

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Matěj Kuchař**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Martin Appel, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh a konstrukce regulátoru pro automatizované kalibrace měřidel vakua

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je seznámení s aktuálním stavem provádění kalibrací měřidle vakua a dostupným hardware v laboratoři Českého metrologického institutu a poté návrh a zprovoznění regulačního a obslužného softwaru pro komunikaci s etalony Baratron a kalibrovanými měřidly v oblasti vakua (0,1 Pa až atmosférický tlak). Součástí práce bude i volba vhodného programového prostředí (LabView, jazyk C#, případně jiné dle zkušeností studenta) a vhodné platformy (osobní počítač, Raspberry, BeagleBone, Orange...). Zvolený systém musí umožnit realizaci regulátoru pomocí strukturovaného a snadno modifikovatelného programového kódu. Výsledný systém umožní autonomní řízení a provádění kalibrací na vakuové aparatuře v reálném čase, jež zahrnuje zejména čtení hodnot tlaku etalonu a kalibrovaných měřidel (sériová komunikace, GPIB, napětíové výstupy), ovládání ventilů regulujících tlak v aparatuře a vyhodnocování a ukládání získaných dat ve formě snadno importovatelné do běžných tabulkových procesorů. Součástí práce může být i návrh doplnění hardwarového vybavení a jeho realizace.

Cíle bakalářské práce:

- Popis dostupného hardware a možných způsobů komunikace s ním.
- Rozbor potřebné přesnosti odečtu analogových signálů vakuometrů a návrh jeho realizace.
- Návrh způsobu regulace tlaku.
- Celkový návrh a popis funkčního schématu regulátoru a formátu výstupních dat.
- Realizace regulátoru a jeho zprovoznění.

Seznam doporučené literatury:

GREPL, Robert. Kinematika a dynamika mechatronických systémů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3530-8

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

Cílem této práce je zrychlení a zpřesnění kalibrace, protože předtím byl používán mechanický ventil pro nastavení požadovaných tlaků. K dosažení automatizace byl navržen a realizován systém, který využívá ADS 1256 pro čtení analogového signálu, EVR 116 pro regulaci tlaku a etalony pro měření tlaku při kalibraci a celý systém je řízen z Raspberry Pi. Výsledky ukazují, že regulátor si vede dobře, až na problémy s nízkými tlaky, ty jsou však způsoben nedokonalostí aparatury.

KLÍČOVÁ SLOVA

Automatizace, kalibrace, vakuum, vakuometry, regulace, analogový signál, A/D převodník, ADS 1256, Raspberry Pi, EVR 116

ABSTRAC

The aim of this work is to accelerate and enhance calibration, as previously a mechanical valve was used to adjust the desired pressures. To achieve automation, a system utilizing ADS 1256 for reading analog signal, EVR 116 for regulation, and standards for pressure measurement during calibration was designed and implemented, with the entire system controlled by Raspberry Pi. The results indicate that the controller performs very well but struggles with low pressures, which are, however, caused by imperfections in the apparatus.

KEYWORDS

Automation, calibration, vakuum, vakuum gauges, regulation, analog signal, A/D converter, ADS 1256, Raspberry Pi, EVR 116

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUCHAŘ, Matěj. *Návrh a konstrukce regulátoru pro automatizované kalibrace měřidel vakua* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157529>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Martin Appel

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování vedoucímu práce za jeho cenné rady a postřehy při tvorbě této práce.
Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia pomáhali a podporovali a motivovali k jeho dokončení.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně 24.5.2024

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	CÍLE PRÁCE	7
3	SEZNÁMENÍ S DOSTUPNÝM HARDWAREM	8
3.1	Dostupný hardware	8
3.1.1	Vývěvy	9
3.1.2	Vakuometry	10
3.1.3	Ventily	12
3.1.4	Signály a komunikace	14
3.2	Dokoupený hardware	16
3.2.1	Raspberry Pi 4b	16
3.2.2	Papouch I/O deska Quido ETH 4/4	19
4	ZPRACOVÁNÍ ANALOGOVÉHO SIGNÁLU	20
4.1	Úprava napěťového výstupních signálů	20
4.2	Úprava proudového výstupu	21
4.3	Záznam hodnot z A/D převodníku	22
4.4	Kalibrace vstupů A/D převodníku	23
4.4.1	Kalibrace napěťových vstupů	24
4.4.2	Kalibrace proudových vstupů	25
4.4.3	Výsledky kalibrace	26
5	NÁVRH A REALIZACE REGULÁTORU	27
5.1	Kritéria pro regulaci	27
5.2	Návrh regulátoru	28
5.3	Realizace	30
5.4	Ověření správnosti funkce regulátoru	31
6	AUTOMATIZACE KALIBRACE VAKUOMETRŮ	36
6.1	Proces kalibrace vakuometrů	36
6.2	Vyčerpání aparatury	38
6.3	Záznam hodnot	39
6.4	Grafické rozhraní (GUI)	40

7	ZÁVĚR	42
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	45
10	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	46
10.1	Seznam obrázků	46
10.2	Seznam Tabulek	47
10.3	Seznam Grafů	47
11	SEZNAM PŘÍLOH	48
11.1	Příloha č.1 – Zjednodušené elektrické schéma zapojení olejové vývěvy	48
11.2	Příloha č.2 – Citlivostní koeficienty tlaku na napětí pro měrky s logaritmickým výstupem [9]	49
11.3	Příloha č.3 - Činnost systému	52

1 ÚVOD

V dnešní době je snaha, co nejvíce procesů zefektivnit a zpřesnit. Tím se zabývá právě automatizace. Jejímž cílem je využití moderních technologií k usnadnění, zrychlení a zpřesnění procesů.

To platí i pro kalibrace, u kterých se správně zpracovanou automatizací urychlí a zpřesní celý proces. Dále se tím i sníží riziko chyby, které se může do procesu kalibrace vnést člověk. Zejména když se jedná o procesy, u kterých je dbáno na velkou přesnost.

Cílem této práce je aplikovat tyto myšlenky na kalibraci vakuometrů. Kde je snahou, navrhnutím regulátoru, který společně s motorizovaným ventilem, dosáhne větší přesnosti nastavených tlaků, dále využití A/D převodníku, lépe odečítat analogové signály z vakuometrů. A využitím vhodné platformy dojde k propojení těchto dílčích cílů.

Na základě seznámení s dostupným hardwarem a funkcí systému dojde k návrhu řešení pro, které se vybere vhodný hardware, jako vhodný A/D převodník a programovací jazyk pro realizaci.

2 CÍLE PRÁCE

1. Popis dostupného hardware a možných způsobů komunikace s ním.
 2. Rozbor potřebné přesnosti odečtu analogových signálů vakuometrů a návrh jeho realizace.
 3. Návrh způsobu regulace tlaku.
 4. Celkový návrh a popis funkčního schématu regulátoru a formátu výstupních dat.
 5. Realizace regulátoru a jeho zprovoznění.
- K těmto 5 cílům bych ještě dodal tyto cíle:
6. Automatizace procesu kalibrace vakuometrů
 7. Tvorba grafického rozhraní pro jednoduchou obsluhu kalibrace

3 SEZNÁMENÍ S DOSTUPNÝM HARDWAREM

Pro realizaci regulátoru a automatizace celé je k dispozici hardware ze stávající aparatury. Je nutné se seznámit s funkcí tohoto hardwarem a pochopit funkci celé kalibrace vakuometrů.

K tomuto hardwaru, je však nutné vybrat a objednat i nový hardware, který doplní stávající hardware k automatizaci celého procesu kalibrace vakuometrů.

3.1 Dostupný hardware

Na Obr.č.1 fotka aparatury s částí dostupného hardwaru. Lze tam vidět tlakovou nádobu, na které je připevněný mechanický krokový ventil. Na spodní část je připevněný deskový ventil, který odděluje tlakovou nádobu od turbomolekulární vývěvy. Mezi další hardware, který je k dispozici je vakuometr MKS Baratron 690 s vyhodnocovací jednotkou MKS 670B, ventil Pfeiffer EVR 116 s komunikační jednotka IF 200, vakuometr Inficon Porter CDG020D a olejová vývěva.



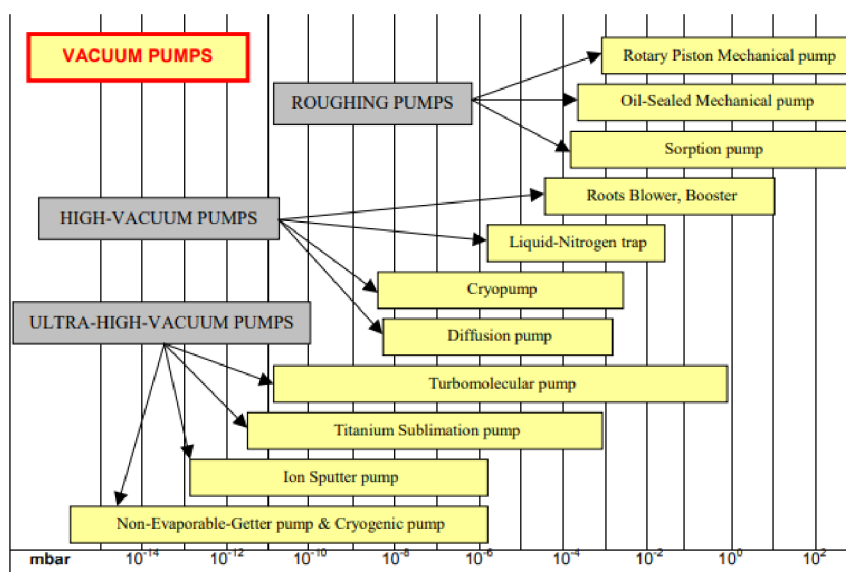
Obrázek 1 Foto aparatury

3.1.1 Vývěvy

Pro vyčerpání vzduchu z aparatury se používají vývěvy (pumpy). Protože nelze dosáhnout z atmosférického tlaku přímo na nízké tlaky (Obrázek 2) okolo 0.001 Pa, což je nejnižší rozlišitelný tlak na této aparatuře, tak se využívají dvě vývěvy pro vyčerpání vzduchu.

První je olejová vývěva, která nasává pomocí lopatek vzduch a následně se ten vzduch stlačuje a díky oleji, který vzduch utěsňuje, je možné dosáhnout větších kompresních poměrů [1]. Nejnižší tlak, který se dá dosáhnout na aparatuře pomocí jednostupňové olejové vývěvy, je okolo 30 Pa.

Přibližně od 30 Pa se potom začne využívat turbomolekulární vývěva. Protože atmosférický tlak je pro výstup této vývěvy příliš velký, je před čerpána membránovou vývěvou, udržující na výstupu turbomolekulární vývěvy tlak okolo 300 Pa. Tuto skutečnost mi vysvětlil pan Vičař. Princip funkce turbomolekulární je ten, že molekuly nasávaného vzduchu dopadají na povrch rotoru, který je většinou diskového tvaru s natočenými lopatkami a spolu s povrchem statoru tvoří mezilehlé prostory, kterými jsou molekuly transportovány ze vstupu vývěvy k jejímu výstupu. Rotor vývěvy se otáčí se na vysokých otáčkách (1500 Hz), dopadem na rotor dostávají molekuly vzduchu impuls ve směru požadovaného toku [1].



Obrázek 2 Ukázka rozsahu vývěv. Převzato z [2]

3.1.2 Vakuometry

Jako etalony vůči, kterým se kalibruje jsou MKS Baratron 690 a Inficon Porter CDG020D. Stejně jako u vývěv, je nutné použít dva vakuometry pro pokrytí celého rozsahu tlaků pro kalibraci.

MKS Baratron 690 a MKS TYPE 670B

Jeho rozsah je 0,001 Pa až 13333 Pa (100 Torrů). Je to vakuometr pro měření absolutního tlaku, který měří tlak pomocí kapacitně snímané výchylky membrány. Výstupní signál manometru je napěťový signál 0-10 VDC.

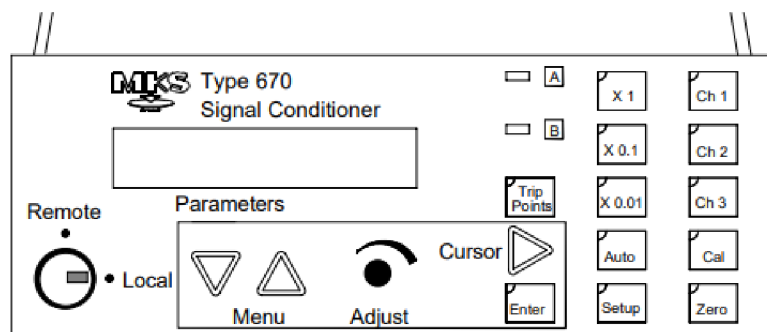
Převod napětí na tlak má na starost vyhodnocovací jednotka MKS TYPE 670B, která je připojena k MKS 690B. Pro zobrazení tlaku je k dispozici displej. Dále přední panel nabízí funkce pro upravení přesnosti zobrazení tlaku, funkce pro vynulování, kalibrování nuly.

