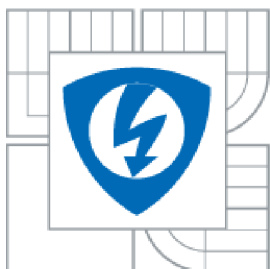




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION**

OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SNÍMAČE (OVS)

OPTICAL FIBER SENSORS (OFS)

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

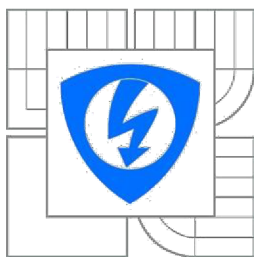
AUTHOR

Bc. Jan Krejsa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Jan Krejsa

ID: 146042

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/2016

NÁZEV TÉMATU:

Optické vláknové snímače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Realizujte měřicí systém s optickými vláknovými snímači pro měření zakalení piva při jeho stáčení z scezovacího tanku.
2. Systém komplexně experimentálně ověřte.
3. Dosažené výsledky přehledně zpracujte a podrobně rozeberte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

TURÁŇ, J.-PETRÍK, S.: Optické vláknové senzory. ALFA Bratislava, 1990.
Firemní literatura, databáze a další podle vlastního výběru.

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 16. 5. 2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Jiří Vítek, Ing. Evžen Vyčichlo

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje problematice optických vláknových snímačů s podrobnějším náhledem na snímač zakalení, jeho návrh a testování. V úvodu se zabývá obecnou teorií vláknových snímačů a metodikou měření fyzikálních veličin, na což navazuje kapitola zabývající se možnými způsoby měření zakalení. Dále tato práce obsahuje návrh nového snímače zakalení, který je realizován s ohledem na jeho průmyslové využití a budoucí aplikaci do automatizovaného procesu výroby piva. Součástí je i podrobný popis hardwaru a softwaru snímače vytvořeného v rámci této diplomové práce. Poslední část je věnována kalibraci a testování funkčnosti snímače zakalení.

Klíčová slova

Automatizovaný proces, Ethernet, fotodetektor, měření zakalení, mikroprocesor, operační zesilovač, optické vlákno, optické vláknové snímače, snímač zakalení, turbidimetr

Abstract

The diploma thesis focuses on optical fiber sensors with detailed preview of the turbidity sensor, its design and testing. The introduction deals with the general theory of fiber sensors and measurement methodology of physical variables. This part is followed by a charter focusing on the possible ways of measuring turbidity. Furthermore, the diploma thesis introduces design of the new turbidity sensor which is realized with consideration of the industrial usage and future application to the automated process of beer production. It also includes a detailed description of the hardware and software sensors created within this thesis. The last section is devoted to a calibration and testing functionality of turbidity sensor.

Keywords

Automated process, Ethernet, fotodetektor, measurement of turbidity, microprocessor, operational amplifier, optical fiber, optical fiber sensors, turbidity sensor, turbidimeter

Bibliografická citace

KREJSA, J. *Optické vláknové snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 85 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optické vláknové snímače jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího a konzultantů diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: **16. května 2016**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce doc. Ing. Ludvíkovi Bejčkovi, CSc a konzultantům Ing. Jiří Vítkovi a Ing. Evženu Vyčichlovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **16. května 2016**

.....
podpis autora

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 13 |
| 2 | Optické vláknové snímače | 14 |
| 2.1 | Dělení OVS..... | 16 |
| 2.2 | Amplitudové OVS | 16 |
| 2.2.1 | Snímače se změnou tlumení | 16 |
| 2.2.2 | Snímače se změnou průchodu a odrazu světla | 17 |
| 2.2.3 | Snímače s porušením okrajových podmínek šíření světla..... | 17 |
| 2.2.4 | Snímače se změnou vzájemné vazby světlovodů | 18 |
| 2.2.5 | Snímače s generací záření | 18 |
| 2.3 | Fázové OVS | 18 |
| 2.3.1 | Dvouramenný jednovidový interferometr | 19 |
| 2.3.2 | Jedno vláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou | 19 |
| 2.3.3 | Mezividový interferometr..... | 20 |
| 2.4 | Polarizační a OVS s modulací vlnové délky | 20 |
| 2.4.1 | Snímače s modulací otočení roviny polarizace | 20 |
| 2.4.2 | Snímače s indukovaným dvojlomem..... | 21 |
| 3 | Zakalení a metody jeho měření | 22 |
| 3.1 | Zakalení a jeho definice | 22 |
| 3.2 | Měření zakalení..... | 22 |
| 3.3 | Turbidimetr | 23 |
| 3.4 | Nefelometr | 23 |
| 3.5 | Dvoukanálový zákaloměr | 24 |
| 3.6 | Poměrové zákaloměry..... | 25 |
| 3.7 | Metoda využívající zpětného rozptylu..... | 26 |
| 3.8 | Vliv velikosti částic na průchod záření | 27 |
| 3.8.1 | Malé částice | 27 |
| 3.8.2 | Středně velké částice | 28 |
| 3.8.3 | Velké částice..... | 28 |
| 3.9 | Jednotky měření zakalení..... | 28 |
| 3.10 | Zdroje záření používané pro měření zakalení | 29 |
| 3.11 | Detektory záření používané pro měření zakalení | 29 |
| 4 | Návrh snímače zakalení a možnosti jeho využití | 30 |
| 4.1 | Návrh blokového schématu snímače zakalení | 30 |
| 4.2 | Možné aplikace snímače zakalení..... | 32 |
| 5 | Návrh a popis částí hardwaru snímače zakalení | 33 |
| 5.1 | Senzorová část | 33 |
| 5.1.1 | Zapojení fotodetektoru | 33 |
| 5.1.2 | Zapojení zdroje záření | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.2 | Výstupy pro řízení periferií..... | 36 |
| 5.2.1 | Analogové výstupy | 36 |
| 5.2.2 | Digitální výstupy | 37 |
| 5.3 | Mikroprocesorová část..... | 38 |
| 5.3.1 | Základní externí obvody pro ATmega 128A..... | 38 |
| 5.3.2 | Programování a ladění MCU..... | 39 |
| 5.4 | Zdroj napájení snímače..... | 39 |
| 5.5 | Mechanická konstrukce zákaloměru..... | 40 |
| 6 | Prostředky ovládání a vizualizace | 42 |
| 6.1 | Dotykový grafický displej | 42 |
| 6.1.1 | Zapojení displeje | 42 |
| 6.1.2 | Komunikační protokol displeje | 42 |
| 6.2 | Komunikační modul Nano SocketLAN..... | 43 |
| 6.2.1 | Síťová komunikace..... | 44 |
| 6.2.2 | Zapojení Nano SocketLAN | 45 |
| 7 | Řídící software zákaloměru..... | 47 |
| 7.1 | Konečný stavový automat pro měření a ovládání z displeje | 47 |
| 7.1.1 | Popis a možnosti jednotlivých stavů (oken)..... | 48 |
| 7.2 | Konečný stavový automat síťové komunikace | 53 |
| 7.3 | Zdroje přerušení | 55 |
| 7.3.1 | Čítač/časovač 3 a obsluha jeho přerušení | 55 |
| 7.3.2 | UART0 a obsluha přerušení příjmu dat..... | 56 |
| 7.3.3 | UART1 a obsluha přerušení příjmu dat..... | 56 |
| 7.3.4 | Odesílání řetězců po sériových linkách..... | 56 |
| 7.3.5 | Externí přerušení INT7..... | 56 |
| 7.3.6 | A/D převodník a obsluha přerušení při dokončení převodu..... | 56 |
| 7.3.7 | Přerušení od 8 b časovačů 0 a 2..... | 57 |
| 8 | Kalibrace a nastavení zákaloměru..... | 58 |
| 8.1 | Příprava kalibračních roztoků..... | 58 |
| 8.2 | Kalibrace zákaloměru | 60 |
| 9 | Výsledky měření a testování vlivů na měření | 63 |
| 9.1 | Měření roztoků formazinu | 63 |
| 9.2 | Měření roztoků džusu | 69 |
| 9.3 | Vliv protékajícího média na měření..... | 70 |
| 9.4 | Vliv úpravy a barvy vnitřních stěn přípravku na měření | 73 |
| 9.5 | Vliv teploty na měření | 74 |
| 9.5.1 | Vliv změny teplot na hlavu snímače | 75 |
| 9.5.2 | Vliv změny teplot na elektroniku snímače | 75 |
| 9.5.3 | Vliv změny teplot na optická vlákna..... | 75 |
| 10 | Závěr..... | 76 |

Seznam obrázků

- Obr. 2.1: Základní blokové schéma OVS [2]
- Obr. 2.2: Optický vláknový mikrofon [3]
- Obr. 2.3: OVS úrovně hladiny kapaliny [3]
- Obr. 2.4: Fázový OVS s Machov – Zehnderovým interferometrem [3]
- Obr. 2.5: Fázový OVS se Sagnacovým interferometrem [3]
- Obr. 2.6: Polarizační OVS protékajícího elektrického proudu [3]
- Obr. 2.7: Polarizační OVS akustických signálů [3]
- Obr. 3.1: Principiální schéma turbidimetru
- Obr. 3.2: Principiální schéma nefelometru
- Obr. 3.3: Dvoukanálová měřicí metoda
- Obr. 3.4: Principiální schéma poměrového zákaloměru
- Obr. 3.5: Zákaloměry využívající zpětného rozptylu
- Obr. 3.6: Rozptyl záření na malých částicích [9]
- Obr. 3.7: Rozptyl záření na středně velkých částicích [9]
- Obr. 3.8: Rozptyl záření na velkých částicích [9]
- Obr. 4.1: Blokové schéma snímače zakalení
- Obr. 5.1: Fotodetektor s převodníkem na napětí
- Obr. 5.2: Zapojení zdroje záření
- Obr. 5.3: Zapojení analogových výstupů
- Obr. 5.4: Zapojení digitálních výstupů
- Obr. 5.5A: Schéma zapojení zdroje napájení
- Obr. 5.6: Uložení zákaloměru
- Obr. 5.7: Pohled na zákaloměr po odstranění ochranného víka
- Obr. 6.1: Nano SocketLAN
- Obr. 6.2: Referenční model ISO/OSI [15]
- Obr. 6.3: Propojení komunikačního modulu Nano SocketLAN s MCU
- Obr. 6.4: Převod mezi 5 V a 3,3 V logikou
- Obr. 7.1: Konečný stavový automat pro měření a ovládání z displeje
- Obr. 7.2: Stav 1 – Hlavní menu
- Obr. 7.3: Stav 5 – Měření STOP
- Obr. 7.4: Stav 6 – Měření RUN
- Obr. 7.5: Stav 7 – Nastavení 1/2
- Obr. 7.6: Stav 8 – Nastavení 2/2
- Obr. 7.7: Stav 10 – Klávesnice mezní hodnoty
- Obr. 7.8: Konečný stavový automat síťové komunikace
- Obr. 8.1: Kalibrační vzorky
- Obr. 8.2: Kalibrační křivka turbidimetru pro rozsah 25 – 220 NTU

- Obr. 8.3: Kalibrační křivka turbidimetru pro rozsah 210 – 520 NTU
- Obr. 8.4: Laboratorní přípravek pro měření zakalení
- Obr. 9.1: Měřicí stanoviště při určování zakalení roztoků v laboratorním přípravku
- Obr. 9.2: Průběh maximální absolutní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Obr. 9.3: Průběh maximální relativní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Obr. 9.4: Průběh maximální absolutní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Obr. 9.5: Průběh maximální relativní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Obr. 9.6: Průběh relativní chyby při měření zakalení vzorků džusu turbidimetrickou metodou (vzorky 1 - 4 měřeny v rozsahu 25 - 220 NTU, vzorky 5 a 6 v rozsahu 210 - 520 NTU)
- Obr. 9.7: Průtokový přípravek pro měření zakalení
- Obr. 9.8 a 9.9: Měřicí systém pro testování vlivu protékajícího roztoku na měřenou úroveň zakalení
- Obr. 9.10: Průběh relativní chyby průtokového měření zakalení turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Obr. 9.11: Průběh relativní chyby měření při testování vlivu rozdílné úpravy a barvy stěn laboratorního a průtokového měřícího přípravku při měření turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

Seznam tabulek

- Tab. 5.1: Výčet největších oděrů proudu v zapojení
- Tab. 7.1B: Aplikační protokol síťové komunikace
- Tab. 8.1: Tabulka složení kalibračních vzorků formazinu
- Tab. 8.2: Tabulka skutečných hodnot kalibračních vzorků
- Tab. 8.3: Naměřené hodnoty A/D převodníku při kalibraci turbidimetru na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 8.4: Naměřené hodnoty A/D převodníku při kalibraci turbidimetru na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.1: Měření 26 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 9.2: Měření 37 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 9.3: Měření 46 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 9.4: Měření 98 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 9.5: Měření 121 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 9.6: Měření 160 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 9.7: Měření 210 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU
- Tab. 9.8: Měření 210 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.9: Měření 258 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.10: Měření 275 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.11: Měření 316 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.12: Měření 407 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.13: Měření 424 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.14: Měření 520 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU
- Tab. 9.15: Tabulka naměřených hodnot a vypočtených chyb měření vzorků z jahodového džusu

Tab. 9.16C: Naměřené a vypočítané hodnoty z testování vlivu protékajícího roztoku na měření zakalení

Tab. 9.17D: Naměřené a vypočítané hodnoty z testování vlivu rozdílné úpravy a barvy stěn přípravku na měření zakalení

1 Úvod

Diplomová práce navazuje na práci semestrální a její části jsou zde i použity pro jejich odbornost a návaznost k tématu. V první části je proveden rozbor metod měření zakalení a nejvhodnější z metod je do snímače implementována. Velká část práce je věnována hardwarovému i softwarovému návrhu snímače, který je v posledních kapitolách kalibrován a testován. Součástí testů jsou i vlivy působící na přesnost měření snímače, jako je velikost suspendovaných částic a vliv průtoku kapaliny hlavou snímače.

Hlavním podmětem pro tvorbu této práce bylo, že se na trhu objevují převážně průmyslové snímače zakalení s příliš velkými pořizovacími náklady. Drobné podniky, jako jsou například malé pivovary, si tyto snímače zakalení nemohou dovolit, a proto se dívají po jiných možnostech. Vzhledem k rostoucí popularitě těchto malých pivovarů vzniká na trhu potenciální odbytiště snímačů zakalení, které by dosahovaly srovnatelných vlastností, jako konkurence, ale pořizovací náklady by byly nižší.

Snímače zakalení často označované, jako zákaloměry či turbidimetry začínají nacházet stále větší uplatnění na trhu nejen v pivovarnickém průmyslu, ale i u velice přesných testů na čistotu a kvalitu vody v čističkách odpadních vod nebo v mlékárnách pro určení procenta tuku v mléčných výrobcích či v recirkulačních akvakulturních systémech. Z historického hlediska je nejjednodušší způsob měření zakalení pomocí Seccioho desky, která se používá pro orientační určení průhlednosti a zbarvení vody v rybníkářství. Využití této metody pro potřeby měření zakalení kapaliny v dnešní době např. v pivovarnickém průmyslu je nereálné. Seccioho deska ovšem vytvořila základ pro moderní optické metody.

Měření zakalení v 21. století pracuje na principu využívání umělého zdroje záření, protože bez záření ať už přírodního či umělého nejde toto měření uskutečnit. Průmyslové zákaloměry, které jsou podmětem této diplomové práce, využívají velice často i optická vlákna (OV). Ty se na měření zakalení přímo nepodílejí, ale slouží, jako prostředek přenosu signálu od hlavy snímače k řídicí jednotce, které od sebe mohou být i velice vzdálené. Z tohoto důvodu lze o snímačích zakalení hovořit, jako o optických vláknových snímačích (OVS).

2 Optické vláknové snímače

Optické vláknové snímače (OVS) patří do třetí generace snímačů, jejichž vznik spadá, současně s prvními v praxi použitelnými optickými vlákny, do konce šedesátých a začátku sedmdesátých let minulého století. Jejich nástup byl razantní, ale od té doby zájem o OVS poklesl i přesto, že neexistuje fyzikální veličina, kterou by nebylo možné těmito novodobými snímači změřit. Hlavními důvody poklesu zájmu o OVS se přisuzují ekonomické strážce věci a také určitému konzervatismu uživatelů měřící a regulační techniky. Díky všeobecným parametrům OVS, a také nedostatečnému zastoupení metalických snímačů v některých úlohách (např. u hydrofonů a gyroskopů), jsou OVS nezastupitelné a dochází k stále se zvyšujícímu podílu těchto snímačů v automatizační technice. Tato skutečnost je dána zejména dvěma faktory [1] [2]:

- Odlišný fyzikální charakter nosičů informace, kterými jsou fotony na rozdíl od elektronů, děr a iontů u metalických snímačů
- Výrazně rozdílná vlnová délka (λ), respektive rozdílný rozsah interakce vlnové délky optického záření s měřenou veličinou.

Optické vláknové snímače mají více výhod oproti klasickým snímačům (snímače první a druhé generace). Mezi hlavní výhody patří [3]:

- Použití interferometrických metod - extrémní citlivost
- Odolnost vůči elektromagnetickému rušení
- Jednoduchá mechanická konstrukce - kompaktnost, malé rozměry, chemická odolnost
- Bezkontaktní snímání
- Odolnost vůči vysokým teplotám, nárazům, mechanickým vibracím a nepříznivým vlivům prostředí
- Rychlá odezva, velká šířka frekvenčního pásma
- Možnost použití ve výbušných prostředích
- Dielektrické materiály - elektrická izolace - žádné elektrické vodivé spojení
- Možnost sterilizace bez změny parametrů snímače
- Nízká energetická náročnost
- Vysoká pevnost v tahu
- Velká mechanická pružnost
- Malé tlumení signálu

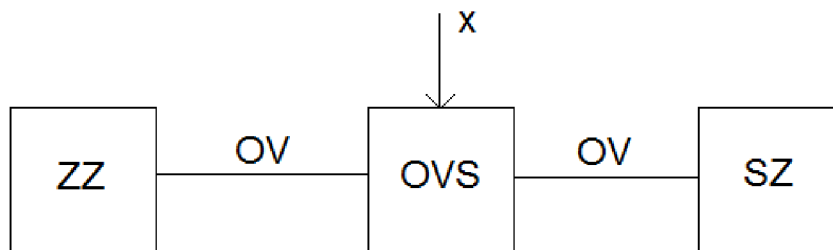
- Velká odolnost vůči radioaktivnímu záření
- Velký dynamický rozsah
- Jednoduchá adaptace na použití v číslicových systémech
- Široké možnosti multiplexování signálu
- Pasivní způsob činnosti většiny optických vláknových snímačů, OVS ovlivňují málo, nebo vůbec neovlivňují měřený objekt
- Většinou velmi jednoduchá konstrukce spojená s vysokou spolehlivostí a nízkými nároky na údržbu
- Možnost měření tam, kde konvenční snímače nelze použít
- Větší utajenost systémů optických vláknových snímačů

Základní blokové schéma optického měřicího kanálu (Obr. 2.1) se skládá ze tří částí. Prvním blokem je zdroj záření (ZZ). Ten je nejčastěji tvořen buď luminiscenční diodou, jako zdroj nekoherentního záření, nebo laserovou diodou, jako zdroj koherentního záření. Zdroje záření jsou popisovány zejména vlnovou délkou λ , šířkou pásma $\Delta\lambda$, optickým výkonem, stabilitou a druhem provozu [2].

Dalším blokem je snímač optického záření (SZ). Nejčastěji používanými snímači optického záření jsou fotodiody, nebo lavinové a PIN diody. Výběr vhodného detektoru závisí především na požadované citlivosti, odstupu signálu od šumu, zisku a také na požadavcích na další zpracování signálu [2].

Posledním a nejpodstatnějším blokem měřicího řetězce je optický vláknový snímač (OVS). Ten se volí na základě druhu měřené veličiny, způsobu modulace signálu a dalších požadavků na měření [2].

Tyto tři bloky spojují optická vlákna (OV), která se volí opět s ohledem na druh měřené veličiny. Používají se mnohavidová, jednovidová i polarizační optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu i gradientní, nebo speciální vlákna určená pro senzorové účely [2].



Obr. 2.1: Základní blokové schéma OVS [2]

2.1 Dělení OVS

Na rozdělení OVS lze nahlížet z mnoha různých úhlů. Avšak nejčastěji se objevuje dělení podle způsobu modulace světla na snímače s modulací amplitudovou, fázovou, polarizační a vlnové délky. Dále tyto snímače dělíme na vnitřní, kdy měřená veličina působí přímo na optické vlákno a vnější, kdy optické vlákno pouze přenáší signál. Dalším ze způsobů, jak dělit OVS je podle charakteru měřené veličiny a to na [2] [3] [4]:

- Elektrické
- Magnetické
- Tepelné
- Mechanické
- Chemické
- Radiační
- Biologické

2.2 Amplitudové OVS

Snímače využívající amplitudovou modulaci jsou nejrozšířenějším typem optických vláknových snímačů. Proces měření lze rozdělit na dvě fáze. V první fázi měřená veličina určitým způsobem ovlivňuje amplitudu (intenzitu) světla, a v druhé fázi se pomocí fotodetektoru měří intenzita optického signálu. Amplitudová modulace optického signálu může vzniknout následujícími způsoby, od nichž se odvozují jednotlivé principy snímačů [3].

2.2.1 Snímače se změnou tlumení

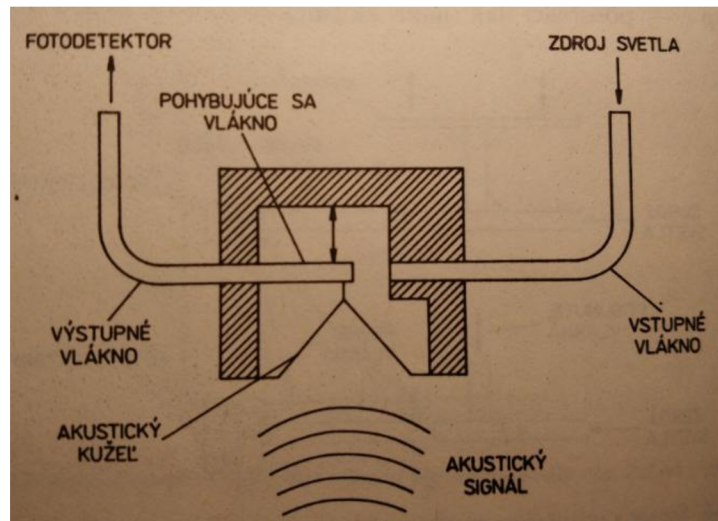
Pro OVS se změnou tlumení se používají dva principy. Buď je citlivou částí snímače samotné vlákno, nebo je vlákno přerušeno a citlivou částí snímače je prostředí mezi vstupním a výstupním vláknem [3].

Důležitou skupinou snímačů, které využívají první z principů změny tlumení, jsou snímače radioaktivního záření. Vystavením vlákna radioaktivnímu záření dochází k radiačnímu poškození optického vlákna a zvětšení tlumení. Stejného principu využívají i klasické snímače se skleněnými bloky. Pomocí OV však lze docílit až o čtyři řády lepší citlivosti. Další uplatnění tyto snímače nachází při měření teploty, kde vlivem teploty dochází buď ke změně koeficientu tlumení jádra vlákna, nebo jeho pláště. Citlivost těchto snímačů pak lze modifikovat změnou tloušťky pláště [3].

Druhý princip změny tlumení využívá velká skupina snímačů, které jsou založeny na různých fyzikálních jevech. Základem je ale vždy pohlcení části intenzity světla. Do této skupiny patří i snímače zakalení, jež jsou podrobně popsány dále.

2.2.2 Snímače se změnou průchodu a odrazu světla

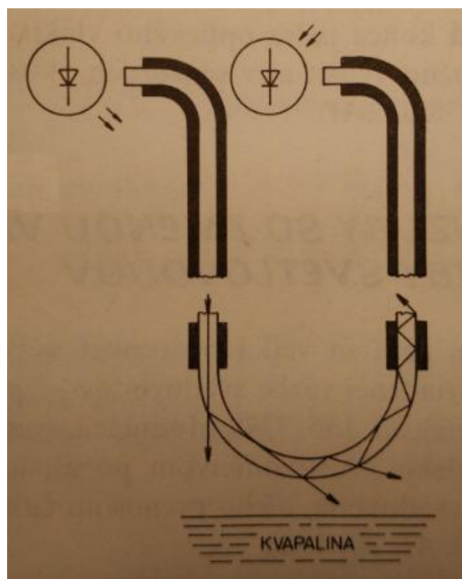
Tyto snímače využívají toho, že přerušením optického vlákna a působením určité fyzikální veličiny na jejich konce dochází k ovlivnění vazby mezi konci vlákna. To znamená, že vychýlením ze souososti jednoho z konců vlákna nedojde k navázání veškerého světla z výstupního vlákna do vlákna vstupního, a tím dojde k poklesu intenzity světla. Tento princip využívá například optický vláknový mikrofon (Obr. 2.2), kde vlivem akustického signálu dochází ke kmitání volně uloženého konce vlákna, čímž vznikají změny intenzity záření na výstupu z OVS [3].



Obr. 2.2: Optický vláknový mikrofon [3]

2.2.3 Snímače s porušením okrajových podmínek šíření světla

Snímače na tomto principu nejčastěji využívají porušení podmínky úplného vnitřního odrazu na rozhraní například mezi jádrem a pláštěm vlákna. Porušením okrajových podmínek se tedy část vedených vidů uvnitř vlákna změní na plášťové, nebo optické vlákno úplně opustí. Tento princip je opět univerzální a lze použít pro měření různých fyzikálních veličin. Jednou z možných aplikací je u snímačů úrovně hladiny agresivních nebo hořlavých kapalin, kde se využívá vhodně ohnutého vlákna do tvaru písmene U [3].



Obr. 2.3: OVS úrovně hladiny kapaliny [3]

2.2.4 Snímače se změnou vzájemné vazby světlovodů

Tyto snímače využívají přenosu části energie z jednoho optického vlákna do druhého pomocí optického tunelového jevu. Provedení těchto snímačů spočívá v přiblížení holých jader dvou vláken na řádově několik mikrometrů po jistou délku, a měří se intenzita záření, které se přeneslo ze vstupního do výstupního vlákna [3].

2.2.5 Snímače s generací záření

Princip posledního typu amplitudových OVS spočívá v měření intenzity záření indukovaného v optickém materiálu vlivem působení optických, tepelných, radiačních či jiných vlivů [3].

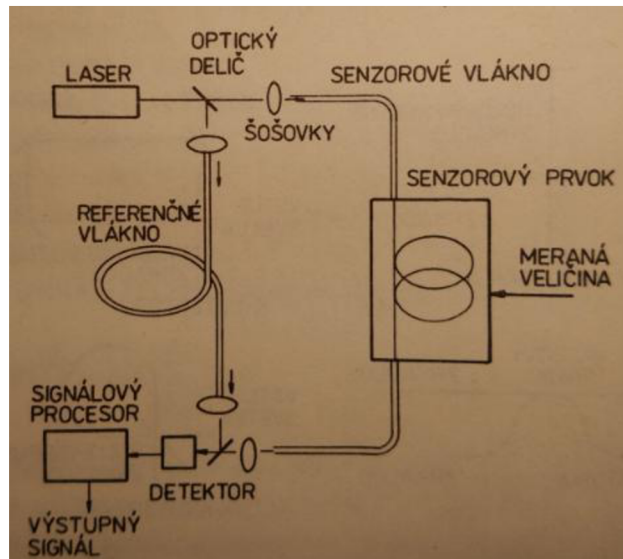
2.3 Fázové OVS

Fázové optické vláknové snímače využívají fázové modulace světelného signálu uvnitř vlákna a patří k nejcitlivějším OVS vůbec. Změny fáze se měří interferometrickými metodami a lze jimi měřit extrémně malé změny dráhy optického signálu se změnou fáze až 10^{-8} rad. Měřenou veličinou lze na fázi optického signálu působit změnou délky optického vlákna, indexu lomu nebo změnou průřezu vlákna. Ta je ale ve většině případů zanedbatelná, proto se často neuvažuje a změna fáze je tedy úměrná působící fyzikální veličině a změnám délky a indexu lomu vlákna [3].

