

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Stanislav Rozsypal

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Automatizace testovací linky

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Stanislav Rozsypal**
Osobní číslo: **I21067**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **Automatizace testovací linky**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je automatizace ovládní a měření linky na testování absorpčních vlastností materiálů. Součástí linky je senzor teploty, vlhkosti, průtoku, koncentrace VOC, dva elektricky ovladatelné ventily a topení.

Teoretická část práce popíše možnosti připojení aktuátorů a snímačů, porovná složitost implementace, možnosti uživatelských rozhraní, spolehlivost a cenovou náročnost řešení při použití mikroprocesoru, akvizitních karet + PC, a nakonec PLC řešení.

Praktická část práce bude implementovat minimálně měření a vizualizaci měřených dat z testovací linky s možností základního ovládní aktivních prvků, viz dokumentace linky pomocí zvoleného řešení.

Rozsah pracovní zprávy: **30-50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003.336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8
- [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsival**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2024**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. ledna 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Automatizace testovací linky jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Stanislav Rozsypal

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Rozsivalovi za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při konzultacích během celé doby zpracování této práce. Poděkování patří také všem, kteří mi poskytli pomoc při realizaci měřicího systému, a v neposlední řadě mé rodině za podporu a pochopení v průběhu studia.

Závěrem bych rád vyjádřil vděčnost všem pedagogům, kteří mě během studia vedli. Díky jejich předaným znalostem a zkušenostem jsem mohl úspěšně realizovat tuto bakalářskou práci.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací systému pro testování filtračních materiálů pomocí akviziční karty a senzoričky. Cílem bylo vytvořit plně funkční a automatizovaný systém sběru dat, řízení aktivních prvků a vizualizace měření. Práce zahrnuje výběr a zapojení senzorů VOC, teploty, vlhkosti, průtoku a tlaku, návrh elektrického zapojení, softwarovou implementaci i praktické testování účinnosti filtračního materiálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

automatizace, testovací linka, akviziční karta, VOC senzor, filtrační materiály, .NET aplikace, řízení výstupních prvků, datová vizualizace

TITLE

Test Stand Automation

ANNOTATION

This bachelor thesis focuses on the design and implementation of a test system for evaluating the properties of filtration materials using a data acquisition card and sensors. The aim was to create a fully functional and automated system for data collection, control of actuators and measurement visualization. The work includes sensor selection and wiring, electronic design, software implementation and practical testing of filter material efficiency.

KEYWORDS

automation, test stand, data acquisition card, VOC sensor, filter materials, .NET application, actuator control, data visualization

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	11
ÚVOD.....	12
1 TEORETICKÁ ČÁST	13
1.1 Úvod do problematiky těkavých organických látek (VOC)	13
1.1.1 Definice a fyzikálně-chemické vlastnosti VOC.....	13
1.1.2 Zdroje VOC v životním prostředí.....	13
1.1.3 Dopady VOC na zdraví a životní prostředí	14
1.1.4 Význam monitorování a regulace VOC.....	15
1.2 Přehled senzorů pro měření VOC	16
1.2.1 Principy funkce senzorů VOC (polovodičové, elektrochemické, PID).....	16
1.2.2 Analýza dostupných senzorů na trhu	17
1.2.3 Porovnání senzorů dle parametrů (citlivost, přesnost, cena, dostupnost).....	18
1.3 Sensory pro měření teploty	19
1.3.1 Principy senzorů pro měření teploty	19
1.3.2 Analýza konkrétních senzorů na trhu	20
1.3.3 Porovnání teplotních senzorů dle parametrů	20
1.4 Sensory pro měření vlhkosti	22
1.4.1 Principy senzorů vlhkosti vzduchu	22
1.4.2 Analýza dostupných senzorů vlhkosti na trhu	22
1.4.3 Porovnání senzorů vlhkosti dle parametrů.....	23
1.5. Možnosti připojení senzorů a aktuátorů k řídicím systémům.....	24
1.5.1 Úvod do způsobů připojení.....	24
1.5.2 Mikroprocesorové systémy (Arduino, STM32, ESP32, Atmel AVR)	25
1.5.3 Akviziční karty propojené s PC	26
1.5.4 PLC systémy	28
2.1 Návrh systému automatizace testovací linky	31
2.2 Výběr a popis použitých komponent	33
2.2.1 Teplotní senzor – LM35DZ	33
2.2.2 Senzor vlhkosti – Honeywell HIH4030.....	34

2.2.3	Senzor těkavých organických látek (VOC) – Alphasense PIDX-A-200	35
2.2.4	Senzor průtoku – Honeywell AWM720P1	37
2.2.5	Elektromagnetické ventily	38
2.2.6	Akviziční karta	39
2.3	Softwarová implementace	40
2.3.1	Výběr vývojového prostředí a knihoven	40
2.3.2	Vytvoření DAQ úlohy a načítání dat	41
2.3.3	Zobrazení dat pomocí grafů	42
2.3.4	Ovládání výstupů – ventily a topení	43
2.3.5	Uložení dat a export výsledků	44
2.4	Konstrukce testovací linky	45
2.4.1	Mechanická konstrukce a rozmístění komponent	45
2.4.2	Elektrické zapojení a připojení komponent	46
2.4.3	Napájení systému	48
2.4.4	První měření a základní kalibrace	49
2.5	Vyhodnocení měření	50
2.5.1	Postup měření a nastavení podmínek	51
2.5.2	První test: 64 ppm aceton	51
2.5.3	Poznámka k dalším měřením	53
2.5.4	Shrnutí výsledků	53
2.6	Závěr a zhodnocení výsledků	54
2.6.1	Shrnutí provedených kroků	54
2.6.2	Funkčnost a spolehlivost systému	55
2.6.3	Omezení a poznatky během realizace	55
2.6.4	Možnosti rozšíření a využití	56
2.6.5	Sebehodnocení a přínos práce	56
	ZÁVĚR	57
	POUŽITÁ LITERATURA	58
	SEZNAM PŘÍLOH	62

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 Princip funkce PID senzoru využívajícího fotoionizaci molekul VOC (J. Sens. Syst., 2015).....	17
Obrázek 2 Senzor teploty LM35DZ (Texas Instruments, 2011)	21
Obrázek 3 Blokové schéma akvizičního systému pro sběr, převod a zobrazení dat (International Journal of Computer Applications, 2012).....	26
Obrázek 4 Schéma automatizovaného měřicího zařízení	32
Obrázek 5 Teplotní senzor LM35DZ (laskakit.cz, 2025).....	34
Obrázek 6 Senzor vlhkosti HIH4030 na modulu SparkFun s analogovým výstupem (robosavvy.co.uk, 2024)	35
Obrázek 7 Fotoionizační senzor PIDX-A-200 – reálné provedení (Alphasense, 2024).....	35
Obrázek 8 Kalibrační křivka senzoru PIDX-A-200 – výstupní napětí v závislosti na koncentraci izobutyleny (Alphasense, 2024).....	36
Obrázek 9 Závislost výstupu senzoru PIDX-A-200 na teplotě okolí – normalizovaný výstup (Alphasense, 2024)	37
Obrázek 10 Senzor průtoku vzduchu Honeywell AWM720P1 s konektorem pro zapojení.(DigiKey, 2025)	38
Obrázek 11 : Elektromagnetický ventil s mosazným tělem a připojením G 1/2", typ NC (elventil/2025).....	39
Obrázek 12 Akviziční karta National Instruments USB-6351 (National Instruments, 2024)..	40
Obrázek 13 Uživatelské rozhraní aplikace s možností exportu dat do formátu CSV nebo PNG.	45
Obrázek 14 Reálná testovací linka.....	46
Obrázek 15 Hlavní část schématu zapojení: propojení senzorů, výkonových prvků a DAQ karty.	47
Obrázek 16 Detail napájecí části: stabilizátory napětí a filtrační kondenzátory.....	48
Obrázek 17 Výstupní rozhraní aplikace vytvořené v .NET s průběhem měřených veličin (VOC, teplota, tlak, proudění)	50
Obrázek 18 Výsledný graf měření 64ppm, testovaného filtru typu Granulovaný aktivní uhlík (GAC)	52
Obrázek 19 Porovnání měření při 64ppm a 32ppm pro stejný filtr	54

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

VOC – Volatile Organic Compounds – těkavé organické látky

DAQ – Data Acquisition – akviziční karta

USB – Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice

PWM – Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace

ppm – parts per million – jednotka koncentrace

%RH – Relative Humidity – relativní vlhkost

AI – Analog Input – analogový vstup

DIO – Digital Input / Output – digitální vstup/výstup

.NET – Microsoft .NET Framework – softwarová platforma pro vývoj aplikací

C# – programovací jazyk C Sharp

GAC – Granulovaný Aktivní Uhlík – typ filtračního materiálu

SCL – Serial Clock Line – hodinový signál sběrnice I²C

SDA – Serial Data Line – datový signál sběrnice I²C

PID – Photoionization Detector – Fotoionizační detektor

SPI – Serial Peripheral Interface – Sériové periferní rozhraní

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

GUI – Graphical User Interface – Grafické uživatelské rozhraní

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition – dispečerské řízení a sběr dat

PCI – Peripheral Component Interconnect – sběrnice pro připojení periférií k základní desce

LED – Light-Emitting Diode – elektroluminiscenční dioda

Wi-Fi – Wireless Fidelity – standard pro bezdrátové sítě

MOS – Metal Oxide Semiconductor

LCD – Liquid Crystal Display – Displej z tekutých krystalů

TTL – Transistor-Transistor Logic – tranzistorově-tranzistorová logika

ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem, realizací a vyhodnocením systému pro automatizaci testovací linky určené k ověřování absorpčních vlastností filtračních materiálů. Hlavním cílem bylo vytvořit kompletní a funkční měřicí sestavu, která umožní sběr, zobrazení a vyhodnocení dat v reálném čase a zároveň nabídne uživatelsky přívětivé ovládání výstupních prvků linky, jako jsou elektromagnetické ventily nebo topné těleso.

Testovací linka byla osazena několika typy senzorů, které měří teplotu, vlhkost, průtok vzduchu, tlak a koncentraci těkavých organických látek (VOC). Data z těchto senzorů jsou zpracovávána pomocí akviziční karty National Instruments USB-6351 a vyhodnocována v aplikaci vytvořené v jazyce C#. Aplikace umožňuje kromě vizualizace také řízení aktivních prvků systému. Práce se opírá o reálné zapojení, měření a analýzu výsledků z provozu zařízení.

V teoretické části práce jsou porovnány různé přístupy k automatizaci měřicích systémů, včetně řešení založených na mikrokontrolérech, akvizičních kartách a programovatelných automatech (PLC). Jsou popsány výhody i nevýhody jednotlivých metod z hlediska jednoduchosti zapojení, nákladů, flexibility a náročnosti implementace.

Praktická část práce se pak věnuje návrhu systému, výběru komponent, jejich propojení a vytvoření softwaru pro ovládání a záznam měření. Následuje popis konstrukce linky, připojení všech prvků a finální ověření funkčnosti prostřednictvím reálných měření. Cílem bylo vytvořit zařízení, které lze využít jak pro výukové účely, tak i pro další experimenty a testování filtračních materiálů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Úvod do problematiky těkavých organických látek (VOC)

1.1.1 Definice a fyzikálně-chemické vlastnosti VOC

Těkavé organické látky (VOC – Volatile Organic Compounds) tvoří rozsáhlou skupinu uhlíkatých sloučenin, které se vyznačují vysokou těkavostí, což znamená, že mají tendenci se snadno odpařovat do okolního vzduchu při běžné teplotě a tlaku. Tato vlastnost souvisí s jejich nízkým bodem varu, který bývá zpravidla nižší než 250 °C při atmosférickém tlaku [1].

Z chemického hlediska zahrnují VOC velmi široké spektrum látek – od jednoduchých alifatických uhlovodíků přes aromatické sloučeniny až po aldehydy, ketony, estery a alkoholy. Jejich molekulární struktura a funkční skupiny mají přímý vliv na jejich reaktivitu, toxicitu a ekologický dopad. Mnohé VOC jsou lipofilní a mají schopnost bioakumulace v tukových tkáních živých organismů, což zvyšuje jejich potenciál dlouhodobého negativního účinku. [2] [3]

VOC jsou chemicky velmi aktivní, což znamená, že se snadno zapojují do reakcí ve vzduchu. Když se dostanou do ovzduší a setkají se tam s oxidy dusíku a slunečním zářením, vzniká při těchto reakcích troposférický ozón. Ten je součástí takzvaného fotochemického smogu, který znečišťuje ovzduší a škodí zdraví lidí i přírodě [4].

1.1.2 Zdroje VOC v životním prostředí

Těkavé organické látky (VOC) pocházejí z různých přírodních a antropogenních zdrojů. Přírodní zdroje zahrnují emise z vegetace, jako jsou isopreny a monoterpeny, které se uvolňují z rostlin a stromů. Antropogenní zdroje jsou však dominantní a zahrnují široké spektrum činností a produktů. [6]

Antropogenní zdroje VOC:

- **Doprava:** Podle údajů americké Agentury pro ochranu životního prostředí (EPA) doprava přispívá přibližně 10 % k celkovým emisím VOC ve Spojených státech [5].
- **Průmysl:** Průmyslové procesy, včetně výroby a zpracování chemikálií, přispívají významně k emisím VOC. Například v některých studiích bylo zjištěno, že průmyslové procesy mohou přispívat až 34,65 % k celkovým koncentracím VOC [6].
- **Domácnosti:** Domácnosti jsou významným zdrojem VOC, zejména v důsledku používání čisticích prostředků, kosmetiky, vaření a dalších činností. Studie ukazují, že koncentrace VOC v interiéru mohou být až desetkrát vyšší než venku [7].

Emise VOC vykazují sezónní variabilitu. V letních měsících dochází k vyšším emisím v důsledku zvýšených teplot, které podporují volatilitu těchto látek. Naopak v zimě může být koncentrace VOC v interiéru vyšší kvůli snížené ventilaci a zvýšenému používání topných zařízení [8].

Koncentrace VOC jsou obecně vyšší v interiéru než venku. Například koncentrace formaldehydu v interiéru se pohybují od 1 do 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, zatímco venkovní koncentrace jsou obvykle nižší. Benzen a toluen jsou také běžně detekovány v interiéru, často v důsledku používání produktů obsahujících tyto látky. [9]

V Evropské unii jsou emise VOC regulovány směrnicí 2004/42/ES, která stanovuje maximální obsah VOC v některých barvách, lacích a výrobcích pro opravy vozidel. Například pro vnitřní nátěrové hmoty je limit stanoven na 30–130 g/l v závislosti na typu produktu [10].

Studie provedená v nově postavených obytných budovách v Číně zjistila, že koncentrace formaldehydu byly až třikrát vyšší než v starších budovách. Toto zvýšení bylo přičítáno emisím z nových stavebních materiálů a nedostatečné ventilaci [11].

1.1.3 Dopady VOC na zdraví a životní prostředí

Expozice těkavým organickým látkám (VOC) představuje významný rizikový faktor pro lidské zdraví i pro kvalitu životního prostředí. VOC působí různými mechanismy v závislosti na své chemické struktuře, koncentraci a délce expozice. [12]

Krátkodobé působení VOC může vést k podráždění očí, nosu a krku, bolestem hlavy, nevolnosti či závratím. Některé látky, jako například formaldehyd nebo styren, mají také senzibilizující účinky a mohou vyvolat alergické reakce. U citlivých jedinců (např. astmatiků) může být expozice spouštěčem akutních záchvatů [12].

Dlouhodobá expozice některým VOC je spojována se závažnějšími zdravotními účinky. Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny (IARC) klasifikuje benzen jako karcinogen skupiny 1, což znamená, že existují dostatečné důkazy o jeho karcinogenitě u lidí. Benzen, toluen a další aromatické uhlovodíky mohou dále poškozovat kostní dřeň, játra, ledviny a centrální nervový systém [13].

