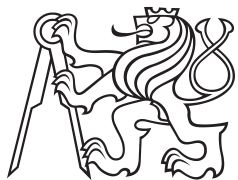


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Elektronický hustoměr kapalin

Pavel Jirkovský

Vedoucí: Ing. Novák Jan Ph.D.
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirkovský** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **492180**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektronický hustoměr kapalin

Název bakalářské práce anglicky:

Electronic Liquid Densitometer

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami elektronického měření hustoty kapalin.
- 2) Porovnejte výhodnost jednotlivých metod pro použití v potravinářství.
- 3) Přenos dat ze senzoru bude bezkontaktní s využitím standardní technologií (např. Bluetooth, Wi-Fi).
- 4) Navrhněte zapojení senzoru s bateriovým napájením, zaměřte se na řízení spotřeby.
- 5) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 6) Proveďte ověřovací měření.
- 7) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- 1) S. Ďaďo, M. Kreidl: Senzory a měřicí obvody. ČVUT Praha, 1999, ISBN: 80-01-01500-9
- 2) K. Kadlec: Provozní snímače hustoty kapalin. Časopis Automa 01,05/2011, ISSN: 1210-9592

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.09.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

Ing. Jan Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Janu Novákovi za odborné vedení mé práce a jeho trpělivost. Poděkování dále patří především mé rodině za důvěru a poskytnuté zázemí.

Prohlášení

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

V Praze, 20. května 2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá metodami měření hustoty kapalin a hodnocením jejich použitelnosti v potravinářském průmyslu. Po zhodnocení byla vybrána metoda využívající k měření vztlakové hustoměry s plovákem pro realizaci vlastního měřáku. Hustoměr s plovákem je opatřen tří-osým akcelerometrem, který měří náklon plováku. Náklon je závislý na hustotě kapaliny a po vyhodnocení jsou data odesílána bezdrátově pomocí Bluetooth Low Energy do mobilní aplikace.

Klíčová slova: hustoměr, náklon, akcelerometr, bezdrátový přenos, Bluetooth Low Energy, mikrokontroler, ESP32

Vedoucí: Ing. Novák Jan Ph.D.

Abstract

This thesis deals with methods for measuring the density of liquids and evaluating their applicability in the food industry. After evaluation, a method using buoyancy density meters with a float was selected for the implementation of the actual meter. The float densitometer is equipped with a three-axis accelerometer that measures the float tilt. The tilt is dependent on the density of the liquid and after evaluation, the data is sent wirelessly via Bluetooth Low Energy to a mobile app.

Keywords: densitometer, tilt, accelerometer, wireless transmission, Bluetooth Low Energy, microcontroller, ESP32

Title translation: Electronic liquid densitometer

Obsah

1 Úvod	1	Laboratorní hydrometry	13
2 Metody měření hustoty kapaliny	3	2.2.3 Refraktometr	14
2.1 Průtokové hustoměry	3	2.2.4 Vztlkové hustoměry s plovákem	15
2.1.1 Ultrazvukové hustoměry	3	Momentová trubice	15
Kalový hustoměr	3	Vztlkový hustoměr s plovákem na řetízku	16
Ultrazvukový hustoměr v čiré kapalině	3	Elektromagnetické zavěšení	17
2.1.2 Hustoměry s kmitající trubicí	5	Kuličkový typ	17
Vibrující U-trubice v Y-Modu	6	3 Fyzikální chování plovákového hustoměru v kapalině	19
Vibrující U-trubice v X-Modu	6	3.1 Výpočet hustoty kapaliny pomocí náklonu plováku	21
2.1.3 Hustoměry s kmitající vidlicí	7	4 Realizace náklonového plovákového hustoměru	25
2.1.4 Coriolisův průtokoměr	8	4.1 Požadavky na realizaci návrhu	25
2.1.5 Radiační hustoměry	9	4.2 Možnosti realizace	25
Konstrukce hustoměru	10	Vývojové moduly	25
2.2 Statické hustoměry	12	Návrh vlastní desky	26
2.2.1 Hydrostatické hustoměry	12	4.3 Výběr komponent	26
2.2.2 Hydrometry	12	Mikrokontroler	26

Akcelerometr	27	MIT App Inventor 2	37
Napěťový regulátor	27	Designer	38
Nabíječka baterie	27	Blocks	38
Baterie	28	5 Měření	41
Pouzdro elektroniky	28	5.1 Použité přístroje	41
Držák plošného spoje	28	5.2 Průběh měření	41
4.4 Součástky pro desku plošného spoje	29	5.3 Zpracování naměřených dat	42
4.5 Návrh vlastní desky plošných spojů	29	6 Závěr	45
4.6 Firmware hustoměru	30	6.1 Zhodnocení výsledku	45
4.6.1 Obsluha akcelerometru	30	6.2 Možná vylepšení	46
Konfigurace akcelerometru	30	A Bibliografie	47
Získání dat	31	B Schéma a deska plošného spoje	51
Kalibrace akcelerometru	32	C Zdrojový kód ESP32	55
4.6.2 Výpočet náklonu	33	D Naměřené hodnoty	61
4.6.3 Komunikace pomocí Bluetooth Low Energy	34		
BLE Server	35		
BLE Klient	36		

Obrázky

2.1 Funkce ultrazvukového hustoměru kalů, převzato z [1].....	4	2.11 Schéma refraktometru, převzato z [15].....	15
2.2 Principiální schéma průtočného ultrazvukového snímače, převzato z [1].....	5	2.12 Vztlakový hustoměr typu momentová trubice, převzato z [1].	16
2.3 Vibrační hustoměr s U-trubicí v Y-mode režimu oscilací, převzato z [1].....	6	2.13 Hustoměr s plovákem na řetízku, převzato z [1].	17
2.4 Vibrační hustoměr s U-trubicí v X-mode režimu oscilací, převzato z [1]	7	2.14 Vztlakový hustoměr s elektromagneticky zavěšeným plovákem, převzato z [1].....	18
2.5 Vibrační hustoměr s kmitající vidlicí, převzato z [7]	8	2.15 Vztlakový hustoměr s kuličkového typu.	18
2.6 Schéma hustoměru s kmitající U-trubicí, převzato z [8]	9	3.1 Stabilní poloha: a) při plování, b) při vychýlení, převzato z [18].	20
2.7 Schéma radiačního hustoměru montovaného na potrubí o průměru větším než 150 mm, převzato z [1].	11	3.2 Labilní poloha tělesa, převzato z [19].....	20
2.8 Schéma radiačního hustoměru montovaného na potrubí o průměru menším než 150 mm, převzato z [1].	11	3.3 Válcový segment, převzato z [21]	21
2.9 Hydrostatický hustoměr: a) se snímačem rozdílu tlaku, b) se dvěma snímači tlaku, převzato z [13].	12	3.4 Náklon hustoměru	22
2.10 Schéma laboratorního hydrometru, převzato z [14].	14	4.1 PET preforma.	28
		4.2 3D model držáku pro variantu vývojových desek	29
		4.3 DPS elektronického hustoměru .	30
		4.4 Adresa akcelerometru pro I^2C komunikaci.	31

4.5 Konfigurace akcelerometru ADXL345.	31	5.1 Závislost náklonu hustoměru na hustotě kapaliny.	43
4.6 Získání hodnoty zrychlení v ose X.	32	B.1 Schéma desky plošného spoje. . .	52
4.7 Kalibrace os X, Y a Z.	33	B.2 Deska plošného spoje.	53
4.8 Výpočet náklonu.	34	C.1 Hlavičkové soubory, deklarace proměnných a funkcí.	56
4.9 Struktura dat GATT profilu, převzato z [30].	35	C.2 Funkce setup.	57
4.10 Knihovny BLE.	36	C.3 Získání dat z akcelerometru a výpočet hustoty.	58
4.11 Definice identifikátorů.	36	C.4 Odeslání dat.	59
4.12 Funkce zpětného volání.	36	D.1 Tabulka naměřených hodnot. . .	62
4.13 Tvorba BLE zařízení, služby a charakteristiky.	37		
4.14 Předání naměřené hodnoty klientovi.	37		
4.15 Okno Designer webového prostředí MIT App Inventor 2. . . .	39		
4.16 UUID na straně BLE Klienta. .	39		
4.17 Žádost o povolení.	39		
4.18 Zařízení nalezeno, konec skenování.	40		
4.19 Zobrazení přijatých dat a následné uložení do Google Sheets.	40		

Tabulky

2.1 Poločas rozpadu radioizotopů . . 10

2.2 Používané stupnice hydrometrů. 13



Kapitola 1

Úvod

Hustota je jednou ze základních charakteristických veličin kapaliny, jejíž pomocí je možné stanovit chování kapaliny, koncentrace složek rozpuštěných v kapalině nebo sledování procesů v potravinářském průmyslu. V současné době existuje řada metod měření hustoty od nejstaršího a nejjednoduššího měření vztlaku a hydrostatického tlaku až po ultrazvukové a radiační hustoměry. Při aktuálním rozmachu bezdrátové a sensorové technologie je přirozené aplikovat tyto možnosti i na měření hustoty kapaliny.

Tato práce modifikuje metodu měření vztlaku s plovákem tak, aby bylo možné naměřené hodnoty náklonu pomocí Bluetooth odeslat do mobilní aplikace. První částí dokumentu je seznámení s možnými metodami měření hustoty, druhá část se zabývá fyzickým návrhem samotného hustoměru.

Kapitola 2

Metody měření hustoty kapaliny

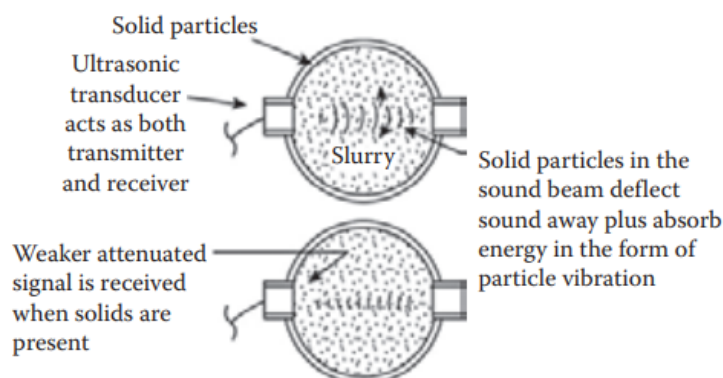
2.1 Průtokové hustoměry

2.1.1 Ultrazvukové hustoměry

Tento typ hustoměru je využíván pro měření kapalin s nerozpuštěnými látkami, kaly i čirými médii.

Kalový hustoměr

Při měření koncentrace kalů je měřící sestava složena z vysílače a přijímače orientovaných proti sobě na průřezu potrubí ve vzdálenosti průměru potrubí 2.1. Vyslaný ultrazvukový pulz se šíří kalem a poměr vstupní a výstupní energie souvisí s hustotou kalu. Útlum ultrazvukového pulzu je funkcí množství nerozpuštěných látek a vzdáleností sond. Vzduchové bubliny přítomné v kalu brání průchodu pulzu, jelikož útlum ultrazvukové vlny je výrazně vyšší ve vzduchu než v kapalině. Pevné částice způsobují rozptyl zvukové vlny a pohlcují její energii ve formě vibrací částic. Měřením útlumu zvukové vlny získáme koncentraci kalu v kapalině [1, 2].



Obrázek 2.1: Funkce ultrazvukového hustoměru kalů, převzato z [1]

■ Ultrazvukový hustoměr v čiré kapalině

Stejně jako v případě kalového hustoměru je nutné znát chování ultrazvukové vlny. Rychlost šíření zvukové vlny je závislá na hustotě, viskozitě, složení kapaliny a teplotě. Rychlost zvuku závisí na hustotě kapaliny podle vztahu

$$v = \sqrt{C/\rho} \quad (2.1)$$

kde C je modul objemové pružnosti prostředí a ρ hustota kapaliny.

V čiré kapalině nám v ideálním případě odpadá problém s nečistotami a vzduchovými bublinami, nicméně je nutné si uvědomit, že se v kapalině mohou nacházet další rozpuštěné látky, jejichž vliv na rychlost zvuku může být složitější povahy [1].

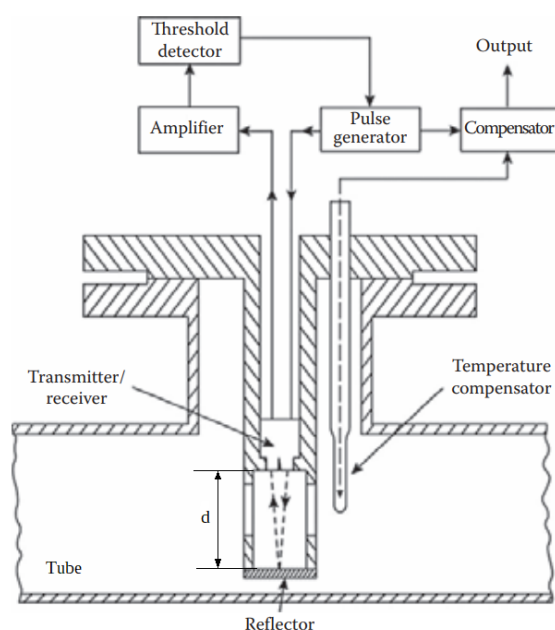
Ultrazvukový snímač hustoty určí rychlost šíření vlny z doby τ , kterou potřebuje pulz na překonání vzdálenosti L mezi vysílačem a přijímačem podle vztahu

$$v = L/\tau \quad (2.2)$$

Přijímač a vysílač je konstruován piezoelektrickými měniči společně s čidlem teploty, které slouží ke kompenzaci výstupního signálu, jelikož rychlost zvuku je závislá na teplotě.

Na obrázku 2.2 vidíme provedení průtočného hustoměru. Vysílač a přijímač je umístěn v rameni vidlice ve vzdálenosti d od reflektoru. Celková dráha, kterou musí ultrazvukový pulz překonat, odpovídá $2d$, resp. vzdálenosti L ve vztahu 2.2.

Snímače průtočného typu umožňují měřit rychlost šíření ultrazvuku s



Obrázek 2.2: Principiální schéma průtočného ultrazvukového snímače, převzato z [1].

přesností 0,1 až 0,01 m/s, což odpovídá přesnosti měření hustoty 0,001 g/cm³ [1, 3].

Využití - Ultrazvukové snímače lze využít k měření koncentrace při výrobě nápojů (obsah extraktu, alkoholu, cukru apod.), v chemickém průmyslu při měření koncentrace alkálií (KOH, NaOH), kyseliny sírové a olea, kyseliny octové, při měření hustoty (stupňovitosti) piva aj..

