



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

MĚŘENÍ PRŮTOKU V MIKROFLUIDNÍM SYSTÉMU SE ZÁZNAMEM A SDÍLENÍM MĚŘENÝCH HODNOT

FLOW MEASUREMENT IN MICROFLUIDIC SYSTEMS WITH RECORDING AND SHARING OF MEASURED
VALUES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Duša

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

Student: Martin Duša

ID: 203212

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Měření průtoku v mikrofluidním systému se záznamem a sdílením měřených hodnot

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Proveďte literární rešerši v oblasti měření průtoku v laboratorních průtokových systémech malých objemů a zabývejte se principy měření průtoku. 2) Navrhněte optimální metodiku měření průtoku v nízkoobjemovém průtokovém systému, způsob záznamu a zobrazování měřených dat s využitím mikroprocesorové techniky (Arduino/ESP32). 3) Vyberte vhodný průtokový senzor. Navrhněte monitorovací systém pro měření průtoku, záznam a sdílení měřených hodnot. Navrhněte také způsob připojení k mikrofluidnímu systému a postup spuštění a ukončení záznamu. 4) Data musí být dostupná vzdáleně přes webové rozhraní. Navrhněte k tomuto účelu webovou databázi a komunikační rozhraní. 5) Realizujte navržený systém. 6) Vytvořte vhodné minimalistické uživatelské rozhraní pro přihlášení a zobrazování zaznamenaných hodnot na webu s rozlišením jednotlivých měření a možnosti exportu dat. 7) Ověřte správnou funkci realizovaného systému v reálném průtokovém systému při simulovaných změnách průtoku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Dixit, Ch. K., Kaushik, A.: : Microfluidics for Biologists. Springer, 2016. ISBN-10: 3319400355

[2] Prophet, G.: IDT MEMS-based flow sensor modules for liquids & gases – in distribution. 2017. Dostupné z [https://www.eenewsembedded.com/news/idt-mems-based-flow-sensor-modules-liquids-gases-distribution.]

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 31.7.2020

Vedoucí práce: Ing. Vratislav Čmiel, Ph.D.

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na měření průtoku, mikrofluidní systémy a realizaci systému, který je schopný měřit průtok a sdílet data s možností jejich vizualizace přes webové rozhraní. První část práce je věnována teoretické rešerši, která se stručně zabývá teorií průtoku a dalšími pojmy, které k průtoku náležejí. Dále jsou zde uvedeny principy průtokoměru používané v laboratorním prostředí, jejich výhody či aplikace. Druhá část teoretické rešerše je věnována mikrofluidním systémům. V této části jsou popsány prvky, které tvoří mikrofluidní systém, jejich možnosti a aplikace. Poslední část práce je věnována realizaci měřicího systému. Realizace obsahuje návrh měřicího systému, kde je uveden výběr mikrokontroléru, senzoru a celkový návrh měřicího systému. Ve softwarovém řešení jsou obsaženy použité platformy a ukázky algoritmizace. Ke konci je popsána fyzická realizace celého systému, popis kalibrace a shrnutí výsledků.

Klíčová slova

Měření průtoku, mikrofluidní systémy, ESP32, sdílení dat, XAMPP, principy průtokoměrů, kalorimetrický senzor, FS1012, operační zesilovač, PHP

Abstract

This paper is focused on flow measurement, microfluidic systems and realization system, which is able to flow measure and share with the possibility of their visualization via web interface. The first part of the work is devoted to the theoretical research, which briefly deals with the theory of flow and other concepts that belong to the flow. There are also mentioned principles of flowmeter and their advantages or applications. The second part is devoted to microfluidic system. This section describes the elements that make up the microfluidic system, their capabilities and applications. The last part is devoted to the realization of the measuring system. The implementation includes a design of the measuring system, where the selection of microcontroller and sensor is given. The software solution includes used platforms and examples of algorithmization. At the end, the physical implementation of the whole system and calibration is described.

Keywords

Flow measurement, microfluidic systems, ESP32, data share, XAMPP, principles of flowmeter, calorimetric sensor, FS1012, operational amplifier, PHP

Bibliografická citace:

DUŠA, Martin. Měření průtoku v mikrofluidním systému se záznamem a sdílením měřených hodnot. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126699>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Vratislav Čmiel.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření průtoku v mikrofluidním systému se záznamem a sdílením měřených hodnot“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Mé první poděkování bych chtěl věnovat svému vedoucímu práce panu Ing. Vratislavu Čmielovi, Ph.D. za trpělivost, odborné rady, čas, přístup a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Hrachovi za obětavost a rady při vývoji měřicího systému. Zvláštní poděkování bych pak chtěl věnovat své rodinně za podporu při studiu, svojí přítelkyni za psychickou podporu a přátelům za rady a morální podporu.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	13
1. Způsoby měření a Teorie Průtoku.....	14
1.1 Teorie v průtoku.....	14
1.2 Metody měření	16
1.2.1 Požadavky na senzory.....	16
1.2.2 Princip rozdílu tlaku.....	16
1.2.3 Vírové	17
1.2.4 Turbínové a lopatkové	18
1.2.5 Ultrazvukové.....	18
1.2.6 Tepelné.....	19
1.2.7 Optické.....	20
1.2.8 Princip Coriolisovy síly	22
2. Mikrofluidní systémy a jeho součásti	23
2.1 Mikrofluidní čerpadla.....	24
2.2 Mikrofluidní čipy	26
2.2.1 Směšovací a čerpací čipy	26
2.2.2 Druhy výroby	26
2.3 Ostatní	27
3. Návrh měřícího systému	29
3.1 ESP32DevKit V4	29
3.2 Průtokový senzor FS1012 -1002-LQ	30
3.3 Napájení	35
3.4 Připojení modulů a ostatních komponent.....	36
4. Softwarová realizace Měřícího systému.....	40
4.1 Algoritmizace měřící jednotky.....	40
4.2 XAMPP	44
4.3 Webové rozhraní	45
4.4 Vizualizace.....	47
5. Hardwarové řešení měřícího systému	49
5.1 Deska plošných spojů.....	49

5.2 Konstrukční krabička	50
6. Zkušební měření a kalibrace	52
7. Shrnutí.....	63
Závěr	64

Seznam obrázků

Obr. 1-1 Ovlivnění toku podle velikosti Reynoldsova čísla. Nahoře turbulentní proudění a dole laminární. [22].....	15
Obr. 1-2 Princip tlakového diferenčního průtokoměru využívající clony. Clona (orifice plate) je dole připevněna šroubem (stud) a matek (nut) [18].....	17
Obr. 1-3 Znárodnění Kármánovy stezky a principu vírových průtokoměru.....	17
Obr. 1-4 Turbínový rychlostní průtokoměr. Průtok (flow) je hnán přes rotující část (rotor), kterou snímá otáčkoměr (counter sensor) nebo pohybový senzor (motion sensor). [19]	18
Obr. 1-5 Ultrazvukový průtokoměr na Dopplerově principu.	19
Obr. 1-6 Kalorimetrický princip [20]	20
Obr. 1-7 Nahoře optické senzory na principu L2F a dole princip scintilace.	21
Obr. 2-1 Základní zapojení mikrofluidního systému.....	23
Obr. 2-2 Princip peristaltického čerpadla [24].....	24
Obr. 2-3 Jedno-kanálové injekční čerpadlo. [25].....	25
Obr. 2-4 Vizualizace zapojení s maticovým ventilem (M-SWITCH) a třícestným ventilem (2-SWITCH). Kde na 2-SWITCH jsou připojeny zásobníky s obnovovacím roztokem (Recover) a odpadem (Waste), které jsou vedeny přes měřič průtoku (Flow unit). Na M-Switch jsou pak napojeny činidla (Reagents). [31]	27
Obr. 2-5 Průřez kolébkového ventilu v poloze vypnuto. [32]	28
Obr. 3-1 Diagram zapojení měřícího systému.	29
Obr. 3-2 Ukázka pinů na ESP32 DevKit V4. Deska na obrázku byla převzata z [43]	30
Obr. 3-3 Ukázka senzoru průtoku FS1012 [5].....	31
Obr. 3-4 Diferenční zapojení operačního zesilovače.....	32
Obr. 3-5 Zapojení senzoru a zesilovače.....	34
Obr. 3-6 Závislost napětí na průtoku deklarovanou výrobcem u senzoru FS1012-1002-LQ [5]	34
Obr. 3-7 Schéma zapojení regulátoru	35

Obr. 3-8 Znázornění I2C a SPI	36
Obr. 3-9 OLED displej [44]	37
Obr. 3-10 Modul pro zapojení microSD karty [45]	37
Obr. 3-11 Zapojení periférií do ESP32 DevKit 32D	38
Obr. 3-12 Porovnání rušení za použití různých metod jeho potlačení. Popisek osy x je počet naměřených vzorků a osy y je hodnota vzorkovaného signálu. Legenda grafu zleva doprava bez použití kondenzátoru, s kondenzátorem, multisampling a kondenzátor. [42]	39
Obr. 4-1 Diagram přenosu a zpracování dat.	40
Obr. 4-2 Diagram programu měřící jednotky	41
Obr. 4-3 Převodní charakteristika napětí na vzorky v různých poklesech. [42].....	42
Obr. 4-4 Diagram s algoritmizací funkce <i>makeSDfile()</i>	42
Obr. 4-5 Diagram s algoritmizací funkce <i>loop()</i>	43
Obr. 4-6 Ukázka prostředí programu phpMyAdmin	45
Obr. 4-7 Úvodní přihlašovací stránka	45
Obr. 4-8 Vizuál rozcestníku	46
Obr. 4-9 Naměřené hodnoty nahrané do databáze.	47
Obr. 4-10 Zobrazení průtoku s ilustračními daty	48
Obr. 5-1 Návrh desky plošných spojů.	49
Obr. 5-2 Osazená pracovní deska a uložena v krabici.	50
Obr. 5-3 Krytí senzoru a konstrukční krabice s ručně obráběnými otvory.....	51
Obr. 6-1 Výsledný měřící systém.	52
Obr. 6-2 Měření na infuzní pumpě	53
Obr. 6-3 Závislosti napětí na průtoku senzoru a jejich vlastní odečet v závislosti na směru průtoku.	55
Obr. 6-4 Graf vytvořený z hodnot odečtených z obr 4-3.....	55
Obr. 6-5 Napěťový výstup ze zesilovače při průtoku 5 ml.....	56
Obr. 6-6 Vliv kondenzátoru na výstupní signál. Žlutá sonda byla umístěna za kondenzátorem a zelená před ním. Červeně jsou označeny filtrovaná místa.	56
Obr. 6-7 Krabicový graf z 1000 vzorků naměřeného vzorkovaného napětí.....	57
Obr. 6-8 Projevení vzduchových bublin signálu.	57
Obr. 6-9 Reakce zesíleného signálu při 50 ml/min.....	58

Obr. 6-10 Krabicový graf vyjadřující rozptyl vzorků v závislosti na délce okna.....	59
Obr. 6-11 Kalibrační křivka vytvořena z exponenciální rovnice o 4 bodech.	60
Obr. 6-12 Kalibrační křivka vytvořena za použití mocninné funkce a 3 bodů.....	62

Seznam tabulek

Tab. 3-1 Tabulka základních parametrů senzoru	31
Tab. 3-2 Tabulka parametrů operačního zesilovače MPC616 a 7	33
Tab. 3-3 Tabulka parametrů LM2575T-5	35
Tab. 3-4 Parametry OLED Displeje	36
Tab. 6-1 Tabulka naměřených hodnot napětí na senzoru při zkušebním měření	53
Tab. 6-2 Výpočet nezesíleného signálu na diferenčním zesilovači.	54
Tab. 6-3 Tabulka chybovosti z kalibrační křivky na obr. 6-12.....	60
Tab. 6-4 Tabulka chybovosti z kalibrační křivky na obr. 6-12.....	62

ÚVOD

Měření a regulace průtoku je jeden z klíčových faktorů pro optimální práci s mikrofluidními čipy. Pracovní částí čipu jsou mikrokanálky, do kterých přivádíme analyzovanou tekutinu. Objem kapaliny proudící v kanálcích se pohybuje v řádech mikrolitrů až nanolitrů. Jelikož se pohybuje v malých řádech, zvyšuje se tím požadavek na citlivost a přesnost regulace průtoku. Tyto faktory poté musíme zohlednit ve výběru senzoru a samotného regulátoru průtoku. Důležitým parametrem pro výběr senzoru je jeho vlastní princip přeměny rychlosti průtoku na elektrický signál.

Proto je první část teoretické rešerše zaměřena právě na principy používané pro měření nízkoobjemových průtoků v laboratorním prostředí a jejich fyzikální interpretaci. Druhá část je věnována popisu mikrofluidních systémů a jeho jednotlivých částí.

Na teoretickou rešerši navazuje praktická část věnující se vytvoření měřícího systému. Systém se skládá ze senzoru FS1012 založeného na kalorimetrii a řídicí jednotky. Základem systému je vývojová deska ESP32 Devkit V4 s integrovaným Wi-Fi modulem. Data odeslané přes Wi-Fi modul jsou uchovány v databázi a vizualizované pomocí webového rozhraní. Jako rozšíření byl přidán modul pro Micro SD kartu, aby bylo možné využít systém bez připojení k Wi-Fi.

Navrhnutý systém byl zrealizován a napájen na DPS a umístěn do konstrukční krabičky. Vyhotovený systém byl odzkoušen při kontrolním měření. Průběh měření a kalibrace systému je rozpracována v předposlední části práce.

Poslední kapitolou je souhrn, kde okomentovány naměřené hodnoty a kalibrační křivka. Jsou zde také popsány nedostatky návrhu a jejich možné řešení. Na poslední kapitolu poté navazuje závěr.

1. ZPŮSOBY MĚŘENÍ A TEORIE PRŮTOKU

Průtok rozlišujeme na hmotnostní a objemový. Objemový lze formulovat jako pohyb objemu kapaliny v uzavřeném prostředí o určitém průřezu, který proteče za jednotku času.[1] Tuto definici lze vyjádřit vztahem:

$$Q_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

Kde Q_V je objemový průtok, ΔV je objem proudící kapaliny a Δt je čas, za který urazí proudící kapaliny dráhu. Stejně je možné definovat i hmotnostní průtok, ale se záměnou objemu tekutiny za její hmotnost. [1]

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

Q_m je hmotnostní průtok, Δm je objem proudící kapaliny a Δt je čas, za který urazí proudící kapaliny dráhu. [1]

1.1 Teorie v průtoku

Metody měření průtoku jsou založené na fyzikálních vlastnostech kapaliny jako je schopnost kapaliny zachovat energii, vliv třecích a setrvačných sil tekutiny na proudění a přenosu tepla mezi kapalinou a okolím.

Bernoulliho rovnice

Rovnice popisuje poměr mezi potenciální a kinetickou energií ve dvou různých bodech proudící tekutiny.

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p + \rho gh = \text{konst} \quad (3)$$

Kde p je tlak kapaliny, g je gravitační zrychlení, v je rychlost proudící kapaliny, h je výška a ρ je hustota kapaliny.[1]

Nusseltovo číslo

Je poměr mezi přenosem tepla pomocí proudění a konduktivního přenosu tepla. Kdy hodnota blíží se 1 odpovídá laminárnímu proudění a turbulentnímu hodnota nad 100.

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (4)$$

Kde α je koeficient přestupu tepla, d je průměr žhaveného drátku, λ je měrná tepelná vodivost.[23]

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo (dále jen Re) popisuje, typ proudění kapaliny v pevném objektu na základě poměru třecích a setrvačných sil částic v tekutině. Změnou proudění je ovlivněna rychlost kapaliny, proto je důležité ji zohlednit. Rozlišujeme tři typy proudění: laminární, které pak přechází do přechodného, a to do turbulentního.

$$\text{Re} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (5)$$

Kde ρ je hustota kapaliny, v je rychlost, D_h je hydraulický průměr a μ viskozita kapaliny. Výsledkem této rovnice je číslo s kritickým bodem, kdy se proud mění z laminárního proudění na turbulentní. [1]

Laminární proudění

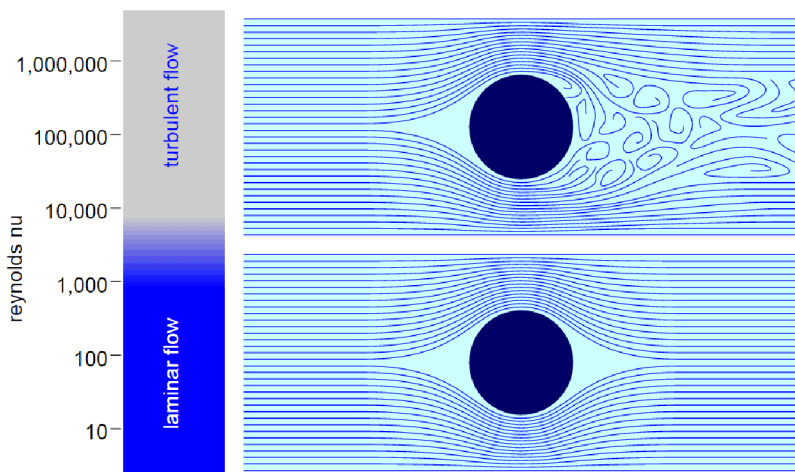
U laminárního proudění převládají účinky třecích sil. Rychlost a tok částic v kapalině není nahodilý a při mísení dvou a více proudů nevznikají turbulence. Rychlost proudění je rozložena parabolicky. Největší rychlost je ve středu osy tělesa a nejmenší na povrchu, kde se projevuje třecí síla nejvýrazněji. Hodnota Re, při které označujeme tok jako laminární je menší než 2000.[4]

Přechodné proudění

Když tok překročí hodnotu Re vyšší než 2000, dostáváme se do nestabilní oblasti a v pozorovaném rozmezí se začínají objevovat známky turbulence. [4]

Turbulentní proudění

U turbulentního proudění dochází k nárůstu třecích sil. Profil proudění je plošší než u laminárního. Rychlost částic tvořící tok kapaliny je různý a přestává být pravidelný. Důsledkem změnou pravidelnosti vznikají víry a turbulence. Kritickým prahem je překročení hodnoty Re vyšší než 4000. Vytváření víru zpomaluje proud kapaliny. [8]



Obr. 1-1 Ovlivnění toku podle velikosti Reynoldsova čísla. Nahoře turbulentní proudění a dole laminární. [22]

1.2 Metody měření

Metody měření je možné rozdělit na přímé a nepřímé. U přímých metod je základem systém, který měří objemový nebo hmotnostní průtok. Měřicí soustava je realizovaná přesně kalibrovanými nádobami. Nádoby se plní kapalinou a v určitý čas je odečtena hodnota symbolizující hodnotu průtoku v mezičase se nádoby vyprázdní. Nepřímé metody, kterým je především věnována tato kapitola, vychází z úvahy o měření výstupního signálu (nejčastěji elektrického) v závislosti na rychlosti nebo kinetické energii kapaliny. [1]

Nepřímé průtokoměry můžeme dále klasifikovat podle snímané veličiny. Senzory snímající rychlost kapaliny jsou např. Průřezové, turbínové, fluidikové, ultrazvukové, indukční, Coriolisovy, tepelné a na průtokoměry snímající změnu kinetické energie. Mezi takové průtokoměry můžeme zařadit deformační, objemové a gyroskopické. [1]. Tato podkapitola je věnována především principům průtokoměrů použitých při měření v laboratorním prostředí a mikrofluidních systémech.

1.2.1 Požadavky na senzory

První požadavkem na výběr senzoru je typ měřeného media (plyn, kapalina, aerosoly apod.) a vlastnosti, kterými kapalina disponuje. U vlastností je brán ohled na viskozitu, tlak, hustotu, teplotu, chemické vlastnosti nebo přítomnost pevných částic. Dále přihlížíme k instalaci a využití průtokoměru. Správnost a spolehlivost měření je vztažná k určitým sensorům a je ovlivněna dalšími komponenty systému jako je filtrace, pumpy a kompresory, boční ventily. Bereme v úvahu i prostředí a parazitní jevy působící na celý systém jako vibrace potrubí, okolní teplota a laboratorní podmínky. Důležitým aspektem v požadavcích jsou provozní vlastnosti senzoru. Mezi ně můžeme zahrnout dobu odezvy senzoru, jeho přesnost, citlivost a opakovatelnost měření. U ekonomické stránky senzoru je důležité přihlídnout nejen k ceně, ale i k nákladům na údržbu, kalibraci a náhradní součástky.[1]

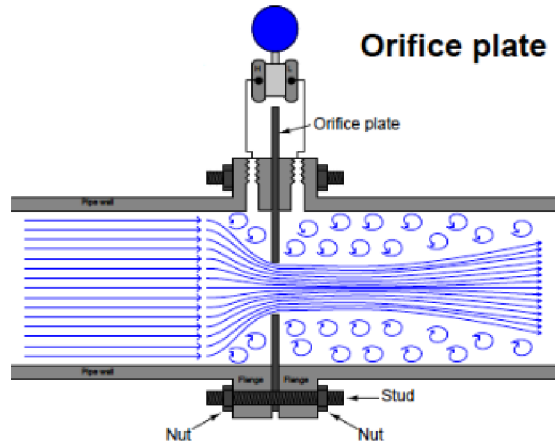
1.2.2 Princip rozdílu tlaku

U tohoto principu využíváme zachování energie. Při zaškrcení nebo zúžení tělesa, kterým protéká kapalina, vzrůstá její kinetická energie. To zapříčiní vzrůst dynamického tlaku, zatím co potenciálová energie klesá a s ní i statický tlak.[1] Rychlost průtoku poté vypočítáme pomocí známého dynamického tlaku, jenž dokážeme vypočítat z rozdílu statického tlaku změřeného pomocí tlakových senzorů umístěných kolmo na osu proudění.[7][8][9] Průtokoměry využívající rozdíl tlaku jsou hojně využívány pro běžné aplikace, díky jejich jednoduché konstrukci a principu.

Clony

Abychom vytvořili zúžení, je nejjednodušší dát do cesty kapalině clonu. Clona je konstrukčně tvořena deskou s vyfrézovanou dírou s funkčně vypočítanou geometrií pro splnění co nejmenší chyby měření. [7] Nevýhodou této aplikace je tření kapaliny o clonu. Tření zapříčiňuje pokles statického tlaku, protože tření mění kinetickou energii na teplo.