Pro komunikaci s ostatními zařízeními je k dispozici konektor RS 232. S následujícími parametry [3]:

Tabulka 1 Parametry pro sériovou komunikaci s MKS TYPE 670B

Baud Rate	9600
Number of data bits	8 bitů
Parity	No
Stop bits	1

Jak je patrné z Obrázek 3, jsou 2 možné módy použití Remote a Local, které udávají, jak se bude vyhodnocovací jednotka ovládat, zejména co se týče nastavení. Tyto módy však neovlivňují čtení tlaku. To probíhá pomocí příkazu „@20?r“ [3]. Na tento dotaz je vrácen příkaz ve formátu „@20 XXXr“, kde XXX je hodnota tlaku ve zvolených jednotkách.

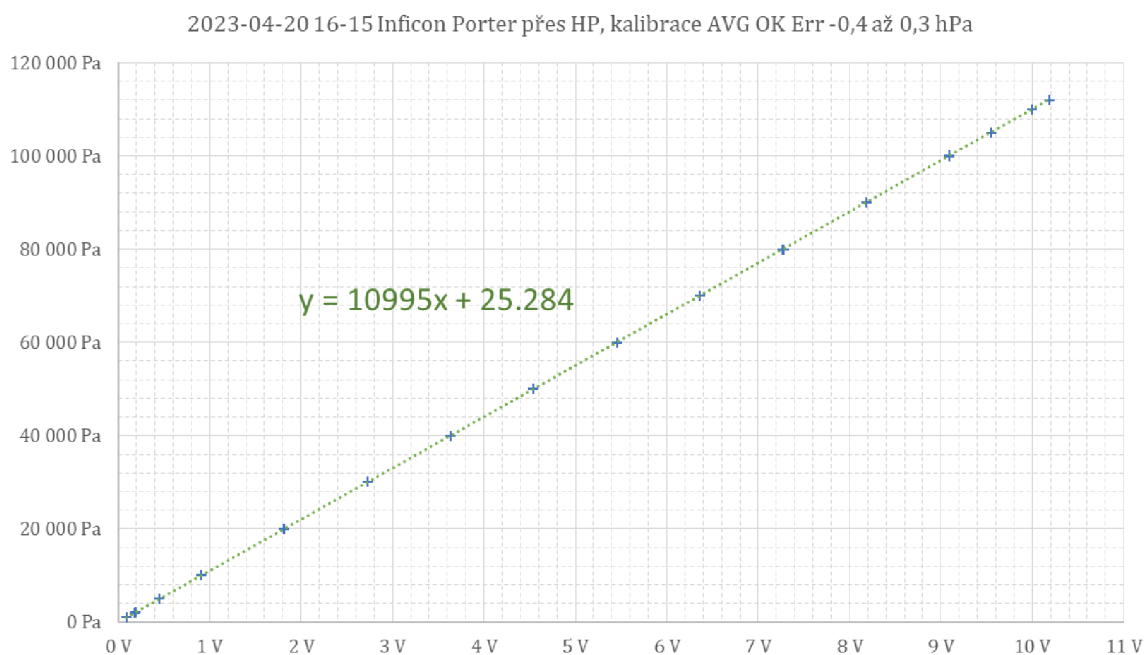


Obrázek 3 Přední panel MKS TYPE 670B Převezato z [3]

Inficon Porter CDG020D

Jedná se o manometr, který má rozsah 0-11000 Pa. Výstupní signál je analogový s 0-10 VDC. Výstupní hodnoty manometru jsou čteny A/D převodníkem.

Závislost napětí na tlaku je lineární a zobrazena na Grafu č. 1. Graf byl převzat jako obrázek, pro doplnění na ose vodorovné je napětí ve Voltech a na svislé je tlak v Pascalech. Tento manometr bude v konečném řešení využíván pro tlaky větší než 10 500 Pa a navazuje na MKS Baratron 690.



Graf 1 Závislost tlaku na napětí pro Inficon Porter CDG020D Převezat z [4]

3.1.3 Ventily

Pro napouštění vzduchu do aparatury je k dispozici ventil Pfeiffer EVR 116 s komunikační jednotka IF 200. Pro ovládání čerpání plynu z aparatury je k dispozici deskový ventil (Obrázek 4).

Pfeiffer EVR 116 a komunikační jednotka IF 200

Jedná se o ventil s motorizovanou jednotkou, který slouží k řízenému napouštění plynu do vakuového systému. Nabízí možnost nastavit až 6780 pozic. Pro ovládání se dá použít analogový signál 0-10 VDC nebo pomocí komunikační jednotky Pfeiffer IF 200.

Komunikační jednotka využívá pro komunikaci sériové rozhraní RS 232, s parametry viz. Tab.č.2. Nabízí dva módy pro komunikaci, analogový a digitální [5].

Tabulka 2 Parametry sériové komunikace s IF 200

Baud Rate	300
Number of data bits	7 bitů
Stop bits	2

V analogovém módu se posílá napětí od 0,5 V, kdy je ventil zavřený až po 9 V, kdy je ventil plně otevřený. Tyto napětí reprezentují polohu ventilu [5].

Komunikace analogovým módem je výchozí po zapnutí jednotky, proto je nutné zvolit digitální mód příkazem „h02\r\n“. Že se příkaz správně provedl, je možné zjistit tak, že je zpět poslána zpráva, pouze s tím rozdílem, že tam velké písmeno místo malého, které inicializuje komunikaci, např.: „H02\r\n“. Dále je nutné na konci příkazu uvést znaky „\r\n“, které ukončují komunikaci (zaslaný povel) a znamenají přechod na nový řádek.

Pro nastavení polohy se mohou použít dva možné přístupy. První je nastavení rozdílu mezi stávající a novou polohou a druhý je nastavení absolutní polohy ventilu. Pro nastavení absolutní polohy je však nutné požadovanou polohu vydělit 2 a následně ji převést do šestnáctkové soustavy, viz (1) Příklad příkazu pro nastavení absolutní polohy „gd34\r\n“ [5].

$$\text{Poloha} = \frac{6780}{2} = 3380 \rightarrow d34 \quad (1)$$

Deskový ventil

Tento ventil slouží společně s turbomolekulární vývěvou k vyčerpání plynu z aparatury.

Celý princip je založený na posouvání páčky, o kterou je na Obr.č.4 opřený, dopředu a dozadu. Tímto pohybem se ventil zavírá a otevírá. Tento pohyb je brán ze zavřeného stavu, jak je na Obrázek 4. V poloze zavřeno je možné ještě pohnout páčkou nahoru, tím se ventil zajistí a utěsní.



Obrázek 4 Deskový ventil

Pneumatický ventil

Pro ovládání vstupů na aparatuře je k dispozici pneumatický ventil. Řízen je 24 VDC, které jsou pro změnu polohy ventil přivedeny na jeho ovládací jednotku. Ta za pomoci vzduchu zavřen nebo otevřen.



Obrázek 5 Pneumatický ventil

3.1.4 Signály a komunikace

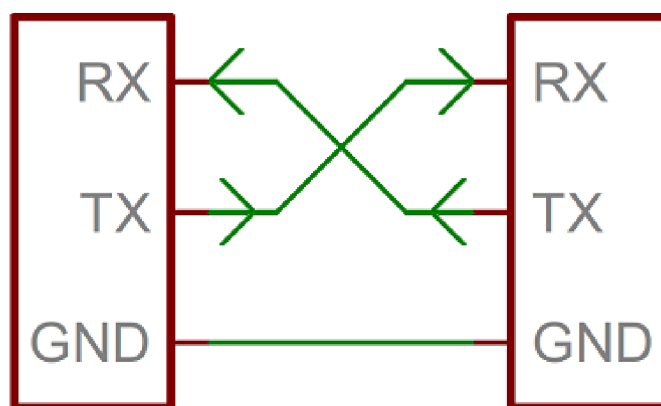
Kromě hardwaru, je nutné se seznámit i se signály a komunikací, které jsou využívány. Jedná se o sériovou komunikaci RS 232 a analogové výstupy z vakuometrů.

Sériová komunikace RS 232 a TTL

Jedná se o standart sériové komunikace, který pro komunikaci potřebuje tři piny, TX – reprezentuje přenos, RX – reprezentuje příjem a GND – reprezentující potenciál 0. Tyto piny jsou mezi dvěma zařízeními propojeny podle Obrázek 6.

Samotná komunikace probíhá, tak že si zařízení mezi sebou vyměňují signály ve formě napětí, které pro RS 232 nejčastěji je +13 V, které reprezentuje počáteční bit (start bit) nebo bitovou hodnotu 0 a druhý signál je -13, který reprezentuje nečinný stav (idle line), stop bit nebo bitovou hodnotu 1. Samotná příkaz je poslaný v bitové tvaru pomocí 0 a 1. [6]

Obdoba RS 232 pro mikrokontrolery je TTL (Transistor – transistor logic), která oproti RS 232 funguje na napětích 3,3 V nebo 5 V, která jsou přijatelná pro mikrokontrolery. [6]



Obrázek 6 Propojení pinů pro sériovou komunikaci Převzato z [6]

Analogový a digitální signál

Mezi signály, které mohou reprezentovat hodnoty veličin z čidel, jsou analogové a digitální signály.

Analogový signál je spojitý signál, který se mění v čase, zároveň existuje nekonečné množství hodnot v rozsahu daného signálu např. 0-10 V. Samotný analogový signál je elektrický signál, který je definován napětím, proudem nebo frekvencí signálu a velikost signálu je vypočtena jako odezva na měřenou veličinu. [8]

Digitální signál je oproti tomu posloupnost diskrétních hodnot, které nabývají omezeného počtu hodnot. Nejčastěji to bývají hodnoty 0 a napájecí napětí (např. 5 V). Digitální signál se používá hlavně kvůli digitálním zařízením (např. počítače). [8]

Pro převod analogových signálu z měrek na digitální signál do počítačů pro zpracování se využívá A/D převodník, respektive D/A převodník, který provádí převod mezi těmito dvěma signály.

3.2 Dokoupený hardware

K již dostupnému hardwaru, je nutné vybrat a koupit vhodný hardware. Zejména se jedná o mikrokontroler nebo počítač, který bude řídit celou kalibraci. Dále A/D převodník pro zaznamenání výstupních analogových signálů, převodníky pro sériovou komunikaci RS 232 a relé pro ovládání dalších zařízení.

3.2.1 Raspberry Pi 4b

Raspberry Pi 4b (RPI 4b) je deskoptový počítač, který byl zvolen pro řízení celého procesu kalibrace. Disponuje USB porty, USB-C pro připojení displeje nebo LAN port pro připojení k internetu. Nejčastěji se na něm využívá operační systém založený na Linuxu.

Oproti klasickému počítači je k dispozici 40 pinový header, který se využívá pro připojení zařízení napájených na 3,3V nebo 5 V. Hlavním důvodem zvolení RPi 4b je přítomnost 6 UART portů pro připojení sériové komunikace. Starší verze mají pouze 2 porty UART pro připojení sériové komunikace.

Kromě RPi bylo nutné zvolit i příslušenství pro připojení sériové komunikace a A/D převodník. Byly zvoleno toto příslušenství:

Převodník TTL na RS232

Tento převodník slouží pro připojení komunikace RS 232 na RPi převodem na TTL. Toto zařízení se však pro připojení sériové komunikace z Ventilů EVR 116 a MKS 670 neosvědčil, tak místo něj je použita redukce z RS 232 na USB.

Pro komunikaci mezi zařízeními se sériovým výstupem a RPi je využívána knihovna pyserial [7].

ADS 1256

Jedná se o ADC převodník, na který se dá připojit až 8 analogových signálů. Rozlišení tohoto převodníku 24 bitů a maximální vzorkovací frekvence je 30k Hz. S RPi komunikuje pomocí SPI.

Rozhodující pro tento převodník bylo jeho rozlišení, hlavně možnost připojení až 8 analogových vstupů. Pro možnost kalibrace více než 3 vakuometrů oproti většině A/D převodníků, které mají pouze 4 vstupy.

Programovací jazyk

Jako programovací jazyk pro tento systém byl zvolen Python. Který je vhodný na práci s daty a kompatibilní s příslušenstvím pro RPi.

Volba rozlišení A/D převodníku

Velká část vakuometrů, které budou na aparatuře kalibrovány má logaritmickou závislost mezi napětím a tlakem podle rovnice (2), kde U_0 je napětí pro tlak 1 Pa a U_D je změna napětí pro 1 dekádu tlaku. Matematickými operacemi lze převést na (3), což je rovnice, která se používá na přepočítání napětí na tlak. [9]

$$U = U_0 + U_D \log_{10} p \quad (1) [9]$$

$$p = 10^{\frac{U-U_0}{U_D}} \quad (2) [9]$$

S tím je i spojena přesnost, které potřeba dosáhnout volbou analog-digitálního převodníku. Relativní změnu tlaku v poměru k aktuálnímu tlaku lze vypočítat ze změny napětí pomocí rovnice (4), jejíž úpravou dostaneme, že změna napětí je rovna (5) [9].