■ 2.1.2 Hustoměry s kmitající trubicí

Základem principu celého hustoměru je vztah popisující periodu oscilující hmoty na pružině

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{c}} \quad (2.3)$$

kde T je perioda rezonančních oscilací, m hmoty a c je tuhost pružiny. Oscilující hmota se skládá z hmotnosti kapaliny a hmotnosti nádoby uzavírající kapalinu. Celkovou hmotnost vyjádříme vztahem

$$m = M + \rho V \quad (2.4)$$

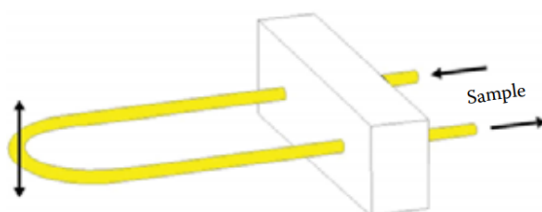
kde M je hmotnost nádoby uzavírající kapalinu, ρ hustota kapaliny a V objem kapaliny. Dosadíme-li 2.4 do 2.3 a vyřešíme pro ρ získáme

$$\rho = \frac{c}{4\pi^2 V f^2} - \frac{M}{V} \quad (2.5)$$

Tento vztah zanedbává vliv teploty a toku média. Změny teploty mění tuhost pružiny i objemu nádoby, proto je nutné do rovnice 2.5 zavést teplotní kompenzaci [1, 4]. Vyšší rychlost průtoku kapaliny zvyšuje odpor vůči příčnému vychýlení kmitajícího prvku, což nepatrně mění oscilační frekvenci. Dále je třeba zajistit adekvátní protiváhu, jelikož rovnice 2.5 počítá s nekonečně velkou protiváhou a je nutné ji zohlednit při výpočtu [5, 6].

■ Vibrující U-trubice v Y-Modu

Máme-li trubici ve tvaru U uloženou v horizontální ploše a řádně zafixovanou těžkou protiváhou, můžeme trubici excitovat ve vertikálním směru (v tzv. Y-modu), viz. obrázek 2.3. Čím těžší protiváhu použijeme, tím méně závislé budou oscilace.

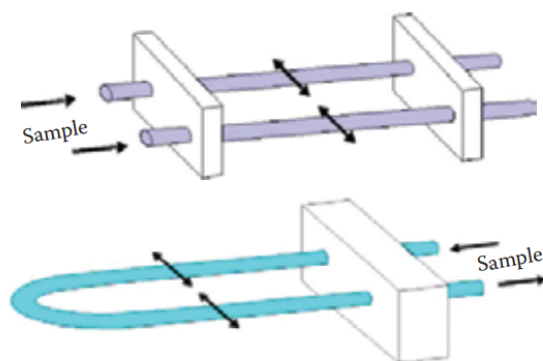


Obrázek 2.3: Vibrační hustoměr s U-trubicí v Y-mode režimu oscilací, převzato z [1].

Oscilace U-trubice jsou vyvolány elektromagnetickým generátorem a zpětnovazebním zesilovačem, který udržuje trubici v rezonanci. Dále je využito odporového snímače teploty pro automatickou teplotní kompenzaci. Tento způsob je využíván pro přesné měření koncentrace obsahu alkoholu v pivovarnictví, farmaceutickém a chemickém průmyslu.

■ Vibrující U-trubice v X-Modu

Skládá se ze dvou paralelních trubice se stejnou geometrií skrz které kapalina protéká. Trubice jsou uloženy v horizontální ploše a excitovány v polovině jejich délky ve stejné rovině, viz obrázek 2.4. Výhodou tohoto uspořádání je absence těžké protiváhy, pokud jsou trubice dostatečně symetrické.



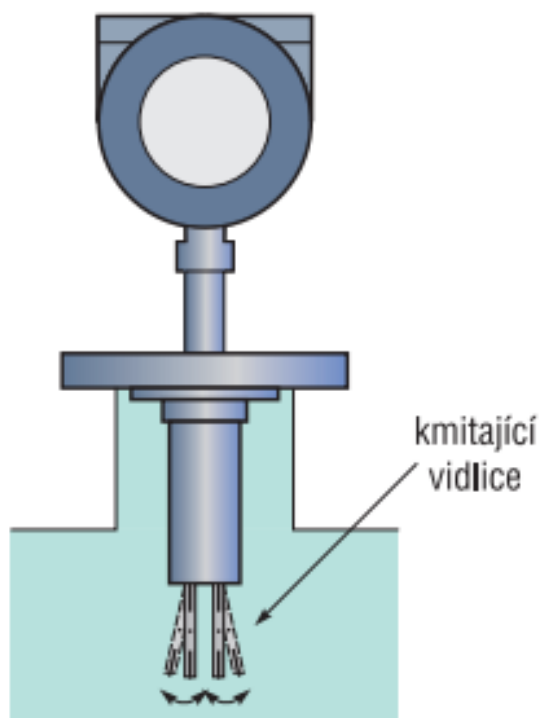
Obrázek 2.4: Vibrační hustoměr s U-trubicí v X-mode režimu oscilací, převzato z [1]

Trubice jsou excitovány piezoelektrickým krystalem se zpětnovazebním zesilovačem pro udržení rezonanční frekvence. Nutnou teplotní kompenzaci zajišťuje odporové teplotní čidlo. Oba typy hustoměrů (X- a Y-mode) jsou schopné měřit hustotu plynů, homogenních kapalin a kalů o malé až střední viskozitě [1, 3].

Využití - Určení procenta pevných částic v kapalině, procenta fruktózy a alkoholu, kvality piva, vína, asfaltu, kyseliny sírové v bateriích.

■ 2.1.3 Hustoměry s kmitající vidlicí

Základem tohoto hustoměru je jednoduchá vidlicová ladička, ponořená do měřené kapaliny. Ramena vidlice jsou buzeny elektromagneticky a udržovány piezoelektrickým snímačem vibrací v rezonanci. Frekvence kmitů vidlice je závislá na hustotě i viskozitě. Existují způsoby, jak minimalizovat vliv viskozity a měřit hustotu přímo, například určením vlastní frekvence oscilací a útlumu oscilací vyvolané kapalinou, lze kompenzovat vliv viskozity. Na obrázku 2.5 vidíme typickou konstrukci tohoto typu hustoměru [3].



Obrázek 2.5: Vibrační hustoměr s kmitající vidlicí, převzato z [7]

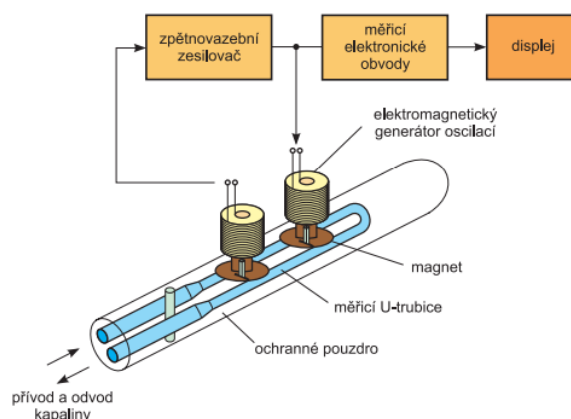
■ 2.1.4 Coriolisův průtokoměr

Tento typ hustoměru využívá Coriolisovy síly, která ovlivňuje rotující hmotu ve směru kolmém na rotační osu. Coriolisův jev způsobuje zkreslení v příčně kmitající trubici a toto zkreslení je přímo úměrné hustotě kapaliny v trubici. Kmitová frekvence potrubí přímo odpovídá hustotě kapaliny. Hustoměr je vyráběn ve verzi s trubicí ve tvaru U nebo přímou trubicí.

Na obrázku 2.6 je vidět typická konstrukce hustoměru skládající se z obvykle dvou U-trubic, mechanismem pro elektromagnetické rozkmitání, detektory pro snímání frekvence a teplotního čidla.

Tok kapaliny je rozdělen na dva proudy, generátor oscilací rozkmitá potrubí v protifázi na jejich vlastní frekvenci. Měřící obvody zaznamenají sinusový průběh napětí jehož frekvence odpovídá vlastní frekvenci vibrační potrubí. Vlastní frekvenci získáme podle vztahu

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$



Obrázek 2.6: Schéma hustoměru s kmitající U-trubicí, převzato z [8]

kde ω je vlastní úhlová frekvence, k tuhost pružiny a m hmotnost systému. Celková hmotnost systému se skládá z hmotnosti měřené kapaliny a trubice, kterou lze vyjádřit vztahem

$$m = \rho V + m_t \quad (2.7)$$

kde ρ je hustota kapaliny, V objem vnitřku trubice a m_t hmotnost trubice. Vyjádříme-li vlastní úhlovou frekvenci ω v řeči frekvence f a vyjádříme hmotnost systému pomocí rovnice 2.7, získáme

$$\omega = 2\pi f \quad (2.8)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\rho V + m}} \quad (2.9)$$

Jelikož známe hmotnost potrubí, jeho rozměry a tuhost pružiny, můžeme přímo měřit hustotu kapaliny. Je nutné dát si pozor na vliv teploty. Rostoucí teplota může způsobit větší elasticitu potrubí, což má za následek změnu vlastní frekvence kmitů, a je potřeba ji kompenzovat. [9, 10].

Využití - Hustoměry založené na Coriolisově jevu mohou měřit jak hustotu, tak i průtok kapalin, viskózních kapalin, plynů i kalů. Jeho řídicí jednotku je možné naprogramovat tak, aby bylo možné určit složení směsí, procento pevných částic vyskytujících se v kapalině, fruktóze a alkoholu.

■ 2.1.5 Radiční hustoměry

Radiace je způsobena samovolným rozpadem jádra atomu. Existují 3 typy radioaktivního záření, záření alfa (emitované jádro hélia), beta (emitovaný

elektron) a gamma (energetické elektromagnetické záření). Každý druh záření má různou prostupnost prostředím, záření alfa prostoupí vzduchem v řádech centimetrů, beta v řádech metrů a gamma v řádu stovek metrů.

Pro měření hustoty se využívá zdrojů gamma záření. Každý zdroj tohoto záření má svůj poločas rozpadu měřený v rocích, viz. tabulka 2.1. Velikost radiačního zdroje je vyjádřena v milicurie (mCi) a je definována jako 37 milionů rozpadů za sekundu. Rozsah velikostí zdroje pro měření hustoty je od 5 do 10 000 mCi. Nejběžnějším zdrojem bývá cesium 137, jehož velikost bývá od 1 do 2000 mCi v závislosti na průměru potrubí [10, 11].

Izotop	Poločas rozpadu [roky]
Americium (Am-241)	455,0
Cesium (Cs-137)	30,0
Cobalt (Co-60)	5,3
Radium (Ra-226)	1602,0

Tabulka 2.1: Poločas rozpadu radioizotopů

Síla radiačního pole je měřená v miliroentgenech (mR), 1 mR odpovídá 2,08 milionům páru iontů v 1 cm³ vzduchu. Intenzita radiačního pole je funkcí velikosti zdroje, vzdálenosti od zdroje a materiálu, kterým záření prochází. Velikosti intenzity popisuje vztah 2.10

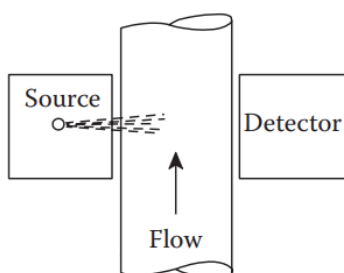
$$D = 1000 \frac{K mCi}{d^2} \quad (2.10)$$

kde D je intenzita zdroje (mR/h), mCi velikost zdroje (mCi), d vzdálenost od zdroje (m) a K konstanta radiačního zdroje (0,6 pro Cs-137). Čím větší hustota materiálu, kterým záření prochází, tím je větší šance, že bude záření pohlceno.

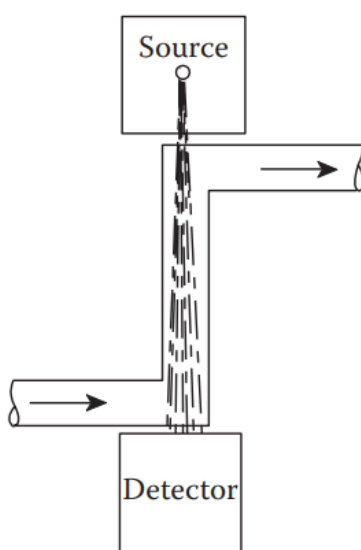
■ Konstrukce hustoměru

Základem je radiační zdroj, který září skrz potrubí do detekčního systému radiačního záření. V případě, že potrubí má průměr větší než 150 mm je možné měřicí soustavu umístit jako na obrázku 2.7.

Pokud je potrubí užší, délka radiační dráhy není dostatečná pro měření s vysokou přesností a citlivostí. Můžeme využít styl montáže podle obrázku 2.8 a prodloužit dráhu, kterou musí svazek překonat.



Obrázek 2.7: Schéma radiačního hustoměru montovaného na potrubí o průměru větším než 150 mm, převzato z [1].



Obrázek 2.8: Schéma radiačního hustoměru montovaného na potrubí o průměru menším než 150 mm, převzato z [1].

Radioaktivní zářič musí být opatřen olověným pouzdem pro ochranu personálu v jeho bezprostřední blízkosti, mechanickou uzávěrkou, sloužící jako bezpečnostní opatření v případě selhání a moderující tok záření. Záření procházející skrz potrubí je zachyceno Geiger-Müllerovým detektorem nebo citlivým scintilačním detektorem s fotonásobičem [1, 11].

Výhody - Vysoká přesnost, kontinuální a bezkontaktní měření, flexibilní montáž, minimální poruchovost, možnost měření kapalin s vysokým obsahem nečistot, agresivních kapalin a kapalin s vysokou viskozitou.

Nevýhody - Usazeniny na stěnách potrubí, znehodnocování zdroje záření, nutnost chránit obsluhu, nutné pravidelné kontroly, vysoká cena.

2.2 Statické hustoměry

2.2.1 Hydrostatické hustoměry

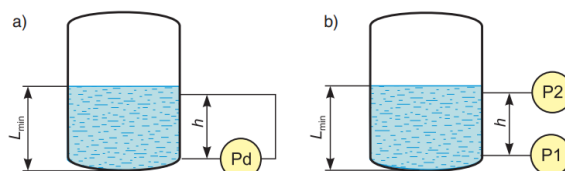
Hydrostatický tlak p v kapalině je přímo úměrně závislý na hustotě a je určen vztahem

$$p = h\rho g \quad (2.11)$$

kde h je výška hladiny, g gravitační zrychlení a ρ hustota kapaliny. Zajistíme-li konstantní výšku hladiny můžeme použít rozdílový snímač tlaku nebo dva snímače tlaku v různých výškách viz. obrázek 2.9. Aby byl splněn požadavek konstantní výšky hladiny, nesmí v nádobě hladina klesnout pod minimální úroveň L_{min} . Naměřené hodnoty Δp přímo úměrně odpovídají hustotě podle vztahu

$$\Delta p = h\rho g \quad (2.12)$$

Bude-li výška hladiny malá, bude malá i citlivost hustoměru. Naměřené hodnoty podléhají vlivu teploty a je nutné zavést korekci. Tato metoda je vhodná v případě, kdy je zajištěno dostatečné množství kapaliny a není vyžadována vysoká přesnost [1, 10, 9, 12].



