

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



---

## Bakalářská práce

Odsávací a filtrační zařízení  
Extraction and filtration system

---

Studijní program: Elektronika a komunikace  
Autor práce: Tomáš Poupě  
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Teplý

Praha 2023



### **Prohlášení**

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

V Praze dne .....

.....  
Tomáš Poupě



## **Poděkování**

Rád bych poděkoval za pomoc, rady a odborné vedení mé Bakalářské práce panu Ing. Tomáši Teplému. Další poděkování patří panu Ing. Vítu Záhlavovi, Csc. za rady k návrhu a kontrolu návrhu desky plošných spoje, která je stěžejní částí mé práce. Dále bych chtěl poděkovat řediteli firmy Kemper Ing. Lukáši Skřivanovi za poskytnutí veškeré materiální podpory a rad při sestavování práce. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a blízkým za trpělivost a pochopení při psaní této práce.



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Poupě** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **498940**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Odsávací a filtrační zařízení**

Název bakalářské práce anglicky:

**Extraction and Filtration System**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte zařízení pro odsávání a filtraci vzduchu v uzavřeném prostoru při sváření, broušení nebo pájení. Aktuální stav čistícího filtru bude měřen pomocí senzorů a na základě výsledků měření bude vyhodnocena míra znečištění filtru. Na motoru s turbínou bude měřena teplota, aby bylo možné předejít jejich přehřátí.

Postup řešení:

- 1) Prostudujte problematiku odsávání nebezpečných par vznikajících při sváření, broušení a pájení.
- 2) Proveďte návrh obvodového zapojení a výběr vhodných součástek pro realizaci řídicí jednotky, která bude sbírat a vyhodnocovat data ze senzorů a bude vhodným způsobem informovat obsluhu o stavu znečištění filtru a nebezpečí přehřátí motoru a turbíny.
- 3) Navrhněte DPS a zařízení realizujte.
- 4) Zařízení otestujte a vyhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Fraden, Jacob: Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications, Fifth Edition, Springer, 2016
- [2] Yiu, J.: The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors Third Edition, Elsevier, 2014
- [3] Záhlava, V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha, 2011

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Tomáš Teplý katedra mikroelektroniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.02.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Tomáš Teplý  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací řídicí desky pro jednotku, která slouží pro odsávání a filtraci vzduchu při práci v uzavřeném prostoru při sváření, broušení, nebo pájení. Návrh se skládá z návrhu obvodového řešení, návrhu desky plošných spojů s programem a následného aplikování řídicí desky do zařízení. Řídicí deska bude měřit provozní teplotu zařízení, průtok vzduchu na filtru a regulovat odsávací sílu motoru. U zařízení se ověří funkčnost řídicí desky a změří se základní parametry zařízení.

## **Klíčová slova**

Měření teploty, měření průtoku vzduchu, regulace motoru, mikroprocesor, čištění vzduchu, filtr

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with the design and implementation of a control board for a unit used for extracting and filtering air in enclosed spaces during welding, grinding, or soldering. The design consists of a circuit solution design, a printed circuit board design with software, and the application of the control board to the unit. The control board will measure the operational temperature of the device, the airflow through the filter, and regulate the suction power of the motor. The functionality of the control board will be verified on the unit, and the basic parameters of the device will be measured.

## **Key words**

Temperature measurement, air flow measurement, motor control, microprocessor, air purification, filter



# Obsah

Úvod	1
<b>1 Teoretický úvod</b>	<b>2</b>
1.1 Filtrační a odsávací zařízení . . . . .	2
1.1.1 Důvod odsávání svařovacího dýmu . . . . .	3
1.1.2 Hlavní části odsávacího a filtračního zařízení . . . . .	3
1.1.3 Princip činnosti odsávacího a filtračního zařízení . . . . .	4
1.2 Měření průtoku vzduchu . . . . .	5
1.2.1 Senzory tlaku s polovodičovým tenzometrem . . . . .	6
1.2.2 Piezoelektrické senzory tlaku . . . . .	7
1.2.3 Kapacitní senzory tlaku . . . . .	8
1.3 Měření teploty . . . . .	9
1.3.1 Dilatační senzory teploty . . . . .	9
1.3.2 Termoelektrické senzory teploty . . . . .	11
1.3.3 Odporové senzory teploty . . . . .	12
1.4 Mikrokontrolér . . . . .	15
1.4.1 Jak funguje mikrokontrolér . . . . .	15
1.4.2 Části mikrokontroléru . . . . .	15
1.4.3 Aplikace mikrokontrolérů . . . . .	16
1.4.4 STM32 . . . . .	16
1.5 Elektromotor . . . . .	16
1.5.1 Stejnoseměrný motor . . . . .	17
1.5.2 Střídavý elektromotor . . . . .	17
1.5.3 Princip činnosti AC motoru . . . . .	17
1.5.4 Typy AC motorů . . . . .	17
<b>2 Praktická část</b>	<b>19</b>
2.1 FilterMaster XL . . . . .	19
2.2 Návrh desky plošných spojů . . . . .	19

2.2.1	Deska plošných spojů . . . . .	19
2.2.2	Mikrokontroler . . . . .	20
2.2.3	Napájecí zdroje . . . . .	21
2.2.4	Vyhodnocovací a měřicí obvody . . . . .	24
2.2.5	Signalizace a relé . . . . .	26
2.2.6	Frekvenční měnič . . . . .	28
2.2.7	ST-Link a USB-C . . . . .	28
2.2.8	Postup návrhu DPS . . . . .	30
2.2.9	Výroba DPS . . . . .	32
2.3	Programování . . . . .	33
2.3.1	Měření teploty a tlaku . . . . .	33
2.3.2	Rotační enkodér a displej . . . . .	36
2.3.3	Řízení motoru enkodérem . . . . .	38
2.3.4	Chybové hlášky . . . . .	39
2.4	Úprava zařízení FilterMaster XL . . . . .	41
2.4.1	Napájení zařízení . . . . .	41
2.4.2	Pneumatický obvod . . . . .	41
2.4.3	Uvedení do chodu . . . . .	42
2.4.4	Měřicí body . . . . .	43
2.5	Testování . . . . .	44
2.5.1	Testování na dílně . . . . .	44
2.5.2	Test na svařovně . . . . .	45
2.6	Grafy . . . . .	47
	<b>Závěr</b>	<b>48</b>
	<b>Reference</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>52</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam grafů</b>	<b>53</b>

<b>Přílohy</b>	<b>54</b>
<b>1 Příloha – Zapojení procesoru</b>	<b>54</b>
<b>2 Příloha – Výrobní omezení JLCPCB</b>	<b>55</b>
<b>3 Příloha – Díly pro montáž komponentů</b>	<b>56</b>
<b>4 Příloha – Silnoproudé schéma</b>	<b>57</b>
<b>5 Příloha – ČVUT FilterMaster XL</b>	<b>58</b>
<b>6 Příloha – CD</b>	<b>59</b>



# Úvod

Téma bakalářské práce „Odsávací a filtrační zařízení“ se zaměřuje na problematiku využití mikrokontroléru pro řízení odsávacího a filtračního zařízení. Mikrokontrolér bude řídit odsávací jednotku, která odsává výpary od sváření, broušení, lakování, nebo například pájení v uzavřeném prostoru. Tyto odsávací jednotky bývají důležitou součástí práce v uzavřených halách pro zlepšení pracovních podmínek pracujících zaměstnanců.

Bakalářská práce zahrne výrobu vlastního řídicí desky vhodné pro implementaci do odsávacího zařízení s konektory pro připojení měřicích periférií. Řídicí deska bude řídit sílu odsávání, měřit aktuální provozní teplotu na třech místech a měřit průtok vzduchu před a za čisticím filtrem, díky kterému bude zařízení schopno spustit proces čištění a filtr stlačeným vzduchem očistit.

Motivací zvolením tohoto tématu bylo vytvořit „chytré“ řízení již zaběhlého odsávacího zařízení firmy Kemper FilterMaster XL, který je pouze řízen automatickým cyklem bez žádné provozní kontroly a vyhodnocování parametrů během běhu zařízení. Chytré řízení běhu jednotky by po vyrobení mohlo být zařazeno do výroby jakožto nový moderní stroj a oživit tak zaběhlou mnohaletou linii výroby.

# 1 Teoretický úvod

## 1.1 Filtrační a odsávací zařízení

Moderní firmy, které se zabývají prací v halovém prostředí jako je sváření, broušení, nebo například pájení, využívají pro bezpečnost svých zaměstnanců odsávací systémy pro čištění vzduchu jak už mobilní jednotky pro lokální čištění vzduchu, tak i centrální halové odsávání.



**Obrázek 1:** Odsávací a filtrační zařízení firmy Kemper [1].

Filtrační a odsávací zařízení se dělí do několika typů a to na mobilní, stacionární a centrální systémy, nebo například systémy pro vysokotlaké odsávání. Každá z těchto kategorií má svou určitou výhodu ve využití. Mobilní jednotky se využívají v případě, kdy je možné odsávací zařízení na pracoviště přesouvat. Stacionární systémy nelze přesouvat, protože plní svůj úkon na stále stejném místě. Výhodou stacionárního zařízení je možnost většího rozměru odsávacího zařízení s větším filtrem a větším odsávacím výkonem. Centrální odsávací systémy mohou sloužit pro celou halu (podle jejich velikosti). Na centrální odsávací systém lze napojit několik odsávacích hubic zároveň a je schopno odsávat několik pracovišť se stálým konstantním výkonem. Centrální systémy oproti stacionárním, nebo mobilním jednotkám mají výhodu využití ve velkém průmyslovém prostředí, zatímco jednotky menšího a pohyblivého typu slouží pro lokální odsávání menšího pracoviště. Vysokotlaké odsávací zařízení poskytují velmi vysoký odsávací tlak, který je schopen odsávat svařovací dým přímo hořáku svařecí techniky. Vysokotlaké systémy mohou být,



také mobilní i centrální. Rozdíl mezi mobilním a centrálním je v odsávacím výkonu (který je i přesto vysoký), ale také ve velikosti filtru. V mém případě v této práci je využita mobilní odsávací jednotka z důvodu poskytnutí těchto specifických dílů od firmy Kemper. Na Obrázku 1 je vidět zařízení, které je v této práci využíváno.

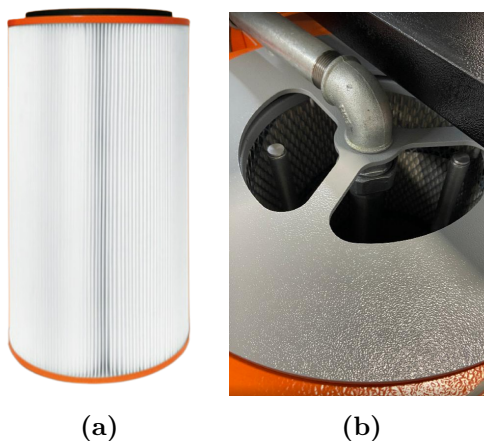
### 1.1.1 Důvod odsávání svařovacího dýmu

Při práci s kovem jako je sváření, nebo broušení vznikají dýmy a plyny, které považujeme za zdraví škodlivé. Tento dým při vdechování částečně způsobuje vznik rakovinotvorných buněk. Při použití odsávacího a filtračního zařízení je svařovací dým efektivně zachycován a filtrován.

Svařovací dým se skládá z částicových a plynných látek. Částicové látky mohou být například: oxid olovnatý, železitý, nebo niklový a plynné látky mohou být například: ozón, oxid uhličitý, nebo dusíkatý. U nebezpečných látek a částic rozlišujeme mezi prachem, který nadechujeme (E-prach) a prachem, který se nám dostává do plicních sklípků (A-prach). Částice prachu, které nadechujeme jsou většinou větší než  $10\ \mu\text{m}$ . A-prach zahrnuje částice, které mohou pronikat až do plicních sklípků. Hranice velikosti je okolo  $2,5\ \mu\text{m}$ . Tyto částice se pak usazují v plicních sklípkách a zabraňují správné výměně plynů ze vzduchu do krve a naopak. Všechny částice, které mohou vzniknout během sváření jsou zařazeny do této nebezpečné skupiny látek. Značná procenta uvolněných látek při svařování se zařazují do skupiny ultra jemného prachu a tím je možné, že se dostávají přes membrány až do krevního oběhu [2] [3] [4].

### 1.1.2 Hlavní části odsávacího a filtračního zařízení

Odsávací a filtrační jednotka se skládá z několika hlavních částí, díky kterým tvoří funkční celek. Hlavní části jsou motor, turbína, filtr, sací ústrojí a řídicí elektronika.



**Obrázek 2:** (a) Filtr, (b) Rotanční dýza.

Motor v propojení s turbínou je základním prvkem mobilní odsávací a filtrační jednotky. Jeho úkolem je odsát vzduch z pracovního prostoru a odsát ho do filtračního

systemu. Motor s turbínou může být umístěn buď přímo na odsávací jednotce nebo odděleně v nějaké vzdálenosti. Jeho výkon je obvykle volen tak, aby zajistil dostatečný objem vzduchu a rychlost proudění pro účinné odsávání zplodin. V případě tohoto projektu je motor s ventilátorem zabudován přímo v jednotce pod filtrem.

Filtr je další důležitou součástí mobilní odsávací a filtrační jednotky. Jeho úkolem je zachytit a zadržet prachové a jiné částice, které jsou přenášeny vzduchem při práci, kde se tyto částice uvolňují. Filtr může být různého typu a úrovně účinnosti v závislosti na požadavcích aplikace. Mezi nejčastěji používané filtry patří například zvlákňovací filtry, sádrové filtry, filtry s aktivním uhlím, nebo filtry ze složeného filtračního papíru. Tato odsávací zařízení mají také možnost očišťování filtru. Očišťování filtru je způsobeno roztočením rotační dýzy (2b) uvnitř filtru stlačeným vzduchem, která je schopna velké nečistoty z filtru oklepat. V rámci této práce je využit filtr poskládaný z filtračního papíru (obrázek 2a) umístěný v sacím ústrojí zařízení s možností očištění filtru.

Sací ústrojí slouží k propojení motoru s turbínou a filtru. Jeho průměr a délka jsou voleny v závislosti na objemu vzduchu, který je nutné odsát a převést do filtru. Potrubí musí být pevné, odolné vůči chemickým látkám a odpovídat požadavkům na průchodnost vzduchu.

Řídicí elektronika je součástí mobilní odsávací a filtrační jednotky, která umožňuje ovládat a monitorovat její činnost. Elektronika může obsahovat regulátory motoru, napěťové zdroje, nebo hlavní část této práce a to řídicí desku, která bude řídit chod zařízení a měřit všechny důležité parametry. Řídicí deska je postavená na procesoru značky STMicroelectronics.

### 1.1.3 Princip činnosti odsávacího a filtračního zařízení

Princip činnosti je takový, že na základě spuštění motoru s turbínou, je vytvořen v sacím ústrojí podtlak, který odsává skrz filtr vzduch s obsahem nečistot a částic, kterou jsou filtrem zachytány.

Motoru s turbínou lze regulovat otáčky za pomoci frekvenčního měniče. Tímto lze zajistit rychlost odsávání dle potřeby uživatele zařízení. Čím rychleji zařízení odsává, tím za kratší dobu se filtr zanese nečistotami. Díky použití diferenčních podtlakových senzorů, které jsou připojeny na sací ústrojí před a za filtrem a porovnávají tlaky v těchto bodech. Díky znalosti tlaků před a za filtrem je řídicí elektronika schopna vyhodnotit, jak moc je filtr ucpaný a spustit proces čištění.

Proces čištění u filtru funguje tak, že v zařízení je zabudovaný vzdušník se stlačeným vzduchem, který je k zařízení připojen. Při vyhodnocení v řídicí elektronice času očištění filtru se přivede signál na magnetický ventil, který vpustí vzduch do rotační dýzy, který je zabudován uvnitř filtru. Rotační dýza (obrázek 2b) má na sobě otvory v protilehlých polohách a při přivedení vzduchu se rotační dýza roztočí a vzduchem s rotací filtr oklepe a ofoukne. Větší odsáté nečistoty s prachem, které jsou vzduchem oklepány padají do odjímatelného místa pod filtrem, které slouží jako sběrný koš pro filtrem zachycené nečistoty.

Řídicí elektronika využívá moderní elektronické senzory s analogovým výstupem. Pomocí odporových senzorů teploty měří teplotu zařízení a kontroluje, kdyby nastal stav přehřátí zařízení. Tuto kontrolu teploty provádí na třech místech, a to na motoru, řídicí desce a filtru. Kdyby se senzor poškodil, nebo byl odpojen, řídicí elektronika pozná poruchu a na displeji začne signalizovat příslušnou chybovou hlášku.

## 1.2 Měření průtoku vzduchu

Při měření průtoku vzduchu vycházíme z Bernouliho principu. Bernouliho princip nám říká, že zvýšení rychlosti šíření média nastává současně s poklesem jeho tlaku a naopak. To znamená, pokud se nám rychlost šířeného média sníží na hodnotu nula, pak se tlak média zvýší na maximum. Tlak při nulové rychlosti šíření média se nazývá *stagnační tlak*. Stagnační tlak vypočteme podle rovnice:

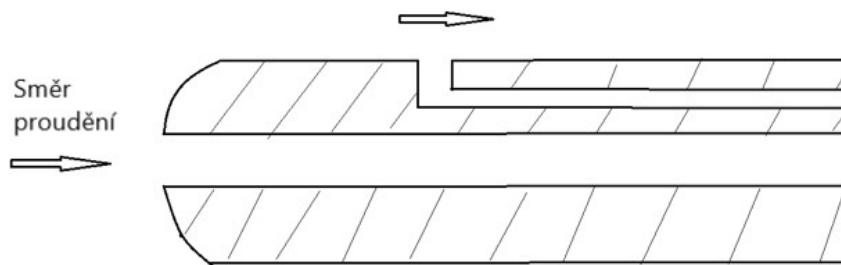
$$P_o = P_s + P_d = P_s + \frac{1}{2}\rho v^2, \quad (1.2.1)$$

kde  $P_o$  je stagnační tlak,  $P_s$  je statický tlak,  $P_d$  je dynamický tlak,  $\rho$  je hustota média a  $v$  je rychlost média. Tento vztah, ale platí pouze pro nestlačitelná proudění. Z rovnice 1.2.1 si můžeme vyjádřit rychlost šíření média, v našem případě vzduchu a vznikne nám vztah:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_o - P_s)}{\rho}}, \quad (1.2.2)$$

který nám udává rychlost proudění vzduchu v závislosti na rozdílu měřeného tlaku a hustotě.

Model pro měření průtoku vzduchu nazýváme Pitotova trubice. Nazýváme ho podle jeho vynálezce francouzského inženýra Henriho Pitota, který jej v 18. století vynalezl. Tento model byl v průběhu let vyvíjen, až do počátku 20. století, kdy německý aerodynamik Ludwig Prandtl spojil měření tlaku a Pitotovu trubici do Pitotovy statické trubice, kterou dnes využíváme v mnoha aplikacích. Na obrázku 3 je uvedeno schéma Pitotovy statické trubice. Při základním měření se využívají body (otvory) na trubici. V jednom bodě snímáme u proudění vzduchu stagnační tlak a v druhém bodě snímáme kolmo k proudění vzduchu a měříme statický tlak [5].



**Obrázek 3:** Schéma Pitotovy statické trubice [5].

Z tohoto úvodu do měření průtoku vzduchu vyplývá, že pro nejprimitivnější měření uvnitř trubice nám stačí pouze dva body a senzory pro snímání tlaku. V mém případě

budu pro měření využívat diferenční senzory tlaku. Těchto senzorů je mnoho druhů a typů. Základním principem diferenčního senzoru je porovnání dvou přivedených tlaků vzduchu do senzoru. V senzorech se nachází membrána, která se vychyluje v závislosti na přivedených tlacích. Vyhodnocování vychylování membrány lze při měření dělit na elektrické a neelektrické. Do skupiny neelektrických patří tlakoměry hydrostatické, deformační a se silovým účinkem. Elektrické tlakoměry fungují na několika principech snímání. Typicky je dělíme do třech podskupin: snímače s odporovými tenzometry, piezoelektrické snímače a kapacitní snímače.

### 1.2.1 Senzory tlaku s polovodičovým tenzometrem

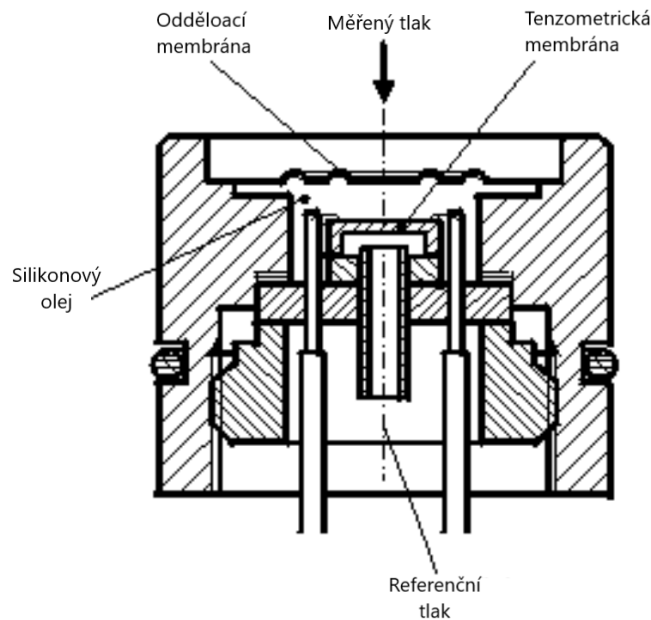
Senzory s polovodičovým tenzometrem, přesně fungují na principu převodu změny jejich rozměru v závislosti na změně odporu  $\Delta R$ . Změna rozměrů senzoru vzniká při jejich deformaci  $\varepsilon$ , tedy při pohybu membrány na které jsou senzory připevněny. U tenzometrů je převodní konstantou *deformační citlivost*  $K$ , kterou definujeme jako

$$K = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\varepsilon_d}, \quad (1.2.3)$$

kde  $R$  je odpor tenzometru,  $\Delta R$  je změna odporu při deformaci a  $\varepsilon_d$  je poměrná deformace udaná vztahem

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta l}{l}, \quad (1.2.4)$$

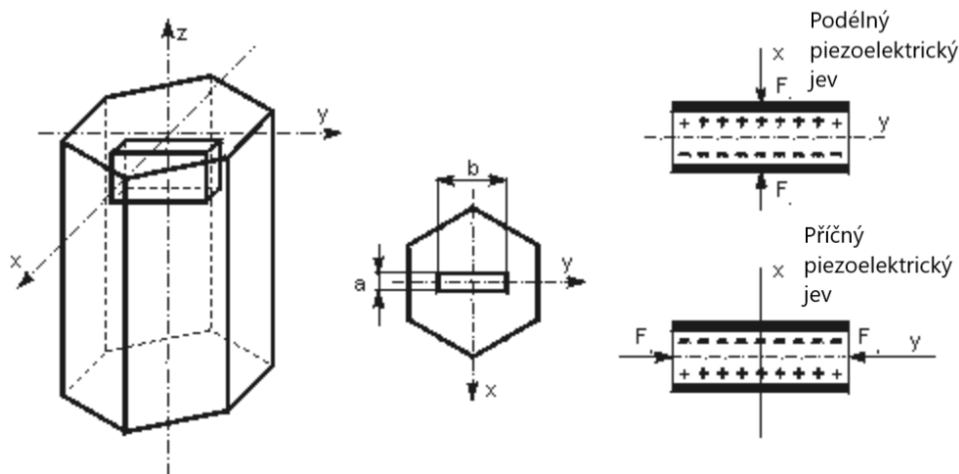
kde  $\Delta l$  je změna délky membrány a  $l$  je délka membrány. Tyto senzory se zhotovují difúzní technologií a jsou připevňovány na kruhovou křemíkovou membránu ve válcovém pouzdře. Ohybem membrány probíhá deformace tenzometru a na základě deformace je vyhodnocována velikost měřeného tlaku [6].



