

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**

Pedagogická fakulta – Katedra aplikované fyziky a techniky

Termoregulační zařízení - návrh, konstrukce a měření

Diplomová práce

Vedoucí práce: Mgr. Pavel Černý, Ph. D.

Vypracoval: Bc. Zdeněk Koudela

## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj a realizaci termoregulační řídicí jednotky s využitím ve školní a laboratorní praxi. Práce čtenáře krátce seznamuje s principem elektronického měření teploty v praxi a periferního propojení platformy Arduino různými typy sériových komunikací. Hlavní součástí práce je vytvoření vlastní řídicí jednotky a její následná aplikace pro školní a laboratorní účely. Práce tak obsahuje několik příkladových laboratorních úloh, na kterých je možné plně uplatnit potenciál vyrobeného přístroje.

## **Abstract**

This master's thesis is aimed at development and realisation of a thermoregulation control unit with applications at school and in practice. The work briefly introduces the reader into the principles of electronic temperature measuring in practice and peripheral interconnection of Arduino platform using different types of serial communication. The main part of the thesis is the creation of the control unit itself and its subsequent application for school and laboratory purposes. The work contains several example laboratory tasks, which can fully utilise the potential of the constructed device.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce.

Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

18. 4. 2019

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce panu Mgr. Pavlu Černému, Ph. D. za konzultace, cenné rady, ochotu a odbornou pomoc. Dále bych tímto poděkoval mým rodičům a rodině, kteří mě během studia velice podporovali. A nakonec děkuji panu Ing. Andreji Lukešovi za odbornou pomoc při programování praktické části diplomové práce.

# Obsah

Úvod .....	7
1 Teoretická část .....	8
1.1 Teplota.....	8
1.1.1 Kelvinova stupnice .....	8
1.1.2 Celsiova stupnice .....	8
1.1.3 Měření teploty .....	9
1.1.3.1 Termočlánek .....	10
1.1.3.2 Teploměr DS18B20 .....	13
1.2 Platforma Arduino .....	14
1.2.1 Arduino Mega .....	15
1.2.2 Arduino Nano.....	16
1.2.3 Komunikace Arduina s externími zařízeními .....	17
1.2.3.1 Komunikace po SPI sběrnici .....	17
1.2.3.2 Komunikace po I <sup>2</sup> C sběrnici.....	18
1.2.3.3 Komunikace po one-Wire .....	18
1.2.3.4 Komunikace po RS232.....	19
Cíle práce.....	21
2 Praktická část .....	22
2.1 Návrh technického řešení.....	22
2.1.1 Požadavky na zařízení.....	22
2.1.2 Blokové schéma zařízení.....	22
2.1.3 Návrh konstrukčních prvků a výroba zařízení.....	24
2.1.3.1 Napájení .....	24
2.1.3.2 MAX6675.....	25
2.1.3.3 Obvod reálného času .....	26
2.1.3.4 SD karta .....	26
2.1.3.5 Dotykový LCD displej.....	27
2.1.3.6 LED diody .....	28
2.1.3.7 Siréna .....	28
2.1.3.8 Tlačítka .....	29
2.1.3.9 Spínání výkonových prvků .....	30
2.1.3.10 Detekce průchodu nulou .....	31
2.1.3.11 Ventilátor .....	32

2.2 Softwarové řešení.....	33
2.2.1 Grafika LCD displeje .....	33
2.2.2 Systém chyb a upozornění poruch .....	35
2.2.3 Princip získávání teploty z termočlánků .....	36
2.2.4 Proces spínání výkonové části .....	37
2.2.5 PID regulace .....	39
2.2.5.1 Proporcionální regulátor.....	40
2.2.5.2 Integrační regulátor .....	40
2.2.5.3 Derivační regulátor .....	41
2.2.5.4 Nastavení a působení regulátoru na soustavu .....	41
2.3 Využití přístroje ve školní praxi .....	42
2.3.1 Průběh teploty ve třídě v závislosti na čase.....	42
2.3.2 Jak dostat vejce do láhve .....	45
2.3.3 Vypařování těkavých látek.....	51
2.3.4 Měření teploty nepopsaným teploměrem .....	53
2.4 Využití přístroje ve výzkumné laboratoři .....	56
2.4.1 Měření a regulace teploty v peci .....	56
2.4.2 Nastavení regulátoru: .....	58
2.4.3 Horkovzduch.....	59
2.4.4 Příklad měření: topné spirály.....	61
Závěr.....	62
Literatura.....	63
Přílohy .....	66
Příloha A – Fotografie přístroje .....	66
Příloha B – Schémata zapojení .....	68
Příloha C – Seznam součástí .....	74
Příloha D – Seznam použitých zkratk .....	76
Příloha E – Seznam obrázků .....	78
Příloha F – Seznam tabulek .....	80

# Úvod

Vzdělávání je důležitý, komplexní proces, při kterém dochází k předávání utříděných dat a pracovních návyků žákům za pomoci učitele. Jednou z možností, jak výslednou úspěšnost přijímání nového učiva ovlivnit, je volba vhodné organizační formy a metody. V případě přírodovědných a technických oborů vzniká ideální časový prostor pro využití specifické formy výuky, jakou je experiment. Experimentální výuka umožňuje žákům ověřit si samostatně pravdivost předávaných informací, ty budou pro ně následně snadněji zapamatovatelné. Používání experimentu při výuce, patří k základním kompetencím rámcového vzdělávacího programu (dále RVP). V této kompetenci se píše, že žák: „samostatně pozoruje a experimentuje, získané výsledky porovnává, kriticky posuzuje a vyvozuje z nich závěry pro využití v budoucnosti, kterou má žák být schopen samostatně provést“ [1].

Na dnešním trhu je možné najít několik společností (např. LogIT, Vernier, Pasco), specializujících se na výrobu přesných měřících zařízení a sestav, pro realizaci školních experimentů. Firmy nabízejí široký sortiment laboratorních přístrojů a čidel fyzikálních, či chemických veličin. Použití jednotlivých sestav na školách bývá často omezeno vysokou pořizovací cenou za jednotlivé díly.

Tato diplomová práce se zaměřila na výrobu a testování speciálního přístroje na měření a simulování specifických teplotních podmínek. Zhotovené zařízení je navrženo tak, aby bylo možné ho používat ve školním i laboratorním prostředí. S přístrojem je možné pracovat buď v režimu samostatného měření teploty daného prostředí, nebo jako s regulátorem, pro dosažení požadované hodnoty.

Celá práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se nachází způsob elektronického měření teploty v praxi, za pomoci běžně používaných součástek a snímacích metod. Dále tak se v krátkosti seznámíme s druhy a řízením sériových komunikací používaných v komunikaci s platformou Arduino a periferních obvodů.

V praktické části se seznámíme s popisem a činnostmi jednotlivých bloků připojených k otevřené platformě Arduino. Krátce se seznámíme s grafickou a softwarovou stránkou, pro ovládání a řízení přístroje. V poslední části práce se nachází sada experimentů na měření a simulování podmínek pomocí vyrobeného zařízení. Pokusy jsou popsány tak, aby bylo možné je aplikovat např. do výuky tematického bloku Molekulová fyzika a termika.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Teplota

Tematický blok molekulová fyzika a termika se zabývá popisem termodynamických jevů a procesů, při nichž dochází k různorodým fyzikálním a chemickým změnám vlastností pozorované hmoty. Důležitou veličinou, umožňující tyto děje popsat, je termodynamická teplota. Teplota je stavová veličina, udávající míru tepelného stavu tělesa, a přímo souvisí s pohybovou energií molekul a atomů ve hmotě. Z definice je tak zřejmé, že s rostoucí teplotou dochází ke zvýšení kinetické energie částic (tzn. zvýšení průměrné rychlosti částic). Pohyb částic je do značné míry ovlivněn látkovým skupenstvím, v němž se látka nachází. V případě pevných látek jsou částice vázány elektromagnetickými vazbami v krystalové mřížce. Se zvyšující se teplotou, dochází k rozkmitání celé krystalové mřížky. U kapalných a plynných látek nejsou částice nijak vázány v pevné struktuře, ale jsou omezeny objemem, v němž se nacházejí. Jestliže platí, že velikost kinetické energie atomu roste závislostí na teplotě, pak musí existovat i taková teplota, při které ustane veškerý pohyb částic v hmotě. Této specifické teplotě se říká absolutní teplotní nula [2].

### 1.1.1 Kelvinova stupnice

V odborných pracích se nejčastěji setkáváme s tzv. termodynamickou teplotou, ta se řadí mezi základní fyzikální veličiny SI (z francouzského „Le Système international d'unités“). Jednotkou termodynamické teploty  $T$  je Kelvin  $K$ . Termodynamická teplota je definovaná dvěma teplotními body. Již zmíněnou absolutní nulou  $0\text{ K}$  a tzv. trojným bodem vody. Trojný bod je speciální teplotní stav, při němž se současně udržují tři skupenství vody (led, voda, pára) za nízkého tlaku. Teplota trojného bodu je stanovená na hodnotě  $273,16\text{ K}$  [2].

### 1.1.2 Celsiova stupnice

V běžné technické praxi se místo termodynamické teploty častěji užívá Celsiova stupnice, jejíž jednotkou je stupeň Celsia  $^{\circ}\text{C}$ . Počátek Celsiovy stupnice (tzn.  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) je dán bodem rovnovážného stavu chemicky čisté vody a ledu (bod tuhnutí vody) při normálním atmosférickém tlaku. Při stejném tlaku (tzn.  $1,01325 \cdot 10^5\text{ Pa}$ ) je definován i druhý význačný bod, ten odpovídá hodnotě  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při této teplotě a tlaku dochází k varu vody. Pomocí význačných bodů lze definovat stupeň Celsia jako  $1/100$ . díl



teplotního rozdílu mezi bodem varu a bodem tuhnutí vody. Při vzájemném porovnání Celsiovy a Kelvinovy stupnice zjistíme, že velikost jednoho stupně Celsia °C odpovídá velikostně právě jednomu Kelvinu K. Převod mezi stupnicemi je dán vztahem:

$$T = t + 273,15, \quad (1)$$

kde  $T$  je značka termodynamické teploty udávaná v Kelvinech a  $t$  je značka Celsiovy stupnice v jednotce stupeň Celsia.

### 1.1.3 Měření teploty

Jakýkoliv proces měření teploty spěje k určení střední kinetické energie částic, tudíž ke stanovení střední průměrné hodnoty teploty. Pro zjištění teploty měřené látky, či pozorovaného prostředí, se využívají různé druhy a typy teploměrů. Teploměry (také teplotní čidla, teplotní snímače atd.) jsou zařízení pracujících na principu změn fyzikálních, či chemických vlastností látky v závislosti na teplotě. Jednotlivé teplotní snímače lze rozdělit podle mnoha kritérií. Podle kontaktu teplotního snímače s měřenou soustavou či prostředím hovoříme o kontaktních a bezkontaktních teploměrech. Teplotní čidla je možné dále rozdělit podle použitých fyzikálních a chemických jevů na:

- dilatační (změna rozměrových vlastností);
- elektrické (změna elektrických veličin);
- radiační (změna emisivity);
- speciální (změna magnetických vlastností látek, apod.).

Mezi dilatační teploměry tak můžeme zařadit například bimetalové, rtuťové, lihové a plynové teploměry, ty pracují na principu objemové či délkové roztažnosti materiálu. V běžné praxi jsou nejvíce zastoupenou skupinou teploměry elektrické, využívající proměnlivost elektrických veličin v závislosti na teplotě (např. elektrický odpor vodičů a polovodičů, termoelektrické jevy atd.). Podle konstrukce a použitého materiálu dělíme elektrické teploměry na:

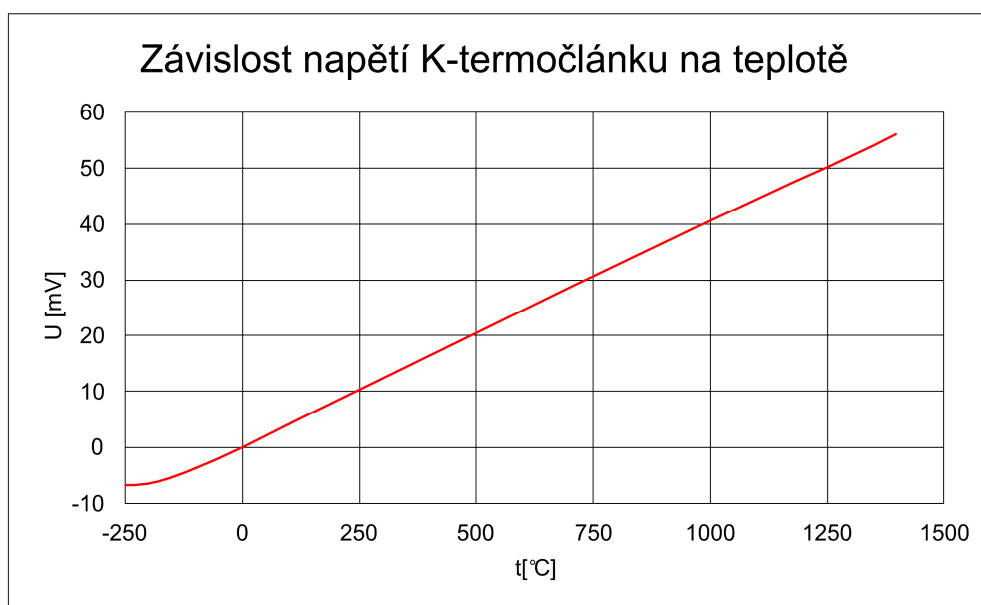
- kovové odporové senzory teploty (např. senzor PT100);
- polovodičové odporové senzory teploty (termistory);
- polovodičové senzory s PN přechodem;
- termoelektrické senzory;
- digitální senzory (senzor DS18B20).

V technické dokumentaci k jednotlivému typu teploměru je dále možné najít mnoho parametrů, určujících jeho možnou aplikaci v konkrétním prostředí. Mezi nejzákladnější údaje k teploměru patří třída přesnosti a teplotní rozsah měření, rychlost odezvy na změnu teploty, či fyzikálněchemická použitelnost v daném prostředí atd. [3].

Pro potřeby této diplomové práce bylo zvoleno použití deseti termoelektrických snímačů teploty (termočlánek), schopných měřit teplotu v neagresivním prostředí v provozním intervalu  $0 \div 400$  °C. Druhým typem teploměru použitého v diplomové práci je digitální senzor teploty typu DS18B20, pracující v provozním teplotním intervalu  $-55 \div 125$  °C.

### 1.1.3.1 Termočlánek

Termočlánek je pasivní elektrotechnická součástka, pracující na principu tzv. termoelektrického (Seebeckova) jevu. Při termoelektrickém jevu dochází ke vzniku nelineárního elektrického napětí na svorkách dvou různých vodičů v závislosti na teplotě prostředí (obr. 1), kde dochází k měření. Důvodem Seebeckova jevu je rozdílná výstupní práce valenčních elektronů v kovu. Dochází tak ke vzniku oblastí s větší a menší hustotou elektronů, způsobenou rozdílnou kinetickou energií elektronů [4].

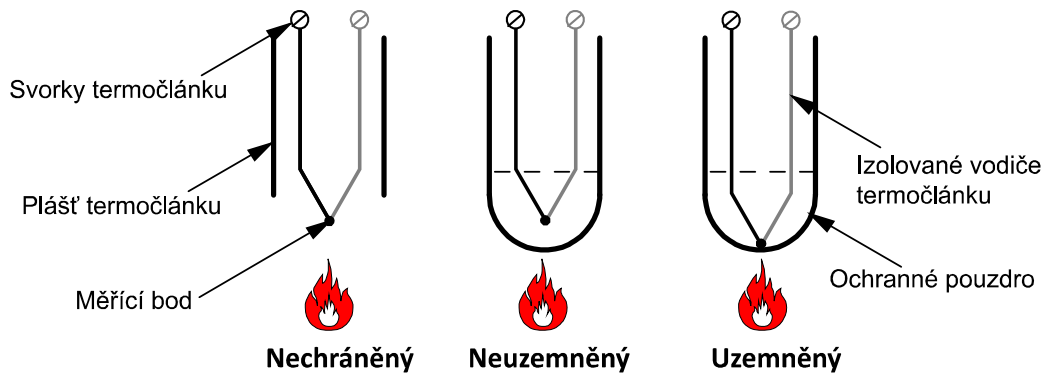


Obr. 1: Teplotní charakteristika termočláneku [5]

Samotná konstrukce termočláneku spočívá v mechanickém spojení, spájení či svaření dvou vodičů z různého materiálu o stejném průměru. Při spojování vodičů je kladen velký důraz na čistotu a kvalitu měřicího bodu. Vyrobený měřicí bod může být následně uložen v kovovém pouzdře (obr. 2). O takovém termočláneku poté hovoříme jako

o termočlátku chráněném. Chráněný termočlánek je možné použít i pro měření teploty kapalin, protože je zabráněno oxidaci spojeného místa. Nechráněný termočlánek je naopak vhodný pro měření neagresivních plynů [6].

Podle druhu uložení a spojení měřicího hrotu s ochranným kovovým pláštěm dělíme termočláanky na uzemněné a neuzemněné. Uzemněný termočlánek má kratší reakční dobu oproti neuzemněnému. Naopak neuzemněný termočlánek je náchylnější na vysokofrekvenční rušení, respektive ke vzniku potenciálových zemních smyček.



**Obr. 2:** Druhy termočláanků [6]

Na volných koncích (svorkách termočláunku označených jako T+ a T-) lze naměřit nelineární termoelektrické napětí. Velikost napětí závisí na rozdílu teplot mezi místem, kde se snímá teplota (měřícím koncem) a místem, kde se napětí měří (svorkách termočláunku). Přibližnou velikost napětí lze vypočítat podle vztahu:

$$U_{TE} = \sum_{i=0}^{10} c_i (dt)^i, \quad (2)$$

kde  $U_{TE}$  je velikost termoelektrického napětí,  $c$  jsou Seebeckovy materiálové koeficienty,  $dt$  je rozdíl teplot mezi měřícím koncem a svorkami termočláunku. Velikost napětí při termoelektrickém jevu se pohybuje v přímé závislosti na rozdílu teplot, a to v řádu milivoltů. Dalším faktorem ovlivňujícím velikost termoelektrického napětí je použitá kombinace vodičů. Pro běžně používané normalizované typy termočláanků existuje značení velkými písmeny (např. typ: J, K, L, N, M), podle nich je možné určit druh použitých vodičů. Použité materiály určují maximální povolený teplotní rozsah termočláanků pro danou aplikaci (podle teploty tání prvku), třídu přesnosti měření daným termočláankem, chemickou odolnost v konkrétním prostředí atd. Z tabulky 1 je možné zjistit nejvíce využívané kombinace vodičů k jednotlivým typům termočláanků, se kterými je možné se v praxi setkat. V případě této diplomové práce se využívají termočláanky typu K s teplotním rozsahem  $0 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$  [6].

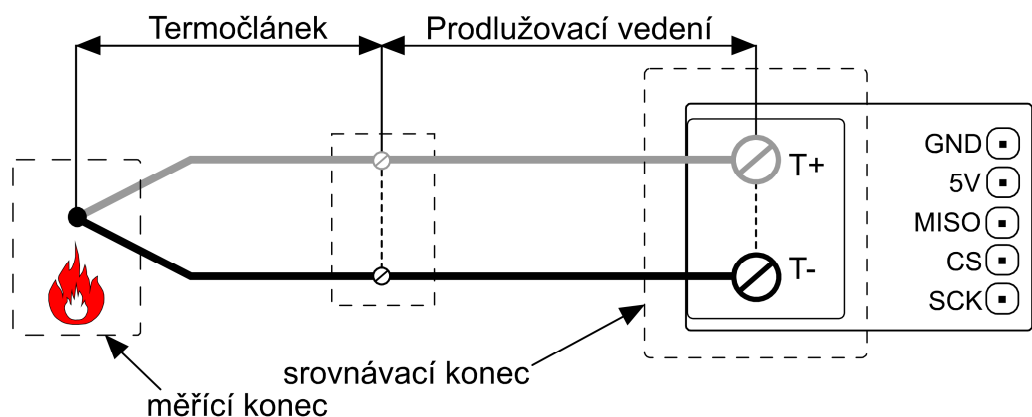
označení	teplotní rozsah [°C]	Citlivost [mV/°C]	složení
K	-180 ÷ 1300	41	Chromel (90% Ni, 10% Cr) Alumel (95% Ni, 2% Mn, 2% Al, and 1% Si)
J	-180 ÷ 800	55	100% Fe Konstantan (55% Cu, 45% Ni)
N	-270 ÷ 1300	39	Nicrosil (84.1% Ni, 14.4% Cr, 1.4% Si, 0.1% Mg) Nisil (95.6% Ni, 4.4% Si)
R	-50 ÷ 1700	10	87% Pt, 13% Rh 100% Pt
S	-50 ÷ 1750	10	90% Pt, 10% Rh 100% Pt
B	0 ÷ 1820	10	70% Pt, 30% Rh 94% Pt, 6% Rh
T	-250 ÷ 400	43	100% Cu Konstantan (55% Cu, 45% Ni)
E	-40 ÷ 900	68	Chromel (90% Ni, 10% Cr) Konstantan (55% Cu, 45% Ni)

**Tab. 1:** Tabulka vlastností termočlánu [5]

Běžně používané termočlánu mají jednotlivé vodiče uloženy v ochranné izolaci, ta má za úkol zabránit náhodnému kontaktu vodičů. V případě náhodného vzájemného spojení vodičů vzniká nový měřící bod, zásadně ovlivňující celý proces měření teploty. Mezi běžně používané druhy patří např. kevlarová a sklolaminátová vlákna, či silikonová izolace atd. Podle použité izolace a materiálu je následně stanoven i teplotní rozsah a prostředí, kde je možné termočlánu použít. Pro měření velmi vysokých teplot existují i termočlánu bez ochranné izolace vodičů. Proto jednotlivé dráty neizolovaných termočlánu musí být během měření vedeny odděleně od sebe. Termočlánu vyrobené z izolovaných vodičů jsou navíc uloženy v ochranném plášti a ten chrání izolaci termočlánu před mechanickým poškozením. Na plášť termočlánu se běžně používá stejný materiál jako v případě izolace vodičů. V případě náročného prostředí, kde hrozí mechanické poškození pláště, je vhodné použít termočlánu s kovovým opředěním. Kovový plášť je nejčastěji vyroben z nerezové oceli či Inconelu, odolávající vyšší teplotě. [4], [6].

### ***Měření teploty termočlánu***

Měření teploty termočlánu má mnoho významných vlastností, které mohou ovlivnit jejich samotné použití. Mezi nejzákladnější vlastnosti termočlánu patří rychlá odezva na změnu teploty, jednoduchost a velká přesnost při měření. Principiální zapojení termočlánu k převodníku je naznačeno na obrázku 3. Obvod se skládá z měřícího termočlánu a prodlužovacího vedení a přístroje měřící termoelektrické napětí.



Obr. 3: Zapojení termočláneků [7]

V obvodu jsou označené oba význačné body. Měřící (častěji jako teplý konec) a srovnávací bod (studený konec). Pro zvýšení přesnosti během měření je nutné zajistit, aby srovnávací konec byl neustále udržován na konstantní teplotě (např. termostatem), nebo v místě studeného konce provádět lokální měření teploty. V případě proměnlivé teploty na studeném konci, dochází ke změně termoelektrického napětí a tím k nejčastější chybě při měření termočlánekem. Pokud je nutné prodloužit délku termočláneků, musí být prodlužovací vedení (včetně spojovacích svorek) vyrobeno ze stejného materiálu [5], [6].

### 1.1.3.2 Teploměr DS18B20

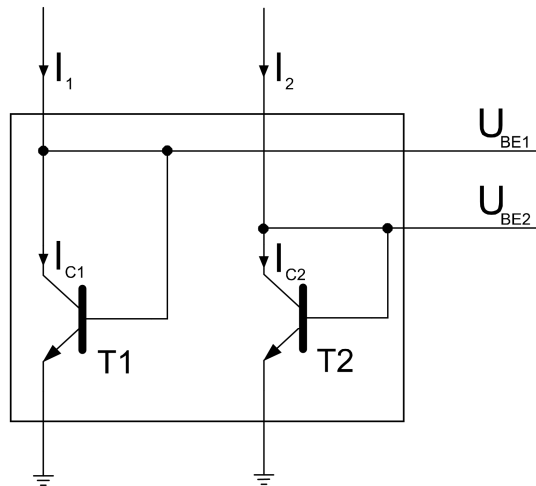
DS18B20 druh digitálního snímače teploty, jenž umožňuje připojení a komunikaci s mikrokontrolérem po sběrnici typu 1-Wire. Teplotní rozsah senzoru je od  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Garantovaná přesnost od výrobce při měření teploty je  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplotní senzor umožňuje nastavit rozlišení teploměru od 12 do 9 bitů. Při změně rozlišení z 12 bitů na 9 bitů se prodlouží doba potřebná pro převedení teploty. Senzor je možné pořídit buď v plastovém pouzdře TO-92, nebo v pouzdře kovovém. Kovové pouzdro je možné využít pro měření teplot kapalin v daném pracovním intervalu [8].

