



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky**

Teplotní komora s Peltierovými články
Temperature Chamber with Peltier Cells

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Aplikovaná elektronika

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Husák CSc.

Martin Kaňok

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kaňok** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **434681**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Teplotní komora s Peltierovými články

Název bakalářské práce anglicky:

Temperature Chamber with Peltier Cells

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši současného stavu poznatků řešení chladicích a ohřivacích systémů s využitím Peltierových článků.
2. Navrhněte teplotní komoru s jednoduchým řízením teploty s využitím Peltierových článků pro možnost chlazení i ohřevu. Objem komory je cca 1 dm³, napájení 12 V / 230 V. Při návrhu řešte homogenní rozložení teploty v komůrce, pro zvýšení účinnosti použijte vnější chlazení Peltierových článků např. větrákem, navrhněte využití více Peltierových článků pro komoru pro dosažení nižší teploty. Komoru doplňte displejem pro zobrazení vnitřní teploty. Pro měření teploty zvolte vhodný typ teplotního senzoru. Navržený systém chlazení teplotní komory realizujte.
3. Zjistěte dosažené parametry realizované teplotní komory, tj. především závislost vnitřní teploty na vnější teplotě, hysterezi udržování vnitřní teploty systému, rychlost chlazení a ohřevu, přesnost regulace teploty.
4. Provedte ekonomickou rozvahu navrženého systému.

Seznam doporučené literatury:

1. Neumann, P., Uhlíř, J.: Elektronické obvody a funkční bloky I, II, ČVUT.
2. Katalogové listy firmy Kryotherm, www.kryotherm.com.
3. ROWE, D. M.: Handbook of Thermoelectrics. CRC Press, July 1995, ISBN 0849301467
4. SHARP, J. GOLDSMID, H. J. NOLAS, G. S.: Thermoelectrics Basic Principles and New Materials Development. Springer Verlag, August 2001.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Miroslav Husák CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

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

.....

datum

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Miroslavu Husákovi CSc. za cenné rady, odborné vedení, věcné připomínky a pomoc při zpracování této práce. Děkuji také své rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

V předložené práci jsou popsány základní principy polovodičů, termoelektrických jevů a jejich využití. Dále je vysvětlena funkce tepelného čerpadla na principu Peltierova jevu pro odvod tepla. Práce se věnuje především užití a realizaci Peltierových článků jako chladicích elementů pro teplotní komoru, která je monitorována a částečně řízena pomocí mikrokontroleru. Práce se zabývá návrhem a realizací teplotní komory včetně příslušných měření.

Abstract

In the present work are described basic principles of semiconductors, thermoelectric effects and their applications. The paper shows the function of a heat pump based on Peltier's effect which is used for cooling. The work is about realization of Peltier's devices as cooling elements for temperature chamber which is monitored and managed by microcontroller. It describes the design and realization of the temperature chamber including appropriate measurements.

Klíčová slova:

Peltierův jev, Peltierův článek, chladicí komora, Nucleo 32 L031K6

Key words:

Peltier effect, Peltier device, cooling box, Nucleo 32 L031K6

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 11 |
| Úvod..... | 13 |
| 1 Teoretická část | 15 |
| 1.1 Polovodiče..... | 15 |
| 1.1.1 Polovodiče typu N..... | 15 |
| 1.1.2 Polovodiče typu P | 15 |
| 1.2 Termoelektrické jevy | 15 |
| 1.2.1 Seebeckův jev..... | 15 |
| 1.2.2 Peltierův jev | 17 |
| 1.3 Peltierův článek..... | 18 |
| 1.3.1 Popis a princip článku | 18 |
| 1.3.2 Využití Peltierova článku..... | 19 |
| 1.3.3 Výhody a nevýhody využívání Peltierových článků..... | 20 |
| 2 Návrh..... | 21 |
| 2.1 Peltierův článek TEC1 – 127060S | 21 |
| 2.2 Mikrokontroler | 22 |
| 2.2.1 Mikrokontroler Nucleo 32 L031K6 | 23 |
| 2.3 Periferie a jejich funkce | 25 |
| 2.3.1 Teplotní senzory TEMP1, TEMP2 a hodiny reálného času RTC | 25 |
| 2.3.2 Displej | 25 |
| 2.3.3 Spínání Peltierových článků..... | 27 |
| 2.3.4 Ostatní součástky v obvodu | 28 |
| 2.4 Programová část..... | 29 |
| 2.4.1 Nástroj STM32CubeMX..... | 29 |
| 2.4.2 Blokové schéma fungování programu..... | 31 |
| 2.5 Ucelené schéma všech periférií..... | 32 |
| 3 Realizace | 33 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Plošný spoj..... | 33 |
| 3.2 | Sestavení teplotní komory..... | 34 |
| 3.2.1 | Víko – horní část komory..... | 34 |
| 3.2.2 | Komora – tepelně izolovaný box | 35 |
| 3.2.3 | Chlazení | 36 |
| 3.2.4 | Přehled výstupů z komory..... | 37 |
| 3.3 | Měření teplotních vlastností komory | 39 |
| 3.3.1 | Závislost vnitřní teploty komory na čase | 40 |
| 3.3.2 | Udržení teploty po vypnutí článků..... | 42 |
| 3.3.3 | Průběh chlazení a diskuze výsledků..... | 45 |
| 4 | Ekonomická rozvaha..... | 47 |
| 5 | Závěr | 49 |
| | Bibliografie | 51 |
| | Seznam obrázků | 54 |
| | Přílohy..... | 55 |
| | Elektronická příloha..... | 59 |

Seznam použitých zkratek a symbolů

| | | |
|----|----------------|----------|
| Cu | | Měď |
| Al | | Hliník |
| Ag | | Stříbro |
| Au | | Zlato |
| Si | | Křemík |
| P | | Fosfor |
| As | | Arsen |
| Sb | | Antimon |
| B | | Bor |
| Ga | | Gallium |
| In | | Indium |
| I | A | Proud |
| U | V | Napětí |
| P | W | Výkon |
| T | °C | Teplota |
| V | m ³ | Objem |
| t | s | Čas |
| C | F | Kapacita |

Zkratky

| | |
|------------------|---|
| TEMP1 | Teplotní senzor č. 1 umístěn uvnitř chladicí komory |
| TEMP2 | Teplotní senzor č. 2 umístěn na desce |
| RTC | (Real-time clock) Hodiny reálného času |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| TEC1 | Peltierův článek č.1 TEC1-127060S |
| TEC2 | Peltierův článek č.2 TEC1-127060S |
| FAN1 | Ventilátor chladiče článku č.1 |
| FAN2 | Ventilátor chladiče článku č.2 |
| FAN3 | Vnitřní ventilátor na cirkulaci vzduchu |
| GND | Uzemnění |
| SCL | Serial Clock Line |
| SDA | Serial Data Line |

| | |
|---------|---|
| I/O | Vstupy a výstupy |
| PWM | Pulzní šířková modulace |
| USART | Synchronní/asynchronní sériové rozhraní |
| Vin | Vstupní napětí mikrokontroleru |
| Potmetr | Potenciometr 47k |
| D | Drain |
| G | Gate |
| S | Source |
| GPIO | General Purpose Input/Output |
| log | Logická hodnota |

Úvod

Téma „Teplotní komora s Peltierovými články“ jsem si zvolil, protože mě zajímá polovodičová technika a chlazení, které je základem pro správné fungování a prodloužení životnosti integrovaných obvodů, které se za běžného provozu přehřívají. To je mimo jiné také jedna z možností, kde Peltierův článek použít. Zajímá mě také jeho použití a chování v praxi.

Práce se zabývá základním popisem principu polovodičových a termoelektrických součástek. Seznamuje s problematikou Peltierova efektu, Peltierových článků, jejich strukturou, principem a aplikací v zapojení jako tepelná čerpadla.

Návrh se věnuje popisu hardwaru a softwaru pro sestavení elektroniky pro teplotní komoru chlazenou dvěma Peltierovými články. Popisuje parametry mikrokontroleru a jeho periférií pro měření teploty senzorem, čítače reálného času a zobrazování těchto parametrů na displeji. Praktická část se zabývá realizací teplotní komory s odnímatelným víkem, její izolací, chlazením, designem, prací s izolačními a vodivými materiály a řešením vývodů pro napájení a komunikaci s elektronikou zabudovanou ve víku. Součástí praktické části je měření vlastností postavené teplotní komory, včetně diskuze nad výsledky měření.

Hlavním cílem práce je realizace teplotní komory monitorované mikrokontrolerem, který bude teplotu zobrazovat na displeji. V závěru práce je ekonomická rozvaha, která popisuje finanční náročnost při výstavbě prototypu.

1 Teoretická část

1.1 Polovodiče

Polovodiče jsou látky, jejichž vlastnosti se silně odvíjí od teploty a osvětlení. Měrnou vodivost mají nižší než kovy (např.: Cu, Al, Ag, Au) a vyšší než izolanty (např.: sklo, dřevo, papír) [1]. Nejběžnějším polovodičem je křemík – Si. Má 4 valenční elektrony, ty tvoří základní krystalovou mřížku polovodiče. Pro vodivost samotného křemíku je nutné ho značně zahřát, což je energeticky nevýhodné. Dochází proto k vytváření sloučenin, jejichž základem je křemík a prvek se třemi nebo pěti valenčními elektrony [2]. Na základě hlavních nositelů náboje dělíme polovodiče do dvou skupin, polovodiče typu N a polovodiče typu P.

1.1.1 Polovodiče typu N

Polovodičem typu N může být sloučenina čistého křemíku – Si s prvkem, který obsahuje 5 valenčních elektronů (např.: P, As, Sb). Prvek, který obsahuje v porovnání s křemíkem jeden valenční elektron navíc říkáme donor – dárce [3]. Čtyři valenční elektrony přidaného prvku se naváží na čtyři valenční elektrony křemíku. Zbylý valenční elektron je schopen se snadno uvolnit z vazby a pohybovat se prostorem krystalové mřížky. Takto pohyblivý elektron vytváří svým pohybem elektrickou vodivost. Majoritními nosiči náboje jsou v případě polovodičů typu N elektrony, minoritními nosiči jsou díry, jejichž četnost souvisí s teplotou polovodiče. V případě, že připojíme polovodič typu N ke zdroji napětí, bude usměrněn pohyb elektronů od záporného ke kladnému pólu zdroje [2].

1.1.2 Polovodiče typu P

Polovodičem typu P může být sloučenina křemíku – Si a prvku se třemi valenčními elektrony (např.: B, Ga, In). Takovému prvku se říká akceptor [3]. Je schopen přijmout do svého valenčního pásu jeden volný elektron. Spojením křemíku s trojmocným prvkem vzniká díra, ta způsobuje děrovou vodivost [4]. Děra je v polovodičích tohoto typu mnohem více než elektronů, proto jsou majoritními nosiči náboje. Vlivem tepla se uvolňují minoritní nosiče náboje, v tomto případě jsou jimi elektrony. Pokud připojíme zdroj napětí k polovodiči typu P, dojde k přeskokům volných elektronů do děr od záporného pólu ke kladnému pólu zdroje [2].

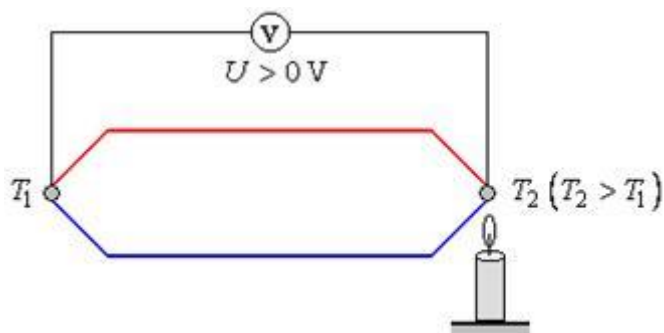
1.2 Termoelektrické jevy

1.2.1 Seebeckův jev

Spojí-li se dva kovy termočlánek s rozdílnou teplotou, vzniká nenulový rozdíl kontaktních napětí [3]. Tento obvod je zobrazen na Obrázku 1. Takovému napětí se také říká termoelektrické ΔU a platí:

$$\Delta U = U_{12}(T_2) - U_{12}(T_1),$$

kde $T_2 > T_1$. Indexy u obou napětí jsou stejné, neboť jde o kontaktní napětí na rozhraní stejných kovů.



Obrázek 1: Princip Seebeckova jevu. Převzato z [2]

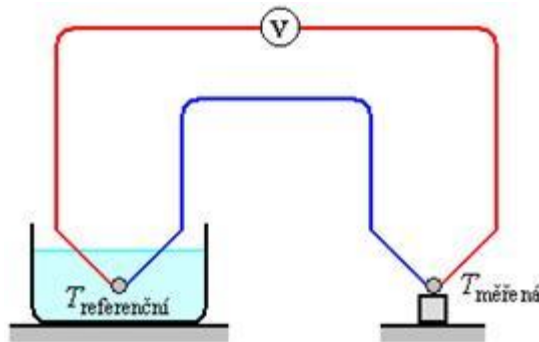
Jedná se o přeměnu teplotních rozdílů na elektrické napětí. Závislost termoelektrického napětí na teplotě lze psát

$$\Delta U = \alpha_{12}(T_2 - T_1) = \alpha_{12}\Delta T,$$

kde α_{12} je Seebeckův koeficient, který závisí na dvojici použitých kovů. Tento zápis je relevantní v případě, že jde o malé rozdíly teplot obou spojů. Tím je dána lineární závislost termoelektrického napětí na teplotě. V případě, že by rozdíl teplot byl vysoký (řádově několik desítek kelvinů) nelze závislost aproximovat lineárním vztahem [2].

Zajímavostí je, že v případě kovů se dodaná tepelná energie přemění na energii elektrickou jen v řádech několika málo procent. Pro svou neefektivitu se termočlánky nepoužívaly jako zdroje energie, ale využívaly se a stále se využívají k měření teploty.

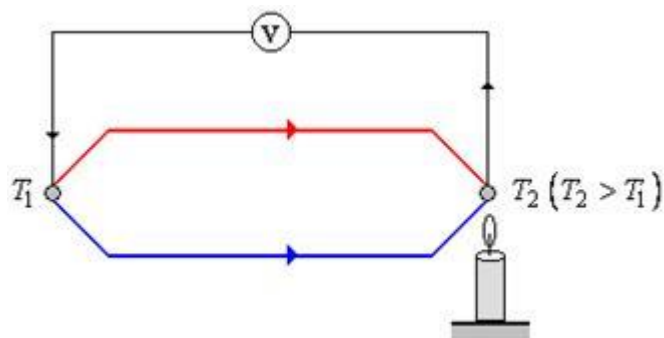
Měření teploty lze názorně vysvětlit na Obrázku 2. Kontakty dvou kovů dokáží reagovat na změnu teploty tak, že jejich rozdíl vytváří určité napětí, které je měřitelné. Pro co možná nejpřesnější měření se používá na jedné straně studená směs vody a ledu s přibližnou teplotou okolo 0 °C. Tato směs vytváří referenční teplotu, z které se při měření vychází. Na straně druhé je detekována námi měřená teplota. Pomocí změřeného napětí se dá stanovit rozdíl teplot mezi referenčním a měřeným bodem.



Obrázek 2: Měření teploty pomocí Seebeckova jevu. Převzato z [2]

1.2.2 Peltierův jev

Princip Peltierova jevu lze vysvětlit na stejném obvodu, na kterém byl objeven jev Seebeckův. Rozdílem je však znázornění toku proudů tímto obvodem, které je patrné na Obrázku 3. Zakresluje se směr pohybu kladně nabitých částic. Kontaktní napětí jsou zde kladná a s rostoucí teplotou T rostou. Spoj s vyšší teplotou má tedy vyšší napětí.



Obrázek 3: Princip Peltierova jevu. Převzato z [2]

Pokud je termočlánek bez rozdílů teplot T_1 a T_2 připojen ke zdroji stejnosměrného napětí nastane Peltierův jev. Teplotní rozdíl mezi spoji vzniká průchodem elektrického proudu oběma kovy. Chlazení a ohřev závisí na polaritě přiloženého napětí [3]. V případě, že tomu bude jako na Obrázku 3, bude se T_1 ochlazovat a T_2 ohřívat. Pokud bude elektrický proud z vnějšího zdroje procházet kovy opačným směrem, než je tomu na obrázku, dojde k ohřátí spoje s teplotou T_1 a k ochlazení spoje s teplotou T_2 .

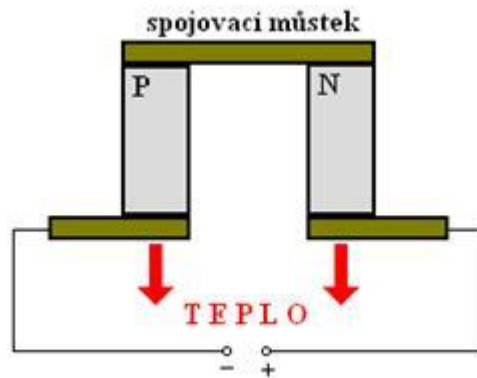
V případě kovů se při průchodu elektrického proudu přemísťují elektrony. U polovodičů se přemísťují elektrony – typ N a díry – typ P (kapitola 1.1). Při přenosu vzniká nerovnováha elektronů mezi oběma spoji a tím roste termoelektrické napětí. Toto napětí je přímo úměrné rozdílu teplot obou spojů. Z místa s vyšším kontaktním napětím se bude šířit teplo [2].

1.3 Peltierův článek

1.3.1 Popis a princip článku

Peltierův článek lze použít ke generování elektrické energie nebo k chlazení. Je tvořen sérií polovodičů typu N a P, které jsou spojeny elektrickým vodičem (nejčastěji měď). Měď funguje jako můstek mezi polovodiči, kterými se přivádí do článku elektrická energie, a zároveň se s její pomocí odvádí teplo. Takto uspořádané jádro článku je vsazeno mezi keramické destičky, které slouží jako elektrický izolant a tepelný vodič [5].