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\ln 10}{U_D} \Delta U \quad (3) [9]$$

$$\Delta U = \frac{\Delta p U_D}{p \ln 10} \quad (4)$$

Minimální změnu tlaku, kterou by měl A/D převodník zaznamenat je 1 %. Ta je stejná pro všechna napětí, vztah (4) na aktuálním napětí nezávisí. Za U_D se dosadí nejmenší hodnota, které u vakuometrů dosahuje a to je 0,6 V, což má např. Pfeiffer PKR 251, který je uveden v Tabulka 4.

Poslední zbývá určit Δp a p pro výpočet ΔU . Hodnoty pro tyto proměnné vyplývají z (3), kde je jejich poměr relativní změna tlaku, která je určena na 1 %. Po dosazení těchto hodnot do vyjde $\Delta U = 2,6$ mV.

Pro určení počtu hodnot N potřebných pro rozlišení změny o velikosti ΔU_{min} je potřeba vydělit U_D ΔU_{min} . (6)

$$N = \frac{U_D}{\Delta U_{min}} = \frac{0,6 V}{2,6 mV} \doteq 231 \quad (5)$$

Pro určení vhodného rozlišení je nutné určit počet hodnot, které rozlišení nabízí. Poté pomocí trojčlenky (8), pro kterou platí že poměr počtu hodnot na jednu dekádu k celkovému počtu hodnot A/D převodníku je rovna napětí pro jednu dekádu k celkovému napětí. Úpravou toho vztahu se dostane počet hodnot na jednu dekádu. Hodnoty pro jednotlivé rozlišení jsou v Tabulka 3, vypočtené pomocí rovnice (7).

$$N_{ADC} = 2^{\text{Rozlišení}} \quad (6)$$

$$\frac{x}{N_{ADC}} = \frac{0,6}{10} \quad (7)$$

$$x = \frac{N_{ADC} 0,6}{10} \quad (8)$$

Tabulka 3 počet hodnot A/D převodníků

Rozlišení A/D	Celkový počet hodnot	Počet hodnot pro 1 dekádu
4	16	1
8	256	15
10	1024	61
12	4096	246
16	65536	3932
24	16777216	1006632

Porovnáním minimálního počtu hodnot na jednu dekádu a počtu hodnot na jednu dekádu pro jednotlivé rozlišení vychází že minimální rozlišení A/D převodníku musí být 12 bitů.

Tabulka 4 Příklady relativní změny tlaku na malé změny napětí [9]

Název manometru	U_0	U_D	ΔU			
			0,010 V	0,005 V	0,002 V	0,001 V
K. J. Lesker 354	8,000	1,000	2,30 %	1,15 %	0,46 %	0,23 %
Edwards WRG	6,667	0,667	3,45 %	1,73 %	0,69 %	0,35 %
Granville-Philips	6,875	1,000	2,30 %	1,15 %	0,46 %	0,23 %
Edwards AIGX-S	7,875	1,000	2,30 %	1,15 %	0,46 %	0,23 %
Pfeiffer PKR 251	5,600	0,600	3,84 %	1,92 %	0,77 %	0,38 %

3.2.2 Papouch I/O deska Quido ETH 4/4

Jedná se o desku, která má 4 digitální vstupy a 4 výstupní relé a má možnost připojení teploměru. Mezi základní funkce patří sledování vstupů a spínání výstupních relé.

Pro komunikaci s deskou se používá sériová komunikace. Parametry komunikace se liší podle typu konektoru, pro tuto konkrétní desku se jedná o USB konektor parametry jsou v Tab.č.5 [10].

Tabulka 5 Parametry pro sériovou komunikaci pro Quido ETH 4/4

Baud Rate	115200
Number of data bits	8 bitů
Parity	No
Stop bits	1

Komunikovat je možné pomocí dvou protokolů Spinel a Modbus. Nejjednodušší protokol pro komunikaci a zvolený je Spinel s komunikačním formátem 66.

Příklad příkazu pro ovládání relé je: *B10S2Hr. Sestavení celého příkazu je v Tabulka 6.

Tabulka 6 Sestavení příkazu pro ovládání relé na Quido ETH 4/4 [7]

Prefix	*B
Adresa	1
Kód instrukce změny výstupu	0S
Číslo výstupu	1/2/3/4
kód sepnutí	H/L
ukončovací znak	\r

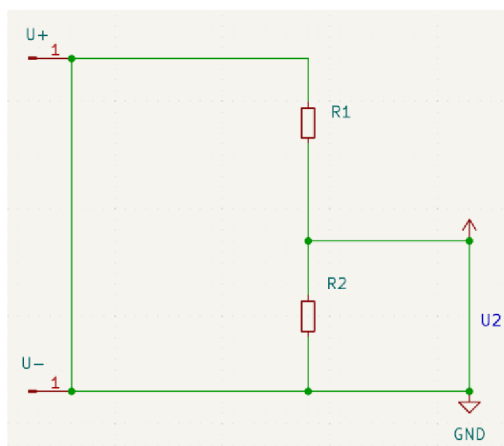
4 ZPRACOVÁNÍ ANALOGOVÉHO SIGNÁLU

Pro záznam analogových hodnot z vakuometrů byl zvolen A/D převodník ADS 1256, který disponuje rozlišením 24 bitů a možností zaznamenávat data až s frekvencí 30 kHz.

Nelze na něj přímo připojit výstupní signály z vakuometrů, proto je nutné tyto signály z vakuometrů upravit. Výstupní signál u vakuometrů s napětovým výstupem je 0–10 V a pro vakuometry s proudovým výstupem je 4–20 mA.

4.1 Úprava napětového výstupních signálů

Pro úpravu napětového signálu byl zvolen napětový dělič [7]. Účelem děliče je snížit vstupní napětí v potřebném poměru, aby mohlo být na rezistoru R_2 napětí U_2 . Toto snížené napětí platí pro celý rozsah výstupního napětí z vakuometrů.



Obrázek 7 Schéma napětového děliče pro výstupní napětí vakuometrů

Na Obrázek 6 je schéma zapojení děliče, kde U_1 je výstupní napětí z vakuometru a U_2 je vstupní napětí do A/D převodníku. Zbývá určit pouze velikosti rezistorů R_1 a R_2 .

Z důvodu ochrany před zkraty je nutné, aby hodnota sériového zapojení rezistorů byla větší než 10 k Ω . Na tuto skutečnost bylo upozorněn panem Vičařem.

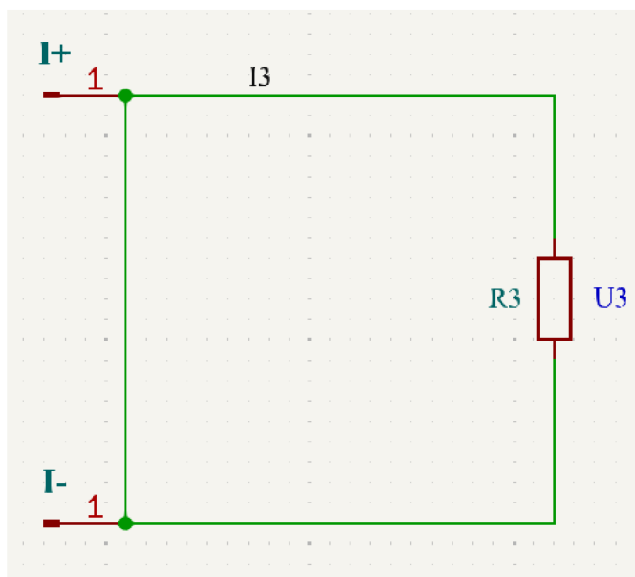
Následně je možné určit odpor $R_2 = 3900 \Omega$. R_1 se vypočítá ze vztahu pro napětový dělič (9), ze kterého se úpravou vyjádří odpor R_1 (11). Po dosazení hodnot vyjde $R_1 = 7918 \Omega$. Na základě toho je pak rezistor R_1 zvolil 8200 Ω , jakožto nejbližší vyšší rezistor.

$$U_2 = U_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

$$R_1 = \frac{R_2(U_1 - U_2)}{U_2} \quad (10)$$

4.2 Úprava proudového výstupu

Stejně jako napěťový výstup je nutné upravit i proudový výstup manometrů. Z důvodu, že na A/D převodník, podle datasheetu, lze připojit pouze 10 mA nepřetržitě[11]. Proto je proudový výstup převést na napěťový úbytek na rezistoru R_3 . Schéma tohoto zapojení je na Obrázek 8.



Obrázek 8 Schéma převodu proudu na napětí

Obdobně jako u napěťových výstupů je zvoleno maximální napětí 3 V. Tomu potom bude odpovídat proud 20 mA. Velikost odporu se poté určí podle Ohmova zákona (11). Velikost rezistoru R_3 po dosazení vyjde 150 Ω .

$$R = \frac{U_3}{I_3} \quad (11)$$

4.3 Záznam hodnot z A/D převodníku

Oproti většině hardwaru určenému pro RPi, tak ADS 1256 nemá knihovnu pro ovládání, která je vydaná přímo výrobcem. Proto je využita knihovna dostupná z [12].

Bylo nutné upravit parametry pro správnou funkci A/D převodníku. Pro čtení správného napětí, bylo nutné upravit v souboru ADS1256.py a funkci ADS1256_init atribut Gain A/D převodníku z hodnoty 4 na 1 (Obrázek 9).

```
def ADS1256_init(self):
    if (config.module_init() != 0):
        return -1
    self.ADS1256_reset()
    id = self.ADS1256_ReadChipID()
    if id == 3 :
        print("ID Read success ")
    else:
        print("ID Read failed ")
        return -1
    self.ADS1256_ConfigADC(ADS1256_GAIN_E['ADS1256_GAIN_1'], ADS1256_DRATE_E['ADS1256_30SPS'])
    return 0
```

Obrázek 9 Úprava atributu pro získání hodnot z A/D převodníku

Samotný čtení hodnot z převodníku je provádělo pomocí příkazů na Obrázek 10. Tento příklad je pro port č.7

```
while True:
    ADC = ADS1256.ADS1256()
    ADC.ADS1256_init()
    Data = ADC.ADS1256_GetChannelValue(7)*5/0x7FFFFFFF
```

Obrázek 10 Ukázka čtení dat z A/D převodníku

Pro další vyhodnocení je napětí získané z A/D převodníku nutné převést zpět na hodnotu výstupního napětí vakuometru pomocí rovnice, které je úpravou rovnice (12).

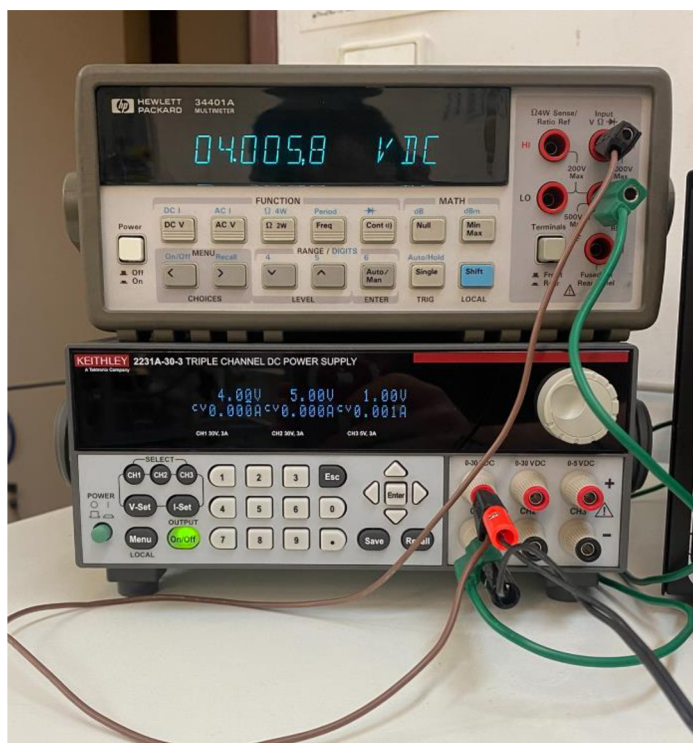
$$U_1 = \frac{U_2(R_1+R_2)}{R_2} \quad (12)$$

Pro převedení na tlak se použije rovnice (3)

4.4 Kalibrace vstupů A/D převodníku

Pro správnou kalibraci, je nutné znát přesnou hodnotu, která je na výstupu z vakuometru. To znamená znát závislost hodnotou z A/D převodníku a výstupním signálem vakuometru, který se dále používá pro další zpracování.

Pro tuto kalibraci byl použit laboratorní zdroj, kalibrovaný multimetr (viz. Obrázek 11), napájené desky s děliči a odpory, A/D převodní s RPi 4b.