Jak už bylo řečeno, základním prvkem snímače pracujícím na principu fázové modulace jsou optické vláknové interferometry, nebo se také používá Fabryho – Perotův rezonátor, který je tvořen dvěma zrcadlovými plochami. Zmíněné interferometry lze rozdělit do třech základních skupin [3].

2.3.1 Dvouramenný jednovidový interferometr

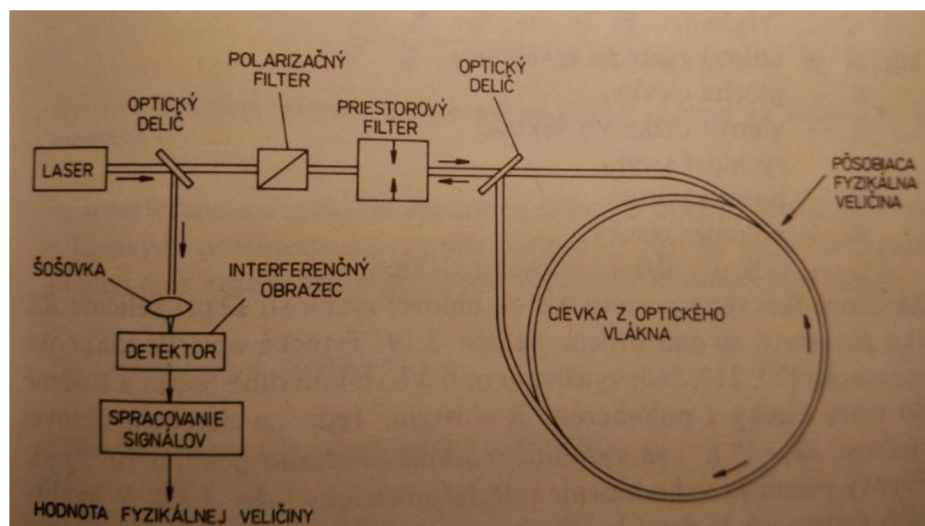
Ten využívá toho, že světelný svazek je rozdělen do dvou vláken. Jedním je měřící vlákno, ve kterém dochází k ovlivnění fáze světelné vlny měřenou fyzikální veličinou, a druhým je referenční vlákno. Nakonec jsou svazky opět sloučeny pomocí polopropustného zrcadla do jednoho vlákna, které je přivedeno na detektor. Typickými představiteli dvouramenného jednovidového interferometru jsou Machov – Zehnderův (Obr. 2.4), nebo Michelsonův interferometr [3].



Obr. 2.4: Fázový OVS s Machov – Zehnderovým interferometrem [3]

2.3.2 Jedno vláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou

Představitelem tohoto druhu interferometru je Sagnacův interferometr (Obr. 2.5). Principem jeho funkce je, že se jedním optickým vláknem navinutým do cívky šíří elektromagnetické vlny oběma směry a vyhodnocuje se čas, jakým obě vlny projdou cívkou. K rozdílnému času dochází, pokud cívka vykonává rotační pohyb. Výsledný fázový posun je pak úměrný úhlové rychlosti otáčení cívky [3].



Obr. 2.5: Fázový OVS se Sagnacovým interferometrem [3]

2.3.3 Mezividový interferometr

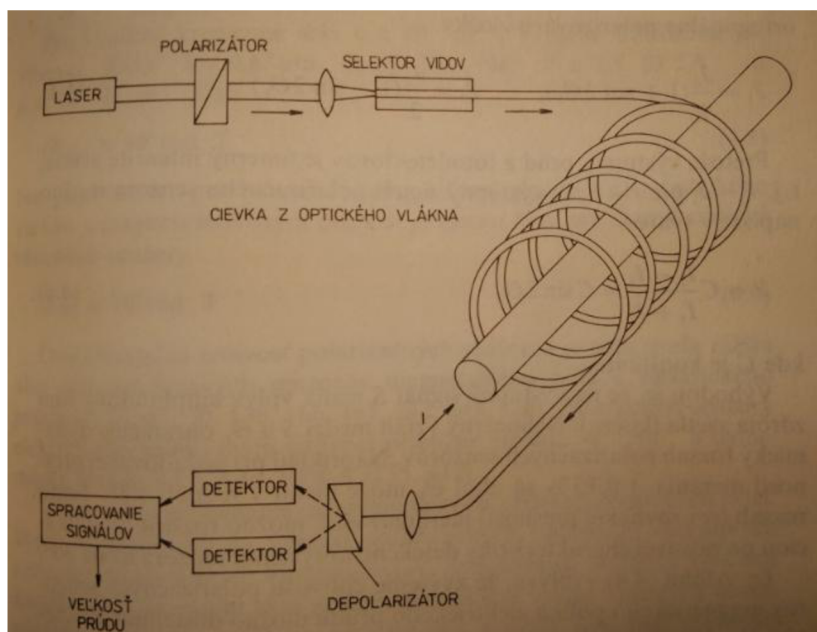
Ten využívá interference mezividy, které se šíří jedním optickým vláknem a měřená fyzikální veličina působí rozdílně na různé vidy uvnitř vlákna. Velkou výhodou těchto interferometrů je, že interferující vidy se šíří ve stejném prostředí, a působí na ně stejné vlivy. Další výhodou je konstrukce snímačů, jelikož využívají mnohavidová optická vlákna [3].

2.4 Polarizační a OVS s modulací vlnové délky

Přístupy ke konstrukci těchto snímačů jsou různé. Používají se optická vlákna s velkým i velmi malým dvojlomem, které mohou být citlivou částí snímače, nebo jsou použity pouze, jako vstup a výstup z polarizačního modulátoru. Vlivem působení různých fyzikálních veličin se u těchto snímačů mění polarizace světla přenášeného vláknem, a to buď otočením elipsoidu polarizace, nebo jeho deformací. Podle toho lze tyto OVS i dělit na snímače s modulací otočení polarizační roviny a snímače s indukovaným dvojlomem [3].

2.4.1 Snímače s modulací otočení roviny polarizace

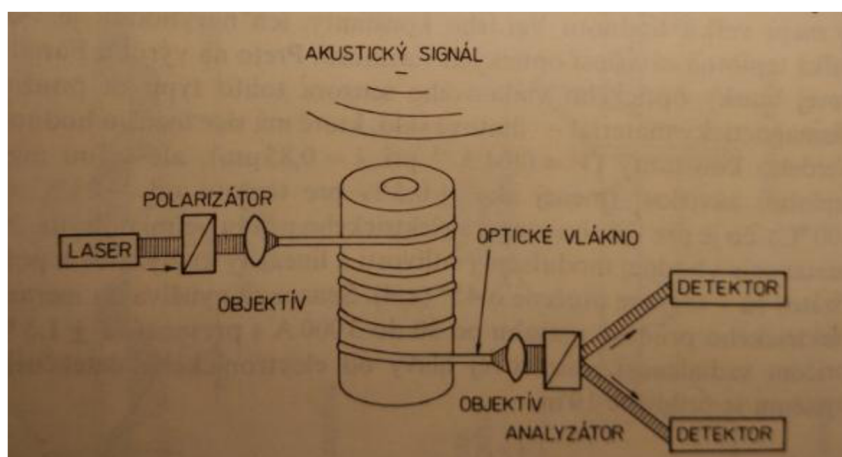
Typickým představitelem snímače pracujícím na tomto principu je snímač elektrického proudu využívající Faradayův jev (Obr. 2.6). Vodič elektrického proudu je umístěn do středu cívky se závitů tvořenými optickým vláknem. Protéká-li vodičem proud, je vlivem magnetického pole, které vodič generuje, otáčena rovina polarizace signálu. Výsledný úhel natočení polarizačního obrazce je přímo úměrný proudu tekoucímu vodičem a počtu závitů optického vlákna [3].



Obr. 2.6: Polarizační OVS protékajícího elektrického proudu [3]

2.4.2 Snímače s indukovaným dvojlomem

Tento typ snímačů využívá změny dvojlomu v optickém vlákně, jehož vlivem dochází k deformaci polarizačního obrazce, který mění svoji prostorovou orientaci. Indukovaného dvojlomu se nejjednodušeji dosáhne navinutím optického vlákna na válec, který se vlivem působící fyzikální veličiny deformuje (vzniká mechanické napětí). Podle materiálu, ze kterého je válec zhotoven, lze měřit různé veličiny. Je-li optické vlákno navinuté na pružný materiál, je snímač vhodný pro měření akustických signálů a tlaku (Obr. 2.7). Pro měření magnetického pole je vhodné vlákno navinout na válec z magnetostrikčního materiálu a pro měření elektrického pole se hodí válec z piezoelektrického materiálu [3].



Obr. 2.7: Polarizační OVS akustických signálů [3]

3 Zakalení a metody jeho měření

3.1 Zakalení a jeho definice

Zakalení tekutin způsobují suspendované pevné látky, které nejsou obvykle viditelné pouhým okem. Měření zakalení je důležitým testem při zjišťování kvality vody, kterým se získá pouze informace o přítomnosti pevných nerozpuštěných látek, ale není možné tyto látky identifikovat [8].

Voda téměř vždy obsahuje suspendované pevné částice, které se skládají z různých látek i velikostí. Některé z těchto částic jsou dostatečně velké i těžké aby se usazovali na dně nádoby. Ostatní, menší částice, které se usazují příliš pomalu nebo vůbec se nazývají koloidní pevné látky. Ty mohou za to, že se nám voda zdá zakalená [8].

3.2 Měření zakalení

Analýza zákalu je ve skutečnosti studiem optických vlastností, které způsobují, že světlo procházející médiiem se podrobí třem reakcím [5] [6].

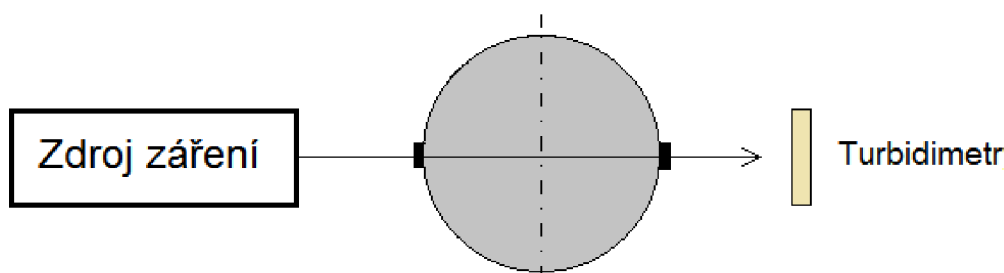
- Část světla je absorbována částicemi obsaženými v médiu.
- Část světla je přenesena původním směrem beze změny.
- Zbývající část světla je vlivem kolizí fotonů s částicemi uvnitř média rozptýlena v různých směrech oproti původnímu směru šíření.

Zakalením média se snižuje jeho transparentnost a intenzita vstupujícího záření tedy neodpovídá intenzitě záření, které lze změřit po průchodu světelného svazku médiem, jelikož zde dochází k absorpci záření a kolizím fotonů s částicemi uvnitř média. Pokud je stupeň zakalení malý, dojde k menšímu rozptýlení a absorbování světla a většina fotonů putuje původním směrem, z čehož plyne, že i naměřená intenzita záření bude vysoká. Měření nízké úrovně zákalu vyžaduje přesné měření rozptýleného světla. Díky pokrokům ve vývoji fotodetektorů je možné měřit i velmi malou změnu (útlum) intenzity záření vzorkem o stálém objemu. Nicméně s měřením vysokých nebo velmi nízkých úrovní zakalení jsou stále velké problémy. Pro vzorky s nízkou úrovní dochází k velmi malému rozptylu a změna intenzity je tedy také velmi malá a obtížně detekovatelná. Tento signál má malý odstup signálu od šumu a zkoumaný signál může být v tomto šumu lehce ztracen. Zatímco pro velké úrovně zákalu se v médiu objevují vícenásobné rozptyly, které interferují s přímým rozptylem. Existují však metody, které zlepšuje odstup signálu od šumu. Jednou z těchto metod je měření rozptylu pod úhlem 90° k přímému směru světelného proudu od zdroje k detektoru záření. Měření pod úhlem 90° je za určitých podmínek považováno za nejpřesnější metodu měření zakalení a je také uznána agenturou EPA (Enviromental protection agency), jako metoda 180.1 [5].

Světlo rozptýlené částicemi, jako jsou prach, řasy, organické látky, a mikroorganismy umožňuje detekci těchto částic ve vodě. Projde-li světelné záření kapalinou, obsahující nečistoty ve formě nerozpuštěných pevných částic (suspenze), dochází na těchto částicích k rozptylu záření do všech směrů a intenzita detekovaného záření se zmenšuje v závislosti na koncentraci suspendovaných částic. Z rozboru z předchozí kapitoly lze soudit, že pro měření zakalení se fázové ani polarizační optické vláknové snímače nehodí na rozdíl od snímačů využívající amplitudové modulace signálu. Obecně známé jsou dva základní principy měření zakalení nazývané turbidimetrie a nefelometrie, od nichž jsou odvozeny i názvy optických vláknových snímačů zakalení. Nejsou to však jediné metody měření zakalení [5] [7] [8].

3.3 Turbidimetr

Turbidimetry měří intenzitu optického záření, které projde vzorkem v přímém směru (Obr. 3.1). To znamená, že tento snímač kvantifikuje množství přeneseného světla od zdroje k fotodetektoru. Nerozpuštěné látky v dráze světelného paprsku způsobují rozptyl a absorpci části světelné energie, o kterou je ponížena hodnota změřená fotodetektorem. Tento druh optického vláknového snímače je vhodný spíše pro měření zakalení vzorků, které obsahují větší částice v poměru k vlnové délce použitého zdroje záření [7] [9].

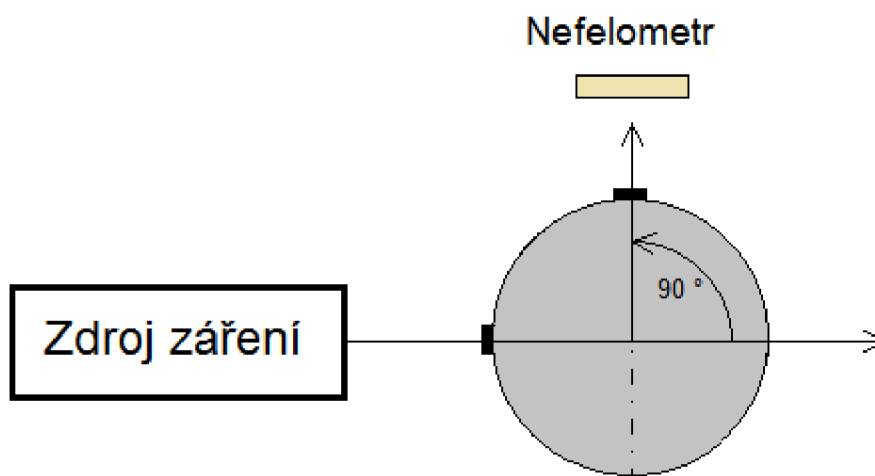


Obr. 3.1: Principiální schéma turbidimetru

3.4 Nefelometr

Dalším způsobem je měření intenzity záření, které vzniká odrazem od pevných částic. V tomto způsobu měření je detektor umístěn pod úhlem 90° od přímého směru šíření světla. Na trhu se však lze setkat i s měřicími přístroji, které jsou označovány jako nefelometry a přitom mají detektor záření umístěn pod jiným úhlem. Ty pracují na podobném principu, ale většinou jsou určeny pro specifické měření a určitý druh aplikace. Úhel detektoru je často volen v závislosti na tom, kde se nachází nejvíce rozptýleného světla. Objektem měření u nefelometrů tedy není intenzita záření v přímém směru, jako tomu je u turbidimetrů, nýbrž záření, které se vlivem kolize fotonů v médiu od tohoto směru odklonilo. Protože změna intenzity rozptýleného záření

je často mnohem větší než změna intenzity procházejícího záření, nabízí nefelometry často vyšší citlivosti než turbidimetry [6] [7].

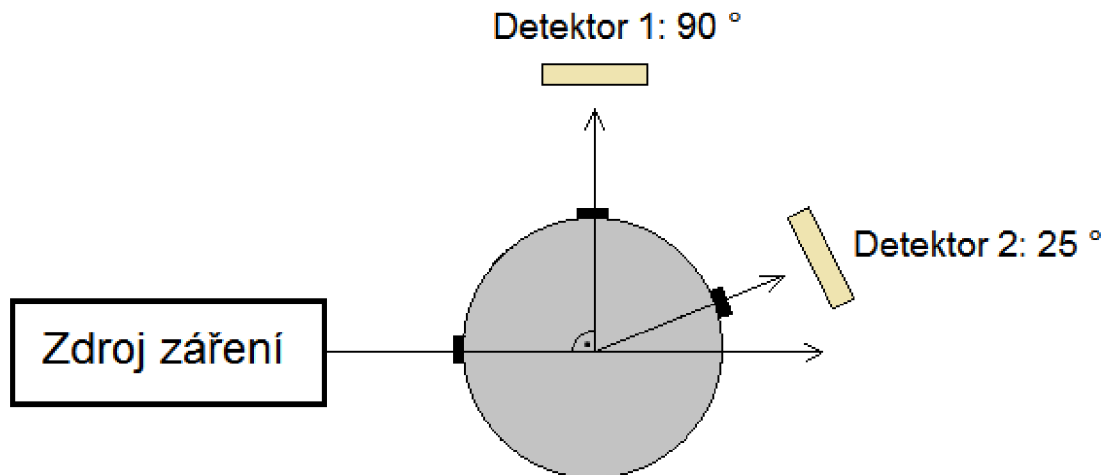


Obr. 3.2: Principiální schéma nefelometru

Jak již bylo zmíněno, intenzita detekovaného záření závisí na koncentraci částic v uvažovaném médiu. Dále pak závisí na úhlu rozptylu, vlnové délce λ použitého záření a na určitých vlastnostech nerozpuštěných částic v kapalině, jako je jejich velikost, tvar, barva a index lomu n . Obě zatím zmíněné metody, především však nefelometry, patří mezi velice citlivé a lze s nimi měřit koncentrace 10 – 5 % při použití laserového nefelometru i nižší [6] [7].

3.5 Dvoukanálový zákaloměr

Při velké úrovni zakalení dochází k vícenásobným rozptylům. Tento problém lze částečně vyřešit použitím takzvané dvoukanálové technologie, při které se současně měří dvěma detektory. Prvním se měří intenzita rozptýleného záření pod úhlem 90° (nefelometr) a druhý detektor snímá intenzitu rozptýleného dopředného záření pod úhlem 25° . Snímač tedy poskytuje dva druhy informací. Údaj z nefelometru indikuje malé částice a druhý detektor poskytuje informaci o rozptylu způsobeném zejména velkými částicemi v médiu. Podobně jako nefelometry, ani tyto snímače často nedodrží striktní nastavení detektorů pod úhly 90° a 25° , ale v různých aplikacích se volí jiné nastavení tak, aby změny intenzity záření byly co největší v závislosti na změně množství částic v měřeném vzorku, nebo aby měřicí rozsahy vyhovovaly požadavkům [7].



Obr. 3.3: Dvoukanálová měřicí metoda

3.6 Poměrové zákaloměry

Jednou z novějších metod měření zakalení využívají takzvané poměrové zákaloměry. Ty spojují všechny doposud zmíněné metody do jedné. To znamená, že snímač (myšlené, jako celek), obsahuje 3 detektory záření. Nefelometr pro bočně rozptýlené záření, detektor zachycující dopředný rozptyl i turbidimetr, měřící v přímém směru šíření záření. Hodnota zakalení, podobně jako u dvoukanálového snímače je přímo úměrná hodnotě z nefelometru a nepřímo úměrná součtu hodnot dopředného rozptylu s hodnotou z turbidimetru. Poměrové zákaloměry disponují řadou výhod oproti svým předchůdcům, jako jsou [9]:

- Zvýšení dlouhodobé stability snímače
- Jistá kompenzace stárnutí a možných usazenin na částech, které jsou v přímém kontaktu s měřeným médiem
- Snížení vlivu teplotních změn v elektronických součástkách
- Rapidně snižuje nutnost opakované re-kalibrace
- Snižuje nežádoucí efekt barvy vzorku

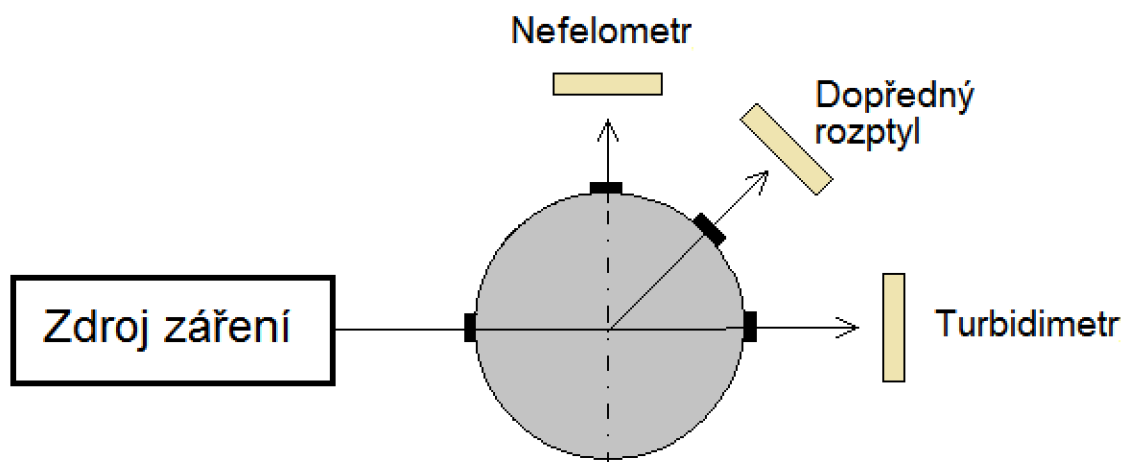
Proto jsou tyto snímače vhodnější pro silně, nebo proměnlivě zbarvené kapaliny, a pro vzorky s vysokým stupněm zakalení [9].

Přes množství výhod, mají tyto měřicí přístroje i jisté nevýhody, které přivádí k zamyšlení, zda určitý technologický proces či aplikace, ve které mají být použity, vyžaduje řešení právě pomocí poměrových zákaloměrů. Těmito nevýhodami jsou:

- Složitost snímače, se kterou je spojena vyšší náročnost výroby hlavy snímače obsahující jeden vstup a tři výstupy

- Cena, která bývá často vyšší z důvodů trojnásobku pomocných elektronických obvodů nutných pro detekci a převod signálů, oproti klasickým snímačům, jako jsou nefelometry nebo turbidimetry

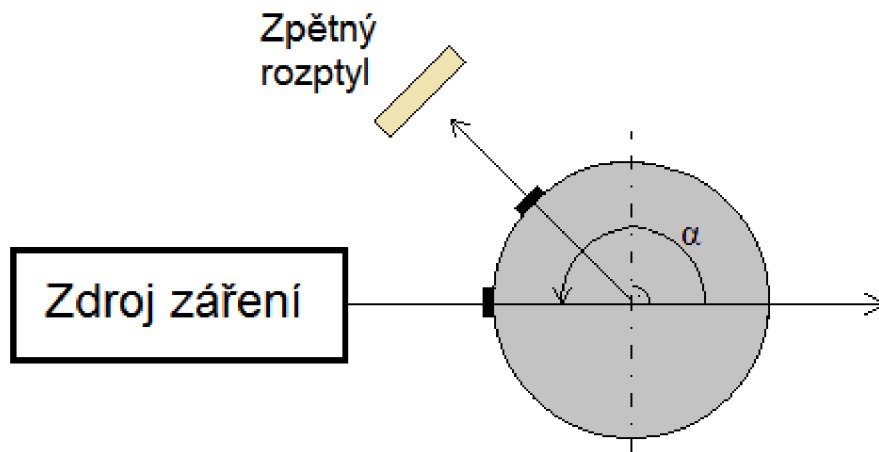
Tento typ zákaloměrů je pojmenován podle způsobu vyhodnocení signálů z fotodetektorů. Je tedy zřejmé, že i předchozí metoda dvoukanálového měření je určitým druhem poměrového zákaloměru. Nejnovější zákaloměry dokonce využívají i detektoru zpětného rozptylu záření a snímače mají čtyři fotodetektory. Dalo by se tedy říci, že poměrový zákaloměr je univerzální název pro všechny zákaloměry, v nichž je více než jeden fotodetektor a výsledná hodnota zakalení se určuje poměrem hodnot z fotodetektorů.



Obr. 3.4: Principiální schéma poměrového zákaloměru

3.7 Metoda využívající zpětného rozptylu

Jak už je z nadpisu zřejmé, využívá tato metoda zpětného rozptylu záření. Ten se měří v rozsahu od 90° do 180° od přímého směru. Metodou zpětného rozptylu se měří intenzita záření, které vzniká kolizemi fotonů s částicemi a je odraženo od přímého směru šíření zpět ke zdroji záření. Proto se tato metoda používá především pro menší úrovně zakalení malými částicemi, na kterých dochází k Rayleighovu rozptylu [5].



Obr. 3.5: Zákaloměry využívající zpětného rozptylu

3.8 Vliv velikosti částic na průchod záření

Rozptyl záření je kromě jiného závislý na průměru částic (d) uvnitř měřeného vzorku a na vlnové délce použitého záření (λ). Rozptyl způsobený částicemi lze spočítat pomocí vztahu (1), kde (r) je poloměr částice, na které dochází k rozptylu [9].

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \quad (1)$$

3.8.1 Malé částice

Za malé částice jsou považovány ty, pro které platí: $d < 0,05 \cdot \lambda$. Při použití zdroje viditelného záření v rozsahu 400 – 700 nm, odpovídá velikost malých částic do $d = 0,03 \mu\text{m}$. Rozptyl záření způsobený malými částicemi ukazuje obrázek 3.6, a popisuje ho Rayleighova rovnice (2), kde i_θ je intenzita rozptýleného záření pod úhlem Θ , I_0 je počáteční intenzita světelného zdroje, n' je index lomu částic, n je index lomu média, r je vzdálenost částic ve vzorku o objemu V a počtu částic N [9].

$$\frac{i_\theta}{I_0} = \left(\frac{n'}{n} - 1\right)^2 \cdot \left(\frac{N \cdot V^2}{\lambda^2 \cdot r^2}\right) \cdot (1 + \cos(\Theta))^2 \quad (2)$$



Obr. 3.6: Rozptyl záření na malých částicích [9]

3.8.2 Středně velké částice

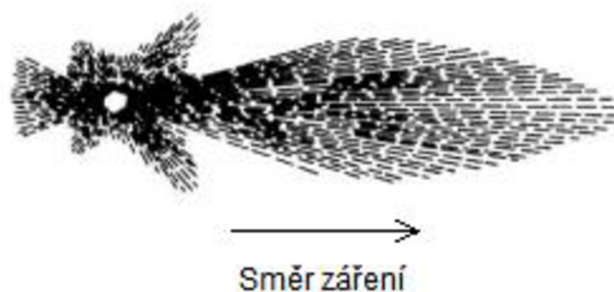
Pro středně velké částice, ale takové, které splňují podmínku velikosti $0,1*\lambda < d < 0,8*\lambda$, se stává úhlové rozdělení rozptýleného světla nesymetrickým a začíná převládat dopředný rozptyl (Obr. 3.7). Při zvětšování částic se rozptyl intenzity záření stává méně závislým na vlnové délce [9].