Při připojení zdroje stejnosměrného napětí k článku vzniká elektrický proud. Ten svým tokem ovlivňuje pohyb elektronů a děr. Elektrony se pohybují ke kladnému pólu a kladné díry k pólu zápornému [6]. Tím vzniká rozdíl kontaktních napětí na měděných protilehlých destičkách.

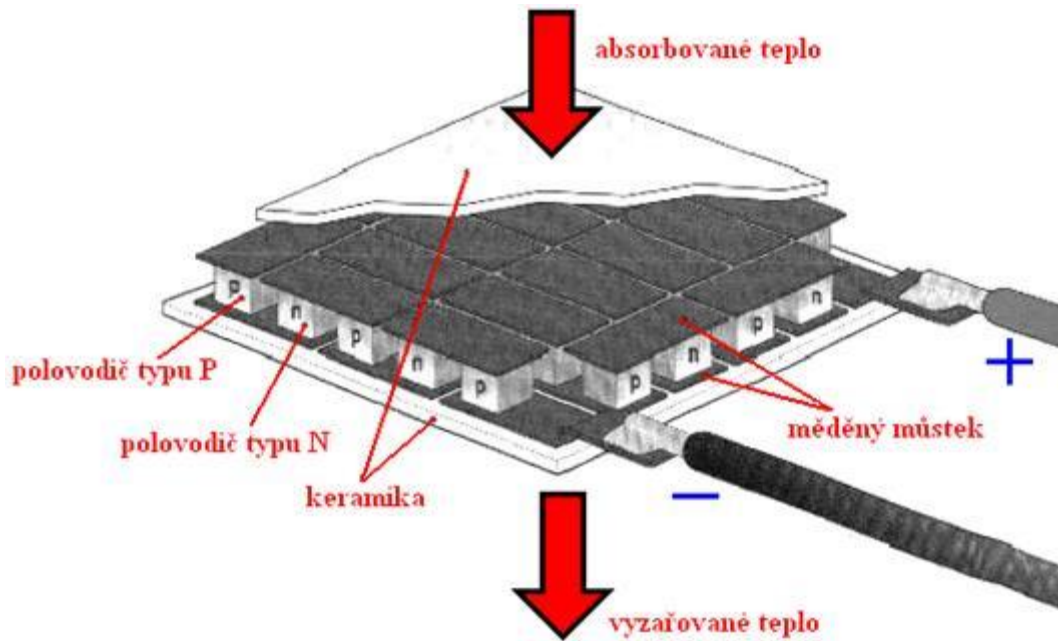


Obrázek 4: Popis funkce Peltierova článku. Převzato z [2]

Na Obrázku 4 jsou dva polovodiče spojeny spojovacím můstkem a připojeny ke zdroji stejnosměrného napětí. Jak již bylo popsáno v kapitole 1.1, v případě polovodičů typu P jsou majoritními nosiči náboje díry a u polovodičů typu N elektrony. Ve spojovacím můstku klesá kontaktní napětí a tím se ochlazuje. Druhá strana spoje se ohřívá.

Materiál spojovacího můstku je klíčový nejen kvůli svým vodivým vlastnostem, ale především kvůli spoji, který vzniká mezi polovodičem a můstkem. Tento spoj je velmi náročný na správnost provedení, od kterého se později odvíjí jeho cena a výkon. Nejčastěji se používá měď, která má malý měrný elektrický odpor a dobře se k ní pájí další součástky [7].

Při výrobě elektrické energie je nutné zahřívát jednu stranu článku, který je pak schopen generovat napětí až do jednotek voltů. Peltierovy články mají malou účinnost, která souvisí s poměrem chladicího/topného výkonu dolní a horní části článku. Platí, že čím vyšší chladicí výkon od článku očekáváme, tím vyšší je rozdíl teplot horní a spodní části. Potenciální výkon článku lze zvýšit kvalitním odvodem tepla, tím se sníží rozdíl teplot obou stran. Je tedy nutné investovat do kvalitního chlazení [2].



Obrázek 5: Ilustrativní řez Peltierovým článkem. Převzato z [2]

1.3.2 Využití Peltierova článku

Peltierovy články mají pro své malé rozměry a okamžitý chladicí výkon poměrně širokou škálu uplatnění. Výhodné jsou i v tom, že jejich plochy hřejí a chladí rovnoměrně. Články jsou spolehlivé a s takřka neomezenou životností. Je možné regulovat jejich výkon [8], [9].

Užití:

- Chlazení CCD snímačů
- Teplotní regulátor – lasery, výkonné generátory
- Chlazení elektronických součástí – mikroprocesory, elektronická zařízení (noktovizory), chlazení taktovaných procesorů
- Chladicí laboratorní desky
- Přenosné ledničky, vinotéky
- Extrakce vody ze vzduchu
- Satelity
- Lékařská technika – chlazení přenosných boxů na biologický materiál a tekutiny (krev)
- Klimatizační nádoby na uskladňování knih a filmů

Seznam vybraných výrobců Peltierových článků:

Kryotherm [5], Nanocoolers [10], Quick-cool [11], TE Technology [12], FerroTec [13].

1.3.3 Výhody a nevýhody využívání Peltierových článků

Výhody a nevýhody článku souvisí s jeho využitím a vlastnostmi [9]:

Výhody

Chlazení velmi malých ploch

Tichý provoz článku

Dlouhá životnost

Možnost generování elektrického proudu

Dosažení nízkých teplot

Snadná regulace výkonu

Okamžitý efekt

Nevýhody

Náročné na chlazení

Vysoká náročnost na odběr proudu

Srážení vlhkosti

Nutné aktivní chlazení při vyšších výkonech

Nízká účinnost článku

Přehřívání

Malý rozdíl teplot

2 Návrh

Nejjednodušším řešením v případě monitorování a řízení teplotní komory je použití mikrokontroleru. Ten je schopen s pomocí vhodných periferií monitorovat a řídit celou komoru bez jakýchkoli zásahů člověka. Zaměřil jsem se na co možná největší praktičnost, co se týče funkčnosti. Základními funkcemi jsou proto měření teploty, datum a čas. Tyto funkce jsou zobrazovány na displeji. Rozšiřující funkcí je spínání Peltierových článků, která by při dobrých izolačních vlastnostech komory a správném naprogramování mohla šetřit spotřebovanou energii. Schémata jsou vytvořena v online aplikaci od společnosti DigiKey¹.

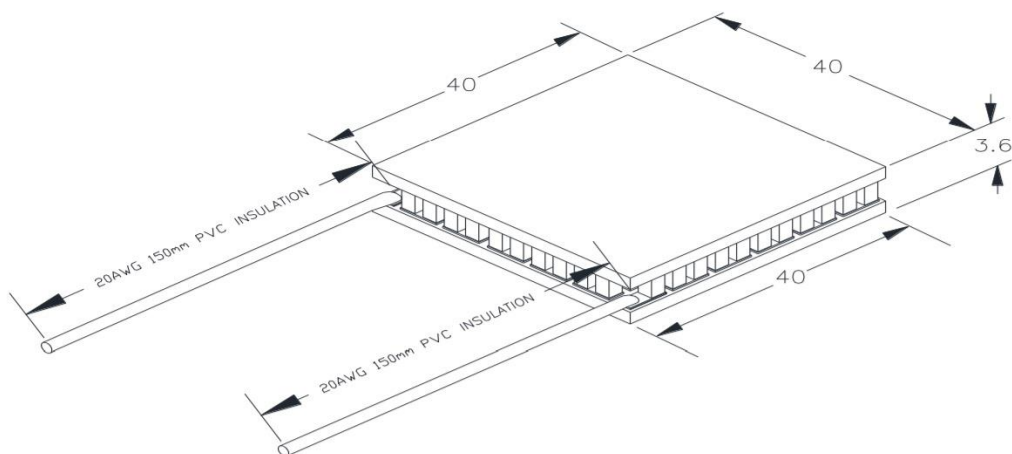
2.1 Peltierův článek TEC1 – 127060S

Peltierův článek o maximálním výkonu 55 W, který odpovídá rozdílu teplot studené a teplé strany ΔT 75 °C, by měl být dostačujícím pro použití v teplotní komoře. Jeho schéma je zobrazeno na Obrázku 6 spolu s jeho rozměry [14]. Ze stran a v oblasti vodičů je ošetřen silikonem pro vyšší odolnost a vodotěsnost, která je příhodná, neboť se v takové blízkosti teplé a studené strany sráží voda. Tento článek obsahuje 127 párů PN přechodů, které jsou spojené měděnými destičkami. Je schopen pracovat do teploty 90 °C. Maximální možné napájení článku je 16,4 V a 6 A. Izolované vodiče článku jsou dlouhé 150 mm. Podrobnější popis vlastností článku, které udává výrobce, je zobrazen v Tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled vlastností článku udávaný výrobcem. Převzato z [14]

| Teplota zahřívání strany (°C) | 25 °C | 50 °C |
|-------------------------------|-------|-------|
| P_{\max} (W) | 51,4 | 55 |
| Delta T_{\max} (°C) | 67 | 75 |
| I_{\max} (A) | 6 | 6 |
| V_{\max} (V) | 15,4 | 16,4 |
| Odpor článku (Ohm) | 2,25 | 2,54 |

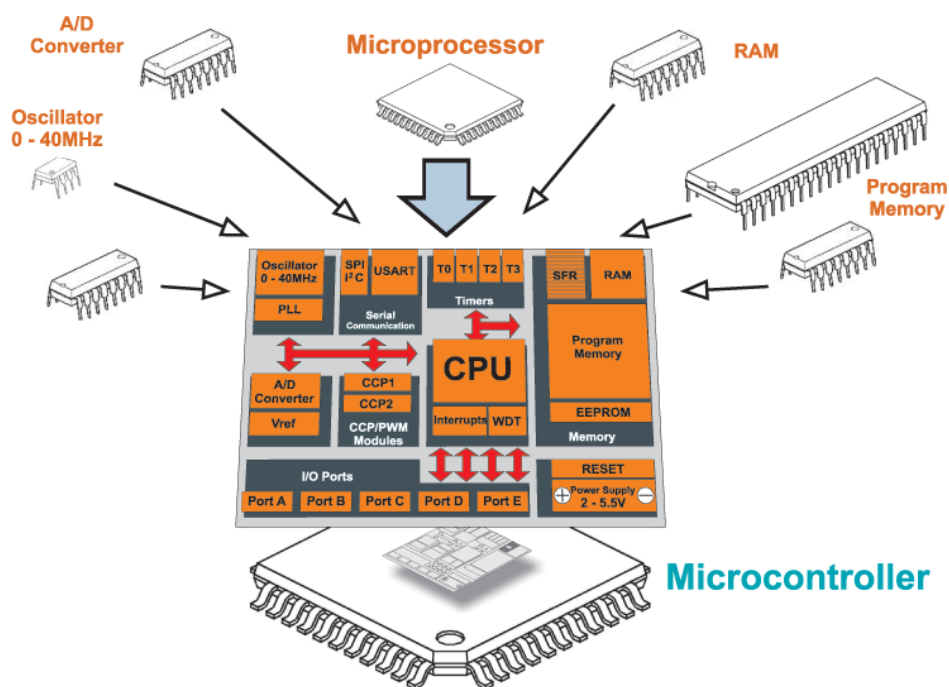
¹ Online aplikace: <https://www.digikey.com/schemeit/project/>, duben



Obrázek 6: Peltierův článek TEC1-127060S a jeho rozměry. Převzato z [14]

2.2 Mikrokontroler

Mikrokontroler je integrovaný obvod s periferiemi, pamětí a procesorem, který obsahuje vše potřebné pro zprovoznění aplikace bez dalších podpůrných obvodů. Mikrokontrolery jsou dnes součástí většiny domácích elektronicky řízených spotřebičů (rádia, tiskárny, chladničky, mrazničky, pračky, televize), automobilů, mobilních telefonů, zabezpečovací techniky a mnoha dalších zařízení. Jsou určeny především pro jednoúčelové aplikace. Vyznačují se spolehlivostí a kompaktností [15]. Základní struktura mikrokontroleru obsahuje procesor, operační paměť, paměť pro uložení programu, oscilátor a vstupní a výstupní porty, jak je vidět na Obrázku 7.



Obrázek 7: Vnitřní uspořádání zapouzdřeného mikrokontroleru. Převzato z [15]

Procesor neboli základní procesorová jednotka je programovatelné zařízení, které je schopno zpracovat digitální data. Pomocí instrukcí, které jsou uloženy v paměti, je schopen vykonávat definovanou činnost. Operační paměť mikrokontroleru zajišťuje čtení a zápis dočasně uložených dat a instrukcí. Od programové paměti se liší tím, že přístup k ní je podstatně rychlejší. V mikrokontrolerech se využívá operační paměť typu RAM, která se vyznačuje tím, že při odpojení napájení ztrácí informaci. Paměť pro ukládání programu bývá typu ROM, FLASH, EPROM nebo EEPROM. Obsahuje program a data s tím spojená. Součástí většiny mikrokontrolerů jsou podpůrné obvody, které zajišťují logické, analogové nebo digitální vstupy a výstupy [16]. V závislosti na typu mikrokontroleru lze využívat různá vstupní a výstupní rozhraní, která jsou schopna sdílet své vývody s podpůrnými obvody Obrázek 7. Jsou jimi například:

- A/D převodníky
- PWM výstupy
- SPI
- D/A převodníky
- USART, USB
- I²C

Mezi připojitelné periferie mikrokontroleru patří LCD displeje, spínače, časovače, čítače, tlačítka, klávesnice, relé a senzory pro snímání teploty, vlhkosti, intenzity světla apod. Programovatelné mikrokontrolery obsahují několik univerzálních I/O portů, které se dají softwarově zprovoznit a nadefinovat. Podrobnější popis je v kapitole 2.4.1.

2.2.1 Mikrokontroler Nucleo 32 L031K6

K ovládání a monitorování teplotní komory používám mikrokontroler Nucleo L031K6 od firmy STMicroelectronics². Pro stabilní napájení mikrokontroleru zdrojem používám stabilizátor pevného napětí L7806 [17]. Stabilizátor jsem pořídil z důvodu testování, kde jsem pro napájení používal starý počítačový zdroj. Jeho stáří a kvalita zpracování měly za následek kolísání napětí na všech větvích (3,3 V, 5 V, 12 V). Nestabilita napětí se projevovala na všech výstupech mikrokontroleru, obzvlášť pak na displeji, který s měnícím se napětím problikával. Stabilizátor se osvědčil jako velmi spolehlivý, proto je v celkovém obvodu zahrnut jako pojistka v případě, že by na novém zdroji došlo ke kolísání napětí.

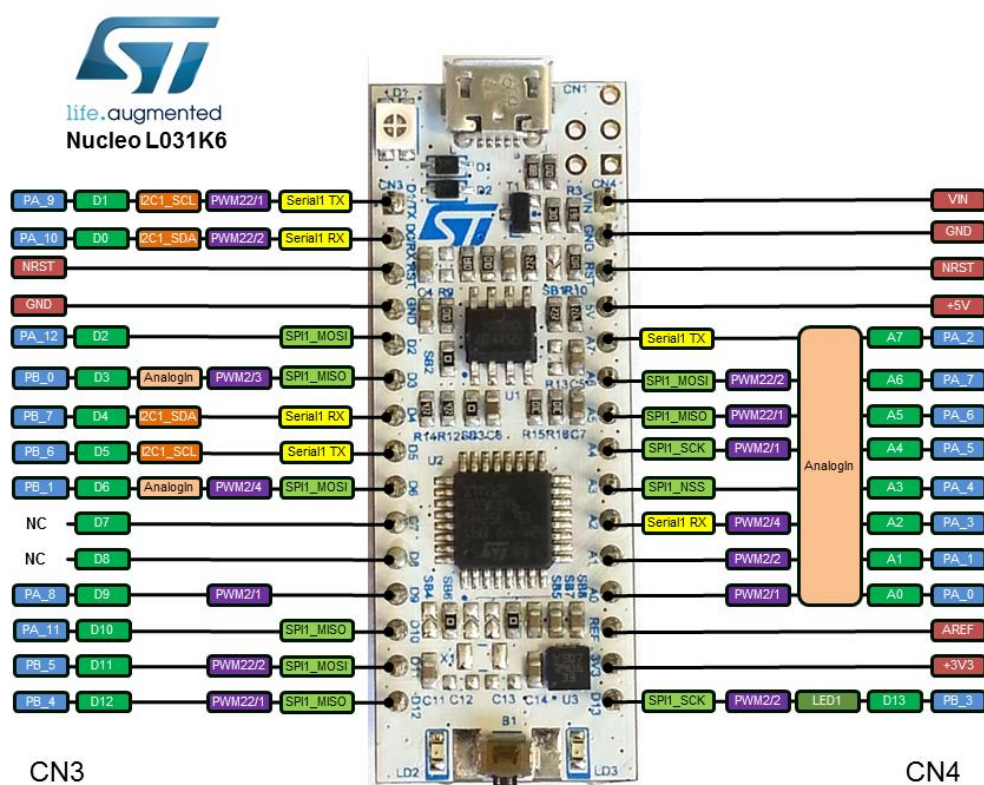
Mikrokontroler je možné napájet pomocí USB, které má napětí 5 V a maximální odběr proudu 300 mA [18]. Další možností je použití externího zdroje v rozmezí 5 V–12 V. S napětím souvisí také maximální odběr proudu mikrokontrolerem, který je schopen si odebírat až 800 mA, a to při nejnižším vstupním napětí 5 V. Při vyšším vstupním napětí $V_{in} > 10$ V je maximální proud mikrokontrolerem 300 mA.

² Dostupné online: <http://www.st.com>, květen 2017

Tabulka 2: Základní informace k mikrokontroleru Nucleo 32 L031K6

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Jádro mikrokontroleru | ARM® Cortex® -M0+ 32 MHz |
| Šířka datové sběrnice | 32 – bit |
| Typ rozhraní | USB, USART |
| Operační paměť | 8 kB SRAM |
| Datová paměť | 32 kB Flash |

Vstupy a výstupy Nuclea L031K6 jsou kompatibilní k Arduino™ Nano [19]. Podrobný ucelený výpis funkcí a jednotlivých použitých I/O bude popsán v kapitole 2.4.1. Některé porty jsou na spodní desce zkratované, aby se Nucleo chovalo jako Arduino. Je možné tyto zkraty zrušit odpájením propojek z desky. V mém případě šlo o propojení portů D5 a A5 propojkou SB16 [18], [Příloha – Obrázek 28]. V případě ponechání zkratu dochází k tomu, že se výstup A5 chová jako plovoucí, je tedy ovlivňován výstupem D5. Oba tyto porty jsou použity pro komunikaci mikrokontroleru s displejem a podrobněji popsány v 2.3.2.



