

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření průtoku vzduchu
Stanislav Morávek

Bakalářská práce
2019

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Stanislav Morávek**
Osobní číslo: **I16034**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Měření průtoku vzduchu**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V mnoha aplikacích se používá stlačený vzduch a nejednou se hodí mít možnost vzdáleně sledovat spotřebu vzduchu, případně jiného plynného média. Práce se bude zabývat návrhem průtokoměru pro technický stlačený vzduch, umožňující vzdálenou kontrolu stavu přes webové rozhraní. Webové rozhraní může být implementováno na snímači, stejně jako může snímač data zasílat na server a mohou být zobrazena zde. Práce bude obsahovat popis dostupných metod měření průtoku plynu, řešerši průmyslových i miniaturních měřičů průtoků, budou porovnány jejich parametry a vyhodnocena jejich vhodnost pro jednotlivé typy aplikací. Praktická část práce bude obsahovat výběr vhodné platformy pro připojení zařízení do pevné nebo bezdrátové sítě vybranou technologií (Ethernet, WiFi, GSM), návrh měřícího zařízení s rozhraním pro vybraný snímač a implementací vzdáleného přístupu k datům. Aplikace bude otestována a výsledky budou součástí práce (záznam průtoku za vybraný čas, náhled dat přes webové rozhraní).

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
[2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
[3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
[4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8 [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Rozsival

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2019**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Jan Pidaňič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9. 5. 2019

Stanislav Morávek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Pavlu Rozsivalovi za cenné rady při psaní mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Kynclovi a firmě JHV–ENGINEERING za poskytnutí prostředků k výrobě a ověření funkčnosti mé bakalářské práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu.

ANOTACE

Teoretická část práce se zabývá principy měření průtoku plynů a kapalin. Praktická část práce se zabývá návrhem zařízení pro vzdálené sledování průtoku stlačeného vzduchu pomocí průmyslového průtokoměru. Práce obsahuje i naměřená data.

KLÍČOVÁ SLOVA

Čidlo průtoku, proudová smyčka

TITLE

Air flow measurement

ANNOTATION

The theoretical part includes principles of measurement of flow rate of liquids and gases. The practical part includes design of device for remote control of compressed air with industrial flow sensor. The thesis includes measured data.

KEYWORDS

Flow sensor, current loop

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam zkratek	11
Úvod	12
1 Měření průtoku	13
1.1 Objemové průtokoměry	14
1.1.1 Přímé objemové průtokoměry	14
1.1.2 Nepřímé objemové průtokoměry	14
1.2 Průtokoměry s měřením tlakového rozdílu.....	15
1.3 Průtokoměry založené na principu magnetické indukce	16
1.4 Průtokoměry využívající Coriolisovu sílu	17
1.5 Ultrazvukové průtokoměry	18
1.5.1 Metoda se dvěma sondami (vysílač/přijímač)	18
1.5.2 Metoda s jedním vysílačem a dvěma přijímači	18
1.5.3 Metoda využívající Dopplerův jev	19
1.6 Kalorimetrické průtokoměry (tepelné metody)	20
1.6.1 Metoda vyhřívaného drátu	20
1.6.2 Metoda s teplotním snímačem (NTC, PTC)	20
1.6.3 Metoda založená na rozdílu teplot	21
1.6.4 Metoda založená na principu termoelektrického anemometru	21
1.7 Vírové průtokoměry	22
2 Hardwarové řešení – volba komponent	23
2.1 Čidlo průtoku	23
2.1.1 Proudová smyčka	23
2.1.2 Čidlo průtoku SFAM-62-3000L-TG12-2SA-M12	24
2.1.3 Čidlo průtoku PFM711-C6-F.....	26
2.2 Řídící obvod.....	28
2.2.1 WeMos D1 Mini Pro.....	28
2.3 Analogově-digitální převodník	30

2.3.1	AD převodník procesoru ESP8266EX	30
2.3.2	Modul AD převodníku s ADS1115	31
2.4	Displej	32
2.5	Napájecí zdroj	32
2.5.1	Modul step-down měniče s MP2315	32
2.6	Konektor	33
3	Praktická realizace	34
3.1	Schéma zapojení	34
3.2	Návrh desky plošných spojů	35
4	Softwarové řešení	37
4.1	Obsluha modulu AD převodníku	39
4.2	Obsluha OLED	40
4.3	Obsluha Wi-Fi	41
4.4	Odesílání dat na webové rozhraní Adafruit IO	41
5	Naměřená data	43
	Závěr	45
	Použitá literatura	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Přímý objemový průtokoměr [1]	14
Obrázek 2: Nepřímý objemový průtokoměr [1]	14
Obrázek 3: Průtokoměry s měřením tlakového rozdílu [1]	15
Obrázek 4: Průtokoměr založený na principu magnetické indukce [1]	16
Obrázek 5: Průtokoměr založený na Coriolisově síle [1]	17
Obrázek 6: Ultrazvukový průtokoměr (2 vysílače/přijímače) [1]	18
Obrázek 7: Ultrazvukový průtokoměr (1 vysílač, 2 přijímače) [1]	19
Obrázek 8: Ultrazvukový průtokoměr využívající Dopplerův jev [1]	19
Obrázek 9: Stabilizační část [1]	20
Obrázek 10: Metoda založená na rozdílu teplot [1]	21
Obrázek 11: Metoda založená na principu termoelektrického anemometru [1]	21
Obrázek 12: Vírový průtokoměr [1]	22
Obrázek 13: Čidlo průtoku Festo řady SFAM [4]	24
Obrázek 14: Zapojení SFAM (verze s proudovým analogovým výstupem 2SA) [4]	25
Obrázek 15: Čidlo průtoku SMC řady PFM711 [5]	26
Obrázek 16: Zapojení PFM [5]	27
Obrázek 17: Princip PFM [5]	27
Obrázek 18: Vývojová deska WeMos D1 mini Pro [6]	29
Obrázek 19: Proudový analogový výstup senzoru průtoku [5]	30
Obrázek 20: Konektor M12 [10]	33
Obrázek 21: Zapojení konektoru [10]	33
Obrázek 22: Schéma zapojení	34
Obrázek 23: DPS (pohled ze strany součástek, modrá je spodní vrstva)	35
Obrázek 24: Fotografie výrobku	36
Obrázek 25: Vývojový diagram	38
Obrázek 26: Logo	40
Obrázek 27: Náhled na „přístrojovou desku“ dashboard	41
Obrázek 28: Naměřená data ITW	43
Obrázek 29: Naměřená data THK	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vybrané parametry čidla průtoku SFAM-62-3000L-TG12-2SA-M12 [4].....	25
Tabulka 2: Vybrané parametry čidlo průtoku PFM711-C6-F [5].....	26
Tabulka 3: Rozlišení a LSB ADS1115 [8].....	31
Tabulka 4: Volba adresy ADS1115 [8].....	31
Tabulka 5: Nastavení rozsahu AD převodníku	39

SEZNAM ZKRATEK

AD	Analog to Digital
ADDR	ADDRes
CSV	Comma-Separated Values
DIN	Deutsche Industrie Norm
DPS	Deska Plošných Spojů
ESR	Equivalent Series Resistance
FSR	Full Scale Range
GND	GrouND
I ² C	Inter-Integrated Circuit
JSON	JavaScript Object Notation
LDO	Low DropOut
LED	Light Emiting Diode
LSB	Least Significant Bit
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OLED	Organic Light-Emitting Diode
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VDC	Voltage Direct Current
Wi-Fi	Wireless Fidelity

ÚVOD

Pro firmy, které se zabývají automatickými a poloautomatickými výrobními linkami je důležité znát cenu energií. Mnoho výrobních linek obsahuje pneumatické části jako jsou pneumatické motory. Je proto důležité vědět jaká je spotřeba stlačeného vzduchu celé linky kvůli nákladům na provoz a správnému dimenzování přívodu media.

Práce se zabývá návrhem zařízení, ke kterému se připojí průmyslové čidlo průtoku. Zařízení pomocí Wi-Fi odesílá měření na webovou stránku, na které jsou ukládána. Data je možné stáhnout pro další zpracování.

Zařízení je sice určeno pro sensor průtoku, ale je možné připojit i jiná průmyslová čidla jako čidla tlaku nebo vzdálenosti.

1 MĚŘENÍ PRŮTOKU

Průtok je množství protékajícího media za jednotku času. Průtok můžeme vyjádřit jako objemový nebo hmotnostní.