Vlastnosti senzoru DS18B20:

- napájecí napětí je od  $3\text{ V} \div 5,5\text{ V}$ ;
- alarm teploty;
- zapojení více senzorů na sběrnici;
- možnost připojení po dvou nebo třech vodičích;
- jedinečná ROM adresa teplotního senzoru.

## Měření teploty s DS18B20

Při měření teploty se využívají charakteristické vlastnosti polovodičových prvků. Na schématu (obr. 4) je zjednodušeně znázorněn způsob měření teploty. Integrovaný obvod obsahuje dva bipolární tranzistory, vytvářejících výstupní napětí v závislosti na aktuální teplotě a protékajícím proudem. Přes tyto parametricky shodné tranzistory, které jsou zapojeny na jedné matici jako diody, protékají proudy  $I_1$  a  $I_2$ . Vzniklé elektrické napětí na tranzistoru ( $U_{BE1}$ ,  $U_{BE2}$ ) tak přímo závisí na protékajícím proudu při dané teplotě.



Obr. 4: Způsob měření teploty DS18B20 [5]

Uložením tranzistorů do jednoho bloku je zajištěno, že na jednotlivých tranzistorech je stejná teplota. Pokud vznikne během měření rozdíl mezi proudy  $I_1$  a  $I_2$  bude velikost napětí závislá na teplotě podle rovnice:

$$U_{BE2} - U_{BE1} = n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right), \quad (3)$$

kde  $n$  je faktor polovodičové dokonalosti tranzistorového uzlu (konstantní neměnná hodnota z výroby:  $\pm 1,01$ ),  $k$  - Boltzmannova konstanta,  $q$  je velikost elementárního náboje a  $T$  – termodynamická teplota.

### 1.2 Platforma Arduino

Při stavbě velkého elektronického projektu se nevyhneme nutnosti používat programovatelné logické obvody neboli mikrokontroléry. Mezi příklady vhodného použití mikrokontroléru patří situace, kdy je nutné ovládat výkonné akční členy, měřit různé fyzikální a chemické veličiny či komunikovat s periferními obvody.

Mezi nejčastěji používané programovatelné obvody patří platforma Arduino. K velkému rozšíření Arduina přispěl přijatelný poměr mezi výkonem a cenou za daný model. Dalším pozitivem pro použití Arduina je uživatelsky přijatelný způsob programování a existence volně dostupných ovládacích knihoven, usnadňujících práci s periferními obvody.

Vývojové desky Arduino se vyrábí v několika variantách. Mezi hlavní rozdíly u jednotlivých modelů patří různý počet digitálních a analogových vstupů a výstupů. Systém Arduino také podporuje velký počet různých funkcí a druhů komunikace s ostatními moduly. K základním funkcím lze například přiřadit:

- vstupy s A/D převodníky;
- digitální výstupy s funkcí PWM (pulzně šířková modulace);
- sériové sběrnice různého typu (I<sup>2</sup>C, SPI, 1-Wire);
- komunikace po UART lince.

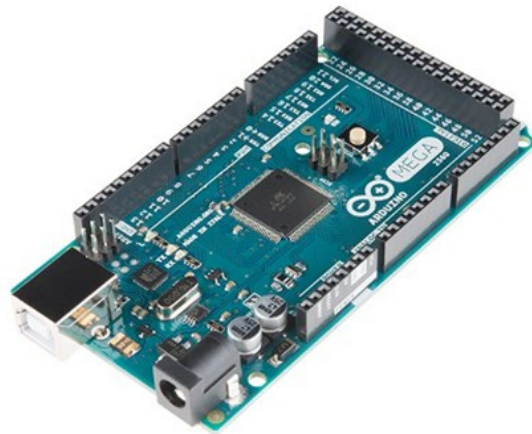
Zdrojový program je psán v textovém editoru ve vývojovém prostředí Arduino IDE, ten je spolu s technickou dokumentací možné získat na oficiálních stránkách výrobce ([www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)). Programovací jazyk Arduina svými vlastnostmi a stylem syntaxe připomíná jazyk C/C++ . Napsaný a zkompileovaný program je následně nahrán do 8 bitového procesoru po USB rozhraní.

Napájení vývojových desek Arduino je realizováno přes USB konektor, nebo přímým přivedením externího napětí. U externího způsobu napájení se napětí přivádí na pin  $V_{in}$ , který je u větších modelů (např. Uno, Mega, Due) doplněn napájecím konektorem. Externí napětí je následně sníženo malým vestavěným stabilizátorem na hodnotu 5 V. Používání integrovaného stabilizátoru je omezeno maximálním proudem, jaký je stabilizátor schopný dodat. V případě náročnějších projektů, kde se předpokládají vyšší proudové požadavky, je vhodné vývojovou desku přímo napájet z vnějšího 5V zdroje za integrovaným stabilizátorem [9], [10].

### 1.2.1 Arduino Mega

Jedná se o jednu z nejvýkonnějších a největších desek z řady Arduino. Na tomto modelu je využit výkonný Atmel procesor typu ATmega2560. Při návrhu výsledného zařízení je možno využít až 54 přepínatelných digitálních pinů s funkcí digitálního vstupu nebo výstupu. Pro měření analogových signálů obsahuje vývojová deska 16 vstupů s 10 bitovými A/D převodníky. Pro funkci „analogového“ výstupu lze využít

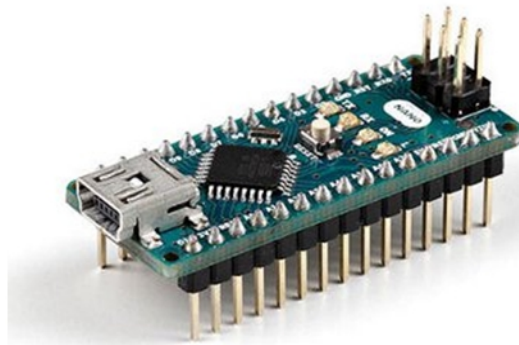
14 programovatelných digitálních pinů s funkcí 8 bitové PWM modulace. Mezi podporované komunikace patří čtyři programovatelná sériová UART rozhraní. Vývojová deska Arduino Mega je taktována interním kalibrovaným oscilátorem o frekvenci 16 MHz. Nahrávání programu je u řady MEGA uskutečněno po USB konektoru typu B. Platforma navíc obsahuje dostatečně velkou 256 kB Flash paměť pro program, 4 kB paměti na vnitřní EEPROM a 8 kB SRAM paměti. Další vlastností periferních obvodů je možnost použití Real Time Counteru s odděleným oscilátorem [9], [10].



**Obr. 5:** Vývojová deska Arduino Mega [9]

### 1.2.2 Arduino Nano

Druhým využitým typem vývojové desky je Arduino NANO. Jedná se o minimalizovanou desku s procesorem AVR ATmega328, s možností testování na nepájivém kontaktním poli. Typová řada Arduino Nano neobsahuje konektor pro napájení z externího zdroje. Programování je zajištěno po mini USB konektoru. Ve výsledné realizaci je možné využít 14 přepínatelných digitálních pinů (některé s funkcí PWM a externím přerušením), 8 analogových vstupů. Frekvence vnitřního oscilátoru je nastavena na 16 MHz [9], [10].



**Obr. 6:** Vývojová deska Arduino Nano [9]



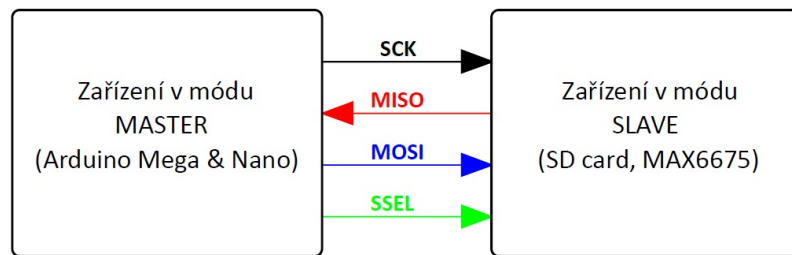
### **1.2.3 Komunikace Arduina s externími zařízeními**

Platforma Arduino podporuje mnoho způsobu vzájemného propojení a komunikace mikrokontroléru s periferními obvody. Mezi periferní obvody můžeme řadit například čtečku SD karet, LCD displej různého typu a způsobu zobrazování, či další připojený mikrokontrolér.

Mezi základní podporovaný druh komunikace patří zasílání dat po sériové UART TTL lince. Systém UART je druh plně duplexní komunikace (může současně přijímat a vysílat) mezi obvody s pevně nastavenou přenosovou rychlostí. Každá platforma Arduino obsahuje alespoň jeden pár digitálních pinů a ty jsou určeny právě pro komunikaci UART. V dokumentaci jsou výstupy označeny velkými písmeny jako RX a TX. V případě odesílání dat z Arduina do externího obvodu je přenos veden po TX pinu. Naopak při čtení příkazů z externího obvodu je signál poslán do RX pinu. Pokud se propojuje více Mikrokontrolérů, je vzájemné propojení pinů vedeno do kříže. Tohoto křížové propojení se využívá při propojení mezi měřicí a výkonovou částí diplomové práce. Dalšími druhy komunikace, které platforma Arduino podporuje, jsou rozepsány v následujících odstavcích [9], [10].

#### **1.2.3.1 Komunikace po SPI sběrnici**

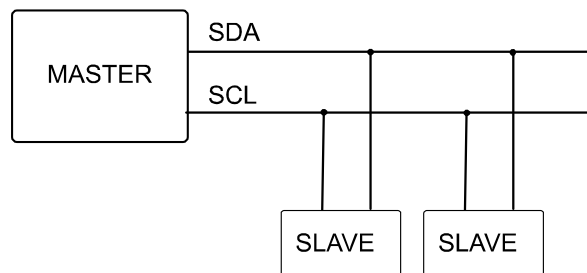
SPI (Serial Peripheral Interface) je externí vysokorychlostní sériová sběrnice, ta umožňuje třívodičovou obousměrnou komunikaci mezi větším počtem připojených zařízení na krátkou vzdálenost. V klasickém zapojení má jedno zařízení řídicí funkci (Master), to pak komunikuje s ostatními periferními zařízeními (Slave). Komunikace mezi propojenými zařízeními je vedena přes tři datové vodiče označené jako MISO, MOSI, SCK. Data se posílají po dvojici vodičů MISO (Master In, Slave Out) a MOSI (Master Out, Slave In). Samotný přenos dat po sběrnici SPI je řízen hodinovým signálem SCK, jenž zajistí synchronizaci mezi připojenými zařízeními. Poslední čtvrtý port SSEL (Slave Select) slouží k vybrání přímé komunikace mezi Master a vybraným obvodem v režimu Slave. Princip výběru obvodu je založen na přivedení logické nuly na pin SSEL. U komunikace typu SPI, je nutné zajistit, aby přesun dat probíhal právě mezi dvěma obvody. [11].



**Obr. 7:** Způsob komunikace SPI sběrnice [11]

### 1.2.3.2 Komunikace po I<sup>2</sup>C sběrnici

I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) je druh sériové poloduplexní sběrnice a ta provádí komunikaci po dvojici datových vodičů označených jako SDA a SCL. Na sběrnici I<sup>2</sup>C je možné připojit až 128 zařízení (v režimu SLAVE), a každé má přiřazenou vlastní jednoznačnou 7 bitovou adresu. Stejně, jako v případě SPI komunikace, obsahuje I<sup>2</sup>C sběrnice jedno zařízení pracující v režimu Master.

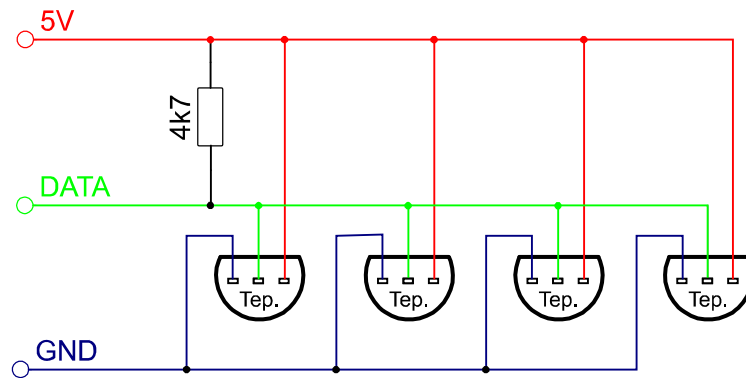


**Obr. 8:** Způsob komunikace po I<sup>2</sup>C sběrnici

Při komunikaci jsou po vodiči SDA posílána data v podobě logických úrovní. Přenos dat je řízen hodinovým signálem SCL (clock line), podobně jako v případě SPI sběrnice. Pro funkci Master obvodu jsou často používány právě různé typy mikrokontroléru. Protože se jedná o poloduplexní komunikaci, provádí Master mezi režimem přijímání a odesílání dat přepínání mezi jednotlivými obvody. Použití tohoto druhu komunikace má výhodu v přenosu dat na větší vzdálenost než u sběrnice SPI. Maximální přenosová vzdálenost je přibližně do 2 metrů [9], [12].

### 1.2.3.3 Komunikace po one-Wire

Sběrnice typu 1-Wire je specifický způsob asynchronní poloduplexní komunikace s větším počtem zařízení po jednom datovém vodiči. Komunikace s připojenými zařízeními zahajuje je na sběrnici 1-Wire jedním zařízením (mikrokontrolérem) v režimu master. Veškerá připojená zařízení mají vlastní ROM paměť s jedinečnou 64 bitovou adresou. Schematické zapojení více zařízení po sběrnici typu 1-Wire k mikrokontroléru v režimu Master je naznačeno na obrázku dle následujícího schématu (obr. 10).

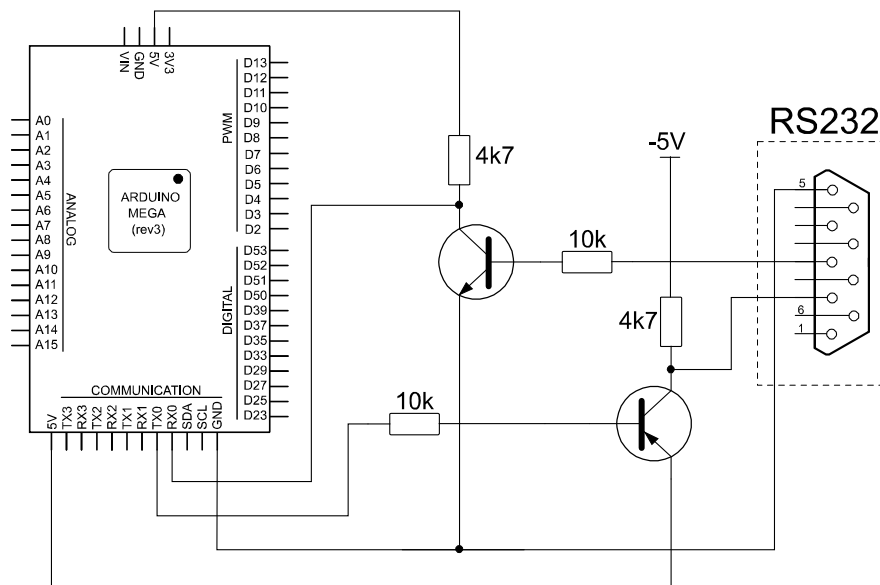


**Obr. 10:** Způsob komunikace po 1-Ware sběrnici

Přenos dat po 1-Wire sběrnici je řízen obvodem v režimu Master, který na začátku komunikace vyšle příkaz *reset* do sběrnice. Poté již všechny Slave čekají další příkazy. Komunikace může být přímá, tzn. že Master pošle příkaz na konkrétní ROM adresu, a vyčkává na zpětnou odpověď. Další z možností řízení je vyslání hromadného příkazu k spuštění měření teploty. Následně jsou data na lince posílána v přesně definovaném pořadí. Přenosová rychlost komunikace je do značné míry ovlivněná počtem připojených zařízení [9], [13].

#### 1.2.3.4 Komunikace po RS232

Komunikace RS232 je dvou vodičový přenos dat na velkou vzdálenost pro průmyslové využití. Mezi hlavní předností komunikace po RS232 patří vyšší odolnost proti vnějšímu rušení při samotném přenosu dat. Odolnost proti rušení je zajištěna použitím stejnosměrného souměrného napětí o různé velikosti. Norma konkrétně udává, že napětí musí být větší než  $\pm 3$  V a zároveň menší než  $\pm 25$  V. Při logické nule lze naměřit na svorkách kladné napětí například +12 V. Naopak v případě logické jedničky nabývá napětí hodnot záporných. Přenos dat je u RS232 řízen pevně nastavenou přenosovou rychlostí jak na straně příjemce, tak odesílatele dat. Při zahájení komunikace dochází k zaslání synchronizačního start bitu. Komunikace je zajištěna po dvou datových vodičích (příjem RX, odesílání TX) a společnou zemí (GND). K vzájemnému propojení mezi RS232 a TTL logikou, využívající nesouměrné napětí 5 V je možné použít speciální převodník. Na obrázku 11 je schematické zapojení mezi Arduinem Mega a komunikací po RS232 [14].



**Obr. 11:** Způsob komunikace po RS232 sběrnici

V této práci se využívá komunikace RS232 k odesílání naměřených dat během měření a regulace teploty do připojeného PC. Pro univerzálnost přístroje je k hotovému výrobku přiložen navíc i převodník od firmy Aten, ten dokáže převést rozhraní RS232 (Canon 9pin Male) na rozhraní USB [14]. K redukci lze následně připojit prodlužovací kabel (součást výrobku), aby byla zajištěna dostatečná vzdálenost mezi přístrojem a PC.

Na přiloženém CD je program PUTTY volně šiřitelný pod licencí MIT (Massachusetts Institute of Technology), podporující operační systém: Windows 7, Windows 10, LINUX atd.

## Cíle práce

- Za pomoci získané a nastudované literatury navrhnout a sestavit termoregulační zařízení, umožňující měřit a regulovat předem daný systém.
- Celkově popsat výsledné řešení postavené na otevřené elektronické platformě Arduino.
- Zvolit vhodný způsob řízení a ovládání dílčích periferních zařízení připojených k Arduinu po softwarové a hardwarové stránce.
- Komplexně zkontrolovat a otestovat zhotovené zařízení.
- Navrhnout a vytvořit sérii laboratorních úloh a aplikací, na kterém by bylo možné přístroj využít ve školní praxi při studiu přírodovědných a technických oborů.
- Vytvořit druhé totožné zařízení, které by se následně aplikovalo ve výzkumném laboratorním prostředí, při studiu a testování polymerů.

## **2 Praktická část**

### **2.1 Návrh technického řešení**

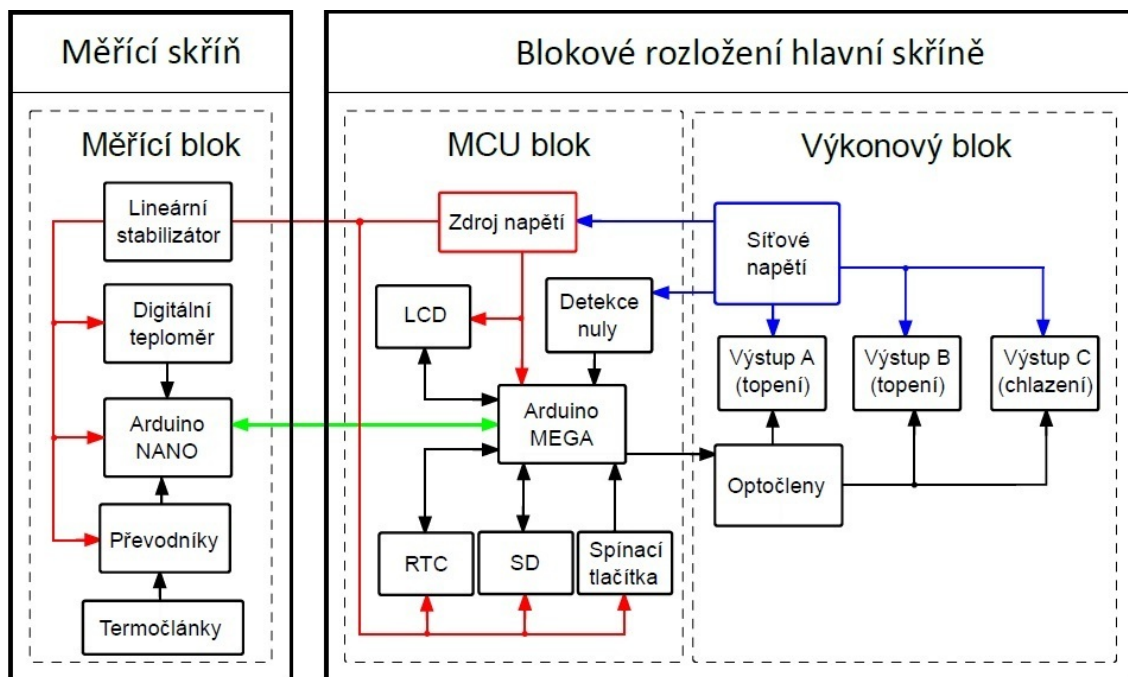
#### **2.1.1 Požadavky na zařízení**

Cílem diplomové práce je vytvoření univerzálního přístroje pro měření a regulaci teploty v daném prostředí. Hotový výrobek by měl být po všech stránkách bezpečný, spolehlivý a odolný proti mechanickému poškození. Pro komunikaci mezi přístrojem a obsluhou musí být výrobek vybaven dotykovým LCD displejem s plnohodnotným uživatelským systémem a zobrazováním a ten bude poskytovat veškeré informace o aktuálním průběhu měření a regulace. V případě závady na přístroji či rozdílu mezi nastaveným a reálným nastavením musí být obsluha vždy informována samostatným bezpečnostním systémem. K dalším požadavkům na vyrobené zařízení patří:

- měření a zobrazení aktuální teploty na LCD displej;
- měření kladné teploty do 300 °C termočlánkem;
- měření kladných a záporných teplot digitálním snímačem teploty;
- možnost plynulé PID regulace na výstupních zásuvkách na 230 V;
- zobrazení celkového průběhu regulace;
- zobrazení nastaveného času;
- ukládání naměřených dat na SD kartu;
- odesílání dat po RS232 do připojeného PC;
- možnost akusticky informovat obsluhu o závadě při regulaci.

#### **2.1.2 Blokové schéma zařízení**

V následujících částí práce jsou podrobně popsány a schematicky rozkresleny veškeré použité funkční obvody a komponenty. Celé zařízení je složeno ze tří hlavních, vzájemně propojených bloků: měřicí, MCU a výkonový (obr. 12). Rozdělení práce do jednotlivých bloků umožňuje, za předpokladu dodržení všech podmínek komunikace, změnit typ připojených měřících čidel, nebo změnit maximální povolený výkon připojených zátěží. Ze schématu lze také vyčíst, že MCU a výkonový blok jsou společně uloženy v hlavní výpočetní skříni. Mezi měřícím blokem a výpočetní skříní tak dochází k rychlému přenosu dat po UART komunikaci.



Obr. 12: Blokové zapojení přístroje

Měřicí blok je určen pro snímání teploty z digitálních snímačů teploty typu DS18B20 a převodníků připojených k deseti termočlánkům. Komunikace s jednotlivými teplotními senzory je uskutečněna elektronickou platformou Arduino Nano. Tato měřicí deska velmi rychle přepíná mezi jednotlivými senzory (funkce multiswitch), a z nich postupně získává informace o aktuální teplotě. Získaná data jsou následně odeslána, v pravidelném čase, do MCU bloku po sériové UART komunikaci.

Blok MCU je nejdůležitější hlavní jednotka celého zařízení zajišťující řízení činnosti jednotlivých funkčních bloků. Mezi dominantními prvky v MCU bloku patří mikrokontrolér typu Arduino MEGA a dotykový LCD displej. Úkolem mikrokontroléru je provádět veškeré matematické výpočty pro regulaci teploty, komunikovat po různých sběrnicích s podpůrnými integrovanými obvody, ukládat naměřené teploty na paměťová média a ovládat optické spínání výkonových prvků.

Výkonový blok je část zařízení, která provádí elektronické spínání výkonových zátěží. Celý blok je uložen na hliníkovém profilu a ten je galvanicky oddělen od veškerých elektronických a konstrukčních částí zařízení. Během regulace je možné využít 2+1 nezávislých triakově spínaných výstupů (kanálů). Na výstup (1-2) lze připojit např. odporové topné spirály, žárovky atd. Na výstup číslo 3 se v případě potřeby připojuje aktivní chlazení systému na 230 V, jenž umožní urychlit snížení teploty regulovaného systému.

### 2.1.3 Návrh konstrukčních prvků a výroba zařízení

Před zahájením výroby zařízení byly veškeré použité obvody otestovány na nepájivém kontaktním poli. Výsledné schéma zapojení bylo vytvořeno v programu LAYOUT, což je speciální editor pro výrobu plošných spojů. Po vyvolání plošného spoje fotocitlivou cestou (za použití zdroje UV světla) byl tištěný spoj vyleptán v roztoku chloridu železitého ( $\text{FeCl}_3$ ). Následně pak mohlo dojít k osazení a výsledné kontrole celkové funkce jednostranného tištěného spoje. V poslední fázi byly jednotlivé mikrokontroléry vloženy do patič.

Aby zařízení odolávalo náročným podmínkám, bylo celé zařízení uloženo do dvoudílného kovového šasi. Do spodní části kovové skříně byly postupně vyvrtány a vyfrézovány veškeré otvory pro datové konektory, pojistky, klávesnici displej atd. Následně byl proveden celkový černý nástřik a na něj se nalepila potíštěná odolná folie. Po celkovém osazení přístroje mohlo začít komplexní testování přístroje s vytvořeným programem.

