



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH A KONSTRUKCE ROZHRANÍ PRO ZPŘESNĚNÍ ÚDAJE VISKÓZNÍHO VAKUOMETRU

INTERFACE DESIGN AND CONSTRUCTION FOR VISCOUS VACUUM GAUGE DATA REFINEMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Pohorský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Appel, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Tomáš Pohorský**
Studijní program: Mechatronika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Martin Appel, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh a konstrukce rozhraní pro zpřesnění údaje viskózního vakuometru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je seznámení se s principem a fungováním viskózního etalonu s rotující kuličkou (SRG). Etalon je využíván v laboratoři Českého metrologického institutu. Pro přesnější měření v oblasti vysokého vakua je však nutné provádět korekci údaje tohoto etalonu na offset (zpomalování rotace bez přítomnosti plynu) a jeho závislost na frekvenci rotace kuličky. Údaj vakuometru dále ovlivňuje aktuální teplota. Cílem práce je navrhnout hardwarový doplněk etalonu SRG (Arduino, Raspberry, či podobný systém dle zkušeností studenta) a softwarové vybavení umožňující provádění systematické korekce uvedených vlivů a zobrazující na dobře čitelném displeji přesnou aktuální hodnotu vakua, případně další doplňující informace. Doplněk bude získávat informace z etalonu SRG pomocí jeho sériového rozhraní. Informace o teplotě SRG bude získávána jednoduchým a současně dostatečně přesným měřením teploty, jehož návrh a realizace je součástí práce. Doplněk umožní i přenos přesné hodnoty vakua do nadřazeného systému (např. osobní počítač) po sériové lince.

Cíle bakalářské práce:

- Popis principu a fungování viskózního etalonu s rotující kuličkou.
- Návrh způsobu měření teploty.
- Návrh způsobu komunikace s nadřazeným systémem.
- Celkový návrh a popis funkčního a elektrického schématu hardwarového doplňku.
- Realizace doplňku a jeho zprovoznění.

Seznam doporučené literatury:

Literatura: Christian Wüthrich, Karl Jousten; Protocol for the CCM comparison CCM.M.P-K14 for absolute pressures in the range from 100 μ Pa to 1 Pa (2009)

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací zařízení pro zpřesnění údaje viskózního vakuometru, který je využíván v laboratoři Českého metrologického institutu. Cílem práce je seznámení se s principem a fungováním viskózního etalonu s rotující kuličkou (SRG). Dalším cílem je návrh zařízení, které pomocí aktuální hodnoty frekvence rotace kuličky ve vakuometru a pomocí aktuální teploty zpřesní údaj vakuometru. Tento zpřesněný údaj poté zobrazí na displej, který je součástí zařízení a také umožní jeho přenos po sériové lince do nadřazeného systému (např. osobního počítače).

Summary

This thesis deals with the design and implementation of a viscous vacuum gauge data refinement device that is used in the laboratory of the Czech Metrology Institute. The aim of the thesis is to get acquainted with the principle and operation of the viscous etalon with the spinning rotor gauge (SRG). Another aim is to design a device which, using the current value of the ball rotation frequency in the vacuum gauge and using the current temperature to refine the vacuum gauge value. This refined value is then displayed on a display that is part of the device and also allows it to be transmitted over a serial link to the parent system (e.g. a personal computer).

Klíčová slova

viskózní etalon s rotující kuličkou, Český metrologický institut, zpřesnění údaje, viskózní vakuometr, hardwarový doplněk

Keywords

viscous etalon with the spinning rotor gauge, Czech Metrology Institute, data refinement, viscous vacuum gauge, hardware add-on

Bibliografická Citace

POHORSKÝ, T. *Návrh a konstrukce rozhraní pro zpřesnění údaje viskózního vakuometru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 34 s., Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Appel, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, pod vedením Ing. Martina Appela, Ph.D., s použitím literatury, která je uvedena v seznamu zdrojů.

Tomáš Pohorský

Brno

.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Appelovi, Ph.D. a Mgr. Martinu Vičarovi Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za jejich cenné rady a čas. Také bych rád poděkoval své rodině a kamarádům za podporu během studia.

Tomáš Pohorský

Obsah

1	Úvod	9
2	Rešerše	10
2.1	Princip a fungování viskózního etalonu vakua	10
2.1.1	Funkce měřicí hlavy	10
2.1.2	Odpor plynů	12
2.2	Způsoby měření teploty	13
2.2.1	Termistor	13
2.2.2	Termočlánek	14
2.2.3	Infrčervené teplotní senzory	15
2.2.4	Digitální teplotní senzory	16
2.3	Způsob komunikace s nadřazeným systémem	16
2.3.1	UART	16
2.3.2	USB	17
2.3.3	RS-232	17
2.3.4	MAX232	18
3	Řešení	19
3.1	Hardware	19
3.1.1	Mikrokontrolér	19
3.1.2	Teplotní čidlo	19
3.1.3	Displej	20
3.1.4	Převodník TTL na RS-232	20
3.2	Deska plošných spojů	21
3.3	Software	22
3.3.1	Programovací prostředí	23
3.3.2	Zpracování hodnot	23
3.3.3	Zobrazení na displej	24
3.3.4	Komunikace s nadřazeným systémem	25
3.4	Návrh krabičky	25
3.5	Testování	26
3.5.1	Sestavení	26
3.5.2	Porovnání hodnot	28
4	Závěr	30
	Literatura	31

Seznam obrázků	33
Seznam příloh	34

1 Úvod

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu zařízení, které bude zpřesňovat údaj viskózního etalonu s rotující kuličkou (SRG). Tento etalon je využíván v laboratoři Českého metrologického institutu k měření v oblasti vysokého vakua.

Etalon funguje na principu roztáčení ložiskové kuličky, která je magneticky bez mechanického tření zavěšena v ocelové trubici, ze které je přes přírubu odsáván plyn. Působením molekul plynu se rychlost otáčení kuličky snižuje. Pomocí této relativní rychlosti zpomalování lze určit tlak uvnitř trubice.

Pro návrh zařízení bude potřeba nastudovat princip a fungování etalonu. Údaj vakuometru je ovlivněn především aktuální frekvencí rotace kuličky a aktuální teplotou. Zařízení tedy bude získávat tyto hodnoty, pomocí kterých bude provádět korekci údaje vakuometru. Zpřesněná hodnota bude zobrazena na displej, který bude také součástí zařízení, a také ji bude možné po sériové lince přenést do nadřazeného systému (PC).

Návrh zařízení bude v první řadě spočívat ve výběru vhodného mikrokontroléru. Následně ve výběru dalšího hardwaru, do kterého patří teplotní senzor, který bude muset mít dostatečnou přesnost. Dále bude potřeba komunikovat s vakuometrem, kvůli získání hodnoty frekvence rotace kuličky. K tomu bude sloužit převodník TTL logiky na RS-232, díky kterému bude možné komunikovat s vakuometrem, který používá sériové rozhraní RS-232. Nakonec displej, který musí být dostatečně velký, aby bylo snadné z něj odečítat hodnoty.

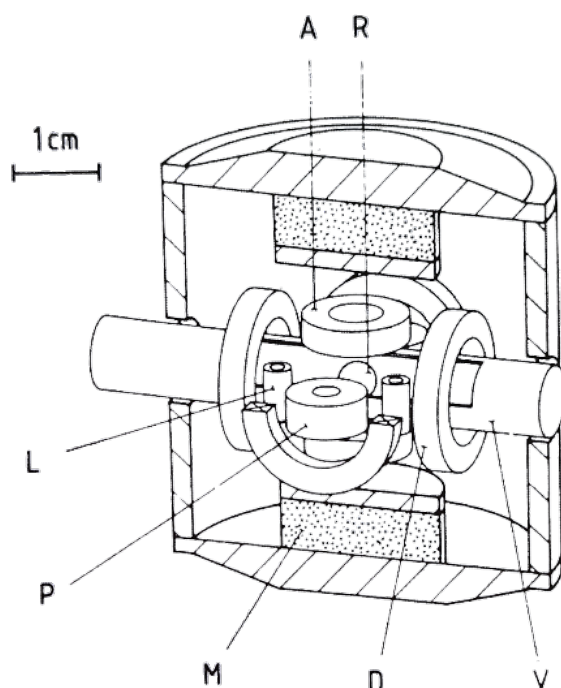
Celé zařízení bude schované v krabici, která bude navržena tak, aby měla otvory pro napájení mikrokontroleru, teplotní senzor, konektor na propojení s vakuometrem, konektor na propojení s PC a také pro displej. Krabice bude sloužit pro ochranu zařízení před vnějšími vlivy a také pro lepší celkový vzhled tohoto zařízení.

