

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

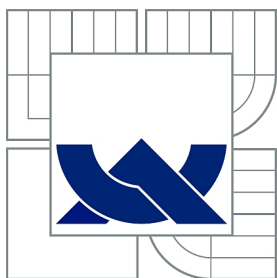
IR TEPLOMĚR S AUTOMATICKOU KOREKČÍ EMISIVITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

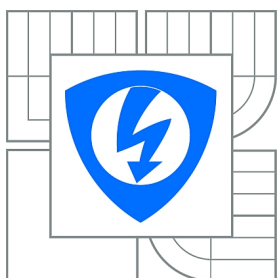
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ALEŠ DOBESCH

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

IR TEPLOMĚR S AUTOMATICKOU KOREKČÍ EMISIVITY

IR THERMOMETER WITH AUTOMATIC EMISSIVITY CORRECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

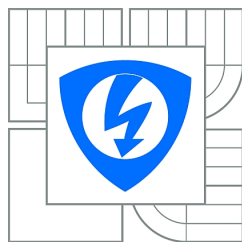
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ALEŠ DOBESCH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JURAJ POLIAK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Aleš Dobesch

ID: 115509

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

IR teploměr s automatickou korekcí emisivity

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami bezkontaktního měření teploty. Podrobně popište pojem tepelného záření a analyzujte možnosti určování hodnoty emisivity objektu.

Navrhněte zapojení dálkového měřiče teploty s automatickou korekcí hodnoty emisivity pomocí stabilizované laserové diody.

Experimentálně ověřte navrhnutý přípravek a optimalizujte ho z hlediska uživatele.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. The Feynman Lectures on Physics Including Feynman's Tips on Physics: The Definitive and Extended Edition, Benjamin-Cummings Pub Co, 2005.

[2] -, Temperature Sensors for Temperature Measurement and Process Automation Solutions [online]. Dostupné na WWW: <http://www.pyrometer.com>

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Juraj Poliak

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
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 pojednává o základních fyzikálních veličinách a zákonech týkajících se bezkontaktního měření teploty a určování emisivity těles. Nastiňuje konstrukční řešení a realizaci IR (Infra-Červeného) teploměru s možností automatické korekce emisivity. V první kapitole je vysvětlen pojem teplota a základní principy měření teploty. Druhá kapitola je zaměřena na historii a teorii bezkontaktního měření teploty, kde jsou postupně vysvětleny základní pojmy týkající se bezkontaktního měření teploty a problému určování emisivity tělesa. V následující třetí kapitole je nastíněn návrh řešení hardwarové stránky IR teploměru. Čtvrtá kapitola obsahuje popis softwarové stránky IR teploměru. Poslední pátá kapitola shrnuje poznatky z realizace bezkontaktního teploměru s automatickou korekcí emisivity a ověření funkčnosti IR teploměru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Teplota, bezkontaktní měření teploty, absolutně černé těleso, emisivita, odrazivost, laser, IR záření, difúzní povrch, mikrokontrolér, triangulace, napájení.

ABSTRACT

Diploma thesis deals with basic physical quantities and laws relating to non-contact temperature measurement and emissivity determination of solids. It describes the design and implementation of the IR (Infra-Red) thermometer often missed with automatic emissivity correction. The first chapter explains the concept of temperature and basic principles of temperature measuring. The second chapter focuses on the history and theory of non-contact temperature measurement. Gradually are explained the concepts related to non-contact temperature measurement and the problem of determining the emissivity of the body. Next third chapter describes the proposed hardware solution of IR thermometer. The fourth chapter describes a software written for the IR thermometer. The fifth and last chapter summarizes the findings and knowledge from the implementation of non-contact thermometer and measuring emissivity.

KEYWORDS

Temperature, non-contact temperature measuring, Blackbody, emissivity, reflectivity, laser, IR radiation, diffuse surface, microcontroller, triangulation, power supply.

DOBESCH, A. *IR teploměr s automatickou korekcí emisivity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Juraj Poliak.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma IR teploměr s automatickou korekcí emivity jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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 nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

..... (podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce ing. Juraji Poliakovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále patří poděkování firmě Melexis Semiconductors, Analog Devices, Linear Technology a Texas Instruments za poskytnutí dílčích vzorků potřebných ke konstrukci prototypu IR teploměru. Zvláštní poděkování patří Ing. Zdeňku Kinclovi, Bc. Michalu Sedláčkovi a Bc. Davidu Semrádovi.

V Brně dne

..... (podpis autora)

Výzkum realizovaný v rámci této diplomové práce byl finančně podpořen projektem
CZ.1.07/2.3.00/20.0007 **Wireless Communication Teams**
operačního programu **Vzdělávání pro konkurenceschopnost**.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Finanční podpora byla poskytnuta Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky.

Obsah

1.	Teplota	7
1.1.	Definice teploty	7
1.2.	Měření teploty	9
2.	Teorie bezkontaktního měření teploty	14
2.1.	Historie bezkontaktního měření teploty	14
2.2.	Fyzikální zákony a jevy v bezkontaktním měření teploty	16
3.	Koncept a návrh hardwaru bezkontaktního IR teploměru	27
3.1.	Řídicí a uživatelské rozhraní	27
3.2.	Měření emisivity	29
3.3.	Měření teploty	48
3.4.	Napájení	51
3.5.	Návrh šasi teploměru	54
4.	Řídicí program	56
4.1.	Hlavní program	56
4.2.	Knihovny IR teploměru a komunikační protokol SMBus	59
5.	Realizace a ověření funkčnosti návrhu IR teploměru	64
5.1.	Návrh desky plošných spojů	64
5.2.	Oživení a analýza bloku měření emisivity	64
5.3.	Oživení bloku teploty a napájení	68
5.4.	Cenová kalkulace	68
5.5.	Naměřené údaje	69
6.	Závěr	72

Seznam obrázků

1.1. Carnotův cyklus	8
1.2. Srovnání Kelvinovy, Celsiovy a Fahrenheitovy stupnice	8
1.3. Kapalínový teploměr	9
1.4. Princip bimetalového teploměru	9
1.5. Princip plynového teploměru	10
1.6. Tlustovrstvý odporový teploměr	10
1.7. Termoelektrický teploměr	10
1.8. Měření teploty pomocí termistoru	11
1.9. Princip jasového pyrometru	12
2.1. Spektrum elektromagnetického záření	14
2.2. Model absolutně černého tělesa	16
2.3. Spektrální hustota vyzařování černého, šedého a reálného tělesa	17
2.4. Závislost spektrální hustoty vyzařování černého tělesa na vlnové délce	18
2.5. Grafické znázornění emisivity, odrazivosti a transmise	21
2.6. Zrcadlový odraz	23
2.7. Smíšený odraz	23
2.8. Rayleighova podmínka pro drsnost povrchu	25
2.9. Rozptylový odraz	26
3.1. Blokové schéma	27
3.2. Pouzdro TQFP ATmega324P	28
3.3. Grafický LCD	29
3.4. Dynamika bezkontaktního měření teploty [7]	29
3.5. Blok měření emisivity	30
3.6. Energetická bilance optického spoje	33
3.7. Definice záře	34
3.8. Graf závislosti výstupního výkonu IR laserové diody na budícím proudu	37
3.9. Schéma zapojení vysílací části měření emisivity	38
3.10. Spektrální výkonová hustota šumu	38
3.11. Schéma zapojení optického přijímače	39
3.12. Amplitudová a fázová charakteristika optického přijímače	41
3.13. Šumový model optického přijímače	42
3.14. Extrapolací metoda Time stretching	45
3.15. Princip triangulace	46
3.16. Senzor SHARP	47
3.17. Graf závislosti výstupního napětí senzoru SHARP na vzdálenosti	47
3.18. Proložení funkce vzdálenosti senzoru SHARP	48
3.19. Senzor MLX90614	49
3.20. Zorné pole IR senzoru	50
3.21. Blok měření teploty	51
3.22. Napájecí zdroj s primární baterií	52
3.23. Napájecí zdroj se sekundárním článkem	53
3.24. 3D model IR teploměru	54

4.1. Rozdělení a pohyb v menu IR teploměru	56
4.2. Vývojový diagram hlavní funkce	57
4.3. Protokol čtení a zápisu senzoru MLX90614	60
5.1. Graf závislosti detekovaného napětí na vzdálenosti	66
5.2. Úhlová závislost senzoru MLX90614	69
5.3. Porovnání kontaktního a bezkontaktního měření s korekcí	70
5.4. Porovnání měření teploty dvou materiálů s rozdílnou emisivitou	71
6.1. Schéma zapojení IR teploměru - Řídicí jednotka	78
6.2. Schéma zapojení IR teploměru - Napájecí jednotka	79
6.3. DPS řídicí jednotky TOP	80
6.4. DPS řídicí jednotky BOTTOM	80
6.5. Osazení DPS řídicí jednotky TOP	81
6.6. Osazení DPS řídicí jednotky BOTTOM	81
6.7. DPS napájecí jednotky TOP	82
6.8. DPS napájecí jednotky BOTTOM	82
6.9. Osazení DPS napájecí jednotky TOP	82
6.10. Osazení DPS napájecí jednotky BOTTOM	82
6.11. Výkres předního panelu	83
6.12. Fotografie 1 - Experimentální měření odrazivosti	84
6.13. Fotografie 2 - Experimentální měření teploty	84
6.14. Fotografie 3 - DPS IR teploměru + přední panel	85
6.15. Fotografie 4 - IR teploměr	85

Seznam tabulek

1.	Hodnoty emisivity pro základní materiály	22
2.	Odhad proudového odběru teploměru	51
3.	Porovnání SMBus a I2C	59
4.	Hodnoty emisivity měřených materiálů	65
5.	Hodnoty detekovaného napětí v závislosti na vzdálenosti	66
6.	Cenový přehled cen komponentů	68

Seznam algoritmu

1.	Struktura Menu_States	58
2.	Funkce “uint16_t read_sensor(unsigned char adress)”	60
3.	Funkce “void battery_gauge_init(void)”	61
4.	Funkce “void lcd_init(void)”	62
5.	Funkce “void draw_pixel(uint8_t x, uint8_t y)”	62
6.	Funkce “void lcd_char (unsigned char ch, unsigned char inv)”	63

Úvod

Bezkontaktní měření teploty je již dlouhou dobu známá a využívaná metoda a v posledních letech nachází v praxi stále větší uplatnění. Setkat se sní je možné především ve strojírenství, metrologii, chemii, zdravotnictví, metalurgii, dokonce i v oborech jako je gastronomie. Bezkontaktní metoda představuje jisté výhody a přednosti oproti klasickým kontaktním způsobům měření teploty, jako je rychlost odezvy, možnost měření pohybujících se předmětů, relativní velké měřené teplotní rozmezí, či neovlivňování měřeného předmětu.

V dnešní době se na trhu objevuje nepřeborná řada bezdotykových teploměrů, jak malých a levných, dostupných běžnému uživateli, tak profesionálních za nemalou pořizovací cenu. Jedno však mají často společné. Tím je absence interní knihovny emisivity nejběžnějších materiálů nebo možnost automatické korekce emisivity. Pokud to dané zařízení dokáže, je příliš drahé. Obvyčejné bezdotykové teploměry mají pevně stanovenou hodnotu emisivity, nejčastěji je tato hodnota 0,95. Lepší přístroje sice mají možnost nastavení hodnoty emisivity v plném rozsahu, ale pořád chybí pro uživatele přijatelnější cesta, vybrat pouze daný materiál na displeji IR teploměru nebo lépe, emisivitu změřit pro daný měřený teplotní rozsah, či kontinuálně korigovat její hodnotu. Emisivita jakožto teplotně závislá vstupní veličina hraje podstatnou roli u bezdotykového měření teploty a ovlivňuje zásadně výslednou přesnost bezdotykového měření teploty.