Obrázek 8: Přehled vstupních a výstupních portů. Převzato z [21]

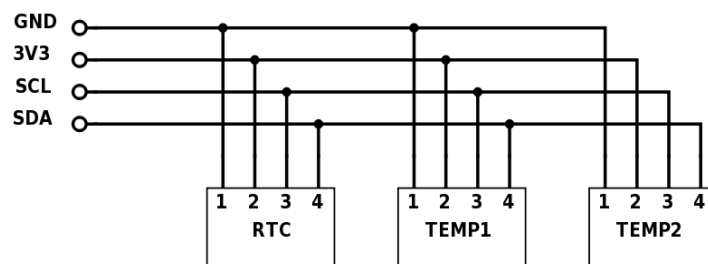
Mikrokontroler Nucleo L031K6 (Obrázek 8) je schopen po připojení stejnosměrného zdroje samostatně napájet své periferie. Má proto určené dva napěťové výstupy na 3,3 V a 5 V. Na

obrázku jsou modře vyznačeny názvy pinů, se kterými mikrokontroler a uživatel pracuje v programové paměti. Zelené piny s označením D0-D13 a A0-A7 jsou komunikačními I/O porty, tyto názvy jsou uvedeny i na horní části mikrokontroleru. Oranžově jsou značeny dvě sériové komunikační sběrnice I²C (D0, D1 a D4, D5). Fialově je značena PWM (pulzní šířková modulace), která umožňuje přenos analogového signálu pomocí dvoustavové veličiny, kterou je napětí [20]. Světle zelená je pro sériovou komunikaci tzv. SPI. Žlutou barvou jsou vstupy pro jakoukoli sériovou komunikaci, která se programově namapuje (například USART, USB).

2.3 Periferie a jejich funkce

2.3.1 Teplotní senzory TEMP1, TEMP2 a hodiny reálného času RTC

Teplotní senzory TEMP1, TEMP2 a hodiny reálného času (RTC) jsou připojeny na sériovou sběrnici I²C. Jsou napájeny napětím 3,3 V z Nuclea (Obrázek 9). Mikrokontroler je řídicím zařízením (master), které zahajuje a ukončuje komunikaci s periferiemi a generuje hodinový signál SCL. Tato komunikační linka je schopna propojit až 128 různých zařízení s pomocí dvou obousměrných vodičů, napájecího napětí a uzemnění. Komunikaci zajišťuje hodinový signál SCL a datový kanál SDA [22]. Maximální frekvence hodinového signálu SCL je softwarově nastavena na 100 kHz a každá periferie má přidělenou sedmibitovou adresu (2.4.1), ta se používá v programové paměti. Datový vodič SDA přenáší informace z teplotních senzorů a hodin. Maximální délka obousměrných vodičů je dána maximální kapacitou 400 pF. Teplotní senzor měří v rozsahu -20 °C až +85 °C s přesností ±0,2 °C. Napájecí napětí se může pohybovat v rozmezí 1,8 V – 3,3 V [23]. V případě RTC se hodinový signál SCL z mikrokontroleru vydělí 65 536, tím se získá frekvence 1 Hz. Každá perioda této frekvence způsobí inkrementaci registru se sekundami [24]. V případě přetečení tohoto registru se v logické návaznosti přičítají minuty, hodiny, dny a roky.



Obrázek 9: Zobrazení sériové komunikace teploměru a hodin (Vytvořeno v DigiKey)

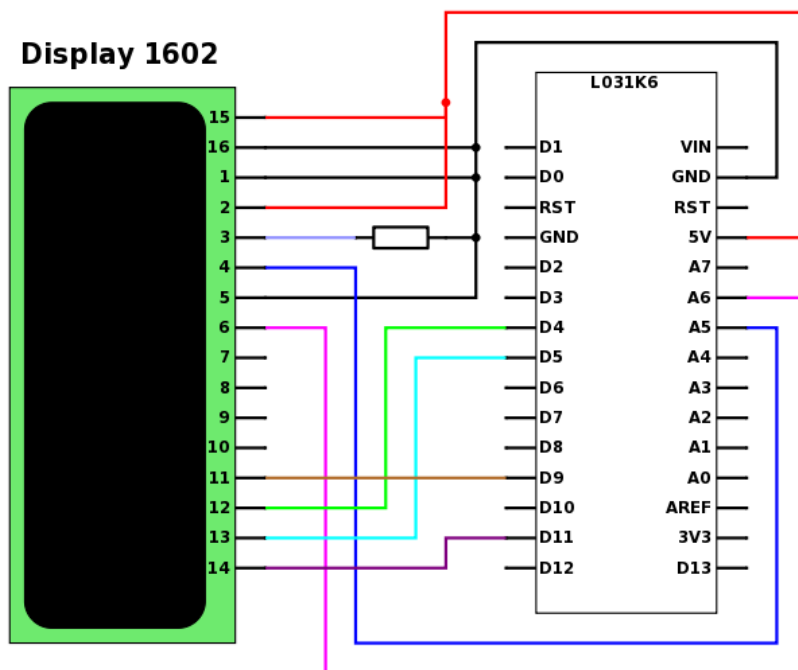
2.3.2 Displej

K zobrazování teplot a reálného času používám dvouřádkový displej WINSTAR WH1602A-YTI-ET [25], který je k mikrokontroleru připojen paralelně, to znamená, že pro komunikaci

potřebuje 6 datových vodičů. Zapojení displeje včetně propojení s mikrokontrolerem je vypsáno v Tabulce 3 (je zohledněno pořadí pinů).

Tabulka 3: Tabulka použitých výstupních portů z displeje včetně zapojení do Nuclea. Převzato z [25]

| Pin | Symbol | Mikrokontroler |
|-----|--------|----------------|
| 15 | A | +5 V |
| 16 | K | GND |
| 1 | Vss | GND |
| 2 | Vdd | +5 V |
| 3 | Vo | Potmetr |
| 4 | RS | A5 |
| 5 | R/W | GND |
| 6 | E | A6 |
| 11 | DB4 | D9 |
| 12 | DB5 | D4 |
| 13 | DB6 | D5 |
| 14 | DB7 | D11 |



Obrázek 10: Schéma zapojení LCD Displeje (Vytvořeno v DigiKey)

Na displeji se v pravém horním rohu zobrazuje teplota měřená senzorem TEMP1 a v levém horním rohu měření senzorem TEMP2, který monitoruje teplotu okolí. Celý dolní řádek ukazuje reálný středoevropský čas. Přehled včetně formátu zobrazení je v Tabulce 4.

Tabulka 4: Přehled zobrazovaných hodnot na displeji

| Pozice | Zdroj | Formát zobrazení |
|-------------------------|-------|------------------|
| Pravá polovina 1. řádku | TEMP1 | 00.0 °C |
| Levá polovina 1. řádku | TEMP2 | 00.0 °C |
| Celý 2. řádek | RTC | dd.mm.rrrr 00:00 |

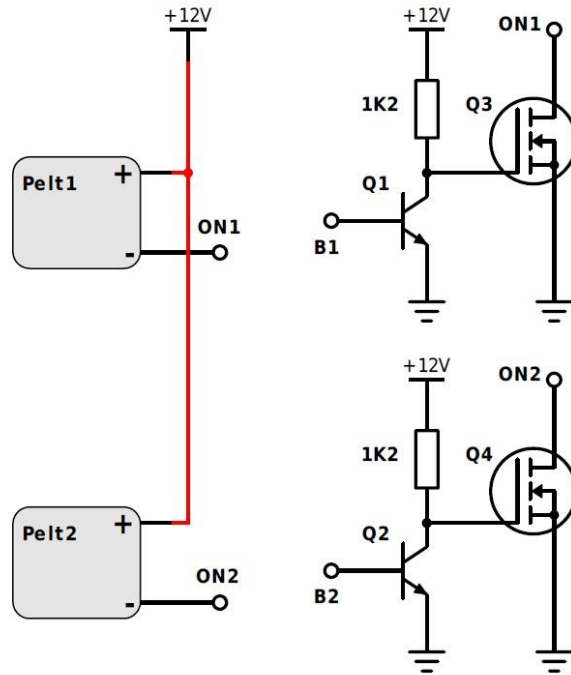
V případě, že dojde k odpojení některého z teploměrů, vypíše se neměnná číselná hodnota 00,0 °C. Ukázka zapnutého displeje s odpojeným teploměrem TEMP1 je zobrazena na Obrázku 10.



Obrázek 11: Ukázka zapojeného displeje

2.3.3 Spínání Peltierových článků

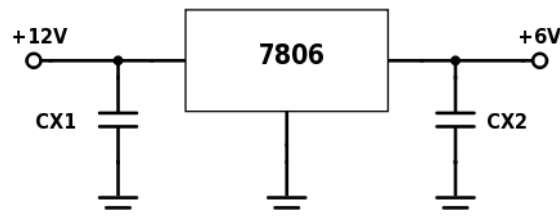
Spínání článků je řešeno unipolárním tranzistorem IRFZ24N [26] a bipolárním tranzistorem PDTD123Y [27] (Obrázek 12). Na vstup ON1/ON2 – Drain (D) je připojen zemnicí vývod článku, přičemž je Source (S) uzemněn. Na Gate (G) by mohl být připojen přímo mikrokontroler, ovšem ten je schopen na B1, B2, resp. D2, D10 budit napětím jen 3,3 V. Unipolární tranzistor IRFZ24N potřebuje na saturaci alespoň 6 V. Proto je celý obvod řešen buzením přímo ze zdroje. Rezistor je pro vytvoření elektrického proudu 10 mA a zajišťuje správné fungování bipolárního tranzistoru. Mikrokontroler řídí spínání pomocí bipolárního tranzistoru. Nucleo na základě svého naprogramování střídá napětí mezi 0 V a 3,3 V, které se objeví na bipolárním tranzistoru PDTD123Y, a tím ho otevře. V případě, že je na výstupu z mikrokontroleru logická 1, tedy 3,3 V, bipolární tranzistor se otevře a unipolární tranzistor se zavře. Uvádím tím Peltierův článek v nečinnost. V případě logické 0 na výstupu z B1/B2 je článek sepnutý.



Obrázek 12: Schéma zapojení tranzistorů (Vytvořeno v DigiKey)

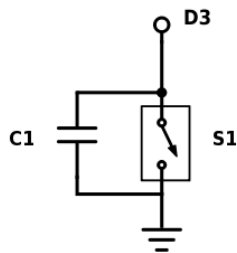
2.3.4 Ostatní součástky v obvodu

Stabilizátor pevného napětí je připojen vstupem na zdroj stejnosměrného napětí. Na jeho výstupu je připojeno napájení mikrokontroleru (Obrázek 13). Hodnoty kondenzátorů jsou ($CX1 = 20 \mu\text{F}$) a ($CX2 = 10 \mu\text{F}$).



Obrázek 13: Stabilizátor pevného napětí LM7806. (Vytvořeno v DigiKey)

Tlačítko je připojeno k mikrokontroleru a používá se pro přepínání režimů (Obrázek 14). Je k němu připojen keramický kondenzátor jako prevence proti záskmitům. Po stisku tlačítka se přepne režim na ten, co je v pořadí hned za ním. Po přepnutí režimu, který je poslední v pořadí, se vrátí opět na začátek.



Obrázek 14: Schéma tlačítka s kondenzátorem (Vytvořeno v DigiKey)

2.4 Programová část

Funkce monitorování a řízení mikrokontrolerem je definovaná nejen jeho vlastnostmi a použitými periferiemi, ale i kódem, který pojmenovává a oživuje jednotlivé I/O porty. Mezi naprogramované periferie patří:

- LCD display
- Teplotní senzory TEMP1 a TEMP2
- RTC
- Spínání článků
- Tlačítko
- USART komunikace pro nahrání času do RTC

Požadované hardwarové funkce jsou popsány v kapitole 2.3.

K programování mikrokontroleru jsem použil programové prostředí TrueStudio³ od společnosti Atollic⁴. Pomocí nástroje Cube (podrobněji v kapitole 2.4.1) jsem na základě vstupních parametrů vygeneroval kód, který mi předdefinoval a otevřel základní komunikaci dle mnou zadaných instrukcí.

2.4.1 Nástroj STM32CubeMX

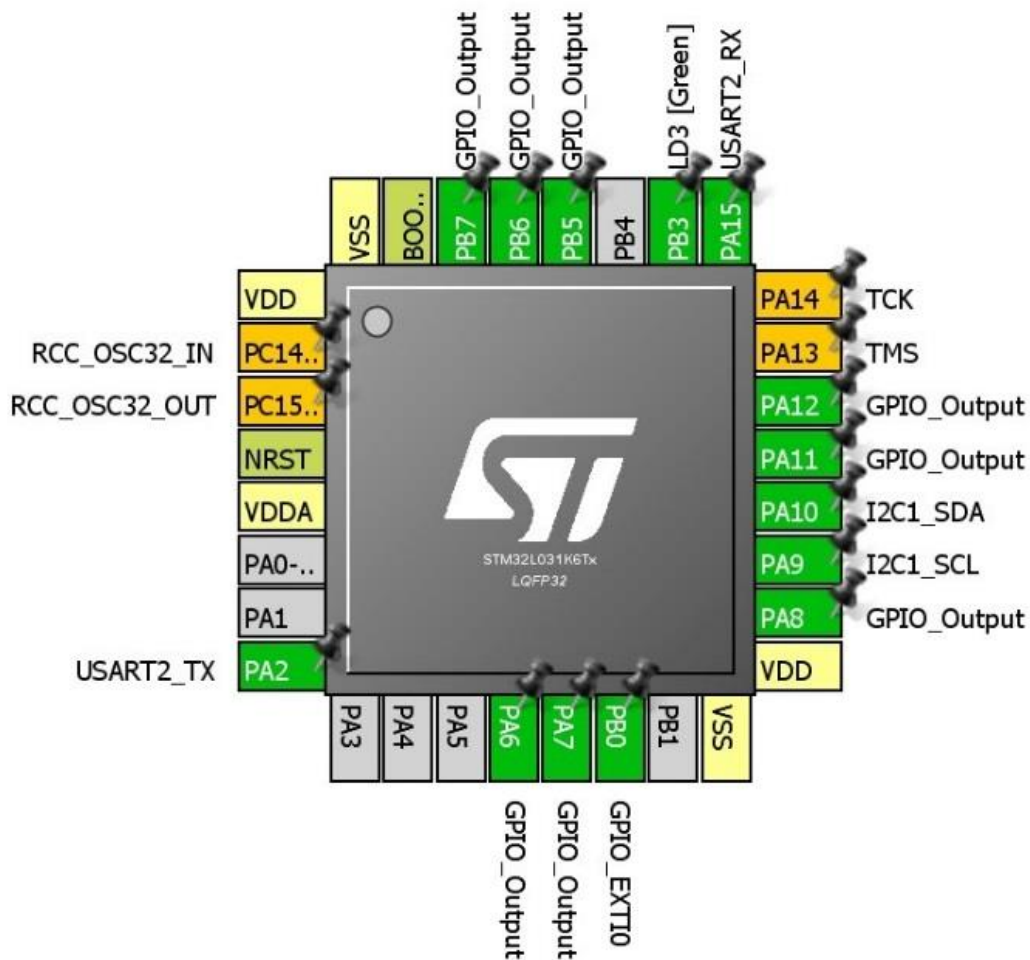
K vygenerování základního kódu pro práci a programování mikrokontroleru slouží aplikace STM32CubeMX⁵. Ta sdružuje všechny modely mikrokontrolerů od firmy STMicroelectronics [21]. Obsahuje knihovny se vstupy a výstupy jednotlivých mikrokontrolerů včetně podrobných popisů pomocných obvodů. Pomocí této aplikace si lze po zadání požadavků vybrat vhodný mikrokontroler pro námi požadovanou aplikaci.

³ Web: <https://atollic.com/truestudio/> březen 2017

⁴ Web: <https://atollic.com/> březen 2017

⁵ Ke stažení: <http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>, únor 2017

Základním krokem bylo na základě předpřipravených periférií definovat jednotlivé vstupy, které bude nutné používat (Obrázek 15). Jak už jsem psal v kapitole 2.3.1, je pro komunikaci teplotních senzorů a RTC použita sériová sběrnice I²C, která je definována na pinech PA9, PA10. LCD displej (2.3.2) je definován na výstupech PA6, PA7, PA8, PB7, PB6, PB5 – vše jako GPIO_Output. Těmito výstupy je přenášena datová informace o zobrazení, která je zpracována mikrokontrolerem na základě kódu. Pro ovládání funkce spínání (2.3.3) jsou definovány výstupy PA11, PA12. Na nich se na základě kódu objevuje logická 0 (0 V) a logická 1 (3,3V). Tyto výstupy jsou definovány vnitřním čítačem, který na základě programu řídí spínání. Sériová komunikace USART je na vstupech PA2, PA15 – ta je zde pouze pro nahrání času do hodin s baterií. Tlačítko je na výstupu PB0. Po zapojení a uzemnění je na stisknutém tlačítku napětí. Změna je detekována sestupnou hranou napěťové hladiny.