Obrázek 11 Zapojení multimetru a laboratorního zdroje pro kalibraci napěťových vstupů A/D převodníku

4.4.1 Kalibrace napěťových vstupů

Pro vstupy s napěťovým děličem byla kalibrace provedena na napětích odpovídající rozsahu vakuometrů, 0-10 VDC po 1 V s konstantním proudem 10 mA. Tyto napětí byla nastavena laboratorním zdrojem a pro znalost přesné hodnoty, která vstupuje do A/D převodníku, byly hodnoty změřeny kalibrovaným multimetrem. V Tabulka 7 jsou znázorněny naměřené hodnoty.

Tabulka 7 Naměřené hodnoty napětí pro kalibraci vstupů

Vstupní napětí [V]	vstup 0 [V]	vstup 1 [V]	vstup 2 [V]	vstup 3 [V]	vstup 4 [V]	vstup 7 [V]
0,005	0,090	0,090	0,090	0,091	0,091	0,064
1,004	1,051	1,053	1,052	1,053	1,050	1,045
2,004	2,014	2,016	2,015	2,017	2,011	2,027
3,005	2,977	2,981	2,978	2,982	2,973	3,011
4,005	3,940	3,944	3,941	3,946	3,934	3,993
5,006	4,903	4,908	4,905	4,910	4,896	4,976
6,006	5,866	5,872	5,868	5,874	5,857	5,958
7,007	6,828	6,835	6,831	6,838	6,818	6,941
8,007	7,791	7,799	7,794	7,802	7,779	7,924
9,006	8,752	8,761	8,755	8,764	8,738	8,904
10,007	9,714	9,725	9,718	9,729	9,699	9,887

4.4.2 Kalibrace proudových vstupů

Pro kalibraci proudových vstupů bylo použito napětí, které bylo na rezistoru. Kalibrace proběhla pro hodnoty proudu odpovídající výstupu vakuometrů, tedy 4-20 mA po 2 mA.

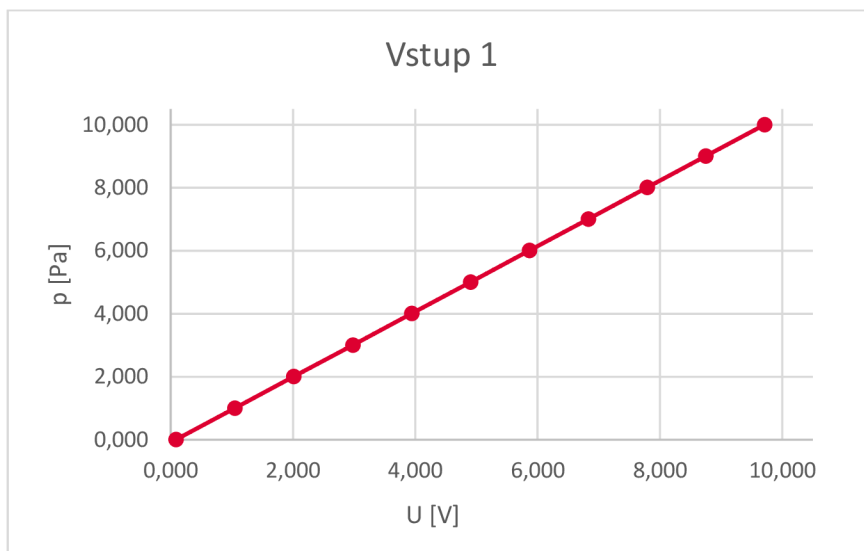
Pro znalost přesné hodnoty, která vstupovala do A/D převodníku, byly nastavované proudy měřeny kalibrovaným multimetrem. Pro přepočítání proudu na napětí byl použit rezistoru 150 Ω . Naměřené hodnoty jsou v Tabulce 8.

Tabulka 8 Naměřené napětí pro kalibraci proudových vstupů

vstupní proud [V]	vstup 5 [V]	vstup 6 [V]
0,60675	0,59910	0,596
0,90825	0,89610	0,891
1,21215	1,19220	1,189
1,5048	1,47988	1,476
1,80705	1,77690	1,773
2,106	2,07060	2,070
2,409	2,36570	2,366
2,70582	2,65530	2,652
3,0045	2,94920	2,951

4.4.3 Výsledky kalibrace

Závislost naměřeného napětí A/D převodníkem a vstupní hodnoty napětí je lineární. Pro vstup 0 je zobrazena v Graf 2. Při pohledu na Tabulka 7, je možné vidět, že hodnoty jsou podobné pro všechny vstupy.



Graf 2 Závislost naměřeného napětí A/D převodníkem a vstupním napětím pro vstup 0

Potom je možné na tuto lineární závislost napasovat lineární regresi ve tvaru $y = kx + c$, která popisuje závislost naměřených hodnot A/D převodníku na výstupu vakuometrů. Tyto závislosti jsou zobrazeny v Tabulka 9.

Tabulka 9 Závislost naměřených hodnot A/D převodníkem na výstupu laboratorního zdroje

Název vstupu	Parametr k	Parametr c
vstup 0	1,039152	-0,088554409
vstup 1	1,03803	-0,088659307
vstup 2	1,038802	-0,088741744
vstup 3	1,03771	-0,089026282
vstup 4	1,04087	-0,089427838
vstup 5	1,0206	-0,000036995444034335
vstup 6	1,01852	0,000003687622895833
vstup 7	1,018138	-0,059956255

5 NÁVRH A REALIZACE REGULÁTORU

Pro návrh regulátoru se často využívá popisu pomocí diferenciálních rovnic. Tyto rovnice následně popisují sledovanou veličinu v závislosti na veličinách, které je možno regulovat. Tento přístup, nelze však použít pro tento případ, protože by ho bylo nereálné popsat.

5.1 Kritéria pro regulaci

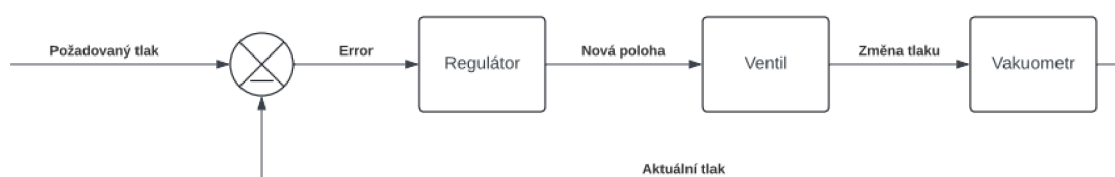
Tento systém je specifický tím, že lze tlak pouze zvyšovat. Snahou tedy je, aby tlak nepřesáhl požadovanou hodnotu tlaku, protože v průběhu kalibrace se nedá aparatura vyčerpat na nižší tlak.

V takových systémech je velmi těžké udržet konstantní tlak s přesností na setiny Pascalů. Proto je povoleno, aby se požadovaná hodnota pohybovala v rozmezí $\pm 5\%$ požadované hodnoty. Tento požadavek je z důvodu nestálosti při tlacích menší než 1 Pa. Protože u těchto tlaků je ovlivňována přesnost měření tlaku zbytky vodní páry, která je přítomna ve vzduchu a dostává se do aparatury při zvyšování tlaku v aparatuře.

5.2 Návrh regulátoru

Navrhovaný regulátor se dá klasifikovat jako P-regulátor. Princip jeho funkce je, ten že na základě naměřených změnách tlak za čas pro jednotlivé polohy ventilu, se dá vypočítat nový tlak, který nastane při daném otevření ventilu. A cílem algoritmu je najít co nejbližší tlak k požadovanému tlaku.

Tuto myšlenku potvrdil pan Vičař, který to odůvodnil, že změna tlaku, čerpání vzduchu do aparatury, které zvyšuje tlak, v aparatuře není závislá na okolním tlaku, protože oblast, ve které se dostává vzduch do aparatury je velmi malé a nedojde tak k ovlivnění okolním tlakem.



Obrázek 12 Funkční schéma regulátoru

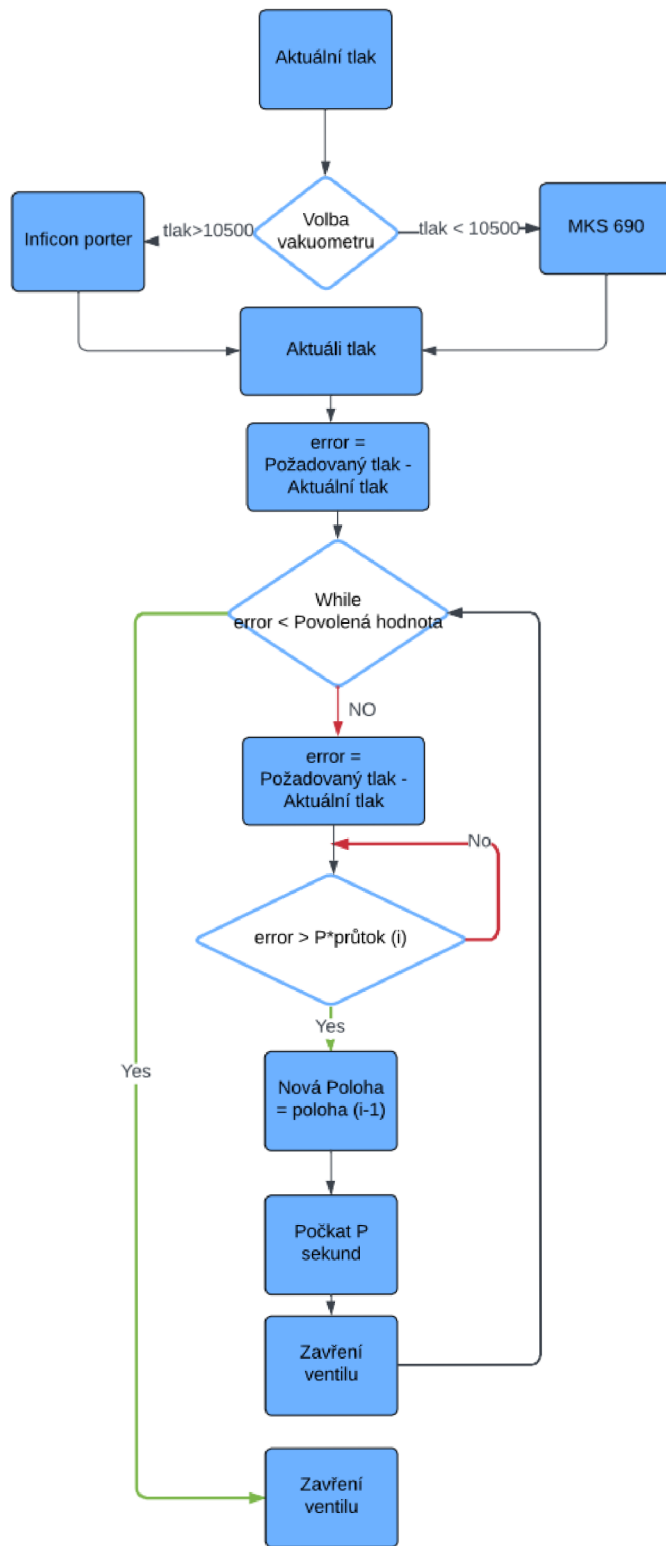
Celé funkce začíná zjištěním aktuálního tlaku, na základě něj se vybere etalon, který je určený na tyto tlaky.

Se znalostí aktuálního tlaku se vypočte rozdíl, který chybí k požadovanému tlaku. Na základě této informace, se hledá taková pozice ventilu, která sníží rozdíl na nejmenší hodnotu. Jak mile je taková pozice ventilu nalezena, tak se změní na tuto pozici a počká P sekundy. Poté se tento proces opakuje do té doby, dokud není rozdíl v tolerovaném pásu požadované hodnoty. Tento proces je znázorněn ve schématu na Obrázek 13.

Změny tlaku jsou uchovány v tzv. „Look Up“ tabulce, ve které se pomocí for cyklu snadno hledají hodnoty. Její ukázka je Tabulka 10.

Tabulka 10 Ukázka "Look Up" tabulky pro regulaci tlaku

tlak1 [Pa]	tlak2 [Pa]	pozice	cas [t]	Q [Pa/s]
0,097	0	832	0	0
0,176	0	864	5	0,0158
0,261	0	896	10	0,017
0,341	0	928	15	0,016
0,411	0	960	20	0,014
0,486	0	992	25	0,015
0,547	0	1024	30	0,0122
0,611	0	1056	35	0,0128
0,666	0	1088	40	0,011



Obrázek 13 Navrhované schéma funkce regulátoru

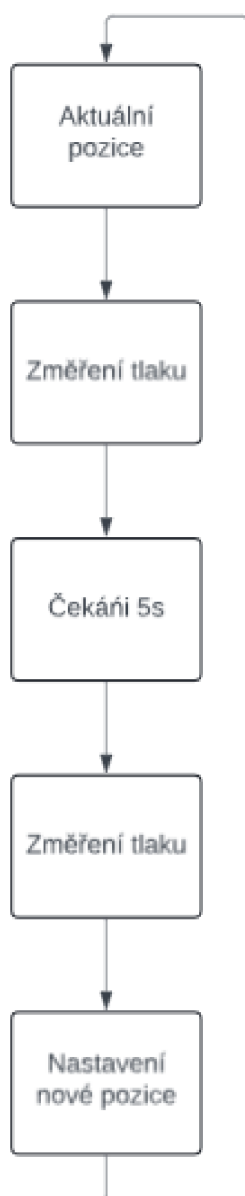
5.3 Realizace

Jako první je nutné změřit změny tlaku pro dané polohy ventilu.

