 2,048$ V. Napájecí napětí čipu se pohybuje v rozmezí 2,7 – 5,5 V. Adresa I²C rozhraní je nastavena na jednu z osmi variant připojením dvou adresních pinů k V_{SS}, V_{DD}, nebo ponecháním bez připojení. [11]

Definování adresy je na modulu realizováno dvojicí pinových lišt označených ADR_0 a ADR_1. Každá z nich je napojena na jeden z adresních pinů převodníku. Pokud nejsou piny lišty propojeny zkratovací propojkou, je na adresní pin přivedeno V_{DD}. Zkratováním dojde k uzemnění, tedy přivedení V_{SS}. Tímto způsobem mohou být definovány čtyři různé adresy, více adres není pro aplikaci potřeba.

Teplotní senzory byly zvoleny tak, aby zesílený signál pokryl v co největší míře vstupní rozsah zesilovače. Z důvodu snadné kalibrace byla uvažována čidla s lineární závislostí odporu na teplotě. Voleno proto bylo mezi senzory PT100 a

PT1000, jež se liší velikostí odporu. V tabulce 1 jsou vyneseny hodnoty, na jejichž základě byla zvolena čidla PT1000. Napětí na čidlech při napájecím proudu 1 mA (maximální dovolený napájecí proud pro oba senzory) byla vypočtena z rovnice (1) Tučně zvýrazněné hodnoty v tabulce 1 jsou proto maximální hodnoty napětí, které lze na senzorech naměřit při 37 °C. Je patrné, že PT1000 je pro aplikaci vhodnější, protože osmkrát zesílený signál přesahuje velikost referenčního napětí integrovaného obvodu MCP3428. Na základě výpočtů byl vhodný napájecí proud stanoven na 0,4 mA a získaný signál je zesilován čtyřikrát. Hodnoty napětí na čidlech v popsaném případě jsou vyneseny do tabulky 2.

Tabulka 1: Porovnání klíčových vlastností termistorů PT100 a PT1000, převzato z [12]

teplota (°C)	PT100 jmenovitý odpor (Ω)	PT1000 jmenovitý odpor (Ω)	PT100 napětí při napájecím proudu 1 mA (V)	PT1000 napětí při napájecím proudu 1 mA (V)
35	113,6	1136	0,1136	1,136
36	114	1140	0,114	1,14
37	114,4	1144	0,1144	1,144
38	114,8	1148	0,1148	1,148
39	115,2	1152	0,1152	1,152
40	115,5	1155	0,1155	1,155

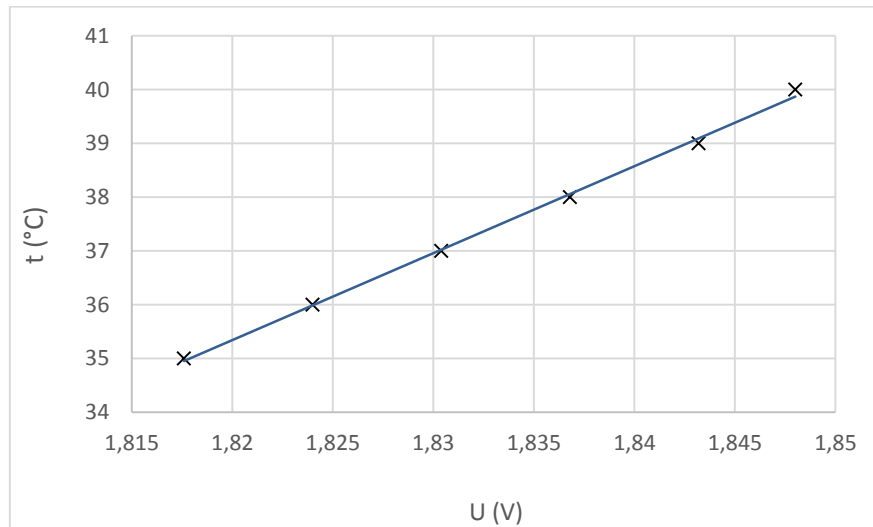
Tabulka 2: Napětí na čidlech PT1000 při napájení proudem 0,4 mA

teplota (°C)	napětí na senzoru	napětí po čtyřnásobném zesílení
35	0,4544	1,8176
36	0,456	1,824
37	0,4576	1,8304
38	0,4592	1,8368
39	0,4608	1,8432
40	0,462	1,848

Z rovnice (3) grafu závislosti teploty na zesíleném napětí (graf 1) lze dopočítat maximální detekovanou teplotu dané aplikace.

$$t = 161,74 \cdot U - 259,03 \quad (3)$$

Změřené napětí je porovnáváno s referencí 2,048 V, dosažením této hodnoty do rovnice (3) získáme maximální detekovanou hodnotu, což je 72,2 °C.



Graf 1: Závislost teploty na zesíleném napětí čidel PT1000

Přesnost aplikace je dána A/D převodníkem. Vzhledem k tomu, že je 16 bitový, nejmenší rozdíl mezi dvěma vzorky je dán rovnicí (4)

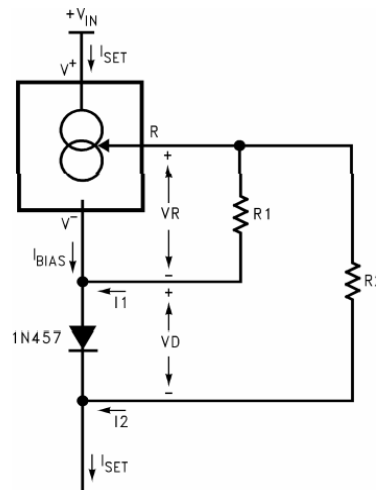
$$U_{ref}/2^{15} \quad (4)$$

Dosažením hodnoty $U_{ref} = 2,048$ do rovnice (4) dostáváme $6,25 \cdot 10^{-5}$. Změna napětí na čidlech při změně teploty o 1 °C je podle tabulky (2) $6,4 \cdot 10^{-3}$. Změna o 1 °C je navzorkována $6,4 \cdot 10^{-3}/6,25 \cdot 10^{-5}$, tedy 102 vzorky. Aplikace proto určuje aktuální teplotu s přesností na setiny °C.

Je však nutné vzít v úvahu nepřesnost způsobenou senzory. Při 25 °C je chyba čidla podle katalogového listu $\pm 0,43$ °C. Při 50 °C může být odchylka $\pm 0,55$ °C. Při teplotě 37 °C je proto třeba počítat s nepřesností $\pm 0,5$ °C. [17]

Napájení senzorů konstantním proudem zajišťuje proudová reference LM334 (Texas Instruments Incorporated, Dallas, USA). Proud je nastavitelný v rozmezí 2 μ A-10mA. Maximální napájecí proud senzorů je 1 mA, tato reference je pro ně proto vhodná. Napájecí napětí je 0,8 – 40 V. V určitém intervalu je shodné s A/D převodníkem, pro napájení obou komponentů může tedy být použito napětí stejné.

Nastavení výstupního proudu LM334 se provádí připojením různě velkých rezistorů. Výhodná je kompenzace závislosti výstupního proudu na teplotě, zajištěná připojením diody. Principem kompenzace je skutečnost, že odpor reference s rostoucí teplotou roste, zatímco u diody klesá. Příspěvky proudů z obou komponentů se mohou při určitém nastavení odporů vynulovat. Situace je znázorněna na obrázku 18. [13]



Obrázek 18: Zapojení proudové reference LM334 v režimu nulové závislosti výstupního napětí na teplotě.

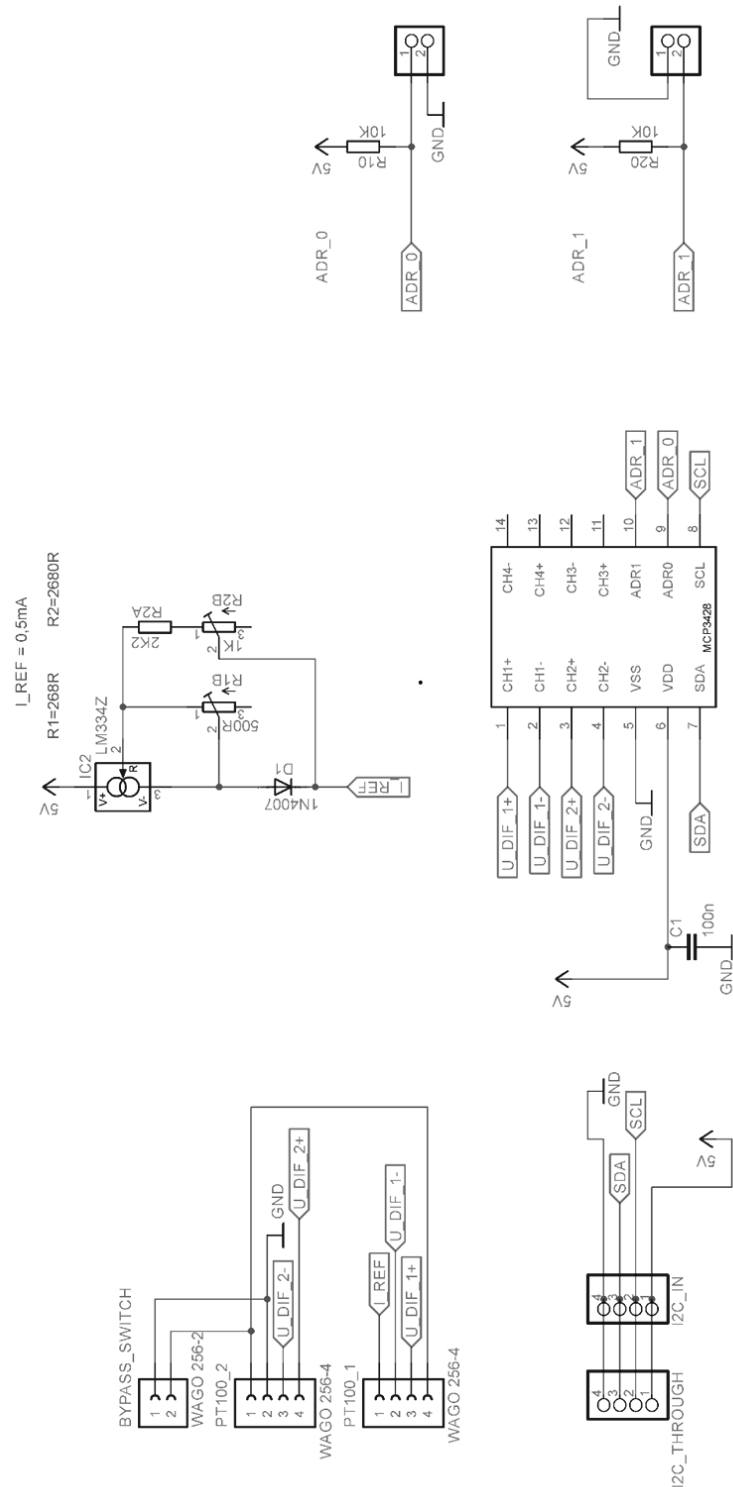
Převzato z [13].

V popisované aplikaci, kdy se předpokládá, že se okolní teplota reference pohybuje blízko 25 °C, platí pro zapojení v režimu kompenzace při použití diody 1N457 poměr odporů $R2 = 10R1$. Odpory jsou na desce realizovány různě velkými trimry, takže je možné operativní nastavení referenčního proudu při zachování poměru odporů. To je výhodné z důvodu možnosti experimentálního nastavení velikosti změny napětí na termistorech. [13]

Přesné nastavení referenčního proudu a poměru odporů bylo provedeno pomocí multimetru Agilent 34401A (Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, USA).

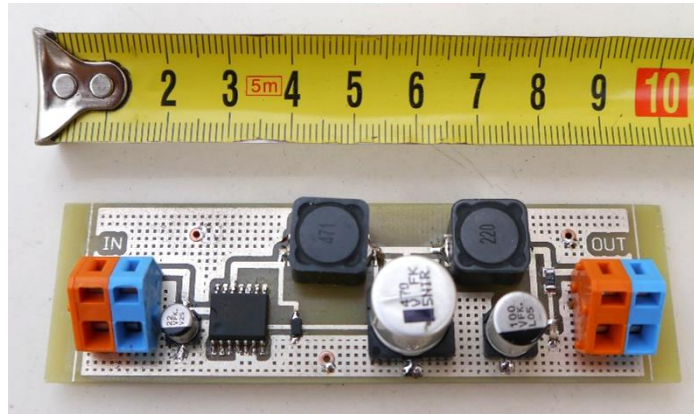
Řídící jednotka je vybavena dvěma identickými moduly pro zpracování signálu. Jsou označeny písmeny A a B. Modul A je určen pro zadanou aplikaci, modul B je připraven k budoucí obsluze pomocného topného adaptéru, případně pouze k připojení dalších teplotních senzorů.