Obrázek 2.9: Hydrostatický hustoměr: a) se snímačem rozdílu tlaku, b) se dvěma snímači tlaku, převzato z [13].

2.2.2 Hydrometry

Hustoměry tohoto typu byly dříve využívány v laboratořích a průtokoměrech s proměnným průřezem. Nyní se převážně využívají v laboratořích. Jejich funkce je založena na Archimedově zákoně, těleso ponořené do kapaliny, které je v klidu, je nadlehčováno silou rovnající se tíze kapaliny stejného objemu jako je ponořená část tělesa. Hydrometry se budou potápět do té doby, než vytlačí stejnou váhu kapaliny jako je jejich vlastní váha. Hustota je

poměr hmotnosti hydrometru k vytlačenému objemu, tento objem je určený hladinou kapaliny a stupnicí na hydrometru. Jelikož je hustota závislá na teplotě, většina hydrometrů obsahuje teploměr pro teplotní kompenzaci.

Hydrometry používané pro měření kapalin s nízkou hustotou (benzín, kerosin, alkohol) mají měřený rozsah pod 1,0 SG (Specific Gravity), zatímco kapaliny s vysokou hustotou (kyseliny, mléko, solné roztoky) mají rozsah nad 1,0 SG. Je možné navrhnout hydrometry s nižším rozsahem, například 1,0 - 0,95 SG nebo 0,95 - 0,9 SG, pro přesnější měření [6].

Existují hydrometry opatřené různými stupnicemi, podle druhu měřené kapaliny. Běžné stupnice jsou uvedeny v tabulce 2.2

Stupnice	Využití
API	Ropný průmysl
Baumé	Chemie a farmakologie
Brix	Šťávy, vína, cukrovarnictví
Oechsle	Hroznové mošty
Plato	Pivovarnictví
Twaddell	Bělidla a barvy

Tabulka 2.2: Používané stupnice hydrometrů.

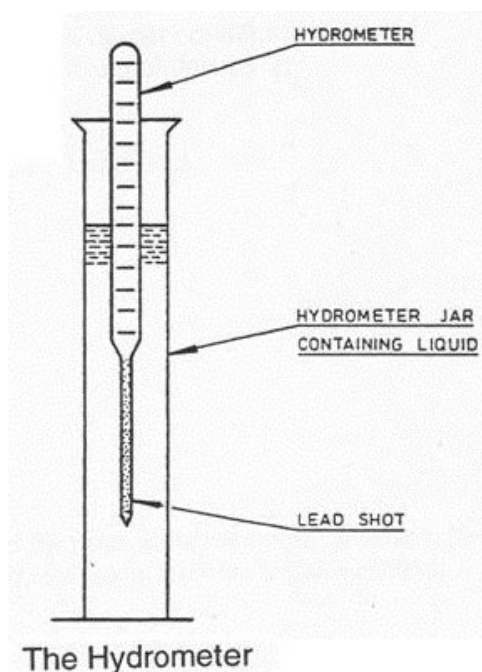
■ Laboratorní hydrometry

Hydrometr se skládá z váženého plováku se stopkou o malém průměru s indikátorem v horní části plováku. Hydrometr má konstantní váhu a po ponoření do kapaliny s různou hustotou vytlačí různý objem kapaliny. Hloubka ponoru stopky určuje hustotu, která se odečte v místě, kde hladina kapaliny protíná stupnici, viz obrázek 2.10 [6, 10, 9].

Výhody - Hydrometry jsou přesné, nevyžadují žádný zdroj energie a jsou korozivzdorné.

Nevýhody - Usazeniny na plováku, turbulence a viskozita ovlivňují přesnost měření.

Využití - Měření stavu elektrolytu v autobateriích, v pivovarnictví, vinařství a v ropném průmyslu.



Obrázek 2.10: Schéma laboratorního hydrometru, převzato z [14].

2.2.3 Refraktometr

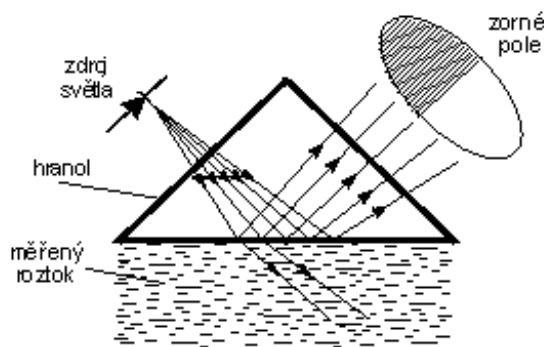
Světlo skrz různá média putuje různou rychlostí. Prochází-li světlo skrz dvě prostředí, dochází k lomu, který je závislý na indexu lomu těchto dvou prostředí. Index lomu n je dán vztahem

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.13)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu a v rychlost světla v prostředí. Světlo dopadající na rozhraní bude z části odraženo a z části pohlceno. Budeme-li zvětšovat úhel dopadu až do tzv. mezního úhlu, dopadající světlo bude totálně odraženo.

Tohoto principu využívá většina refraktometrů. Vyhodnocuje se světlo odražené od rozhraní mezi hranolem a kapalinou. Pozorované odražené světlo v zorném poli je rozděleno na světlou a tmavou část, viz. obrázek 2.11. Rozhraní mezi světlou a tmavou částí závisí na velikosti mezního úhlu, tudíž na indexu lomu kapaliny. Poloha rozhraní je pomocí fotoelektrických detektorů vyhodnocena. Nutná teplotní kompenzace je většinou řízena mikroprocesorem.

Rozhraní hranolu refraktometrů tohoto typu je umísťováno přímo do měřené kapaliny. Výhodou tohoto typu je, že měření není ovlivněno viskozitou,



Obrázek 2.11: Schéma refraktometru, převzato z [15].

zbarvením či přítomností bublinek v kapalině [16].

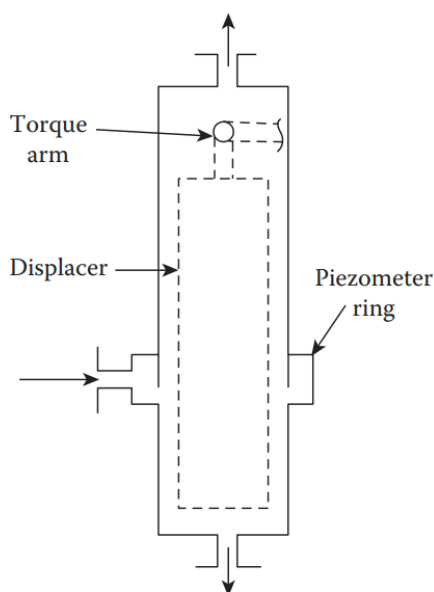
Využití - Měření změny koncentrace libovolné látky ve vodném roztoku, měření kvality medu či mléka, měření podílu rozpustných látek v kávě, měření kvality vinné révy a ovocných šťáv, kontrola množství alkoholu, měření "cukernatosti" kvasu při jeho fermentaci.

2.2.4 Vztlkové hustoměry s plovákem

Ponoříme-li těleso známého objemu a hustoty do měřené kapaliny, můžeme měřit výslednou vztlkovou sílu, která je funkcí hustoty. Má-li ponořený plovák nižší hustotu než kapalina, vztlková síla bude plovák nadnášet a zvedat k hladině. Chceme-li plovák udržet pod hladinou, musíme vyvinout sílu, která ho tam udrží. Bude-li mít plovák vyšší hustotu než kapalina, bude klesat ke dnu, tudíž bude třeba vyvinout sílu potřebnou k udržení plováku v požadované pozici. Všechny hustoměry uvedené v této kapitole budou s tímto faktem pracovat, pouze se bude lišit způsob odečtu této síly.

Momentová trubice

Mějme nádobu s přítokem a odtokem, ve které se nachází vytěšňovač o známém objemu a hustotě, připevněný na rameno, které přenáší točivý moment, viz. obrázek 2.12. Průtokem kapaliny vzniká točivý moment, vyvolaný nadlehčením vytěšňovače, který je přímo úměrný zdánlivé váze plováku a tím pádem i hustotě. Velikost a materiál vytěšňovače ovlivňuje provozní podmínky a měřený rozsah hustot kapalin.



Obrázek 2.12: Vztlkový hustoměr typu momentová trubice, převzato z [1].

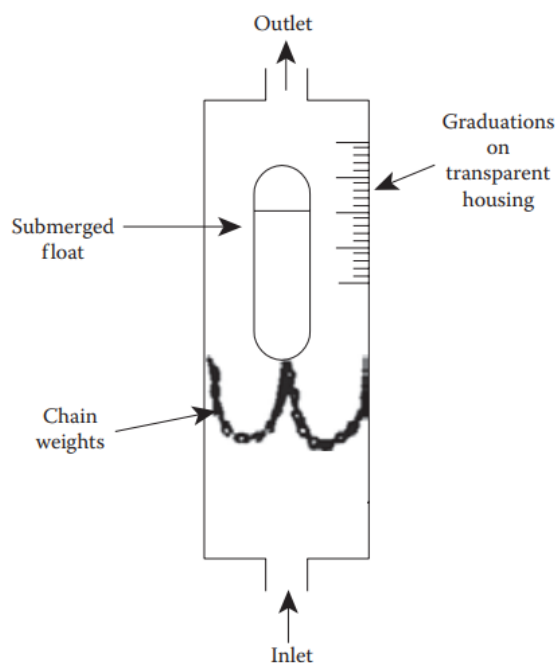
Je nutné udržovat konstantní a nízký průtok kapaliny, proto je doporučeno umístit tento hustoměr mimo provozní potrubí. Lze jím měřit pouze čisté neviskózní kapaliny, jelikož nečistoty přilepené na vytěšňovači zapříčiní změnu jeho objemu a nepřesnost měření [1]

■ Vztlkový hustoměr s plovákem na řetízku

Ponořený plovák a řetízek vytlačují pevný objem kapaliny, viz obrázek 2.13. Vztlková síla je funkcí hustoty kapaliny a jejím zvýšením se plovák stoupá. Během stoupaní plovák zvedá řetízek o kalibrované hmotnosti. Plovák stoupá, dokud se váha soustavy nevyrovná se vzrůstem vztlkové síly vyvolané hustotou kapaliny.

Snímání polohy plováku zajišťuje transformátor se třemi vinutími, umístěný mimo potrubí, a magnetické jádro uvnitř plováku. Pohyb plováku způsobuje změnu indukčnosti transformátoru a výslednou změnu výstupního napětí, toto napětí je usměrněno a vyhodnoceno.

Tento hustoměr je využíván v provozech s čistými a neviskózními kapalinami, jelikož tření ve viskózní kapalině zanáší do měření chybu. Dalším zdrojem chyby je nadměrný průtok kapaliny, který se snažíme minimalizovat [1].

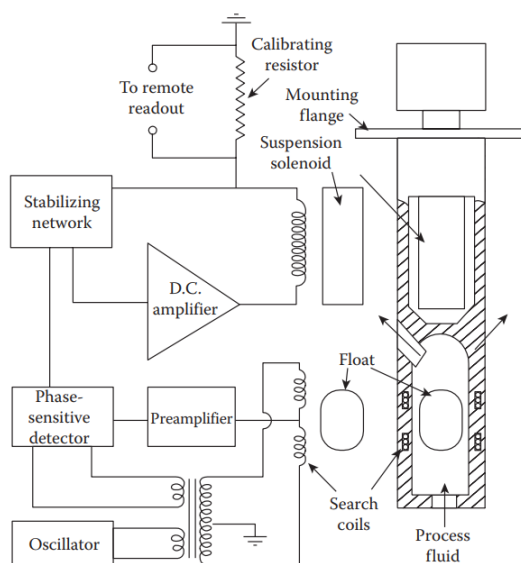


Obrázek 2.13: Hustoměr s plovákem na řetízku, převzato z [1].

■ Elektromagnetické zavěšení

Ponořený plovák je obklopen párem vyhledávacích cívek v pouzdře hustoměru, které jsou napájeny vysokofrekvenčním zdrojem a snímají polohu plováku, viz. obrázek 2.14. Plovák je vyroben ze zlatem potahované feritové slitiny a jeho hustota by měla být nepatrně větší než maximální očekávaná měřená hustota. Plovák nadnáší solenoid nacházející se přímo nad ním a generuje magnetické pole držící plovák na místě. Elektronické obvody se starají, aby byl plovák udržován mezi vyhledávacími cívkami. Při změně hustoty kapaliny plovák klesá a změna polohy vyvolá ve vyhledávacích cívkách rozdílový signál do zesilovače, který zvýší proud do solenoidu. Solenoid přitáhne plovák a vrátí jej zpět do výchozí polohy. Naměřený proud do solenoidu odpovídá hustotě kapaliny.

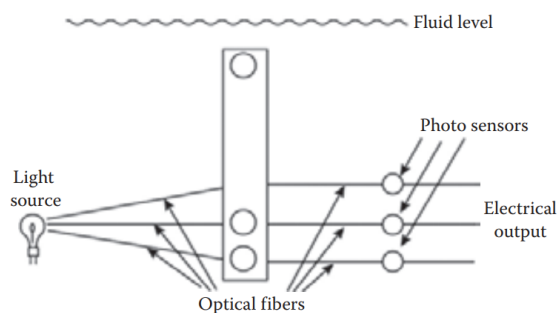
Hustoměr je vhodný pro čiré a neviskózní kapaliny. Případné nečistoty nanesené na plováku by způsobily chybu měření.



Obrázek 2.14: Vztlakový hustoměr s elektromagneticky zavěšeným plovákem, převzato z [1].

■ Kuličkový typ

Tento hustoměr se skládá z průhledné trubice, ve které se nachází desítky dutých, neprůhledných kuliček z křemenného skla, viz obrázek 2.15. Každá kulička má nepatrně různou hustotu, a je tak určen měřící rozsah. Pomocí optických vláken se na jednu stranu trubice svítí světlem, na straně druhé je fotodiodami zaznamenáván průchod světla skrz trubici. Poslední kulička, která se vznáší a neblokuje průchod světla, určuje hustotu.



Obrázek 2.15: Vztlakový hustoměr s kuličkového typu.

Výhodou tohoto způsobu měření je naprostá bezpečnost používání a je vhodná pro měření výbušných směsí. Dále nepodléhá vlivům elektrického a magnetického pole [1, 9, 12].