Z hlediska ekologických dopadů hrají VOC významnou roli při tvorbě přízemního ozónu a fotochemického smogu, což negativně ovlivňuje vegetaci, ekosystémy i klima. Přízemní ozón způsobuje zpomalení růstu rostlin, poškození listové struktury a snížení výnosů plodin [14].

VOC mohou rovněž pronikat do půdy a podzemních vod, kde se mohou akumulovat a ovlivňovat biologické procesy v prostředí. Vzhledem k jejich perzistenci mohou některé látky přetrvávat v prostředí po delší dobu, což vyžaduje přísná opatření pro jejich sledování a eliminaci. [12]

1.1.4 Význam monitorování a regulace VOC

Těkavé organické látky (VOC) jsou součástí každodenního života – často si to ani neuvědomujeme. Nacházejí se ve sprejích, čisticích prostředcích, lepidlech, barvách, ale i v novém nábytku nebo podlahách. Některé z nich, jako je formaldehyd nebo benzen, mohou mít negativní vliv na zdraví, obzvláště pokud jsou ve vzduchu v uzavřených prostorách delší dobu. Proto je důležité jejich výskyt pravidelně sledovat a snažit se je omezit. [14]

VOC nejsou vidět ani cítit (alespoň většina z nich ne), ale mohou se v ovzduší hromadit. Zatímco venku se často rychle rozptýlí, v místnostech zůstávají a jejich koncentrace může být až několikanásobně vyšší než venku. Pravidelné měření koncentrace těchto látek nám pomáhá zjistit, kdy je třeba více větrat, vyměnit čisticí prostředky nebo zkontrolovat stavební materiály. [14]

Například v nově zrekonstruovaných bytech se často měří vyšší koncentrace formaldehydu, protože se uvolňuje z nábytku z dřevotřísky, podlah a lepidel. Pokud se takové látky neodvětrají, může to vést k bolestem hlavy, podráždění očí nebo dokonce k dlouhodobým problémům s dýcháním [15].

Měření se může provádět pomocí speciálních přístrojů – tzv. vzorkovačů nebo senzorů. Existují jednoduché detektory, které si může pořídit i běžná domácnost, ale také profesionální systémy pro průmyslové haly nebo laboratoře. Některé z nich umí měřit neustále v reálném čase a upozornit, když se koncentrace zvýší. [15]

Aby se předešlo zdravotním rizikům, existují v Evropské unii i v Česku limity, které říkají, kolik VOC smí být obsaženo například v barvách nebo lacích. Tyto limity jsou uvedeny ve směrnici 2004/42/ES a dodržují je výrobci i kontrolní úřady. Pro vnitřní prostředí platí také normy ČSN, které definují, jak se mají tyto látky měřit a co je ještě bezpečné. [16]

Například formaldehyd má v některých normách doporučený limit pod 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pokud je koncentrace vyšší, doporučuje se místnost vyvětrat nebo provést technická opatření. [18]

Monitorování VOC není jen byrokracie – jde o praktický nástroj, jak chránit zdraví lidí i přírodu. Díky pravidelnému sledování je možné: zjistit, jestli je vzduch v místnosti zdravý, vybrat šetrnější stavební materiály, omezit používání škodlivých čisticích prostředků, kontrolovat znečištění v průmyslu a výrobě, a především předcházet problémům, které by mohly nastat později. [18]

1.2 Přehled senzorů pro měření VOC

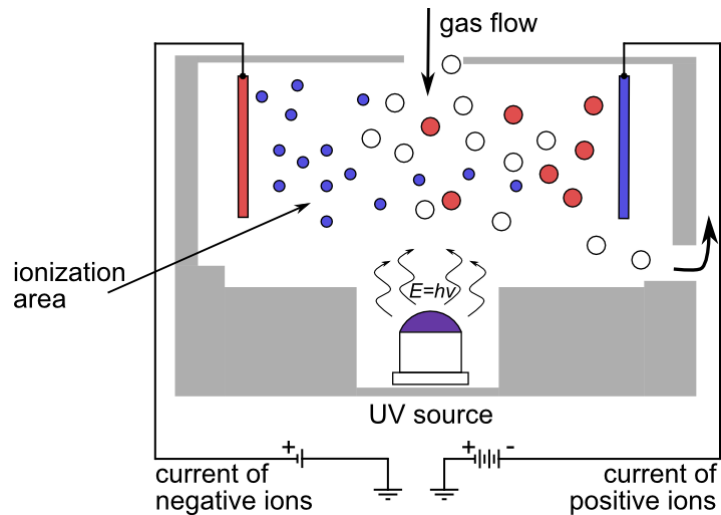
1.2.1 Principy funkce senzorů VOC (polovodičové, elektrochemické, PID)

Pro efektivní detekci těkavých organických látek (VOC) se využívají různé principy senzorů, které se liší svou technologií, citlivostí i použitím. Nejčastěji používané jsou senzory polovodičové, elektrochemické a senzory s fotoionizačním detektorem (PID). Každý typ má své výhody a nevýhody a je vhodný pro odlišné aplikace v průmyslu i domácím prostředí [17], [18].

Polovodičové senzory (MOS – Metal Oxide Semiconductor) jsou založeny na změně vodivosti polovodičového materiálu, obvykle oxidu cínu, při reakci s plynnými látkami. Tento princip je výhodný svou jednoduchostí a nízkými náklady, ale trpí nižší selektivitou a může být ovlivněn změnami teploty a vlhkosti prostředí. V praktických aplikacích bývají oblíbené například PID senzory řady PID-AH nebo PIDX-A-200, které umožňují měřit velmi nízké koncentrace VOC s vysokou citlivostí a rychlou odezvou. [20]

Elektrochemické senzory detekují VOC prostřednictvím chemických reakcí na elektrochemických člancích. Výsledný elektrický proud je úměrný koncentraci dané látky. Tyto senzory nabízejí vyšší přesnost a selektivitu, a proto se často používají v náročnějších aplikacích. [20]

Fotoionizační detektory (PID) využívají UV záření k ionizaci molekul VOC. Ionizované molekuly generují elektrický proud, jehož velikost odpovídá koncentraci VOC. Tento princip, zmíněný je mimořádně citlivý a umožňuje detekci velmi nízkých koncentrací (v řádu ppb), ale vyžaduje pečlivou údržbu. [20]



Obrázek 1 Princip funkce PID senzoru využívajícího fotoionizaci molekul VOC
(J. Sens. Sens. Syst., 2015)

Volba vhodného senzoru závisí na konkrétních požadavcích aplikace – MOS senzory jsou běžné v domácnostech pro svou nízkou cenu, zatímco v průmyslových a laboratorních prostředích se preferují přesnější elektrochemické nebo PID senzory. [20]

1.2.2 Analýza dostupných senzorů na trhu

Na současném trhu je k dispozici široká škála senzorů určených pro detekci těkavých organických látek (VOC), které se liší nejen svým principem, ale i konstrukcí, aplikací, cenou a technickými parametry. Tyto senzory nacházejí uplatnění v životním prostředí, průmyslové automatizaci, zdravotnictví i domácnostech [21].

Mezi významné výrobce těchto senzorů patří například Figaro, Alphasense, Sensirion nebo Bosch. Polovodičové senzory Figaro řady TGS jsou široce používány díky nízké ceně, jednoduchosti a snadné integraci. Vhodné jsou pro základní měření v domácnostech, automobilech a ventilačních systémech [22].

Elektrochemické senzory od firmy Alphasense vynikají vyšší přesností a selektivitou. Jsou často implementovány v průmyslových měřicích jednotkách, laboratořích nebo systémech ochrany zdraví, kde je nutná detekce konkrétních typů VOC i při nízkých koncentracích [22].

PID senzory umožňují detekci velmi nízkých koncentrací těkavých látek (v řádu jednotek až desítek ppb). Používají se v aplikacích s vysokými nároky na přesnost a rychlost měření – například v monitorovacích stanicích, přenosných detektorech nebo ve spojení s PLC [23].

Z hlediska zapojení těchto senzorů do automatizovaných systémů se velmi často používají mikrokontroléry AVR, které umožňují čtení a zpracování dat z analogových výstupů. Programování v jazyce C a použití vestavěných A/D převodníků zajišťuje vysokou flexibilitu při návrhu měřicích jednotek [24].

Významnou roli hraje také návrh analogové části – úprava signálu, potlačení šumu, linearizace výstupu nebo filtr pro eliminaci vlivu vlhkosti. Tato témata jsou často řešena v odborných publikacích zaměřených na základní elektroniku, které jsou hojně využívány v závěrečných pracích [25].

Důraz je rovněž kladen na uživatelské rozhraní – indikace stavu pomocí LED, vizualizace hodnot na LCD nebo přenos dat do nadřazeného systému. Systém může být realizován buď jako autonomní jednotka, nebo jako součást komplexního monitorovacího systému napojeného na centrální řízení [25].

1.2.3 Porovnání senzorů dle parametrů (citlivost, přesnost, cena, dostupnost)

Srovnání senzorů pro měření těkavých organických látek (VOC) se nejčastěji zaměřuje na parametry jako je citlivost, selektivita, linearita výstupu, životnost, provozní podmínky a ekonomická náročnost. [26]

Citlivost senzorů je klíčovým parametrem především při měření velmi nízkých koncentrací VOC. PID senzory umožňují detekci v řádech jednotek až desítek ppb, zatímco elektrochemické senzory běžně pracují v rozsahu nízkých ppm. MOS senzory mají vyšší limity detekce, což je činí vhodnými spíše pro orientační měření. [25]

Selektivita se týká schopnosti rozlišit konkrétní složku ve směsi VOC. Zde vynikají elektrochemické senzory a PID detektory, které se díky specifickým ionizačním energiím nebo elektrochemickým reakcím zaměřují na konkrétní sloučeniny. Oproti tomu MOS senzory reagují obecněji na širší spektrum látek. [26]

Přesnost měření závisí mimo jiné na linearitě výstupu, stabilitě signálu a schopnosti senzorového systému korigovat vlivy prostředí. PID senzory dosahují nejvyšší přesnosti, ale zároveň vyžadují pravidelnou kalibraci a údržbu. [27]

Cena senzorů se výrazně liší podle technologie – MOS senzory se pohybují v jednotkách eur, elektrochemické v řádu stovek korun a PID senzory mohou přesáhnout i několik tisíc. Rozdíly se promítají do konstrukční náročnosti i provozních nákladů. [27]

Dostupnost náhradních dílů, potřeba kalibrace, výdrž elektrolytu nebo stabilita polovodičového materiálu jsou faktory, které ovlivňují celkovou životnost a údržbu. Například elektrochemické senzory je potřeba měnit přibližně po 2 letech provozu, zatímco dobře navržený MOS senzor může sloužit i 5 let. [25]

Z hlediska technické implementace se často řeší i možnost programového zpracování výstupních dat v mikrokontrolérech nebo připojení na analogové vstupy měřicích karet. Převod výstupu na digitální hodnotu, aplikace filtrace a linearizace jsou popsány v odborné i univerzitní literatuře zaměřené na řízení technologických procesů. [28]

1.3 Senzory pro měření teploty

1.3.1 Principy senzorů pro měření teploty

Teplota je jedním z nejčastěji sledovaných fyzikálních parametrů v technické praxi, a její měření je nezbytné ve většině průmyslových, domácích i laboratorních aplikací. Pro měření teploty se využívá více typů senzorů, které se liší principem činnosti, rozsahem měření, přesností i nároky na zpracování signálu. [5] [29]

Mezi základní typy patří odporové teploměry (např. Pt100, Pt1000), jejichž princip spočívá v lineární změně odporu kovového vodiče v závislosti na teplotě. Platina se používá pro svou stabilitu a opakovatelnost. Jsou přesné, ale nákladnější. [5] [30]

Termočlánky využívají termoelektrického jevu – vznik napětí na spoji dvou rozdílných kovů, které je úměrné rozdílu teplot. Jsou jednoduché a odolné, ideální pro vyšší teplotní rozsahy, ale méně přesné. [28] [31]

Polovodičové senzory, jako například TMP36 nebo LM35DZ, mění své výstupní napětí lineárně v závislosti na okolní teplotě. Díky své jednoduché konstrukci a nízké ceně se hojně využívají v embedded systémech nebo spotřební elektronice, i když mají omezenou přesnost a bývají citlivé na výkyvy napájecího napětí. [35]

Digitální senzory, jako je DS18B20, poskytují výstup přímo ve formátu digitální hodnoty, což eliminuje potřebu externího A/D převodníku. Tento senzor komunikuje prostřednictvím sběrnice 1-Wire, což umožňuje připojení více čidel na jednu linku. Je oblíbený zejména v domácích měřicích systémech. [34]

Při výběru teplotního senzoru je důležité zohlednit nejen rozsah a přesnost měření, ale také linearitu, odolnost vůči elektromagnetickému rušení, konstrukční provedení nebo způsob napájení. V měřicích systémech řízených mikrokontroléry bývá nutná úprava signálu, jeho filtrování nebo digitalizace. [2] [34]

Volba konkrétního senzoru by měla odpovídat konkrétní aplikaci – v průmyslu jsou populární Pt100 a termočlánky typu K, v domácnostech digitální DS18B20 a v embedded systémech například LM35DZ. [1] [30]

1.3.2 Analýza konkrétních senzorů na trhu

Na trhu je dnes dostupná široká škála teplotních senzorů, které se liší technologií, přesností, rozsahem měření a způsobem komunikace. Výběr vhodného senzoru závisí na konkrétní aplikaci, nárocích na přesnost, rychlost měření a způsobu připojení k řídicímu systému. [29]

DS18B20 je digitální teplotní senzor vyráběný firmou Maxim Integrated, který je velmi oblíbený pro svou jednoduchost a komunikaci pomocí 1-Wire sběrnice. Nabízí rozlišení až 12 bitů, měřicí rozsah od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesnost $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Díky digitálnímu výstupu není nutná další úprava signálu, což zjednodušuje návrh měřicích obvodů. [34]

TMP36 od společnosti Analog Devices je nízkonapěťový lineární teplotní senzor s analogovým výstupem, určený pro měření v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výstupní napětí se mění úměrně teplotě, typicky $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, a výstup při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ je 750 mV . Je vhodný pro jednoduché aplikace s mikrokontroléry, které mají A/D převodník. [35]

LM35DZ od Texas Instruments je podobně jako TMP36 analogový senzor s lineárním výstupem. Má vyšší přesnost než TMP36 a je kalibrován přímo ve stupních Celsia. Nevyžaduje externí kalibraci a je široce používán ve vzdělávacích i průmyslových aplikacích. [36]

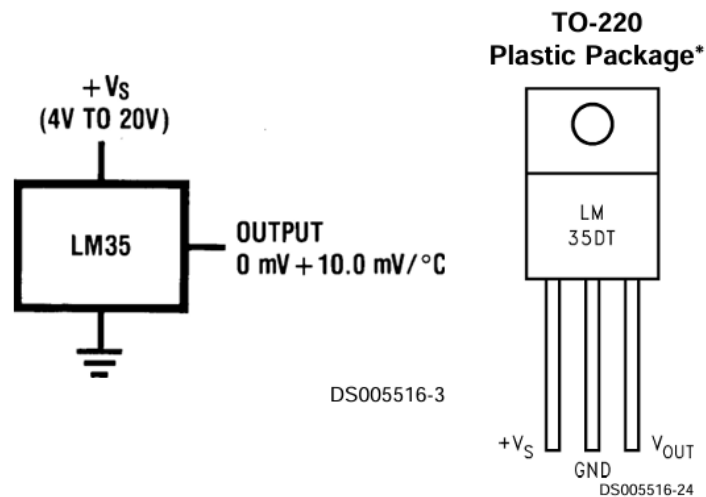
Pro přesná a stabilní měření v průmyslu se často používají odporové snímače Pt100 nebo termočlánky typu K. Tyto senzory mají vysoký rozsah teplot a dobrou opakovatelnost. Většinou však vyžadují zesílení a lineární úpravu výstupního signálu, což zvyšuje nároky na zapojení. [29] [32]