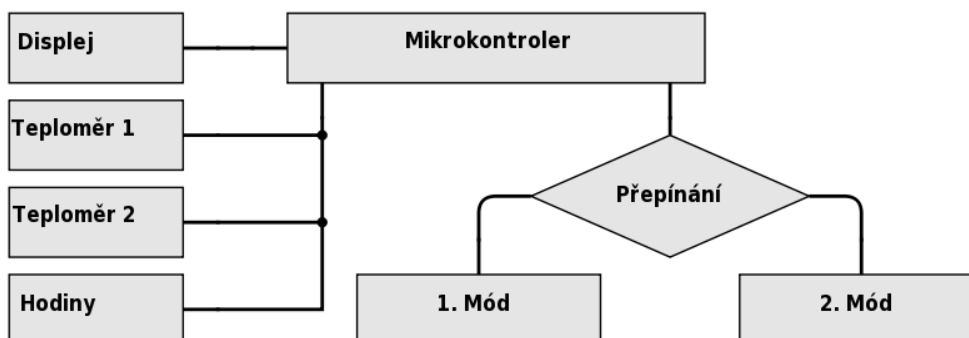


Obrázek 15: Přehled portů v programovém prostředí STM32CubeMX [21].

2.4.2 Blokové schéma fungování programu

Blokové schéma uceluje připojené periferie a jejich propojení, viz Obrázek 16. Mikrokontroler je monitorovací jednotkou pro stav teplotních senzorů a RTC článku, jejichž výstupy zpracovává a zobrazuje na displej. Druhou naprogramovanou funkcí mikrokontroleru je řízení spínání článků, které je ovládáno tlačítkem. V datové paměti jsou naprogramovány dva módy. První mód má za úkol držet na obou výstupech z mikrokontroleru pro řízení spínání 0 V. To na základě vysvětlení v kapitole 2.3.3 způsobí propojení obou článků a řízeného zdroje. Tento režim zajišťuje trvalé sepnutí článku do doby, než je přepnut, nebo dokud není celá elektronika odpojena od zdroje energie. Po sepnutí tlačítka se spínání článků přepne do režimu 2. V tomto režimu je první výstup k spínání článku na hodnotě 0 V pořád a druhý je naprogramovaný na spínání po 30 sekundových intervalech. Tento režim je testovací a měl by sloužit pro regulaci a udržení teploty mezi teplotou, kdy je jeden článek v provozu, a teplotou, kdy jsou v provozu oba články. Jeden článek je v tomto režimu zapnutý pořád a druhý je v 30 sekundových intervalech spínán.

Součástí naprogramování není implementované ukládání informací do paměti mikrokontroleru, která by si po odpojení zdroje pamatovala poslední režim spínání. Po vypnutí dochází k resetování a tím k návratu k módu 1.

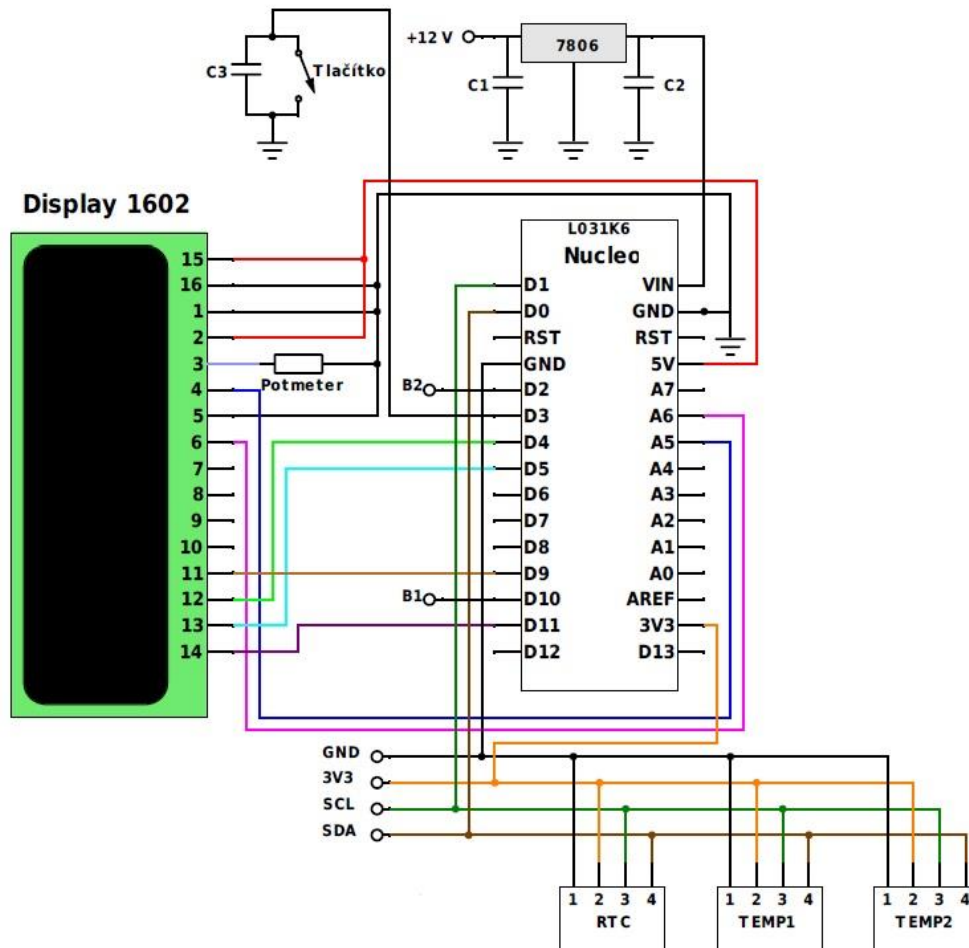


Obrázek 16: Blokové schéma programu. Vytvořeno v DigiKey.

2.5 Ucelené schéma všech periferií

Výsledné schéma propojení jednotlivých periferií je znázorněno na Obrázku 17. Toto schéma neobsahuje porty pro napájení ventilátorů FAN1, FAN2 a FAN3 a spínání článku (Obrázek 12).

Tento návrh byl realizován na vrтанém plošném spoji (viz kapitola 3.1).



Obrázek 17: Schéma zapojení periferií do mikrokontroleru, včetně výstupů B1, B2 na spínání článků. Vytvořeno v DigiKey.

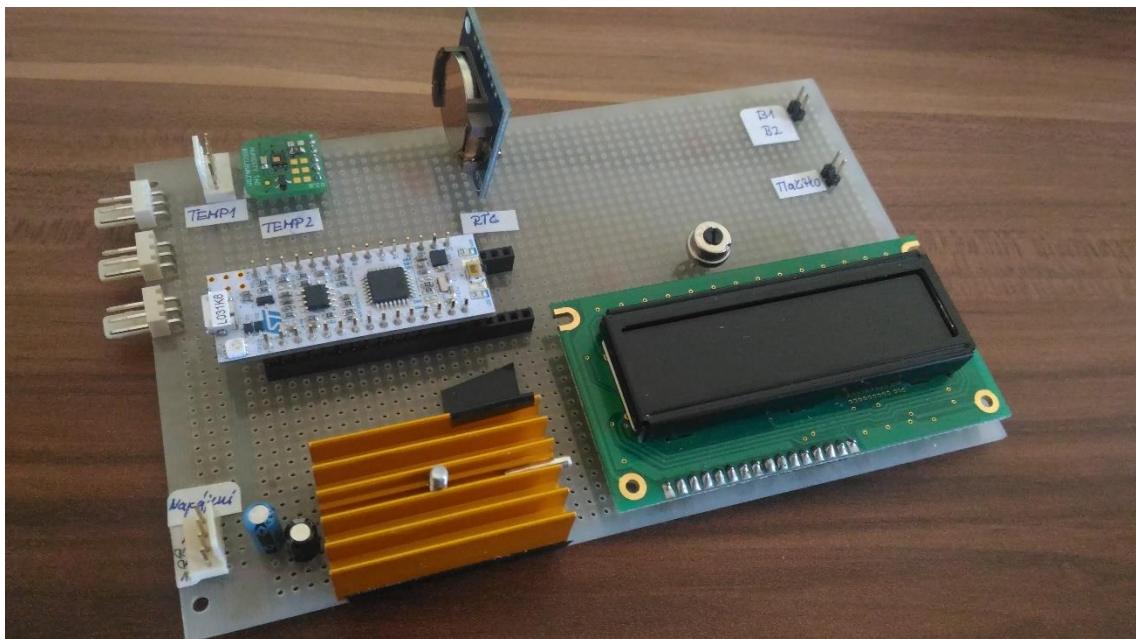
3 Realizace

3.1 Plošný spoj

Návrh jsem realizoval pomocí univerzálního vrtaného plošného spoje o rozměrech 160 mm x 100 mm s roztečí 2.54 mm [Příloha - Obrázek 31]. Na spoj jsou napájeny dutinkové lišty pro připojení mikrokontroleru a pro fyzickou podporu připájeného displeje. Mikrokontroler je umístěn v pomyslném středu pro dobrý přístup k výstupům použitých periférií. Na desce je napájen displej, RTC, TEMP2, tlačítko a stabilizátor. Všechny tyto periferie jsou napájeny na spodní část vrtaného plošného spoje, který je ošetřen tenkou měděnou vrstvou pro lepší spojení cínu s deskou. Jako vodiče jsem zde použil několik odizolovaných drátů o tloušťce 0,4 mm. Důležité bylo vymyslet správné umístění napájení a komunikace s víkem. K napájení ventilátorů slouží 3 navzájem kompatibilní vstupy. Všechny pracují na 12 V DC. Tento plošný spoj (Obrázek 19) je udělán přesně podle schémat, která jsou obsažena v návrhu, kapitola 2. Neobsahuje pouze pomocné tranzistory pro spínání článků, které jsem v rámci experimentování napájel na menší vyříznutou část podobného vrtaného plošného spoje (Obrázek 18).



Obrázek 18: Realizované spínání článků. (Na obrázku MOSFET s chladičem)



Obrázek 19: Fotografie realizovaného plošného spoje

Zlatý chladič v levém dolním rohu Obrázku 19 chladí stabilizátor pevného napětí 7806-STM. Nalevo od něj je vstup pro napájení přímo ze zdroje. Nad ním jsou v levé horní části napájeny vstupy na ventilátory FAN1, FAN2, FAN3. Horní část desky patří paralelnímu zapojení RTC článku s baterií a teploměřům TEMP1 a TEMP2. Teploměr TEMP2 je připojen přímo k desce. Teploměr TEMP1, který je v boxu, se pomocí žlutého kabelu a příslušné koncovky (Obrázek 27) připojuje na desku. RTC článek s baterií je napájen kolmo k desce z důvodu snazšího přístupu k baterii a elektronice. V pravém dolním rohu fotografie je displej, jehož kontrast lze ovládat pomocí potenciometru, který je nad ním. Tlačítko se připojuje přímo na desku pomocí vodičů, které jsou na něj napájeny.

3.2 Sestavení teplotní komory

Teplotní komora je sestavena ze dvou částí. Horní část, kterou tvoří odnímatelné víko, obsahuje veškerou elektroniku a s ní spojené vývody. Dolní část obsahuje odizolovanou nádobu. Základními stavebními kameny komory jsou dva články TEC1-127060S (jeden o výkonu 55 W) [14], dva chladiče Alpine 64 PLUS [28] s 12 V DC ventilátory o průměru 92 mm, od kterých se odvíjí velikost vnitřního plastového boxu s odnímatelným víkem, která je 220 mm x 230 mm x 345 mm. Z toho vyplývá její přibližný objem, který je dán vztahem



Obrázek 20: Chladič s ventilátorem Alpine 64 PLUS. (Převzato z [28])

$$V = a \cdot b \cdot c = (2,2 \cdot 2,3 \cdot 3,45) \text{ dm}^3 = 17,46 \text{ dm}^3.$$

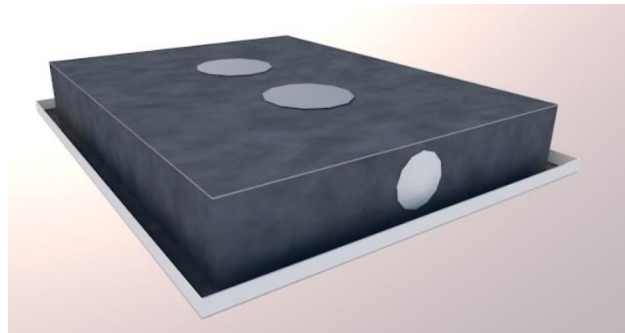
To odpovídá objemu přibližně 17 l bez izolace víka a uspořádání článků. Tato hodnota má pouze orientační charakter. Vnější nádoba je vytvořena z hliníkového plechu tloušťky 1 mm. Její rozměry jsou (š-v-h) 455 mm x 270 mm x 355 mm a účelem je především pevnost a odolnost komory vůči vnějším vlivům.

3.2.1 Víko – horní část komory

Plechové víko o rozměrech (š-v-h) 455 mm x 65 mm x 355 mm obsahuje základní elektroniku (články, chladiče, ventilátory), kabeláž a průduchy pro potřebnou cirkulaci ohřátého vzduchu. Vrchní strana víka má dva otvory o průměru 90 mm opatřené mřížkou, které jsou od sebe vzdálené 63 mm a jsou vycentrované do středu. Jsou zde pro odvod tepla v případě vypnutých ventilátorů, a pro přívod vzduchu v případě aktivního chlazení. Pro zajištění ještě lepší cirkulace jsou na kratších stranách víka dva otvory 30 x 30 mm (Obrázek 21). Ty jsou zabezpečeny dvěma

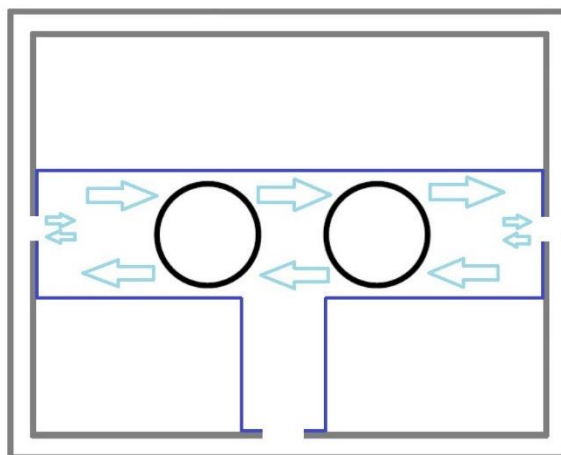
kovovými mřížkami, které mají čistě bezpečnostní charakter z důvodu ostrých hran vystřihnutého plechu.

Vzhledem k dobré tepelné vodivosti vnější nádoby z hliníku $\lambda = 229 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (platí pro teplotu $20 \text{ }^\circ\text{C}$) [29], bylo nutné použít dobrý tepelný izolant. V případě víka jsem použil polystyrén o tloušťce 5 mm , jehož tepelná vodivost $\lambda = 0,024 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (platí pro teplotu $20 \text{ }^\circ\text{C}$) [29] zajišťuje dostatečnou tepelnou neprostupnost.



Obrázek 21: Vizualizace plechového víka. Vytvořeno v ArchiCAD.

V této izolaci je také značný prostor pro kabeláž (Obrázek 22). Prostor slouží nejen pro lepší orientaci v případě přestavby, ale především pro snazší manipulaci s tepelným senzorem TEMP1, který je umístěn uvnitř komory. Kabeláž je poté vyvedena otvorem o rozměrech $27 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$. Tento otvor je opatřen gumovou izolační páskou, která slouží jako ochrana kabeláže.



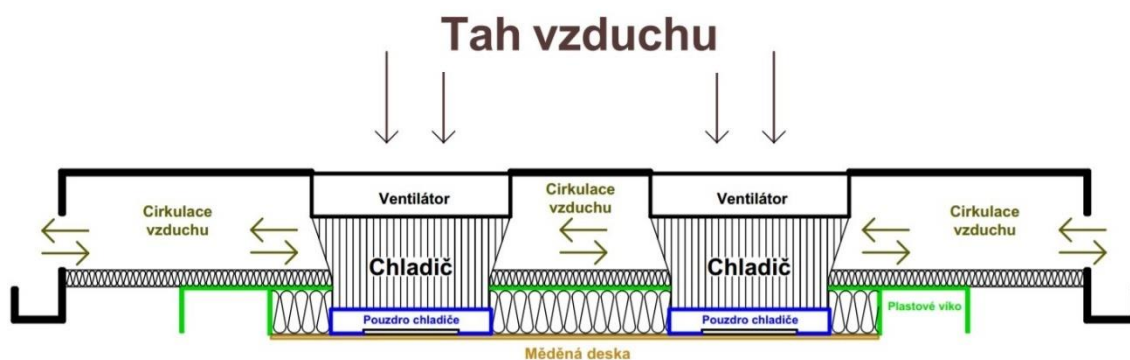
Obrázek 22: Vizualizace cirkulace vzduchu uvnitř plechového víka opatřeného polystyrénem včetně dutiny pro výstup kabeláže. Vytvořeno v ArchiCAD.

3.2.2 Komora – tepelně izolovaný box

Vnitřní nádoba je od té vnější oddělená 60 mm izolací. Izolace je tvořena na spodní straně nádoby lepeným polystyrénem ($1 \times 50 \text{ mm}$ a $1 \times 10 \text{ mm}$). Všechny obvodové strany jsou odděleny skelnou vatou (tepelná vodivost při $20 \text{ }^\circ\text{C}$ je $\lambda = 0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) [29] v rozmezí tloušťky od 60 mm do 70 mm . Tepelná vodivost je v tomto případě asi $4x$ lepší než případě polystyrenu. To je dáno vzduchovou složkou, která je při práci s vatou nutná (při silném vtěsnání ztrácí své izolační vlastnosti). Skelná vata je vhodná pro objemově náročnější místa a nevhodná pro stísněné úzké prostory. Horní část obvodových stran je zarovnána polystyrénem s okrajem vnitřní nádoby. Takto silná izolace byla zvolena s ohledem na objem vnitřní část komory.