2 Rešerše

2.1 Princip a fungování viskózního etalonu vakua

Viskózní etalon s rotující kuličkou SRG (spinning rotor gauge) slouží k měření vakua v rozsahu 1 Pa až 10^{-4} Pa absolutního tlaku. Tento sekundární etalon je využíván v laboratoři Českého metrologického institutu pro kalibraci a ověření ostatních zařízení, které měří vakuum.

2.1.1 Funkce měřicí hlavy



Obrázek 2.1: Schéma etalonu SRG [1]

Etalon SRG je tvořen rotorem **R**, kterým je obvykle ocelová ložisková kulička o průměru 4,5 mm. Tato kulička je magneticky zavěšena bez mechanického kontaktu na ose nemagnetické trubky z nerezové oceli **V**. Trubka je připevněna k vakuovému systému přes přírubu.

Zavěšení rotoru je dosaženo pomocí magnetických sil mezi dvěma vzájemně se přitahujícími permanentními magnety **M**. Osová poloha magnetů je vhodně nastavena tak, aby se magnetické a gravitační síly působící na rotor vzájemně vyrušily. Rovnováha je ovšem nestabilní, tj. rotor se přitáhne buď k hornímu, nebo dolnímu magnetu, pokud nejsou k dispozici stabilizační prostředky. Tyto prostředky se skládají ze dvou cívek elektromag-

netu **A**, které podporují přitažlivost spodního magnetu, když se rotor pohybuje směrem nahoru, a naopak podporují přitažlivost horního magnetu, když se rotor pohybuje směrem dolů. V důsledku toho je rotor stabilně vázán na střední rovnovážnou polohu. Cívky jsou napájeny ze stejnosměrného zesilovače, který je řízen stejnosměrným snímacím napětím. To je úměrné vertikální odchylce rotoru od rovnovážné polohy. Zesilovač zajišťuje obnovovací a tlumicí síly.

Stejnoseměrný snímací signál se nejlépe získává z osových řídicích cívek **A** pomocí diferenciálního snímacího obvodu, který porovnává impedance těchto cívek. Impedance mírně závisí na blízkosti rotoru, který zachycuje nepatrné množství výkonu z cívek. Když rotor zůstane v polovině vzdálenosti mezi cívkami, výstupní napětí snímacího obvodu a řídicí proud se vynulují. V opačném případě velikost a polarita těchto signálů odpovídá odchylce rotoru podél svislice.

K tlumení bočních oscilací v rotoru jsou k dispozici čtyři indukční cívky **L**, dvě na každé straně trubky **V**. Když se rotor pohybuje směrem k jedné z cívek, dochází k indukci napětí způsobené vertikální magnetickou polarizací rotoru. Toto napětí je úměrné boční rychlosti rotoru. Signál je zesílen a přiveden k odpovídající kontrolní cívce umístěné na opačné straně rotoru. Interakce mezi magnetickým momentem kontrolní cívky a magnetickým momentem rotoru účinně tlumí boční pohyb mezi příslušnými cívkami. Druhá dvojice cívek funguje podobně, rotor se tedy stabilizuje ve všech směrech.

Čtyři další cívky **D** připojené k výstupu dvoufázového generátoru střídavého proudu vytvářejí točivé magnetické pole, které otáčí rotorem kolem svislé osy. Mechanismus pohonu je podobný jako u běžného indukčního motoru. Rotor dosáhne rychlosti 400 Hz za méně než 1 minutu. Poté se generátor vypne a rotor se nechá běžet.

Volně se otáčející rotor se působením molekul plynu zpomaluje. Při jakékoli přesné práci za nízkého tlaku je třeba počítat s malým zbytkovým odporem vířivých proudů, který je obvykle ekvivalentní odporu plynů ve vzduchu při tlaku přibližně 10^{-6} mb. Zbytkový odpor lze určit při odčerpání systému na základní tlak. Odpor zůstává stabilní po dlouhou dobu, pokud není rotor vyjmut ze závěsu.

Zpomalování rotoru se měří v hodnotách $-\frac{\dot{\omega}}{\omega}$, což je relativní rychlost zpomalování úhlové frekvence rotoru ω . Rychlost zpomalování se určuje na základě pozorování nulových průsečíků indukčního snímacího signálu generovaného rotační složkou magnetizace rotoru. K tomuto účelu jsou k dispozici dvě snímací cívky **P**.

Výskyt sběrného napětí se přisuzuje malému sklonu magnetizace rotoru vůči ose spinu. Protože se svislá osa spinu za stacionárních podmínek nepohybuje, magnetizace opisuje malý kužel kolem svislice. Horní a dolní pól rotoru jsou tak střídavě skloněny k jedné z cívek **P**. Změny toku na cívkách spojené s tímto periodickým sklonem způsobují, že se na cívkách objevují indukční napětí, která jsou ve vzájemné protifázi. Cívky musí být správně zapojeny, aby se signál sběrače spíše zdvojnásobil, než zrušil. Při správném zapojení tato soustava dvou cívek potlačuje všechny sudé harmonické signály sběrače, zatímco opačné zapojení potlačuje všechny liché harmonické, včetně základního signálu. Výraznou výhodou tohoto uspořádání snímače a cívek při správném zapojení je, že potlačuje také plochá bludná pole podél svislice. Taková pole mohou být vnášena vnějším elektromotorickým zařízením, např. pohonem čerpadla, přestože pouzdro hlavice měřidla z měkké oceli poskytuje poměrně účinné magnetické stínění. Svislá orientace os cívek snímače rovněž minimalizuje indukční vazbu s polem pohonu rotoru. [1]

2.1.2 Odpor plynů

V minulosti bylo shromážděno mnoho experimentálních důkazů o tom, že molekuly plynu opouštějící hladký povrch kovu v průměru nemění s povrchem žádné významné množství tangenciálního momentu hybnosti, bez ohledu na úhel dopadu. Absence tangenciálního momentu hybnosti spojeného s vystupujícími molekulami znamená, že tyto molekuly není třeba uvažovat při výpočtu plynného odporu sférického rotoru.

Tangenciální moment hybnosti přenášený dopadajícími molekulami se vypočítá za předpokladu, že tyto molekuly vycházejí ze stěn vakuového prostoru, aniž by se srazily s jinými molekulami. V tomto případě činí průměrná tangenciální hybnost přenášená na rotor $mr^2\omega$ na molekulu, kde m označuje hmotnost molekuly, r radiální vzdálenost místa dopadu od osy spinu a ω úhlovou rychlost rotoru. Dále berme v úvahu rychlost dopadu $(2/\pi)p/m\bar{c}$, která je zde vyjádřena pomocí tlaku plynu p a střední molekulové rychlosti \bar{c} . Integrální působení dopadajících molekul způsobuje rychlost ztráty úhlové hybnosti $-(8\pi/15)da^5\dot{\omega}$ rotující koule vyjádřenou pomocí poloměru koule a a hustoty materiálu d . Po integraci přes sférický povrch snadno získáme odpor plynů v termínech relativního zpomalení rotoru za jednotku času

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \left(\frac{10}{\pi}\right) \left(\frac{1}{ad}\right) \frac{p}{\bar{c}}. \quad (2.1)$$

Tento vztah byl ve skutečnosti ověřen s přesností na několik procent četnými výzkumy na volně se otáčejících rotorech. Předpoklad mizivého příspěvku vystupujících molekul se tedy ukazuje jako správný v mezích experimentální přesnosti.

Ve stejném rozsahu, v jakém platí výše uvedený předpoklad, je třeba SRG považovat za absolutní měřidlo. Požadavkem na absolutní měřidlo je, aby nepotřebovalo kalibraci. Určovaná veličina musí být redukovatelná na základní veličiny, jako je délka, hmotnost a čas, a další dobře definované veličiny, které nevyžadují kalibraci. Když se podíváme na rovnici 2.1, vidíme, že tato podmínka platí pro SRG. Rychlost zpomalení $-\frac{\dot{\omega}}{\omega}$, poloměr a a hustota materiálu rotoru d jsou dostupné základními metodami, a \bar{c} , střední molekulová rychlost, je veličina, kterou lze předpovědět pro jakýkoli plyn v rovnováze při známé teplotě bez kalibrace. [1]

Po vyjádření tlaku p z rovnice 2.1, malé úpravě a zahrnutí ztrát, je získán přesný vztah pro výpočet tlaku v etalonu SRG

$$p = \frac{\pi\nu\rho d}{20\sigma} \left(-\frac{\dot{\omega}}{\omega} - RD(\omega) - 2\alpha \frac{dT}{dt} \right), \quad (2.2)$$

kde:

- p je tlak uvnitř etalonu
- ν je střední tepelná rychlost molekul plynu
- ρ je hustota kuličky
- d je průměr kuličky
- σ je koeficient akomodace hybnosti

- $-\frac{\dot{\omega}}{\omega}$ je relativní rychlost zpomalování úhlové frekvence kuličky ω
- $RD(\omega)$ je zbytkový odpor závislý na frekvenci, který je způsoben vířivými proudy
- α je součinitel tepelné roztažnosti kuličky
- T je teplota kuličky [2]

2.2 Způsoby měření teploty

Teplotu lze měřit mnoha způsoby. Každý z nich má určité výhody a nevýhody, které hrají určitou roli při jejich výběru pro daný účel. Zde jsou uvedeny ty, které jsou nejvíce používané.