V následujících částech práce jsou podrobně schematicky rozkresleny a popsány funkce všech použitých obvodů.

#### 2.1.3.1 Napájení

Celé zařízení je napájeno z jednoho centrálního spínaného zdroje, umístěného v MCU bloku. K tomuto účelu byl zvolen zdroj RQ-50B od firmy MEAN WELL. Vybraný spínaný zdroj má dva výstupy souměrného napětí  $\pm 5\text{ V}$  a  $\pm 12\text{ V}$ . Zdroj dále obsahuje specifické integrované ochrany proti výkonovému přetížení, zkratu a přepětí na jednotlivých výstupech.

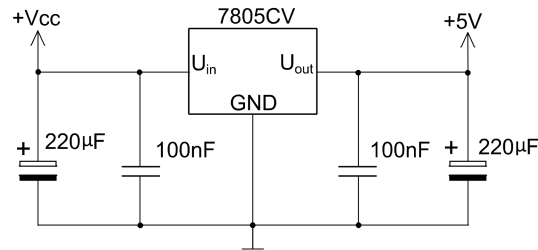
Většina použitých obvodů a modulů vyžaduje převážně nesouměrné 5V napájecí napětí. Mezi tyto obvody patří například zdroj hodinového signálu, čtečka SD karet, dotykový TFT displej, mikrokontrolér typu Arduino MEGA a další obvody v MCU bloku.

Pro napájení komunikačních obvodů sběrnice RS232 se využívá souměrné  $\pm 5\text{ V}$  napětí. Funkcí sběrnice je přenos dat z MCU bloku do připojeného PC,

Nesouměrné 12V napětí se využívá jak ke spínání ventilátoru, tak i pro napájení celého měřicího bloku přes propojovací datový kabel. V měřicím bloku je přivedené napětí sníženo stabilizátorem na hliníkovém profilu z 12 V na 5 V. Sériové stabilizátory typu 7805, od firmy STMicroelectronics, se vyrábějí v plastovém pouzdře TO-220.



Napětí 5 V se poté používá k napájení mikrokontroléru (Arduino NANO), převodníků a digitálních teploměrů. Zapojení lineárního stabilizátoru je zobrazeno dle následujícího schématu (obr. 12).

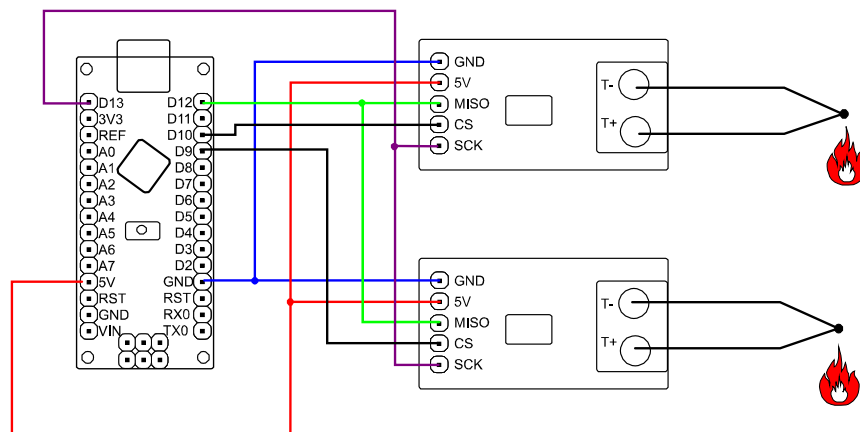


**Obr. 12:** Zapojení stabilizátoru napětí [12]

Ze schématu je patrné, že na stabilizátor typu 7805 jsou po obou stranách připojeny dva elektrolytické a blokovací keramické kondenzátory. Keramické kondenzátory zlepšují stabilitu napětí, při náhlém zvýšení odběru může tak i ochránit použitý stabilizátor před vysokofrekvenčním rušením.

### 2.1.3.2 MAX6675

Obvod MAX6675 je přesný, digitální 12 bitový převodník pro práci s termočlánky typu K. Převodník je schopen změřit teplotu v pracovním rozsahu od 0 do 1024 °C s přesností na 0,25 °C. Součástí převodníků je obvod kompenzující problém studeného konce, ovlivňující přesnost měření termočlánkem. Jednotlivé termočlánky se připojují k převodníkům šroubovací svorkovnicí. Komunikace mezi převodníkem a platformou Arduino NANO je realizována SPI sběrnici (obr. 13). Knihovna převodníku MAX6675 umožňuje měřit teplotu jak ve stupních Celsia, tak i Fahrenheita. Pro kontrolu převodníku a připojených termočlánku obsahuje knihovna funkci detekce poruchy [5], [7].

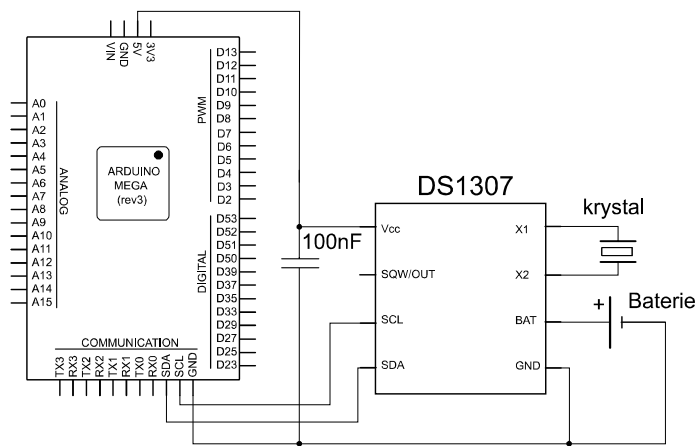


**Obr. 13:** Zapojení převodníku termočlánku

### 2.1.3.3 Obvod reálného času

Pro výslednou analýzu vybraných laboratorních úloh, ve kterých dochází ke změnám teploty v závislosti na čase, byl do zařízení přidán RTC modul (Real Time Clock). Z modulu RTC je možné získávat aktuální čas a datum, kdy bylo měření prováděno. Časová data se spolu se změřenými teplotami ukládají na externí paměťová media jako je PC, či SD karta.

V aplikaci je použit obvod DS1307 s integrovanou lithiovou baterií. Záložní baterie typu CR2032 zajišťuje neustálý chod modulu s nastaveným časem i po vypnutí celého zařízení. Před prvním spuštěním přístroje je důležité zkontrolovat, popřípadě ručně nastavit aktuální čas v menu „Nastavení hodin“. Komunikace mezi RTC modulem a mikrokontrolérem je realizována po sériovém I<sup>2</sup>C rozhraní (obr. 14).



Obr. 14: Zapojení RTC [14]

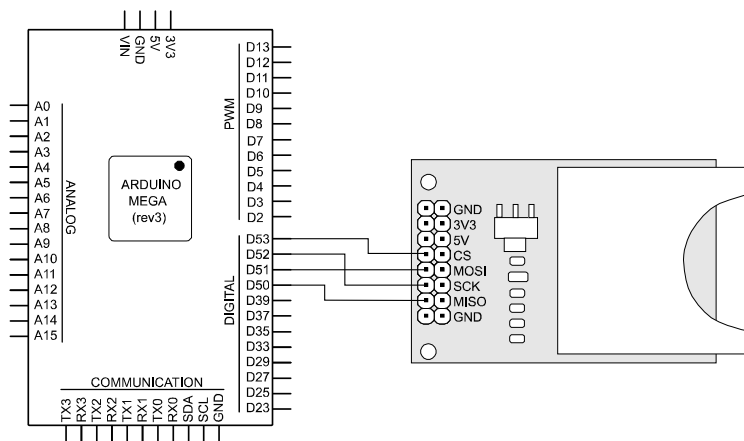
Ze schématu je patrné, že data jsou posílána na I<sup>2</sup>C sběrnici po datových vodičích SCL a SDA. Celkový způsob I<sup>2</sup>C komunikace byl již popsán v odstavci (1.4.2). Při zapnutém zařízení je celý RTC modul napájen z centrálního 5V zdroje napětí. V tomto režimu je možné data o aktuálním čase odesílat přímo do mikrokontroléru. Pokud dojde k vypnutí centrálního napájecího napětí, je veškerá komunikace s vývojovou deskou přerušena a modul automaticky přepíná do nízko-energetického záložního režimu.

### 2.1.3.4 SD karta

Z důvodů výsledné analýzy testovacích úloh bylo zařízení vybaveno paměťovými obvody pro zápis a odesílání naměřených dat. Získaná data je možné během měření odesílat jak do připojeného PC, tak i na 2GB SD kartu, umístěnou ve slotu karet na čelní straně výrobku. Po připojení externího média se v menu „Ukládání dat“ musí aktivovat funkce pro zapnutí nahrávání dat.

Před zahájením zápisu na SD kartu musí být provedena kontrola, zda je připojená karta funkční. V případě zapojení paměťové karty před zapnutím samotného přístroje, je kontrola prováděná vždy automaticky. Správná funkčnost SD karty je signalizována dvojbarevnou led diodou (označenou jako SD karta) zeleně.

Po ukončení měření se SD karta následně vloží se do čtečky SD v klasickém PC či notebooku. Uložená data jsou zapsána ve formátu \*CSV, a ten je možné otevřít v tabulkovém programu Excel.

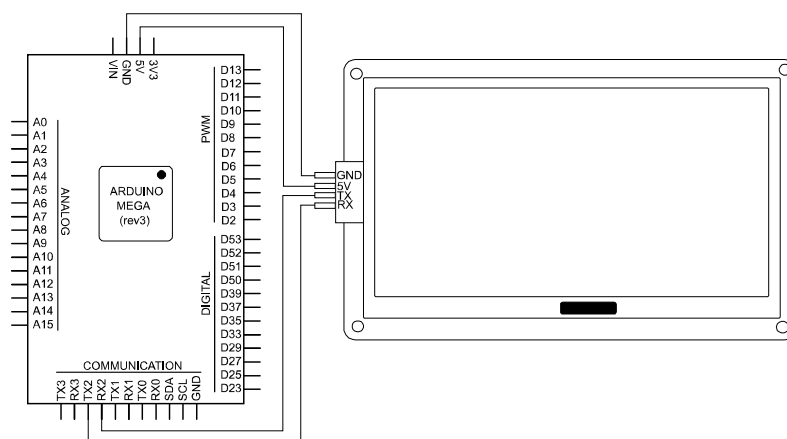


**Obr. 15:** Zapojení SD karty [14]

Ze zapojení SD karty je patrné, že komunikace mezi SD kartou a vývojovou deskou Arduino je realizovaná po sériové SPI sběrnici, kde mikrokontrolér je nastaven v režimu Master. Samotný princip komunikace mezi Master a Slave obvody byl popsán v kapitole 1.2.3.1. Napájení celého slotu SD karty je připojeno k centrálnímu 5 V zdroji napětí. Při práci s SD kartou je hlavně používáno napájecí napětí o hodnotě 3V3. Pro snížení napětí na požadovanou hodnotu obsahuje čtečka SD karet integrovaný stabilizátor napětí [9].

### 2.1.3.5 Dotykový LCD displej

Nedílnou součástí každého moderního přístroje velký, dotykový LCD displej, jímž je možno nastavovat a zobrazovat veškeré požadované parametry. Po celkové analýze dnes dostupných jednotlivých modelů bylo rozhodnuto o využití grafického LCD displeje od firmy Nextion. Jedná se o barevný, dotykový snadno programovatelný HMI displej (Human Machine Interface) o celkové velikosti 4.3" s rozlišením 480 x 240 bodů. Displeje řady Nextion umožňují velmi jednoduché propojení (obr. 17) s mikrokontroléry typu Arduino, či Raspberry po sériové dvojitodičové UART lince.

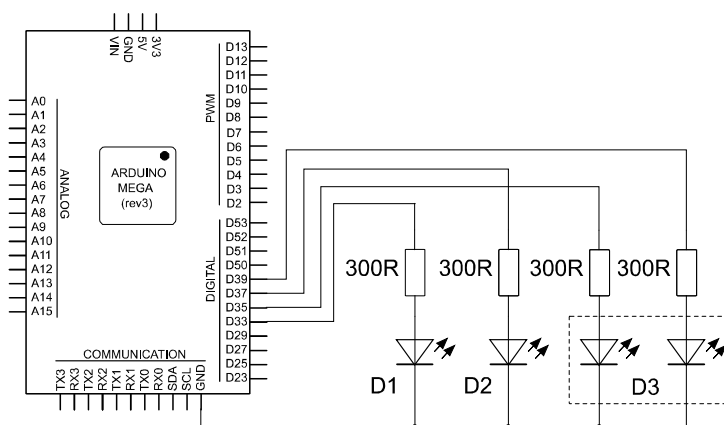


**Obr. 17:** Zapojení displeje [16]

Po připojení Nextion displeje ke zdroji 5 V, je možné přímo nahrát do paměti displeje vytvořený a zkontrolovaný program přes mini SD kartu. Ukládáním výsledné grafiky do vlastní paměti displeje se výrazně ušetří programová paměť v mikrokontroléru [16].

### 2.1.3.6 LED diody

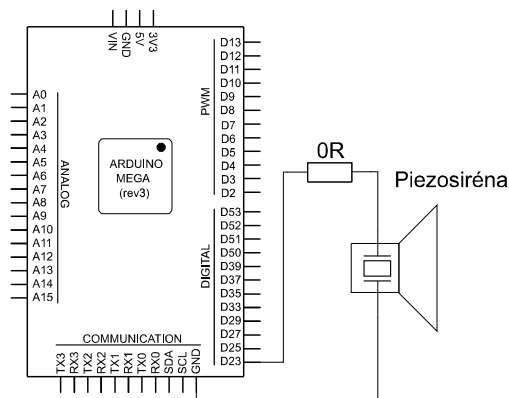
Pro optickou kontrolu byly na čelní panel přístroje přidány kontrolní LED diody, ty informují obsluhu o aktivaci jednotlivých funkcí v programu. Dvoubarevná R/G dioda byla přidána pro celkovou kontrolu aktuálního stavu připojené SD karty (nalezená/nenalezená). Na obrázku 18 je celkové schéma zapojení jednotlivých LED diod k digitálním výstupům mikrokontroléru Arduino Mega [9].



**Obr. 17:** Základní zapojení LED indikátorů [17]

### 2.1.3.7 Siréna

Do přístroje byla přidána malá siréna typu KPE222A s vlastním budícím odvodem, jenž je přímo připojena k mikrokontroléru podle schématu (obr. 19). Siréna zde plní funkci akustického varování na poruchové stavy, na které musí být obsluha upozorněna.

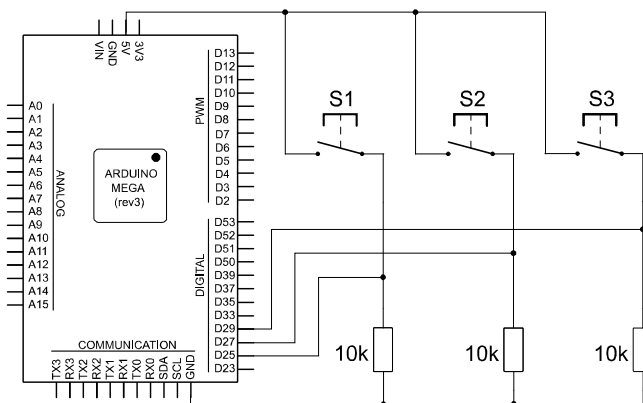


Obr. 18: Zapojení piezosirény [9]

K aktivaci sirény může dojít v případě rozdílu mezi nastavenou a změřenou teplotou při regulaci teploty, nebo při poruše na vybraném regulačním termočlánku. V takovém případě dochází k automatickému vypnutí měření a regulace teploty a poruchový signál je vydáván krátkým přerušovaným tonem. Pro individuální nastavení je možné v menu „hlavní nastavení“ akustickou signalizaci vypnout [9].

### 2.1.3.8 Tlačítka

Na čelním panelu vyrobeného zařízení se nachází tři mechanická tlačítka aktivující vedlejší funkce v programu. K těmto funkcím patří automatická vypnutí měření a regulace teploty, automatické posouvání zobrazených stránek na displeji a vstup do menu s chybovým hlášením. Z obrázku č. 19 lze zjistit, jak jsou připojena jednotlivá mechanická tlačítka k vstupům mikrokontroléru.



Obr. 19: Zapojení tlačítek [9]

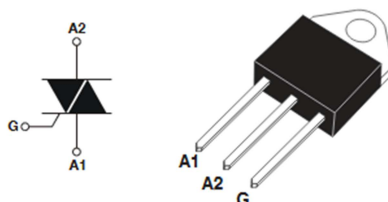
Každé připojené tlačítko má tedy vlastní digitální vstup (tzn. jedinečnou digitální adresu v programu). Po stisknutí mechanického tlačítka na čelním panelu přístroje je přivedeno 5V napětí na daný vstup mikrokontroléru. Ten následně aktivuje danou funkci ve výsledném programu.

### 2.1.3.9 Spínání výkonových prvků

Spínání výkonových prvků je dnes možno provádět za pomoci nejrůznějších elektronických a elektrotechnických způsobů, metod a součástek. Nejjednodušším způsobem spínání zátěží o velkém výkonu je přes dvupolohové elektromagnetické relé, či stykač. Relé je elektrotechnická součástka, skládá se z cívky, kotvy a mechanických kontaktů. Po přivedení napětí na cívku relé (stejnoseměrné, střídavé) dojde k přitažení kotvy, ta je přímo spojena k mechanickým kontaktům. Při spínání pomocí relé (popřípadě stykačem) se pracuje pouze s nulovým nebo stoprocentním výkonem připojené zátěže. Konstrukce relé navíc neumožňuje velmi časté a rychlé spínání mechanických kontaktů, kdy může docházet k jejich vypalování elektrickým proudem.

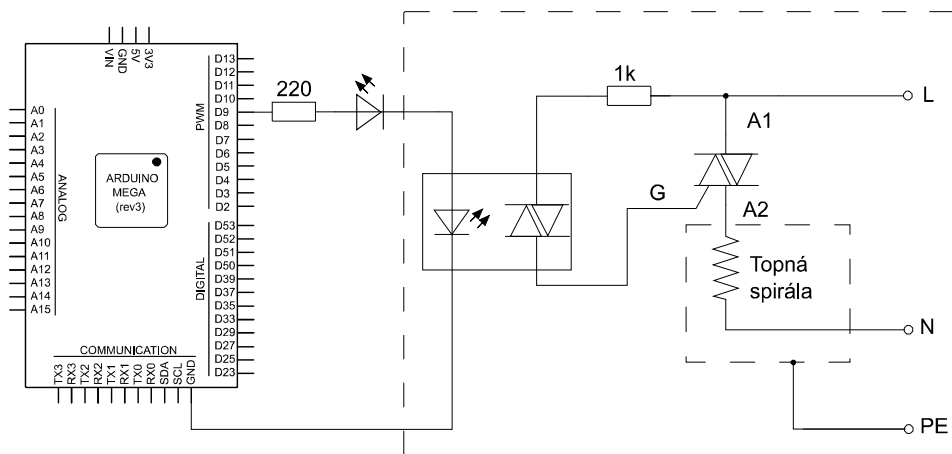
#### *Triakové spínání výkonu*

Z výše popsaných důvodů byla do zařízení aplikována plynulá triaková regulace, ta je schopna přímo regulovat výkon připojené zátěže proporcionálně od nuly do sta procent. Tímto řešením je možné odstranit (společně se softwarovým regulátorem) veškeré nežádoucí překmity přes požadovanou nastavenou teplotu. Hlavní součástkou u použitého způsobu ovládání výkonných prvků je Triak (obr. 20). Triak je polovodičová, obousměrná a pětivrstvá součástka [17].



**Obr. 20:** Schematická značka triaku, triak [17]

Do zařízení byl vložen triak typu BTA26B/600V od firmy STMicroelectronics. Předností použitého typu je vzájemné galvanické oddělení síťového napětí od chladičí plošky. Součástka tak umožňuje spínat elektrický proud (mezi svorkami A1 – A2) o maximální hodnotě 25 A při velikosti napětí 600 V. K řízení výkonu obsahuje triak řídicí elektrodu G (GATE), do té se přivádí řídicí signál o přibližné velikosti 50 mA. Přestože má triak minimální elektrický odpor, dochází při spínání k jeho zahřívání. Z tohoto důvodu je nutné umístit součástku na hliníkový chladič a ten přebytečné teplo odvede. Na schématu číslo 21 je znázorněno celé spínání výkonové části. Předložený obvod je vhodný pro čistě odporové zátěže, jako jsou žárovky, odporové spirály atd.



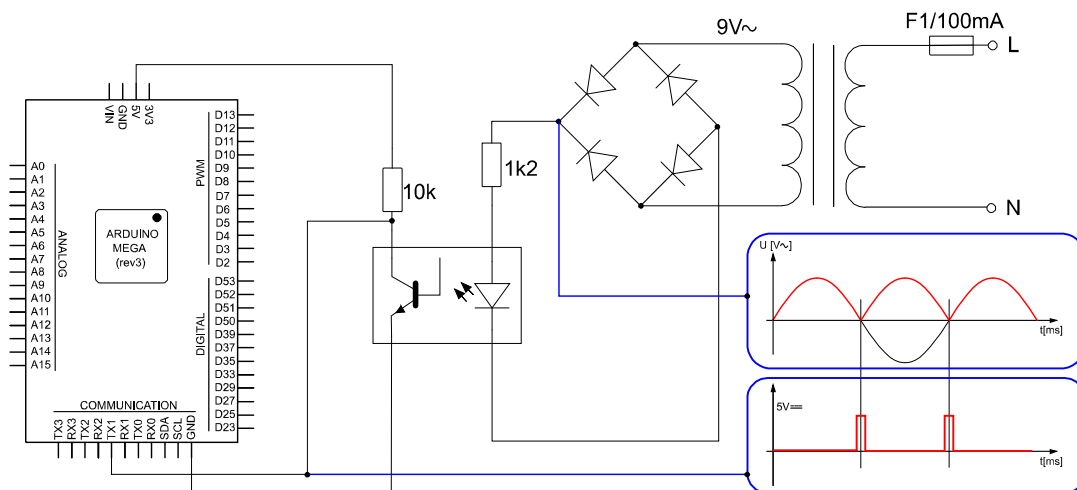
**Obr. 21:** Schéma zapojení triaku [19]

Ze schématu je patrné, že spínání výkonových triaků (elektronických zátěží) je řízeno digitálním signálem přímo z mikrokontroléru, přes polovodičovou optickou součástku. V tomto případě se k optickému přenosu signálu využívá optorelé typu MOC 3021 zajišťující galvanické oddělení nízkonapěťové části od silové části. Obvody tak mohou mít navzájem mezi sebou rozdílný průběh a napěťovou úroveň, a to až v řádech stovek voltů. Opto-relé se skládá z polovodičové, integrované LED diody, na vstupní a opto-triakem na výstupní straně součástky. Po přivedení řídicího signálu se vnitřní LED dioda začne rozsvěcovat, tím dojde k sepnutí triaku na výstupní straně opto-relé. Pokud nastane elektronické sepnutí opto-relé, dochází k otevření výkonného triaku a zátěž je připojena k síťovému napětí.

### 2.1.3.10 Detekce průchodu nulou

Detekce průchodu nulou (neboli zero-cross detection) je doporučený elektronický obvod pro spínání výkonových zátěží (obr. 22). Použitý obvod neustále sleduje sinusový průběh rozvodného síťového napětí. V okamžiku, kdy sinusovka prochází nulou, vytváří se speciální referenční bod, ten je nezbytný pro celkovou synchronizaci mikrokontroleru. Výstupem obvodu DPN je tak pravidelný, obdélníkový 5V signál, ten je následně přiveden na digitální vstup v MCU bloku.

Z daného schématu je patrné, že obvod DPN je neustále připojen na rozvodnou elektrickou síť. V případě překročení maximálního povoleného proudu (např. při zkratu) je obvod navíc chráněn trubičkovou pojistkou, uloženou v pouzdře na desce plošného spoje. Použití transformátoru, typu BV-303 2031 od firmy HAHN zde plní dvojí funkci. Jednak galvanicky odděluje řídicí desku od energetické sítě a rovněž snižuje velikost síťového napětí na bezpečnější hodnotu (konkrétně 9 V).

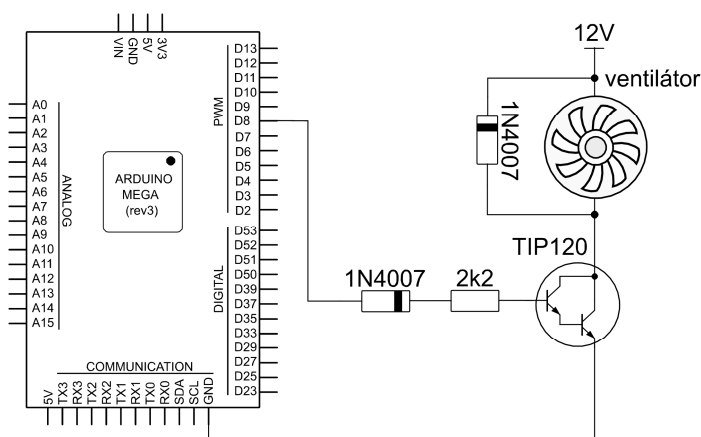


**Obr. 22:** Schéma zapojení detekce průchodu nulou [19]

Střídavé napětí je následně usměrněno polovodičovým můstkem a poté přivedeno na opto-tranzistor. Opto-tranzistor se skládá z integrované LED diody a rychlého optického tranzistoru. V okamžiku, kdy síťové napětí je rovno nule, objeví se na vstupu mikrokontroléru logická jednička. Průchod nulou tak určuje čas, od kterého má být sepnuty či rozepnutý triak podle aktuálního nastavení výkonu [17].