Moduly obsahují konektory pro sériové připojení dvou termistorů. Pro případ připojení pouze jednoho čidla obsahuje deska konektorů pro připojení spínače, který nahrazuje chybějící senzor zkratem. Z modulu B je spínač vyveden na čelní panel řídicí jednotky, čímž je zajištěna možnost volby počtu připojených senzorů.



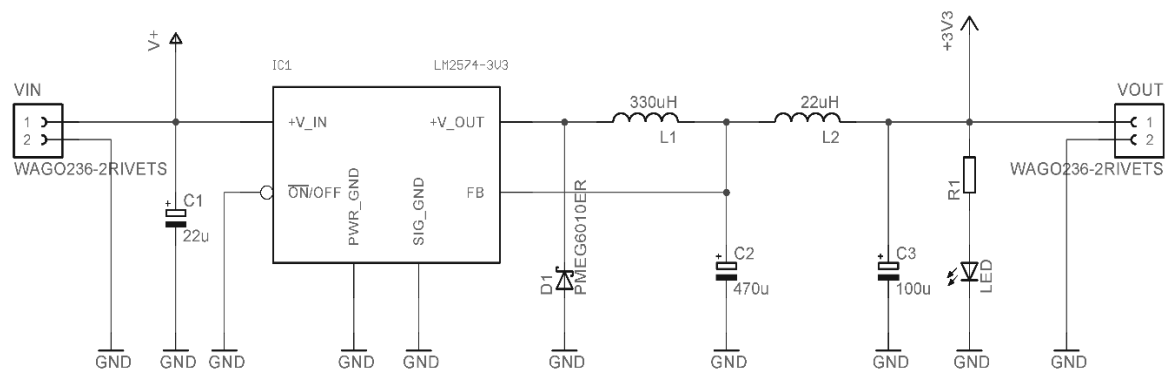
Obrázek 19: Schéma modulu pro zpracování signálu z termistorů

3.1.6 Modul se spínaným zdrojem



Modul je zdrojem napětí 5 V pro celý systém. Jeho základem je integrovaný obvod LM2574 (Texas Instruments Incorporated, Dallas, USA). Maximální vstupní stejnosměrné napětí čipu je 60 V. Je zapojen v režimu nastavitelného napěťového zdroje v rozmezí 1,2 – 55 V. Nastavení výstupního napětí 5 V je provedeno pomocí rezistoru R1. Výstupní proud je 0,5 A. Modul obsahuje L-C filtr pro snížení výstupního šumu. [14]

Vstupní napětí je přivedeno z 24V síťového zdroje. Výstupní napětí je vedeno do napájecího pinu Arduina.



Obrázek 20: Schéma napájecího modulu

3.1.7 Uživatelské rozhraní



Obrázek 21: Přední panel řídicí jednotky



Obrázek 22: Zadní panel řídicí jednotky

Uživatelské rozhraní je na předním panelu šasi tvořeno LCD displejem, hlavním spínačem pro zapnutí přístroje, zelenou LED diodou indikující zapnutí temperování, otočným přepínačem pro volbu režimu vytápění, spínačem pro volbu počtu připojených pomocných termistorů a konektory pro připojení topných těles a senzorů.

Zadní panel obsahuje konektor pro připojení napájecího napětí 24 V, USB konektor pro programování přístroje a pojistkové pouzdro s pojistkou na 3 A. Pojistka je připojena mezi konektor 24V napájecího napětí a hlavní spínač.

Hlavní spínač je dimenzován na proud 3 A, stejně jako pojistka. Sepnutí spínače způsobí přivedení 24 V na modul pro napájení adaptéru a na modul se spínaným zdrojem. Napájecí modul začne po sepnutí na výstupních pinech generovat 5 V, čímž dojde k zapnutí Arduina a tím i LCD displeje.

Pro aplikaci je použit podsvícený alfanumerický displej Winstar WH0802A1-YGH-ET. Obsahuje 2 řádky o osmi znacích. Je napájen napětím 5 V. Kontrast je trvale nastaven na maximální hodnotu, protože v aplikaci nebyl použit trimr, kterým je možné ho případně zmenšit. K ovládání displeje jsou použity příkazy z knihovny LiquidCrystal, která je k tomuto účelu určena. První

řádek displeje dává informaci o aktuální teplotě adaptéru, druhý řádek informuje o právě používaném topném programu a cílové teplotě. [15]

Otočným přepínačem pro volbu režimu vytápění je možné nastavit tři různé cílové teploty. V první poloze je topení trvale vypnuto. Tento stav je vhodný při programování řídicího modulu. V takovém případě je řídicí jednotka připojena přes USB port v zadním panelu k počítači a Arduino je zapnuté, ačkoliv hlavní spínač na předním panelu je vypnutý.

LED dioda je připojena k PWM pinu Arduina, jenž zahajuje vytápění. V případě, že se na pinu objeví napětí, dioda svítí. V případě, že dioda svítí, ale teplota adaptéru na displeji se nezvětšuje, je závada na modulu pro napájení topného adaptéru.

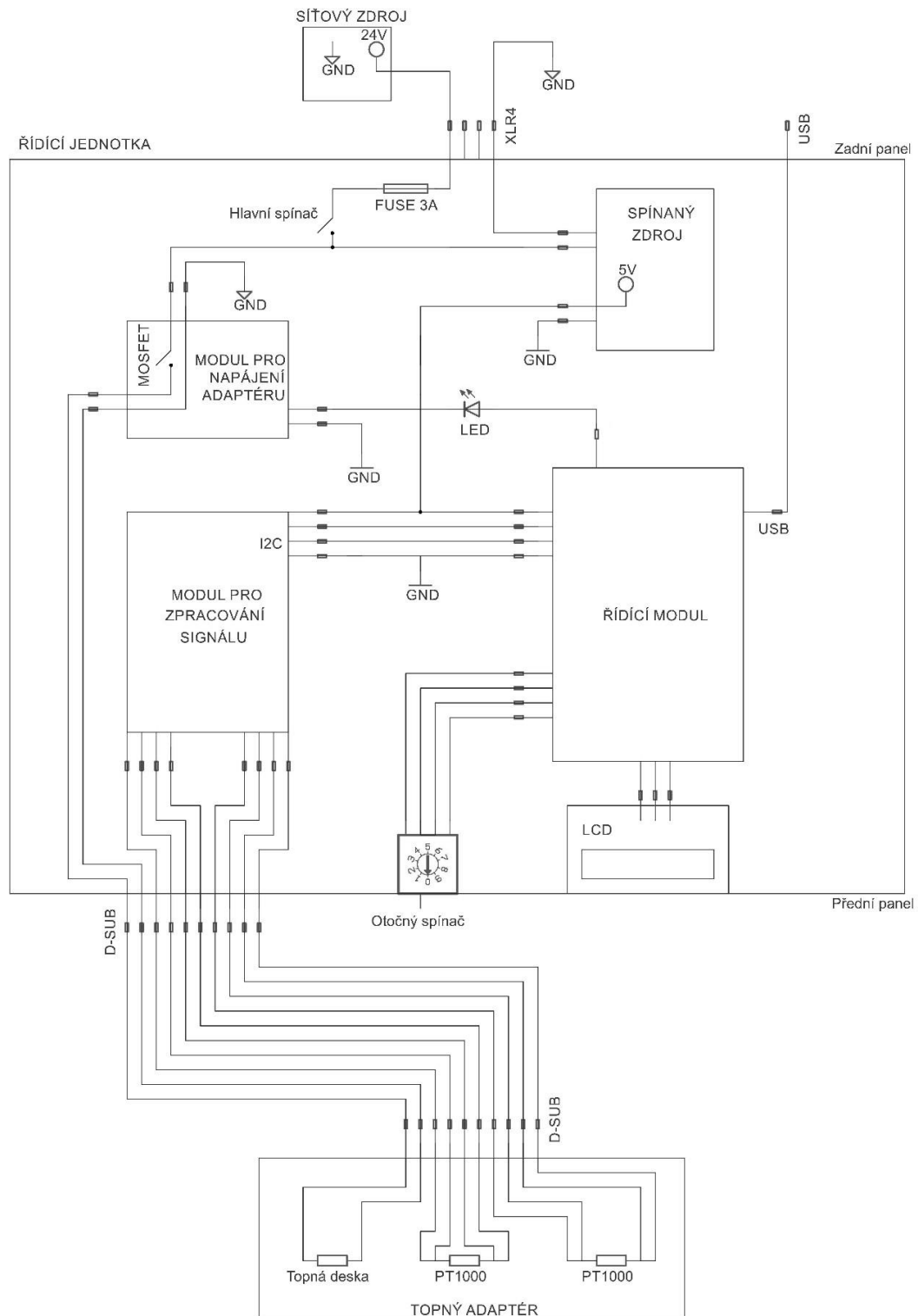
Spínač pro volbu počtu senzorů řeší případ, kdy je potřeba namísto dvou používat pouze jeden termistor. Princip funkce spínače je k dispozici v kapitole 3.1.5.

Přední panel obsahuje konektory D-SUB F15, D-SUB F9 a třípinový Neutrik XLR. D-SUB F15 slouží pro připojení stávajícího topného adaptéru a má stejnou funkci jako kombinace zbylých dvou konektorů. Z 15 pinů je použito 12, přičemž osm slouží pro čtyřvodičové zapojení termistorů a zbylé čtyři pro napájení topné desky. Napájecí proud je veden vždy přes dvojici pinů, aby se velikost proudu tekoucího přes jeden pin zmenšila na polovinu. Konektor D-SUB není primárně určen pro vedení velkých proudů, byl však použit kvůli svým malým rozměrům a zvýšení ergonomie výrobku, protože umožňuje připojení adaptéru jediným kabelem. D-SUB F9 je připraven pro budoucí připojení teplotních senzorů a Neutrik XLR dodává spínaných 24 V. Rozdělení celkové funkce do dvou konektorů zvyšuje variabilitu řídicí jednotky, protože může být nezávisle využita pouze jedna z funkcí.

USB konektor na zadním panelu šasi umožňuje programovat řídicí modul. Konektor obsahuje USB port z vnější i vnitřní strany panelu. Z vnitřní strany je z konektoru veden kabel do Arduina.

Schéma propojení všech komponentů řídicí jednotky, které souvisejí s hlavním topným adaptérem, je znázorněno na obrázku 23. Všechny komponenty

uživatelského rozhraní jsou ve schématu umístěny na příslušný panel šasi. Pouze LED dioda a hlavní spínač jsou kvůli přehlednosti znázorněny jinde.



Obrázek 23: Schéma propojení komponentů řídicí jednotky v souvislosti s topným adaptérem

3.1.8 Konstrukční uspořádání

Celková koncepce přístroje je modulární. Jednotlivé funkční celky – napájecí modul, řídicí modul, modul pro zpracování signálu, modul pro napájení topného adaptéru – jsou odpojitelné, tím pádem je možné je v případě poruchy vyměnit a v případě potřeby modifikovat nebo nahradit.