Kapitola 3

Fyzikální chování plovákového hustoměru v kapalině

Na těleso o objemu V a hustotě ρ_T ponořené do kapaliny o hustotě ρ působí tíhová síla \vec{F}_G a vztlaková síla \vec{F}_{VZ} . Tyto síly jsou opačně orientované a velikost výsledné síly \vec{F} je určena vztahem

$$F = |F_G - F_{VZ}| \quad (3.1)$$

dosazením za F_G a F_{VZ} získáme rovnici

$$F = |mg - \rho Vg| = |\rho_T g - \rho Vg| = |\rho_T - \rho|Vg \quad (3.2)$$

výsledná síla může mít jedno ze tří řešení určené členem $|\rho_T - \rho|$. Hustota tělesa je větší než hustota kapaliny, výslednice míří ke dnu a těleso se potápí. Hustota tělesa je shodná s hustotou kapaliny, výslednice je nulová a těleso se vznáší. Hustota tělesa je nižší než hustota kapaliny, výslednice míří vzhůru proti směru působící gravitace a těleso plove [17].

Ponořené těleso splňující podmínku $\rho_T = \rho$ se působením vztlakové síly bude pohybovat směrem k hladině, částečně se vynoří tak, aby byla splněna podmínka statické rovnováhy. Pro rovnováhu bude platit vztah

$$F'_{VZ} + F_G = 0 \quad (3.3)$$

kde F'_{VZ} je vztlaková síla vytvořená ponořenou částí tělesa o objemu V' . Dosazením a úpravou rovnice 3.3 získáme

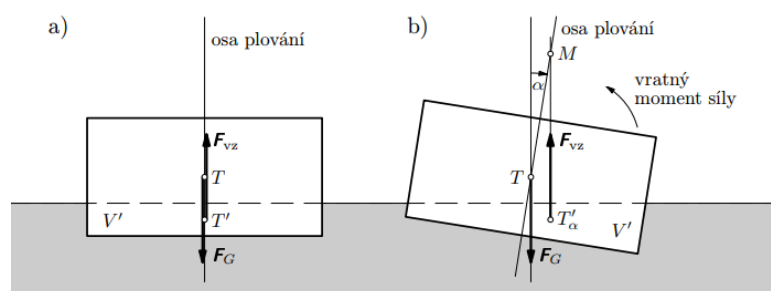
$$V' \rho g = V \rho_T g \quad (3.4)$$

$$\frac{V'}{V} = \frac{\rho_T}{\rho} \quad (3.5)$$

vztah 3.5 lze chápat jako kolik procent tělesa je ponořeno v kapalině.

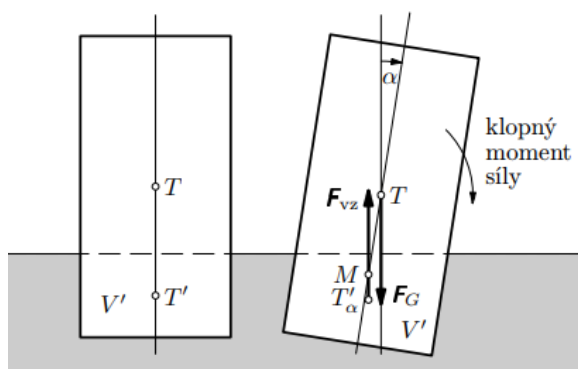
U plovoucích těles se zabýváme stabilitou. Těleso může mít tři polohy, stabilní, labilní (vratkou) a indiferentní (volnou). To v jaké poloze se těleso nachází rozhodují dva body, těžiště tělesa T , kde působí tíhová síla F_G a těžiště kapalného tělesa T' , v němž působí vztlaková síla F_{VZ} . Za rovnováhy se tyto dva body nachází na tzv. ose plování. Vychýlíme-li těleso o malý úhel α změní se tvar kapalného tělesa a tudíž i poloha těžiště T' na T'_α . Při vychýlení vytvoří tíhová a vztlaková síla moment síly, který vrací nebo převrací vychýlené těleso. Stabilitu určuje tzv. metacentrum M , které je průsečíkem vychýlené osy plování a vztlakové síly. Vzdálenost mezi těžištěm T a metacentrem se nazývá metacentrická výška.

Pokud se bod M nachází nad bodem T je metacentrická výška kladná, vytváří se vratný moment síly a těleso se vrací do stabilní polohy, viz obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Stabilní poloha: a) při plování, b) při vychýlení, převzato z [18].

Je-li metacentrum pod těžištěm T , metacentrická výška je záporná a těleso se nachází v labilní poloze. Při vychýlení o úhel α , vytvoří síly F_G a F_{VZ} klopný moment síly a těleso převrhne, viz. obrázek 3.2



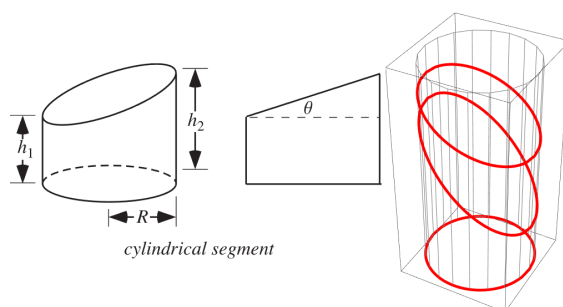
Obrázek 3.2: Labilní poloha tělesa, převzato z [19].

Pokud se bod M nachází v těžišti T , jedná se o indiferentní polohu. Příkladem této polohy může být rotační válec nebo koule.

3.1 Výpočet hustoty kapaliny pomocí náklonu plováku

Ponoříme-li sestavené zařízení do kapaliny zjistíme, že vlivem nerovnoměrně rozložené váhy v krytu, čili hmotným středem posunutým mimo střed souměrnosti krytu, plove zařízení ve stabilním nakloněném equilibriu. Vztlková síla ponořené části zařízení je v rovnováze s tíhovou silou.

Pro výpočet hustoty měřené kapaliny potřebujeme zjistit objem ponořené části zařízení. Vzhledem k náklonu tělesa lze ponořenou část vyjádřit jako válcový segment na obrázku 3.3 [20].



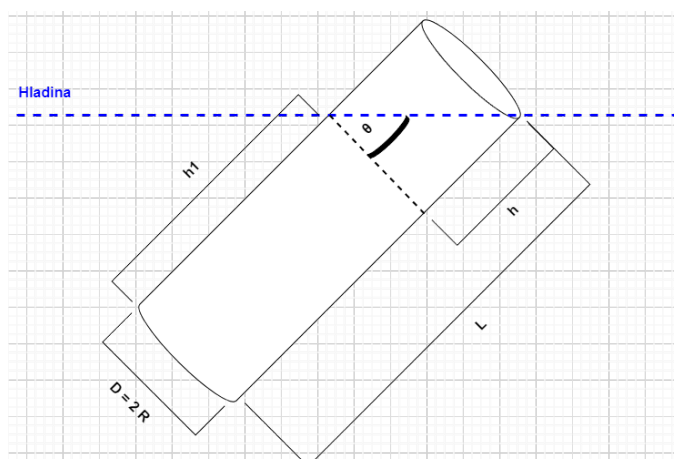
Obrázek 3.3: Válcový segment, převzato z [21]

Výpočet objemu tohoto útvaru popisuje vztah

$$V' = \frac{1}{2}\pi R^2(h_1 + h_2) \quad (3.6)$$

kde R je poloměr válce, h_1 kratší výška válce a h_2 delší výška válce. Nyní potřebujeme vypočítat výšky h_1 a h_2 .

Budeme-li pozorovat ponor plováku zjistíme, že uzávěr PET preformy plove na hladině, což nám umožňuje provést jedno zjednodušení a to takové, že výška h_2 bude odpovídat délce krytu zařízení $L = 16$ cm. Nyní můžeme ze znalosti náklonu plováku určit i kratší výšku h_1 . Na obrázku 3.4 vidíme schema situace ponořeného plováku kde h je výška trojúhelníku, který vznikne rozdělíme-li ponořenou část na obdélník a trojúhelník. Průměr válce $D = 2R$ a úhel θ mezi hladinou a kolmicí na stranu L .



Obrázek 3.4: Náklon hustoměru

Výšku h_1 vyjádříme jako

$$h_1 = L - h \quad (3.7)$$

kde výšku h , vyjádříme z rovnice

$$\tan \theta = \frac{h}{2R} \quad (3.8)$$

a získáme

$$h = 2R \tan \theta \quad (3.9)$$

Nyní můžeme dosadit do rovnice 3.6 a vypočítat objem ponořené části plováku

$$V' = \frac{1}{2} \pi R^2 (L - 2R \tan \theta + L) \quad (3.10)$$

po úpravě získáme

$$V' = \pi R^2 (L - R \tan \theta) \quad (3.11)$$

dosadíme-li V' do rovnice 3.5 můžeme vyjádřit hustotu kapaliny ρ v závislosti na náklonu plovákového hustoměru

$$\rho = \rho_T \frac{V}{V'} \quad (3.12)$$

$$\rho = \rho_T \frac{\pi \check{R}^2 L}{\pi R^2 (L - R \tan \theta)} \quad (3.13)$$

$$\rho = \frac{m}{\pi \check{R}^2 L} \frac{\pi \check{R}^2 L}{\pi R^2 (L - R \tan \theta)} \quad (3.14)$$

$$\rho = \frac{m}{\pi R^2 (L - R \tan \theta)} \quad (3.15)$$

kde m je celková hmotnost zařízení.

Tato rovnice je platná v určitém rozsahu úhlů náklonu. Se zvyšujícím se úhlem náklonu klesá výška h_1 . Položíme-li v rovnici 3.7 h_1 rovno 0 a dosadíme rovnici 3.9, pak získáme jednu z krajních podmínek pro rozsah, ve kterém je možné vztah 3.15 uplatnit.

$$h_1 = L - h \quad (3.16)$$

$$h_1 = L - 2R \tan \theta_{max} \quad (3.17)$$

$$0 = L - 2R \tan \theta_{max} \quad (3.18)$$

$$\theta_{max} = \arctan \frac{L}{2R} \quad (3.19)$$

dosazením číselných hodnot za L a R získáme maximální úhel náklonu, ve kterém rovnice 3.15 platí.

$$\theta_{max} = \arctan \frac{L}{2R} = \arctan \frac{16}{2 \cdot 1,9} = 76^\circ 38' \quad (3.20)$$

Z rovnice 3.20 vidíme maximální možný náklon hustoměru, při kterém je ještě možné aplikovat rovnici 3.15.

Pro zjištění druhé krajní podmínky využijeme opět rovnici 3.7 a položíme h_1 rovno L .

$$L = L - 2R \tan \theta_{min} \quad (3.21)$$

Vyjádríme úhel náklonu θ_{min}

$$\theta_{min} = \arctan \frac{L - L}{2R} \quad (3.22)$$

vidíme, že rozdíl v čitateli je roven 0, tudíž úhel náklonu $\theta_{min} = 0^\circ$.

Rovnice 3.20 a 3.22 nám určují rozsah, kterém je možné tento typ hustoměru využít. Dosadíme-li tyto meze do rovnice 3.15 určíme tak rozsah hustot kapalin, které je hustoměrem možné měřit. Do rovnice 3.15 za θ dosadíme θ_{min} a θ_{max} , L , R a m je celková hmotnost zařízení zjištěná pomocí vážení. Rovnice

$$\rho_{min} = \frac{m}{\pi R^2 (L - R \tan \theta_{min})} = \frac{150}{\pi 1,9^2 \cdot (16 - 1,9 \cdot \tan 0)} = 0,827 g/cm^3 \quad (3.23)$$

odpovídá minimální měřitelné hustotě a

$$\rho_{max} = \frac{m}{\pi R^2 (L - R \tan \theta_{max})} = \frac{150}{\pi 1,9^2 \cdot (16 - 1,9 \cdot \tan 76,64)} = 1,653 g/cm^3 \quad (3.24)$$

odpovídá maximální měřitelné hustotě.

Kapitola 4

Realizace náklonového plovákového hustoměru

4.1 Požadavky na realizaci návrhu

Pro měření hustoty kapaliny pomocí náklonového plováku je nutné zjistit úhel náklonu celé měřící sestavy. Tuto úlohu zajišťuje 3-osý MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) akcelerometr, který v pravidelných intervalech měří složky gravitačního zrychlení v ose X, Y a Z. Při změně náklonu dochází ke změně velikosti složek zrychlení, které lze přepočítat na úhel náklonu ve stupních. Získaná data budou po datové sběrnici I^2C přenášena do mikroprocesoru, kde dojde k výpočtu náklonu a následně i hustoty kapaliny. Při návrhu je nutné dbát na energetickou náročnost, proto musí být mikrokontroler sám o sobě úsporný a podporovat bezdrátovou technologii Bluetooth Low Energy (BLE), díky které bude možné získané hodnoty zaslat a prezentovat například na smartphonu.

4.2 Možnosti realizace

Při realizaci byly využity dva možné přístupy pro sestavení a zapojení potřebné elektroniky.

■ Vývojové moduly

Existuje řada mikročipů a MEMS čipů, které je možné zakoupit v podobě modulů. Jde o malé desky plošných spojů osazených integrovanými obvody potřebnými pro konkrétní úlohu. Piny mikročipů jsou vyvedeny na pinové lišty nacházející se na okraji DPS.

V této variantě bylo využito vývojové desky LaskaKit ESP32-C3-LPKit založené na WiFi/Bluetooth čipu ESP32-C3 a destičky s 3-osým akcelerometrem ADXL345. Kit se skládá z DPS s mikroprocesorem a minimem součástek, nutných pro správné fungování procesoru. Součástí desky je také zdroj pro napájení čipu a programátor, kterým lze do mikroprocesoru nahrát firmware. Propojení obou destiček je řešeno propojovacími kabely.

Tento styl realizace je výhodný ve vývojové fázi, kdy může dojít k volbě nevyhovujícího modulu nebo nesprávnému zapojení komunikačních pinů mikroprocesoru. Nevýhodou tohoto přístupu jsou velké rozměry použitých desek a cesta mezi mikroprocesorem a senzorem je příliš dlouhá.

■ Návrh vlastní desky

Touto cestou lze dosáhnout menší velikosti DPS, optimalizovat vzdálenost mezi senzorem a mikroprocesorem a zvýšit robustnost napájení čipů. Návrh této desky může být časově náročnější a případná chyba se hůře odstraňuje. Pro zjednodušení návrhu byly využity obdobné alternativy samostatných komponent, které se nacházejí na vývojových deskách prvního návrhu, jde o mikroprocesor ESP32 WROOM a 3-osý akcelerometr ADXL345.