### 2.1.3.11 Ventilátor

Celý výkonový blok je uložen na hliníkovém profilu, ten vykonává funkci pasivního chladiče. Pro rychlejší odvádění tepla je na žebrování hliníkového chladiče vháněn vzduch z ventilátoru. Celkové zapojení ventilátoru je znázorněno na obr. 23. V obvodu je jako spínací prvek použit výkonový NPN tranzistor. V součástce TIP 120, od výrobce STMicroelectronics, se nacházejí dva tranzistory v Darlingtonově zapojení řízené PWM regulací. Dioda paralelně připojená k větráku chrání tranzistor před záporným napětím indukovaným při vypínání větráku. Druhá dioda slouží jako ochrana mikrokontroléru.



**Obr. 23:** Zapojení ventilátoru

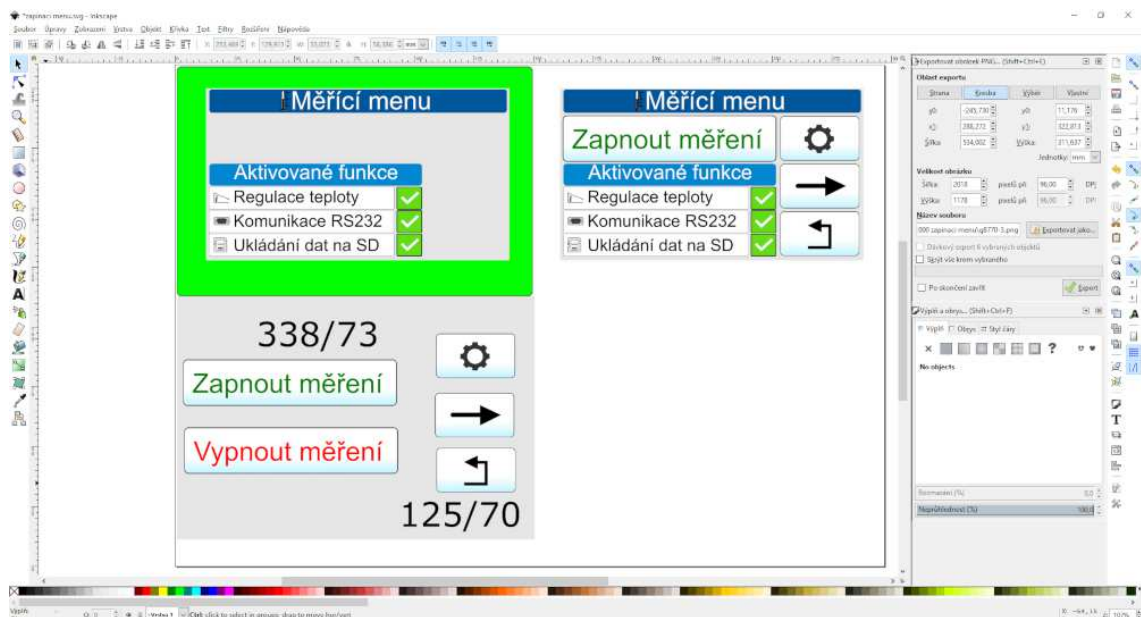


## 2.2 Softwarové řešení

V této části práce jsou rozepsány způsoby komunikace mezi měřicím a MCU blokem, způsob regulace teploty, způsob a tvorba grafiky LCD displeje atd.

### 2.2.1 Grafika LCD displeje

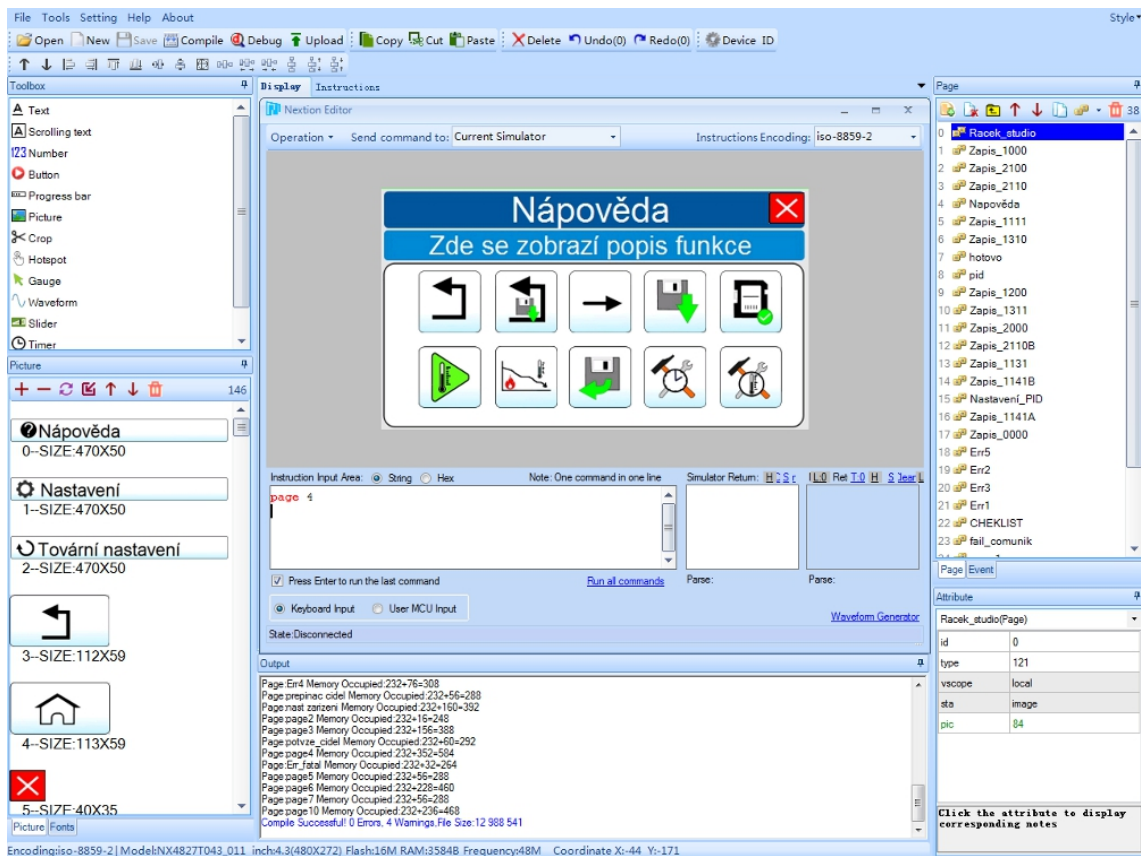
Pro práci s dotykovým LCD displejem bylo nutné vytvořit rozsáhlou sadu grafických oken, tlačítek a symbolů, a ty se budou během měření a regulace zobrazovat. K vytvoření jednotlivých prvků byl nakonec zvolen freewarový, grafický editor Inkscape.



Obr. 24: Příklad grafiky tvorby grafiky v Inkscape

V tomto editoru je možné vytvářet nejrůznější obrazce pomocí vektorové grafiky. Program tak podporuje tvorbu prvků, jako jsou například: texty, geometrické tvary, různé značky a barevné přechody a ty je možné nadále upravovat. Mezi další funkce, které program Inkscape podporuje, je klonování a seskupování jednotlivých prvků do celků či práce s jednotlivými vrstvami atd. Oproti programům používajících bitmapový způsob grafiky, je možné u vytvořených obrazců měnit jejich velikost, aniž by došlo ke zhoršení kvality.

Vytvořené prvky v programu Inkscape se následně nahrály do Nextion grafického studia, v němž se nastavuje výsledná grafická stránka displeje. Součástí editoru jsou tak předem nadefinovaná funkční okna (např. dotyková tlačítka, textová pole, obrázky atd.), ta jsou podle potřeby rozmístěna po aktivní ploše LCD displeje.



Obr. 25: Editace LCD displeje

V editoru se nastavuje i komunikace mezi mikrokontrolérem a LCD displejem. Při aktivaci jakékoliv prvků odešle LCD display jedinečnou adresu do MCU bloku, a ten následně spustí požadovanou funkci v programu. K nahrání hotového programu do paměti displeje se používá mikro SD karta, vložená do slotu na desce zobrazovače. Maximální velikost projektu u displeje o velikosti 4.3" je 16 MB.



Obr. 26: Příklad grafiky LCD displeje

### 2.2.2 Systém chyb a upozornění poruch

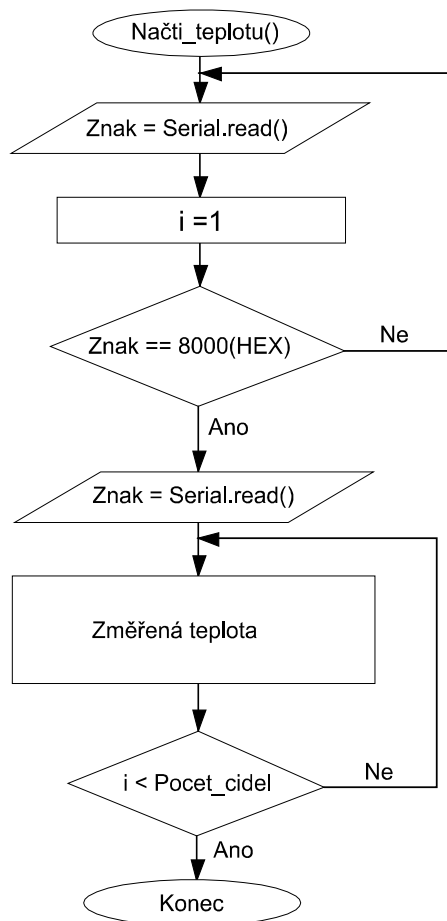
V dnešní době je již standardem, že chytrá průmyslová a měřící zařízení mají vlastní bezpečnostní a informační systém. Takový systém neustále hlídá chod celého zařízení a kontroluje celkové správné nastavení přístroje. Vytvořený bezpečnostní systém se okamžitě aktivuje po zapnutí přístroje. Po spuštění prvních funkcí programu je provedena první kontrola stavu připojených termočlánků. Pokud po vstupní kontrole není některý z termočlánků nalezen, pak ho není již možné pro řízení regulace teploty vybrat. Při vzniku a po celou dobu trvání závady svítí kontrolní LED dioda. V případě, že je zapnutá i piezo-siréna vydává zařízení při závažné poruše přerušovaný tón. Pro vstup do chybového menu je nutné stisknout tlačítko „Výpis z poruch“. Na LCD displeji se zobrazí popis a způsob jak vzniklou závadu odstranit:

<b>E1</b>	Chyba: Závada na regulačním termočlánku nebo převodníků. Proces měření a regulace byl automaticky ukončen z důvodu ochrany připojených přístrojů. Je nutné provést kontrolu termočlánku, zda nebyl mechanicky poškozen. Pro vypnutí závady je nutné přístroj vypnout a opětovně ho zapnout. Pokud dochází k opakovanému spouštění, je nutné daný termočlánek vyměnit.
<b>E2</b>	Chyba: Překročení maximální povolené teploty o 10 °C na regulačním termočlánku. Celý proces měření a regulace byl ukončen z důvodu ochrany připojených přístrojů. Pro vypnutí této závady je nutné celé zařízení vypnout a opětovně ho zapnout.
<b>E3</b>	Upozornění: Poškození termočlánku. Nejedná o regulační čidlo, měření teploty nadále pokračuje. V menu chyb je možné poškozené čidlo vypnout, aby se závada neustále neopakovala.
<b>E4</b>	Upozornění: Překročení maximální povolené teploty o 10 °C na jednom z termočlánků. Měření nebylo automaticky ukončeno
<b>E5</b>	Upozornění: Není zvoleno žádné čidlo pro regulaci teploty. V menu nastavení čidel je nutné vybrat alespoň jedno řídicí čidlo
<b>E6</b>	Upozornění: Požadované čidlo bylo kvůli závadě vypnuto nebo při vstupní kontrole připojených čidel nedošlo k nalezení termočlánku.
<b>E7</b>	Chyba: Došlo k překročení maximální konstrukční teploty termočlánku. Přístroj je nutné nechat vychladnout a poté opětovně zapnout.

### 2.2.3 Princip získávání teploty z termočlánků

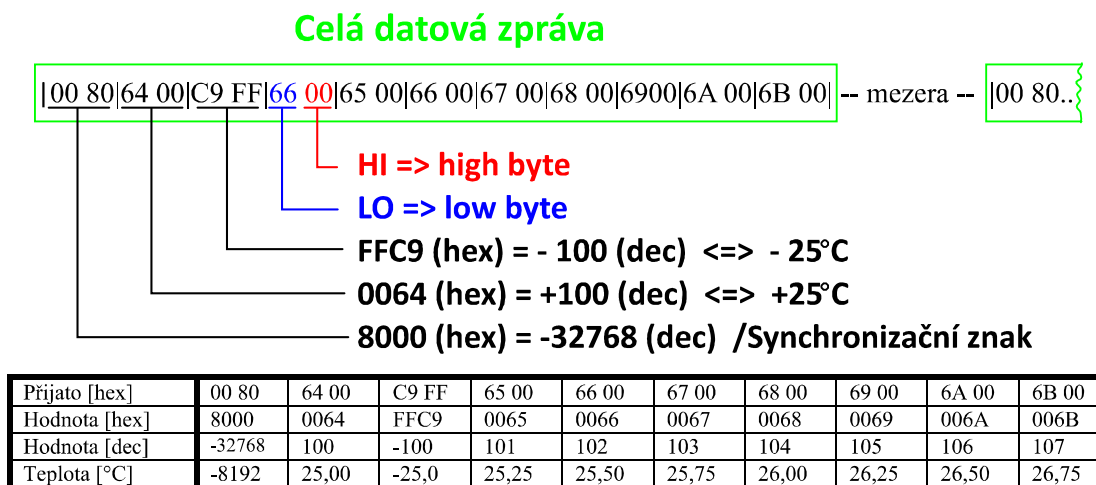
Z blokového rozdělení v bodě 2.1.2 je také patrné, že přenos mezi měřícím a výpočetním blokem je řešen po pevně nastavené, sériové UART komunikaci. Přenos dat mezi bloky začne probíhat v případě, kdy je zapnuto měření nebo regulace teploty, nebo když přístroj provádí vstupní kontrolu. V ostatních situacích, kdy dochází k nastavování přístroje, je komunikace pozastavena.

Jedním z největších problémů při realizaci přístroje bylo vytvoření samotného, důmyslného způsobu kódování a dekódování naměřených dat. Vytvořený způsob komunikace mezi bloky musel být rychlý, ale zároveň spolehlivý a datově (časově) úsporný. Nakonec bylo rozhodnuto o převádění změřené teploty z teplotních čidel na celočíselný typ. Veškeré informace o každém čidle a jeho aktuální teplotě se budou zapisovat ve dvojbytovém hexadecimálním čísle. Před začátkem přenosu dat je vyslán synchronizační hexadecimální znak 8000 (-32768 dekadicky), po němž následují veškerá data z čidel. U hexadecimálního způsobu kódování je vždy zaručená stejná délka výsledného datového čísla, ta však nezávisí na aktuální změřené teplotě.



Obr. 27: Princip odesílání dat

Pro kompletní přenos dat je nutné přenést celkem 22 bytů. Při odesílání dat se jako první posílají méně významné bity (LO) následované významnějšími bity (HI). Na obrázku 27 je znázorněn způsob kódování a dekódování naměřených teplot.



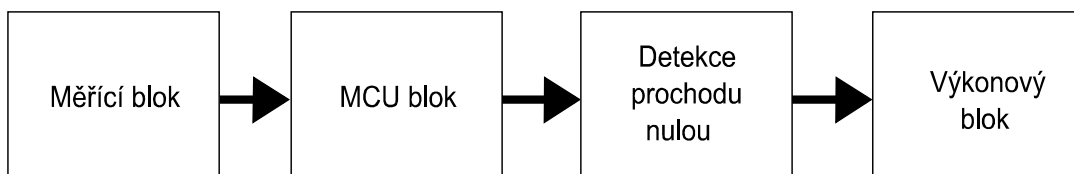
Obr. 28: Příklad kódování a dekódování

Informace získané z čidel jsou převedeny na datový formát Int se znaménkem. Tento formát pracuje s čísly v rozsahu od -32768 do +32767. Číslo odpovídající -32768 bylo zvoleno jako synchronizační znak a programově bylo zajištěno, že se takový údaj nikdy nemůže vyskytnout mezi naměřenými hodnotami. Dále byly údaje získané z obou typů čidel (MAX6675 i DS18B20) znormovány tak, že hodnota vysílaná do sériové linky odpovídá čtyřnásobku naměřené hodnoty. Tím je zachována citlivost čidel 0,25 °C na jeden bit. Po přijetí informace ze sériové linky stačí vydělit hodnotu číslem 4.0 a tím získat správnou hodnotu změřené teploty ve formátu float.

Pevně nastavená rychlost UART sériové komunikace na hodnotě 9600 bps umožňuje přenést veškerá data přibližně za 25,2 ms.

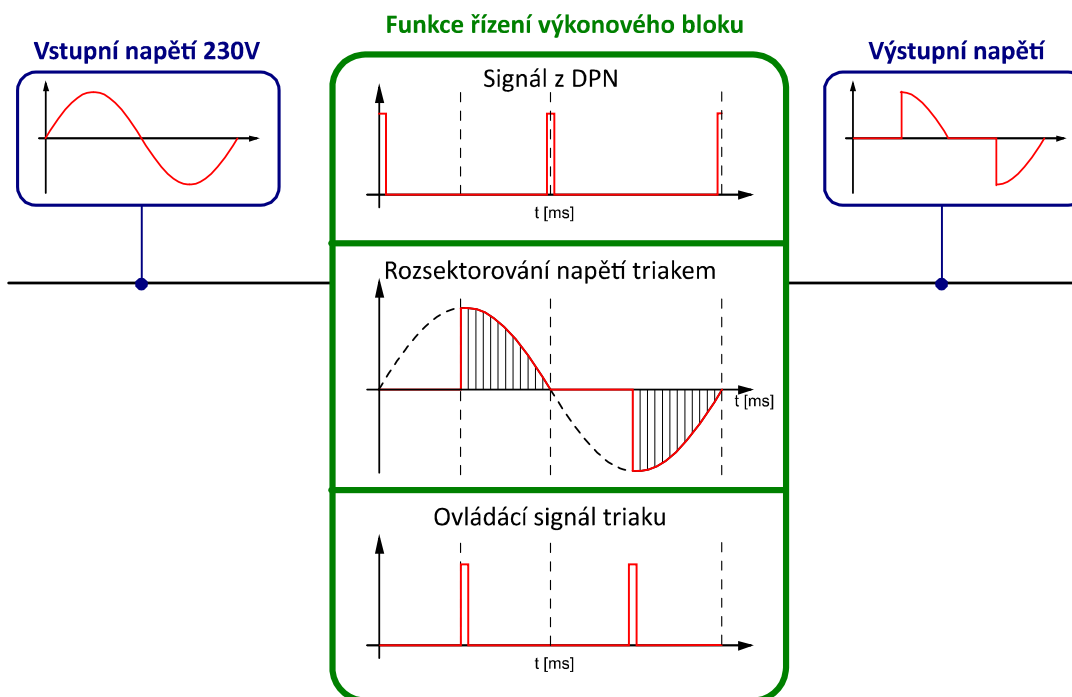
#### 2.2.4 Proces spínání výkonové části

Pro spínání výkonového bloku je nutné komplexně spojit několik vzájemně po sobě jdoucích kroků. Vše začíná měřením a odesláním teploty z termočláneků. Měřící blok v pravidelném intervalu (pomocí vnitřního časovače) odesílá data o aktuální teplotě do MCU bloku. Po příchodu všech dat je provedena filtrace zákmitů teploty. Nově získaná a vyfiltrovaná data jsou následně převzata softwarovým PID regulátorem, a ten vypočte aktuální výkon triaku (pro daný čas regulace, při dané teplotě). Celý proces pro sepnutí výkonové části je nastíněn na obr. 28. [17].



**Obr. 29:** Kaskáda pro sepnutí výstupu

Samotnému spínání triaku vyžaduje synchronizovat mikrokontrolér v MCU bloku s elektrickou rozvodnou sítí. K tomu je použit obvod detekce průchodu nulou, ten v pravidelném čase (10ms) vysílá impuls na vstup UART komunikační linky RX1. Pokaždé, když sinusové síťové napětí prochází nulou (po 10ms), dochází k přerušení ostatních funkcí (částí) programu a vzniká 5V synchronizační pulz. Hodnota 20 ms je určena samotným síťovým napětím 230 V o frekvenci 50 Hz. Pokud by zařízení bylo zapojeno na zdroj o jiné frekvenci, muselo by dojít ke změnám v programu. Řídící signál z obvodu DPN je následně aktivuje se další vnitřní časovač v MCU bloku, pro který je nutné nahrát do paměti mikrokontroléru oficiální knihovnu Timer One.H od výrobce Arduina. Po synchronizaci a výpočtu regulačního bytového čísla je časovačem řízený signál odeslán na výkonový spínací triak. V této práci se tak využívá tzv. fázového řízení triaku (obr. 30), při němž dochází ořezávání sinusového průběhu v závislosti na čase.



**Obr. 30:** Princip řízení výkonu na 50%

Z obrázku lze zpozorovat, že celý sinusový průběh síťového napětí je rozdělen časovačem na 64 stejných časových úseků. Po průchodu napětí nulou se určí doba, kdy má být triak sepnut. Vzhledem k tomu, že sinusovka je složena ze dvou půlvln, tak dobu sepnutí je možné ovlivnit pouze v intervalu 10 ms od průchodu nulou. Pokud sepneme výkonový prvek ihned po průchodu nulou, pak bude připojená odporová zátěž pracovat se 100% výkonem. Z toho plyne, že výkon zátěže je ovlivněn časem, kdy je triak sepnut a kdy je naopak rozepnut [17].

### 2.2.5 PID regulace

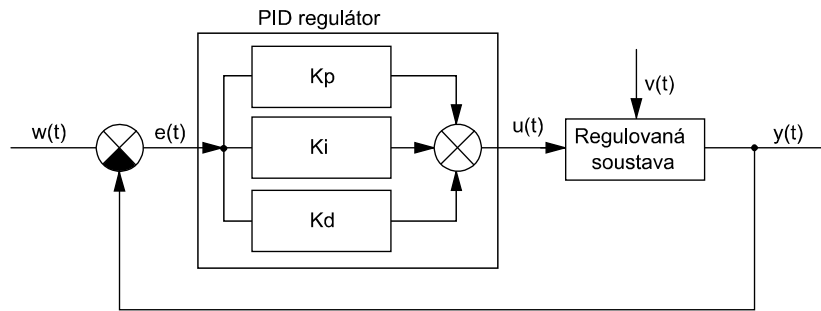
Vyrobený přístroj byl navrhnout tak, aby dokázal měřit a současně udržovat nastavenou teplotu měřeného systému. Za tímto účelem byl do programu vyrobeného zařízení implementován softwarový PID regulátor, což je nejběžnější způsob jak regulovat danou soustavu platformou Arduino. Do paměti mikrokontroléru se tak nahraje volně dostupná knihovna PID\_v1.h.[18]. Softwarový regulátor se skládá ze tří samostatných složek (proporcionální, integrační, derivační) a ty je možno různě kombinovat. Výsledná kombinace jednotlivých složek má různý vliv na regulaci soustavy. Aby regulátor mohl správně pracovat, vyžaduje informace o aktuální a nastavené teplotě. K určení skutečné teploty se využívají data z termočlánků a DS18B20. Samotná regulace poté probíhá tak, že pokud během regulace vznikne rozdíl mezi skutečnou a požadovanou hodnotou, vzniká tzv. regulační odchylka, a tu se regulátor pokusí snížit na minimum. Pro výpočet regulační odchylky je možné použít jednoduchý vztah:

$$e(t) = w(t) - y(t), \quad (4)$$

kde  $e(t)$  je časově proměnná regulační odchylka,  $w(t)$  aktuální nastavená hodnota,  $y(t)$  je skutečná změřená hodnota. Kromě požadavků na minimální odchylku by měl ideální regulátor zároveň splňovat:

- minimální překmit přes nastavenou hodnotu;
- co nejkratší dobu ustálení na požadovanou hodnotu;
- celkové zachování stability systému při regulaci.

Pro splnění všech zmíněných požadavků je vhodné použít komplexní spojité PID regulátor. Regulátory s funkcí PID vzniknou paralelním spojením proporcionální, integrační a derivační složky podle celkového blokového schématu (obr. 31).