**Obrázek 4:** Senzor tlaku s polovodičovými tenzometry [6].

## 1.2.2 Piezoelektrické senzory tlaku

Při mechanické deformaci krystalů například křemene, vzniká elektrický náboj. Tohoto jevu využívají piezoelektrické senzory tlaku. Upravený krystal, který u těchto senzorů využíváme nazýváme *piezoelektrický element*. Piezoelektrický element získáme tak, že vyrobíme v krystalu destičku, kde její hrany budou rovnoběžné s osami krystalu (obrázek 5). Osa X symbolizuje osu elektrickou, osa Y osu mechanickou a osa Z osu optickou.



Obrázek 5: Piezoelektrický jev u krystalu křemene [6].

To znamená, pokud působí síla kolmo na osu Z, tedy osu optickou, krystal se působením síly zelektrizuje na ploškách, které jsou kolmé na osu X, tedy elektrickou a objeví elektrický náboj. Při působení síly, která je rovnoměrně rozložena podél osy X, můžeme hovořit o takzvaném *podélném piezoelektrickém jevu*. Při podélném piezoelektrickém jevu vzniklý náboj (kolmý k elektrické ose X) jsme schopni popsat rovnicí:

$$Q = K_p \cdot F_x, \quad (1.2.5)$$

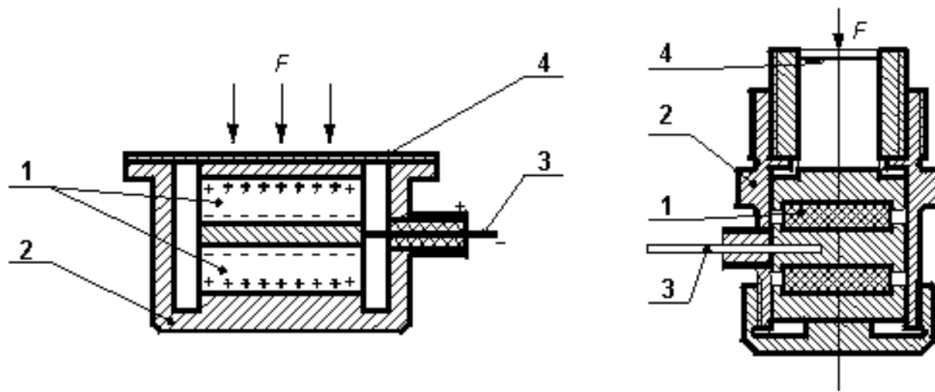
kde  $K_p$  je piezoelektrická konstanta a  $F_x$  je rovnoměrně rozložená síla. Z rovnice 1.2.5 je zřejmé, že velikost náboje  $Q$  při podélném piezoelektrickém jevu není závislá na rozměrech krystalu. V případě, kdy působí síla ve směru osy Y, dochází k *příčnému piezoelektrickému jevu*. Zde je velikost náboje závislá na rozměrech krystalu a směr polarizačního vektoru je záporný. Velikost náboje při příčném polarizačním jevu je dána vztahem:

$$Q = -K_p \cdot F_y \cdot \frac{b}{a}, \quad (1.2.6)$$

kde  $K_p$  je piezoelektrická konstanta,  $F_y$  je síla působící ve směru osy Y a  $b$ ,  $a$  jsou rozměry destičky (obrázek 5). Výbrus krystalu má vodivé elektrody, na kterých při mechanickém namáhání krystalu vzniká náboj. Senzor lze tedy také popsat jako zdroj napětí s velkým vnitřním odporem. Vzniklý náboj lze převést na napětí dle následujícího vztahu:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{K_p \cdot F_x}{C}, \quad (1.2.7)$$

kde  $U$  je napětí na výstupu snímače,  $C$  je kapacita snímače,  $K_p$  je piezoelektrická konstanta a  $F_x$  je rovnoměrně rozložená síla. Na obrázku 6 je znázorněno schéma piezoelektrického snímače tlaku [6]. Popis obrázku 6 je následující:



Obrázek 6: Piezoelektrického snímače tlaku [6].

- |                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| 1. piezoelektrické krystaly | 3. centrální elektroda |
| 2. kryt senzoru             | 4. membrána            |

### 1.2.3 Kapacitní senzory tlaku

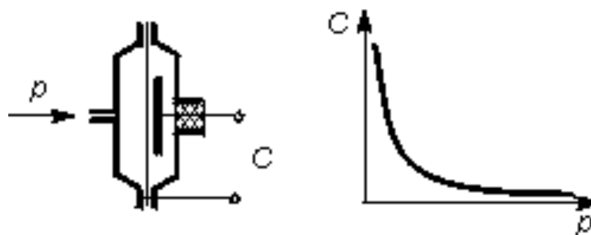
Kapacitní senzory tlaku fungují na principu deskového kondenzátoru. Konstrukčně je sestava ze dvou, nebo více elektrod. Senzor využívá vzájemné pozice těchto elektrod, která se mění na základě měřené neelektrické veličiny, v našem případě tlaku vzduchu. Pro klasický deskový kondenzátor je jeho kapacita dána vztahem:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}, \quad (1.2.8)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ),  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita,  $S$  je velikost plochy elektrod,  $d$  je vzdálenost elektrod. Elektrody kontrolujeme tak, že jedna z elektrod bývá pevná a druhá slouží jako membrána, která měřeným tlakem mění svou polohu vůči elektrodě pevné. Vzorec 1.2.8 pro výpočet kapacity si tedy můžeme pro měření s využitím senzoru zjednodušit, tak že část vzorce s veličinami, které jsou pro nás známými konstantami nahradíme konstantou  $k_C$ :

$$k_C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S \Rightarrow C = \frac{k_C}{d}. \quad (1.2.9)$$

Díky tomuto zjednodušení jsme schopni kapacitu vyhodnocovat pouze s měnící se vzdáleností elektrod  $d$ . Nevýhodou kapacitního senzoru je jeho charakteristika. Na obrázku 7 je znázorněna závislost kapacity na tlaku kapacitního senzoru. Z charakteristiky je zřejmé, že se jedná o hyperbolicou nelineární závislost. To znamená, že senzor má nejvyšší citlivost pouze při malých vzdálenostech mezi elektrodami  $d$ . Abychom mohli porovnávat dva tlaky, využijeme diferenční senzor (obrázek 8), který je vyroben ze tří elektrod, z nichž jsou dvě pohyblivé a jedna pevná. Díky této konstrukci můžeme porovnávat přivedené tlaky  $p_1$  a  $p_2$ , které budou tlačít na pohyblivé membrány a senzor bude vyhodnocovat kapacitu vůči elektrodě pevné [6].



Obrázek 7: Jednoduchý kapacitní senzor [6].

### 1.3 Měření teploty

Měření teploty je jedním z nejběžnějších měření, protože teplota je veličina, která se nachází všude kolem nás a ovlivňuje a je ovlivňována mnoha aspekty. Při měření teploty obecně vždy měříme jinou veličinu, na které je konstrukčně teplota závislá. Časté veličiny, které měříme a poté převádíme na teplotu jsou: tlak, odpor, napětí... Senzory teploty lze dělit do čtyř skupin, a to na dilatační, elektrické, speciální a bezdotykové. V Tabulce 1 můžeme vidět rozdělení senzorů dle skupin s principy a parametry.

Tabulka 1: Senzory teploty [7].

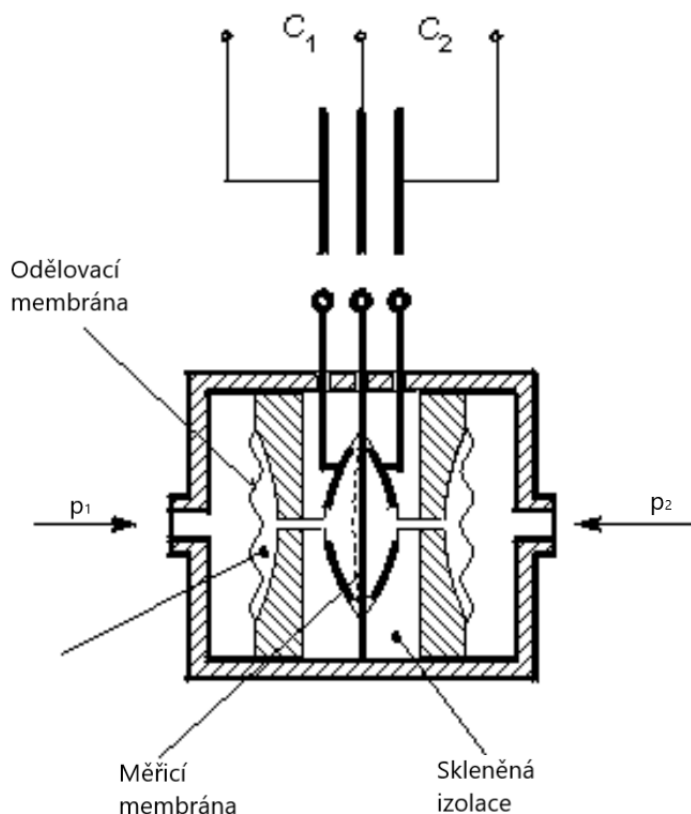
Skupina	Typ	Fyzikální princip	Rozsah °C	
Dilatační senzory	Plynové	Změna tlaku	-5	+500
	Tenzní	Změna tenze par	-40	+400
	Kapalinové	Změna objemu	-200	+750
	Kovové	Délková roztažnost	0	+900
Elektrické senzory	Termoelektrické	Termoelektrický jev	-200	+1700
	Odporové kovové	Změna elektrického odporu	-250	+1000
	Odporové polovodičové	Změna prahového napětí	-200	+400
Speciální senzory	Keramické žároměrky	Bod měknutí	+600	+2000
	Teploměrná tělíska	Bod tání	+100	+1300
	Teploměrné barvy	Změna Barvy	+40	+1350
Bezdotykové senzory	Širokopásmové pyrometry	Teplotní záření	-40	+5000
	Monokrystalické pyrometry	Teplotní záření	+100	+3000
	Poměrové pyrometry	Teplotní záření	+700	+2000
	Termovize	Teplotní obraz	-30	+1200

#### 1.3.1 Dilatační senzory teploty

Dilatační senzory fungují na principu změny délky, nebo svého objemu kapalných, plyných, nebo tuhých látek působením měřené teploty. Tyto senzory dělíme tedy na plyné, tenzní, kapalinové a roztažnostní.

Plynové senzory teploty vychází z tvrzení, že plyn při stálém objemu je přímo úměrný teplotě. Tlak lze popsat rovnicí (Charlesův zákon):

$$pV = nRT \Rightarrow p = k \cdot T, \quad (1.3.1)$$



**Obrázek 8:** Diferenční kapacitní senzor [6].

kde  $n$  je látkové množství,  $R$  je plynová konstanta,  $V$  je objem plynu,  $T$  je teplota a  $k$  je konstanta do které zahrneme konstantní parametry, které při měření známe. Měřící rozsah teploty těchto senzorů je od  $-50$  °C do  $+500$  °C. Běžně se nepoužívají.

Tenzní senzory teploty využívají závislost tenze par na teplotě. Závislost tenze par, můžeme popsat následující rovnicí:

$$\log p = A - \frac{B}{T} + C \cdot \log T, \quad (1.3.2)$$

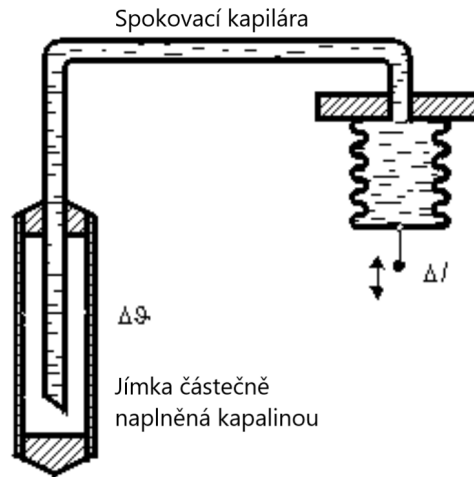
kde  $p$  je tlak,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  jsou konstanty,  $p$  je tlak a  $T$  je teplota. Na obrázku 9 je zobrazen tenzní senzor teploty, který se skládá z jímky, spojovací kapiláry a tlakoměrného ústrojí. Samotná jímka slouží jako snímač teploty, vyhodnocuje se závislost objemu kapaliny v jímce na teplotě. Při maximální možné naměřitelné teplotě se vypaří všechna kapalina a na vlnovec bude působit tlak, který ho deformuje.

Kapalinové senzory teploty pracují na závislosti změny objemu kapaliny a teploty. Neznámějším kapalinovým senzorem teploty je rtuťový teploměr. Části senzoru obvykle bývají: deformační tlakoměr, kompenzační kapilára, spojovací kapilára, měřící nádoba a zobrazovací ústrojí viz obrázek 10. Nádoby a kapiláry jsou uzavřeny a

naplněné kapalinou (nejčastěji rtuť). Při změně objemu kapaliny v závislosti na teplotě dochází k deformaci deformačního tlakoměru. Tento děj lze popsat následující rovnicí:

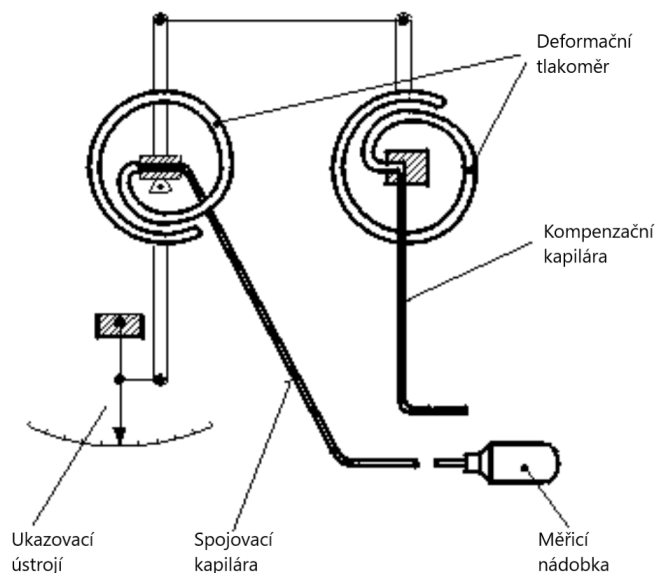
$$V_{\vartheta} = V_0 \cdot (1 + \beta\vartheta), \quad (1.3.3)$$





Obrázek 9: Tenzní senzor teploty [7].

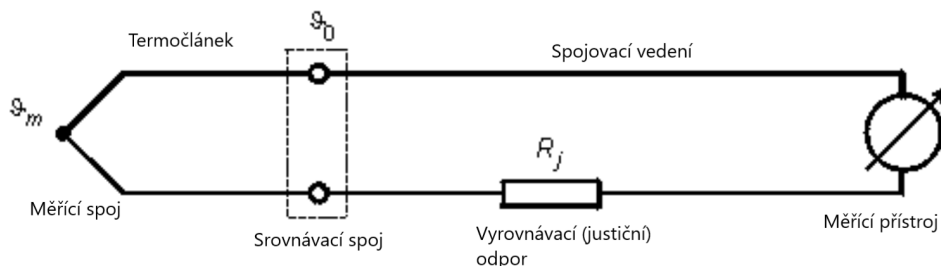
kde  $V_\vartheta$ ,  $V_0$  jsou objemy při teplotách  $\vartheta$  resp.  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a  $\beta$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti. Velkou výhodou těchto senzorů teploty je jejich linearita [7].



Obrázek 10: Kapalinový senzor teploty [7].

### 1.3.2 Termoelektrické senzory teploty

Termoelektrické senzory teploty využívající termoelektrického článku (termočlátku), který využívá termoelektrického jevu. Termočlánek je obvod složený ze dvou materiálově rozdílných na konci spojených kovů, kde vzniká termoelektrická síla. Na obrázku 11 je schéma zapojení termočlátku, kde měřící spoj odpovídá místu, na kterém se měří teplota. Svorcky značené jako srovnávací spoj využívá pro měření termoelektrického napětí. Termoelektrické napětí je takové napětí, které je úměrné rozdílu teploty v místě měřícího a srovnávacího spoje a je přiváděno spojovacím vedením na měřící přístroj. Srovnávací



**Obrázek 11:** Schéma obvodu termočlánu [7].

spoje by měli být udržovány na známé, nejlépe konstantní teplotě, aby se mohlo přiřazovat naměřenému napětí naměřená teplota. Závislost termoelektrického napětí  $U$  na teplotě můžeme vyjádřit vztahem:

$$U = \alpha_{AB}\vartheta_m + \alpha_{BA}\vartheta_0 = \alpha_{AB}(\vartheta_m - \vartheta_0) , \quad (1.3.4)$$

kde  $\alpha_{AB}$  je koeficient závislý na použitých materiálech (platí:  $\alpha_{AB} = -\alpha_{BA}$ ),  $\vartheta_m$  je teplota měřící spoje a  $\vartheta_0$  je teplota srovnávacího spoje [7].

### 1.3.3 Odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty využívají převod změny elektrického odporu v závislosti na teplotě. Můžeme je dělit na kovové odporové a polovodičové odporové.

U kovových odporových senzorů teploty vzrůstá odpor s teplotou. Tuto závislost můžeme vyjádřit aproximační rovnicí:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \beta(\vartheta - \vartheta_0)^2] . \quad (1.3.5)$$

Rovnici můžeme pro použití do maximálně 100 °C zjednodušit a to tak, že odstraníme nelineární člen:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)] , \quad (1.3.6)$$

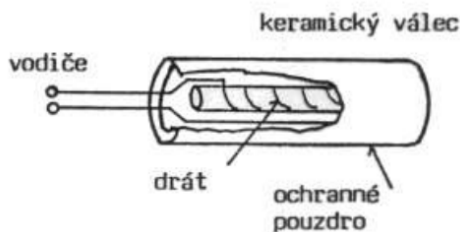
kde  $R_0$  je výchozí odpor kovového vodiče,  $\alpha$  je teplotní součinitel definovaný v bodě  $\vartheta_0$ , který můžeme definovat pro rozsah teplot 0 až 100 °C Rovnicí 1.3.7 a  $\vartheta$  je teplota.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad (1.3.7)$$

Nejčastěji používané kovy pro konstrukci těchto senzorů jsou Platina (Pt), Nikl (Ni) a Měď (Cu). Jejich teplotní součinitele a meze použití lze vidět v tabulce 2. Materiály jsou v tabulce seřazeny podle používání, tedy nejčastěji používaná je Platina. Odpor u odporových senzorů je nejčastěji tvořen spirálově stočeným tenkým platinovým drátkem. Tento drátek je zataven do skleněného tělíska (obrázek 12). Toto tělísko se obvykle schovává do kovové trubičky (schránky). Známý teplotní senzor PT100 s touto konstrukcí má odpor platinového drátku definovaný při 0 °C 100  $\Omega$ .