1.3.3 Porovnání teplotních senzorů dle parametrů

Při výběru vhodného senzoru pro měření teploty je nutné zohlednit více parametrů, které ovlivňují přesnost, spolehlivost a cenu výsledného řešení. Mezi nejdůležitější patří rozsah měření, přesnost, výstupní signál (analogový vs. digitální), linearita, stabilita, citlivost na rušení, napájení a samozřejmě cena. [29]

DS18B20 jako digitální senzor nabízí výhodu přímé digitální komunikace a jednoduchého zapojení. Jeho přesnost $\pm 0,5$ °C v rozsahu -10 až $+85$ °C je dostatečná pro běžné aplikace. Je však pomalejší (konverze až 750 ms) a omezený na sběrnici 1-Wire. [34]

TMP36 a LM35DZ jsou levné analogové senzory, které jsou vhodné pro jednoduché aplikace s mikrokontroléry. TMP36 má nižší přesnost a je citlivější na napětí, zatímco LM35DZ poskytuje lepší linearitu a přesnost, ale vyžaduje čisté napájení a citlivější analogové čtení. [35] [36]



Obrázek 2 Senzor teploty LM35DZ (Texas Instruments, 2011)

Pro náročné průmyslové aplikace jsou preferovány odporové senzory jako Pt100 nebo termočlánky. Pt100 nabízí vysokou přesnost a opakovatelnost, ale vyžaduje proudový buzení a zesílení. Termočlánky typu K pokrývají extrémní rozsah teplot, ale mají nelineární charakteristiku a vyžadují kompenzaci spojů. [29] [32]

Cena senzorů se pohybuje v širokém spektru v závislosti na technologii, výrobci a dodavateli. Například senzory TMP36 a LM35DZ jsou běžně dostupné za ceny kolem 30–60 Kč, DS18B20 přibližně 60–120 Kč a profesionální odporové senzory Pt100 nebo termočlánky typu K s převodníky se pohybují od 300 Kč výše. Ceny se mohou lišit v závislosti na požadavcích na přesnost, montážní provedení a výstupní rozhraní. Tyto údaje jsou čerpány z katalogů dodavatelů elektronických součástek jako GME, TME nebo Conrad. [37]

1.4 Senzory pro měření vlhkosti

1.4.1 Principy senzorů vlhkosti vzduchu

Měření vlhkosti vzduchu je důležité v řadě aplikací – od klimatizace, zemědělství, skladování potravin až po průmyslové procesy. Vlhkost ovlivňuje kvalitu prostředí, komfort, bezpečnost i životnost zařízení. Pro detekci vlhkosti se nejčastěji využívají senzory kapacitní, odporové a optické. [29]

Kapacitní senzory měří změnu permitivity (dielektrické konstanty) mezi elektrodami v závislosti na obsahu vodních par ve vzduchu. Jsou nejběžnější díky své spolehlivosti, kompaktnímu provedení a širokému rozsahu měření. Typickým příkladem je senzor H1H-4030 od Honeywell. [38]

Odporové senzory měří změnu elektrického odporu hygroskopického materiálu, který absorbuje vlhkost ze vzduchu. Jejich výhodou je jednoduchost, ale bývají méně stabilní při dlouhodobém použití. [29]

Optické senzory fungují na principu změny propustnosti nebo odrazu světla v závislosti na kondenzaci vlhkosti na optické ploše. Používají se zejména ve speciálních aplikacích s vysokou přesností nebo v prostředí s požadavky na sterilitu. [39]

1.4.2 Analýza dostupných senzorů vlhkosti na trhu

Na trhu existuje mnoho různých senzorů, které dokážou měřit vlhkost vzduchu. Liší se tím, jak přesně měří, v jakém rozsahu fungují a jak jednoduše se dají připojit k elektronice. Mezi nejčastěji používané patří senzory s názvy DHT11, DHT22, SHT31, H1H-4030 nebo BME280. Některé jsou velmi jednoduché a levné, jiné přesnější a určené spíše pro profesionální použití. [38] [40]

H1H-4030 od společnosti Honeywell je analogový senzor vlhkosti vzduchu, který se vyznačuje jednoduchostí použití a spolehlivostí. Výstupní napětí senzoru je přímo úměrné relativní vlhkosti, což umožňuje snadné připojení a interpretaci výsledků pomocí analogově-digitálního převodníku. Vlhkost může být měřena v rozsahu 0 až 100 % s přesností $\pm 3,5$ % RH. Díky své robustnosti, rychlé odezvě a poměrně vysoké přesnosti je H1H-4030 využíván v různých aplikacích od běžného domácího použití až po mírně náročnější průmyslové aplikace. [38]

DHT11 je cenově dostupný senzor, který umí měřit teplotu i vlhkost. Připojuje se jednoduše pomocí digitálního signálu. Vlhkost měří v rozmezí 20 až 90 % s přesností ± 5 %. Je vhodný spíše pro nenáročná měření, třeba doma nebo pro výuku. [40]

DHT22 je vylepšená verze DHT11. Dokáže měřit v širším rozsahu (0 až 100 % vlhkosti) a s lepší přesností ($\pm 2-5$ %). Je vhodný tam, kde je potřeba trochu lepší výsledek, ale stále se jedná o levné řešení. [40]

SHT31 je moderní senzor od firmy Sensirion. Nabízí velmi přesné měření (± 2 % RH), je stabilní a komunikuje pomocí I2C sběrnice. Používá se i v profesionálních aplikacích, kde je potřeba spolehlivý a přesný výsledek. [41]

BME280 je víceúčelový senzor od firmy Bosch. Kromě vlhkosti měří také teplotu a atmosférický tlak. Je velmi přesný (± 3 % RH) a umožňuje komunikaci přes více typů připojení (I2C nebo SPI). Je vhodný pro různé chytré systémy a automatizace. [42]

1.4.3 Porovnání senzorů vlhkosti dle parametrů

Při výběru senzoru pro měření vlhkosti je vhodné se zaměřit na několik důležitých faktorů – přesnost měření, rozsah měřené vlhkosti, rychlost reakce na změny, typ výstupu (digitální nebo analogový), stabilitu v čase a pořizovací cenu. [29]

DHT11 je levný a jednoduchý senzor. Vlhkost je měřena s přesností ± 5 % v rozsahu 20 až 90 %. Tento senzor je obvykle využíván pro nenáročné aplikace jako domácí použití nebo výuku, kde menší přesnost není kritická. [40]

DHT22 nabízí širší rozsah měření (0 až 100 % vlhkosti) s lepší přesností v rozmezí ± 2 až 5 %. Cenově je mírně dražší, avšak stále dostupný. [40]

HIH-4030 poskytuje analogový výstup a měří vlhkost v celém rozsahu od 0 do 100 % s přesností $\pm 3,5$ %. Díky rychlé odezvě a stabilitě nachází tento senzor uplatnění jak v domácích, tak i v mírně náročnějších průmyslových aplikacích, kde analogový výstup umožňuje snadnou integraci do elektronických systémů. [43]

Senzory SHT31 nebo BME280 patří mezi přesnější a spolehlivější varianty. Vlhkost je měřena s přesností kolem ± 2 až 3 % RH, dlouhodobá stabilita je vysoká a jsou často součástí chytrých zařízení. Výhodou je moderní komunikace pomocí rozhraní I2C nebo SPI, což je výhodné při integraci do složitějších systémů. [41] [42]

Optické senzory jsou využívány v případech vyžadujících velmi přesná měření nebo v prostředích, kde klasické senzory nejsou vhodné, jako jsou laboratoře nebo sterilní prostory. Jsou odolné vůči rušení a vykazují rychlou odezvu. [39]

Cena senzorů se značně liší – základní DHT11 lze zakoupit za cenu kolem 30 až 50 Kč, DHT22 za 80 až 130 Kč. Sensory HIH-4030 jsou dostupné v cenové hladině 100 až 200 Kč. SHT31 a BME280 se pohybují v rozmezí 150 až 300 Kč. Optické senzory patří k nejdražším variantám, ale poskytují nejvyšší přesnost. [37]

1.5. Možnosti připojení senzorů a aktuátorů k řídicím systémům

1.5.1 Úvod do způsobů připojení

Celkově tedy výběr vhodné platformy pro připojení senzorů a aktuátorů výrazně ovlivňuje výslednou kvalitu, rychlost vývoje i ekonomickou efektivitu projektu. Vhodně zvolený přístup umožní realizovat spolehlivý a škálovatelný systém, který bude dobře fungovat nejen v laboratorním, ale i reálném provozním prostředí. [34]

Zvláštní pozornost je potřeba věnovat i napájení a fyzické ochraně komponent. Pro sensoriku a aktuátory je klíčové stabilní napájení, správné dimenzování vodičů, ochrana proti přepětí a elektromagnetickému rušení, což bývá běžnou součástí návrhu zejména u PLC systémů. Mikroprocesory a akviziční karty vyžadují často více práce při návrhu těchto obvodů, ale nabízejí větší variabilitu. [32]

Kromě fyzického zapojení je důležité také zohlednit, jakým způsobem dochází ke sběru dat, jejich zpracování a vyhodnocení. Mikroprocesorové systémy obvykle poskytují přímý přístup k datům ze senzorů prostřednictvím analogových či digitálních vstupů, často využívají standardní sběrnice jako I2C, SPI nebo UART. Naopak akviziční karty s připojením k PC umožňují vysokou flexibilitu při záznamu a vizualizaci dat, ale za cenu vyšší složitosti nastavení a závislosti na softwarovém prostředí. PLC systémy jsou pak známé svou robustností a vysokou spolehlivostí, což z nich činí preferované řešení v průmyslovém nasazení. [28]

Tato kapitola se zaměřuje na porovnání tří hlavních variant – mikroprocesorových platform jako Arduino, STM32 nebo ESP32, dále akvizičních karet ve spojení s osobním počítačem a nakonec PLC systémů, které dominují v průmyslových provozech. Cílem je popsat princip fungování každého přístupu, typické způsoby připojení, možnosti komunikace se senzory a aktuátory a především posoudit jejich vhodnost z hlediska konkrétního použití ve zkušební lince měřící těkavé organické látky (VOC), teplotu a vlhkost. [31]

Pro účinné řízení a sběr dat z testovací linky je zásadní správná volba způsobu propojení senzorů a aktuátorů s řídicím systémem. V praxi existuje několik přístupů, jak toto připojení realizovat – od jednoduchých mikroprocesorových systémů, přes akviziční karty propojené s počítačem, až po průmyslově robustní PLC systémy. Každé z těchto řešení nabízí jiné výhody a úskalí v závislosti na konkrétní aplikaci, požadované přesnosti, rychlosti odezvy a rozpočtu. [30]

1.5.2 Mikroprocesorové systémy (Arduino, STM32, ESP32, Atmel AVR)

Mikroprocesorové systémy představují flexibilní a cenově dostupné řešení pro připojení senzorů a řízení aktuátorů v automatizačních aplikacích. Nejčastěji používané platformy zahrnují Arduino, STM32, ESP32 nebo Atmel AVR. Každá z těchto platform poskytuje specifické výhody a je vhodná pro různé úrovně složitosti systémů. [29]

Arduino platforma je oblíbená pro svou jednoduchost, širokou komunitu a rozsáhlou podporu knihoven. Díky otevřenému hardwaru i softwaru je vhodná pro rychlé prototypování a vzdělávací účely. Její nevýhodou však může být omezený výkon a počet dostupných periférií. [31]

Platforma STM32, založená na architektuře ARM Cortex-M, nabízí vyšší výkon, větší množství periférií a nízkou spotřebu energie. Je preferována v profesionálních embedded aplikacích, kde je kladen důraz na výpočetní výkon a optimalizaci zdrojů. Programování bývá komplexnější a často vyžaduje použití vývojových prostředí jako STM32CubeIDE. [31]

ESP32 je mikrořadič od firmy Espressif s integrovaným Wi-Fi a Bluetooth modulem, což ho činí ideálním řešením pro bezdrátové aplikace. Je široce využíván v oblasti IoT (Internet of Things), domácí automatizace a chytrých zařízení. Výhodou je také dvoujádrový procesor a velká rozšiřitelnost. [29]

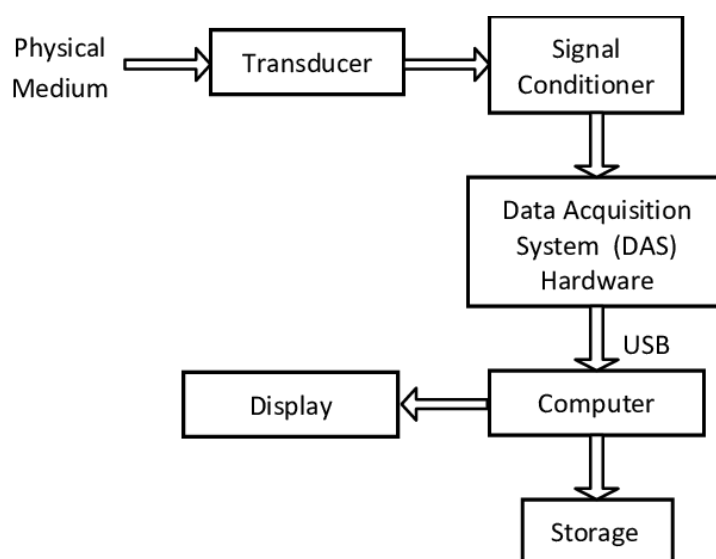
Atmel AVR je tradiční platforma, často používaná ve výuce mikroprocesorové techniky. Vyžaduje detailní znalosti programování v jazyce C a práce s registry. Platforma poskytuje dobrý poměr cena/výkon pro jednoduché aplikace a hlubší pochopení fungování mikrokontrolérů. [31] [29]

Mikroprocesorové systémy obecně komunikují se senzory a aktuátory prostřednictvím digitálních nebo analogových vstupů a výstupů. Mezi běžně používaná rozhraní patří I2C, SPI a UART. Tyto systémy se často používají v kombinaci s různými typy snímačů, jako jsou teploměry (např. LM35DZ), vlhkoměry nebo VOC senzory. [29]

Z hlediska realizace jsou mikroprocesorové systémy atraktivní zejména díky nízkým nákladům, modulárnosti a široké nabídce vývojových nástrojů a knihoven. Jsou vhodné pro laboratorní měřicí systémy, domácí automatizaci a malé průmyslové projekty, kde není nutná robustnost a certifikace jako u PLC. [29]

1.5.3 Akviziční karty propojené s PC

Akviziční karty představují flexibilní prostředek pro připojení senzorů k osobnímu počítači a zajištění sběru dat. Používají se zejména ve výzkumných a vývojových aplikacích, kde je požadována vysoká přesnost měření a možnost detailního zpracování dat. [43]



Obrázek 3 Blokové schéma akvizičního systému pro sběr, převod a zobrazení dat (International Journal of Computer Applications, 2012)

Typické akviziční karty disponují vícekanálovými analogovými a digitálními vstupy, výstupy, A/D i D/A převodníky. Rozlišení analogových vstupů bývá 12–24 bitů, což umožňuje přesné měření i velmi malých signálů, jako je například nízká koncentrace VOC nebo mírné změny teploty. Pro tyto účely se v praxi často využívají senzory na bázi fotoionizační detekce (PID), jako například PIDX-A-200, jejichž výstupní signály jsou ideálně přizpůsobeny pro přesné snímání pomocí citlivých akvizičních systémů. [45]