Obr. 31: PID regulátor

kde  $u(t)$  je akční veličina zasahující na soustavu,  $v(t)$  je vliv poruch působících na soustavu,  $e(t)$  je časově proměnná regulační odchylka,  $w(t)$  aktuální nastavená hodnota,  $y(t)$  je skutečná změřená hodnota. Jak již bylo zmíněno, každá jednotlivá složka PID regulátoru má charakteristický vliv na regulovanou soustavu. V následné části jsou popsány jednotlivé složky ideálního regulátoru, tzn. proporcionální složka P, integrační složka I a derivační složka D [19], [20].

### 2.2.5.1 Proporcionální regulátor

Regulátor s proporcionální složkou provádí neustálý výpočet velikosti regulační odchylky, která ovlivní akční zásah na regulovanou soustavu. U regulátoru typu P se nastavuje převodní konstanta  $K_p$ , ta určuje výsledné zesílení regulátoru (tj. poměr mezi regulační odchylkou a vygenerované velikosti akční veličiny). Protože P regulátor není schopen úplně odstranit regulační odchylku, není vhodné ho používat pro systém vyžadující přesné dodržení nastavené hodnoty [19], [20].

$$x(t) = K_p e(t) \quad (5)$$

### 2.2.5.2 Integrační regulátor

Integrační složka regulátoru se používá pro vynulování regulační odchylky v ustáleném stavu. Na rozdíl od proporcionální a derivační složky má I regulátor nejpomalejší reakci na změnu systému, protože hodnota výstupní veličiny přímo závisí na integrálu vstupní veličiny. Proto je regulátor vhodné samostatně používat u systému s velkou setrvačností, nebo s nízkým počet změn. Stejně jako u regulátoru s proporcionální složkou závisí rychlost na změnu na nastavení regulační konstanty  $K_i$ . V běžné praxi se I regulátory používají v různé kombinaci s proporcionální složkou. [19], [20].

$$x(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (6)$$



### 2.2.5.3 Derivační regulátor

Derivační složka je nejrychleji reagující část PID regulátoru, která reaguje i na minimální změnu hodnoty regulované veličiny. Rychlost, s jakou bude do soustavy zasahovat, ovlivňuje nastavení derivační časové konstanty  $K_d$ . Z popisu složky je patrné, že se stoupající velikostí derivační konstanty se zvýší citlivost a rychlost regulace, ovšem na úkor stability soustavy (zesilování šumu).

Protože derivační regulátor reaguje pouze na změny velikosti regulační odchylky, není možné jej používat samostatně. V praxi se tak setkáme s různými kombinacemi D regulátoru s ostatními složkami [19], [20].

$$x(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

### 2.2.5.4 Nastavení a působení regulátoru na soustavu

Nastavení jednotlivých konstant ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) se provádí buď pomocí matematického modelování, nebo experimentálním testováním samotného systému. Při nastavování každého regulátoru vzniká kompromis mezi přesností a rychlostí regulace na změnu v systému. Princip a vliv PID regulace na soustavu, je možné popsat rovnicí:

$$x(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Z principu regulátoru je jasné, že se snaží dosáhnout a udržet danou nastavenou hodnotu co možná v nejkratším čase. Aby bylo možné ovlivnit i rychlost nárůstu teploty v závislosti na čase, byla do programu přidána speciální funkce regulace gradientu teploty. Její funkce spočívá v tom, že mikrokontrolér vedle samotné odchylky regulace vypočítává i směrnici přímký mezi teplotními zlomy. Z přímký je následně možné vyčíst teoretickou teplotu pro daný okamžik od spuštění regulace. Vypočtená teplota se poté použije jako nastavená teplota pro PID regulátor. Po provedení kompletních výpočtů akční veličiny se spouští příkazem `Compute()`, a vzniká výsledné bytové číslo v rozmezí od 0 do 255 bitů. Při čísle 255 se provádí maximální možný zásah (výkon) na regulovanou soustavu. Tento signál je následně vyslán přes optorelé do výkonového bloku [18], [20].

## 2.3 Využití přístroje ve školní praxi

V třetím úseku praktické části jsou podrobně popsány veškeré situace, na kterých byl přístroj testován a aplikován. V každém sestaveném experimentu se využívají jednotlivé kombinace funkcí, jaké přístroj může poskytnout.

První sada experimentů používá funkce měření a ukládání průběh teploty během testu. U experimentu číslo 4 a 5 je aplikována i funkce regulace teploty na požadovanou hodnotu. U jednotlivých pokusů je k dispozici až 10 teplotních senzorů v podobě termočlánků, či digitálních snímačů teploty. Konkrétní typ použitých termočlánků umožňuje měřit teplotu v rozmezí  $0 \div 400$  °C. Naopak senzory typu DS18B20 pracují v teplotním intervalu  $-55 \div 125$  °C.

Změřená data se následně převádí ve formátu *\*txt* a *\*csv* do Excel tabulky. Poté je možné provádět analýzu naměřených dat a jejich grafické znázornění. Jednotlivé pokusy se navzájem liší délkou trvání, provozní teplotou a rychlostí změn. Proto jsou u jednotlivých úloh použity konkrétní typy čidel.

### 2.3.1 Průběh teploty ve třídě v závislosti na čase

Měření teploty prostředí patří k nejméně náročným experimentům, se kterými se žák na základní škole může setkat. Často se provádí formou domácího pokusu, kdy se měří venkovní teplota v předem stanoveném čase a intervalu (týden, měsíc atd.). Výstupem bývá vytvoření grafu ze zaznamenaných hodnot teploty. Znázornění může být provedeno buď na milimetrový papír, nebo za použití elektronického tabulkového programu např. Excel. Venkovní teplota se získává buď klasickým rtuťovým či lihovým teploměrem, nebo dnes moderními digitálními meteo-stanicemi. Důležitou podmínkou po celou dobu měření je umístění měřicího přístroje ve stínu. Tento pokus byl modifikován na měření teploty ve třídě během jedné vyučovací hodiny (obr. 32).



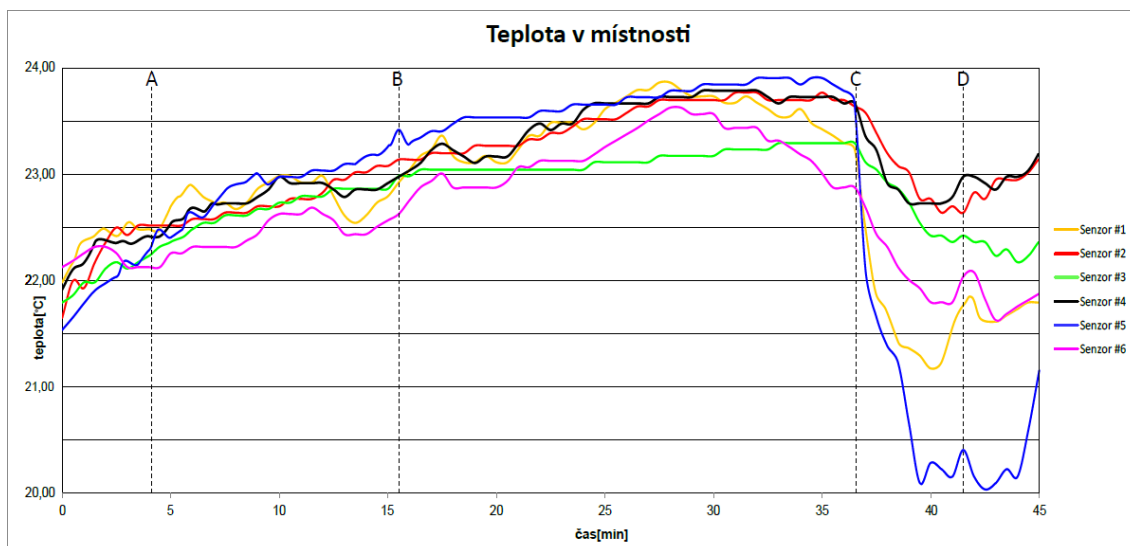
**Obr. 32:** Měření v místnosti

Cílem pokusu je poukázat na to, jak rychle se může změnit teplota (jak rychle, o kolik) ve třídě během 45 minut. To, jaká teplota je v místnosti, má zásadní vliv na pozornost žáků při práci. Problematika klimatických podmínek na pracovišti je součástí souboru pravidel bezpečnosti práce a hygieny prostředí, platící i pro školní prostředí. K základním požadavkům patří teplota, dostatečná velikost místnosti na daný počet žáků, světelné podmínky, či obměna a přísun čerstvého vzduchu. Veškeré podmínky lze najít ve vyhlášce č. 410/2005 Sb. „o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých“ [21].

### ***Průběh měření***

Po třídě byla rovnoměrně rozmístěna jednotlivá, digitální čidla typu DS18B20. Následně přístroj odečítal v pravidelném intervalu jedné minuty naměřené hodnoty z čidel a ukládal je do PC. Před zahájením výuky byla zavřena všechna okna a teplota v místnosti se nechala stabilizovat. Poté, co přišli žáci do třídy, se spustilo měření po dobu jedné vyučovací hodiny (8:00 – 8:45). Pokusu se celkem zúčastnilo 25 žáků. Venkovní teplota se pohybovala kolem 21 °C, polojasno. Okna místnosti směřovala na jih, dále během měření občas vycházelo slunce, což je patrné z výsledného grafu. Rozměry místnosti a rozložení čidel jsou zakresleny podle obrázku 33.





Obr. 34: Graf změřené teploty

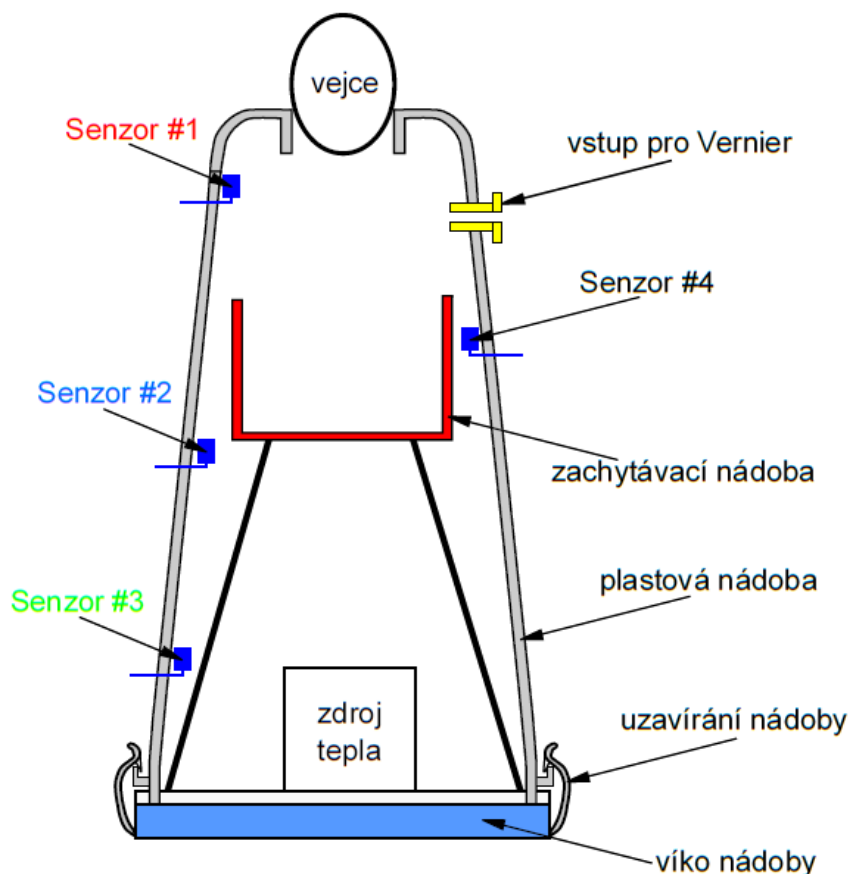
Z analýzy výsledku se zjistilo, že během jedné vyučovací hodiny došlo k nárůstu teploty ve třídě při zavřených oknech o více než 2 °C. Na výsledné hodnoty měla největší vliv poloha jednotlivého čidla, počet žáků v místnosti a občasný svit slunce. Po otevření okna se teplota v místnosti postupně sjednocovala, což je z grafu patrné.

### 2.3.2 Jak dostat vejce do láhve

Dostat vejce do láhve se řadí do kapitoly tlaková síla, tlak, podtlak. U pokusu se zkoumá, zda je možné dostat uvařené, oloupané vejce do láhve, i když průměr hrdla je menší, než průměr samotného vajíčka. Ještě dnes lze najít více vysvětlení, popisující celkový fyzikální průběh a podstatu experimentu [22]. Lze tak nalézt i vysvětlení, přes proces chemické přeměny kyslíku na oxid uhličitý při hoření papíru, umístěného ve skleněné láhvi. Během hoření (chemické oxidace) by měl uvnitř nádoby vzniknout podtlak, který vejce nasaje do láhve. Pro komplexní ověření pokusu, byl po celou dobu měřen vnitřní tlak a teplota ve zkušební nádobě. K měření tlaku se využil snímač z laboratorní sestavy Vernier.

#### ***Výroba aparatury:***

Do prostoru plastové nádoby, s hermetickým uzavíráním, byly postupně usazeny čtyři snímače teploty DS18B20. Celkové rozmístění čidel a uzavíratelného vstupu (pro tlakový senzor Vernier) v nádobě je podle obrázku 35.



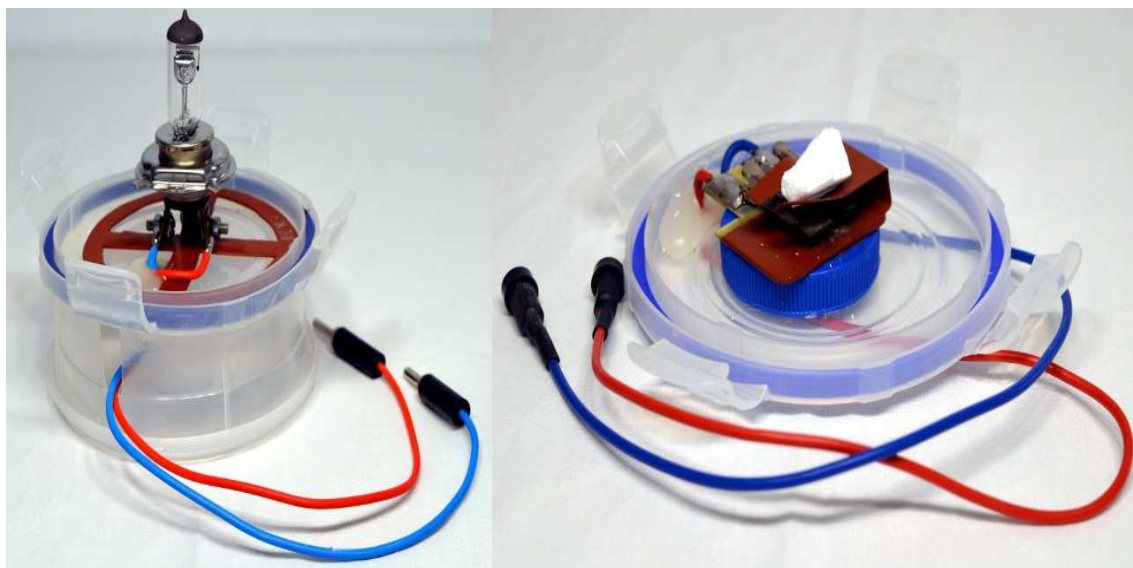
**Obr. 35:** Schéma testovací nádoby

Do testovací nádoby se vkládá kovová zachytávací nádoba, chrání horní plastové části před roztavením a zároveň zabrání vajíčku dopadnout na zdroj tepla. U částí zařízení (kabely, senzory atd.) procházející stěnou testovací nádoby bylo nutné zajistit, maximální těsnost mezi vnitřním prostorem a okolím. Proto byla jednotlivá průchozí místa zalepena vteřinovým lepidlem a následně byla nanesena vrstva tavného lepidla. Nutnost důsledně utěsnit nádobu se projevila již u prvního testování, kdy přes průchod pro kabely došlo k nasávání vzduchu z okolí, což měření výrazně ovlivnilo.

Celý pokus proveden s dvěma různými zdroji tepla. K ohřevu vnitřního prostoru testovací nádoby se využíval elektrický ovládaný zápalník a halogenová autožárovka.

Elektrický zápalník umožnil přesné načasování experimentu, kdy bylo možné aparaturu celkově sestavit, a následně v ní elektricky zapálit pevný líh. Zápalník se skládá ze dvou krokosvorek, stojánku na pevný líh, odporového drátu a sirky. Po připojení zápalníku k ploché 4,5V baterii, prochází odporovým drátem elektrický proud. Drát se následně rozžhaví a přes sirku zapálí pevný líh. Postupným testováním se zjistilo, že k spolehlivému zapálení dochází nejnázne u pevného podpalovače na bázi benzínu.

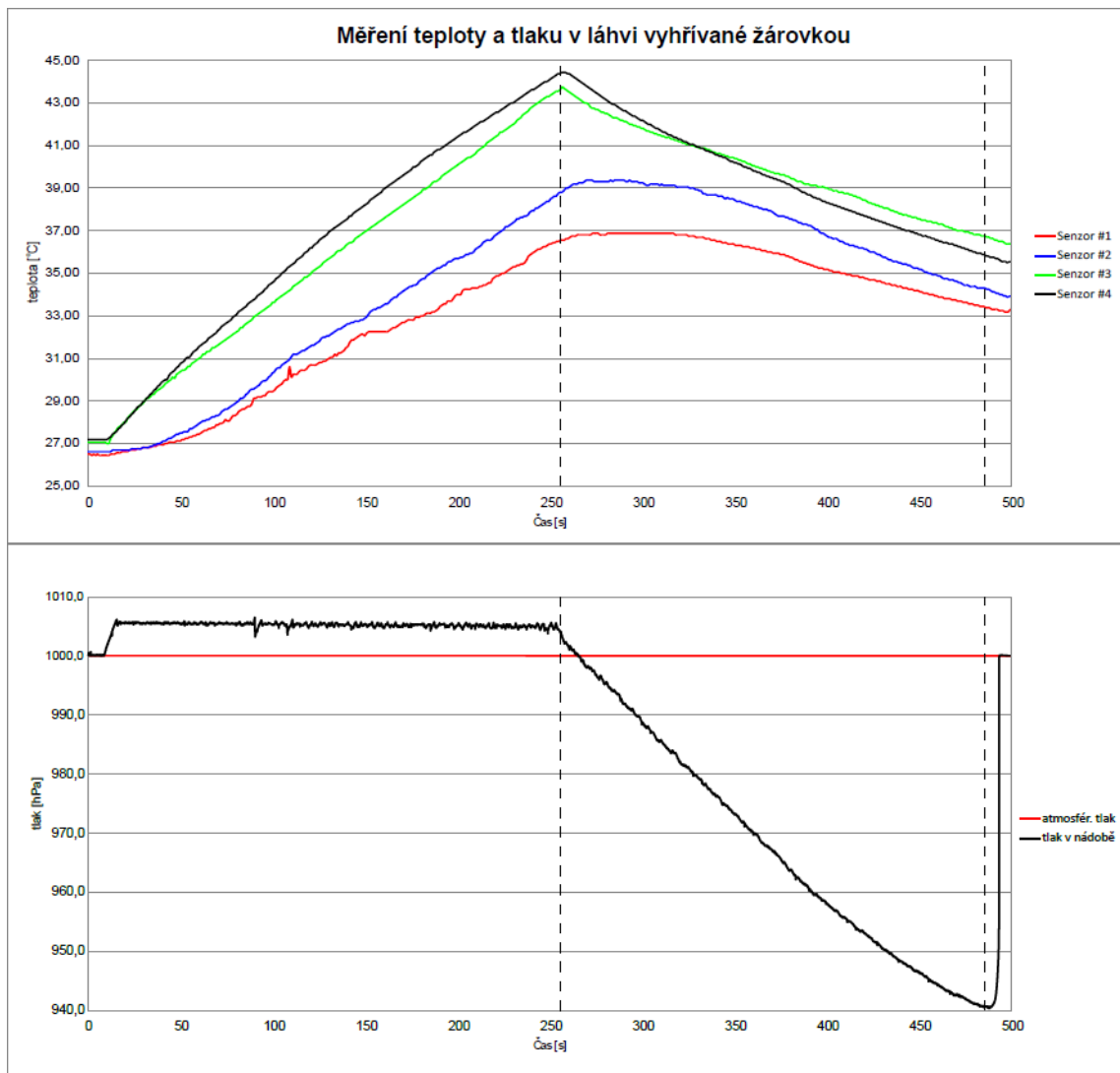
Vytápění za pomoci halogenové 55W auto-žárovky mělo ověřit, zda je možné pokus zopakovat bez hoření papíru. Po kompletním složení aparatury se žárovka připojí na klasickou autobaterii. Ohřev vnitřku nádoby žárovkou je oproti plamenu pomalejší, dochází pak k výraznějšímu světelnému vyzařování tepla. Aby nedošlo k protavení plastové stěny testovací nádoby žárovkou, byla celá vnitřní strana polepená hliníkovou lepicí páskou. Vyzařované světlo bylo následně odráženo zpět, čímž se rychleji ohříval vzduch v nádobě.



**Obr. 36:** Elektrický a plamenový způsob vytápění

### ***Průběh měření: Žárovkou ohřívaná nádoba***

Celková doba experimentu byla zvolena na 500 sekund. V grafu v prvních 20 sekundách je zaznamenán tlak a teplota v nádobě po nasazení vajíčka na hrdlo testovací nádoby. Poté, co byla auto-žárovka připojena k baterii, se postupně zvyšovala teplota a tlak. Z grafu tlaku v nádobě je patrné, že při překročení mezní hodnoty docházelo k nadzvednutí vejce, což se projevilo snížením tlaku.

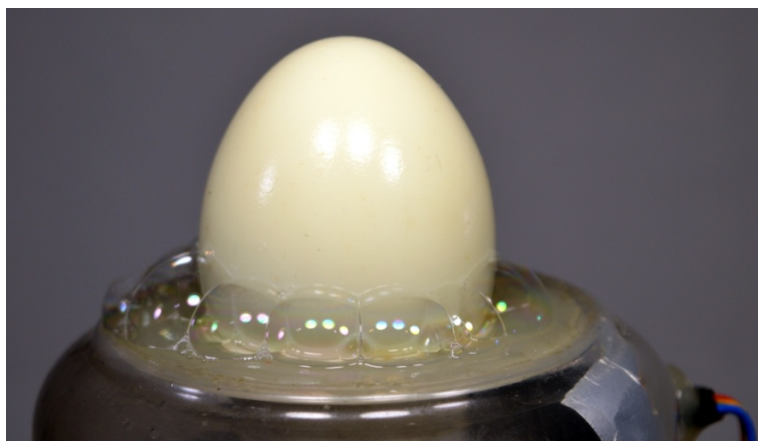


**Obr. 37:** Graf elektrického ohřevu nádoby

V čase 260 sekund byla žárovka odpojena od zdroje. Teplota v testovací nádobě se postupně snižovala. Při ochlazování se tlak velmi rychle snížil, až do okamžiku, kdy došlo k nasátí vajíčka do láhve (480 sekund). Poté se tlak rychle vrátil na počáteční hodnoty atmosférického tlaku.

Proces úniku vzduchu z nádoby při nadzvednutí vejce byl opticky zviditelněn mýdlovým saponátem aplikovaným na hrdlo plastové nádoby (obr. 38).

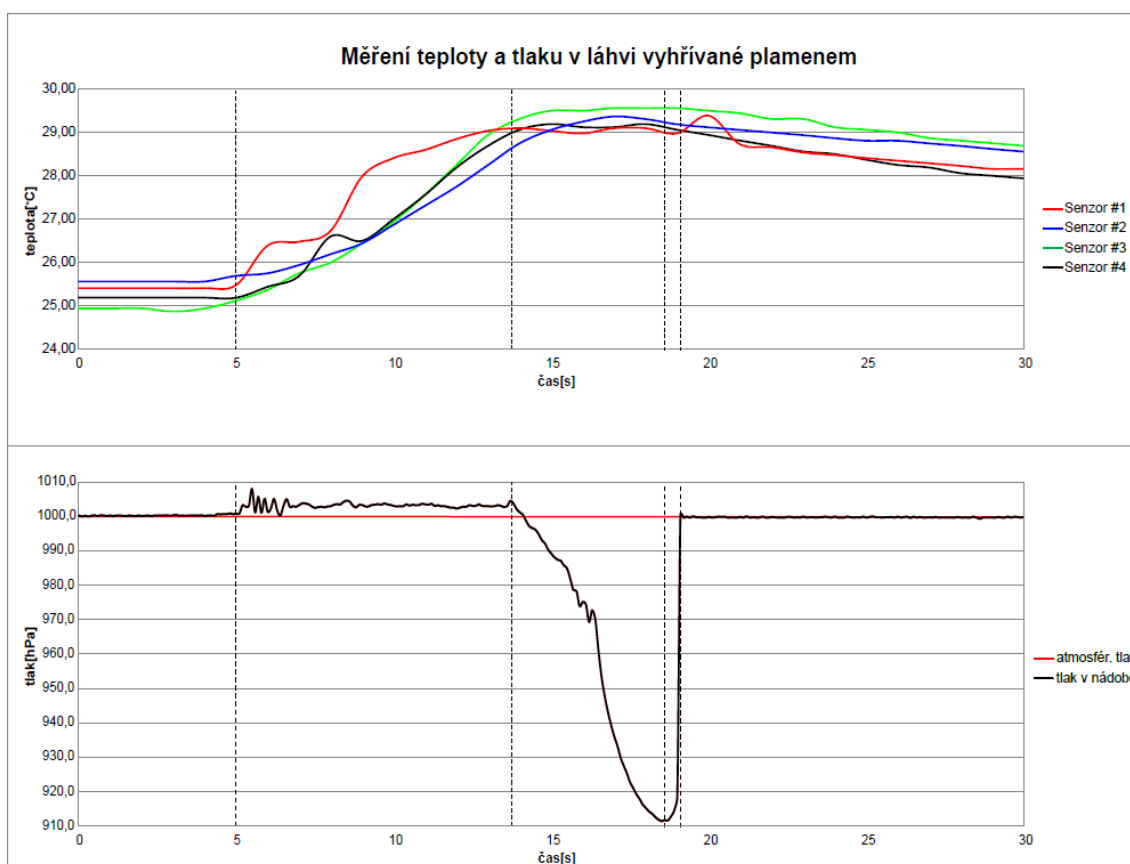




**Obr. 38:** Únik vzduchu z nádoby

***Průběh měření: Plamenem ohříváná nádoba***

Průběh experimentu přibližně odpovídá elektrickému ohřevu. Největší rozdíl nastává v době trvání a v rychlosti změn teploty a tlaku. V úseku 5 až 7 sekundy je viditelné kolísání tlaku, způsobené postupným zapalováním pevného lihu a jeho následným hořením. V čase 14 sekundy přestává líh hořet. Díky rychlému zvýšení teploty vzduchu v nádobě je vzniklý podtlak větší, než u elektrického ohřevu. Tento efekt je také způsoben tím, že při elektrickém ohřevu se výrazně ohřívá i samotná testovací láhev.