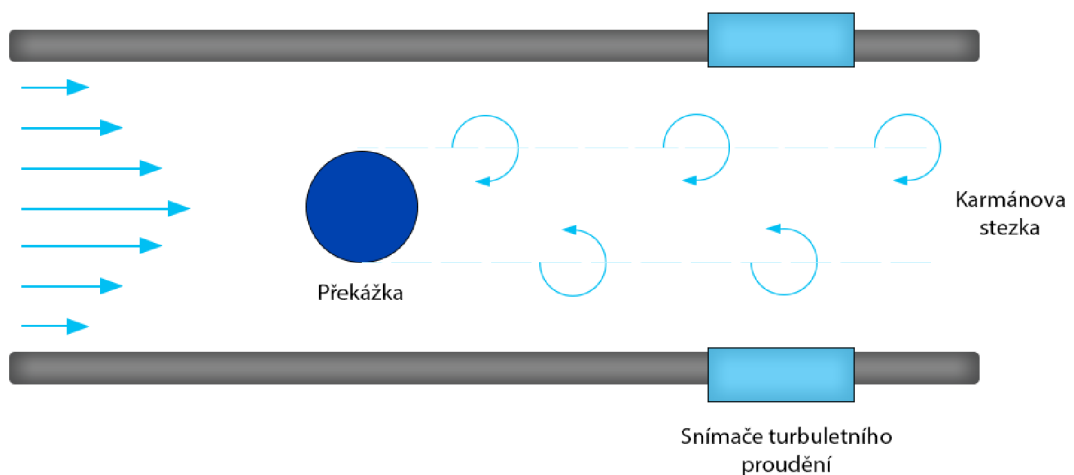
Tím se změní rovnováha v Bernoulliho rovnice (4) a dochází tak k nepřesnostem v měření. Tento jev můžeme omezit úpravou potrubí např. vyhlazením. [9]



Obr. 1-2 Princip tlakového diferenčního průtokoměru využívající clony. Clona (orifice plate) je dole připevněna šroubem (stud) a matek (nut) [18]

1.2.3 Vírové

Rychlostní průtokoměr založený na vyhodnocování objemového průtoku. Rychlost je snímána pomocí Kármánových vírů. Víry vznikají umístěním překážky kolmo na proud kapaliny. Při zvyšování rychlosti se za překážkou sníží tlak. Díky nízkému tlaku se mění laminární proudění na turbulentní, tvořící periodicky střídavé víry. Víry jsou poté unášeny proudem, které utvářejí Kármánovu stezku. Pro snímání potom využíváme piezoelektrických a kapacitních senzorů. Sensory na kapacitním principu snímají vychylování pádla a u piezoelektrického principu je pádlo tlakově namáháno kmitáním. Kmity převádíme na elektrické impulzy a přepočítáváme na rychlost průtoku. Frekvence víru je ovlivněna výběrem překážky. [39]



Obr. 1-3 Znázornění Kármánovy stezky a principu vírových průtokoměru.

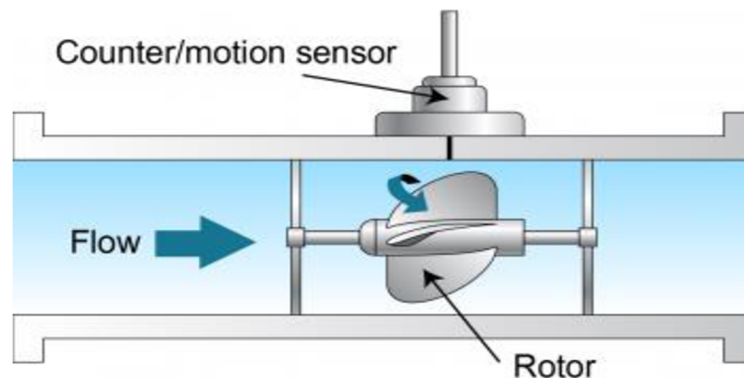
Vírové průtokoměry jsou přesné, s malou tlakovou ztrátou a vhodné pro extrémní podmínky. Svou jednoduchostí a spolehlivostí nahrazují v aplikaci průtokoměry na principu tlakové diference. Největší omezení vírových průtokoměrů je v jejich vlastním principu. Víry jsou znatelné až od hodnoty Re víc než 5000, a s tím je omezená minimální a maximální rychlost průtoku. Jsou citlivé na parazitické jevy, jako jsou vibrace potrubí a jsou také nevhodné pro abrazivní kapaliny. [1]

1.2.4 Turbínové a lopatkové

Proud tekutiny uvádí do pohybu rotační těleso (lopatkový rotor) spojené s měřicím systémem. Signál, který pak vystupuje ze senzoru je lineárně závislý na rychlosti průtoku.

Turbínové

Základem turbínových průtokoměrů je otočný rotor s radiálními lopatkami, které se ve většině případů umísťuje do střední osy proudění. Aplikace turbíny v senzoru se různí podle potřeby použití. Např. Zásuvné průtokoměry s malou turbínou umístěnou mimo osu proudění (měření zemního plynu), průtokoměr se dvěma protiběžnými rotory (měření paliva) nebo tvaru vrtule.



Obr. 1-4 Turbínový rychlostní průtokoměr. Průtok (flow) je hnán přes rotující část (rotor), kterou snímá otáčkoměr (counter sensor) nebo pohybový senzor (motion sensor). [19]

Lopatkové

Lopatkové průtokoměry se liší od turbínových polohou lopatek. Tyto průtokoměry mají lopatky umístěny kolmo na směr toku kapaliny. Jsou ekonomicky výhodnější a odolnější než turbínové.

Nevýhody turbínových a lopatkových průtokoměrů je neschopnost měření od nulového průtoku, proto výrobce udává minimální měřitelný průtok. Další nevýhodou je odolnost lopatek, kdy jsou poškozovány kavitací a abrazí ložisek. [1]

1.2.5 Ultrazvukové

Princip průtokoměru je založen na rychlosti šíření ultrazvukového vlnění protékající kapalinou a odrazem vln od částic nebo vzduchových bublin v kapalině.[1]

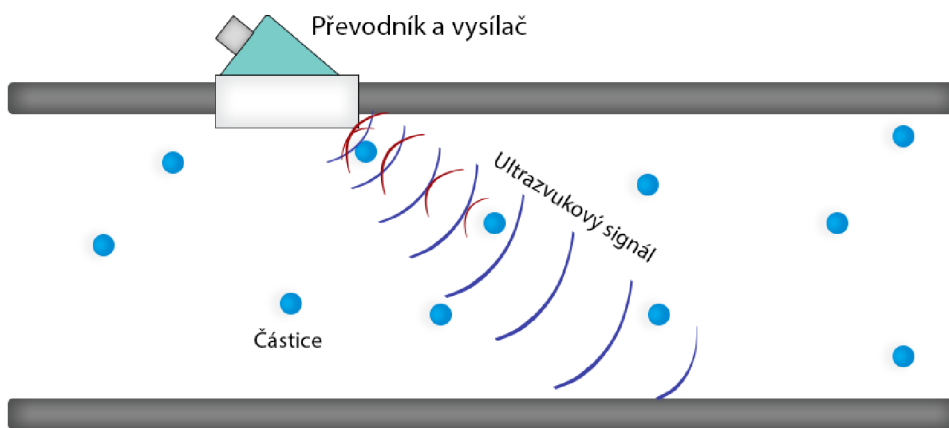
Přímé impulzní

Přijímačem je zaznamenán impuls ve tvaru vlny trvající několik ms. Měřená doba je poté dána průchodem vlnění kapalinou od vysílače k přijímači. [1] Mezi přímé impulzní také patří průtokoměry založené na lomu a odrazu vlnění, kdy dva vysílače proti sobě vyšlou impuls o stejné frekvenci. Když je kapalina v klidu a nekoná žádný pohyb, lom impulsu má při dopadu na přijímač stejnou dobu dopadu, ale při průtoku je tato doba posunuta. [11]

Dopplerovy

Průtokoměry, které využívají odrazení ultrazvukových vln od pevných částic nebo vzduchových bublin. Tyto elementy poté odráží ultrazvukové vlny a pomocí Dopplerova principu se vypočítá rychlost částic v kapalině, která je vztažná k rychlosti kapaliny.

Výhody v použití ultrazvukových senzorů je jejich univerzálnost, kdy můžeme měřit kapaliny či plyny s různorodými chemickými vlastnostmi (agresivní či ultračisté), extrémních teplotních hodnot (-300 až 600 °C) nebo velkém rozsahu tlaku. Jejich spolehlivost a odolnost, vychází z jejich konstrukce, jelikož neobsahují žádné pohyblivé součástky a jsou snadno kalibrovány s vysokou přesností a stálostí měření. Nevýhodou ultrazvukových senzorů je snímání vzduchových bublin, které ovlivňují průchod snímaného zvukového signálu, proto musí potrubí být pod stálým tlakem (plně zaplněné potrubí). Stejným způsobem zanášejí nejistoty měření i turbulentní a vířivé proudy. [11]



Obr. 1-5 Ultrazvukový průtokoměr na Dopplerově principu.

1.2.6 Tepelné

Měří přímo hmotnostní průtok. Princip je založen na výměně tepla mezi jeho zdrojem a okolím. Zdroj je tvořený odporovým tělesem, které předává své teplo proudící tekutině. Přenos tepla je poté úměrný k hodnotě hmotnostního průtoku. Podmínkou chodu průtokoměru je minimalizace teplotních ztrát mimo proudění. [1]

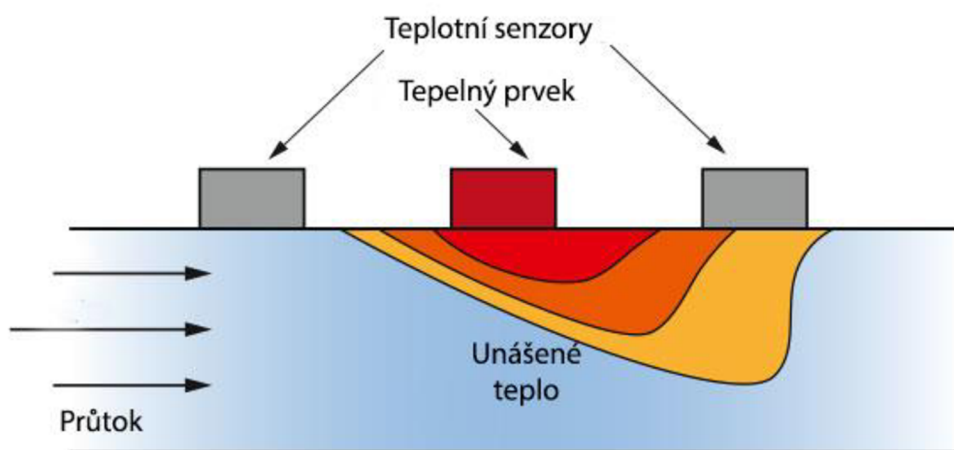
Termoanometry

Jedním z typů tepelných průtokoměrů jsou **termoanometry**. Princip fungování se odvíjí z jejich konstrukce. Mezi dvěma elektrodami je natažen odporový prvek z kovu nebo polovodiče. Odporový prvek je proudem ohříván nad teplotu okolí a při změně rychlosti je ochlazován. V praxi se setkáme s termoanometry s dvěma čidly. Toto zapojení má navíc referenční čidlo měřící teplotu kapaliny. To využijeme ke kompenzaci změny teploty rychlostního snímače a snížení zanesení nejistot do měření. [1]

Kalorimetry

Senzory jsou si stavbou podobné s termoanometrem, liší se pouze v zapojení čidel. Referenční sensor je zapojený s rychlostním snímačem v diferenčním zapojení. Na základě funkce diferenčního zapojení se teploty dvou senzorů odečítají. Čím víc je teplota na rychlostním čidlu odváděna, tím se zvyšuje rozdíl mezi snímači. Rozdíl je potom vztažený k rychlosti průtoku.

Výhodou tepelných průtokoměrů je univerzálnost v aplikaci. Mají velký měřitelný rozsah s vysokou přesností a citlivostí za extrémních podmínek. Je možné je použít pro malé i velké průtoky a nezpůsobují žádnou tlakovou ztrátu. Celkově mezi nevýhody patří citlivost senzoru na měřená média, jeho znečištění a složení. [41]



Obr. 1-6 Kalorimetrický princip [20]

1.2.7 Optické

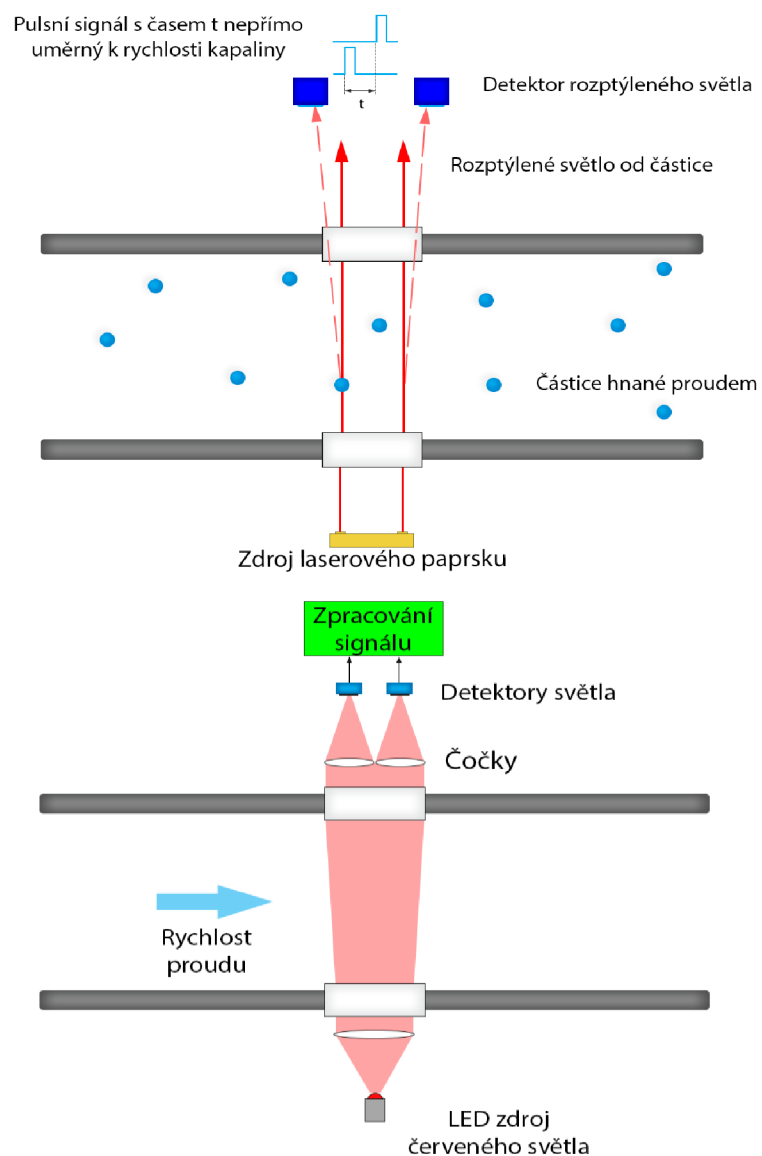
L2F

Princip L2F je založen na dvou laserových paprscích směřujících na detektory. Při průchodu částice skrz první laser je snímačem zaznamenána změna v podobě rozptylu světla a detekována snímačem. Odpověď detektoru na rozptyl světla je obdélníkový signál. Stejný průběh se odehrává na druhém laseru a detektoru. Časový odstup mezi dvěma impulsy je nepřímo úměrný k rychlosti průtoku. Jelikož jsou lasery bodové a

nepojmou celý profil potrubí, nejsou svazky laseru schopny zaznamenat celkový průtok, proto do soustavy přidáváme tlakový a teplotní snímač pro výpočet Reynoldsova čísla. Tím je vypočítán profil proudění (viz. kapitola 1.1.) Hlavní nevýhodou je předpoklad nutného výskytu částic či vzduchových bublin v kapalině.[40]

Scintilační princip

Dalším principem, vhodnějším pro měření průtoku, je scintilace. Metoda není na rozdíl od L2F závislá na částicích v kapalině, ale na deformaci světla při průchodu určitého objemu kapaliny. Přesnost měření se zvyšuje s Reynoldsovým číslem a tím i scintilační efekt. Zpracování signálu je stejné jako u L2F a to interpretován časovým posunem mezi impulzy. Omezení nastává při použití průtokoměru na nízké rychlosti, kdy turbulentní proudění klesá skoro k nule a tím je přesnost snížena. Další nevýhodou je přítomnost částic v kapalině, které zanáší nejistoty. [40]



Obr. 1-7 Nahoře optické senzory na principu L2F a dole princip scintilace.

1.2.8 Princip Coriolisovy síly

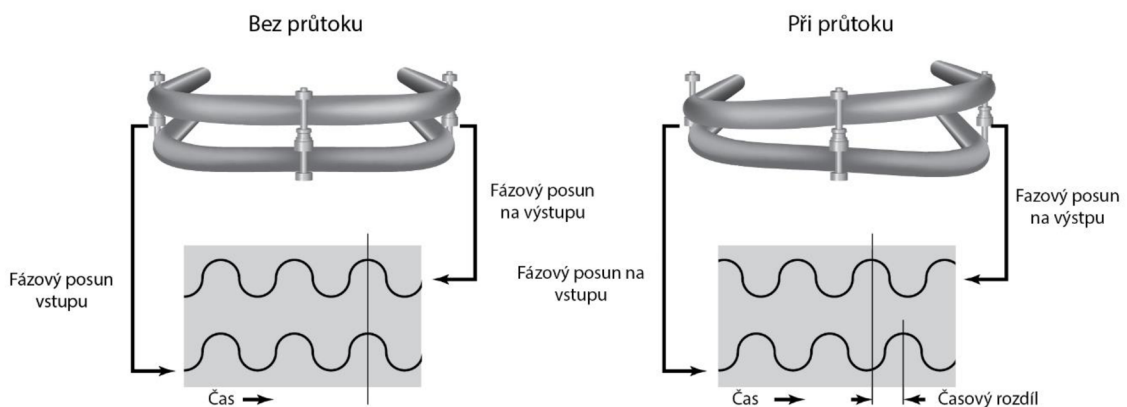
Coriolisův průtokoměr je založen na hmotnostním průtoku a oscilaci trubic vně senzoru. Do trubice rozkmitané o známé frekvenci je přivedena kapalina. Kapalina způsobí změnu fáze kmitání a rychlost průtok je poté přímo úměrná hmotnostnímu průtoku (2). [16]

Největší vliv na měření má trubice. Nejčastěji vybíráme specifický tvar a materiál podle měřeného média a prostředí, kde se můžeme setkat s vibracemi, teplotní roztažností apod. [1]

Přímé trubice jsou odolné k zanesení či ucpání, mají jednoduchou údržbu a tlaková ztráta je minimální, ale díky lineárnímu spojení snímače s potrubním systémem se projevují v měření parazitické kmity potrubního systému. Kmity se můžou odstranit pomocí diferenčního zapojení dvou trubic.

Zakřivené trubice jsou přesnější, citlivější a odolnější na zanášení rušivých vlivů do měření. Příčiny nevýhod pochází z tvaru trubice, které jsou náročnější na údržbu a díky ohybům je způsobena vyšší tlaková ztráta. [17]

Výhodou Coriolisových sensorů je univerzálnost principu, možnost měření hustoty, teploty a viskozity. U vlastností je vysoká přesnost měření, opakovatelnost, jednoduchá kalibrace a možnost obousměrného měření. Nevýhody plynou z daného tvaru trubice a nákladnosti.[1]



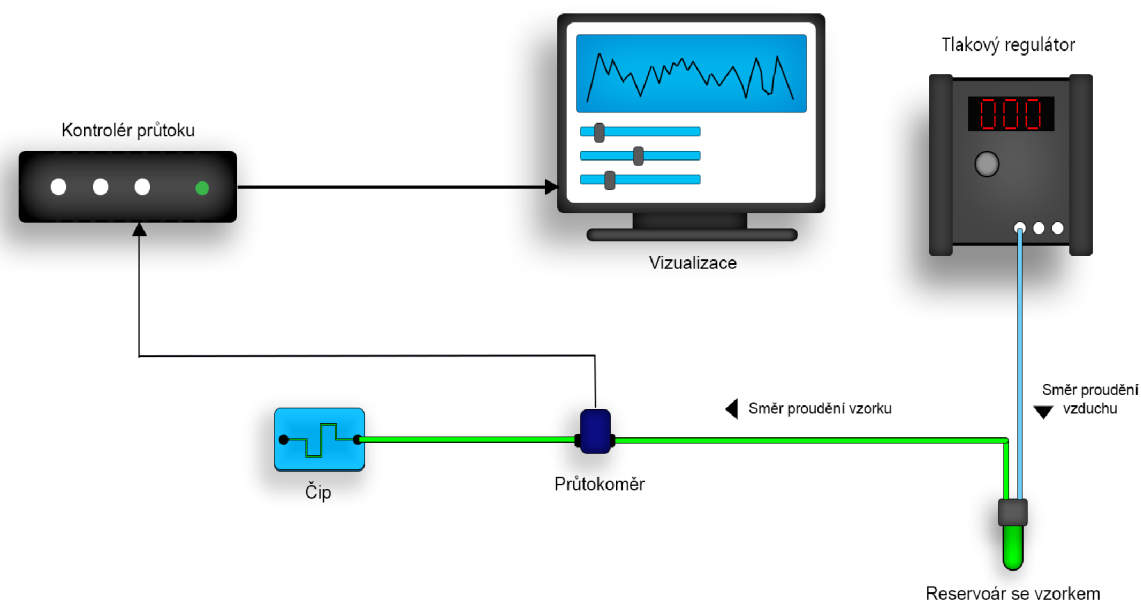
Obr. 1-7 Znáznornění Coriolisova principu. V První části bez průtoku je fáze stejná v druhé části je již průtok přítomen a fáze se posunuje. [20]

2. MIKROFLUIDNÍ SYSTÉMY A JEHO SOUČÁSTI

Mikrofluidika jako taková zkoumá proudění tekutin v pevných kanálcích o rozměrech jednotek až stovek μm , přičemž využíváme výše popsaných efektů a zákonů s minimálním využitím mechanických pohyblivých částí. Právě tyto prvky mají náklonnost k vysoké poruchovosti, ať už způsobené vnějšími vlivy jako kavitace a rezonance nebo vlastním opotřebením. Vypuštění mechanických částí zvýšíme efektivitu a spolehlivost systému, ale snížíme schopnost kontroly nad systémem.

Prvotním záměr mikrofluidiky bylo vytvořit systém, který by byl schopen konkurovat jiným systémům v oblasti zpracování informací. Tento systém, ale naráží na problém s rychlostí přenosu informace, protože rychlost přenosu v mikrofluidice je vztažná k rychlosti zvuku. Nejsilnějším konkurentem mikrofluidiky v přenosu informací byla elektronika, kde rychlost přenosu je závislá na rychlosti světla. Mikrofluidika se potýkala s dalšími technologickými či ekonomickými problémy tehdejší doby, které neumožnili rychlejší vývoj jako např. miniaturizace a technologie pro snížení nákladů. [3]

Pro využití mikrofluidních čipů, ve kterých se odehrávají všechny chemické reakce a snímání, vyžadujeme nutnou regulaci a kontrolu nad zkoumaným analytem. Proto využíváme mikrofluidních systémů, mezi jehož součásti patří přístroje zabezpečující kontrolu a regulaci pomocí čerpadel, senzorů průtoku a tlaku. Dále pak vizualizační a řídicí software pro zpracování výsledků a zajištění kontrolu nad systémem. A ostatní součástky jako elektrické ventily, hadičky, či bublinové pasti.