Obr. 3.7: Rozptyl záření na středně velkých částicích [9]

3.8.3 Velké částice

Pro velké částice o velikosti $d > 0,8*\lambda$ stále platí rovnici (1). U částic, které jsou větší než $1 \mu\text{m}$, se objevuje extrémní koncentrace rozptylu v dopředném směru, protože ve vzorku dochází ke vzájemným destruktivním účinkům zpětných rozptylů. Kromě maxima přímého rozptylu obsahuje obrazec i sekundární vrcholy viz obrázky 3.8 [9].



Obr. 3.8: Rozptyl záření na velkých částicích [9]

Problémem však je, že v praxi nejsou podmínky tak ideální a částice mají v drtivé většině případů nepravidelný tvar a náhodnou velikost. Proto není vždy jednoznačné, jakou metodu měření zakalení použít [9].

3.9 Jednotky měření zakalení

Na trhu existuje široká škála snímačů pro měření zakalení, ve kterých je světlo rozptýlené částicemi suspendovanými v kapalině. Jak již bylo řečeno dříve, měření zakalení závisí kromě jiného na vlnové délce a úhlu umístění detektoru. Z různých důvodů se nepoužívá pouze jeden druh zdroje záření a úhel umístění detektoru. Výsledkem je, že naměřené hodnoty intenzity záření stejného vzorku různými

metodami se markantně liší, a proto vzniklo i více jednotek zakalení. Nejznámější a nejpoužívanější jednotkou zakalení je NTU (Nephelometric Turbidity Unit). V pivovarnictví se však nejčastěji používá jednotka EBC (European Brewery Convention). Převodní vztah mezi těmito jednotkami je velice jednoduchý a odpovídá vztahu (3).

$$1 \text{ EBC} = 4 \text{ NTU} \quad (3)$$

3.10 Zdroje záření používané pro měření zakalení

Pro měření zakalení je nutné správně zvolit zdroj záření. Jde-li o měření zakalení pitné vody, používá se často žárovka s wolframovým vláknem s vlnovou délkou 400 – 600 nm (bílé světlo) svítící s barvou o teplotě 2200 – 3000 K. Wolframové žárovky emitují světlo v širokém spektru. Jelikož částice v médiu mohou lehce absorbovat některé konkrétní vlnové délky záření, dochází k znatelnější absorpci záření těmito částicemi. To vede k nižší intenzitě rozptýleného světla. Z tohoto důvodu je pro většinu ostatních měření vhodnější použít zdroj generující záření v infračervené oblasti (například IR LED diodu s vlnovou délkou 780 nm se spektrální šířkou menší než 60 nm). Použitím infračerveného zdroje záření se minimalizuje, případně eliminuje vliv zbarvení zkoumaného vzorku. To však přináší jednu nepříjemnou vlastnost a to takovou, že u snímačů pracujících s IR zdroji záření dochází k jistému snížení citlivosti, jelikož malé částice při těchto vlnových délkách rozptylují méně světla než při viditelném záření [5] [8].

3.11 Detektory záření používané pro měření zakalení

Ve snímačích zakalení spolu iteruje světlo od zdroje společně s měřenou fyzikální veličinou působící na optický svazek. Výsledek je detekován pomocí fotodetektorů a elektrický signál je převeden na míru zakalení. Jak již bylo řečeno dříve, umístění detektoru záleží na požadované metodě měření zakalení. Jako detektory se používají – fotonásobiče, vakuové fotodiody, křemíkové fotodiody nebo klasické fotorezistory. Každý z uvedených fotodetektorů reaguje odlišně na určité vlnové délky světla. Při použití monochromatického světelného zdroje, není specifikace fotodetektoru příliš kritická. Obecně platí, že pokud je jako zdroj světla použita žárovka s wolframovým vláknem, je vhodnější použít jako detektor fotonásobič, vakuovou fotodiodu nebo fotorezistor. Tyto detektory jsou citlivější na kratší vlnové délky světla, a proto jsou vhodné spíše pro detekci menších částic v médiu. Křemíková fotodioda je citlivější na delší vlnové délky záření, a proto se nejčastěji používá v kombinaci s IR zdrojem záření. Tato konfigurace měřicího systému se hodí spíše pro měření větších částic obsažených v médiu [5].

4 Návrh snímače zakalení a možnosti jeho využití

Obecně je možné snímač rozdělit na dvě části. První částí je hlava snímače měřící vstupní fyzikální veličinu, v našem případě zakalení média. Ta z pravidla obsahuje zdroj a detektor záření, nebo zakončení optických vláken, pokud jsou tyto součástky vzdáleny od bodu měření. Druhá část se stará o převod měřené neelektrické veličiny na elektrický signál, nejčastěji pomocí proudově citlivých operačních zesilovačů. Tyto signály jsou následně zpracovávány řídicí jednotkou, která je ve většině případů založena na nějakém typu mikroprocesoru. Ten je kromě samotného zpracování měřeného signálu propojen i s dalšími podpůrnými obvody, sloužícími k regulaci měřené veličiny či vizualizaci a diagnostice.

Kompletní snímač by měl v předem stanovených mírách splňovat tyto hlavní požadavky:

- Spolehlivost – úzce spjata s robustností provedení
- Nízké výrobní náklady – z důvodu konkurenceschopnosti na trhu
- Požadované rozlišení – taková nejmenší změna vstupního měřeného signálu, která vede ke změně LSB bitu (nejméně významný bit) vyhodnocovací jednotky
- Požadovaná přesnost – míra chyby mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny
- Požadovaný rozsah měření

Kromě těchto bodů by měl snímač splňovat i požadavky související s jeho mechanickým provedením, jako je například jeho velikost či stupeň krytí v takzvaném IP kódu.

4.1 Návrh blokového schématu snímače zakalení

Snímače zakalení nacházejí již v této době využití nejen v laboratorních podmínkách (například při zkoumání kvality pitné vody a množství obsažených bakterií), ale i u průmyslových výrobních linek a u automatizovaných procesů. Tomu odpovídá i zvyšující se dostupnost zákaloměrů na trhu. Určitým nedostatkem většiny již prodávaných zákaloměrů, jsou však jejich často vysoké pořizovací a instalační náklady, což bylo i hlavním podmětem pro tuto práci.

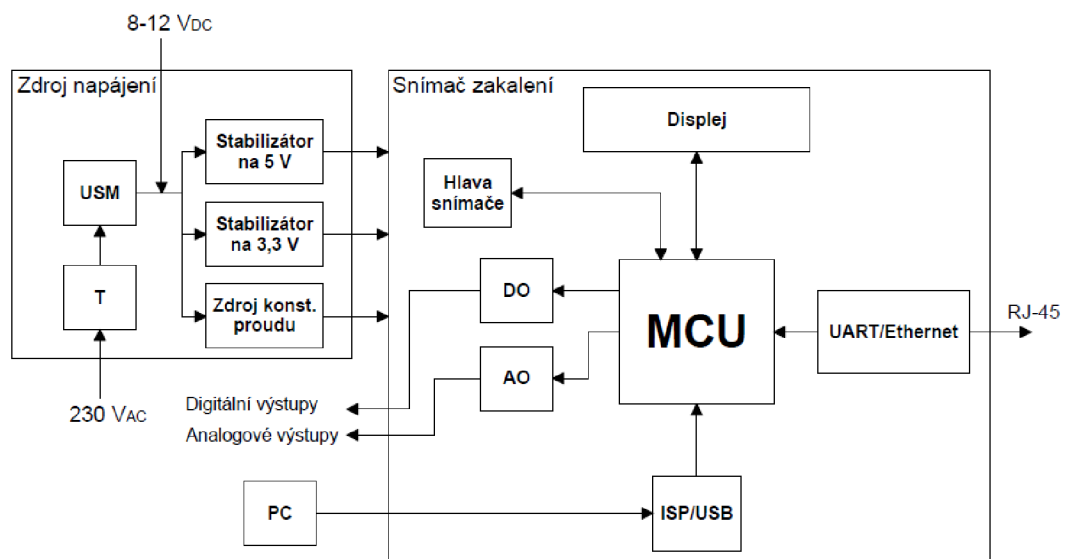
Z provedeného průzkumu trhu v rámci semestrální práce [17] je patrné, že před samotným návrhem je nutné stanovit, zda tento nový snímač bude sloužit pro laboratorní či průmyslové účely. Jelikož se předpokládá zařazení snímače do procesu

výroby piva, přesněji pro oddělení kvasnic od piva při jejich stahování, je zřejmé, že výsledkem návrhu by měl být zákaloměr vhodný pro průmyslové využití.

Výše zmiňované základní požadavky na snímač bývají definovány procesním inženýrem, dokonale obeznámeným s výrobním procesem, a marketingovým oddělením společnosti, pro niž je snímač vyvíjen. Dále je pro takoveto snímače žádoucí splnění následujících bodů:

- Dostatečná velikost paměti dat pro zachycení nejdelšího možného cyklu měření
- Možnost připojení i více vstupních měřicích kanálů (vhodné například při změně metody měření či poruše na jednom z kanálů)
- Možnost ovládání i více akčních členů současně
- Jednoduché přeprogramování MCU
- Možnost manuálního řízení, změny nastavení (například změna rozsahu měření) a vizualizace, jak z bezprostřední blízkosti místa měření, tak z řídicího softwaru celého výrobního procesu
- Možnost střídavého síťového i stejnosměrného napájení

Na základě těchto požadavků bylo sestaveno základní blokové schéma snímače zakalení (Obr. 4.1). To se skládá z bloků pro výstupy (DO, AO), hlavy snímače, MCU, displeje, převodníku na průmyslový Ethernet (UART/Ethernet), převodníku na USB pro programování (ISP/USB), počítače a bloků zdroje napájení (transformátoru T, usměrňovače USM, Stabilizátoru na 5 V, Stabilizátoru na 3,3 V a zdroje konstantního proudu pro napájení zdroje záření).



Obr. 4.1: Blokové schéma snímače zakalení

4.2 Možné aplikace snímače zakalení

Nejčastější aplikace průmyslových zákaloměrů jsou u spojité a dávkové výroby. Typickým příkladem spojité výroby může být například ropná rafinérie, nebo čistička odpadních vod, kde zákaloměry sledují množství částic před a po její filtraci. Spojitá výroba tedy označuje kontinuální proces, jehož výsledkem je nepřetržitý tok výrobků.

Dávková výroba se vyznačuje výrobou šarží, což je skupina výrobků podobných vlastností. Tento proces však není kontinuální a po vyprodukování jedné dávky je nutná odstávka, kdy dochází ke změně nastavení nebo k čistící fázi. Typickou výrobou pracující na dávkovém principu a využívající zákaloměry je ve farmaceutickém průmyslu výroba léčiv, v průmyslu potravinářském při výrobě piva, slazených nápojů nebo v mlékárnách při výrobě mléčných výrobků.

Obecně se zákaloměry hojně využívají v průmyslech, které jsou nějak spojené s filtrací nebo ji při výrobě využívají. Jedním takovým odvětvím je i rybářství, kde se u recirkulačních zařízení pro chov ryb využívá filtrace vody, ve které žijí ryby náchylné na její čistotu.

5 Návrh a popis částí hardwaru snímače zakalení

Z provedeného rozboru metod měření zakalení a faktu, že hlavní využití snímače má být v pivovaru, kde bude měřit zakalení při stahování kvasnic, které jsou v porovnání s vlnovou délkou záření kategorizovány, jako velké částice, jsou nejvhodnější volbou pro měření metoda turbidimetrická a metoda využívající dopředného rozptylu záření.

Při návrhu jednotlivých částí snímače vycházejících z blokového schématu je dodržováno několika zásad. První zásadou bylo co možná nejjednodušší schéma. Proto byly při řešení jednotlivých problémů implementovány již existující integrované obvody, které vyžadují minimální množství dalších externích součástek a je s nimi i pohodlnější práce při jejich programování. I přes skutečnost, že jeden fotodetektor jako turbidimetr je optimální metodou při tomto měření, obsahuje snímač fotodetektory dva. Důvodem implementace druhého fotodetektoru bylo vyzkoušet měření i jinou metodou. Kromě toho plní druhý fotodetektor i funkci náhradního kanálu při poruše či poškození kanálu hlavního. Dále bylo mojí snahou vytvořit univerzální snímač, který bude mít dostatečný počet výstupů a pohodlné uživatelské rozhraní, které umožní změnu nastavení snímače z bezprostřední blízkosti i ze vzdáleného PC či PLC pomocí průmyslového Ethernetu.

Další dvě zásady návrhu se spíše věnují návrhu desky plošného spoje (DPS). Kvůli snaze o co nejmenší rozměry desek, a také potlačení možných vzniků rušení na vývodech citlivých součástek, bylo upřednostňováno použití součástek v SMD pouzdrech namísto klasických vývodových. V některých případech, kdy délka cest nehrála zásadní roli, bylo použito i vývodové provedení součástek. Díky tomu se docílilo zjednodušení schématu a ušetření i několika zbytečných prokůvů mezi vrstvami desek. S potlačením rušení je spojena i druhá velice důležitá zásada návrhu DPS. Tou je rozdělení zemního potenciálu a napájecího napětí ihned po filtraci za zdrojem napájení tak, aby například spínání digitálních výstupů co nejméně ovlivňovalo operační zesilovače při zpracovávání signálu z fotodetektorů.

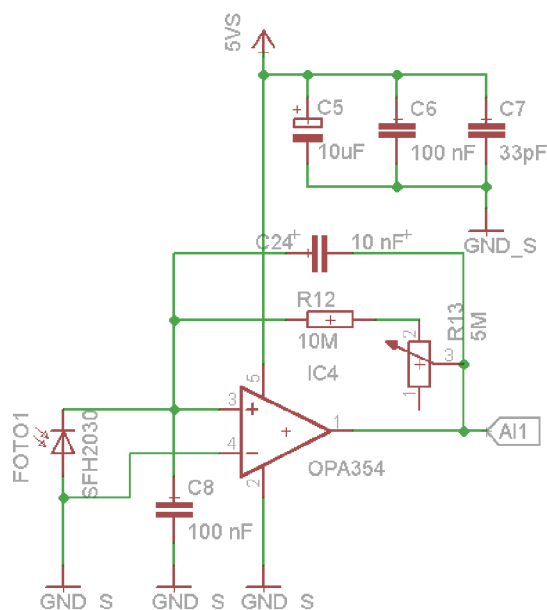
5.1 Senzorová část

5.1.1 Zapojení fotodetektoru

Jedná se o nejdůležitější část celého zákaloměru. Informace o úrovni zakalení (intenzita záření) je pomocí optického vlákna přivedena z hlavy snímače do řídicí jednotky. Zde dochází k jejímu převodu na odpovídající hodnotu elektrického proudu (fotodiody), která je následně v I/U převodníku transformována na napětí a digitalizována v integrovaném 10 b A/D převodníku mikroprocesoru.

Při volbě fotodiody i zdroje záření se vycházelo z poznatků z teoretického rozboru metod měření zakalení. Pro naši potřebu je vhodné pracovat v infračervené části spektra záření z důvodu potlačení vlivu barvy média, a aby byly detekovatelné i co nejmenší částice, je vhodné využít spíše kratších vlnových délek v infračervené oblasti. Spolu s podmínkou kompatibility zdroje záření a fotodetektoru byla zvolena PIN fotodiody SFH 2030. Ta pracuje v širokém spektru 400 – 1100 nm a dosahuje maximální citlivosti při 850 nm.

Jelikož se předpokládá využití snímače především v procesu výroby piva při stahování kvasnic, kde jsou očekávány velké změny v zakalení, byl zvolen I/U převodník s operačním zesilovačem (OZ) typu OPA 354. Tento operační zesilovač je díky svým vlastnostem vhodný pro použití k převodu malých proudů na napětí, ale je napájen nesymetrickým zdrojem napětí. Obecně platí, že symetricky napájené OZ zajišťují větší odstup signálu od šumu a lepší citlivost. I přesto je tento OZ považován za vhodné řešení. I/U převodník je zapojen podle známého zapojení viz obrázek 5.1.



Obr. 5.1: Fotodetektor s převodníkem na napětí

Kondenzátory C_5 , C_6 a C_7 slouží k filtraci napájecího napětí od napěťových špiček, které by mohly ovlivnit převod. Jejich kapacity jsou voleny tak, aby zachytili dlouhé i velice krátké pulzy. Odpor R_{12} a trimr R_{13} slouží k nastavení rozsahu výstupního napětí I/U převodu podle vztahu (3), kde I_{FD} je proud generovaný fotodiodou a U_{OUT} je výstupní analogové napětí po převodu. Součástí zapojení je i kondenzátor C_{24} , který pro velké kmitočty představuje zkrat a tím je potlačeno kmitání výstupního napětí z I/U převodníku.

$$U_{out} = -I_{FD} \cdot (R_{12} + R_{13}) \quad [V] \quad (3)$$

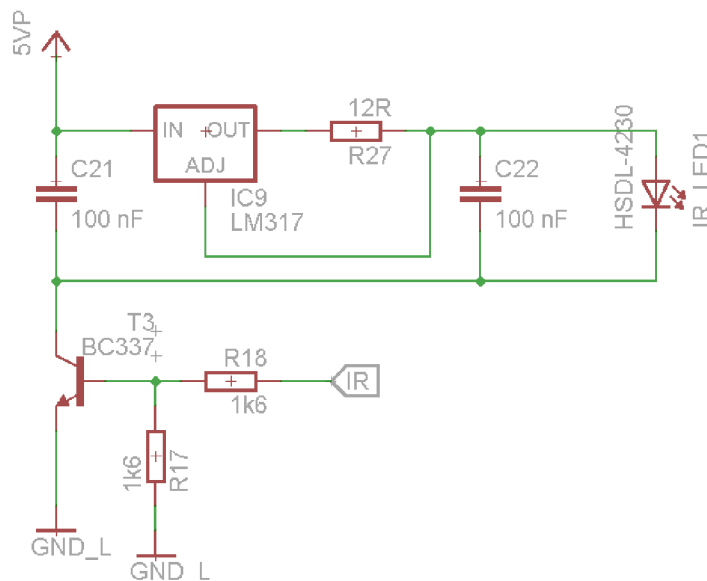
Celkové schéma obsahuje dva tyto převodníky proudů na napětí, pro každý fotodetektor jeden.

5.1.2 Zapojení zdroje záření

Volba zdroje záření je již částečně vyřešena. Jelikož zdroj musí být kompatibilní s fotodetektozem, je nutné, aby generoval záření v IR oblasti, nejlépe s vlnovou délkou 850 nm. Na té je použita fotodioda nejcitlivější. Dalším požadavkem je dostatečný výkon zdroje záření, kterým je možné prosvítit médium i u větších rozměrů potrubí. Z těchto důvodů byla zvolena IR LED dioda typu HSDL – 4230, která emituje záření o vlnové délce 875 nm s výkonem 150 mW/sr pro $I_{LED} = 100$ mA.

Aby byla zajištěna co nejlepší stabilita zdroje záření a LED dioda co nejméně ovlivňovala měřené hodnoty fotodetektorů, je pro její napájení použit zdroj proudu (Obr. 5.2). Ten tvoří běžný stabilizátor napětí LM317 v zapojení s rezistorem R_{27} , který se v tomto zapojení stává zdrojem konstantního proudu 104,2 mA podle vztahu (4). V_{REF} v tomto vztahu udává referenční napětí mezi piny IN a OUT a I_{ADJ} je proud tekoucí pinem ADJ. Stabilizátor je doplněn dvěma filtračními kondenzátory C_{21} a C_{22} .

$$I_{LED} = \frac{V_{REF}}{R_{27}} + I_{ADJ} = \frac{1,25}{12} + 50 \cdot 10^{-6} = 104,2 \text{ mA} \quad (4)$$



Obr. 5.2: Zapojení zdroje záření

Proud LED diodou je příliš velký, a není možné vyřešit spínání pouze změnou logické hodnoty na výstupním pinu MCU. Proto je do zapojení přidán běžný NPN tranzistor ve spínacím režimu se zesílením $h_{21} = 160$. Rezistor R_{18} slouží k nastavení proudu I_B tekoucího do báze tranzistoru tak, aby se dosáhlo plného otevření tranzistoru. Potřebný proud báze tranzistoru se spočítá podle vztahu (5). Rezistor R_{17} plní v tomto

zapojení pouze ochranou funkci. Pokud by byl výstup z mikroprocesoru z nějakého důvodu ve stavu vysoké impedance, R_{17} se postará o bezpečné uzavření tranzistoru. Jeho hodnota se většinou volí stejná, jako je hodnota R_{18} .

$$I_B = \frac{I_E}{h_{21}} = \frac{0,1042}{160} = 0,65 \text{ mA} \quad (5)$$

Tato hodnota proudu I_B je však mezní hodnotou pro plné otevření tranzistoru. V praxi se pro výpočet R_{18} volí 3-5 x větší hodnota I_B , ze které je následně podle vztahu (6) spočítána hodnota rezistoru.

$$R_{18} = \frac{U_{IN} - U_{BE}}{5 \cdot I_B} = \frac{5 - 0,7}{5 \cdot 0,65 \cdot 10^{-3}} = 1,323 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

Protože se volil pětinasobek proudu I_B použije se rezistor z běžně dostupné řady s nejbližší vyšší hodnotou, tedy 1,6 k Ω . Zkouška výpočtu je provedena podle vztahů (7) a (8), v nichž je uvažován i ztrátový proud tekoucí rezistorem R_{17} .

$$I_B^* = \frac{U_{IN} - U_{BE}}{R_{18}} - \frac{U_{BE}}{R_{17}} = \frac{5 - 0,7}{1,6 \cdot 10^3} - \frac{0,7}{1,6 \cdot 10^3} = 2,25 \text{ mA} \quad (7)$$

$$I_E^* = I_B^* \cdot h_{21} = 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = 360 \text{ mA} \quad (8)$$

Výsledná hodnota proudu I_E^* je větší než trojnásobek hodnoty proudu I_E , a proto se jedná o vhodnou volbu rezistorů a hodnoty již není nutné měnit.

5.2 Výstupy pro řízení periferií

Prvotní myšlenkou bylo, aby navržený snímač nebyl omezený pouze na řízení jednoho akčního členu. Některé automatizované výrobní procesy, kde by bylo možné tento snímač použít, vyžadují řízení více akčních členů současně na základě jednoho měření. To znamená, že zákaloměr schopný ovládat pouze jeden akční člen by nebyl do tohoto provozu vhodný. Zbytečně by tedy docházelo k snižování uplatnění tohoto snímače na trhu. Proto byl snímač navržen tak, že obsahuje dva digitální a dva analogové výstupy.

Po hlubším zkoumání však vyplynulo, že řízení akčních členů samotným zákaloměrem je nevhodné. Snímač by přímo ovlivňoval výrobní proces a jeho porucha by mohla vést na značné materiální i finanční ztráty podniku, což je pro výrobce snímače značné riziko. Proto je vhodnější výstupy použít pouze pro signalizaci nebo alarmy a řízení akčních členů přenechat na řídicím softwaru v PLC.

5.2.1 Analogové výstupy

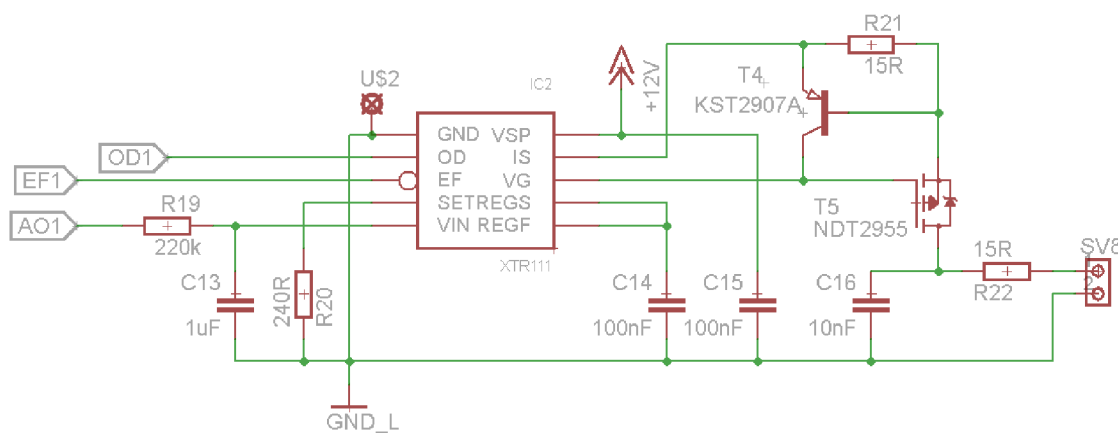
Analogové výstupy pracují na principu proudové smyčky v rozsahu 4 – 20 mA. Z MCU je analogový výstup získán pomocí pulzní šířkové modulace. PWM signál je

následně vyhlazen RC článkem tvořícím dolnofrekvenční propust'. Hodnoty rezistoru R_{19} a kondenzátoru C_{13} RC článku jsou zvoleny tak, aby výstupní analogový signál dosahoval minimálního zvlnění a zároveň nebyl přechodový děj příliš pomalý. Výpočet zvlnění odpovídá rovnici (9) a při hodnotách $R_{19} = 220 \text{ k}\Omega$, $C_{13} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ a frekvenci PWM 179,3 Hz vychází zvlnění výstupního signálu za RC článkem při střídě 1:1 na 0,64 %. Z rovnic je zřejmé, že zmenšení zvlnění lze dosáhnout zvětšením hodnot odporu a kondenzátoru. To však vede k dalšímu zvětšování časové konstanty τ a k zpomalování přechodového děje. Druhou možností, jak snížit zvlnění je zrychlením PWM, zde jsme limitováni možnostmi použitého procesoru a kmitočtem oscilátoru. Časovou konstantu τ lze spočítat pomocí vztahu (10).

$$r = 100 \cdot \left(1 - e^{-0,5 \cdot \left(\frac{1}{f_{PWM} \cdot R \cdot C} \right)} \right) \cdot \frac{\left(1 - e^{-0,5 \cdot \left(\frac{1}{f_{PWM} \cdot R \cdot C} \right)} \right)}{\left(1 - e^{-\left(\frac{1}{f_{PWM} \cdot R \cdot C} \right)} \right)} = 0,64 \% \quad (9)$$

$$\tau = R \cdot C = 220 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,22 \text{ s} \quad (10)$$

Analogové napětí z RC filtru je následně zpracováno integrovaným obvodem XTR 111, který spolu s externími součástkami tvoří U/I převodník na 4 – 20 mA proudové smyčky (Obr. 5.3). Samotné zapojení obvodu XTR 111 a použité hodnoty ostatních externích součástek odpovídá doporučení výrobce, které lze nalézt v dokumentaci tohoto integrovaného obvodu.