**Obr. 39:** Graf plamenového ohřevu nádoby

Výsledek pokusu potvrdil, že na průběh experimentu nemá vliv typ ohřívání (plamen, žárovka), ale záleží na rychlosti změny teploty vzduchu v nádobě. Ohřátý vzduch se následně rozpíná, čímž nadzvedává vajíčko umístěné na hrdle nádoby. Poté, co zdroj přestane ohřívát vzduch v nádobě, vzniká podtlak schopný nasátí vejce do láhve.

Ohříváním žárovkou (stálější průběh tlaku) je také přibližně možné změřit hmotnost vajíčka. Hmotnost získáme za předpokladu, že známe celkovou plochu vstupního hrdla a z grafu vyčteme rozdíl mezi atmosférickým tlakem (na začátku měření) a mezním tlakem (vejce nadskakovalo). Z těchto hodnot vypočteme hmotnost podle rovnice 1, kde  $m_v$  je celková hmotnost vejce,  $S_h$  plocha vstupního hrdla,  $g$  velikost tíhového zrychlení ( $9,81 \text{ ms}^{-1}$ ),  $p_{\text{atm}}$  velikost atmosférického tlaku a  $p_m$  je mezní tlak.

$$m_v = \frac{S_h(p_m - p_{\text{atm}})}{g} \quad (9)$$

#### *Příklad výpočtu hmotnosti vejce*

Pomocí posuvného měřítka byl změřen průřez hrdla 3,3 cm, ze kterého byla vypočtena celková plocha  $S$  8,55 cm<sup>2</sup>. Tlak na začátku měření byl 1000,13 hPa. Naopak tlak (vyčteno z grafu), kdy docházelo k nadzvednutí vejce, byl 1005,72 hPa. Z těchto hodnot je následně možné vypočítat přibližnou hmotnost vejce po dosazení do rovnice.

$$d = 3,3 \text{ cm}$$

$$r = 1,65 \text{ cm}$$

$$S_h = 8,55 \text{ cm}^2 = 0,000855 \text{ m}^2$$

$$p_{\text{atm}} = 1000,13 \text{ hPa} = 100013 \text{ Pa}$$

$$p_m = 1005,72 \text{ hPa} = 100572 \text{ Pa}$$

$$m_v = \frac{S_h \cdot (p_m - p_{\text{atm}})}{g}$$

$$m_v = \frac{0,000855 \cdot (100572 - 100013)}{9,81}$$

$$m_v = 0,04872 \text{ kg} = \mathbf{48,72 \text{ g}}$$



**Obr. 40:** Ohřívání nádoby žárovkou

### 2.3.3 Vypařování těkavých látek

Vypařování je součástí učiva v osmé třídě v kapitole skupenské přeměny. Mezi podmínky určující rychlost vypařování patří druh, teplota a celková plocha kapaliny. Dále tak teplota a proudění prostředí, v jaké se látka nachází. Jak již bylo zmíněno, druh kapaliny (těkavá x netěkavá), také rychlost vypařování ovlivňuje. Proto byl vytvořen pokus, umožňující testovat vypařování vícero látek ve stejném čase. Výsledkem měření je získání grafu o době potřebné pro vypaření daného množství látky a průběhu teploty odpařované kapaliny v testovací formě [23].

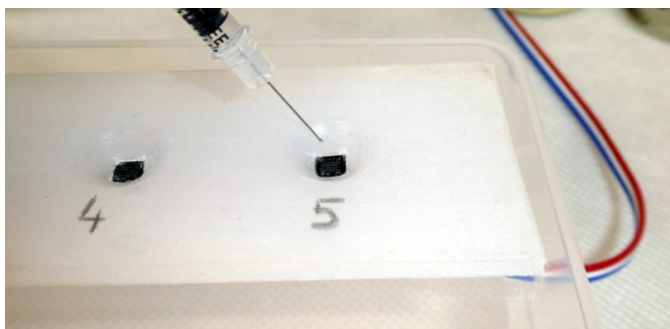
#### *Výroba aparatury:*

Aparatura se skládá z plastové destičky vyrobené z polypropylénu (dále PP), odolnému proti použitým rozpouštědlům. U první sady, původně vyrobené z polystyrénu, došlo k rozpuštění testovací desky nitro-ředidlem. Na této testovací destičce jsou v řadě přesně vyvrtané důlky pro aplikaci pozorované látky. Na dně každého důlku jsou čtvercové otvory k následnému usazení teplotních čidel typu DS18B20. Na obrázku 39 je zobrazena hotová sestava s uloženými čidly.



**Obr. 41:** Celková aparatura vypařování

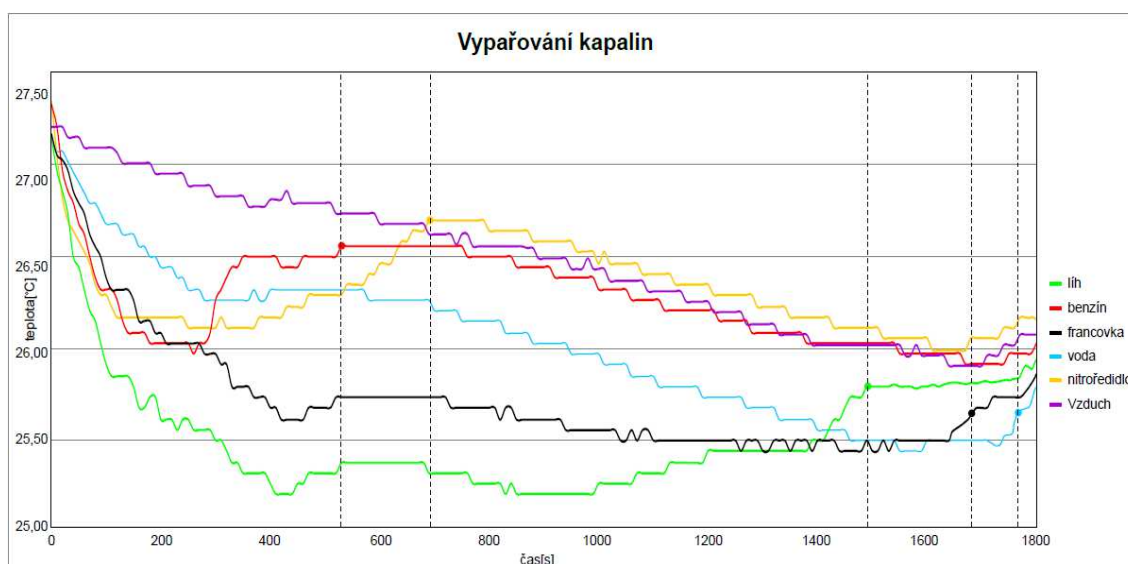
**Senzor #6** měří okolní teplotu prostředí při vypařování látek. Celá spodní strana PP destičky je uložena v plastové krabičce, aby nedocházelo k ovlivnění měření (prouděním vzduchu z prostředí). Dávkování kapaliny se provádí pomocí inzulínových injekčních stříkaček. Do jednotlivé testovací jamky se aplikuje vždy 0,05 ml zkoumané látky. Data z jednotlivých čidel jsou následně posílána po sběrnici do měřicího bloku a následně uložena na paměťové médium.



**Obr. 42:** Aplikace látky na teplotní senzor

### **Průběh měření:**

Ze získaného grafu je možné získat nejen informace o vypařovacím čase kapaliny, ale i o kolik se teplotní čidlo při vypařování ochladí. Mezi pozorované kapaliny patřil technický líh, Francovka, voda, Nitroředidlo C6000 a technický benzín.



**Obr. 43:** Graf vypařování testovaných látek

Z grafu je patrné, že nejrychleji se vypařil technický benzín, a to za dobu 532 sekund. Po této době byla měřena již teplota prostředí, přibližně odpovídající kontrolnímu senzoru (fialová čára). V tabulce 2 jsou zaznamenány časy, kdy došlo k vypaření jednotlivých kapalin. Zajímavostí v grafu je přibližně stejný průběh teplotních křivek u čistého technického lihu a Francovky (podle výrobce 40% alkohol).

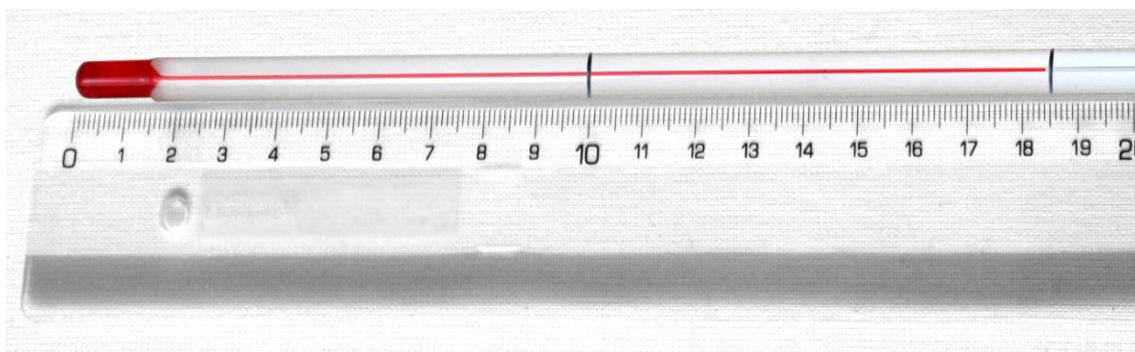
Senzor	Barva	Látka	Čas[s]
Senzor #1	zelená	Líh	1462
Senzor #2	červená	Benzín	532
Senzor #3	černá	Francovka	1634
Senzor #4	modrá	Voda	1725
Senzor #5	žlutá	Nitroředidlo	678
Senzor #6	fialová	Vzduch	X

**Tab. 2:** Záznam teploty na neoznačenou kapiláru

### 2.3.4 Měření teploty nepopsaným teploměrem

Původní návrh úlohy byl již použit na Archimediádě za rok 2016/2017. Autorem experimentu je Mgr. Vladimír Vochozka, Ph.D., který pro účely této diplomové práce poskytl hlavní myšlenku.

V převzaté úloze mají žáci za úkol změřit teplotu za pomoci skleněného trubicového teploměru bez vložené teplotní stupnice. K vyřešení zadání je zapotřebí zvolit vhodné, referenční body, se kterými by bylo možné, na neoznačenou kapiláru (obrázek 41) rozkreslit teplotní stupnici. Takto vytvořeným teploměrem bylo již možné změřit požadovanou teplotu v místnosti a neznámé kapaliny. Podle použitých pomůcek na pracovním stole by žáci měli dojít ke konečnému řešení a to za použití historické definice Celsiovy stupnice.



**Obr. 44:** Záznam teploty na neoznačenou kapiláru

Jak bylo zmíněno v teoretické části, je Celsiova stupnice určena bodem tání a varu vody za normálního atmosférického tlaku. K určení bodu tání (tj.  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se využívá rovnovážného stavu chemicky čisté vody ledu a páry. Tuto směs je nezbytné uchovávat v dobře izolované nádobě, aby si dlouhodobě udržela teplotu. Jako vhodná nádoba byla při tomto pokusu zvolena nerezová termoska.

Na udržení teploty vody na bodu varu (tj.  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se v originální úloze používá kalorimetr s topnou spirálou. Kalorimetr obsahuje dvě navzájem izolované hliníkové kádinky a dobře izolované víko s gumovým uzávěrem. Ve víku se nacházejí průchody pro teploměr a topnou spirálu. Teplota vody v kalorimetru se udržuje připojením topné spirály na zdroj napětí, dokud nedosáhne požadované hodnoty. Dlouhodobé udržení a řízení teploty na  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  je důležitou podmínkou pro získání druhého referenčního bodu.



Úloha byla upravena s tím, že vyrobený přístroj RCK-25 úplně nahradí manuální řízení topné spirály za automatické. Dále tak triaková regulace střídavého napětí (230 V) umožňuje nahradit drahý kalorimetr za klasickou rychlovarnou konvici. Voda v řízené konvici se přes regulátor, udrží na žádané hodnotě 100 °C.

### ***Příprava aparatury***

Propojení zařízení je realizováno kabelovou redukcí (Eurokonektor/zásuvka), přes kterou se rychlovarná konvice připojí na řízený výstup RCK-25. Před zahájením měření se v přístroji nastavuje konkrétní řídicí čidlo, teplota na 100 °C a celkový čas regulace. Regulační řídicí senzor se následně umístí do držáku a vloží se do rychlovarné konvice. Usazené čidlo musí být ponořeno ve vodě. Po aktivaci regulátor postupně zvyšuje teplotu, dokud nedosáhne nastavené teploty. Poté je již možné měření zahájit.

### ***Průběh měření:***

Získání 0°C referenční teploty se získá ponořením neoznačené kapiláry do termosky s vodou a ledem. Voda i led musí být z chemicky čisté destilované vody, a směs musí být vzájemné termodynamické rovnováze. Po vložení neoznačené kapiláry do lázně dojde za určitý čas k rovnovážnému stavu. Na skleněný obal kapiláry se fixem označí výška lihového sloupce přibližně odpovídající 0 °C. Při řešení úlohy je nutné klást důraz na přesnost při zaznamenávání jednotlivých hladin lihového sloupce. Princip získávání referenčních bodů je možný podle obrázku 45.



**Obr. 45:** Měření teploty tání a varu vody

Druhý referenční bod se získává podobně jako u 0 °C. Kapilára se vkládá do řízené rychlovarné konvice s destilovanou vodou a vyčkává se, dokud hladina lihového sloupce nepřestane stoupat. Poté se kapiláře označí nejvyšší dosažená teplota lihovým fixem. Získávání 100°C teploty obnáší riziko popálení horkou vodou a párou. Proto je důležité důsledně dohlédnout na práci žáků při manipulaci s konvicí.



**Obr. 46:** Celková sestava zařízení pro teploměr

Vzdálenost jednotlivých bodů na kapiláře při 0 °C a 100 °C se rozdělí na sto dílků. Takto vytvořeným teploměrem je již možné měřit teplotu místnosti, či jiné kapaliny. Výhodou přístroje RCK-25 je možnost připojení další rychlovarné konvice na druhý regulační výstup. V druhé konvici by se tak mohla nacházet kapalina s jinou nastavenou teplotou při regulaci.

## 2.4 Využití přístroje ve výzkumné laboratoři

Dalším odvětvím, ve kterém finální zařízení nalezlo uplatnění, bylo využití ve výzkumu v laboratoři při studiu polymerních plastů na Ústavu materiálového inženýrství fakulty strojní na ČVUT. Výsledná kompletní sestava bude tak vytvářet ideální podmínky k výrobě a testování vzorků z granulovaného termoplastu.

### 2.4.1 Měření a regulace teploty v peci

Připojená pec, od firmy BOSCH typu HBG633TS1, byla kompletně přestavěna tak, aby veškeré funkce mohlo převzít zařízení RCK-25. Na obr. 47 je celková sestava řízení a regulace pečící pece.

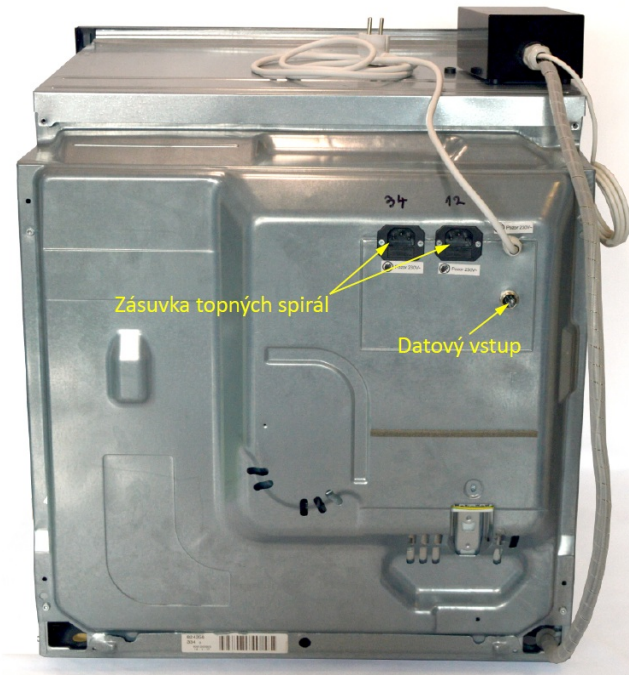


**Obr. 47:** Celková sestava pece a zařízení

Pec obsahuje čtyři odporové topné spirály na síťové napětí 230 V. Jmenovitý výkon jednotlivých spirál je 2x 1300 W, 1600 W a 2300 W. Napájení spirál je realizováno dvěma kabely s EURO-konektory. Kabely se jednotlivě zapojují do EURO-zásuvek (Topení #1, Topení #2) ze zadní strany přístroje a pece (viz obr. 48). Na zadní straně pece se nachází konektor k datovému spojení pece a přístroje RCK-25. Po sériové lince

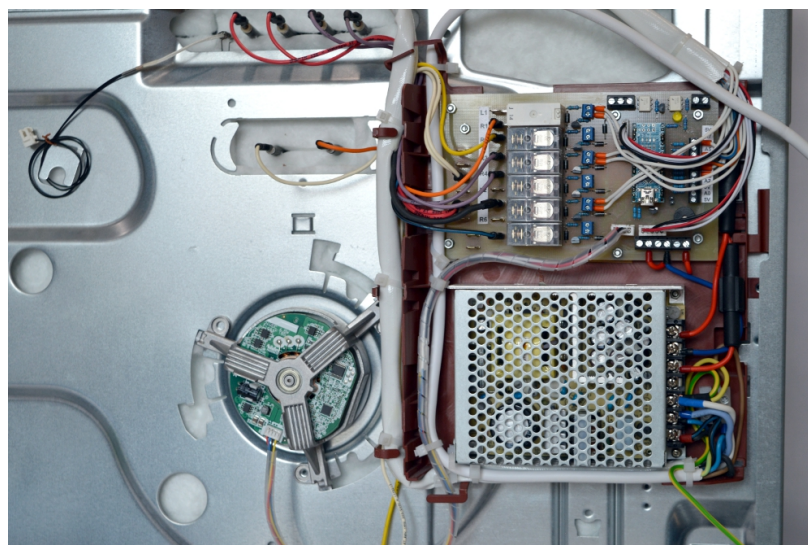


se odesílají pokyny pro řídicí elektroniku pece. Před použitím pece je nutné zkontrolovat, zda jsou datové a napájecí kabely zapojeny. V peci se také nachází osvětlení vnitřního prostoru (žárovka 230V) a dva ventilátory na 24 V stejnosměrných.



**Obr. 48:** Celková sestava pece (zadní pohled)

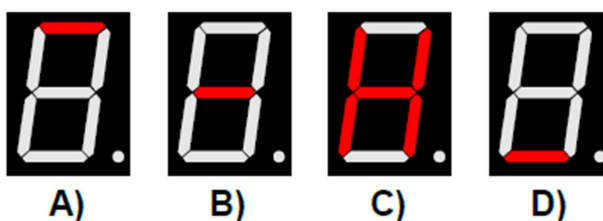
Původní elektronika byla nahrazena novou ovládací deskou, která zajišťuje veškeré funkce pece včetně akustického hlídání otevření dveří přepínání a spínání spirál, osvětlení a řízení stejnosměrných motorů. Ovládání osvětlení vnitřního prostoru je možné aktivovat tlačítkem na čelní straně pece. Nad tlačítkem světla se nachází dodatečná červená LED dioda, ta ověřuje správnost funkce. Druhá LED dioda opticky upozorní na otevření dveří během regulace teploty.



**Obr. 49:** Pohled na novou řídicí elektroniku pece

Komunikace ovládací jednotky s řídicím blokem je realizována po UART sériové komunikaci, paralelně zapojené k měřicímu bloku. Aktivace jednotlivých topných spirál se provádí na dotykovém displeji v menu nastavení topných spirál. Pokud se zapne funkce horkovzduchu je nezbytný ventilátor aktivován automaticky. Stav aktuálně nastavených spirál se pro kontrolu zobrazuje na sedmissegmentovém displeji na čelní straně pece (obr. 50).

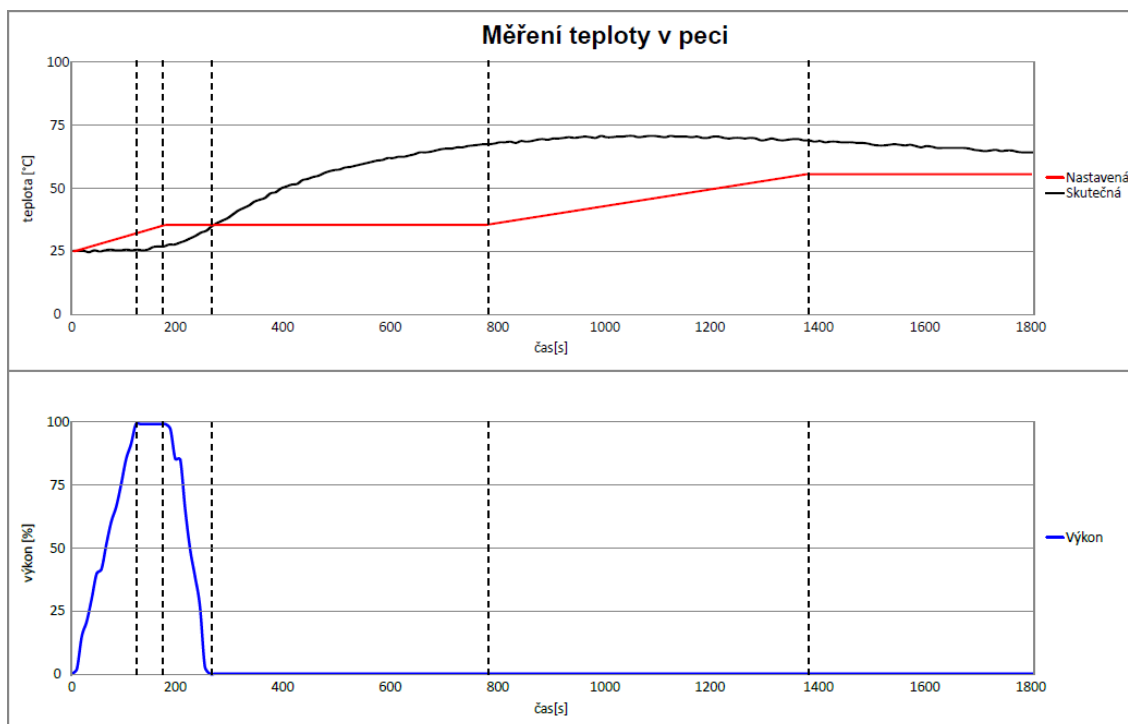
Pozice	Zkratka	A	B	C	D
Horní spirála vnější 1300 [W]	A	✓			✓
Horní spirála vnitřní 1600 [W]	B		✓		✓
Horkovzduch 2300 [W]	C			✓	
Dolní spirála 1300 [W]	D	✓			✓
			✓		



Obr. 50: Povolené kombinace spirál a zobrazení úrovní na sedmissegmentovém displeji

#### 2.4.2 Nastavení regulátoru:

Během testování kompletní sestavy se negativně projevovaly nežádoucí účinky tepelné setrvačnosti systému. S rychlým nárůstem teploty docházelo tak k překračování požadované teploty. K potlačení výsledné odchylky bylo nutné najít a nastavit správné konstanty PID regulátoru. Tato skutečnost přesně odpovídá studiím, které uvádějí, že až 70 % problémů s regulací způsobuje špatné nastavení regulačních konstant. Postupným praktickým testováním docházelo k snižování odchylky mezi skutečnou a nastavenou teplotou. Na obrázku 51 je zobrazen příklad z praktického měření, když nebyly PID konstanty správně nastaveny. Z grafu je patrné, že regulátor při spuštění pomalu zvyšoval výkon topných spirál do doby, než byl výstup zcela otevřen. Pomalé najíždění regulátoru na plné otevření společně se setrvačností způsobil velký rozdíl mezi hodnotou nastavenou a hodnotou skutečnou. Tu se regulátor snažil co nejrychleji (v nejkratším čase) odstranit. Po dosažení žádané hodnoty se naopak projevila kladná setrvačnost systému, kde i při vypnutí spirál došlo překročení teploty.