2.2.1 Termistor

Termistor je polovodičové teplotní čidlo, které mění svou elektrickou rezistenci v závislosti na teplotě. VA charakteristika tohoto čidla ale bohužel není lineární. Existují dva hlavní typy termistorů: PTC (pozitivní teplotní koeficient), u kterého s rostoucí teplotou roste odpor, a NTC (negativní teplotní koeficient), u kterého se zahřátím součástky odpor klesá. [3]



Obrázek 2.2: Schematická značka termistoru [3]

PTC

Pozistor je elektrická součástka, která má dva vývody. Je to speciální typ termistoru, který má pozitivní teplotní závislost odporu, což znamená, že s rostoucí teplotou roste i odpor. Proto se často označuje jako PTC termistor (positive temperature coefficient). Vyrábí se z polykrytalické feroelektrické keramiky, obvykle z titaničitanu barnatého (BaTiO_3). Odpor pozistoru nejprve mírně klesá s rostoucí teplotou, ale nad Curieovou teplotou prudce vzrůstá (asi o tři řády), a poté opět mírně klesá. Tuto oblast nárůstu lze ovlivnit chemickým složením, což umožňuje vytvoření teploměrů s různými teplotními rozsahy.

Pozistory se využívají i jako vratné tepelné pojistky díky jejich strmému průběhu teplotní závislosti. Dále se používají v odmagnetovacích obvodech barevných obrazovek, spínacích obvodech s polovodičovými prvky, čidlech teploty a ve dvoustavových snímačích v řídicích systémech, například v elektrických motorech, transformátorech nebo při ohřevu výkonových součástek. [3]

Závislost odporu na teplotě popisuje vzorec:

$$R = R_0 e^{-B(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})}, \quad (2.3)$$

kde:

- T je teplota na konci měření
- T_0 je teplota na počátku měření
- R je odpor při teplotě T
- R_0 je odpor při teplotě T_0
- B je teplotní konstanta termistoru

NTC

NTC (negative temperature coefficient) termistor je speciální typ termistoru s negativním teplotním koeficientem odporu, což znamená, že s rostoucí teplotou odpor klesá. Pro měření teploty se často využívá metoda nazývaná můstková výhylková metoda, která umožňuje dosáhnout velmi vysoké přesnosti měření až do rozlišení 10^{-5} K.

Tyto NTC termistory byly historicky využívány jako součásti žhavicích obvodů elektronických zařízení. Jejich úkolem bylo chránit vlákna elektronek před přehřátím, zejména pokud byla zapojena sériově. NTC termistory mají opačnou teplotní charakteristiku než vlákna elektronek, což znamená, že jejich odpor klesá s teplotou. Při zapojení NTC termistoru do obvodu se zpočátku omezoval proud, což umožnilo postupné prohřátí všech vláken současně. Tímto způsobem se zabránilo situaci, kdy by jedno vlákno získalo výrazně vyšší teplotu než ostatní a přehřálo by se, což by mohlo vést k jeho přepálení. [3]



Obrázek 2.3: Termistor [4]

2.2.2 Termočlánek

Termočlánek je teplotní čidlo, které využívá jev termoelektrického efektu. Skládá se z dvou různých kovových drátů spojených na jednom konci. Když je na čidlo aplikována teplota, vzniká mezi kovy malé elektrické napětí, které lze měřit a interpretovat jako teplotu. Výhoda tohoto čidla je velký rozsah teploty v řádu stovek stupňů Celsia. Nevýhodou je, že umí měřit jen rozdíl od referenční teploty a nemá vysokou přesnost.

Koncepce termočláneku vychází z principu známého jako Seebeckův efekt - když jsou dva různé kovy spojeny, vzniká na místě jejich spojení malé měřitelné napětí v důsledku změny teploty. Velikost tohoto napětí závisí na rozdílu teplot a na vlastnostech použitých kovů.

Termočlánek se skládá ze dvou vodičů, které jsou izolované od sebe a připojené k měřicímu zařízení. Tyto termočláneky jsou využívány jako senzory a bezpečnostní měřidla

pro sledování teploty v různých procesech a zařízeních. Jsou navrženy tak, aby odolaly náročným podmínkám prostředí.

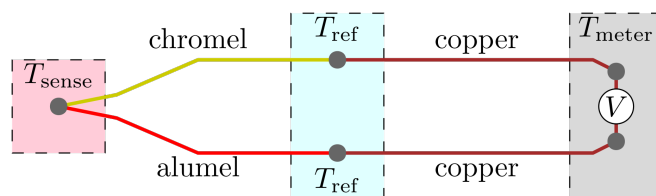
Výběr konkrétního typu termočlánku závisí na rozsahu teplot, okolním prostředí a médium, ve kterém bude měření prováděno. Velikost a tvar termočlánku jsou přizpůsobeny konkrétní aplikaci a požadované přesnosti a rychlosti odezvy.

Když jsou dva vodiče termočlánku spojeny do konektoru, jeden z nich je připojen k měřenému tělesu a slouží k měření teploty, to se označuje jako horký spoj nebo měřicí spoj. Druhý konektor je spojen s tělesem při známé teplotě a funguje jako referenční konektor nebo studený konektor.

Princip fungování termočlánku je založen na třech hlavních efektech objevených Seebeckem, Peltierem a Thomsonem. Seebeckův efekt vzniká, když jsou dva různé kovy spojeny, což vede k vytvoření termoelektrické síly na obou spojích. Při Peltierově efektu vzniká termoelektrická síla v obvodu, když se spojí dva různé kovy a vytvoří dva přechody s rozdílnými teplotami. Thomsonův jev spočívá v absorpci tepla podél tyče, jejíž konce mají různou teplotu.

Naměřená teplota je spojena s proudem, který prochází termočlánkem, a jako vedlejší účinek vznikají teplotní změny po celé délce tyče.

Standardní obvod termočlánku se skládá ze dvou odlišných vodičů, které jsou spojeny v konektoru. Na obou spojích je různá teplota, což indukuje termoelektrickou sílu. Elektronový tok v termočlánku přenáší tepelnou a elektrickou energii. Pokud je jedna strana měděného drátu zahřátá, elektrony se přenášejí podél drátu k chladnější straně, vytvářejí tak teplotní gradient podél své dráhy. Tím dochází k přeměně tepla na elektrickou energii. [5]



Obrázek 2.4: Termočlánek [6]

2.2.3 Infrčervené teplotní senzory

Infračervené teplotní senzory jsou důležitou součástí moderního technologického vybavení, která umožňuje bezkontaktní měření teploty objektů na základě infračerveného záření, které emitují.

Princip fungování těchto senzorů spočívá ve sběru a analýze infračerveného záření v určitém spektrálním rozsahu. Tento druh senzoru je schopen detekovat infračervené záření v rozsahu teplot od -50 °C do více než 1000 °C , což zajišťuje jeho širokou aplikovatelnost v různých průmyslových odvětvích.

Základním stavebním kamenem infračerveného senzoru je detekční prvek, který může být realizován pomocí různých technologií, jako jsou termoelektrické senzory, pyroelektrické senzory nebo polovodičové detektory. Tyto senzory fungují na principu absorpce infračerveného záření objektem a následné konverze této energie na elektrický signál, který je následně interpretován jako teplotní hodnota.

Mezi hlavní výhody infračervených teplotních senzorů patří jejich schopnost měřit teplotu bezkontaktně, což je ideální zejména pro měření teploty objektů, které jsou ve vysokých teplotách nebo jsou ve vzdáleném prostoru, a také pro aplikace, které vyžadují rychlé odezvy a vysokou přesnost.