Cílem této práce je navrhnout, zkonstruovat a naprogramovat zařízení, které umožní uživateli vybírat hodnotu emisivity z vnitřní knihovny zařízení podle typu materiálu, nastavit emisivitu klasicky číselně podle tabulek nebo použít funkci automatické korekce emisivity. To vše realizovat jednoduše a za přijatelnou cenu.

Navrhované řešení takového bezdotykového IR teploměru předpokládá použití na trhu běžně dostupných elektronických součástek. Integrovaného infra-termočláňkového senzoru pro bezdotykové měření teploty, zahrnující digitální signálový procesor umožňující zpracování signálu z infra-termočláňku, kalibraci senzoru a komunikaci se senzorem. Ke korekci emisivity měřeného objektu použít metodu měření odrazivosti pomocí stabilizované laserové diody, na základě které je následně vypočtena hodnota emisivity. Pro komunikaci, vyhodnocení a zobrazení naměřených dat použít řídicí mikrokontrolér spolu s grafickým LCD (Liquid Crystal Display) a jednoduchým ovládacím rozhraním.

1. Teplota

1.1. Definice teploty

Termodynamická teplota je centrálním pojmem fyzikálního odvětví zvaného termodynamika a je jednou ze sedmi základních veličin SI soustavy s jednotkou 1 Kelvin. Je to stavová veličina, která určuje stav termodynamické rovnováhy v soustavě těles izolované od okolního prostředí, ve které neprobíhají žádné makroskopické jevy a všechny veličiny popisující tuto soustavu jsou nezávislé na čase. Teplotu lze definovat pomocí druhého termodynamického zákona a tzv. Carnotovy věty, která z něj vyplývá. Na obrázku 1.1 je názorná ukázka Carnotova cyklu. Účinnost všech vratných Carnotových cyklů pracujících mezi dvěma teplotami $\vartheta_1 < \vartheta_2$ je shodná. Lze ji zapsat jako funkci pouze těchto dvou teplot podle vztahu 1.1:

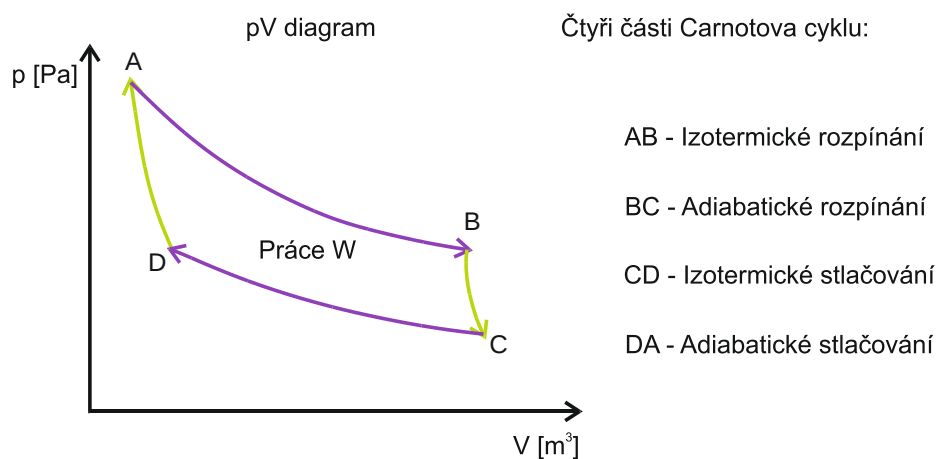
$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = \frac{F(\vartheta_1) - F(\vartheta_2)}{F(\vartheta_1)} \quad [-], \quad (1.1)$$

kde η je účinnost Carnotova cyklu $[-]$, $|Q_1|$ je teplo přijaté od ohřívače $[J]$, $|Q_2|$ je teplo předané chladiči $[J]$, $F(\vartheta_n)$ je funkce obecné teploty $[K]$.

Funkci $T = F(\vartheta)$ nazval Lord Kelvin (William Thomson (1824 - 1907)) termodynamickou teplotou a namísto závislosti na obecné teplotě ϑ ji definoval právě pomocí vztahu pro účinnost přepsaného do tvaru 1.2:

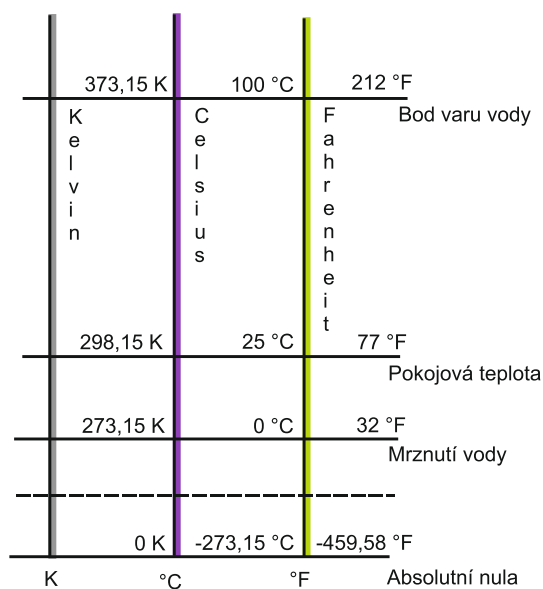
$$\frac{|Q_1|}{|Q_2|} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (1.2)$$

kde poměr dvou termodynamických teplot T_1 a T_2 je roven poměru tepla odevzdaného chladiči a tepla přijatého od ohřívače při vratném Carnotově cyklu, pracujícím mezi těmito dvěma teplotami. Pomocí dvou bodů lze takto definovat celou termodynamickou teplotní stupnici. Jeden z bodů je nulová termodynamická teplota a je dána implicitně jako teplota chladiče, při které má vratný Carnotův cyklus účinnost 100 %. Této teploty ovšem podle třetí věty termodynamické nebude nikdy dosaženo.



Obrázek 1.1: Carnotův cyklus

Jak již bylo řečeno, jednotkou termodynamické teploty je 1 Kelvin [K] a je definován jako $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody. Nejvíce používanou teplotní stupnicí je Celsiova s jednotkou ve stupních Celsia [°C], případně Fahrenheitova stupnice [°F]. Na následujícím obrázku 1.2 je vidět grafické srovnání tří teplotních stupnic včetně stupnice Kelvinovy [1, 2].



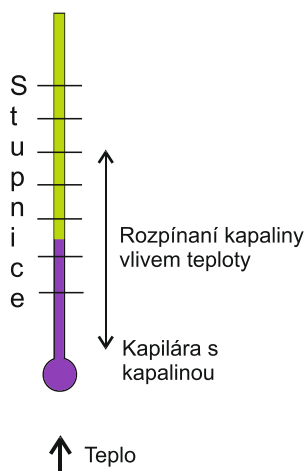
Obrázek 1.2: Srovnání Kelvinovy, Celsiovy a Fahrenheitovy stupnice

1.2. Měření teploty

Obor zabývající se měřením teploty se nazývá termometrie. K měření teploty slouží zařízení známé jako teploměr. V současné době je možné teploměry rozdělit podle funkčního principu následovně:

Kapalinový teploměr

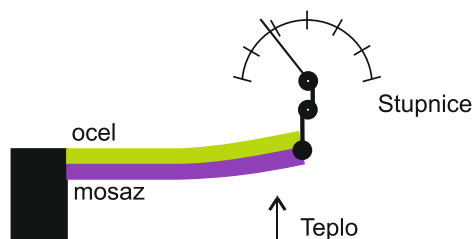
Kapalinový teploměr je obyčejný typ teploměru, kterým je možné měřit teplotu pomocí rozpínání kapaliny v tenké skleněné trubičce. Skleněná nádobka obsahuje kapalinu, nejčastěji rtuť nebo obarvený líh, která je velmi citlivá na změny teploty. Rtuť se používá pro vyšší teploty (maximální rozsah -39 až 357 °C, tj. mezi body tání a varu), líh pak pro teploty nižší. Na obrázku 1.3 je vidět ukázka kapalinového teploměru po funkční stránce.



Obrázek 1.3: Kapalinový teploměr

Bimetalový teploměr

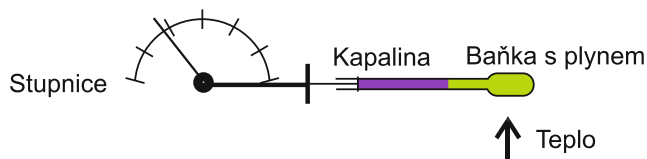
Zde se k měření teploty využívá bimetalový (dvojkový) pásek složený ze dvou kovů s různými teplotními součiniteli délkové roztažnosti α . Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručku přístroje. Schéma takového teploměru je vidět na následujícím obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Princip bimetalového teploměru

Plynový teploměr

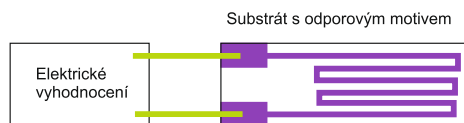
U plynového teploměru se k měření teploty využívá závislosti tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu. Na obrázku 1.5 je znázorněn princip funkce plynového teploměru.



Obrázek 1.5: Princip plynového teploměru

O odporový teploměr

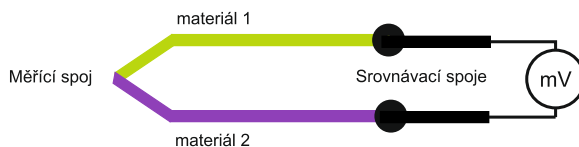
Základním materiálem odporového teploměru je čistý kov, například platina, měď, nikl a další. U odporového teploměru se využívá závislosti odporu kovu na teplotě. Nejčastěji se používá platina pro své chemické a fyzikální vlastnosti. Na obrázku 1.6 je odporový teploměr vytvořený tlustovrstvou technologií. Odporovou pastou je motiv natisknutý na základním nosném substrátu.



Obrázek 1.6: Tlustovrstvý odporový teploměr

Termoelektrický teploměr

K měření teploty se využívá termoelektrického jevu. Elektrony, které jsou nositelem elektrického proudu, se významně podílí na vedení tepla. Základem termoelektrického teploměru je termoelektrický článek, který je sestaven ze dvou materiálů (kovových vodičů nebo polovodičů) elektricky vodivě spojených. Pokud jsou teploty měřicího spoje a srovnávacích spojů rozdílné, objeví se mezi srovnávacími spoji elektrické napětí. Ukázka takového teploměru je na následujícím obrázku 1.7.



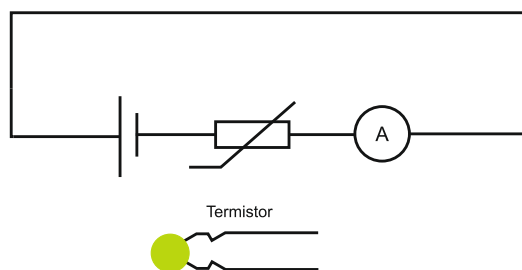
Obrázek 1.7: Termoelektrický teploměr

Polovodičový teploměr

U polovodičového teploměru se využívá závislosti charakteristik polovodičového prvku (zesilovací činitel, napětí přechodu P-N) na teplotě. Z hlediska použitého senzoru se tyto teploměry dají rozdělit na:

- Polykrystalické - Termistory
- Monokrystalické bez P-N a s P-N přechodem

Na obrázku 1.8 je ukázka zapojení termistoru v měřícím obvodu.