**Tabulka 2:** Parametry materiálů pro kovové odporové senzory teploty [7].

Materiál	$\alpha \cdot 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]}$	Meze použití [°C]	
Pt	3,85 - 3,93	-200	850
Ni	6,17 - 6,70	-60	200
Cu	4,26 - 4,33	-50	150

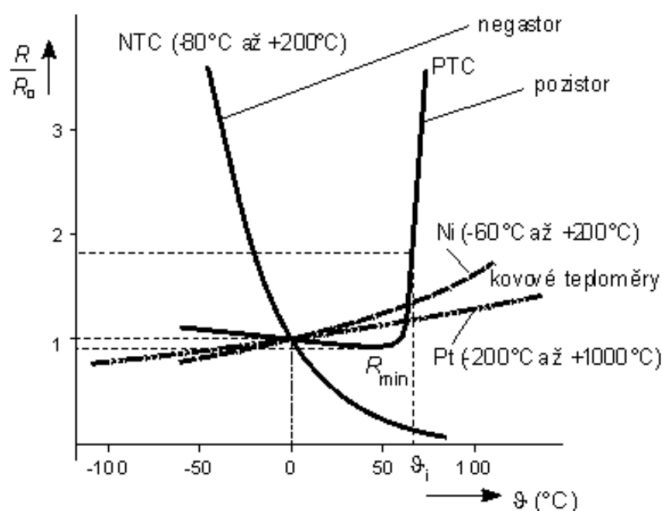


**Obrázek 12:** Platinový odporový senzor teploty [8].

Polovodičové odporové senzory teploty známe jako NTC-termistory, (negastor), PTC-termistory (pozistor) a monokrystalické senzory. Ze zkratky NTC („Negative Temperature Coefficient“) je známé, že u NTC-termistoru je závislost odporu na teplotě nelineární a odpor s teplotou klesá. Tato závislost lze popsat vztahem:

$$R = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (1.3.8)$$

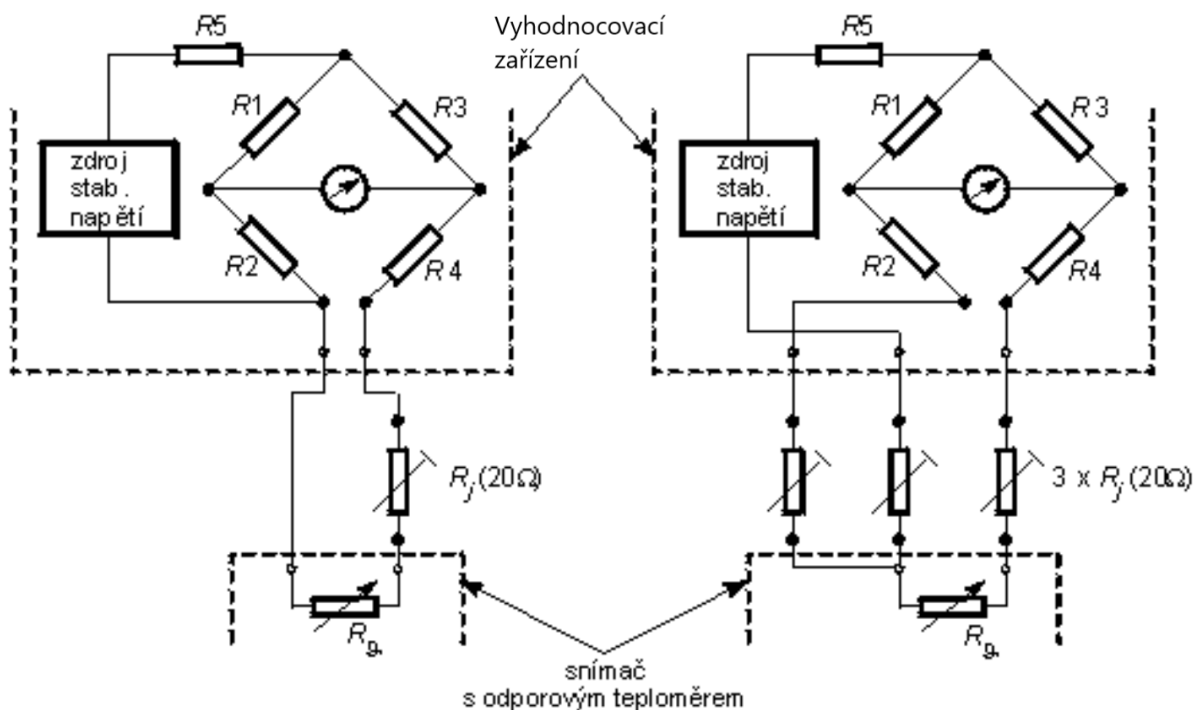
kde  $R$  je odpor při teplotě  $T$ ,  $R_0$  odpor termistoru při kalibrační teplotě  $T_0$  a  $B$  je materiálová konstanta. Termistory jsou citlivé a díky tomu umožňují měřit rychlé teplotní změny. PTC-termistor („Positive Temperature Coefficient“) má kladný teplotní součinitel odporu. Elektrický odpor s teplotou mírně klesá a poté prudce roste. Na obrázku 13 jsou zobrazeny závislosti odporu na teplotě odporových senzorů teploty [7].



**Obrázek 13:** Závislost odporu na teplotě odporových senzorů [7].

Na vyhodnocování signálu z odporových senzorů teploty používáme speciální vyhodnocovací obvody. Vyhodnocovací obvody používáme s dodržováním těchto požadavků [7]:

- minimalizace proudu procházejícího senzorem,
- minimalizace odporů přívodů senzoru,
- analogová, nebo číslicová linearizace,
- unifikace analogového, nebo číslicového výstupu.



**Obrázek 14:** Wheatstoneův můstek jako vyhodnocovací obvod [7]

Nejpoužívanějším vyhodnocovacím obvodem je Wheatstoneův můstek. Na obrázku 14 jsou zobrazeny dvě různé zapojení Wheatstonova můstku. Vlevo je zapojení dvou vodičové, kde je připojený odporový senzor teploty  $R_s$  a oba připojovací vodiče do jedné větve odporového můstku. Pokud se změní odpor senzoru můstek se rozváží a změna indikuje měřicí ústrojí zapojené diagonálně. Odpor vedení mezi senzorem a vyhodnocovacím obvodem, by měl být vždy nastaven na stejnou hodnotu bez ohledu na délku vedení. K tomuto nastavení nám slouží justiční odpor  $R_j$ , kterým lze donastavit celkový odpor vedení na  $20 \Omega$ . Dvou vodičové zapojení se používá právě kvůli eliminaci odporu přívodů pouze na krátké vzdálenosti mezi senzorem a vyhodnocovacím obvodem. Pro použití dlouhé vzdálenosti a menší teplotní rozsahy volíme zapojení tří vodičové, které můžeme vidět vpravo na obrázku 14. U tohoto zapojení je snímač teploty a jeden vodič s justičním odporem  $R_j$  zapojen do jedné větve můstku a druhý vodič s justičním odporem  $R_j$  do druhé větve. Třetí vodič je v napájecí větvi a napájecí bod je posunut až k senzoru teploty. Rušení se tedy navzájem kompenzuje v sousedních větvích [7].

## 1.4 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér (dále označován  $\mu\text{C}$ ) je kompaktní integrovaný obvod vytvořený k řízení operací ve vestavěných systémech. Typický  $\mu\text{C}$  obsahuje: procesor, paměť a vstupní a výstupní periferie (I/O) na jednom čipu. V různých literaturách jej můžeme vidět jako embedded kontrolér, nebo například MCU („Microcontroller unit“). Dnes jej používáme ve většině elektronických operacích jako jsou například: robotika, medicínské přístroje, rádiové přijímače a vysílače a další [9].

### 1.4.1 Jak funguje mikrokontrolér

Každý  $\mu\text{C}$  je vestavěn uvnitř nějakého systému pro řízení jednotných funkcí v zařízení. Funkce řídí na základě přijatých dat z I/O periférií, které zpracovává použití mikroprocesoru (dále označován  $\mu\text{P}$ ). Přijatá dočasná data si  $\mu\text{C}$  ukládá do datové paměti, kde k nim má  $\mu\text{P}$  přístup a používá instrukce uložené v programové paměti pro dešifrování a zpracovávání přijatých dat. Po zpracování přijatých dat využívá I/O periferie pro komunikace a provedení navazujících akcí. Většinou využití  $\mu\text{C}$  v zařízeních nezůstává pouze u jednoho, ale využívá více  $\mu\text{C}$ , které se sebou navzájem komunikují a jsou tak schopny plně obsluhovat několik akcí najednou [9].

### 1.4.2 Části mikrokontroléru

- Procesor
  - Považujeme jej za „mozek“ zařízení. Zpracovává a reaguje na různé instrukce, které řídí funkce  $\mu\text{C}$ . Umožňuje základní logické, aritmetické a I/O operace.
- Paměť
  - Používá se k ukládání dat, které procesor přijímá a používá k reagování instrukcí ke kterým je naprogramován.  $\mu\text{C}$  má dva druhy paměti:
    - \* programová paměť, která ukládá dlouhodobé informace o instrukcích, které procesor má zpracovávat;
    - \* datová paměť, která slouží pro uchovávání krátkodobých dat během provádění příkazů.
- I/O periferie
  - Vstupní a výstupní periferie představují rozhraní pro procesor. Vstupní porty přijímají a posílají informace procesoru ve formě binárních dat. Procesor přijatá data zpracuje a odešle informace na výstupní periferie, které provádějí úlohy mimo  $\mu\text{C}$ .
- Analogově digitální převodník (ADP)
  - Obvod, který převádí analogové signály na digitální data. Velice využívané pro zpracovávání signálů ze senzorů.

- Digitálně analogový převodník (DAP)
  - Funguje naopak než ADP. Slouží ke komunikaci odcházejících digitálních signálů z procesoru s externími analogovými komponenty.
- Systémová sběrnice
  - Služí k propojení  $\mu\text{C}$  s ostatními komponenty [10].

### 1.4.3 Aplikace mikrokontrolérů

Dnes se i život bez využití  $\mu\text{C}$  nedokážeme prakticky představit. S  $\mu\text{C}$  se většina lidí potká už při probuzení díky digitálnímu budíku, nebo mobilnímu telefonu. Moderní zabezpečovací bezpečnostní systémy jsou konstruovány s využitím  $\mu\text{C}$  například pro zpracovávání biometrických údajů potřebných pro potvrzení přístupu, nebo naopak k uzamknutí. Pomocí  $\mu\text{C}$  a internetu věcí (IoT) můžeme vyvíjet aplikace, kde můžeme řídit, či ovládat jejich periferie, nebo měřící prvky řízené aplikace na relativně neomezenou vzdálenost. S využitím ADP a DAP můžeme zpracovávat pomocí  $\mu\text{C}$  radiové signály a tím i komunikovat mezi zemí a vesmírnými projekty. Z toho plyne, že  $\mu\text{C}$  dnes využíváme v takové šíři od inteligentní domácnosti až po vesmírné projekty.

### 1.4.4 STM32

Mikrokontroléry STM32 jsou výkonné, 32-bitové, nízkopříkonové a univerzální mikrokontroléry, které jsou oblíbené pro své schopnosti řídit různé aplikace od embedded systémů po IoT a výkonné robotické systémy. Tyto mikrokontroléry jsou navrženy společností STMicroelectronics a jsou založeny na jádru ARM Cortex-M.

Mikrokontroléry STM32 mají širokou škálu periférií, které umožňují řídit různé aplikace. Tyto periferie zahrnují analogově-digitální převodníky (ADC/DAC), digitální vstupy/výstupy (GPIO), komunikační rozhraní (např. USART, SPI, I<sup>2</sup>C), časovače a další funkce. Mikrokontroléry STM32 jsou také vybaveny hardwarovou podporou pro různé typy paměti, jako jsou flash, EEPROM a SRAM.

Programování mikrokontrolérů STM32 se provádí v jazyce C nebo C++. Vývojové prostředí pro programování mikrokontrolérů STM32 jsou k dispozici zdarma od STMicroelectronics. Tyto vývojové prostředí obsahují sadu nástrojů pro vývoj, kompilaci a ladění programů pro mikrokontroléry STM32.

## 1.5 Elektromotor

Elektromotor je elektromechanické zařízení, které převádí elektrickou energii na energii mechanickou. Princip elektromotoru je založen na principu magnetu a elektromagnetického pole. Elektromotory se dělí zpravidla na dva typy a to na stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrné motory fungují na stejnosměrné napětí a střídavé motory na napětí střídavé.

### 1.5.1 Stejnoseměrný motor

Stejnoseměrný (DC) motor je motor, který převádí stejnosměrný proud na mechanickou energii. Fungují na principu Lorenzova zákona který říká: „síla působící na vodič, je závislá na indukci v místě vodiče“, kde síla je Lorenzova síla. Stejnoseměrné motory se dělí na několik typů: sériové DC motory, DC motory s permanentními magnety, krokové, nebo bezkartáčové BLDC motory [11].

### 1.5.2 Střídavý elektromotor

Střídavý (AC) elektromotor je motor, který převádí střídavý proud na mechanickou sílu pomocí elektromagnetického indukčního jevu. Jeho dvě nejdůležitější části jsou stator a rotor. Stator je nepohyblivá část motoru a rotor je rotační část motoru. Střídavé motory mohou být jednofázové i třífázové [12].

### 1.5.3 Princip činnosti AC motoru

Základní princip činnosti AC motoru závisí na principu magnetismu. Jednoduchý AC motor obsahuje cívku drátu a dva pevné magnety okolo hřídele motoru. Když na cívku připojíme střídavé napětí, cívka se stává elektromagnetem a vytváří okolo sebe magnetické pole. Uvnitř statoru je pevná kovová osa, smyčka vodičů, cívka, klec vyrobená z kovových tyčí a další kovové rotující části schopné vést elektrický proud. U AC motoru posíláme energii na okolní cívky, které tvoří stator. Cívky jsou napájené v párech, v sekvencích a produkují magnetické pole, které se otáčejí kolem vnější strany motoru [12].

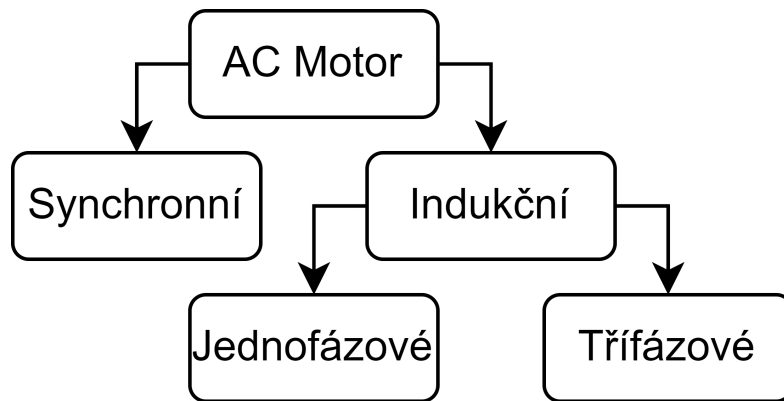
Rotor suspenduje uvnitř magnetické pole. Magnetické pole se v důsledku otáčení stále mění, takže podle zákona elektromagnetismu magnetické pole vytváří uvnitř rotoru elektrický proud. Je-li vodičem prstenec, nebo drát, tak proud kolem něj protéká ve smyčce. Pokud je vodičem pouze kus kovu, protékají okolo něj místo toho vířivé proudy. Indukovaný proud vytváří vlastní magnetické pole a podle dalšího zákona elektromagnetismu se otáčením vytváří i točivé magnetické pole. Zjednodušeně řečeno, když magnety na sebe vzájemně působí, hřídel a cívka s dráty se začnou otáčet, což motor uvede do chodu [12].

### 1.5.4 Typy AC motorů

AC motory se dělí na dva typy Synchronní a Indukční motory viz obrázek 15.

Synchronní motor je motor, který konvertuje střídavou elektrickou energii na mechanickou a funguje pouze při synchronní rychlosti. Při napájení synchronního motoru se vytvoří točivé pole, které se snaží táhnout rotor za sebou, ale kvůli setrvačnosti rotoru se nemůže otáčet. Proto nevytváří žádný rozběhový moment. Synchronní motor tedy nemůže být samočinný.

Indukční (asynchronní) motor konvertuje střídavou elektrickou energii v mechanickou pomocí elektromagnetické indukce. Tyto motory se dělí na dva typy a to na jednofázové



**Obrázek 15:** Rozdělení AC motorů.

a třífázové. V indukčním motoru slouží vinutí kotvy i jako vinutí pole. Když se satorové vinutí připojí ke střídavému napájení, tak vzniká ve vzduchové mezeře tok. Tok se otáčí pevnou rychlostí, která se nazývá synchronní rychlost. Tento rotující tok indukuje napětí ve satorovém a rotorovém vinutí. Je-li rotorový obvod uzavřen, proud protéká rotorovým vinutím a reaguje s rotujícím tokem a vytváří točivý moment. V ustáleném stavu se rotor otáčí rychlostí velmi blízkou synchronním otáčkám [12].



## 2 Praktická část

### 2.1 FilterMaster XL

Odsávací a filtrační jednotka FilterMaster XL je zařízení, které v základu bylo schopno pouze odsávat dým v maximální možné míře a v určitém časovém intervalu si očistit filtr. S využitím řídicí desky je u zařízení možno regulovat otáčky motoru a kontrolovat jeho provozní parametry. Provozními parametry je myšlena kontrola teploty zařízení, ucpání filtru a ztráta tlaku na sací hubici.

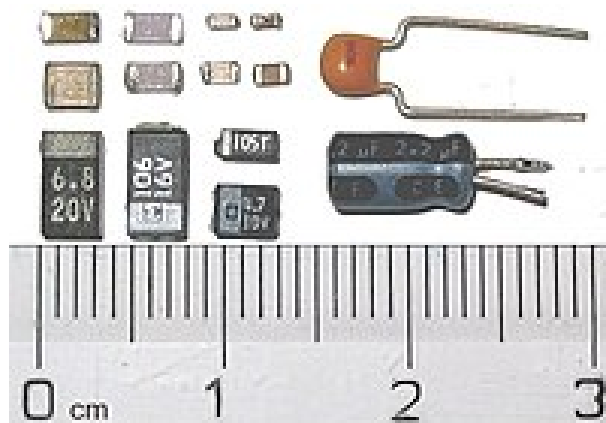
### 2.2 Návrh desky plošných spojů

Hlavní část této práce je návrh a realizace řídicí desky plošných spojů, která bude řídit mobilní odsávání jednotku pro čištění vzduchu firemním názvem FilterMaster XL. Tato řídicí deska bude sbírat data ze 4 senzorů, dvou diferenčních podtlakových a dvou teplotních PT100. Tyto data bude vyhodnocovat mikroprocesor STM32F446RE. Tento procesor jsem zvolil v závislosti na testování použitých komponentů na vývojovém kitu STM32 Nucleo F446RE. Tento vývojový kit obsahuje právě tento procesor. Procesor není v této práci na plno využit a mnoho pinů je nevyužito. Zvolil jsem ho tedy proto, že jsem k procesoru měl přístup na vývojovém kitu a nemusel jsem pořizovat zvlášť nový procesor. Zařízením bude možné řídit otáčky motoru pomocí frekvenčního měniče. Zařízení je také schopno očistit si filtr. Všechny informace bude kontrolní deska schopna zobrazit na 4 místném 7-segmentovém displeji a ovládání je řízeno pomocí inkrementálního rotačního enkodéru. Ovládací deska může být programována dvěma způsoby: přímým naprogramováním pomocí prostřednictvím konektoru USB-C, nebo pomocí ST-Linku s možností debugování programu. Mezi těmito dvěma způsoby programování je možné přepínat.

#### 2.2.1 Deska plošných spojů

Deska plošných spojů (DPS) z anglického „printed circuit board“ (PCB) je významně využívaná deska v elektrotechnice k osazování elektrotechnických součástek, které jsou propojené pomocí tenké vrstvy vodivého materiálu. Nejčastěji se vyrábí sklolaminátové desky s tenkými měděnými vrstvami. DPS mohou být vyráběny v realizacích od 1 až do n-vrstev, počet vrstev DPS se určuje podle možnosti výroby a také podle aplikace využití.

DPS se osazují dvěma druhy součástek, které jsou rozděleny podle jejich montážního provedení. První využívanou skupinou jsou součástky s drátovými vývody THT z anglického „Through - hole technology“. Pro montáž těchto součástek je nutné mít na DPS vyvrtané díry do kterých se vývody součástek zasunují a následně řádně připájí. Tato technologie montáže byla a stále je využívána již od začátků osazování plošných spojů. Dnes je tato technologie převážně nahrazována součástkami pro povrchovou montáž SMD z anglického „Surface mount device“, které spadají do kategorie SMT („Surface mount technology“). Tyto součástky se osazují přímo na vnější strany povrchu DPS. Největší



**Obrázek 16:** SMD (vlevo) a THT (vpravo) součástky [13].

výhodou SMD součástek je jejich velikost. Na obrázku 16 je vidět porovnání velikosti SMD a THT součástek. Jak je vidět SMD součástky jsou o dost menší, to znamená, že při návrhu DPS s využitím SMD součástek dokážeme mít větší hustotu součástek na menší ploše než s využitím THT součástek.

DPS v rámci mé práce má velice přínosné využití z důvodu integrování všech měřících, napěťových a ostatních podobvodů na jednu kompaktní desku, kde bude vše řádně spojeno a připraveno k výrobě a naprogramování. DPS je navrhována v programu KiCad 6.0 a následně vyrobena firmou JLCPCB.

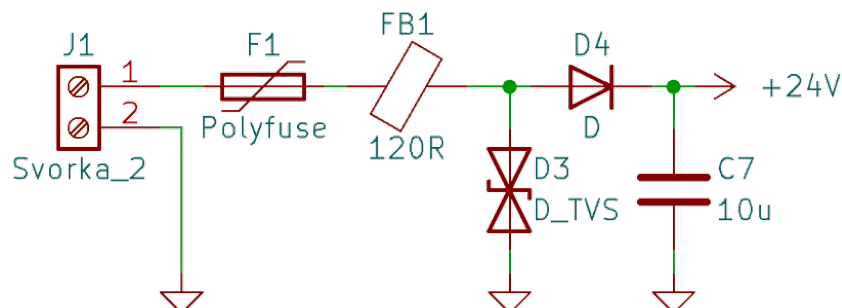
### 2.2.2 Mikrokontroler

Použitý mikroprocesor je od značky ST Microelectronics typu STM32F446RE. Zapojení procesoru je zobrazeno v příloze 1. Kondenzátory připojené okolo procesoru mají několik funkčních významů. Kondenzátory zajišťují stabilizaci napájení, jelikož jsou připojené k vývodům napájení mikroprocesoru a vyhlazují napěťové špičky a odstraňují rušení a šum napájecích tras do procesoru. Tento šum je často způsoben jinými obvody na DPS a může ovlivnit výkon a stabilitu mikroprocesoru. Kondenzátory také mohou sloužit jako zásobníky náboje, například když by mikroprocesor potřeboval krátkodobě dodat větší proud, mohou jej kondenzátory poskytnout.

Připojení analogového napětí k mikroprocesoru se využívá v případě využití měření, nebo zpracování analogových signálů. Analogové signály se přivádí například jako v mém případě na analogově digitální převodníky, které měří napětí na ně přivedené a převádí jej na digitální signál. Toto analogové napětí, aby měření s převodníky bylo přesné, je nutné také filtrovat pomocí filtračních kondenzátorů, které zajistí stabilní napětí nerušené šumem.