- ❖ Objemový průtok Q_V [V/t] – V je objem, t je čas
- ❖ Hmotnostní průtok Q_M [m/t] – m je hmotnost, t je čas

K měření průtoku se používají průtokoměry. Pro měření existují různé metody. Mezi tyto metody patří využití ultrazvuku, magnetické indukce, teplotních změn, Coriolisovy síly nebo turbíny či oběžných kol. [1]

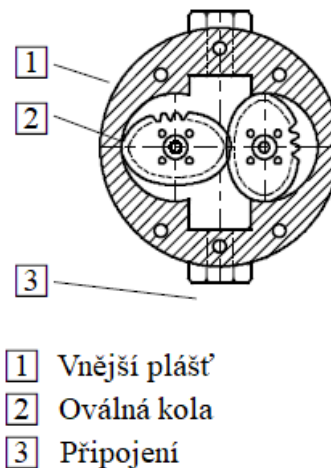
Důvody měření průtoku [2]:

- ❖ Měření spotřeby systému
- ❖ Řízení nákladů na výrobu
- ❖ Výpočet nákladů na energie
- ❖ Sledování systémových procesů
- ❖ Sledování netěsností

1.1 Objemové průtokoměry

1.1.1 Přímé objemové průtokoměry

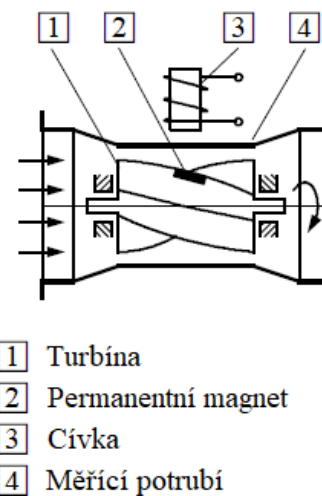
Průtok je měřen počtem otáček ozubených kol. Jedna otáčka ozubeného kola odpovídá definovanému objemu látky. [1]



Obrázek 1: Přímý objemový průtokoměr [1]

1.1.2 Nepřímé objemové průtokoměry

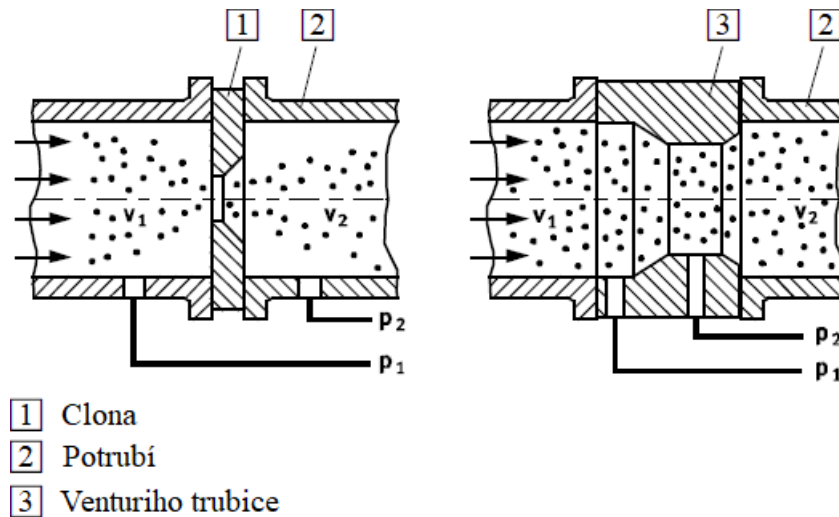
Nepřímý objemový průtokoměr obsahuje turbínu, která je umístěna v proudící látce. Turbína je poháněna proudící látkou. Počet otáček odpovídá průtoku. Otáčky turbíny jsou měřeny magneticky (například cívkou nebo Hallovo sondou). [1]



Obrázek 2: Nepřímý objemový průtokoměr [1]

1.2 Průtokoměry s měřením tlakového rozdílu

Metoda měření průtoku pomocí tlakového rozdílu spočívá v lokálním škrcení průtoku. Průtok je určen pomocí rozdílu tlaku před zúžením p_1 a tlaku za zúžením p_2 . [1]



Obrázek 3: Průtokoměry s měřením tlakového rozdílu [1]

Tato metoda je vhodná pro:

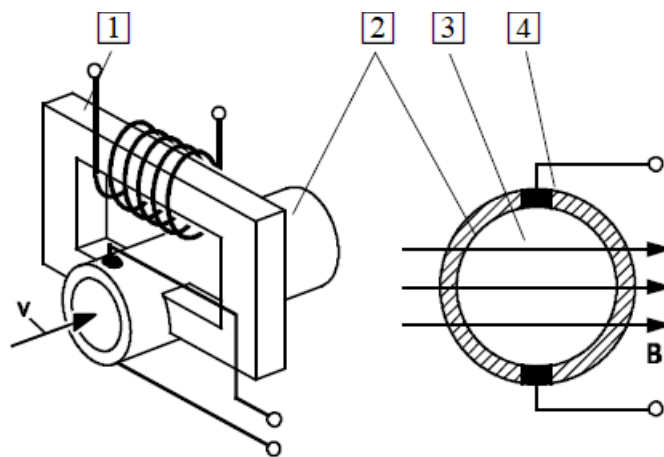
- ❖ měření velkých průtoků kapalin i plynů
- ❖ vysoké tlaky a teploty
- ❖ agresivní látky

1.3 Průtokoměry založené na principu magnetické indukce

Pro měření průtoku je použita síla působící na pohybující se elektrický náboj v magnetickém poli.

Magnetické pole je vytvářeno pomocí magnetů nebo cívek umístěných vně potrubí. Magnetické pole způsobí vznik elektrického napětí na snímacích elektrodách. Toto napětí je úměrné rychlosti průtoku.

Medium, u kterého má být měřen průtok, protéká přes izolovanou (nevodivou) přímou část potrubí. [1]



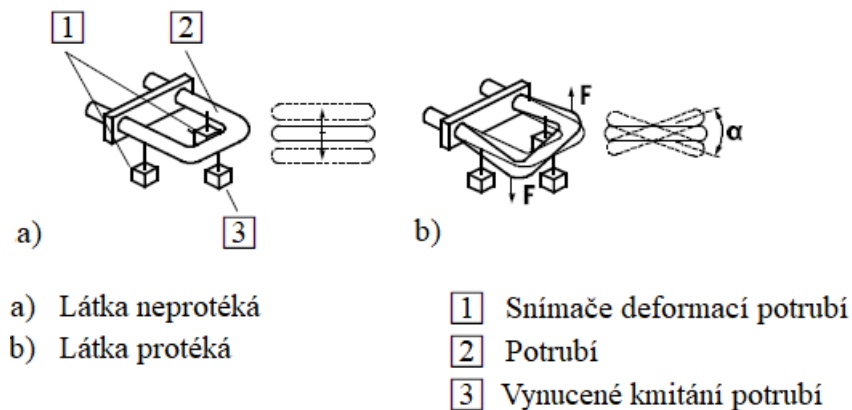
- | | | | |
|---|--------------------------|---|--------------------|
| 1 | Jádro | B | Magnetická indukce |
| 2 | Nevodivé potrubí | v | Průtok |
| 3 | Měřená protékající látka | | |
| 4 | Snímací elektrody | | |

Obrázek 4: Průtokoměr založený na principu magnetické indukce [1]

1.4 Průtokoměry využívající Coriolisovu sílu

Tyto průtokoměry využívají Coriolisovu sílu, která je vytvářena při průtoku látky přes potrubí tvaru U.

Potrubí je uvedeno do pohybu, který je kolmý ke směru průtoku kapaliny. Dva snímače snímají deformaci potrubí. Při nulovém průtoku oba snímače reagují současně (nevzniká žádná deformace). Při průtoku vznikají vlivem Coriolisovy síly deformace potrubí a snímače snímají v jiný čas. Toto měření vyžaduje přesné snímače. Měřený úhel je přímo úměrný hmotnostnímu průtoku. [1]



Obrázek 5: Průtokoměr založený na Coriolisově síle [1]

Měřicí přístroje založené na principu Coriolisovy síly jsou drahé, ale mohou být použity pro:

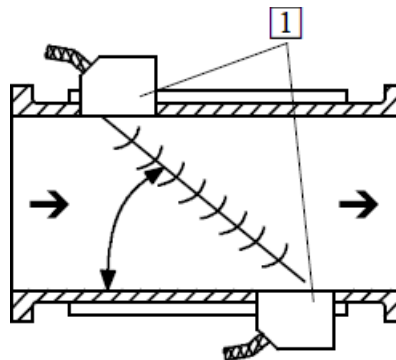
- ❖ měření malých průtoků
- ❖ krátkodobá měření
- ❖ pulzní měření průtoku
- ❖ vysoké a nízké teploty
- ❖ potrubí, která nejsou zcela zaplněna
- ❖ vysoký tlak

1.5 Ultrazvukové průtokoměry

Metoda je založena na šíření rychlosti zvuku v pohybujícím se mediu. Změna rychlosti látky způsobí i změnu rychlosti ultrazvukového impulsu. Ultrazvukové průtokoměry se používají vně potrubí [1].

1.5.1 Metoda se dvěma sondami (vysílač/přijímač)

2 měřicí sondy vysílají a přijímají ultrazvukové impulsy střídavě proti sobě pod úhlem 45° . Impuls, který je vyslán ve směru proudění je zrychlen, ale impuls vyslaný proti směru proudění je zpomalen. Rozdíl časů vyslaných impulsů je závislý na rychlosti proudění látky. Měření není ovlivněno složením nebo teplotou látky. [1]

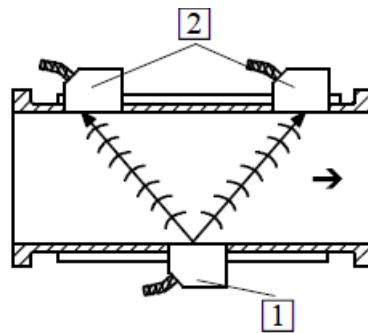


1 Měřicí sondy

Obrázek 6: Ultrazvukový průtokoměr (2 vysílače/přijímače) [1]

1.5.2 Metoda s jedním vysílačem a dvěma přijímači

Vysílač vysílá ultrazvukové impulsy ke dvěma přijímačům. Jeden je umístěn ve směru proudění, druhý proti směru. Rozdíl přijatých časů ultrazvukových impulsů je úměrný rychlosti proudění látky. [1]

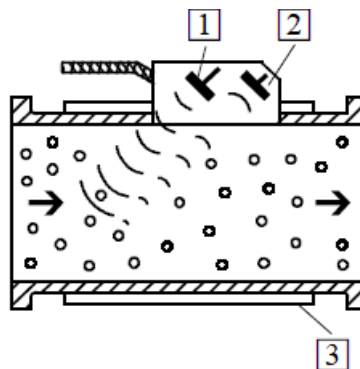


- 1 Vysílač
- 2 Přijímač

Obrázek 7: Ultrazvukový průtokoměr (1 vysílač, 2 přijímače) [1]

1.5.3 Metoda využívající Dopplerův jev

Tato metoda je založena na odrazu akustického signálu od vzduchových bublin nebo částic. Tyto částice nesmí být příliš malé. Pohyb částic způsobí zkrácení vlnové délky (zvýšení frekvence) zvukového signálu. Rozdíly ve frekvenci jsou přímo úměrné rychlosti proudění. [1]



- 1 Vysílač
- 2 Přijímač
- 3 Potrubí

Obrázek 8: Ultrazvukový průtokoměr využívající Dopplerův jev [1]

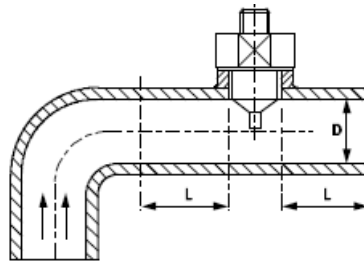
1.6 Kalorimetrické průtokoměry (tepelné metody)

Při použití těchto metod měření je průtok plynu nebo kapaliny určován pomocí teploty nebo teplotního rozdílu.