Infračervené teplotní senzory jsou důležitým nástrojem v průmyslu, zdravotnictví, vědeckém výzkumu a mnoha dalších oblastech, kde jsou kladeny vysoké nároky na přesnost a spolehlivost měření teploty. Jejich široká aplikovatelnost a vlastnosti je činí nenahraditelnými prostředky pro monitorování teploty v moderním technologickém prostředí. [7]

2.2.4 Digitální teplotní senzory

Digitální teplotní senzory představují klíčový prvek v moderním průmyslu a technologii, umožňující přesné a spolehlivé monitorování teploty v širokém spektru aplikací.

Tyto senzory využívají digitální technologie k měření teploty a přenosu dat o teplotě do počítačového systému nebo mikrokontroléru. Jejich základní funkcí je konverze teplotních změn na digitální signál, který je pak snadno čitelný a zpracovatelný.

Princip fungování digitálních teplotních senzorů spočívá v detekci teplotních změn prostřednictvím různých senzorů, jako jsou termistory, termoelektrické senzory nebo snímače teploty založené na polovodičích. Tyto senzory generují analogový signál, který je pak digitalizován pomocí analogově-digitálního převodníku (ADC) a převeden na digitální hodnotu.

Digitální teplotní senzory nabízejí několik výhod, mezi něž patří vysoká přesnost měření, široký teplotní rozsah a možnost komunikace pomocí digitálních rozhraní, jako jsou I2C, SPI nebo UART. Díky tomu jsou tyto senzory snadno integrovatelné do různých elektronických zařízení a systémů.

Mezi hlavní aplikace digitálních teplotních senzorů patří průmyslové automatizace, lékařská diagnostika, meteorologie, spotřebiče a mnoho dalších. Jejich spolehlivost, přesnost a jednoduchá implementace je činí nezbytným nástrojem pro sledování teploty ve širokém spektru aplikací. [8]

Digitální senzor DS18B20

Digitální teploměr DS18B20, který byl vybrán pro tuto práci, poskytuje 9bitové až 12bitové měření teploty ve stupních Celsia. Komunikuje po sběrnici 1-Wire, která vyžaduje pouze jednu datovou linku (a zem) pro komunikaci s centrálním mikroprocesorem. Má rozsah provozních teplot od -55 °C do $+125\text{ °C}$ a má přesnost $\pm 0,4\text{ °C}$ v rozsahu -10 °C až $+70\text{ °C}$. Převádí teplotu na 12bitové digitální slovo za 400 ms. [9]

2.3 Způsob komunikace s nadřazeným systémem

2.3.1 UART

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) je komunikační protokol používaný pro sériovou komunikaci mezi zařízeními. Je to jednoduchý a univerzální způsob komunikace, který se často využívá pro přenos dat mezi mikrokontroléry, jako je Arduino, a dalšími zařízeními, včetně počítačů.

Princip fungování UART spočívá v tom, že data jsou posílána po jednotlivých bitech v rámci sériového proudu. Komunikace probíhá asynchronně, což znamená, že neexistuje

žádný společný hodinový signál mezi odesílatelem a příjemcem. Namísto toho jsou data synchronizována pomocí startovacího bitu na začátku každého přenosu a stopovacích bitů na konci.

UART využívá dva datové piny: TX (Transmit) pro odesílání dat a RX (Receive) pro jejich příjem. K odeslání dat mikrokontrolérem se nejprve nastaví požadovaná rychlost přenosu (baud rate), která určuje, jak rychle jsou bity posílány nebo přijímány. Poté se data posílají jeden bit po druhém, začínaje nejméně významným bitem, až po nejvíce významný bit.

Na straně příjemce jsou data zpracovávána stejným způsobem. Přijímací zařízení čte jednotlivé bity z datového proudu a skládá je zpět do původního datového slova. Pokud jsou data přijata správně, jsou zpracována a předána aplikaci nebo uložena do paměti.

Výhody UART zahrnují jeho jednoduchost, univerzálnost a spolehlivost. Je široce podporován v různých zařízeních a snadno se implementuje v softwaru. Nicméně, UART je obvykle omezen pouze na komunikaci mezi dvěma zařízeními a nemá funkce jako detekce chyb nebo řízení toku, které jsou k dispozici v pokročilejších komunikačních protokolech. [10]

2.3.2 USB

USB (Universal Serial Bus) je standardizovaný komunikační protokol a fyzické rozhraní, které se používá pro připojení různých zařízení k počítači, včetně Arduina a jiných mikrokontrolérů. USB je velmi rozšířený díky své jednoduchosti, rychlosti a univerzálnosti.

Princip fungování USB spočívá v tom, že zařízení připojená k počítači komunikují pomocí série "pakety" dat, které jsou přenášeny po jednotlivých liniích v kabelu. Existuje několik různých typů USB konektorů, například USB-A, USB-B, USB-Mini-B, USB-Micro-B nebo nejnovější typ USB-C.

USB umožňuje nejenom přenos dat, ale také napájení zařízení například z počítače, to znamená, že není potřeba externí zdroj napětí.

Existují různé verze USB standardu, které se liší v rychlosti přenosu dat a dalších funkcích. Například USB 1.1 může přenášet data rychlostí až 12 Mbps, zatímco novější verze USB 3.0 a 3.1 mohou dosáhnout rychlostí až 5 Gbps.

Celkově lze říct, že USB rozhraní je klíčovým prvkem pro komunikaci mezi dvěma zařízeními a poskytuje spolehlivý a rychlý způsob přenosu dat mezi těmito zařízeními. Díky své univerzálnosti a rozšířenosti je USB široce používáno v mnoha aplikacích od domácích projektů až po průmyslové systémy. [11]

2.3.3 RS-232

RS232 je starší technologie pro sériovou komunikaci mezi elektronickými zařízeními. Byla poprvé standardizována v roce 1962 společností Electronic Industries Association (EIA) a je stále široce používána i v dnešní době. Tato technologie umožňuje přenos dat mezi dvěma zařízeními pomocí sériového kabelu, jako jsou počítače, tiskárny, skenery nebo jiná elektronika.

RS232 využívá asynchronní komunikaci, což znamená, že data jsou přenášena po jednotlivých bitech a není potřeba synchronizace hodin. Pro přenos dat používá dva dráty - jeden pro přenos (TX) a druhý pro příjem (RX), a může mít také další dráty pro napájení a zem. Při komunikaci mezi dvěma zařízeními se jedno zařízení (vysílač) připojí k druhému (příjímači) pomocí sériového kabelu.

I když RS232 je starší technologie, stále má svá místa v průmyslu a v různých apli-

kacích. Jeho jednoduchost a spolehlivost jsou hlavními důvody jeho používání. RS232 je také kompatibilní s mnoha různými zařízeními a počítači a je často používán v systémech, které potřebují stabilní a spolehlivou komunikaci.

Nicméně, RS232 má i některé nevýhody. Patří mezi ně pomalý přenos dat oproti modernějším standardům, omezená rychlost a vzdálenost přenosu, potřeba sériového kabelu, což může být nepraktické v některých situacích, a citlivost na elektromagnetické rušení.

Celkově lze říci, že RS232 je stále důležitou součástí mnoha systémů a zařízení, přestože existují modernější alternativy. Jeho jednoduchost, spolehlivost a kompatibilita ho udržují v používání, ale je důležité si uvědomit jeho omezení a hledat alternativy tam, kde RS232 nedostačuje pro požadované aplikace. [12]

2.3.4 MAX232

MAX232 je integrovaný obvod, který převádí vyšší napěťové úrovně RS-232 na nižší úrovně vhodné pro moderní elektroniku, a naopak.

Je to dvoukanálový vysílač/přijímač, který umožňuje převod signálů RX, TX, CTS a RTS. Přijímače převádějí vstupní napětí RS-232 na standardní 5V TTL úrovně, zatímco vysílače poskytují výstupy s úrovněmi napětí RS-232 z 5V napájení.

MAX232 má výhodu v tom, že umožňuje snadné připojení starších zařízení používajících RS-232 k moderním zařízením, která používají nižší napěťové úrovně. Poskytuje jednoduché řešení na rozdíl od starších čipů, které vyžadovaly oddělené napájení a více čipů pro překlad signálů.