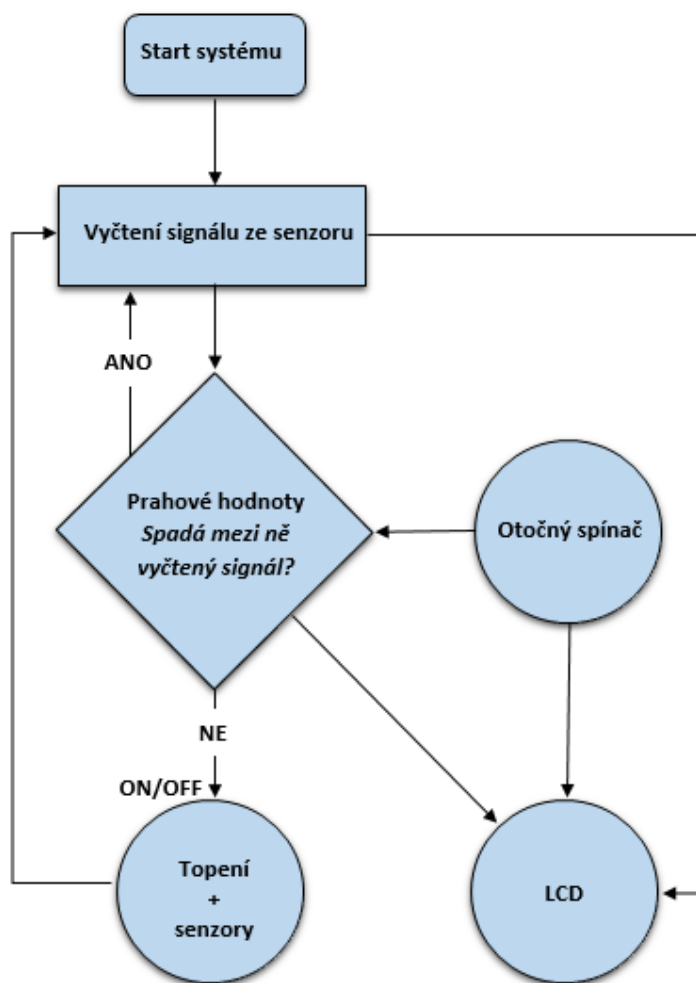
Celý systém je možné dimenzovat přidáním dalších vhodných modulů na ovládání více topných prvků. V takovém případě je nutné použít jiné šasi o adekvátní velikosti s rozšířeným uživatelským rozhraním.

Systém je aktuálně umístěn v hliníkové konstrukční krabici RL 17 220 od společnosti Fischer Elektronik GmbH (Ludenscheid, Německo) o rozměrech $160 \times 100 \times 100$ mm. Krabice obsahuje kolejnice pro uchycení desek v různých úrovních. Z tohoto důvodu je šířka všech modulů 100 mm.

Otvory v panelech pro komponenty uživatelského rozhraní byly zhotoveny CNC frézku podle návrhu provedeného v programu Autodesk Inventor Professional 2016 (Autodesk, Inc., San Rafael, USA).

3.2 Firmware

Firmware byl vytvořen v programu Arduino Software (IDE). Řídí vyčítání z modulu pro zpracování signálu a spínání výkonového obvodu modulu pro napájení adaptéru. Dále ovládá LCD displej na předním panelu šasi. Kromě programu pro ovládání hlavního adaptéru obsahuje firmware program pro připojení pomocného topení. Doladění programu na konkrétní aplikaci lze provést přes USB konektor v zadním panelu šasi. Schéma programu pro ovládání topného adaptéru a displeje je ukázáno na obrázku 24.



Obrázek 24: Schéma programu pro ovládání topného adaptéru a displeje

3.2.1 Vyčítání signálu z termistorů

A/D převodník MCP3428 je s Arduinem propojený přes sběrnici I²C, k programování byla použita knihovna Wire, která je k ovládání tohoto rozhraní určena.

První byte v zahájené komunikaci přes I²C definuje adresu součástky ve sběrnici. Adresa převodníku je nastavitelná díky vývodům adresovacích pinů na konektory. Bez aplikace propojek konektorů jsou piny napojeny na logickou úroveň 1. První čtyři bity z prvního byte jsou definované výrobcem, další tři jsou určené logickou úrovní adresovacích pinů. Osmý bit v běžné praxi definuje, zda má být

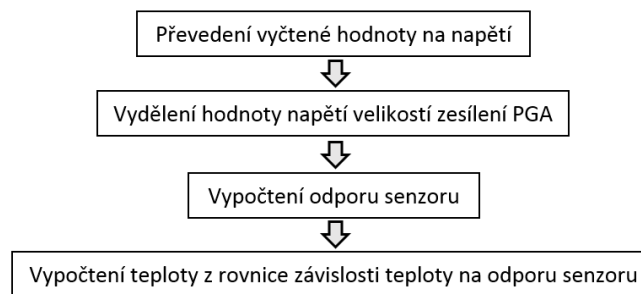
následující byte do součástky zapsán, nebo z ní vyčten. U Arduina však osmý bit nahrazuje zapisovací či vyčítací funkce, jejíž proměnnou první byte je. [16]

Druhý byte určuje parametry MCP3428 - druh konverze, výběr kanálu, frekvenci vzorkování, zesílení. [11]

Firmware obsahuje kódy pro vyčítání z modulu A (program A) a z modulu B (program B). Programy se liší adresním bytem. Na modulu A jsou oba adresní piny připojeny k 5 V, na modulu B je adresní pin 0 uzemněn. V obou programech je nastavena kontinuální konverze, největší rozlišení vzorkování (15 bitů), čtyřnásobné zesílení. Vyčítání je na obou modulech prováděno z kanálů 1 a 2, z nichž jsou vyvedeny vodiče na konektory předního panelu šasi. Mezi vyčtením z kanálu 1 a z kanálu 2 je nastavena nezbytná prodleva 180 ms. Perioda vyčítání je 500 ms. Navzorkovaná hodnota z modulu A je ukládána do proměnných XA1 pro kanál 1 a XA2 pro kanál 2. Pro modul B jsou zavedeny analogické proměnné XB1 a XB2. Všechny čtyři proměnné jsou zobrazovány v seriálovém okně prostředí Arduino IDE.

3.2.2 Výpočet teploty

Výpočet teploty probíhá podle blokového schématu na obrázku 25.



Obrázek 25: Blokové schéma výpočtu teploty

Výpočet je realizován rovnicemi (5) a (6). Výsledkem rovnice (5) je odpor senzoru. Vztah (6) je rovnicí grafu 2 (závislost teploty čidla PT1000 na jeho odporu) a jeho výsledkem je teplota. Proměnné v obou uvedených rovnicích náležejí kanálu 1 modulu A.

$$RAI = \text{konst} \cdot XAI / \text{zes_A/I_A} \quad (5)$$

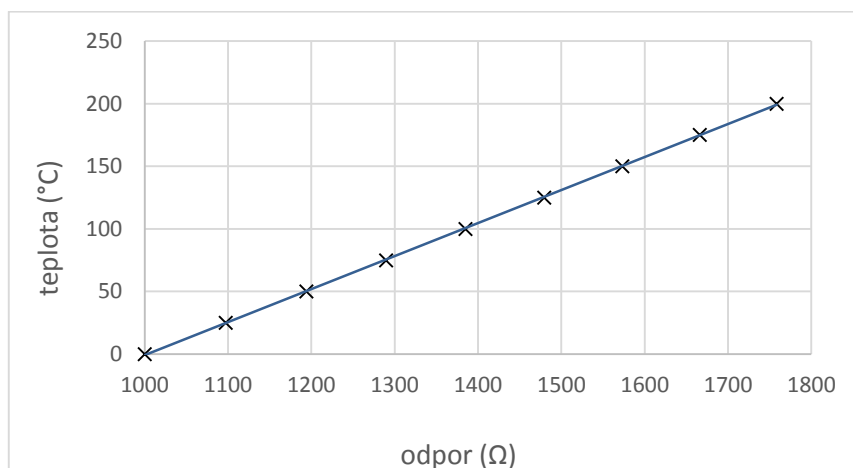
$$TAI = 0.2636 \cdot RAI - 264,52; \quad (6)$$

Převádění vyčtené hodnoty na napětí je popsáno v kapitole 3.1.5. V rovnici (5) představuje napětí výraz $konst \cdot XAI/zes_A$. Konstanta konst je definována jako výsledek rovnice (4). Proměnná XAI je vyčtená hodnota ze senzoru, zes_A je zesílení signálu. Vypočtení odporu probíhá podle rovnice (1) v kapitole 3.1.1. Pro tento účel jsou v programu zavedeny proměnné I_A a I_B , které definují velikost proudové reference modulů A a B.

Hodnoty pro vytvoření grafu 2 jsou vyneseny v tabulce 3. Jsou převzaty z katalogového listu použitých senzorů SA10200542.

Tabulka 3: Závislost odporu senzoru PT1000 na teplotě, převzato z [17]

teplota (°C)	odpor (Ω)
0	1000
25	1097,35
50	1193,97
75	1289,87
100	1385,06
125	1479,51
150	1573,25
175	1666,27
200	1758,56



Graf 2: Závislost teploty senzoru PT1000 na jeho odporu

3.2.3 Regulace vytápění

Regulace je realizována definováním hystereze požadované teploty adaptéru. K tomuto účelu slouží konstanty MAX# a MIN#, kde # značí číslo temperujícího programu. S nastavenými hodnotami těchto konstant je periodicky porovnávána proměnná *Temp*, která je průměrem vypočtené teploty obou senzorů modulu A. V případě, že je hodnota *Temp* menší než MIN#, je topný obvod sepnut. Když *Temp* překročí hodnotu MAX#, je topení vypnuto. Výkon topení určuje konstanta PWM_val, jejíž definování v rozsahu 0 – 255 určuje míru otevření výkonového MOSFETU. Při hodnotě 0 je tranzistor uzavřen, při 255 plně otevřen.

V programu 1, kde je požadovaná teplota 37 °C, je hodnota MIN1 nastavena na 36 °C a MAX1 na 36,3 °C. Topení sepne, jakmile senzory detekují 36 °C, a temperuje tak dlouho, dokud není detekováno 36,3 °C. Po vypnutí však stále dodává adaptéru dostatek energie, aby ho vytopil alespoň na 37 °C. Situace je znázorněna na grafu 3. Tento typ regulace způsobuje, že na počátku temperování, kdy je adaptér ohříván z vychladlého stavu, trvá určitou dobu (v řádech jednotek minut), než se ustálí interval, v němž se výsledná teplota pohybuje, z důvodu velkého rozehřátí topné desky. Jedná se o nenáročný způsob regulace a experimentální ověření prokázalo, že je pro danou aplikaci dostačující. Hodnoty MIN1 a MAX1 byly stanoveny na základě experimentálního měření.

3.2.4 Topné programy

Firmware definuje tři režimy vytápění. Změna programu je realizována otočným přepínačem na předním panelu šasi. Módy se liší v hodnotách konstant MAX# a MIN#. Princip změny režimu spočívá v uzemnění jednoho ze tří digitálních pinů, které jsou trvale naprogramovány na generování logické úrovně jedna. Pomocí přepínače jsou piny střídavě připojovány k zemi, čímž se jejich logická úroveň mění na nulu. Výskyt nuly je podnětem pro zahájení určitého režimu vytápění. V případě, že se nevyskytuje žádná nula, je topení vypnuto.

3.2.5 LCD displej

Displej je programován pomocí příkazů z knihovny LiquidCrystal. V případě, že nejsou připojeny žádné senzory, zobrazuje displej zprávu „no signal“. V praxi je tento stav navozen tehdy, když hodnoty vyčtené ze senzorů spadají do intervalu $\langle -2, 2 \rangle$. V případě, že senzory připojeny jsou, je do prvního řádku periodicky vyčítán průměr jejich teplot *Temp*.

Do druhého řádku displeje se periodicky vyčítá stav otočného přepínače pro volbu topného režimu. V případě, že žádný z příslušných digitálních pinů není ve stavu logické nuly, zobrazí se nápis „Off“, který signalizuje vypnutí topného obvodu. V případě výskytu logické jedničky se zobrazí „P#“, kde P je zkratkou pro program a # jeho číslo. Za dvojtečkou následuje cílová teplota programu.

4 Výsledky

4.1 Funkce přístroje

Výsledkem práce je systém, který udržuje v okolí PFFC komory nastavitelnou konstantní teplotu. K zapnutí řídicí jednotky dochází hlavním spínačem na předním panelu šasi. V případě, že k jednotce není připojen hlavní topný adaptér, zobrazuje se na displeji zpráva „no signal“. Pokud adaptér připojen je, zobrazuje displej jeho aktuální teplotu. K zahájení vytápění dochází otočením spínače na předním panelu šasi, což způsobí volbu jednoho ze tří vytápěcích programů. Ve druhém řádku displeje se zobrazuje informace o stavu spínače a požadovaná teploty. Zahájení vytápění je signalizováno rozsvícením LED diody na předním panelu. Řídicí jednotka obsahuje konektory pro připojení pomocného topného zařízení. Programování systému je umožněno přes USB port v zadním panelu.