Snímač může být vnořen přímo v potrubí. Aby se zabránilo vzniku chyb měření, je před místem měření stabilizační zóna. Délka stabilizační zóny L od kolen a částí potrubí se změnou průřezu musí být dostatečně velká. Minimální délka stabilizačního zóny pro senzory průtoku založené na tepelných metodách by měla být:

- ❖ Před měřicím bodem $L = 10 \times D$
- ❖ Za měřicím bodem $L = 6 \times D$

Díky stabilizační zóně potrubí je proudění ve větší míře laminární. [1]



L Stabilizační zóna

Obrázek 9: Stabilizační část [1]

1.6.1 Metoda vyhřívání drátu

Tato metoda je založena na ochlazování vyhříváního prvku. Elektricky vyhříváný prvek (odporová zátěž) je ochlazován průtokem látky. Elektrický odpor vyhříváního prvku poskytuje informace o rychlosti proudění. Objemový průtok je možné určit při znalosti průřezu potrubí. [1]

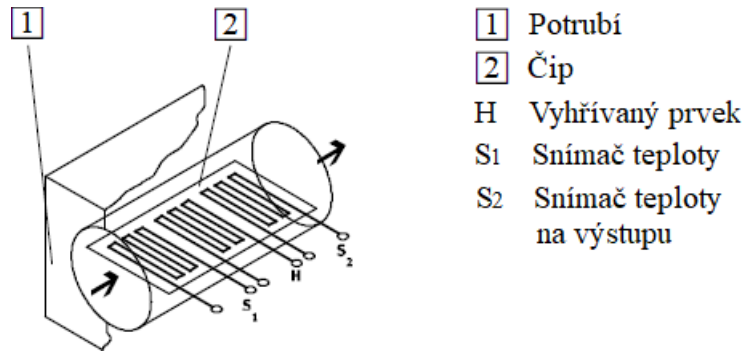
1.6.2 Metoda s teplotním snímačem (NTC, PTC)

Teplotně závislý rezistor (NTC, PTC) je umístěn u zdroje tepla (elektricky vyhříváný prvek). Průtokem je zdroj tepla ochlazován a odpor snímače se mění.

Při použití NTC snímače se jeho odpor zvyšuje, pokud průtok stoupá a tím teplota vyhříváního prvku klesá. Při použití PTC snímače se naopak jeho odpor snižuje.[1]

1.6.3 Metoda založená na rozdílu teplot

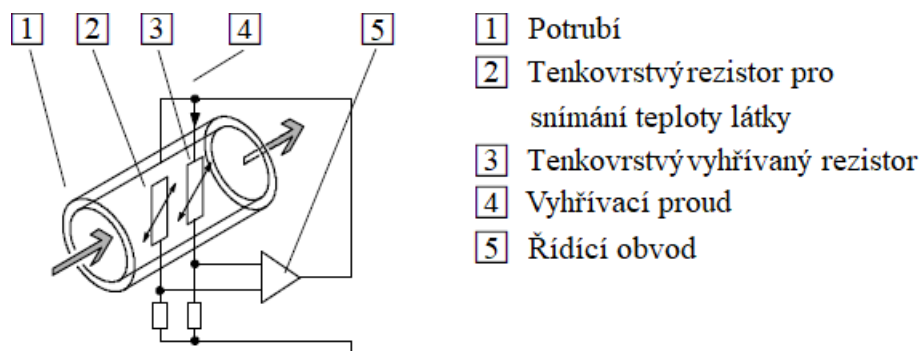
Vyhřívaný prvek a 2 teplotní snímače jsou umístěny na čipu. Ten je umístěn v proudící látce. Teplotní senzor S1 měří původní teplotu látky. Látka je následně ohřívána pomocí vyhřívacího prvku H a teplota je měřena pomocí senzoru S2. Rozdíl teplot snímačů S1 a S2 je závislý na průtoku. [1]



Obrázek 10: Metoda založená na rozdílu teplot [1]

1.6.4 Metoda založená na principu termoelektrického anemometru

Potrubí obsahuje 2 tenkovrstvé platinové rezistory, které jsou umístěny kolmo ke směru průtoku. Jeden rezistor je vyhříván, druhý slouží jako snímač teploty. Vyhřívání rezistoru je ochlazováno průtokem. Vyhodnocovací obvod udržuje teplotu vyhřívajícího rezistoru konstantní – ohřev je řízen velikostí proudu. Při zvyšování průtoku dochází i ke zvyšování vyhřívacího proudu. Tento proud poskytuje informaci o hmotnostním průtoku. Snímací rezistor funguje jako reference pro teplotu látky, přičemž vyhodnocovací obvod udržuje rozdíl teplot vyhřívajícího rezistoru a látky konstantní. [1]

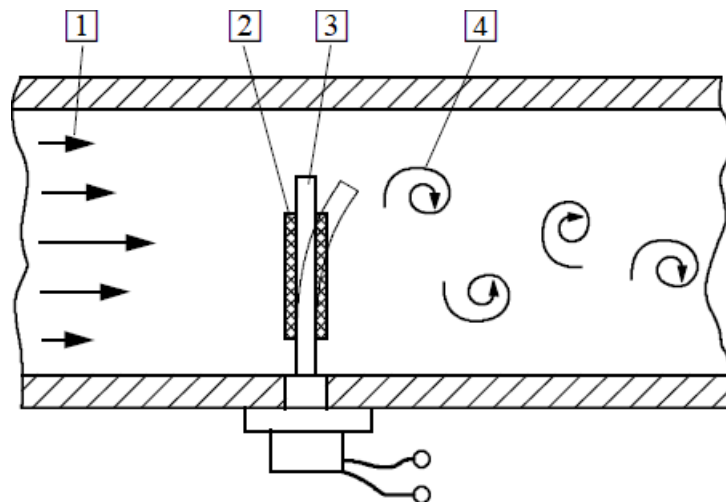


Obrázek 11: Metoda založená na principu termoelektrického anemometru [1]

1.7 Vírové průtokoměry

Pokud je v cestě průtoku umístěna překážka, vznikají víry (turbulentní proudění). Počet vzniklých vírů je přímo úměrný rychlosti proudění. Tyto víry periodicky kmitají.

Na obrázku je princip snímače s překážkou s tenzometry. Tenzometry jsou umístěny kolmo k průtoku. Vzniklé víry rozkmitají překážku s tenzometry. Frekvence kmitání je úměrná objemovému průtoku. [1]



- 1 Laminární proudění
- 2 Tenzometr
- 3 Pružná překážka v průtoku
- 4 Víry (turbulentní proudění)

Obrázek 12: Vírový průtokoměr [1]

2 HARDWAROVÉ ŘEŠENÍ – VOLBA KOMPONENT

Úkolem je navrhnout zařízení, které umožní vzdálené sledování spotřeby vzduchu (například u výrobních linek). Zařízení je možné zabudovat do rozvaděče na DIN lištu. K zařízení se připojí průmyslové čidlo průtoku. Data bude možné sledovat na internetové stránce. Naměřená data se dají stáhnout ve formátu JSON nebo CSV.

Základní části zařízení:

- ❖ Napájecí zdroj
- ❖ Řídící obvod
- ❖ AD převodník
- ❖ Displej
- ❖ Konektor

2.1 Čidlo průtoku

K dispozici jsem měl dva průmyslové průtokoměry. Oba průtokoměry mají proudový analogový výstup 4 až 20 mA (proudová smyčka). Při nulovém průtoku je výstupní proud 4 mA. Při maximálním průtoku, na který je senzor průtoku dimenzován, je výstupní proud 20 mA. Závislost mezi průtokem a výstupním proudem je lineární.