Toto měření probíhalo tak, že se nastavila pozice ventilu, změřil tlak a počkalo se 5 sekund. Poté se ventil zavřel a nastavila se nová pozice a změřil se tlak, viz. Obrázek 14.

Výsledkem tohoto měření jsou dva tlaky, které udávají změnu tlaku v aparatuře za 5 sekund. Měření bylo provedeno pro polohy ventilu od 1472 do 6760 po 32 pozicích.

Poté byl na základě schéma na Obrázek 13 regulátor naprogramován.



Obrázek 14 Postup měření změny tlaku na poloze ventilu

5.4 Ověření správnosti funkce regulátoru

Pro ověření správné funkčnosti regulátoru byli provedeny dvě měření.

První spočívá v tom, že byly postupně nastaveny všechny tlaky, na kterých se kalibruje, a cílem bylo otestovat schopnost regulace. V případě, že by byl regulátor nefunkční, tak by nebyl schopný nastavit požadovaný tlak. A u daného tlaku by nebyla naměřená hodnota. Po vyregulování tlaku se počkalo 5 sekund, poté se změřil tlak.

Tabulka 11 Naměřené tlaky pro ověření funkce regulátoru

tlak [Pa]	Požadovaný tlak [Pa]	Δp [Pa]	relativní odchylka
0,104	0,1	0,004	4,00%
0,191	0,2	0,009	4,50%
0,482	0,5	0,018	3,60%
0,951	1	0,049	4,90%
1,913	2	0,087	4,35%
4,804	5	0,196	3,92%
9,622	10	0,378	3,78%
19,159	20	0,841	4,21%
47,71	50	2,29	4,58%
95,367	100	4,633	4,63%
190,24	200	9,76	4,88%
475,26	500	24,74	4,95%
953,74	1000	46,26	4,63%
1909,6	2000	90,4	4,52%
4752,6	5000	247,4	4,95%
9505,2	10000	494,8	4,95%
19092,98	20000	907,01684	4,54%
48389,88	50000	1610,119689	3,22%
95029,2	100000	4970,79935	4,97%

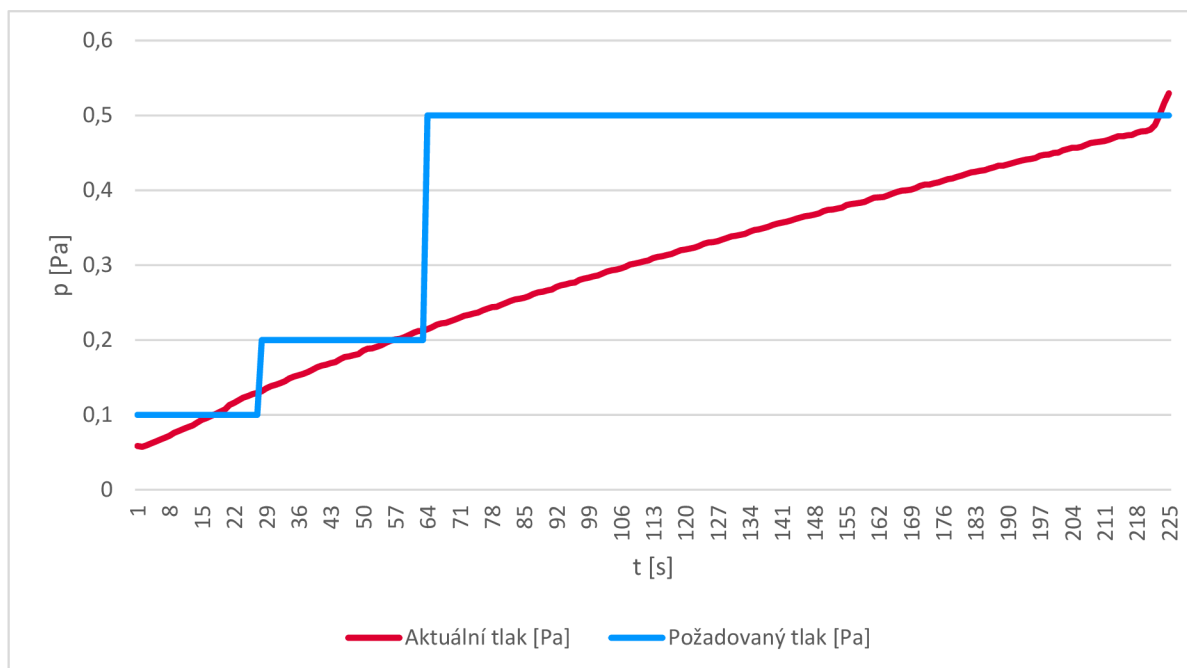
V Tabulka 11 můžeme vidět, že relativní odchylky pro všechny nastavené tlaky je menší než 5 %, což ukazuje že regulátor je schopný nastavit všechny požadované tlaky.

Druhé měření spočívalo v ověření rychlosti regulace. Není stanoven, žádný časový limit pro regulaci. Spíše jde o zobrazení regulace v čase.

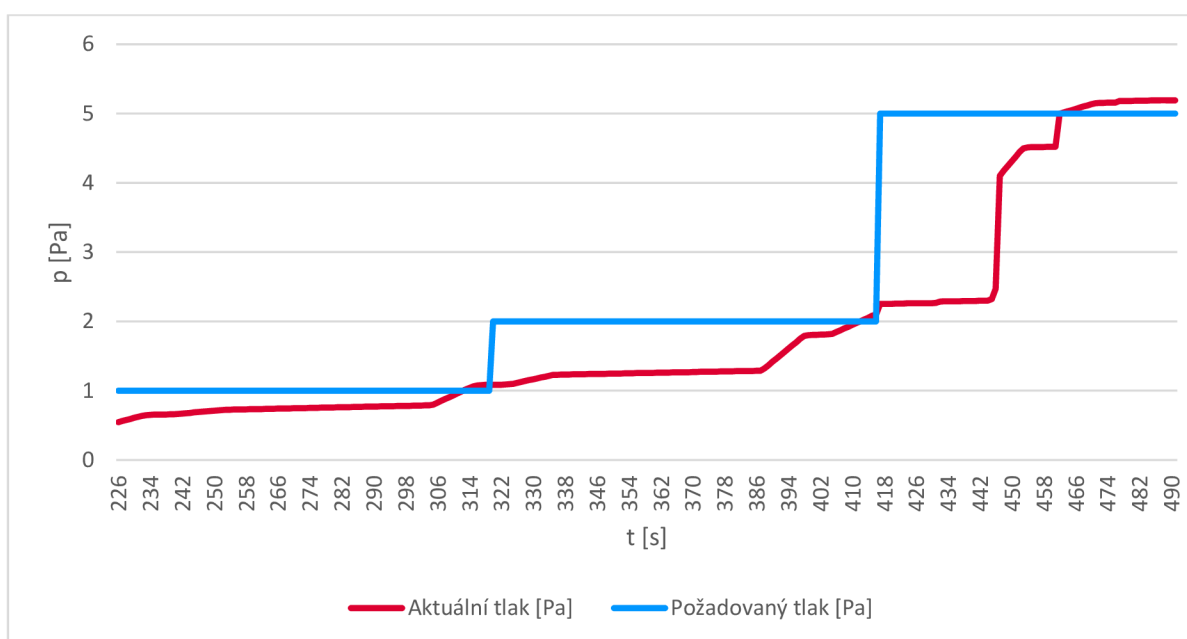
Pro přehlednější výsledky, byli do jednoho grafu dány tři nastavované tlaky na dekádu.

Po nastavení požadovaného tlaku, se počkalo 10 sekund na ustálení

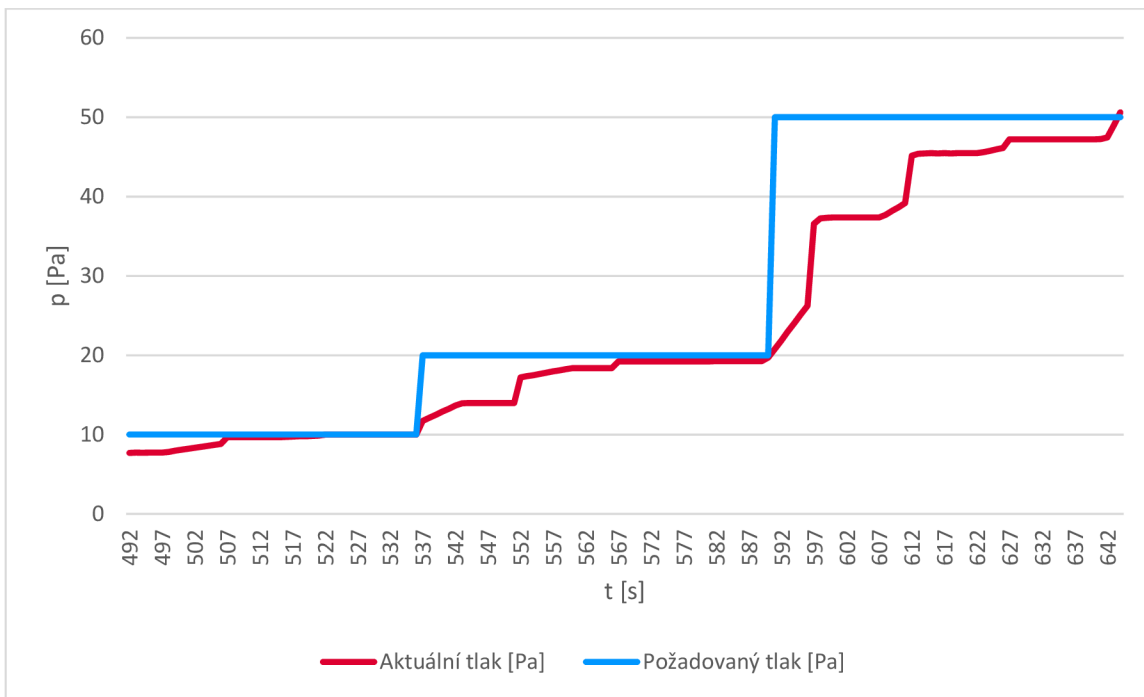
Pro měření Aktuálního tlaku byla použita Leybold Pennivac PTR 90 N.



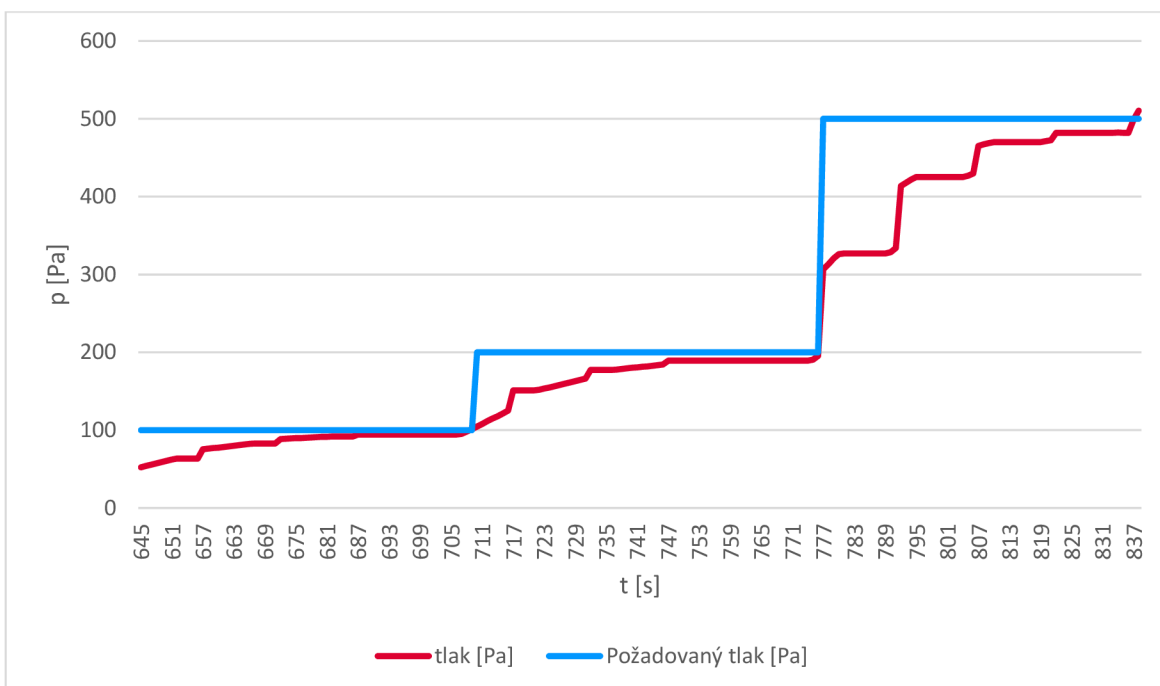
Graf 3 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 0,1;0,2 a 0,5 Pa