■ 4.3 Výběr komponent

■ Mikrokontroler

Pro zhotovení varianty z vývojových desek byla využita deska LaskaKit ESP32-C3-LPKit jejíž velikost vyhovovala zamýšlenému krytu z PET preformy. Další její výhodou je důraz kladený na energetickou náročnost, kterou zajišťuje

mikrokontroler ESP32-C3 s extrémně nízkou spotřebou. Rovněž disponuje subsystémem pro WiFi, který splňuje požadavky protokolu IEEE 802.11b/g/n a pro Bluetooth Low Energy podporující funkce Bluetooth 5. Modul je opatřen piny pro komunikaci po I^2C sběrnici, konektorem pro zapojení baterie a USB-C konektorem sloužícím k programování mikrokontroleru, napájení desky v případě absence baterie a nabíjení baterie. [22]

Pro návrh vlastní desky byla využita alternativa mikročipu ESP32-C3 a to ESP32-WROOM-32. Jedná se o starší mikrokontroler s integrovanou anténou a verzí Bluetooth 4.2 [23].

■ Akcelerometr

V obou návrzích byl použit 3-osý MEMS akcelerometr ADXL345 od firmy Analog Devices. Čip nabízí nízkou spotřebu a malé rozměry. Je schopný měřit v rozsahu ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g a ± 16 g. Rozlišení je možné uživatelem nastavit v závislosti na zvoleném rozsahu, 10-bit pro nejnižší rozsah až 13-bit pro nejvyšší rozsah. Pro komunikaci využívá rozhraní I^2C a SPI. Tento akcelerometr je vhodný pro měření náklonu a umožňuje měřit změnu náklonu menší než 1° [24].

■ Napěťový regulátor

S ohledem na dostupnost byl pro stabilizaci napájecího napětí z baterie zvolen regulátor s nízkým poklesem napětí neboli Low Drop-Out (LDO) regulátor TPS7A0333DBVR od firmy Texas Instruments. Nabízí stabilizaci vstupního napětí v rozmezí od 1,5 do 6 V na fixní výstupní napětí v rozsahu od 0,8 do 5 V nastavitelné uživatelem s krokem 50 mV. LDO je schopné při výstupním napětí 3,3 V dodat 200 mA s maximálním poklesem napětí 270 mV [25].

■ Nabíječka baterie

Vzhledem k přítomnosti baterie v návrhu bylo nezbytné obohatit navrhouvanou desku nabíječkou jednočlánkových Li-ion baterií TP4054 od firmy TOPPOWER. Nabíjecí proud je možný naprogramovat až do hodnoty 800

mA. TP4054 nabízí možnost sledování stavu nabíjení pomocí dedikovaného pinu [TP4054].

■ Baterie

Jedním z požadavků je maximalizace provozní doby zařízení, proto byla zvolena GeB Li-Ion baterie formátu 18650 o kapacitě 3200 mAh [26].

■ Pouzdro elektroniky

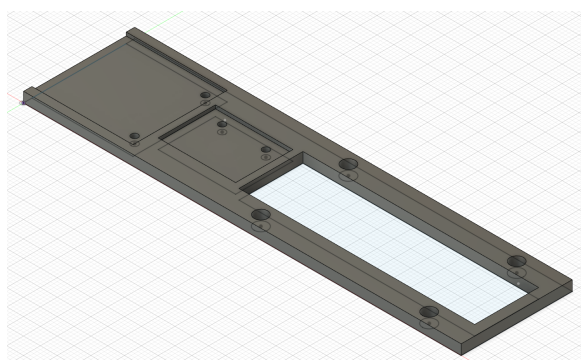
Pouzdro bylo vybírané tak, aby absolutně zamezilo jakémukoli průniku kapaliny do vnitřku pouzdra, ale zároveň bylo snadno rozebíratelné a zajistilo pevné umístění držáku s DPS. Byla zvolena polyethylentereftalátová (PET) preforma 4.1, válcového tvaru s šroubovým uzávěrem o délce 16,5 cm a průměru 3,8 cm.



Obrázek 4.1: PET preforma.

■ Držák plošného spoje

V případě návrhu s vývojovými deskami i vlastním návrhu DPS bylo potřeba zajistit robustní oporu použité elektroniky. Jednoznačně nejlepší variantou byl vlastní návrh držáku pro 3D tisk v programu Fusion 360 od firmy Autodesk. Na obrázku 4.2 je 3D model držáku pro variantu z vývojových desek.



Obrázek 4.2: 3D model držáku pro variantu vývojových desek

4.4 Součástky pro desku plošného spoje

Pro dosažení malých rozměrů byly zvoleny součástky typu SMD (Surface Mounted Device). Jedná se o komponenty pro přímou povrchovou montáž na DPS. Výhodou tohoto typu montáže je absence drátů a nutnosti vrtat díry, avšak ruční osazení součástek je obtížnější. Pasivní součástky byly vybrány v pouzdře 0603 s tolerancí 1% a 5%.

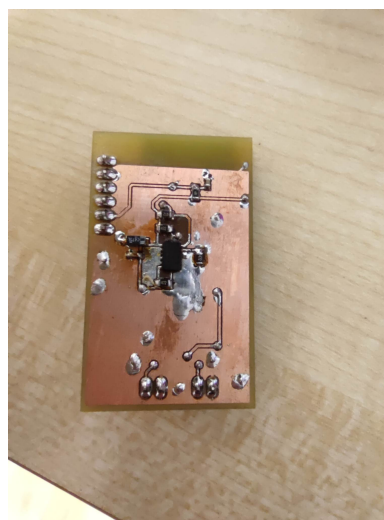
4.5 Návrh vlastní desky plošných spojů

Schéma zapojení desky nalezneme v příloze B.1. Schéma obvodu a DPS bylo realizováno v programu Eagle ve verzi 9.6.2.

Prvním krokem návrhu bylo nalézt v knihovně programu Eagle potřebné modely a schemata použitých součástek a provést jejich zapojení. Další fáze zahrnuje přidělení správných pouzder a očíslování součástek. Posledním krokem je návrh desky samotné, viz. příloha B.2, kde provádíme rozmístění součástek tak, aby nedocházelo k vzájemnému rušení, a cesty byly pokud možno co nejkratší. Deska je dvouvrstvá o tloušťce 1,57 mm a součástky jsou osazeny z obou stran, viz. obrázek 4.3.



(a) : DPS čelní strana.



(b) : DPS zadní strana.

Obrázek 4.3: DPS elektronického hustoměru

4.6 Firmware hustoměru

4.6.1 Obsluha akcelerometru

Pro komunikaci s akcelerometrem ADXL345 využijeme knihovny `Wire.h`, umožňující komunikaci s I^2C/TWI (Two Wire Interface) zařízeními. Pro propojení senzoru a mikrokontroleru využijeme piny `SDA` pro přenos dat a `SCL` pro hodinový signál. Linky ESP32 nejsou vnitřně vytaženy nahoru pomocí rezistorů, proto je nutné k těmto linkám dodat vytahovací rezistory o hodnotách 4,7 k Ω .

Konfigurace akcelerometru

Nejprve provedeme konfiguraci akcelerometru. Každé I^2C zařízení má svou unikátní I^2C adresu, v našem případě 0x53 [24], viz. obrázek 4.4.

Před nastavením akcelerometru je nutné započít komunikaci příkazem `Wire.begin()` a specifikovat piny linek `SDA` a `SCL`. ESP32 přenáší data do akcelerometru voláním metod `Wire.beginTransmission()`, `Wire.write()`, a `Wire.endTransmission()`. Konfigurace registrů pro rychlost přenosu, rozlišení

```
int ADXL345 = 0x53;           // ADXL345 sensor I2C address
```

Obrázek 4.4: Adresa akcelerometru pro I^2C komunikaci.

a funkcí pro úsporu energie akcelerometru ADXL345 [24] je ukázána na obrázku 4.5

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin(8, 10);

  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x2C);           //Data rate and power mode control
  Wire.write(0x08);           //Output data rate 25 Hz
  Wire.endTransmission();

  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x31);           //Data format control
  Wire.write(0x08);           //Full resolution
  Wire.endTransmission();

  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x2D);           //Power-saving features control
  Wire.write(0x08);           // Measure mode
  Wire.endTransmission();
}
```

Obrázek 4.5: Konfigurace akcelerometru ADXL345.

■ Získání dat

Na obrázku 4.6 je příklad získání zrychlení v ose X z datových registrů 0x32 a 0x33. Při zvoleném rozsahu ± 2 g máme rozlišení 10bit, 10bitové hodnoty zrychlení získáme maskováním druhého bajtu (který se čte z 0x33 pro osu X) pomocí 0x03, čímž se osmkrát posune doprava. Poté se oba bajty spojí (0x32 & 0x33) do celého 16bitového čísla. Tato 10bitová hodnota se bude pohybovat

od 0 do 1024. Zrychlení se měří v obou směrech podél osy. Pokud je tedy hodnota větší než 511, odečteme od ní 1024 a získáme zápornou hodnotu, která udává druhý směr osy. Finální zrychlení získáme vynásobením 10bit hodnoty 0,0039. To samé provedeme i pro osu Y a Z.

```
void loop() {

  // X-axis data acquisition
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x32);
  Wire.endTransmission();
  Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
  byte x0 = Wire.read();

  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x33);
  Wire.endTransmission();
  Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
  byte x1 = Wire.read();
  x1 = x1 & 0x03;

  uint16_t x = (x1 << 8) + x0;
  int16_t xf = x;

  if(xf > 511) {
    xf = xf - 1024;
  }
  float X = xf*0.0039;
}
```

Obrázek 4.6: Získání hodnoty zrychlení v ose X.

Kalibrace akcelerometru

Ke kalibraci akcelerometru využijeme OFF_SET registry, jejichž adresy nalezneme v [24]. Pro kalibraci využijeme syrová data před upravením do požadované podoby. Akcelerometr umístíme tak, aby kalibrovaná osa mířila ve směru gravitačního zrychlení. Zaznamenáme nejvyšší naměřenou hodnotu a provedeme následný výpočet 4.3. Výpočet provedeme pro osu X a bude pouze názorný se smyšlenými hodnotami.

$$R_x = 283 \quad (4.1)$$

$$Error : 283 - 256 = 27 \quad (4.2)$$

$$R_{offset} = -Round(27/4) = -7LSB \quad (4.3)$$

kde R_x je hodnota naměřená akcelerometrem a R_{offset} je kalibrační hodnota pro osu X.

Obrázek 4.8 popisuje zapsání kalibračních hodnot do OFF SET registrů.

```

//X-axis calibration
Wire.beginTransmission(ADXL345);
Wire.write(0x1E);
Wire.write(0);
Wire.endTransmission();

//Y-axis calibration
Wire.beginTransmission(ADXL345);
Wire.write(0x1F);
Wire.write(3);
Wire.endTransmission();

//Z-axis calibration
Wire.beginTransmission(ADXL345);
Wire.write(0x20);
Wire.write(-13);
Wire.endTransmission();

```

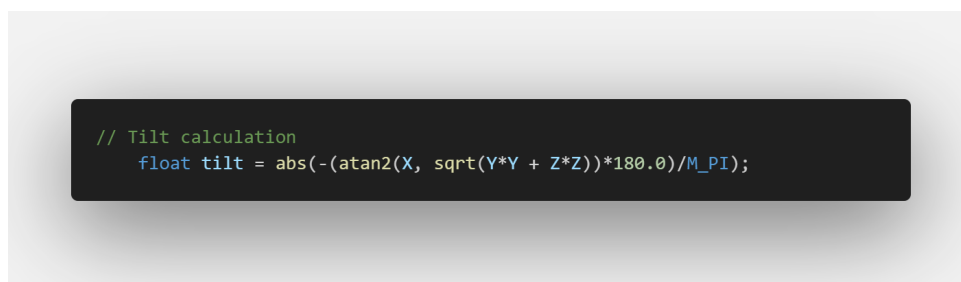
Obrázek 4.7: Kalibrace os X, Y a Z.

4.6.2 Výpočet náklonu

Pro výpočet náklonu θ hustoměru z hodnot zrychlení tříosého akcelerometru využijeme následující vztah [27]

$$\theta = - \left(\arctan 2 \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \right) \quad (4.4)$$

kde a_x , a_y a a_z jsou složky zrychlení v osách X, Y a Z. Programové řešení výpočtu je znázorněno na obrázku ??



Obrázek 4.8: Výpočet náklonu.

4.6.3 Komunikace pomocí Bluetooth Low Energy

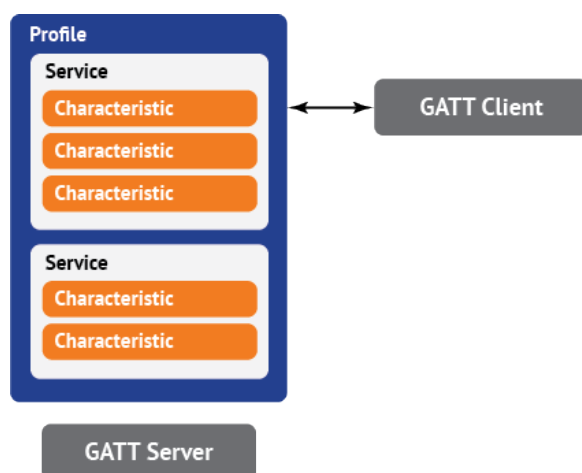
Bluetooth Low Energy, zkráceně BLE, je energeticky úsporná varianta Bluetooth. Hlavní aplikací BLE je přenos malého množství dat na krátkou vzdálenost (malá šířka pásma). Na rozdíl od neustále zapnutého Bluetooth zůstává BLE neustále v režimu spánku dokud není navázáno spojení. Díky tomu má velmi nízkou spotřebu energie.

V technologii BLE existují dva typy zařízení, server a klient. Zařízení ESP32 může fungovat buď jako klient nebo jako server, v našem případě jako server. Server inzeruje svou existenci, takže jej mohou najít ostatní zařízení, a obsahuje data, která může klient číst. Klient prohledává okolní zařízení, a když najde hledaný server, naváže spojení a naslouchá příchozím datům. Tomuto postupu se říká komunikace bod-bod [28].

GAP (Generic Access Profile) řídí připojení a reklamu v Bluetooth. GAP zviditelňuje zařízení pro okolní svět a určuje, jak spolu mohou dvě zařízení komunikovat. GAP definuje různé role zařízení, dvě klíčová jsou centrální zařízení a periferní zařízení. Periferní zařízení jsou malá zařízení s nízkým výkonem a omezenými zdroji, která se mohou připojit k mnohem výkonnějšímu centrálnímu zařízení [29]

GATT (Generic Attributes) definuje hierarchickou datovou strukturu, která je vystavena připojeným zařízením BLE, viz obrázek 4.9. To znamená, že GATT definuje způsob, jakým dvě zařízení BLE odesílají a přijímají standardní zprávy.

Nejvyšší úroveň hierarchie je profil, který se skládá z jedné nebo více služeb. Každá služba obsahuje alespoň jednu charakteristiku nebo může také odkazovat na jiné služby. Služba je soubor informací, jako jsou například údaje ze senzorů. Existují předdefinované služby pro několik typů dat definovaných v SIG (Bluetooth Special Interest Group), jako například krevní tlak, srdeční



Obrázek 4.9: Struktura dat GATT profilu, převzato z [30].

tep, váha atd..

Charakteristika obsahuje skutečná data a má vždy dva atributy, deklaraci charakteristiky (která poskytuje metadata o datech) a hodnotu charakteristiky. Za hodnotou charakteristiky mohou navíc následovat deskriptory, které dále rozšiřují metadata obsažená v deklaraci charakteristiky.

Každá služba, charakteristika a deskriptor mají identifikátor UUID (Universally Unique Identifier). UUID je jedinečné 128bitové (16 bajtové) číslo. Pro všechny typy, služby a profily specifikované v SIG (Bluetooth Special Interest Group) existují zkrácené identifikátory UUID. Pokud však aplikace potřebuje vlastní UUID, je třeba jej vygenerovat.

■ BLE Server

Nejprve importujeme potřebné knihovny a definujeme identifikátory služby a charakteristiky

Funkce zpětného volání *MyServerCallbacks()* mění logickou proměnnou *deviceConnected* na hodnotu *true* nebo *false* podle aktuálního stavu zařízení BLE, pokud je klient připojen k serveru, je stav *true*. Pokud se klient odpojí, změní se logická proměnná na *false*.

Vytvoříme BLE zařízení, službu a charakteristiku Tímto proběhla inicializace. Nyní můžeme započít službu a zviditelnit zařízení klientům.