Mezi nejčastěji používané softwarové nástroje pro konfiguraci a zpracování dat patří platformy jako LabVIEW, MATLAB nebo NI-DAQ. Tyto nástroje umožňují uživatelsky přívětivé vytváření měřicích a regulačních schémat, zaznamenávání hodnot i jejich vizualizaci. Kromě specializovaných softwarových prostředí se stále častěji využívá i přímé programování pomocí jazyků jako je C# v kombinaci s knihovny typu National Instruments DAQmx, což umožňuje flexibilní a rychlé vytvoření vlastních měřicích aplikací. [43]

Akviziční karty se uplatňují také při vývoji prototypů a laboratorních měřeních. V automatizaci testovacích linek jsou vhodné zejména tam, kde je potřeba opakovatelně zaznamenávat chování zařízení nebo analyzovat reakci systému při změně podmínek. [44]

Nevýhodou akvizičních karet bývá vyšší pořizovací cena, potřeba instalace specializovaného softwaru a ovladačů, a také větší nároky na správné nastavení hardwaru. V některých případech může být problémem i nižší odolnost vůči elektromagnetickému rušení a nutnost externího napájení. [25]

Existuje několik typů akvizičních karet v závislosti na způsobu komunikace – například PCI, PCIe, USB nebo Ethernet. USB akviziční karty jsou populární pro svou snadnou přenositelnost, zatímco karty do sběrnice PCIe se vyznačují vyšší rychlostí přenosu dat a stabilitou připojení. Ethernetové karty pak umožňují vzdálený sběr dat v síťovém prostředí. [44]

Výrobci jako National Instruments, Advantech nebo Measurement Computing nabízejí širokou škálu akvizičních modulů, které lze jednoduše přizpůsobit konkrétní aplikaci. Moduly bývají specializované na určité typy vstupních signálů – např. napěťové, proudové, odporové nebo z teplotních čidel typu termočláanky či RTD. [43]

Z hlediska přesnosti měření je důležité zohlednit parametry jako vzorkovací frekvence, šířka pásma, lineární chyba převodníku a čas odezvy. Při měření koncentrací VOC nebo teplotních změn se běžně využívají vzorkovací frekvence od jednotek Hz po stovky Hz, podle požadovaného časového rozlišení. [45]

V pokročilejších aplikacích lze akviziční karty využít i pro řízení. Některé modely obsahují digitální výstupy nebo dokonce reléové kontakty, které umožňují přímé ovládání ventilů, čerpadel nebo jiných akčních členů v testovací lince. Takový přístup je výhodný zejména při vývoji řídicí logiky v rámci jedné platformy. [43]

Integrace s počítačem umožňuje kombinovat měření s pokročilou analýzou dat – např. statistickým vyhodnocením, detekcí anomálií nebo vytvářením predikčních modelů. To je velmi cenné v oblasti environmentálního inženýrství nebo vývoje nových filtračních technologií, kde se sledují dlouhodobé trendy a reakce materiálů na změny koncentrace VOC. [45]

1.5.4 PLC systémy

Programovatelné logické automaty (PLC) představují jeden z nejrozšířenějších nástrojů pro řízení automatizovaných systémů zejména v průmyslovém prostředí. Ve srovnání s mikrokontroléry jako je například Atmel AVR (používaný například v platformě Arduino), nabízejí PLC vyšší odolnost, modularitu, dlouhou životnost a možnost práce v náročném provozním prostředí. [30][31][32]

PLC systémy jsou typicky složeny z řídicí jednotky (CPU), vstupně-výstupních modulů (I/O), komunikačních rozhraní a napájecího zdroje. I když v oblasti výuky nebo nenáročných aplikací často narazíme na mikrokontroléry jako ATmega328P (Arduino UNO), v průmyslu mají PLC výhodu zejména v diagnostice, standardizaci (např. programování dle IEC 61131-3) a možnosti propojení s SCADA systémy. [32][46]

Mikrokontroléry jako Atmel AVR výborné pro embedded aplikace, rychlou prototypizaci a jednoduché měřicí úlohy, ale jejich využití v robustních průmyslových aplikacích je omezeno absencí certifikací, nižší ochranou proti rušení a chybějící redundancí. [30][31]

Naopak PLC systémy jsou navrženy tak, aby zvládly i dlouhodobý provoz bez restartu či výpadku. Nabízejí přímou kompatibilitu s průmyslovými senzory a aktuátory, jako jsou relé, elektromagnetické ventily nebo analogové vstupy 4–20 mA. Velkou výhodou je rovněž možnost snadného rozšíření pomocí přídatných modulů a přímé vizualizace pomocí HMI panelů. [32]

Kromě výše zmíněného lze PLC jednoduše integrovat do vyšších úrovní řízení prostřednictvím standardních komunikačních protokolů (např. Modbus, Profibus, Profinet), které mikrokontroléry typu Arduino zpravidla neimplementují bez pokročilého programování nebo přídatných modulů. [32]

Z výše uvedeného vyplývá, že zatímco mikrokontroléry jako Atmel AVR a Arduino nacházejí uplatnění v menších, cenově citlivých projektech nebo v oblasti výuky, PLC zůstávají standardem pro aplikace, kde jsou klíčové spolehlivost, odolnost a dlouhodobý provoz. [30][32][46]

1.5.5 Porovnání složitosti implementace, spolehlivosti, uživatelských rozhraní a cenové náročnosti

Při volbě vhodného řídicího systému pro automatizaci testovací linky je důležité porovnat jednotlivé varianty nejen z hlediska technických parametrů, ale také z pohledu složitosti implementace, spolehlivosti, dostupnosti uživatelského rozhraní a finančních nákladů. Nejčastěji se uvažují tři hlavní kategorie řešení: mikrokontroléry (např. Atmel AVR, Arduino, ESP32), akviziční karty propojené s PC a programovatelné logické automaty (PLC). [30][31][32]

Z pohledu implementace jsou mikrokontroléry jako Arduino a Atmel AVR vhodné pro uživatele, kteří mají základní znalosti programování a elektroniky. Vývojová prostředí jako Arduino IDE nebo PlatformIO umožňují poměrně snadnou práci. Na druhou stranu, integrace s více senzory, zajištění spolehlivosti a pokročilé rozhraní může být náročnější a vyžadovat dodatečné moduly nebo přizpůsobení. [32]

Významnou výhodou akvizičních karet je jejich flexibilita a schopnost snadné integrace s pokročilým softwarem pro analýzu dat. Díky tomu jsou velmi vhodné pro aplikace, kde je požadováno nejen řízení, ale také detailní zaznamenávání, zpracování a vizualizace velkého objemu měřených dat. V praktických realizacích se často využívají kombinace akvizičních karet s programováním v jazyce C#, kde knihovny typu National Instruments DAQmx umožňují přímé čtení dat například z PID senzorů měřících koncentraci VOC v reálném čase. [32]

V kombinaci s PC navíc umožňují jednoduchý přístup k výpočetnímu výkonu a rozšířené možnosti uživatelského rozhraní, což z nich činí atraktivní volbu pro výzkumné a testovací aplikace, kde je kladen důraz na univerzálnost a přehlednost výsledků. [32]

Akviziční karty ve spojení s PC poskytují vyšší výkon a flexibilitu. Jsou schopny zpracovávat větší objemy dat a umožňují sofistikovanou vizualizaci pomocí software jako LabVIEW, MATLAB nebo SCADA systémy. Vývoj je však náročnější na konfiguraci, licencování softwaru a technickou podporu. Toto řešení je vhodné především pro laboratorní prostředí nebo výzkumné účely. [32]

PLC systémy jsou standardem v průmyslu. Nabízejí robustní konstrukci, dlouhou životnost a vysokou odolnost vůči rušení. Díky programovacím jazykům dle normy IEC 61131-3 a široké podpoře hardwaru jsou implementace standardizované a dobře zdokumentované. Významnou výhodou je i přímé napojení na SCADA nebo HMI panely. Nevýhodou bývá vyšší pořizovací cena a složitější počáteční konfigurace. [32][46]

Co se týče spolehlivosti, PLC jasně dominují díky odolnosti, redundantnímu napájení a vestavěné diagnostice. Mikrokontroléry jsou méně robustní a náchylnější na rušení, ale při správném návrhu mohou být dostatečné pro méně náročné aplikace. Akviziční karty leží mezi těmito dvěma extrémy, a jejich spolehlivost závisí primárně na kvalitě napájení a software. [32]

Cenová náročnost je dalším klíčovým faktorem. Nejlevnější variantu obvykle představují mikrokontroléry, a to jak z hlediska hardware, tak i vývojových nástrojů (většinou open-source). Akviziční karty a PLC mají vyšší nároky na investici, přičemž PLC zpravidla přinášejí nejvyšší počáteční náklady, ale zároveň i nejvyšší spolehlivost v dlouhodobém horizontu. [31][32]

2 Praktická část

2.1 Návrh systému automatizace testovací linky

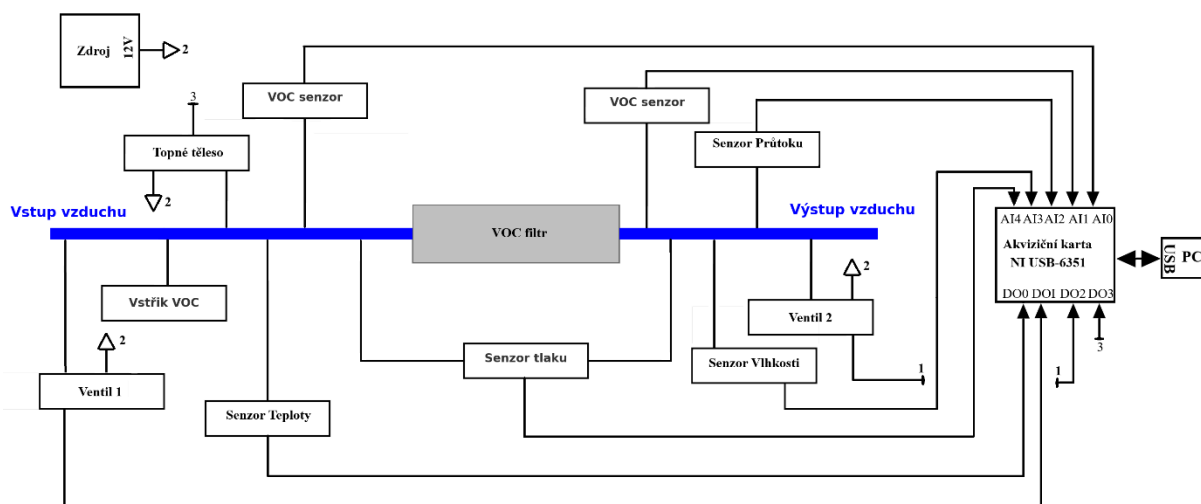
Cílem návrhu systému bylo vytvořit měřicí a regulační platformu, která umožní testování absorpčních vlastností filtračního materiálu při různých podmínkách. Důraz byl kladen na možnost záznamu a vizualizace koncentrace těkavých organických látek (VOC), teploty, vlhkosti a průtoku vzduchu v reálném čase a zároveň na dálkové ovládání aktivních prvků linky, zejména ventilů a topení.

Před návrhem bylo nutné stanovit základní požadavky na funkčnost systému. Požadováno bylo:

- měření teploty v rozsahu přibližně 10 až 110 °C,
- měření relativní vlhkosti vzduchu,
- měření koncentrace VOC (v jednotkách ppm),
- měření průtoku vzduchu v systému,
- řízení topného tělesa a dvou ventilů v závislosti na měřených veličinách nebo ručně,
- zaznamenávání měřených dat,
- přehledné uživatelské rozhraní s možností vizualizace.

Z hlediska architektury bylo rozhodnuto použít systém založený na akviziční kartě připojené k osobnímu počítači, čímž bylo možné dosáhnout vysoké flexibility, snadného vývoje softwaru a komfortního zobrazení dat. Tento přístup zároveň umožnil připojit různorodé senzory bez nutnosti implementace nízkoúrovňových ovladačů a zároveň využít výpočetní výkon PC k analytickému zpracování a archivaci dat.

Již v této fázi návrhu bylo zvažováno, že měřený systém bude sloužit nejen pro testování filtračních médií, ale také jako základní platforma pro demonstraci řízení jednoduché laboratorní jednotky. Proto byl kladen důraz na jednoduchost obsluhy, přehlednost vizualizace a možnost modifikace celého systému do budoucna.



Obrázek 4 Schéma automatizovaného měřicího zařízení

Schéma znázorňuje celkovou strukturu a propojení komponent testovací linky. Vzduch vstupuje do systému zleva a prochází postupně přes elektromagnetický ventil 1, topné těleso a vstřík VOC, kde je do proudu vzduchu dávkována těkavá látka. Následně jsou měřeny veličiny pomocí senzorů: koncentrace VOC (před a za filtrem), teplota, tlak, vlhkost a průtok vzduchu.

Všechny senzory jsou připojeny na akviziční kartu NI USB-6351 přes analogové vstupy AI0–AI4. Tato karta přenáší měřená data do počítače přes USB rozhraní (obousměrná komunikace), kde jsou dále zpracována. Z počítače jsou zároveň odesílány řídicí signály zpět do karty na digitální výstupy DO0–DO3, které ovládají oba ventily a topné těleso.

Napájení aktivních prvků (ventily a topné těleso) je zajištěno ze samostatného 12V zdroje. Směry signálů i napájení jsou v diagramu vyznačeny šipkami.

2.2 Výběr a popis použitých komponent

Výběr jednotlivých součástí testovací linky probíhal podle toho, jaké fyzikální veličiny bylo potřeba měřit a jaké prvky bylo nutné řídit. Zohledněna byla také dostupnost senzorů, jednoduchost jejich zapojení a schopnost spolupráce s použitým řídicím systémem. V následujících podkapitolách je uveden stručný popis všech hlavních komponent – včetně zdůvodnění jejich výběru, způsobu zapojení a ověření jejich funkčnosti v praxi.

Výběr jednotlivých komponent testovací linky probíhal postupně. Na základě definovaných měřených veličin a požadavků na ovládání systému bylo nutné zvolit vhodné senzory, akviziční hardware a výstupní prvky. V následujících podkapitolách je popsán výběr každé části včetně krátkého zdůvodnění, praktického zapojení a testování funkčnosti.

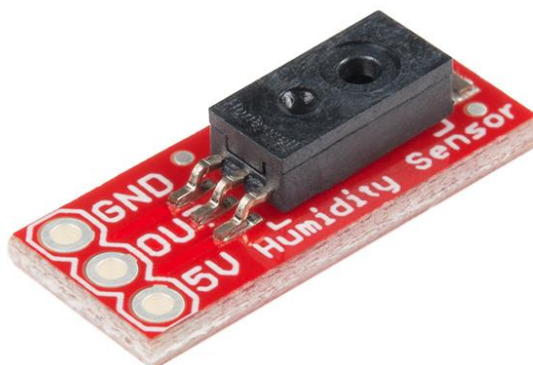
2.2.1 Teplotní senzor – LM35DZ

Pro měření teploty v systému byl zvolen analogový senzor LM35DZ. Tento integrovaný obvod poskytuje výstupní napětí lineárně závislé na aktuální teplotě, s převodní konstantou 10 mV na každý stupeň Celsia. Senzor je napájen napětím 5 V a jeho výstupní signál je přiveden přímo na jeden z analogových vstupů měřicí karty NI USB-6351.

LM35DZ disponuje třípinovým vývodem – napájení (VCC), výstup (VOOUT) a zem (GND). Mezi výstupní pin a zem byl zapojen keramický kondenzátor o kapacitě 100 nF, který slouží ke snížení šumu a zajištění stabilního signálu. Díky analogovému výstupu lze senzor snadno integrovat do systému bez nutnosti použití mikrokontroleru nebo digitální komunikační sběrnice, což zjednodušuje jak návrh zapojení, tak i softwarové zpracování naměřených hodnot.