3.2.3 Chlazení

Nejkomplikovanější částí celé stavby teplotní komory je jádro víka, ve kterém je umístěna elektronika. Jádro tvoří původní plastové víko o rozměrech 255 mm x 385 mm. Peltierovy články TEC1 a TEC2 jsou teplovodivou pastou, která je dodávána přímo s chladiči, nalepeny na chladičovou stranou vyzařující teplo. Takto připravené chladiče s články jsou vloženy do vyřezaných děr ve tvaru chladičů do plastového víka a přilepeny pro základní fixaci. V rozteči otvorů pro pevnou fixaci ventilátorů (přibližně 110 mm) jsou vyvrtány do víka 4 díry o průměru 3,5 mm a do nich jsou vloženy závitové tyče. Ty slouží jako jediný pevný spoj mezi všemi vrstvami víka. Rozměry článků jsou 40 mm x 40 mm x 3,6 mm. K nim jsem vytvořil z polystyrenu tenkého 3,5 mm pouzdro opatřené cestami pro vodiče, do kterého jsem vložil článek spolu s chladičem. Toto izolační pouzdro odděluje chladič článek od měděné desky (Obrázek 23). Teplá i studená strana článků jsou tím odizolovány. Plastové víko tvoří z vnitřní strany ve vhodných neměnných místech pouze lepený polystyren o tloušťce 13,5 mm. V místech, kde jsou mimo vrtů umístěny i vodiče je pak použita pro lepší tvárné vlastnosti jako izolace skelná vata.

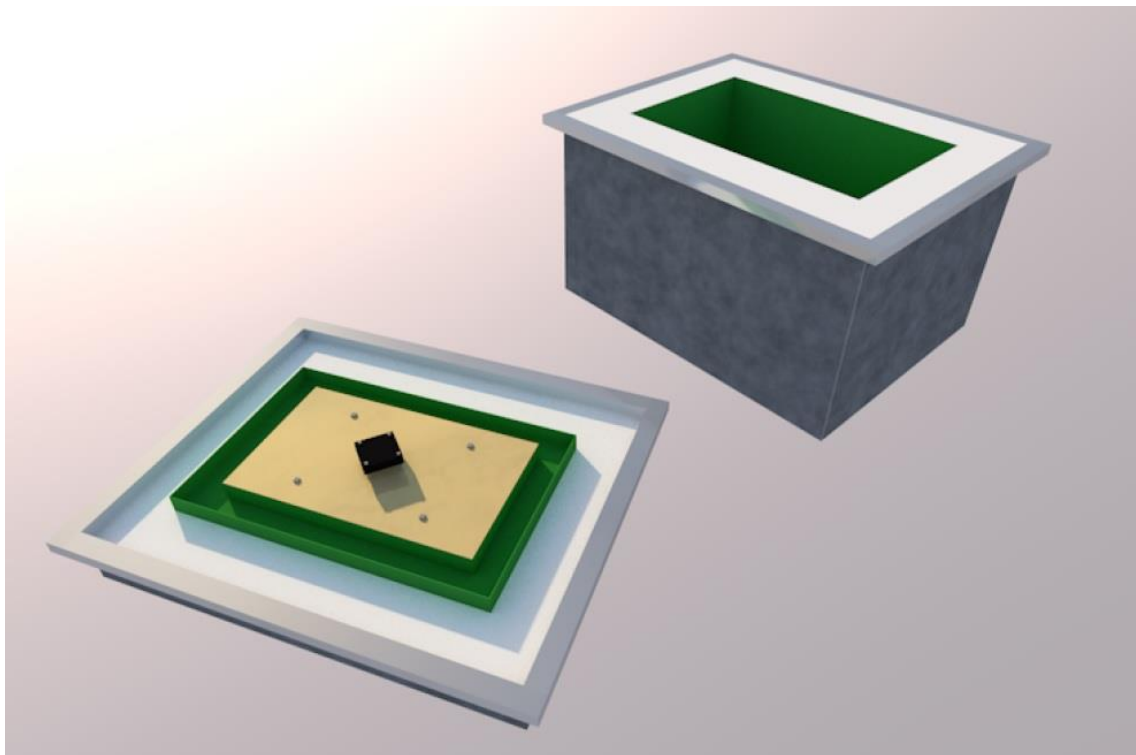


Obrázek 23: Řez víkem a jeho strukturou. Vytvořeno v ArchiCAD.

Hlavní plochou, která bude rozvádět chlad do bedny je měděná deska o rozměrech 160 mm x 275 mm x 1 mm a tepelné vodivosti $\lambda = 395 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ při 20 °C [29]. Těmito vlastnostmi je nejlepším cenově dostupným materiálem na trhu, co se rozvodu tepla týče. Do středu bedny je navrtán a na 3,5 mm šroubky posazen FAN3 o rozměrech 40 mm x 40 mm s odskokem 9,5 mm od desky tak, aby nasával chladný vzduch z povrchu měděné desky a rozváděl ho po komoře. V místě ventilátoru jsem vrtákem o šířce 3,5 mm vyvrtal díru na příslušné vodiče, které jsou upevněny lepidlem. To zde slouží mimo jiné i jako základní izolace. Do takto předpřipravené měděné desky jsem ve vzdálenostech 110 mm x 143 mm vyvrtal 4 díry o průměru 3,5 mm pro výsledné pevné uchycení desky k chladičům pomocí závitové tyče o průměru 3 mm. Na chladičovou stranu článků jsem nanasíl bílou teplo-vodivou pastu EXTRÉM s tepelnou vodivostí $\lambda = 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [30], která zajišťuje co možná nejnižší tepelné ztráty při odvodu tepla z desky.

Na takto ošetřené články jsem nalepil a upevnil měděnou desku spolu s ventilátorem FAN3, jehož vodiče se nechají zapustit do polystyrénu. Deska je uchycena pomocí podložek a matic příslušné velikosti. V případě utahování matic je třeba dávat veliký pozor, protože je měď v této šířce poměrně tvárným kovem a není těžké ji zdeformovat.

Připravené jádro víka je pak nasazeno pomocí čtyř závitových tyčí na již odizolovanou vrchní plechovou část s polystyrénem. Ta je z vnitřní i vnější strany upevněna podložkami a maticemi pro pevnější fixaci. Tato sada matic s podložkami slouží jako kalibrovací mechanismus pro správné upevnění a dolehnutí hrany plastového víka na plastový box. Vnější plechový box je ve spodní části vybaven ochrannými nožičkami proti poškrábání hladkých povrchů.



Obrázek 24: Vizuální podoba teplotní komory. Vytvořeno v ArchiCAD.

Veškeré náležitosti pro výrobu plechové bedny s víkem, posazení plastové bedny, pozice šroubů a ventilátoru jsou uvedeny v příloze.

3.2.4 Přehled výstupů z komory

Z nádoby vychází tři 4-pinové a jeden 3-pinový konektor. Ty slouží k dobrému úchytu vodičů k desce s hardwarem. Další vodiče jsou vývody z Peltierových článků dlouhé 0,5 m. Ty jsou napájeny na vývod z článku o délce 150 mm. Využil jsem odizolovanou značenou měděnou dvojlinku pro lepší přehled při vyhotovování. Kabley jsou pro lepší přehled popsány. Vývody jsou zachyceny na Obrázku 25, 26 a detailněji popsány v Tabulce 5.



Obrázek 25: Vývody pro TEMP 1 (žlutý), FAN1, FAN2 (černý), FAN3 (černo-červený)



Obrázek 26: Vývody Peltierových článků

V případě napájení ventilátorů FAN1, FAN2 a FAN3 není nutné zapojení v nějakém pořadí, jsou vzájemně kompatibilní. K zapojení 4-pinových dutinek do 3-pinových konektorů na desce slouží pomocná drážka na straně dutinek, která nedovolí špatné zapojení.

Tabulka 5: Přehled kabelových výstupů z bedny

| Počet | Výstup/Barva kabelu | Připojení | Účel |
|-------|----------------------------------|------------|--|
| 2 | 4-pin černý | FAN1, FAN2 | Napájení ventilátorů 12 V DC |
| 1 | 3-pin červený/černý | FAN3 | Napájení ventilátoru 12 V DC |
| 1 | 4-pin žlutý | TEMP1 | Napájení + I ² C komunikace |
| 2 | Dvoj-žíla černá s proužkem/černá | TEC1, TEC2 | Napájení článků |

Pro napájení a komunikaci vnitřního teploměru TEMP1 slouží žlutý kabel obsahující 4 žíly. Dvě pro komunikaci s mikrokontrolerem a dvě pro napájení (Tabulka 6). Kabel má na obou koncích stejný konektor. Vzhledem k umístění kompatibilního konektoru se zámkem k tomuto vývodu na desku, je nutné dodržovat v tabulce stanovené pořadí vodičů.

Tabulka 6: Přehled vodičů pro komunikaci TEMP1 s deskou

| Barva vodiče | Popis |
|-----------------|-------|
| Oranžová / bílá | GND |
| Oranžová | VCC |
| Zelená / bílá | SCL |
| Zelená | SDA |



Obrázek 27: Fotografie zapojení komunikačního kabelu

3.3 Měření teplotních vlastností komory

Měření je prováděno pomocí kalibrovaného teploměru TEMP1 a v některých případech pomocí rtuťového teploměru s rozsahem ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) s přesností $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k velikosti nádoby jsem se rozhodl měřit ve třech úrovních. První úroveň je v blízkosti měděného plechu, druhá úroveň je přibližně v polovině vnitřního boxu a třetí úroveň je na samotném dně. Od těchto úrovní se i odvíjí časová náročnost, která bude zohledněna v grafech, a bude diskutována v závěru měření. Vzdáleností je myšlen odstup teplotního senzoru od měděné (chladicí) desky. Teplota, na kterou lze vnitřek komory zchladit, souvisí s okolní teplotou vzduchu. Všechna měření byla prováděna s prázdnou komorou.

Na základě výsledků testovacího měření „Změny teploty v režimu spínání článků ve vzdálenosti 1 cm“ (Graf 7 v příloze) jsem se rozhodl je neprezentovat přímo v práci, ale uvést je pouze v příloze. To proto, že pokud je článek odpojen od zdroje stejnosměrného napětí přestane jeho jedna strana chladit a druhá hřát. Bohužel s komponenty, co mám k dispozici, a s celkovým uspořádáním teplotní komory jsem nebyl schopen dostatečně eliminovat prohřátí článku, a tedy i přenos tepla z horní části na měděnou desku po odpojení zdroje. Článek po odpojení okamžitě ztrácí své vlastnosti, které má, když je připojen. Vzhledem k tomu, že je vytvořen z tepelně velmi dobře vodivých materiálů, prakticky okamžitě dojde ke srovnání teplot mezi horní a dolní stranou. To má za následek narušení chlazení pouze jedním článkem a podstatné ovlivňování měření. V tomto případě je viníkem samotné víko. Důvodů je zde několik. Měděná deska, která je na spodní části víka a stará se o správné rozvádění tepla nebo chladu do komory, je monolitem pro teplotní přenos obou článků. Z toho vychází značné vzájemné ovlivňování teplot článků na měděné desce. Řešením by bylo oddělit tyto plochy a použít místo mědi pasivní chladiče s žebry, které by snadněji absorbovaly teplotu okolí. Další problém nastává při detailním pohledu na samotné víko. Jeho izolace je na popsany druh testování nedostačující. Jednou z možností je použití výhradně polystyrenu jako izolačního materiálu, ovšem ten nepatří mezi odolné materiály ve srovnání s plastem a hliníkovým plechem, a proto se domnívám, že by sám nebyl schopen nést použité procesorové chladiče. Dalším důvodem jsou samotné procesorové chladiče s ventilátory, které jsou směřovány tak, aby do mezery mezi plech a odizolované plastové víko vháněly vzduch. Tím je zaručena kvalita aktivního chlazení. Posledním důvodem je málo izolačního materiálu v oblasti chladičů nad víkem. Důvod je ten, že jsem chtěl zachovat co možná nejkvalitnější cirkulaci vzduchu, která by byla v případě ucpání vzduchových cest značně potlačena.

Veškerá měření jsem provedl s oběma články zapnutými přímo na zdroj MEAN WELL 12 V/20 A [30]. Vzhledem k možnosti kalibrovat napětíovou hladinu v řádech několika desetín voltů doplním, že zdroj byl v době všech měření nastaven na 12,0 V.

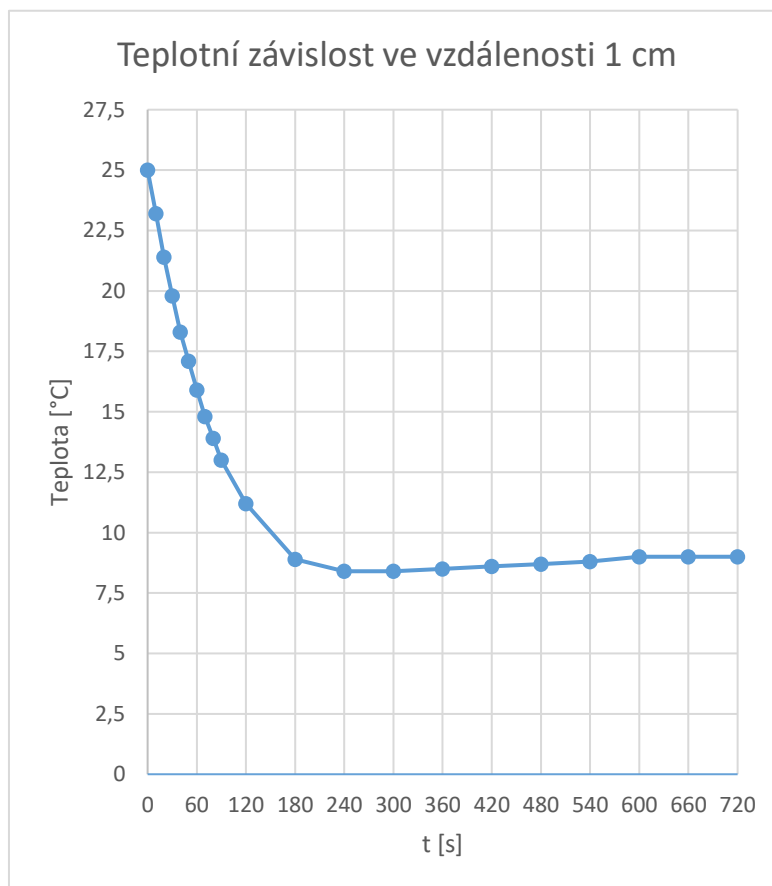
3.3.1 Závislost vnitřní teploty komory na čase

Měření ve vzdálenosti 1 cm od chladicí desky

Teplota okolí [°C]: 26,0

Tabulka 7: Měření vnitřní teploty - 1 cm

| Čas [s] | Teplota [°C] |
|---------|--------------|
| 0 | 25 |
| 10 | 23,2 |
| 20 | 21,4 |
| 30 | 19,8 |
| 40 | 18,3 |
| 50 | 17,1 |
| 60 | 15,9 |
| 70 | 14,8 |
| 80 | 13,9 |
| 90 | 13,0 |
| 120 | 11,2 |
| 180 | 8,9 |
| 240 | 8,4 |
| 300 | 8,4 |
| 360 | 8,5 |
| 420 | 8,6 |
| 480 | 8,7 |
| 540 | 8,8 |
| 600 | 9 |
| 660 | 9 |
| 720 | 9 |



Graf 1: Průběh měřené teploty ve vzdálenosti 1 cm od chladicí desky

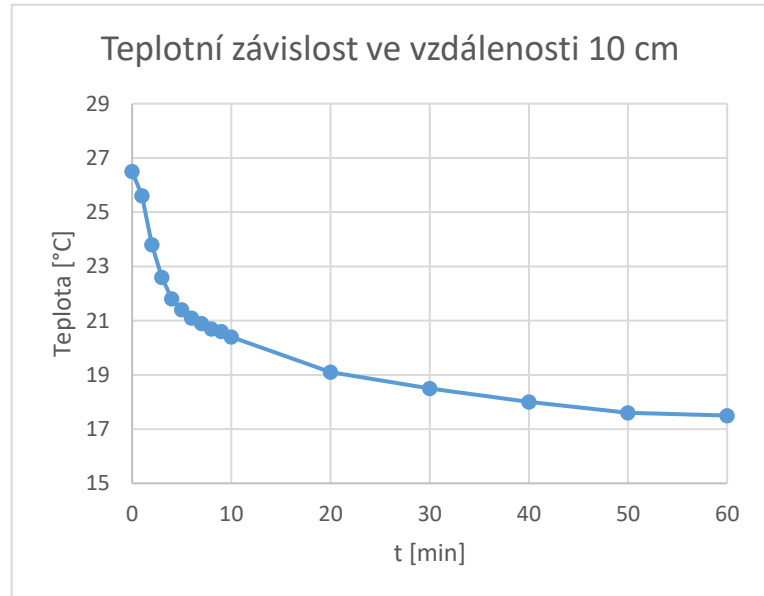
Měření s tímto odstupem teplotního senzoru od desky bylo poměrně rychlé, proto jsem v časovém rozmezí 0–90 sekund zvolil měření v 10 sekundových intervalech. V rozmezí 90–720 s jsem zvolil krok 30 sekund. Z grafu je patrná efektivita a linearita v samém počátku měření. V rozmezí 0–120 s je průběh téměř lineární, a došlo ke snížení teploty o 12 °C. To odpovídá rychlosti ochlazení 0,1 °C/s. Od hodnoty v čase $t = 180$ s je patrné, že dochází k ustálení teploty. Potenciálního minima bylo dosaženo v časovém intervalu $t \in (240; 300)$. Naměřené a zaznamenané minimum je 8,4 °C. Měření je vyobrazeno do času $t = 720$ s, protože poté se teplota ustálila. V tomto měření se podařilo snížit teplotu vůči teplotě okolí o 17 °C. Použit byl i rtuťový teploměr, který na začátku měření ukazoval 25 °C a na konci přibližně 8 °C.