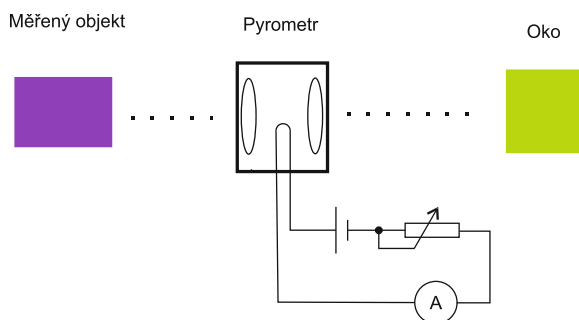


Obrázek 1.8: Měření teploty pomocí termistoru

Infračervený a jasový pyrometr

Jasový pyrometr

Je to přístroj pro subjektivní měření teploty, kde lidským okem je pozorován jas objektu a porovnáván s jasem elektricky rozžhaveného vlákna. Elektrický proud je měřen ampérmetrem, který je cejchován jako teplotní stupnice. Jasový pyrometr pracuje ve viditelném rozmezí elektromagnetického spektra, a proto své uplatnění najde jen v rozmezí teplot 700 °C až 2300 °C. Na obrázku 1.9 je znázorněn princip jasového pyrometru.



Obrázek 1.9: Princip jasového pyrometru

Infračervený pyrometr

Pokud je potřeba měřit i nižší teploty, což je v praxi samozřejmost, je potřeba použít senzor, který je schopen detekovat záření větších vlnových délek. Toto záření spadá už do IR oblasti elektromagnetického spektra. Takové senzory měří teplotu na bázi IR záření a je možné je rozdělit následovně:

Tepelné U tepelných senzorů je měřen ohřev senzoru, vlivem dopadajícího fokusovaného IR svazku. Podle principu detekce ohřevu lze senzory dále rozdělit:

- **Infra-termočláňkové (Thermopile)** - Infra-termočláňkové senzory reagují přímo na tepelné vyzařování objektů. Senzory umožňují dálkové měření teploty s rozlišením 1 až 0,1 °C. Přes optický filtr pouzdra senzoru prochází IR záření, které dopadá na IR citlivé konce skupiny v sérii zapojených termočláňků, které převádí záření na teplo. Samotné termočláňky senzoru jsou nejčastěji vyrobeny tenkovrstvou technologií kombinací materiálů Bi, Sb, Al, Au. Na výstupu je výstupní napětí úměrné množství intenzity dopadajícího IR záření. Součástí senzoru navíc obvykle bývá referenční termistor sloužící ke kompenzaci vlivu okolní teploty. Konstrukčně jsou tyto senzory většinou zapouzdřené v pouzdru typu TO (Transistor Outline) s jedním nebo více druhy opticky odlišnými okénky.
- **Pyroelektrické senzory** - Pyroelektrické senzory reagují na změny tepelného vyzařování vlivem spontánní změny polarizace pyroelektrika při změně teploty. Sensor se dá charakterizovat jako kondenzátor, na jehož elektrodách se při změně polarizace pyroelektrika indukuje elektrický náboj. Typickým materiálem pyroelektrika je titaničitan a

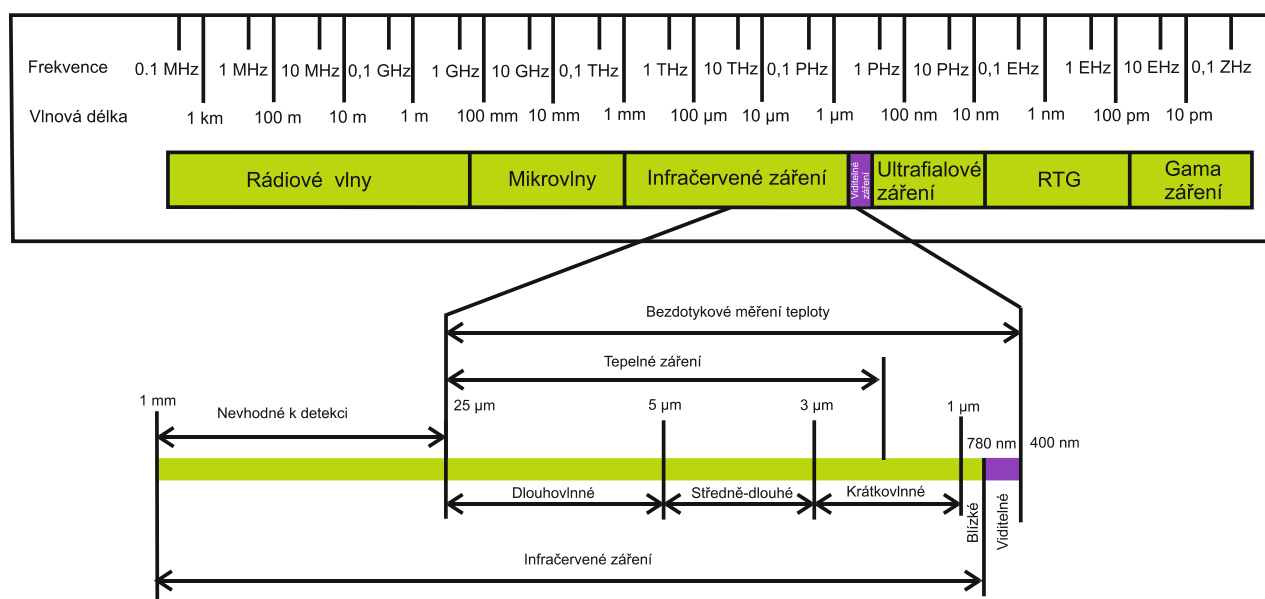
zirkoničitan olovnatý. Výhodou pyroelektrických oproti infra-termočláňkovým senzorům je vyšší citlivost.

- **Odporové (Bolometry)** - Elektrický odpor se mění v závislosti na teplotě podobně jako u termistoru. Změna teploty je způsobená pohlcováním IR záření. Tedy změna odporu je závislá na množství intenzity dopadajícího IR záření. Bolometr musí být perfektně izolován od okolního prostředí. Materiálem bolometru jsou například oxidy Ti, Mn a Mg. Výhodou odporových senzorů je především vysoká citlivost.

Kvantové Při absorpci fotonu elektronem z valenčního pásu polovodiče dojde k excitaci elektronu z valenčního do vodivostního pásu a následně ke vzniku páru elektron – díra [3].

2. Teorie bezkontaktního měření teploty

Princip bezdotykového měření teploty je založen na podstatě, že všechny objekty, jejichž teplota je vyšší než 0 K, vyzařují elektromagnetické záření v určité části elektromagnetického spektra. Záření je následně zachycováno pyrometrickým senzorem, který převádí toto záření na elektricky měřitelnou veličinu. Na obrázku 2.1 je rozdělení spektra elektromagnetického záření s vyznačením oblasti využívané pro bezdotykové měření teploty. Zde patří oblast v rozmezí vlnových délek 0,4 - 25 μm . Uvedené rozsahy vlnových délek pokrývají měření teplot v rozmezí od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jak je patrné, toto záření spadá z určité části do viditelné oblasti, z větší části pak do oblasti spektra IR, které odpovídá vlnovým délkám od 0,78 μm do 1 mm.



Obrázek 2.1: Spektrum elektromagnetického záření

2.1. Historie bezkontaktního měření teploty

Může být překvapující, že se radiační termometrie používá již po tisíce let. Prvním prakticky používaným teploměrem, pracujícím na principu měření IR záření bylo lidské oko. To obsahuje čočku, která soustřeďuje emitované záření na sítnici, která je zářením podrážděna a následně vysílá signál do mozku, který slouží jako indikátor záření. Pokud je mozek zkušeností správně kalibrován, převádí tento signál na hodnotu teploty.

Fyzik Isaac Newton (1670-1672) studoval bílé světlo a zjistil, že je možné jej rozložit do barevného spektra. Následně dospěl k názoru, že světlo je tvořeno malými částicemi (korporulkami). V roce 1678 Christian Huygens (1629-1695) popsal vlnové vlastnosti světla a položil tak základy pro Maxwellovu teorii elektromagnetického záření. IR záření bylo objeveno v roce 1800 v Anglii vědcem a astronomem Frederickem Williamem Herschelem (1738-1822) jeho pokusem pomocí skleněných hranolů a rtuťového teploměru. V roce 1864 konečně James Clark Maxwell (1831-1879) odvodil rovnice popisující základní zákony elektromagnetismu.

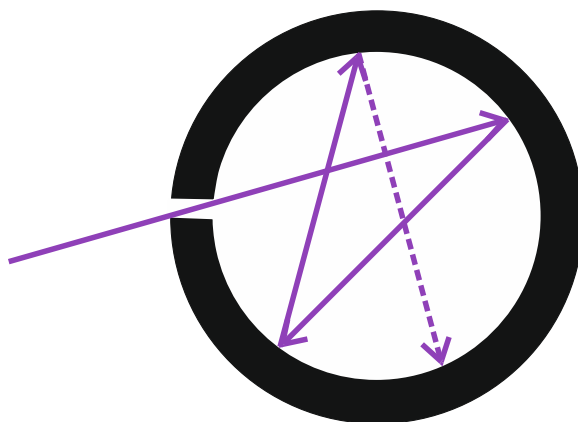
Elektromagnetické vlny mají definované frekvence, které určují polohu zdroje v elektromagnetickém spektru. Zde jsou zahrnuty rádiové vlny až po gama záření. Toto rozdělení je na obrázku 2.1. V roce 1859 vytvořil Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) obecnou teorii emise a radiace známou jako Kirchhoffův-Bunsenův zákon. Ten říká, že schopnost látky emitovat záření je shodná se schopností jej absorbovat při shodné teplotě. Na základě tohoto zákona Kirchhoff později odvodil koncepci absolutně černého tělesa. V roce 1884 bývalý žák rakouského fyzika Josefa Stefana (1835-1893) Ludwig Boltzman (1844-1906) odvodil na základě termodynamických principů a Maxwellovy elektromagnetické teorie Stefanem experimentálně vysledovaný zákon vyzařování absolutně černého tělesa. Tento zákon je známý jako Stefanův-Boltzmanův zákon a tvoří teoretický základ radiační termometrie. Dalším stěžejním bodem byl pokus fyzika Wilhelma Wiena (1864-1928), který v roce 1893 zjistil, že špičková hodnota intenzity záření dané vlnové délky je přímo úměrná energii a nepřímo úměrná absolutní teplotě. Jestliže se teplota zvyšuje, nezvyšuje se jen celkové množství záření v souladu se Stefan-Boltzmannovým zákonem, ale hodnota vlnové délky pro maximální intenzitu záření se snižuje. To ovšem platí jen u malých vlnových délek. Největší přelom učinil fyzik Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), který našel vztah k popisu záření absolutně černého tělesa na jakékoliv vlnové délce a teplotě. Vyslovil zásadní myšlenku, že světlo a teplo není vyzařováno ve spojitém spektru, ale je to energie vyzařována v oddělených jednotkách (kvantech). Planck objevil univerzální konstantu - Planckovu konstantu, která se využívá pro výpočet spektra. Planck uvedl svou kvantovou teorii a změnil tak základní rámec fyziky.

V roce 1901 byl podán první patent týkající se radiační termometrie. Přístroj používal termoelektrické čidlo, dával elektrický výstupní signál a byl schopen pracovat bez obsluhy. V roce 1931 byly na trh uvedeny první komerčně dostupné radiační termometry. První moderní radiační teploměry byly dostupné až po druhé světové válce. Prvními infračervenými kvantovými detektory, široce používanými v průmyslové termometrii, byly fotodetektory se sirníkem olovnatým. Mnohé infračervené radiační teploměry používají termoelektrické články jako detektory, které jsou citlivé na široké spektrum záření [4].