Výstupní signál odpovídá aktuální teplotě a je následně zpracováván ve vývojovém prostředí. Převod napětí na teplotu je realizován jednoduchým výpočtem podle vztahu $T = V \times 100$, kde T je teplota ve stupních Celsia a V je napětí ve voltech. Tento způsob umožňuje rychlé a přesné vyhodnocení naměřených dat bez složitých algoritmů.

Senzor byl fyzicky umístěn v prostoru měření tak, aby přesně odrážel okolní teplotu vzduchu a nebyl ovlivněn tepelným vyzařováním okolních komponent. Toto umístění zajišťuje, že získaná data odpovídají reálným podmínkám uvnitř měřeného prostoru.



Obrázek 6 Senzor vlhkosti HIH4030 na modulu SparkFun s analogovým výstupem (robosavvy.co.uk, 2024)

2.2.3 Senzor těkavých organických látek (VOC) – Alphasense PIDX-A-200



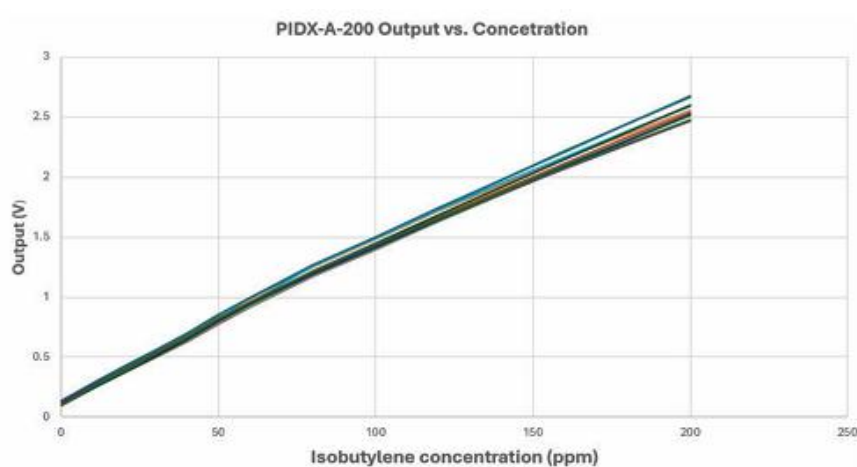
Obrázek 7 Fotoionizační senzor PIDX-A-200 – reálné provedení (Alphasense, 2024)

Pro detekci těkavých organických látek (VOC) byl v testovací lince použit fotoionizační senzor PIDX-A-200 od firmy Alphasense. Tento typ senzoru využívá fotoionizační detekci (PID), při které jsou molekuly VOC ionizovány pomocí ultrafialového záření. Po ionizaci vznikají nabitě částice, jejichž množství je úměrné koncentraci VOC v ovzduší. Výsledný proud je následně převeden na výstupní napětí, které je dále zpracováno.

Senzor má analogový výstup v rozsahu přibližně 0 až 2,85 V, což umožňuje přímé připojení ke vstupu akviziční karty bez nutnosti složitých převodníků. Napájecí napětí senzoru je 3,2 až 5,5 V. Detekční rozsah činí až 200 ppm VOC, přičemž citlivost senzoru činí přibližně 12 mV/ppm. Senzor má velmi krátkou dobu odezvy, typicky do 6,5 sekund, a stabilizuje se během několika minut po spuštění.

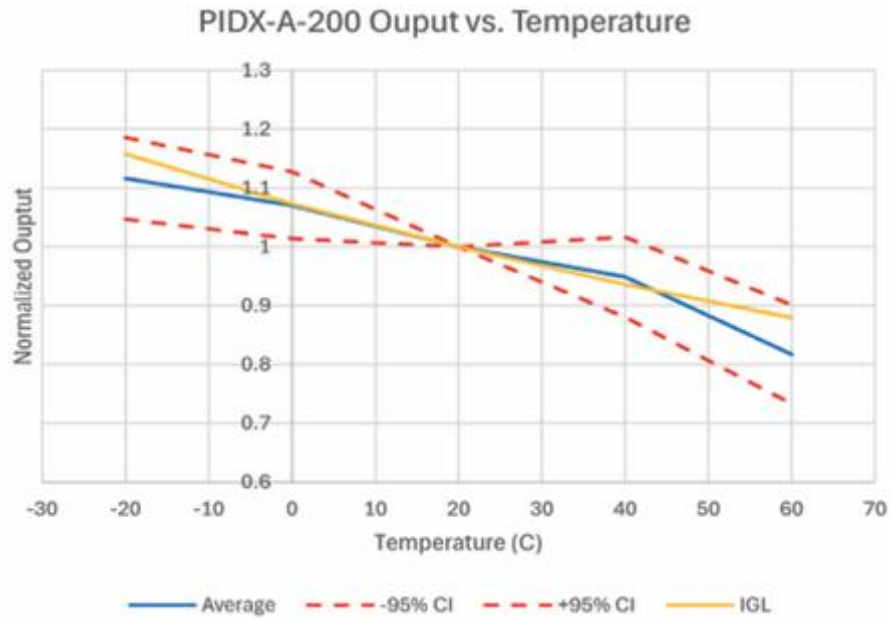
Senzor je umístěn jak na vstupu, tak na výstupu z testovacího systému, což umožňuje srovnání koncentrace VOC před a po průchodu vzduchu testovaným filtračním materiálem. Díky tomu lze vyhodnotit účinnost filtru a jeho absorpční schopnost pro danou látku.

Na následujícím grafu je znázorněn vztah výstupního napětí senzoru PIDX-A-200 ke koncentraci izobutylenu, který slouží jako referenční plyn. Z grafu je patrná přibližně lineární závislost v rozsahu do 200 ppm. To výrazně usnadňuje interpretaci měřených hodnot ve spojení s akvizičním systémem.



Obrázek 8 Kalibrační křivka senzoru PIDX-A-200 – výstupní napětí v závislosti na koncentraci izobutylenu (Alphasense, 2024)

Dále je v dokumentaci uveden graf závislosti výstupu senzoru na okolní teplotě. Zde je možné pozorovat drobné odchylky v závislosti na provozní teplotě, zejména nad 40 °C. Pro přesná měření je proto vhodné tuto teplotní závislost při analýze zohlednit nebo provést kalibraci při provozní teplotě.



Obrázek 9 Závislost výstupu senzoru PIDX-A-200 na teplotě okolí – normalizovaný výstup (Alphasense, 2024)

2.2.4 Senzor průtoku – Honeywell AWM720P1

Pro monitorování průtoku vzduchu v testovací lince byl použit senzor Honeywell AWM720P1. Tento senzor pracuje na principu měření tepelného hmotnostního průtoku (tzv. hot-wire princip). Vnitřní odporový prvek se ohřívá a proudící vzduch jej ochlazuje – míra ochlazení je úměrná velikosti průtoku. Výstupní napětí senzoru je analogové a pohybuje se v rozsahu 1 až 5 V, což odpovídá průtoku 0 až 200 standardních litrů za minutu (SLPM).

Napájení senzoru je zajištěno napětím 10 V. Vzhledem k požadavku na stabilní proudění suchého plynu je senzor integrován do hlavního potrubí testovacího systému, kde zajišťuje přesnou zpětnou vazbu o aktuálním průtoku vzduchu. Údaje z tohoto senzoru jsou důležité pro vyhodnocení filtračních vlastností materiálu při různých průtocích.

Senzor je vybaven čtyřpinovým konektorem. Mezi výhody tohoto senzoru patří nízká spotřeba energie, rychlá odezva a možnost použití ve velmi kompaktním zapojení. Výrobce doporučuje laminární proudění kvůli zajištění přesnosti, protože turbulence může negativně ovlivnit výstupní hodnoty.



Obrázek 10 Senzor průtoku vzduchu Honeywell AWM720P1 s konektorem pro zapojení. (DigiKey, 2025)

2.2.5 Elektromagnetické ventily

V testovací lince jsou použity dva elektromagnetické ventily typu normálně zavřený (NC), které slouží k řízení proudění vzduchu. Tento typ ventilu zajišťuje, že v klidovém stavu (bez napětí) je ventil uzavřen a po přivedení napětí (v tomto případě 230 V AC) se otevře a umožní průchod média.

Ventily mají robustní mosazné tělo a jsou navrženy pro provozní tlak do 10 bar. Jsou osazeny standardním závitem G 1/2", což umožňuje jejich snadné připojení ke vzduchovým rozvodům. Díky své konstrukci jsou vhodné pro použití v testovacích a průmyslových aplikacích, kde je požadováno spolehlivé spínání proudění.

Ovládání ventilů je v rámci systému zajištěno přes spínané relé, které propojuje DAQ kartu s napájecím obvodem 230 V. Tím je možné provádět jak automatické spínání na základě sensorových údajů, tak i manuální ovládání uživatelem přes rozhraní aplikace.



Obrázek 11 : Elektromagnetický ventil s mosazným tělem a připojením G 1/2", typ NC (elventil/2025)

2.2.6 Akviziční karta

Pro účely této práce byla zvolena akviziční karta National Instruments USB-6351 ze série X-Series. Tato karta poskytuje vysoký počet analogových a digitálních vstupů a výstupů a zároveň umožňuje přesné a rychlé vzorkování měřených signálů. Hlavní výhodou tohoto řešení je snadná integrace do aplikace běžící na PC, podpora komunikační knihovny NI-DAQmx a kvalitní dokumentace.

Karta USB-6351 disponuje až 16 analogovými vstupy (16bitové rozlišení), 2 analogovými výstupy, 24 digitálními I/O liniemi a čtyřmi 32bitovými čítači. Komunikuje s počítačem prostřednictvím USB 2.0 rozhraní. Vstupy jsou diferenciální a karta umožňuje měření v několika módech, včetně single-ended (RSE) a differential (DIFF). Maximální vzorkovací frekvence pro analogové vstupy je 1,25 MS/s (celkem) a 250 kS/s na kanál při vícekanálovém vzorkování.

Tato karta umožňuje nejen čtení signálů ze senzorů (např. napěťový výstup z VOC senzoru, senzoru průtoku atp.), ale také řízení výstupních prvků, jako jsou ventily či topné těleso, pomocí digitálních výstupů.

Použití akviziční karty v kombinaci s vlastním softwarem (např. vytvořeným v C#) zajišťuje vysokou flexibilitu, rychlý vývoj a snadnou údržbu. Softwarová knihovna NI-DAQmx umožňuje pohodlnou práci se signály i řízením výstupů.

(Viz. Obrázek 15. a 16.)



Obrázek 12 Akviziční karta National Instruments USB-6351 (National Instruments, 2024)

2.3 Softwarová implementace

Pro správné fungování testovací linky bylo nutné vytvořit softwarovou aplikaci, která umožní číst data ze senzorů, zobrazovat je uživateli v reálném čase, umožnit jejich uložení a zároveň ovládat aktivní prvky, jako jsou ventily nebo topení. Cílem bylo vytvořit přehledný a jednoduše ovladatelný nástroj, který bude zároveň snadno rozšiřitelný do budoucna.

2.3.1 Výběr vývojového prostředí a knihoven

Jako vývojové prostředí bylo zvoleno Microsoft Visual Studio s jazykem C#, konkrétně s využitím technologie Windows Forms pro tvorbu uživatelského rozhraní. Tento přístup byl zvolen díky osobní zkušenosti, dostupnosti dokumentace a jednoduchosti práce s vizuálními komponentami.

Pro komunikaci s DAQ kartou byla využita knihovna NationalInstruments.DAQmx, která poskytuje objektové rozhraní pro konfiguraci a čtení měření. Ke správné funkci je vyžadována instalace ovladače NI-DAQmx Runtime, který zajišťuje propojení softwaru s hardwarem.

Pro vizualizaci měřených dat byla použita knihovna ScottPlot.WinForms, která umožňuje snadné zobrazení signálů ve formě časových průběhů. Knihovna podporuje více typů grafů, práci s více osami, zoomování a export zobrazených dat. V tomto projektu je využívána k přímému zobrazení veličin, jako je teplota, vlhkost, VOC a průtok.

Aplikace dále využívá i další základní knihovny platformy .NET pro řízení toku programu, práci s časovači a soubory.

Přehled hlavních použitých knihoven a jejich význam:

- NationalInstruments.DAQmx.dll – Zajišťuje přímou komunikaci s DAQ kartou, konfiguraci kanálů a čtení/výstup signálů.
- ScottPlot.WinForms.dll – Slouží k vizualizaci dat ve formě grafů přímo ve Windows Forms prostředí.
- System.Windows.Forms.dll – Obsahuje komponenty pro tvorbu grafického rozhraní aplikace.
- System.Timers.dll – Použita pro periodické spuštění měření pomocí časovače.
- System.IO.dll – Zajišťuje práci se souborovým systémem – ukládání dat do CSV nebo PNG.

2.3.2 Vytvoření DAQ úlohy a načítání dat

Po spuštění aplikace a inicializaci GUI se připraví panely pro vykreslování grafů pomocí komponenty FormsPlot. Každý graf slouží pro vizualizaci jedné měřené veličiny.

Pro samotné měření je vytvořena tzv. DAQ Task – objekt, který definuje, které kanály se budou měřit, v jakém režimu a s jakým napěťovým rozsahem. V tomto případě bylo použito pět analogových vstupních kanálů (ai0 až ai4) v diferenciálním režimu s rozsahem 0 až 5 V. Diferenciální zapojení snižuje vliv rušení na měřený signál.

```
AIChannel myAIChannel;  
myAIChannel = analogInTask.AIChannels.CreateVoltageChannel("dev1/ai0:4",  
"myAIChannel0:4", AITerminalConfiguration.Differential, 0, 5,  
AIVoltageUnits.Volts);
```

Po definici kanálů je vytvořen objekt `AnalogMultiChannelReader` pro čtení dat z vícekanálového vstupu. Je napojen na datový proud DAQ karty a umožňuje číst aktuální hodnoty ve formě pole typu `double[]`.

```
mchreader = new AnalogMultiChannelReader(analogInTask.Stream);
```

Pro pravidelné čtení dat byl implementován softwarový časovač (`Timer`), který v daném intervalu spouští čtení a zpracování hodnot. Tento přístup je vhodný pro pomalu se měnící signály, typické pro testování absorpčních vlastností materiálů.

```
double[] napeti = mchreader.ReadSingleSample();
```

Pro zvýšení robustnosti aplikace je vhodné zahrnout ošetření výjimek, které mohou nastat při práci s DAQ hardwarem. Mezi nejčastější chyby patří odpojení zařízení, chybné nastavení kanálů nebo ztráta komunikace. V rámci aplikace lze tyto situace zachytit pomocí konstrukcí typu `try-catch`, přičemž při zachycení výjimky je vhodné uživatele informovat pomocí dialogového okna a zároveň zastavit měření, aby nedošlo k poškození výstupních prvků nebo ztrátě dat.

```
try
{
    double[] napeti = mchreader.ReadSingleSample();
    // zpracování hodnot
}
catch (DaqException ex)
{
    MessageBox.Show("Chyba při čtení z DAQ karty: " + ex.Message);
    analogInTask.Dispose();
}
```

2.3.3 Zobrazení dat pomocí grafů

Po každém úspěšném načtení nových dat ze senzorů jsou tyto hodnoty zobrazeny uživateli prostřednictvím grafického výstupu. V aplikaci je použit komponent `FormsPlot` z knihovny `ScottPlot.WinForms`, který umožňuje zobrazovat časové průběhy měřených veličin v reálném čase.

Každá měřená veličina má svůj samostatný graf – konkrétně teplota, relativní vlhkost, průtok vzduchu a koncentrace VOC. Díky tomu je zajištěna přehlednost a snadná orientace i při dlouhodobějším sledování vývoje hodnot.