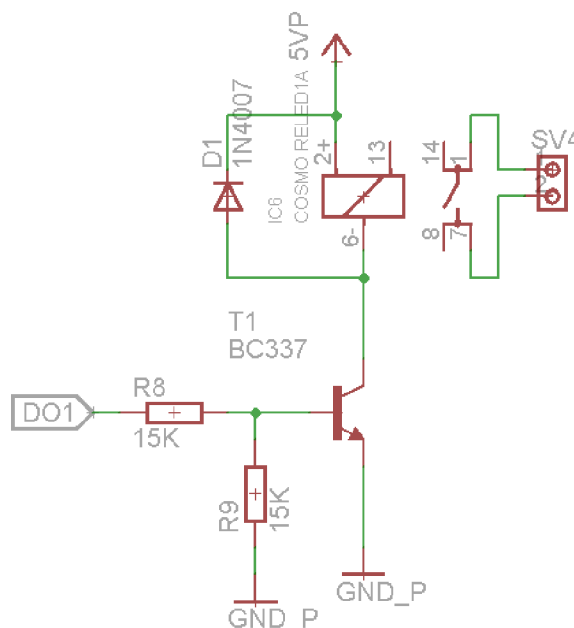


Obr. 5.3: Zapojení analogových výstupů

5.2.2 Digitální výstupy

Zapojení digitálních výstupů využívá stejně jako zdroj záření tranzistor zapojený ve spínacím režimu. Rozdílem je pouze to, že tranzistor nyní spíná jazýčkové relé (Obr. 5.4). Použité relé spíná stejnosměrné napětí až do 200 V a maximální zatížení kontaktu je 1 A. Rezistory R_8 a R_9 opět slouží k nastavení proudu bází tranzistoru zajišťující jeho úplné otevření a ochranu tranzistoru před poškozením. Pro jejich

výpočet jsou opět použity rovnice (5), (6), (7) a (8) s tím rozdílem, že nyní se proud I_E rovná proudu cívky relé, který je 10 mA. To sice není hodnota, která by musela nutně vést k poškození vývodu MCU, ale je nutné dbát i na maximální zatížení celého portu MCU a vybíjení cívky relé. Proto je řešení s použitím spínacího tranzistoru na místě. Dále je k relé paralelně připojena běžná usměrňovací dioda. Při sepnutém relé neplní tato dioda žádnou funkci, ale v okamžiku jeho rozepnutí slouží k postupnému vybíjení energie nahromaděné v cívce relé.



Obr. 5.4: Zapojení digitálních výstupů

5.3 Mikroprocesorová část

Při výběru vhodného mikroprocesoru (MCU) bylo hlavní zohlednit potřebu dvou portů pro sériovou linku, ISP port, dostatečný počet I/O linek, alespoň 2 PWM kanály, určitý minimální počet časovačů a také dostatečně velkou paměť programu a dat. Na základě těchto požadavků byla vybrána ATmega 128A.

5.3.1 Základní externí obvody pro ATmega 128A

Tento mikroprocesor má sice možnost pomocí fuse bitů (pojistek) nastavení interního oscilátoru, ale tato volba v našem případě není příliš vhodná. Předpokládá se časté používání sériových linek, a proto je vhodnější využít externího krystalu o kmitočtu 11,0592 MHz, díky kterému vychází výpočet hodnoty registru UBRR podle vztahu (11) celočíselně. Díky tomu vychází přesná komunikační rychlost (baudrate) odpovídající řadě standardních rychlostí (1200, 2400, 4800, 9600,...) a chyba komunikace po sériové lince tak nabývá 0 % chyby. Zapojení krystalu je na základě doporučení opatřeno dvojicí kondenzátorů o hodnotě 15 pF.

$$UBRR = \frac{f_{osc}}{BAUDRATE*16} - 1 \quad [-] \quad (11)$$

Druhou nezbytnou součástí je externí RESET, proto je MCU doplněn o mikrospínač s pull-up rezistorem, kterým lze MCU při neočekávaném chování jednoduše resetovat.

5.3.2 Programování a ladění MCU

Procesory řady AVR nabízejí více způsobů programování od ISP, přes JTAG rozhraní až k takzvanému my self programming. To využívá vybraného rozhraní a bootladeru uloženého v paměti programu. Po prvotním nahrání bootladeru tento program následně pracuje podobně, jako například BIOS ve Windows. Při chodu běžící aplikaci nijak neovlivňuje a kromě menšího prostoru v paměti se nijak neprojevuje. Pouze při resetu či připojení napájení se volá nejprve bootlader, který buď začne s přepisováním paměti novým programem, nebo se přistoupí k již dříve nahrané aplikaci.

Pro realizaci zákaloměru byl vybrán způsob programování pomocí ISP programátoru. Ten lze připojit do připraveného konektoru SV7 na DPS. Jedná se asi o nejjednodušší řešení, a kromě toho jsou náklady na pořízení ISP programátoru minimální.

5.4 Zdroj napájení snímače

Snímač zakalení lze napájet dvěma způsoby. Buď ze sítě 230 V_{AC} nebo stejnosměrným zdrojem napětí v rozsahu 8 – 12 V. Napájení vyšším stejnosměrným napětím je sice možné (do 24 V), ale toto rozhodnutí vede k nadměrnému zahřívání stabilizátoru napětí vlivem velkého ztrátového výkonu. Ze součtu největších odběrů vyplývá, že maximální proudové zatížení zdroje odpovídá přibližně 1,35 A (Tab. 5.1).

Tab. 5.1: Výčet největších oděrů proudu v zapojení

| Součástka [-] | Odběr proudu [mA] |
|----------------|-------------------|
| Displej | 450 |
| Mikroprocesor | 400 |
| Indikační LED | 150 |
| Nano SocketLAN | 150 |
| Relé | 100 |
| IR LED | 104 |
| Celkem | 1354 |

S přihlédnutím na zanedbání malých odběrů řady součástek se dá předpokládat, že výsledný maximální proud zatěžující zdroj napájení bude kolem 1,5 A. S přičtením určité rezervy byl vybrán 33 VA transformátor na 12 V. Další kritickou součástkou

zdroje je stabilizátor napětí na 5 V. Ten je zvolen tak, aby byl schopný do zařízení dodat až 2 A, ale vzniká na něm úbytek napětí, a vlivem ztrátového výkonu se tato součástka zahřívá. Z toho plyne, že ho je nutné opatřit hliníkovým chladičem, který zamezí jeho přehřátí. Použit je chladič s koeficientem oteplení $T_W = 4,1 \text{ K/W}$. Výsledné oteplení stabilizátoru lze spočítat podle vztahu (12), kde P_x je ztrátový výkon, ΔU představuje úbytek napětí na stabilizátoru a I_m je maximální odebíraný proud (hodnoty ve výpočtu odpovídají situaci, kdy je měřicí přístroj napájen ze sítě 230 V_{AC}).

$$T = P \cdot T_W = \Delta U \cdot I_m \cdot T_W = 7 \cdot 1,5 \cdot 4,1 = 43,05 \text{ K} \quad (12)$$

Maximální odběr proudu je tedy limitován stabilizátorem napětí na 2 A. Jako ochrana zdroje proti zkratu i nadměrnému odběru je použita trubičková 2 A pojistka. Zdroj dále obsahuje dvoucestný diodový usměrňovač a odpovídající kondenzátory pro vyhlazení a filtraci signálu. Zapojení zdroje napájení je na obrázku 5.5A, který je přiložen na konci dokumentu, jako příloha A.

Součástí zdroje je i stabilizátor napětí na 3,3 V pro napájení komunikačního modulu Nano SocketLAN.

O dostatečné vyhlazení napětí při maximálním odebíraném proudu 1,5 A se v zapojení zdroje stará kondenzátor C_1 . Minimální kapacita kondenzátoru C_1 je spočítána podle vztahu (13), kde I_m je maximální odebíraný proud, f je kmitočet síťového napětí, U_{max} a U_{min} jsou maximální a minimální hodnoty výstupního napětí. Ta jsou určena výstupním napětím transformátoru a minimální hodnotou vstupního napětí stabilizátoru napětí na 5 V.

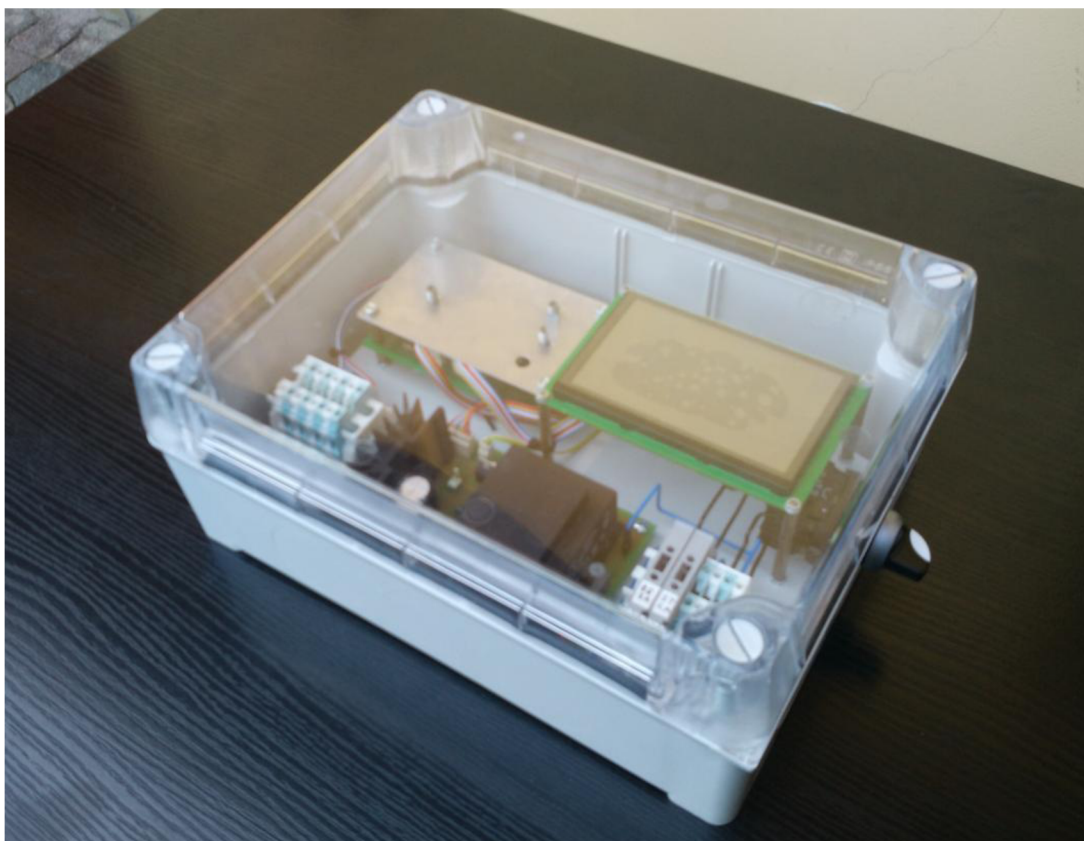
$$C_1 = \frac{I_m}{2 \cdot f \cdot (U_{max} - U_{min})} = \frac{1,5}{2 \cdot 50 \cdot (12 - 8)} = 3,75 \text{ mF} \quad (13)$$

S přihlédnutím na určitou rezervu a skutečnost, že zdroj je navržen na maximální odběr 2 A byl zvolen kondenzátor s kapacitou 4,7 mF.

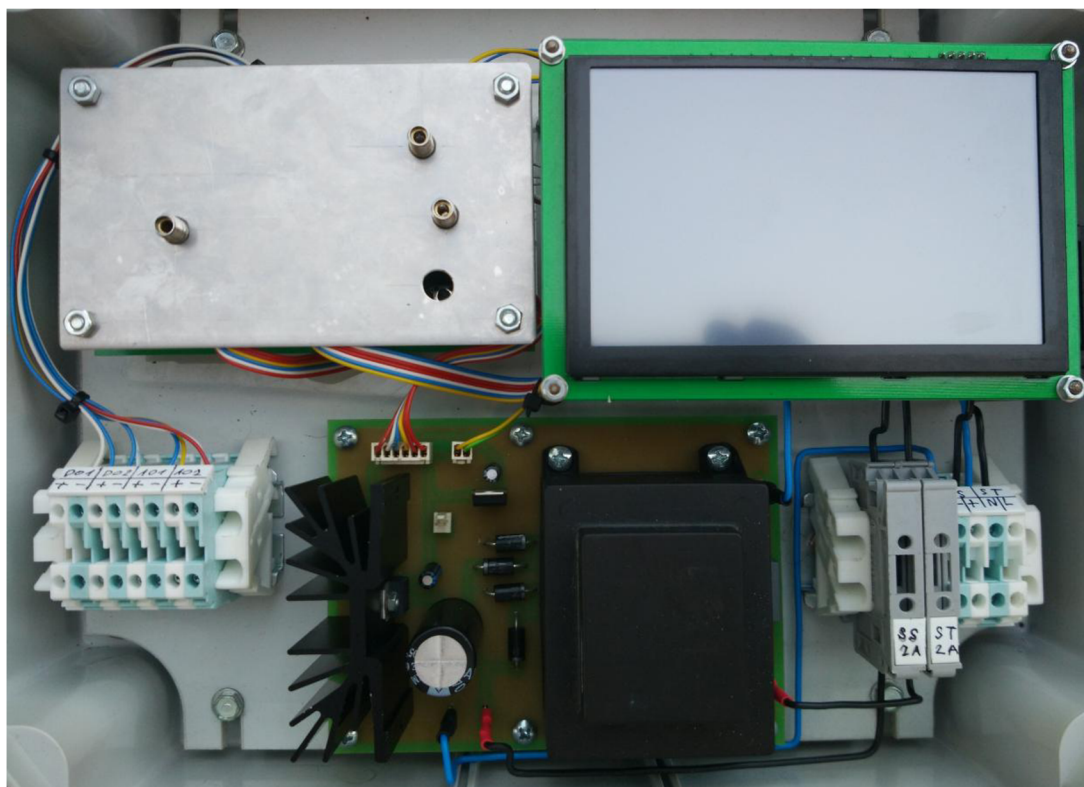
5.5 Mechanická konstrukce zákaloměru

Na základě možností využití zákaloměru a problémů plynoucích z místa instalace je nutné, aby bylo zařízení dostatečně imunní vůči vodě, prachu i odolné proti mechanickému poškození. Proto je zařízení umístěno do elektroinstalační krabice s krytím IP – 55 a oddělitelným průhledným víkem viz obrázek 5.6.

Po odstranění víka jsou v dolní části krabice instalovány DIN lišty, na kterých jsou dobře přístupné svorkovnice pro připojení výstupů zákaloměru a napájecího napětí (Obr. 5.7). V blízkosti svorkovnic napájecího napětí jsou i patice pro uložení trubičkových pojistek. Pro přehlednost jsou všechny svorkovnice jasně popsány, aby nedošlo k jejich záměně a porušení přístroje. Součástí krabice je i třípolohový hlavní vypínač, který je připevněn k pravé straně přístroje.



Obr. 5.6: Uložení zákaloměru



Obr. 5.7: Pohled na zákaloměr po odstranění ochranného víka

6 Prostředky ovládání a vizualizace

Pro ovládání respektive změnu nastavení zákaloměru a vizualizaci slouží jednak dotykový displej připojený přes první sériovou linku, ale také je pomocí druhé sériové linky možné zákaloměr ovládat z řídicího podnikového softwaru uvnitř vzdáleného PLC či PC prostřednictvím průmyslového Ethernetu.

6.1 Dotykový grafický displej

Na trhu je nespočetné množství displejů různých velikostí a provedení. Důležité však bylo, aby měl displej vlastní řadič, byl napájen pěti volty, měl vlastní paměť, dotykovou obrazovku a nespornou výhodou by byl již implementovaný komunikační protokol.

Rozhodnutí padlo na dotykový displej od společnosti MIDAS, který všechny tyto parametry splňuje a obsahuje 4 kB paměť FLASH, na které může být předpřipravena grafika o rozlišení 800x480 pixelů. MCU na řídicí desce se tedy nestará o vykreslování jednotlivých pixelů na displeji, ale pouze posílá požadavky na přepínání obrazů na displeji nebo na vykreslení jednoduchých geometrických tvarů a textu. Díky tomu není nutné použít extrémně výkonný procesor, a vyhovuje i ATmega pracující v řádech megahertzů. Součástí displeje je i dotyková plocha. To znamená, že komunikace probíhá i opačným směrem, kdy se přenáší souřadnice místa dotyku obsluhy zpět k MCU.

6.1.1 Zapojení displeje

Zapojení displeje je velice jednoduché a vyžaduje pouze propojení s MCU pomocí základních vodičů sériové linky RXD, TXD, napájení, zem a jednoho vodiče navíc pro BUSY flag. Ten zde plní funkci řízení přenosu (flow control). Je tedy zřejmé, že ostatní vodiče sériové linky uvedené ve standardu, sloužící pro řízení přenosu nejsou nutné. Je-li BUSY flag nastaven (logická jednička), displej signalizuje směrem k MCU, že stále zpracovává předchozí přijatý příkaz, nebo je sériová linka právě používána a nový příkaz nebude akceptován. V opačném případě je komunikační linka volná a displej je připraven přijmout a zpracovat nový příkaz.

6.1.2 Komunikační protokol displeje

Komunikace MCU s displejem probíhá pomocí příkazů v podobě krátkých znakových řetězců. Komunikační protokol displeje obsahuje celou řadu příkazů. Jako příklad je uveden příkaz pro zobrazení požadovaného textu na displeji.

```
STR X Y C text\n
```

Zkratka STR představuje klíčové slovo příkazu, X, Y a C udávají souřadnice a barvu textu a posledním parametrem je vlastní text. Nejdůležitější částí příkazu je ukončovací znak $\backslash n$, kterým se dává displeji najevo, že příkaz je kompletní. Bez poctivého odesílání ukončovacích znaků je možné, že displej zamrzne a bude ho nutné restartovat.

Komunikace opačným směrem, tedy z displeje směrem k MCU spočívá pouze v jednom jediném příkazu, který obsahuje souřadnice dotyku na displej a má tvar:

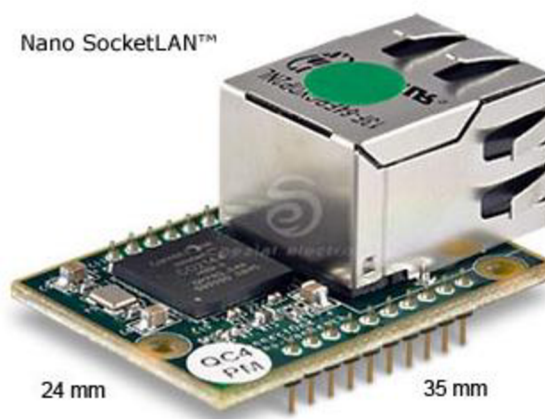
TXY X Y\ n .

Počátek souřadnicového systému je v levém horním rohu. Což znamená, že poslední pixel v pravém dolním rohu má hodnotu: $[x, y] = [800, 480]$.

Zbytek příkazů je velice podobný a jejich souhrn i další informace o displeji jsou uvedeny v dokumentaci displeje [11].

6.2 Komunikační modul Nano SocketLAN

Aby bylo možné uskutečnit komunikaci se softwarem na vyšší úrovni podnikové hierarchie, byl do zařízení implementován převodník UART/Ethernet Nano SocketLAN (dále pouze NSL) viz obrázek 6.1.



Obr. 6.1: Nano SocketLAN

NSL představuje most, kterým se propojují zařízení komunikující po sériovém rozhraní s 10/100 Mbit Ethernetem. Tím lze zpřístupnit i malé aplikace běžící na méně výkonných mikrokontrolérech ze sítě. Modul podporuje velké množství internetových i bezpečnostních protokolů, a proto disponuje velkou škálou možností na jeho použití [12].

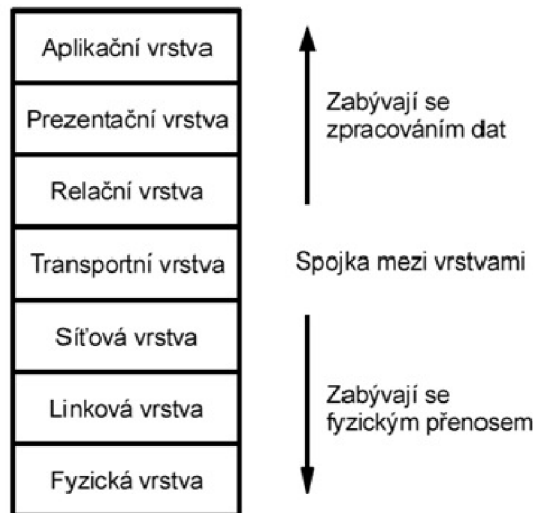
Základní vlastnosti a možnosti použití [12]

- Komunikace prostřednictvím AT+i příkazů
- Umožňuje současně otevření až deseti TCP/UDP socketů

- Umožňuje dva současně otevřené naslouchací sockety
- Nabízí dva webové servery
- Podporuje SMTP a POP3 klienty
- Podporuje FTP a TELNET klienty
- Obsahuje SerialNET mód a mnoho dalších možností

6.2.1 Sít'ová komunikace

Komunikace probíhá na základě referenčního modelu ISO/OSI, což je zkratkou slovního spojení International Standards Organization / Open System Interconnection. ISO/OSI model slouží, jako názorný příklad řešení komunikace v počítačové síti a skládá se ze sedmi vrstev (Obr. 6.2). Hlavním úkolem každé vrstvy je usnadnit práci sousední nadřazené vrstvě a nezatěžovat ji detaily služby, kterou vykonává [13] [14].



Obr. 6.2: Referenční model ISO/OSI [15]

Modul NSL zprostředkovává všechny vrstvy referenčního modelu ISO/OSI, kromě vrstvy aplikační. Tu zajišťuje software uvnitř MCU na řídicí desce zákaloměrů. Jedná se o aplikační protokol, který definuje příkazy a odpovídající odpovědi síťové komunikace. Ten je nadefinován v tabulce 7.1B, která je přiložena na konci dokumentu, jako příloha B. Jelikož modul nabízí dva transportní protokoly (TCP a UDP), je nutné provést krátkou úvahu o tom, který z nich použít. Také je nutné se zamyslet, zda by měl zákaloměr v síti figurovat, jako server či klient.

6.2.1.1 Volba transportního protokolu

Při rozhodování, jaký transportní protokol použít, je asi nejúčinnější zaměřit se na výhody a nevýhody každého z nich. Oba transportní protokoly využívají síťový IP protokol a identifikaci aplikace určuje číslo portu. Jejich hlavním rozdílem je však to, že

UDP na rozdíl od TCP nenavazuje spojení, z čehož plynou jisté výhody i nevýhody [16].

(Ne)výhody TCP [16]

- Snadná detekce nedoručení dat
- Zajištěna správnost dat
- Garance správnosti pořadí přijímaných dat
- Velké zatížení sítě – příliš mnoho informací, velká hlavička, potvrzování

(Ne)výhody UDP [16]

- Malé zatížení sítě – malá hlavička, neposílá se potvrzování
- Při přijímání lze rozlišit jednotlivé datagramy
- Naprosto nezabezpečený přenos dat - data se mohou ztratit, poškodit duplikovat nebo se předbíhat

Jelikož nás zatížení sítě tolik netrápí, ale oproti tomu správnost dat je velice důležitá, je vhodnější volbou transportní protokol TCP.

6.2.1.2 Funkce zákaloměru – server/klient

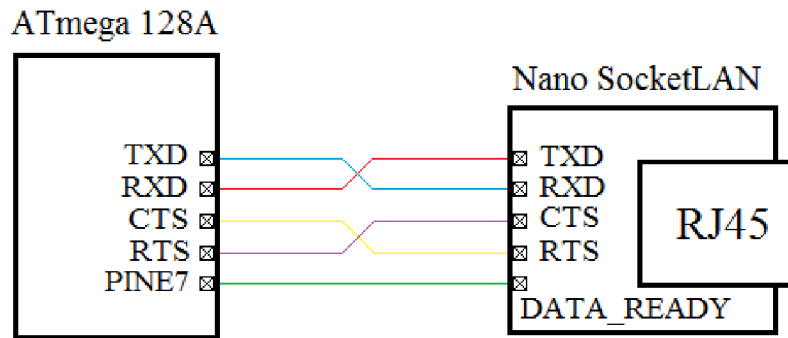
Komunikace server/klient je využívána většinou síťových aplikací a je aplikována i do realizovaného zákaloměru. Klient v síti plní funkci zdroje dotazů. Tyto dotazy jsou posílány na odpovídající server, který je vyhodnotí a jakmile je to možné, reaguje a posílá odpověď zpět ke klientovi, kde dotaz vznikl. Server sám o sobě nikdy nenavazuje spojení, pouze čeká, až tak učiní klient.

Zákaloměr by mohl plnit funkci jak serveru, tak klienta, ale zákaloměr figurující v síti jako server se zdá být vhodnější volbou. MCU se pomocí AT+i příkazů odeslaných na NSL postará o otevření naslouchacího TCP socketu a následně jen čeká na připojení klienta. Po úspěšném navázání spojení mezi serverem a klientem je server připraven na příjem požadavků od klienta, na které adekvátně odpovídá. Klient tedy může provést změnu nastavení měření a získávat hodnoty z měření s libovolnou periodou, která je omezená pouze rychlostí přenosu dat a zaneprázdněním komunikační sítě.

6.2.2 Zapojení Nano SocketLAN

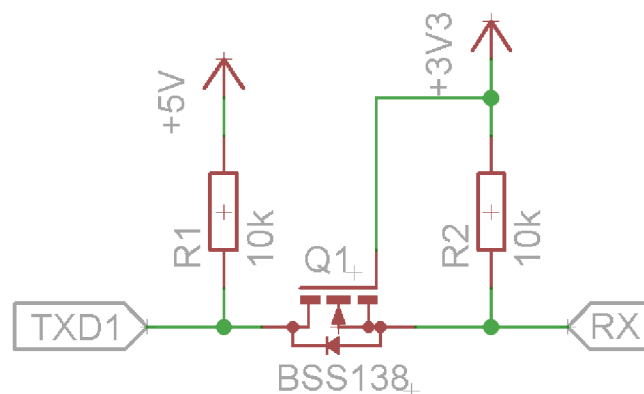
Zapojení modulu nabízí hned několik možností (USB, ISP nebo UART). Jelikož je ISP port MCU již používán pro programování MCU, a druhá sériová linka je zatím volná je použita komunikace pomocí sériové linky. Modul využívá i funkce řízení přenosu (flow control), proto nestačí pro komunikaci pouze vodiče TXD a RXD, ale je

využíváno i vodičů CTS (Clear To Send) a RTS (Request To Send). Oba páry vodičů, pro přenos i pro řízení přenosu je nutné se stejnojmennými vodiči v MCU překřížit. Také je vhodné využít jeden vodič navíc pro vývod DATA_READY, který nese informaci o tom, že NSL přijal data ze sítě, která je nutné vyzvednout z TCP bufferu. Ukázka propojení MCU s NSL je na obrázku 6.3.



Obr. 6.3: Propojení komunikačního modulu Nano SocketLAN s MCU

Jedinou nevýhodou v zapojení modulu je, že pracuje s napětím 3,3 V a není tolerantní vůči 5 V logice. Z toho důvodu jsou všechny signálové spoje opatřeny unipolárním tranzistorem a dvěma pull-up rezistory (Obr. 6.4), které slouží pro převod signálů mezi 5 V a 3,3 V logikou.