```
#include <BLEDevice.h>
#include <BLEServer.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLE2902.h>
```

Obrázek 4.10: Knihovny BLE.

```
#define SERVICE_UUID          "4a4c8ecd-5afe-43b7-a6ac-2c11108e309c"
#define CHARACTERISTIC_UUID  "1b55c853-4c41-4e58-95ce-5806b9f77978"
```

Obrázek 4.11: Definice identifikátorů.

```
class MyServerCallbacks: public BLEServerCallbacks {
  void onConnect(BLEServer* pServer) {
    deviceConnected = true;
  };

  void onDisconnect(BLEServer* pServer) {
    deviceConnected = false;
  }
};
```

Obrázek 4.12: Funkce zpětného volání.

Následuje kontrola, zda-li je nějaký klient připojený. Pokud ano, nastavíme charakteristiku na hodnotu proměnné *rho_l* pomocí funkce *SetValue()*. Po nastavení hodnoty uvědomíme připojeného klienta pomocí funkce *Notify()*.


```
// Create the BLE Device
BLEDevice::init("BLE_Hustomer");

// Create the BLE Server
pServer = BLEDevice::createServer();
pServer->setCallbacks(new MyServerCallbacks());

// Create the BLE Service
BLEService *pService = pServer->createService(SERVICE_UUID);

// Create a BLE Characteristic
pCharacteristic = pService->createCharacteristic(CHARACTERISTIC_UUID,
BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY);
```

Obrázek 4.13: Tvorba BLE zařízení, služby a charakteristiky.

```
// notify changed value
if (deviceConnected) {

    pCharacteristic->setValue(tilt);
    pCharacteristic->notify();
    pCharacteristic_1->setValue(tilt);
    pCharacteristic_1->notify();
    delay(1000);
}
```

Obrázek 4.14: Předání naměřené hodnoty klientovi.

■ BLE Klient

Mobilní aplikace tvoří stranu klienta. Tato aplikace prezentuje a dále zpracovává výstup ze strany BLE Serveru. Aplikace je vytvořena ve webové aplikaci MIT App Inventor 2.

■ MIT App Inventor 2

Jedná se o online, cloudově řešené, grafické vývojové prostředí pro tvorbu mobilních aplikací vyvinuté Massachusetts Institute of Technology (MIT) ve spolupráci se společností Google. V tomto prostředí je možné vytvářet aplikace pro operační systém Android a iOS. K tvorbě kódu jsou využity předpřipravené funkční bloky, jejichž skládáním tvoříme složitější struktury. Není nutné znát syntaxi programovacího jazyka jelikož správnost kódu je ověřena v momentě, kdy bloky do sebe zapadají [31].

Návrh aplikace probíhá ve dvou oknech, Designer a Blocks. V okně Designer upravujeme vzhled uživatelského rozhraní vznikající aplikace, například rozmístění textu a tlačítek, úprava písma, apod.. V oknu Blocks probíhá samotné programování aplikace a realizace funkcí z okna Designer.

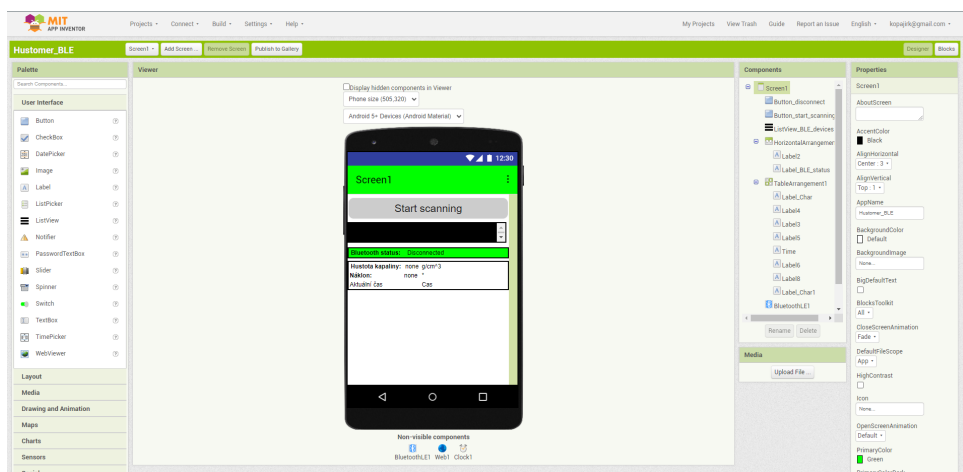
Tvorbu aplikace je možné průběžně sledovat buď pomocí emulátoru nebo AI Companionem. Emulátor emuluje prostředí Android/iOS a AI Companion umožňuje sledovat vývoj v reálném čase přímo na mobilním telefonu po stažení aplikace MIT AI2 Companion z obchodu Google Play. Propojení webového rozhraní a mobilního telefonu je možné buď pomocí unikátního kódu nebo QR kódem.

■ Designer

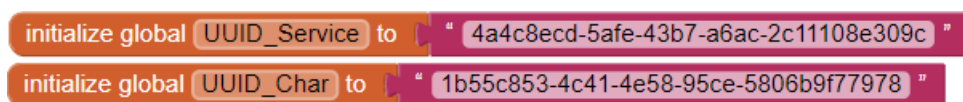
Na obrázku 4.15 vidíme vzhled hlavní obrazovky aplikace, funkční tlačítka pro vyhledání blízkých BLE Serverů a okno nalezených zařízení pod nímž se nachází ukazatel stavu připojení. Pod ukazatelem je umístěna tabulka prezentující přijímané hodnoty z BLE Serveru.

■ Blocks

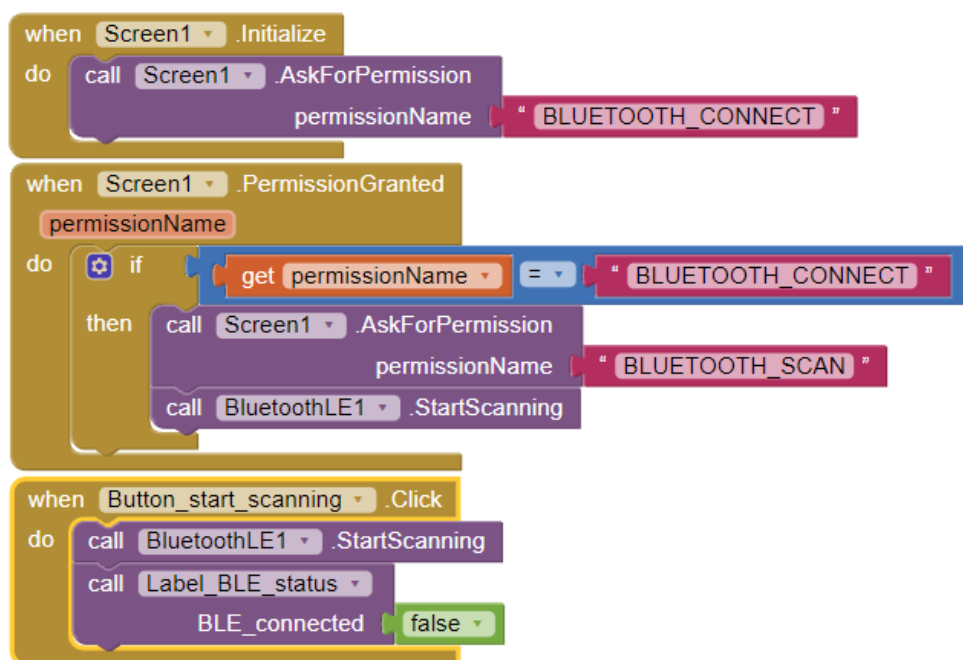
Zde dochází k programování funkcí vytvořených v okně Designer a navázání spojení s BLE Serverem. Na obrázku 4.16 vidíme deklaraci UUID, které se musí shodovat s UUID na straně BLE Serveru. Následně probíhá žádost o povolení k připojení. Po stisknutí tlačítka Start scanning se žádá o povolení k hledání zařízení. Ze seznamu nalezených zařízení můžeme vybrat cílový a připojit se. Po připojení se ukončuje vyhledávání zařízení. Nyní přijaté



Obrázek 4.15: Okno Designer webového prostředí MIT App Inventor 2.



Obrázek 4.16: UUID na straně BLE Klienta.



Obrázek 4.17: Žádost o povolení.

hodnoty ze zařízení propojíme se štítkem Label_Char, který zobrazí data na hlavní stránce v datovém formátu float. Následně dochází k propojení mobilní aplikace s tabulkovým procesorem Google Sheets pro uchování naměřených dat. Do sešitu se ukládá přesný časový údaj, zjištěný v okamžiku přijetí hodnoty a naměřená hodnota hustoty

```

when BluetoothLE1 . DeviceFound
do
  set ListView_BLE_devices . ElementsFromString to BluetoothLE1 . DeviceList

when ListView_BLE_devices . AfterPicking
do
  if ListView_BLE_devices . SelectionIndex ≥ 0
  then
    call BluetoothLE1 . StopScanning
    call BluetoothLE1 . Connect
      index ListView_BLE_devices . SelectionIndex

when BluetoothLE1 . Connected
do
  call BluetoothLE1 . RegisterForFloats
    serviceUuid get global UUID_Service
    characteristicUuid get global UUID_Char
    shortFloat false
  call Label_BLE_status . BLE_connected true
  set Label_BLE_status . Text to "Conected"
  
```

Obrázek 4.18: Zařízení nalezeno, konec skenování.