### 2.2.3 Napájecí zdroje

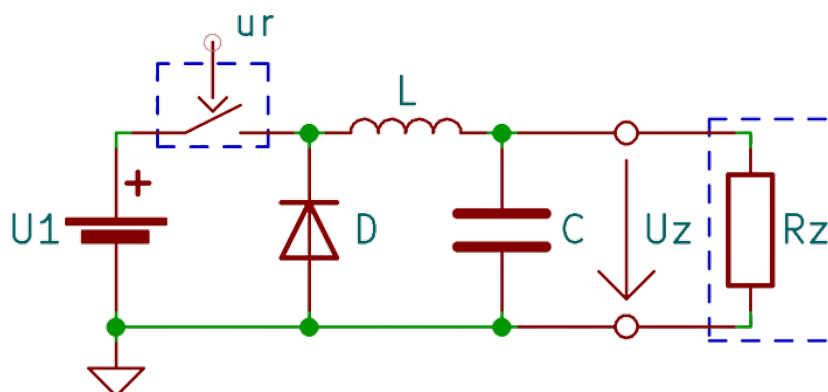
V této práci se využívá jako napájecí zdroj stejnosměrného napětí značky MeanWell s napětím 24 V a proudem 1 A. Napětí z toho zdroje je následně upravováno, aby s ním bylo možné napájet jednotlivé obvody a senzory.



Obrázek 17: Přívod napětí 24 V.

Vstupní napětí 24 V ze zdroje MeanWell je přivedeno na DPS pomocí obvodu na obrázku 17. Obvod je vybaven pojistkou F1, která se při nadproudu přetaví a ochrání zařízení. Feritový korálek FB1 v obvodu potlačuje vysokofrekvenční šum, který je do obvodu vnášen. Obousměrná transilová dioda D3 slouží jako ochrana při elektrostatickém výboji, funguje tak, že když přijde velké elektrostatické napětí, tak se dioda zkratuje a pošle ho proti zemi. Dioda D4 je obsažena v obvodu proto, aby zdroj napětí pouze dodával a nebylo možné, aby se jiné napětí dostávalo ke zdroji a dostávalo se sním do zkratu.

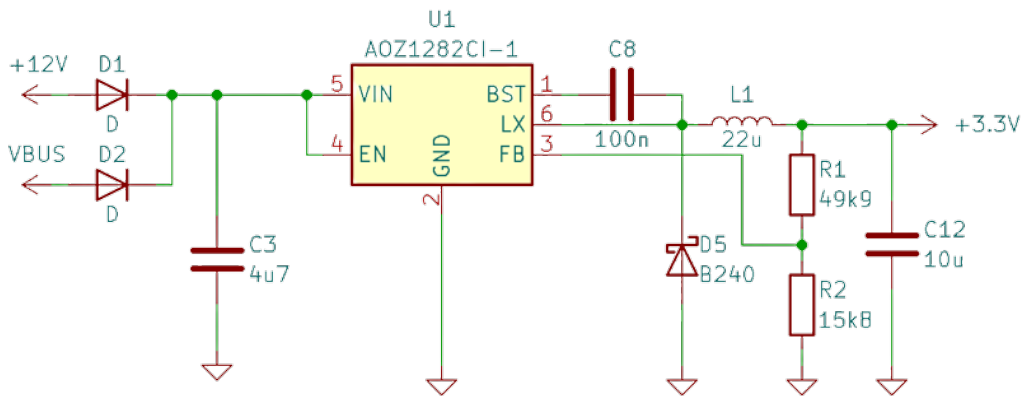
Ze vstupního napětí 24 V je nutné získat 12 V pro napájení senzorů a 3,3V pro napájení procesoru a jiných komponentů. Napětí 24 V snížím využitím spínaného zdroje, který se nazývá Step-Down napěťový měnič. Tyto měniče se označují jako „Buck“. Tyto měniče mají mnohem vyšší účinnost než klasické lineární regulátory. Účinnost Buck měničů často převyšuje 90 %, což umožňuje stabilní dodávku energie pro všechny napájené periferie. Principiální schéma, na kterém lze vysvětlit funkci v ideálním případě je na obrázku 18.



Obrázek 18: Principiální schéma Step-Down měniče.

Step-Down měnič funguje ve dvou stavech ve kterých je spínač spojený, nebo rozpojený.

V počátečním stavu je spínač rozpojený a proud v obvodu je nulový. Když se spínač sepe, v obvodu začne narůstat proud a induktor L v závislosti na měnícím se proudu vytváří na svých svorkách opačné napětí. Úbytek tohoto napětí působí proti napětí zdroje  $U_1$ , a proto snižuje napětí na zátěži. Postupem času se rychlost změny proudu snižuje a napětí na induktoru se snižuje také a tímto se zvyšuje napětí na zátěži. V induktoru se ukládá energie v podobě elektromagnetického pole. Při rozeptnutí spínače při stále měnícím se proudu, vznikne na induktoru L úbytek napětí, to znamená že napětí na zátěži  $U_z$  bude vždy menší, než je napětí vstupní  $U_1$ . Při snížení proudu po rezeptnutí spínače, klesající proud způsobuje na induktoru opačný úbytek napětí než ve stavu zaplém, a induktor L se stává zdrojem proudu. Energie uložená formou elektromagnetického pole podporuje průtok proudu zátěží. Tento proud, který protéká zátěží v rozeptnutém stavu se po přičtení k proudu tekoucímu v zapnutém stavu sečte na proud větší, než je proud vstupní. Toto „zvýšení“ proudu vyrovnává snížení napětí a v ideálním případě zachová výkon dodávaný do zátěže. Při vypnutém stavu induktor L vybíjí svou uloženou energii do zbytku obvodu.



**Obrázek 19:** Reálné zapojení Step-Down měniče.

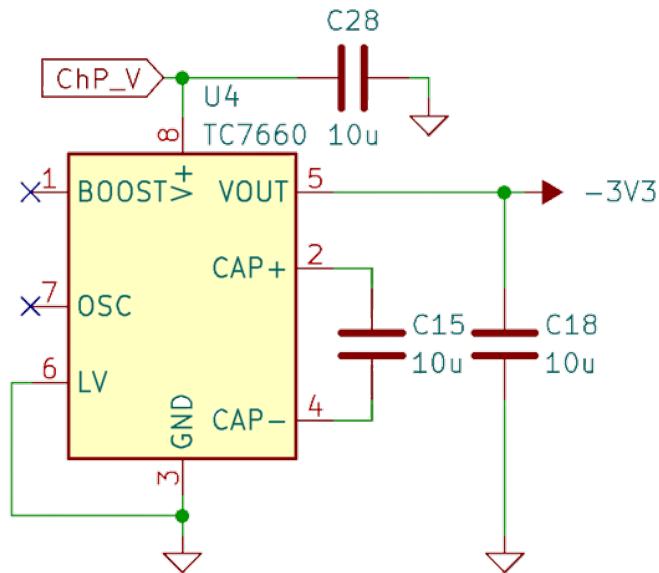
Reálné schéma zapojení Step-Down měniče je na obrázku 19. Mnou využitý Step-Down měnič využívá integrovaný obvod AOZ1282CI-1 v SMD pouzdře SOT23-6. Použil jsem doporučené zapojení z datasheetu produktu [14]. Výstupní napětí jsem nastavil podle tohoto vzorce:

$$U_{VYST} = 0,8 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right). \quad (2.2.1)$$

obrázek 19 ukazuje příklad realizace zdroje napětí 3,3 V, ve schématu je využit i další Step-Down měnič 12 V. Návrh rezistorů pro výstupní napětí je pro 3,3 V roven  $R_1 = 49,9 \text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 15,8 \text{ k}\Omega$ .

Pro napájení operačních zesilovačů (OZ) pomocí symetrického napájení je nutné vyrobit záporné napětí. Záporné napětí -3,3 V je generováno pomocí nábojové pumpy. Nábojová pumpa funguje na principu převodu stejnosměrného napětí na napětí stejnosměrné o velikosti, kterou je daná součástka schopna převést. K převodu nábojová pumpa využívá opakované nabíjení a vybíjení kondenzátorů. Základní nábojová pumpa se skládá ze dvou kondenzátorů a dvou spínačů. Když se jeden spínač otevře, začne

se nabíjet jeden kondenzátor z napájecího napětí. Při sepnutí druhého spínače se elektrony z prvního kondenzátoru přesunou na kondenzátor druhý a tím se na něm objeví dvojnásobné napětí. Tímto způsobem lze pomocí vhodné aplikace zapojení s nábojovou pumpou generovat napětí o uživatelsky definované velikosti. Mnou využívaná nábojová pumpa jakožto generátor záporného napětí je integrovaný obvod TC7660, který je schopen dodávat od -1,5 V do -10 V. Vhodné doporučené zapojení, kde má vstupní napájení je 3,3 V jsem zvolil podle datasheetu [15]. Na obrázku 20 je vidět schéma zapojení zdroje záporného napětí s nábojovou pumpou.

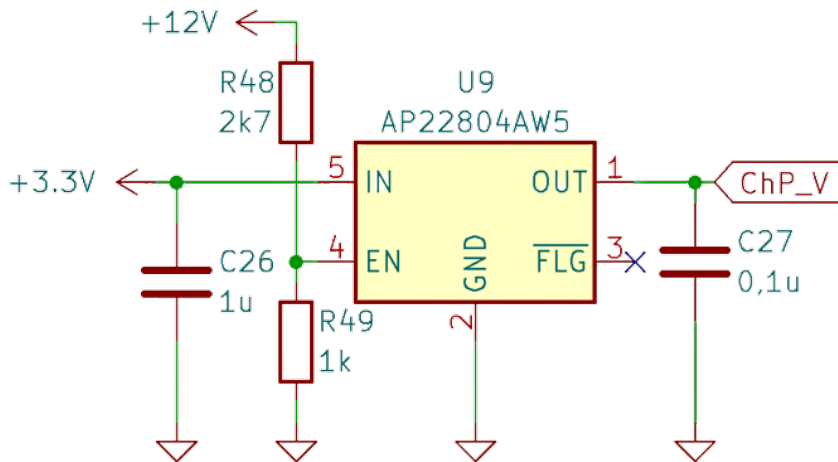


**Obrázek 20:** Zdroj -3,3 V pomocí nábojové pumpy.

Když se programuje mikroprocesor, tak není přítomno napájení 24 V, ale pouze 5 V napájení z USB-C, které pomocí Step-Down měniče konvertováno na 3,3 V, který napájí mikroprocesor, zobrazovací a ovládací periférie. Proto při napájení z USB může nastat, že je generováno napětí -3,3 V, ale není přítomno druhé napájení 12 V pro operační zesilovač, tak by mohla nastat chyba, nebo poškození operačního zesilovače při špatné a neúplné polaritě napájení. Aby k tomuto problému nedošlo, je napájení nábojové pumpy ošetřeno obvodem dostupným z datasheetu [16] viz obrázek 21. Integrovaný obvod, který využívám je AP22802AW5-7 Tento obvod slouží pro zapínání napájení pro další obvody. Vstupní napětí je zde převáděno na výstup na základě přivedení napětí na Enable pin. U tohoto napěťového obvodu je možnost aktivovat Enable pin od -0,3 V do  $U_{VST} + 0,3$  V, v mém případě tedy do 3,6 V. Proto pomocí napěťového děliče, vytvořím podmínku, která nám říká: pokud mám přítomno napájení 24 V ze zdroje MeanWell mohu jej konvertovat na napětí 12 V a tímto napětím zapnout Enable pin a vpustit napájení nábojové pumpy. Velikost rezistorů u napěťového děliče vypočítáme pomocí tohoto vzorce:

$$U_{VYST} = U_{VST} \cdot \frac{R_{49}}{R_{48} + R_{49}}, \quad (2.2.2)$$

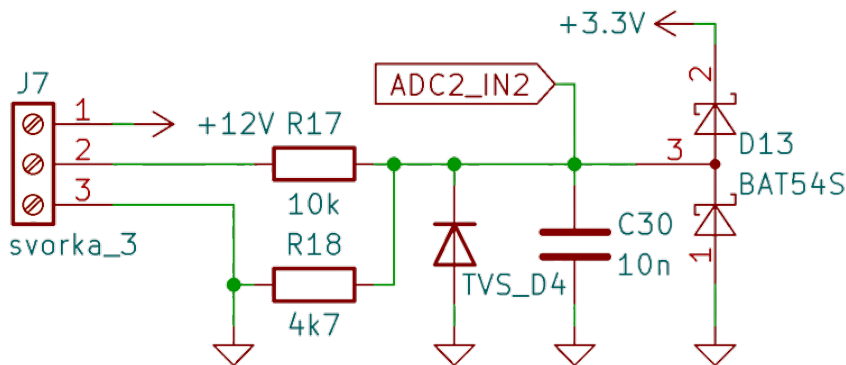
kde  $R_{49}$  volím 1 k $\Omega$ ,  $U_{VST} = 12$  V,  $U_{VYST}$  chci 3,3 V, tak  $R_{48} = 2,7$  k $\Omega$ .



Obrázek 21: Napájení nábojové pumpy.

#### 2.2.4 Vyhodnocovací a měřicí obvody

Výstup z použitých senzorů před vstupem do procesoru musí být vhodně upraven tak, aby poté mohl procesor signál zpracovat. Výstupy ze senzorů jsou připojeny na piny procesoru, kde jsou připojeny analogově-digitální převodníky. Mnou využívaný procesor STM32F446RE má 12-bitové analogově-digitální převodníky, které jsou schopné zpracovat napěťový signál od 0 V do 3,3 V. To znamená, že výstup ze senzorů musí být upraven, tak aby odpovídal tomuto napěťovému rozmezí.



Obrázek 22: Obvod pro úpravu signálu z diferenčního senzoru.

Diferenční podtlakový senzor Huba Control je napájen 12 V a má analogový výstup 0,5 V až 4,5 V. Abych zajistil, že do procesoru ke zpracování signálu půjde pouze napětí mezi 0 V až 3,3 V, využiji jednoduchý napěťový dělič, který mi napětí do této meze sníží. Obvod pro úpravu signálu z diferenčního senzoru je na obrázku 22. Výstup z odporového děliče je ošetřen transilovou diodou TVS\_D4, která má za úkol ochránit vstup procesoru při případném nechtěném statickém napětí. Dvojitá Schottkyho dioda D13 v sériové realizaci slouží jako druhá ochrana analogově-digitálního převodníku na procesoru. Dioda by měla zamezit při příchodu napětí většího, než je 3,3 V k průchodu do převodníku a jeho zničení.

Toto nežádoucí napětí dioda pošle proti zemi. Odvození velikosti rezistorů  $R_{17}$  a  $R_{18}$ :

$$U_{VST_{MAX}} = 4,5 \text{ V}; U_{VYST_{MAX}} = 3,3 \text{ V}, \quad (2.2.3)$$

$$U_{VYST_{MAX}} = U_{VST_{MAX}} \cdot \frac{R_{18}}{R_{17} + R_{18}}, \quad (2.2.4)$$

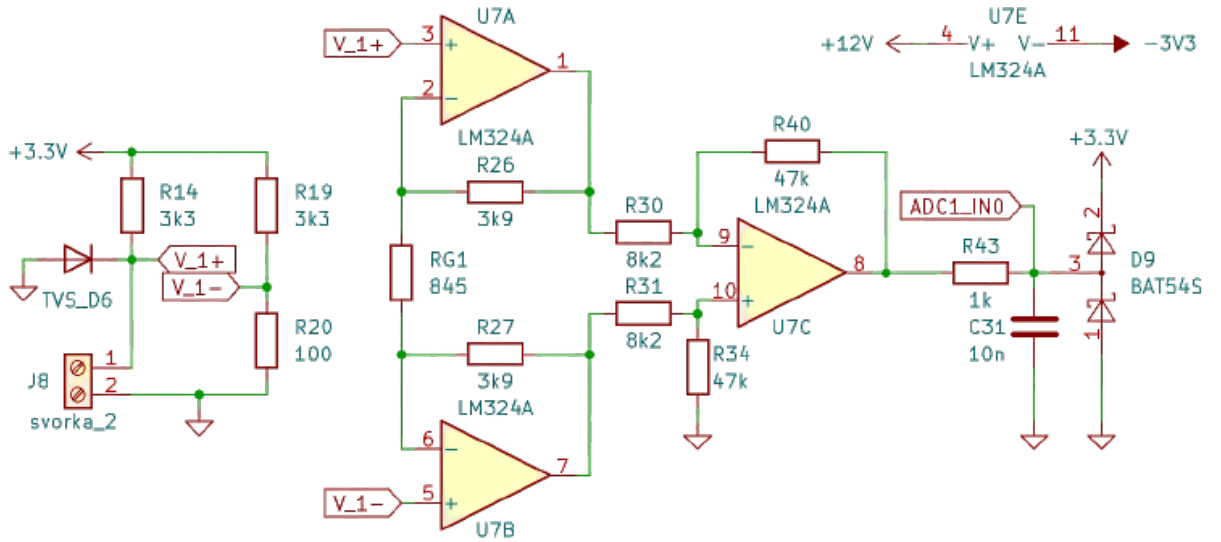
$$R_{17} \cdot U_{VYST_{MAX}} + R_{18} \cdot U_{VYST_{MAX}} = R_{18} \cdot U_{VST_{MAX}}, \quad (2.2.5)$$

$$R_{17} \cdot U_{VYST_{MAX}} = R_{18} \cdot U_{VST_{MAX}} - R_{18} \cdot U_{VYST_{MAX}}, \quad (2.2.6)$$

$$R_{17} \cdot U_{VYST_{MAX}} = R_{18} \cdot (U_{VST_{MAX}} - U_{VYST_{MAX}}), \quad (2.2.7)$$

$$R_{18} = R_{17} \cdot \frac{U_{VYST_{MAX}}}{U_{VST_{MAX}} - U_{VYST_{MAX}}}, \quad (2.2.8)$$

$$\text{pro } R_{17} = 10 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_{18} = 4,7 \text{ k}\Omega. \quad (2.2.9)$$



**Obrázek 23:** Obvod pro měření teploty senzorem PT100.

Obvod pro zpracování signálu z teplotního senzoru PT100 se skládá z Wheatstonova měřícího můstku viz kapitola 1.3.3 a přístrojového operačního zesilovače. Přístrojový zesilovač se skládá z trojice operačních zesilovačů, které v kombinaci zapojení viz obrázek 23. Operační zesilovač je integrovaný obvod se dvěma vstupy, invertujícím a neinvertujícím a jedním výstupem. Do operačního zesilovače se signál přivádí na jeden ze vstupů a druhý se využívá jako referenční. Přístrojový zesilovač je rozdílový zesilovač se zpětnou vazbou. Rozdílovým zesilovačem chápeme zesilovač, který zesiluje rozdíl vstupních napětí (na obrázku 23 vstupy označené  $V_{1+}$  a  $V_{1-}$ ). Pro realizaci na obrázku 23 je využit integrovaný obvod se čtyřmi integrovanými operačními zesilovači v jednom pouzdře. Obvod je opět ošetřen transilovou diodou na ochranu proti statickému výboji a dvojitou Schottkyho diodou pro ochranu analogově-digitální převodníku v procesoru. Podrobné odvození výpočtu součástek přístrojového zesilovače je v [17]. Výpočet odporu  $R_{G1}$ :

$$R_{26} = R_{27} = 3,9 \text{ k}\Omega; R_{30} = R_{31} = 8,2 \text{ k}\Omega; R_{40} = R_{34} = 47 \text{ k}\Omega, \quad (2.2.10)$$

$$R_{G_1} = \frac{2 \cdot R_{26}}{\frac{R_{30} \cdot A_T}{R_{40}} - 1}, \quad (2.2.11)$$

$$A_T = \left( \frac{R_{40}}{R_{30}} \right) \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{R_{26}}{R_{G_1}} \right), \quad (2.2.12)$$

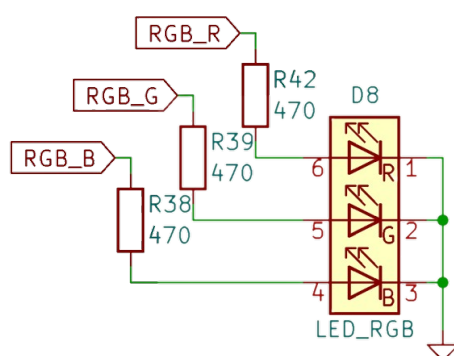
$$R_{G_1} = 845 \Omega. \quad (2.2.13)$$

### 2.2.5 Signalizace a relé

DPS obsahuje dva druhy signalizačních prvků, a to RGB LED (Red Green Blue Light Emmiting Diod) a Piezo houkačku. Relé na DPS slouží ke spuštění procesu čištění filtru.

Zapojení s RGB LED je na obrázku 24. RGB LED zde slouží k možné signalizaci zapnutí zařízení, poruchy zařízení, nebo případné informační signalizace pro uživatele zařízení. Použitá RGB LED FYLS-5050NRGBC je v SMT pouzdře o velikosti 5050 a konstrukčně není zapojena ani se společnou ananodou a ani se společnou katodou. Diody jsou v pouzdře zvlášť a na DPS propojené jako v zapojení se společnou katodou. Velikosti předřadného odporu je vypočtena pomocí vzorce:

$$R_x = \frac{U_N - U_{LED}}{I}. \quad (2.2.14)$$

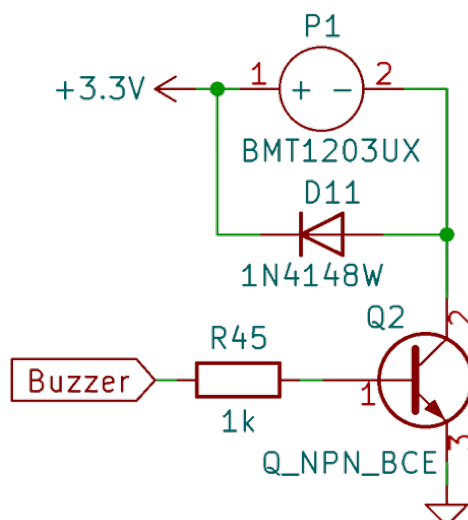


**Obrázek 24:** Zapojení s RGB LED.

Piezo houkačka využitá v této práci je již se zabudovaným budičem, tedy při přivedení napětí na kladný kontakt začne signalizovat s konstantním tónem a není třeba ji již frekvenčně budít do určitého tónu. Zapojení funguje na principu spínání s bipolárním tranzistorem. Houkačka je stále napájena napětím 3,3 V a pomocí procesoru a bipolární tranzistoru je připojena k zemi a začne vydávat tón. Signalizační houkačka slouží k signalizaci poruch, odezvy ovládání a ostatních oznamovacích dílčích úloh. Na obrázku 25 je vidět zapojení ovládání houkačky.