Topný adaptér rozměrově vyhovuje dané komoře a lze jej použít během mikroskopování, protože je dimenzován na prostor pro 96 jamkovou miskou. K ohřátí adaptéru z 27 °C na 40 °C dochází během 60 s. (viz graf 3).

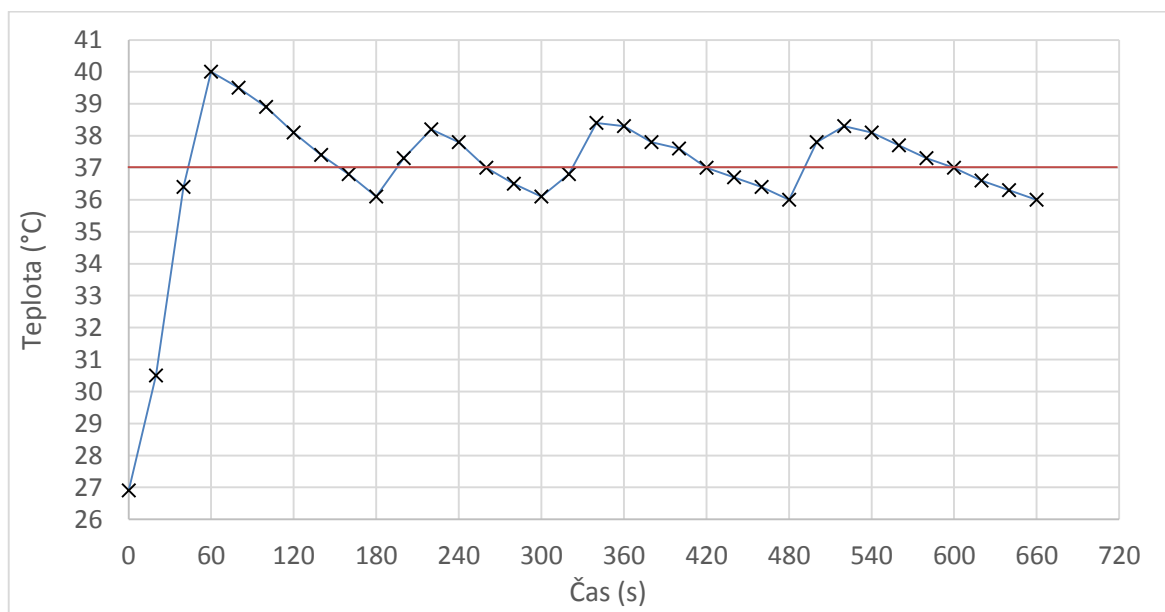
4.2 Laboratorní a experimentální ověření

4.2.1 Laboratorní ověření

Laboratorní ověření funkčnosti bylo provedeno za použití termokamery FLIR C2 (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, USA). Topný systém byl nastaven na program s cílovou teplotou 37 °C (program 1). Na počátku experimentu byl adaptér vychladlý. Od zapnutí přístroje bylo topení každých 20 sekund snímáno termokamerou a zároveň byla zaznamenána aktuální teplota z displeje řídicí jednotky. Teplota v čase byla vynesena do grafu 3 a porovnána s hodnotami na příslušných snímcích z kamery.

Tabulka 4: Teplota adaptéru v čase při laboratorním ověření

čas (s)	teplota (°C)	čas (s)	teplota (°C)	čas (s)	teplota (°C)
0	26,9	220	38,2	440	36,7
20	30,5	240	37,8	460	36,4
40	36,4	260	37	480	36
60	40	280	36,5	500	37,8
80	39,5	300	36,1	520	38,3
100	38,9	320	36,8	540	38,1
120	38,1	340	38,4	560	37,7
140	37,4	360	38,3	580	37,3
160	36,8	380	37,8	600	37
180	36,1	400	37,6	620	36,6
200	37,3	420	37	640	36,3

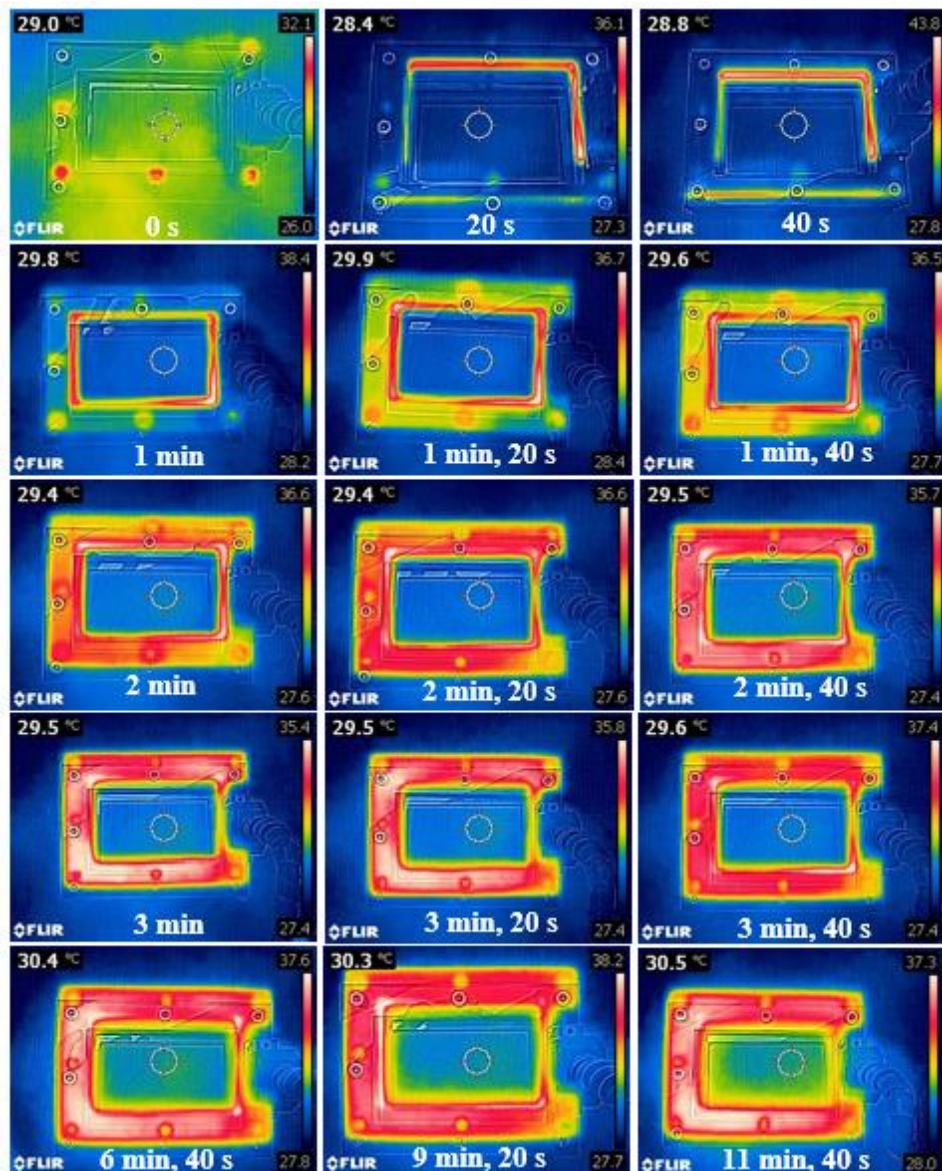


Graf 3: Teplota adaptéru v čase při laboratorním ověření

Z grafu 1 je patrné, že při nynější regulaci začíná přibližně po dvou minutách od zapnutí systému teplota těla adaptéru oscilovat kolem hodnoty 37 °C s výchytkou ± 1 °C. Z hodnot, které byly naměřeny po uplynutí druhé minuty, byla podle rovnice (7) spočítána průměrná hodnota teploty 37,2 °C.

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (7)$$

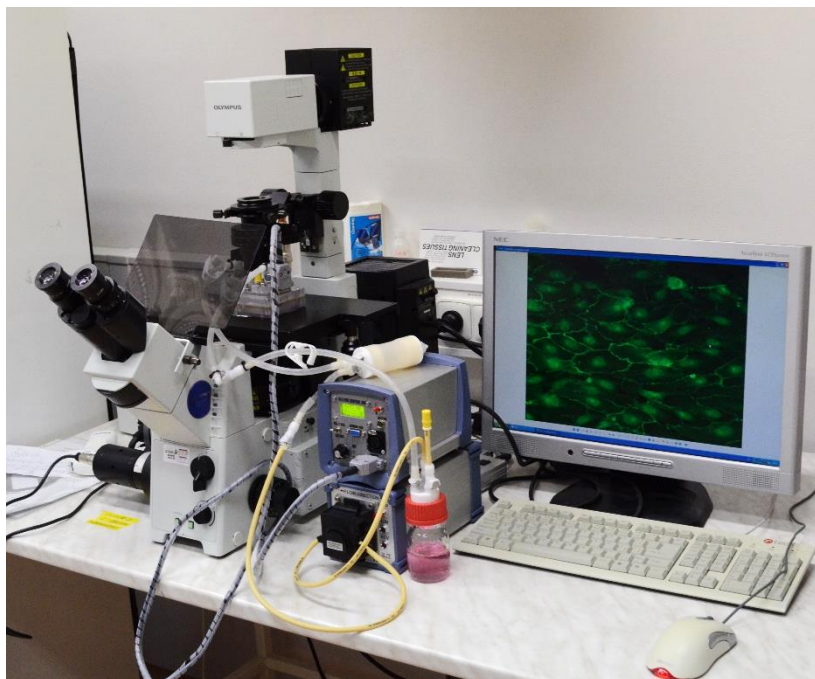
Výstup z ověření termokamerou je zobrazen na obrázku 26. Čas pořízení fotografie od spuštění systému je zaznamenán vždy v její spodní části. Průměrná teplota adaptéru na začátku měření je podle první fotografie 27 °C. Adaptér vyzařuje homogenně přibližně po třech minutách plného výkonu. Nehomogenní část tvoří pouze oblast, kde je zabudovaný konektor. Po čtyřech minutách dosahuje teplota adaptéru 37 °C, přičemž tento stav přetrvává i po jedenácti minutách od spuštění.



Obrázek 27: Záznam experimentálního ověření funkce termokamerou

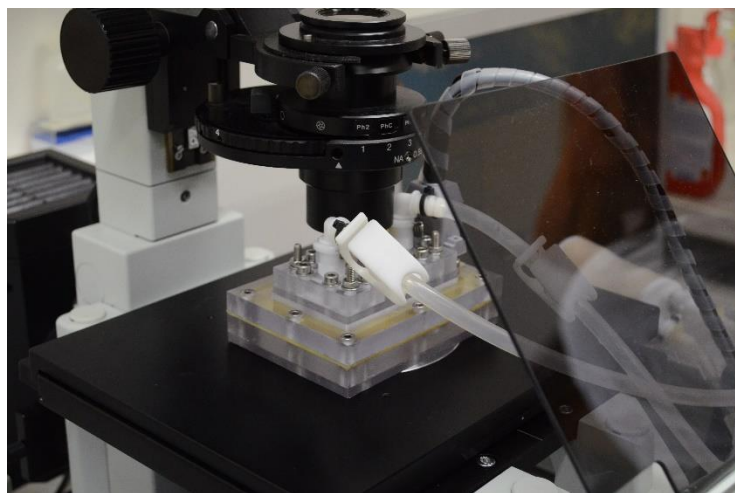
Vývoj teplot se nezměnil ani v následujících třech hodinách, během nichž byla aktuální teplota na displeji řídicí jednotky průběžně sledována.