2.2. Fyzikální zákony a jevy v bezkontaktním měření teploty

Absolutně černé těleso

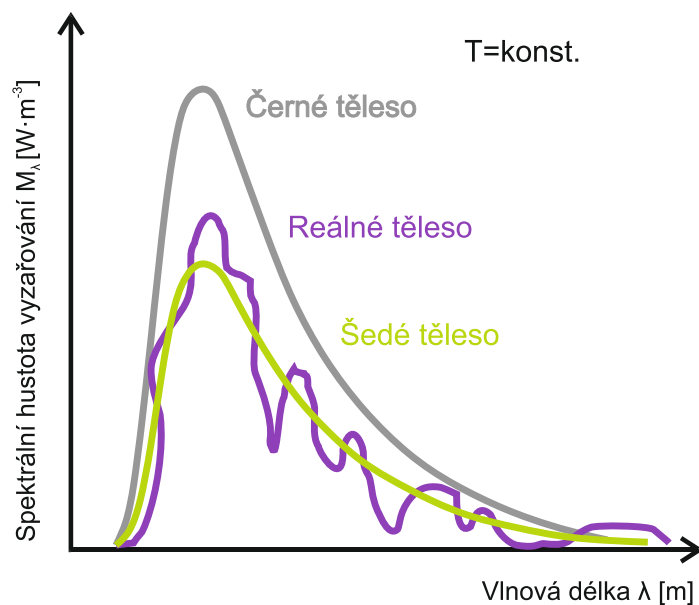
Absolutně černé těleso, černé těleso nebo černý zářič je ideální fyzikální těleso, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek, dopadající na jeho povrch. Ze slova ideální je zřejmé, že takové těleso v praxi neexistuje. Absolutně černé těleso je současně ideální zářič, ze všech možných těles stejné teploty vysílá největší možné množství zářivé energie. Celkové množství energie, které se vyzáří z povrchu absolutně černého tělesa za jednotku času a rozložení intenzity záření podle vlnových délek závisí jen na jeho teplotě. Emisivita takového tělesa je rovná jedné. Absolutně černé těleso je možno aproximovat dutým tělesem s velmi malým otvorem, které je vidět na obrázku 2.2. Uvedené těleso slouží jako model, který se svými vlastnostmi velice blíží absolutně černému tělesu. Jestliže záření projde malým otvorem do dutiny, jejíž vnitřní povrch je černý a matný, pak se po několika odrazech pohltí – tzn., že se malý otvor navenek jeví jako absolutně černé těleso – veškeré záření projde otvorem dovnitř, ale žádné záření otvorem nevyjde ven. Experimentálně se zjistilo, že množství vyzářené energie závisí na teplotě a je tím větší, čím je teplota tělesa vyšší [5].



Obrázek 2.2: Model absolutně černého tělesa

Modely reálných těles

Na obrázku 2.3 je vidět spektrální hustota vyzařování M_λ absolutně černého, šedého a reálného tělesa v závislosti na vlnové délce λ .

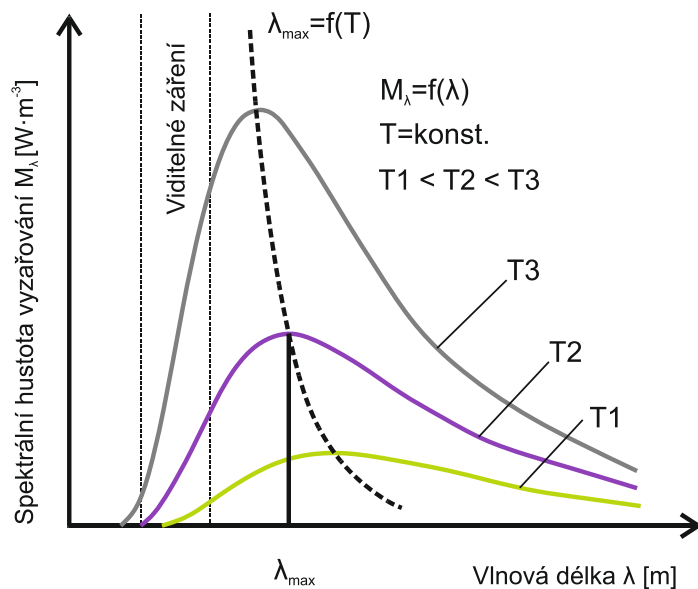


Obrázek 2.3: Spektrální hustota vyzařování černého, šedého a reálného tělesa

- Šedé těleso - je takové těleso, jehož emisivita je menší než jedna, ale není závislá na frekvenci.
- Selektivní zářič - emisivita selektivního zářiče je funkcí vlnové délky záření. Každý skutečný předmět se ve skutečnosti chová jako selektivní zářič. V řadě případů je ale možné si vystačit s modelem šedého tělesa [1].

Wienův posunovací, Stefanův-Boltzmanův a Planckův vyzařovací zákon

Při určité teplotě T , černé těleso vyzařuje do okolí elektromagnetické vlnění různých vlnových délek. Tato vlnění nemají stejnou intenzitu. To je možné vidět na následujícím obrázku 2.4 grafu funkce $M_\lambda = f(\lambda, T)$. Veličina M_λ neboli spektrální hustota vyzařování určuje, jaká část celkové energie vyzářené zdrojem za 1 s přísluší záření o vlnové délce λ při teplotě T .



Obrázek 2.4: Závislost spektrální hustoty vyzařování černého tělesa na vlnové délce

Celkovou energii, kterou zdroj vyzáří za 1 s, charakterizuje celková intenzita M_e tepelného záření černého tělesa, což je celková energie vyzářena plochou 1 m^2 zdroje. Její hodnotu určuje Stefanův-Boltzmannův zákon podle vztahu 2.1:

$$M_e = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}], \quad (2.1)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta $[\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$.

Na obrázku 2.4 M_e představuje velikost celkové plochy vymezené grafem funkce M_λ . Ze Stefanova-Boltzmannova zákona vyplývá, že energie vyzařována černým tělesem se s rostoucí teplotou prudce zvětšuje. Pro spektrální hustotu intenzity vyzařování platí při konstantní teplotě vztah 2.2:

$$M_\lambda = \frac{\Delta M_e}{\Delta \lambda} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (2.2)$$

kde λ je vlnová délka [m].

Dále je z obrázku 2.4 vidět, že při vyšší teplotě je celková vyzářená energie větší a největší hodnota M_λ je posunuta ke kratším vlnovým délkám. Nejkratší vlnové délce $\lambda_{\max}$ odpovídá záření, které má při dané teplotě T největší intenzitu. Tím je vysvětlen jev, kdy při nižších teplotách se zahřáté těleso jeví jako červené, při dalším zahřívání těleso získává barvu žlutou, následně bílou, což je důsledek zastoupením všech viditelných vlnových délek. U nejvyšších teplot se bílá mění v barvu modrobílou.

Vlnová délka záření $\lambda_{\max}$, na které je černým tělesem vyzařováno s největší intenzitou, je tím kratší, čím větší je termodynamická teplota T tělesa. Toto potvrzuje spojnice vrcholů křivek na obrázku 2.4. Tato závislost je nazývána jako Wienův posunovací zákon podle vztahu 2.3:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad [\text{m}], \quad (2.3)$$

kde $\lambda_{\max}$ je maximální vlnová délka [m], b je Wienova konstanta [$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$].

Fyzikové se také pokusili nalézt vztah pro funkci M_λ , který určuje tvar křivky na obrázku 2.4. Na základě představ klasické fyziky však vycházelo, že by se podíl energie připadající na kratší vlnové délky měl stále zvětšovat. To je ovšem v rozporu s experimentálním zjištěním, že při $\lambda \ll \lambda_{\max}$ černé těleso prakticky nevyzařuje. Zákonitosti záření černého tělesa objasnil až M. Planck, který zavedl předpoklad z hlediska klasické fyziky nepochopitelný. Podle jeho teorie černé těleso nevyzařuje energii spojitě, ale v určitých kvantech. Velikost těchto kvant závisí na frekvenci záření podle následujícího vztahu 2.4:

$$E = h \cdot f \quad [\text{J}], \quad (2.4)$$

kde E je energie [J], f je frekvence záření [Hz], h je Planckova konstanta [$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$].

Na základě předešlých poznatků M. Planck odvodil vztah 2.5 vyjadřující intenzitu záření černého tělesa v závislosti na frekvenci známý jako Planckův vyzařovací zákon:

$$dI = \frac{\hbar}{\pi^2 \cdot c^2} \cdot \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} \cdot d\omega, \quad (2.5)$$

kde ω je úhlová frekvence [s^{-1}], I je intenzita záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], $\hbar$ je redukovaná Planckova konstanta [$\hbar = h/(2 \cdot \pi) \text{ J} \cdot \text{s}$], c je rychlost světla ve vakuu [$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$], k Boltzmannova konstanta [$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$] [1].

Formy přenosu tepla

Kondukce

Kondukce představuje přenos tepelné energie skrz těleso nebo více těles při vzájemném kontaktu těchto těles.

Konvekce

Během konvekce dochází k přenosu tepelné energie z pevného tělesa na plyn. Typickým příkladem je zahřívající se vzduch v okolí teplého tělesa.

Záření

U záření dochází k přenosu tepelné energie z objektu plynného, pevného, či tekutého formou elektromagnetického záření. Všechna tělesa v praxi vyzařují tepelnou energii a většina této energie spadá právě do oblasti IR záření.

Kirchhoffův zákon pro záření

Poměr intenzity vyzařování M_e k absorpci α závisí pouze na absolutní teplotě tělesa. Pro úhrnné záření ho lze vyjádřit vztahem 2.6, který říká, že tento podíl je funkcí jediné proměnné T a je tudíž nezávislý na vlastnostech tělesa:

$$\frac{M_e}{\alpha} = f(T), \quad (2.6)$$

kde α je bezrozměrný koeficient absorpce[–].

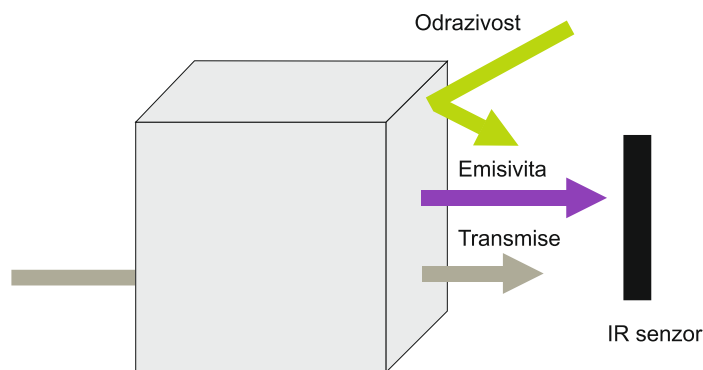
Dlouhovlnné IR vycházející z objektu nacházejícího se v zorném poli, se skládá ze složek emisivity ε , odrazivosti ρ a transmise τ . Na obrázku 2.5 je vidět grafické znázornění těchto složek. Jejich součet je vždy roven jedné (100 %) podle vztahu 2.7:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1. \quad (2.7)$$

Jelikož transmise v praxi zaujímá jen velmi malou roli, dá se zanedbat. Předchozí vzorec je zjednodušen pouze na součet složky emisivity a odrazivosti podle vztahu 2.8:

$$\varepsilon + \rho = 1. \quad (2.8)$$

Z předchozího vztahu následně plyne, že čím je emisivita nižší, tím vyšší je podíl odraženého IR záření.