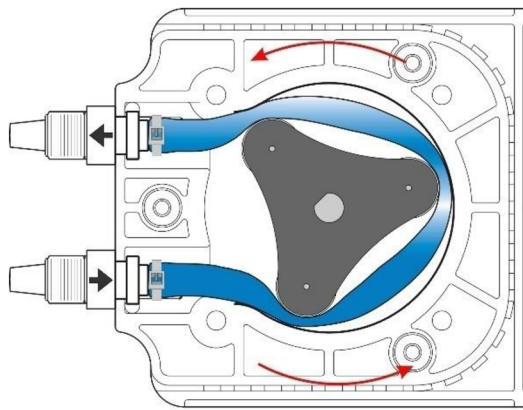
Obr. 2-1 Základní zapojení mikrofluidního systému

2.1 Mikrofluidní čerpadla

Čerpadla v mikrofluidní sestavě zastávají funkci regulaci průtoku. Průtok je důležitým elementem v mikrofluidice, protože díky miniaturizaci se zvyšují požadavky na citlivost a přesnost.

Peristaltická čerpadla

Principem čerpadla je rotor se systémem rotujících disků či válečků vytvářející periodické komprese a relaxace flexibilní hadičky. Díky tomu se kapalina poté čerpá dál do soustavy a tím pumpa vytváří pulsující proud. U peristaltické pumpy lze nastavit pouze rpm, čímž je regulovaná pouze frekvence pulzů. Amplituda poté závisí na počtu rotujících těles a průřezu hadičky.[13]



Obr. 2-2 Princip peristaltického čerpadla [24]

Silnou stránkou peristaltických čerpadel je nepřímý dotyk pohyblivých částí čerpadla s kapalinou. Tím nedochází k poškození pohyblivých součástí, či celého čerpadla chemicky agresivními a abrazivními kapalinami. Dalšími výhodami je uživatelská přívětivost, tichá činnost, připojení hadic je nenáročné a jsou cenově dostupné.[12]

Největším problémem u čerpadel je životnost hadice. Ta ovlivňuje spolehlivost přístroje především v přesnosti, tlaku a rychlosti čerpání. V některých aplikacích (zkoumání buněk citlivé na mechanické namáhání) vyžadujeme rovnoměrný pohyb, což je nemožné nastavit. Regulace tlaku je závislá na rotujících tělesech a flexibilitě hadičky na jejím vnitřním průřezu pak rychlost průtoku. [13]

Injekční pumpa

Součástí injekční pumpy jsou regulovatelný tlačný systém a injekční stříkačka s tekutinou. Principem je elektrický pístový nebo šroubový tlačný mechanismus, který vytváří tlak na píst injekční stříkačky, čímž uvádí do pohybu žádanou kapalinu.[13]



Obr. 2-3 Jedno-kanálové injekční čerpadlo. [25]

Hlavní výhodou této metody je přesnost. Při použití adekvátní stříkačky se můžeme dostat až na dávkování v řádech nanolitřů. Stabilita proudu je dalším plusem stříkačkové pumpy, ale je podmíněna kvalitou stříkačky a lineárního pohonu (odpor pístu, vytváření pulzů pohybem krokového motoru). Mohou také vytvořit vysoký tlak, což usnadňuje práci s vysoko viskózními látkami. Injekční čerpadla mají možnost regulace teploty pomocí zabudovaného ohřevu. [14]

Nevýhody pramení z využití samotné stříkačky. Odezva (od sekund po hodiny) pumpy závisí na odporu látky a pístu. Nárůstem takového odporu může vznikat riziko selhání stříkačky. Dalším minusem je objem pumpy, který je určen objemem komory stříkačky a při odečítání rychlosti průtoku je nutné použít průtokoměr.[14]

Tlaková čerpadla

Regulace průtoku je vyvolána tlakem v uzavřené nádobě. Nádoba je tvořena dvěma otvory, jedním otvorem je pomocí regulátoru do nádoby vháněn vzduch, který vytváří tlak na kapalinu. Kapalina je vytlačována druhým otvorem směrem do systému. Změnou tlaku potom regulujeme průtok kapaliny.[15]

Výhodou tlakových čerpadel je produkovaný rovnoměrný průtok regulovaný tlakem, který lze nastavit podle typu aplikace a snadno reprodukovat specifické tlaky jako systolický a diastolický. Rychlost odezvy systému je v řádech milisekund a disponuje relativně neomezeným objemem pro zkoumanou kapalinu závislou na nádobě. Výběr tlačného plynu můžeme přizpůsobit k měřené látce.

Slabou stránkou čerpadla je externí zdroj tlaku (bomba s plynem, kompresor). Pro sledování rychlosti průtoku musí být přidán senzor. Čerpadlo není schopné vytvořit průtok o objemu menší než 1 μ l.[13]

2.2 Mikrofluidní čipy

Mikrofluidní čipy obstarávají v mikrofluidních systémech pracovní a snímací část zkoumané kapaliny. Čipy jsou tvořeny sadou mikrokanálek leptaných nebo jinak obráběných na destičce z materiálu jako je sklo, keramika, křemík či polymery. Mikrokanálky jsou funkčně vyhotoveny tak, aby splňovaly určitou vlastnost např. míchání, pumpování, detekci apod. Čipy je možné sestavit za sebe a vytvořit tak malé laboratoře a systémy. Kapalina je přivedena pomocí čerpadel skrz přípojky na čipu.

2.2.1 Směšovací a čerpací čipy

Obstarávají výkonnou část u mikrofluidních čipů. Čipy jsou založeny na elektrických nebo neelektrických principech využívající například piezoelektrický nebo termodynamický jev.

Mikropumpy

Mikropumpy se skládají z pohonu, který mění energii na pohyb kapaliny. Energie je dodávána pomocí elektřiny, tepla, tlaku vody nebo vzduchu. Pohon je většinou realizován diskem připojeným na membránu, která vytváří tlak na kapalinu a vytváří tak pohyb. Další součástí jsou ventily, které jsou použity k řízení toku. Ventily můžeme dělit na pasivní (nemají vnější ovládací mechanismus) a aktivní (ovládání externími zařízeními). K přechovávání kapaliny jsou použity mikrokomory. Na výstupu mikrokomory je instalována tryska nebo difuzér k usměrnění toku kapaliny. Jako zdroj tlaku jsou použity rozličné principy jako například již zmíněny piezoelektrický jev, využívající krystal, který při přivedení střídavého proudu mění svoji strukturu a vytváří oscilace závislé na připojeném napětí. Krystal je spojený s membránou a při oscilacích převedených na membránu vytváří tlak na kapalinu. [35]

Mikromíchadla

Mísení látek v mikrofluidice představuje jeden z problémů, protože v malém prostředí je obtížné dosáhnout turbulentního proudění, které zprostředkuje míchání kapalin v makro aplikacích. Proto využíváme aktivní míchadlo nebo principy difuze, přenosu tepla a hydrodynamických sil. Mikromíchadla můžeme rozdělit do dvou skupin, stejně jako ventily, na aktivní a pasivní. [3]

Pasivní mikromíchadla využívají energii proudění a funkčně vyrobené čipy. Mikrokanálky jsou vytvořeny s účelnou geometrií pro zvýšení efektivity při míchání. Aktivní poté využívají energii zprostředkovanou externím zdrojem, jakým je například magnetické nebo elektrostatické pole. [36]

2.2.2 Druhy výroby

Jednoduchou a rychlou metodou je **mikroobrábění**. Využívá k odstranění materiálu frézovací nástroje, které vytváří kanálky v desítkách mikrometrů. Destička musí být vodorovně umístěna s přesnou vzdáleností nástroje od destičky, jinak vznikají nejistoty v hloubce kanálek. [38]

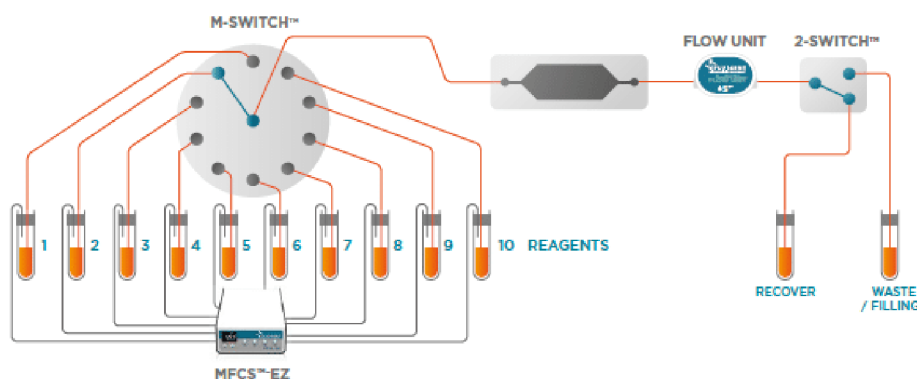
LIGA technologie je zkratkou pro procesy litografie, galvanickým pokovením a vytváření modelu. Postup výroby začíná nanesením fotorezistivní vrstvy s izolačními vlastnostmi na vodivou destičku. Základem litografie je odstranění fotorezistu osvětlením pomocí UV záření přes masku s požadovaným vzorem. Galvanickým pokovením se vzor vyplní kovem a odstraněním přebytečného fotorezistu vzniká razidlo, které se ohřátím otiskne do materiálu nebo vstřikováním.[38]

2.3 Ostatní

Ventily

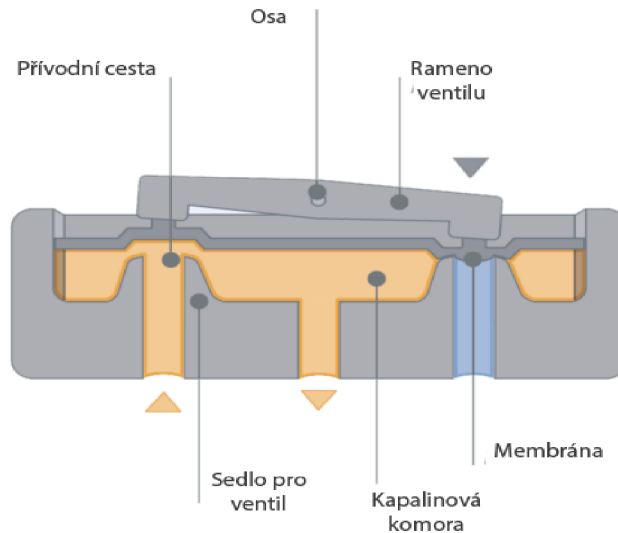
Slouží k připojování a přepojování mezi různými zkoumanými látkami, jde o důležitou součást v pokročilé sestavě mikrofluidního systému, díky níž je možné korigovat a kontrolovat průtok víceru látek. Vlastnostmi, které musí ventil disponovat podle provedení je typ přenášeného média, stupeň chemické odolnosti, připojení hadiček, spotřeba a rozsah přípustného tlaku. Ventily mohou být uspořádány do setů, jsou potom elektronicky řízeny pomocí regulátoru toku. Další možností jsou ventilové matice obsahující víceru připojení s vlastním ovládacím systémem.[30]

Důležitým parametrem je uspořádání ventilů podle vstupu a výstupu. Tento parametr je potom dělen na dvoucestné, třicestné a speciální. Mezi speciální jsou zařazeny maticové, ty mají víceru vstupních a jeden výstupní, kombinace třicestných s krokovým motorem. Dvoucestný má jeden výstup s připojením na jeden reservoár. K třicestnému se mohou připojit dva reservoáry, ve ventilu se potom přepínají cesty pomocí klapky do jednoho výstupu.[31] Ventily pracují na různých principech jako např. klapkový, pákový řízené elektromagneticky. V mikrofluidních systémech se nejčastěji objevují ventily na kolébkový princip. [33]



Obr. 2-4 Vizualizace zapojení s maticovým ventilem (M-SWITCH) a třicestným ventilem (2-SWITCH). Kde na 2-SWITCH jsou připojeny zásobníky s obnovovacím roztokem (Recover) a odpadem (Waste), které jsou vedeny přes měřič průtoku (Flow unit). Na M-Switch jsou pak napojeny činidla (Reagents). [31]

Kolébkový princip je založen na kyvném kolébkovém rameni. Ramínko vytváří kolébavý pohyb, který se řídí pomocí cívky (solenoidu). Jako těsnící prvek je využívána membrána mezi vstupem nebo výstupem a koncem ramínka. Ventily využívající tohoto principu mají velmi dobrou těsnící vlastnost, jednoduché čištění, rezistenci vůči tlaku a dlouhou životnost, proto se často využívají k práci s biologickými materiály. [33]



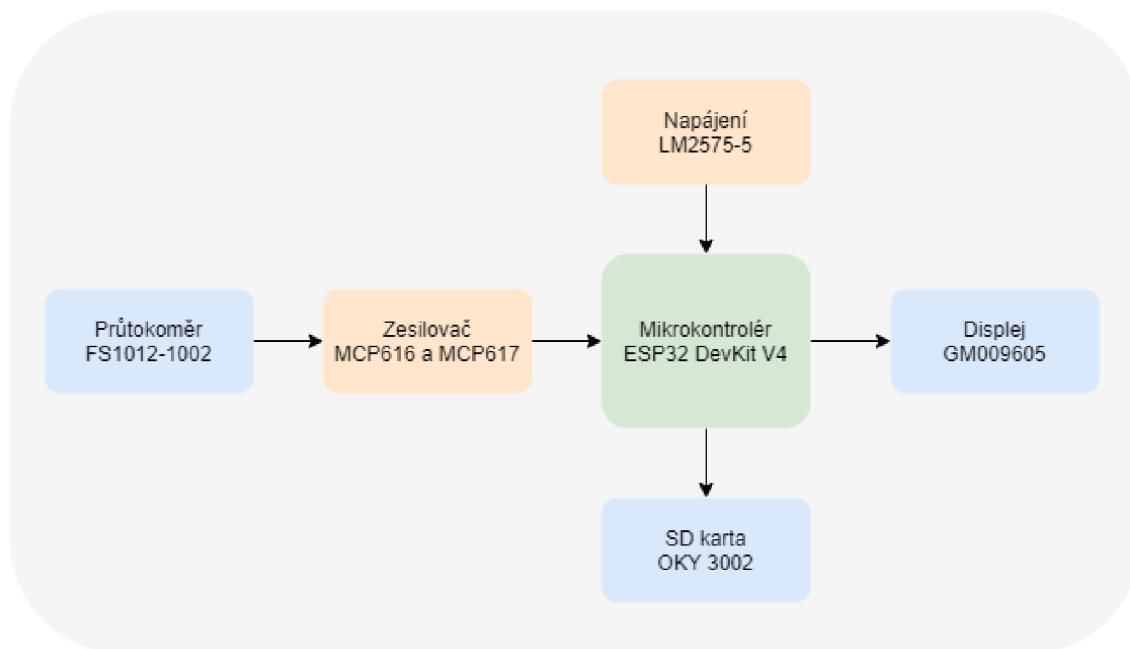
Obr. 2-5 Průřez kolébkového ventilu v poloze vypnuto. [32]

Bublinové pasti

Vzduch v mikrofluidním systému může měnit fyzikální principy v systému a tím zanechat nejistoty do měření. Vzduchové bubliny mohou vznikat při špatném čerpání, proto do systému připojujeme bublinové pasti. Tyto pasti fungují na principu působení hydrodynamické síly vytvořené proudem kapaliny a povrchovým napětím stěnami spolu s mikroporézní membránou z PTFE. Vlivem sil jsou bubliny vytlačovány ven skrz hydrofobní membránu a jsou odváděny pryč. Bublinovou past je možné zapojit aktivně nebo pasivně. Zapojení pasivně je připojení pasti do systému. Při aktivním se k pasti připojí vakuová pumpa. [34]

3. NÁVRH MĚŘÍCIHO SYSTÉMU

V této kapitole jsou uvedeny výpočty, technické parametry a specifikace vybrané k prvkům použitým v měřícím systému. Základním prvkem měřícího systému je řídicí jednotka ESP 32 DevKit V4 od firmy Espressif. Pro své výhodné vlastnosti byl vybrán kalorimetrický senzor FS1012-1002-LQ. Napájení systému je potom zprostředkované pevným spínaným regulátorem. Pro záznam dat je přidán modul pro připojení MicroSD karty a jako orientační zobrazovací prvek je připojený OLED displej.



Obr. 3-1 Diagram zapojení měřícího systému.

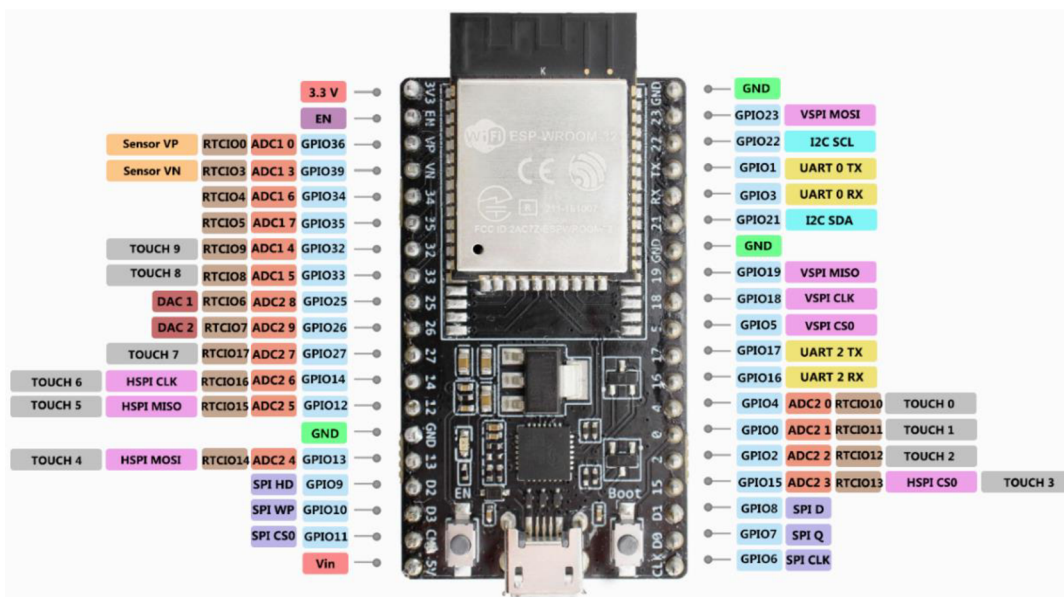
3.1 ESP32 DevKit V4

Je vývojová deska založena na čipu ESP32-WROOM-32D vyvinutá firmou Espressif. Na desce se mimo jiné nachází sběrnice USB/UART zajišťující napájení a komunikaci mezi počítačem a čipem. Dále tlačítko pro resetování desky a tlačítko boot pro nahrání nového firmwaru na flash paměť. Také se zde nachází další komponenty jako regulátor napětí, signalizační dioda apod.

Tato vývojová deska byla vybrána, protože disponuje integrovanou Wi-Fi, kompaktností a výkonem. Programování desky je možné v jazyce C Jako alternativu je možné použít Nodemcu V3 s integrovaným modulem ESP8266 patřící do rodiny Espressif, nebo jakékoliv jiné zařízení pro IOT.

Výkon desky vychází z dvou jádrového procesoru ESP32-D0WD s upravitelnou taktovací frekvencí 80 až 240 MHz. Hlavní výhodou je již integrovaný Wi-Fi modul s frekvenčním rozsahem 2,4 GHz. Odesílané data jsou zabezpečena pomocí běžným standardem OTA. Modul obsahuje i Bluetooth 4.2 a Bluetooth LE (*lowenergy*), standart vhodný pro stálý provoz s odběrem malého množství energie. Na periférii desky jsou

četné rozhraní jako UART, SPI, SDIO, I2C, PWM, I2S, GPIO, kapacitní dotykový senzor, A/D a D/A převodníky. Navíc disponuje integrovaným Halovým senzorem a vnitřní flash pamětí 4 MB.[6]



Obr. 3-2 Ukázka pinů na ESP32 DevKit V4. Deska na obrázku byla převzata z [43]

3.2 Průtokový senzor FS1012 -1002-LQ

FS1012 je hmotnostní průtokový senzor využívající kalorimetrického principu, který je schopný měřit kapaliny a plyny. Senzor ke snímání využívá princip závislosti změny napětí na teplotě. Výrobce udává maximální měřitelný průtok až 1 SLPM¹. Časové rozlišení mezi hodnotami je pod 5 ms, což dává možnost frekvenci záznamu minimálně 250 Hz. Dalším pozitivem je i ochranný film z karbidu křemíku (SiC). Ten se vyznačuje vysokou tvrdostí, odolností, a tak poskytuje ochranu proti abrazivnímu opotřebení. Abrazie senzoru vede k fragmentaci nejzatíženějších částí senzoru, čímž je funkčnost senzoru snižována. Senzor je již sestaven s přípojkami k hadičkám, proto nevyžaduje žádné mechanické úpravy, kromě ochranného krytu. Typickou aplikací senzoru je kontrola výrobního procesu, kontrola proti úniku, HVAC systémy, CPAP, respirační systémy a další.[2]

¹ SLPM je jednotkou objemového průtoku udávající proteklý objem v litrech za minutu a je ekvivalentní k l/min.



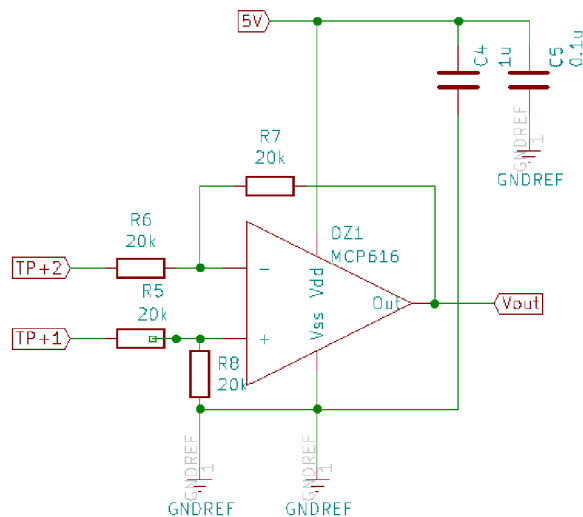
Obr. 3-3 Ukázka senzoru průtoku FS1012 [5]

Senzor byl vybrán podle referencí výrobce. Výstupní signál dosahuje překvapivě dobrým poměrem signál-šum, což je v laboratorním prostředí při měření malých objemů pozitivním aspektem. Jelikož jsme brali v úvahu ekonomickou stránku rozhodnutí padlo na FS1012, který není kalibrováný oproti vyšší třídě FS2012. Jelikož senzor neobsahuje žádné membrány, zúžení nebo pohyblivé mechanické součástky nehrozí obstrukce senzoru a jeho vyřazení z provozu. [5]

Tab. 3-1 Tabulka základních parametrů senzoru

Parametr	Hodnoty
Napájení	3-5 V
Maximální napájení	5,6 V
Odezva senzoru	<5 ms
Rozsah provozní teploty	0 až 85 °C
Maximální tlak	10 barů
Maximální rychlost průtoku	1 SLPM

Zkušební měření senzoru proběhlo bez průtoku s kapalinou o pokojové teplotě. Výrobce deklaruje stálý a neproměnlivý výstup na pinech TP1+ a TP2+. Pomocí multimetru UT39C bylo naměřeno na výstupu 0,12 V s tolerancí 0,001 V při vstupnímu napětí 5 V, kdy výrobní dokumentace udává nejlepší výsledky. Zapojení snímače je ve výrobním listu doporučené jako *Single-Ended*. Zapojení se zesilovačem se dá přirovnat ke klasickému termoanemometr, nebo zapojení diferenciálním zesilovačem jako kalorimetrický, kdy jedno žhavicí těleso funguje jako referenční a druhé rychlostní je od něho odečítané. Jediným pozitivem pro použití diferenčního zapojení nepatrně větší přesnost, proto bylo rozhodnuto pro tento typ.