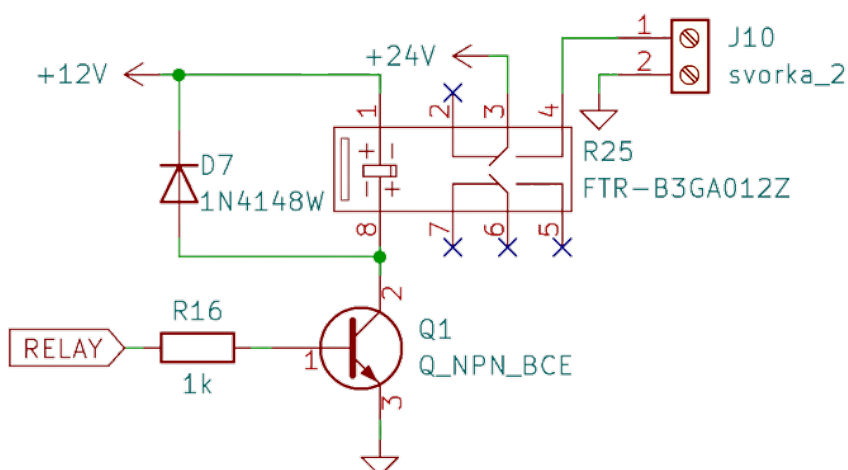
Zařízení ovládané touto řídicí deskou má funkci očištění svého čistícího filtru. Tento proces očištění filtru funguje tak, že součástí filtru je rotační dýza, která se při vpuštění stlačeného vzduchu začne otáčet a postupně ofukovat filtr a tím smetat nečistotu do





**Obrázek 25:** Zapojení s Piezo houkačkou.

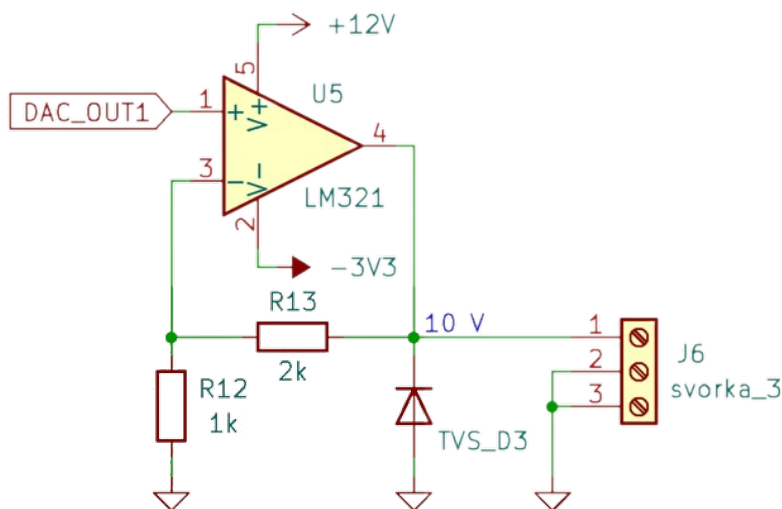
prostoru (koše) na prach (nečistoty). Tento proces se spouští na základě vyhodnocení ucpanosti z informací z podtlakových diferencních senzorů. Zapojení spínání relé je na obrázku 26. Spínání funguje na stejném principu jako u Piezo bzučáku. Budící cívka relé je stále napájena napětím 12 V a pomocí bipolárního tranzistoru je po přivedení signálu z procesoru kontakt uzemněn. Při uzemnění budící cívka přitáhne kladívko spínacího kontaktu a z kontaktu NO (Normally Open - „Normálně otevřeno“) se stane kontakt NC (Normally Close - „Normálně zavřeno“). Tímto sepnutím zařízení pošle 24V signál na magnetický ventil, který vpustí zvuk do rotační dýzy a filtr se očistí. Očišťování filtru není možné provádět stále, po čase se filtr zanesou pevnými nečistotami, který již nelze vzduchem oklepat do koše. Obvykle toto bývá ovlivněno počtem očištění filtru.



**Obrázek 26:** Obvod pro spínání elektromagnetického relé.

### 2.2.6 Frekvenční měnič

Frekvenční měnič je v této práci využit pro řízení a regulaci otáček elektromotoru. K jeho řízení je využito neinvertující zapojení operačního zesilovače s cílem zesílit signál z digitálně-analogového převodníku (DAC) v rozsahu 0-3.3V na 0-10V. Tento výstupní signál pak slouží jako řídicí signál pro frekvenční měnič, kterým se digitálně simuluje pohyb potenciometru, což umožňuje měnit frekvenci a tím i otáčky. Zapojení využívá neinvertující zesilovač s kladnou zpětnou vazbou. Signál z DACu se přivádí na neinvertující vstup operačního zesilovače, zatímco na invertující vstup se připojí zpětnovazební odpor R13. Zpětnovazební obvod tvoří spolu s vstupním odvodem R12 napěťový dělič, který snižuje vstupní napětí na vhodnou úroveň pro operační zesilovač. Výstup operačního zesilovače pak vytváří napěťový signál v rozsahu 0-10V, který slouží jako řídicí signál pro frekvenční měnič. Tento signál umožňuje měnit frekvenci a tím i otáčky, což je využíváno pro řízení elektromotoru. Zapojení je znázorněno na obrázku 27. Zapojení dvojité země je z důvodu využití stíněného kabelu.

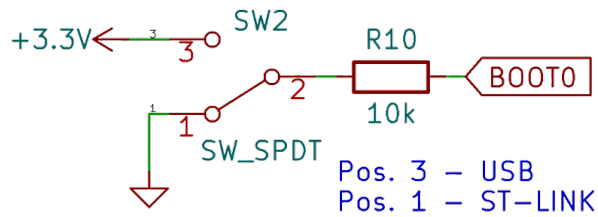


Obrázek 27: Ovládání frekvenčního měniče.

### 2.2.7 ST-Link a USB-C

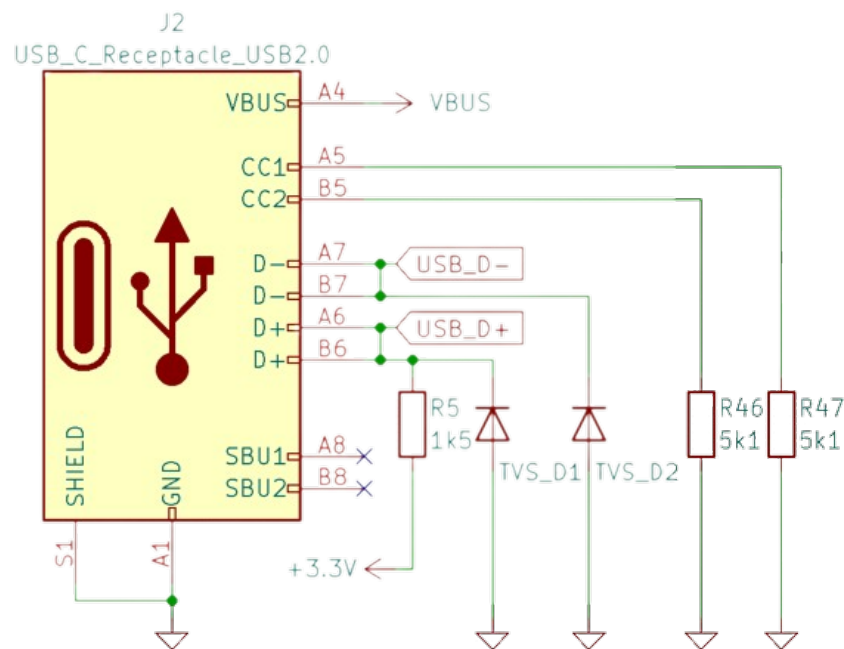
Řídicí deska má možnost programování dvěma způsoby. Jeden způsob je programovat desku pomocí zařízení ST-Link a druhá pomocí datového konektoru USB-C. Mezi těmito možnostmi programování lze přepínat pomocí obvodu na obrázku 28. To znamená, když je přepínač v první poloze, tedy poloze 1 je u procesoru pin Boot připojen na přímo na zem přes odpor o velikosti 10 k $\Omega$ . Když je přepínač v poloze 3, tak je desku možno programovat pomocí ST-Linku.

Programování pomocí konektoru USB-C je zajištěno pomocí dvou datových vodičů Data+ a Data-, které jsou připojené na procesoru do pinů pro datový přenos. Schéma zapojení USB-C jako programovacího konektoru je na obrázku 29. Využití konektoru USB-C je protože konektor USB-C je aktuálně jeden z nejmodernějších konektorů současnosti.



**Obrázek 28:** Přepínač mezi možnostmi programování.

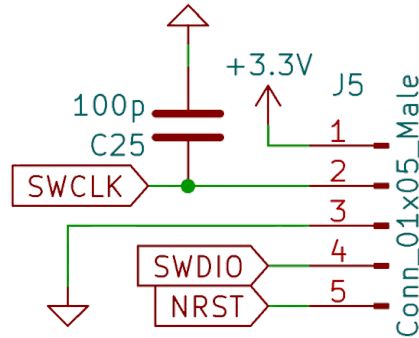
Je to aktuálním nástupcem známých stále využívaných konektorů jako je například Micro USB, nebo Mini USB. Konektor USB-C, také nabízí možnosti přenosu obrazu, ale toto je pro mou aplikaci nevyužito. USB-C má možnost zapojit konektor v obou směrech, proto má všechny piny vyvedeny dvakrát a na DPS se musí propojit. USB-C využité na v mém projektu využívá protokol USB-C 2.0. Výhodou programování pomocí USB-C je taková, že je Control Board z něj i přímo napájen. Při připojení USB-C do počítače přijde do konektoru napětí 5 V (VBUS), které je spínaným zdrojem upraveno na napětí 3.3 V, kterým je následně napájen procesor a periferie potřebné k naprogramování desky. Nevýhodou programování přes USB-C konektor je nepřítomnost možnosti debugování.



**Obrázek 29:** Zapojení USB-C.

ST-Link je programovací zařízení od firmy ST Microelectronics vytvořené pro programování a debugování mikrokontroléru řady STM32. Výhodou tohoto zařízení je možnost přímého debugování zařízení. Jeho nevýhodou je nutnost potřeby dalšího napájení, ST-Link nenapájí programované zařízení. V mém případě při připojení programovacího zařízení ST-Link je nutné připojit i USB-C kabel pro připojení napájení, nebo připojit přívodní napájení 24 V. ST-Link se prodává jako hotové zařízení, nebo si jej lze vyrobit odlomením programmer části z vývojového kitu Nucleo. V mé práci využívám k progra-

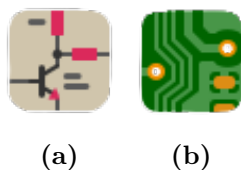
mování právě programátor ST-Link vyrobený z vývojového kitu Nucleo. Propojení ST-Linku s deskou je na obrázku 30. Pin číslo 1 reprezentuje napájení 3,3 V, pin 2 připojuje k mikroprocesoru hodinový signál, který slouží pro synchronizaci datového přenosu. Pin 3 je přímo připojen na zem. Pin 4 slouží k přenosu dat mezi mikrokontrolérem a ST-Linkem. Poslední pin 5 je připojen na reset a při programování restartuje chod zařízení.



**Obrázek 30:** Připojení ST-Linku k mikrokontroléru.

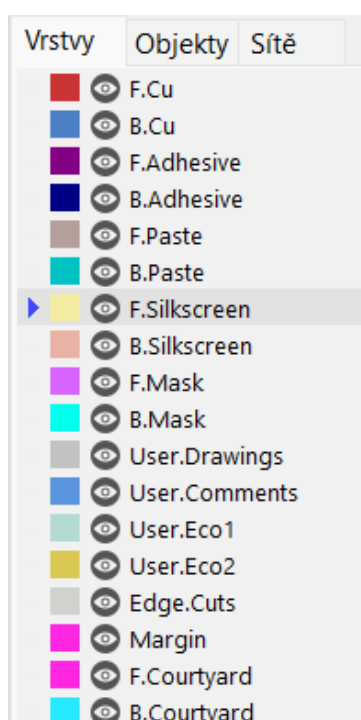
### 2.2.8 Postup návrhu DPS

Návrh DPS v programu KiCad 6.0 jsem začal kreslením schématu v prostředí Editoru schémat (obrázek 31a). Celé schéma se nachází v příloženém CD. V tomto prostředí si lze za pomoci bloků z knihovny symbolů sestavit funkční schéma zapojení. Pokud knihovna neobsahuje součástku, která je potřeba pro návrh, tak ji lze v programu vytvořit a následně využít. Editor schémat umožňuje pojmenovávat jednotlivé spoje. Díky pojmenování jednotlivých spojů je pak při návrhu samotného DPS mnohem snazší se orientovat při spojování jednotlivých součástek a komponentů. Po nakreslení kompletního schématu se jednotlivým komponentům přidělí jejich pouzdro. Proto je nutné znát všechny součástky, které se budou využívat. Výrobce každé součástky udává velikost pouzdra dané součástky. Například při výběru rezistoru, či kondenzátoru si mohou vybrat z celé řady velikostí, který mohou využívat. Například u napěťových stabilizátorů, nebo operačních zesilovačů si velikost pouzdra součástky vybírám podle údaje o součástce v datasheetu daného výrobce. Pokud v knihovně v KiCadu 6.0 není dané pouzdro součástky, kterou chci využívat obsaženo, je možnost si toto pouzdro vyhledat na internetu, nebo si jej v editoru nakreslit. Při kreslení vlastního pouzdra součástky je důležité dbát rozměrů podle datasheetu. Při nedodržení přesných rozměrů součástky, tak reálná součástka nemusí jít připevnit k pájecí ploše.



**Obrázek 31:** (a) Editor schémat, (b) Editor DPS.

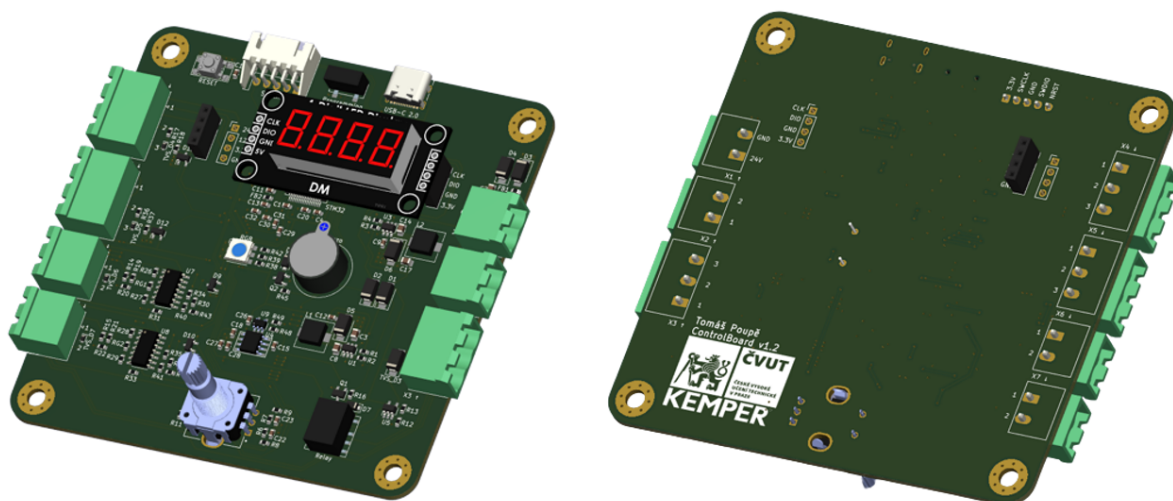
Spojování jednotlivých součástek a komponentů se provádí v prostředí Editor DPS (obrázek 31b). Do tohoto prostředí si daný uživatel naimportuje všechny součástky, které použil v první části, a to v návrhu schémat. Součástky se naimportují s přidělenými pouzdry v seskupení, které navrhl program. Toto uspořádání většinou postaví vedle sebe komponenty stejných velikostí, případně typů. Toto rozprostření komponentů není ideální pro následné propojování jednotlivých komponentů. Pro kompaktní a smysluplné propojování jednotlivých komponentů je dobré si součástky rozdělit podle jednotlivých funkčních bloků navrhnutých v editoru schémat. Při skládání funkčních bloků se součástky seskupují, tak aby mohly být co nejefektivněji propojeny. Před začátkem propojení je nutné vyplnit kolonky týkající se omezení v návrhu DPS předdefinované výrobcem DPS. Můj výrobce je firma JLCPCB, takže z dostupných dat na jejich webových stránkách je nutné vyplnit data viz příloha 2. Na propojování jsem použil šířky spoje 0,3 mm pro signálové spoje a 0,5 mm pro napájecí spoje.



**Obrázek 32:** Vrstvy v editoru DPS.

Na obrázku 32 je vidět tabulku pro možnost využití vrstev se kterými se následně pracuje. Při zakládání projektu jsem si zvolil, že DPS budu realizovat na dvou vrstvách mědi z toho jedna (spodní vrstva) bude vrstva zemnicí, na které bude po celém DPS propojená zem. Velikost DPS jsem zvolil  $10 \times 10$  cm. Mojí cílem není mít co nejmenší DPS, ale aby byl co nejkompaktnější pro následné využívání. Pomocí vrstvy (viz obrázek 32) Edge.Cuts jsem nakreslil čtverec  $10 \times 10$  cm, který symbolizuje okraje budoucího DPS. Rohy DPS jsem pomocí nástroje zaoblil v závislosti na montážních dířích pro šrouby (M4). Začal jsem rozmisťováním konektorů pro připojení napájení, měřících a ovládacích periférií. Tyto konektory jsou umístěny po levé a pravé straně. Konektory mají přes DPS přesah, aby se do nich mohl vsunout protikus ke kterému se montují vodiče pro připojení. Na pravé straně konektor X1 slouží k připojení napájení DPS zdroj 24 V, konektor X2

slouží k připojení spínače, který spustí očištění filtru v zařízení, poslední konektor na pravé straně X3 slouží k připojení frekvenčního měniče, který je využívám k regulaci otáček motoru. Na levé straně jsou konektory X4, X5, X6, X7, které slouží k připojení senzorů. Programovací konektory USB-C a ST-Link jsou pro dobrý přístup umístěny na vrchní straně DPS, včetně posuvného dvoustavového přepínače, který umožňuje přepínání mezi možnostmi programování mikroprocesoru. Následně po umístění konektorů jsem rozmístil pospojované funkční bloky. Rotační enkodér pro ovládání jsem umístil na spodní stranu DPS a konektory pro připojení čtyřmístného 7-segmentového displeje do horní části. Piezo houkačku pro signalizaci a RGB LED jsem umístil do středu DPS. Bloky pro zpracování měřeného signálu jsou umístěné vždy u konektorů daného senzoru z důvodu okamžité úpravy signálu, aby mohl být zpracován v mikroprocesoru. Ostatní bloky jako jsou napájecí zdroje jsou rozmístěny tak, aby se mohl jejich výstup pohodlně rozvést po celém DPS. Z programu KiCad lze exportovat digitální 3D model navrhnuté DPS. Na obrázku 33 je vyexportovaný 3D model DPS hotové řídicí desky.



Obrázek 33: 3D model DPS řídicí desky.

### 2.2.9 Výroba DPS

Výroba desek plošných spojů je složitý proces, který zahrnuje několik kroků a použití speciálních nástrojů a technologií. V současné době existuje několik firem, které nabízejí služby výroby desek plošných spojů, jako je například firma JLCPCB.

Po dokončení návrhu desky je nutné vytvořit soubor s rozšířením Gerber a další soubory nezbytné pro výrobu, jako například soubor pro vrtání otvorů. Soubory potřebné pro výrobu desky se následně odesílají firmě JLCPCB. Firma umožňuje nahrání souborů přímo na své webové stránky a nabízí možnost volby různých parametrů pro výrobu desky. Mezi tyto parametry patří například velikost desky, počet vrstev, tloušťka mědi a další. Poté, co jsou soubory nahrány a parametry nastaveny, začíná samotná výroba desky. Proces začíná výrobou desek pomocí fotografického procesu. Na desky se poté nanáší měděná vrstva, která se následně chemicky odstraňuje tam, kde není potřeba pro

vedení spojů. Po dokončení výroby se deska očisťuje a kontroluje, zda jsou na ní všechny spoje v pořádku. Pokud je vše v pořádku, deska se odesílá zákazníkovi.

Export souborů je důležitou součástí celého procesu výroby desky plošných spojů. Pro úspěšnou výrobu je důležité správně nastavit parametry a vytvořit správné soubory pro výrobu. Proto je nutné si předem ověřit, zda jsou soubory v pořádku a odpovídají požadavkům firmy, která provádí výrobu (příloha 2). V případě nesprávně nastavených parametrů nebo chybějících souborů by mohlo dojít k výrobním chybám a nekvalitním deskám. Export souborů pro výrobu desek plošných spojů zahrnuje vytvoření souborů v požadovaném formátu. Mezi nejčastěji používané formáty patří Gerber, Excellon, nebo například NC Drill. Tyto soubory obsahují informace o vedení spojů, výřezy desky a další potřebné informace pro výrobu. Při exportu souborů je důležité mít k dispozici aktuální verzi softwaru pro tvorbu desek plošných spojů, který obsahuje správné formáty pro export souborů a umožňuje nastavení požadovaných parametrů.

## 2.3 Programování

Tato bakalářská práce je programována v programovacím jazyce C ve vývojovém prostředí od firmy ST Microelectronics (STM), které se nazývá STM32CubeIDE. Toto prostředí je přímo připravené na programování procesorů a vývojových kitů od firmy STM. Základním nastavením je zvolení správného procesoru. V mém případě se jedná o procesor STM32-F446RE. Celý zdrojový kód je na přiloženém CD.