MAX232 se běžně používá v mnoha aplikacích, kde je zapotřebí spolehlivá sériová komunikace mezi zařízeními s různými napěťovými úrovněmi. [13]

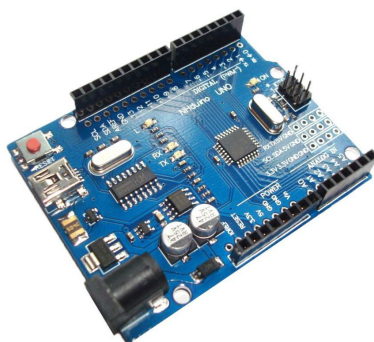
3 Řešení

3.1 Hardware

3.1.1 Mikrokontrolér

Mezi prvními úkoly, které se řešily, byl výběr mikrokontroléru. Jelikož je tato bakalářská práce tvořena pro Český metrologický institut, který již měl zakoupené dva mikrokontroléry: Arduino UNO a Raspberry Pi 4, tedy jejich čínské klony, tak bylo vybíráno z těchto dvou možností. Na základě předchozích zkušeností s Arduinem bylo rozhodnuto dělat HW doplněk pomocí Arduina.

Arduino bude zpracovávat data z teplotního senzoru a z etalonu, které bude přepočítávat, zobrazovat na displej a posílat po sériové lince do počítače.

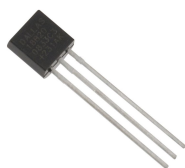


Obrázek 3.1: Arduino UNO R3 [14]

3.1.2 Teplotní čidlo

Při výběru teplotního čidla byla brána v potaz hlavně přesnost a cena. Nejdříve byl zvažován jen nějaký NTC termistor, ale pro snazší implementaci byl zvolen digitální teplotní senzor DS18B20, který má také nízkou cenu a ušetřil spoustu času při programování.

Tento senzor má dle datasheetu přesnost $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, ale testováním přímo na ČMI bylo zjištěno, že senzor ukazuje s přesností $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 3.2: Digitální senzor DS18B20 [15]

3.1.3 Displej

Při výběru displeje hráli roli hlavně požadavky na velikost a typ. Vybíralo se mezi LCD a OLED displeji. Pro lepší čitelnost a menší spotřebu energie bylo rozhodnuto, že se bude vybírat z OLED displejů.

Důležitým parametrem byla velikost zobrazovací plochy, protože požadavkem bylo zobrazovat nejen hodnotu tlaku, ale také aktuální hodnotu rotace kuličky a teplotu. Proto byla zvolena jako vhodná velikost úhlopříčky 2,42 palce.

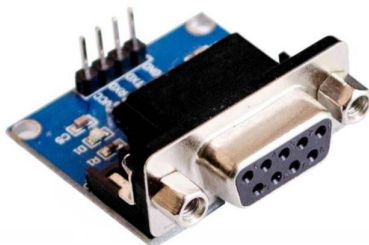
Zvolen byl tedy modrý OLED displej 128x64 pixelů s úhlopříčkou 2,42 palce komunikující pomocí SPI sběrnice.



Obrázek 3.3: OLED displej [16]

3.1.4 Převodník TTL na RS-232

Pro získávání dat o rychlosti rotace kuličky v etalonu a aktuálního tlaku do arduina je potřeba komunikace s etalonem, který má jako výstup RS-232 port. Proto byl použit převodník z TTL logiky na RS-232, který využívá čip MAX3232. Tento převodník je již vybaven RS-232 konektorem, do kterého stačí připojit kabel. Na obrázku 3.5 lze vidět schéma tohoto převodníku.

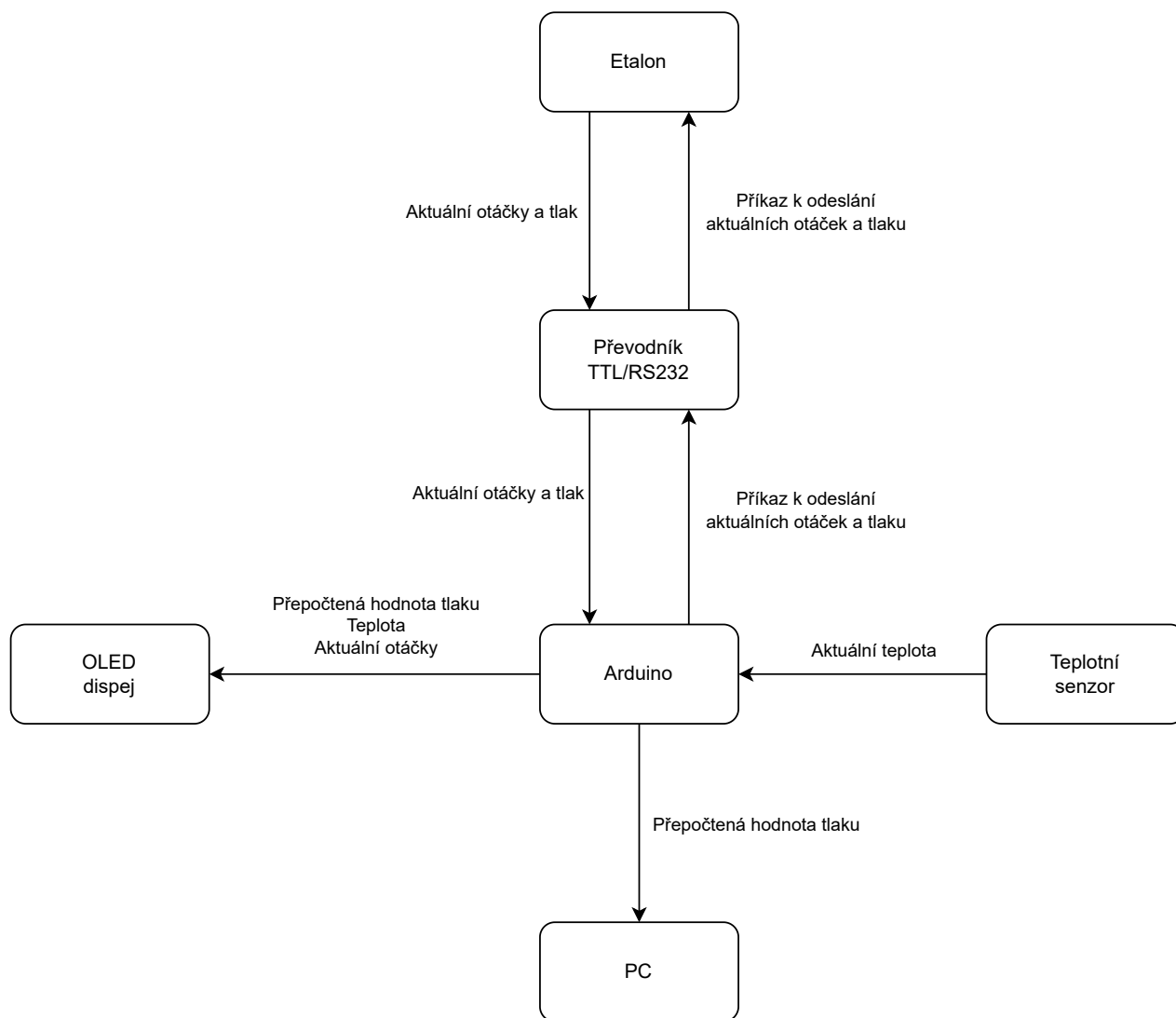


Obrázek 3.4: Převodník TTL na RS-232 [17]



Obrázek 3.7: Deska plošných spojů - spodní strana

3.3 Software



Obrázek 3.8: Diagram pracujícího algoritmu

Jednou z nejnáročnějších částí této práce bylo vytvoření správně fungujícího algoritmu. Diagram tohoto algoritmu lze vidět na obrázku 3.8, který popisuje funkci HW doplňku.

Zařízení bude muset načíst hodnotu aktuální teploty, poslat příkaz do etalonu pro získání hodnot aktuálních otáček kuličky a aktuálního (nepřesného) tlaku. Zpracovat tyto data a pomocí vzorce 3.1 vypočítat skutečnou hodnotu tlaku, kterou poté zobrazí na OLED displej a odešle po sériové lince do osobního počítače.

3.3.1 Programovací prostředí

Mikrokontroler byl programován v prostředí Arduino Integrated Development Environment neboli Arduino IDE. Toto rozhraní je velice uživatelsky přívětivé a má spoustu návodů na internetu. Programuje se v modifikované verzi jazyka C++.

3.3.2 Zpracování hodnot

Pro získání hodnoty teploty z teplotního senzoru byly použity knihovny `DallasTemperature.h` a `OneWire.h`. Funkcí `senzoryDS.begin()` se zapne komunikace knihovny s teplotním čidlem. Dále je v každém cyklu programu funkce `senzoryDS.requestTemperatures()`, která načte teplotu ze senzoru a funkcí `senzoryDS.getTempCByIndex(0)` je získána hodnota teploty přímo ve stupních celsia.