Měření ve vzdálenosti 10 cm od chladicí desky

Teplota okolí [°C]: 27,3

Tabulka 8: Měření vnitřní teploty - 10 cm

| Čas [min] | Teplota [°C] |
|-----------|--------------|
| 0 | 26,5 |
| 1 | 25,6 |
| 2 | 23,8 |
| 3 | 22,6 |
| 4 | 21,8 |
| 5 | 21,4 |
| 6 | 21,1 |
| 7 | 20,9 |
| 8 | 20,7 |
| 9 | 20,6 |
| 10 | 20,4 |
| 20 | 19,1 |
| 30 | 18,5 |
| 40 | 18,0 |
| 50 | 17,6 |
| 60 | 17,5 |



Graf 2: Průběh měření teploty ve vzdálenosti 10 cm od chladicí desky

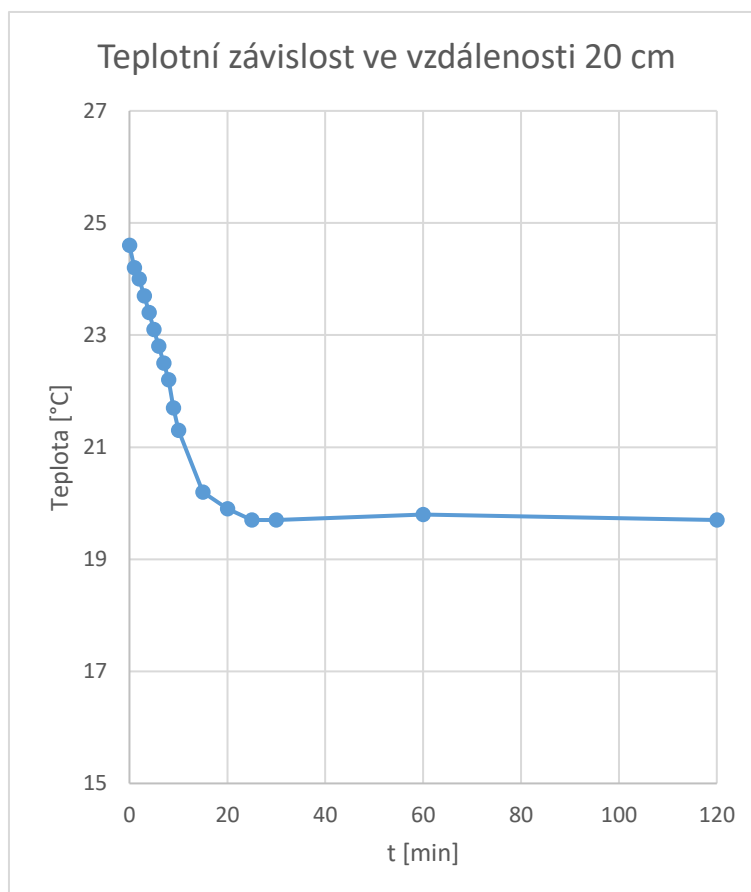
Měření probíhalo pouze teplotním senzorem TEMP1 ve vzdálenosti 10 cm od měděné desky. Rtuťový teploměr jsem v tomto případě nepoužil, protože by bylo skoro nemožné měřit v otevřeném prostoru stejnou teplotu jako měří teplotní senzor. Teploměr byl na svém přívodovém kabelu zavěšen uprostřed bedny. Vzhledem k poměrně velkému objemu bedny jsem počítal s tím, že bude třeba při měření zvolit delší časový krok. Z počátku jsem v rozmezí 0–10 minut zvolil měření s minutovým opakováním. Ve zbylém čase jsem hodnoty zaznamenával po 10 minutách. Z grafu je patrné, že největší pokles teploty nastal právě v prvních 5 minutách. V tomto časovém rozmezí teplota poklesla o 5,1 °C. To odpovídá poklesu teploty o přibližně 1 °C/min. Směrnice křivky napovídá, že přibližně v okolí 7 minuty dochází k pozvolnému zlomu a teplota má mnohem menší spád. Až do měření 60. minuty se teplota zcela neustálila.

Měření ve vzdálenosti 20 cm od chladicí desky – dno vnitřního boxu

Teplota okolí [°C]: 25,4

Tabulka 9: Měření vnitřní teploty - 20 cm

| Čas [min] | Teplota [°C] |
|-----------|--------------|
| 0 | 24,6 |
| 1 | 24,2 |
| 2 | 24,0 |
| 3 | 23,7 |
| 4 | 23,4 |
| 5 | 23,1 |
| 6 | 22,8 |
| 7 | 22,5 |
| 8 | 22,2 |
| 9 | 21,7 |
| 10 | 21,3 |
| 15 | 20,2 |
| 20 | 19,9 |
| 25 | 19,7 |
| 30 | 19,7 |
| 60 | 19,8 |
| 120 | 19,7 |



Graf 3: Průběh měřené teploty ve vzdálenosti 20 cm od chladicí desky

Měření změn teplot bylo v tomto případě časově velmi náročné, neboť jsem měřil na samotném dně teplotní komory. Teplota v bedně v době přikrytí byla necelých 25 °C, okolní teplota byla 25,4 °C. Při připojení komory na zdroj byl celkový průběh ochlazování velmi pomalý.

Uspokojivým výsledkem ale je, že do 15. minuty bylo ochlazování lineární a teplota klesla o 4,4 °C. To odpovídá asi 0,3 °C/min. Za touto hranicí se teplota stabilizovala a byla stejná přibližně 90 minut, tedy do konce měření.

3.3.2 Udržení teploty po vypnutí článků

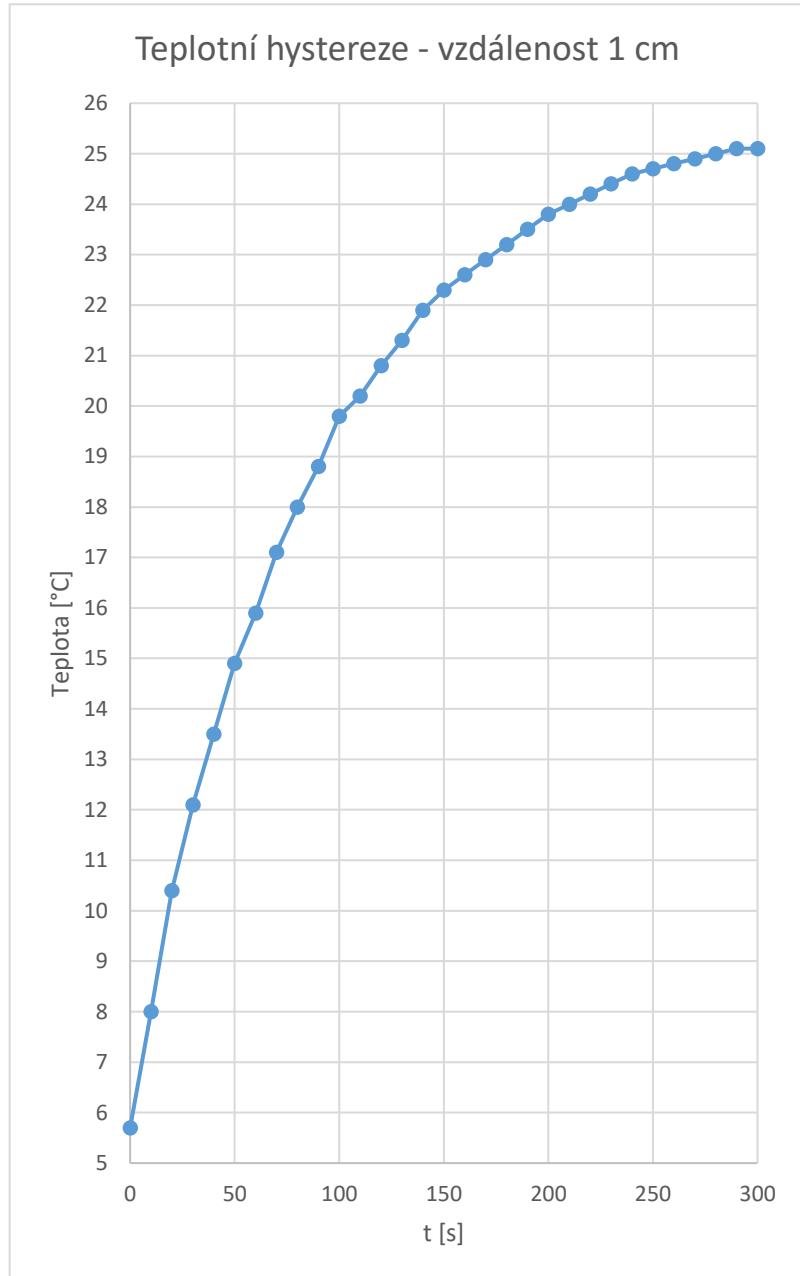
Tento druh měření se provádí vypnutím napájení zdroje pro oba Peltierovy články. Vzhledem k problému, který je popsán v úvodu kapitoly 0, jsem pro všechna měření nechával ventilátory chladičů zapnuté. Tím jsem zajistil rychlý přesun tepla ze článků pryč z komory, aby jejich ohřev zbytečně neovlivňoval měření.

Měření ve vzdálenosti 1 cm od chladicí desky

Teplota okolí [°C]: 25,7

Tabulka 10: Měření teplotní hystereze - 1 cm

| Čas [s] | Teplota [°C] |
|---------|--------------|
| 0 | 5,7 |
| 10 | 8,0 |
| 20 | 10,4 |
| 30 | 12,1 |
| 40 | 13,5 |
| 50 | 14,9 |
| 60 | 15,9 |
| 70 | 17,1 |
| 80 | 18,0 |
| 90 | 18,8 |
| 100 | 19,8 |
| 110 | 20,2 |
| 120 | 20,8 |
| 130 | 21,3 |
| 140 | 21,9 |
| 150 | 22,3 |
| 160 | 22,6 |
| 170 | 22,9 |
| 180 | 23,2 |
| 190 | 23,5 |
| 200 | 23,8 |
| 210 | 24,0 |
| 220 | 24,2 |
| 230 | 24,4 |
| 240 | 24,6 |
| 250 | 24,7 |
| 260 | 24,8 |
| 270 | 24,9 |
| 280 | 25,0 |
| 290 | 25,1 |
| 300 | 25,1 |



Graf 4: Měření teplotní hystereze ve vzdálenosti 1 cm od chladicí desky

Měření probíhalo teplotním senzorem TMP1 ve vzdálenosti 1 cm. Rtuťový teploměr jsem použil pro kontrolu výchozího stavu a byl umístěn spolu se senzorem 1 cm od chladicí desky. V čase $t = 300$ s rtuťový teploměr ukazoval 25 °C. V okamžiku, kdy se teplota v komoře ustálila na stabilní teplotu, jsem vypnul napájení Peltierových článků. Teplota v čase $t = 0$ s odpovídá ustálené teplotě v komoře před vypnutím. Kvůli podstatě měření ohřevu článků po vypnutí napájení je tabulka měření i graf velmi podrobný. Graf dokazuje, že ihned po odpojení dochází

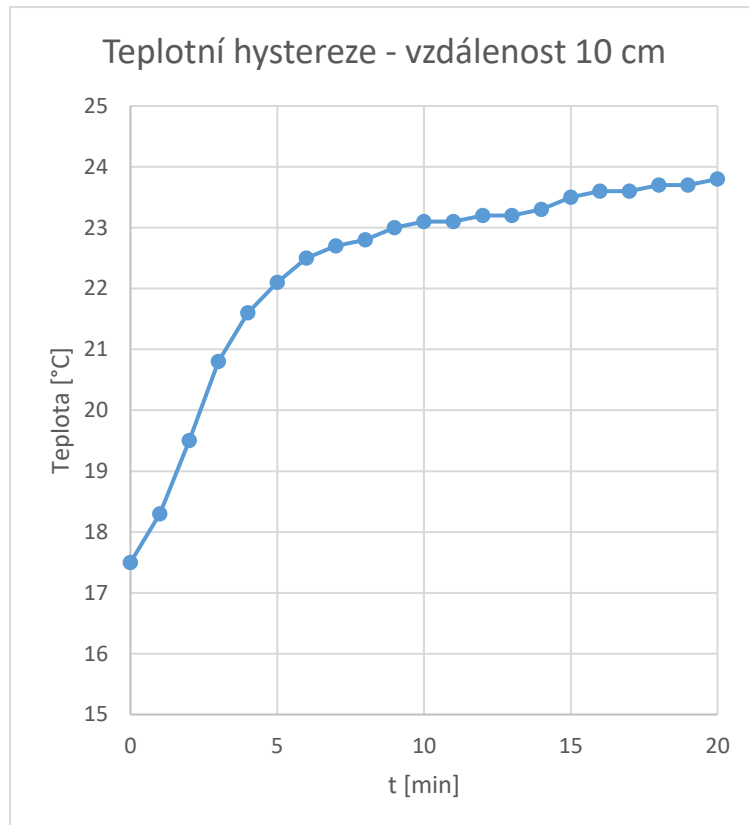
k prudkému vzrůstu teploty o 10,2 °C během první minuty měření. To odpovídá nárůstu teploty, který se blíží hodnotě 0,2 °C/s. Teplota desky uvnitř komory se ustálila během necelých 5 minut po vypnutí na teplotu blížíící se teplotě místnosti.

Měření ve vzdálenosti 10 cm od chladicí desky

Teplota okolí [°C]: 26,5

Tabulka 11: Měření teplotní hystereze – 10 cm

| Čas [min] | Teplota [°C] |
|-----------|--------------|
| 0 | 17,5 |
| 1 | 18,3 |
| 2 | 19,5 |
| 3 | 20,8 |
| 4 | 21,6 |
| 5 | 22,1 |
| 6 | 22,5 |
| 7 | 22,7 |
| 8 | 22,8 |
| 9 | 23 |
| 10 | 23,1 |
| 11 | 23,1 |
| 12 | 23,2 |
| 13 | 23,2 |
| 14 | 23,3 |
| 15 | 23,5 |
| 16 | 23,6 |
| 17 | 23,6 |
| 18 | 23,7 |
| 19 | 23,7 |
| 20 | 23,8 |



Graf 5: Teplotní průběh po odpojení článků ve vzdálenosti 10 cm od chladicí desky

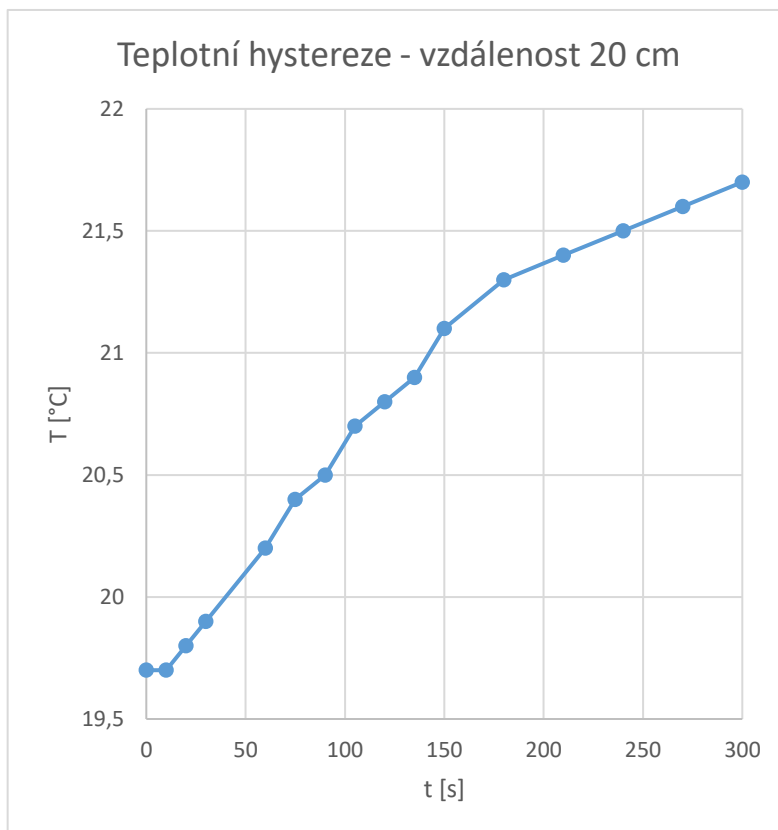
Měření bylo realizováno pouze teploměrem TEMP1 ve vzdálenosti 10 cm od měděné desky ve volném prostoru plastového boxu. Vzhledem k charakteru měření jsem použil neměnný krok 1 minutu. Teplota okolí byla v průběhu měření neměnná. Nejvyšší nárůst teploty nastal v prvních 5 minutách. Prvotní teplotní skok na teplotním senzoru byl 4,6 °C to je po zaokrouhlení téměř 1 °C/min. Takto rychlé oteplení může být příčinou špatné izolace, nebo špatně odvedeného tepla při vypnutí článků ze zdroje. Pak se rychlost oteplování komory snížila. V Grafu 5 je patrný takřka lineární teplotní průběh. Během zbylých 14 minut došlo k ohřevu komory o 1,3 °C.

Měření ve vzdálenosti 20 cm od chladicí desky – dno vnitřního boxu

Teplota okolí [°C]: 26,8

Tabulka 12: Měření teplotní hystereze - 20 cm

| Čas [s] | Teplota [°C] |
|---------|--------------|
| 0 | 19,7 |
| 10 | 19,7 |
| 20 | 19,8 |
| 30 | 19,9 |
| 60 | 20,2 |
| 75 | 20,4 |
| 90 | 20,5 |
| 105 | 20,7 |
| 120 | 20,8 |
| 135 | 20,9 |
| 150 | 21,1 |
| 180 | 21,3 |
| 210 | 21,4 |
| 240 | 21,5 |
| 270 | 21,6 |
| 300 | 21,7 |



Graf 6: Průběh teplotní hystereze ve vzdálenosti 20 cm od chladicí desky

Měřil jsem pouze teplotním senzorem TEMP1. V čase $t = 0$ s byly oba články odpojeny od zdroje. Počáteční naměřená teplota byla v komoře stabilizována více než hodinu. Celý proces stabilizování teploty spodní části komory po vypnutí článku je takřka lineární. Překvapivým výsledkem je, že od přibližně 3. minuty je ohřívání komory naprosto konstantní. Rychlost návratu teploty na referenční hodnotu je přesně $0,2$ °C/min.

3.3.3 Průběh chlazení a diskuze výsledků

Provedl jsem měření dvou různých jevů pro tři různé vzdálenosti teplotního senzoru od chladicí desky. Vzhledem k tomu, že teplotní senzor nebyl ponořen do žádné kapaliny a nebyl ani přilepen na žádný teplovodivý materiál, je důležité zmínit, že výsledky měření souvisí s tepelnou vodivostí vzduchu, která je pouze $\lambda = 0,024$ W·m⁻¹·K⁻¹ [29].