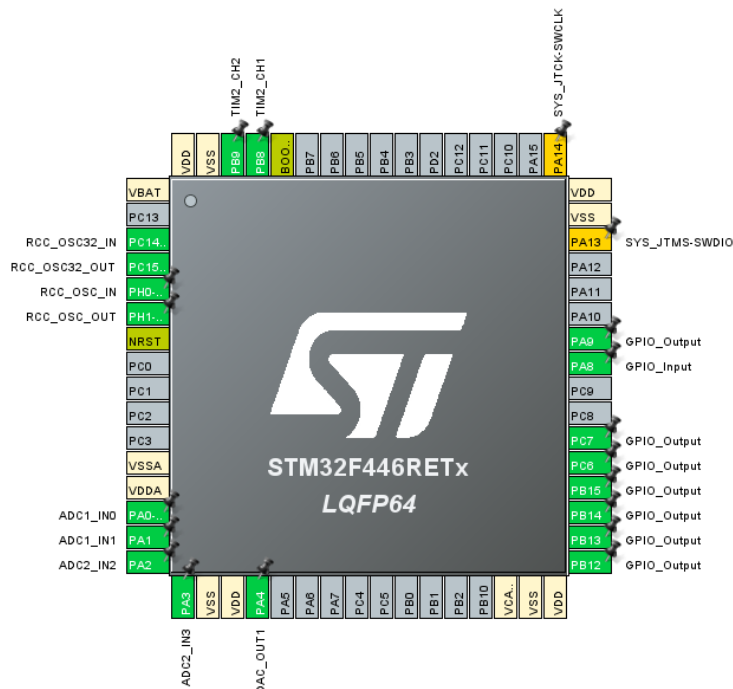
Pro programování je možné nastavit si buď čistý projekt, kde si uživatel píše celý kód od začátku sám, nebo si zvolit STM32Cube projekt, který disponuje možností využití .ioc prostředím, kde si lze nastavit a nakonfigurovat použité piny vybraného procesoru. V tomto prostředí, je také možné podrobně konfigurovat takt procesoru i takt řízení připojených periférií. V tomto prostředí je vyobrazen programovaný procesor se zvýrazněnými piny. Na tyto piny je možné kliknout a vybrat si jejich funkci (například ADC převodník, nebo vstup s výstupem). Tyto vybrané položky si lze také zaklikat v postraním Menu, kde je možné i podrobně donastavit různé parametry těchto pinů. Prostředí s volením pinů na procesoru je na obrázku 34.

Po nastavení a navolení pinů, které budou využívány při programování je na základě jejich nastavení předvygenerován kód, který piny inicializuje a definuje jejich základní konfiguraci pro následné využití v programu.

V mém programu běží hlavní Loop smyčka, které neustále měří parametry zařízení viz obrázek 35. Tato smyčka také kontroluje zda při běhu nenastala nějaká chyba (Error). Dále je na obrázku 35 zobrazeno, jak funguje uživatelské rozhraní (User Interface). V dalších kapitolách bude vysvětlena funkce jednotlivých dílčích sekcí kódu s popisem principu činnosti.

### 2.3.1 Měření teploty a tlaku

Měření teplot a tlaků je zpracováváno v procesoru na pinech 14, 15, 16 a 17, tedy na převodníku ADC 1 kanálech 1 a 2 a na převodníku ADC 2 kanálech 2 a 3. Pro získání



Obrázek 34: Využité piny procesoru.

informace z ADC pro následné zpracování je nutné programově vybrat kanál daného ADC ze kterého budeme data číst. Ukázkou výběru kanálu lze vidět v Kódu 1. Na řádce 2 je vidět volba kanálu a další řádky slouží pro další konfiguraci vybraného kanálu jako je například počet vzorků, v případě Kódu 1 je vybráno odečítání 28 vzorků v jedné čtecí periodě.

#### Kód 1: Výběr kanálu ADC.

```

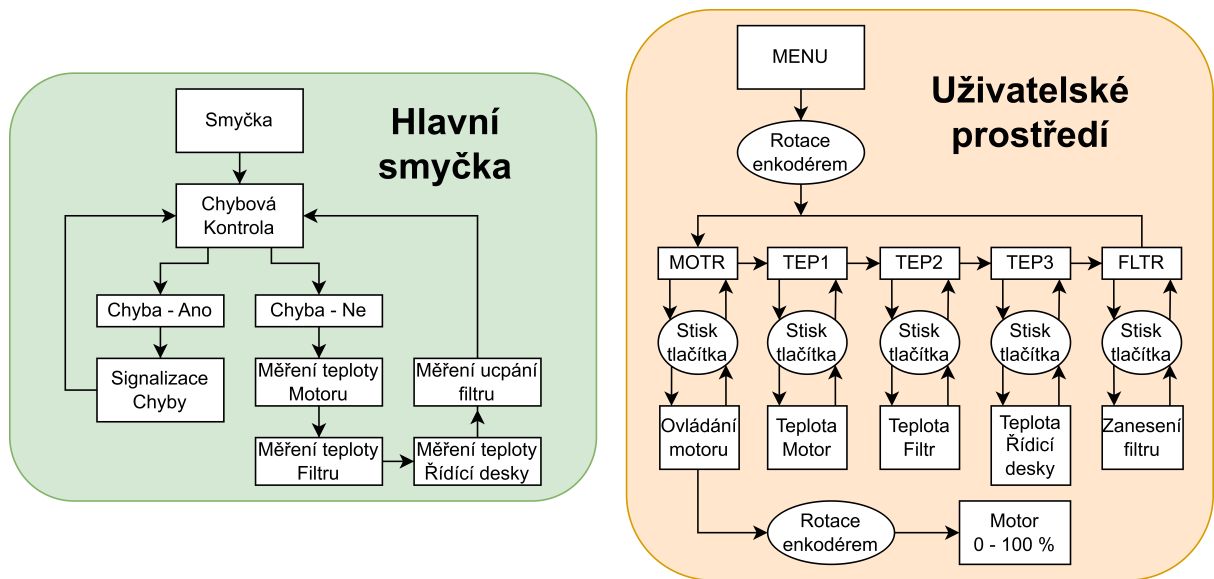
1  ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};
2  sConfig.Channel = ADC_CHANNEL1;
3  sConfig.Rank = 1;
4  sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_28CYCLES;
5  if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)
6  {
7      Error_Handler();
8  }

```

Procesor má ADC převodníky 12-bitové. To znamená: ADC převodník převádí analogovou napěťovou hodnotu 0 až 3,3 V na digitální hodnotu 0 až 4096. maximální digitální hodnotu 4096 získáme tak, že vypočteme  $2^{12}$ , tedy 2 na počet bitů ADC. Tuto hodnotu (0 až 4096) získáme viz Kód 2. Postup je taký, že si vytvoříme proměnnou *val*, která typu *double* a při začátku je nastavena na 0. Proces načítání funguje tak, že pomocí *for* cyklu, který má délku 1000 cyklů, se načítají hodnoty *val* a postupně se sčítají. Po načtení a sečtení 1000 vzorků se hodnota *val* vydělí 1000. Tímto způsobem získáme průměrnou hodnotu 1000 načtených vzorků.

#### Kód 2: Načítání hodnot z ADC.





Obrázek 35: Vývojový diagram programu.

```

1 double val = 0;
2 for (int i = 0; i < 1000; i++)
3 {
4     HAL_ADC_Start(&hadc1);
5     HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, HAL_MAX_DELAY);
6     val += HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
7 }
8 val /= 1000.0;

```

Pro samotný výpočet teploty je nutné uvědomit si jakým způsobem je teplota měřena. V mém případě se jedná tedy o zapojení senzoru teploty PT100 do Wheatstonova můstku a výstup z něj je zesilován pomocí přístrojového zesilovače. Problematika a nastavení měření pomocí tohoto zapojení v kapitole 2.2.4. V Kódu 3 je vidět postup výpočtu. Nejprve je nutné definovat si proměnné  $V_{adc}$ ,  $R_{pt}$ ,  $T$  typu *double*. Dále si v mém případě je nutné převést hodnotu z ADC, tak aby se s ní dále mohlo lépe pracovat a to tak, že ji odečtu od 4095 a uložím do proměnné  $Ref$ . Tuto hodnotu je nutné si převést na napětí  $V_{adc}$  se kterým se následně počítá odpor  $R_{pt}$ . Když známe jaký odpor má teplotní senzor můžeme vypočítat teplotu  $T$ .

Kód 3: Výpočet teploty.

```

1 double V_adc, R_pt, T;
2 uint16_t Ref;
3 Ref = 4095 - val;
4 V_adc = Ref * (3.3 / 4095);
5 R_pt = V_adc * 14.187 + 92.57;
6 T = ((R_pt - 100) / 0.385);

```

### 2.3.2 Rotační enkodér a displej

Rotační enkodér slouží k ovládání zařízení. Mnou využitý rotační enkodér má zabudované tlačítko, kterou vypomáhá k jednoduchému ovládání zařízení. Zařízení obsahuje displej, který má možnost zobrazení čtyř 7-segmentových číslic. Displej slouží k zobrazení Menu, ve kterém se nachází všechny provozní informace o stavu zařízení a možnost ovládání motoru.

V Kódu 4 je definováno několik makrodefinic, proměnných a pole ukazatelů na funkce, které se využívají pro implementaci menu u mé řídicí desky. Makrodefinice *NUM\_MENU\_ITEMS* a *NUM\_OPEN\_MENU\_ITEMS* definují počet položek v menu a otevřeném menu. Makrodefinice *ENCODER\_STEPS\_PER\_ITEM* určuje počet kroků, které enkodér provede při jednom otočení, přesněji jde o to, že když uživatel otočí enkodérem tak jeden krok enkodéru uloží 4 kroky do časového registru, který je v režimu enkodér. Proměnné *menuFunc* a *openMenuFunc* jsou pole ukazatelů na funkce, které reprezentují akce, které se mají provést po výběru položky v menu a otevřeném menu. Konkrétně jsou zde uvedeny funkce *MOTR*, *TEP1*, *TEP2*, *TEP3*, *FLTR* pro *menuFunc* a funkce *openMOTR*, *openTEP1*, *openTEP2*, *openTEP3*, *openFLTR* pro *openMenuFunc*. Celkově lze tedy říci, že tento úryvek kódu slouží k definování parametrů a funkcí potřebných pro implementaci menu v mikrokontroléru.

**Kód 4:** Definice ovládacího Menu zařízení.

```
1 #define NUMMENUITEMS 5
2 #define NUMOPENMENUITEMS 5
3 #define ENCODER_STEPS_PER_ITEM 4
4 void (*menuFunc [NUMMENUITEMS]) ( void )
5     = {MOTR, TEP1, TEP2, TEP3, FLTR};
6 void (*openMenuFunc [NUMMENUITEMS]) ( void )
7     = {openMOTR, openTEP1, openTEP2, openTEP3, openFLTR};
```

Kód 5 implementuje zpětnovazební mechanismus pro výběr položek v menu pomocí enkodéru. Proměnná *encoderValue* uchovává hodnotu aktuální pozice enkodéru, která je porovnávána s předchozí hodnotou *prevEncoderValue*. Pokud se hodnoty liší, znamená to, že enkodér byl otočen a počet kroků *encoderSteps* je inkrementován, nebo dekrementován podle toho, zda byl enkodér otočen doprava nebo doleva. Následně se kontroluje, zda počet kroků enkodéru odpovídá počtu kroků pro vybrání jedné položky v menu (*ENCODER\_STEPS\_PER\_ITEM*). Pokud ano, vybraná položka *selectedItem* se aktualizuje a *encoderSteps* se resetuje. Pokud byl enkodér otočen doleva, je vybrána předchozí položka v menu. Tento úryvek kódu slouží k implementaci mechanismu pro výběr položek v menu pomocí enkodéru, což umožňuje uživatelům intuitivně a snadno navigovat v menu. Celkově lze tedy říci, že funkce je implementována pro usnadnění interakce s uživatelským rozhraním.

**Kód 5:** Pohyb v Menu pomocí enkodéru.

```
1 int16_t encoderValue = _HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim2);
2 if (encoderValue != prevEncoderValue)
3 {
4     if (encoderValue > prevEncoderValue)
```

```

5     encoderSteps++;
6     else
7         encoderSteps--;
8     if (encoderSteps == ENCODER_STEPS_PER_ITEM)
9     {
10        selectedItem = (selectedItem + 1) % NUM_MENU_ITEMS;
11        encoderSteps = 0;
12    } else if (encoderSteps == -ENCODER_STEPS_PER_ITEM)
13    {
14        selectedItem = (selectedItem + NUM_MENU_ITEMS - 1)
15            % NUM_MENU_ITEMS;
16        encoderSteps = 0;
17    }
18    prevEncoderValue = encoderValue;
19 }

```

V úryvku Kódu 6 je implementován pro ovládání tlačítka v aplikaci. Nejprve se kontroluje, zda bylo tlačítko stisknuto. Pokud ne, program čeká 90 ms pomocí funkce *HAL\_Delay* a opět kontroluje stav tlačítka. Pokud je stále zařízení vypnuté, nic se neděje. Pokud je tlačítko stisknuto, funkce *BZZZ()* vyvolá krátkou zvukovou signalizaci a přepne stav *statePress* na opačnou hodnotu (příznak stisknutí tlačítka). Následně se počet stisknutí tlačítka *countPress* aktualizuje na základě *statePress*. Pokud je *statePress* rovno 1, znamená to, že bylo stisknuto poprvé, a *countPress* se inkrementuje o 1. Pokud je *statePress* rovno 0, znamená to, že bylo stisknuto znovu, a *countPress* se nemění. Tento mechanismus umožňuje provádět mechanismus dvoustavového tlačítka s využitím tlačítka jednoho. Tedy přizpůsobit funkčnost stiskem zapni a dalším stiskem vypni.

**Kód 6:** Detekce stisknutí tlačítka.

```

1  if (!(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA, GPIO_PIN_8) == 1))
2  {
3      HAL_Delay(90);
4      if (!(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA, GPIO_PIN_8) == 1))
5      {
6          BZZZ();
7          statePress = !statePress;
8      }
9  }
10 countPress = (countPress + statePress)%2;

```

Kód 7 implementuje obsluhu události stisknutí tlačítka a výběru položky v menu pomocí enkodéru. Pokud stav proměnné *statePress* je rovna 0, znamená to, že tlačítko nebylo stisknuto a program spouští kód pro výběr položky v menu pomocí enkodéru. Funkce *HAL\_TIM\_Encoder\_Start* spouští enkodér a funkce *menuFunc[selectedItem]()* vyvolá funkci, která náleží vybrané položce v menu. Pokud je stav proměnné *statePress* roven 1, znamená to, že tlačítko bylo stisknuto a program spouští kód pro otevření podmenu. Pokud je vybraná položka v menu na úrovni 0, funkce *do...while* čte stav tlačítka a spouští funkci *openMenuFunc[selectedItem]()* pro otevření podmenu, dokud není tlačítko opět stisknuto. V obou případech se používá funkce *HAL\_Delay* pro přerušení programu a zajištění stabilního výkonu aplikace. Tento úryvek kódu umožňuje uživateli interagovat

s menu pomocí enkodéru a tlačítka v intuitivním způsobem a zajišťuje plynulý a spolehlivý běh aplikace.

**Kód 7:** Mechanismus ovládání otevírání položek v Menu.

```
1  if (statePress == 0)
2  {
3      HAL_TIM_Encoder_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_ALL);
4      HAL_Delay(25);
5      menuFunc[selectedItem]();
6  }
7  else
8  {
9      if (selectedItem > 0)
10     {
11         HAL_TIM_Encoder_Stop(&htim2, TIM_CHANNEL_ALL);
12         HAL_Delay(25);
13         openMenuFunc[selectedItem]();
14     } else
15     {
16         do
17         {
18             HAL_Delay(25);
19             openMenuFunc[selectedItem]();
20         } while (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA, GPIO_PIN_8) == 1);
21     }
22 }
```

Na příloženém CD je kód ovladače LED displeje TM1637 což je čip, který ovládá čtyřmístné 7-segmentové displeje LED. Kód obsahuje nastavení jasu displeje, zobrazení konkrétních čísel nebo znaků na displeji a k aktualizaci displeje novými údaji, nebo konverzi čísla na segmentový kód a konverzi znaku na segmentový kód. Kód definuje piny pro hodinový signál (CLK) a datový vstup/výstup (DIO) čipu TM1637. Dále definuje několik funkcí pro ovládání displeje. Mezi hlavní funkce pro ovládání čipu TM1637 patří *tm1637\_Start()* a *tm1637\_Stop()* pro zahájení a ukončení komunikace s čipem, *tm1637\_ReadACK()* pro čtení potvrzovacího signálu z čipu a *tm1637\_WriteByte()* pro zápis dat do čipu a také funkce zpoždění s názvem *SomeDelay()*. Funkce *tm1637\_SetBrightness* slouží k nastavení jasu displeje a funkce *tm1637\_DisplayUpdate* aktualizuje zobrazení na displeji. Funkce *tm1637\_NumberToSegments* konvertuje čísla na segmentový kód a funkce *tm1637\_CharToSegments* konvertuje znaky na segmentový kód. Celkově tento kód poskytuje pohodlný způsob propojení s čipem TM1637 a ovládání čtyřmístného 7-segmentového LED displeje. Mohl by být také využit v různých aplikacích, jako jsou digitální hodiny nebo jiné projekty založené na displeji.

### 2.3.3 Řízení motoru enkodérem

Ovládání motoru pomocí digitálního analogového převodníku (DAC) s využitím enkodéru je ukázáno v Kódu 8. Na začátku jsou deklarovány proměnné pro ukládání hodnot enkodéru a pro hodnoty DAC. Poté se získá aktuální hodnota enkodéru a vypočítá rozdíl

oproti předchozí hodnotě. Pokud rozdíl není nulový, tak se vypočítá procentuální změna hodnoty enkodéru a uloží do proměnné *dac\_proc*. Pokud se hodnota nachází na nejvyšší, nebo nejnižší úrovni (0% nebo 100%), tak se uloží nová hodnota enkodéru a funkce končí. Pokud se hodnota nachází mezi těmito dvěma úrovněmi, tak se přičte vypočítaná změna do proměnné *dac\_proc*. Poté se ověří, že hodnota *dac\_proc* nevyšla z rozmezí 0 až 100. Pokud ano, tak se nastaví na nejvyšší, nebo nejnižší hodnotu v rozsahu. Nakonec se vypočítá hodnota pro DAC a nastaví se pomocí funkce *HAL\_DAC\_SetValue*. Tato hodnota se také zobrazí na 7-segmentovém displeji pomocí funkce *tm1637\_ShowNumber*. Pokud je rozdíl enkodéru nulový, tak se pouze zobrazí aktuální hodnota *dac\_proc* na displeji. Funkce *HAL\_Delay* zajistí prodlevu 50 ms pro stabilizaci hodnoty.

**Kód 8:** Ovládání otáček motoru enkodérem.

```

1  uint32_t pre_encoder_value = 0;
2  32_t dac_val = 0;
3  32_t dac_proc = 0;
4  2_t encoder_diff = 0;
5  2_t encoder_value = TIM2->CNT;
6  der_diff = encoder_value - pre_encoder_value;
7  encoder_diff != 0) {
8  int32_t proc_diff = (encoder_diff * 25) / 100;
9  if (dac_proc == 0 && proc_diff < 0) {
10     pre_encoder_value = encoder_value;
11     return;
12 } else if (dac_proc == 100 && proc_diff > 0) {
13     pre_encoder_value = encoder_value;
14     return;
15 }
16 dac_proc += proc_diff;
17 if (dac_proc > 100) {
18     dac_proc = 100;
19 } else if (dac_proc < 0) {
20     dac_proc = 0;
21 }
22 dac_val = (uint32_t)((dac_proc / 100.0) * 4095);
23 HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL1, DAC_ALIGN_12B_R, dac_val);
24 tm1637_ShowNumber(dac_proc);
25 pre_encoder_value = encoder_value;
26 se {
27 tm1637_ShowNumber(dac_proc);
28
29 Delay(50);

```

### 2.3.4 Chybové hlášky

Jednou z funkcí řídicí desky je hlášení chyb. Tato funkce umožňuje identifikovat a řešit konkrétní problémy v systému. K tomuto účelu je využíván displej a houkačka s RGB LED, které společně poskytují uživateli vizuální a zvukovou zpětnou vazbu. V případě výskytu chyby se na displeji zobrazí příslušný kód chyby (seznam možných identifikovatelných chyb je v tabulce 3). Teto slouží jako orientační bod při řešení problému

**Tabulka 3:** Chybové hlášky řídicí desky.

Chybová hláška	Význam chyby	Řešení
Err1	Chyba měření teploty motoru (Svorka X6).	Teplotní senzor není připojen, teplotní senzor je rozbitý.
Err2	Teplota motoru přesáhla tolerovatelnou mez.	Vypnout zařízení.
Err3	Chyba měření teploty filtru (Svorka X7).	Teplotní senzor není připojen, teplotní senzor je rozbitý.
Err4	Teplota filtru přesáhla tolerovatelnou mez.	Vypnout zařízení.
Err5	Chyba průtoku vzduchu před filtrem (Svorka X4).	Senzor průtoku není připojen, senzor průtoku je rozbitý.
Err6	Chyba průtoku vzduchu za filtrem (Svorka X5).	Senzor průtoku není připojen, senzor průtoku je rozbitý.
Err7	Filtr již nelze očistit.	Vyměňte filtr, zkontrolujte sací ústrojí za filtrem.
Err8	Malý sací výkon.	Zkontrolujte sací hubici, zkontrolujte sací ústrojí před filtrem

a může být dále zpracován uživatelem nebo technickou podporou. Současně s tím se spustí houkačka, která vydá zvukový signál upozorňující na chybu. Zároveň se blikajícím světlem signalizuje RGB LED, že je nutné provést akci k odstranění chyby. Toto hlášení chyb je důležitou součástí celého systému a umožňuje rychlé a efektivní řešení problémů. Výhodou tohoto způsobu hlášení je rychlá a intuitivní identifikace chyb bez nutnosti rozsáhlého hledání a diagnostiky.

Kód 9 ukazuje primitivní funkci, která se využívá k porovnání skutečné hodnoty (*value*) s předpokládanou hodnotou (*predict*). Pokud skutečná hodnota je menší než předpokládaná hodnota, zavolá se funkce *Error\_Out* s parametrem *err*, pod kterým je identifikována konkrétní chyba. Pokud skutečná hodnota je větší nebo rovna předpokládané hodnotě, funkce *Error\_Out* se zavolá s nulovým parametrem, který značí stav bez žádné chyby, nebo problému. Tato funkce se používá ve funkcích, které sbírají výsledky ze senzorů. Do funkce se pošle parametr, který senzor naměří a porovná se s hodnotou, která je v normě, pokud hodnota ze senzoru nevyhoví očekávané hodnotě, spustí se chybové hlášení, které připadá k dané chybě.