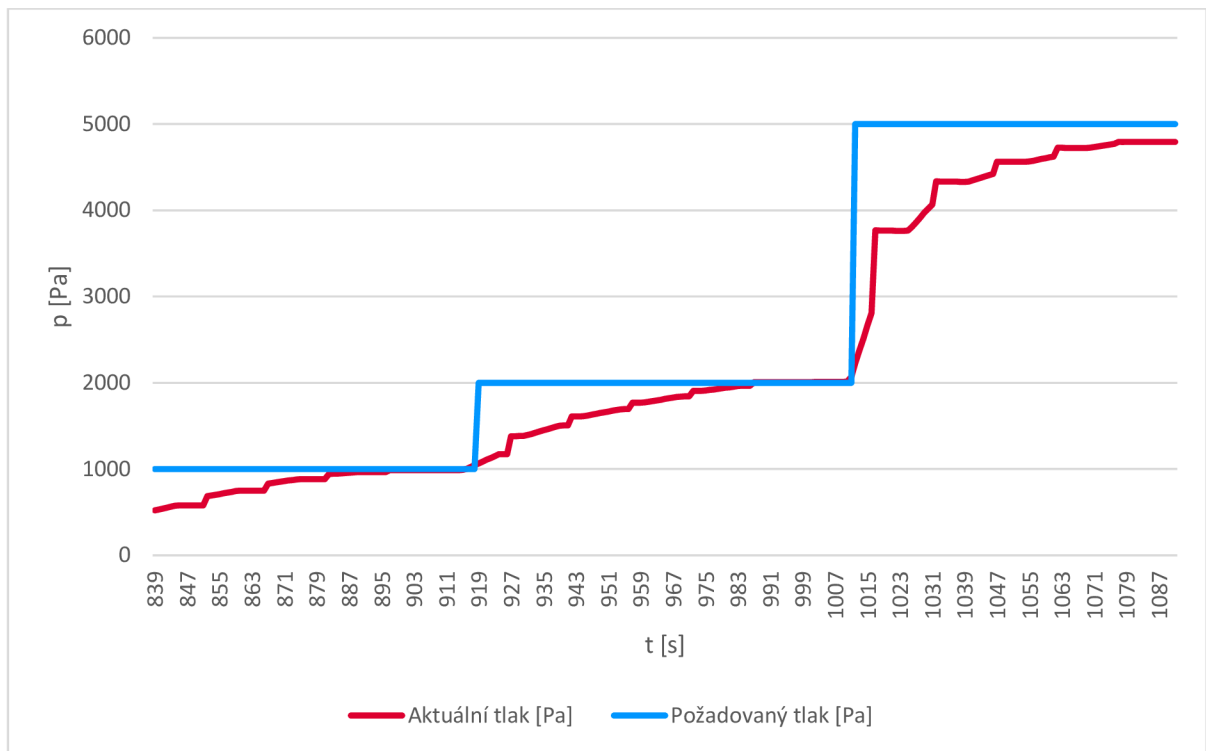
Graf 4 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 1; 2 a 5 Pa



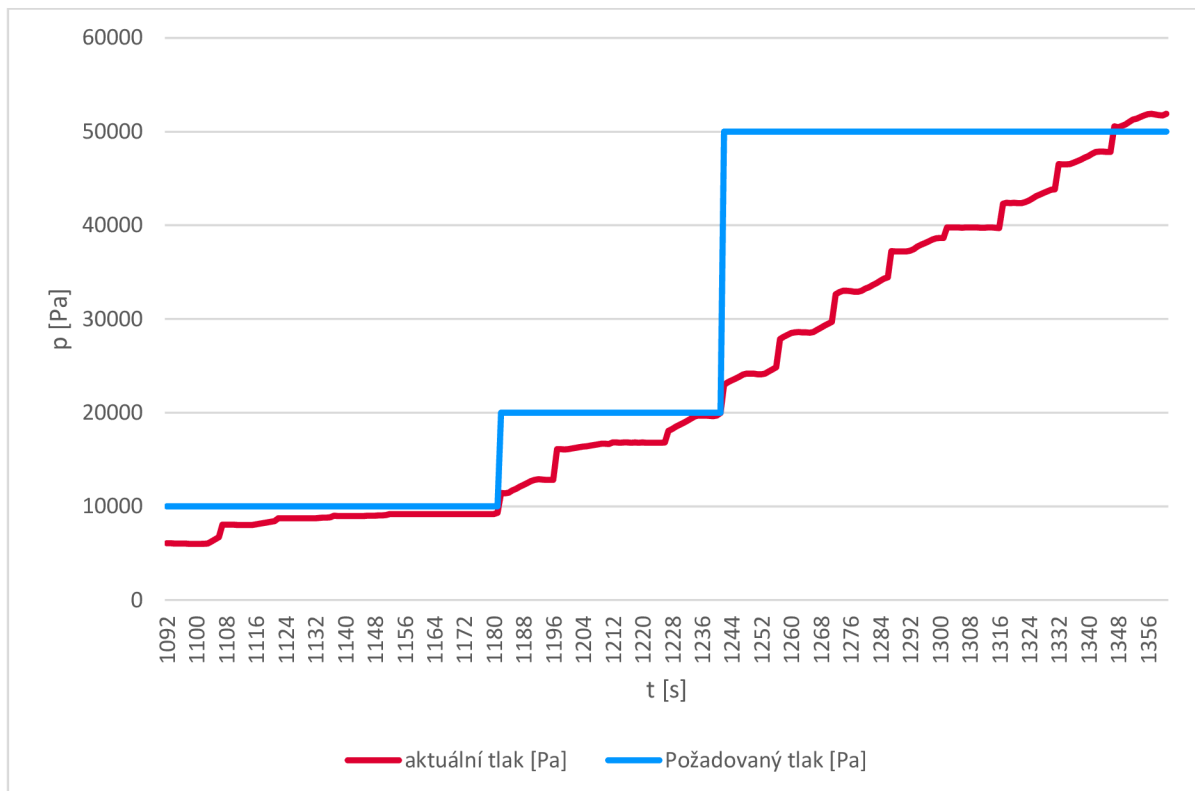
Graf 5 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 10; 20 a 50 Pa



Graf 6 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 100; 200 a 500 Pa



Graf 7 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 1000; 2000 a 5000 Pa



Graf 8 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 10 000; 20 000 a 50 000 Pa

Při pohledu na Graf 3 je možné vidět, že Aktuální tlak v aparatuře stoupá, i když by neměl. Toto není způsobeno však chybou regulátoru, nýbrž je to nedostatkem aparatury. Tyto nízké tlaky okolo 1 Pa, mohou být ovlivněny zbytkem vodní páry, která zůstala v aparatuře po vyčerpání. Tento problém však vymizí, když pro vyčerpání bude použit dusík místo vzduchu.

Další věci si lze všimnout u Graf 8, kde je průběh vzrůstu tlaku z 20 kPa na 50 kPa lineární na rozdíl od ostatních, kde je logaritmický. Toto je způsobeno limitací ventilu, který se schopný pro regulaci zvyšovat tlak pouze přibližně 1000 Pa/s.

Ostatní průběhy jsou v pořádku.

6 AUTOMATIZACE KALIBRACE VAKUOMETRŮ

6.1 Proces kalibrace vakuometrů

Kritéria pro průběh jsou součástí dodatečného zadání a jsou k dispozici v 11.3. Podle tohoto popisu, je naprogramovaný celý proces kalibrace

Schéma proces kalibrace je poté na Obrázek 15

První krok je zvolení vakuometru. Toto probíhá v GUI a cílem je získat konstantu pro převod napětí na tlak.

Dále následuje vyčerpání plynu z aparatury olejovou a turbomolekulární vývěvou. Jakmile tlak klesne pod 100 Pa, otevře se deskový ventil a vyčerpá se zbytek plynu. Deskový ventil musí zůstat otevřený 15 minut pro ustálení tlaku.

Po ustálení tlaku začne samotná kalibrace. Kalibruje se vždy na 3 bodech na dekádu a poslední nastavený tlak je atmosférický tlak. Seznam všech nastavovaných hodnot je v Příloha č.3 - Činnost systému.

Tyto tlaky se nastavují pomocí regulátoru, který je nastaven s maximální možnou odchylkou $\pm 5\%$ z žádaného tlaku.

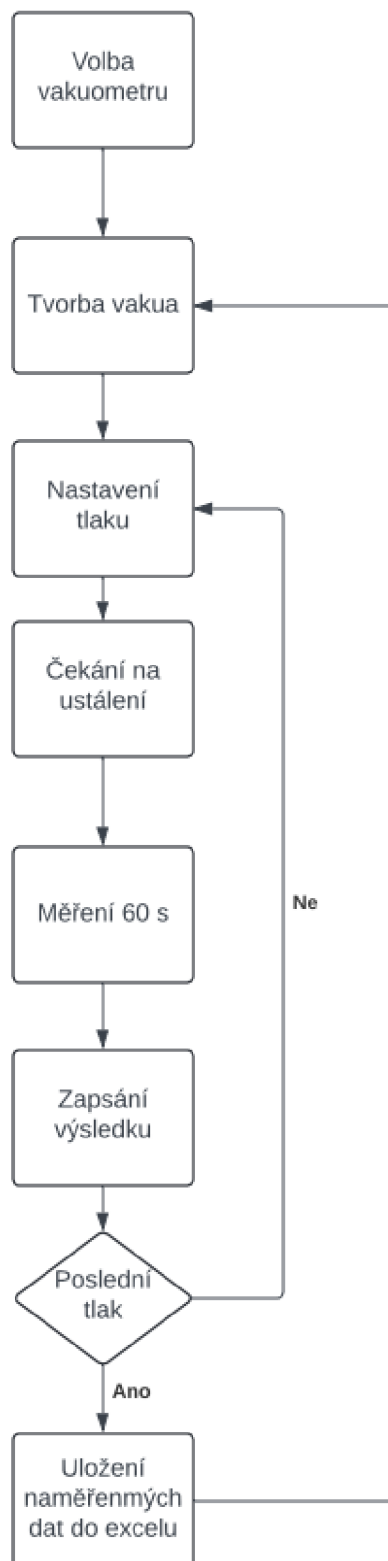
Po nastavení tlaku se čeká 60 sekund na ustálení tlaku, u nižších tlaků tato doba může být nižší. To z důvodu možné přítomnosti zbytku vodních par, které ovlivňují vakuometry na těchto nízkých tlacích.

Samotná kalibrace trvá 60 sekund a výsledná hodnota se bere jako průměr všech naměřených hodnot za tento čas.

Jediný rozdíl poté nastává u kalibrace na 100 000 Pa (atmosférickém tlaku), kdy se čeká 10 minut a je nutné vakuometr nastavit na atmosférický tlak, stlačením tlačítka na vakuometru.

Po kalibraci na všech bodech se výsledky zapíší do připraveného excel souboru, ze kterého se použijí pro vyhodnocení kalibrace.

Tento celý proces kalibrace poté probíhá přibližně 3-4.



Obrázek 15 Schéma průběhu kalibrace

6.2 Vyčerpání aparatury

Čerpání vakua se skládá ze dvou částí, čerpání olejovou vývěvou a čerpání turbomolekulární vývěvou. Jak je možné vidět na Obr.č.1, tak olejová vývěva vyčerpá tlak v aparatuře pod 100 Pa. Kontrola toho tlaku je prováděna vakuometry MKS 690 a Inficon Porter CDG020D

Automatizace této části spočívá v zapívání a vypínání napájení olejové vývěvy. Zjednodušené elektrické schéma zapojení je v Příloze č.1. Využívá se k tomu relé z desky Quidu 4/4, které se spíná softwarovým příkazem. Na základě aktuálního tlaku.

Protože není doporučeno připojit na Quido napětí 230 V [10], bylo proto použito relé Finder 40.61, které je spínané napětím 24 VDC, pro spínání 230 V

Pro ochranu aparatury je na výstupu olejové vývěvy do aparatury pneumatický ventil, který je spínaný softwarově pomocí relé na Quido 4/4. Který se ovládá stejně jako olejová vývěva, na základě aktuálního tlaku.

Po vyčerpání pod 100 Pa, se otevře deskový ventil. Ten se otevírá mechanicky a jedna ze dvou věcí, které nejsou automatizované na této aparatuře. Tento mechanický ventil, lze nahradit deskovým ventilem, který je ovládaný pneumaticky. Ale vzhledem k jeho pořizovací ceně a urychlení, které tato automatizace může poskytnout, se nevyplatí do něj investovat.

Podobná situace je i s turbomolekulární vývěvou. K té lze pro ovládání dokoupit ovládací jednotka. Ta však není potřeba, protože je možné zapnout a nechat běžet vývěvu po celou dobu kalibrování a využívat ji otevíráním deskového ventilu.