Aktualizace grafů probíhá v intervalu 1 sekundy, což je vhodné pro účely laboratorního testování, kde se očekávají pomalu se měnící signály. Toto nastavení odpovídá tzv. „soft real-time“ vizualizaci a je dostatečné pro odezvu obsluhy i pro vyhodnocení chování filtračního materiálu. Počet zobrazovaných bodů není explicitně omezen, grafy se v průběhu měření dynamicky rozšiřují (scrollují), přičemž osy se automaticky přizpůsobují rozsahu dat.

Zobrazovaná data nejsou nijak filtrována – v grafech se vykreslují přímo surové hodnoty získané z DAQ karty. Tento přístup byl zvolen pro co nejvyšší věrnost dat. V případě potřeby by však bylo možné implementovat jednoduchý filtr (např. klouzavý průměr), což je podporováno i knihovnou ScottPlot.

Pro vykreslení dat je použit následující kód:

```
graf.Plot.Clear();  
graf.Plot.Add.Signal(prvni);  
graf.Refresh();
```

Uživatelské rozhraní také umožňuje zoomování, posouvání grafu a export zobrazených dat. V rámci návrhu bylo dbáno na to, aby výsledný graf byl přehledný i při delším testování. V případě potřeby by bylo možné přidat další grafy nebo přepínání mezi veličinami pomocí karet nebo tlačítek.

(viz. Obrázek 13., 17., 18.)

2.3.4 Ovládání výstupů – ventily a topení

Součástí softwarového řešení je také ovládání výstupních prvků testovací linky, konkrétně dvou elektromagnetických ventilů a topného tělesa. Každý prvek má v uživatelském rozhraní své samostatné tlačítko, kterým může obsluha ručně spínat nebo vypínat odpovídající výstup na DAQ kartě.

DAQ karta poskytuje digitální výstupy typu TTL (5 V logika), které slouží k ovládání řídicích signálů. Z důvodu ochrany výstupních kanálů karty je mezi DAQ a napájené prvky zařazeno relé nebo tranzistorový spínač, který galvanicky odděluje řídicí signál od zátěže. Tím je zajištěno, že výpadek nebo přetížení na výstupu neohrozí samotnou DAQ kartu.

Spínání je řešeno pomocí objektu typu `DigitalSingleChannelWriter`, který odesílá logickou hodnotu (1 nebo 0) na příslušný digitální kanál. Tato hodnota odpovídá stavu tlačítka v uživatelském rozhraní. Současně se aktualizuje i grafická reprezentace tlačítka, aby vizuálně odpovídala skutečnému stavu výstupu.

```
writer.WriteSingleSampleSingleLine(true, true);
```

V budoucnu je možné rozšířit ovládání o automatické řízení na základě aktuálních měřených hodnot – např. sepnutí topného tělesa při poklesu teploty nebo zavření ventilu při překročení koncentrace VOC. Toto rozšíření lze jednoduše implementovat přidáním podmínky k rozhodování na základě aktuálních dat.

2.3.5 Uložení dat a export výsledků

Aplikace v průběhu měření uchovává načtené hodnoty ve vnitřních seznamech, které obsahují průběžně aktualizovaná data ze senzorů. Uživatel má možnost tato data uložit buď jako graf ve formátu PNG, nebo jako tabulku ve formátu CSV. Export slouží zejména pro dokumentaci výsledků a další analýzu v tabulkových procesorech, jako je Microsoft Excel.

Uložení grafu je realizováno metodou:

```
graf.Plot.SavePng(sf.FileName, graf.Height, graf.Width);
```

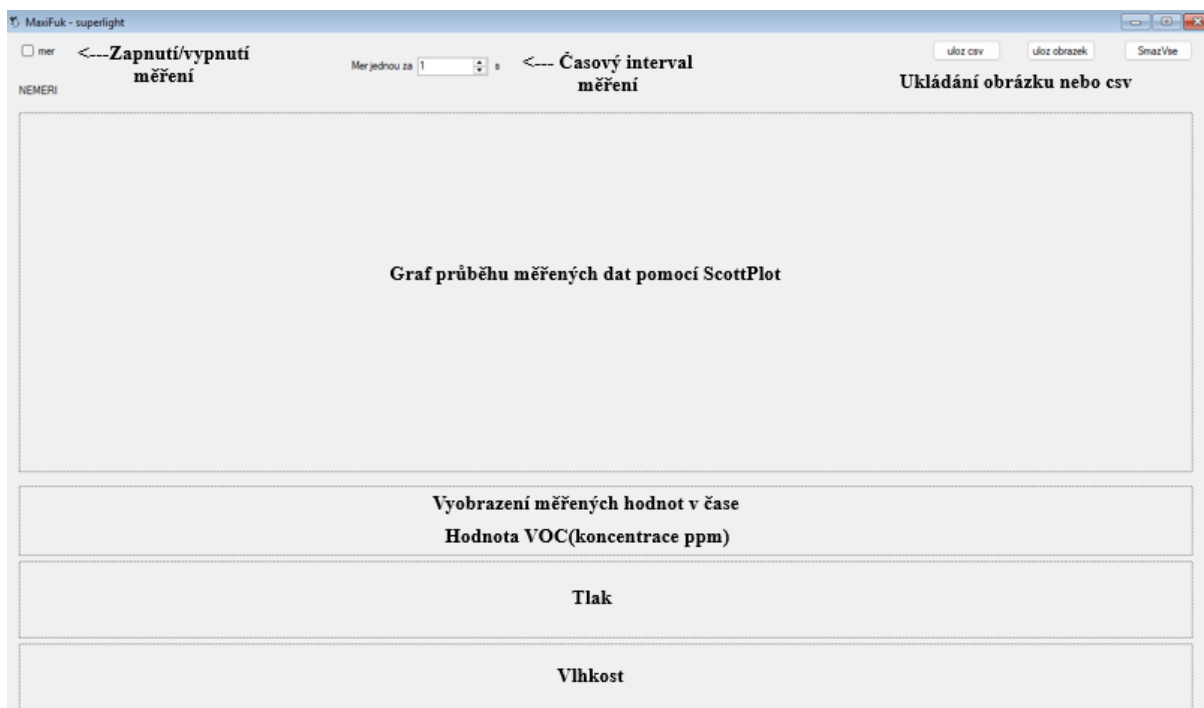
Tímto způsobem se zaznamená aktuální stav zvoleného grafu včetně os, měřítka a průběhu.

Naměřená data lze uložit také jako soubor CSV. Zápis je prováděn pomocí objektu `StreamWriter`, přičemž každý řádek obsahuje časový údaj (například sekundy od spuštění) a příslušné hodnoty jednotlivých senzorů.

```
vystup.WriteLine("{0};{1};{2};{3};{4};{5};", i * interval, prvni[i], druhy[i], tlak[i], vlhkost[i], teplota[i]);
```

Výsledný soubor má strukturu s hlavičkou, následují řádky s jednotlivými záznamy, kde jsou hodnoty odděleny středníkem. To zajišťuje kompatibilitu s běžnými nástroji pro práci s daty.

Obrázek níže znázorňuje uživatelské rozhraní aplikace v neaktivním stavu, kdy jsou k dispozici ovládací prvky pro export dat a grafů.



Obrázek 13 Uživatelské rozhraní aplikace s možností exportu dat do formátu CSV nebo PNG.

Navržený software se tak stal klíčovou součástí systému, který umožňuje nejen řízení testovací linky, ale i její další rozšiřování dle budoucích požadavků.

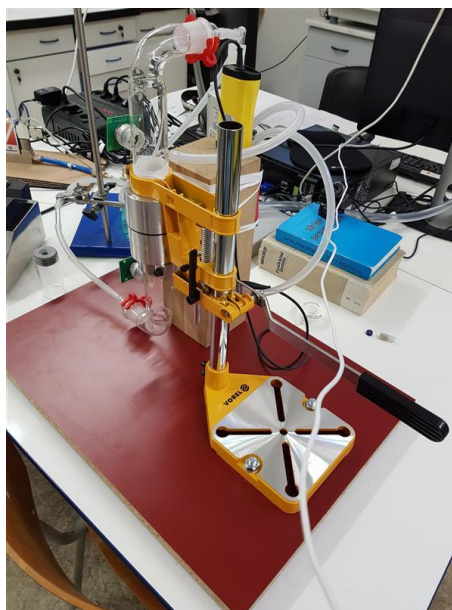
2.4 Konstrukce testovací linky

Pro realizaci měření bylo nezbytné sestavit kompletní fyzickou testovací linku. Její návrh a konstrukce probíhala postupně, a to v několika fázích: od mechanického sestavení přes propojení senzorů a akčních členů až po elektrické zapojení a připojení k počítači. Tato část popisuje celý proces stavby linky včetně praktických poznatků získaných při sestavování a ožívování systému.

2.4.1 Mechanická konstrukce a rozmístění komponent

Jako základní rám byla použita hliníková konstrukce typu Al profil, která umožňuje snadné upevnění a přesné polohování jednotlivých komponent. Na rám byly připevněny držáky pro senzory, ventily, průtokoměr i topné těleso. Důraz byl kladen na přístupnost při údržbě a čitelnost zapojení.

V testovací komoře byl upevněn držák na zkušební vzorek materiálu. Průtok vzduchu byl směřován skrz testovaný materiál a následně přes jednotlivé senzory. Ventily byly rozmístěny tak, aby bylo možné přepínat směr proudění – tedy provádět reverzní testování filtračních vlastností.



Obrázek 14 Reálná testovací linka.

2.4.2 Elektrické zapojení a připojení komponent

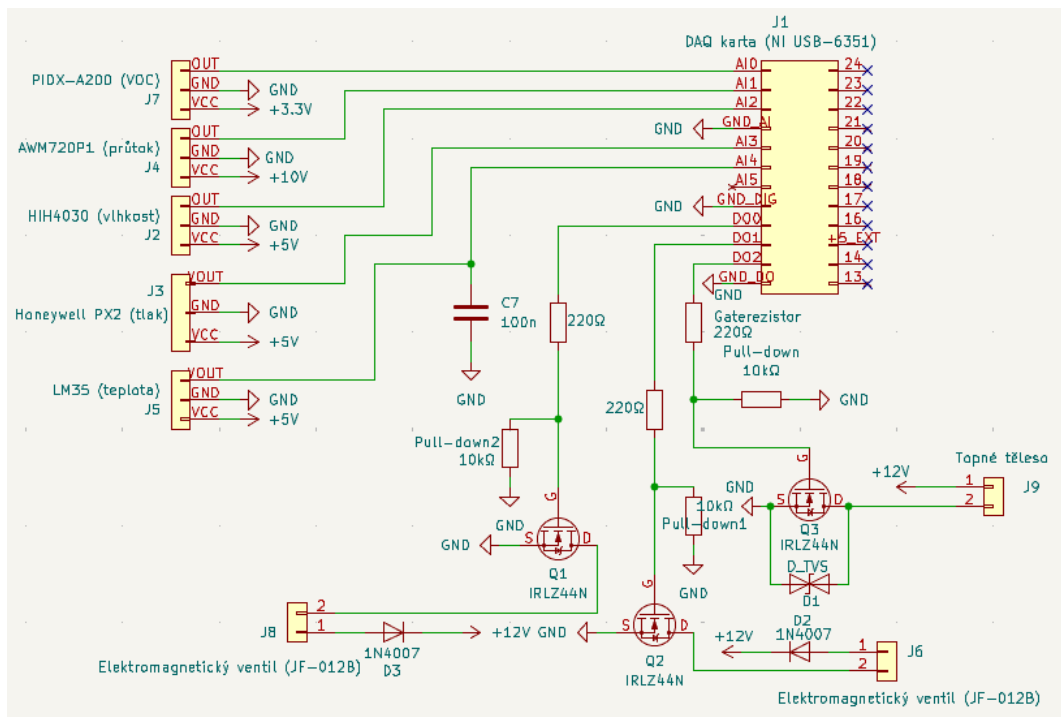
Elektrické zapojení celého systému zahrnuje všechny sensorické prvky, akční členy, napájecí zdroje a jejich propojení s měřicí kartou NI USB-6351. V návrhu byly využity jak analogové, tak digitální signály. Analogové vstupy slouží k měření hodnot z jednotlivých senzorů fyzikálních veličin, zatímco digitální výstupy jsou použity pro ovládání spínaných prvků systému.

Na analogové vstupy (AI0 až AI4) byly přivedeny výstupy z čidel měřících například teplotu, tlak, vlhkost, průtok nebo koncentraci těkavých látek. Díky tomu, že čidla poskytují analogový napěťový výstup, bylo možné jejich připojení realizovat bez potřeby dalších převodníků. Při návrhu zapojení bylo dbáno na správné rozdělení napěťových větví a eliminaci rušení – analogové signály jsou vedeny stíněnými kabely a doplněny o filtrační prvky tam, kde je to vhodné.

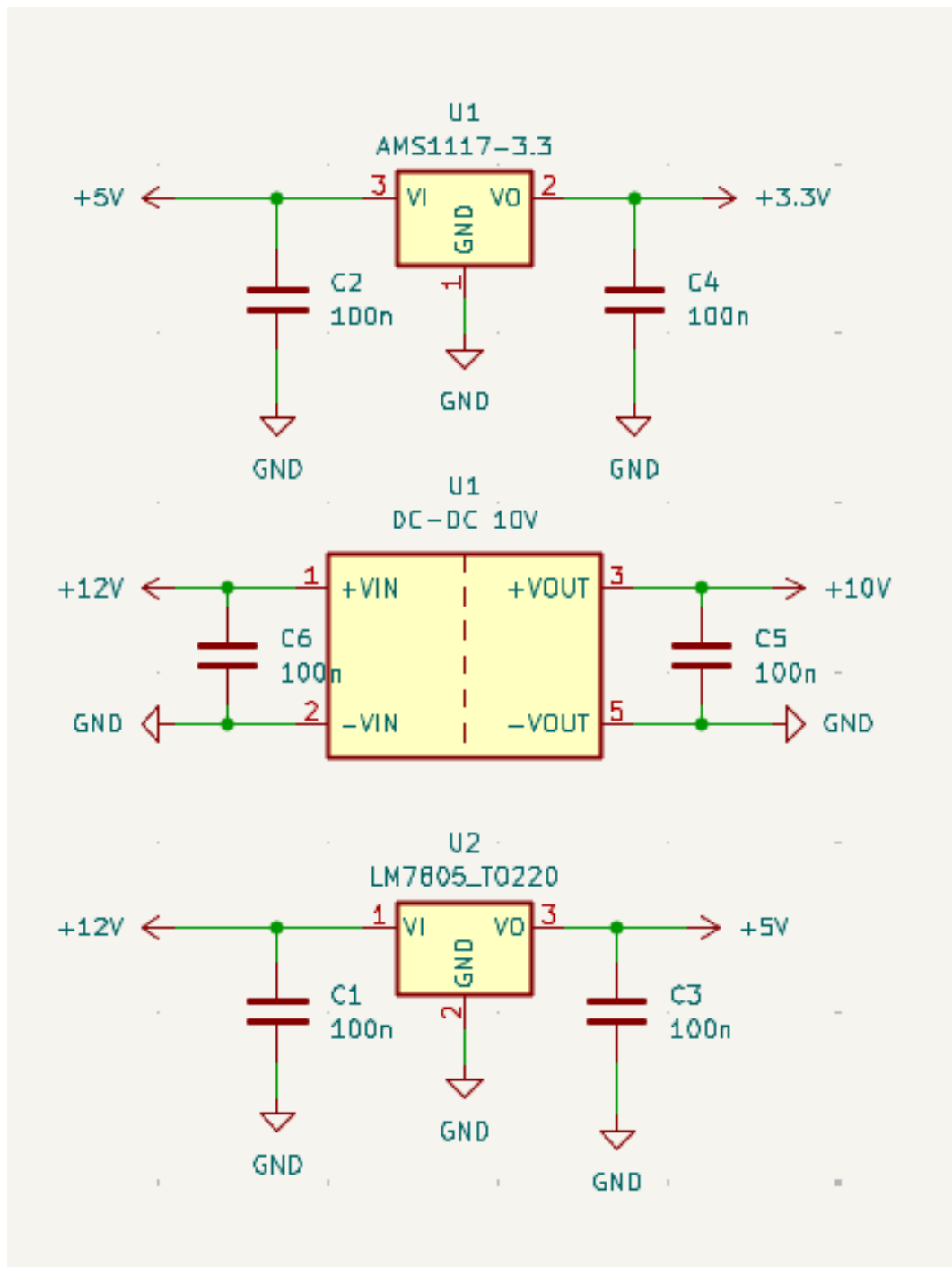
Digitální výstupy (DO0 až DO2) byly využity pro řízení akčních členů, jako jsou elektromagnetické ventily nebo topné těleso. Spínání těchto prvků je realizováno pomocí výkonových tranzistorů, které jsou chráněny zpětnými diodami proti napěťovým špičkám způsobeným indukčními zátěžemi. Výstupní obvody jsou navrženy s ohledem na dostatečné dimenzování a spolehlivost při dlouhodobém provozu.