Obr. 3-4 Diferenční zapojení operačního zesilovače.

Při návrhu diferenčního zesilovače je nutné zahrnout vnitřní odpor senzoru $180\text{ k}\Omega$. Vnitřní odpor je po připojení k diferenčnímu zesilovači sériově spojený s předřadnými odpory a tím ovlivní zesílení operačního zesilovače. V tomto důsledku je možné uvažovat tři způsoby, jak diferenční zesilovač navrhnout. První způsob je, že přičteme vnitřní odpor senzoru k vstupním rezistorům. Tento způsob může snížit kvalitu měření v závislosti na proměnlivosti odporů.

Druhým způsobem je použití minimálně o dva řády vyšší odpory, čímž se stává vnitřní odpor relativně zanedbatelný. Úskalím tohoto řešení je velikost odporu senzoru a tolerance rezistorů. Při výběru rezistorů o dva řády vyšší se dostáváme do hodnot v řádu mega, čímž se hodnota rezistoru díky toleranci může lišit o desetitisíce a různorodost rezistorů potom ovlivní přesnost a kvalitu zesílení rozdílu.

Třetím způsobem je před diferenční zesilovač umístit impedanční oddělení v podobě neinvertujícího operačního zesilovače. Ideálního operačního zesilovače má vstupní odpor nekonečný a výstupní odpor je nulový. Promítnutím těchto vlastností do reálných zesilovačů je možné odpor od zesilovacího prvku oddělit a zvýšit tím přesnost hodnot rezistorů zajišťující zesílení signálu. Třetí způsob se konstrukčně blíží k přístrojovému zesilovači, proto první myšlenkou bylo použití přístrojového zesilovače AD620. Po přezkoumání a doporučení, že tato součástka není technologicky způsobená pro práci při asymetrickém napájení a stejně tak napájením malými hodnotami, bylo od této myšlenky opuštěno. Alternativou AD620 by mohla být AD623, která pracuje lépe při asymetrickém napájení, ale pro nedostupnost a cenu bylo přehodnoceno zakoupení již vyrobeného přístrojového zesilovače. Proto byly vybrány *rail to rail* operační zesilovač MPC616 a MPC617, ze kterých se následně sestrojí obdoba přístrojového zesilovače. Tyto operační zesilovače jsou vyrobené přímo pro práci při nízkém asymetrickém napájení a výrobcem jsou doporučeny pro senzorické aplikace.

Tab. 3-2 Tabulka parametrů operačního zesilovače MPC616 a 7

Parametr	Hodnota
Napájení	2,3 až 5,5 V
Provozní teplota	-40 to +85 °C
Max. výstupní napětí	$V_{dd}^2 - 0,020$ V
Min. výstup	$V_{ss}^3 + 0,015$ V
CMMR	80 až 100 dB

Nevýhodou pro vytvoření vlastního přístrojového zesilovače je riziko nízké hodnoty CMMR. Tato hodnota udávaná v dB představuje, jak zesilovač potlačuje souhlasnou složku rušení k rozdílové složce, tedy čím nižší tato hodnota tím je více se na výstupu projeví šum. [49] Další nevýhodou je nepřesnost ve vybraných rezistorech, což ovlivňuje zesílení. U přístrojových zesilovačů integrovaných do jediného pouzdra jsou již z výroby opatřeny velmi přesnými rezistory, proto je nutné při výběru rezistorů z řady E24 počítat s výrobní tolerancí 1 % a vybrat co nepřesnější rezistory.

Výpočet hodnot rezistorů, které ovlivňují zesílení signálu vychází z limitních hodnot A/D převodníku 0,1 až 1,8 V viz. obr. 4-3. Řešení spodní hranice limitu vychází z konstrukce senzoru a měřiče, kdy detekovatelná změna je až nad 0,1 V. Vrchní limit je poté možné dopočítat. Pro určení zesílení použijeme vzorec pro neinvertující zesilovač.

$$A = 1 + \frac{R_{12}}{R_{34}} \quad (6)$$

Kde A je zesílení, R_{12} jsou rezistory ve zpětné vazbě na neinvertujícím zesilovači a R_{34} jsou rezistory na invertujícím vstupu spojené se zemí. Značení odpovídá podle schématu v příloze. Oba předřadné zesilovače jsou stejné, a proto stačí jediný výpočet. S úvahou použití neinvertujícího zesilovače jako hlavního zesilujícího prvku a diferenčního zesilovače, kde se oba zesílené signály od sebe odečtou se zesílením 1. Proto je možné pro rezistory R_5 až R_8 zvolit jednotnou hodnotu 20 k Ω a R_1 až R_4 poté dopočítat s ohledem na vstupní napětí převodníku. Na obou vstupech zesilovače je ze senzoru přivedeno maximální napětí $V_{max} = 0,12$ V a minimální napětí se poté liší podle snímače na $V_{minTP+2} = 0,05$ V a $V_{minTP+1} = 0$ V. Minimální napětí představuje maximální průtok, který je schopný senzor detekovat. Tato hodnota se musí po zesílení a odečtení co nejlépe přiblížit k hornímu limitu převodníku a zároveň zesílený V_{max} nesmí překročit hodnotu napájení, aby nedošlo k saturaci operačního zesilovače. Při výpočtu byly prvně empiricky zvoleny rezistory $R_{12} = 33$ k Ω a $R_{34} = 1$ k Ω .

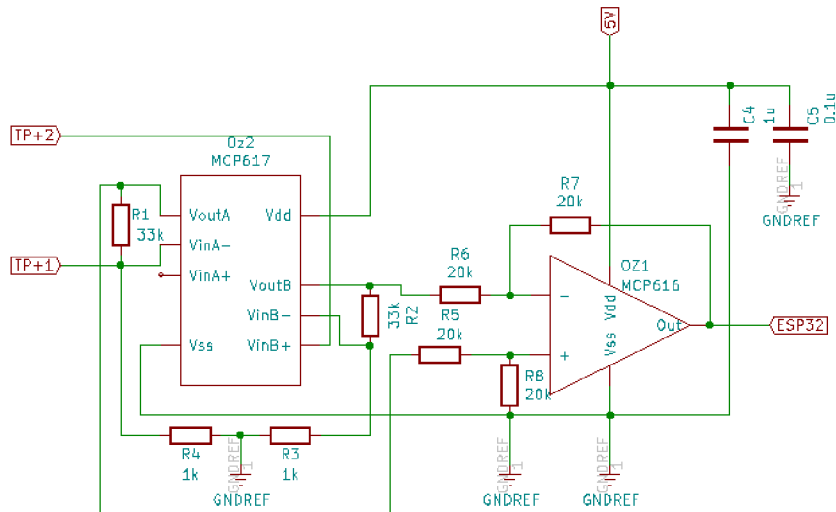
$$A = 1 + \frac{33000}{1000}$$

Výsledná hodnota zesílení je poté 34. Po zesílení V_{max} a V_{min} jsou pořád v limitu převodníku i saturace.

² Napájecí napětí pro zesilovač

³ Hodnota napětí na zemi

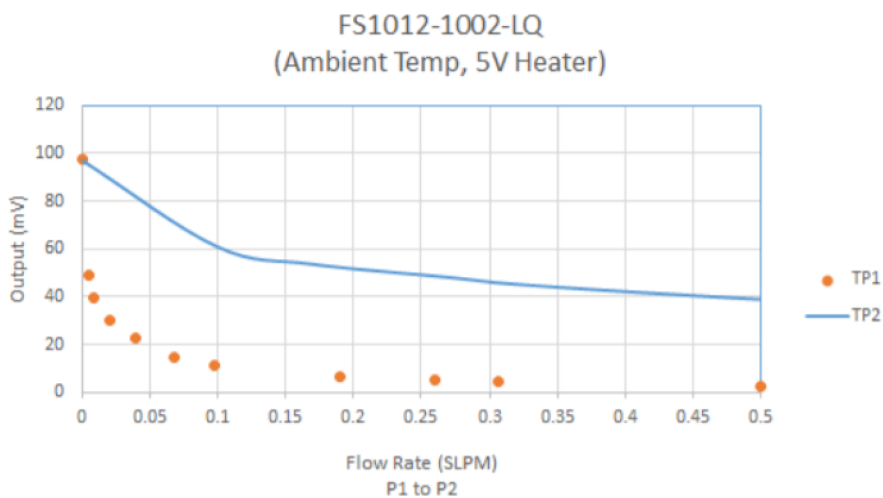
Pro zlepšení napájení zesilovačů jsou přidány blokovací kondenzátory C4 a C5, které jsou umístěny paralelně na operační zesilovače. Kondenzátory filtrují kolísání napětí při velkých odběrech z měniče a zajišťují plynulost napájení. Hodnoty kondenzátorů byly převzaty z výrobního listu výrobce zesilovačů.



Obr. 3-5 Zapojení senzoru a zesilovače

Návrh postupu kalibrace

Senzor nemá pevně danou kalibraci a výstupem je rozdílová hodnota dvou tepelných čidel, proto bude potřeba vytvořit závislost naměřeného napětí na daném průtoku. Tuto závislost můžeme vytvořit pomocí správně kalibrované pumpy a odečítat hodnoty na A/D převodníku, a poté vytvořit jejich závislost. Závislost se dá proložit spojnicí trendu, a tak získat rovnici závislosti. Ta se dá umístit do softwarového zpracování a s její pomocí vypočítat rychlost průtoku. Reálný postup kalibrace je poté popsán v kapitole 7.



Obr. 3-6 Závislost napětí na průtoku deklarovanou výrobcem u senzoru FS1012-1002-LQ [5]

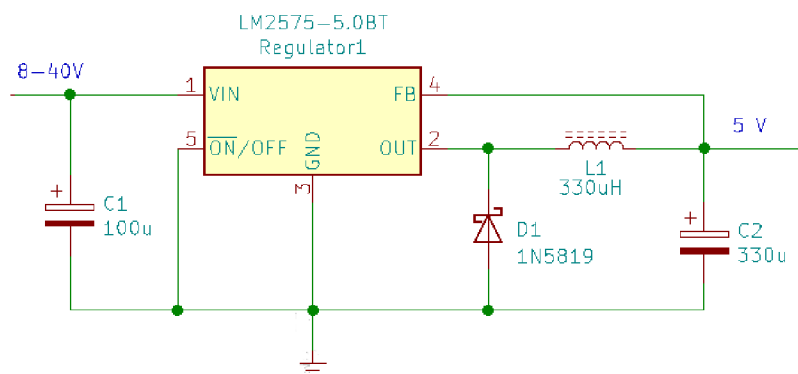
3.3 Napájení

Jelikož většina prvků v měřícím systému je napájena vstupní napětí do 5 V, byl proto zvolen pevný spínaný regulátor s výstupním napětím 5 V. Velkou výhodou spínaných regulátorů je jejich velká účinnost, malé provozní teploty a nevyžadují velké pasivní chlazení jako lineární regulátory. Pro napájení měřícího systému byl použit spínaný regulátor LM2575T-5.

Tab. 3-3 Tabulka parametrů LM2575T-5

Parametr	Hodnoty
Výstupní napětí	5 V
Vstupní napětí	8 až 45V
Max. výstupní proud	1 A
Účinnost	77 %
Frekvence	52 kHz
Provozní teplota	-40 až 125°C

Při těchto hodnotách je jak proudový odběr, tak i pracovní oblast součástky nejideálnější. Regulátor je tvořen 5 piny a to V_{in} , V_{out} , Feedback, On/Off a zemnicí pin. Součástka není kompletní a funguje jako spínač, řízený pulzně šířkovou modulací neboli PWN. Neregulované napětí na pinu V_{in} je přiváděno na tranzistor. Tranzistor zde plní práci přepínače regulovatelného PWN, která je přivedena na pin Feedback jako výstupní napětí z regulátoru. Pro správnou činnost regulátoru je nutné obvod opatřit ještě o filtrační kondenzátory, cívku a schottkyho diodu. [55]

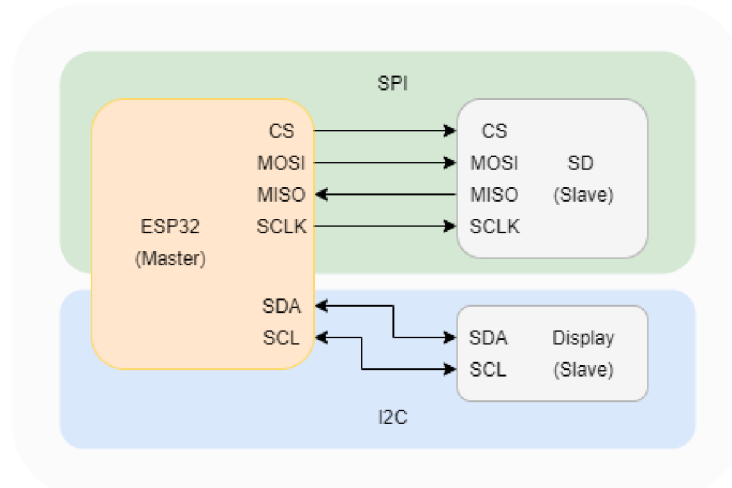


Obr. 3-7 Schéma zapojení regulátoru

Na trhu se objevují i jiné regulátory založené na obdobném principu. Jedním z nich je lineární regulátor. Lineární regulátory jsou cenově dostupnější, což je vykoupeno velmi malou účinností a vysokými provozními teplotami, načež je nutné regulátor vybavit příslušným chladičem. [54] Stejně tak se teplota může rozvést po desce a ovlivnit parametry operačních zesilovačů jako CMMR operačních zesilovačů či odběru proudu. [49]

3.4 Připojení modulů a ostatních komponent

Periferie připojeny k mikrokontroléru jsou zpravovány pomocí SPI standardem a I2C sběrnici. SPI neboli sériové periferní rozhraní je rozhraní, fungující na principu Master/Slave využívající *clock* signály. Master si pomocí pinu CS⁴ volí, s jakým Slave zařízením bude komunikovat. Poté na SCLK⁵ pinu vysílá *clock* signál a otevírá kanál MOSI⁶, kterým vysílá informace do Slave zařízení. Slave odpovídá přenosem informací na MISO⁷ vstup do řídicí jednotky. Master poté komunikaci terminuje nebo pokračuje vysílání. Dalším standardem je I²C sběrnice, princip je podobný SPI s tím rozdílem, že komunikace nemůže probíhat simultánně, ale lze připojit více zařízení. [46]



Obr. 3-8 Znárodnění I2C a SPI

Zobrazovací jednotka

Pro zvýšení uživatelské přívětivosti byl měřicí systém vybaven zobrazovací jednotkou upevněnou na pouzdro. O displeji není uvažováno jako o hlavním zobrazovacím systému průtoku, ale jako o způsobu zpětné vazby systému pro uživatele. Pro tento účel byl vybrán OLED displej s následujícími parametry:

Tab. 3-4 Parametry OLED Displeje

Parametr	Hodnoty
Úhlopříčka	0,96"
Rozlišení	128 x 64px
Napájení	3,3 až 5V
Provozní teplota	- 30 až 80°C
Rozměry	27 x 27 x 4,1mm
Pozorovací úhel	> 160 °

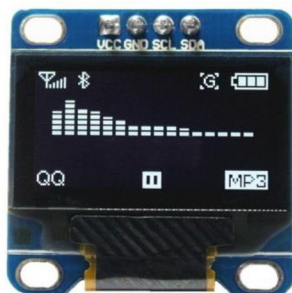
⁴ CS (Chip Selected) signál, určující se kterým Slave zařízením bude Master komunikovat

⁵ SCLK (Serial Clock) pin na, který je poslán hodinový signál

⁶ MOSI (Master OUT, Slave IN) výstup signálu z Master zařízení a vstup signálu do Slave zařízení

⁷ MISO (Master In, Slave Out) vstup signálu do Master zařízení a výstup signálu ze Slave zařízení

Komunikace je zprostředkována skrz piny SDA⁸ a SCL⁹. Zbytek pinů slouží pro napájení a zem. Displej využívá OLED principu. Ten spočívá v matici LED obsahující organickou část, jenž emituje světlo. Jak vyplývá z tabulky jednou z výhod je malý odběr proudu. To je způsobeno absencí podsvícení displeje, kterého využívají například LCD displeje. Z toho i vychází, že OLED displej nemusí generovat černou barvu pro pixely, protože jsou nativně černé. Díky tomu má i lepší rozlišení a pozorovací úhly. [47]



Obr. 3-9 OLED displej [44]

Modul pro zapojení MicroSD karty

Pro práci byl vybrán modul OKY3002 pro jeho dostupnost. Tento modul je opatřený slotem pro kartu podporující standardy MicroSD a MicroSDHC. SD karta je zařízení pro ukládání dat využívající flash paměť.[45] Základním principem tohoto typu paměti je jeho rozdělení do bloků. Tyto bloky je snadné upravovat, čímž je dynamičnost práce s daty zvýšená. Buňka, z níž se skládají bloky, je tvořena unipolárními tranzistory a představují 1 bit pro uchování informace. Flash paměť je poté zatavena do plastu s výstupy a umístěna do modulu, zajišťující připojení s řídicí jednotkou. [46]



Obr. 3-10 Modul pro zapojení microSD karty [45]

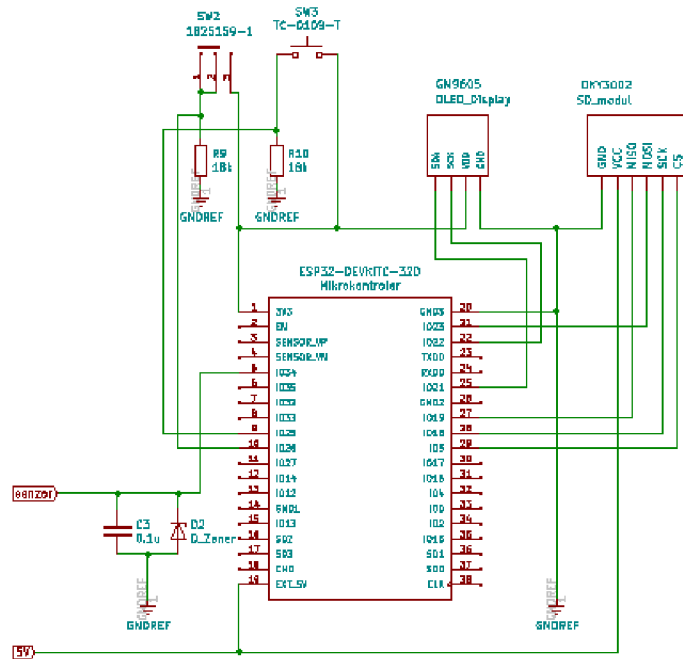
Modul obsahuje vstupní piny CS, MOSI, SCK, MISO zajišťující kontrolu nad modulem. Napájecí pin VDD je přivedený na regulátor a umožňuje napájet modul 4,5 až 5 V, dále pak pracuje s logickou úrovní 3,3 V. Poslední pin je zemnicí. Před ukládáním dat je nutné naformátovat SD karta na FAT16 nebo FAT32.[45]

⁸ Anglická zkratka pro *serial data*, tedy datový kanál sloužící k obousměrnému přenosu dat

⁹ Anglická zkratka pro *serial clock* tedy hodinový signál zajišťující komunikaci mezi master a slave

FAT je anglickou zkratkou pro *file allocation table*. Jak z anglického názvu vypovídá, jde o tabulku s přiřazením souborů na určité místo. Místem jsou zde označovány clustery, do kterých je rozděleno místo na disku. Ke každému clusteru je potom pomocí FAT kódu přiřazován záznam. [48]

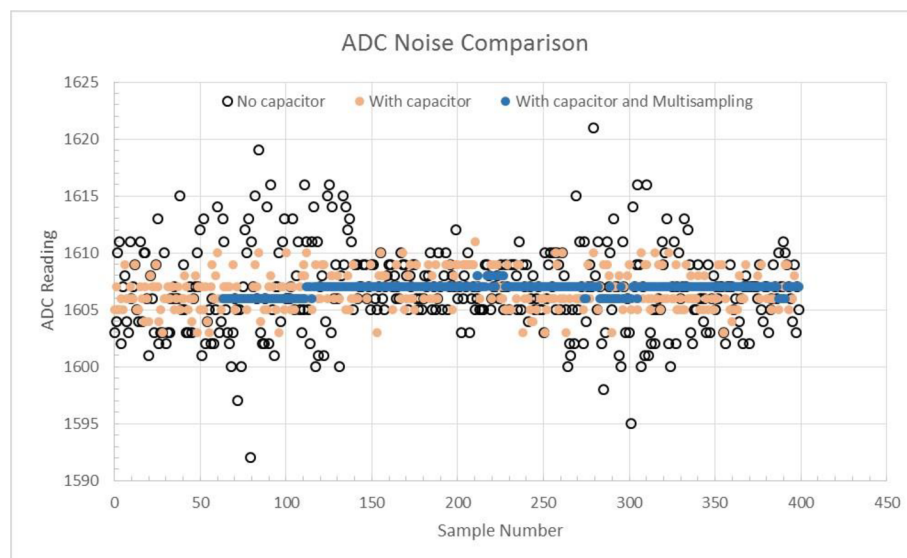
Zapojení periférií



Obr. 3-11 Zapojení periférií do ESP32 DevKit 32D

K řídicí desce je navíc připojený spínač sloužící ke změně módu na měřiči. Spínače je vybaven *pull-down* rezistorem o hodnotě 18 k Ω , typickou pro připojování k ESP32. *Pull-down* rezistory vymezují logickou úroveň směrem k 0, aby nedošlo k náhodnému sepnutí spínače okolním rušením. Při logické 1 je pak signál veden na GPIO 26.