Získání hodnot z etalonu je o něco složitější. Jelikož jsou data poté posílána po sériové lince do PC, tak je potřeba komunikovat s etalonem pomocí knihovny `SoftwareSerial.h`, díky které lze nastavit sériovou komunikaci na některé piny arduina. RX a TX piny jsou tedy nastaveny pomocí funkce `mySerial(3, 2)` na piny 2 (TX) a 3 (RX). Tyto piny jsou připojeny na převodník společně s napájením a zemí.

Dále v cyklu programu jsou dvě funkce, které získávají hodnoty z etalonu. Tyto funkce jsou velmi podobné a každá z nich slouží k získání jedné hodnoty. První funkce tedy získá hodnotu aktuálních otáček kuličky v etalonu a druhá funkce získá aktuální (nepřesnou) hodnotu tlaku. Pro popsání těchto funkcí tedy postačí popsat pouze jednu z nich.

Funkce pro získání hodnoty aktuálních otáček kuličky nejprve odešle příkaz "RSP", který přijme etalon a v reakci na něj odešle zpět hodnotu aktuálních otáček kuličky. Hodnota ovšem přijde v datovém typu `char`. Znaky jsou tedy uloženy do stringu, který je následně pomocí funkce `toFloat()` převeden na datový typ `float`. Hodnota otáček je tedy uložena do proměnné a může se s ní dále pracovat. Pro získání hodnoty tlaku se postupuje stejně, akorát je použit příkaz "VAL".

Následuje výpočet skutečné hodnoty tlaku pomocí těchto hodnot podle vzorce 3.1, který byl dodán od ČMI, ale lze jej odvodit z rovnice 2.2, kde ztrátový součinitel $RD(\omega)$ je nastaven pro nejnižší používanou frekvenci rotace kuličky, aby výsledný vypočtený tlak nebyl v záporných hodnotách. Pro jeho správnou hodnotu je nutné jej tedy přepočítávat pro aktuální frekvenci.

V tomto vzorci lze vidět koeficient ϵ , který vyjadřuje úměrnost mezi ofsetem a frekvencí rotace kuličky. Tento koeficient byl získán experimentálním měřením na ČMI tak, že při konstantním tlaku byly kuličce udělovány různé velikosti frekvence. Z tohoto měření poté byla odvozena závislost ofsetu, který je vypočítán jako indikace SRG etalonu mínus skutečný tlak určený ionizačním vakuometrem, na frekvenci. Koeficient má velikost $2,47 \cdot 10^{-6}$.

Konstanta f_0 je nastavený ofset frekvence otáček kuličky na etalonu. Jelikož je kulička roztáčena na frekvenci 415 Hz a poté zpomaluje na frekvenci 405 Hz, při jejímž dosažení je opět roztáčena na horní hranici 415 Hz, tak je tento ofset nastaven na spodní hranici

405 Hz. Kdyby byl ofset nastaven na vyšší hodnotu a frekvence by byla nižší než je ofset, tak by tlak při výpočtu v etalonu vycházel v záporných číslech. Ofset frekvence tedy musí mít hodnotu spodní hranice frekvence otáček kuličky.

Konstanta t_0 je nastavený ofset teploty, který je nastaven na hodnotu 23°C. Tato hodnota je zvolena z toho důvodu, že se tato teplota v místnosti, kde je umístěn etalon, vyskytuje nejčastěji.

$$P_{ind} = [P_{val} - \epsilon(f - f_0)] \sqrt{\frac{273,15 + t_{real}}{273,15 + t_0}} \quad (3.1)$$

kde:

- P_{ind} je skutečná hodnota tlaku.
- P_{val} je aktuální hodnota tlaku v etalonu, která není přesná.
- ϵ je koeficient úměrnosti mezi ofsetem a frekvencí rotace kuličky.
- f je aktuální hodnota frekvence otáčení kuličky získaná z etalonu.
- f_0 je konstanta nastaveného ofsetu frekvence otáčení kuličky.
- t_{real} je aktuální teplota ze senzoru ve stupních Celsia.
- t_0 je konstanta nastaveného ofsetu teploty.

3.3.3 Zobrazení na displej

Dalším velmi důležitým krokem je zobrazit skutečnou hodnotu tlaku na displej. Méně důležité, ale spíše jako informativní veličiny zobrazené na displeji jsou aktuální teplota a frekvence otáčení kuličky.

OLED displej je připojen k mikrokontroleru pomocí SPI sběrnice. K zobrazení hodnot na displej je použita knihovna `U8glib.h`. V cyklu programu následuje funkce, která zobrazuje požadované hodnoty na displej. V této funkci je nastaven typ a velikost písma pomocí funkce `oled.setFont()`, umístění pozice začátku textu pomocí funkce `oled.setPrintPos()` a pro zobrazení daného textu slouží funkce `oled.print()`. Pomocí těchto tří funkcí jsou na displeji zobrazeny všechny veličiny.

Jelikož je skutečný tlak uložen jako číslo v proměnné `float` a na displeji má být zobrazen v exponenciálním tvaru, tak je pomocí funkce `dtostrf()` převeden do proměnné typu `char`. Hodnota je zobrazena na tři desetinná místa.

Z hlediska větší důležitosti je skutečný tlak na displeji zobrazen větším písmem a teplota s frekvencí otáčení kuličky mají písmo trochu menší. Jak vypadají zobrazené veličiny můžeme vidět na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: Veličiny zobrazené na displeji

3.3.4 Komunikace s nadřazeným systémem

Pro další zpracování hodnoty zpřesněného tlaku je tato hodnota posílána po sériové lince do osobního počítače. Skutečný tlak je opět převeden pomocí funkce `dtostrf()` do proměnné typu `char`, ale pro větší přesnost údaje má hodnota čtyři desetinná místa.

Pokud zařízení obdrží příkaz "VAL" z osobního počítače, tak v reakci na něj odešle hodnotu skutečného tlaku zpět do počítače. To je řešeno podmínkou `if (command == "VAL")` a pomocí funkce `Serial.println()`.

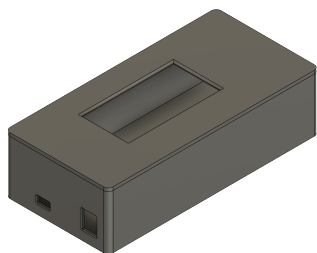
3.4 Návrh krabičky

Posledním krokem návrhu bylo vytvoření krabičky pro HW doplněk. Krabička slouží pro ochranu celého zařízení a také pro lepší vzhled. K vymodelování byl použit software Fusion 360 od společnosti Autodesk. Krabička byla poté vytisknuta na 3D tiskárně.

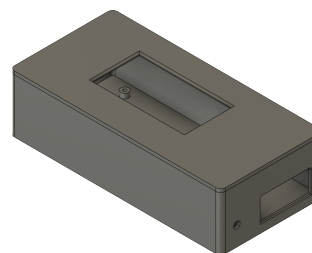
Celá krabička se skládá ze dvou částí, z krabičky a víka. Při jejím návrhu se bral velký zřetel na rozměry a to hlavně na šířku krabičky, protože na obou stranách jsou konektory, které musí mít dobrý přístup. Na jedné straně jsou výstupy z arduina, jeden sloužící ke komunikaci s PC a druhý k napájení, když zařízení zrovna není připojeno k PC. Na druhé straně se nachází konektor RS232, který slouží ke komunikaci s etalonem a také je tam umístěna svorkovnice pro teplotní senzor. Krabička má tedy celkem čtyři otvory.

Dále bylo potřeba zařízení v krabičce upevnit, to je vyřešeno pomocí dvou malých sloupků umístěných na dně krabičky, ve kterých je díra na vrut, kterým je zařízení ke krabičce upevněno skrze otvory v arduinu.

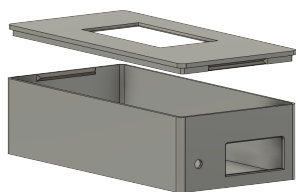
Víko bylo navrženo tak, aby na krabičce drželo pomocí zacvaknutí. Na vnitřních stranách krabičky tedy byly vytvořeny výstupky pod úhlem 45° a na víku zase drážky, do kterých tyto výstupky zapadly, viz obrázek 3.13. Ve víku je také velký otvor pro displej. Proto musela být výška krabičky také přesně zvolena, aby nebyl displej schovaný uvnitř.