Obrázek 2.5: Grafické znázornění emisivity, odrazivosti a transmise

Emisivita

Emisivita ε je bezrozměrná veličina, charakterizující schopnost tělesa emitovat IR záření. Je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa H_E k intenzitě vyzařování absolutně černého H_{EO} tělesa o stejné teplotě podle vztahu 2.9:

$$\varepsilon = \frac{H_E(T)}{H_{EO}(T)} \quad [-], \quad (2.9)$$

kde H_E je intezita vyzařování reálného tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a H_{EO} je intezita vyzařování absolutně černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Hodnota emisivity závisí na materiálu a teplotě objektu. V tabulce 1 je přehled hodnot emisivity pro základní materiály. Emisivita absolutně černého tělesa, jak již bylo zmíněno

dříve je rovna jedné. U reálných těles je vždy menší, než je u absolutně černého tělesa. Emisivita tělesa je pro daný materiál a dané podmínky konstantní. Přesné měření emisivity ovšem závisí na mnoha faktorech, jako například na:

- úhlu odklonu od normály povrchu
- teplotě objektu
- barvě povrchu
- struktuře povrchu

Materiál	Emisivita ϵ
Absolutně černé těleso	1,00
Alobal	0,04
Beton	0,85
Bukové dřevo	0,88
Guma šedá	0,94
Lidská pokožka	0,98
Ocel 301	0,54 - 0,63
Papír	0,93
Plast	0,91
Rtuť	0,10
Sklo	0,92 - 0,94
Voda	0,95 - 0,963
Železo	0,87 - 0,95

Tabulka 1: Hodnoty emisivity pro základní materiály

Odrazivost

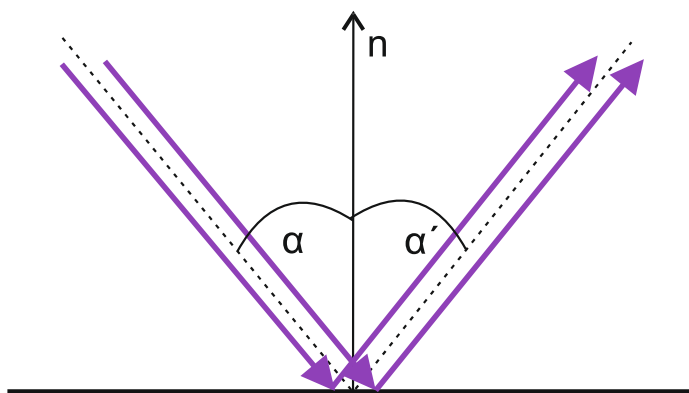
Odrazivost ρ je měřítko pro schopnost materiálu odrážet záření, v tomto případě IR záření. Závisí na charakteru povrchu, teplotě a druhu materiálu. Zpravidla odrážejí silněji hladké, leštěné povrchy, než hrubé matné povrchy stejného materiálu. Odrazivost se pohybuje v rozmezí 0 až 1. Odrazivost jakožto bezrozměrná veličina se vypočítá podle vztahu 2.10:

$$\rho = \frac{I}{I_0} \quad [-], \quad (2.10)$$

kde I je intenzita záření odražená od ozářeného povrchu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a I_0 je intenzita záření dopadající na daný povrch [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

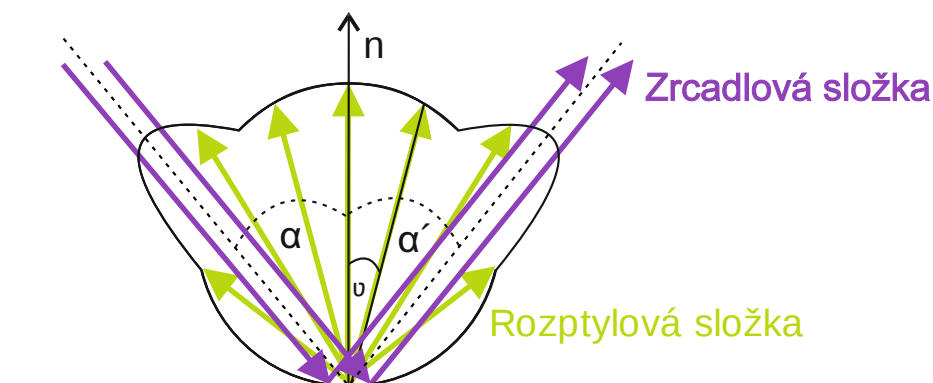
U odrazivosti lze rozlišit tři základní typy odrazu. První a nejjednodušší odraz je tzv. zrcadlový, který se řídí zákonem odrazu dle vztahu 2.11. Úhel dopadajícího záření ke kolmici plochy je shodný s úhlem odraženého záření. Příklad takového odrazu je vidět na následujícím obrázku 2.6. Dopadající záření je odraženo od povrchu pod stejným úhlem bez jakéhokoliv rozptylu.

$$\alpha = \alpha'.$$
(2.11)



Obrázek 2.6: Zrcadlový odraz

Dalším typem odrazu je odraz rozptylový. Ten se řídí dle Lambertova zákona a bližší pohled na něj bude popsán v následující kapitole, jelikož se jedná o stěžejní část této práce. Posledním typem odrazu je odraz smíšený. Ten kombinuje vlastnosti obou předchozích druhů odrazů a v praxi se takhle chová většina povrchů. Zobrazení takového odrazu je na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Smíšený odraz

Transmise

Transmise τ je měřítko pro schopnost materiálu předat (vpustit) IR záření. Transmise τ závisí na druhu a tloušťce materiálu. Většina materiálů je pro dlouhovlnné infračervené záření netransmisní, to znamená nepropustné. Transmise je bezrozměrná veličina a její výpočet odpovídá zjednodušenému vztahu 2.12 [6]:

$$\tau = \frac{I_V}{I} \quad [-], \quad (2.12)$$

kde I_V je intenzita záření pohlcená povrchem $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ a I je intenzita záření dopadající na daný povrch $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$.

Lambertův zákon

Lambertův nebo taky někdy nazývaný Kosinův zákon říká, že zářivost ΔI_ϑ izotropního rovinného plošného zdroje v každém jeho bodě klesá s kosinem úhlu odklonu od kolmice k ploše zdroje. Zdroje zářící podle Lambertova zákona se nazývají kosinové. Matematické vyjádření Lambertova zákona je podle vztahu 2.13:

$$\Delta I_\vartheta = \Delta I_n \cos(\vartheta) \quad [\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}], \quad (2.13)$$

kde ΔI_ϑ je zářivost izotropního rovinného plošného zdroje $[\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}]$, ΔI_n je zářivost $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ a ϑ je úhel odklonu od normály plochy.

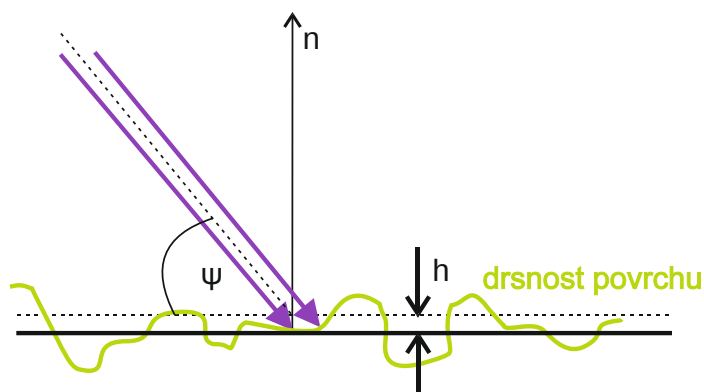
Difúzní povrch

Každý difúzní povrch je charakterizován svou drsností. Nerovnosti každého povrchu jsou mnohem větší nebo srovnatelné s vlnovou délkou optického záření. Kritérium pro drsnost povrchu popisuje tzv. Rayleighova podmínka podle vztahu 2.14:

$$h \geq \frac{\lambda}{8 \cdot \sin(\psi)} \quad [\text{m}], \quad (2.14)$$

kde h je průměrná výška nerovností povrchu [m] a ψ je úhel mezi dopadajícím optickým svazkem a povrchem.

Na obrázku 2.8 je ilustrace Rayleighovy podmínky.

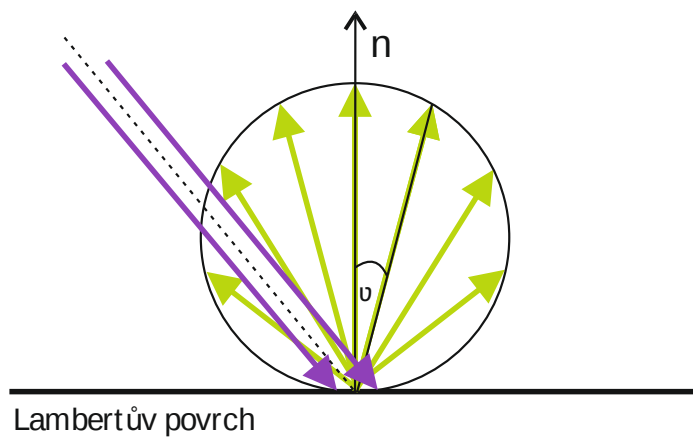


Obrázek 2.8: Rayleighova podmínka pro drsnost povrchu

Pokud na drsný povrch dopadá svazek optického záření, se zvětšující se drsností povrchu rostou možnosti směrových odrazů optického paprsku od povrchu. Pokud jsou tyto nerovnosti na povrchu náhodné, směry odrazů paprsků jsou taktéž náhodné a jedná se o difúzní odraz. Opakem difúzního odrazu je odraz zrcadlový. Mluví-li se o dokonale difúzním povrchu, jedná se o tzv. Lambertův povrch [8].

Lambertův povrch

Lambertův povrch je definován jako ideálně difúzní, což znamená, že intenzita vyzařování takového povrchu je ve všech úhlech stejná vůči pozorovateli. Jinak řečeno, vyzařování je izotropní a řídí se podle Lambertova zákona. Povrch, který tyto podmínky splňuje, odráží záření tzv. rozptylovým zářením. To je vidět na obrázku 2.9 [8].

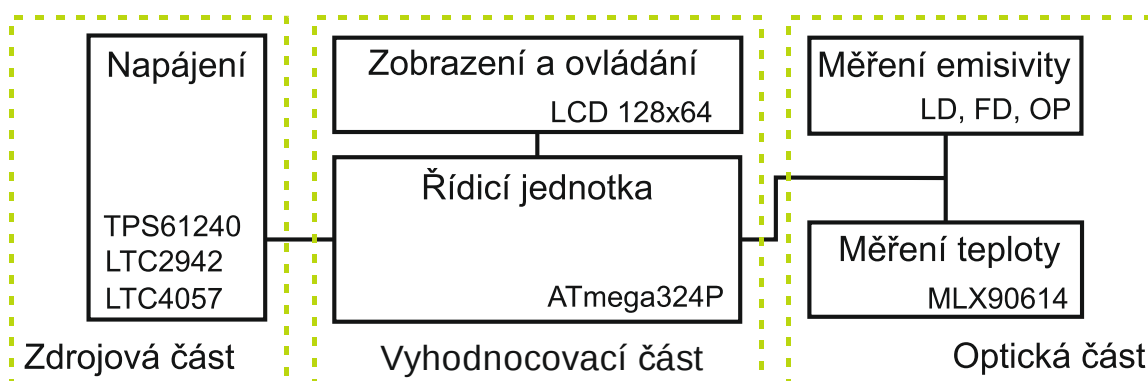


Obrázek 2.9: Rozptylový odraz

3. Koncept a návrh hardwaru bezkontaktního IR teploměru

Na obrázku 3.1 je celkové blokové schéma IR teploměru s automatickou korekcí emisivity. Hardware teploměru je rozdělen do několika funkčních bloků. Blok napájení, řídicí jednotky, uživatelského rozhraní, měření teploty a blok měření emisivity. Každý funkční blok bude podrobně rozebrán a popsán níže.