**Obr. 51:** Příklad špatného nastavení PID konstant

Po dlouhotrvajícím pokusném testování se podařilo závadu omezit kombinovaným použitím regulátoru a dodatečných funkcí v programu. Funkce pracují tak, že v závislosti na velikosti odchylky lineárně přepínají regulační konstanty. Pokud nastane situace, že odchylka od požadované hodnoty je větší, než 15 °C, zasahuje regulátor do systému agresivněji.

### 2.4.3 Horkovzduch

Po nastavení regulátoru bylo prováděno testovací měření. Funkce horkovzdušného vyhřívání spočívá, ve spínání topné spirály o výkonu 2300 W. Spirála se nachází společně s kovovou vrtulí ventilátoru za ochranou mřížkou. Ventilátor smíchává vzduch v prostoru pece, čímž zajišťuje rovnoměrné rozložení teploty v peci.

První spuštění funkce horkovzdušného vyhřívání nemělo při testování problémy s regulací teploty, ale s ovládáním motoru ventilátoru. Proudění vzduchu v daném typu pece zajišťuje bezkartáčový stejnosměrný motor BLDC (Brushless DC) na 24 V. Motory tohoto typu vyžadují specifický řídicí signál. Ten byl nakonec získán z původního zapojení digitálním osciloskopem. Ze získaného signálu byla, zjištěna frekvence i střída potřebná k řízení motoru. Signál byl posléze nasimulován přes Arduino, uloženého v nové ovládací desce pece.

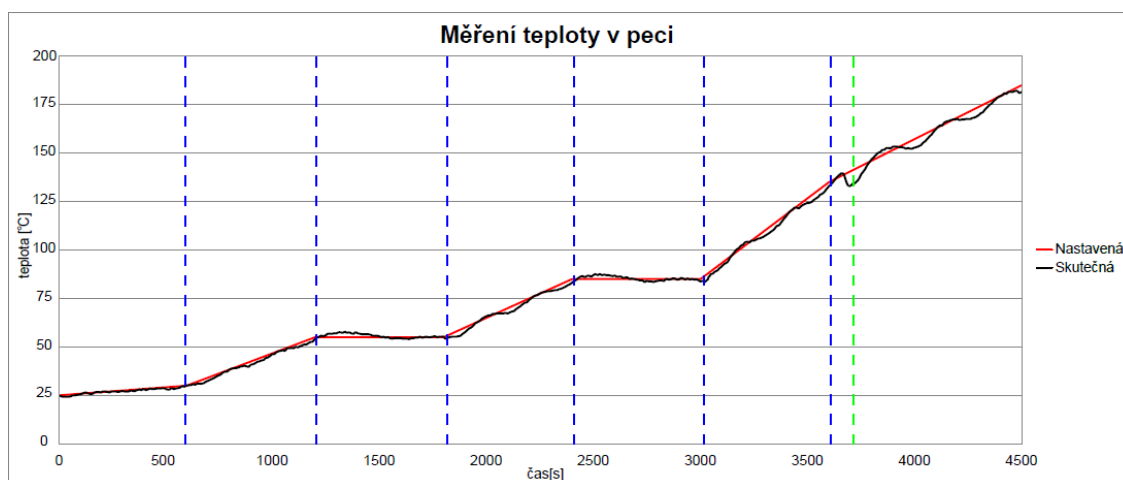
### Příklad měření: Horkovzduch

K úplnému otestování funkce horkovzdušného vyhřívání byl zvolen příkladový průběh požadované teploty v čase. Teplota v peci musela obsahovat časové úseky s konstantní teplotou, aby se prověřilo, zda je regulátor schopen ji udržet. Dále tak úseky s rozdílným sklonem náběhu ideální křivky. Tabulka číslo 3 obsahuje veškeré zlomové body funkce požadované teploty v závislosti na čase.

Regulační krok	Počáteční teplota [°C]	Konečná teplota [°C]	Čas [min]
1	25	35	10
2	35	55	10
3	55	55	10
4	55	85	10
5	85	85	10
6	85	135	10
7	135	185	15

Tab. 3: Naprogramovaný průběh teploty

Z grafu je patrné, že rovnoměrným vyhříváním prostoru pece naměřená teplota přibližně odpovídala požadované hodnotě. Regulace teploty byla nastavena tak, že za stejné časové úseky (po 10 minutách) schodovitě rostla teplota v peci.



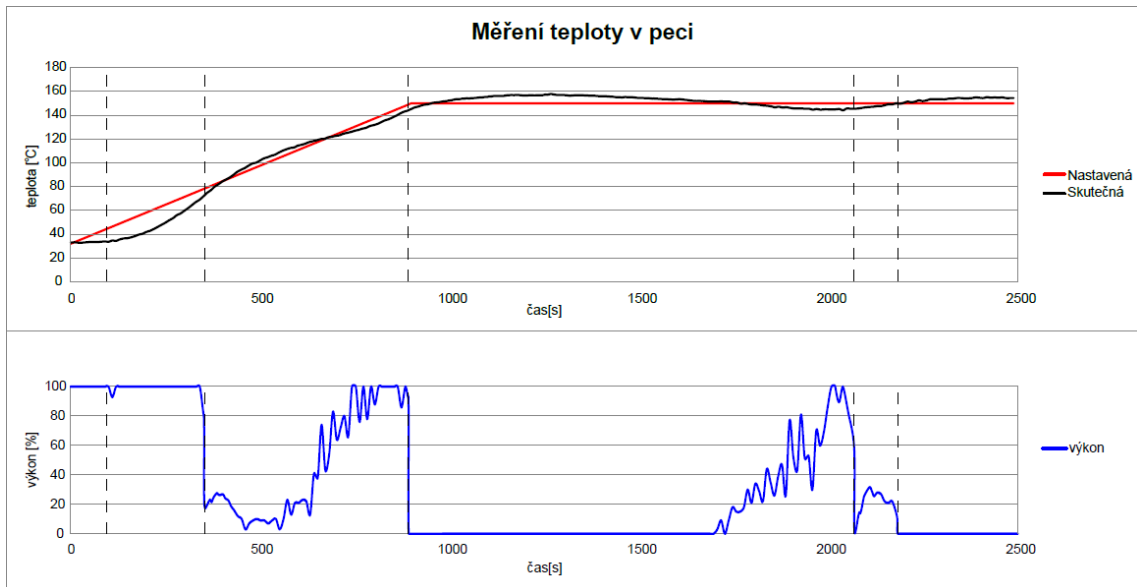
Obr. 52: Regulace teploty horkovzduchem

Při rostoucí teplotě se nastavoval i rozdílný směr sklonu přímky, aby se ověřila reakce regulátoru na změnu. V posledním úseku (přibližně 3700 sekunda) byly otevřeny dveře pece (zelená čára). Regulátor se snažil odstranit vzniklou chybu a po zavření dveří se vrátit na původní regulační křivku (červená čára).

Kvůli plánovanému využití pece pro tavení práškového termoplastu lze předpokládat, že funkce horkovzduch bude využívána minimálně.

#### 2.4.4 Příklad měření: topné spirály

Vyhřívání prostoru pece topnými spirálami se ukázalo jako obtížně regulované. Na rozdíl od horkovzdušného ohřevu nedochází k rovnoměrnému prohřívání pece. Během testování se potvrdilo, že při nízkém výkonu, když regulátor začne omezovat spirály, dochází k pomalému ohřívání plechů. Naakumulované teplo je špatně detekovatelné teplotními senzory, což má za následek pomalý nárůst teploty. V grafu (obrázek 53) je příklad regulace teploty v peci, po vyladění PID konstant a aplikace dílčích funkcí.



**Obr. 53:** Regulace teploty topných spirál

Z grafu je patrné, že k snížení časového zpoždění je prvních 90 sekundách napevno nastaven výkon na 100 %. Poté do řízení již samostatně zasahuje regulátor s dodatečnými úpravami. V okamžiku, kdy regulátor začíná postupně omezovat výkon spirál, nastává skokové nastavení výstupů na nulu. Tím se eliminuje setrvačnost systému. Teprve v okamžiku, kdy regulátor opětovně začne otevírat, se dodatečná funkce vypne. Při regulaci došlo k překročení teploty o 8 °C. Následně se odchylka snížila a teplota se již pohybovala okolo nastavené hodnoty.

## Závěr

Výsledkem diplomové práce bylo úspěšné navržení a postavení spolehlivé jednotky pro měření a regulaci teploty pro školní účely. Sestava byla realizována na otevřené platformě Arduino, která se ukázala jako dobrým kompromisem mezi pořizovací cenou a výkonem.

Před samotnou realizací byla nastudována odborná literatura, rozšiřující vědomosti o řízení a komunikaci elektronické platformy Arduino s externími přístroji, přes různé druhy sériové komunikace. Následně bylo nutné nastudovat i celkovou technologii používání dotykových TFT display-ů řady NEXTION, pro které byl navrhnut a realizován vlastní design a způsob ovládání.

Nejnáročnějším úkolem při programování zdrojového kódu bylo nalezení optimální metody ovládání triakových výkonových prvků a zároveň vyřešení bezpečného způsobu ukládání a přenosu naměřených dat na paměťová media. Tyto problémy zapříčinily výrazné zpoždění testování přístroje.

Po komplexním otestování byla navržena výběrová sada experimentů ze školního prostředí pro ověření funkčnosti a použitelnosti přístroje. Navrhnuté školní experimenty naznačují jedny z mnoha možností využití přístroje ve školní praxi. Přístroj je vhodné využít pro studium mnoha termodynamických jevů, například pro úlohy na tepelnou vodivost, na skupenské přeměny látky, či s kombinací s regulátorem ovládat průběh teploty rychlovarné konvice. V úloze, kde dochází k měření teploty za pomoci neoznačeného teploměru, tak zařízení dokázalo plně nahradit kalorimetr a udržet vodu v nádobě na požadované teplotě. Použití přístroje RCK-25, v kombinaci se sestavou Vernier, umožnilo podrobně popsat průběh teploty a tlaku při nejčastěji prováděném školním experimentu.

Při samotném testování se následně ukázala i možnost použití přístroje pro laboratorní účely. Z toho důvodu byla nakonec vytvořena kopie zařízení a její následná, specifická aplikace pro řízení pece. Ta je v současné době používána na fakultě strojní na pražském Ústavu materiálového inženýrství fakulty strojní na ČVUT.

## Literatura

- [1] Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: [http://www.nuv.cz/uploads/RVP\\_ZV\\_2016.pdf](http://www.nuv.cz/uploads/RVP_ZV_2016.pdf)
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: Vutium a Prometheus, 2006. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] LUFINKA, Aleš. Snímače pro měření teploty [online]. In: . [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: [http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p%2010\\_snimace\\_teploty.pdf](http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p%2010_snimace_teploty.pdf)
- [4] Termočláňkové snímače teploty. Günther GmbH [online]. 2016 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/805a74a9-7235-cdf2-2323-717e02f019e4>
- [5] Thermal Management Handbook [online]. 2014 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN4679.pdf>
- [6] HYRŠ, Jan. Měření teploty termočláňky [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/11989/2012\\_BP\\_Hyrs\\_Jan\\_126057\\_Mereni\\_teploty\\_termoclanky.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/11989/2012_BP_Hyrs_Jan_126057_Mereni_teploty_termoclanky.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Kamil Podaný
- [7] MAX6675. Maxim Integrated [online]. 2014 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>
- [8] DS18B20. Maxim Integrated [online]. 2018 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [9] VERBERNE, Erik. Arduino documentation [online]. 2014 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://vctec.co.kr/web/product/BAE/img/Arduinodocumentation.pdf>
- [10] Co je to Arduino. Czechduino.cz [online]. 2012 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://czechduino.cz/?co-je-to-arduino,29>

- [11] AIDAN. Our Arduino SPI Tutorial. Core-Electronics [online]. 2018, 08. 11. 2018 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://core-electronics.com.au/tutorials/spi-arduino-tutorial.html>
- [12] VODA, Zbyšek. Propojujeme Arduino s jinými zařízeními. Arduino.cz [online]. 2015 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://arduino.cz/propojujeme-arduino-s-jinym-i-zarizenimi/>
- [13] Dallas Semiconductor's 1-Wire Protocol. Arduino [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://playground.arduino.cc/Learning/OneWire/>
- [14] OLMR, Vít. HW server představuje - Sériová linka RS-232. HW server s.r.o. [online]. Praha, 2005, 12. 12. 2005 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/rozhrani/hw-server-predstavuje-seriova-linka-rs-232.html>
- [15] STMICROELECTRONICS. Positive voltage regulator ICs [online]. 2014 [cit. 2015-06-30]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.330-149.1.pdf>
- [16] BENTLEY BORN. Nextion. GitHub Inc. [online]. 2016 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://github.com/bborncr/nextion/tree/master/examples/>
- [17] DIY\_BLOKE. Arduino Controlled Light Dimmer. Instructables [online]. 2018 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Arduino-controlled-light-dimmer-The-circuit/>
- [18] BEAUREGARD, Brett. Arduino PID Library. Arduino [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary/>
- [19] Základy teorie ON/OFF a PID regulace. Dixell CZ [online]. 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>
- [20] SCHLEGEL, Miloš. Průmyslové PID regulátory: Teorie pro praxi. In: Sborník přednášek konference pořádané v rámci doprovodného programu veletrhu Pragoregula 2001 [online]. Praha, 2001, s. 3-26 [cit. 2019-04-02]. ISBN 8090213162. Dostupné z: <http://zcu.arcao.com/kky/zky/Prago1.pdf>
- [21] Vyhláška č. 410/2005 Sb. Zakonyprolidi.cz [online]. 2005 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-410>



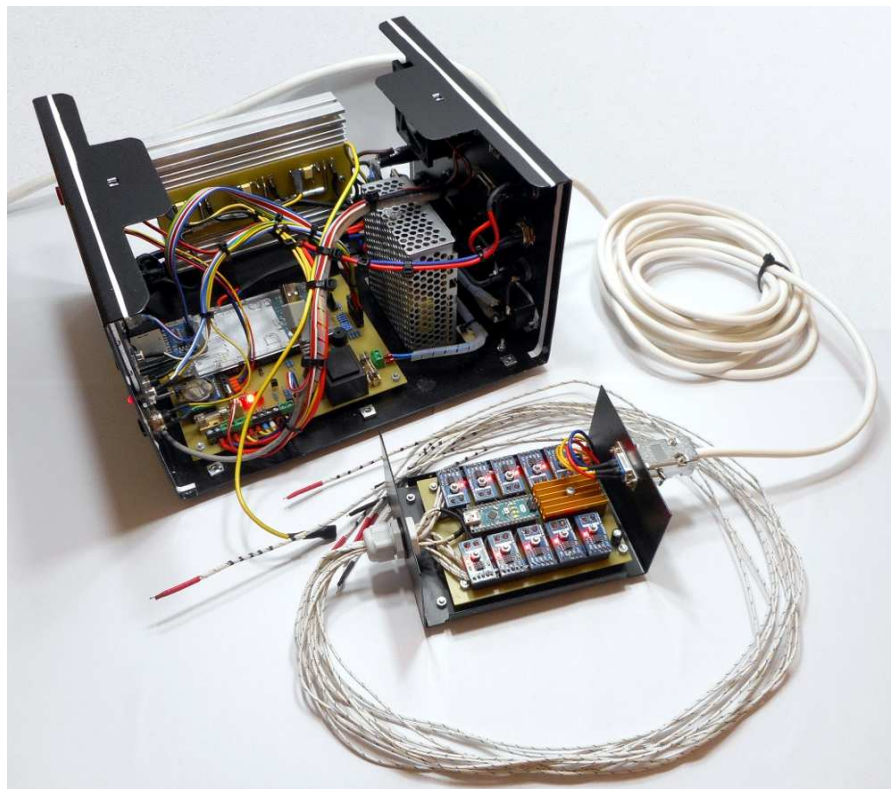
- [22] ŽALUDOVÁ, Naďa. Fyzikální pokus: Pokusné vajíčko II. Matfyz.cz [online]. Praha, 2015, 21. 9. 2015 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.matfyz.cz/clanky/434-fyzikalni-pokus-pokusne-vajicko-ii>
- [23] TESAŘ, Jiří a František JÁCHIM. Fyzika 5 pro základní školu: energie. Praha: SPN - pedagogické nakladatelství, 2010. ISBN 978-80-7235-491-7.

## Přílohy

### Příloha A – Fotografie přístroje



Regulace výstupu zobrazená žárovkou



Pohled na celý otevřený přístroj

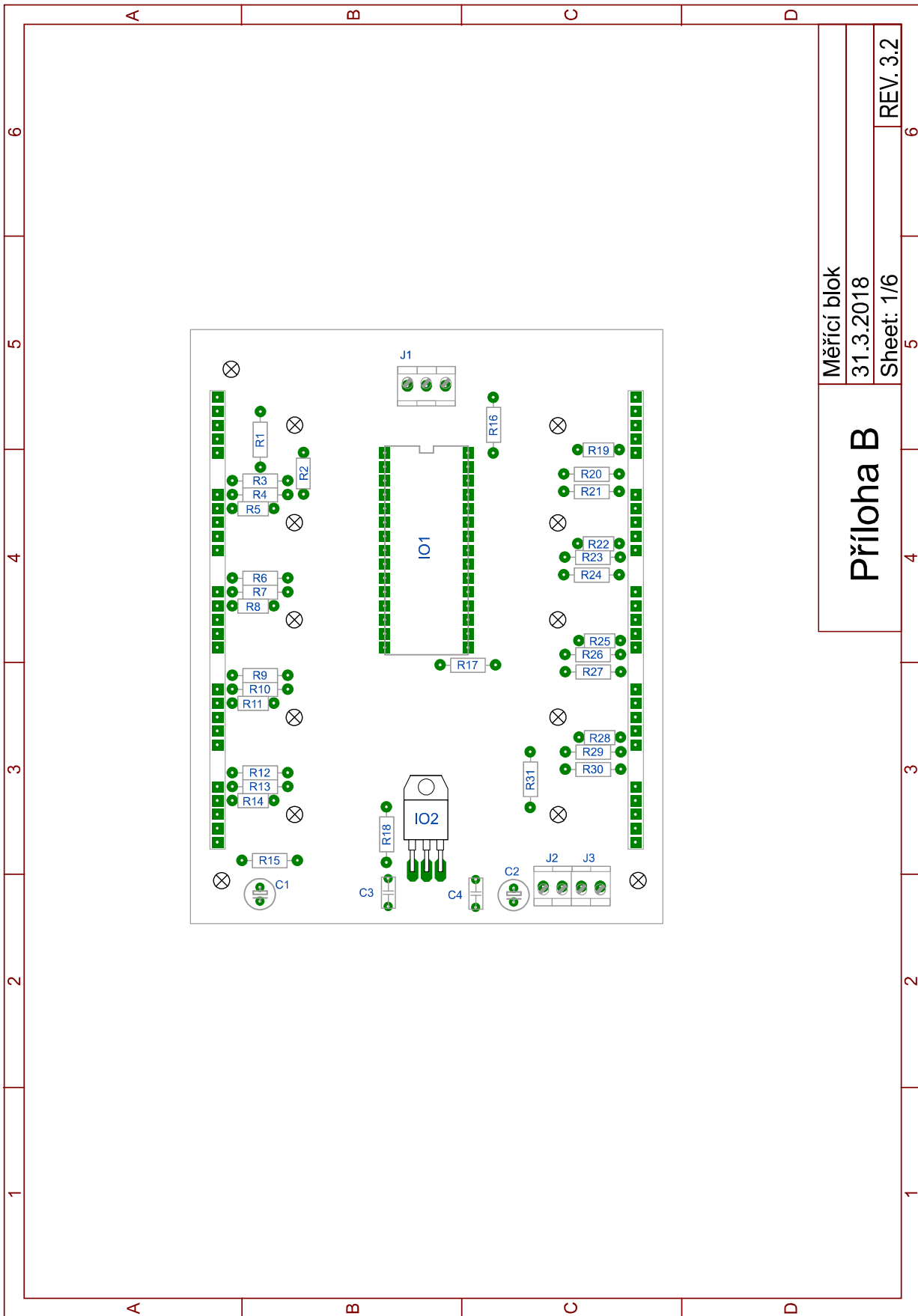


Přední pohled na hlavní skříň



Zadní pohled na hlavní skříň

## Příloha B – Schémata zapojení



Měřicí blok

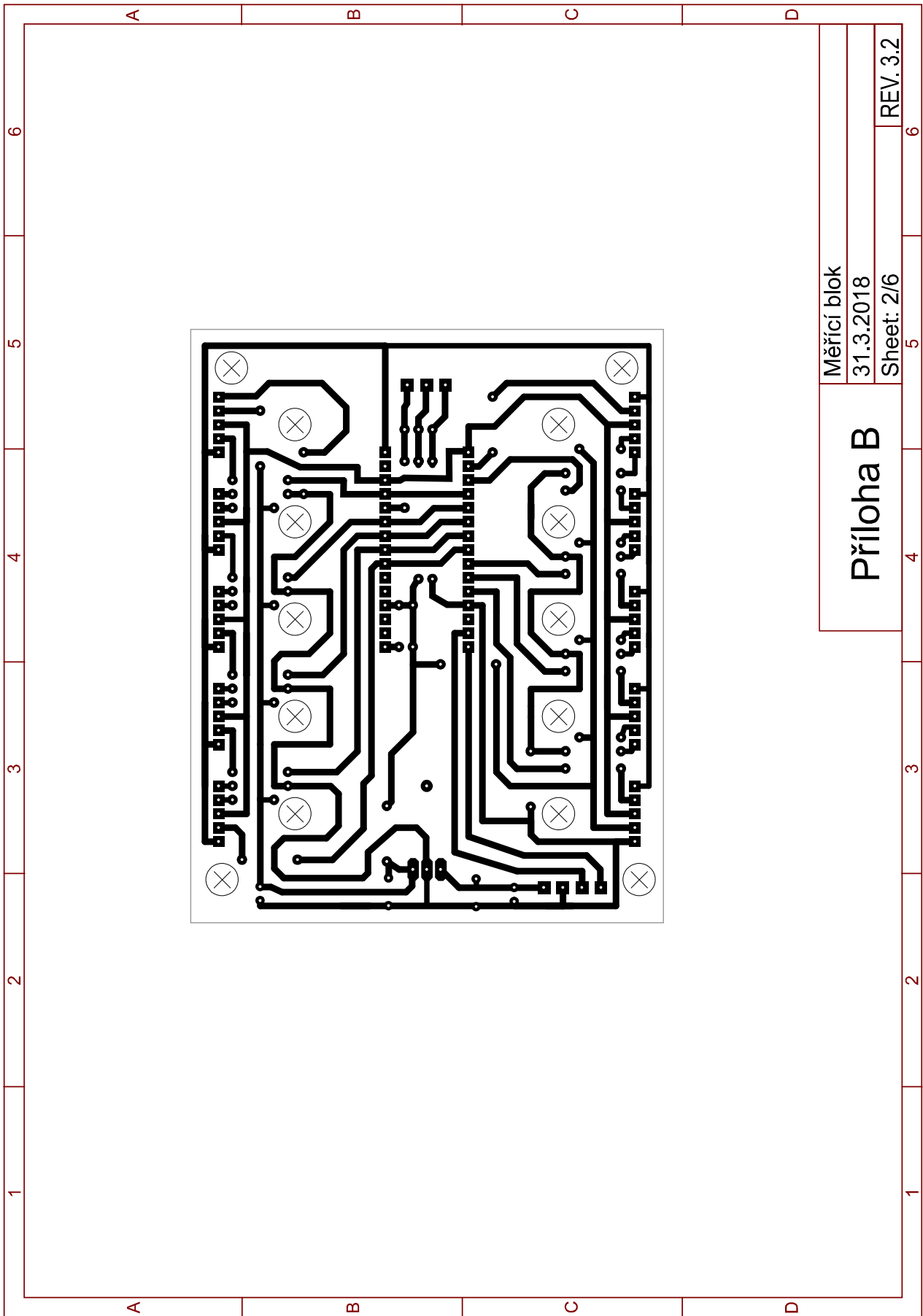
31.3.2018

Sheet: 1/6

REV. 3.2

Příloha B

Rozložení součástek měřícího bloku



Měřicí blok

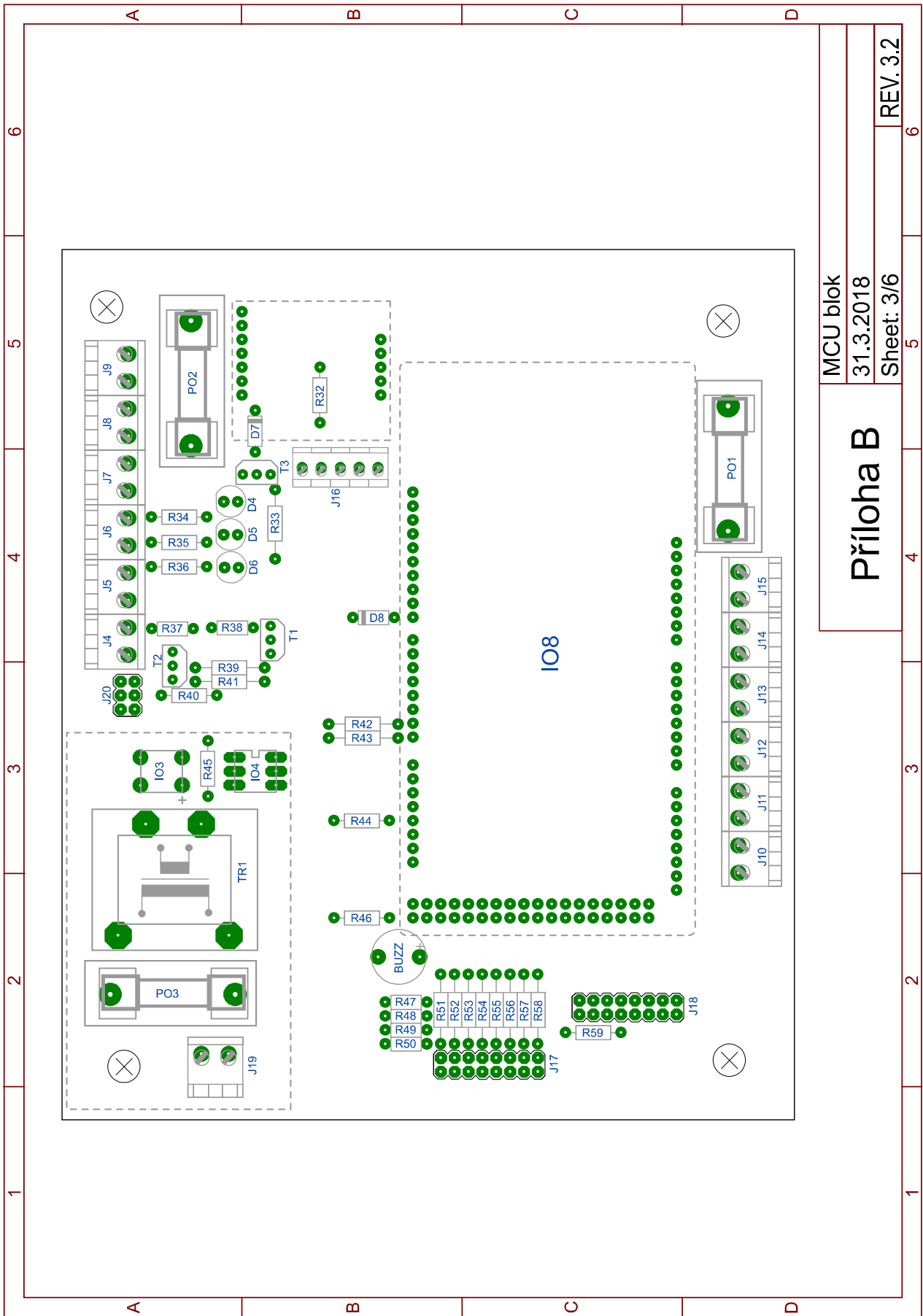
31.3.2018

Sheet: 2/6

REV. 3.2

## Příloha B

Schéma tištěného spoje měřícího bloku



MCU blok  
31.3.2018  
Sheet: 3/6

# Příloha B

Rozložení součástek MCU bloku [17]