Obr. 6.4: Převod mezi 5 V a 3,3 V logikou

Princip je docela jednoduchý. Pokud ani jedna ze stran nic neposílá, je napětí mezi piny Source a Gate unipolárního tranzistoru takřka nulové. To znamená, že je tranzistor uzavřen a pull-up rezistory zajistí, logickou jedničku na obou stranách komunikace. Pokud začne posílat data NSL (3,3 V logika), dojde posláním start bitu (logické nuly) k rozdílu napětí na pinech Source a Gate, čímž se tranzistor otevře a logická nula se objeví i na straně MCU. Podobně to funguje i v případě komunikace opačným směrem. Zde dioda mezi piny Source a Drain způsobí zvýšení napětí mezi piny Source a Gate, čímž opět dojde k otevření tranzistoru [10].

7 Řídící software zákaloměru

Software je napsán ve vývojovém prostředí Atmel Studio 6.2 a pomocí ISP programátoru a programu eXtreme Burner – AVR nahrán do MCU.

Program se skládá ze dvou základních částí (funkcí).

- Konečný stavový automat měření a ovládání z displeje
- Konečný stavový automat komunikace

Tyto funkce jsou mezi sebou úzce svázány tak, aby příkazy zadané z displeje a příkazy přijaté z PLC či řídicího počítače pomocí NSL vedly na stejné chování. Stav viditelný na displeji tedy musí odpovídat datům uvnitř odpovědi poslané zpět k zařízení, které zahájilo komunikaci. Program dále využívá šesti různých zdrojů přerušení.

7.1 Konečný stavový automat pro měření a ovládání z displeje

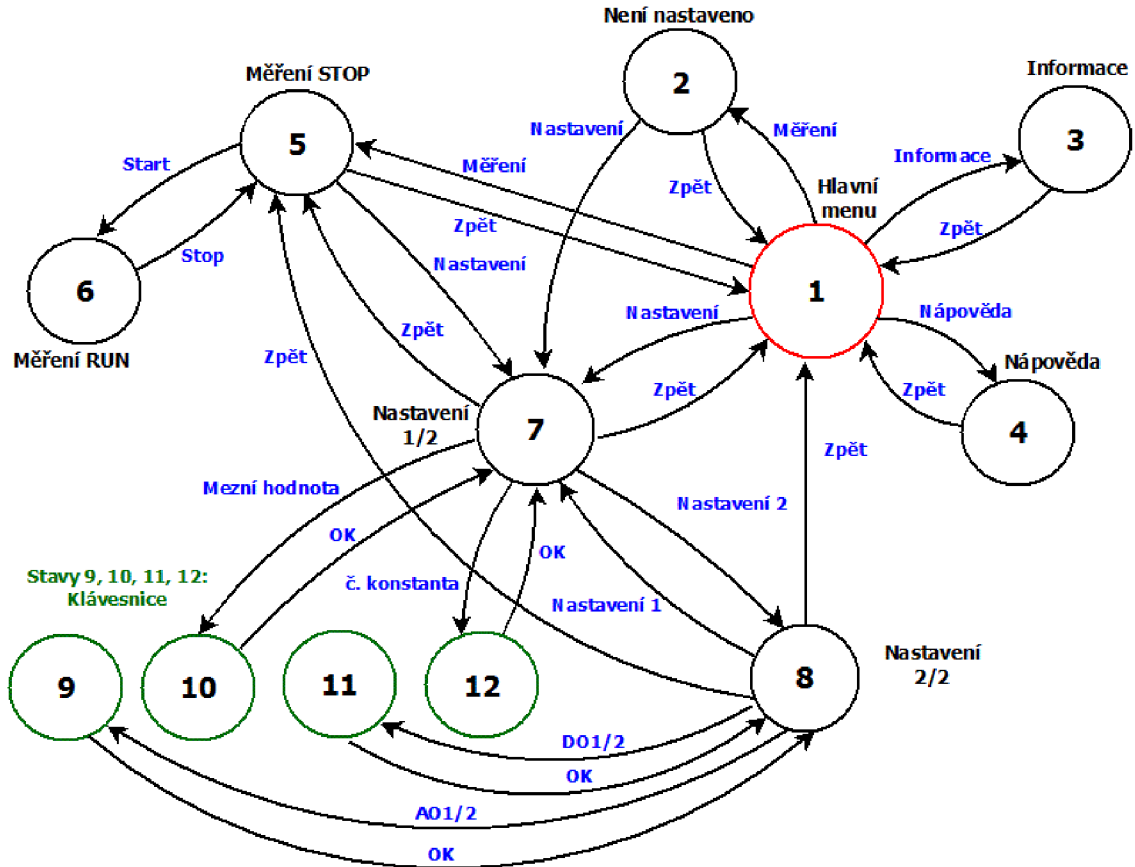
Tento stavový automat má celkem čtrnáct stavů, mezi kterými se přechází v závislosti na požadavku obsluhy (Obr. 7.1). Každý ze stavů představuje jedno pracovní okno, na kterém jsou umístěny aktivní prvky. Na displeji je možné narazit celkem na tři různé aktivní prvky, kterými jsou tlačítka, bool pole a textová pole.

- Tlačítka slouží ke změně stavu. Kliknutím na některé z tlačítek dojde k přesunu ve stavovém diagramu a na displeji se objeví odpovídající nové okno s vlastními aktivními prvky.
- Aktivní bool pole se nacházejí pouze ve stavech NASTAVENÍ 1 nebo 2 a slouží k aktivaci/deaktivaci požadovaného výstupu, výběru metody měření či rozsahu měření.
- Aktivní textová pole slouží k dočasné změně stavu na jednu ze čtyř klávesnic. Dočasné proto, že ze všech klávesnicových stavů se lze vrátit pouze k původnímu stavu, do žádného jiného stavu z klávesnic přistoupit nelze. Tato aktivní textová pole se nacházejí opět pouze ve stavech NASTAVENÍ 1 nebo 2 a slouží k nastavení mezní hodnoty zakalení, časové konstanty, rozsahu měření a počátečního stavu výstupů.

Textová i bool pole se nacházejí i v jiných stavech, nicméně nepředstavují aktivní prvky. Kliknutím na ně se docílí stejného chování, jako když obsluha klikne na displeji mimo aktivní prvky okna. Stav zůstává stejný, pouze dojde k obnovení okna na displeji, kterým se smaže stopa po kliku. Konečný stavový automat měření a ovládání z displeje představuje funkce *automat*. Ta nemá žádné vstupní ani výstupní parametry, ale pracuje s globálními proměnnými a její hlavička vypadá takto:

```
void automat(void);
```

Základem funkce automat je struktura if, if else, else, kde vždy jedna podmínka vyhovuje jednomu stavu automatu.



Obr 7.1: Konečný stavový automat pro měření a ovládání z displeje

7.1.1 Popis a možnosti jednotlivých stavů (oken)

Stav 1 – Hlavní menu

Jedná se o úvodní okno sloužící k představení práce, a zároveň jde o hlavní menu a tudíž i základní křižovatku stavového automatu. Obsahuje pět tlačítek pro přístup k měření, nastavení, nápovědě, základním informacím a restart viz obrázek 7.2.



Obr. 7.2: Stav 1 – Hlavní menu

Stav 2 – Není nastaveno

Jedná se pouze o ochranný stav, který nepustí uživatele k měření, dokud není nastaven způsob měření a časová konstanta. Z tohoto stavu je možné přejít do nastavení, nebo se vrátit zpět do hlavního menu.

Stav 3 – Informace

Stav, který slouží k základnímu představení zákaloměru. Obsahuje popis základních parametrů snímače, číslo verze softwaru a také kontaktní údaje. Stav Informace je konečný a nenabízí žádné možnosti, kromě cesty zpět do hlavního menu.

Stav 4 – Náповěda

Okno nápovědy je podobné jako okno informace s tím rozdílem, že je zde připraveno kromě tlačítka zpět i tlačítko pro listování nápovědou. Náповěda slouží k stručnému vysvětlení principu měření a obsahuje návod, jak se zařízením pracovat. Náповěda je dostupná pouze z hlavního menu a tlačítkem zpět se tedy stejně, jako u stavu 3 lze vrátit pouze do hlavního menu.

Stav 5 – Měření STOP

Jedná se o jeden ze dvou stavů měření. Stav 5 generuje na displeji okno, na kterém je shrnuto nastavení měření, avšak pouze jako informace pro obsluhu. Z tohoto okna již nelze nastavení měnit, ale obsluze nic nebrání využít tlačítko nastavení, které zajistí změnu stavu na stav 7 (Nastavení 1/2). Stav Měření STOP slouží pro kontrolu nastavení, ale také je to stav, do kterého konečný stavový automat přechází, pokud je požadováno zastavení probíhajícího měření. Kromě tlačítka nastavení jsou zde i tlačítka start a zpět (Obr. 7.3).

Tlačítko zpět plní opět stejnou funkci, ale tlačítko START je rozhodně zajímavější. Kliknutím na tlačítko START, se kromě změny okna na displeji aktivuje měření. To znamená, že dojde k negaci pinu 7 na portu A, na který je připojen zdroj záření. Kromě

toho dojde i k nastavení požadovaných hodnot výstupů, povolení přerušení od časovačů 0 a 2, a nastavení řídicích pinů obvodů XTR 111, které realizují převod napětí na proud 4 – 20 mA.

Obr. 7.3: Stav 5 – Měření STOP

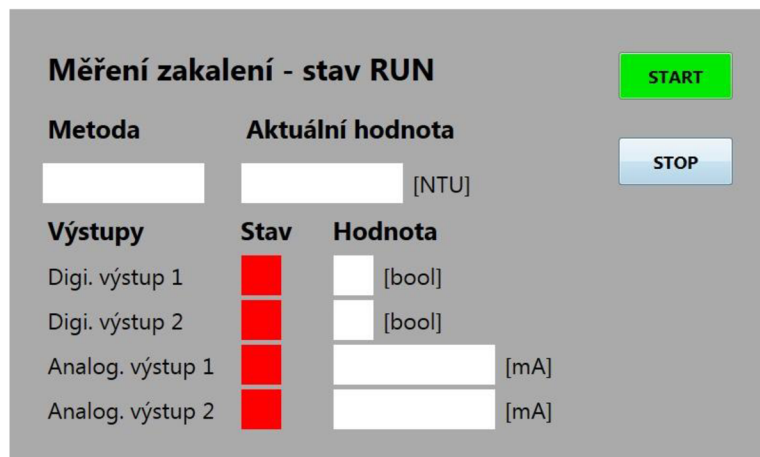
Stav 6 – Měření RUN

V tomto stavu jsou možnosti minimální. V zobrazovaném okně (Obr. 7.4) je pouze jeden aktivní prvek, kterým je tlačítko STOP. Tím lze zastavit měření, což vede na zhasnutí zdroje záření, a také k vynulování posuvného registru DATA, který obsahuje poslední naměřené hodnoty.

Okno stavu měření RUN je jediné, které je automaticky aktualizováno. Při každé aktualizaci (jednou za sekundu) je na displeji zobrazena aktuální hodnota měřeného zakalení a hodnoty výstupů.

Naměřená hodnota zakalení je úzce spjata s časovou konstantou měření, kterou lze nastavit ve stavu 7 – Nastavení 1/2. Nastavením časové konstanty se určuje velikost registru DATA a tedy i počet vzorků, ze kterých je výsledná naměřená hodnota průměrována. Perioda měření je nastavena přerušením od přetečení čítače/časovače 3 na 1 s. Jelikož jedna naměřená hodnota zakalení zabere v paměti 16 b a vyhrazený prostor pro registr DATA je 0,6 kB, odpovídá maximální časová konstanta hodnotě 300 s. Posuvný registr je typu FIFO (first in first out). To znamená, že pokud dojde k naplnění registru, je první vyřazenou hodnotou nejstarší hodnota v registru. Pro lepší nastínění problému je uveden příklad nastavení měření.

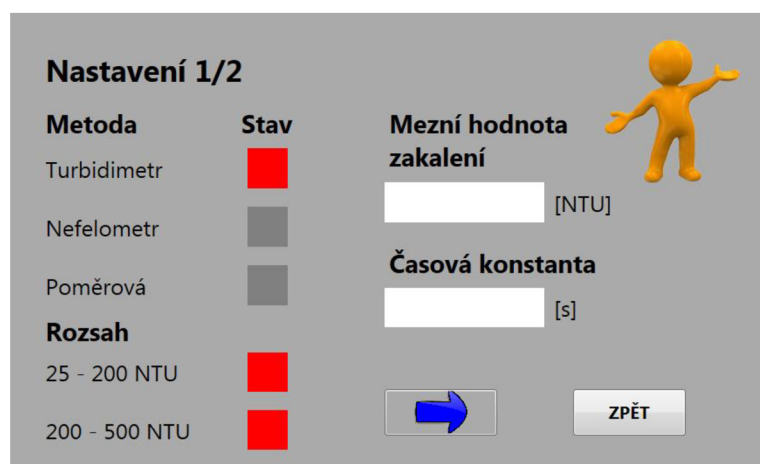
Příklad: Časová konstanta je nastavena na 20 s. To znamená, že do posuvného registru se vejde maximálně 20 hodnot a výsledná naměřená hodnota je váženým průměrem z 20 ti posledních měření. Je tedy zřejmé, že každá naměřená hodnota se bude ve výsledné hodnotě zakalení projevovat 20 s a poté bude vyřazena. Dokud není posuvný registr naplněn, je vážený průměr počítán pouze z tolika naměřených hodnot, kolik jich registr obsahuje.



Obr. 7.4: Stav 6 – Měření RUN

Stavy 7 a 8 – Nastavení

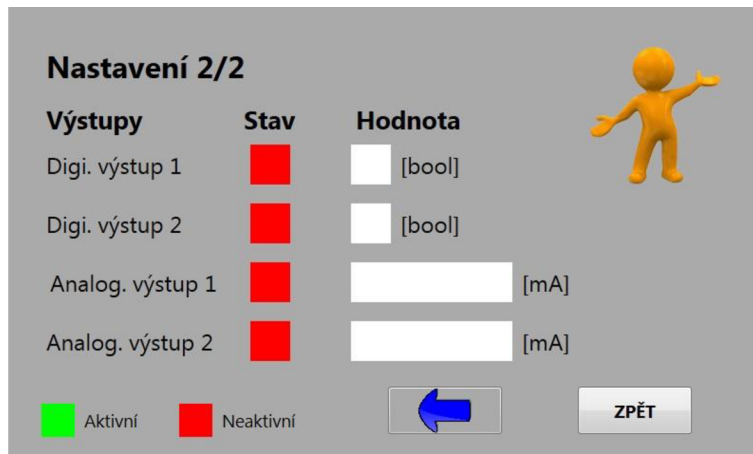
Nastavení je rozděleno do dvou oken. V prvním okně (Obr. 7.5) je možné nastavit metodu měření, mezní hodnotu zakalení, rozsah měření a časovou konstantu zmiňovanou ve stavu 6. Z důvodů, jež jsou popsány v kapitole 8, zákaloměr nabízí pouze jednu metodu měření. Ta využívá měření pomocí turbidimetru. Výběr metody lze provést kliknutím do aktivního bool pole, které svým podbarvením signalizuje obsluze, zda je metoda aktivní či nikoli. Program je ošetřen tak, aby v každé situaci byla vybrána pouze jedna z metod měření zakalení. Pomocí dalších dvou aktivních bool polí je možné vybrat rozsah měření. Dále jsou součástí stavu Nastavení 1/2 aktivní textová pole pro zadání mezní hodnoty a časové konstanty. Kliknutím do těchto polí se stavový automat přesune do stavů 10 nebo 12, které představují numerické klávesnice pro zadání hodnot.



Obr. 7.5: Stav 7 – Nastavení 1/2

Druhé okno nastavení (Obr. 7.6) slouží pro vybrání požadovaných výstupů a nastavení jejich počátečních hodnot. Na výběr jsou dva digitální a dva analogové výstupy. Princip aktivace či deaktivace jednotlivých výstupů je stejný, jako u výběru

metody či rozsahu měření. Opět jsou zde aktivní bool pole, která svojí barvou signalizují stav výstupu (aktivní/neaktivní). Jednotlivým výstupům odpovídají aktivní textová pole, která vedou na stavy 9 nebo 11. Ty představují numerické klávesnice pro zadání počátečních hodnot výstupů.



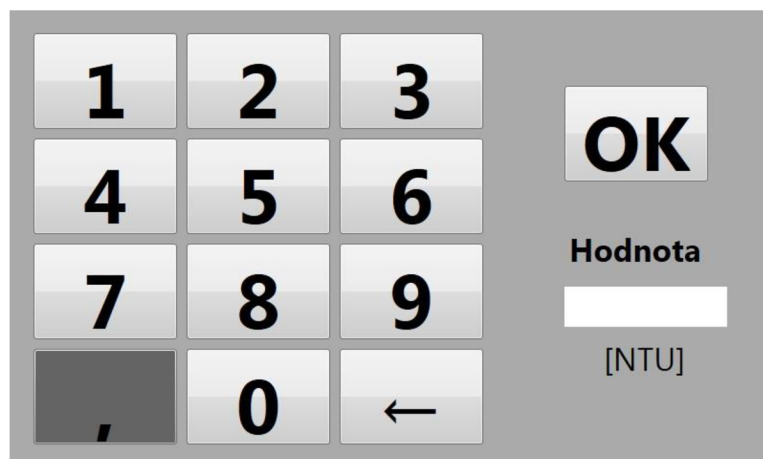
Obr. 7.6: Stav 8 – Nastavení 2/2

Obě z oken nabízejí i tlačítko zpět, které zde má více možností. Záleží na tom, z jakého stavu bylo nastavení zavoláno. Pokud se do nastavení přistupuje ze stavů 1 (Hlavní menu) nebo 2 (Není nastaveno), tlačítkem zpět se automat vrátí do hlavního menu. Je-li nastavení voláno ze stavu Měření STOP, automat se nevrací do stavu 1, ale do stavu Měření STOP.

Stavy 9,10,11 a 12 – Klávesnice (Obr. 7.7)

Všechny tyto stavy a odpovídající okna představují numerické klávesnice pro zadání mezní hodnoty (stav 10), časové konstanty (stav 12), počáteční hodnoty digitálních a analogových výstupů (stavy 9 a 11). Zásadním rozdílem jednotlivých klávesnic jsou zpřístupněná tlačítka a jednotka u textového pole. Je zřejmé, že u digitálních výstupů jsou potřeba pouze číslice 0 a 1. Proto jsou ostatní číslice i desetinná čárka nepřístupné. Hodnota meze a časové konstanty jsou celočíselné, a proto je zde neaktivní pouze desetinná čárka. Poslední klávesnice analogových výstupů má aktivní i desetinnou čárku, ale zadaná hodnota je po potvrzení zaokrouhlena na jedno desetinné místo.

Každá z klávesnic obsahuje i tlačítko BACK SPACE pro opravy chyb a potvrzovací tlačítko OK, kterým se provede uložení zadané hodnoty a automat se vrátí k jednomu ze stavů nastavení.



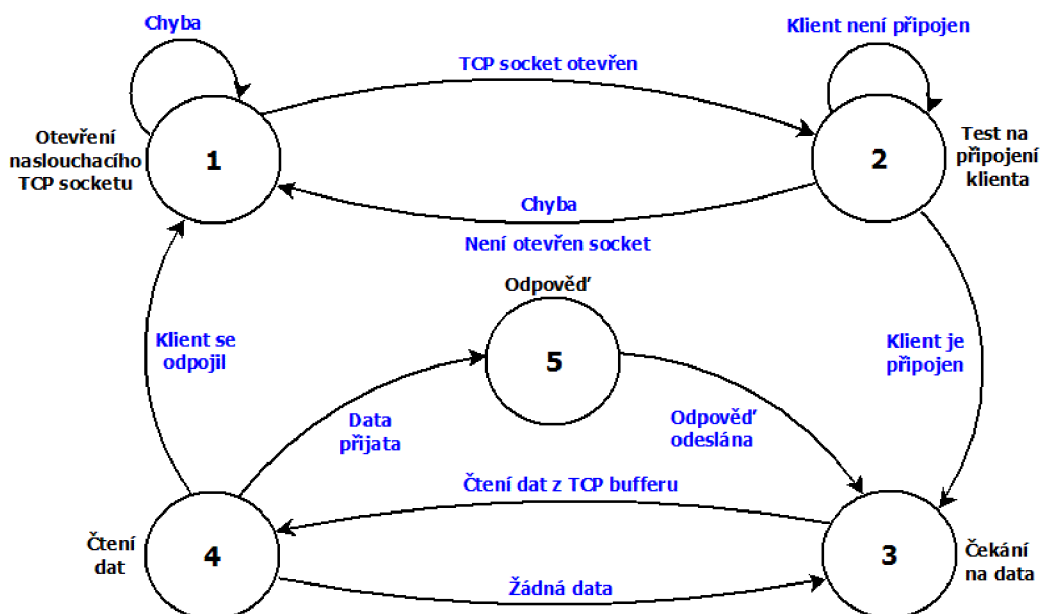
Obr. 7.7: Stav 10 – Klávesnice mezní hodnoty

7.2 Konečný stavový automat síťové komunikace

Stavový automat komunikace po Ethernetové síti má pouze pět stavů (Obr. 7.8). Stejně jako v předchozím případě, tak i tento automat je uvnitř jedné funkce, která nepřijímá ani nepředává žádné parametry. Její hlavička vypadá takto:

```
void automatEthernet(void);
```

Automat síťové komunikace lze rozdělit do dvou částí. V první části dochází k navazování spojení mezi klientem a serverem a v druhé části probíhá komunikace prostřednictvím příkazů z aplikačního protokolu. V jednotlivých stavech automatu se vyhodnocují zprávy, které směrem k MCU odesílá NSL. Podle přijatých zpráv automat reaguje a přechází mezi stavy.



Obr. 7.8: Konečný stavový automat síťové komunikace

Stav 1 – Otevření naslouchacího TCP socketu

Pro navázání komunikace server/klient je nutné, aby server otevřel naslouchací socket. NSL obsahuje celkem dva tyto sockety označeny čísly 010 a 011. Před otevřením jednoho z nich je nejprve nutné oba uzavřít. Tím se předejde možným chybovým stavům. Pro uzavření naslouchacího socketu 010 slouží příkaz *"AT+iSCLS:010\r\n"*. Pokud není uzavření socketů úspěšné, automat v tomto stavu setrvává.

Po úspěšném uzavření obou socketů je možné jeden z nich bezpečně otevřít pomocí příkazu *"AT+iLTCP:20100,1\r\n"*. Při otevírání TCP socketu je nutné zvolit port a množství klientů, které se mohou k serveru připojit. Je žádoucí, aby do měření zasahovalo pouze jedno zařízení, proto je povoleno připojení pouze jednoho klienta. Pro komunikaci byl vybrán jeden z neobsazených portů, kterým je port 20100.

Po odeslání žádosti na otevření TCP socketu se čeká na odpověď z NSL, ve které je buď číslo úspěšně otevřeného socketu, nebo kód chyby. Při úspěchu přechází automat do stavu 2. V opačném případě se tento stav opakuje.

Stav 2 – Test na připojení klienta

NSL nemá žádný externí signál, který by informoval o připojení klienta, a proto je řešení softwarové. Pomocí příkazu *"AT+iLSST:010\r\n"* se lze modulu zeptat, zda je nějaký klient připojen. Ve stavu 2 se tedy MCU tímto příkazem každou sekundu ptá, zda klient je nebo není připojen. Odpověď na test připojení klienta může mít tři různé podoby. Pokud není otevřen naslouchací socket, odpovědí je chybové hlášení a automat se vrací zpět do stavu 1. Není-li připojen žádný klient, stav se nemění a pokračuje se v pravidelném odesílání dotazů na připojení klienta. Poslední a žádoucí odpovědí od NSL je, že došlo k úspěšnému navázání spojení mezi klientem a serverem. Součástí odpovědi je i číslo aktivního spojení. V tomto případě dojde ke změně stavu a automat přechází do stavu 3.

Stav 3 – Čekání na data

Na rozdíl od předchozího případu má NSL signálový vodič označený, jako DATA_READY. Ten signalizuje stav přijímacího TCP bufferu. Přijme-li NSL nějaká data od připojeného klienta, uloží se do TCP bufferu a tím dojde k nastavení pinu DATA_READY. Tento vývod z NSL je připojen do MCU k pinu externího přerušení 0. Přijatá data jsou tedy ihned vyzvednuta z TCP bufferu pomocí příkazu *"AT+iSRCV:000\r\n"* (číslo na konci příkazu je označení aktivního spojení). Odesláním tohoto příkazu automat přechází do stavu 4.

Součástí stavu 3 je i ochrana proti odpojení klienta. Odpojí-li se klient, MCU to nikdy nezjistí, protože neustále čeká na vznik externího přerušení. Proto je po deseti sekundách, kdy nepřijdou žádná data vynucen přechod do následujícího stavu odesláním stejného příkazu na čtení dat *"AT+iSRCV:000\r\n"*.

Stav 4 – Čtení dat

Po odeslání příkazu na čtení dat je v tomto stavu vyhodnocována odpověď z NSL. Ta může mít tři různé podoby. Chybové hlášení značí, že k serveru již není připojen klient. Proto je nutné uzavřít aktivní socket a pokusit se o navázání nového spojení. To je zajištěno přechodem do počátečního stavu 1. Pokud je připojen klient a odpověď je prázdná, žádná data nebyla přijata a jedná se pouze o kontrolu, zda je klient k serveru stále připojen. Následkem toho se automat vrací zpět ke stavu 3, kde čeká na nová data. Pokud odpověď obsahuje nějaká data, přistoupí se k poslednímu stavu automatu.

Stav 5 – Odpověď

Tento stav slouží k vyhodnocení a odpovědi na přijatá data. Přijatý požadavek od klienta je vyhodnocen a pomocí příkazu "AT+iSSND%:000,4:data\r\n" je odeslána adekvátní odpověď. Trojice nul v tomto příkazu opět značí aktivní spojení a číslo 4 počet odesílaných znaků v odpovědi. Po odeslání odpovědi se automat vrací do stavu 3, kde čeká na nová data.

Před odesláním odpovědi je také zavolána funkce *automat*, která zajistí vykonání přijatého požadavku.

7.3 Zdroje přerušení

7.3.1 Čítač/časovač 3 a obsluha jeho přerušení

Jedná se o základní přerušení celého programu. Registry TCNT3H a TCNT3L jsou nastaveny tak, aby k přetečení čítače docházelo s periodou 1 s. Výpočet hodnot registrů vychází ze vztahu (15), kde N je 16 b počáteční hodnota. Horních 8 b je uloženo do registru TCNT3H a spodních 8 b do TCNT3L. t_{int} představuje periodu přerušení, DIV zvolenou před děličku a F_{CPU} kmitočet externího krystalu.

$$N = 2^{16} - \left(\frac{t_{int}}{\frac{1}{\frac{F_{CPU}}{DIV}}} \right) = 2^{16} - \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{11,0592 \cdot 10^6}{256}}} \right) = 22336 \quad (15)$$

V obsluze přerušení je implementováno počítadlo počtu přerušení, pomocí kterého jsou odvozovány časy pro odesílání dotazu na připojení klienta (1 s) a dotazu na data v TCP bufferu NSL (10 s). Ty jsou odesílány pouze pokud se stavový automat síťové komunikace nachází v odpovídajících stavech.

Také se zde povoluje start převodu a přerušení od A/D převodníku, pokud se stavový automat pro měření a ovládání z displeje nachází ve stavu 6 - Měření RUN. Nastavením bitu pro začátek převodu dojde k aktivaci „sample and hold“ obvodu, který navzorkuje signál na vybraném kanále A/D převodníku a začne s převodem.