**Kód 9:** Funkce pro nalezení vychýlené hodnoty.

```

1 void Read_Error(uint32_t value, uint32_t predict, int err)
2 {
3     if (value < predict)
4     {
5         Error_Out(err);
6     }
7     else
8         Error_Out(0);
9 }
```

V Kódu 10 je funkce *Error\_Out*, která slouží k signalizaci chyby. Pokud je vstupní parametr *err* roven 0, pak funkce nastaví pin GPIOB13 na hodnotu SET, což způsobí, že zelená LED připojená na tento pin se rozsvítí. V případě, že je vstupní parametr *err* roven 1 (nebo jinému číslu), pak funkce provede následující akce: Nejprve se pomocí funkce *tm1637\_DisplayUpdate* na displeji zobrazí text "ERR1". Poté se spustí cyklus, který se provádí jednou a volá funkci *Alarm*. Tato funkce slouží k vygenerování zvukového a světelného signálu pomocí piezo reproduktoru. Poté se pomocí funkce *HAL\_Delay* zpozdí další provádění programu o 2 sekundy, aby uživatel mohl vidět zprávu na displeji a byla pauza mezi houkáním. Tato část kódu umožňuje tedy signalizaci chyby pomocí LED, zvukového signálu a zprávy na displeji.

#### Kód 10: Signalizace chyby.

```

1 void Error_Out(int err)
2 {
3     if(err == 0)
4         HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_13, SET);
5     else if (err == 1) {
6         tm1637_DisplayUpdate(0, 0, 0, 0);
7         tm1637_DisplayUpdate(tm1637_CharToSegments('E'),
8                               tm1637_CharToSegments('R'),
9                               tm1637_CharToSegments('R'),
10                              tm1637_CharToSegments('1'));
11         for (int var = 0; var < 1; var++) {
12             Alarm();
13         }
14         HAL_Delay(2000);
15     }
16 }

```

## 2.4 Úprava zařízení FilterMaster XL

### 2.4.1 Napájení zařízení

Zařízení je napájeno ze sítě 400 V. Toto napájení je dále využito na napájení motoru a frekvenčního měniče. Z využitím přívodu napětí 400 V, jsem pomocí oddělení jedné fáze a nulového vodiče využil napětí na 230 V, kterým je napájen zdroj MeanWell 24 V. Napájení frekvenčního měniče je napájeno přes stykač, který je spínán přivedením 24 V na jeho budící cívku. Toto opatření zajistí, že frekvenční měnič bude napájen pouze když běží zdroj 24 V, tedy jen když je napájena řídicí deska, která frekvenční měnič ovládá. Spínaný zdroj MeanWell je napájen přes pojistku, pojistka při prudkém nárustu proudu by měla zdroj ochránit. Toto je využito i před napájením řídicí desky.

### 2.4.2 Pneumatický obvod

Zařízení disponuje pneumatickým obvodem, který zajišťuje práci se se strojem. Do stroje je připojen vzduch, který se ukládá do vzdušníku v zařízení vedle filtru. Tento vzduch

je ve vzdušníku ukládám z důvodu potřeby tohoto stlačeného vzduchu na očištění filtru. Očištění filtru je podmíněno měřením průtoku vzduchu před a za filtrem. Toto měření je zajištěno podtlakovými diferenčními senzory tlaku značky Huba Control. V zařízení jsou tyto senzory dva a jsou zapojené tak, že tlak před filtrem je snímám propojením + vstupu prvního senzoru a – vstupu druhého senzoru, tlak za filtrem je připojen na + vstup druhé senzoru. Toto zapojení zajišťuje možnost přesného měření rozdílů tlaku na filtru a i měření úbytku tlaku na sací hadici. Na základě vyhodnocení těchto diferenčních senzorů řídicí deska vyhodnotí procentní ucpanost filtru a při potřebě spustí jeho očištění. Očištění funguje na principu vpuštění stlačeného vzduchu do rotační dýzy, která se nachází vně filtru. Tento vzduch se do dýzy vpustí na určitý čas a roztočí dýzu, která stlačeným vzduchem filtr ofouká a oklepe. Díky této funkci získá filtr delší životnost. Prach a usazené odsáté nečistoty z filtru padají do koše umístěného pod filtrem.

### 2.4.3 Uvedení do chodu

Pro uvedení stroje do chodu s vyrobenou řídicí deskou bylo nutné vytvořit nový přípravek pro rozvod napájení a připojení silové části zařízení. V 2.4.1 napájení zařízení byla pospána problematika napájení zařízení. Toto napájení je nutné kompaktně rozvést v zařízení pro napájení periférií. Pro rozvod síťového napětí do komponentů pro zpracování napětí byli nakresleny držáky pro montáž komponentů do zařízení.

V příloze 3 jsou vyobrazeny montážní díly vymodelované v programu Inventor Professional 2023. Na držák komponentů s držákem pro diferenční senzory tlaku se přišroubuje frekvenční měnič, svorkovnice, stykač, zdroj MeanWell a diferenční senzory. Na tomto díly lze pohodlně všechny díly propojit podle schématu viz příloha 4. Zapojené silnoproudé schéma zabudované ve stroji je vidět na obrázku 36.

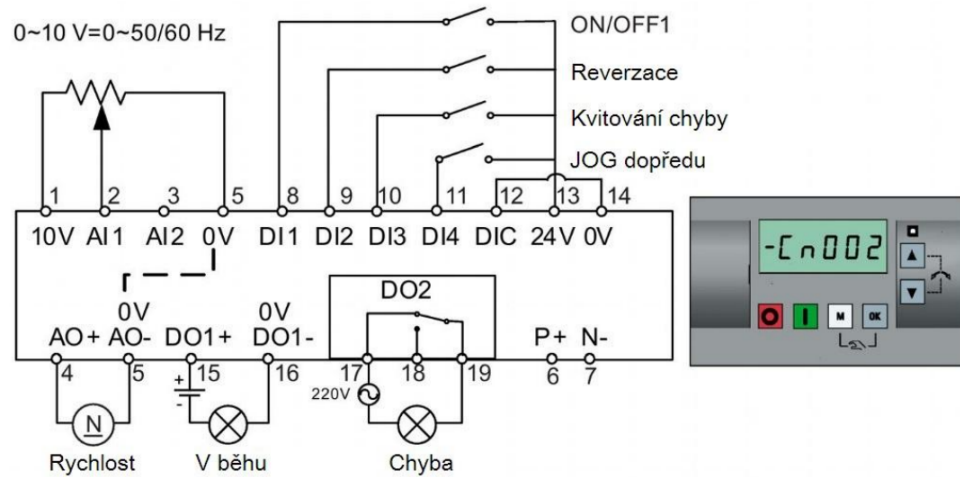


**Obrázek 36:** Silnoproudé zapojení.

Po zapojení podle schématu je nutné zařízení připojit do elektrické sítě a naprogramovat frekvenční měnič. Pro naprogramování frekvenčního měniče je nutné znát parametry motoru a makro zapojení svorek, které bude využíváno. Frekvenční měniče Siemens Sinamics V20 disponují celou řadou funkcí a možností volby maker zapojení ovládacích svorek.



Pro tuto práci jsem zvolil zapojení svorek viz obrázek 37. Toto zapojení svorek umožňuje řízení otáček pomocí potenciometru, který je simulován na řídicí desce. Dále zapojení umožňuje ovládání zapnutí a vypnutí frekvenčního měniče a kontrolu jeho chodu. K frekvenčnímu měniči lze připojit například kontrolky a kontrolovat, tak chybové hlásky, nebo stav zapnutí a vypnutí chodu.



**Obrázek 37:** Zapojení svorek na frekvenčním měniči [18].

Frekvenční měnič se programuje pomocí vestavěných tlačítek, které jsou na obrázku 37. Do měniče se ukládají parametry motoru. Parametry motoru jsou k nalezení na štítku motoru. Motor využit v této práci má parametry následující:

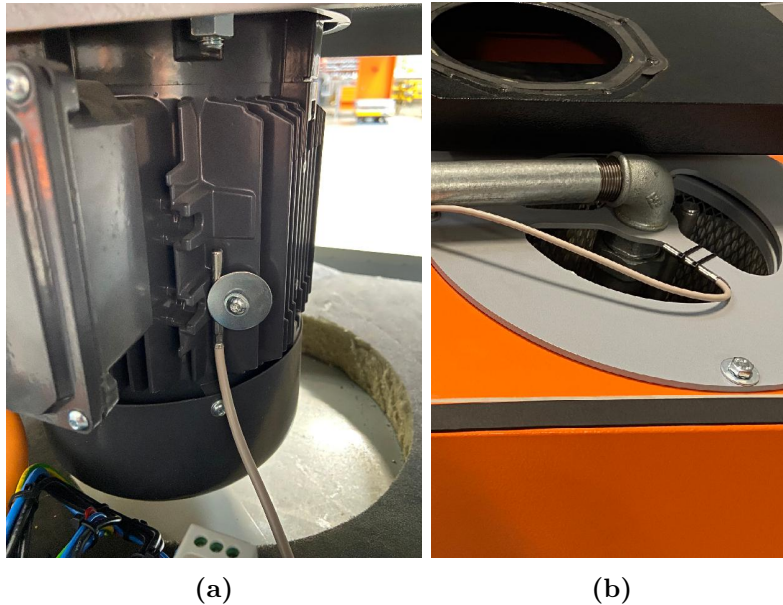
- napětí: 400 V,
- proud: 3,14 A,
- výkon: 1,5 kW,
- účinnost: 86 %,
- frekvence: 50 Hz,
- otáčky: 2895 Rpm.

Každý tento parametr symbolizuje ve frekvenčním měniči jeden krok, který je nutno aktivovat a nastavit na příslušnou hodnotu. Při správném nastavení parametrů motoru je frekvenční měnič schopen motor řídit bez možnosti jeho poškození.

Po naprogramování frekvenčního měniče je nutné odpojit zařízení ze sítě a připojit řídicí desku. Řídicí deska je připevněna k držáku pro řídicí desku, který je vidět v příloze 3. K řídicí desce se připojí napájení, senzory, spuštění očišťování a ovládání frekvenčního měniče. Po připojení všech kabelů se držák řídicí desky přiřubuje k čelnímu panelu zařízení. Čelní panel se zašroubuje na zařízení. Po připojení síťového napětí je zařízení schopno pracovat.

#### 2.4.4 Měřící body

Řídicí deska umožňuje měřit teplotu na třech místech a průtok vzduchu před a za filtrem. Jelikož filtrační zařízení v rámci práce pouze upravují, to znamená, že zařízení je



**Obrázek 38:** (a) Měřící bod teploty na motoru, (b) měřící bod teploty na filtru.

ve stavu původní konstrukce a zapojení, která je firmou Kemper využívána. Všechnu původní elektroniku jsem odstranil a vložil svou viz obrázek 36. Při vytváření zadání práce byli vymyšleny měřící body teploty na motoru (obrázek 38a) a na turbíně. Při úpravě a přidělování senzorů teploty jsem bohužel narazil na chybu a to, že nemohu senzor teploty, který by měl měřit teplotu turbíny upevnit na vhodný bod, aby měření bylo efektivní. Aby se zajistila vhodná poloha měření teploty na turbíně, bylo by nutné navrhnout a vyrobit nový kryt turbíny na který by se měřící bod upevnil. Návrh, výroba, realizace a test krytu by byl, ale pro mou práci časově náročný a nebyl by součástí zadání mé práce.

Abych využil teplotní senzor turbíny, vymyslel jsem nový měřící bod, který bude mít kladný účel v měření provozních parametrů. Tento měřící bod je umístěn za filtrem a měří teplotu vyfukovaného vzduchu. Díky tomuto senzoru je také možné potencionálně odhalit zažehnutí filtru nasátím rozpálené kusu kovu, nebo jiné žhavé zplodiny, která by filtru mohla uškodit. Měřící bod je na obrázku 38b.

## 2.5 Testování

Sestrojené zařízení pro odsávání a filtrování se sací ramenem je v příloze 5. Na zařízení, pro které jsem v rámci této bakalářské práce vytvořil řídicí systém budu testovat provozní teploty, jak moc se zanáší při odsávání filtr a jak se začne očišťovat.

### 2.5.1 Testování na dílně

První testování zařízení probíhá na čisto v dílně, zda zařízení bude mít plynulý chod a bude připraveno jít na test na svařovnu. Pro tento první test jsem přidal do ovládacího

Menu zařízení možnost očistit filtr manuálně pomocí stisknutí tlačítka. Testování na dílně probíhalo ve třech fázích po jedné hodině. První fáze probíhalo s nastavením otáček motoru na 50 %. Každých patnáct minut jsem kontroloval teplotní parametry zařízení. Vnější měřená teplota motoru se celou dobu držela na 21 °C, teplota na filtru byla po celou dobu sání na 50 % 22 °C. Druhá fáze testování měla otáčky motoru nastavené na 75 %. první kontrola vnější teploty motoru byla naměřena 21 °C a držela se až do konce testu druhé fáze. Teplota na filtru se v průběhu této fáze měnila, začala na 21 °C a na konci testu byla naměřena 24 °C. Při vyšších otáčkách je zvyšující teplota na filtru způsobena vyšším prouděním vzduchu. Při druhé fázi jsem manuálně testoval čištění filtru. Při stisknutí v Menu zařízení položky *CLN* („clean“, čištění) se na jednu vteřinu vpustí všech stlačený vzduch ze vzdušníku. Proces očištění filtru, nijak teplotu na filtru neovlivnil. Třetí fáze měla otáčky motoru na maximální možný výkon a to na 100 %. Teplota motoru po celou dobu měření byla 22 °C. Teplota na filtru se v průběhu měření zvyšovala. Na konci měření byla teplota na filtru 26 °C a zkouška očišťování teplotu opět neovlivnila. Zařízení bylo celkově testováno okolo pěti hodin v nepřetržitém chodu v dílně. Během testu jsem nenarazil na žádný problém s přehříváním, nebo chodem zařízení.

Druhá test na dílně byl v rámci testování výpočtu zanešení filtru. Tento test probíhal za pomoci ucpávání filtru igelitovým pytlem, který byl postupně nasouván na filtr. Test probíhal s nastavením motoru na 100% otáčky, při těchto otáčkách je zatížení filtru největší a měřené hodnoty nejpřesnější. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 4. Graf těchto naměřených hodnot je sekci 2.6 v grafu 1. Z naměřených výsledků je zřejmé, že měření tlaků před a za filtrem, má díky filtru a měřicímu vzduchovému ústrojí jistou ztrátu, kterou nelze při malém znečištění filtru změřit. Poměrně přesnou hodnotu v % s přesností  $\pm 5$  % získáváme od 25 % zanešení filtru. Očištění filtru nastává při hodnotě zanesení 70 %. Přibližná aproximace pomocí polynomu 4. stupně, kterou jsou naměřené body proloženy je dána rovnicí:

$$y = -2,61 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0172x + 27. \quad (2.5.1)$$

**Tabulka 4:** Test ucpání filtru pytle, při 100% otáčkách motoru.

Ucpání filtru pytle [%]	0	25	50	75	100
Naměřená hodnota řídící deskou [%]	27	29	54	78	100

### 2.5.2 Test na svařovně

Test na svařovně probíhal při 100% otáčkách a byly měřeny všechny parametry stroje, tedy vnější teplota motoru, teplota filtru, teplota řídicí desky a zanesení filtru. Test trval celkem tři hodiny, tedy 180 minut a naměřené hodnoty jsou v tabulce 5, tyto hodnoty jsou vyneseny v grafu 2 v sekci 2.6. Hodnota ucpání filtru byla zaznamenávána každých pět minut po dobu třech hodin. Po dvou hodinách měření bylo zjištěno, že filtr se při

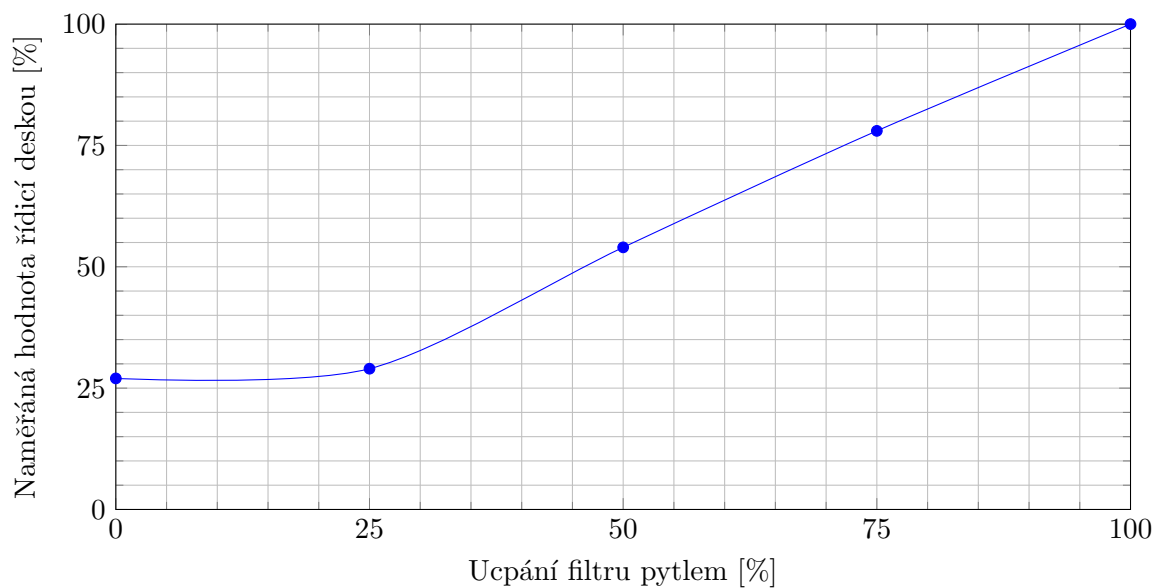
odsávání ucpává pomalu, proto jsem po dvou hodinách manuálně očistil filtr a tím jej oklepal. V grafu 2 je vidět pád hodnoty zanesení filtru po manuálním očištění filtru. Přibližná aproximace pomocí polynomu 4. stupně, kterou jsou naměřené body proložené je dána rovnicí:

$$y = -7,7 \cdot 10^{-7}x^4 + 1,8 \cdot 10^{-4}x^3 - 1,6 \cdot 10^{-2}x^2 + 3,9x + 27. \quad (2.5.2)$$

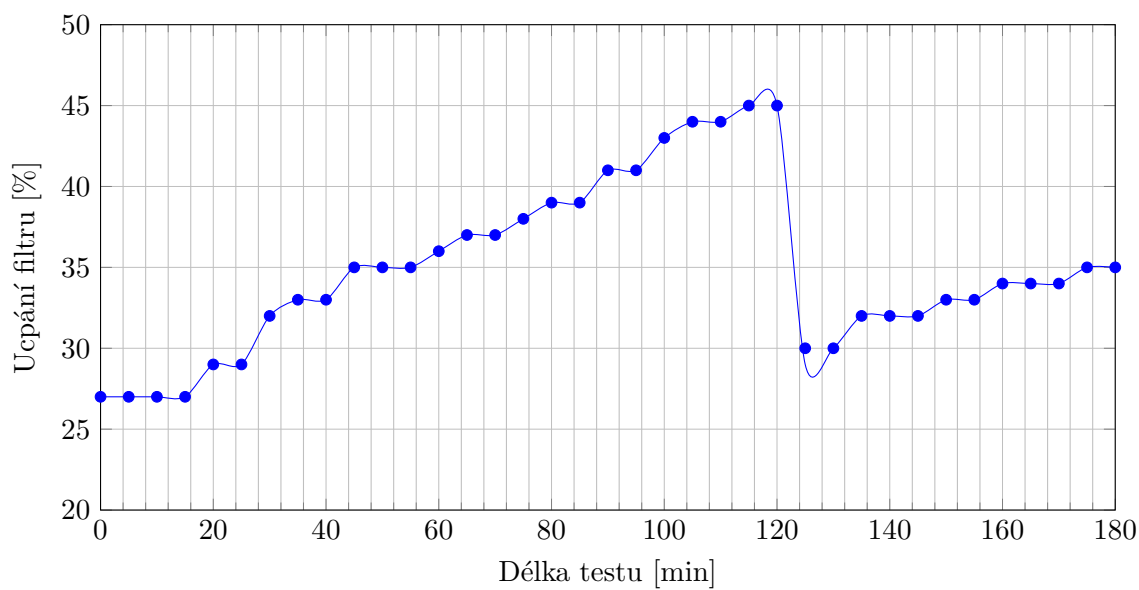
**Tabulka 5:** Měření zanesení filtru při odsávání při sváření v závislosti na čase.

<b>Délka testu [min]</b>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Zanesení filtru [%]</b>	27	27	27	29	29	32	33	33	35	35	35	35	36
<b>Délka testu [min]</b>	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
<b>Zanesení filtru [%]</b>	37	37	38	39	39	41	41	43	44	44	45	45	30
<b>Délka testu [min]</b>	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	-	-
<b>Zanesení filtru [%]</b>	30	32	32	32	33	33	34	34	34	35	35	-	-

## 2.6 Grafy



**Graf 1:** Test ucpání filtru pytlek, při 100% otáčkách motoru (proloženo polynorem 4. stupně).



**Graf 2:** Měření zanesení filtru při odsávání při sváření v závislosti na čase (proloženo polynorem 4. stupně).

## Závěr

Bakalářská práce se zaměřila na návrh a realizaci zařízení pro odsávání a filtraci vzduchu v uzavřeném prostoru při sváření, broušení, nebo pájení. Cílem bylo vytvořit řídicí jednotku, která by mohla sbírat a vyhodnocovat data ze senzorů a vhodným způsobem informovat obsluhu o stavu znečištění filtru a nebezpečí přehřátí motoru a turbíny.