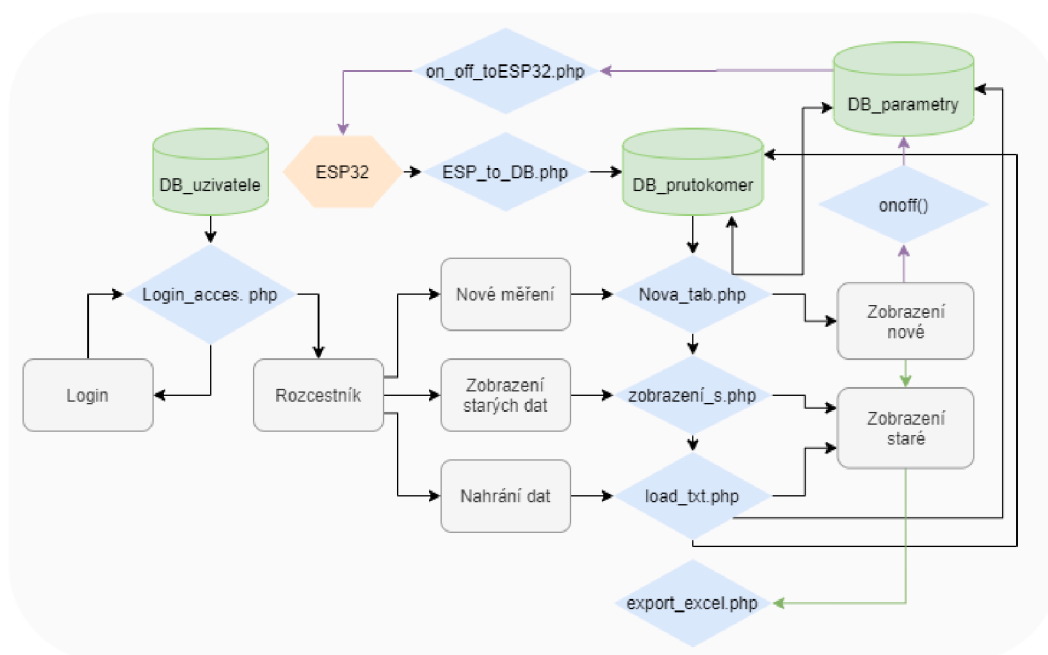
Výstup senzoru po zesílení je veden na pin 34, kde je umístěn A/D převodník. ESP 32 má dva typy převodníku ADC1 a ADC2. Pin 34 je typu ADC1. Převodník typu ADC1 byl zvolen, protože druhý typ při připojování k Wi-Fi může kolidovat z důvodu vyšší priority na signálových cestách sdílených s ADC2. Před vstupem signálu do řídicí desky je kondenzátor C₃ a Zenerova dioda. Kondenzátor slouží pro snížení rušení zvýšení přesnosti na A/D převodníku a jeho hodnota vychází z doporučení výrobcem mikrokontroléru. [42] Dioda poté funguje jako ochrana vstupu. Po překročení 3,1 V je signál sveden na zem a zabrání se tak zničení modulu.



Obr. 3-12 Porovnání rušení za použití různých metod jeho potlačení. Popisek osy x je počet naměřených vzorků a osy y je hodnota vzorkovaného signálu. Legenda grafu zleva doprava: bez použití kondenzátoru, s kondenzátorem, multisampling a kondenzátor. [42]

4. SOFTWAREVÁ REALIZACE MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU

Vytvoření programu pro řídicí jednotku ESP 32 byl napsán v prostředí Arduino IDE. Po nainstalování modulů podporující nahrávání a kompletaci do programového prostředí pro ESP 32. Jako síťový prvek byla vybrána multiplatforma XAMPP, kombinující lokální server a databázi, která je uložena na pracovní jednotce uživatele. Naměřené hodnoty se budou ukládat do vytvořené databáze MySQL, která je jednou z funkcí XAMPP. Pro přenos dat a kontrolu jednotky budou použity PHP skripty. Webová stránka je vytvořena značkovacím jazykem HTML a CSS. Vizualizace naměřených výsledků je interpretovaná skrz knihovnu Chart.js. Pro zlepšení uživatelského rozhraní a kompletnost webu je zobrazování rozšířeno o prvky JQuery. K vizualizaci se poté přistupuje přes přihlašovací stránku. Celá webová aplikace je poté spravována pomocí programu phpMyAdmin.

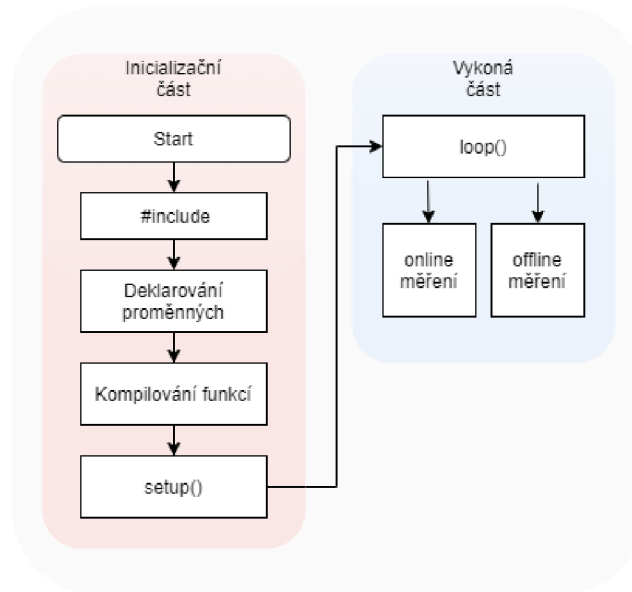


Obr. 4-1 Diagram přenosu a zpracování dat.

4.1 Algoritmizace měřící jednotky

Hlavní program zajišťující funkčnost měřícího systému, byl napsán v prostředí Arduino IDE. V tomto prostředí se nejčastěji používá programovací jazyk Wiring, vycházející z jazyka C. Jelikož je tento software primárně určen pro vývojové moduly Arduino a v této práci se využívá vývojový kit založený na ESP32 je nutné toto prostředí nakonfigurovat, tak aby byla umožněna správná sériová komunikace mezi vývojovou

dekou a počítačem. [51] Program, jenž byl napsán pro zajištění měření průtoku a jeho záznamu, lze poté rozdělit na část inicializační a výkonnou.



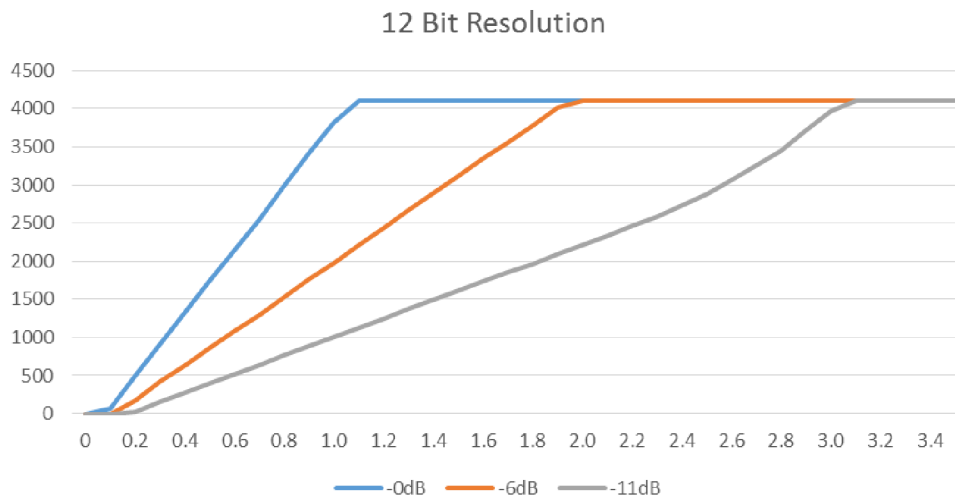
Obr. 4-2 Diagram programu měřící jednotky

Inicializace kódu je provedena pouze jednou. V první zahajující části jsou načteny potřebné knihovny pomocí příkazu *#include*. Před načtením knihoven je nezbytná jejich instalace pomocí manažera knihoven. S tímto nástrojem lze také snadno spravovat knihovny, které nejsou obsahem balíčku vývojového prostředí

Mezi vybrané knihovny patří *Wire.h* zajišťující komunikaci s I2C sběrnici, *WiFi.h* obsahující příkazy pro vytvoření připojení mezi modulem a Wi-Fi, knihovna *HTTPClient.h* zajišťující spojení s webovým serverem, dále využití *FS.h*, *SD.h* a *SPI.h* pro správnou vazbu mezi moduly na perifériích a procesorem nebo grafická knihovna *Adafruit_GFX.h* spolu s knihovnou *Adafruit_SSD1306.h* pro správné zobrazování na OLED displeji. Do této části je i zahrnuto deklarování proměnných a definování parametrů a pinů pro modul SD karty, OLED displeje a dvou spínacích prvků.

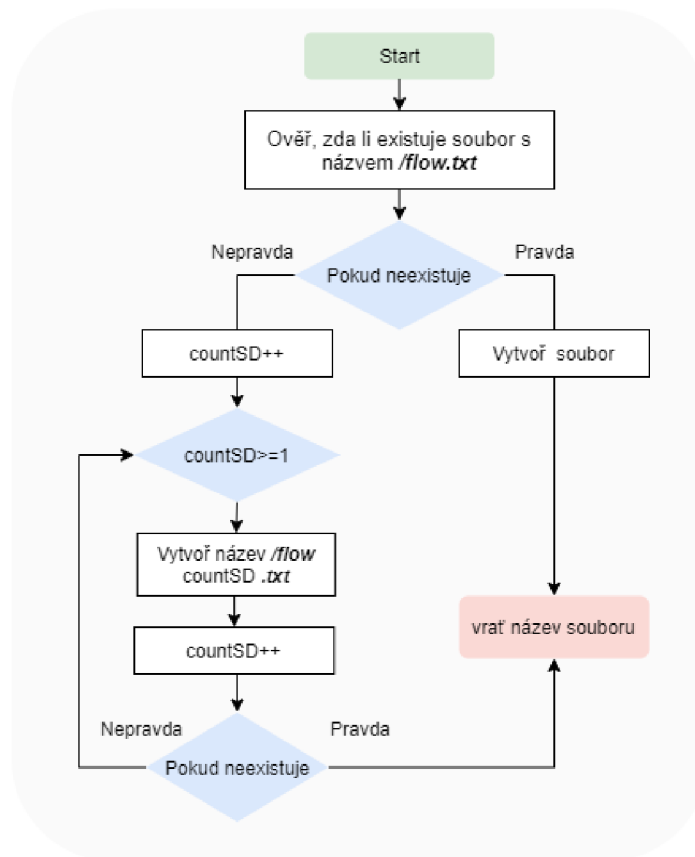
Další krokem inicializace je zkompilování funkcí, které nejsou přiřazeny k žádné knihovně. Tyto funkce jsou poté volány v měřící části programu a vrací příslušné hodnoty. Jmenovitě to jsou *readFlow()*, *writeFile()*, *appendFile()*, *makeSDfile()*.

Úlohou funkce *readFlow()* je odečítání analogového signálu z výstupu operačního zesilovače. Signál je připojen na 12bit A/D převodník. Jelikož, průtokoměr nevyužije celý napěťový rozsah do 3,3 V, funkce nastavuje vstup převodníku a jeho rozsah na pokles -6 dB místo klasických -11 dB viz. obr 4-3. Změnou poklesu se zbavíme i nelinearity charakteristiky převodníku, s čímž jsou spojené možné nepřesnosti v měření.



Obr. 4-3 Převodní charakteristika napětí na vzorky v různých poklesech. [42]

Pro vytváření nových souborů na úložném zařízení slouží funkce *makeSDfile()*. Tato funkce je vytvořena pro offline měření nebo jako záloha při selhání spojení systému s Wi-Fi, přičemž není systém schopný odesílat hodnoty průtoku do databáze. Funkce vytváří soubory s příponou *.txt*, s pevně daným textovým názvem *flow*. Algoritmus si postupně ověřuje, zdali SD karta obsahuje daný soubor, pokud ano inkrementuje proměnnou *countSD*. Vytvoří se název *flow1.txt*, funkce si ověří, jestli textový soubor obsahuje, pokud ne, vytváří pojmenovaný soubor a vrací název.



Obr. 4-4 Diagram s algoritmizací funkce *makeSDfile()*

hodnoty první uloženy do pole a po nabytí určitého počtu vzorků je pole postupně uloženo do předem vytvořeného souboru. Celý proces je sledován podmínkami pro ukončení měření v podobě tlačítka a při jeho sepnutí je cyklus měření ukončen.

Průběh celé inicializace, měření a ověřování odesílání dat je zobrazován na OLED displeji. Po inicializačním procesu, kdy se definuje šířka a délka grafické jednotky se ověřuje její dostupnost. Pokud nastavení proběhne úspěšně, je v průběhu kódu určena velikost písmen a rozmístění vykreslovaných textů na displeji. Aby se texty nepřekrývaly, je displej vyčištěn a připravený pro zobrazení nových hodnot.

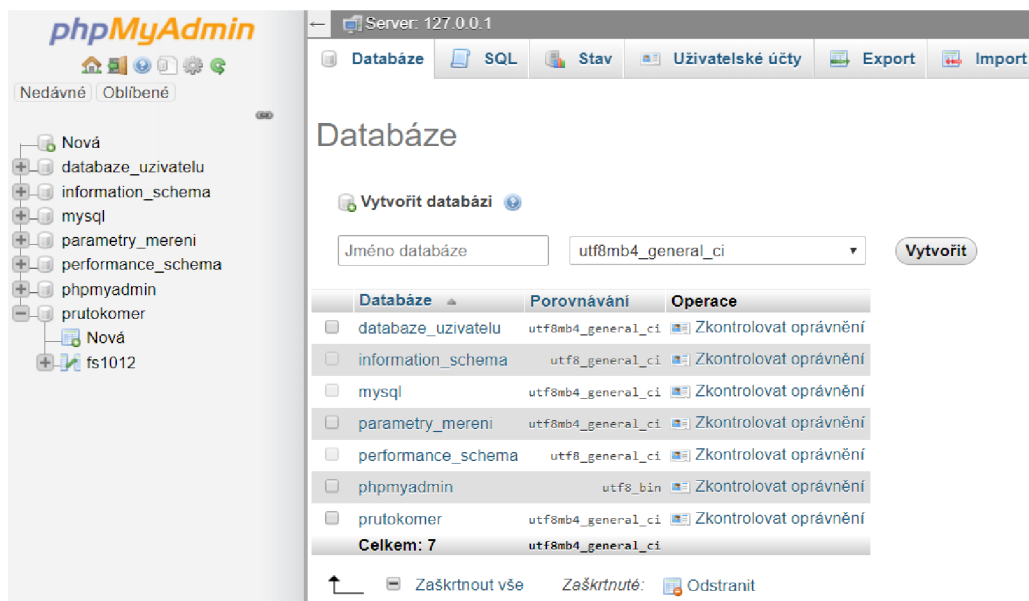
4.2 XAMPP

Je multiplatformová *freeware* aplikace, která obsahuje software jako Apache Server, MySQL, MariaDB, PHP, PERL či FTP server. Apache je software, který vytvoří lokální webový server na hardwaru uživatele. Připojením k internetu je možné server spravovat a mít přístup k prohlížení databází nebo webových stránek v lokální síti. MySQL a MariaDB jsou poté relačními databázovými nástroji. PHP a PERL pak představuje podporu těchto jazyků u webových serverů a databází. FTP server poté přináší výhodu pro vzdálenou správu souborů. Výhodou XAMPP je jeho dostupnost (otevřený software), jednoduchost a obsažnost důležitých aplikací. [27]

Hlavním kritériem pro výběr síťového prvku bylo použití volně dostupného softwaru, který by poskytl serverové uložení s prvky jako MySQL či PHP, které jsou esenciální pro tuto práci. Tento software byl také vybrán pro vysokou míru využitelnosti v praxi, což se odráží ve zdrojích informací k této platformě. Velkou nevýhodou softwaru je zobrazení a nahrávání dat, které je omezeno pouze na lokální síť. Tuto nevýhodu by mohlo pokrýt cloudové řešení či zakoupení domény.

Jako alternativou k platformě XAMPP mohou být použity programy, založené na podobném principu. Jmenovitě to jsou WampServer, Apache http server a Laragon. Tyto softwary jsou založeny na serveru Apache, který je nejpoužívanějším webovým serverem. Druhým nejpoužívanějším je platforma IIS, která je nabízena jako doplňkový software k Windows 10 a 8, tudíž se nemusí dodatečně stahovat a po konfiguraci počítače je IIS dostupný.[37][52]

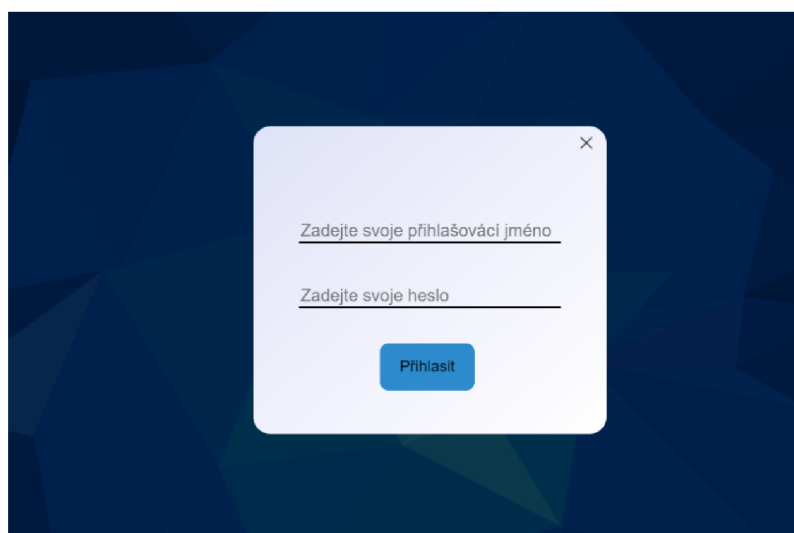
Ke správě Apache serveru se využívá nástroj phpMyAdmin. Po nainstalování balíčku XAMPP je přístupný přes webový prohlížeč. Po napsání adresy *localhost/phpmyadmin/* je uživatel přesměrován do uživatelského rozhraní pro správu databází, uživatelských účtů a samotného serveru. Díky podpoře MySQL je možné vytvářet a upravovat databáze pomocí SQL příkazů nebo skrze přívětivé uživatelské rozhraní.



Obr. 4-6 Ukázka prostředí programu phpMyAdmin

4.3 Webové rozhraní

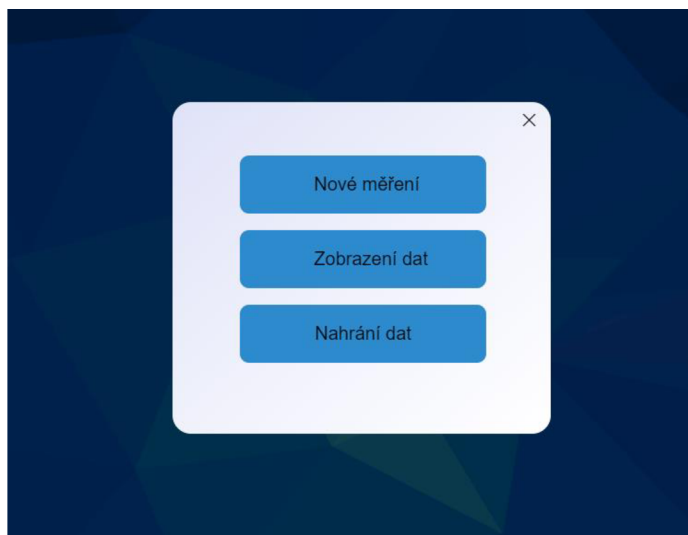
Webové rozhraní je napsané v jazyce HTML s podporou CSS. Jde o jazyk zajišťující strukturu webové stránky, a tedy její vzhled. O výkonnou část se poté stará skriptovací jazyk PHP. Ten zajišťuje správnou funkci odesílání dat do databáze, ale stejně tak i o kontrolu nad přístupem k zobrazení dat. Responzivita poté zajišťuje přizpůsobení a správné zobrazení stránky na zařízení s různým rozlišením. Základy některých grafických prvků webové aplikace jako modální okno obr. 4-7 nebo posuvné tlačítko v zobrazení byly převzaty ze stránky W3School a upraveny podle potřeby. [53]



Obr. 4-7 Úvodní přihlašovací stránka

Po zadání adresy *ip/login.php* se dostává uživatel na úvodní stránku s tlačítkem *Přihlásit*. Po kliknutí na tlačítko se otevírá přihlašovací okno. Po zadání hesla a

uživatelského jména jsou údaje ověřeny pomocí php skriptu *login_accses.php*. Skript ověří, zdali hodnoty jsou shodné v databázi *DB_uzivatele*. Volná registrace nových uživatelů není podporovaná. Přihlašovací údaje jsou do databáze vkládány správcem, který má přístup k serveru a programu phpMyAdmin. Po ověření správnosti je přístupný rozcestník na 4-8 V opačném případě se objeví chybové hlášení a uživatel je přesměrován na hlavní stránku. Na rozcestníku webová stránka nabízí volbu ze tří tlačítek: *Nové měření*, *Zobrazení starých dat* a *Nahrání dat*.



Obr. 4-8 Vizuál rozcestníku

Při stisknutí *Nové měření* se stránka přesune a požádá uživatele o jméno nového měření. Po zadání a potvrzení je vytvořena pomocí skriptu *nova_tab.php* nová tabulka v databázi *DB_prutokomer*, zároveň je název tabulky odeslán do *DB_parametry*. Po dokončení příprav k měření se objevuje zobrazení v podobě lineárního grafu. Při sepnutí spínače na v levém okně měřicího systému se vykresluje průtok v závislosti na čase. Spínač funguje na technologii AJAX (viz. kapitola 4.4) a skriptu *on_offSDsend.php*. Po zmačknutí posuvného spínače je pomocí AJAX aktualizována hodnota v *on_offSDsend.php*. Skript naváže spojení s *DB_parametry* a aktualizuje pole status. Pokud je skript *on_offtoESP32.php* zavolán systémem a jeho status je 1 je započnuto měření. Hodnoty snímané z průtokoměru jsou odesílány skrz skript *ESP_to_DB.php* do databáze.

Výběrem tlačítka *Zobrazení starých dat* se zpřístupní stránka s rolovacím menu obsahující názvy ze všech provedených měření, které jsou uloženy v databázi. Po výběru měření je stránka přesměrována na zobrazení s již naměřenými daty. Nad grafem je poté tlačítko *Export do tabulky*. Po stisknutí je soubor uložen do formátu .csv a stažen do počítače.

Tlačítko *Nahrání dat* je vytvořeno pro import dat z počítače do databáze a s tím spojená vizualizace dat. K souboru ve formátu .txt je do textového pole napsána cesta uložení souboru a po potvrzení jsou skriptem *nahrani_txt.php* odeslány do databáze *DB_prutokomer* a zobrazena.

+ Nastavení				id	prutok	time			
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2642	2514	6.401
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2643	2474	6.402
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2644	2347	6.403
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2645	2437	6.404
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2646	2422	6.405
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2647	2416	6.406
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2648	2451	6.407
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2649	2459	6.408
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2650	2533	6.409
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2651	2569	6.410
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2652	2634	6.411
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2653	2686	6.412
<input type="checkbox"/>		Upravit		Kopírovat		Odstranit	2654	2779	6.413

Obr. 4-9 Naměřené hodnoty nahrané do databáze.