7.3.2 UART0 a obsluha přerušování příjmu dat

Sériová linka 0 je využívána pro komunikaci s displejem a je nastavena na 1 start bit, 8 bitů dat, 1 stop bit, žádnou paritu a komunikační rychlost 9600 b/s.

V obsluze přerušování se po přijetí kompletní zprávy volají dvě funkce. Nejprve jsou pomocí funkce *touchPosition* dekodovány vertikální i horizontální souřadnice z přijatého řetězce dat definující přesné místo kliku na displej a následně je zavolána již známá funkce *automat*. Ta podle aktuálního stavu a souřadnic kliku vyhodnotí, zda je nutné stav změnit nebo se má v aktuálním stavu setrvat.

7.3.3 UART1 a obsluha přerušování příjmu dat

Nastavení komunikace po sériové lince 1 je stejné, jako u UART0, ale je využívána pro komunikaci s NSL.

V obsluze přerušování se čeká na přijetí celé zprávy. Ta je zpravidla zakončena znakem `\r`. Po přijetí zprávy je zavolána funkce *automatEthernet*, kde jsou vykonány odpovídající úkony. Přijatá zpráva může být ve dvou tvarech. Buď se jedná o odpověď na AT+i příkaz související s navazováním spojení, nebo o požadavek klienta. Pokud příkaz nevyhovuje žádné možnosti z aktuálního stavu, je to vyhodnoceno, jako chyba obsluhy a obratem je odeslána zpráva ke klientovi, že je daný příkaz neznámý.

7.3.4 Odesílání řetězců po sériových linkách

Příjem dat je řešen pomocí přerušování, ale k odesílání nejsou přerušování (obsluhy přerušování) nutné. Odesílání řetězců je řešeno pomocí funkce *send*. Té jsou předávány dva vstupní parametry. První parametr určuje sériovou linku a druhý vstupní parametr obsahuje řetězec k odeslání. V této funkci je následně vytvořen cyklus přes všechny znaky, a zpráva je pomocí funkce *putchar* postupně odeslána.

7.3.5 Externí přerušování INT7

Externí přerušování INT7 vznikne v okamžiku, kdy jsou v NSL přijata data a uložena do výstupního TCP bufferu. Obsluha přerušování spočívá ve vyzvednutí těchto dat. To se provede odesláním AT+i příkazu `"AT+iSRCV:000\r\n"`, na který NSL odpovídá příkazem obsahujícím všechna data z TCP bufferu.

7.3.6 A/D převodník a obsluha přerušování při dokončení převodu

Před použitím A/D převodníku je ho nejprve nutné, podobně jako sériovou linku či časovače v odpovídajících registrech vhodně nastavit.

V registru ADMUX je nutné nastavit napěťovou referenci, se kterou bude signál porovnáván, zarovnání výsledku převodu a kanál, na kterém bude analogová hodnota

měřena. Pro měření je zvolen externí referenční signál, který je přiveden na pin U_{REF} . Dále je nastaveno klasické zarovnání výsledku vpravo a na základě vybrané metody i kanál A/D převodníku.

V registru ADCSRA je nutné povolit přerušení a vhodně zvolit před děličku hodinového kmitočtu A/D převodníku. Ten pro 10 b rozlišení vyžaduje vzorkovací frekvenci v rozsahu 50 – 200 kHz. Při nastavení před děličky na 64 vychází vzorkovací frekvence 172,8 kHz, což spadá do povoleného pásma.

V obsluze přerušení dokončeného A/D převodu je nově změřenou hodnotou nahrazena nejstarší hodnota v posuvném registru DATA a následně je proveden výpočet nové průměrné hodnoty měření.

Součástí obsluhy přerušení je i volání funkce *stavMereni*, ve které jsou v závislosti na porovnání mezní hodnoty zakalení a průměrné hodnoty měněny výstupy zákaloměru. Digitální výstupy mění ostře svůj stav podle toho, zda je mezní hodnota větší či menší než průměrná hodnota. U analogových výstupů je situace poněkud složitější. Hodnota výstupu záleží na aktuální i na poslední změřené hodnotě a může nabývat celkem 33 hodnot od 4 do 20 mA s krokem 0,5 mA. Při uvažování dvou hodnot se nabízí čtyři způsoby řešení.

- Aktuální i poslední hodnota jsou větší než mezní hodnota – hodnota výstupu se o 1 mA sníží.
- Aktuální i poslední hodnota jsou menší než mezní hodnota – hodnota výstupu se o 1 mA zvýší.
- Aktuální hodnota je větší a poslední hodnota je menší než mezní hodnota – hodnota výstupu se o 0,5 mA sníží.
- Aktuální hodnota je menší a poslední hodnota je větší než mezní hodnota – hodnota výstupu se o 0,5 mA zvýší.

Před opuštěním obslužné rutiny přerušení je volána funkce *automat*, která zajistí zobrazení změn hodnot na displeji.

7.3.7 Přerušení od 8 b časovačů 0 a 2

Tato dvě přerušení slouží pro generování PWM signálů analogových výstupů. Nastavením před děličky (DIV) na 256 vznikne PWM signál, jehož kmitočet vychází podle vztahu (16) na 168,75 Hz. Počet kroků k přetečení je tedy 256. Protože je potřeba 33 stavů (s hodnotami 0 - 4 mA celkem 41 stavů) výstupů, je počáteční hodnota čítačů změněna na hodnotu 15. Díky tomu je krok mezi jednotlivými stavy celočíselný. Změna počátečních hodnot čítačů však vede na zvýšení kmitočtu na přibližně 179,3 Hz. To je již při výpočtu zvlnění napětí za RC článkem v kapitole 5.2.1 zohledněno.

$$f_{PWM} = \frac{f_{OSC}}{DIV \cdot 256} = \frac{11,0592 \cdot 10^6}{256 \cdot 256} = 168,75 \text{ Hz} \quad (16)$$

8 Kalibrace a nastavení zákaloměru

8.1 Příprava kalibračních roztoků

Pro kalibraci zákaloměru se nejčastěji používá roztok nazývaný formazin. Ten byl díky jeho relativně dobré stabilitě, jednoduchosti na výrobu a hlavně dobré reprodukovatelnosti zvolen, jako standard pro kalibraci zákaloměru [18].

Formazin je vodní suspenze, která vznikla reakcí síranu hydrazinia ($N_2H_4 \cdot H_2SO_4$) a hexametylentetraminu ($C_6H_{12}N_4$) známého také, jako urotropin [18].

Kalibrační vzorky vznikají vhodným naředěním základního 4000 NTU formazinu s deionizovanou vodou (dále pouze voda). Přípravu formazinu o hodnotě 4000 NTU popisuje následující postup [19].

- Rozpustit 1 g síranu hydrazinia v přibližně 80 ml vody a následně doplnit vodou do 100 ml.
- Rozpustit 10 g urotropinu v přibližně 80 ml vody a následně doplnit vodou do 100 ml.
- Oba roztoky slít do čisté, suché kádinky a důkladně promíchat.
- Vzniklý 200 ml roztok nechat inkubovat po dobu 24 h při teplotě 25 ± 3 °C. Dodržení teploty a přesných vah i objemů při míchání chemikálií je důležité pro správnou tvorbu částic.

Pro jednodušší počítání a snadnější odměřování podílu formazinu v kalibračních vzorcích byl tento 200 ml 4000 NTU formazin naředěn vodou na 800 ml, čímž vznikl formazin o hodnotě 1000 NTU. Z tohoto formazinu bylo následně vhodným ředěním vyrobeno devět kalibračních vzorků (Obr. 8.1). Předpokládané hodnoty zakalení jednotlivých vzorků, včetně podílu vody a 1000 NTU formazinu jsou v tabulce 8.1.

Potřebné množství formazinu V_{Z_0} pro výrobu nového vzorku lze určit podle vztahu (17), kde V_{Z_x} určuje požadovaný objem vzorku, Z_x představuje požadovanou hodnotu zakalení a Z_0 je zakalení formazinu, ze kterého je nový vzorek míchán.

$$V_{Z_0} = V_{Z_x} \cdot \frac{Z_x}{Z_0} \quad [\text{ml}] \quad (17)$$

I přes snahu docílit konstantních podmínek po dobu inkubace a současně použitím velice přesných vah, odměrných válců a injekčních stříkaček pro dávkování formazinu mohlo dojít k nepřesnostem. Proto je nutné hodnoty určené výpočtem při míchání vzorků brát pouze orientačně. Z tohoto důvodu bylo provedeno kontrolní měření vzorků na laboratorním zákaloměru MZN - 89 v laboratoři Měšťanského pivovaru v Poličce.

Tab. 8.1: Tabulka složení kalibračních vzorků formazinu

| Číslo vzorku [-] | Zakalení vzorku [NTU] | Množství 1000 NTU formazinu [ml] | Množství deionizované vody [ml] | Objem vzorku [ml] |
|------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 25 | 5 | 195 | 200 |
| 2 | 50 | 10 | 190 | 200 |
| 3 | 100 | 20 | 180 | 200 |
| 4 | 150 | 30 | 170 | 200 |
| 5 | 200 | 40 | 160 | 200 |
| 6 | 250 | 50 | 150 | 200 |
| 7 | 300 | 60 | 140 | 200 |
| 8 | 400 | 80 | 120 | 200 |
| 9 | 500 | 100 | 100 | 200 |

Z naměřených hodnot (Tab. 8.2) je zřejmé, že při míchání vzorků k nepřesnostem došlo. Rozdíly mezi hodnotami, na které byly vzorky míchány a skutečnými hodnotami rozhodně nejsou zanedbatelné, a proto je při vytváření kalibračních křivek přístroje počítáno s hodnotami změřenými laboratorním zákaloměrem.

Tab. 8.2: Tabulka skutečných hodnot kalibračních vzorků

| Číslo vzorku [-] | Požadované zakalení vzorku [NTU] | Skutečné zakalení vzorku [NTU] |
|------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 25 | 26 |
| 2 | 50 | 46 |
| 3 | 100 | 98 |
| 4 | 150 | 160 |
| 5 | 200 | 210 |
| 6 | 250 | 258 |
| 7 | 300 | 312 |
| 8 | 400 | 424 |
| 9 | 500 | 520 |



Obr. 8.1: Kalibrační vzorky

8.2 Kalibrace zákaloměru

Po namíchání kalibračních roztoků a provedení prvních testů pro hrubé určení měřících rozsahů se ukázalo, že zapojení fotodetektorů, je pro jinou metodu než turbidimetrickou nevhodné. Zvolený pár IR LED diody a fotodiody v kombinaci s celkem velkým vnitřním průměrem přípravků a zapojením fotodiody pouze s jedním operačním zesilovačem sloužícím jako I/U převodník vede u metody využívající dopředného rozptylu záření na generaci příliš malého výstupního napětí. To i při použití malého referenčního napětí A/D převodníku způsobí, že naměřené hodnoty jsou pouze v dolní části rozsahu A/D převodníku, což je pro měření krajně nevhodné. Důvodem je, že světlo je částicemi rozptýleno do všech směrů a fotodetektor pod úhlem 25 ° nebo 30 ° zachytí pouze jeho malou část. Touto chybou při navrhování snímače došlo k omezení způsobů měření pouze na turbidimetrickou metodu.

Turbidimetr díky umístění vláken, která vůči sobě nejsou nijak vychýlena je na tom o poznání lépe, a pracuje ve dvou měřících rozsazích 25 - 220 NTU s citlivostí 1 NTU a 210 – 520 NTU s citlivostí 2 NTU.

Naměřené hodnoty A/D převodníku pro jednotlivé kalibrační vzorky jsou v tabulkách 8.3 a 8.4. Proložení naměřených hodnot vhodnými funkcemi jsou určeny vztahy kalibračních funkcí. Grafy průběhů kalibračních křivek jsou na obrázcích 8.2 a 8.3.

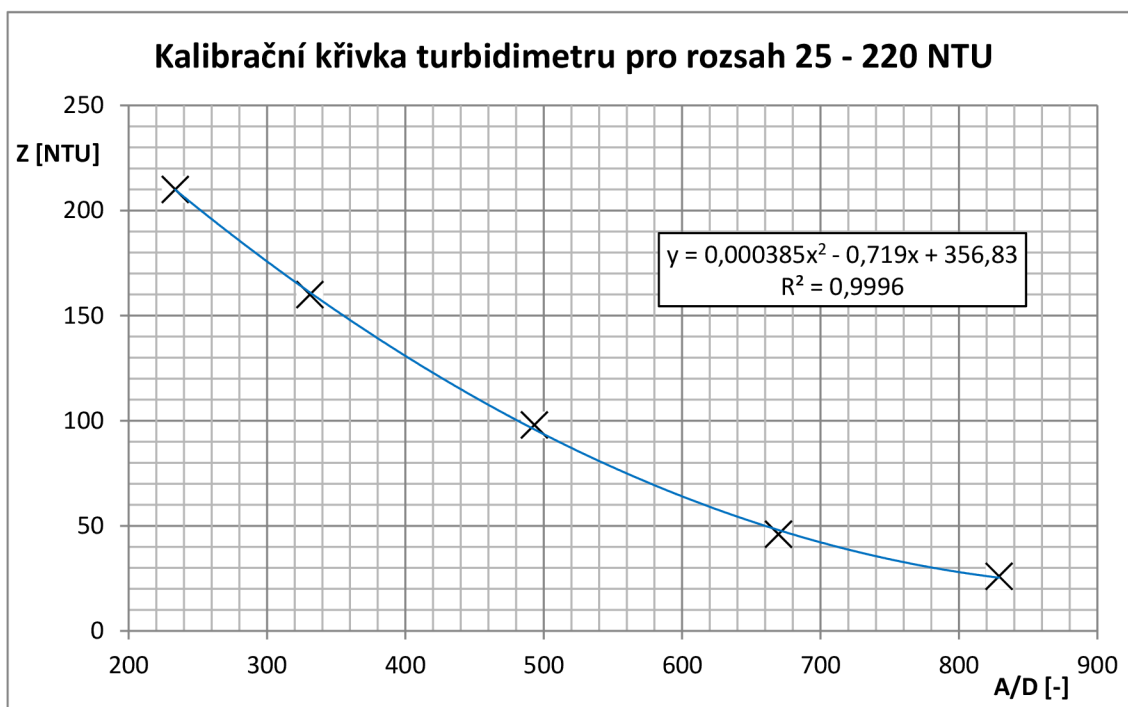
Pro každý kalibrační vzorek bylo změřeno celkem deset sad hodnot, kde každá z naměřených hodnot odpovídá váženému průměru z padesáti měření. Mezi jednotlivými sadami byl vzorek vždy vylit, zamíchán a znovu nalit zpět do laboratorního přípravku, kde byla po jedné minutě zahájena nová sada měření. Výsledkem měření na jednom vzorku je tedy 10 hodnot, ze kterých je spočítán vážený průměr, a tato hodnota je teprve vynesena do grafu jako správná hodnota A/D převodníku pro daný kalibrační vzorek. Laboratorní přípravek využitý při kalibraci v podobě nerezového hrníčku je na obrázku 8.4.

Tab. 8.3: Naměřené hodnoty A/D převodníku při kalibraci turbidimetru na rozsahu 25 – 220 NTU

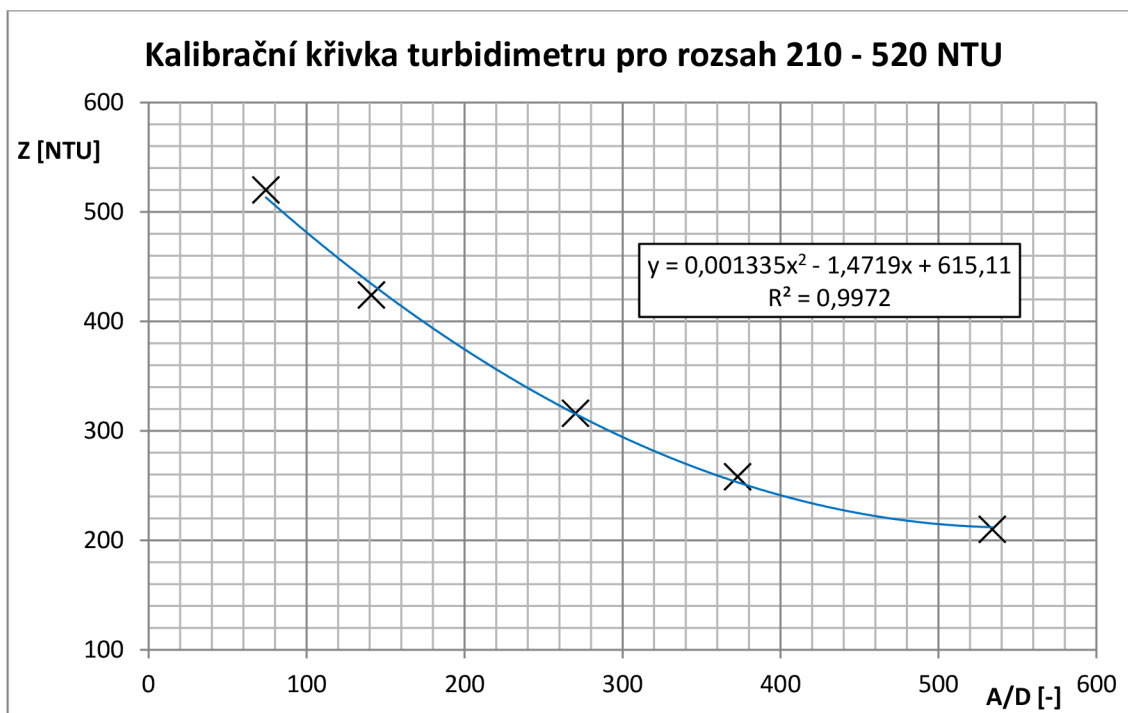
| Z _s [NTU] | Průměrné hodnoty A/D převodníku z 50 ti měření [-] | | | | | | | | | | Výsledný průměr hodnot A/D převodníku [-] |
|----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|---|
| | č. 1 | č. 2 | č. 3 | č. 4 | č. 5 | č. 6 | č. 7 | č. 8 | č. 9 | č. 10 | |
| 26 | 835 | 831 | 827 | 830 | 829 | 828 | 828 | 826 | 831 | 825 | 829 |
| 46 | 667 | 669 | 661 | 668 | 675 | 670 | 675 | 668 | 669 | 674 | 670 |
| 98 | 492 | 495 | 494 | 494 | 491 | 490 | 492 | 495 | 500 | 489 | 493 |
| 160 | 329 | 330 | 331 | 330 | 328 | 332 | 335 | 331 | 330 | 334 | 331 |
| 210 | 234 | 234 | 234 | 233 | 232 | 233 | 234 | 235 | 233 | 235 | 234 |

Tab. 8.4: Naměřené hodnoty A/D převodníku při kalibraci turbidimetru na rozsahu 210 – 520 NTU

| Z _s [NTU] | Průměrné hodnoty A/D převodníku z 50 ti měření [-] | | | | | | | | | | Výsledný průměr hodnot A/D převodníku [-] |
|----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|---|
| | č. 1 | č. 2 | č. 3 | č. 4 | č. 5 | č. 6 | č. 7 | č. 8 | č. 9 | č. 10 | |
| 210 | 532 | 531 | 535 | 530 | 529 | 532 | 539 | 537 | 538 | 537 | 534 |
| 258 | 371 | 376 | 375 | 371 | 375 | 372 | 372 | 371 | 373 | 372 | 373 |
| 316 | 270 | 266 | 272 | 273 | 268 | 271 | 270 | 271 | 269 | 272 | 270 |
| 424 | 140 | 144 | 141 | 139 | 140 | 140 | 142 | 140 | 142 | 142 | 141 |
| 520 | 75 | 74 | 74 | 73 | 72 | 74 | 74 | 77 | 76 | 73 | 74 |



Obr. 8.2: Kalibrační křivka turbidimetru pro rozsah 25 – 220 NTU



Obr. 8.3: Kalibrační křivka turbidimetru pro rozsah 210 – 520 NTU

Naměřeným hodnotám v obou rozsazích nejlépe odpovídalo proložení polynomickeou funkcí druhého řádu (kvadratická funkce), přesněji řečeno její první částí. V grafech tedy není minimum kvadratické funkce a v celém rozsahu měření se jedná o klesající funkci bez lokálních extrémů. Pomocí vzniklých rovnic kalibračních funkcí (rovnice regrese viz obrázky 8.2 a 8.3) a naměřených hodnot A/D převodníku zákaloměr přepočítává odpovídající hodnotu zakalení zkoumaného vzorku.



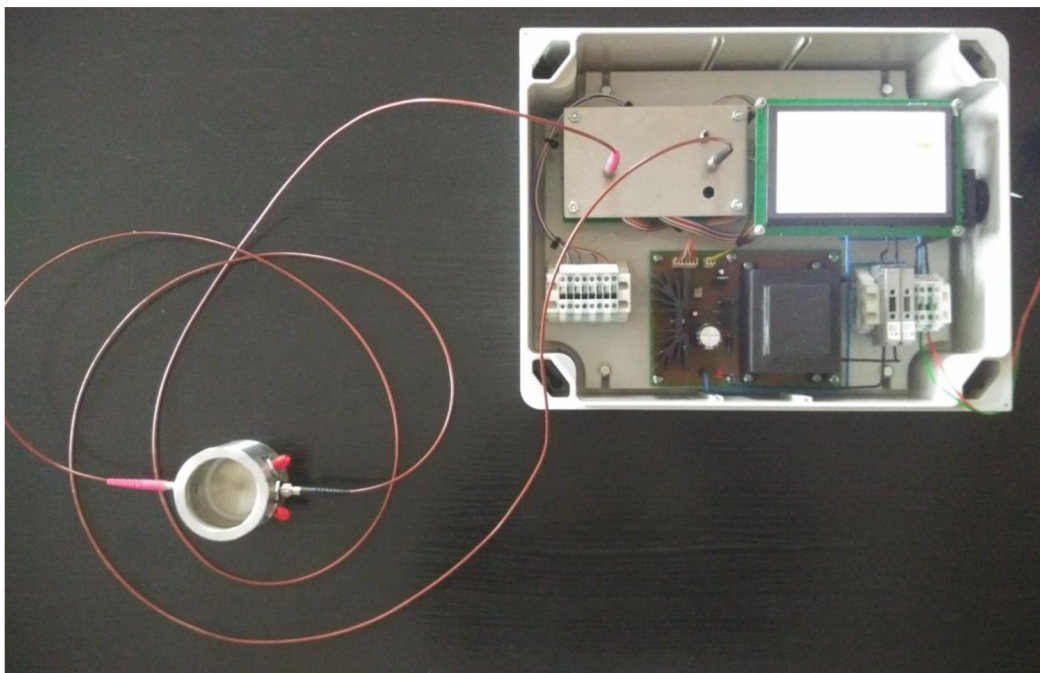
Obr. 8.4: Laboratorní přípravek pro měření zakalení

9 Výsledky měření a testování vlivů na měření

Po kalibraci byl zákaloměr podroben řadě měření s roztoky formazinu použitými při kalibraci, ale i s novými roztoky s ověřenou hodnotou zakalení. Kromě formazinu bylo vyzkoušeno i měření na namíchaných a ověřených vzorcích z jahodového džusu a nakonec i vzorcích připravených z polotučného mléka. Větší část měření, včetně kalibrace, byla na nerezovém laboratorním přípravku (Obr. 8.4), ale část i na průtokovém přípravku (Obr. 9.7).

9.1 Měření roztoků formazinu

Měření s roztoky formazinu bylo provedeno jednak s kalibračními roztoky, ale také se čtyřmi novými roztoky, které při kalibrování zákaloměru nijak nefigurovaly. Na obou rozsazích bylo proměřeno celkem sedm vzorků. Ukázka měřicího stanoviště s laboratorním přípravkem je na obrázku 9.1.



Obr. 9.1: Měřicí stanoviště při určování zakalení roztoků v laboratorním přípravku

Naměřené hodnoty pro rozsah 25 – 220 NTU jsou v tabulkách 9.1 až 9.7, včetně vypočítaných absolutních a relativních chyb měření. Průběhy maximálních hodnot vypočítaných absolutních i relativních chyb v závislosti na skutečné hodnotě zakalení vzorků jsou v grafech na obrázcích 9.2 a 9.3.

Naměřené hodnoty i vypočítané chyby z měření v druhém rozsahu 210 – 520 NTU obsahují tabulky 9.8 až 9.14 a průběhy maximálních chyb měření jsou vyneseny do grafů na obrázcích 9.4 a 9.5.