2.1.1 Proudová smyčka

Proudová smyčka 4-20 mA je standard pro přenos hodnot měřených veličin v oblasti průmyslové automatizace. Díky velké šumové imunitě je vhodná pro přenos na vzdálenosti i stovek metrů. [3]

V praxi se lze setkat se dvěma typy proudové smyčky:

- ❖ Analogová proudová smyčka – hodnoty jsou vyjádřeny v rozsahu 4-20 mA
- ❖ Digitální proudová smyčka – hodnoty logické 0 jsou vyjádřeny proudem 4 mA, hodnoty logické 1 jsou vyjádřeny proudem 20 mA

Ve většině případů se využívá analogové varianty. [3]

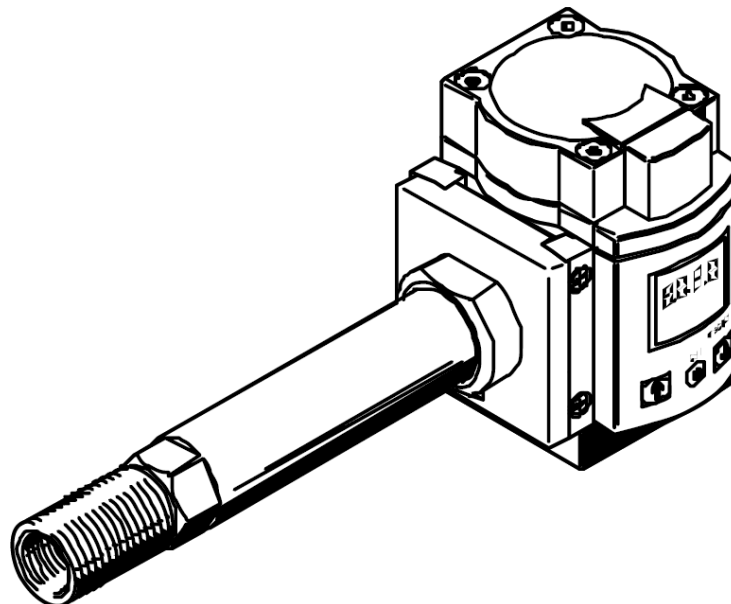
Výhodou proudové smyčky je jednoduchost, přenos na velké vzdálenosti a značná imunita proti elektromagnetickému rušení (v průmyslu s často vyskytuje). Další výhodou je i detekce přerušené smyčky (detekovaný proud klesne na hodnotu 0 mA). Odolnost proti rušení je dána nízkým vstupním odporem proudových vstupů zařízení připojených do smyčky. Pokud je proudová smyčka napájena dostatečně dimenzovaným zdrojem, úbytky napětí způsobené nenulovým odporem vodičů nemají přímý vliv na přenášenou hodnotu. [3]

Typická proudová smyčka je složena z těchto komponent [3]:

- ❖ Senzor – převádí měřenou neelektrickou veličinu na napěťový signál
- ❖ Převodník napětí/proud – provádí převod napětí na proud v rozsahu 4 až 20 mA
- ❖ Napájecí zdroj – poskytuje napájení pro převodník napětí/proud a pro přijímač
- ❖ Přijímač – provádí zpětný převod proudu na napětí, popřípadě provádí vyhodnocení a zobrazení

2.1.2 Čidlo průtoku SFAM-62-3000L-TG12-2SA-M12

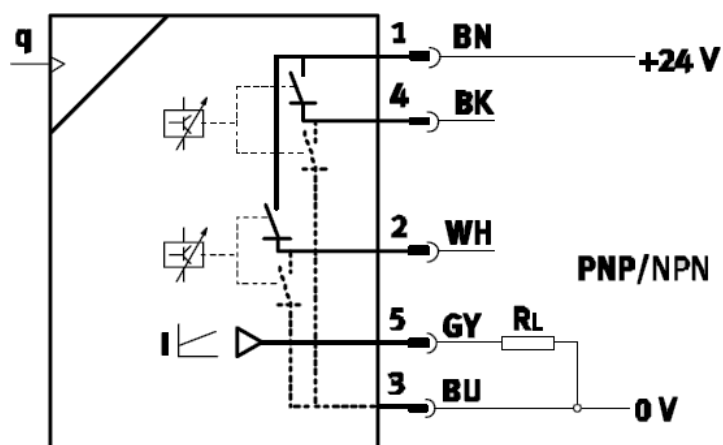
Jedná se o čidlo průtoku plynů od firmy Festo. Firma Festo vyrábí celou řadu těchto čidel průtoku (SFAM), liší se například rozsahem měření, způsobem připojení měřeného plynu nebo elektrickým výstupem. [4]



Obrázek 13: Čidlo průtoku Festo řady SFAM [4]

Tabulka 1: Vybrané parametry čidla průtoku SFAM-62-3000L-TG12-2SA-M12 [4]

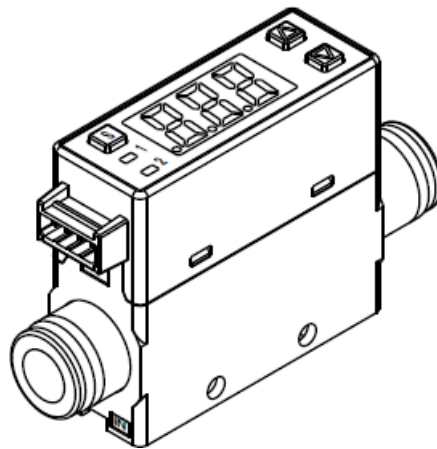
Rozsah měření	30-3000 l/min
Provozní tlak	0–16 bar
Vhodné pro	Stlačený vzduch Dusík
Způsob připojení pneumatiky	Vnitřní závity G1/2
Elektrické připojení	5pinový M12 konektor
Napájecí napětí	15-30 VDC
Elektrický výstup	2x spínací NPN/PNP 1x analogový 4–20 mA
Princip měření	Metoda založená na principu termoelektrického anemometru



Obrázek 14: Zapojení SFAM (verze s proudovým analogovým výstupem 2SA) [4]

2.1.3 Čidlo průtoku PFM711-C6-F

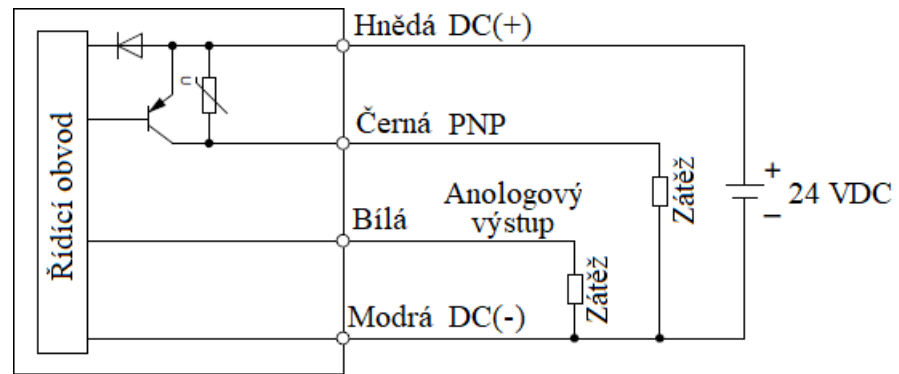
Jedná se o čidlo průtoku od firmy SMC z řady PFM.



Obrázek 15: Čidlo průtoku SMC řady PFM711 [5]

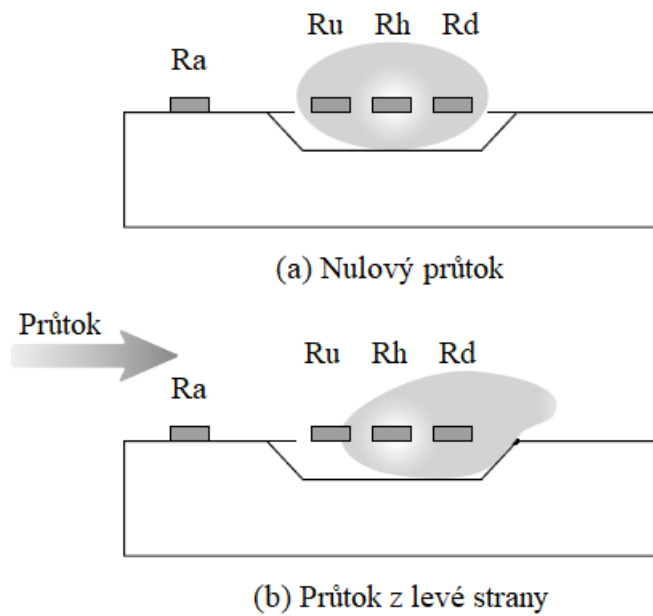
Tabulka 2: Vybrané parametry čidlo průtoku PFM711-C6-F [5]

Rozsah měření	2–100 l/min
Provozní tlak	-1–7.5 bar
Vhodné pro	Stlačený vzduch Dusík Argon CO ₂
Způsob připojení pneumatiky	Nástrčné šroubení pro hadice s vnějším průměrem 6 mm
Elektrické připojení	4 pinový konektor ZS-33-D
Napájecí napětí	24 VDC ± 10 %
Elektrický výstup	1x spínací PNP 1x analogový 4–20 mA
Princip měření	Metoda založená na rozdílu teplot



Obrázek 16: Zapojení PFM [5]

V katalogu čidel průtoku řady PFM je znázorněn i princip měření. Princip měření je popsán v teoretické části.



Obrázek 17: Princip PFM [5]

2.2 Řídící obvod

V zařízení je použit procesor ESP8266EX. Procesor obsahuje výpočetní část a Wi-Fi část. Procesor je osazen na vývojové desce. Vývojové desky byly vyzkoušeny čtyři:

1. NodeMCU V2 (Amica)
2. NodeMCU V3 (LoLin)
3. WeMos D1 Mini
4. WeMos D1 Mini Pro

Všechny tyto vývojové desky jsou osazeny čipem ESP8266EX. Čip u desek NodeMCU a WeMos D1 mini je zapouzdřen v modulu ESP8266MOD (ESP12).

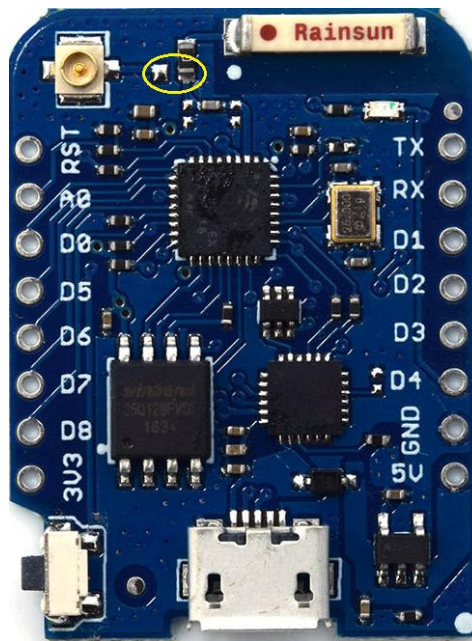
Z důvodu malých rozměrů a možnosti připojit externí anténu byla použita vývojová deska WeMos D1 mini Pro.