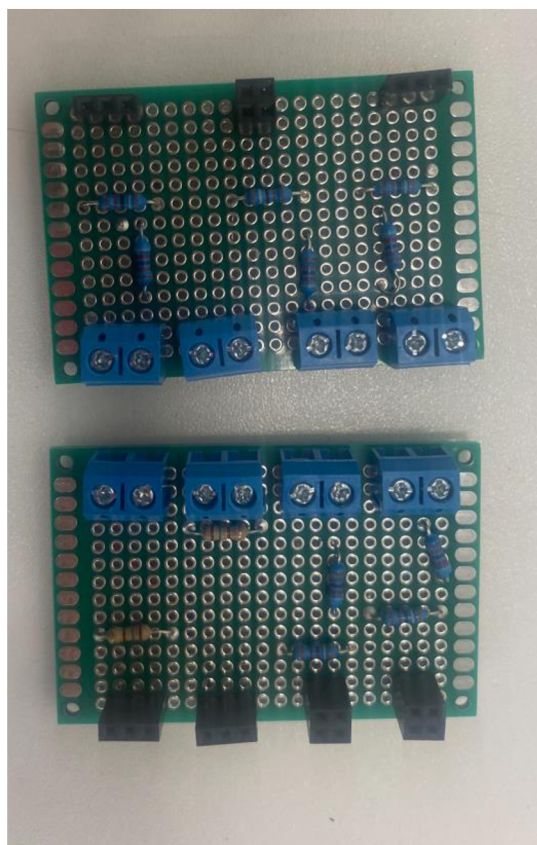
6.3 Záznam hodnot

Princip záznamu hodnot z výstupu vakuometrů je popsán v kapitole 4.3 a proces záznamu je popsán v 6.1.

Podle požadavků v 4.1 a 4.2 pro připojení výstupních signálu z vakuometrů, tak byli vytvořeny desky, které obsahují 5 přípojek pro napěťové výstupy a 2 přípojky pro proudové vstupy. Jeden dělič je pak rezervován pro etalon.

Počet typů výstupu byl určen podle četnosti výskytu daného typu pro kalibraci.

Desky obsahují šroubovatelné svorkovnice, na které se připojí signály „+“ a „-“ z vakuometru, dále elektronické součástky, které definují typ vstupu a konektory pro připojení na A/D převodník.



Obrázek 16 Napájené desky s napěťovými děliči a rezistory

6.4 Grafické rozhraní (GUI)

Pro jednoduchou obsluhu je k vytvořené jednoduché grafické rozhraní (GUI), ze kterého se dá vše jednoduše ovládat. GUI bylo vytvořeno pomocí knihovny tkinter.

GUI se dělí na dvě části. V první části je určena pro volbu vakuometru pro danou pozici na A/D převodníku. Pro další funkci kalibrace je výstupem volby vakuometru konstanty U_D a U_0 , které se používají pro převod napětí na tlak.

Dále se zde nachází tlačítko „Kalibrovat“. To slouží k spuštění celého procesu kalibrace.

Ve druhé části GUI jsou tlačítka, která umožňují manuálně ovládat vybrané funkce.

Jsou zde dvě tlačítka pro ovládání Olejové vývěvy:

- „**Ventil k olejovce**“ – toto tlačítko slouží pro manuální ovládání pneumatického ventilu, který odděluje olejovou vývěvu od aparatury
- „Zapnutí olejovky“ – toto tlačítko slouží k manuálnímu zapnutí olejové vývěvy

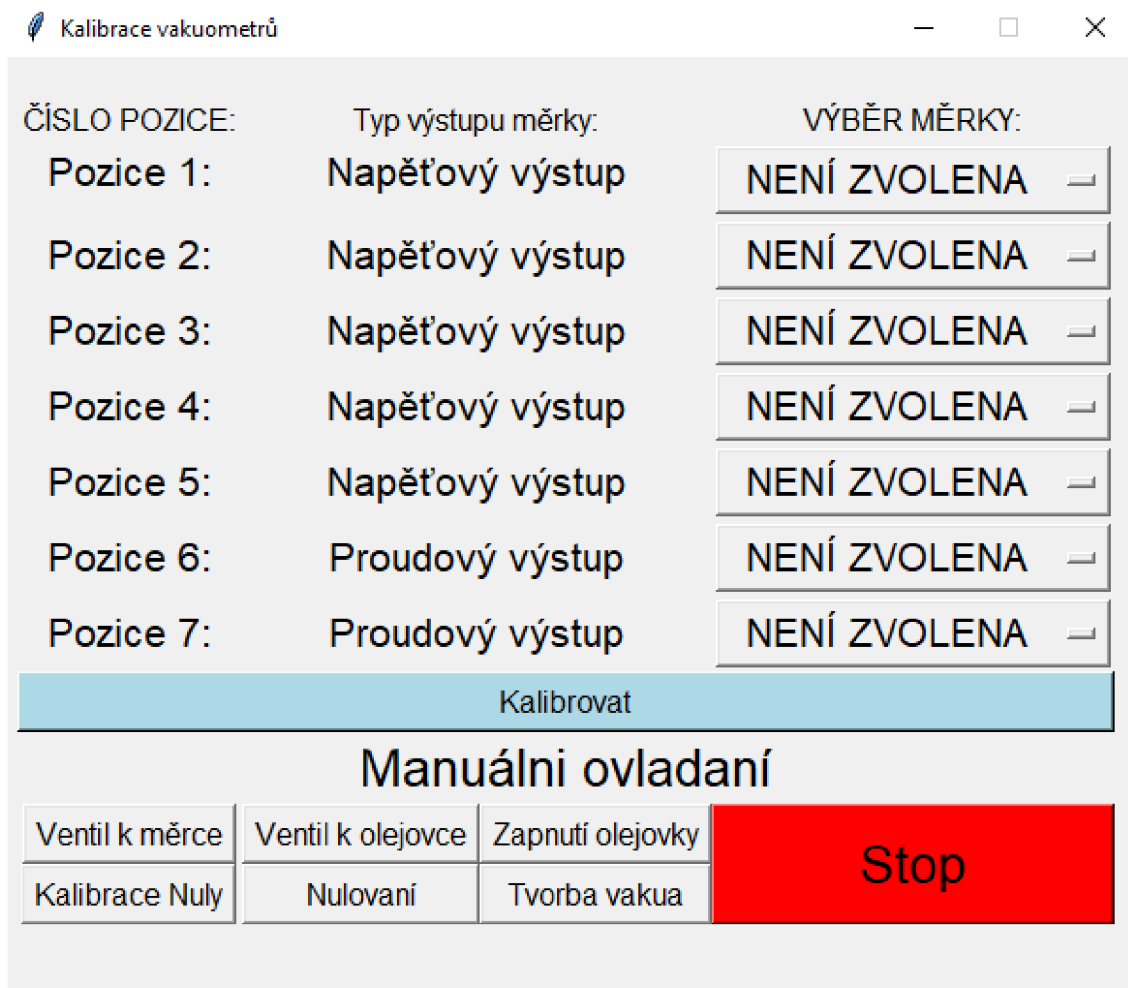
Dále je zde tlačítko „Ventil k měrci“ – ten slouží pro otevření ventilu k vakuometru MKS Baratron 690, který je v případě nečinnosti kalibrace zavřený, aby ochránil vakuometr, před tlaky, pro které není určen.

Dále jsou zde dvě tlačítka, které obstarávají funkce MKS 670B:

- „Nulování“ – toto tlačítko provede proceduru na vynulování hodnoty tlaku na MKS 670B pro přesný odečet tlaku[3].
- „Kalibrace Nuly“ – toto tlačítko provede proceduru kalibrace nuly na MKS 670B[3].

Tlačítko „Tvorba vakua“ – toto tlačítko provede vyčerpání aparatury pod 100 Pa, jak je uvedeno v 5.2 Vyčerpání aparatury.

Jako poslední je zde tlačítko „Stop“. Toto tlačítko v případě problému zastaví celý průběh kalibrace, zavře se GUI a zavře se ventily k olejové vývěvě a vakuometru MKS 690.



Obrázek 17 Grafické rozhraní pro ovládání kalibrace

7 ZÁVĚR

V první části jsem se seznámil s dostupným hardwarem a popsal jeho funkci v Dostupný hardware. Nejobtížnější bylo zprovoznit sériovou komunikaci s MKS 670 B a komunikační jednotkou ventilu s RPi, výsledkem toho byla výměna převodníku RS 232 na TTL za redukci z RS 232 na USB. S redukcí už tato komunikace byla bez problémů.

Dále bylo nutné určit rozlišení A/D převodníku, aby při odečtu hodnot A/D převodníkem nebyla způsobena nepřesnost. Pro správné určení, bylo nutné určit nejmenší změnu tlaku na jednu dekádu a požadavkem zachycení změny 1 % a pomocí vzorce pro relativní změnu tlaku v závislosti na napětí bylo vypočteno nejmenší rozlišení 12 bitů pro A/D převodník.

Návrh regulátoru je popsán v 5.2. Kdy celá regulace tlaku je založena na změně polohy ventilu, který vpouští do aparatury vzduch. Pro účely regulace byla naměřena pomocná tabulka, která má v sobě uloženy změny tlaku pro různé polohy ventilu.

Zhodnocení funkce regulátoru je v 5.4, kdy jediný problém, který nastal u tlaku okolo 1 Pa, kdy kvůli zbytku vodních par kolísá tlak a tlak nezůstane na ustálené hodnotě po nastavení tlaku regulátorem. Jinak regulátor vždy zreguluje tlak do požadované oblasti $\pm 5\%$ požadované hodnoty.

Automatizovat se podařilo celý proces až na otevírání deskového ventilu. Hodně k této automatizaci přispěla I/O deska Quido 4/4, pomocí, které se ovládá pneumatický ventil z olejové vývěvy, pouštění olejové vývěvy a zavírání ventilu k etalonu, když se dostane mimo svůj rozsah měření.

Záznam hodnot z výstupu vakuometrů je obstaráván A/D převodníkem 8 kanálovým ADS 1256, pro připojení výstupu z vakuometrů slouží desky, které jsou osazeny napěťovými děliči pro napěťové výstupy a rezistory pro proudové výstupy.

Pro snadné ovládání je k dispozici GUI, které je popsáno v kap. Grafické rozhraní (GUI).

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DR. WALTER UMRATH, DR. HERMANN ADAM †, ALFRED BOLZ, HERMANN BOY a HEINZ DOHMEN A DALŠÍ. *Fundamentals of Vacuum Technology* [online]. 2016. Dostupné z: www.leybold.com
- [2] MARQUARDT, Niels. *INTRODUCTION TO THE PRINCIPLES OF VACUUM PHYSICS* [online]. nedatováno [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://cds.cern.ch/record/582156/files/p1.pdf>
- [3] SHATTUCK ROAD, Six. *MKS Type 670B High Accuracy Signal Conditioner* [online]. nedatováno [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: https://www.mks.com/mam/celum/celum_assets/resources/670Bman.pdf
- [4] MGR.MARTIN VIČAŘ PH.D. *Návrh a konstrukce regulátoru pro automatizované kalibrace měřidel vakua*. [.doc]. [cca. 2024]. Dokument mi byl poskytnut M.Vičářem
- [5] PFFEIFER VACUUM. *Installation Vacuum Connection* [online]. nedatováno. [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: www.pfeiffer-vacuum.net
- [6] JIMBLOM. Serial Communication:Wiring and Hardware[online]. Sparkfun Dostupné z:<https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication/wiring-and-hardware>.
- [7] *Using 0-10V analog sensor output with rasbery pi*[online]. Edaboard.com [cit. 2024-05-24] Dostupné z <https://www.edaboard.com/threads/using-0-10v-analog-sensor-output-with-rasbery-pi.384789/>.
- [8] Analog signal vs Digital signal [online] Monolithicpower. [cit. 2024-05-24] Dostupné z <https://www.monolithicpower.com/en/analog-vs-digital-signal>.
- [9] MGR.MARTIN VIČAŘ PH.D. *Citlivostní koeficienty tlaku na napětí pro měrky s logaritmickým výstupem [.doc]* [cca. 2024]. Dokument mi byl poskytnut M.Vičářem Dostupné v 11.2.
- [10] SRO, Papouch. Quido-MODBUS Q u i d o-M O D B U S Katalogový list [online]. 2023 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: https://cdn.papouch.com/data/user-content/spolecne/quido/quido-spine1_cz.pdf
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. *ADS 1255/1256* [online]. 2013. [cit. 2024-05-24] Dostupné z: www.ti.com
- [12] RASPI ADC LOGGER. [online] PhysicsOpenLab. 8. listopad 2019 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://physicsopenlab.org/2019/11/28/raspi-adc-logger/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