4.2.2 Experimentální ověření

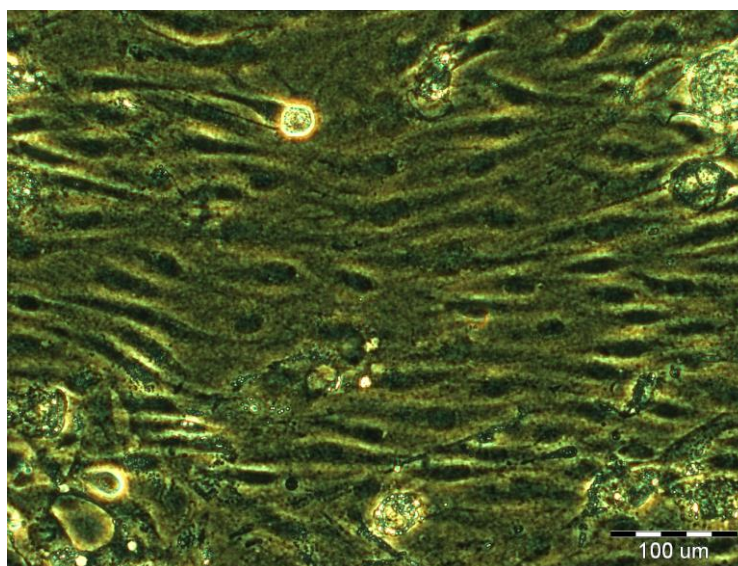


Obrázek 28: Experimentální ověření topného systému s kultivační komorou ve fluorescenčním mikroskopu

V rámci experimentu byly použity endotelové buňky HUVEC (human umbilical vein endothelial cells), které byly nasazeny do dynamické kultivační komory. Kultivace probíhala po dobu 24 hodin s proměnlivou zátěží od 2,5 do 10 dyn/cm². Systém pro temperování dokázal po celou dobu udržet stabilní teplotu 37 °C. Na obrázku 29 je zobrazeno umístění adaptéru ve fluorescenčním mikroskopu Olympus IX-71 společně s kultivační komorou. Obrázek 28 zachycuje kompletní sestavu experimentu - mikroskop, temperující systém a perfuzní okruh. Obrázek 30 je nativní fotografie buněk z mikroskopu pořízená na konci experimentu.



Obrázek 29: Umístění adaptéru ve fluorescenčním mikroskopu společně s kultivační komorou



Obrázek 30: Kultivované endotelové buňky

5 Diskuze

Navržený systém se během testování osvědčil a splňuje všechny požadavky definované v kapitole 3.

Regulace teploty je aktuálně nastavena tak, že teplota adaptéru periodicky osciluje okolo požadované hodnoty v rozmezí ± 1 °C, přičemž nepřesnost čidel může interval zvětšit až na $\pm 1,5$ °C. Tento stav je pro danou aplikaci dostačující. Nejjednodušší způsob zmenšení intervalu je zkrácení doby sepnutí topného obvodu. To lze nejnadhěji realizovat zmenšením hystereze maximální a minimální teploty. V případě plastového prototypu adaptéru, který sloužil pouze pro ověření funkčnosti návrhu, není potřeba regulaci dále vylepšovat.

Ovládání přístroje je při použití pouze hlavního topného adaptéru snadné, jedná se jen o připojení k síti, propojení jednotky s adaptérem, zapnutí přístroje a nastavení požadované teploty. V případě pomocného adaptéru je z uživatelského hlediska určitý prostor pro vylepšení. Na LCD displeji se zobrazují informace pouze o hlavním adaptéru, pomocný topný prvek je nutné monitorovat pomocí počítače, což kontrolu komplikuje. Vylepšením by mohlo být upravení řídicího firmwaru tak, aby na displeji zobrazoval informace o obou adaptérech, a to ideálně pouze v případě, že jsou připojeny oba.

Dalším nedostatkem řídicí jednotky je nemožnost vypnutí přístroje tehdy, když je připojen k počítači. Platforma Arduino toto neumožňuje. Tato skutečnost může zapříčinit situaci, že uživatel zapne přístroj připojením k PC, nastaví otočným spínačem mód vytápění, rozsvítí se LED indikující zahájení vytápění, ale přístroj temperovat nezačne. Na vině je v této situaci nepřipojení přístroje ke zdroji 24 V. Navíc je však nutné zapnout hlavní spínač systému, který napájecí napětí přivádí k modulu se spínaným zdrojem a do výkonového obvodu. Jednotka neobsahuje žádný signalizační prvek, který by připojení k síti potvrdil. Původně tuto funkci plnila LED, avšak její funkci následně nahradil displej. Ten se rozsvítí po zapnutí přístroje. Dioda tudíž byla využita jinak, a to pro signalizaci zahájení vytápění. Problém by vyřešila další LED, která by byla napájena napětím z uzlu mezi hlavním spínačem a modulem se spínaným

zdrojem. Aktuálním nejlepším řešením je použití přístroje, aniž by byl připojen k PC, čímž je riziko vzniku nedorozumění vyloučeno.

Dalším nápadem na vylepšení je zabudování signalizace nechtěného výkyvu teploty adaptéru. Tato signalizace, například akustická, by oznamovala, že teplota, ačkoliv má být stabilizovaná na požadované hodnotě, má hodnotu jinou, čímž je ohrožen experiment. Program výstrahy by se však musel aktivovat až po určité době od zapnutí přístroje, aby nedocházelo k signalizaci tehdy, když se adaptér teprve zahřívá na žádanou teplotu.

Ergonomie adaptéru je vyhovující. Prototyp prokázal, že návrh topného prvku je pro danou aplikaci vhodný. Vyhovuje umístění spojovacích komponentů, senzorů i konektoru. Narušení homogenity vyzařování konektorem v praxi nevadí, čímž byly vyvráceny původní obavy. Z důvodu jednoduchosti manipulace s adaptérem je konektor navzdory zmíněnému negativu výhodou. Topná deska je funkční a má dostatečný výkon. Jediným vylepšením pro budoucí hliníkovou verzi, jež zajistí ještě stabilnější udržení teploty, by mohlo být prohloubení zářezu pro kabely ve spodním díle o 1 mm. V prototypu jsou kabely těsně stlačeny a do jisté míry hrozí jejich popraskání. Zároveň je zbytečně namáhán horní díl, který na kabely tlačí, čímž se nepatrně prohýbá.

6 Závěr

Výsledkem bakalářské práce je jednoduše ovladatelný systém, jenž umožňuje temperování PPFC kultivačních komor mimo temperovaný inkubátor. Byl proveden návrh a realizace hardwarové i softwarové části. Hardware sestává z topného adaptéru a řídicí jednotky. Adaptér zajišťuje udržování stabilní teploty v těsném okolí komory. Rozměry adaptéru vyhovují požadavku na možnost aplikace v mikroskopu s prostorem na 96 jamkovou misku. Senzoriku zajišťuje dvojice integrovaných teplotních čidel PT1000. Temperování je realizováno deskou s topným meandrem. Prototyp byl zhotoven z polykarbonátu, na základě pozitivních praktických ověření jeho funkce bude návrh realizován ve finální podobě z hliníku.

Řídicí jednotka sestává z elektroniky, jež je uložena ve vhodné přístrojové krabici, a uživatelského rozhraní na panelech šasi. Rozhraní umožňuje připojit a ovládat dva nezávislé topné adaptéry. Temperování je realizováno ve třech nastavitelných režimech. Aktuální informace o stavu systému jsou zobrazovány na LCD displeji na předním panelu jednotky.

Firmware zajišťuje regulaci teploty uvnitř adaptéru a podává informace o stavu systému. Na základě signálu z termistorů vypočítává a zobrazuje aktuální teplotu na displeji. Ten zároveň obsahuje informace o zvoleném režimu vytápění.

Funkce systému byla laboratorně ověřena pomocí termovizní kamery, kdy po dobu jedenácti minut od zapnutí přístroje byl každých 20 sekund snímán topný adaptér a byla zapisována hodnota aktuální teploty z displeje. Během následujících tří hodin byla aktuální teplota kontrolována. Měření prokázalo, že teplota topení je stabilně udržována v intervalu 37 ± 1 °C, což je pro zadaný účel vyhovující. Experimentální ověření bylo realizováno 24 hodinovou aplikací na PPFC komoru s endotelovými buňkami. Systém dokázal po celou dobu udržet stabilní teplotu 37 °C. Experimentem byla zároveň ověřena vhodná ergonomie produktu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] WONG, Andrew, Pierre LLANOS a Nickolas BORODA. *Cellular and molecular bioengineering*. New York: Springer. ISBN 1865-5025.
- [2] MURAYAMA, Yuichi, Yoshiaki SUZUKI, Fernando VINUELA, Makoto KAIBARA, Kimi KUROTOBI, Masaya IWAKI a Toshiaki ABE. *Development of a Biologically Active Guglielmi Detachable Coil for the Treatment of Cerebral Aneurysms. Part I: In Vitro Study* [online]. 1999 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.ajnr.org/content/20/10/1986.full.pdf+html>
- [3] PECON [online]. 2012. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: http://www.pecon.biz/?page_id=2624
- [4] KYODO international Inc. [online]. 2015. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.kyodo-inc.co.jp/english/bio/chamlide/index.html>
- [5] Heating: Application Fundamentals. 1998. Warner instruments [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: https://www.warneronline.com/product_info.cfm?name=Heating:%20Application%20Fundamentals&id=747
- [6] Products. 2007. Solent Scientific [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.solentsci.com/products.htm>
- [7] *ELCHEMCo: Zalévací hmoty pro elektroniku a elektrotechniku* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/rubriky/zalovací-hmoty-pro-elektroniku-a-elektrotechniku/>
- [8] Arduino. Arduino [online]. 2015 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [9] 4N25M, 4N26M, 4N27M, 4N28M, 4N35M, 4N36M, 4N37M, H11A1M, H11A2M, H11A3M, H11A4M, H11A5M General Purpose 6-Pin Phototransistor Optocouplers. *Fairchild* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/products/optoelectronics/phototransistor-optocouplers/phototransistor-output-dc-sensing-input/4N35M.html>
- [10] IRFZ44N. <http://www.irf.com/> [online]. 2001 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfz44n.pdf>
- [11] MCP3426/7/8. Microchip [online]. 2009 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22226a.pdf>
- [12] Snímače Pt1000 s teplotním koeficientem $T_k = 3850 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. *Regmet* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://regmet.cz/download/zapojeni/Pt1000.pdf>
- [13] LM134/LM234/LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources. Texas Instruments [online]. 2014 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm334.pdf>

- [14] LM2574x SIMPLE SWITCHER® 0.5-A Step-Down Voltage Regulator. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm2574.pdf>
- [15] WH0802A1. *Winstar* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.winstar.com.tw/products_detail_ov.php?lang=en&ProID=13
- [16] MCROBERTS, Michael. *Beginning Arduino*. New York: Distributed to the book trade worldwide by Springer Science Business Media, LLC., c2010. Technology in action series. ISBN 14-302-3240-4.
- [17] Specification of pt thermal sensor. *GME* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/530/110/platinove-teplotni-cidlo-pt1000-1000r-datasheet-1.pdf>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Schéma PFFC. Převzato a upraveno z [2].....</i>	<i>9</i>
<i>Obrázek 2: The Heating Frame 2000 a TempControler 2000, převzato z [3].....</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 3: Topný systém Chamlide TC, KYODO INTERNATIONAL INC., převzato z [4].....</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 4: Topný systém společnosti Warner Instruments, LLC, převzato z [5]</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 5: 37° Incubation Chamber, Solent Scientific Limited, převzato z [6].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 6: Prototyp topného systému</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 7: Prototyp topného adaptéru</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 8: Uspořádání vodičů uvnitř adaptéru</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 9: Realizace čtyřvodičového zapojení senzorů</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 10: Topná deska</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 11: Řídící jednotka</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 12: Blokové schéma řídicí jednotky.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 13: Řídící modul</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 14: Schéma řídicího modulu.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 15: Modul pro napájení topného adaptéru.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 16: Schéma modulu pro napájení topného adaptéru.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 17: Modul pro zpracování signálu z termistorů</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 18: Zapojení proudové reference LM334</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 19: Schéma modulu pro zpracování signálu z termistorů</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 20: Schéma napájecího modulu.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 21: Přední panel řídicí jednotky, Obrázek 22: Zadní panel řídicí jednotky.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 23: Schéma propojení komponentů řídicí jednotky v souvislosti s topným adaptérem.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 24: Schéma programu pro ovládání topného adaptéru a displeje</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
<i>Obrázek 25: Blokové schéma výpočtu teploty.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 26: Vývoj teploty topného adaptéru v čase při spuštěném vytápění</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 27: Záznam experimentálního ověření funkce termokamerou... Chyba! Záložka není definována.</i>	
<i>Obrázek 28: Experimentální ověření topného systému ve fluorescenčním mikroskopu</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 29: Umístění adaptéru ve fluorescenčním mikroskopu společně s kultivační komorou</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 30: Kultivované endotelové buňky.....</i>	<i>43</i>
<i>Graf 1: Závislost teploty na zesíleném napětí čidel PT1000.....</i>	<i>26</i>
<i>Graf 2: Závislost teploty senzoru PT1000 na jeho odporu</i>	<i>36</i>
<i>Graf 3: Teplota adaptéru v čase při laboratorním ověření</i>	<i>40</i>