2.2.1 WeMos D1 Mini Pro

WeMos D1 Mini Pro je vývojová deska s procesorem ESP8266EX. Deska dále obsahuje stabilizátor napětí LN1193, převodník USB na UART CP2104 a externí FLASH paměť 25Q128JVSQ. [6]

Vlastnosti [6]:

- ❖ Napájecí napětí: 5 nebo 3.3 V (na desce jsou příslušné piny)
- ❖ 11 digitálních vstupně-výstupních pinů (3,3 V kompatibilní)
- ❖ 1 analogový vstup (10bitový AD převodník)
- ❖ Programování pomocí USB – na desce je osazen microUSB konektor
- ❖ Možnost použití externí antény



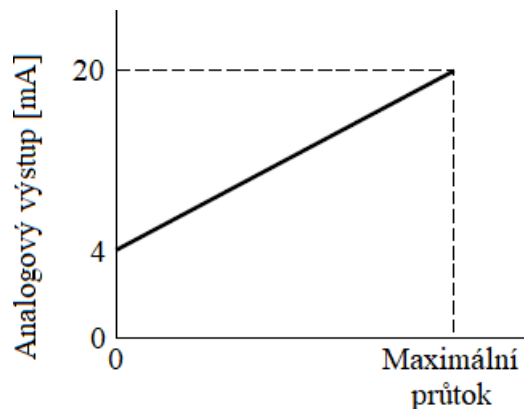
Obrázek 18: Vývojová deska WeMos D1 mini Pro [6]

Pro napájení 5 V se napětí připojí na příslušný pin, napětí je dále sníženo pomocí LDO stabilizátoru na 3.3 V. Ve schématu desky WeMos D1 Mini Pro je uveden stabilizátor RT9013, ale na desce je osazen stabilizátor LN1193, který má stejné parametry.

Deska je osazena keramickou anténou. Je možno použít i externí anténu. Pro její použití je nutné přepájet zkratovací propojku R16. Na obrázku 18 je to znázorněno žlutou barvou. Pro externí anténu je na desce konektor (IPX konektor).

2.3 Analogově-digitální převodník

Zařízení pracuje s analogovou hodnotou z čidla průtoku, jehož výstup je reprezentován jako proud v rozsahu 4–20 mA. Aby mohl být tento výstup dále zpracován, je nutné ho převést do digitální podoby. K tomu slouží AD převodník. Do proudové smyčky ze senzoru průtoku je zapojen rezistor s hodnotou 100 Ω a přesností 0.5 %. Jedná se o rezistor řady TR161 od firmy Tesla. [7] Na tomto rezistoru vzniká průchodem proudu napětí, které AD převodník převede do digitální podoby.



Obrázek 19: Proudový analogový výstup senzoru průtoku [5]

2.3.1 AD převodník procesoru ESP8266EX

Procesor ESP8266EX, který řídí celé zařízení, obsahuje 10bitový AD převodník. To znamená, že má 1024 rozlišovacích úrovní. Při použití čidla průtoku SFAM-62-3000L-TG12-2SA-M12 je změna výstupního proudu při změně průtoku o 1 l/min 5.3 μ A. To na rezistoru 100 Ω způsobí změnu napětí o 530 μ V. To je pro 10bitový AD převodník neměřitelné, protože nejmenší změna napětí, kterou dokáže rozlišit (LSB) je asi 3.2 mV.

Proto je v zařízení použit modul 16bitového (15bitový + 1bit znaménko) AD převodníku. Základem tohoto modulu je obvod ADS1115.

2.3.2 Modul AD převodníku s ADS1115

Vlastnosti modulu [8]:

- ❖ Napájecí napětí: 2 až 5.5 V
- ❖ Počet analogových vstupů: 4 (4 proti GND nebo 2 diferenciální)
- ❖ Komunikace pomocí I²C
- ❖ Volitelná adresa I²C
- ❖ Nastavitelné zesílení (rozlišení)

ADS1115 je AD převodník s rozlišením 16 bitů. 15 bitů je pro velikost napětí a jeden bit je pro určení polaritu měřeného napětí. Tento AD převodník má tedy pro měření napětí 32 768 (2^{15}) rozlišovacích úrovní. U ADS1115 je možné měnit rozlišení měřeného napětí a tím zvýšit přesnost měření.

Tabulka 3: Rozlišení a LSB ADS1115 [8]

Rozlišení (FSR) [V]	Velikost LSB [μ V]
± 6.144	187.5
± 4.096	125
± 2.048	62.5
± 1.024	31.25
± 0.512	15.625
± 0.256	7.8125

Modul AD převodníku komunikuje s procesorem pomocí I²C sběrnice. Adresa modulu je volitelná. Adresa se volí zapojením pinu „ADDR“.

Tabulka 4: Volba adresy ADS1115 [8]

Pin „ADDR“ zapojen na:	I ² C adresa
VDD	0x48 (01001000)
GND	0x49 (01001001)
SDA	0x4A (01001010)
SCL	0x4B (01001011)

2.4 Displej

Displej v zařízení není primárně určen pro odečítání hodnot. Je určen pro zobrazení informací o připojení k Wi-Fi.

V zařízení je použit OLED displej s úhlopříčkou 0.91“. Výhodou tohoto displeje je malá spotřeba, velké rozlišení a jednoduché ovládání.

Displej je ovládán pomocí I²C sběrnice, stejně jako AD převodník. Adresa tohoto displeje je neměnná (0x3C).

2.5 Napájecí zdroj

Protože je zařízení navrženo pro průmyslové aplikace, je jeho napájecí napětí 24 VDC. Komponenty zařízení nejsou na toto napětí navrženy a je potřeba napětí snížit. K tomuto účelu lze použít lineární stabilizátor. Toto řešení je však nevýhodné z důvodu nízké účinnosti a nutnému použití chladiče (výkonová ztráta by byla vyšší než 2 W). Z tohoto důvodu je v zařízení použit modul spínaného stabilizátoru. Z důvodu malých rozměrů a velké účinnosti byl použit modul, jehož základem je obvod MP2315.

2.5.1 Modul step-down měniče s MP2315

Vlastnosti modulu [9]:

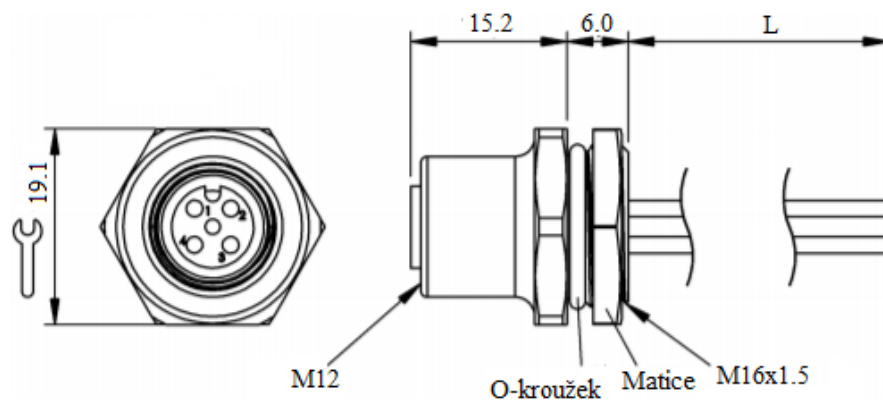
- ❖ Vstupní napětí: 4.5 až 24 V (absolutní maximum je -0.3 až 28 V)
- ❖ Výstupní napětí: volitelné pomocí zkratovacích propojek
 - Pevně nastavené napětí: 3.3, 5, 9, 12 V
 - Plynule nastavitelné napětí: 0.8 až 12 V
- ❖ Maximální výstupní proud: 3 A
- ❖ Spínací frekvence: 500 kHz
- ❖ Účinnost: více než 70 %

Modul obsahuje samotný řídicí obvod, tlumivku, vstupní a výstupní keramické kondenzátory a indikační LED. Výrobce obvodu MP2315 doporučuje na vstup a výstup zapojit kondenzátory, nejlépe s nízkým ESR (na modulu nejsou tyto kondenzátory osazeny). [9] Modul má 4 vývody. Jeden vývod slouží pro digitální zapnutí/vypnutí celého modulu. Další vývody jsou vstup, zem

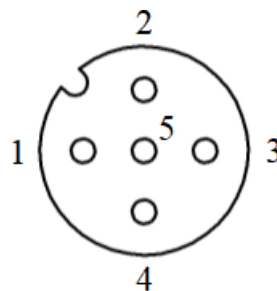
a výstup. Rozložení těchto vývodů odpovídá rozložení vývodů lineárních stabilizátorů řady 78xx v pouzdře TO220.