Z měření ve vzdálenosti 1 cm je jasné, že na povrchu desky dochází k rychlým teplotním změnám. Důvodem takto rychlých změn jsou kvalitní materiály pro přenos tepla (měď, keramika, teplovodivá pasta). Tyto změny jsou ovlivňovány tím, zda jsou nebo nejsou články připojeny.

V prvním případě, kde jsem měřil teplotu pod chladicí deskou, je rozdíl teplot v době měření mezi vnitřkem komory v ustáleném stavu a vnější teplotou místnosti 17 °C. Ochlazení trvalo necelé 3 minuty což je uspokojivý výsledek. V druhém případě tohoto měření jsem měřil teplotní hysterezi daného místa v komoře. Měření dokázalo, že po odpojení článku ze zdroje dochází k okamžitému ohřátí spodní, tedy chladné, části článku a měděné desky. Důvodem je teplo, které je v zahřáté části článku a v chladiči. Nemusí zde jít jen o článek ale i špatně odizolovanou hlavu chladiče a směr řízené ventilace. Na základě těchto skutečností lze konstatovat, že Peltierovy články nejsou vhodné pro sekvenční spínání, pokud vyžadujeme výkon.

Druhé měření probíhalo 10 cm od chladicí desky v uzavřeném prostoru komory. Velikost komory, výkon článků a měřené prostředí (vzduch) mají za následek propad výsledné teploty chlazení oproti měření u desky o více než 7 °C. To znamená, že teplota vzduchu v bodě teploměru uvnitř komory je o přibližně 10 °C nižší než teplota v místnosti, což je dobrý výsledek. V případě odpojení článku od zdroje byl v prvních minutách teplotní nárůst opravdu značný. Zde je dle mého názoru problém nejen v člancích ale i v izolaci, která je v horním víku na takováto měření nedostatečná.

Třetí měření probíhalo na dně teplotní komory. Teplota zde klesla jen o pár stupňů a velmi brzy dosáhla svého minima. Tento výsledek napovídá, že na takový objem jsou dva články a pouze deska s ventilátorem málo. Oproti tomu teplotní hystereze po odpojení článků byla téměř lineární.

Výsledky měření jsou na tak objemnou nádobu (cca 16 l) celkem uspokojivé. Na základě výsledků měření navrhuji následující změny:

- V případě, že bych měl chladit pouze vzduch uvnitř komory a chtěl bych docílit co možná nejrovnoměrnějšího a nejrychlejšího chlazení, určitě bude rozumnější místo měděné desky použít na každý článek zvlášť žebrovitý pasivní chladič. Ten by v režimu sepnutých Peltierových článků chladil mnohem lépe než samotná deska.
- Další možnou úpravou při tomto typu chlazení je použití vnitřní nádoby pouze z polystyrenu. Ten by zajistil dokonalejší odizolování. Pokud bychom chladili kapalinu uvnitř plastové nádoby, bylo by vhodné na měděnou desku naletovat několik měděných trubek, které by se do kapaliny ponořily. Takto vytvořené víko by z kapaliny efektivně absorbovalo teplo.
- Další možností úpravy je vytvoření efektivnější izolace ve víku. Realizovat lze vložením tepelně vodivého materiálu (měď) ve tvaru Peltierova článku mezi spodní desku a článek. Tím by došlo k vyvýšení článku spolu s chladiči a ventilátory. Vytvořil by se tím dostatečný prostor pro masivnější izolaci. Vedlejším efektem této úpravy by mohl být tlumený nástup prohřívání článku na chladicí desku po vypnutí napájecího zdroje.

4 Ekonomická rozvaha

Cena výrobku se může lišit na základě jednotlivých komponentů, výběru materiálu a použitých technologií výrobního procesu. Finanční výdaje dělím na dvě skupiny. První je elektronika, součástky a položky s ní spojené. Druhá skupina pak obsahuje cenu za použitý izolační materiál, nádobu, tepelné vodiče. Elektroniku a součástky jsem nakupoval v pražských pobočkách Alzy⁶ a GM electronic [30]. Vzhledem k tomu, že jsem chtěl vysoký chladicí výkon, bylo třeba se zaměřit na výrobce, kteří s tím mají zkušenosti. Procesory značky AMD⁷ jsou známé tím, že se dost zahřívají. Proto vybrat chladič, který je na tento typ procesorů postaven, bylo zcela jistě nejlepší řešení.

Chladicí box je prototypem, proto má tato ekonomická rozvaha spíše orientační charakter. Je sestavena z běžně dostupných materiálů. Přihlížel jsem primárně na funkčnost nikoli na úsporu a optimalizaci celého systému.

Tabulka 13: Ceny elektronických součástek

| Položka | Cena vč. DPH (CZK) |
|---|--------------------|
| Spínaný zdroj MEAN WELL 12 V/20 A | 1 510,- |
| 2x Chladič Alpine 64 PLUS | 508,- |
| 2x Peltierův článek 55 W 40x40mm | 416,- |
| Mikrokontroler Nucleo L031K6 | 299,- |
| Cínová pájka 0.6 mm 100 g | 240,- |
| LCD displej WINSTAR WH1602A-YTI-ET | 169,- |
| Univerzální spoj 160x100 RM 2.54 | 165,- |
| Síťový kabel, zástrčka/otevřený konec 1.5 m | 92,- |
| Izolované vodiče na cívce | 276,- |
| Ventilátor SUNON HA40101V4-999 | 99,- |
| Teplovodivá pasta EXTRÉM – 25ml | 99,- |
| Stabilizátor pevného napětí 7806-STM | 10,- |
| Konektory se zámkem | 10,- |
| 2x Unipolární tranzistor IRFZ24N | 26,- |
| Oboustranné kolíky | 40,- |
| 3x Dutinková lišta BL20G | 48,- |
| RTC | 125,- |
| 2x Teploměr HDC2080 | 150,- |
| Baterie CR 2032 | 45,- |
| Potenciometr 47k | 20,- |
| Ostatní součástky | 20,- |
| 2x Kovová mřížka pro ventilátory 92x92mm | 36,- |
| Celkem | 4 301,- |

⁶ Web: <https://www.alza.cz/> květen 2017

⁷ Web: <http://www.amd.com/en> květen 2017

Tabulka 14: Ceny materiálu na výrobu odizolované komory

| Položka | Cena vč. DPH (CZK) |
|--|--------------------|
| Hliníkový plech Prefalz Stucco 1.5 m ² + nýty | 600,- |
| Plastová bedna Omni Box S, modrá | 99,- |
| Měděná deska 275x160mm | 300,- |
| 2x Ochrana vzduchových otvorů | 68,- |
| Lepidlo na polystyrén | 50,- |
| Lepidlo na kov | 150,- |
| Izolační gumová páska | 50,- |
| Polystyrén 3.5 mm | 85,- |
| Polystyren 10 mm | 79,- |
| Polystyren 50 mm | 100,- |
| Skelná vata | 52,- |
| Matice, šrouby, podložky, tyč s metrickým závitem | 75,- |
| Celkem | 1 708,- |

Celková částka za sestavení prototypu činí 6 009,- a zahrnuje veškerý použitý materiál na sestavení komory. Několik položek z celkové rozvahy bylo naddimenzovaných, protože se nedaly sehnat v menším požadovaném množství. V celkové ceně nejsou zahrnuty náklady spojené s testováním a odlaďováním modelu.

5 Závěr

Teoretická část práce pojednává o základních principech, které jsou nutné pro chápání Peltierova jevu, a tedy i funkce tepelného čerpadla. Teoretická část práce dále obsahuje popis a základní funkce mikrokontroleru, jeho periferií, vlastností a použití.

Cílem práce byl návrh, sestavení a proměření teplotní komory chlazené dvěma Peltierovými články. Návrh elektroniky je realizován na vrtaném plošném spoji, kde jsou umístěny potřebné periferie, nebo možnost k jejich připojení. Mikrokontroler je schopen měřit a zobrazovat teplotu na displeji. Z praktických důvodů je na desce RTC článek s baterií, který uchovává aktuální čas i po vypnutí zdroje napájení. K desce se dají připojit pomocné obvody pro režimy spínání Peltierových článků.

V rámci bakalářské práce jsem vytvořil teplotní komoru, která se skládá z vnitřní odizolované části a vnější plechové. Elektronika je umístěna v odnímatelném víku, ze kterého vycházejí přívodové vodiče pro napájení Peltierových článků a ventilátorů. Přes vnitřní odizolovanou část víka je vyveden kabel s napájecími a komunikačními vodiči pro teplotní senzor TEMP1, který umožňuje měření změn teploty uvnitř uzavřené teplotní komory.

Vnitřní nádoba komory byla zvolena s ohledem na velikost chladičů s ventilátory. Ty jsou pro svou váhu a chladičí výkon podpírány vnitřní (plastovou) i vnější (plechovou) nádobou. Minimální navrhovaný objem nádoby byl 1 l, já jsem zvolil větší objem, kvůli variabilitě použití a velké hmotnosti víka. Tento způsob zpracování zajišťuje odolnost celého systému.

Během měření jsem narazil na několik skutečností. Při chlazení tak velkého vzduchem vyplněného prostoru měděným plechem, který slučuje oba články, dochází k velmi pomalému přenosu teploty z mědi do celého prostoru. Chlazení bylo urychleno ventilátorem, který je umístěn na vnitřní straně, ovšem pouze ve vzdálenosti několika málo centimetrů od měděné desky, čemuž odpovídala i efektivita chlazení. Dalším pozorovaným jevem je prohřívání Peltierových článků po odpojení od zdroje napětí, které způsobí ztrátu vlastností tepelného čerpadla a sloučí teploty horní a dolní strany článku. Tento jev byl nejcitelnější ve chvíli, kdy byl měřený článek v dostatečně dlouho připojen ke zdroji a došlo v rámci napětí zdroje k maximálnímu rozdílu teplot mezi teplou a studenou stranou. V tomto případě nebyl ani zapnutý ventilátor chladiče uspokojivým řešením, protože nestačil teplo z teplé strany článku odvést včas.

Vytvořil jsem teplotní komoru, která má spíše laboratorní charakter. Vzhledem k plastovému vnitřku komory je zde dle mého názoru potenciál pro měření ohřevu, respektive chlazení kapaliny. To lze realizovat přiletováním měděných trubek na měděnou desku. Ty by mohly být ponořeny v kapalině a tím předávat teplo efektivněji, než je tomu u vzduchu. Při užití správné

hydroizolace teplotního senzoru by bylo možné s jeho pomocí měřit teplotu v kapalině. Víko teplotní komory je vytvořeno tak, aby nebylo těžké ho rozebrat a provést jakékoli úpravy. Vnitřní prostor je uzpůsoben tak, že je možnost měnit objem nádoby pomocí polystyrénu. Z toho lze vytvořit menší nádobu, pro rychlejší odvod tepla. Je tedy možné se výsledkem této práce zabývat i nadále a pokračovat v optimalizaci celého systému.

Bibliografie

- [1] K. Seeger, *Semiconductor Physics*, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [2] J. Reichl, „Encyklopedie fyziky,“ 1 Únor 2010. [Online]. Available: <http://fyzika.jreichl.com/>. [Přístup získán 5 Únor 2017].
- [3] S. M. Sze a K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons, Inc., 2007.
- [4] A. Sharma, *Semiconductor Electronics*, New Delhi: New Age International (P) Ltd., 1996.
- [5] G. Gromov, „Thermoelectric cooling modules, RMT Ltd,“ 2003. [Online]. Available: http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf. [Přístup získán 20 Květen 2017].
- [6] „Skupina ČEZ,“ ČEZ, a.s., 2013. [Online]. Available: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k31.htm>. [Přístup získán 14 Leden 2017].
- [7] D. D. Pollock, *Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool*, Amherst: ASTM, 1985.
- [8] D. Cremaldi, „Seebeck and Peltier Effects,“ 2009. [Online]. Available: <http://www.phy.olemiss.edu/~cremaldi/PHYS417/>.
- [9] „Kryotherm,“ 2007. [Online]. Available: <http://www.kryotherm.com/indexbc8b.html?tid=47>. [Přístup získán 16 Březen 2017].
- [10] „NanoCool,“ NanoPore, [Online]. Available: <http://www.nanocool.com/cooling-systems>. [Přístup získán 12 Květen 2017].
- [11] „Quick-cool,“ Quick-OHM Küpper & Co. GmbH, 2016. [Online]. Available: <http://www.quick-cool.de/>. [Přístup získán 13 Květen 2017].
- [12] „TE Technology,“ TE Technology, INC., 2017. [Online]. Available: <https://totech.com/>.

- [13] „Ferrotec,“ Ferrotec (USA) Corporation, 2001. [Online]. Available: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref01/>. [Přístup získán 25 Březen 2017].
- [14] GME, *Thermoelectric Cooler Performance Specifications*.
- [15] „MikroElektronika,“ MikroElektronika d.o.o, 1998. [Online]. Available: <https://www.mikroe.com/>. [Přístup získán 6 Květen 2017].
- [16] M. Verle, *Architecture and programming of 8051 MCUs*, MikroElektronika, 2007.
- [17] STMicroelectronics, *Positive Voltage regulator ICs*, GME.
- [18] STMicroelectronics, *UM1956 User Manual - STM32 Nucleo-32 board*, 2017.
- [19] „Digi-Key Electronics,“ [Online]. Available: <https://www.digikey.com/product-detail/en/stmicroelectronics/NUCLEO-L031K6/497-16283-ND/5806780>. [Přístup získán 4 Květen 2017].
- [20] B. Group, „BARR group,“ 2012. [Online]. Available: <https://barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>. [Přístup získán 22 Duben 2017].
- [21] „STMicroelectronics,“ [Online]. Available: http://www.st.com/content/st_com/en.html. [Přístup získán 15 Květen 2017].
- [22] J. b. Jonathan Valdez, „Texas Instruments,“ Červen 2014. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>. [Přístup získán 22 Duben 2017].
- [23] T. Instruments, *HDC2080 Low power humidity and temperature digital sensors*, Texas Instrumets.
- [24] *RTC DS1307*, Maxim Integrated, 2017.
- [25] Winstar, *WHI602A LCD Display*.
- [26] I. Rectifier, *IRFZ24N Power MOSFET*, 1999.
- [27] Nexperia, *PDTD123Y series*, 2009.
- [28] „Arctic,“ Arctic GmbH, [Online]. Available: https://www.arctic.ac/eu_en/alpine-64-plus.html.

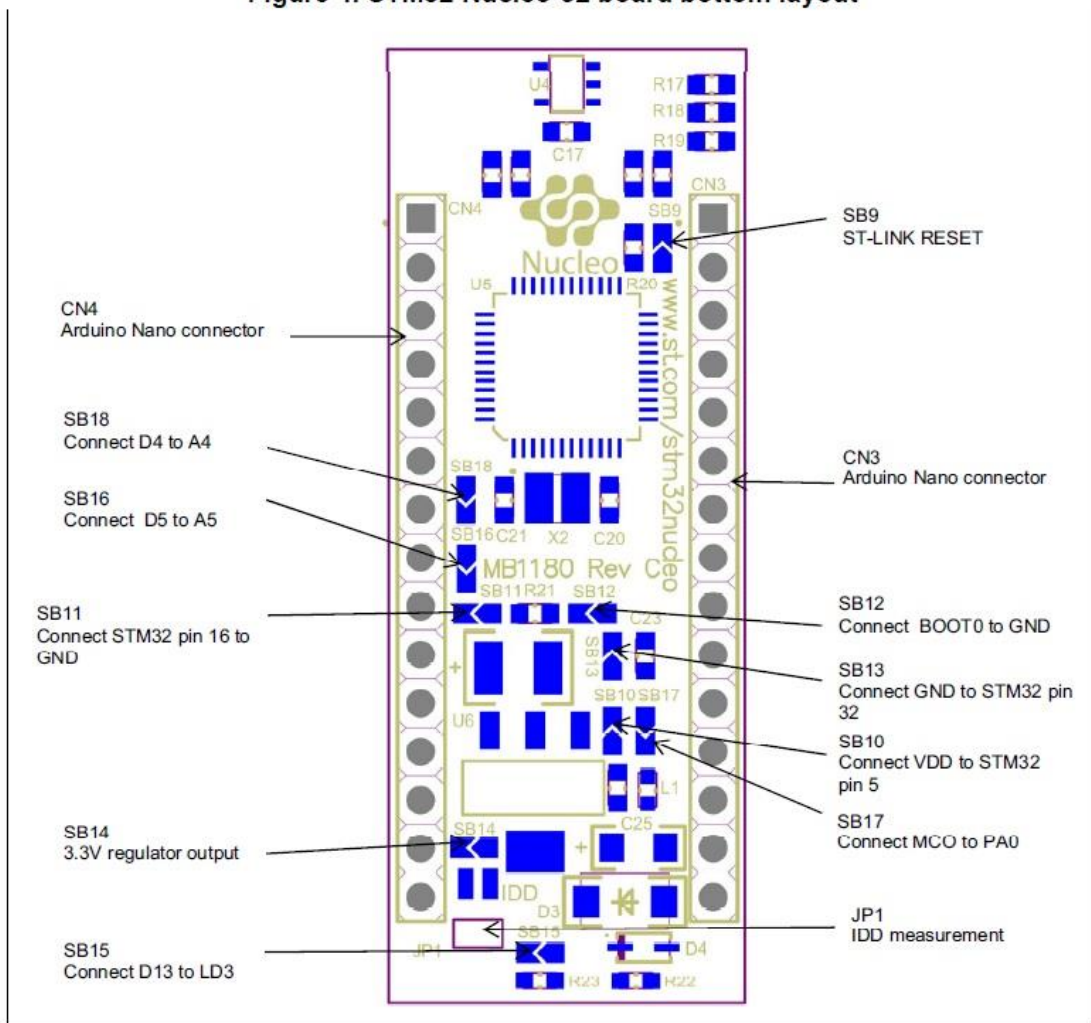
- [29] T. E. ToolBox, „Engineering ToolBox,“ [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. [Přístup získán 15 Duben 2017].
- [30] s. s. GM electronic, „GM electronic,“ [Online]. Available: <https://www.gme.cz/>. [Přístup získán 4 Květen 2017].