V první fázi práce byla provedena rešerše problematiky odsávání nebezpečných par vznikajících při sváření, broušení a pájení se způsoby řešení této problematiky. Na základě získaných poznatků bylo navrženo obvodové zapojení a vybrány vhodné součástky pro realizaci řídicí jednotky. Důležitou součástí řídicí jednotky jsou senzory, které měří aktuální stav znečištění filtru a teplotu motoru s filtrem, aby bylo možné předejít jejich přehřátí. Teplota turbíny bohužel nemohla být měřena z důvodu nedokonalé konstrukce zařízení, proto toto měření bylo nahrazeno měřením teploty na filtru.

V další fázi práce byla navržena a vyrobena deska plošných spojů, na které je realizován řídicí systém. Všechny součástky a komponenty byly na desku plošných spojů připájeny. Po připájení komponentů byla na desce plošných spojů vyzkoušena základní funkčnost a poté byla naprogramována. Řídicí deska byla do zařízení nainstalována s ostatními komponenty zajišťujícími chod zařízení pomocí vyrobených přípravků.

V poslední fázi práce bylo zařízení otestováno. Z provedených testů vyplynulo, že zařízení je schopné účinně odsávat a filtrovat nebezpečné plyny a částice. Výsledky potvrdily, že zařízení plně splňuje požadované parametry a může být úspěšně použito v praxi.

V průběhu vývoje byl kladen důraz na ergonomii a praktičnost zařízení. Bylo zohledněno, že zařízení bude využíváno v průmyslových podmínkách, kde je důležité snadné ovládání a údržba. Z tohoto důvodu byla řídicí jednotka navržena s přehledným a jednoduchým uživatelským rozhraním, které umožňuje snadnou konfiguraci a sledování stavu zařízení.

Celkově lze tedy konstatovat, že cíle této bakalářské práce byly úspěšně naplněny a vytvořené zařízení přináší výrazné přínosy pro bezpečnost a zdraví pracovníků v prostředí s nebezpečnými plyny a částicemi. Výsledek této práce bude prezentován u vývojového oddělení firmy Kemper s možností zařazení do výroby a oživení, tak zaběhlého zařízení s novým řízením.

## Reference

- [1] Kemper, “Extraction device for welding smoke filtermaster xl w3 ifa 2 m arm.” [Online]. Available: [https://www.kemper.eu/en/products/filter-master-xl-fume-extraction-filter-unit\\_kp18071](https://www.kemper.eu/en/products/filter-master-xl-fume-extraction-filter-unit_kp18071)
- [2] —, “Odsávání svářečského dýmu: Produkty - zákony - předpisy.” [Online]. Available: <https://www.kemper.eu/cs/co-je-dobre-vedet/svarovaci-dym-obecne/svarecky-dym-co-toje>
- [3] —, “Odsávání svářečského dýmu: Produkty - zákony - předpisy.” [Online]. Available: <https://www.kemper.eu/cs/co-je-dobre-vedet/svarovaci-dym-obecne/slozeni-svarovaciho-dymu>
- [4] —, “Odsávání svářečského dýmu: Produkty - zákony - předpisy.” [Online]. Available: <https://www.kemper.eu/cs/co-je-dobre-vedet/svarovaci-dym-obecne/jak-velke-jsou-jednotlive-castice-ve-svarovacim-dymu>
- [5] “Pitot-static tube: A device to measure air flow speed,” 2022. [Online]. Available: <https://www.jove.com/v/10452/pitot-static-tube-a-device-to-measure-air-flow-speed>
- [6] M. Kmínek and K. Kadlec, “Měření tlaku,” Praha, 2005. [Online]. Available: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/f4/f4k42-tlak.htm>
- [7] —, “Měření teploty,” Praha, 2005. [Online]. Available: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [8] M. Husák, “Teplotní senzory - jednotky,” 2021. [Online]. Available: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/334169/mod\\_resource/content/2/09\\_Teplotni\\_senzory\\_SEE\\_2021.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/334169/mod_resource/content/2/09_Teplotni_senzory_SEE_2021.pdf)
- [9] B. Lutkevich, “What is a microcontroller and how does it work?” Nov 2019. [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcontroller>
- [10] T. Teplý, “A2b34mik: Mikrokontroléry,” 2022. [Online]. Available: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/369531/mod\\_resource/content/1/01\\_MIK.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/369531/mod_resource/content/1/01_MIK.pdf)
- [11] Macfos, “Working principle of dc motor,” Jan 2021. [Online]. Available: <https://robu.in/working-principle-of-dc-motor/>
- [12] P. Dixit and Macfos, “Working principle of ac motor,” Feb 2021. [Online]. Available: <https://robu.in/working-principle-of-ac-motor/>
- [13] Zámek Kuřim, Jirka, “Výroba plošných spojů,” [https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/16\\_Sada\\_Elektrotechnicka\\_schemata\\_a\\_plosne\\_spoje/VY\\_32\\_INOVACE\\_16\\_13\\_Vyroba\\_plosnych\\_spoju.pdf](https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/16_Sada_Elektrotechnicka_schemata_a_plosne_spoje/VY_32_INOVACE_16_13_Vyroba_plosnych_spoju.pdf), Červen 2013.

- [14] Alpha and O. Semiconductor, “Aoz1282ci-1-dte datasheet,” [Online]. Available: <https://www.tme.eu/Document/78ed953370ed76b4f51e17a664c89e89/AOZ1282CI-1-DTE.pdf>, 2017, accessed: Apr. 7, 2023.
- [15] I. Analog Devices, “Adxl345 datasheet,” [Online]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/1669497.pdf>, 2013, accessed: Apr. 7, 2023.
- [16] Diodes Incorporated, “AP22802 Load Switch,” Datasheet, 2019. [Online]. Available: <https://www.tme.eu/Document/b237793b2d6a6077d03c95aa5d7482fa/AP22802.pdf>
- [17] J. Hospodka, “Elektronické obvody, interaktivní studijní materiál,” Apr 2023. [Online]. Available: <https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf>
- [18] M. Vojtěch, “Návod k použití sinamics v20,” 2017. [Online]. Available: [https://www.ciz-regulace.cz/fotky930/fotov/\\_ps\\_1965navod-k-pouziti\\_v20\\_2015-03\\_cz.pdf](https://www.ciz-regulace.cz/fotky930/fotov/_ps_1965navod-k-pouziti_v20_2015-03_cz.pdf)
- [19] Avishorp, “Avishorp/tm1637: Arduino library for tm1637 (led driver),” Dec 2020. [Online]. Available: <https://github.com/avishorp/TM1637>



## Seznam obrázků

1	Odsávací a filtrační zařízení firmy Kemper [1]. . . . .	2
2	(a) Filtr, (b) Rotanční dýza. . . . .	3
3	Schéma Pitotovy statické trubice [5]. . . . .	5
4	Senzor tlaku s polovodičovými tenzometry [6]. . . . .	6
5	Piezoelektrický jev u krystalu křemene [6]. . . . .	7
6	Piezoelektrického snímače tlaku [6]. . . . .	8
7	Jednoduchý kapacitní senzor [6]. . . . .	9
8	Diferenční kapacitní senzor [6]. . . . .	10
9	Tenzní senzor teploty [7]. . . . .	11
10	Kapalinový senzor teploty [7]. . . . .	11
11	Schéma obvodu termočlánku [7]. . . . .	12
12	Platinový odporový senzor teploty [8]. . . . .	13
13	Závislost odporu na teplotě odporových senzorů [7]. . . . .	13
14	Wheatstoneův můstek jako vyhodnocovací obvod [7] . . . . .	14
15	Rozdělení AC motorů. . . . .	18
16	SMD (vlevo) a THT (vpravo) součástky [13]. . . . .	20
17	Přívod napětí 24 V. . . . .	21
18	Principiální schéma Step-Down měniče. . . . .	21
19	Reálné zapojení Step-Down měniče. . . . .	22
20	Zdroj -3,3 V pomocí nábojové pumpy. . . . .	23
21	Napájení nábojové pumpy. . . . .	24
22	Obvod pro úpravu signálu z diferenčního senzoru. . . . .	24
23	Obvod pro měření teploty senzorem PT100. . . . .	25
24	Zapojení s RGB LED. . . . .	26
25	Zapojení s Piezo houkačkou. . . . .	27
26	Obvod pro spínání elektromagnetického relé. . . . .	27
27	Ovládání frekvenčního měniče. . . . .	28
28	Přepínač mezi možnostmi programování. . . . .	29

29	Zapojení USB–C. . . . .	29
30	Připojení ST–Linku k mikrokontroléru. . . . .	30
31	(a) Editor schémat, (b) Editor DPS. . . . .	30
32	Vrstvy v editoru DPS. . . . .	31
33	3D model DPS řídicí desky. . . . .	32
34	Využití piny procesoru. . . . .	34
35	Vývojový diagram programu. . . . .	35
36	Silnoproudé zapojení. . . . .	42
37	Zapojení svorek na frekvenčním měniči [18]. . . . .	43
38	(a) Měřící bod teploty na motoru, (b) měřící bod teploty na filtru. . . . .	44

## Seznam tabulek

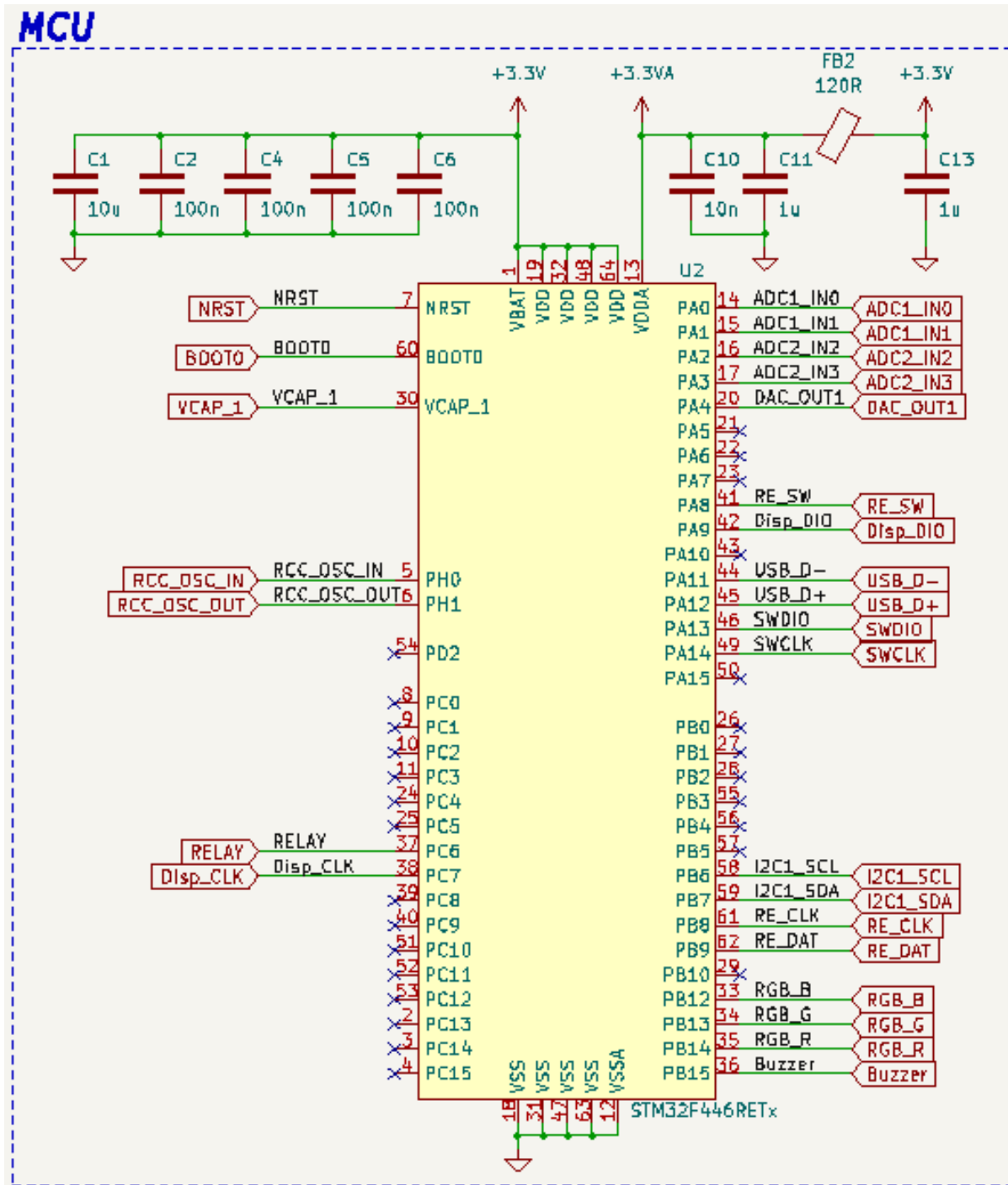
1	Senzory teploty [7]. . . . .	9
2	Parametry materiálů pro kovové odporové senzory teploty [7]. . . . .	13
3	Chybové hlášky řídicí desky. . . . .	40
4	Test ucpání filtru pytle, při 100% otáčkách motoru. . . . .	45
5	Měření zanesení filtru při odsávání při sváření v závislosti na čase. . . . .	46

## Seznam grafů

1	Test ucpání filtru pytle, při 100% otáčkách motoru (proloženo polynome- mem 4. stupně). . . . .	47
2	Měření zanesení filtru při odsávání při sváření v závislosti na čase (proloženo polynome- mem 4. stupně). . . . .	47

# Přílohy

## 1 Příloha – Zapojení procesoru



## 2 Příloha – Výrobní omezení JLCPCB

Nastavení desky

Struktura desky

- Vrstvy editoru desky
- Fyzická struktura
- Povrchová úprava desky
- Pájecí maska/pasta

Text & grafika

- Výchozí
- Textové proměnné

Pravidla návrhu

- Omezení**
- Předdefinované velikosti
- Třídy spojů
- Vlastní pravidla
- Závažnost porušení

Povolené funkce

- Povolit slepé/vnořené prokovy
- Povolit mikro prokov (uVia)

Oblouk/kružnice aproximovaná po segmentech

Max povolená odchylka: 0,005 mm

Poznámka: Vypĺívání zón může být pomalé, když je < 0,005 mm.

Strategie plnění zóny

- Mimic legacy behavior
- Smoothed polygons (best performance)
- Allow fillets outside zone outline

Ladění délký

- Include stackup height in track length calculations

Měď

- Min. izolační mezera: 0,2 mm
- Minimální šířka spoje: 0,2 mm
- Minimální šířka prstence: 0,13 mm
- Minimální průměr prokovu: 0,7 mm
- Izolační mezera díry a mědi: 0,25 mm
- Izolační mezera hrany a mědi: 0 mm

Díry

- Minimální průchozí díra: 0,3 mm
- Izolační mezera mezi dírami: 0,254 mm

mikro Prokovy

- Minimální průměr mikroprokov: 0,2 mm
- Minimální díra uProkovu: 0,1 mm

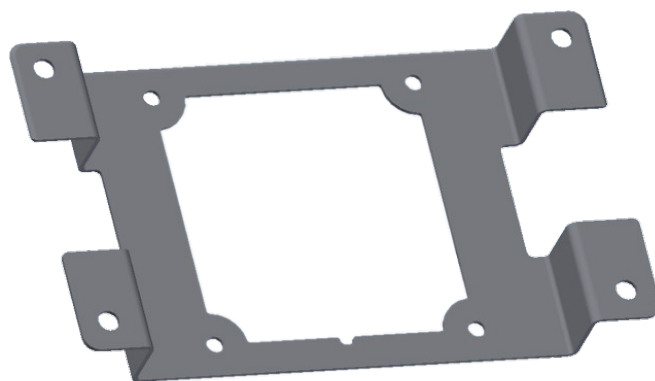
Potisk

- Minimální izolační mezera: 0 mm

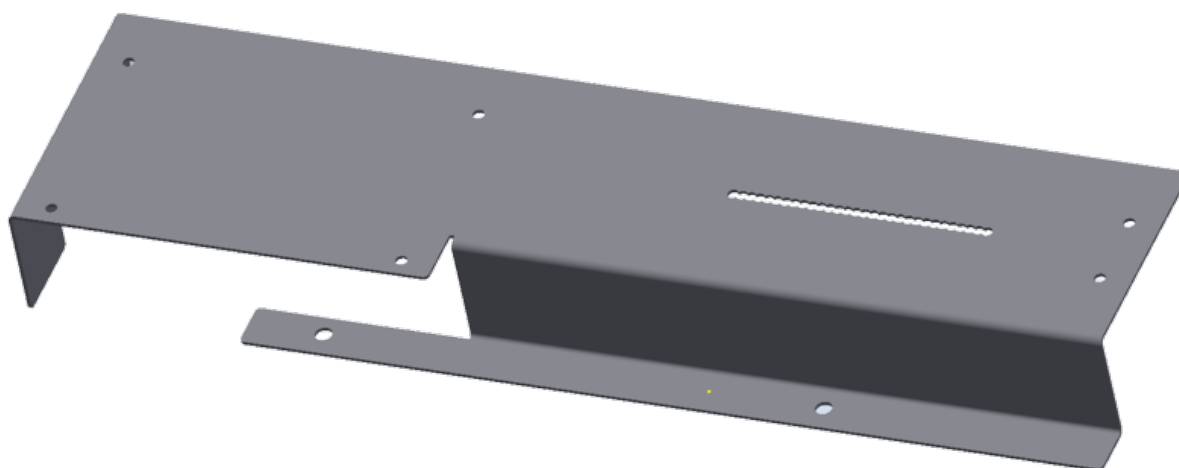
Import nastavení z jiné desky...

OK Zrušit

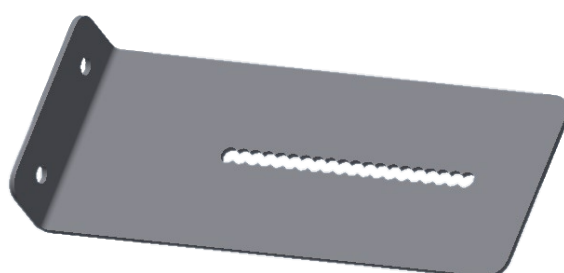
### 3 Příloha – Díly pro montáž komponentů



Držák řídicí desky.

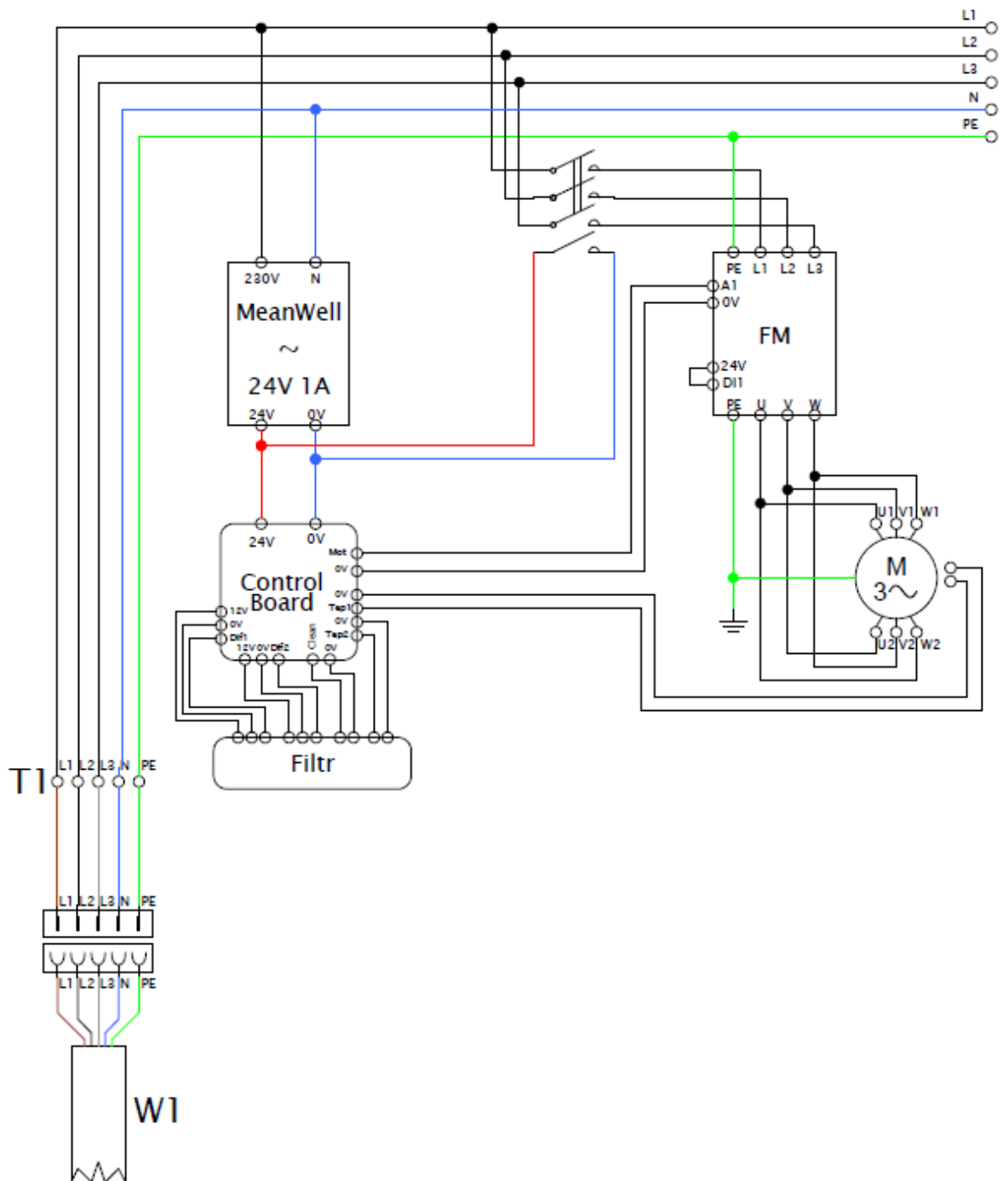


Držák komponentů.



Držák diferenčních podtlakových senzorů.

#### 4 Příloha – Silnoproudé schéma



## 5 Příloha – ČVUT FilterMaster XL





## 6 Příloha – CD

Na zadní straně desek se nachází CD digitálními přílohami. Obsah CD:

- bakalářská práce
- schéma zapojení řídicí desky,
- rozmístění součástek na desce plošných spojů,
- zdrojový kód,
- zdrojový kód knihovny pro displej [19],
- fotky zařízení.

Elektronická verze příloh je dostupná na: <https://tinyurl.com/46w3bysb>, nebo pomocí QR kódu.