2.6 Konektor

Pro připojení napájecího napětí a výstupu čidla průtoku je použit průmyslový 3pinový konektor M12 s označení BCC0E1E (popřípadě BCC M453-0000-1A-RM069-006). [10]



Obrázek 20: Konektor M12 [10]



PIN 1: hnědá
PIN 2: modrá
PIN 3: černá

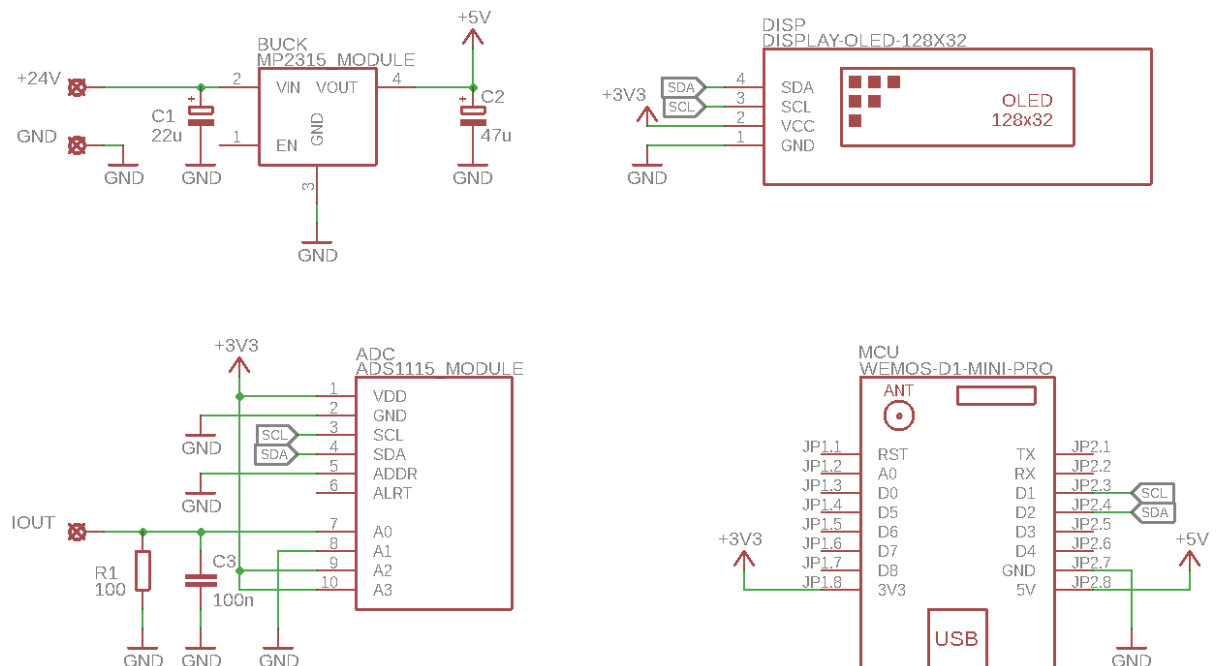
Obrázek 21: Zapojení konektoru [10]

3 PRAKTICKÁ REALIZACE

Pro návrh schématu a desky plošných spojů byl použit software EAGLE. Protože EAGLE neobsahuje knihovnu použitých modulů, byla použita knihovna stažená z internetu (diy-modules.lbr). Modul AD převodníku byl v této knihovně upraven. Modul step-down měniče není v knihovně obsažen, proto byl navržen.

3.1 Schéma zapojení

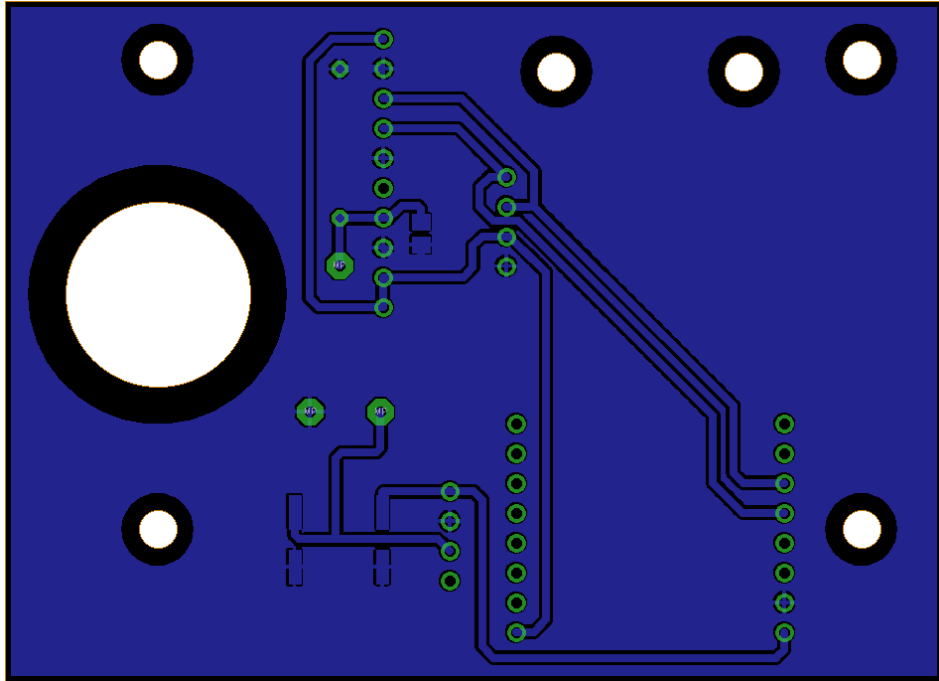
Díky použití modulů je schéma velice jednoduché. Moduly obsahují všechny potřebné součástky, například pull-up rezistory pro I²C sběrnici apod. Na základě datasheetu byly k step-down modulu doplněny vstupní a výstupní kondenzátory. Na vstup AD převodníku je z důvodu potlačení rušení zapojen keramický kondenzátor.



Obrázek 22: Schéma zapojení

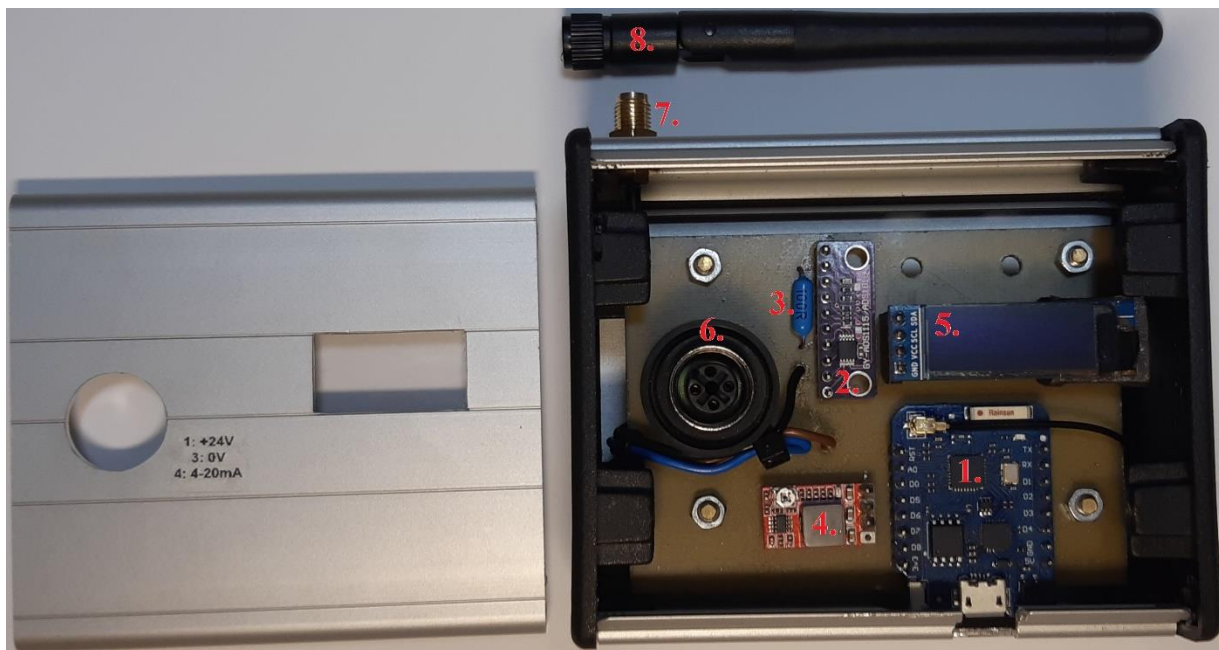
3.2 Návrh desky plošných spojů

Deska plošných spojů byla navržena jako jednostranná. Byla navržena tak, aby ji bylo možné zamontovat do pouzdra, která je vyrobena z hliníkového profilu určeného původně pro vedení kabeláže.



Obrázek 23: DPS (pohled ze strany součástek, modrá je spodní vrstva)

Deska byla vyrobena ve škole pomocí laseru na plošné spoje. Laserem byly vypáleny i otvory pro šrouby a konektor.



Obrázek 24: Fotografie výrobku

1. WeMos D1 mini Pro
2. Modul AD převodníku s ADS1115
3. Snímací rezistor
4. Modul step-down měniče s MP2315
5. OLED displej 0.91“
6. Průmyslový konektor BCC0E1E
7. Anténní konektor
8. Anténa

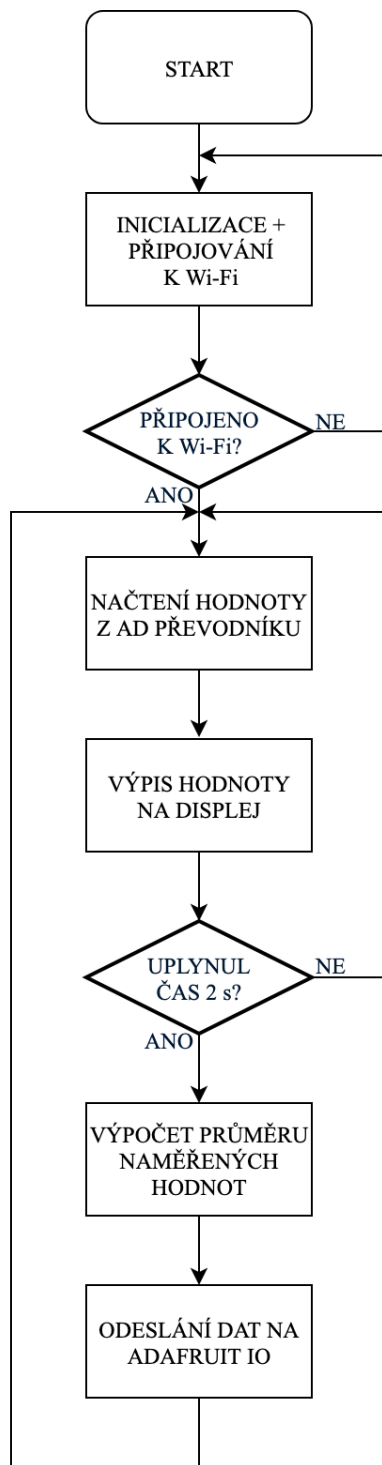
4 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ

Procesor, který je umístěn v zařízení, byl naprogramován pomocí doplňku Visual Micro k vývojovému prostředí Microsoft Visual Studio. K programování je možné použít i vývojové prostředí Arduino. Nevýhodou prostředí Arduino je absence doplňování kódu.