Klíčovou částí IR teploměru je řídicí jednotka tvořena mikrokontrolérem Atmega324P spolu s uživatelským rozhraním v podobě grafického LCD s rozlišením 128x64 bodů a čtyř ovládacích tlačítek. Řídicí jednotka zpracovává naměřené data z bloků měření teploty a měření emisivity a předává je mezi sebou. Následně data vyhodnocuje. Napájení celého zařízení zajišťuje jedno-článekový Li-ion akumulátor.



Obrázek 3.1: Blokové schéma

3.1. Řídicí a uživatelské rozhraní

Mikrokontrolér ATmega324P

Jádrem IR bezdotykového teploměru je Mikrokontrolér ATmega324P výrobce Atmel. Mikrokontrolér patří do rodiny AVR, kde spadají také další tři řady mikrokontrolérů AVR tiny, AVR XMEGA a AVR UC3. Všechny tyto obvody vychází z tzv. RISC (Reduced Instruction Set Computing) architektury, využívající redukovanou instrukční sadu, která je jednoduchá a vysoce optimalizovaná. Každá řada se od sebe odlišuje svým provedením, parametry, výkonem, nabídkou periferií, velikostmi pamětí aj. Předností řady AVR Mega jsou především nízké napájecí požadavky a pro konstruktéra dostupná široká škála periferií. Zvolená ATmegaxx4P je z nové řady 8bitových mikrokontrolérů s vnitřní programovou pamětí o velikostech 16, 32, 64 a 128 kB. Využití najde především v embedded systémech a všude tam, kde je potřeba velké paměti pro rozsáhlé programové kódy. V této konstrukci IR teploměru je zvolen mikrokontrolér ATmega324P s velikostí programové paměti 32 kB v pouzdru TQFP (Thin Quad Flat Pack) se 44 vývody (3.2). Všechny parametry, vnitřní architekturu, popis mikrokontroléru lze nalézt v katalogovém listu [12, 13].



Obrázek 3.2: Pouzdro TQFP ATmegy324P

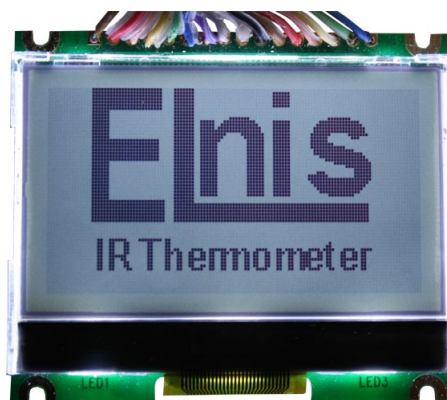
Co se týče programování, je využito sériového způsobu nazvaného ISP (In System Programming). To znamená, že obvod lze programovat, i když je už zapojen a zapájen na desce, na rozdíl od paralelního programování. To usnadňuje mnoho práce při vývoji a ladění softwaru. U sériového programování jsou použity čtyři vývody mikrokontroléru, konkrétně MOSI (Master Out, Slave In), MISO (Master In, Slave Out), SCK (Serial Clock) a Reset [12].

Mikrokontrolér ATmega324P pracuje s přesným hodinovým signálem na frekvenci 8 MHz, který zajišťuje externí krystalový oscilátor. Periferie TWI (Two Wires Interface) je použita ke komunikaci mezi integrovaným senzorem měření teploty MLX90614 a obvodu k monitorování stavu napájecí jednotky LTC2942. Hodinová frekvence této dvojvodičové sběrnice je nastavena na 100 kHz. Interní periferie 16bitového časovače/čítače je využita ke generování přesného signálu pro laserovou diodu na frekvenci 1,019 kHz. Periferie 10bitového AD (Analogově-Digitální) převodníku je využita k převodu analogového signálu z integrovaného sensoru SHARP a výstupu selektivního přijímače obvodu měření emisivity. Zpracovaná data jsou zobrazována na grafickém LCD 128x64, který komunikuje s mikrokontrolérem po 8bitové paralelní datové sběrnici. Snadné ovládání je zajištěno čtyřmi mikropsínači připojenými na vstupně/výstupní port mikrokontroléru.

LCD 128x64

LCD jsou nedílnou součástí embedded systémů. V této práci je použit grafický monochromatický LCD s rozlišením 128x64 bodů a bílým podsvícením. Fotka displeje je na obrázku 3.3. Použitý grafický LCD je zakoupen pod názvem LM6029A s integrovaným řadičem firmy Samsung S6B0724A01 zahrnující množství řídicích instrukcí k nastavení displeje.

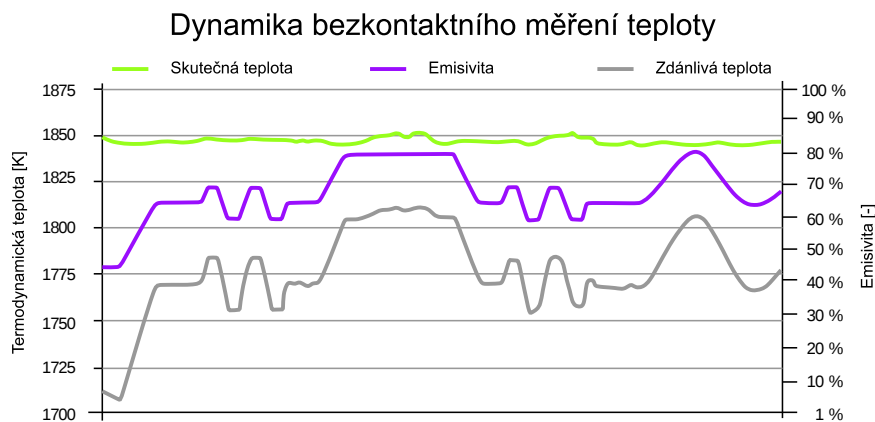
Komunikace s displejem probíhá paralelně po 8bitové datové sběrnici (DB0-DB7) s pěti řídicími vývody /RD (Read), /WR (Write), RS (Register Select), /RES (Reset) a /CS1 (Chip Select). Výhodou je rychlá odezva displeje, nevýhodou pak vysoký počet použitých vývodů mikrokontroléru. Zobrazovací plocha displeje je řadičem rozdělena na 8 bytových stránek od 0 až po 127. Zápis tedy probíhá po jednotlivých stránkách od stránky 0 po stránku 7. Inicializace displeje probíhá sledem nastavovacích instrukcí viz. katalogový list LCD. Podrobný popis instrukcí, které jsou spolu s popisem ostatních instrukcí a komunikace k dohledání v katalogovém listu.



Obrázek 3.3: Grafický LCD

3.2. Měření emisivity

Pro přesné měření teploty je potřeba znát skutečnou hodnotu emisivity měřeného povrchu. Emisivita je proměnlivá a závisí na mnoha faktorech, které byly zmíněny dříve. Na následujícím obrázku 3.4 je vidět graf, který zobrazuje, jak mění se emisivita ovlivňuje přesnost bezkontaktního měření teploty. Šedá barva zobrazuje zdánlivou teplotu, fialová emisivitu a zelená skutečnou teplotu objektu. Z obrázku 3.4 je patrné, jak změna emisivity povrchu ovlivňuje měřenou teplotu, přičemž skutečná teplota se nemění. Pro co nejpřesnější výsledky měření je potřeba emisivitu měřeného povrchu korigovat přímo před daným měřením nebo kontinuálně v rámci měření. Obrázek 3.4 je vypůjčen od firmy Pyrometer, která v této oblasti bezkontaktního měření teploty drží několik patentů.



Obrázek 3.4: Dynamika bezkontaktního měření teploty [7]

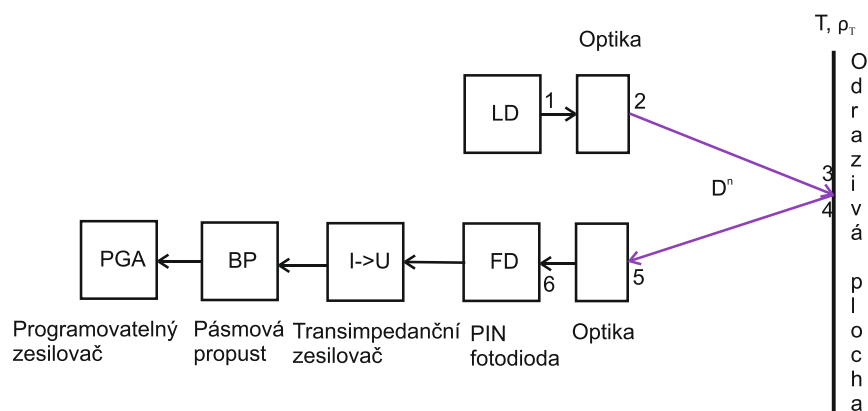
Na základě teoretických poznatků Kirchhoffova zákona pro záření a Lambertova zákona je možné u povrchů s difúzními vlastnostmi stanovit emisivitu pomocí měření odrazivosti povrchu objektu. Za předpokladu, že měřený povrch objektu splňuje náležitosti Lambertova povrchu a je splněna kolmost měřeného povrchu vůči měřicímu zařízení, výsledná emisivita objektu lze určit z redukovaného vztahu 2.8, a sice že součet hodnoty odrazivosti a emisivity

je roven jedné. Emisivita je tedy stanovena na základě odrazivosti povrchu. Výpočet odrazivosti pro danou plochu odpovídá vztahu 3.1 vyjádřeného ze vztahu 2.10 pro obecný výpočet odrazivosti:

$$\rho_T(\beta) = \pi \cdot \frac{L(\beta)}{I_0(\beta)} \quad [-], \quad (3.1)$$

kde ρ_T je odrazivost měřené plochy $[-]$, β je úhel mezi normálou plochy a optickou osou laserového svazku, $L(\beta)$ je intenzita záření povrchu $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ a $I_0(\beta)$ je intenzita ozáření povrchu $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$.

Na obrázku 3.5 je blokové schéma jednotky měření emisivity. K měření odrazivosti je vhodné použít stabilizovanou LD (Laserovou Diodu) pracující v IR oblasti. Dle provedení s vlnovou délkou v rozmezí 810-1050 nm. V této diplomové práci je pro experimentální účely použita LD s vlnovou délkou 850 nm.



Obrázek 3.5: Blok měření emisivity

LD vysílá modulovaný optický svazek o určitém středním výkonu směrem k ploše povrchu objektu. Na hranici povrchu je optický svazek odrážen viz. Lambertův zákon rozptylovým odrazem. Za předpokladu nulového úhlu mezi normálou ozařované plochy a optické osy přijímače lze vztah pro výpočet odrazivosti vyjádřit úpravou distanční rovnice pro Lambertův povrch. Odrazivost je vyjádřena jako poměr přijatého a vyslaného optického výkonu v závislosti na vzdálenosti měřeného objektu podle vztahu 3.2:

$$\rho_T = \frac{4 \cdot P_P \cdot D^n}{P_L \cdot d^2} \quad [-], \quad (3.2)$$

kde P_P je přijímaný výkon $[\text{W}]$, P_L je výkon vyslaný $[\text{W}]$, d je průměr aktivní plochy přijímače $[\text{mm}]$, D je vzdálenost měřeného objektu $[\text{m}]$ a n je koeficient mocniné funkce vzdálenosti D $[-]$.

Odražený modulovaný signál je detekován PIN fotodiodou, jejíž výstupní signál je zesílen selektivním zesilovačem. Velikost přijatého výkonu optického přijímače lze vypočítat pomocí vztahu 3.3:

$$P_P = \frac{U_{\text{det}}}{S_U} \quad [\text{W}], \quad (3.3)$$

kde U_{det} je detekované napětí na přijímači [V], S_U je napěťová citlivost optického přijímače [$\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$].