Hodnoty absolutních chyb Δ_Z a relativních chyb δ_Z jsou spočítány podle vztahů (18) a (19), kde Z_S je skutečná (správná) a Z_N je naměřená hodnota zakalení zkoumaného vzorku.

$$\Delta_Z = Z_N - Z_S \quad [\text{NTU}] \quad (18)$$

$$\delta_Z = \frac{\Delta_Z}{Z_S} \cdot 100 \quad [\%] \quad (19)$$

Tab. 9.1: Měření 26 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| Z_S [NTU] | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| Z_N [NTU] | 26 | 26 | 25 | 26 | 26 | 26 | 25 | 25 | 25 | 26 |
| Δ_Z [NTU] | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| δ_Z [%] | 0,00 | 0,00 | -3,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -3,85 | -3,85 | -3,85 | 0,00 |

Tab. 9.2: Měření 37 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z_S [NTU] | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 |
| Z_N [NTU] | 39 | 36 | 37 | 35 | 35 | 36 | 35 | 36 | 35 | 35 |
| Δ_Z [NTU] | 2 | -1 | 0 | -2 | -2 | -1 | -2 | -1 | -2 | -2 |
| δ_Z [%] | 5,41 | -2,70 | 0,00 | -5,41 | -5,41 | -2,70 | -5,41 | -2,70 | -5,41 | -5,41 |

Tab. 9.3: Měření 46 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Z_S [NTU] | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 |
| Z_N [NTU] | 49 | 49 | 50 | 49 | 50 | 50 | 50 | 50 | 49 | 50 |
| Δ_Z [NTU] | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| δ_Z [%] | 6,52 | 6,52 | 8,70 | 6,52 | 8,70 | 8,70 | 8,70 | 8,70 | 6,52 | 8,70 |

Tab. 9.4: Měření 98 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Z_S [NTU] | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Z_N [NTU] | 95 | 99 | 95 | 96 | 95 | 98 | 95 | 94 | 96 | 95 |
| Δ_Z [NTU] | -3 | 1 | -3 | -2 | -3 | 0 | -3 | -4 | -2 | -3 |
| δ_Z [%] | -3,06 | 1,02 | -3,06 | -2,04 | -3,06 | 0,00 | -3,06 | -4,08 | -2,04 | -3,06 |

Tab. 9.5: Měření 121 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z _S [NTU] | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 |
| Z _N [NTU] | 121 | 119 | 119 | 119 | 119 | 120 | 119 | 119 | 119 | 120 |
| Δ _Z [NTU] | 0 | -2 | -2 | -2 | -2 | -1 | -2 | -2 | -2 | -1 |
| δ _Z [%] | 0,00 | -1,65 | -1,65 | -1,65 | -1,65 | -0,83 | -1,65 | -1,65 | -1,65 | -0,83 |

Tab. 9.6: Měření 160 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| Z _S [NTU] | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| Z _N [NTU] | 161 | 162 | 161 | 160 | 160 | 161 | 159 | 159 | 162 | 160 |
| Δ _Z [NTU] | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | -1 | -1 | 2 | 0 |
| δ _Z [%] | 0,63 | 1,25 | 0,63 | 0,00 | 0,00 | 0,63 | -0,63 | -0,63 | 1,25 | 0,00 |

Tab. 9.7: Měření 210 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Z _S [NTU] | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| Z _N [NTU] | 209 | 208 | 210 | 212 | 213 | 209 | 211 | 210 | 211 | 212 |
| Δ _Z [NTU] | -1 | -2 | 0 | 2 | 3 | -1 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| δ _Z [%] | -0,48 | -0,95 | 0,00 | 0,95 | 1,43 | -0,48 | 0,48 | 0,00 | 0,48 | 0,95 |

Tab. 9.8: Měření 210 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Z _S [NTU] | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| Z _N [NTU] | 212 | 210 | 210 | 210 | 210 | 212 | 210 | 210 | 212 | 210 |
| Δ _Z [NTU] | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| δ _Z [%] | 0,95 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,95 | 0,00 | 0,00 | 0,95 | 0,00 |

Tab. 9.9: Měření 258 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z _S [NTU] | 258 | 258 | 258 | 258 | 258 | 258 | 258 | 258 | 258 | 258 |
| Z _N [NTU] | 258 | 258 | 260 | 262 | 256 | 254 | 256 | 256 | 254 | 256 |
| Δ _Z [NTU] | 0 | 0 | 2 | 4 | -2 | -4 | -2 | -2 | -4 | -2 |
| δ _Z [%] | 0,00 | 0,00 | 0,78 | 1,55 | -0,78 | -1,55 | -0,78 | -0,78 | -1,55 | -0,78 |

Tab. 9.10: Měření 275 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z_s [NTU] | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 |
| Z_N [NTU] | 272 | 268 | 268 | 268 | 270 | 270 | 268 | 272 | 268 | 270 |
| Δ_z [NTU] | -3 | -7 | -7 | -7 | -5 | -5 | -7 | -3 | -7 | -5 |
| δ_z [%] | -1,09 | -2,55 | -2,55 | -2,55 | -1,82 | -1,82 | -2,55 | -1,09 | -2,55 | -1,82 |

Tab. 9.11: Měření 316 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Z_s [NTU] | 316 | 316 | 316 | 316 | 316 | 316 | 316 | 316 | 316 | 316 |
| Z_N [NTU] | 314 | 316 | 316 | 314 | 320 | 318 | 320 | 320 | 318 | 316 |
| Δ_z [NTU] | -2 | 0 | 0 | -2 | 4 | 2 | 4 | 4 | 2 | 0 |
| δ_z [%] | -0,63 | 0,00 | 0,00 | -0,63 | 1,27 | 0,63 | 1,27 | 1,27 | 0,63 | 0,00 |

Tab. 9.12: Měření 407 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

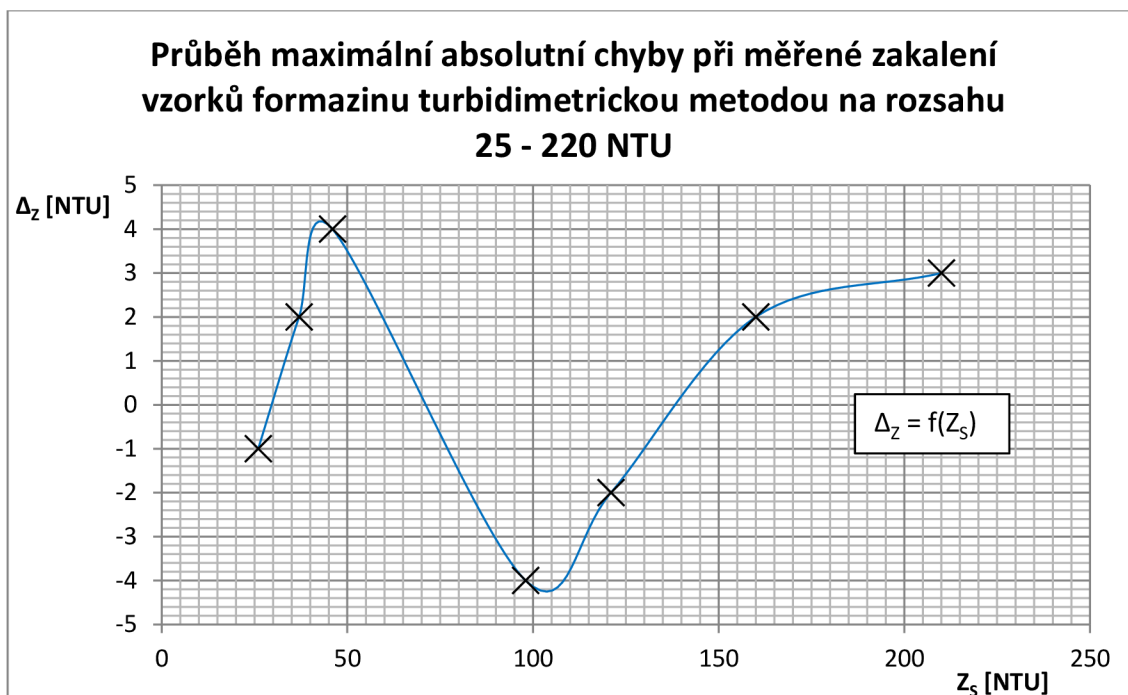
| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Z_s [NTU] | 407 | 407 | 407 | 407 | 407 | 407 | 407 | 407 | 407 | 407 |
| Z_N [NTU] | 410 | 404 | 408 | 402 | 410 | 408 | 408 | 404 | 402 | 404 |
| Δ_z [NTU] | 3 | -3 | 1 | -5 | 3 | 1 | 1 | -3 | -5 | -3 |
| δ_z [%] | 0,74 | -0,74 | 0,25 | -1,23 | 0,74 | 0,25 | 0,25 | -0,74 | -1,23 | -0,74 |

Tab. 9.13: Měření 424 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

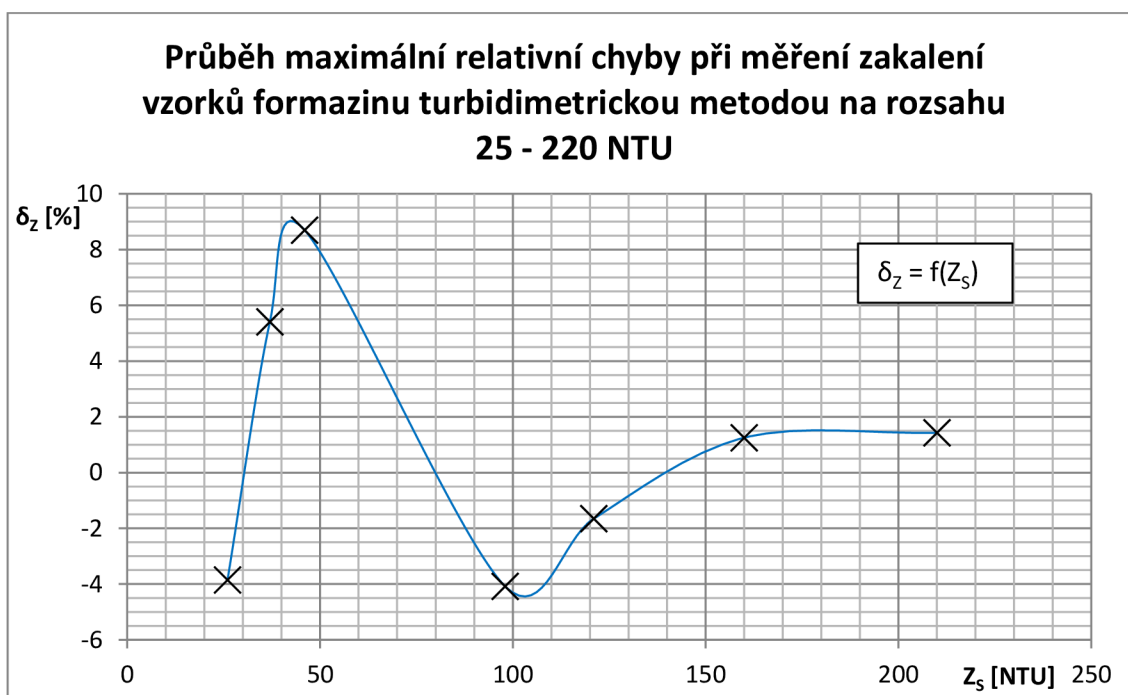
| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Z_s [NTU] | 424 | 424 | 424 | 424 | 424 | 424 | 424 | 424 | 424 | 424 |
| Z_N [NTU] | 432 | 432 | 434 | 432 | 434 | 432 | 434 | 434 | 434 | 432 |
| Δ_z [NTU] | 8 | 8 | 10 | 8 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 |
| δ_z [%] | 1,89 | 1,89 | 2,36 | 1,89 | 2,36 | 1,89 | 2,36 | 2,36 | 2,36 | 1,89 |

Tab. 9.14: Měření 520 NTU roztoku formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

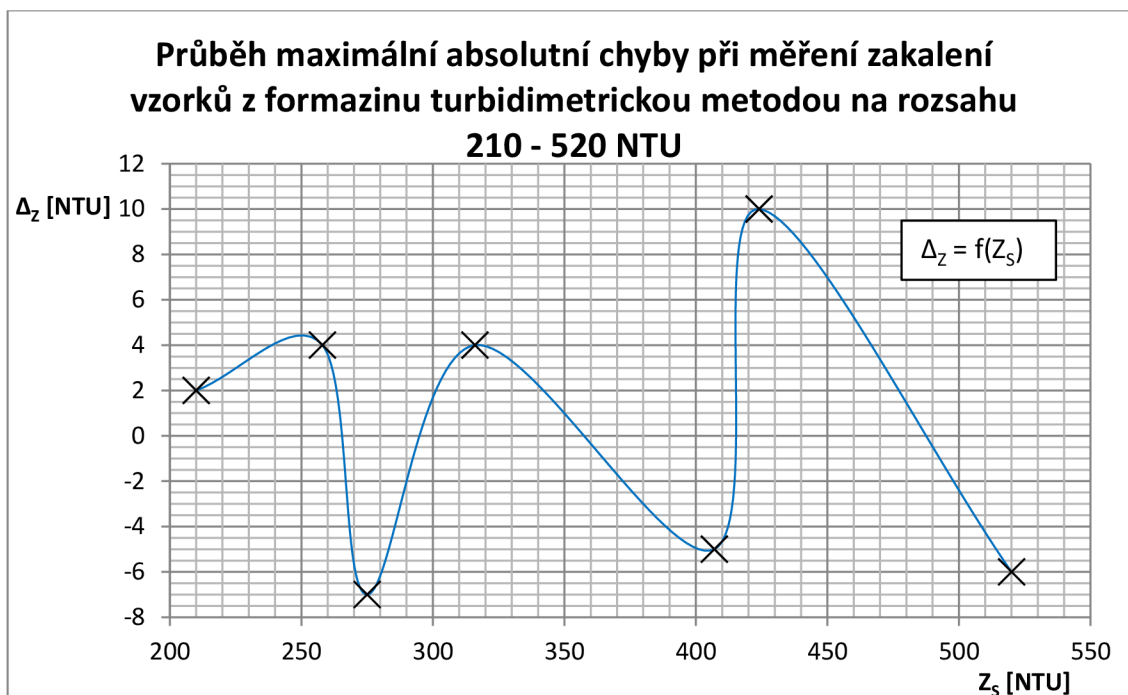
| č. měření | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| Z_s [NTU] | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 |
| Z_N [NTU] | 516 | 520 | 518 | 516 | 522 | 522 | 514 | 516 | 520 | 520 |
| Δ_z [NTU] | -4 | 0 | -2 | -4 | 2 | 2 | -6 | -4 | 0 | 0 |
| δ_z [%] | -0,77 | 0,00 | -0,38 | -0,77 | 0,38 | 0,38 | -1,15 | -0,77 | 0,00 | 0,00 |



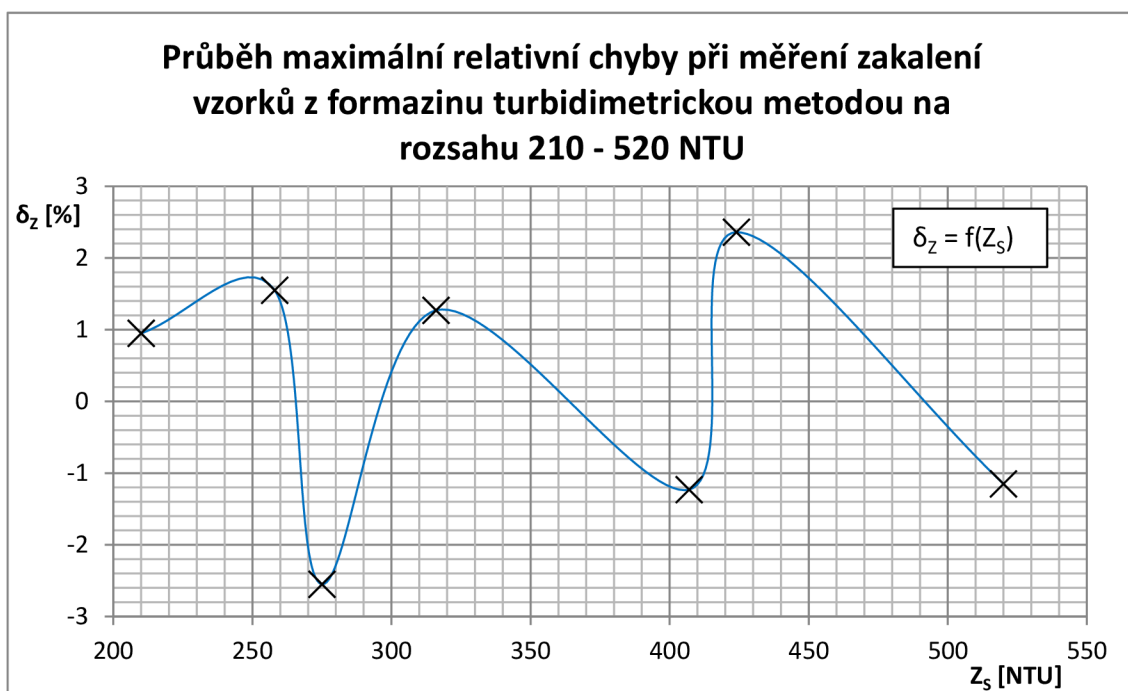
Obr 9.2: Průběh maximální absolutní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU



Obr 9.3: Průběh maximální relativní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU



Obr. 9.4: Průběh maximální absolutní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU



Obr. 9.5: Průběh maximální relativní chyby při měření zakalení vzorků formazinu turbidimetrickou metodou na rozsahu 210 – 520 NTU

Všechna měření s roztoky formazinu byla provedena na laboratorním přípravku s nastavením časové konstanty zákaloměru na pět sekund. To znamená, že změřené hodnoty odpovídají váženému průměru z pěti po sobě jdoucích měření.

Z průběhů relativních chyb je zřejmé, že maximální chyba měření u většiny vzorků nepřesahuje 5 %. Výjimkou je vzorek o hodnotě 37 NTU, kde vychází relativní chyba měření v absolutní hodnotě 6,41 %. Druhým vzorkem, který přesáhl 5 % hranici chyby měření je kalibrační vzorek se skutečnou hodnotou zakalení 46 NTU. Tato chyba je pravděpodobně způsobena především nedokonalým proložením kalibrační funkcí (Obr. 8.2). Při měření v rozsahu 210 – 520 NTU chyba měření nepřesáhla hodnotu ± 3 %.

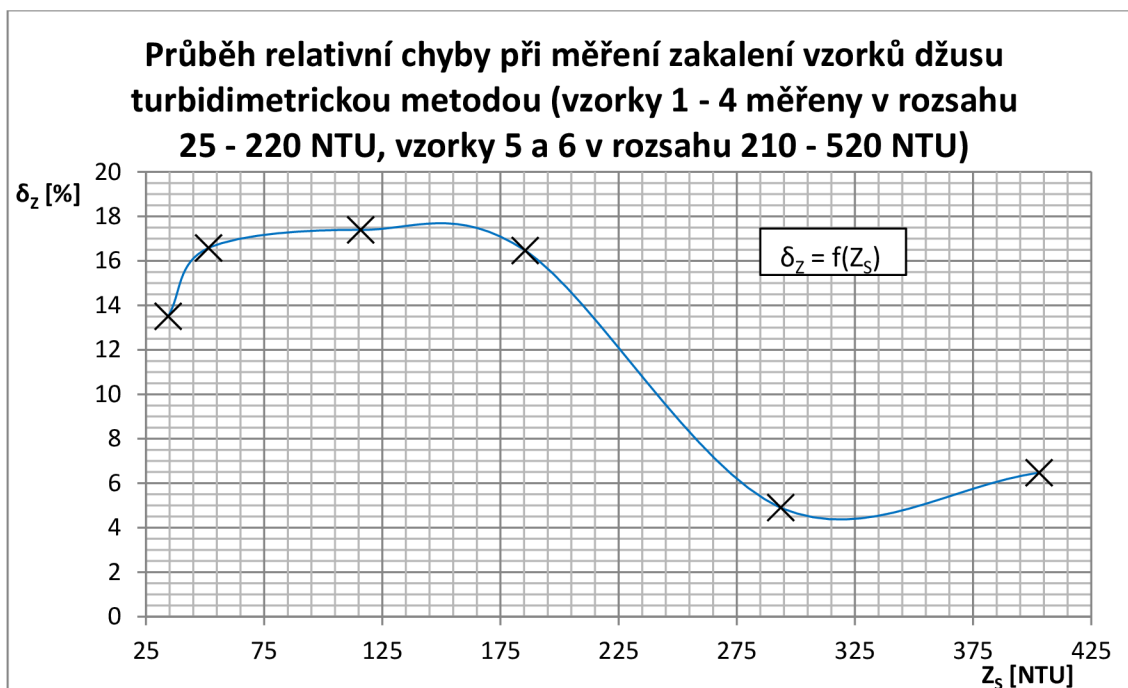
9.2 Měření roztoků džusu

Kromě měření na formazinových roztocích byl zákaloměr testován i na roztocích z jahodového džusu, které mají daleko horší vlastnosti. Hlavním rozdílem je obrovská škála velikostí suspendovaných částic v roztoku, stabilita a rychlost usazování částic. Pro měření bylo připraveno celkem šest roztoků, jejichž skutečné hodnoty zakalení byly zjištěny laboratorním zákaloměrem MZN – 89 v laboratoři Měšťanského pivovaru v Poličce.

Roztoky džusu byly proměřeny v laboratorním nerezovém přípravku s nastavenou časovou konstantou na 50 s. Naměřené hodnoty jsou tedy váženým průměrem z 50 ti měření a spolu se správnými hodnotami úrovně zakalení i vypočítanými chybami měření jsou zaznamenány v tabulce 9.15. Chyby měření byly opět spočítány podle vztahů (18) a (19) a průběh relativní chyby měření je vynesena v grafu na obrázku 9.6.

Tab. 9.15: Tabulka naměřených hodnot a vypočtených chyb měření vzorků z jahodového džusu

| č. vzorku | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Rozsah [NTU] | 25 - 220 | 25 - 220 | 25 - 220 | 25 - 220 | 210 - 520 | 210 - 520 |
| Z_s [NTU] | 34,36 | 51,47 | 115,85 | 185,47 | 293,61 | 402,93 |
| Z_N [NTU] | 39 | 60 | 136 | 216 | 308 | 429 |
| Δ_z [NTU] | 4,64 | 8,53 | 20,15 | 30,53 | 14,39 | 26,07 |
| δ_z [%] | 13,50 | 16,58 | 17,39 | 16,46 | 4,90 | 6,47 |



Obr 9.6: Průběh relativní chyby při měření zakalení vzorků džusu turbidimetrickou metodou (vzorky 1 - 4 měřeny v rozsahu 25 - 220 NTU, vzorky 5 a 6 v rozsahu 210 - 520 NTU)

Z průběhu relativní chyby je zřejmé, že tato měření jsou zatížena velkou chybou. Hlavním důvodem je pravděpodobně to, že při měření laboratorním zákaloměrem je vzorek prosvětlován v jiné výšce než při měření v nerezovém přípravku. To u roztoků formazinu nebyl problém, protože v celém objemu obsahují přibližně stejně velké částice. Roztoky z džusu však obsahují částice o velikostech ve velkém rozpětí, a ty se pravděpodobně nacházejí v různých hloubkách roztoků. Proto při měření v menší vzdálenosti od dna přípravku odpovídají všechny změřené hodnoty většímu zákalu, než hodnoty naměřené laboratorním zákaloměrem.

9.3 Vliv protékajícího média na měření

Zatím provedená měření byla pouze statická, ale jelikož se předpokládá využití zákaloměru při vypouštění tanku, bylo provedeno i dynamické průtokové měření. V něm se zjišťovalo, jaký vliv má protékající médium na měření zakalení. Pro toto měření není vhodný laboratorní přípravek se dnem, a proto byl po domluvě s vedoucím práce vyroben nový přípravek. Snahou bylo vyrobit přípravek tak, aby byl svými vnitřními rozměry co nejvíce podobný laboratornímu přípravku a snímač tak nebylo nutné znovu kalibrovat. Výsledkem je potrubí o vnitřním průměru 50 mm (Obr. 9.7). Průtokové měření s tak velkým průměrem přípravku však vedlo na pokusy v poněkud větším měřítku oproti měření s laboratorním přípravkem, kde stačily roztoky o objemu 200 ml.



Obr. 9.7: Průtokový přípravek pro měření zakalení

Popis průtokového měřicího systému

Pro zachycení dostatečného počtu hodnot z jednoho pokusu byla nastavena časová konstanta zákaloměru na 2 s, a byl namíchán měřicí roztok naředěním polotučného mléka vodou v poměru 1:355. Připravený roztok pro průtokové měření se tedy skládá z jednoho litru mléka a 355 litrů přefiltrované dešťové vody.

Měřicí systém obsahuje dvě 450 litrové kádě. Vrchní kád' slouží pro dostatečnou zásobu roztoku pro měření a spodní kád' pro zachycení roztoku po jednom cyklu měření. Před začátkem měření je roztok pomocí vodního čerpadla přečerpán do vrchní kádě, kde je držen, dokud není zákaloměr správně nastaven. Po spuštění měření se uvolní zátka v kád' s roztokem a ten je měřicím přípravkem samospádem vypuštěn do spodní kádě. Aby bylo možné určit vliv protékající kapaliny na měření je na konci každého měřicího cyklu uzavřen konec přípravku zátkou, a po naplnění potrubí sloupcem roztoku je provedeno statické měření. Ukázka měřicího systému při tomto pokusu je na obrázcích 9.8 a 9.9.

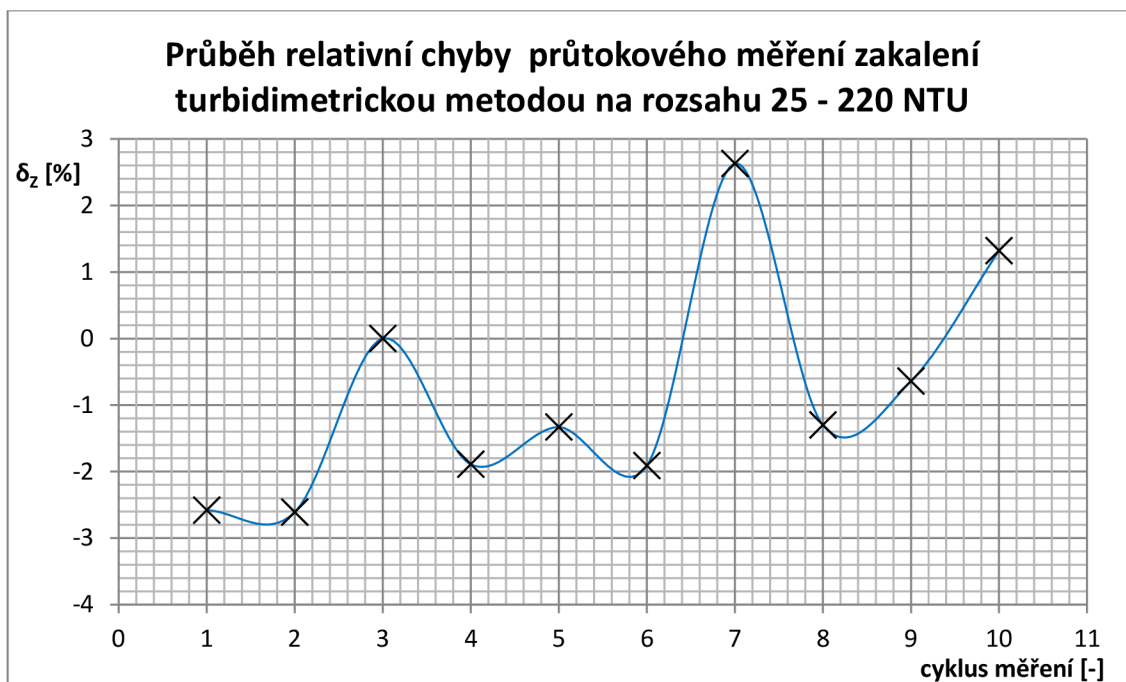


Obr. 9.8 a 9.9: Měřicí systém pro testování vlivu protékajícího roztoku na měřenou úroveň zakalení

Naměřené hodnoty

Měření bylo provedeno celkem v deseti cyklech a hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 9.16C, která je přiložena na konci dokumentu, jako příloha C. Výsledkem jednoho měřicího cyklu je deset hodnot z dynamického a deset hodnot ze statického měření. Z těch je v rámci cyklu spočítána absolutní a relativní chyba měření opět podle vztahů (18) a (19). Při výpočtu chyb je průměrná hodnota ze statického měření považována za správnou a průměrná hodnota z dynamického měření za měřenou. Průběh vypočítané relativní chyby měření je vynesena do grafu na obrázku 9.10.

Chyba mezi dynamickým a statickým měřením nepřesahuje $\pm 3 \%$. Z toho vyplývá, že měření zakalení není na průtoku závislé. Pokud je zákaloměr kalibrován při statickém měření a následně používán při dynamickém měření chyba vlivem protékající kapaliny bude minimální.



Obr. 9.10: Průběh relativní chyby průtokového měření zakalení turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

9.4 Vliv úpravy a barvy vnitřních stěn přípravku na měření

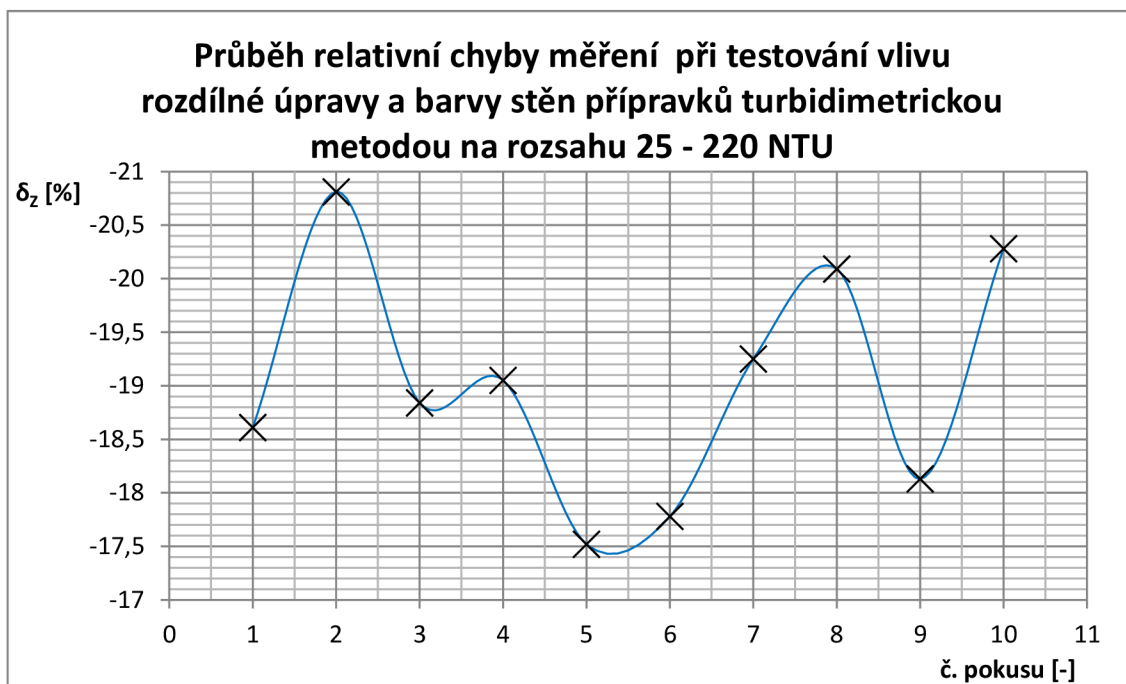
Dalším vlivem, který může vést na zhoršení přesnosti měření je úprava vnitřních stěn hlavy snímače. Je obecně známé, že různá barva povrchu souvisí s mírou pohlcení záření. Jak velký vliv má tento fakt na měření zakalení byl ověřen měřením mléčného roztoku v laboratorním přípravku a porovnáním naměřených hodnot s hodnotami získanými měřením na průtokovém přípravku, který byl z jedné strany uzavřen zátkou.