A/D převodník – analogově-digitální převodník

D/A převodník – digitálně-analogový převodník

UART - Universal asynchronous receiver-transmitter

RPi – Raspberry Pi

10 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

10.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Foto aparatury	8
Obrázek 2 Ukázka rozsahu vývěv. Převzato z [2]	9
Obrázek 3 Přední panel MKS TYPE 670B Převzato z [3].....	11
Obrázek 4 Deskový ventil	13
Obrázek 5 Pneumatický ventil	13
Obrázek 6 Propojení pinů pro sériovou komunikaci Převzato z [6]	14
Obrázek 7 Schéma napěťového děliče pro výstupní napětí vakuometrů.....	20
Obrázek 8 Schéma převodu proudu na napětí	21
Obrázek 9 Úprava atributu pro získání hodnot z A/D převodníku	22
Obrázek 10 Ukázka čtení dat z A/D převodníku	22
Obrázek 11 Zapojení multimetru a laboratorního zdroje pro kalibraci napěťových vstupů A/D převodníku	23
Obrázek 12 Funkční schéma regulátoru	28
Obrázek 13 Navrhované schéma funkce regulátoru.....	29
Obrázek 14 Postup měření změny tlaku na poloze ventilu	30
Obrázek 15 Schéma průběhu kalibrace	37
Obrázek 16 Napájené desky s napěťovými děliči a rezistory	39
Obrázek 17 Grafické rozhraní pro ovládání kalibrace	41

10.2 Seznam Tabulek

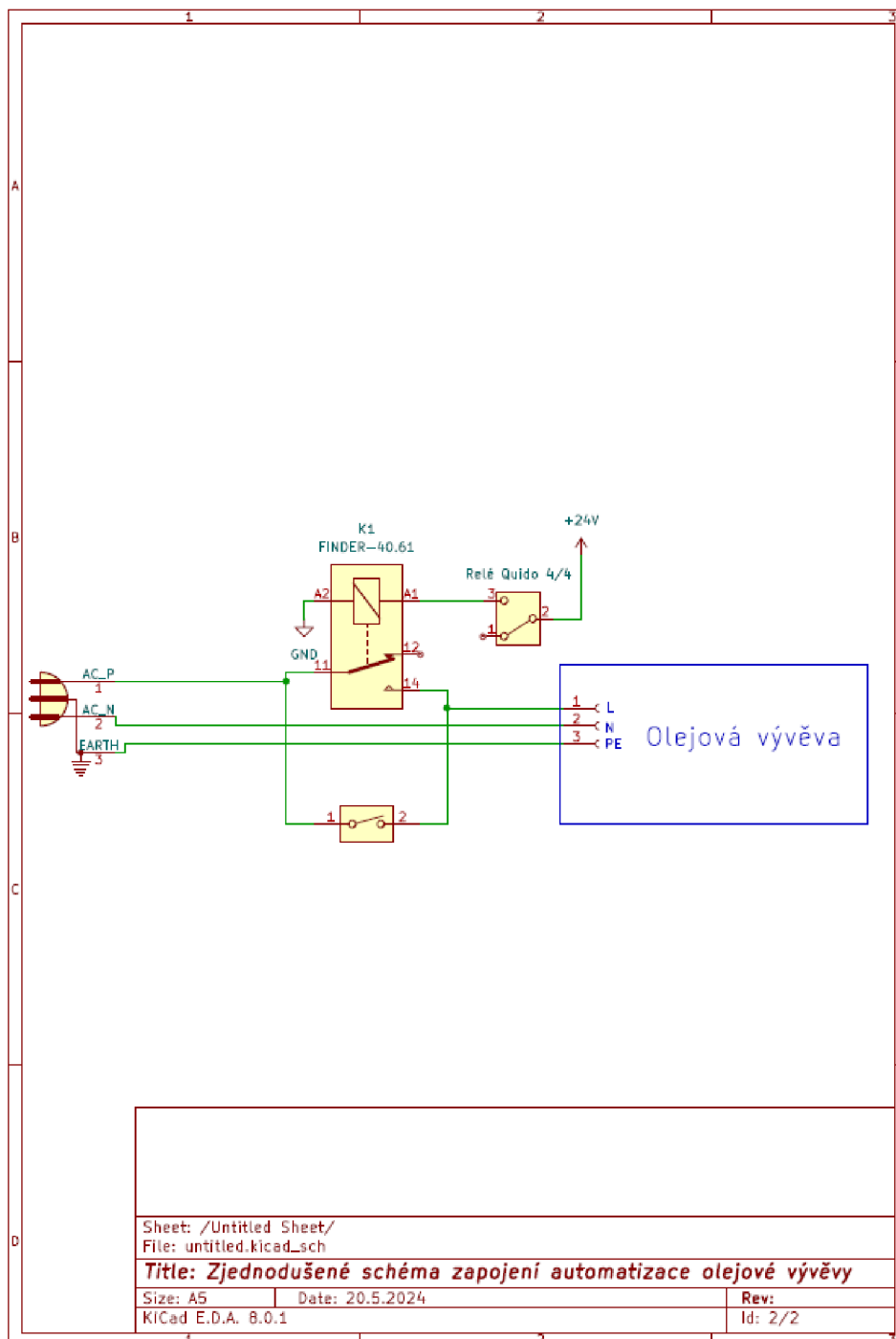
Tabulka 1 Parametry pro sériovou komunikaci s MKS TYPE 670B	10
Tabulka 2 Parametry sériové komunikace s IF 200	12
Tabulka 3 počet hodnot A/D převodníků	18
Tabulka 4 Příklady relativní změny tlaku na malé změny napětí [9]	18
Tabulka 5 Parametry pro sériovou komunikaci pro Quido ETH 4/4	19
Tabulka 6 Sestavení příkazu pro ovládání relé na Quido ETH 4/4 [7]	19
Tabulka 7 Naměřené hodnoty napětí pro kalibraci vstupů	24
Tabulka 8 Naměřené napětí pro kalibraci proudových vstupů	25
Tabulka 9 Závislost naměřených hodnot A/D převodníkem na výstupu laboratorního zdroje	26
Tabulka 10 Naměřené tlaky pro ověření funkce regulátoru	31

10.3 Seznam Grafů

Graf 1 Závislost tlaku na napětí pro Inficon Porter CDG020D [4]	11
Graf 2 Závislost naměřeného napětí A/D převodníkem a vstupním napětí pro vstup 0	26
Graf 3 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 0,1;0,2 a 0,5 Pa	32
Graf 4 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 1; 2 a 5 Pa	32
Graf 5 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 10; 20 a 50 Pa	33
Graf 6 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 100; 200 a 500 Pa	33
Graf 7 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 1000; 2000 a 5000 Pa	34
Graf 8 Zobrazení regulace v čase pro tlaky 10 000; 20 000 a 50 000 Pa	34

11 SEZNAM PŘÍLOH

11.1 Příloha č.1 – Zjednodušené elektrické schéma zapojení olejové vývěvy



11.2 Příloha č.2 – Citlivostní koeficienty tlaku na napětí pro měrky s logaritmickým výstupem [9]

Pokud vakuová měrka poskytuje výstupní napětí U ve Voltech, pak k přepočtu na základní jednotky, Pascaly, lze použít vztah:

$$p = 10^{\frac{U-U_0}{U_D}}$$

a k němu inverzní přepočet tlaku na konvenčně správné výstupní napětí:

$$U = U_0 + U_D \cdot \log_{10} p$$

Tyto tvary zápisu jsou jedny z možných a jsou nejilustrativnější právě proto, že konstanta U_0 je rovna napětí, které přístroj indikuje při tlaku 1 Pascalu, a konstanta U_D je rozdíl napětí odpovídající rozdílu tlaků o jednu dekádu (zvýšení napětí o U_D odpovídá vzrůstu tlaku na desetinásobek).

Pro různé měrky různých výrobců existuje několik různých přepočtů, shrnutých v následující tabulce:

Měrka	U_0	U_D
K. J. Lesker 354	8,000	1,000
WRG	6,667	0,667
Granville-Philips	6,875	1,000
Edwards AIGX-S	7,875	1,000
Pfeiffer PKR 251	5,600	0,600

Změnu tlaku odpovídající změně napětí lze vypočítat jako derivaci vztahu $p(U)$:

$$\frac{dp}{dU} = \frac{\ln 10}{U_D} \cdot 10^{\frac{U-U_0}{U_D}}$$

Relativní změna tlaku $\frac{dp}{p}$ s napětím pak odpovídá:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\frac{\ln 10}{U_D} \cdot 10^{\frac{U-U_0}{U_D}}}{10^{\frac{U-U_0}{U_D}}} = \frac{\ln 10}{U_D}$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{\ln 10}{U_D} \cdot dU$$

Tedy malá změna napětí ΔU způsobí odpovídající změnu indikace tlaku Δp :

$$\Delta p = p \cdot \frac{\ln 10}{U_D} \cdot \Delta U$$

A relativní změna tlaku (v poměru k aktuální hodnotě p) je rovna:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\ln 10}{U_D} \cdot \Delta U$$

Pro jednotlivé měrky z výše uvedené tabulky vychází relativní změny tlaku pro malé změny napětí takto:

Měrka	U_0	U_D	ΔU			
			0,010 V	0,005 V	0,002 V	0,001 V
K. J. Lesker 354	8,000	1,000	2,30 %	1,15 %	0,46 %	0,23 %
Edwards WRG	6,667	0,667	3,45 %	1,73 %	0,69 %	0,35 %
Granville-Philips	6,875	1,000	2,30 %	1,15 %	0,46 %	0,23 %
Edwards AIGX-S	7,875	1,000	2,30 %	1,15 %	0,46 %	0,23 %
Pfeiffer PKR 251	5,600	0,600	3,84 %	1,92 %	0,77 %	0,38 %

Pro měrky s lineárním výstupním signálem, kdy

$$\frac{U - U_{\text{MIN}}}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}} = \frac{p - p_{\text{MIN}}}{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}}$$

je změna tlaku odpovídající změně napětí rovna:

$$\frac{U - U_{\text{MIN}}}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}} = \frac{p - p_{\text{MIN}}}{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}}$$

$$\frac{U}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}} - \frac{U_{\text{MIN}}}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}} = \frac{p}{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}} - \frac{p_{\text{MIN}}}{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}}$$

$$U = U_{\text{MIN}} + p \cdot \frac{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}}{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}} - p_{\text{MIN}} \cdot \frac{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}}{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}}$$

nebo opačně:

$$p = p_{\text{MIN}} + U \cdot \frac{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}} - U_{\text{MIN}} \cdot \frac{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}}$$

$$\frac{dp}{dU} = \frac{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}}$$

a relativní změna tlaku (v poměru k celému rozsahu) je rovna relativní změně napětí:

$$\frac{dp}{p_{\text{MAX}} - p_{\text{MIN}}} = \frac{dU}{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}}$$

Například pro měрку s rozsahem (0 – 1100) hPa a výstupním signálem (0 – 10) V odpovídá změna napětí 0,010 V (jedno promile rozsahu) změně tlaku 1,1 hPa (též jedno promile rozsahu).

11.3 Příloha č.3 - Činnost systému

Vyčerpání recipientu s připojenými měrkami

- Zjištění tlaku v aparatuře, pokud je nižší než 100 Pa, je možné přeskočit předčerpání olejovou vývěvou
- Zapnutí olejové vývěvy
- Otevření ventilu mezi recipientem a olejovou vývěvou
- Čekání na pokles tlaku pod 100 Pa
- Zavření ventilu mezi recipientem a olejovou vývěvou
- Vypnutí olejové vývěvy
- Otevření ventilu mezi recipientem a běžící turbomolekulární vývěvou
- Čekání na pokles tlaku pod 0,10 Pa
- Čekání 10 minut
- Záznam 1 min
- Zavření ventilu mezi recipientem a běžící turbomolekulární vývěvou

Kalibrace

- Nastavení prvního tlaku 0,10 Pa
- Čekání 1 min
- Záznam 1 min
- Nastavení dalších tlaků, poté vždy čekání a záznam hodnot jako výše {0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1 000; 2 000; 5 000; 10 000 Pa}
- Zavření ventilu ke kapacitní 100Torr-ové měrce (100 Torr = 13 332,20 Pa)
- Nadále je k určení tlaku používána měrka Inficon Porte
- Nastavení, čekání a záznam pro zbývající tlaky {20 000 Pa; 50 000 Pa; 100 000 Pa}
- U tlaku 100 000 Pa se obvykle čeká před odečtem hodnoty ne 1 min, ale 10 minut.
- U velká části Piraniho měrek je třeba provést při takto ustáleném atmosférickém tlaku 100 kPa korekci na atmosféře stisknutím tlačítka na měrce. V tom případě by bylo třeba počkat na zásah a potvrzení od operátora. Je možné, že některé měrky by mohly mít nulování „vzdálené“, např. uzemněním nějakého vstupního pinu apod., systém by měl být modifikovatelný pro tuto možnost (je to však již mimo zadání práce).
- Kalibrace probíhá zpravidla ve třech sériích, tj. nyní se opět začne od začátku (viz výše) vyčerpáním systému a celý proces se zopakuje 2 x až 3 x