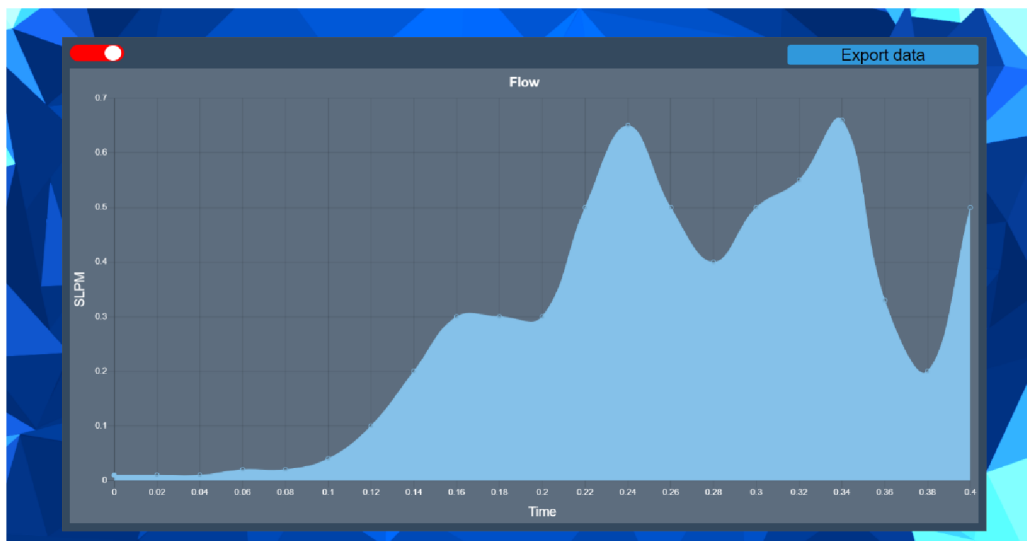
Princip odesílání a zobrazování dat tkví ve vytvoření spojení mezi skriptem a databází pomocí příkazu `new mysqli()`. Po vložení souboru `data.php` obsahující parametry jako název databáze, uživatelského jména a hesla ke spravování databázi a IP adresy a funkce `newmysqli()` vytváří spojení a pomocí MySQL dotazů a požadavkového příkazu `mysqli_query()` jsou buď hodnoty do tabulky přidávány nebo vybírány. Každý kód se potom liší od funkce, kterou vykonává.

Skript zajišťující přesun hodnot ze senzoru databáze po vytvoření spojení, podmínkou s post metodou očekává, jestli přijme nějaké data. Po ověření jsou data uloženy do tabulky.

4.4 Vizualizace

Základem pro grafickou interpretaci naměřených hodnot je grafická sada Chart.js. Chart.js je volně dostupná, jejíž zdrojový kód je založený na JavaScriptu. Po vložení dostupného kódu, který zajišťuje vykreslování dat do html stránky se objevuje graf. Typ vykreslovaného grafu ovlivňuje proměnná `type`. Vybrat typ graf je možné z nepřeberného množství např. sloupcové, koláčové, síťové a další. Pro naši aplikaci bude nejvhodnějším znázorněním dat využití klasického čárového grafu. Do proměnné `data` jsou za proměnnou `labels` vložena data vykreslována na ose x a v `datasetu` zase data pro osu y. V proměnné `options` jsou nastavovány parametry pro vizualizaci dat. Za výběrem této knihovny stojí její jednoduché použití a uživatelská komunita, což se odráží v dostupných zdrojích.

Stránka disponuje tlačítkem, kterým se zapíná a vypíná online měření. Toto tlačítko existuje pouze u kontinuálního zobrazení dat. Dále se zde nachází tlačítko pro export dat do `.csv` souboru. Tuto funkci již obsahuje každá stránka pro zobrazení.



Obr. 4-10 Zobrazení průtoku s ilustračními daty.

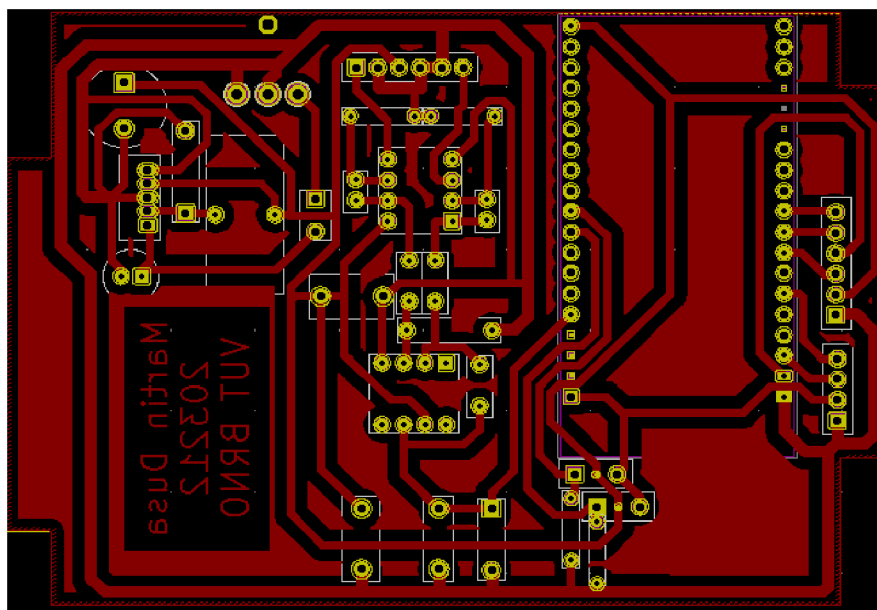
jQuery je další knihovnou použitou ve vizualizaci. Důvodem použití je interaktivnost zobrazení dat. Data se aktualizují každé 3 vteřiny bez nutnosti mačkání tlačítek skrz funkci *updateFlow()*, která je založená na technologii AJAX. AJAX je anglickou zkratkou pro Asynchronous JavaScript and XML umožňující aktualizaci obsahu stránky bez potřeby celkového obnovení. [50]

UpdateFlow() skrze AJAX vytáhne zakódovaná data typu json ze skriptu *ajax_update.php*, který otevírá komunikaci s MySQL databází a vloží data do proměnných *labels* a *data*. Funkce následně čeká 3 s a poté je opakovaně volána, čímž dochází k aktualizaci dat.

5. HARDWAROVÉ ŘEŠENÍ MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU

5.1 Deska plošných spojů

První prototyp byl napájen na univerzální spoj. Tato verze však byla nepraktická, a proto nahrazena deskou plošných spojů, dále jen DPS. Pro DPS byla použita kuprexidová deska s tloušťkou mědi 35 μ m o rozměrech 113 / 74 mm.



Obr. 5-1 Návrh desky plošných spojů.

Jak DPS, tak schéma přiložené v příloze, byly navrženy v programu KiCad. Deska byla vyhotovena pomocí laserové tiskárny a topného tělesa. Kdy na voskový papír byl natisknut vzor z obr. 5-1 a pomocí topného tělesa převeden na odmaštěnou a čistou kuprexidovou desku. Tato metoda je přijatelnou cestou pro vytvoření pracovního návrhu desky, ale není zcela vhodná pro sériovou výrobu, protože při přenášení vzoru na desku je použit tlak a vysoké teploty, které mohou poničit desku nebo narušit vazbu mezi deskou a vrstvou mědi. Další rizikem je roztečení toneru, čímž se můžou vytvářet zkraty na desce. Poslední nevýhodou je tenká či chybějící vrstva toneru, která způsobí proleptání částí určený pro vedení signálu. Stejně tak dráhy na plošném spoji nejsou tak ostré, proto není metoda vhodná jako koncová výroba v porovnání s jinými metodami jako použití fotocitlivého laku, UV zářiče a následné leptání nebo frézování desky pomocí CNC. Vyleptání desky poté proběhlo v lázni s chloridem železitým. Po vyleptání byla deska osázena součástkami, zapájena a ošetřena ochranným lakem proti korozi.



Obr. 5-2 Osazená pracovní deska a uložena v krabičce.

Vstupní napájení je realizováno souosým konektorem o vnějším průměru 5,5 / 2,1 mm. Napětí je poté regulováno přes regulátor napětí (viz 3.3). Jelikož regulátor je předpokladem pro nežádoucí zvýšení teplot na desce je vybaven malým pasivním chladičem. Patice pro vývojovou desku byla vytvořena z pinových lišt o rozteči 2,54 mm. Pro připojení senzoru byl vybrán žilový kabel AWG28, který je připojený pomocí konektorů IDC. Operační zesilovače MPC616 a MPC617 jsou usazeny do patic. Na desce jsou vývody periférií realizovány pomocí již zmíněného žilového kabelu. Zenerova dioda potom slouží jako ochrana proti přepětí a poškození vývojové desky.

5.2 Konstrukční krabička

Jako krytí byla vybrána univerzální krabička KM-76BKTRS od výrobce Masczyck. Krabička o rozměrech 80 / 120 / 36 mm je vytvořena z materiálu ABS. Krabička je vyhotovena ze dvou dílů spojených k sobě čtyřmi šrouby. Ztmavený vrchní kryt s těsnícím prvkem je upravený tak, aby viditelnost displeje nebyla omezena. Spodní úložný kryt černé lesklé barvy je taktéž upraven o vstupy pro spínač, konektor pro připojení k řídicí jednotce a souosý konektor k napájení. Spodní část je rovněž vybavena nožičkami pro uchycení DPS. Jako krytí senzoru byla vybrána krabička KM-03 o rozměrech 26 / 16 / 17 mm vytvořenou z materiálu ABS. Krabička je vyhotovena ze dvou dílů. Pro uchycení senzoru byly v krabičce vytvořeny vstupy pro přívodní kabel a dva vstupy pro přívody pro připojení hadiček.

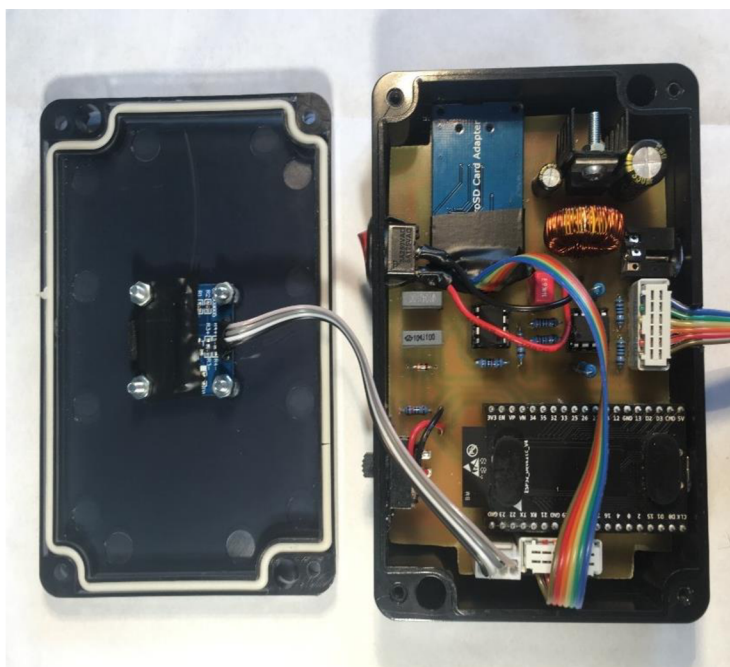


Obr. 5-3 Krytí senzoru a konstrukční krabička s ručně obráběnými otvory

6. ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ A KALIBRACE

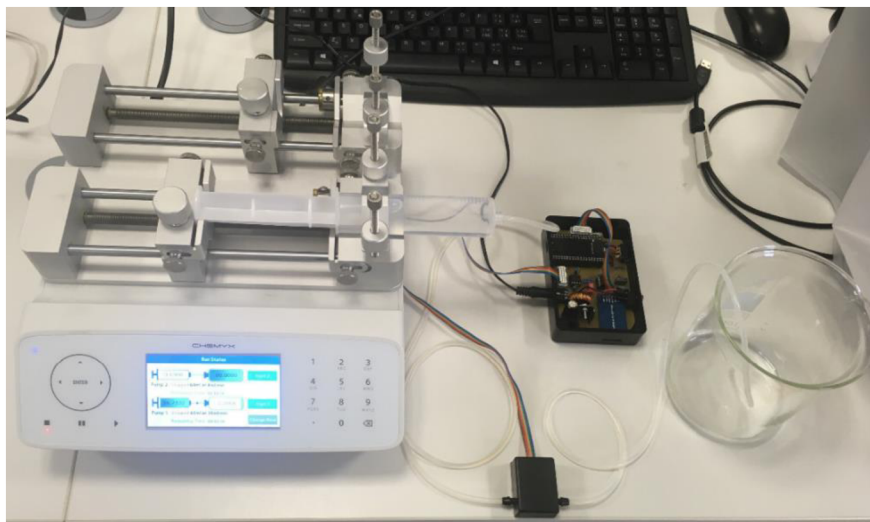
Za účelem ověření funkčnosti bylo provedeno zkušební měření. Ze získaných hodnot se pomocí Excelu sestrojí kalibrační křivka a převodní rovnice zajišťující přesný záznam měření rychlosti průtoku pro mikrofluidní zařízení.

Průběh měření je následující: Po připojení napájení dojde k inicializaci systému. Jakmile je přípravná část dokončena, upozorní systém na tuto skutečnost hlášením na OLED displeji. Mezi online a offline módem je možné přepínat pomocí šoupátkového spínače. Pro *online* je důležité před zapnutím systému vytvořit na stránce *Nové měření* novou tabulku se jménem měření, jinak dojde k ukládání dat do předešlé tabulky a znehodnocení dat. Online měření se poté spouští na stránce se zobrazením. Při *offline módu* je po stisknutí tlačítka vytvořen pokaždé nový soubor, do kterého je průtok zaznamenáván spolu s ID a časem kdy byl zaznamenán. Měření se vypíná opětovným stisknutím tlačítka.



Obr. 6-1 Výsledný měřicí systém.

Kontrolní měření proběhlo s využitím infuzní více kanálové pumpy Fusion 4000 od firmy Chemyx. Pumpa disponuje dvěma na sobě nezávislými kanály pro injekční stříkačky a před samotným spuštěním je nutné nakonfigurovat její objem, vnitřní průměr a rychlost krokového motoru. Písty mohou vytlačovat kapalinu ze stříkaček rychlostí 0,0001 až 188,3 ml/min s přesností menší než 0,35 %. Rychlost je pouze omezena objemem stříkačky. Protože pro zkušební test byla použita 60 ml stříkačka s vnitřním průměrem 27 mm, u které systém dopočítal maximální rychlost na 102 ml/min. Dalším pozitivem je programovatelnost krokových motorů skrz grafické rozhraní v softwaru MATLAB či LabVIEW. [56]



Obr. 6-2 Měření na infuzní pumpě

Na senzor byly přivedeny hadičky o vnějším průměru 4,2 mm a vnitřním průměru 2,2 mm. Hadička vycházející ze stříkačky byla připojena na vstup senzoru P1. Kapalina procházející senzorem vychází na výstupu P2 a hadičkou je odváděna do kádinky. Pro měření byla vytvořena tabulka s různými hodnotami průtoku. Po získání vzorkovaného signálu pomocí A/D převodníku by se sestavila charakteristika pro převod z napětí do škály 0 až 1 SLPM.

Měření proběhlo se vzorkovací frekvencí záznamu 1 kHz. Při kontrole dat ze zkušebního měření bylo zjištěno, že obsahují pouze šum a nulové hodnoty. Proto byl senzor přeměřen pomocí osciloskopu Keysight EDUX1002A a hodnoty byly zaneseny do tabulky podobné jaká byla vytvořena pro kalibraci. Jelikož tvar signálu byl podobný jak na obr. 6-5, který se podobá spojitému periodickému signálu, byly proto zaneseny jejich extrémy.

Tab. 6-1 Tabulka naměřených hodnot napětí na senzoru při zkušebním měření

Průtok [ml/m]	TP1+ _{max} [mV]	TP1+ _{min} [mV]	TP2+ _{max} [mV]	TP2+ _{min} [mV]
0	120	80	120	100
1	119	80	117	99
5	95	40	100	80
10	80	40	100	70
15	80	35	100	70
20	75	35	90	70
30	65	30	90	65
40	60	20	90	60
50	60	20	90	60
60	55	15	90	55
70	50	15	85	55
80	50	10	85	50
90	45	5	80	50
100	45	5	75	50

Signály z obou snímačů mají stejnou fázi, proto pro výpočet výstupu signálu z diferenčního zesilovače použijeme maximální extrémy. Rovnice použitá pro výpočet:

$$V_{diff} = TP2_{max} - TP1_{max} \quad (7)$$

V_{diff} představuje rozdílovou hodnotu snímače $TP2_{+max}$ a $TP1_{+max}$. Znamínko polarity bylo ze vzorce vyjmuto, protože způsobovalo formátovou chybu. Tato rovnice vychází z rovnice pro diferenční zapojení senzoru:

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (8)$$

Kde V_{out} je napětí na výstupu diferenčního zesilovače, A je hodnota zesílení. Zesílení je v tomto případě zanedbatelné, proto bylo ze vzorce (7) vypuštěno. V_2 je hodnota přivedená na invertující vstup a V_1 zase na neinvertující vstup operačního zesilovače. Příklad výpočtu:

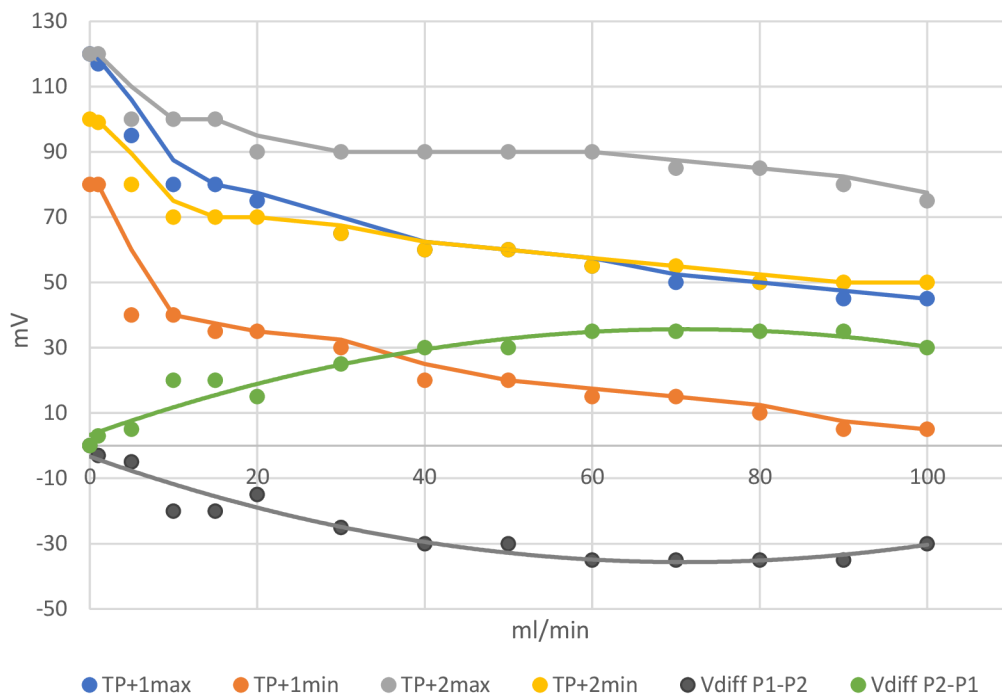
$$V_{diff} = 100 - 80$$

$$V_{diff} = -20 \text{ mV}$$

Tab. 6-2 Výpočet nezesíleného signálu na diferenčním zesilovači.

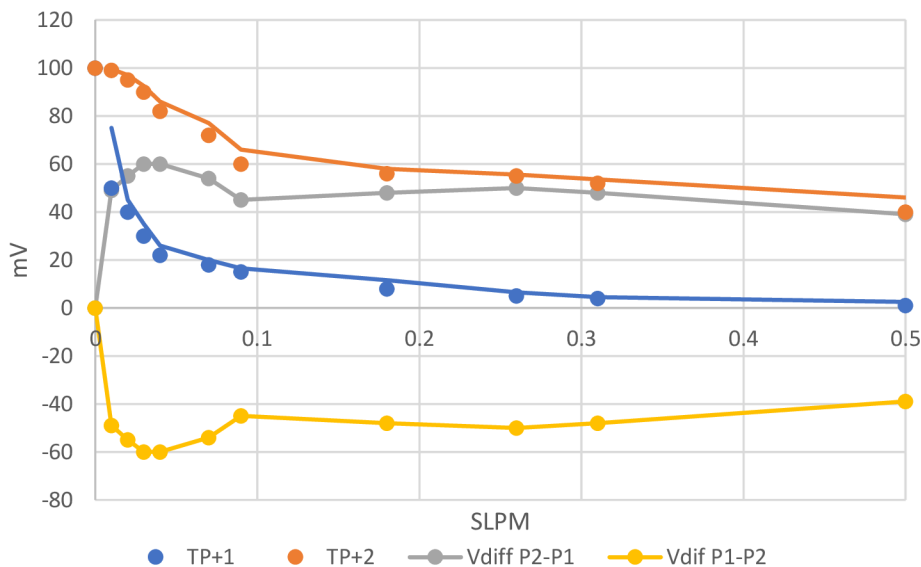
TP1 _{+max} [mV]	TP2 _{+max} [mV]	V _{diff} [mV]
120	120	0
119	120	-3
95	100	-5
80	100	-20
80	100	-20
75	90	-15
65	90	-25
60	90	-30
60	90	-30
55	90	-35
50	85	-35
50	85	-35
45	80	-35
45	75	-30

Dle tabulky vidíme, že napětí je záporné, které se přes saturaci operačního zesilovače neprojeví na výstupu, protože využíváme asymetrické napájení a jakékoliv záporné napětí je změněno na dolní hranici minimálního zesílení viz. tab. 3-2. Po tomto zjištění byl přezkoumán a porovnán návrh zapojení zesilovacího prvku z této práce s návrhem zapojení ve výrobním listu. Rozdíl mezi zapojeními nebyl nalezen. Proto byl analyzován graf výstupu senzorů ve výrobním listu a porovnán s reálnými výstupy senzoru.



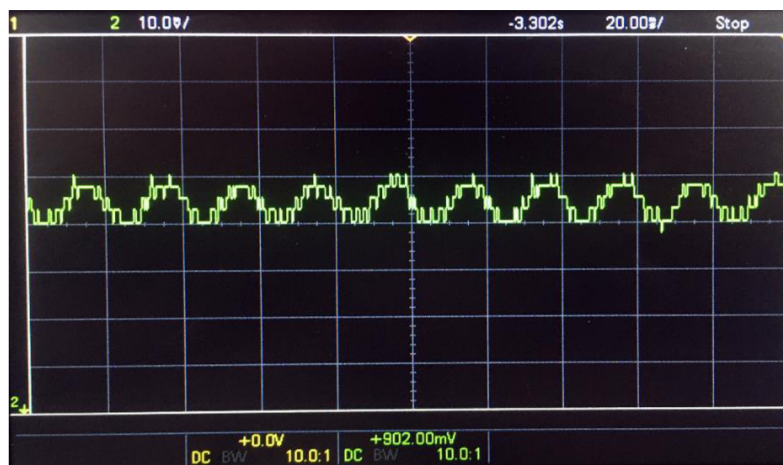
Obr. 6-3 Závislosti napětí na průtoku senzoru a jejich vlastní odečet v závislosti na směru průtoku.

Řešením problému, jak vidíme na grafu byla změna směru toku z P2 do P1. V tomto zapojení zesílené hodnoty napětí korespondují se změnou rychlosti průtoku. Dalším problémem vycházejícím z grafu je tendence rozdílového signálu lineárně stoupat do 60 ml/min a poté klesat. Proto byly analyzovány i průběhy výrobního listu. Hodnoty byly odečteny z obrázku a vykresleny do grafu níže.