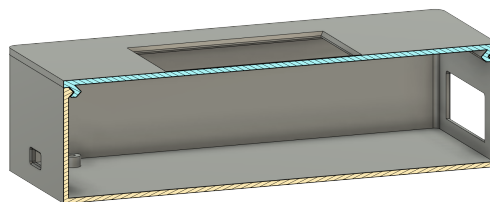
Obrázek 3.10: Levá strana krabičky



Obrázek 3.11: Pravá strana krabičky



Obrázek 3.12: Krabička se zvednutým víkem



Obrázek 3.13: Řez krabičkou

3.5 Testování

Tato závěrečná kapitola se bude věnovat celkovému sestavení výrobku, jeho funkčnosti a zhodnocení výsledků.

3.5.1 Sestavení

Po obdržení desky plošných spojů následovalo její osazení. Na desku je následně nasazen převodník TTL na RS232 a pomocí distančních sloupků upevněn k desce. Dále je na desku nasazen displej, který je rovněž upevněn pomocí distančních sloupků. Do svorkovnice je zapojen teplotní senzor, ten je ale nejprve provlečený dírou v krabičce.



Obrázek 3.14: Sestavené zařízení

Tento celek je umístěn do krabičky a upevněn pomocí dvou vrtů ke dnu krabičky, aby byl zamezen pohyb v této krabičce. Na krabičku je nacvaknuté víko, které doléha k displeji.

Pomocí kabelu s RS232 konektory je zařízení připojeno k etalonu a pomocí externího

zdroje je napájeno arduino. Teplotní čidlo je umístěno přímo na měřící hlavu etalonu pro co nejpřesnější měření teploty.

Na displeji je zobrazen přepočítaný tlak, frekvence otáček kuličky a teplota. Data jsou na displeji obnovována po 5 sekundách.



Obrázek 3.15: Kompletní zařízení v krabici

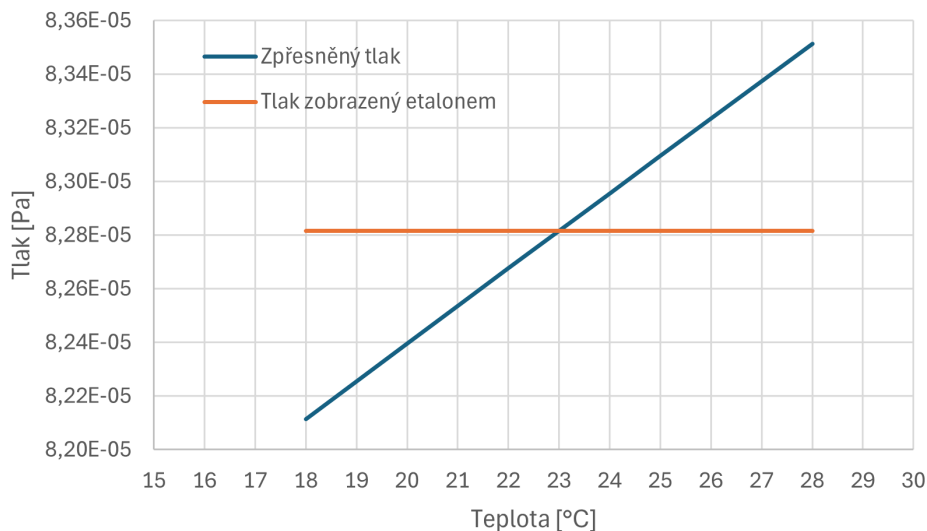
Zařízení je umístěno přímo na etalonu pro dobrý přehled dat. Na obrázku 3.16 lze vidět porovnání hodnot, které zobrazuje etalon a které jsou zpřesněny přepočtem. Rozdíl těchto hodnot je při malých tlacích poměrně veliký.



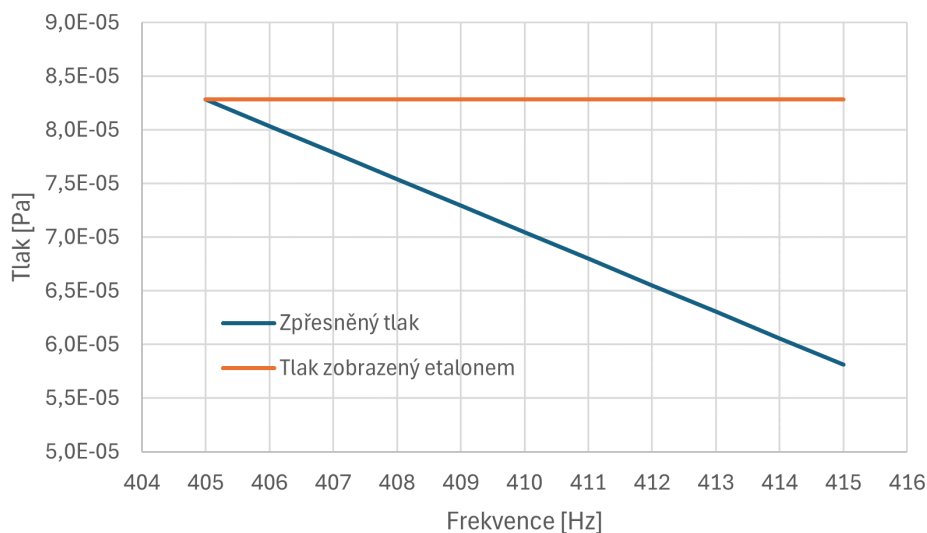
Obrázek 3.16: HW doplněk s etalonem

3.5.2 Porovnání hodnot

Na obrázcích 3.17 a 3.18 můžeme vidět jak velký vliv má teplota a frekvence rotace kuličky na hodnotu tlaku. Vliv těchto veličin je lineární, což jde poznat z rovnice 3.1.



Obrázek 3.17: Graf závislosti tlaku na teplotě

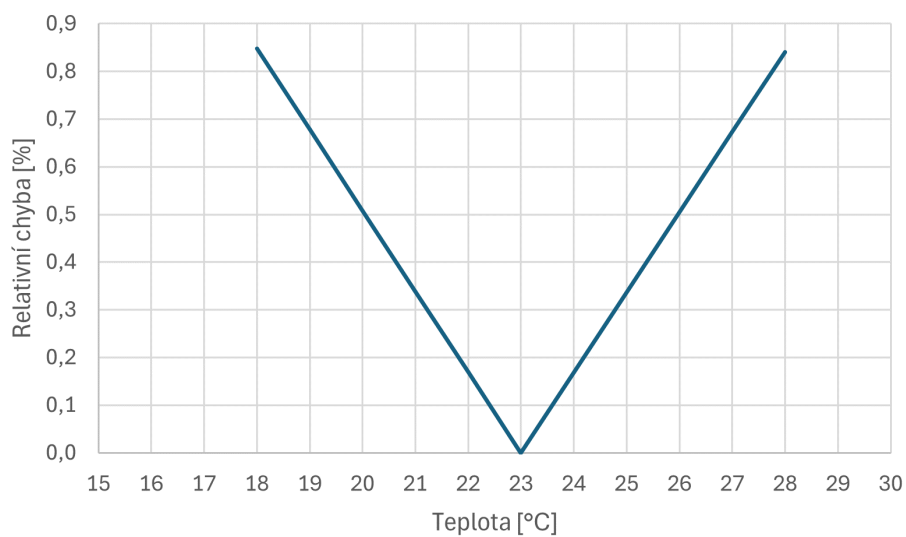


Obrázek 3.18: Graf závislosti tlaku na frekvenci rotace kuličky

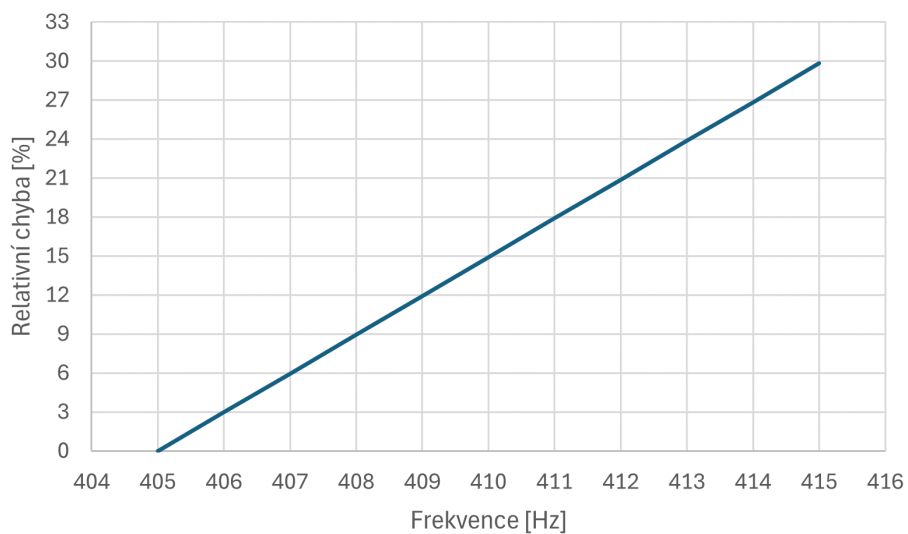
Na obrázcích 3.19 a 3.20 lze vidět vliv teploty a frekvence rotace kuličky na relativní chybu. Při porovnání těchto dvou veličin je zřejmé, že frekvence má mnohem větší vliv na chybu než teplota.