Pro napájení jednotlivých částí systému byly použity stabilizované větve s napětím 3,3 V, 5 V, 10 V a 12 V, které zajišťují správnou funkci všech sensorických i výkonových prvků. Všechny napěťové větve byly navrženy tak, aby byla zachována jejich stabilita i při současném odběru z více míst.

Celé zapojení bylo navrženo přehledně a s důrazem na funkčnost a snadnou diagnostiku případných závad. Výsledné schéma elektrického zapojení znázorňuje veškeré propojení a slouží jako základní podklad pro sestavení systému.



Obrázek 15 Hlavní část schématu zapojení: propojení senzorů, výkonových prvků a DAQ karty.



Obrázek 16 Detail napájecí části: stabilizátory napětí a filtrační kondenzátory

2.4.3 Napájení systému

Napájení celé testovací linky bylo řešeno jako samostatný subsystém s důrazem na stabilitu, bezpečnost a dostatečný výkon pro napájení všech aktivních prvků. Hlavním napájecím zdrojem systému byl spínaný zdroj Mean Well LRS-35-12, který poskytuje výstupní napětí 12V stejnosměrných při maximálním proudovém odběru až 3 A.

Toto napětí bylo využíváno přímo pro napájení elektromagnetických ventilů (JF-012B) a topného tělesa (KERUI Cartridge Heater 12 V 40 W). Ventily měly proudový odběr přibližně 250 mA každý, zatímco topné těleso vyžadovalo při plném výkonu až 3,3 A. Z tohoto důvodu byl provoz topného tělesa řízen s omezením a nebyl spínán zároveň s dalšími většími zátěžemi.

Analogové senzory, jako je průtokoměr (AWM720P1), senzor vlhkosti (HIH4030) a senzor koncentrace VOC (PIDX-A-200), byly napájeny napětím 5 V nebo 10 V. Pro tyto účely byly použity napěťové regulátory a lineární stabilizátory (např. 7805), které upravily napětí z hlavního 12V zdroje.

Teplotní senzor LM35DZ byl napájen z 5V větve prostřednictvím lineárního stabilizátoru 7805. Díky velmi nízkému odběru proudu nebylo potřeba žádné další úpravy napájení.

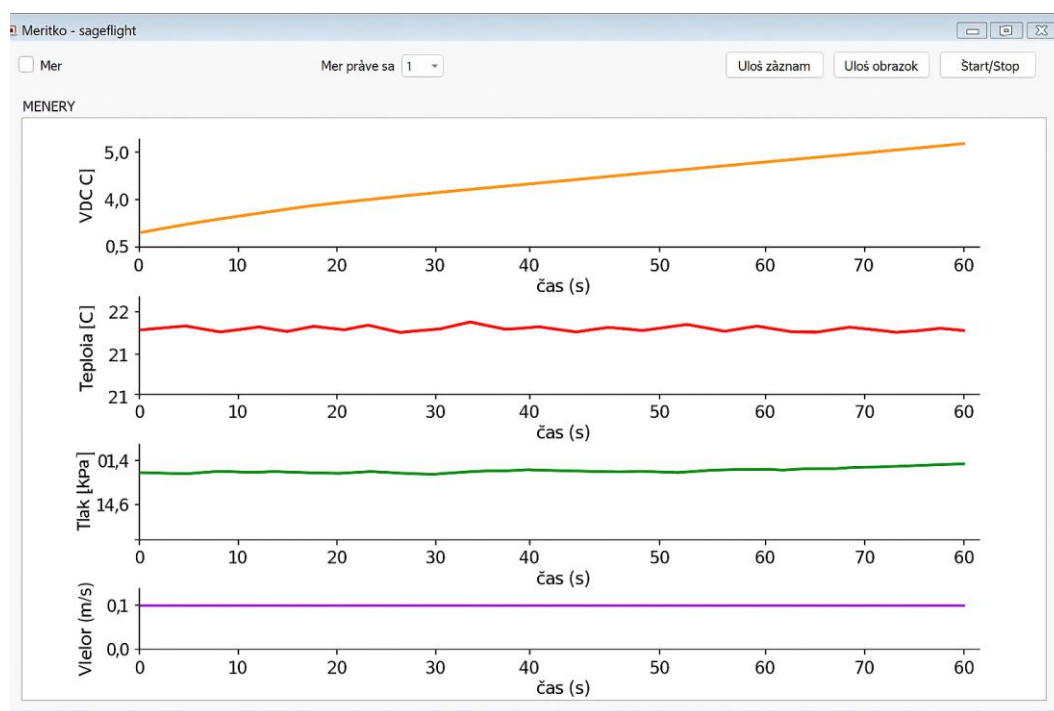
Celkové napájecí řešení bylo navrženo s rezervou a zabezpečeno proti přepětí. Zvláštní pozornost byla věnována přehlednému vedení napájecích vodičů a rozdělení napěťových větví. Tím byla zajištěna spolehlivost systému i při delším provozu a pod zátěží.

2.4.4 První měření a základní kalibrace

Po úspěšném zapojení a oživení systému bylo provedeno první testovací měření, jehož cílem bylo ověření funkčnosti všech senzorů a výstupních prvků. Zároveň byla provedena základní kalibrace měřicích zařízení porovnáním výstupních hodnot s referenčními přístroji (např. laboratorní teploměr a komerční VOC senzor).

Měření probíhalo v laboratorním prostředí za standardních podmínek (teplota přibližně 23 °C). Pomocí vyvinuté desktopové aplikace vytvořené v prostředí .NET byla v reálném čase zobrazována data ze všech snímačů – konkrétně koncentrace VOC, teplota, atmosférický tlak a rychlost proudění vzduchu. Program rovněž umožňoval zaznamenávání průběhů a jejich uložení do souboru pro další analýzu.

Na Obrázku 13 je zachycen typický průběh těchto veličin během prvního měření. Křivky odpovídají stabilnímu provozu systému a dokazují správnou funkčnost všech snímačů, napájecích větví a komunikačních rozhraní. Měření prokázalo připravenost testovací linky k dalším experimentům a ověřování absorpčních vlastností materiálů.



Obrázek 17 Výstupní rozhraní aplikace vytvořené v .NET s průběhem měřených veličin (VOC, teplota, tlak, proudění)

Shrnutí

Testovací linka byla úspěšně sestavena a uvedena do plně funkčního stavu. Výsledkem je kompaktní a přehledný systém propojující senzory, výstupní prvky, měřicí kartu a řídicí software. Všechny komponenty byly zapojeny, otestovány a bezchybně spolupracují s vyvinutou softwarovou aplikací. Fyzická realizace tak tvoří spolehlivý základ pro plánované testování absorpčních vlastností filtračních materiálů a jejich následné vyhodnocování.

2.5 Vyhodnocení měření

Po úspěšném zapojení systému a ověření funkčnosti senzorů i výstupních prvků byla testovací linka využita k provedení prvních měření koncentrace těkavých organických látek (VOC). Hlavním cílem těchto měření bylo ověřit, zda sensorová část systému správně reaguje na změny koncentrace VOC a zda jsou data spolehlivě přenášena, zpracovávána a zobrazována pomocí vytvořeného softwaru.

2.5.1 Postup měření a nastavení podmínek

Měření probíhala v laboratorním prostředí s teplotou přibližně 22–23 °C. Vzduch obsahující aceton (VOC) byl vstříkován do testovací komory, kde následně procházel filtrem s granulovaným aktivním uhlím (GAC). Za filtrem byly měřeny veličiny:

- koncentrace VOC (PIDX-A-200),
- teplota (LM35DZ),
- relativní vlhkost (HIH4030),
- atmosférický tlak (PX2),
- průtok vzduchu (AWM720P1).

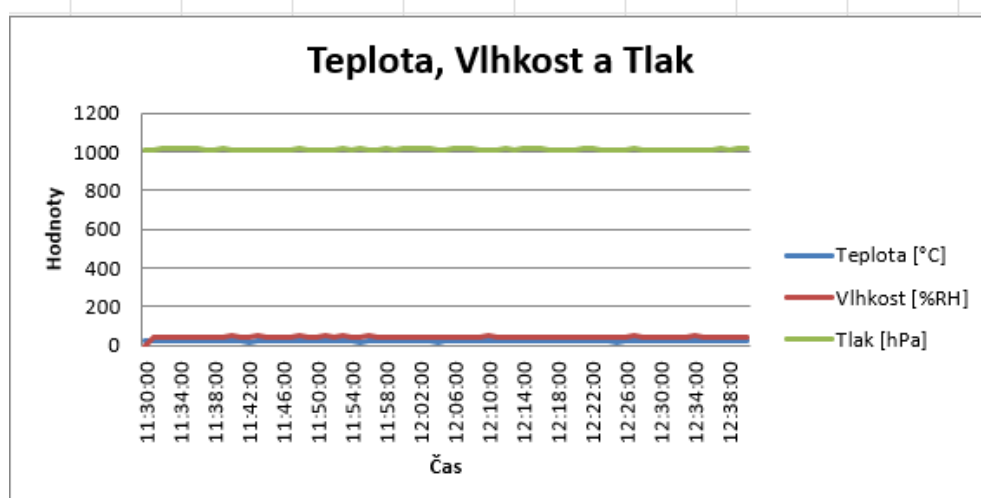
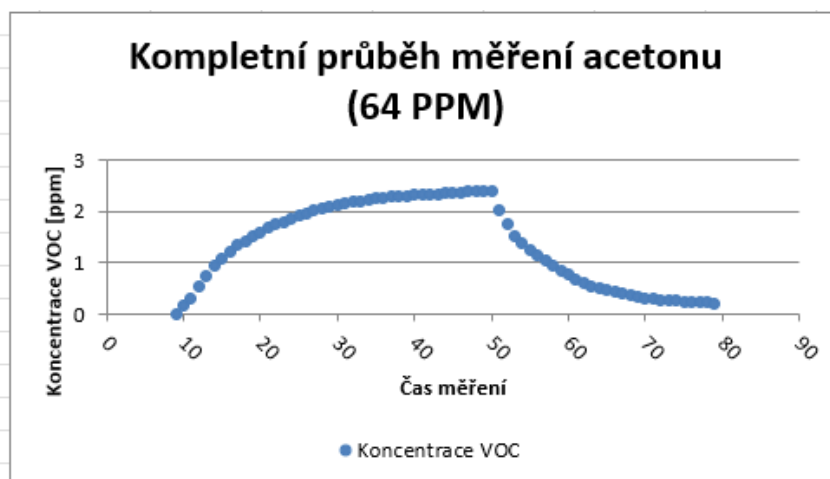
Data byla snímána pomocí akviziční karty NI USB-6351 a v reálném čase vizualizována pomocí .NET aplikace s knihovnou ScottPlot. V rámci testu byla data zaznamenávána s intervalem 1 minuta.

2.5.2 První test: 64 ppm aceton

První test byl zaměřen na nasycení filtru při vstříknutí VOC s koncentrací přibližně 64 ppm. Graf (Obrázek 18) ukazuje typický průběh:

- 11:30 – zahájení měření, počáteční koncentrace 0 ppm,
- 12:00–12:14 – nárůst koncentrace až na 2,4 V, odpovídající přibližně 64 ppm,
- od 12:14 – pozorován postupný pokles koncentrace, indikující desorpci VOC z filtru.

Průběh odpovídá očekávanému chování filtru – nejprve dochází k absorpci, po ukončení vstříkování následuje pomalé uvolnění zachycených látek.



Obrázek 18 Výsledný graf měření 64ppm, testovaného filtru typu Granulovaný aktivní uhlík (GAC)

Tabulka 1 Excel - Naměřené hodnoty při měření 64PPM, testovaného filtru typu Granulovaný aktivní uhlík (GAC)

Čas [hh:mm:ss]	Koncentrace VOC [ppm]	Teplota [°C]	Vlhkost [%RH]	Tlak [hPa]	Poznámka
14:50:00	0	21,9	0	1012,1	
14:51:00	0,156	22,2	42,8	1011,4	
14:52:00	0,312	22,0	47,1	1014,1	Start měření
...	
15:10:00	2,087	22,7	43,5	1011,9	
15:11:00	2,124	22,7	48,8	1013,0	
15:12:00	2,158	22,0	47,9	1012,2	Stabilizace saturace filtru
...	
15:30:00	2,391	21,1	48,7	1012,9	
15:31:00	2,402	21,8	46,3	1012,2	
15:32:00	2,035	21,5	45,8	1013,2	Začátek fáze desorpce
...	
15:59:00	0,218	21,7	47,2	1013,7	
16:00:00	0,214	21,8	42,8	1014,4	Konec měření

2.5.3 Poznámka k dalším měřením

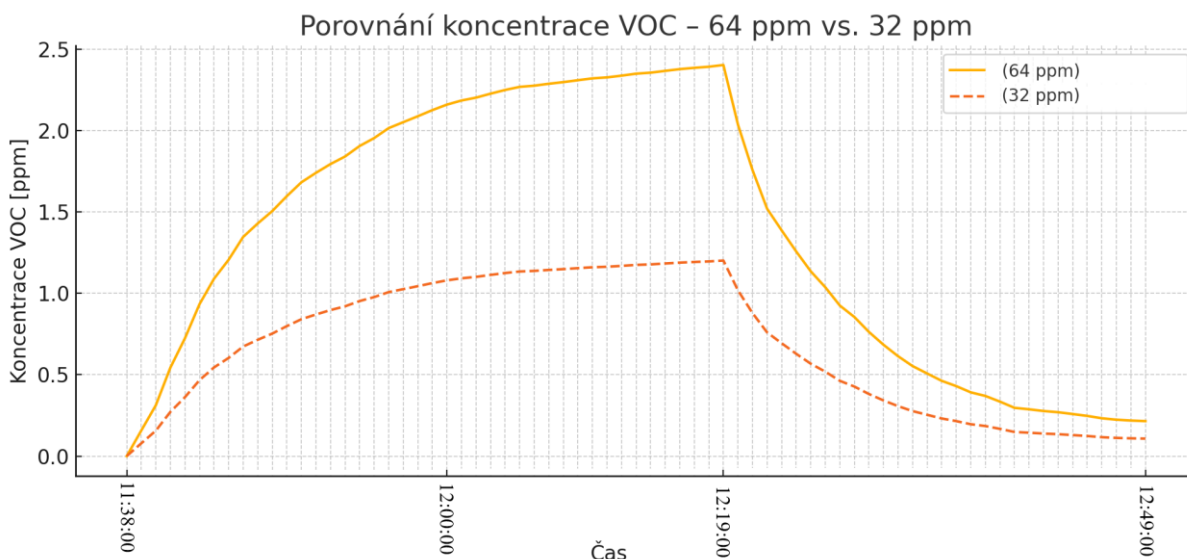
V rámci ověřování systému byla provedena i další měření s vyšší koncentrací VOC a opakovanými dávkami. I při těchto testech byly pozorovány obdobné reakce filtračního materiálu – náhlé nasycení při vstřiku a postupná desorpce po jeho ukončení. Průběhy tak potvrzují očekávané chování i při změně vstupních podmínek. Výsledky těchto měření nebyly kvůli rozsahu zahrnuty do této části, ale sloužily jako dodatečné ověření správné funkce systému.