Seznam obrázků

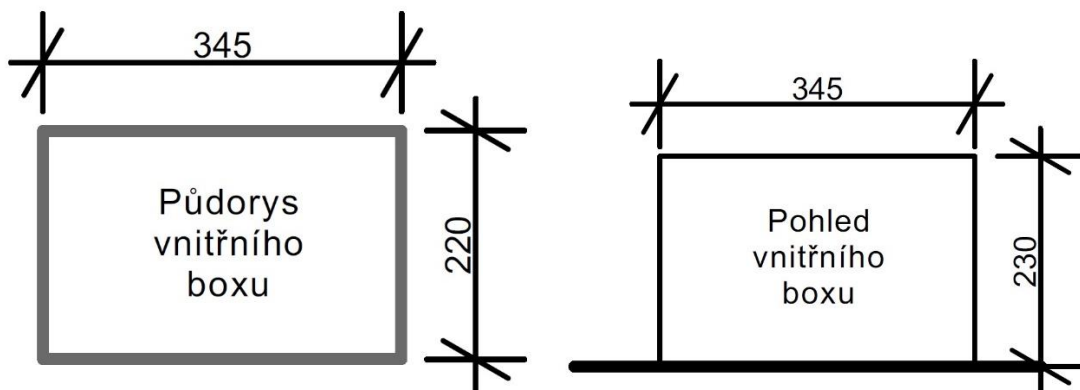
| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Princip Seebeckova jevu. Převzato z [2] | 16 |
| Obrázek 2: Měření teploty pomocí Seebeckova jevu. Převzato z [2] | 17 |
| Obrázek 3: Princip Peltierova jevu. Převzato z [2] | 17 |
| Obrázek 4: Popis funkce Peltierova článku. Převzato z [2] | 18 |
| Obrázek 5: Ilustrativní řez Peltierovým článkem. Převzato z [2] | 19 |
| Obrázek 6: Peltierův článek TEC1-127060S a jeho rozměry. Převzato z [14] | 22 |
| Obrázek 7: Vnitřní uspořádání zapouzdřeného mikrokontroleru. Převzato z [15] | 22 |
| Obrázek 8: Přehled vstupních a výstupních portů. Převzato z [21] | 24 |
| Obrázek 9: Zobrazení sériové komunikace teploměrů a hodin (Vytvořeno v DigiKey) | 25 |
| Obrázek 10: Schéma zapojení LCD Displeje (Vytvořeno v DigiKey) | 26 |
| Obrázek 11: Ukázka zapojeného displeje | 27 |
| Obrázek 12: Schéma zapojení tranzistorů (Vytvořeno v DigiKey) | 28 |
| Obrázek 13: Stabilizátor pevného napětí LM7806. (Vytvořeno v DigiKey) | 28 |
| Obrázek 14: Schéma tlačítka s kondenzátorem (Vytvořeno v DigiKey) | 29 |
| Obrázek 15: Přehled portů v programovém prostředí STM32CubeMX [21]. | 30 |
| Obrázek 16: Blokové schéma programu. Vytvořeno v DigiKey. | 31 |
| Obrázek 17: Schéma zapojení periférií do mikrokontroleru, včetně výstupů B1, B2 na spínání článků. Vytvořeno v DigiKey. | 32 |
| Obrázek 18: Realizované spínání článků. (Na obrázku MOSFET s chladičem) | 33 |
| Obrázek 19: Fotografie realizovaného plošného spoje | 33 |
| Obrázek 20: Chladič s ventilátorem Alpine 64 PLUS. (Převzato z [28]) | 34 |
| Obrázek 21: Vizualizace plechového víka. Vytvořeno v ArchiCAD. | 35 |
| Obrázek 22: Vizualizace cirkulace vzduchu uvnitř plechového víka opatřeného polystyrénem včetně dutiny pro výstup kabeláže. Vytvořeno v ArchiCAD. | 35 |
| Obrázek 23: Řez víkem a jeho strukturou. Vytvořeno v ArchiCAD. | 36 |
| Obrázek 24: Vizuální podoba teplotní komory. Vytvořeno v ArchiCAD. | 37 |
| Obrázek 25: Vývody pro TEMP 1 (žlutý), FAN1, FAN2 (černý), FAN3 (černo-červený) | 38 |
| Obrázek 26: Vývody Peltierových článků | 38 |
| Obrázek 27: Fotografie zapojení komunikačního kabelu | 38 |
| Obrázek 28: Přehled dolní části mikrokontroleru. Převzato z [18] | 55 |
| Obrázek 29: Kotování děr na měděné desce (Vytvořeno v ArchiCAD) | 57 |
| Obrázek 30: Specifikace článku TEC1-127060S dodávané výrobcem. Převzato z [14] | 58 |
| Obrázek 31: Univerzální plošný vrtaný spoj, 2,54 mm. Převzato z [30] | 58 |

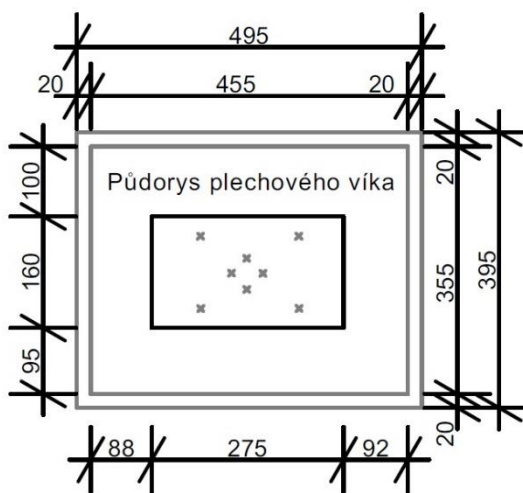
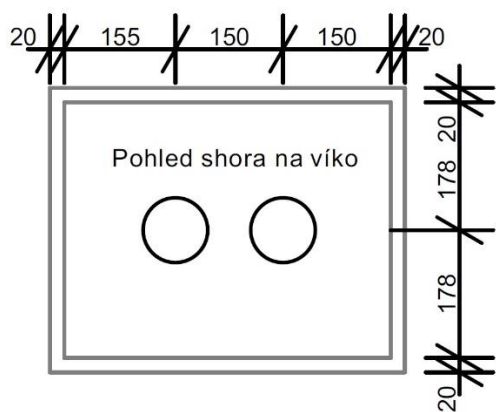
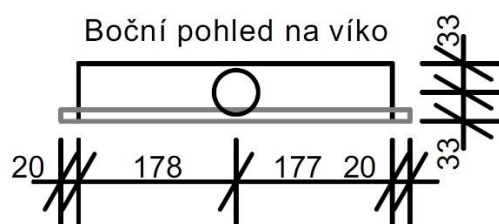
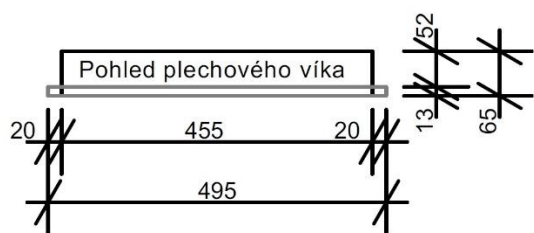
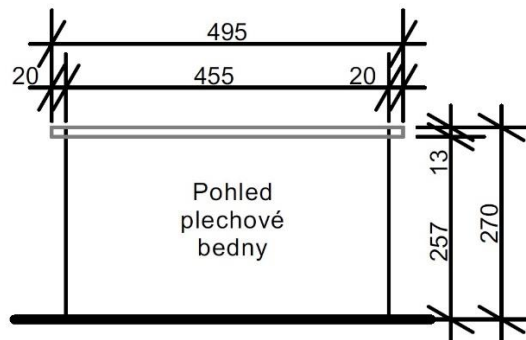
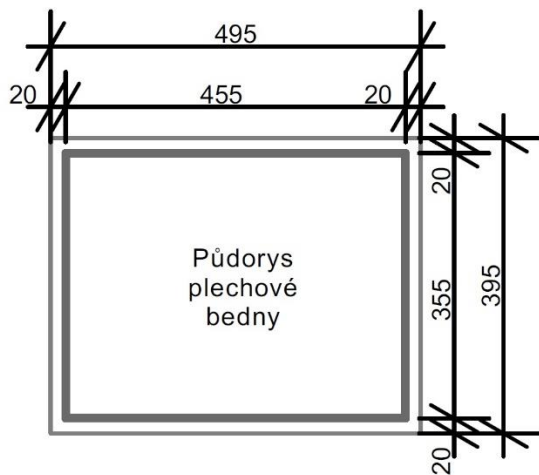
Přílohy

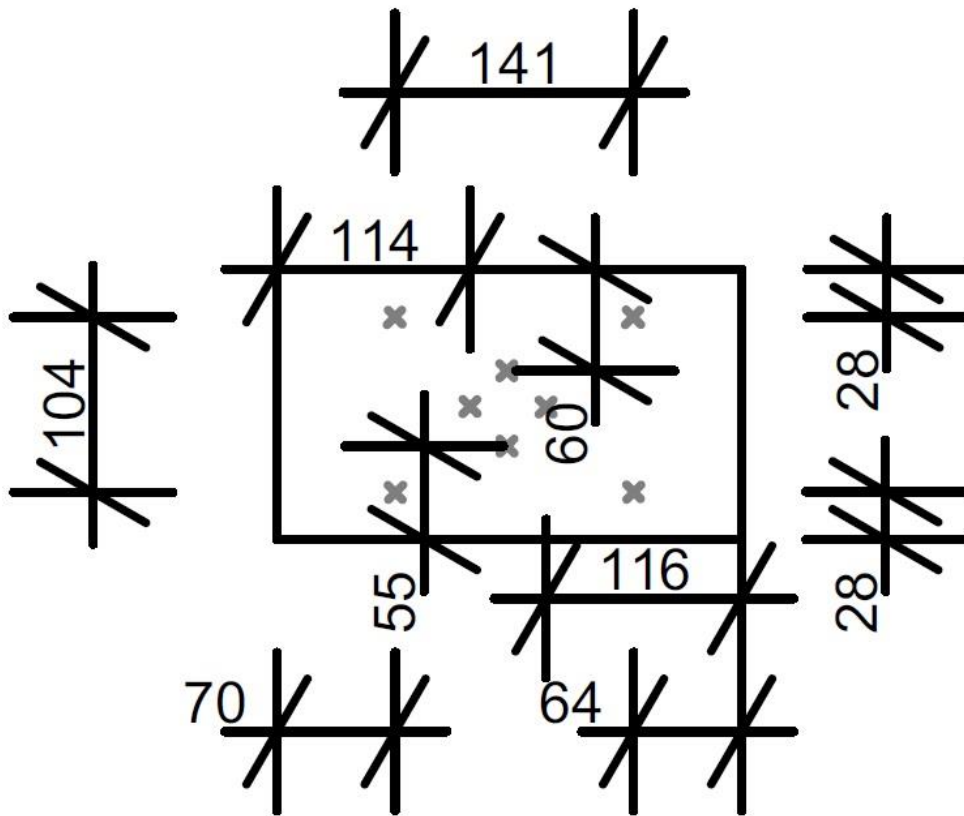
Figure 4. STM32 Nucleo-32 board bottom layout



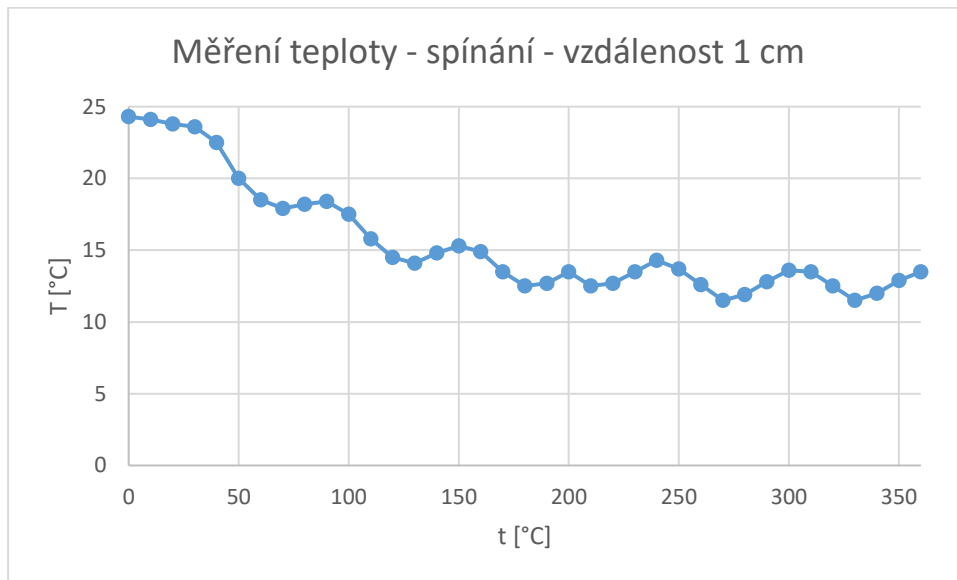
Obrázek 28: Přehled dolní části mikrokontroleru. Převzato z [18]



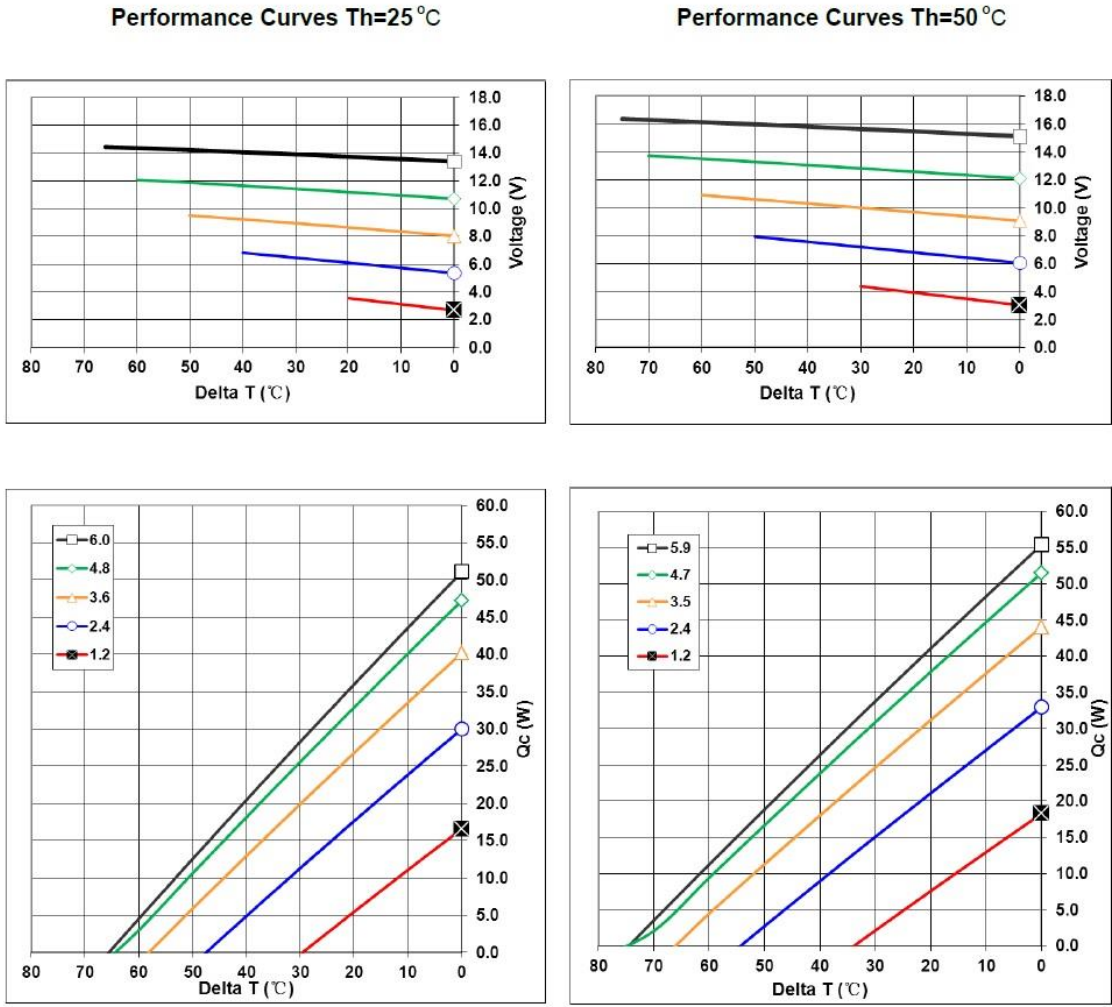




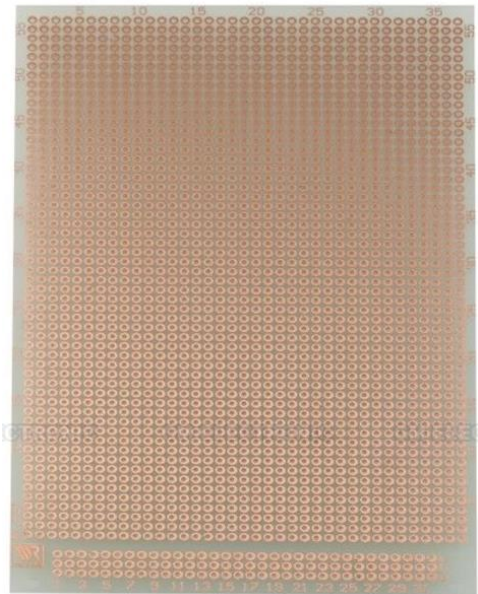
Obrázek 29: Kotování děr na měděné desce (Vytvořeno v ArchiCAD)



Graf 7: Měření teploty – spínání článků



Obrázek 30: Specifikace článku TEC1-127060S dodávané výrobcem. Převzato z [14]



Obrázek 31: Univerzální plošný vrtaný spoj, 2,54 mm. Převzato z [30]

Elektronická příloha

- | | |
|---------------------|----------------|
| 1. Schémata | Složka souborů |
| 2. Tabulky měření | Složka souborů |
| 3. Zdrojový program | Složka souborů |
| 4. BP_kanokma1 | .pdf |