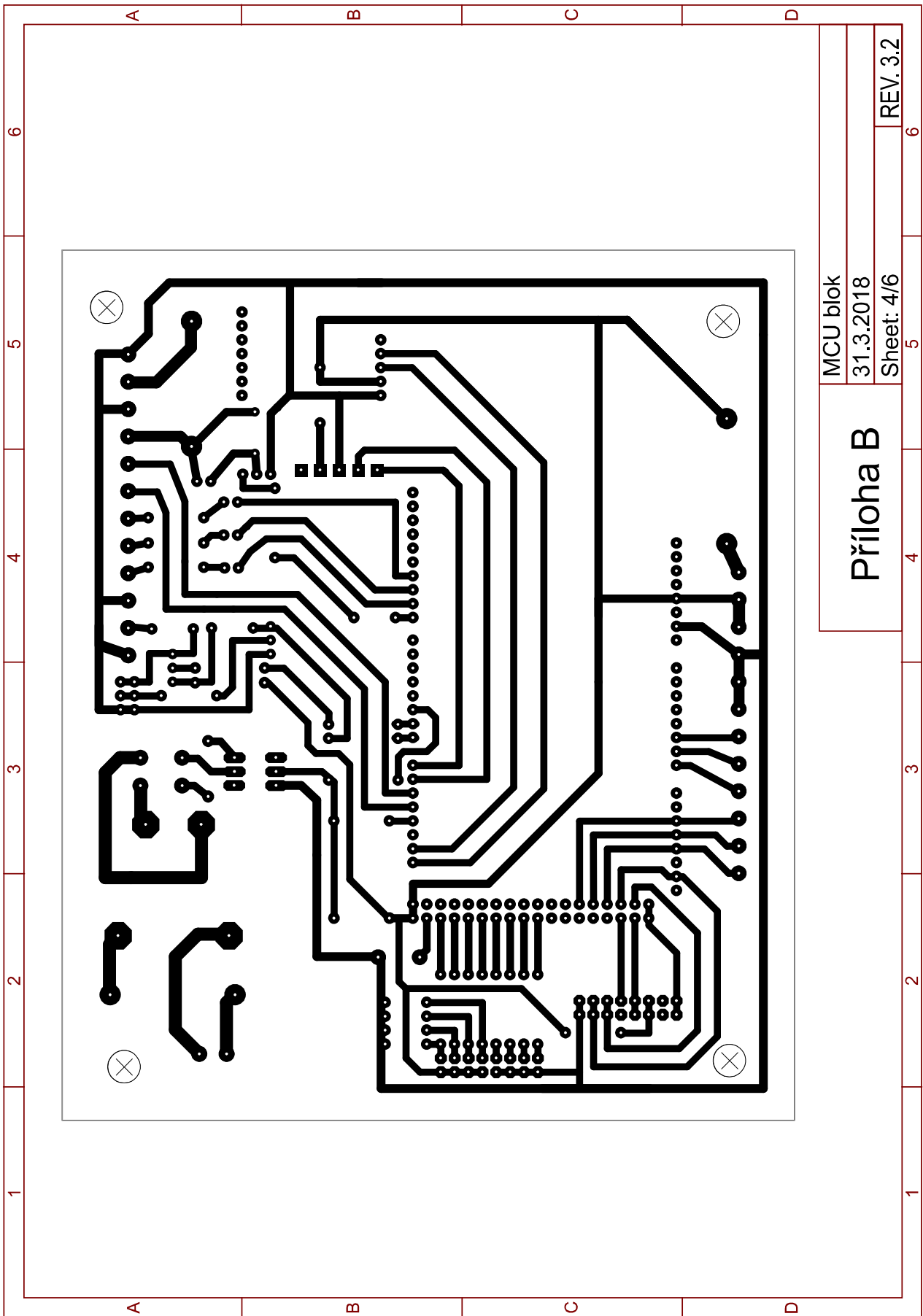
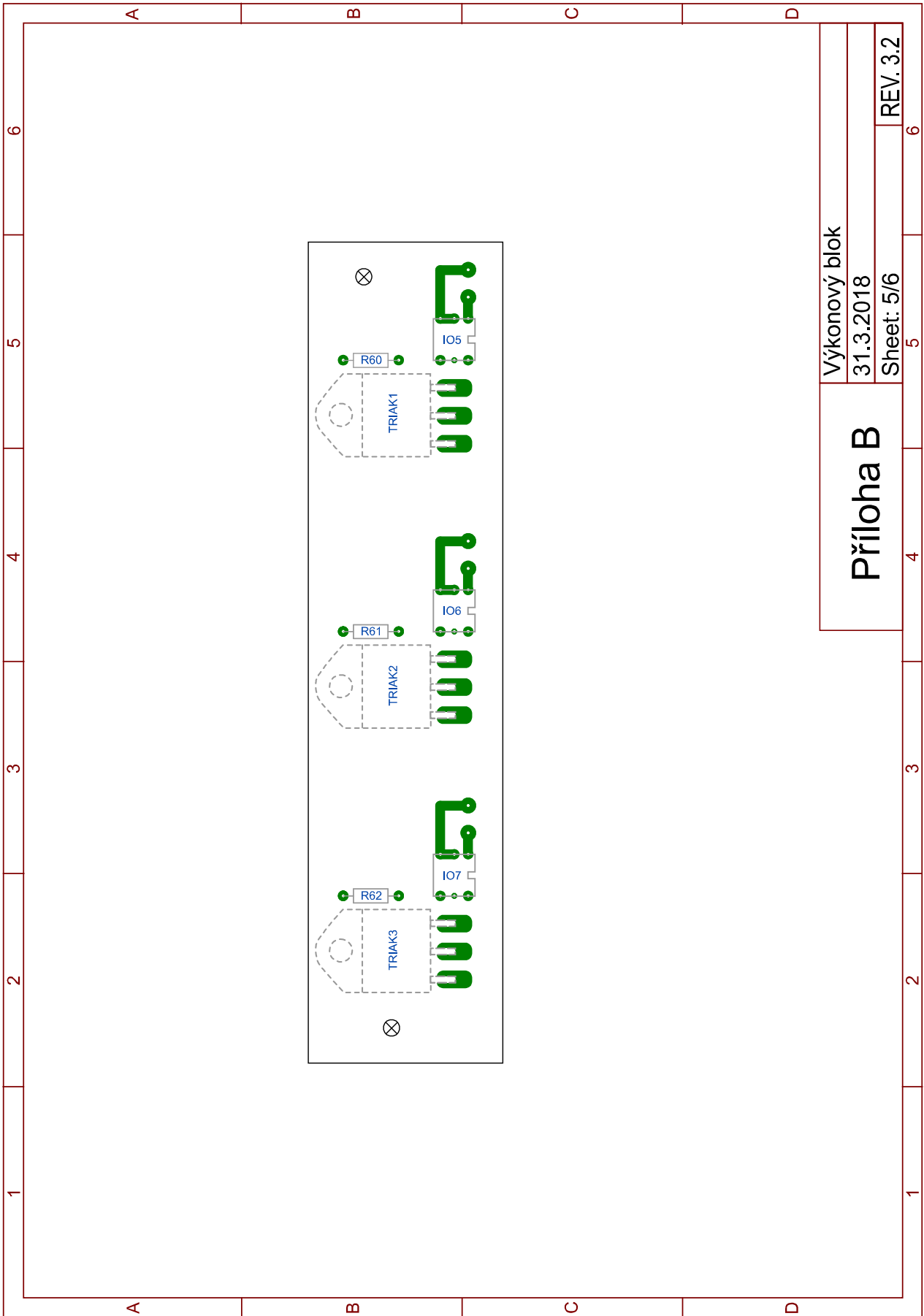


Schéma tištěného spoje výkonového bloku



Výkonový blok

31.3.2018

Sheet: 5/6

REV. 3.2

# Příloha B

Rozložení součástek výkonového bloku



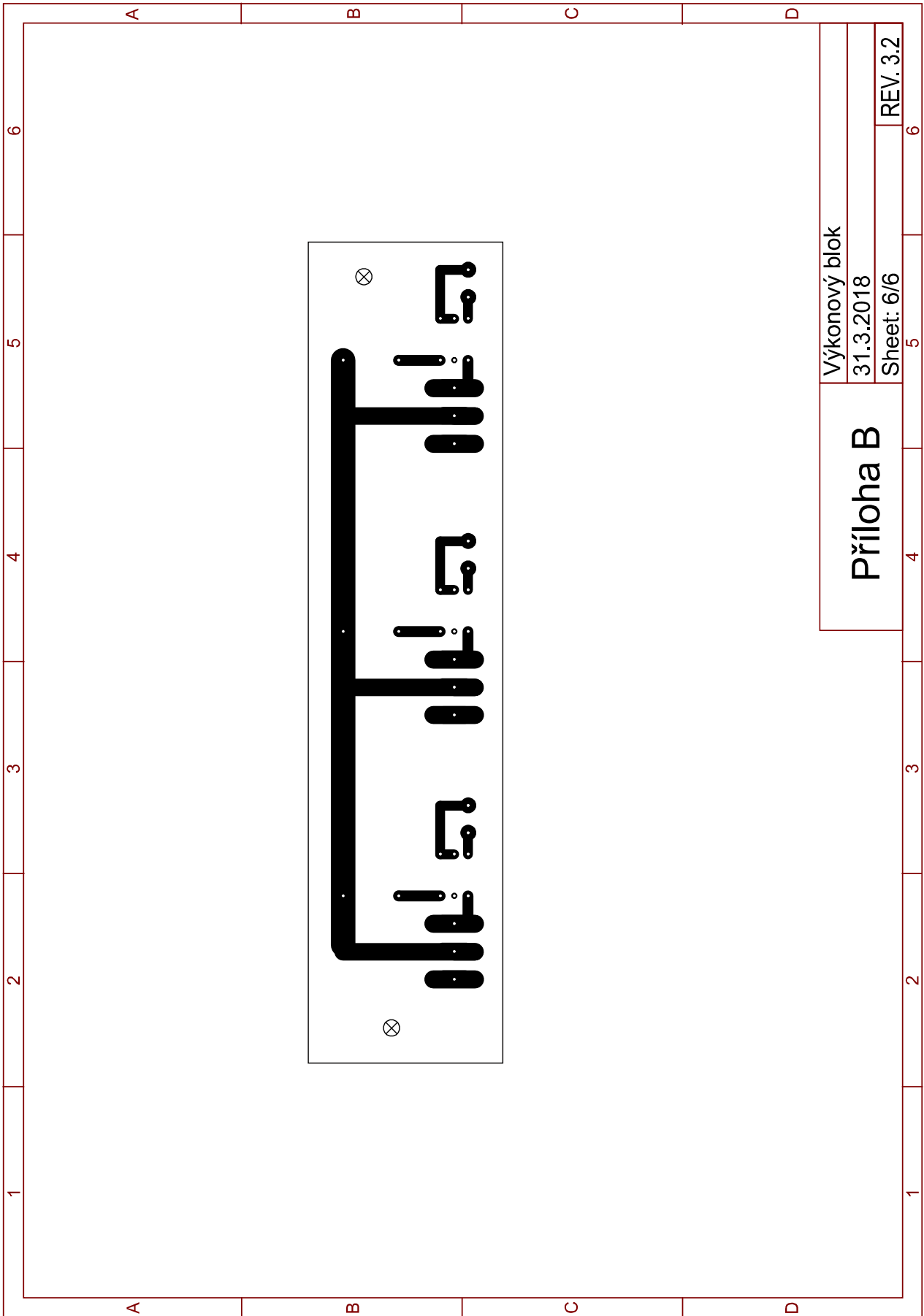


Schéma tištěného spoje výkonového bloku

## Příloha C – Seznam součástek

### Rezistory

R <sub>1</sub> -R <sub>32</sub>	0 Ω	(drátová propojka)
R <sub>33</sub>	2,2 kΩ	
R <sub>34</sub> - R <sub>36</sub>	220 Ω	
R <sub>37</sub> - R <sub>38</sub>	4,7 kΩ	
R <sub>39</sub> – R <sub>40</sub>	10 kΩ	
R <sub>41</sub> – R <sub>44</sub>	0 Ω	(drátová propojka)
R <sub>45</sub>	1,2 kΩ	
R <sub>46</sub> – R <sub>50</sub>	10 kΩ	
R <sub>51</sub> – R <sub>54</sub>	0 Ω	(drátová propojka)
R <sub>55</sub> – R <sub>58</sub>	300 Ω	
R <sub>59</sub>	0 Ω	(drátová propojka)
R <sub>60</sub> – R <sub>62</sub>	1 kΩ	

### Kondenzátory

C1-C2	220 μF	Elektrolyt
C3-C4	100 nF	

### Polovodičové součástky

T <sub>1</sub>	BC337	(45V/0,5A)
T <sub>2</sub>	BC557	(45V/0,3A)
T <sub>3</sub>	TIP120	(60V/5A)
D <sub>1</sub> -D <sub>2</sub>	BL-BJE5V4V-2)	LED (na panelu)
D <sub>3</sub>	L-59EGW	RG LED (na panelu)
D <sub>4</sub> -D <sub>6</sub>	BL-BJE5V4V-2)	LED (na desce)
D <sub>7</sub> -D <sub>8</sub>	1N4007	(1000V/1A)
IO <sub>1</sub>	Arduino Nano	
IO <sub>2</sub>	7805	Stabilizátor
IO <sub>3</sub>	B380C1000DIL	Diodový můstek
IO <sub>4</sub>	4N35	Optotranzistor
IO <sub>5</sub> – IO <sub>7</sub>	MOC3021	Optorelé
IO <sub>8</sub>	Arduino Mega	
TRIAK	BTA26B/600V	

## Ostatní součástky

J <sub>1</sub>	AK550/3DS-H	Svorkovnice
J <sub>2</sub> – J <sub>3</sub>	AK550/2DS-V	Svorkovnice
J <sub>4</sub> – J <sub>15</sub>	AK500/2DS-V	Svorkovnice
J <sub>16</sub>	AK550/5DS-V	Svorkovnice
J <sub>17</sub> – J <sub>18</sub>	S2G50	Oboustranný kolík
J <sub>19</sub>	AK500/2DS-V	Svorkovnice
J <sub>20</sub>	S2G50	Oboustranný kolík
PO <sub>1</sub> - PO <sub>3</sub>	KS-T0347RA	Pojistkové pouzdro
PO <sub>1</sub> - PO <sub>3</sub>	KS-T0347RA	Pojistkové pouzdro
TR <sub>1</sub>	BV EI 303 2031	Transformátor
BUZZ	KXG1205C	
Chladič	V7142B BLACK	
LCD displej	Nextion USART HMI TFT LCD Display	
3x Pouzdro na diodu	EBF A5	
4x Pojistkové pouzdro	KS12B	
8x Konektor	CAN 9	
Kabelová průchodka	KSS PG-16SR	
Mřížka pro ventilátory	PB 06D	
Ventilátor	EB60251S1-999	
2x Tlačítko		(250V/2A/ČERNÉ)
Tlačítko		(250V/2A/ČERVENÉ)
Konektor	MIC326	
Konektor	MIC336	
Modul RTC	DS1307	
Modul SD		(SPI sběrnice)
Spínaný zdroj	RQ-50B	

## Příloha D – Seznam použitých zkratk

A/D	analogová veličina převedená na digitální hodnotu
CS, SSEL	( <i>Chip Select</i> ) výběr digitálního čísla aktivního převodníku
EEPROM	( <i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> ) rychlá, elektricky mazatelná paměť
I <sup>2</sup> C	( <i>Inter-Integrated Circuit</i> ) druh sériové komunikace
LCD	( <i>Liquid Crystal Display</i> ) displej z tekutých krystalů
LED	( <i>Light-Emitting Diode</i> ) elektroluminiscenční, polovodičová dioda
MCU	( <i>Mikro-Controller Unit</i> ) blok s mikrokontrolérem (v diplomové práci blok s Arduinem Mega)
MISO	( <i>Master In Slave Out</i> ) digitální vstup pro zařízení v režimu Master, výstup pro zařízení nastavené jako Slave, při SPI rozhraní
MOSI	( <i>Master Out Slave In</i> ) digitální výstup ze zařízení v režimu Master, vstup pro zařízení nastavené jako Slave, při SPI rozhraní
PID	proporcionálně-integračně-derivační regulátor
PWM	( <i>Pulse Width Modulation</i> ) pulzně šířková modulace
RTC	( <i>Real-Time Clock</i> ) hodiny reálného času (modul DS1307)
SCK	( <i>Serial Clock</i> ) synchronizační, hodinový signál u SPI rozhraní
SCL	( <i>Synchronous Clock</i> ) hodinový signál pro I <sup>2</sup> C komunikaci
SDA	( <i>angl. Synchronous Data</i> ) datový kanál pro I <sup>2</sup> C komunikaci
SPI	( <i>Serial Peripheral Interface</i> ) sériové, periferní rozhraní
SRAM	( <i>Static Random Access Memory</i> ) statická paměť s libovolným přístupem
USART	( <i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> ) seriové, univerzální, synchronní a asynchronní rozhraní
UART	( <i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> ) univerzální asynchronní rozhraní
V <sub>in</sub>	velikost vstupního napětí

USB	<i>(Universal Serial Bus)</i> univerzální sériová sběrnice
SD	<i>(Secure Digital)</i>
TX	<i>(Transmitter)</i> vysílací linka
RX	<i>(Receiver)</i> přijímací linka
Vcc	napájecí napětí
3V3	napájecí napětí 3,3V
GND	nulový vodič nebo Uzemnění
RS232	standard definující parametry sériové komunikace

## Příloha E – Seznam obrázků

<b>Obr. 1:</b> Teplotní charakteristika termočláčku.....	10
<b>Obr. 2:</b> Druhy termočlámků.....	11
<b>Obr. 3:</b> Zapojení termočlámků.....	13
<b>Obr. 4:</b> Způsob měření teploty DS18B20.....	14
<b>Obr. 5:</b> Vývojová deska Arduino Mega.....	16
<b>Obr. 6:</b> Vývojová deska Arduino Nano.....	17
<b>Obr. 7:</b> Způsob komunikace po SPI sběrnici.....	18
<b>Obr. 8:</b> Způsob komunikace po I <sup>2</sup> C sběrnici.....	18
<b>Obr. 9:</b> Způsob komunikace po 1-Wire sběrnici.....	19
<b>Obr. 10:</b> Způsob komunikace po RS232 sběrnici.....	20
<b>Obr. 11:</b> Blokové zapojení přístroje.....	22
<b>Obr. 12:</b> Zapojení stabilizátoru.....	24
<b>Obr. 13:</b> Zapojení převodníku termočláčku.....	24
<b>Obr. 14:</b> Zapojení RTC.....	25
<b>Obr. 15:</b> Zapojení SD karty.....	26
<b>Obr. 16:</b> Zapojení displeje.....	27
<b>Obr. 17:</b> Základní zapojení LED indikátorů.....	27
<b>Obr. 18:</b> Zapojení piezosirény.....	28
<b>Obr. 19:</b> Zapojení tlačítek.....	28
<b>Obr. 20:</b> Schematická značka triaku, triak.....	29
<b>Obr. 21:</b> Schéma zapojení triaku.....	30
<b>Obr. 22:</b> Schéma zapojení detekce průchodu nulou.....	31
<b>Obr. 23:</b> Zapojení ventilátoru.....	31
<b>Obr. 24:</b> Příklad grafiky tvorby grafiky v Inkscape.....	32
<b>Obr. 25:</b> Editace LCD displeje.....	33
<b>Obr. 26:</b> Příklad grafiky LCD displej.....	33
<b>Obr. 27:</b> Princip odesílání dat.....	35
<b>Obr. 28:</b> Příklad kódování a dekodování.....	36
<b>Obr. 29:</b> Kaskáda pro sepnutí výstupu.....	36
<b>Obr. 30:</b> Princip řízení výkonu.....	37
<b>Obr. 31:</b> PID regulátor.....	38
<b>Obr. 32:</b> Měření v místnosti.....	42
<b>Obr. 33:</b> Schéma rozložení čidel při měření.....	43

<b>Obr. 34:</b> Graf změřené teploty.....	44
<b>Obr. 35:</b> Schéma testovací nádoby .....	45
<b>Obr. 36:</b> Elektrický a plamenový způsob vytápění.....	46
<b>Obr. 37:</b> Graf elektrického ohřevu nádoby.....	47
<b>Obr. 38:</b> Únik vzduchu z nádoby .....	48
<b>Obr. 39:</b> Graf plamenového ohřevu nádoby.....	48
<b>Obr. 40:</b> Ohřívání nádoby žárovkou.....	49
<b>Obr. 41:</b> Celková aparatura vypařování .....	50
<b>Obr. 42:</b> Aplikace látky na teplotní senzor.....	51
<b>Obr. 43:</b> Graf vypařování testovaných látek.....	51
<b>Obr. 44:</b> Záznam teploty na neoznačenou kapiláru.....	52
<b>Obr. 45:</b> Měření teploty tání a varu vody .....	53
<b>Obr. 46:</b> Celková sestava zařízení pro teploměr .....	54
<b>Obr. 47:</b> Celková sestava pece a zařízení .....	55
<b>Obr. 48:</b> Celková sestava pece (zadní pohled).....	56
<b>Obr. 49:</b> Pohled na novou řídicí elektroniku pece .....	56
<b>Obr. 50:</b> Kombinace spirál a zobrazení úrovní na sedmsegmentovém displeji.....	57
<b>Obr. 51:</b> Příklad špatného nastavení PID konstant .....	58
<b>Obr. 52:</b> Regulace teploty horkovzduchem .....	59
<b>Obr. 53:</b> Regulace teploty topných spirál .....	60

## **Příloha F – Seznam tabulek**

<b>Obr. 3:</b> Tabulka vlastností termočlánku .....	11
<b>Obr. 4:</b> Zapojení termočlánků .....	12
<b>Obr. 5:</b> Naprogramovaný průběh teploty .....	59