Zatímco teplota, která se v laboratoři ČMI pohybuje mezi 20 až 25 °C, způsobí při změně o 1 °C chybu nějakých 0,15 %, tak frekvence rotace kuličky, která se pohybuje v

rozmezí od 405 Hz do 415 Hz, způsobí chybu až 30 %. Aktuální hodnota frekvence rotace kuličky je tedy opravdu důležitá pro určení přesné hodnoty tlaku.



Obrázek 3.19: Graf závislosti relativní chyby na teplotě



Obrázek 3.20: Graf závislosti relativní chyby na frekvenci rotace kuličky

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zkonstruovat hardwarový doplněk pro zpřesnění údaje viskózního etalonu vakua, který je využíván v laboratoři Českého metrologického institutu.

V první části této práce je popsán princip a fungování viskózního etalonu s rotující kuličkou. Dále byla provedena rešerše způsobů měření teploty, pomocí které byl později zvolen vhodný teplotní senzor. Následuje také rešerše o způsobu komunikace s nadřazeným systémem, kde je rozebrán UART, USB, RS-232 a převodník MAX232, který slouží k převodu TTL logiky na RS-232.

V další části je popsáno samotné řešení této práce. Nejdříve byl vybírán hardware, jehož hlavním prvkem je mikrokontrolér. Vybráno bylo Arduino UNO. Teplotní senzor pro tuto práci byl zvolen velmi rozšířený DS18B20, který má dostatečnou přesnost $\pm 0,4$ °C. Při výběru displeje se rozhodovalo mezi LCD a OLED, zvolen byl nakonec OLED displej 128x64 pixelů s úhlopříčkou 2,42 palce komunikující pomocí SPI sběrnice. Jelikož arduino pracuje s logickou úrovní 5 V a etalon využívá ke komunikaci RS-232, který má logickou úroveň ± 12 V, tak byl použit převodník TTL na RS-232, který využívá čip MAX3232.

V části 3.2 je popsán návrh desky plošných spojů. Ta slouží k propojení všech hardwarových prvků a také pomáhá k větší pevnosti a odolnosti zařízení. Deska byla navržena pomocí softwaru EasyEDA. Byla navržena takovým způsobem, aby ji bylo možné přímo nasadit na arduino. Komponenty jsou k desce připojeny pomocí kolíkových lišt a upevněny distančními sloupky, což umožňuje jejich případnou výměnu.

V další části, tedy 3.3, je rozebrán software pro arduino. Mikrokontrolér byl programován v prostředí Arduino IDE. Na obrázku 3.8 lze vidět diagram pracujícího algoritmu. Arduino načte aktuální hodnotu teploty a odešle příkaz k odeslání hodnoty frekvence rotace kuličky a tlaku. Po přijetí těchto hodnot je zpracuje a vypočte zpřesněnou hodnotu tlaku pomocí vzorce 3.1. Tuto zpřesněnou hodnotu poté zobrazí na displej společně s aktuální teplotou a frekvencí rotace kuličky. Zpřesněnou hodnotu také odešle do osobního počítače pro její další zpracování.

Další část je věnována návrhu krabičky pro zhotovené zařízení. K jejímu vymodelování byl použit program Fusion 360 od společnosti Autodesk. Krabička byla následně vytisknuta na 3D tiskárně v MechLabu. Celý návrh je popsán v kapitole 3.4.

Poslední část této práce se věnuje sestavení, testování a porovnání hodnot. Zařízení pracuje správně dle požadavků a je umístěno přímo na ČMI. Při porovnání hodnot bylo zjištěno, že mnohem větší vliv na nepřesnost má frekvence rotace kuličky, což je popsáno v části 3.5.2.

Všechny cíle této práce se podařilo splnit. Dalším vylepšením by mohlo být například upravení softwaru tak, aby se zařízení chovalo jako prostředník při potřebě poslat nějaké příkazy z počítače přímo do etalonu bez nutnosti odpojování zařízení a připojování počítače přímo k etalonu.

Literatura

- [1] FREMEREY, J. K. The spinning rotor gauge. *Journal of Vacuum Science & Technology A* [online]. 1985, roč. 3, č. 3, s. 1715–1720 [cit. 2024-05-06]. ISSN 0734-2101. Dostupné z DOI: 10.1116/1.573007.
- [2] FEDCHAK, James; ARAI, Kenta; JOUSTEN, Karl; SETINA, Janez; YOSHIDA, Hajime. Recommended practices for the use of spinning rotor gauges in inter-laboratory comparisons. In: *Measurement* [online]. 66. vyd. Elsevier, 2015, s. 176–183 [cit. 2024-05-06]. ISBN 0263-2241. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.012>.
- [3] *Termistor* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termistor>.
- [4] *Termistor* [online]. 2011. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/termistory/1857657>.
- [5] *Termočlánek* [online]. 2023. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://botland.cz/blog/termoclanek-co-to-je-princip-fungovani-a-pouziti/>.
- [6] *Termočlánek* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termo%C4%8Dl%C3%A1nek>.
- [7] ROGALSKI, Antoni. Infrared detectors: Status and trends. *Progress in quantum electronics* [online]. 2003, roč. 27, s. 59–210 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z DOI: 10.1016/S0079-6727(02)00024-1.
- [8] *ElectronicDesign* [online]. 2008. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/industrial/boards/article/21756038/digital-temperature-sensors>.
- [9] *DS18B20* [online]. 2004. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf>.

- [10] *UART* [online]. 2004. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>.
- [11] *USB* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/USB>.
- [12] *RS-232* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/RS-232>.
- [13] *MAX232* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/MAX232>.
- [14] *Arduino UNO R3* [online]. 2013. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://dratek.cz/photos/produkty/f/1/1353.jpg?m=1502871143>.
- [15] *DS18B20* [online]. 2013. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://dratek.cz/photos/produkty/f/1/1187.jpg?m=1645792998>.
- [16] *OLED displej* [online]. 2021. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.laskakit.cz/user/shop/big/3545_3545-2-42-128x64-oled-displej-spi-bily.jpg?6137b46c.
- [17] *TTL na RS232* [online]. 2021. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.laskakit.cz/user/shop/big/2930_prevodnik-ttl-na-rs232--max3232.jpg?61d95d02.
- [18] *TTL na RS232 schéma* [online]. 2021. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/prevodnik-ttl-na-rs232--max3232/>.

Seznam obrázků

2.1	Schéma etalonu SRG	10
2.2	Schematická značka termistoru	13
2.3	Termistor	14
2.4	Termočlánek	15
3.1	Arduino UNO R3	19
3.2	Digitální senzor DS18B20	19
3.3	OLED displej	20
3.4	Převodník TTL na RS-232	20
3.5	Schéma převodníku TTL na RS-232	21
3.6	Deska plošných spojů - vrchní strana	21
3.7	Deska plošných spojů - spodní strana	22
3.8	Diagram pracujícího algoritmu	22
3.9	Veličiny zobrazené na displeji	25
3.10	Levá strana krabičky	25
3.11	Pravá strana krabičky	25
3.12	Krabička se zvednutým víkem	26
3.13	Řez krabičkou	26
3.14	Sestavené zařízení	26
3.15	Kompletní zařízení v krabičce	27
3.16	HW doplněk s etalonem	27
3.17	Graf závislosti tlaku na teplotě	28
3.18	Graf závislosti tlaku na frekvenci rotace kuličky	28
3.19	Graf závislosti relativní chyby na teplotě	29
3.20	Graf závislosti relativní chyby na frekvenci rotace kuličky	29

Seznam příloh

- **DPS:** Složka obsahující schéma desky plošných spojů a 3D model DPS.
- **Kód:** Složka se zdrojovým kódem.
- **Krabička:** Složka obsahující výkresy krabičky a víka, 3D model krabičky a vyexportovaný projekt ze softwaru Fusion 360.