```

when BluetoothLE1 . FloatsReceived
  serviceUuid characteristicUuid floatValue
do
  set Label_Char . Text to get floatValue
  set Web1 . Url to "https://script.google.com/macros/s/AKfycbzF16Arn..."
  set global time to call Clock1 . Now
  set Time . Text to call Clock1 . FormatDateTime
    instant get global time
    pattern "MM/dd/yyyy hh:mm:ss a"
  call Web1 . PostText
    text join (
      " Datum="
      Time . Text
      "&Hustota="
      Label_Char . Text
    )
  
```

Obrázek 4.19: Zobrazení přijatých dat a následné uložení do Google Sheets.

Kapitola 5

Měření

5.1 Použité přístroje

K měření byla použita přesná laboratorní váha Kern KB 240-3N s přesností 1 mg a funkcí tárování, laboratorní odměrný válec o objemu 500 l, stupnice měla rozsah 50 až 500 ml s krokem 10 ml, kelímek pro odsypání soli, velká nádoba na vodu, 5 l destilované vody a kuchyňská sůl.

5.2 Průběh měření

Před začátkem měření bylo nutné zjistit, jaká je skutečná hustota destilované vody. Nejprve byl kelímek umístěn na váhu a vynulována jeho váha. Následně bylo do odměrného válce nalito 100 ml destilované vody, která byla přelita do kelímku a změřena její hmotnost. Nyní bylo možné vypočítat její hustotu pomocí vztahu

$$\rho_{Dest} = \frac{m}{V} \quad (5.1)$$

kde m je hmotnost a V objem destilované vody v kelímku. Stejným způsobem byla zjištěna hustota kohoutkové vody.

Velká nádoba byla pomocí odměrného válce naplněna dostatečným objemem destilované vody ($V_N = 6,5$ l), aby mohl hustoměr po vložení volně plovat a

nedotýkat se dna. Dříve použitý kelímek byl vysušen a umístěn na váhu. Do kelímku bylo nasypáno 50 g kuchyňské soli, která byla následně přidána do velké nádoby. Obsah velké nádoby bylo nutné řádně promíchat tak, aby došlo k úplnému rozpuštění soli. Do nádoby byl vložen hustoměr, propojen pomocí Bluetooth s mobilním telefonem. Po otevření Google Sheets a sledujeme přijímané hodnoty náklonu. Vyčkáme dokud se hustoměr v nádobě neustálí v konečné poloze a data nebudou stabilní, poté odečteme 20 úhlů náklonu pro konkrétní koncentraci soli. Tento proces opakujeme pro příměs soli o hmotnostech 100, 200, 300 až 1500 g.

5.3 Zpracování naměřených dat

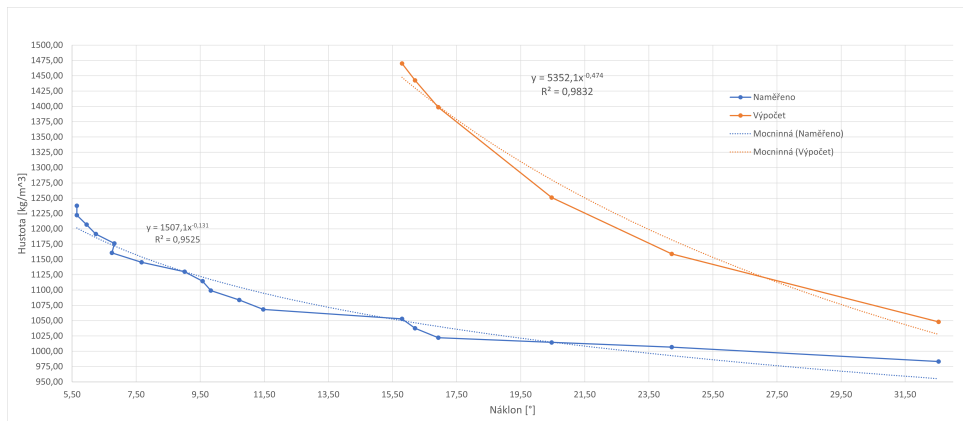
Přesnou hustotu solných roztoků o různé koncentraci vypočítáme pomocí vztahu

$$\rho_{NaCl} = \rho_{Dest} + \frac{m_{sul}}{V_N/1000} \quad (5.2)$$

kde ρ_{NaCl} je hustota solného roztoku v kg/m^3 , V_N objem destilované vody v nádobě, ρ_{Dest} hustota destilované vody v kg/m^3 a m_{sul} hmotnost přidávané soli v kg. Hodnoty naměřených úhlů průměrujeme pro zvýšení spolehlivosti výstupu.

V příloze D.1 se nachází tabulka s naměřenými vs. teoretickými hodnotami. Hodnoty v posledním řádku tabulky představují výsledek mnou odvozeného vztahu z části 3.1. Jak již bylo řečeno v předchozím textu, tento vztah platí jen v určitém rozsahu náklonů, proto hodnoty ve světle oranžové části představují platný rozsah a část světle červená neplatné hodnoty.

Na obrázku 5.1 vidíme graf závislosti náklonu hustoměru na hustotě solného roztoku. Data jsou následně proložena mocninou křivkou. Data měření jsou proložena mocninou funkcí $y = 1507,1 \cdot x^{-0,131}$ s koeficientem determinace $R^2 = 0,95$ a data teoretického výpočtu mocninou funkcí $y = 5352,1 \cdot x^{-0,474}$ s koeficientem determinace $R^2 = 0,98$.



Obrázek 5.1: Závislost náklonu hustoměru na hustotě kapaliny.

Při současné konstrukci hustoměru jsme byli schopni v rozsahu náklonu $5,65^\circ$ až $32,54^\circ$ změřit hustotu v rozsahu $983,32 \text{ kg/m}^3$ až $1237,59 \text{ kg/m}^3$.

Kapitola 6

Závěr

6.1 Zhodnocení výsledku

Nutné zjednodušení pro analytický výpočet vedlo ke změně průběhu charakteristiky náklonu na hustotě, nicméně trend změny náklonu je shodný. Pro výpočet hustoty byl do algoritmu vyhodnocení náklonu implementován empirický vztah zjištěný z rovnice trendu naměřených dat.

Mnou navržený model chování je obdobou tyče, uchycené na jednom ze svých konců těsně na hladině kapaliny. Hustoměr plove na hladině volně a ponořený objem nelze triviálně vyjádřit. Předpoklad homogenity celého zařízení rovněž nebylo možné dodržet, jelikož je zařízení složeno z více částí. Při výpočtu hustoty kapaliny nebyl uvažován hmotný střed a střed vztlaku hustoměru, který je při změně hustoty posouván. Analytický zjednodušený model se ukázal pro navržené zařízení jako nevhodný. Vhodnější by byl model založený na numerickém řešení pomocí fyzikálního simulátoru, který by lépe zachytil nehomogenity zařízení.

Z naměřených dat vidíme, že průběh závislosti není zcela hladký. Příčinou mohla být již zmiňovaná poloha těžiště a středu vztlaku. V průběhu měření došlo k vybití baterie a bylo nutné zařízení dobýt, tudíž mohlo nedbalostí dojít k posunu těžiště a výsledné hodnoty mohly být znehodnoceny.

Nicméně zaměříme-li se na změnu úhlu náklonu s rostoucí hustotou vidíme,

že náklon prudce klesá, následně pozvolna zpomaluje, až se dostává do stavu "saturace", kdy se úhel náklonu s rostoucí hustotou mění minimálně.

6.2 Možná vylepšení

Co se týče modelu popisu chování hustoměru, je co do něj zlepšovat. Především by bylo zapotřebí do modelu zakomponovat závislost na těžišti zařízení a středu vztlaku ponořené části. Možným řešením by bylo využití metacentrické výšky a metacentra.

Uchycení DPS není příliš robustní a je náchylné k posuvům, které znehodnocují měření. Zde bych pokračoval variantou 3D tisku a navrhl držák takový, aby zamezil pohybu měřicí elektroniky. Zároveň bych jej vybavil úchytem pro závažíčka pro případnou změnu měřicího rozsahu.

Mobilní aplikace je místo, kde může dojít k mnoha vylepšením. Jelikož technologie BLE dovoluje existenci více BLE charakteristik, bylo by možné zavést sledování stavu baterie nebo další verzi hustoměru osadit teploměrem a kalibrovat data i pomocí teploty. Uchovávání dat by mohlo být sofistikovanější a být přímo součástí aplikace, ne v Google Sheets.

Příloha A

Bibliografie

1. VENCZEL, Kriszta; LIPTÁK, B. *Instrument and automation engineers' handbook : measurement and safety*. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 9781498727648.
2. KAZYS, Rymantas; SLITERIS, Reimondas; REKUVIENE, Regina; ZUKAUSKAS, Egidijus; MAZEIKA, Liudas. Ultrasonic Technique for Density Measurement of Liquids in Extreme Conditions. *Sensors* [online]. 2015, roč. 15, č. 8, s. 19393–19415 [cit. 2023-05-22]. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s150819393.
3. KADLEC, Karel. Provozní snímače hustoty kapalin (část 1). *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. 2006, roč. 17, č. 1, s. 44–48 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/43585.pdf&ved=2ahUKEwjZg4PDzI7_AhXj1P0HHfp2CZ%20oQFnoECA4QAQ&usg=A0vVaw21X4oxy11Z1kg0gjmjg236q.
4. FURTADO, Andreia; BATISTA, Elsa; SPOHR, I.; FILIPE, Eduarda. Measurement of density using oscillation-type density meters. Calibration, traceability and Uncertainties. In: 2009.
5. ROMEO, R.; GIULIANO ALBO, P.A.; LAGO, S. Density of standard seawater by vibrating tube densimeter: Analysis of the method and results. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2019, roč. 154, s. 103157. ISSN 0967-0637. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.103157>.
6. Experimental Techniques 2: Vibrating Tube Densimetry. In: *Volume Properties - Liquids, Solutions and Vapours* [online]. Spain: Royal Society of Chemistry (RSC), 2015, s. 100–114 [cit. 2023-05-22]. ISBN 9781849738996. Dostupné z: <https://app.knovel.com/web/view/>

- khtml/show.v/rcid:kpVPLSV004/cid:kt010VLKW1/viewerType:khtml/root_slug:volume-properties-liquids/url_slug:volume-pro-experimental?kpromoter=Summon%5C&page=1%5C&view=collapsed%5C&zoom=1.
7. *Vibrační snímač s kmitající vidlicí: a) princip* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2018/PDF/122-127.pdf.
 8. *Vibrační snímač s U-trubicí* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2018/PDF/122-127.pdf.
 9. GILLUM; R, Donald. 8. Liquid Density Measurement. In: *Industrial Pressure, Level, and Density Measurement (2nd Edition)* [online]. 2. vyd. United States: International Society of Automation (ISA), 2009, s. 425–460 [cit. 2023-05-22]. ISBN 9781934394342. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpIPLDME01/cid:kt007WGYE3/viewerType:khtml/root_slug:industrial-pressur%20elevel/url_slug:liquid-density-measurement?kpromoter=Summon%5C&page=1%5C&view=collapsed%5C&zoom=1.
 10. HUGHES; A, Thomas. 9. Liquid Density Measurement. In: *Measurement and Control Basics* [online]. 5. vyd. United States: International Society of Automation (ISA), 2015, s. 253–271 [cit. 2023-05-22]. ISBN 9780876640142. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpMCBE0013/cid:kt00U9TDG2/viewerType:khtml/root_slug:measurement-control-basics/url_slug:liquid-density-measurement?kpromoter=Summon%20n%20http://app.knovel.com/web/%5C&page=1%5C&view=collapsed%5C&zoom=1.
 11. KADLEC, Karel. Provozní snímače hustoty kapalin (část 2). *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. 2006, roč. 2011, č. 5, s. 42–43 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://automa.cz/cz/casopis-clanky/provozni-snimace-hustoty-kapalin-cast-2-2011_05_43585_5618/&ved=2ahUKEwjIyruFzY7_AhWU_rsIHTV8BTUQFnoECAoQAQ&usg=A0vVaw3LN3NbLVCz_4jTbmRVmySL.
 12. BOYES, Walt. *Instrumentation reference book*. 4th Edit. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2010. ISBN 978-0-7506-8308-1.
 13. *Hydrostatický hustoměr* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2018/PDF/122-127.pdf.
 14. *Hydrometer- Construction* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.toppr.com/ask/content/concept/acid-battery-hydromete%20r-208869/>.
 15. *Schéma refraktometru* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k46-sloz.htm>.
 16. KADLEC, Karel; KMÍNEK, Miloš. *MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA* [online]. Praha, 2013 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k46-sloz.htm>.

17. VYBÍRAL, Bohumil. *MECHANIKA IDEÁLNÍCH KAPALIN* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/studijni-texty>.
18. *Těleso ve stabilní poloze při plování – při vychýlení tělesa leží metacentrum M nad těžištěm T* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/kapaliny.pdf>.
19. *Těleso v labilní poloze při plování – při vychýlení tělesa leží metacentrum M pod těžištěm T* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/kapaliny.pdf>.
20. W, Eric; WEISSTEIN. *Cylindrical Segment* [online]. 2023-5. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/CylindricalSegment.html>.
21. *Cylindrical segment* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/CylindricalSegment.html%5C#:text=A%5C%20cylindrical%5C%20segment%5C%2C%5C%20sometimes%5C%20also%20known%5C%20as%5C%20a%5C%20cylindrical%5C%20wedge..>
22. *ESP32-C3 Series Datasheet* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf.
23. *ESP32-S3-WROOM-2 Datasheet* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-2_datasheet_en.pdf.
24. *ADXL345 Datasheet* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/adxl345.pdf>.
25. *TPS7A03 Datasheet* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a03.pdf?ts=1684729930373%5C&ref_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fgoogle.com.
26. *GeB Li-Ion Baterie 1x18650 1S1P 3.7V 3200mAh* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/geb-li-ion-baterie-1x18650-1s1p-3-7v-3200mah/>.
27. *Arduino-ADXL345* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://github.com/jarzebski/Arduino-ADXL345>.
28. *Getting Started with ESP32 Bluetooth Low Energy (BLE) on Arduino IDE* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-bluetooth-low-energy-ble-arduino-ide/>.
29. *Introduction to Bluetooth Low Energy* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy/gap>.

30. *GATT (Generic Attribute Profile)* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://gonorthforge.com/bluetooth-is-revolutionizing-the-way-you-watch-tv-listen-to-music-and-transfer-data-in-general%E2%80%89%E2%80%89how-does-this-work/>.
31. KUČEROVÁ, Ema. *Grafické programování mobilních aplikací v prostředí MIT App Inventor 2*. České Budějovice, 2018. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

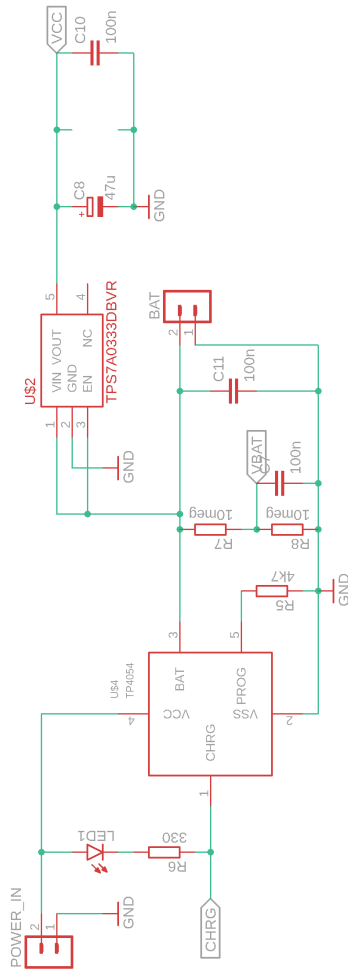
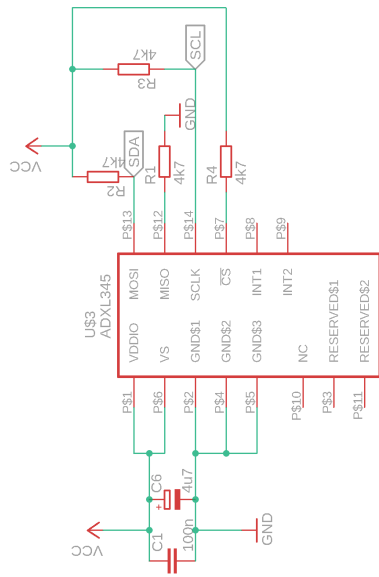


Příloha B

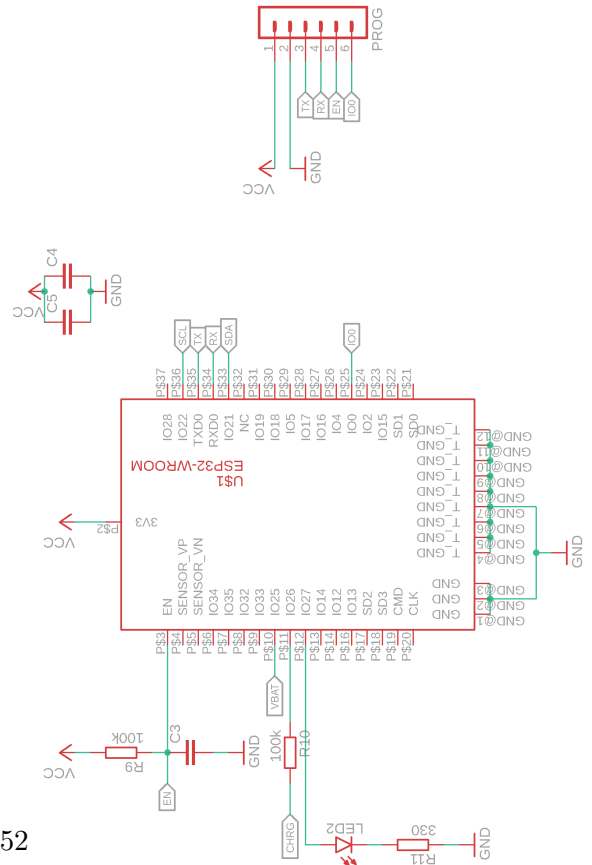
Schéma a deska plošného spoje

Níže je uvedeno elektrické schéma a deska plošného spoje vytvořená v rámci této práce.

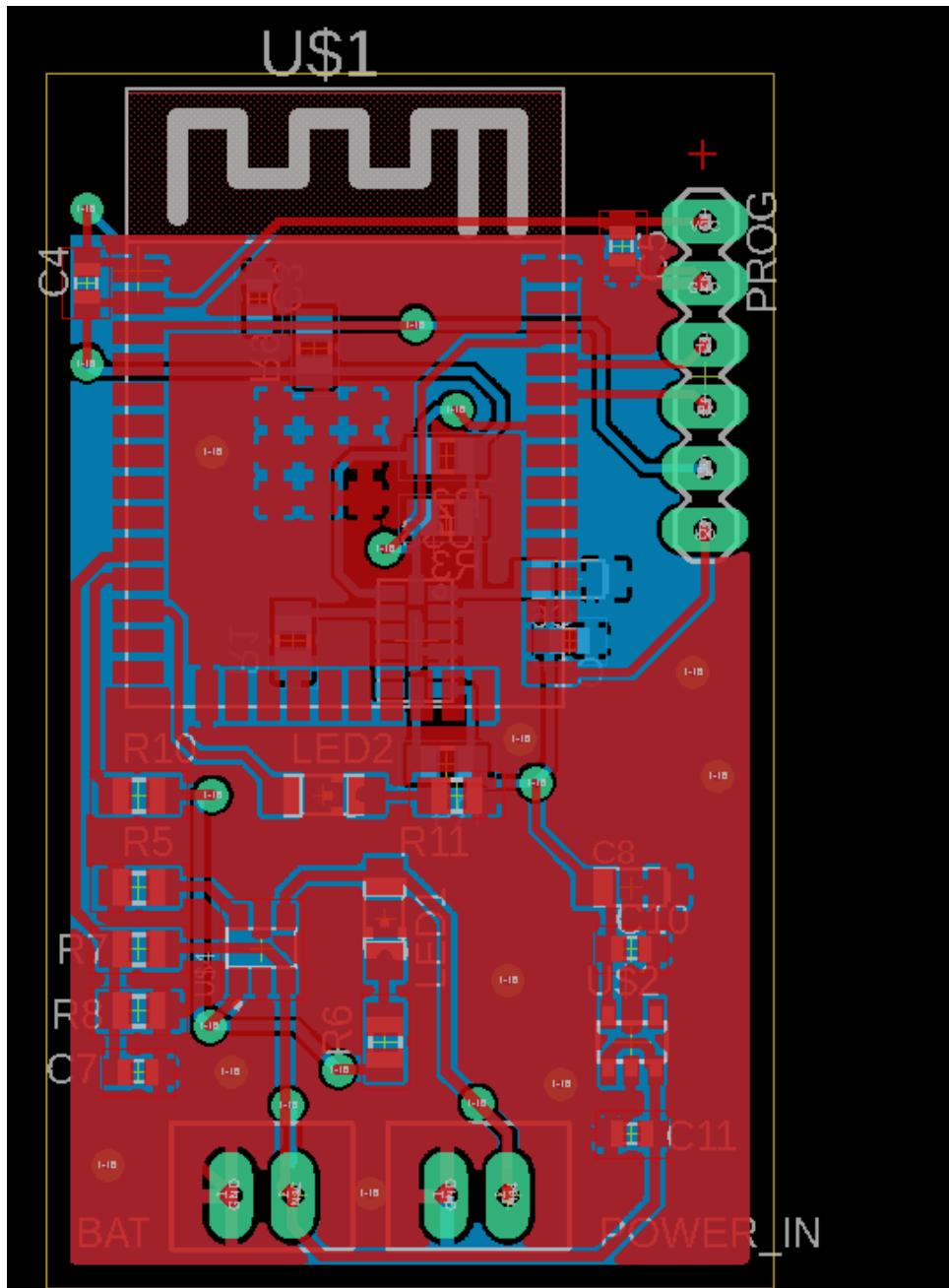
B. Schéma a deska plošného spoje



52



Obrazek B.1: Schéma desky plošného spoje.



Obrázek B.2: Deska plošného spoje.



Příloha C

Zdrojový kód ESP32

Zde se nachází zdrojový kód elektronického hustoměru kapalin programovaného v prostředí Visual Studio Code.