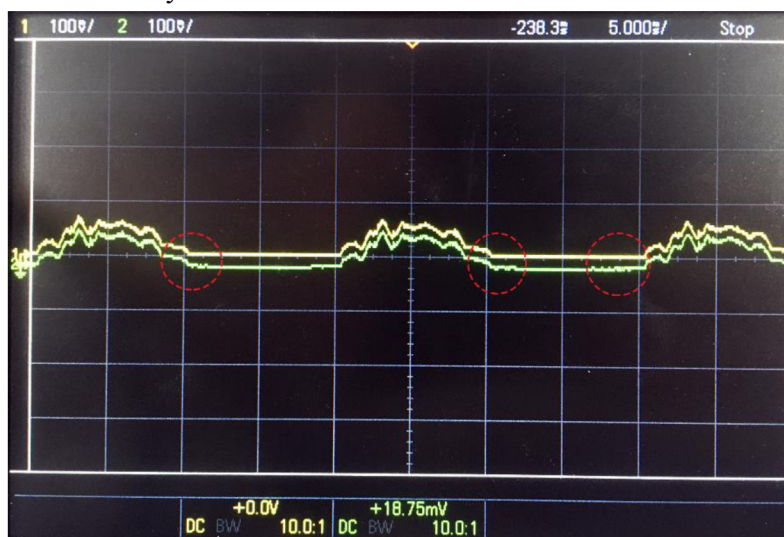
Obr. 6-4 Graf vytvořený z hodnot odečtených z obr 4-3.

Pro výpočet hodnot z průběhu byl použit stejný vzorec jako (7). Průběhy v grafu jsou podobné, jaké byly naměřeny v laboratoři. Skok mezi 0 a do 0,1 SLPM (100 ml/min), je z důvodu dalšího zpracování signálu nepřijatelný a stejně tak malé napětové rozlišení mezi hodnotami 0,1 až 0,5 SLPM. To zapříčiní, že převod vzorkovaného signálu pomocí charakteristiky je možný, ale hodnoty po převodu nebudou korespondovat s aktuálním průtokem.



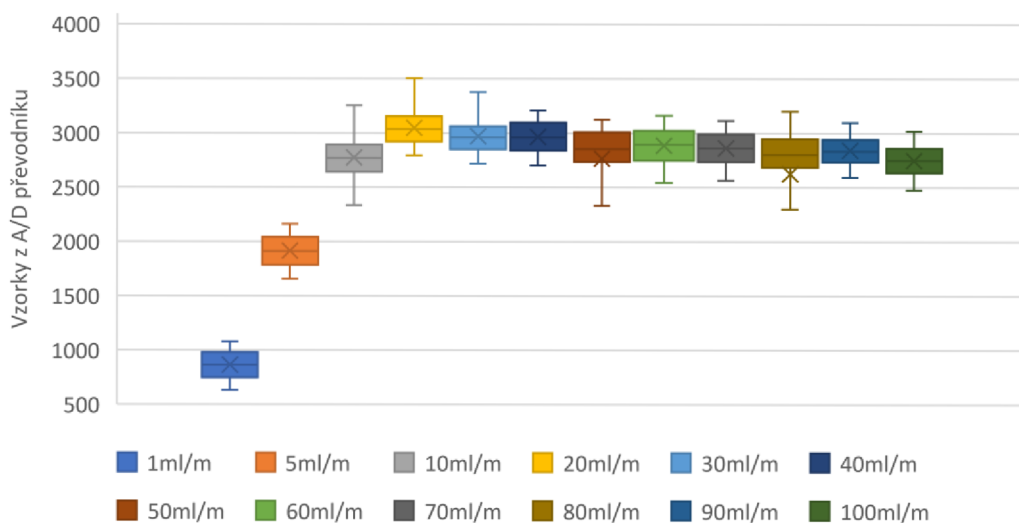
Obr. 6-5 Napětový výstup ze zesilovače při průtoku 5 ml.

Další měření proběhlo za účelem ověření výstupních signálů ze zesilujícího prvku. Na vstupu do A/D převodníku byly naměřeny dva druhy signálu. V menších průtocích spojitě periodický vypadající signál na obr. 6-5 a ve vyšších nespojitě vypadající signál. Tyto signály mají svoje maxima i minima. Ty se mohou nepříznivě projevit při vzorkování signálu a zvýšit nepřesnosti při převodu. Tyto extrémy by měli být do určité míry omezit filtrující kondenzátor C3. Z obrázku níže můžeme vycházet, že kondenzátor extrémy filtruje, ale ne moc účinně a napětový průběh spíše vyhlazuje. Vyhlazení můžeme vidět v označených částech na obr. 6-6.



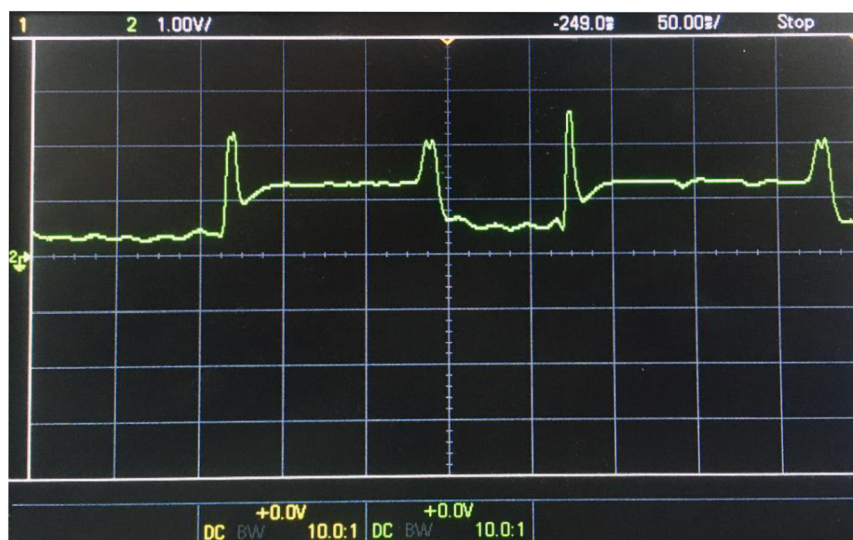
Obr. 6-6 Vliv kondenzátoru na výstupní signál. Žlutá sonda byla umístěna za kondenzátorem a zelená před ním. Červeně jsou označeny filtrovaná místa.

Při zpracování dat došlo k dalšímu problému. Ty byly ale předpokládány po získání průběhu na obr. 6-5 a charakteristiky na obr. 6-4. Jmenovitě jde o nelineární závislost vzorků na průtoku, periodicitou naměřených vzorků v malých průtocích a její vymizení ve větších průtocích a velký rozptyl vzorovaného napětí. Nelinearita je způsobena diferenčním zapojením zesilovačů a tím dochází k odečítání signálů od sebe viz. Obr 6-4. Z krabicového grafu níže vidíme že nelinearita i periodicitu se projevila v naměřených datech.



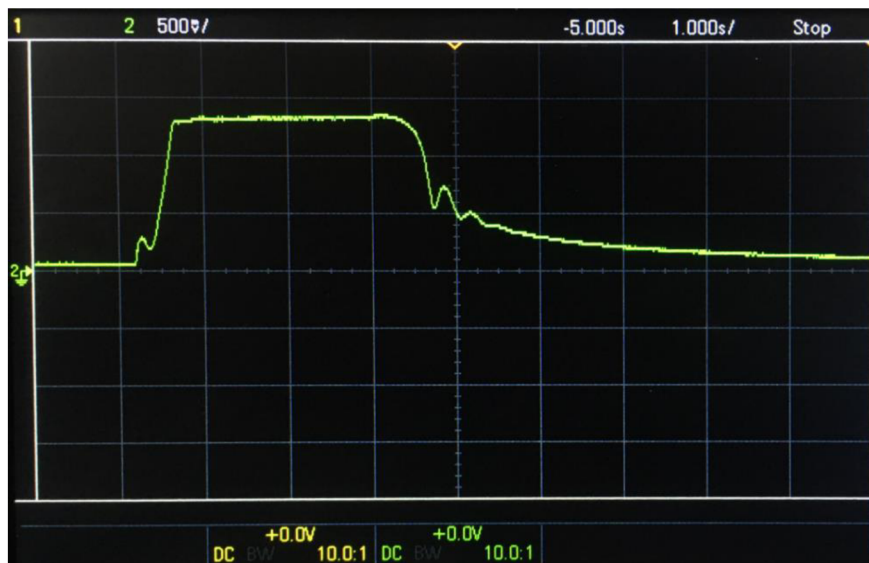
Obr. 6-7 Krabicový graf z 1000 vzorků naměřeného vzorkovaného napětí

V grafu je uveden medián (šedá čára uvnitř krabice) a průměr (křížek uvnitř krabice). Tyto ukazatele ve srovnání napříč krabicemi jsou relativně uprostřed, což odkazuje na určité normální rozložení hodnot, kromě 50 a 80 ml/min. V tomto průtoku byly záměrně v kapalině zanechány vzduchové bubliny, aby byl ověřen jejich vliv na senzor. Vliv bublin na signál je možné vidět na obr. 6-8. Rozptyl u všech vzorků se pohyboval kolem $500 \pm 5\%$ a byl určen statistickým nástrojem v Excelu.



Obr. 6-8 Projevení vzduchových bublin signálu.

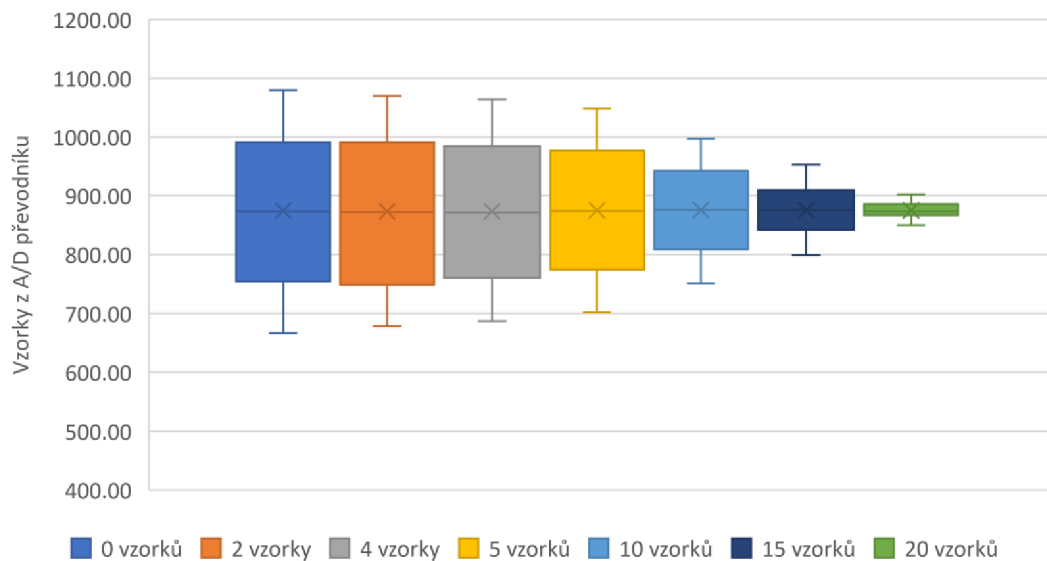
Závěrečným měřením bylo ověření časové odezvy senzoru na změnu průtoku. Jelikož jsme použili infuzní pumpu, která má velmi stabilní průtok, je pro toto měření způsobila. Na obr. 6-9 vidíme, že při začátku i konci jsou viditelné malé zákmity a po ukončení měření se projevil doznívající průtok. Záznam doznívajícího průtoku se ustálil někdy až po 7 s. Celková časová reakce na změnu průtoku je pod 500 ms, což je celkem uspokojivý výsledek. Většina artefaktů v obrázcích může být způsobena elasticitou a odporem hadiček nebo citlivostí senzoru na otřesy hadičky. Tyto otřesy byly zpozorovány při zahájení průtoku na pumpě. Po vymizení artefaktu a ustálení průtoku je senzor překvapivě stabilní.



Obr. 6-9 Reakce zesíleného signálu při 50 ml/min.

Předzpracování signálu

Prvním krokem před vytvořením převodní charakteristiky je důležité signálové předzpracování, protože signál může být postihnut artefakty a šumem, které můžeme vidět na obrázcích 6-5, 6-8 a 6-9. Předzpracování sníží rozptyl vzorkovaného signálu a zvýší přesnost měření. Pro snížení šumu a artefaktů byla teoreticky vyzkoušena obdoba nerekurzivního průměrového filtru s délkou okna 20. Délka okna vychází z krabicového grafu útlumu na 7-11. Nevýhodou tohoto filtru je ztráta nejen krajních hodnot, ale při použití velké délky okna i užitečného signálu. Proto využití jiných metod či filtrů je žádoucí. Hojně využívaná metoda je Kalmánův filtr. Filtr odrušuje signál v časové oblasti bez nutnosti jeho převodu využitím FFT. Základním principem filtru je predikce budoucího vzorku z již už naměřených hodnot, predikce je srovnána s nově naměřenou hodnotou, zpracována a znovu použita pro predikci nové hodnoty. [57]



Obr. 6-10 Krabicový graf vyjadřující rozptyl vzorků v závislosti na délce okna.

Je zde i možnost jiného řešení snížení rozptylu vzorkovaného napětí, který se pojí s šumem v signálu, a to zvýšením napěťového rozsahu na A/D se stejným zesílením na zesilovači. Pro ilustraci ukázka výpočtu jednoho kvantového kroku:

$$q = \frac{U_{Max}}{2^n} \quad (8)$$

Kde q představuje jeden kvantový krok, U_{Max} zase maximální napětí přivedené na A/D převodník a 2^n je počet kvantizačních úrovní a n představuje počet bitů. Do rovnice dosadíme hodnoty současného a maximálního napětí A/D převodníku. [59]

$$q_{max} = \frac{3,3}{2^{12}}$$

$$q_{stavající} = \frac{1,8}{2^{12}}$$

A vypočítáme:

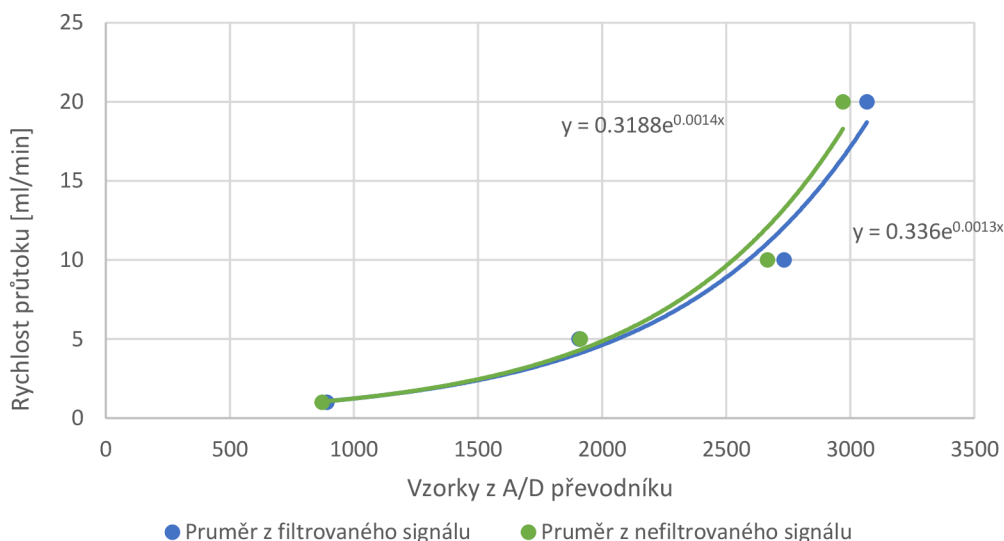
$$q_{max} = 0.022916667$$

$$q_{stavající} = 0.0125$$

Jak je vidno, tak hodnota kvantového kroku u vyššího maximálního napětí na A/D převodníku se zvětšila skoro dvakrát. Ve většině aplikacích se tuto hodnotu snažíme mít co nejmenší, abychom získali co nejlépe odpovídající signál skutečnosti. U problému s velkým rozptylem vzorku nám toto řešení sníží jejich počet skoro o polovinu, ale je to vykoupeno nelineární charakteristikou z obr. 4-3 a snížení přesnosti měření. Z těchto důvodů je tato metoda krajním řešením.

Sestrojení kalibrační křivky a její ověření

Při sestavení kalibrační křivky byly použity hodnoty z průměrového filtru a jako srovnání nezpracovaná naměřená data. Jedním z požadavků při sestavení kalibrační křivky je určitá návaznost mezi vzorky a jejich rozlišení mezi jednotlivými hodnotami. Z tohoto důvodu byly použity pro kalibraci pouze první 4 naměřené průtoky 1 až 20 ml/min. U každého průtoku byl z 500 vzorků vytvořen průměr. Hodnoty průměru byly zaneseny do grafu za účelem vytvoření závislosti. Závislost se proložila trendem a zjistila se její rovnice.



Obr. 6-11 Kalibrační křivka vytvořena z exponenciální rovnice o 4 bodech.

Základem trendu je exponenciální funkce. Výsledné křivky se od sebe příliš nelišily, proto pro ověření chyby měření byla použita rovnice filtrovaného signálu:

$$y = 0.336e^{0,0013x} \quad (9)$$

Y zde představuje hodnotu průtoku a x zase vzorkované napětí. Ze 100 vzorků převedeného na průtok byla určena Absolutní chyba a relativní chyba. Hodnoty chyb byly zprůměrovány a zaneseny do tabulky.

Tab. 6-3 Tabulka chybovosti z kalibrační křivky na obr. 6-12

Nefiltrovaný signál	Absolutní Chyba	Relativní chyba [%]
1 ml/min	0,16	15,71
5 ml/min	0,96	19,8
10 ml/min	2,27	22,68
20 ml/min	2,95	14,73
Filtrovaný signál		
1 ml/min	0,07	7,04
5 ml/min	0,99	19,77
10 ml/min	2,27	19,91
20 ml/min	1,89	9,44

Příklad výpočtu absolutní chyby:

$$\Delta X = X - X' \quad (10)$$

Kde ΔX je chyba měření, X je správná hodnota a X' je vypočítaná hodnota z rovnice.

$$\Delta X = 1 - 0,87343$$

$$\Delta X = 0.12657$$

Příklad výpočtu relativní chyby:

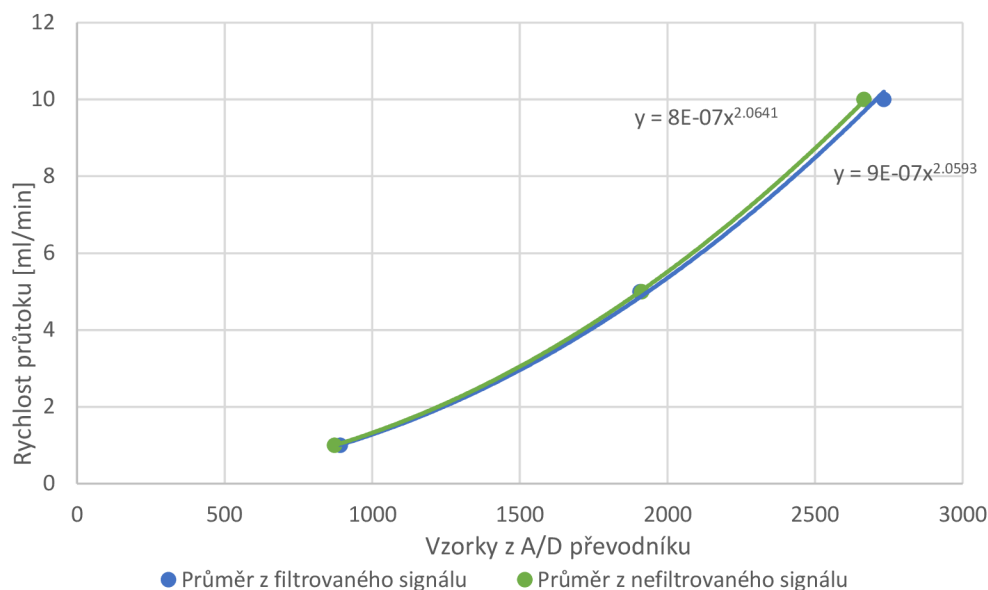
$$\delta X = \frac{X-X'}{X} = \frac{\Delta X}{X} 100 \quad (11)$$

δX je relativní chyba, ΔX je chyba absolutní X je správná hodnota. Relativní chyba se většinou udává v procentech.

$$\delta X = \frac{0.12657}{1} 100$$

$$\delta X = 12.657$$

Funkce pro výpočet byly převzaty z [58]. Z vypočítaných dat můžeme usoudit, že převodní charakteristika není neoptimálnější. V malých průtocích do 5 ml/min dosahuje relativně uspokojivé citlivosti, zvláště pak, když signál vyfiltrujeme. Vyšší hodnoty průtoku jsou již neuspokojivé a při měření 20 ml/min je možnost systému změřit o 2 ml/min více než je skutečnost. Proto bylo otestována ještě jedna charakteristika, ale s hodnotami pouze do 10 ml/min.



Obr. 6-12 Kalibrační křivka vytvořena za použití mocninné funkce a 3 bodů.

Zde byla použita pro trend mocninná funkce a už od pohledu je tato charakteristika přesnější, proto proběhlo další ověření. Použitá rovnice je z nefiltrovaného signálu a stejně jako u první křivky byly vypočítány absolutní a relativní chyby. Rovnice funkce:

$$y = 0.0000008x^{2,064} \quad (9)$$

Stejně jak u rovnice (11) představuje y hodnotu průtoku a x zase vzorkované napětí.

Tab. 6-4 Tabulka chybovosti z kalibrační křivky na obr. 6-12.

Nefiltrovaný signál	Absolutní chyba	Relativní chyba [%]
1 ml/min	0,246	24,16
5 ml/min	0,64	12,84
10 ml/min	0,83	8,27
Filtrovaný signál		
1 ml/min	0,019	1,93
5 ml/min	0,28	5,52
10 ml/min	0,059	0,59

Z vypočítaných hodnot můžeme usoudit, že vypuštěním jednoho bodu z kalibrace jsme dosáhli daleko lepších výsledků než u minulé křivky. Filtrovaný signál dosahuje překvapivě nízké chyby a mohl by být použit pro měření malých průtoků. Při použití funkce vytvořené z filtrovaného signálu by mohl dosáhnout ještě lepších výsledků. Nefiltrovaný signál taky dosáhl velmi uspokojivých výsledků a na rozdíl od minulé charakteristiky nepřekročil hodnotu 1 ml/min. Problémem je, že i tyto hodnoty chyb nefiltrovaného signálu jsou pořád vysoké a v malých průtocích můžou zanášet velké nepřesnosti, proto je filtrace silně doporučena.