Seznam tabulek

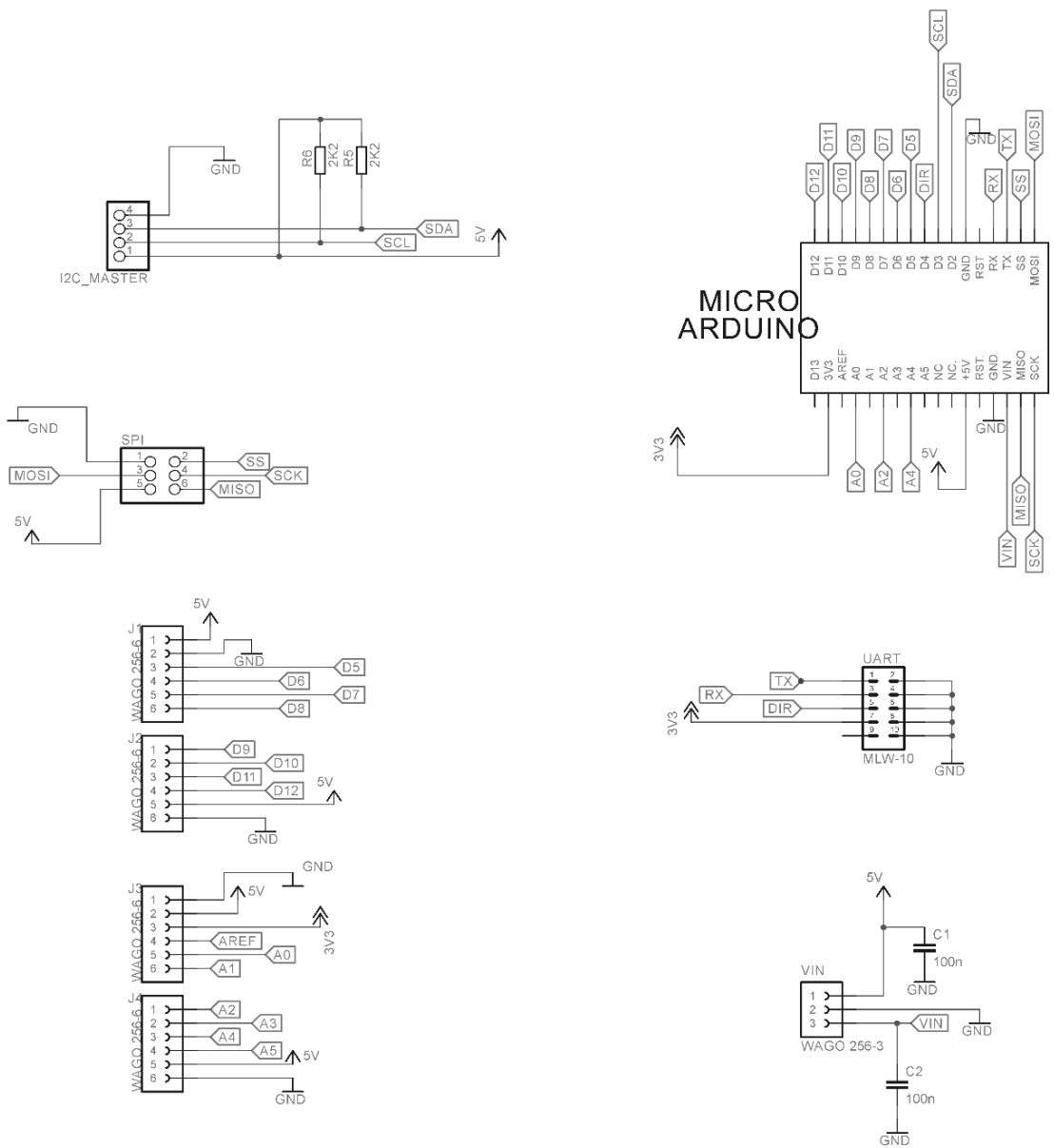
<i>Tabulka 1: Porovnání klíčových vlastností termistorů PT100 a PT1000, převzato z [12]</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 2: Napětí na čidlech PT1000 při napájení proudem 0,4 mA</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 3: Závislost odporu senzoru PT1000 na teplotě, převzato z [17]</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 4: Teplota adaptéru v čase při laboratorním ověření</i>	<i>40</i>

Seznam příloh

P1.1 Konstrukční řešení	Schéma řídicího modulu
P1.2 Konstrukční řešení	Osazovací výkres a DPS řídicího modulu
P1.3 Konstrukční řešení	Schéma modulu pro napájení topného adaptéru
P1.4 Konstrukční řešení	Osazovací výkres a DPS modulu pro napájení topného adaptéru
P1.5 Konstrukční řešení	Schéma modulu pro zpracování signálu z termistorů
P1.6 Konstrukční řešení	Osazovací výkres a DPS modulu pro zpracování signálu z termistorů
P2.1 Konstrukční řešení	Schéma propojení modulů
P2.2 Konstrukční řešení	Seznam součástek mimo DPS
P3.1 Firmware	

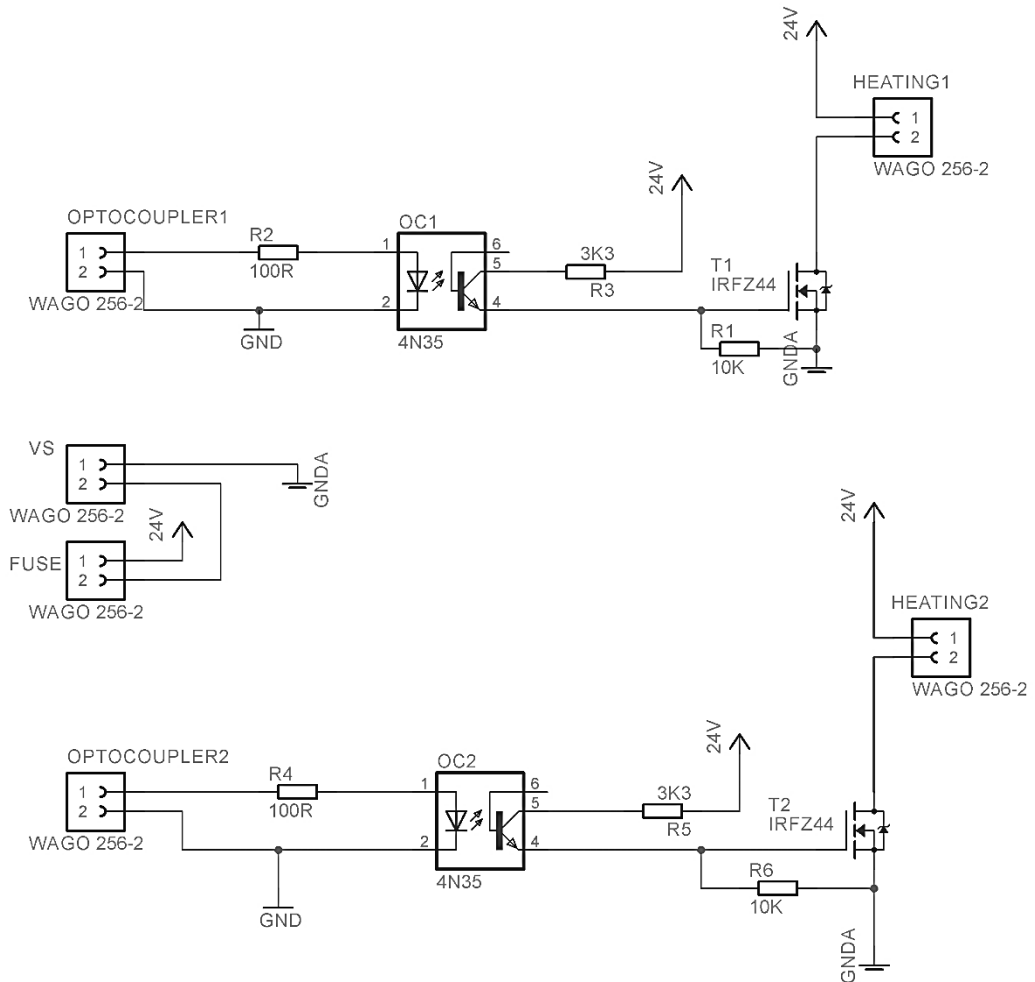
P1.1 – konstrukční řešení

Schéma řídicího modulu



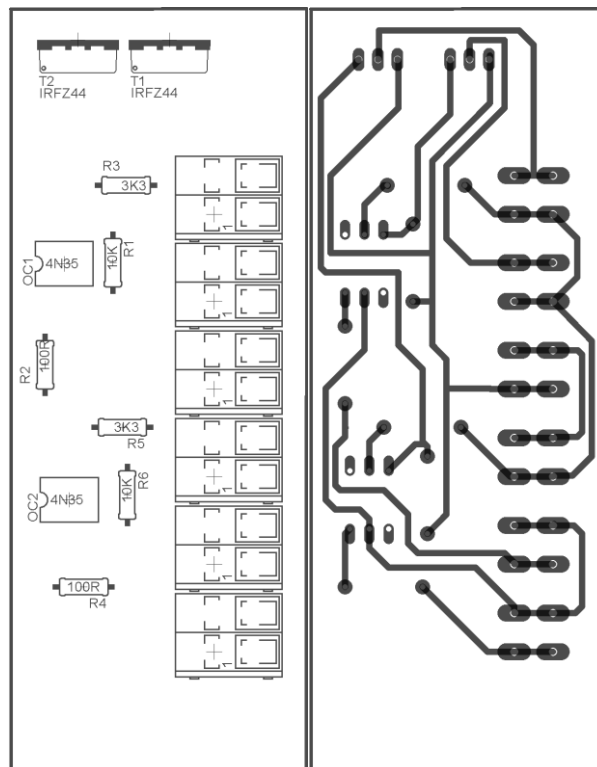
P1.3 – konstrukční řešení

Schéma modulu pro napájení topného adaptéru



P1.4 – konstrukční řešení

Osazovací výkres a DPS modulu pro napájení topného adaptéru



Seznam součástek:

T1, T2 ... IRFZ44

R1, R6 ... 10 k Ω

R2, R4 ... 100 Ω

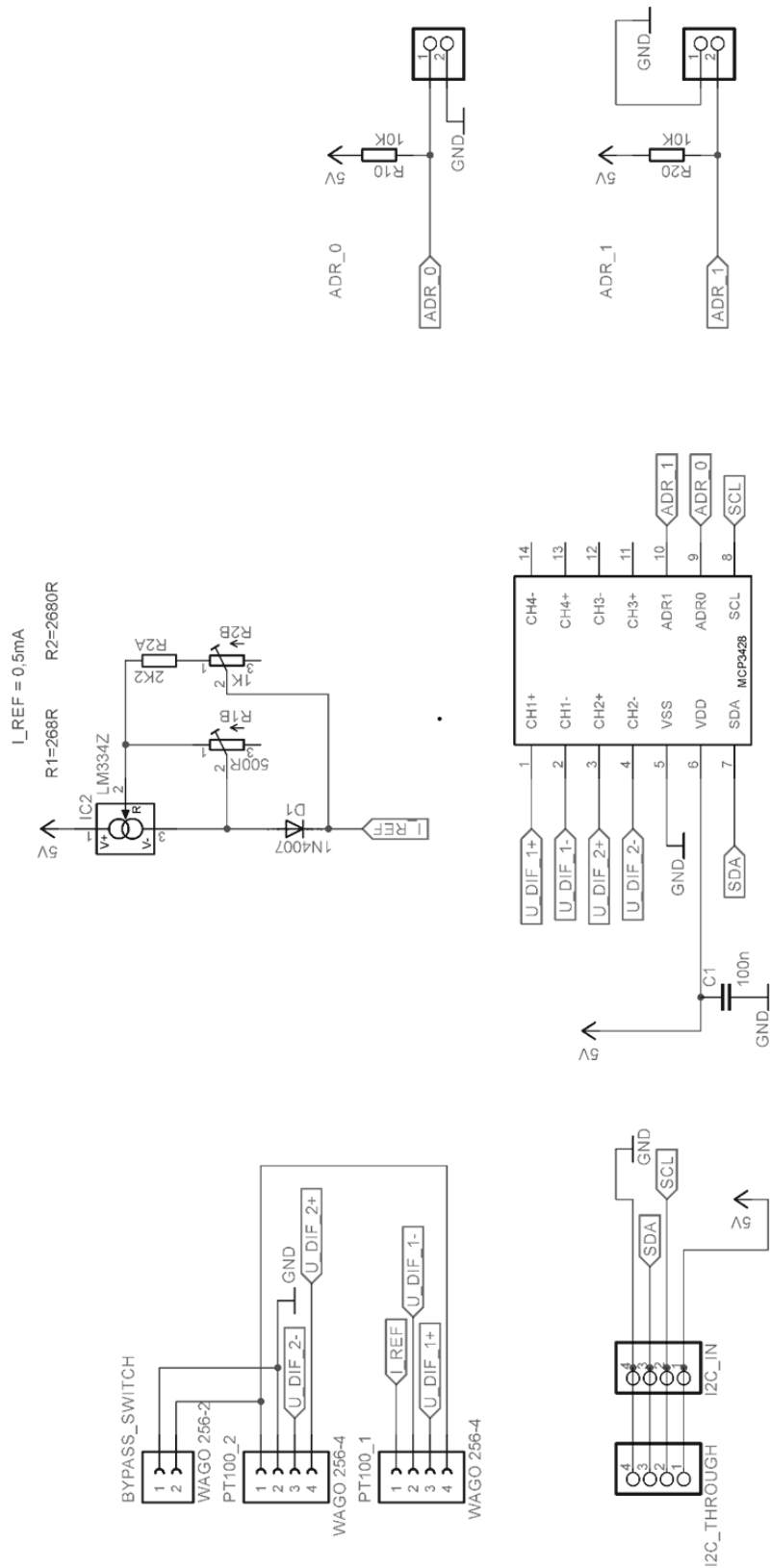
R3, R5 ... 3,3 k Ω

OC1, OC2 ... 4N35

Wago 236

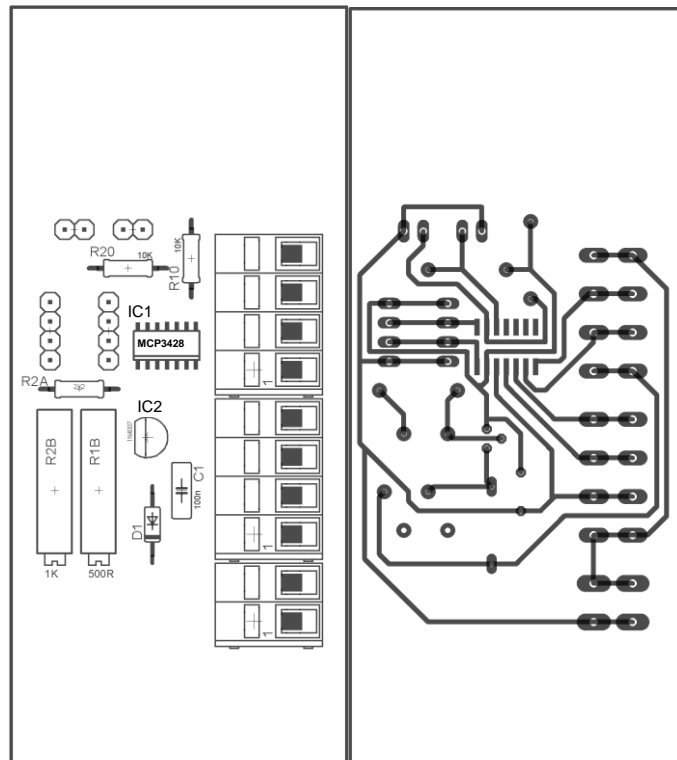
P1.5 – konstrukční řešení

Schéma modulu pro zpracování signálu z termistorů



P1.6 – konstrukční řešení

Osazovací výkres a DPS modulu pro zpracování signálu z termistorů



Seznam součástek:

R2A ... 2,2 kΩ

R10, R20 ... 10 kΩ

R1B ... 500 Ω

R2B ... 1 kΩ

D1 ... 1N4007

C1 ... 100 nF

IC1 ... MCP3428

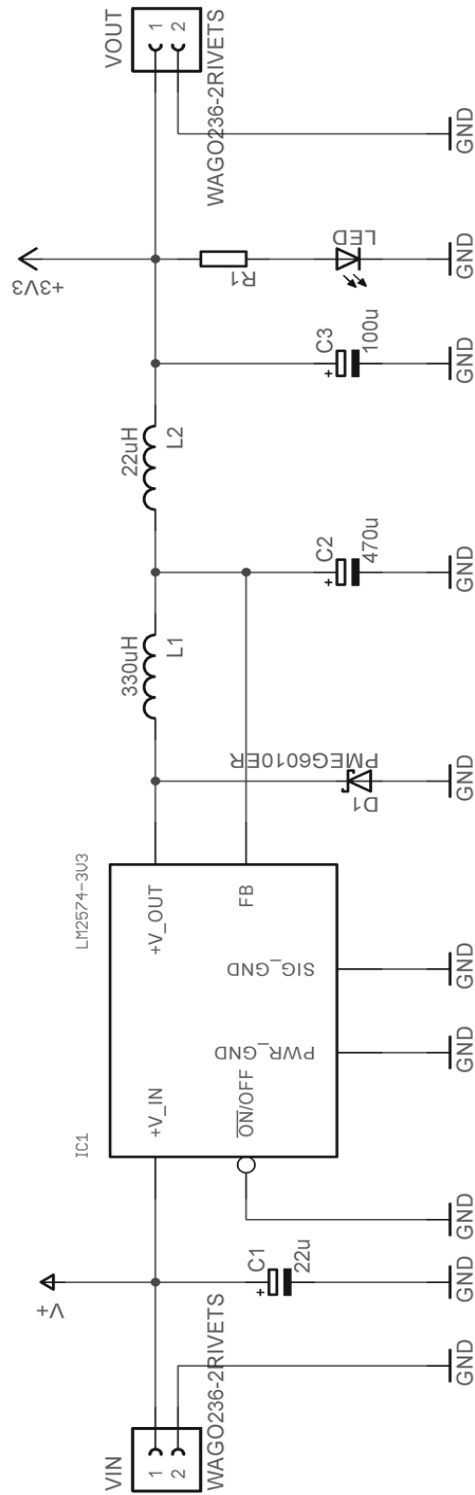
IC2 ... 1N4007

kolíkové lišty

Wago 236

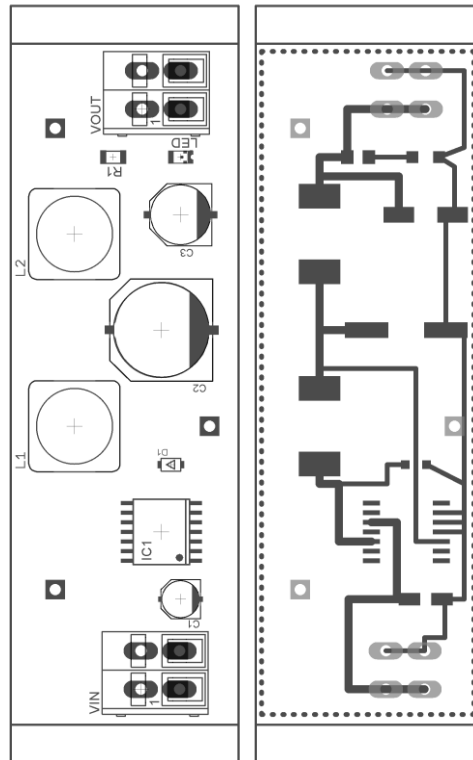
P1.6 – konstrukční řešení

Schéma modulu se spínaným zdrojem



P1.7 – konstrukční řešení

Osazovací výkres a DPS modulu se spínaným zdrojem



Seznam součástek:

IC1 ... LM2574

C1 ... 22 μ F

C2 ... 470 μ F

C3 ... 100 μ F

L1 ... 470 μ H

L2 ... 220 μ H

D1 ... PMEG6010ER

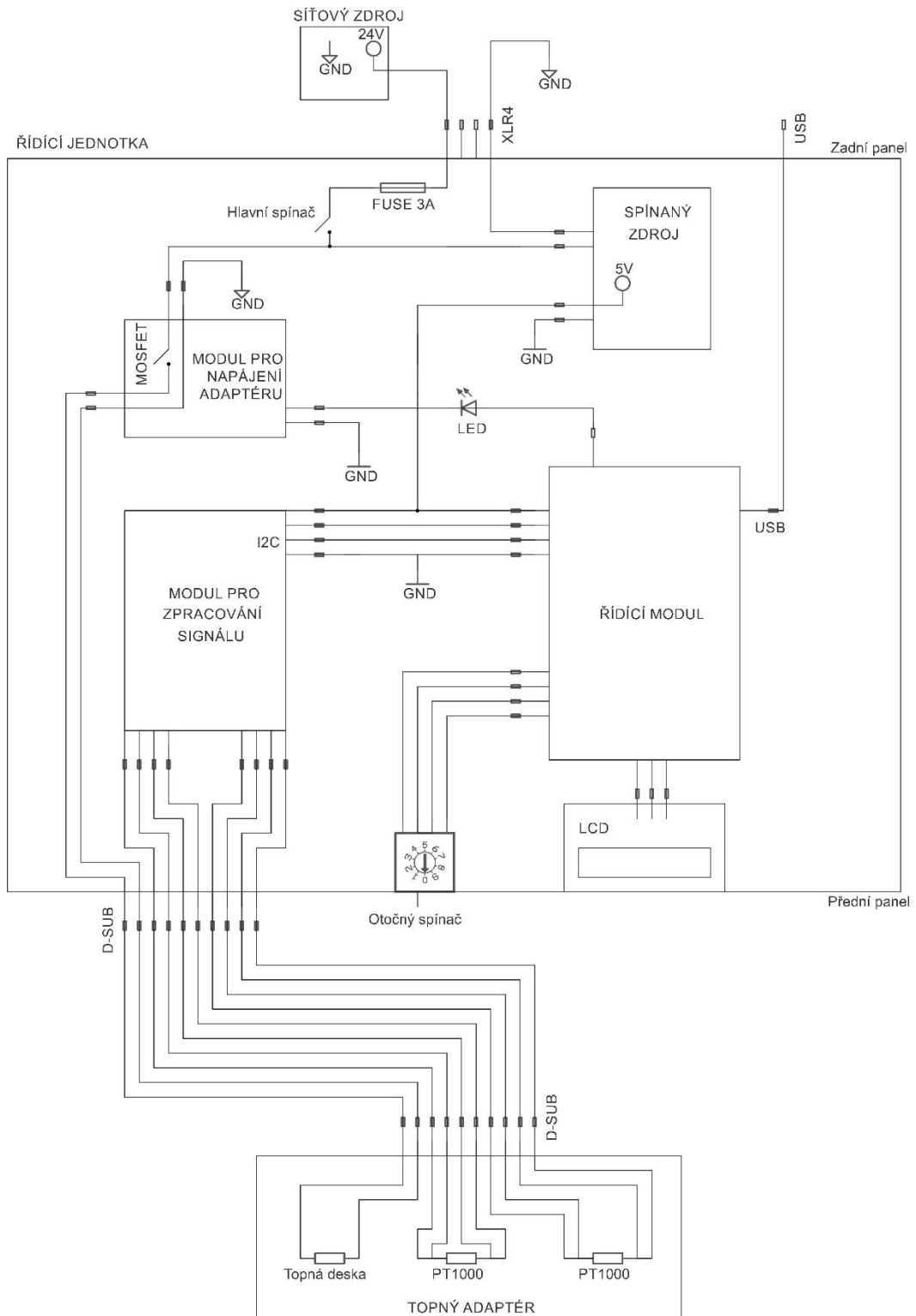
R1 ... 331 Ω

LED

Wago 236

P2.1 – celkové konstrukční řešení

Schéma propojení modulů



P2.2 – celkové konstrukční řešení

Seznam součástek mimo DPS

konektor D-sub F15

konektor D-sub F9

konektor Neutrik NC-3FDL/BAG

konektor Neutrik NC4FD-LX

konektor Neutrik NAUSB-W

pouzdro pojistkové do panelu LS-506

pojistka trubičková T 3,15A 5x20

pouzdro na LED LEDIN501CH

LED 5 mm, zelená

LCD displej Winstar WH0802A1-YGH-ET

čidlo PT1000, 2 ks

spínač páčkový P-B073A

spínač páčkový P-KNX1

spínač otočný P-DS1

zdroj napěťový OWA-90E-24

krabice konstrukční RL 17 220

P3.1 – Firmware

```
//NASTAVITELNE PARAMETRY
```

```
//MODUL A
```

```
//Vytapeci programy - nastaveni max. a min. teploty pro jednotlivé programy modulu A
```

```
//PRG1:
```

```
float MAX1 = 36.3;
```

```
float MIN1 = 36;
```

```
//PRG2:
```

```
float MAX2 = 36;
```

```
float MIN2 = 35.7;
```

```
//PRG3:
```

```
float MAX3 = 37;
```

```
float MIN3 = 36.7;
```

```
//napajeci proud senzoru
```

```
const float I_A = 0.0004;
```

```
//zesileni signalu
```

```
const int zes_A = 4;
```

```
//MODUL B
```

```
//nastaveni max. a min. teploty modulu B
```

```
float B_MAX = 36.3;
```

```
float B_MIN = 36.0;
```

```
//napajeci proud senzoru
```

```
const float I_B = 0.0004;
```

```
//zesilení signálu
```

```
const int zes_B = 4;
```

```
//-----
```

```
// Konstanty a promenne modulu A
```

```
int XA1 = 0; // hodnota vycitena ze senzoru 1 modulu A
```

```
int XA2 = 0; // hodnota vycitena ze senzoru 2 modulu A
```

```
float TA1 = 0; // teplota spocitana z hodnoty senzoru 1 modulu A
```

```
float TA2 = 0; // teplota spocitana z hodnoty senzoru 2 modulu A
```

```
float Temp_max = 0; // nejnizsi teplota - topeni se pri teto hodnote zapne
float Temp_min = 0; // nejvyssi teplota - topeni se pri teto teplote vypne
float RA1 = 0; //odpor senzoru 1 modulu A
float RA2 = 0; //odpor senzoru 2 modulu A
float Temp = 0; //prumer TA1 a TA2
const int PWM_A = 6; // pouzivany PWM pin pro modul A
int PWMA_val = 0; //velikost PWM signálu pro modul A
```

```
// Konstanty a promenne modulu B
```

```
int XB1 = 0; //hodnota vycetena ze senzoru 1 modulu B
int XB2 = 0; //hodnota vycetena ze senzoru 2 modulu B
float TB1 = 0; //teplota spocitana z hodnoty senzoru 1 modulu B
float TB2 = 0; //teplota spocitana z hodnoty senzoru 2 modulu B
float TempB = 0; //prumer TB1 a TB2
float RB1 = 0; //odpor senzoru 1 modulu B
float RB2 = 0; //odpor senzoru 2 modulu B
const int PWM_B = 10; // pouzivany PWM pin pro modul B
```

```
// Vypocet teploty
```

```
const float konst = 0.0000625; // Vref_MCP3428/2^15
```

```
// Konstanty a promenne pro otocny spinac
```

```
const int InPin_1 = 7; //pouzivany switch pin
const int InPin_2 = 8; //pouzivany switch pin
const int InPin_3 = 9; //pouzivany switch pin
int PRG_1 = 0; //hodnota vycetena z InPin_1
int PRG_2 = 0; //hodnota vycetena z InPin_2
int PRG_3 = 0; //hodnota vycetena z InPin_3
```

```
// LCD displej
```

```
LiquidCrystal LCD(A1, A2, 12, A3, A5, A4); //pouzivane piny
```



```

void setup ()
{
  Wire.begin();
  Serial.begin (9600);

  //nastaveni PWM pinu jako vystupni
  pinMode(PWM_A, OUTPUT);
  pinMode(PWM_B, OUTPUT);

  //nastaveni pinu otocneho spinace jako vystupni, rezim HIGH
  pinMode(InPin_1, INPUT);
  digitalWrite(InPin_1, HIGH);
  pinMode(InPin_2, INPUT);
  digitalWrite(InPin_2, HIGH);
  pinMode(InPin_3, INPUT);
  digitalWrite(InPin_3, HIGH);

  //LCD spinac
  LCD.begin(16, 2);
  LCD.clear();
}

void loop()
{

  //----MODUL A-----//

  //A: VYCTENI Z CH2
  Wire.beginTransmission(0x6E); //zacinam akci na tizene adrese; adr0 pin = 1, adr1 pin = 1
  Wire.write(0x1A); //zapis 2. bitu; config. reg. = 11010
  Wire.endTransmission();
  Wire.requestFrom(0x6E, 2); //pozaduji 2 byty z dane adresy

  if (Wire.available())
  {
    XA2 = Wire.read();
    XA2 = XA2 << 8; //prevedeni vyssiho bytu na vyssich 8 bitu
    XA2 |= Wire.read(); //prijem nizsiho bytu jako nizsich 8 bitu
  }
}

```

```

// VYPOCET TEPLoty TA2
RA2 = konst*XA2/zes_A/I_A; //vypocet odporu senzoru
TA2 = 0.2636*RA2-264.52; //vypocet teploty

// vypsani do serialoveho okna
Serial.println("A: ");
Serial.print("CH2: ");
Serial.print(XA2);
Serial.print(", TA2 = ");
Serial.print(TA2);
Serial.print("C, ");
}

delay(180);

//A: VYCTENI Z CH1
Wire.beginTransmission(0x6E); //zacinam akci na tizene adrese; adr0 pin = 1, adr1 pin = 1
Wire.write(0x3A); //zapis 2. bitu; config. reg. = 111010
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(0x6E, 2); //pozaduji 2 byty z dane adresy

if (Wire.available())
{
XA1 = Wire.read();
XA1 = XA1 << 8; //prevedeni vyssiho bytu na vyssich 8 bitu
XA1 |= Wire.read(); //prijem nizsiho bytu jako nizsich 8 bitu

// VYPOCET TEPLoty TA1
RA1 = konst*XA1/zes_A/I_A; //vypocet odporu senzoru
TA1 = 0.2636*RA1-264.52; //vypocet teploty

// vypsani do serialoveho okna
Serial.print("CH1: ");
Serial.print(XA1);
Serial.print(", TA1 = ");
Serial.print(TA1);
Serial.println("C");
}

```

```
Temp = (TA1 + TA2)/2; //prumer teplot obou senzoru
```

```
//A: SPINANI TOPENI
```

```
//spinani na zaklade zmerene teploty
```

```
if ((Temp < Temp_min) && (Temp > 0)) //zapnuti v rozmezi teplot 0 °C - Temp_min  
{analogWrite(PWM_A, PWMA_val);}
```

```
if ((Temp > Temp_max) && (Temp < 0)) //vypnuti pri teplote vyssi nez Temp_max a mensi nez 0 °C  
{analogWrite(PWM_A, 0);}
```

```
//vypnuti topeni v pripade, ze otocny spinac je v pozici "off"
```

```
if (PRG_1 == 1 && PRG_2 == 1 && PRG_3 == 1)  
{analogWrite(PWM_A, 0);}
```

```
//VOLBA PROGRAMU
```

```
PRG_1 = digitalRead(InPin_1);
```

```
PRG_2 = digitalRead(InPin_2);
```

```
PRG_3 = digitalRead(InPin_3);
```

```
if (PRG_1 == 0)
```

```
{  
  Temp_max = MAX1;  
  Temp_min = MIN1;  
  PWMA_val = 255;  
}
```

```
if (PRG_2 == 0)
```

```
{  
  Temp_max = MAX2;  
  Temp_min = MIN2;  
  PWMA_val = 200;  
}
```

```
if (PRG_3 == 0)
```

```
{  
  Temp_max = MAX3;
```

```

Temp_min = MIN3;
PWMA_val = 150;
}

//-----//

//---MODUL B-----//

//B: VYCTENI CH2
Wire.beginTransmission(0x6A); //zacnam akci na tizene adrese; adr0 pin = 0, adr1 pin = 1
Wire.write(0x1A); //zapis 2. bitu; config. reg. = 11010
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(0x6A, 2); //pozaduji 2 byty z dane adresy

if (Wire.available())
{
XB2 = Wire.read();
XB2 = XB2 << 8; //prevedeni vyssiho bytu na vyssich 8 bitu
XB2 |= Wire.read(); //prijem nizsiho bytu jako nizsich 8 bitu

// vypsani do serialoveho okna
Serial.println("B:");
Serial.print("CH2: ");
Serial.print(XB2);
Serial.print(", ");
Serial.print(TB2);
Serial.print(", ");
Wire.endTransmission();
}

// VYPOCET TEPLoty TB2
RB2 = konst*XB2/zes_B/I_B; //vypocet odporu
TB2 = 0.2636*RB2-264.52; //vypocet teploty

delay(180);

//B: VYCTENI CH1
Wire.beginTransmission(0x6A); //zacnam akci na tizene adrese; adr0 pin = 0, adr1 pin = 1

```

```

Wire.write(0x3A); //zapis 2. bitu; config. reg. = 111010
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(0x6A, 2); //pozaduji 2 byty z dane adresy

if (Wire.available())
{
XB1 = Wire.read();
XB1 = XB1 << 8; //prevedeni vyssiho bytu na vyssich 8 bitu
XB1 |= Wire.read(); //prijem nizsiho bytu jako nizsich 8 bitu

// vypsani do serialoveho okna
Serial.print("CH1: ");
Serial.print(RB1);
Serial.print(", ");
Serial.print(TB1);
Serial.println();
}

// VYPOCET TEPLOTY TB1
RB1 = konst*XB1/zes_B/I_B;
TB1 = 0.2636*RB1-264.52;

TempB = (TB1 + TB2)/2; //prumer teplot obou senzoru

//B: SPINANI TOPENI

if((TempB < B_MIN) && (TempB > 0)) //zapnuti v rozmezi teplot 0 °C - B_MIN
{analogWrite(PWM_B, 255);}

if((TempB > B_MAX) && (TempB < 0)) //vypnuti pri teplote vyssi nez B_max a mensi nez 0 °C
{analogWrite(PWM_A, 0);}

//-----//

// vypsani stavu otocneho spinace do analogoveho okna
Serial.print("PRG_1: ");
Serial.print(PRG_1);
Serial.print(", PRG_2: ");

```

```
Serial.print(PRG_2);  
Serial.print(" , PRG_3: ");  
Serial.println(PRG_3);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
//LCD DISPLAY
```

```
//1. RADEK
```

```
LCD.clear();
```

```
//zobrazí "no signal", když nejsou připojeny senzory  
if (XA2 == (2,1,0,-1,-2)||XA1 == (21,0,-1,2))  
{LCD.print("no signal");}
```

```
//zobrazí teplotu, pokud spadá do rozmezí 0 - 100 °C  
if (Temp > 0 && Temp < 100)  
{LCD.print("T=");  
LCD.print(Temp);}
```

```
//2. RADEK
```

```
LCD.setCursor(0, 1);
```

```
//zobrazí "Off", když otočný spínač je v pozici "off"  
if (PRG_1 == 1 && PRG_2 == 1 && PRG_3 == 1)  
{LCD.print("Off");}
```

```
//zobrazení pro spínač v pozici 1
```

```
if (PRG_1 == 0)  
{  
LCD.print("P1:");  
LCD.print(37.0);  
}
```

```
//zobrazení pro spínač v pozici 2
```

```
if (PRG_2 == 0)  
{
```

```
LCD.print("P2:");  
LCD.print(36.7);  
}
```

```
//zobrazeni pro spinac v pozici 3  
if (PRG_3 == 0)  
{  
  LCD.print("P3:");  
  LCD.print(37.7);  
}
```

```
delay(500);  
}
```