Program byl vytvořen v programovacím jazyce Arduino. Na začátku je připojení potřebných knihoven. Další část programu obsahuje vytvoření proměnných.

Dále program obsahuje inicializaci připojených periférií. Při inicializaci se provádí i připojení k serveru Adafruit.

Po všech inicializacích program cyklicky načítá hodnoty z AD převodníku a vypisuje je na OLED displej. Každé 2 sekundy se vypočítá průměr z načtených hodnot a tato hodnota se odesílá na server.



Obrázek 25: Vývojový diagram

4.1 Obsluha modulu AD převodníku

Pro obsluhu je použita knihovna Adafruit_ADS1015 stažená z webu github.

AD převodník cyklicky každých 10 ms zjišťuje napětí na snímacím rezistoru. Nejprve je nastaven rozsah měření 2.048 V. Pokud je napětí na snímacím rezistoru menší než cca 1.01 V, přepne se rozsah měření na 1.024 V. Pokud je napětí nižší než cca 0.506 V, opět se přepne rozsah měření na 0.512 V. Pro změnu rozsahu se používá příkaz `.setGain()`. Do závorek se píše makro zesílení:

Tabulka 5: Nastavení rozsahu AD převodníku

Rozsah [V]	Makro
±6.144	GAIN_TWOTHIRDS
±4.096	GAIN_ONE
±2.048	GAIN_TWO
±1.024	GAIN_FOUR
±0.512	GAIN_EIGHT
±0.256	GAIN_SIXTEEN

Měření napětí probíhá mezi dvěma vstupy pomocí `.readDiferencial_0_1()`.

Po načtení dat z AD převodníku je nutné je přepočítat na průtok.

Průtok je určen z rovnice:

$$Q_V = \frac{AD - k_1}{k_2}$$

Kde:

- ❖ Q_V je objemový průtok [l/min]
- ❖ AD je hodnota načtená z AD převodníku
- ❖ k_1 a k_2 jsou konstanty jejichž velikost je dána rozsahem AD převodníku

Ukázka kódu obsluhy AD převodníku (načítání hodnot a přepínání rozsahu AD převodníku):

```
ads.setGain(GAIN_TWO); //nastaveni FSR = +-2.048V
adcOut = ads.readADC_Differential_0_1(); //nacteni hodnoty z AD převodniku
if (adcOut < 16204)
{
    ads.setGain(GAIN_FOUR); //nastaveni FSR = +-1.024V
    adcOut = ads.readADC_Differential_0_1(); //nacteni hodnoty z AD převodnik
    if (adcOut < 16204)
    {
        ads.setGain(GAIN_EIGHT); //nastaveni FSR = +-0.512V
        adcOut = ads.readADC_Differential_0_1(); //nacteni hodnoty z AD převodniku
        flow = (adcOut - 25600) / 34.13; //prevod cisla z ADC na prtok
    }
    else
    {
        flow = (adcOut - 12800) / 17.066; //prevod cisla z ADC na prtok
    }
}
else
{
    flow = (adcOut - 6398, 6) / 8.5338; //prevod cisla z ADC na prtok
}
}
```

Proměnné v ukázce kódu:

- ❖ adcOut – slouží pro načítání hodnot z AD převodníku
- ❖ flow – proměnná představující průtok

4.2 Obsluha OLED

Pro obsluhu displeje jsou použity knihovny Adafruit_SSD1306 a Adafruit_GFX stažené z github. Display po zapnutí zobrazí moje jméno a logo firmy. Logo firmy bylo upraveno tak, aby jej bylo možné vypsát na displej. Logo bylo převedeno do bitmapy pomocí internetového nástroje image2cpp.

STANISLAV MORÁVEK JHV

Obrázek 26: Logo

Poté se na displeji vypisuje informace o připojování k Wi-Fi síti. Po úspěšném připojení se na displeji zobrazují hodnoty měřené pomocí AD převodníku.

4.3 Obsluha Wi-Fi

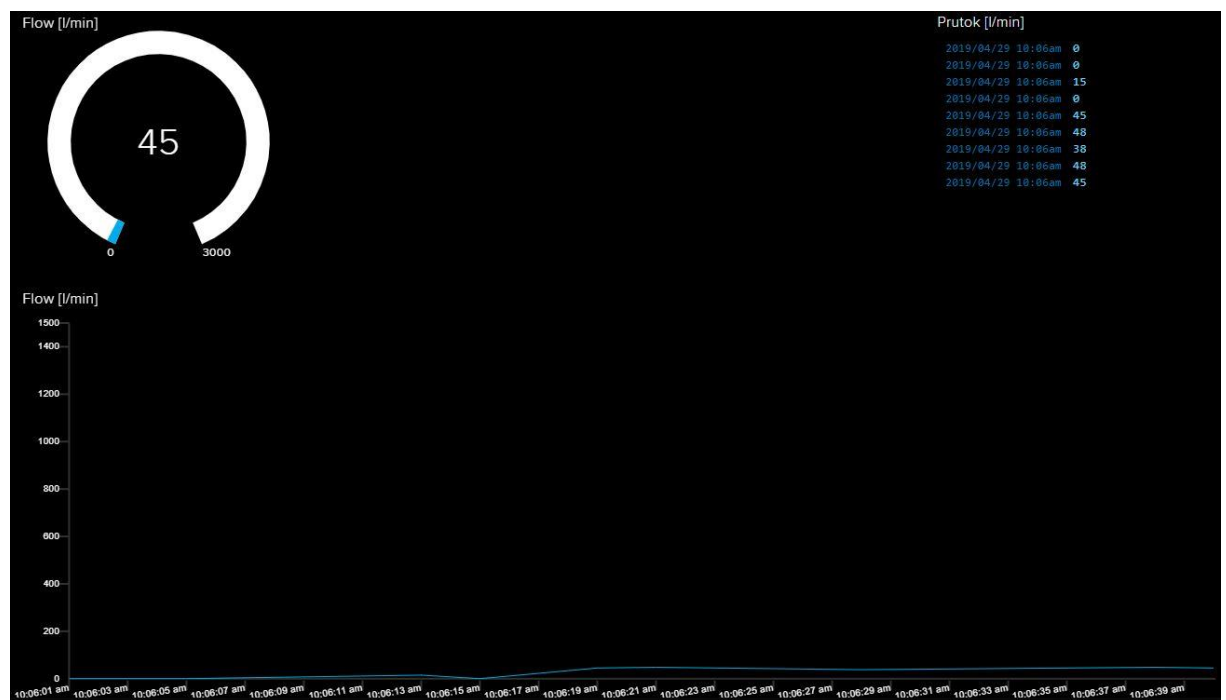
Pro obsluhu Wi-Fi je použita knihovna ESP8266WiFi.h stažená z github.

Pro připojení k Wi-Fi je použit příkaz `wifi.begin(WLAN_SSID, WLAN_PASS)`, kde WLAN_SSID je název Wi-Fi sítě a WLAN_PASS je heslo pro připojení k této síti.

4.4 Odesílání dat na webové rozhraní Adafruit IO

Pro možnost vzdálené kontroly měřených hodnot (průtoku) je použita internetová služba Adafruit IO. Jedná se o službu mimo jiné poskytující i cloudové úložiště. To je v práci využito. Po registraci je nutné vytvořit „proměnnou“ (feed) pro ukládání hodnot. Poté je nutné vygenerovat bezpečnostní klíč, který slouží k připojení k serveru. [11]

Dále je na Adafruit IO vytvořena „přístrojová deska“ (dashboard) kam možné vložit grafy nebo bargrafy pro sledování měřené veličiny (feed). [11]



Obrázek 27: Náhled na „přístrojovou desku“ dashboard

Pro odesílání dat na Adafruit IO jsou použity knihovny `Adafruit_MQTT_Client.h`, `Adafruit_MQTT.h` stažené z github.

Aby bylo možné odesílat data na server Adafruit IO, je nutné vytvořit MQTT klienta. Je nutné zadat název serveru, číslo portu serveru, uživatelské jméno a klíč.