2.5.4 Shrnutí výsledků

Na základě provedených měření lze konstatovat následující:

- Systém byl schopen v reálném čase spolehlivě snímat koncentraci VOC i podpůrné fyzikální veličiny, jako je teplota, vlhkost a tlak.
- Získané křivky koncentrace VOC vykazují typické fázování absorpčního děje: nasycení, stabilizace a následné uvolňování zachycených látek.
- Zaznamenané hodnoty a průběhy odpovídají předpokládanému chování filtračního materiálu GAC a potvrzují jeho schopnost zachycovat těkavé látky.
- Naměřená data potvrzují nejen správné zapojení a funkčnost sensorové části, ale také korektní spolupráci akviziční karty a vizualizační aplikace.

Pro přesnější kvantitativní analýzu by bylo vhodné v budoucnu doplnit přesné parametry filtru, množství vstřikované látky, více měření a případné kalibrační křivky.



Obrázek 19 Porovnání měření při 64ppm a 32ppm pro stejný filtr

Obrázek zachycuje měření v několika cyklech. Lze pozorovat postupné nárůsty a poklesy koncentrace v závislosti na dávkách VOC. Výrazné rozdíly v odezvě mohou souviset se zbytkovou saturací filtru nebo pomalejším odvětráním.

2.6 Závěr a zhodnocení výsledků

2.6.1 Shrnutí provedených kroků

V praktické části práce byla navržena a sestavena automatizovaná testovací linka určená pro měření absorpčních vlastností materiálů při kontaktu se vzduchem kontaminovaným VOC. Byly provedeny následující klíčové kroky:

- Konstrukce mechanické části linky a upevnění senzorů, ventilů a topného tělesa,
- Realizace elektrického zapojení včetně propojení komponent s DAQ kartou,
- Vývoj softwarové aplikace v jazyce C# pro ovládání systému a vizualizaci dat,
- Testování systému pomocí reálných měření koncentrace VOC (aceton) a záznam odezvy systému.

Každý z těchto kroků byl navržen s důrazem na přehlednost, rozšiřitelnost a možnost jednoduchého ovládání ze strany uživatele.

2.6.2 Funkčnost a spolehlivost systému

Měření ukázala, že celý systém je schopný v reálném čase sledovat změny koncentrace VOC a odpovídajícím způsobem je zobrazovat. Pomocí zvolených senzorů a akviziční karty bylo dosaženo dostatečné přesnosti i stability dat. Softwarová část zajišťovala nejen sběr dat, ale také jejich grafické zobrazení, ukládání a jednoduché ovládání aktivních prvků linky.

Odezva systému při změně podmínek (např. vstřík VOC nebo otevření ventilu) byla okamžitá a jasně patrná na grafech. Všechna zařízení spolupracovala bez výpadků, což potvrzuje spolehlivost celého řešení.

2.6.3 Omezení a poznatky během realizace

Během vývoje se vyskytlo několik omezení a technických komplikací, které ovlivnily hloubku vyhodnocení:

- V průběhu měření se projevila variabilita podmínek okolního prostředí (např. drobné výkyvy teploty a vlhkosti), které mohly mírně ovlivnit odezvu senzorů.
- Vliv na přesnost měření mohla mít také skutečnost, že byly použity cenově dostupné senzory s běžnou přesností a menší odolností vůči rušení, což je však pro naše účely dostatečné.
- Měření nicméně probíhalo za realistických podmínek a výsledky odpovídají očekávanému chování systému při změnách koncentrace VOC.

I přes tato omezení se podařilo dosáhnout validního funkčního ověření – systém měřil, reagoval a zaznamenával přesně podle očekávání.

2.6.4 Možnosti rozšíření a využití

Testovací linka byla navržena jako modulární. V budoucnu by bylo možné realizovat následující vylepšení:

- Automatizace testovací sekvence podle předem zadaného scénáře (např. pomocí PLC nebo C# skriptování),
- Kalibrace senzorů s použitím referenčních vzorků a následné vyhodnocení účinnosti různých filtrů,
- Implementace PID regulace teploty a vlhkosti pro přesnější simulaci reálných podmínek,
- Rozšíření o další senzory (např. CO₂, NO_x) pro vícesložkovou analýzu.

Získané výsledky a vytvořený software mohou najít využití nejen při vývoji filtračních materiálů, ale také při jejich certifikaci nebo výuce principů environmentálního měření.

2.6.5 Sebehodnocení a přínos práce

Tato práce přinesla nejen funkční technické řešení, ale také cennou osobní zkušenost se sestavením reálného měřicího systému. Během realizace bylo nutné kombinovat znalosti z oblasti programování, elektrotechniky, sensoriky i uživatelského rozhraní. Prakticky jsem se naučil pracovat s akviziční kartou NI USB-6351, navrhovat schémata v prostředí KiCAD a programovat desktopovou aplikaci v jazyce C# ve Visual Studiu s využitím knihovny ScottPlot.

Z pohledu přínosu lze tuto práci hodnotit jako funkční základ pro reálné využití a další rozvoj. Systém je spolehlivý, rozšiřitelný a dostatečně univerzální pro další testování i úpravy.

Shrnutí

Navržený a realizovaný systém úspěšně splnil všechny hlavní cíle práce. Měření proběhla bez technických komplikací a výsledky odpovídají očekávání. Díky navržené modularitě je možné systém dále rozšiřovat, kalibrovat a využít jak v praxi, tak v laboratorních podmínkách.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na návrh, sestavení a ověření funkční testovací linky určené pro měření absorpčních vlastností materiálů při působení těkavých organických látek (VOC). Hlavním cílem bylo vytvořit systém, který umožní sběr dat z různých senzorů, jejich vizualizaci a zároveň řízení aktivních prvků, jako jsou ventily a topné těleso.

V rámci realizace byla použita akviziční karta NI USB-6351, která byla propojena s několika senzory – konkrétně s čidly VOC, teploty, vlhkosti, tlaku a průtoku. Použité senzory měly analogový výstup, což umožnilo jejich přímé připojení na vstupy měřicí karty bez nutnosti převodníků či mikrokontrolérů. Data ze senzorů byla zpracovávána v počítačové aplikaci vytvořené v jazyce C#, která umožňuje nejen sledování aktuálních hodnot v reálném čase, ale i ovládání jednotlivých prvků linky. Celý systém byl zapojen dle schématu a fyzicky sestaven s důrazem na funkčnost a modularitu.

Funkčnost celého systému byla ověřena měřením účinnosti filtru s granulovaným aktivním uhlím. Do testovacího prostoru byly dávkovány výpary acetonu (VOC) a senzor zaznamenával koncentraci v čase. Průběh měření odpovídal očekávaným vlastnostem filtru – bylo pozorováno typické nasycení, stabilizace a postupná desorpce. Tím byla potvrzena schopnost systému zachytit dynamiku filtračního procesu. Přestože měření nebyla prováděna v přesně řízených laboratorních podmínkách, výsledky byly stabilní a konzistentní.

Při práci byla získána řada zkušeností nejen s návrhem zapojení a prací s měřicí technikou, ale i s programováním uživatelské aplikace a návrhem zapojení v prostředí KiCAD. Projekt ukázal, že propojení hardwaru a softwaru do funkčního celku je proveditelné i za použití běžně dostupných komponent.

Do budoucna se nabízí několik možných vylepšení systému, jako je automatické spínání na základě předem nastavených podmínek, rozšíření o další typy senzorů, přesná kalibrace výstupních hodnot nebo přechod na řízení pomocí PLC. Díky své otevřené architektuře je navržený systém vhodný pro rozšiřování i pro výukové účely.

Práce splnila všechny stanovené cíle a výstupem je spolehlivě fungující měřicí systém s praktickým využitím. Projekt přinesl autorovi důležité praktické zkušenosti a může být dále rozvíjen v rámci výzkumu nebo technické praxe.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MANGOTRA, K. a SINGH, R. K., 2024. Volatile Organic Compounds: A Threat to the Environment and Health Hazards to Living Organisms – A Review. *Journal of Biotechnology* [online]. 382, s. 51–69 [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.12.013>. ISSN 0168-1656 .
- [2] ZHANG, Y., HOPKE, P. K. a MANDIN, C., 2022. Volatile Organic Compounds (VOCs). In: C. YANG a Y. HUANG, eds. *Handbook of Indoor Air Quality*. Singapore: Springer, s. 1–50. ISBN 978-981-16-7680-2.
- [3] SALTHAMMER, T., 2019. Indoor air pollutants: Sources, occurrence and control. *Chemical Reviews* [online]. 119(17), s. 10629–10774 [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00679>. ISSN 0009-2665 .
- [4] SEINFELD, J. H. a S. N. PANDIS, 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3. vyd. Hoboken: John Wiley & Sons, s. 1152. ISBN 978-1-118-94740-1.
- [5] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2023. Air Pollution from Cars, Trucks, and Buses [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change>
- [6] WANG, S., ZHENG, H., KONG, S., CHEN, N., NIU, Z., ZHANG, Y. a QI, S., 2021. Source apportionment of volatile organic compounds: Implications to reactivity, ozone formation, and secondary organic aerosol potential. *Atmospheric Research* [online]. 250, 105344 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105344>. ISSN 0169-8095
- [7] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2023. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>
- [8] SHAO, S. et al., 2023. Seasonal variation and indoor-outdoor relationship of VOCs in residential buildings. *Building and Environment* [online]. 235, 110275 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110275>. ISSN 0360-1323 .
- [9] LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2024. Indoor VOCs: Concentrations and Health Risks [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://iaqscience.lbl.gov/voc-health>
- [10] EVROPSKÁ UNIE, 2004. Směrnice 2004/42/ES o omezení emisí VOC. Úřední věstník

- Evropské unie [online]. L 143, s. 87–96 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0042>
- [11] LI, Y. et al., 2024. How does microorganism in different zones cooperatively promote N₂O emissions from SWIS during freeze-thaw? *Science of The Total Environment* [online]. 912, 168747 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168747>. ISSN 0048-9697 .
- [12] SALTHAMMER, T. et al., 2019. Indoor air pollutants: Sources, occurrence and control. *Chemical Reviews* [online]. 120(3), 1209–1293 [cit. 2025-04-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00012>. ISSN 0009-2665.
- [13] INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC), 2018. Benzene. In: *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans* [online]. Vol. 120. Lyon: IARC [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Benzene-2018>.
- [14] SEINFELD, J. H. a PANDIS, S. N., 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3. vyd. Hoboken: Wiley. ISBN 978-1-118-94740-1.
- [15] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 1999. *Compendium Method TO-15: Determination of VOCs in Air Collected in Specially-Prepared Canisters* [online]. Washington, D.C.: U.S. EPA [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/airtox/to-15r.pdf>.
- [16] EVROPSKÁ UNIE, 2004. Směrnice 2004/42/ES o omezování emisí těkavých organických sloučenin. *Úřední věstník EU* [online]. L 143, 30.4.2004, s. 87–96 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0042>.
- [17] YAMAZOE, N. a MIYOSHI, A., 1991. Gas sensors for volatile organic compounds (VOCs). *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 5(1–4), 7–19 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(91\)80115-5](https://doi.org/10.1016/0925-4005(91)80115-5). ISSN 0925-4005.
- [18] WANG, C. et al., 2010. Recent progress in sensing technology for VOCs. *Sensors* [online]. 10(3), 2088–2106 [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s100302088>. ISSN 1424-8220.
- [19] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2022. *Photoionization Detectors (PIDs) for VOC Monitoring: Technology Fact Sheet* [online]. Washington, D.C.:

U.S. EPA [cit. 2025-04-06]. Dostupné z: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-11/butyl-acrylate-pid-assessment-report-v1.0.1_0.pdf.

[20] NOVÁK, Jan, 2021. Návrh systému pro měření kvality ovzduší pomocí VOC senzorů. Brno, Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

[21] KREJČÍ, Michal, 2021. Analýza možností použití plynových senzorů Figaro. Ostrava, Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

ALPHASENSE, [bez data]. Electrochemical Sensors Data Sheets [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: <https://www.alphasense.com/products/view-by-target-gas/volatile-organic-compound-sensors>

[22] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2022. Photoionization Detectors (PIDs) for VOC Monitoring: Technology Fact Sheet [online]. Washington, D.C.: U.S. EPA [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-11/butyl-acrylate-pid-assessment-report-v1.0.1_0.pdf

[23] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2022. Photoionization Detectors (PIDs) for VOC Monitoring: Technology Fact Sheet [online]. Washington, D.C.: U.S. EPA [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-11/butyl-acrylate-pid-assessment-report-v1.0.1_0.pdf

[24] VÁŇA, Vladimír, 2003. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-102-0.

[25] BRTNÍK, Bohumil, 2011. Základní elektronické obvody. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-408-8.

[26] FIGARO ENGINEERING, [bez data]. TGS Sensors Specifications [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: <https://www.figaro.co.jp/en/product/feature/tgs5141.html>

[27] ALPHASENSE, [bez data]. PID and Electrochemical Sensors Comparison [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: <https://www.alphasense.com/products>

[28] VLACH, Jaroslav, 2002. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-86056-66-X.

[29] RIPKA, Pavel a TIPEK, Alois, 2003. Master Book of Sensors. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 0-12-752184.

[30] VÁŇA, Vladimír, 2003. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-083-0.

[31] VÁŇA, Vladimír, 2003. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C.

Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-102-0.

[32] BRTNÍK, Bohumil, 2011. Základní elektronické obvody. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-408-8.

[34] DALLAS SEMICONDUCTOR, [bez data]. DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>

[35] ANALOG DEVICES, [bez data]. TMP36: Low Voltage Temperature Sensor [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/tmp36.html>

[36] TEXAS INSTRUMENTS, [bez data]. LM35: Precision Centigrade Temperature Sensors [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

[37] GME, TME, Conrad, 2024. Katalogové ceny senzorů [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: <https://www.gme.cz>, <https://www.tme.eu>, <https://www.conrad.cz>

[38] HONEYWELL, [bez data]. HIH-4030 Series Humidity Sensors [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/file/0J324/HIH-4030-datasheet.pdf>

[39] LIU, W. et al., 2020. Optical humidity sensors: A review. Measurement Science and Technology, 31(12), 122001. DOI: 10.1088/1361-6501/ab9bff

[40] ADAFRUIT, [bez data]. DHT11/DHT22 Humidity and Temperature Sensor Datasheets [online]. [cit. 2025-04-15]. Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/dht.pdf>

[41] SENSIRION, [bez data]. SHT3x Humidity and Temperature Sensor Datasheet [online]. [cit. 2025-04-15]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet_SHT3x_DIS.pdf

[42] BOSCH, [bez data]. BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor Datasheet [online]. [cit. 2025-04-15]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>

[43] NOVOTNÝ, Martin, 2020. Měření a řízení pomocí akvizčních karet NI. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

[44] NATIONAL INSTRUMENTS, [bez data]. DAQ Hardware Overview [online]. [cit. 2025-04-15]. Dostupné z: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition.html>

[45] YANG, L. et al., 2018. Data acquisition technologies for industrial sensor networks. IEEE Sensors Journal, 18(12), 4921–4933. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8353611>

[46] MAŠEK, Tomáš, 2020. Návrh PLC systému pro řízení výrobní linky. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

SEZNAM PŘÍLOH

Zdrojový kód aplikace v jazyce C# s grafickým uživatelským rozhraním