Geometrické rozdíly přípravků, jako je například nedokonalá souosost přijímacího a vysílacího vlákna nebo jejich různá vzdálenost zásadním způsobem ovlivňují měření. V tomto případě mají oba přípravky shodný vnitřní průměr, ale vzdálenost mezi zakončením optických vláken je u průtokového přípravku o 3 mm větší. Proto při měření nebyly úplně dotáhnuty konektory laboratorního přípravku tak, aby se docílilo stejné vzdálenosti zakončení vláken, jako u průtokového přípravku. Toto ošetření však vnáší do měření také určitou chybu, a proto nelze vypočítanou chybu přisuzovat pouze různému povrchu vnitřních stěn přípravků.

Laboratorní přípravek vyrobený z nerezů má vnitřní stěny lesklé s barvou typickou pro tento materiál, kdežto průtokový přípravek vyrobený z plastového potrubí má stěny hladké, lesklé a hlavně černé.

Bylo provedeno celkem deset měření na obou přípravcích se shodným nastavením časové základny na 5 s. Naměřené hodnoty zakalení a vypočítané chyby měření jsou

v tabulce 9.17D, která je přiložena na konci dokumentu, jako příloha D. V grafu na obrázku 9.11 je vykreslen průběh relativní chyby tohoto měření. Výpočet chyb měření stejně, jako v předchozích případech vychází z rovnic (18) a (19). Jelikož byl zákaloměr kalibrován na laboratorním přípravku, jsou na něm naměřené hodnoty pro výpočet chyb považovány za správné a hodnoty z průtokového přípravku za měřené.



Obr 9.11: Průběh relativní chyby měření při testování vlivu rozdílné úpravy a barvy stěn laboratorního a průtokového měřícího přípravku při měření turbidimetrickou metodou na rozsahu 25 – 220 NTU

Je zřejmé, že hodnoty naměřené na průtokovém přípravku se od správných hodnot naměřených na laboratorním přípravku značně liší. Jelikož jsou relativní chyby měření záporné a přesahují až -20% , je podpořen fakt, že černá barva lépe pohlcuje záření. Vlivem černé barvy stěn průtokového přípravku dochází k většímu útlumu optického signálu a tím se měřené vzorky jeví, jako více zakalené.

Závěrem tohoto pokusu je, že by zákaloměr měl být kalibrován na ten přípravek (hlavu snímače), kterým budou prováděna veškerá měření. Tím se předejde vzniku chyb měření, které plynou z rozdílné geometrie či povrchu a barvy vnitřních stěn od kalibračního přípravku.

9.5 Vliv teploty na měření

Teplota a její změny v průběhu měření ovlivňují velkou část snímačů nejrůznějších fyzikálních veličin a zákaloměry nejsou výjimkou. Rušivý teplotní vliv může působit na třech místech zákaloměru.

9.5.1 Vliv změny teplot na hlavu snímače

Velká část vyráběných průmyslových zákaloměrů má zdroj záření i fotocitlivé prvky přímo v hlavě snímače. Ta je součástí potrubí a vlivem okolní teploty a teploty protékajícího média jsou tyto součástky ovlivňovány. Tím vzniká chyba měření, kterou je nutné kompenzovat.

Realizovaný zákaloměr díky využití optických vláken nemá fotocitlivé prvky ani zdroj záření umístěny v hlavě snímače, ale jsou zabudovány na řídicí desce elektroniky snímače. Díky tomu může být snímač umístěn v místnosti s konstantní teplotou. Tím nedochází k ovlivňování měření vlivem měnící se teploty média v potrubí či jeho okolí. Tato vlastnost zákaloměru je současně jeho největší výhodou. Využitím optických vláken pro přenos signálu od hlavy snímače k jeho elektronice se navíc potlačuje vliv elektromagnetického rušení, které na rozdíl od metalického vedení optická vlákna nijak neovlivňuje.

9.5.2 Vliv změny teplot na elektroniku snímače

Oproti teplotnímu vlivu na hlavu snímače je vliv změny teplot na elektroniku citelnější. Důvodem je teplotní citlivost fotodetektorů, operačních zesilovačů i zdroje záření. Ostatní digitální obvody jsou vůči změnám teplot v porovnání s těmito součástkami relativně imunní. Díky velkému krytí krabice, ve které je elektronika uložena, nedochází k cirkulaci vzduchu a zahřívání některých součástek pravděpodobně povede k zvětšení chyby měření. Jedinou součástkou, která zásadním způsobem mění svoji teplotu je stabilizátor napětí na 5 V. Ten je sice opatřen poměrně velkým chladičem, ale v kombinaci s uzavřeným prostorem se projevuje, jako slušný zdroj tepla. Proto by bylo vhodnější celou část zdroje napájení od transformátoru až po stabilizaci napětí na 5 V ze zařízení odstranit a umístit mimo krabici zákaloměru. Toto teplotní opatření je prospěšné i z hlediska potlačení elektromagnetického rušení, které zdroj vytváří.

9.5.3 Vliv změny teplot na optická vlákna

Jelikož se samotná optická vlákna používají i jako vlastní snímače teploty, může být zdrojem jisté chyby měření i útlum signálu vzniklý na OV vlivem teplotních změn. Potlačení vlivu teploty lze do velké míry vyřešit vhodnou volbou optických vláken. Asi nejvhodnější se jeví použití skleněných, mnohavidových vláken. Další možností, jak bojovat s nežádoucím teplotním vlivem na přesnost měření, je využití kompenzačního vlákna, které by procházelo stejným prostředím, a vzniklý útlum na tomto vlákne by určoval, do jaké míry je měření teplotou ovlivněno.

10 Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo realizovat systém s optickými vláknovými snímači pro měření zakalení a jeho funkčnost experimentálně ověřit.

Z poznatků získaných z teoretického rozboru metod měření zakalení byl stanoven závěr, že pro využití zákaloměru v pivovaru při měření množství kvasnic v pivě před jeho filtrací jsou vlivem velikosti částic nevhodnějšími metodami turbidimetrická a metoda, která měří dopředný rozptyl záření. Z tohoto důvodu je pro hlavní měřící kanál využit turbidimetr, který měří záření v přímém směru od zdroje. Kvůli značným výhodám poměrového měření je zákaloměr opatřen i druhým kanálem, který by bylo možné využít současně pro měření pod jiným úhlem. Při testování zákaloměru měření pod úhly 25° a 30° bylo zjištěno, že přijímaný signál je při těchto metodách příliš slabý a je nutné ho před přivedením do A/D převodníku zesílit. Druhý kanál je tedy při ověřování funkčnosti zákaloměru vynechán a testování se zaměřilo pouze na měření turbidimetrem.

Turbidimetr je pomocí kalibračních vzorků zkalibrován ve dvou rozsazích. První rozsah je od 25 NTU do 220 NTU a zakalení se v něm měří s citlivostí 1 NTU a druhý rozsah měří od 210 NTU do 520 NTU s citlivostí 2 NTU. Kalibrační křivky včetně jejich funkcí jsou na obrázcích 8.2 a 8.3.

Testování funkčnosti zákaloměru bylo provedeno na roztocích z formazinu i na roztocích z džusu. Při měření formazinů vykazovalo měření hlavně v rozsahu 210 – 520 NTU velice dobrých výsledků. Relativní chyba zde nepřesáhla $\pm 3\%$ (Obr. 9.5). Při měření na rozsahu 25 – 220 NTU sice relativní chyba měření dosahovala větších hodnot (Obr. 9.3), ale z průběhu absolutní chyby (Obr. 9.2) je zřejmé, že měření dosahuje také velice dobré přesnosti.

Při měření roztoků z džusu je situace značně odlišná. Relativní chyba měření zde ve třech z šesti případů přesahuje -15% (Obr. 9.6). Důvodem této nepřesnosti měření je pravděpodobně rozdílná hloubka měření laboratorním a realizovaným zákaloměrem. Roztoky džusu obsahují velkou škálu velikostí suspendovaných částic, které se nacházejí v různých hloubkách. Proto se při měření ve větší hloubce realizovaným zákaloměrem vzorky jeví, jako více zakalené.

Součástí provedených testů na zákaloměru bylo i zjišťování vlivu průtoku roztoku na měřenou hodnotu zakalení. Tento pokus byl proveden s 356 litry roztoku namíchaného z mléka a vody v poměru 1:355. Průběh relativní chyby měření mezi statickým a dynamickým měřením na totožném měřicím přípravku je v grafu na obrázku 9.10. Z grafu je zřejmé, že při žádném z pokusů nepřesáhla chyba měření $\pm 3\%$. Toto zjištění vede k závěru, že průtok roztoku na měření zakalení má minimální vliv.

Posledním testem, byl vliv úpravy a barvy povrchu vnitřních stěn přípravku na měření zakalení. Kromě těchto vlivů je měření zásadním způsobem ovlivněno i nedokonalou shodou geometrických rozměrů obou přípravků. Vnitřní průměr obou přípravků je sice totožný, ale vzájemná vzdálenost zakončení vláken se o 3 mm liší. To má také bezpochyby vliv na přesnost měření. Dle předpokladů vychází relativní chyba měření i více než – 20 %. Z tohoto pokusu vyplývá, že pro potlačení těchto vlivů na přesnost měření je ideální povést kalibraci na přípravku, kterým je následně zakalení měřeno.

I přes relativně malé chyby měření turbidimetrickou metodou na vzorcích formazinu by si měřicí přístroj zasloužil určitá vylepšení, aby byl na trhu konkurenceschopný. Největším problémem je omezení zákaloměru pouze na jednu metodu měření. Tento problém by bylo možné vyřešit vsazením zesilovače napětí před A/D převodník. V ideálním případě by mohl tento zesilovač mít funkci přeladitelného zesílení, které by se dalo využít i při změně měřících rozsahů. Neschopnost měnit měřicí rozsahy pouze softwarově bez nutnosti dalšího hardwarového zásahu je totiž další z nevýhod realizovaného zákaloměru.

Kromě nevýhod má však tento zákaloměr i jednu velkou výhodu oproti konkurenci, která pramení z použití optických vláken pro přenos signálu od hlavy snímače. Tou je velice dobrá odolnost vůči rušivým teplotním i magnetickým vlivům. Nespornou výhodou je také možnost vzdáleného nastavení a kontroly měření prostřednictvím průmyslového Ethernetu. Za zmínku stojí i mechanické provedení zákaloměru, který je umístěn do krabice s krytím IP - 55, což je dostatečná ochrana i proti tekoucí vodě. Zároveň je víko krabice vyrobeno z průhledného plastu, a tak je možné kontrolovat měření z bezprostřední blízkosti sledováním hodnot na displeji.

Literatura

- [1] BEJČEK, L.: Optické vláknové snímače teploty. *Automa* [online]. 2011, (8-9), 38-43 [cit. 2016-01-07]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=44586
- [2] BEJČEK, L.: *Optoelektronické snímače* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=86412
- [3] TURÁŇ, J. a PETRÍK, S.: *Optické vláknové senzory*. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00655-1.
- [4] Automatizační systémy 1 [online]. Chomutov [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: <http://web.spscv.cz/~madaj/autsys1.pdf>
- [5] BIN OMAR, A. F. a BIN MATJAFRI, M. Z.: Turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the Measurement of Water Turbidity. *Sensors* [online]. 2009, (9) [cit. 2016-01-07]. ISSN 8311-8335. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3292109/#b1-sensors-09-08311>
- [6] KHOUJA, H.: Turbidimetry & Nephelometry [online]. [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: <http://www.kau.edu.sa/Files/0013791/Subjects/Turbidimetry%20and%20Nephelometry.pdf>
- [7] GOLJÁŠ, J.: Metody analýzy potrevin: Nefelometrie a turbidimetrie [online]. 2013 [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?cast=52957>
- [8] Turbidity. *LaMotte* [online]. [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: <http://www.lamotte.com/en/blog/test-factors/91-what-is-turbidity>
- [9] WORSFOLD, P. J., TOWNSHEND, A. a POOLE, C. F.: *Spectrophotometry: Turbidimetry and nephelometry*. Ohio, Oberlin: Elsevier, 2005, s. 343-351. ISBN 978-0-12-369397-6. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/244575279_Spectrophotometry_Turbidimetry_and_nephelometry
- [10] SLINTÁK, V.: Konverze mezi 5V a 3,3V logikou. *MArt.cz* [online]. 2011 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://uart.cz/253/konverze-mezi-5v-a-3v-logikou/>
- [11] *Specification of part: MCT050U6TW800480MLMC*. Anglie, 2014. Dostupné také z: <http://www.farnell.com/datasheets/1934406.pdf>
- [12] *Nano SocketLAN*. Kalifornie, 2009. Dostupné také z: http://www.spezial.cz/pdf/Nano_Socket_LAN_DS.pdf

- [13] Počítačové sítě - Model ISO/OSI. *Site.the.cz* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://site.the.cz/index.php?id=4>
- [14] Referenční model ISO/OSI. *Wikipedie* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Referen%C4%8Dn%C3%AD_model_ISO/OSI
- [15] Referenční model ISO/OSI. *IJS: Internet a Jeho Služby* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://ijs.8u.cz/index.php/standardizace-v-pocitacovych-sitich/referencni-model-iso-os>
- [16] C/C++: Protokol UDP 1. část. *BUILDER* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.builder.cz/rubriky/c/c--/protokol-udp-1-cast-156226cz>
- [17] KREJSA, J.: *OVS - Optické vláknové snímače*. Brno, 2016. Semestrální práce. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Bejček L., CSc.
- [18] ŠKULCOVÁ, L.: *Reprodukční test toxicity s Caenorhabditis elegans*. Brno, 2012. Diplomová práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jakub Hofman, PhD.
- [19] ČSN EN ISO 7027. *Jakost vod - Stanovení zákalu*. Český normalizační institut, 2001.

Seznam zkratek a symbolů

| | |
|---------|--|
| OV | Optické vlákno |
| OVS | Optické vláknové snímače |
| HW | Hardware |
| SW | Software |
| ZZ | Zdroj záření |
| SZ | Snímač záření |
| EPA | Enviromental protection agency |
| NTU | Nephelometric Turbidity Unit |
| EBC | European Brewery Convention |
| IR LED | Infra Red LIght-Emitting Diode |
| LSB | Least significant bit |
| MCU | Micro Controller Unit |
| DO | Digital Outputs |
| AO | Analog Outputs |
| UART | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| USB | Universal Serial Bus |
| ISP | In-System Programming |
| PLC | Programmable Logic Controller |
| AC/DC | Střídavé/stejnsměrné napětí |
| USM | Usměřovač |
| DPS | Deska plošných spojů |
| SMD | Surface Mount Device |
| I/U | Převodník proudu na napětí |
| A/D | Převodník analogové hodnoty na digitální |
| OZ | Operační zesilovač |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| I/O | Inputs/Outputs |
| BIOS | Basic Input – Output System |
| RXD | Recieve Data |
| TXD | Transmit Data |
| CTS | Clear To Send |
| RTS | Request To SEnd |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| UDP | User Datagram Protocol |
| POP3 | Post Office Protocol 3 |
| SMTP | Simple Mail Transmit Protocol |
| FTP | File Transfer Protocol |
| IP | Internet Protocol |
| ISO/OSI | International Standards Organization / Open System Interconnection |

Seznam příloh

Příloha A: Obr. Schéma zapojení zdroje napájení

Příloha B: Aplikační protokol síťové komunikace

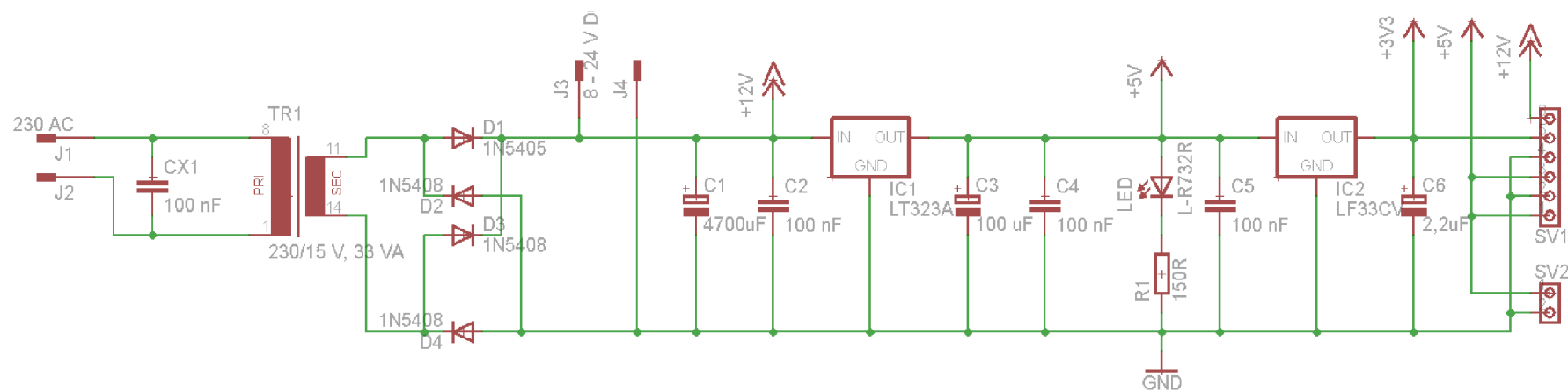
Příloha C: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot průtokového měření

Příloha D: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot měření vlivu povrchu a barvy vnitřních stěn přípravků

Příloha E: CD obsahující:

- Elektronickou verzi tohoto dokumentu: Krejsa_DP.pdf
- Soubor APprotokol.xls s tabulkou aplikačního protokolu
- Soubor mereni.xls s naměřenými a vypočítanými hodnotami
- Složku s použitými obrázky při vytváření uživatelského rozhraní: grafika
- Složku s elektrickými schémata a navrženými plošnými spoji: zapojeni
- Složku obsahující zdrojový kód snímače zakalení: DP_TaN

Příloha A



Obr. 5.5A: Schéma zapojení zdroje napájení

Příloha B

Tab. 7.1B: Aplikační protokol síťové komunikace

| PŘÍKAZ Z PC | ODPOVĚĎ Z MCU |
|---|--|
| KLIK_MERENI | STAV=NE NI NASTAVENO nebo STAV=MERENI STOP |
| KLIK_NASTAVENI1 | STAV=NASTAVENI1 |
| KLIK_NASTAVENI2 | STAV=NASTAVENI2 |
| KLIK_RESET | STAV=LOAD SCREEN |
| KLIK_ZPET | STAV=LOAD SCREEN nebo STAV=MERENI STOP |
| KLIK_START | STAV=MERENI RUN |
| KLIK_STOP | STAV=MERENI STOP |
| KLIK_TURB | STAV=TURB |
| KLIK_NEF | STAV=NEF |
| KLIK_POM | STAV=POM |
| ACTIVE_DO1 | STAV=DO1A |
| ACTIVE_DO2 | STAV=DO2A |
| ACTIVE_AO1 | STAV=AO1A |
| ACTIVE_AO2 | STAV=AO2A |
| DEACTIVE_DO1 | STAV=DO1P |
| DEACTIVE_DO2 | STAV=DO2P |
| DEACTIVE_AO1 | STAV=AO1P |
| DEACTIVE_AO2 | STAV=AO2P |
| HODNOTA_MEZ=XXXXXXXXXX | HODNOTA_MEZ=YYYYYYYYYY |
| HODNOTA_CAS=XXXXXXXXXX | HODNOTA_CAS=YYYYYYYYYY |
| HODNOTA_DO1=X | HODNOTA_DO1=Y |
| HODNOTA_DO2=X | HODNOTA_DO2=Y |
| HODNOTA_AO1=XXXXXXXXXX | HODNOTA_AO1=YYYYYYYYYY |
| HODNOTA_AO2=XXXXXXXXXX | HODNOTA_AO2=YYYYYYYYYY |
| ROZSAH=25-220 ROZSAH=210-520 | ROZSAH=25-220 ROZSAH=210-520 |
| STAV? | DO1=Y,DO2=Y,AO1=YYYYYYYYYY,AO2=YYYYYYYYYY, MEZ=YYYYYYYYYY,CAS=YYYYYYYYYY,KAL=YYYYYYYYYY |
| Příkaz, který aktuální stav automatu nepovoluje. | NYNI_NELZE |
| Příkaz, který není v aplikačním protokolu. | NEZNAMY_PRIKAZ |

Příloha C

Tab. 9.16C: Naměřené a vypočítané hodnoty z testování vlivu protékajícího roztoku na měření zakalení

| Č. cyklu | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | | 10 | |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Č. měření | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S |
| | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | |
| 1 | 150 | 155 | 149 | 153 | 151 | 151 | 157 | 162 | 148 | 150 | 152 | 159 | 158 | 154 | 150 | 157 | 155 | 158 | 156 | 153 |
| 2 | 151 | 155 | 148 | 154 | 149 | 149 | 156 | 162 | 147 | 153 | 153 | 154 | 158 | 152 | 152 | 156 | 155 | 157 | 157 | 154 |
| 3 | 150 | 155 | 147 | 152 | 148 | 151 | 155 | 159 | 147 | 150 | 155 | 158 | 157 | 153 | 151 | 154 | 155 | 157 | 155 | 152 |
| 4 | 151 | 156 | 148 | 153 | 148 | 151 | 155 | 160 | 146 | 151 | 153 | 156 | 156 | 153 | 152 | 153 | 155 | 156 | 157 | 151 |
| 5 | 152 | 154 | 149 | 154 | 149 | 151 | 157 | 160 | 148 | 150 | 153 | 157 | 157 | 153 | 151 | 155 | 155 | 156 | 157 | 152 |
| 6 | 152 | 155 | 150 | 153 | 149 | 151 | 156 | 158 | 148 | 151 | 155 | 156 | 156 | 151 | 151 | 153 | 155 | 155 | 157 | 150 |
| 7 | 152 | 153 | 148 | 154 | 149 | 151 | 156 | 157 | 149 | 149 | 153 | 157 | 154 | 152 | 152 | 153 | 155 | 155 | 152 | 152 |
| 8 | 152 | 155 | 149 | 152 | 150 | 148 | 156 | 159 | 147 | 150 | 154 | 157 | 152 | 152 | 151 | 155 | 155 | 157 | 149 | 151 |
| 9 | 152 | 154 | 150 | 153 | 151 | 149 | 157 | 157 | 147 | 149 | 155 | 156 | 153 | 153 | 154 | 153 | 156 | 156 | 151 | 149 |
| 10 | 151 | 153 | 148 | 152 | 153 | 148 | 157 | 157 | 149 | 147 | 156 | 155 | 155 | 151 | 153 | 155 | 155 | 157 | 153 | 151 |
| Průměr | 151 | 155 | 149 | 153 | 150 | 150 | 156 | 159 | 148 | 150 | 154 | 157 | 156 | 152 | 152 | 154 | 155 | 156 | 154 | 152 |
| Δ _z [NTU] | -4 | | -4 | | 0 | | -3 | | -2 | | -3 | | 4 | | -2 | | -1 | | 2 | |
| δ _z [%] | -2,58 | | -2,61 | | 0,00 | | -1,89 | | -1,33 | | -1,91 | | 2,63 | | -1,30 | | -0,64 | | 1,32 | |

Příloha D

Tab. 9.17D: Naměřené a vypočítané hodnoty z testování vlivu rozdílné úpravy a barvy stěn přípravku na měření zakalení

| Č. cyklu | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | | 10 | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S | Z _N | Z _S |
| | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | | [NTU] | |
| 1 | 131 | 161 | 131 | 169 | 129 | 159 | 131 | 163 | 132 | 159 | 135 | 163 | 130 | 160 | 131 | 165 | 129 | 161 | 129 | 164 |
| 2 | 131 | 162 | 132 | 169 | 128 | 159 | 134 | 164 | 131 | 159 | 136 | 162 | 129 | 159 | 131 | 165 | 130 | 161 | 130 | 162 |
| 3 | 131 | 161 | 134 | 168 | 128 | 159 | 132 | 162 | 132 | 160 | 136 | 163 | 129 | 158 | 131 | 164 | 130 | 160 | 130 | 162 |
| 4 | 131 | 162 | 134 | 168 | 129 | 158 | 131 | 162 | 131 | 160 | 136 | 163 | 129 | 159 | 132 | 164 | 130 | 160 | 129 | 163 |
| 5 | 132 | 161 | 134 | 168 | 129 | 159 | 131 | 162 | 132 | 159 | 135 | 164 | 129 | 159 | 130 | 163 | 132 | 160 | 132 | 163 |
| 6 | 131 | 162 | 134 | 169 | 128 | 159 | 133 | 162 | 133 | 160 | 136 | 164 | 130 | 159 | 130 | 163 | 132 | 159 | 130 | 163 |
| 7 | 130 | 162 | 133 | 167 | 129 | 160 | 132 | 163 | 132 | 160 | 136 | 163 | 131 | 160 | 130 | 164 | 132 | 159 | 129 | 163 |
| 8 | 132 | 161 | 133 | 167 | 128 | 160 | 132 | 163 | 131 | 161 | 136 | 163 | 132 | 159 | 131 | 165 | 132 | 159 | 129 | 162 |
| 9 | 130 | 160 | 132 | 168 | 129 | 160 | 132 | 163 | 131 | 160 | 135 | 163 | 132 | 159 | 131 | 166 | 131 | 160 | 130 | 163 |
| 10 | 131 | 160 | 133 | 169 | 130 | 159 | 132 | 163 | 131 | 160 | 135 | 163 | 131 | 159 | 131 | 164 | 131 | 161 | 130 | 162 |
| Průměr | 131 | 161 | 133 | 168 | 129 | 159 | 132 | 163 | 132 | 160 | 134 | 163 | 130 | 161 | 131 | 164 | 131 | 160 | 130 | 163 |
| Δ_z [NTU] | -30 | | -35 | | -30 | | -31 | | -28 | | -29 | | -31 | | -33 | | -29 | | -33 | |
| δ_z [%] | -18,61 | | -20,81 | | -18,84 | | -19,05 | | -17,52 | | -17,78 | | -19,25 | | -20,09 | | -18,13 | | -20,28 | |