Dosazením vztahu 3.3 do vztahu 3.2 je získána klíčová rovnice měření odrazivosti podle vztahu 3.4:

$$\rho_T = \frac{4 \cdot \frac{U_{\text{det}}}{S_U} \cdot D^n}{P_L \cdot d^2} \quad [-]. \quad (3.4)$$

Je-li známá hodnota vyslaného výkonu, napěťová citlivost optického přijímače, aktivní plocha přijímače a vzdálenost měřeného objektu, je snadné změřit hodnotu odrazivosti měřené plochy podle předchozího vztahu 3.4 [8, 9, 10].

V praxi je postup měření odrazivosti následující:

- Pomocí referenční odrazivé plochy s přesně známou hodnotou odrazivosti ρ_T , vysílacím výkonem P_L , vzdáleností D a s průměrem aktivní plochy přijímače d je stanovena referenční hodnota napěťové citlivosti optické přijímače, která je vypočtena z velikosti změřeného maximálního napětí U_{det} podle vztahu 3.5. Tímto krokem je provedena kalibrace zařízení měření emisivity na výchozí hodnotu.

$$S_U = \frac{4 \cdot U_{\text{det}} \cdot D^n}{\rho_T \cdot P_L \cdot d^2} \quad [\text{V} \cdot \text{W}^{-1}]. \quad (3.5)$$

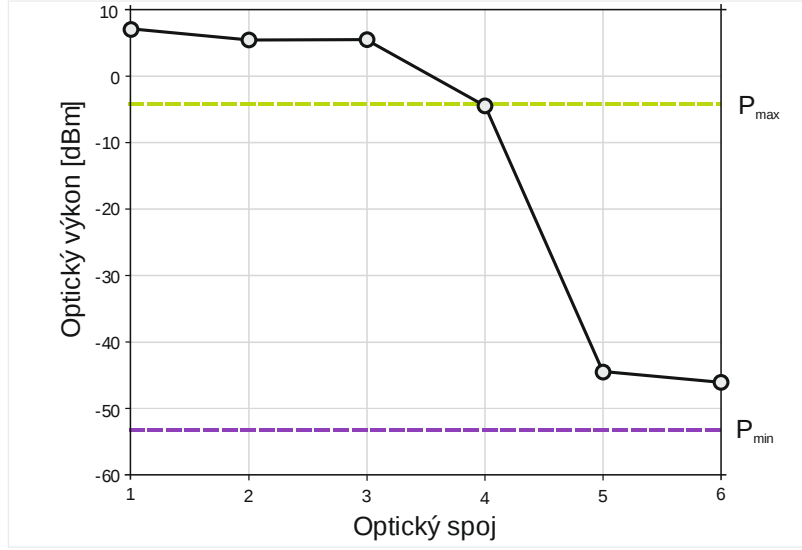
- Nyní je známá hodnota napěťové citlivosti optické přijímače a je možné měřit odrazivost povrchu, která přímo odpovídá velikosti detekovaného napětí U_{det} a vzdálenosti D podle vztahu 3.6:

$$\rho_T = \frac{4 \cdot U_{\text{det}} \cdot D^n}{S_U \cdot P_L \cdot d^2} \cdot \eta_{\text{sys}} \quad [-], \quad (3.6)$$

kde η_{sys} je systémový faktor propustnosti $[-]$.

Energetická bilance optického spoje

Energetická bilance optického spoje (EBOS) modeluje trasu šíření optického paprsku a jednotlivé útlumy na této trase od vysílače k přijímači. EBOS lze využít pro stanovení potřebného dynamického rozsahu optického přijímače. Ten je u tohoto optického spoje klíčový s ohledem na proměnlivou vzdálenost měřených objektů a odlišné hodnoty odrazivosti měřených povrchů. Schématické znázornění optického spoje a jednotlivé body EBOS jsou popsány čísly 1 až 6 na obrázku 3.5. Na následujícím obrázku 3.6 je grafické zpracování EBOS. Jsou zde také vyznačeny hodnoty maximálního a minimálního přijímaného optického výkonu [10, 11].



Obrázek 3.6: Energetická bilance optického spoje

První bod označen číslem 1 představuje střední výkon vysílací laserové diody P_{LD} . V bodě číslo 2 je připočtena účinnost vazby mezi laserovou diodou a optickou soustavou podle vztahu 3.7. Účinnost vazby α_{TLD} závisí na úhlové šířce a rozložení svazku vyzařovaném LD a na numerické apertuře vysílací optické soustavy. V praxi lze počítat s útlumem optické vazby přibližně -1,5 dB.

$$\alpha_{TLD} = 10 \cdot \log \left[\frac{P_{VOS}}{P_{LD}} \right] \quad [\text{dB}], \quad (3.7)$$

kde α_{TLD} je účinnost vazby v decibelech [dB], P_{VOS} je výkon dopadající na aperturu vysílací optické soustavy ve wattech [W] a P_{LD} je střední výkon laserové diody ve wattech [W].

Ve třetím bodě je připočten útlum šířením prostředím α_{AMB} . Útlum kolimovaného laserového svazku v čisté atmosféře je asi 1dB/km. Z důvodu krátké vzdálenosti měření, je tento útlum zanedbán.

Bod číslo 4 odpovídá dopadu optického svazku na měřený povrch a připočtení útlumu odrazem α_{REF} . Útlum optického svazku závisí na odrazivosti povrchu a vypočítá se podle vztahu 3.8:

$$\alpha_{REF} = 10 \cdot \log \left[\frac{\rho_T \cdot P_{INC}}{P_{INC}} \right] \quad [\text{dB}], \quad (3.8)$$

kde α_{REF} je útlum vlivem odrazu od povrchu v decibelech [dB] a P_{INC} je výkon dopadající na měřený povrch ve wattech [W].

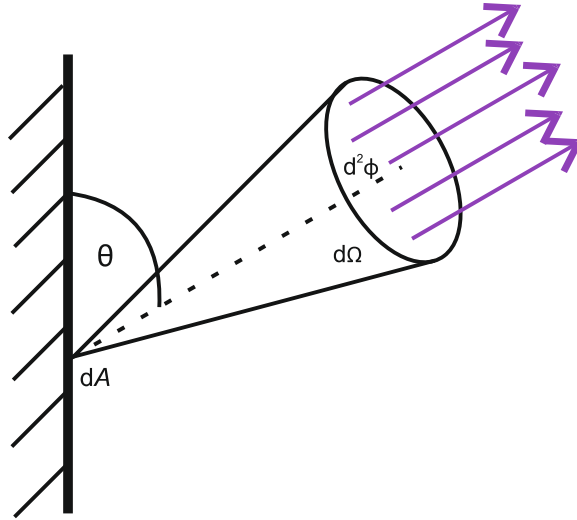
Bodu s číslem 5 odpovídá velikost optického výkonu dopadajícího na aperturu přijímací optiky. Vlivem odrazu od difúzního povrchu dochází k rozptylu kolimovaného optického

svazku do okolního prostředí. Takto odražený paprsek lze nyní považovat za zdroj nového záření, podléhající Lambertovu zákonu pro záření. Přijatý výkon optickým přijímačem je nutně jen určitá část optického výkonu Lambertova zářiče. Velikost přijatého výkonu ovlivňuje rozptylový útlum α_{DIF} a je odvozen z radiometrické veličiny zvané zář definované v následujícím vztahu 3.9:

$$L = \frac{d^2\phi}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos(\theta)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}], \quad (3.9)$$

kde ϕ je zářivý tok [W], A je plocha povrchu zářiče [m^2], Ω je prostorový úhel [Sr] a θ je úhel mezi kolmicí plochy zářiče a směrem záření.

Obrázek 3.7 zobrazuje jednotlivé veličiny definující zář L .



Obrázek 3.7: Definice záře

Další použitou radiometrickou veličinou ke stanovení α_{DIF} je ozáření E , která je odvozená ze vztahu 3.9 a je vyjádřena vztahem 3.10:

$$E = \frac{d\phi}{dA} = \int_{\Omega} L \cdot \cos(\theta) \cdot d\Omega \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]. \quad (3.10)$$

Ozáření celé hemisféry E_A lze získat integrací pomocí sférických souřadnic pro prostorový úhel hemisféry podle následujícího vztahu 3.11:

$$E_A = \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\frac{\pi}{2}} L \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi = \pi \cdot L \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]. \quad (3.11)$$

Ze vztahu 3.10 a 3.11 plyne následující vztah 3.12 pro celkovou zář hemisféry Lambertova zářiče L_A :

$$L_A = \frac{\phi}{A \cdot \pi} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}]. \quad (3.12)$$

Pomocí následujícího vztahu 3.13 lze stanovit rozptylový útlum α_{DIF} . Využitím tohoto vztahu je možné vypočítat množství přijatého optického výkonu v závislosti na vzdálenosti zářiče a na velikosti plochy přijímací optiky:

$$\alpha_{\text{DIF}} = 10 \cdot \log \left[\frac{\frac{L}{L_A} \cdot P_S}{P_S} \right] = 10 \cdot \log \left[\frac{\frac{\Omega \cdot \cos(\theta)}{\pi} \cdot P_S}{P_S} \right] = 10 \cdot \log \left[\frac{\frac{A_r \cdot \cos(\theta)}{\pi \cdot r^2} \cdot P_S}{P_S} \right] \quad [\text{dB}], \quad (3.13)$$

kde A_r je aproximovaná plocha přijímače [m^2], r je vzdálenost přijímače[m] a P_S je optický výkon Lambertova zářiče.

V bodě číslo 6 je připočtena účinnost vazby mezi přijímací fotodiodou a optickou soustavou. Útlum vazby α_{RPD} je 0 dB za předpokladu konstatního ozáření přijímací apertury a splnění podmínky podle vztahu 3.14:

$$A_{\text{FD}} \geq A_{\text{SPOT}}, \quad (3.14)$$

kde A_{FD} je aktivní plocha fotodiody [mm^2], A_{SPOT} velikost skvrny v ohniskové vzdálenosti přijímací optické soustavy [mm^2].

Celkový přijatý výkon na konci optického spoje je vypočten podle vztahu 3.15 a jedná se o celkový součet jednotlivých útlumů na trase šíření optického svazku:

$$P_{\text{R[dBm]}} = P_{\text{LD[dBm]}} + \alpha_{\text{TLD}} + \alpha_{\text{AMB}} + \alpha_{\text{REF}} + \alpha_{\text{DIF}} + \alpha_{\text{RPD}} \quad [\text{dBm}], \quad (3.15)$$

kde $P_{\text{R[dBm]}}$ je přijatý optický výkon fotodiodou [dBm].