7. SHRNU TÍ

Z dostupných výsledků měření můžeme konstatovat, že při vytvoření kalibrační křivky je systém schopný měřit s určitou přesností jen velmi malé průtoky do 20 ml/min a to jenom ilustračně. Při měření do 10 ml/min a použitím metody z oblasti předzpracování signálu je schopný měřit s přijatelnou přesností, ale jelikož je senzor určen pro měření průtoku musí přesnost dosahovat vyšších hodnot. Proto by bylo nutné systém podrobit ještě dalším testům za účelem získání nejistoty měření, zvýšení citlivosti systému apod. Pro měření ve vyšších hodnotách nad 20 ml/min nebyla vytvořena charakteristika. Z obr 6-7, ale můžeme usoudit, že při vyfiltrování signálu je určitá pravděpodobnost použití měřicího systému je možné pro orientační měření průtoku, ale jelikož je tématem této práce vytvoření systému pro mikrofluidiku, kde průtok ovlivňuje funkčnost používaných čipů (viz. Podkapitola 2.2) je tento systém ve vyšších průtocích nepoužitelný. Naopak při použití při průtocích do 15 ml/min s možností signál filtrovat, dosahuje relativně obstojné citlivosti. Je však nutné provést další testy a kalibrace.

Senzor jako takový je kvalitní, s dobrou odezvou hodnot a jeho vlastnosti jsou obstojné. Většina artefaktů, které byly naměřeny se dají snadno signálovým zpracováním upravit. Největší problém ale nastal v zapojení senzoru. Diferenční zapojení není u senzoru nejspíše nejlepší volba, ale existuje senzor z rodiny FS1012 pro aplikaci na plyny. U tohoto senzoru se zdá, že jeho napěťové odpovědi na změnu průtoku jsou lépe uzpůsobeny pro diferenční zapojení. Zapojení zesilovače *Single-ended* se potom zdá přijatelnější volbou pro kapalinový průtokoměr.

Se zamyšlením nad časovou vytížeností a použitých prostředků při sestavení měřicí části obvodu, by byl nákup o třídu vyššího senzoru ze stejné rodiny senzorů jmenovitě FS2012 ideálnější volbou. S tímto typem odpadá část s návrhem zesilovacího prvku a vytváření kalibrace senzoru, neboť je již kalibrován a hodnoty se přenáší pomocí sběrnice I2C nebo SPI. Náklady na tento senzor jsou jen o polovinu větší než u použitého senzoru.

Další nevýhodou systému je připojování na Wi-Fi a metodou odesílání naměřených dat ve zdrojovém kódu, kdy je nutné systém připojit a ručně změnit parametry. Dále může být problém při odhlášení počítače ze sítě, kam jsou posílány data a při opětovném přihlášení je možnost, že se změní IPV4 adresa tohoto zařízení. Při změně adresy ESP32 již není schopné odesílat data a nastává nutnost jeho opětovné změny parametrů ve zdrojovém kódu. Problém se změnou Wi-Fi je možné vyřešit vytvořením přístupového bodu ve zdrojovém kódu ESP32 a vytvořit tak z něj webový server, kde by se po připojení daly změnit parametry. Problém s IPV4 adresou je možné vyřešit vytvořením statické IPV4 adresy pro toto zařízení na routeru nebo vytvořením přístupového bodu k síti statickou IPV4 adresou pro toto zařízení, kdy při odhlášení a opětovném přihlášení se adresa nemění.

Systém obsahuje i další neuspokojivé řešení, jako přenášení dat pomocí MicroSD karty, kdy je nutné ji vyjmout a ručně přehrát data do uživatelského zařízení. Pokus s bezdrátovým přenosem dat proběhl, ale kvůli nedostatku znalostí a času bylo od konkrétního řešení upuštěno. V příložených zdrojových kódech jsou "zakomentované" části kódu, které měly pro tuto funkci sloužit. Zobrazení hodnot průtoku při online měření by šlo rozšířit o mazání posledních x veličin, aby se hodnoty v grafu nekumulovaly a nesnižovali přehled o naměřených veličinách.

ZÁVĚR

Obsahem a cílem bakalářské práce, jak již bylo v úvodu řečeno, je vypracování projektu a následná realizace měřicího systému schopného měřit průtok a zjištěná data odesílat na lokální server, včetně vytvoření webového rozhraní pro vzdálené řízení průtoku s náhledem dat ve formě grafu a možností procházení již naměřených hodnot z minulých měření.

Na základě teoretické rešerše byl navrhnout systém, jehož základním prvkem je průtokový senzor FS1012-1002-LQ využívající kalorimetrický princip. Tento senzor je vhodnou volbou, co se týče poměru nákladu a funkčnosti, ale je nutné ho doplnit o zesilující prvek a návrh vlastní převodní charakteristiky, ke které je potřeba buď již kalibrovaného senzoru nebo pumpy s možností změny průtoku. Jelikož bylo nutné signál zesílit výrobce do výrobního listu senzoru uvedl, jak senzor zapojit. Z navržených možností bylo vybráno diferenční zapojení z důvodu zvýšení přesnosti měření. Protože senzor má jistý vnitřní odpor, byl vytvořen předzesilovač z *rail to rail* operačního zesilovače MCP617, aby byl vnitřní odpor oddělen a neovlivňoval zesílení na konečném diferenčním zesilovači vytvořeného pomocí MCP616.

Signál bylo nutné zpracovat a odesílat do webového rozhraní. Pro tento účel byla vybrána vývojová deska založená na čipu ESP32-WROOM-32D. Tato deska obsahuje integrovaný Wi-Fi modul, rozhraní jako SPI, I2C a A/D převodník, což jsou esenciální rozhraní pro tuto práci. Navíc skýtá velmi dobrý výpočetní výkon a další funkce.

Aby bylo možné systém využít pro analýzy, bylo třeba zajistit určitou frekvenci naměřených vzorků. Jelikož přímé odesílání dat pomocí PHP skriptu do databáze trpělo na velké časové zpoždění, a tím by bylo měření průtoku pouze informativní, byl proto přidán modul pro MicroSD kartu OKY3002. Tím se zvýšila možnost zápisu dat blízko k 1 kHz. Pro doplnění celistvosti a uživatelské přívětivosti byl systému opatřen o OLED displej, který informuje uživatele, co zrovna systém dělá. Celek je nutné napájet, proto rozhodnutí padlo na spínaný regulátor LM2575TT-5. Systém byl poté napájen na vytvořenou DPS a uložen v univerzální krabičce s funkčními dírami. Hardware celého systému vyšel na 714 Kč.

Jedním z požadavků je umožnění systému odesílat data do databáze. Za tímto účelem byl vybrán software XAMPP. Ten vytvoří na počítači uživatele server s MySQL databází. Po zadání domény skládající se z IP adresy počítače a cesty k webové stránce nebo adresy aplikace PHPmyAdmin umožní přístup na lokální síti k datům uloženým v databázi. Nevýhodou tohoto řešení je sama lokální síť, ke které nelze přistupovat jinak než, že se zájemce připojí na danou síť. Tento problém jde, ale vyřešit zakoupením domény. Celé zobrazování, odesílání i připojení k výsledkům by mělo být podporované i u podobných softwarových nástrojů. K naměřeným datům se poté přistupuje přes vytvořenou webovou aplikaci v HTML a CSS. Funkčnost poté zajišťují skripty napsané v PHP. Základním prvkem pro zobrazení je, pak dostupná grafická sada Chart.js vyvinutá na MIT založená na Javascriptu. Pro interaktivnost zobrazení je stránka opatřena o AJAX prvky z knihovny JQuery, umožňující aktualizaci dat bez nutnosti aktualizace webové stránky.

S navrhnutým systémem bylo provedeno zkušební měření za účelem kalibrace. Na zkušebním měření bylo zjištěno, že informace ve výrobním listu nejsou interpretovány správně nebo autor přehlédl zásadní skutečnosti, které vedly k chybám v měření a celkovému snížení funkčnosti měřicího systému. V měření byl senzor FS1012-1002-LQ na různé změny průtoku. Hodnoty napětí byly změřeny pomocí osciloskopu, zpracovány

a popsány. Stejně tak byl ověřen zesilující prvek. Závěrem kapitoly věnované měření bylo vypracování převodní charakteristiky a kalibrace systému. Křivka byla potom otestována pomocí absolutní a relativní chyby. Po jejím stanovením se zjistilo že systém je s určitou přesností použitelný pouze do 10 ml/min.

Díky vzniklým komplikacím při návrhu nedošlo k celkovému otestování měřícího systému na nejistoty, proto je nutné navrhnout systém ještě proměřit s vytvořenými převodními charakteristikami a doplnit zdrojový kód o vybranou formu filtrace signálu.

V celém návrhu webové aplikace se odráží i malá zkušenost a praxe autora se síťovým řešením problému a webovými aplikacemi. V kapitole 7. jsou poté navrhována další řešení, jak systém vylepšit nebo zpřesnit jeho vlastní měření.

Zcela na závěr bych pak chtěl podotknout, že celý návrh a tvorba zařízení pro mě byly náročnou, ale přínosnou zkušeností i praxí, jak pro moje další studium, tak pro další pracovní rozvoj.

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

TP1+	...	Thermopile 1 (+)
TP1-	...	Thermopile 1 (-)
CPAP	...	Continuous positive airway pressure
HVAC	...	Heating, ventilating, air-conditioning
OTA	...	Over the air
Rpm	...	Rounds per minute
PWM	...	Progressive web apps
PTFE	...	Polytetrafluorethylen
DPS	...	Deska plošných spojů
SLPM	...	Standartní litr za minutu
UART	...	Universal asynchronous receiver-transmitter
SPI	...	Serial Peripheral Interface
SDIO	...	Secure Digital Input Output
I2C	...	Inter-Integrated Circuit
PWM	...	Pulse Width Modulation
I2S	...	Inter-IC Sound
GPIO	...	General-purpose input/output
UV	...	ultraviolet
CNC	...	Computer numeric control
A/D	...	Analogově digitální převodník
D/A	...	Digitálně analogový převodník
FAT	...	File Allocation Table
AJAX	...	Asynchronous JavaScript and XML
FFT	...	Fast Fourier transform
ADC	...	Analog digital convertor
IoT	...	Internet of Things
IPV4	...	Internet Protocol version 4
HTTP(S)	...	Hypertext Transfer Protocol (Secure)

Symbols:

ρ	...	Hustota
μ	...	Viskozita
D_h	...	Hydraulický průměr
v	...	Rychlost kapaliny
Re	...	Reynoldsovo číslo
ΔV	...	Objem průřezu
Δt	...	Rozdíl času
S	...	Plocha průřezu
h	...	Výška
g	...	Gravitační zrychlení
p	...	Tlak kapaliny
Nu	...	Nusseltovo číslo
α	...	Koeficient přestupu tepla
λ	...	Měrná tepelná vodivost
V_{dd}	...	Napájecí napětí Operační zesilovače
V_{ss}	...	Napětí na zemi.
ml/min	...	mililitry za minutu
ml/m	...	mililitry za minutu

Literatura

- [1] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-x.
- [2] IntegratedDevice Technology, Inc. [online katalogový list]. *FS1012*. ©2018 [cit. 28.9.2019]. Dostupné z: <https://www.idt.com/us/en/document/dst/fs1012-datasheet>
- [3] TESAŘ, Václav. Mikrofluidika. Automa – časopis pro automatizační techniku, s. r. o. 10/2008. [cit. 5.11.2019]. ISSN 1210-9592.
- [4] BEEBE, David J, Glennys A MENSING and Glenn M WALKER. Physics and applicationsofmicrofluidics in biology. Annualreviewofbiomedicalengineering. 2002, vol. 4, no. 1, pp. 261–286.
- [5] PROPHET, Graham. IDT MEMS-basedflow sensor modulesforliquids&gases – in distribution. *EeNewsEmbedded* [online]. 2017 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.eenewsembedded.com/news/idt-mems-based-flow-sensor-modules-liquids-gases-distribution>
- [6] Espressif Systém [online katalogový list]. *ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U Datasheet V1.9*. ©2019 [4.12.2019]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf
- [7] RIPKA, Pavel a Alois TIPEK. Modernsensors handbook. NewportBeach, CA: ISTE USA, 2007. ISBN 978-1-905209-66-8.
- [8] MILLER, R. W. *Flowmeasurementengineering handbook*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c1989. ISBN 0-07-042046-7.
- [9] ORLÍKOVÁ, Soňa. Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. *Elektrorevue* [online]. 2001, 10.12.2001, **2001**(49) [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [10] UltrasonicFlowmeter Technology. *Universal FlowMonitors* [online]. Hazel Park: Universal FlowMonitors, 2012 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: https://www.flowmeters.com/product-list.php?page=ultrasonic-technology/pg1-cid100.html=/asc_action=SetCurrCat/category_id=100
- [11] KADLEC, Karel. Ultrazvukové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. *AUTOMA*. 2013, (7), 14-17 [cit. 2019-12-13].
- [12] How do peristalticpumpswork? *Watson Marlow* [online]. Wilmington: Watson Marlow, ©2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.watson-marlow.com/id-en/support/how-do-peristaltic-pumps-work-industrial/>
- [13] HOW TO SELECT THE RIGHT MICROFLUIDIC PUMP? FLUIGENT: Smart Microfluidics [online]. Fluigent, c2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.fluigent.com/microfluidic-expertise/what-is-microfluidic/system-comparison-for-microfluidic-applications/>

- [14] Advantages and Disadvantages of Syringe Pumps. *Chemyx Pumps In Research & Industry* [online]. Stafford: Chemyx, ©2019 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://www.chemyx.com/support/knowledge-base/applications/advantages-and-disadvantages-of-syringe-pumps/>
- [15] Flow Control in Microfluidics. *Darwin Microfluidics* [online]. Paris: Darwin Microfluidics, ©2019 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://darwin-microfluidics.com/pages/flow-control-in-microfluidics>
- [16] HANEVELD, J., T.S.J. LAMMERINK, M. DIJKSTRA, H. DROOGENDIJK, M.J. DE BOER a R.J. WIEGERINK. Highly sensitive microcoriolis mass flow sensor. In: *2008 IEEE 21st International Conference on MicroElectroMechanical Systems* [online]. Tucson: IEEE, 2008, 2008, **2008**, s. 920-923 [cit. 2019-12-29]. DOI: 10.1109/MEMSYS.2008.4443807. ISBN 978-1-4244-1792-6. ISSN 1084-6999. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4443807/>
- [17] Coriolisovy průtokoměry: 2010. *AUTOMA*. 2010, (11), 40-42 [cit. 2020-01-02]. ISSN 1210-9592.
- [18] Pressure-based Flow Meters. In: <https://instrumentationtools.com/> [online]. 2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/pressure-based-flowmeters/>
- [19] Typical turbine meter. In: *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. Washington, DC: OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/femp/technical-water-meter-selection-guidelines>
- [20] Teaser-Know-how-E-Zchn-6701-600x338.jpg. In: Baumer [online]. Denmark: Baumer, c2020 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: https://www.baumer.com/dk/en/service-support/know-how/function-principle/functionality-and-technology-of-calorimetric-flow-sensors/a/Know-how_Function_calorimetric_Flow-sensors
- [21] The amount of twisting (in units of time) is quantified by comparing the time difference between the motions of the tubes detected at different locations on the tubes. Note the time difference in the sensor readings. In: *The Current: Flow Solutions blog* [online]. St. Louis: Emerson Flow Expert, 2014 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.flowsolutionsblog.com/blog/the-basics-of-flow-measurement-with-coriolis-meters-part-2/>
- [22] Flow-Regime. In: *Reactor Physics* [online]. Reactor Physics, c2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.reactor-physics.com/engineering/fluid-dynamics/laminar-flow-vs-turbulent-flow/>
- [23] What is Nusselt Number. *Nuclear Power* [online]. Nuclear Power, ©2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/introduction-to-heat-transfer/characteristic-numbers/what-is-nusselt-number/>

- [24] Progressivesqueezeactionwithfewcomponents. In: *Blue-White* [online]. HuntingtonBeach: Blue-White, ©2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.blue-white.com/peristaltic-pump-wear-factors/>
- [25] Single SyringeInfusion Pump. In: *Otto envirtonmental* [online]. Greenfield: Otto envirtonmental, ©2014 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.ottoenvironmental.com/single-syringe-infusion-pump>
- [26] Microfluidic-setup-diagram-recirculating-perfusion-microfluidic-system. In: *ElveFlow* [online]. Paris: ElveFlow, ©2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.elveflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-applications/recirculating-perfusion-microfluidic-system/microfluidic-setup-diagram-recirculating-perfusion-microfluidic-system/>
- [27] *ApacheFriends* [online]. ApacheFriends, 2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.apachefriends.org/index.html>
- [28] Progressive Web Apps - The New Word In User Engagement. Clockwise Software [online]. Dnipro: Clockwise Software, ©2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://clockwise.software/blog/progressive-web-apps-the-new-word-in-user-engagement/>
- [29] Progressive Web Apps: Progressive Web Apps are nowsupported on the desktop! *Web* [online]. Google, ©2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://developers.google.com/web/progressive-web-apps>
- [30] MMW – MICROFLUIDIC VALVE CONTROLLER. *ElveFlow* [online]. Paris: ElveFlow, ©2019 [cit. 2019-12-31]. Dostupné z: <https://www.elveflow.com/microfluidic-flow-control-products/flow-control-system/mmw-microfluidic-mux-wire/>
- [31] MICROFLUIDIC VALVES. In: FLUIGENT: SMART MICROFLUIDICS [online]. Lowell: Fluigent, ©2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.fluigent.com/product/microfluidic-components/ess-easy-switch-solutions/>
- [32] Power-offPosition (3/2-way rocker valve). In: *Darwin Microfluidics* [online]. Paris: Darwin Microfluidics, 2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://darwin-microfluidics.com/products/microfluidic-solenoid-rocker-valve-burkert-type-0127>
- [33] Bürkert 2/2 or 3/2 Way Rocker Valve Type 0127. Darwin Microfluidics [online]. Paris: Darwin Microfluidics, ©2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://darwin-microfluidics.com/products/microfluidic-solenoid-rocker-valve-burkert-type-0127>
- [34] Bubble Trap with PTFE Membrane. PreciGenome [online]. precigenome: PreciGenome, ©2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.precigenome.com/bubble-trap>
- [35] ASHRAF, Muhammad Waseem, Shahzadi TAYYABA a Nitin AFZULPURKAR. MicroElectromechanical Systems (MEMS) BasedMicrofluidicDevicesforBiomedicalApplications. *International Journal of MolecularSciences* [online]. 2011, 12(6), 3648-3704 [cit. 2020-01-02]. DOI:

- 10.3390/ijms12063648. ISSN 1422-0067. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1422-0067/12/6/3648>
- [36] SUH, YongKweon a Sangmo KANG. A Review on Mixing in Microfluidics. *Micromachines* [online]. 2010, 1(3), 82-111 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.3390/mi1030082. ISSN 2072-666X. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-666X/1/3/82>
- [37] KEARY, Tim. What is IIS/Windows Web Server? How to use it, Top Tools&Resources. In: *Comparitech* [online]. Maidstone: comparitech, 2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.comparitech.com/>
- [38] PŘIBYL, Michal, ed. Inženýrské mikrosystémy pro biotechnologické aplikace: sborník workshopu konaného dne 19.6.2007, [Praha ...]. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2007. ISBN 978-807080-647-0.
- [39] KADLEC, Karel. Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. *AUTOMA*. 2014, **2014**(10), 34-39.
- [40] Opticalflow meter Principle. *InstTools* [online]. InstTools, 2020 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/optical-flow-meter-principle/>
- [41] VOJÁČEK, Antonín. Kompaktní kalorimetrické průtokoměry. *Automatizace.HW.cz* [online]. Praha: Automatizace.HW.cz, 2007 [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007021901>
- [42] ESPRESSIF: ESP-IDF Programming Guide. Analog to Digital Converter [online]. Shanghai: Espressif Systems (Shanghai) CO., c2016 - 2020 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/index.html>
- [43] Espressif ESP32-DevKitC V4. In: *RIOT* [online]. RIOT, 2020 [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: https://doc.riot-os.org/group_boards_esp32_wroom-32.html
- [44] OLED display 0,96" 128x64, I2C. In: *GM electronic* [online]. Praha: GM electronic, c1990–2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/oled-display-0-96-128x64?forum%5Bfirst%5D=true>
- [45] Micro SD Storage Board Micro SD TF Card Memory Shield Module Smart Homes Technology. *Okystar* [online]. Shenzhen: Okystar Technology, c2017 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.okystar.com/product-item/card-module-slot-socket-reader-sd-card-module-smart-homes-technology-oky3002/>
- [46] PALACKÝ, Petr. Mikropočítačové řídicí systémy I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008]. ISBN 978-80-248-1494-0.
- [47] OLED technology: introduction and basics. *OLED-Info* [online]. Israel: Metalgrass, c2004-2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.oled-info.com/oled-technology>
- [48] File Allocation Table (FAT). *Techopedia* [online]. Canada: Techopedia, c2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/1369/file-allocation-table-fat>
- [49] KARKI, Jim. Understanding Operational Amplifier Specifications. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2018–2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z:

- https://www.ti.com/lit/an/sloa011a/sloa011a.pdf?ts=1595772850577&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [50] ROB LARSEN. Professional JQuery. 2012. ISBN 9781118026687.
- [51] SANTOS, Rui. Installing the ESP32 Board in Arduino IDE (Windows, Mac OS X, Linux). Randomnerdtutorial [online]. RandomNerdTutorials.com, c2013-2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/installing-the-esp32-board-in-arduino-ide-windows-instructions/>
- [52] JANJIC, Voja. Performance Comparison: Apache vs. IIS. DovX [online]. TechnologyAdvice, c2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <http://www.devx.com/webdev/performance-comparison-apache-vs.-iis.html>
- [53] W3Schools How To [online]. Refsnes Data, c1999-2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.w3schools.com/howto/default.asp>
- [54] Difference Between Linear Regulator and Switching Regulator. ROHM [online]. ROHM, c1997-2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.rohm.com/electronics-basics/dc-dc-converters/linear-vs-switching-regulators>
- [55] Step Down Buck Regulator / Converter. Electronics Notes [online]. electronics-notes.com [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/power-supply-electronics/switching-step-down-buck-regulator-dc-dc-converter.php
- [56] FUSION 4000 INDEPENDENT CHANNELS SYRINGE PUMP. Chemyx [online]. Stafford: Chemyx, c2020 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.chemyx.com/syringe-pumps/fusion-4000/>
- [57] WINKLER, Zbyněk. Měření rychlosti. Robotika.cz [online]. robotika.cz, 2005 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <https://robotika.cz/guide/filtering/cs>
- [58] CHYBY A NEJISTOTY V MĚŘENÍ (1999 : BRNO, Česko), Karel SOUKUP a František VDOLEČEK. Chyby a nejistoty v měření: sborník ze semináře s mezinárodní účastí Brno, 14. říjen 1999. Brno: Vysoké učení technické, Ústav automatizace a informatiky, 1999, 52 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-214-1427-8.
- [59] PASTOR, René, Petr ČESLÁK, Adam ČERNÝ a Tomáš NOWÁK. Převodníky A/D a D/A. Studijní materiály - SŠEaS [online]. Ústí nad Labem: SŠEaS, c2010 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <http://studijni-materialy.sseas.cz/elektronika/3-rocnik/prevodniky-a-d-a-d-a/>