```
#include <Wire.h>
#include <Arduino.h>
#include <BLEDevice.h>
#include <BLEServer.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLE2902.h>

using namespace std;
int ADXL345 = 0x53;           // ADXL345 sensor I2C address

float rho_l, tilt;           // Density of a liquid [g/cm^3]

#define TIME_TO_SLEEP 15;
#define uS_S 1000000;

BLEServer* pServer = NULL;
BLECharacteristic* pCharacteristic = NULL;
BLECharacteristic* pCharacteristic_1 = NULL;
bool deviceConnected = false;
bool oldDeviceConnected = false;

// See the following for generating UUIDs:
// https://www.uuidgenerator.net/

#define SERVICE_UUID          "4a4c8ecd-5afe-43b7-a6ac-2c11108e309c"
#define CHARACTERISTIC_UUID  "1b55c853-4c41-4e58-95ce-5806b9f77978"

class MyServerCallbacks: public BLEServerCallbacks {
    void onConnect(BLEServer* pServer) {
        deviceConnected = true;
    };

    void onDisconnect(BLEServer* pServer) {
        deviceConnected = false;
    }
};
```

Obrázek C.1: Hlavičkové soubory, deklaráce proměnných a funkcí.

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin(8, 10);

  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x2C); //Data rate and power mode control
  Wire.write(0x08); //Output data rate 25 Hz
  Wire.endTransmission();

  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x31); //Data format control
  Wire.write(0x08); //Full resolution
  Wire.endTransmission();

  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x2D); //Power-saving features control
  Wire.write(0x08); // Measure mode
  Wire.endTransmission();

  //X-axis calibration
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x1E);
  Wire.write(0);
  Wire.endTransmission();

  //Y-axis calibration
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x1F);
  Wire.write(3);
  Wire.endTransmission();

  //Z-axis calibration
  Wire.beginTransmission(ADXL345);
  Wire.write(0x20);
  Wire.write(-13);
  Wire.endTransmission();

  // Create the BLE Device
  BLEDevice::init("BLE_Hustomer");
  esp_ble_tx_power_set(ESP_BLE_PWR_TYPE_DEFAULT, ESP_PWR_LVL_N3);
  esp_ble_tx_power_set(ESP_BLE_PWR_TYPE_ADV, ESP_PWR_LVL_N3);
  esp_ble_tx_power_set(ESP_BLE_PWR_TYPE_SCAN, ESP_PWR_LVL_N3);

  // Create the BLE Server
  pServer = BLEDevice::createServer();
  pServer->setCallbacks(new MyServerCallbacks());

  // Create the BLE Service
  BLEService *pService = pServer->createService(SERVICE_UUID);

  // Create a BLE Characteristic
  pCharacteristic = pService->createCharacteristic(CHARACTERISTIC_UUID,
  BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY);

  // https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/viewer?attributeXmlFile=org.bluetooth.descriptor.gatt.client_characteristic_configuration.xml
  // Create a BLE Descriptor
  //pCharacteristic->addDescriptor(new BLE2902());

  // Start the service
  pService->start();

  // Start advertising
  BLEAdvertising *pAdvertising = BLEDevice::getAdvertising();
  pAdvertising->addServiceUUID(SERVICE_UUID);
  pAdvertising->setScanResponse(false);
  pAdvertising->setMinPreferred(0x0);
  // set value to 0x00 to not advertise this parameter
  BLEDevice::startAdvertising();
  Serial.println("Waiting a client connection to notify...");
}

```

Obrázek C.2: Funkce setup.

```
void loop() {
  if(deviceConnected) {
    // X-axis data acquisition
    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x32);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
    byte x0 = Wire.read();

    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x33);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
    byte x1 = Wire.read();
    x1 = x1 & 0x03;

    uint16_t x = (x1 << 8) + x0;
    int16_t xf = x;

    if(xf > 511) {
      xf = xf - 1024;
    }
    float X = xf*0.0039;

    // Y-axis data acquisition
    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x34);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
    byte y0 = Wire.read();

    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x35);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
    byte y1 = Wire.read();
    y1 = y1 & 0x03;

    uint16_t y = (y1 << 8) + y0;
    int16_t yf = y;
    if(yf > 511)
    {
      yf = yf - 1024;
    }
    float Y = yf*0.0039;

    // Z-axis data acquisition
    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x36);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
    byte z0 = Wire.read();

    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x37);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(ADXL345, 1);
    byte z1 = Wire.read();
    z1 = z1 & 0x03;

    uint16_t z = (z1 << 8) + z0;
    int16_t zf = z;
    if(zf > 511)
    {
      zf = zf - 1024;
    }
    float Z = zf*0.0039;

    // Tilt calculation
    tilt = abs(-atan2(X, sqrt(Y*Y + Z*Z))*180.0/M_PI);
    // Density calculation
    rho_l = 1507.1*pow(tilt,-0.131);
  }
}
```

Obrázek C.3: Získání dat z akcelerometru a výpočet hustoty.

```
// notify changed value
if (deviceConnected) {
  pCharacteristic->setValue(rho_1);
  pCharacteristic->notify();
  delay(2000);
  // bluetooth stack will go into congestion, if too many packets are sent, i
  // n 6 hours test i was able to go as low as 3ms
}
// disconnecting
if (!deviceConnected && oldDeviceConnected) {
  delay(500);
  // give the bluetooth stack the chance to get things ready
  pServer->startAdvertising(); // restart advertising
  Serial.println("start advertising");
  oldDeviceConnected = deviceConnected;
}
// connecting
if (deviceConnected && !oldDeviceConnected) {
  // do stuff here on connecting
  oldDeviceConnected = deviceConnected;
}
}
```

Obrázek C.4: Odeslání dat.



Příloha D

Naměřené hodnoty

V této příloze nalezneme tabulku naměřených hodnot náklonu v závislosti na hustotě kapaliny.

D. Naměřené hodnoty

Příměs soli [g]	Destilovaná voda														Kohoutková voda	Destilovaná voda		
	50g	100g	200g	300g	400g	500g soli	600g	700g	800g	900g	1000g	1100g	1200g	1300g			1400g	1500g
	32,46	24,29	20,43	17,07	16,23	15,89	11,57	10,80	10,00	9,35	9,09	7,46	7,02	6,71	6,24	5,78	5,80	5,53
	32,61	24,05	20,46	16,99	16,31	15,77	11,55	10,68	9,07	9,38	9,39	7,66	6,60	6,71	6,04	6,01	5,77	5,54
	32,58	24,33	20,76	16,65	16,46	15,99	11,55	10,66	9,80	10,06	8,90	7,72	6,82	6,74	6,26	5,72	5,53	5,51
	32,58	24,17	20,29	16,65	16,37	15,58	11,58	10,60	9,99	9,53	8,90	7,72	6,62	6,68	6,26	5,81	5,78	5,80
	32,39	24,57	20,74	16,57	16,31	15,44	11,58	11,00	9,70	9,53	9,34	7,46	6,57	6,76	6,51	5,94	5,57	5,49
	32,70	24,21	20,19	17,07	16,02	16,02	11,56	10,63	10,24	9,53	9,12	7,72	6,82	6,71	6,26	5,81	5,77	5,55
	32,98	24,41	20,50	17,13	16,35	15,80	11,76	10,92	9,73	9,61	9,09	7,49	6,99	6,95	6,31	5,98	5,78	5,76
	32,61	24,05	20,40	17,14	16,04	15,80	11,35	10,69	10,00	9,61	8,89	7,95	6,60	6,93	6,24	5,57	5,53	5,56
	32,61	24,17	20,47	17,35	16,08	15,99	11,54	10,73	10,25	9,75	8,90	7,69	6,74	6,76	6,49	5,56	5,04	5,77
	32,37	24,25	20,46	16,99	16,35	15,82	11,31	10,66	9,88	9,54	8,90	7,69	7,07	6,76	6,24	6,23	5,75	5,34
	32,49	24,09	20,30	17,01	16,35	15,80	11,27	10,46	9,74	9,79	8,66	7,69	6,52	6,96	6,46	6,03	5,78	5,78
	32,58	24,17	20,64	16,87	16,04	15,63	11,30	10,87	10,03	9,76	8,47	7,69	6,74	6,79	6,04	6,23	5,51	5,76
	32,58	24,41	20,33	16,72	16,08	15,83	11,42	10,61	9,81	9,54	9,02	7,95	6,82	6,73	6,24	6,45	5,77	5,54
	32,54	24,01	20,29	16,99	16,06	15,86	11,43	10,68	9,76	9,39	8,93	7,46	6,79	6,77	6,26	5,83	5,55	5,96
	32,58	24,29	20,33	16,99	16,02	15,83	11,61	10,69	9,70	9,54	9,15	7,72	6,77	7,18	6,19	5,96	5,55	5,75
	32,39	23,97	20,50	16,87	16,17	15,55	11,36	10,72	9,51	9,57	8,85	7,72	6,54	6,77	6,24	5,79	5,79	5,77
	32,28	24,01	20,54	16,99	16,23	16,05	11,37	10,91	9,98	9,35	9,09	7,69	6,82	6,71	6,26	6,21	5,75	5,50
	32,46	24,05	20,64	16,93	16,10	15,75	11,35	10,65	9,74	9,60	8,93	7,69	6,77	6,98	5,97	6,23	5,56	5,80
	32,58	24,50	20,33	16,66	16,06	15,80	11,30	10,67	9,80	9,53	9,32	7,65	6,80	6,71	6,27	5,79	5,75	5,79
	32,58	24,29	20,92	16,93	16,29	15,74	11,55	10,96	9,73	9,47	9,13	7,66	6,57	6,98	5,99	6,06	5,54	5,58
	32,39	24,21	20,29	16,93	16,35	15,74	11,50	10,46	9,95	9,57	9,15	7,66	6,58	6,93	6,24	5,99	5,76	5,57
Střední hodnota úhlů [°]	32,54	24,22	20,47	16,93	16,20	15,80	11,47	10,72	9,83	9,57	9,01	7,67	6,74	6,82	6,24	5,95	5,65	5,65
Přesná hustota [kg/m³]	983,22	1006,82	1014,51	1022,20	1037,59	1052,97	1068,36	1083,74	1099,13	1114,51	1129,90	1145,28	1160,67	1176,05	1191,44	1206,82	1222,20	1237,59
Vypočtená hustota [kg/m³]	1048,02	1159,00	1250,97	1398,66	1442,52	1470,09	2057,49	2289,26	2711,66	2883,91	3395,65	7206,36	-185078,09	113799,75	-9906,47	-6129,20	-4258,12	-4261,73

Obrazek D.1: Tabulka naměřených hodnot.