Inicializace MQTT klienta:

```
#define AIO_SERVER      "io.adafruit.com"
#define AIO_SERVERPORT 1883
#define IO_USERNAME    "xxxxxxxxxxxx" //moje uzivatelske jmeno
#define IO_KEY         "xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx" //klic

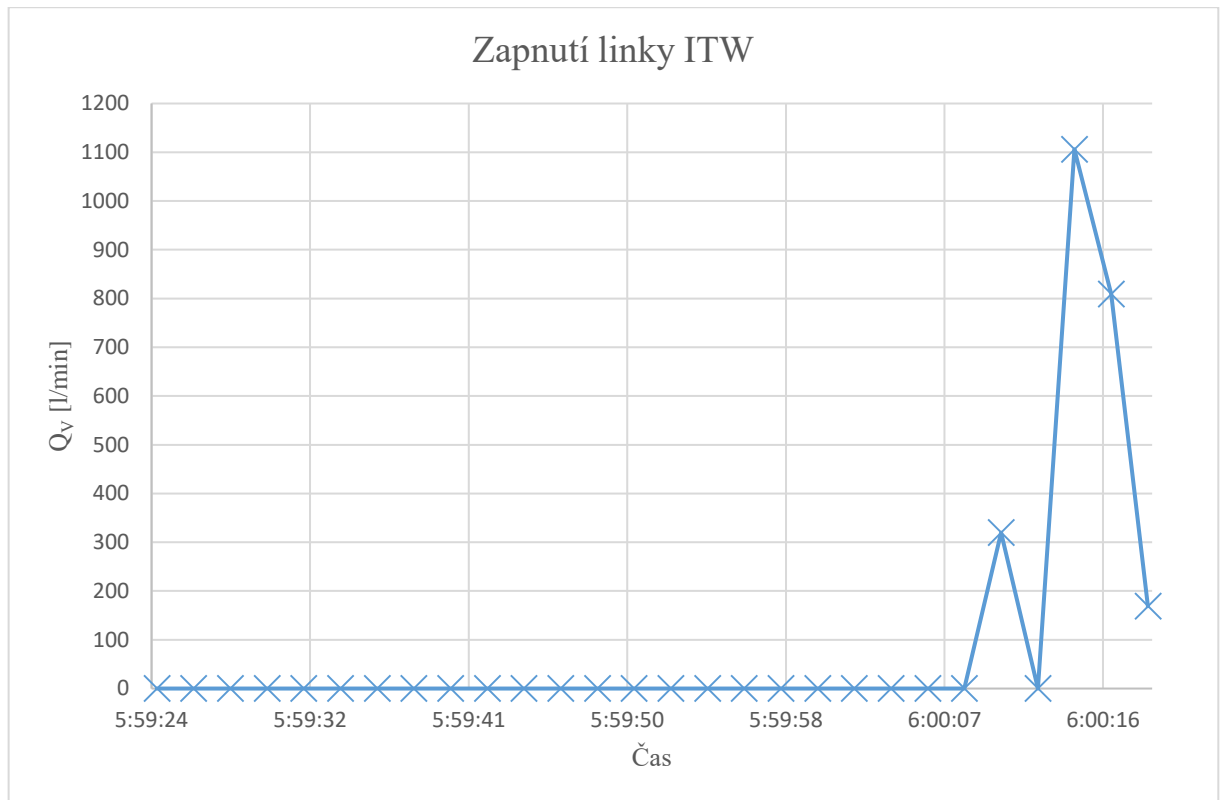
WiFiClient client;

Adafruit_MQTT_Client mqtt(&client, AIO_SERVER, AIO_SERVERPORT, IO_USERNAME, IO_KEY);

Adafruit_MQTT_Publish prutok = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, IO_USERNAME "/feeds/pru-
tok");
```

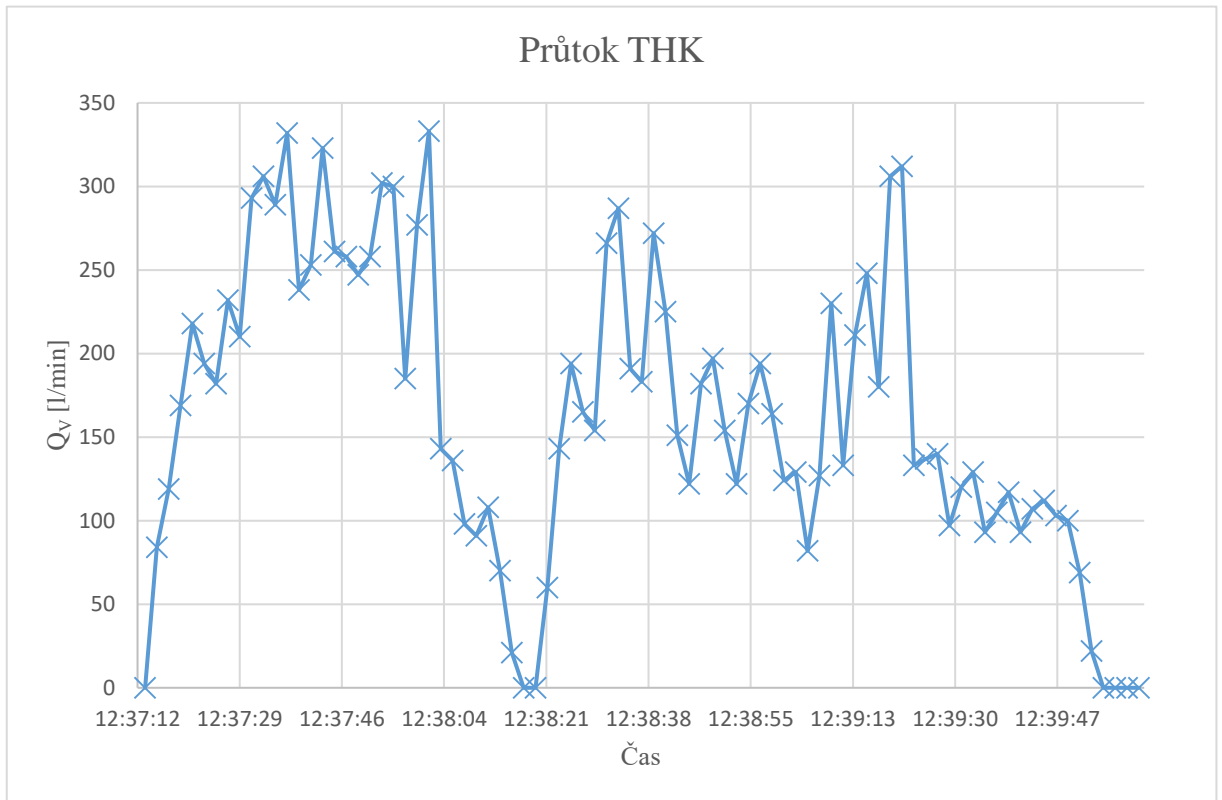
5 NAMĚŘENÁ DATA

Výrobek byl ověřen ve firmě zabývající se návrhem a výrobou automatických výrobních linek (JHV-ENGINEERING). Měření bylo prováděno na automatické lince na výrobu dílů pro automobilový průmysl (ITW). Linka byla ve fázi testování a seřizování, čemuž odpovídají i naměřená data (linka nebyla v plném provozu, fungovaly pouze její části). Významnou částí měření je zapnutí stroje.



Obrázek 28: Naměřená data ITW

Další měření bylo provedeno na jiné automatické lince na výrobu automobilových dílů (THK). Tato linka byla také ve fázi testování a seřizování.



Obrázek 29: Naměřená data THK

Měření bylo prováděno celkem asi 20 hodin a za tuto dobu bylo naměřeno přes 40 000 dat. Data je možné z Adafruit IO stáhnout ve formátu csv.

ZÁVĚR

Podářilo se navrhnut a sestrojít zařizení pro vzdálené sledování průtoku. Zařizení bylo prakticky ověřeno ve firmě zabývající se návrhem a výrobou automatických linek. Firma poskytla k práci některé komponenty a prostor pro ověřeni zařizení.

Díky tomu, že použitý průtokoměr SFAM-62-3000L-TG12-2SA-M12 obsahuje i displej pro zobrazení měřeného průtoku, bylo možné určit i chybu měření. Chyba měření je nižší než 1 %.

Dalším vylepšením výrobku by bylo například využití dalších volných vstupů AD převodníku a připojení například čidla tlaku. Bylo by tak možné sledovat například pokles tlaku při velkých průtocích.

Dalším vylepšením by bylo přidání ochranných prvků na napájecí část zařizení proti přepólování a překročení maximálního napájecího napětí. Další ochranné prvky by byly přidány i na měřicí část, zvláště ochrana AD převodníku. Při překročení maximálního vstupního napětí obvodu ADS1115 může dojít k jeho nevratnému poškození. Dále by byla vhodná možnost zvolit si, zda je analogový vstup napět'ový nebo proudový.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Sensors/Vision systems. *Festo* [online]. b.r. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/17075/Sensorenbrochure_EN_2012-08b_low.pdf
- [2] Průtokoměry SFAM-62. *Festo* [online]. b.r. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/14314_14385.htm#id_10389
- [3] Proudová smyčka 4-20 mA - obecný popis. *Automatizace.HW.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>
- [4] Průtokoměry SFAM. *Festo* [online]. b.r. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_CS/PDF/CZ/SFAM_CZ.PDF
- [5] 2-Color Display Digital Flow Switch: Series PFM. *SMC Pneumatics.com* [online]. b.r. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/PFM.pdf>
- [6] D1 mini Pro V1.0.0(retired) [WEMOS Electronics]. *WEMOS wiki [WEMOS Electronics]* [online]. wemos, 2018 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: https://wiki.wemos.cc/products:retired:d1_mini_pro_v1.0.0
- [7] TR161. *Katalog součástek* [online]. b.r. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.teslakatalog.cz/TR161.html>
- [8] ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator. *Texas Instruments* [online]. b.r. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>
- [9] MP2315: High Efficiency 3A, 24V, 500kHz Synchronous Step Down Converter. *MPS* [online]. b.r. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://www.mouser.com/ds/2/277/MP2315_r1.01-478439.pdf
- [10] BCC M453-0000-1A-RM069-006. *Balluff* [online]. b.r. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: http://publications.balluff.com/mongodb_pdb/public_pdb_material.php?id=226882&con=en&ws=approval
- [11] What is Adafruit IO?. *Adafruit* [online]. b.r. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/welcome-to-adafruit-io/what-is-adafruit-io>