Ukázkový výpočet minimální a maximální hodnoty optického výkonu a celkového potřebného dynamického rozsahu optického přijímače pro parametry $P_{LD} = 5 \text{ mW}$, $\rho_{Tmin} = 0,02$, $\rho_{Tmax} = 0,99$, $r_{min} = 0,2 \text{ m}$, $r_{max} = 1,5 \text{ m}$, $A_r = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$:

$$\begin{aligned}
P_{R[dBm]max} &= P_{LD[dBm]} + \alpha_{TLD} + \alpha_{REF} + \alpha_{DIF} = \\
&10 \cdot \log[P_{LD}] - 1,5 + 10 \cdot \log\left[\frac{\rho_{Tmax} \cdot P_{INC}}{P_{INC}}\right] + 10 \cdot \log\left[\frac{\frac{2,27 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 0 \cdot P_S}{\pi \cdot r_{min}^2}}{P_S}\right] = \\
&10 \cdot \log[5] - 1,5 + 10 \cdot \log\left[\frac{0,99 \cdot \left(10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}{\left(10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}\right] + 10 \cdot \log\left[\frac{\frac{2,27 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 0 \cdot \left(0,99 \cdot 10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}{\pi \cdot 0,2^2}}{\left(0,99 \cdot 10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}\right] = \\
&-21,96 \text{ dBm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{R[dBm]min} &= P_{LD[dBm]} + \alpha_{TLD} + \alpha_{REF} + \alpha_{DIF} = \\
&10 \cdot \log[P_{LD}] - 1,5 + 10 \cdot \log\left[\frac{\rho_{Tmin} \cdot P_{INC}}{P_{INC}}\right] + 10 \cdot \log\left[\frac{\frac{2,27 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 0 \cdot P_S}{\pi \cdot r_{max}^2}}{P_S}\right] = \\
&10 \cdot \log[5] - 1,5 + 10 \cdot \log\left[\frac{0,02 \cdot \left(10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}{\left(10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}\right] + 10 \cdot \log\left[\frac{\frac{2,27 \cdot 10^{-4} \cdot \cos 0 \cdot \left(0,02 \cdot 10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}{\pi \cdot 1,5^2}}{\left(0,02 \cdot 10^{\frac{6,98-1,5}{10}}\right)}\right] = \\
&-56,44 \text{ dBm}
\end{aligned}$$

$$|P_{R[dBm]min} - P_{R[dBm]max}| = 34,48 \text{ dB}$$

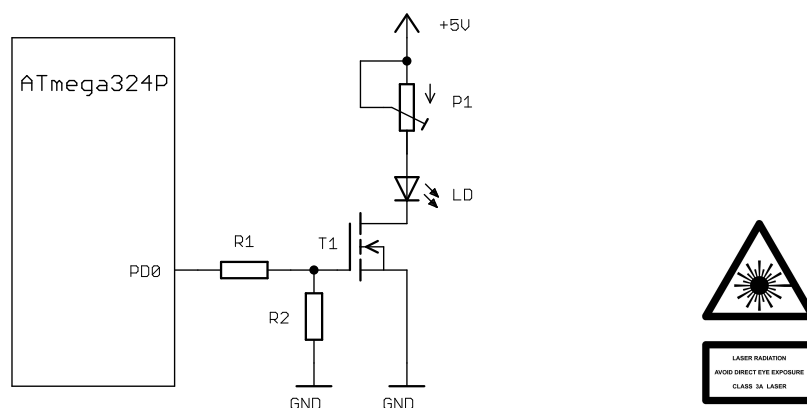
Část vysílače

Hlavní část vysílače tvoří IR laserová dioda s vlnovou délkou 850 nm pracující v kontinuálním režimu. Napájecí napětí LD je 5 V, maximální proud diodou v kontinuálním režimu je 12 mA, v pulsním režimu to může být až 48 mA. Na obrázku 3.17 je závislost výstupního výkonu na budícím proudu použité laserové diody OPV310. Je zřetelné, že výrobcem udávaná závislost výstupního výkonu se značně liší od závislosti laboratorně změřené. U laserových diod se však nejedná o nic výjimečného. Z grafu lze vidět prahový budící proud LD pohybující se kolem 1,4 mA.



Obrázek 3.8: Graf závislosti výstupního výkonu IR laserové diody na budícím proudu

Na obrázku 3.9 je schéma zapojení vysílací části bloku měření emisivity. Laserová dioda modulována na frekvenci 1,019 kHz je spínána unipolárním tranzistorem. Modulace je použita k potlačení vlivů okolního prostředí na optický signál. Samotnou modulaci zajišťuje vnitřní periferie Čítač/Časovač mikrokontroléru ATmega324P generující přesný PWM (Pulse Width Modulation) signál se střídou 50 %. Frekvence je záměrně zvolena nad hodnotou 1 kHz, jelikož na nižších hodnotách je zřetelný vliv blikavého šumu a driftů. Množství Růžového šumu v této oblasti odpovídá převrácené hodnotě kmitočtu ($1/f$). Na kmitočtech vyšších než 1 kHz je hodnota šumu daleko nižší a konstantní, zde se jedná o oblast tzv. Bílého šumu. Průběh spektrální výkonové hustoty šumu je na obrázku 3.10.

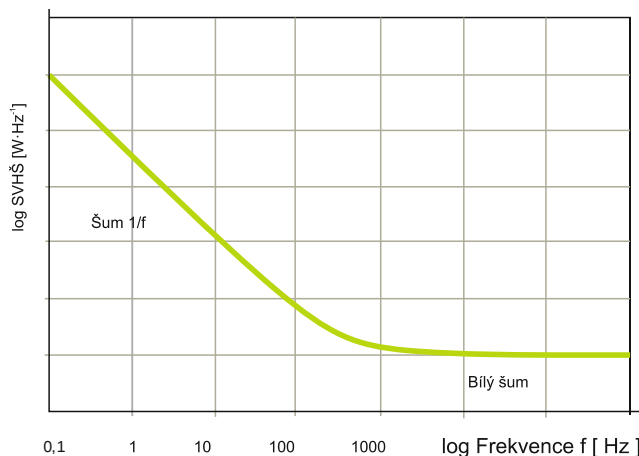


Obrázek 3.9: Schéma zapojení vysílací části měření emisivity

Důležitý fakt je také nutnost volit frekvenci modulace mimo násobky rušivých frekvencí, například zářivek. Proto je zvolena právě hodnota 1,019 kHz.

Vzhledem k nízkým výkonům LD je budicí proud nastavován více otáčkovým potencio-
metrem, v tomto případě na hodnotu 10 mA, což odpovídá výstupnímu střednímu optickému
výkonu 5 mW. Laserové dioda se středním optickým výkonem 5 mW spadá do bezpečnostní
třídy laserů Class 3A.

Spektrální výkonová hustota šumu



Obrázek 3.10: Spektrální výkonová hustota šumu

Rozbíhavý laserový svazek je nutné kolimovat. K tomuto účelu je použita ploskovypuklá
optická čočka s ohniskovou vzdáleností 8,5 mm. LD dioda je umístěna právě v této ohniskové
vzdálenosti.

Část přijímače

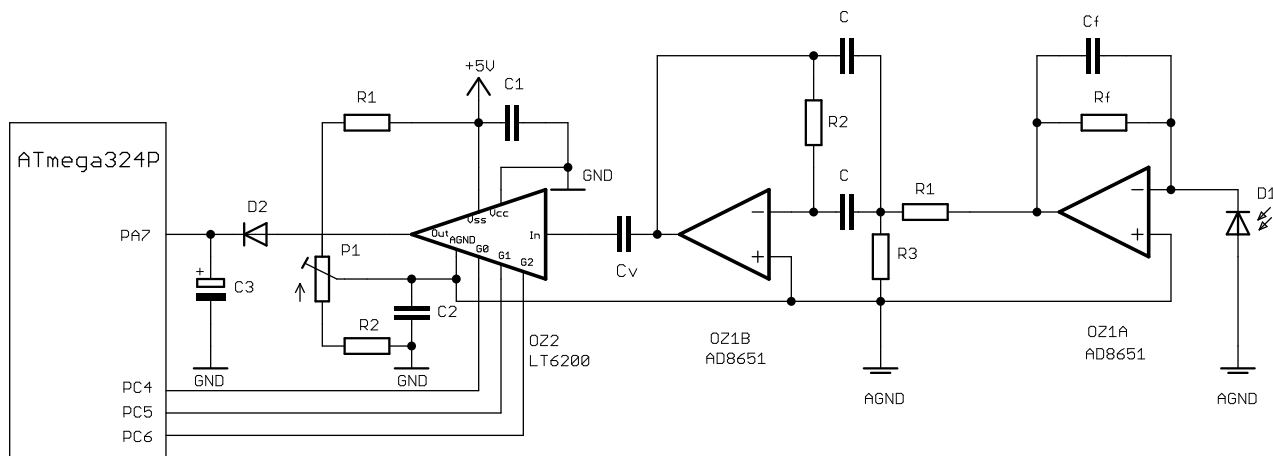
Na obrázku 3.11 je schéma zapojení optického přijímače obvodu měření emisivity. Jedná se o selektivní optický přijímač s transimpedančním zesilovačem na vstupu, s pásmovou propustí s vícenásobnou zpětnou vazbou a programovatelným zesilovačem na výstupu.

Transimpedanční zesilovač

Optický signál přijatý IR PIN fotodiodou je převeden na elektrický signál. PIN fotodi-oda SFH213 FA s maximální citlivostí na vlnové délce 880 nm je zapouzdřena v 5 mm LED (Light Emitting Diode) pouzdře s optickým filtrem v oblasti vlnové délky 880 nm. Dioda je zapojena v hradlovém režimu tzn., chová se jako řízený zdroj proudu. Výhodou je především rychlost odezvy a lepší šumové vlastnosti. Proud fotodiody je převeden na napětí pomocí nízkošumového transimpedančního zesilovače tvořeného operačním zesilovačem IO1A. Výstupní napětí transimpedančního zesilovače odpovídá vztahu 3.16. Použitý OZ (Operační Zesilovač) je speciální operační Rail-to-Rail zesilovač firmy Analog Devices AD8651 s velmi nízkou hodnotu šumového napětí $4,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Hodnota transimpedance tohoto stupně je $500 \text{ k}\Omega$. Kondenzátor C_f omezuje frekvenční pásmo zhruba na 10 kHz a zajišťuje stabilitu transimpedančního zesilovače [14].

$$U_{\text{out}} = -I_D \cdot R_f \quad [\text{V}], \quad (3.16)$$

kde U_{out} je výstupní napětí transimpedančního zesilovače [V], I_D je proud fotodiody [A] a R_f je hodnota zpětnovazebního rezistoru [Ω].



Obrázek 3.11: Schéma zapojení optického přijímače

Pásmová propust

Úzkopásmová propust se středovou frekvencí 1,019 kHz je tvořena druhou polovinou operačního zesilovače IO1B. Jak je vidět z obrázku 3.11, je použito zapojení s vícenásobnou zpětnou vazbou. Pomocí jednoho OZ v invertujícím zapojení je získán filtr vysoké jakosti Q s poměrně velkým zesílením. Pásmová propust má zesílení 50 a činitel jakosti Q má hodnotu 7. Výpočet hodnot součástek pásmové propusti odpovídá vztahům 3.17, 3.18, 3.19, 3.20. Simulace filtru byla provedena pomocí simulačního programu MicroCap [15].

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C} \cdot \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}} \quad [\text{Hz}], \quad (3.17)$$

kde f_m je středová frekvence pásmové propusti, C je kapacita kondenzátorů pásmové propusti [F] a $R_{1,2,3}$ jsou hodnoty odporu rezistorů v pásmové propusti [Ω].

$$-A_m = \frac{R_2}{2 \cdot R_1} \quad [-], \quad (3.18)$$

kde A_m je zesílení pásmové propusti s danou středovou frekvencí [-].

$$Q = \pi \cdot f_m \cdot R_2 \cdot C \quad [-], \quad (3.19)$$

kde Q je jakost filtru [-].

$$B = \frac{1}{\pi \cdot R_2 \cdot C} \quad [\text{Hz}], \quad (3.20)$$

kde B je šířka pásma filtru [Hz].

Ukázkový výpočet hodnot součástek pásmové propusti s parametry $A = -50$, $Q = 7$, $f_m = 1,019 \text{ kHz}$ a $C = 22 \text{ nF}$:

$$R_2 = \frac{Q}{\pi \cdot f_m \cdot C} = \frac{7}{\pi \cdot 1,019 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-8}} = 99,39 \text{ k}\Omega$$

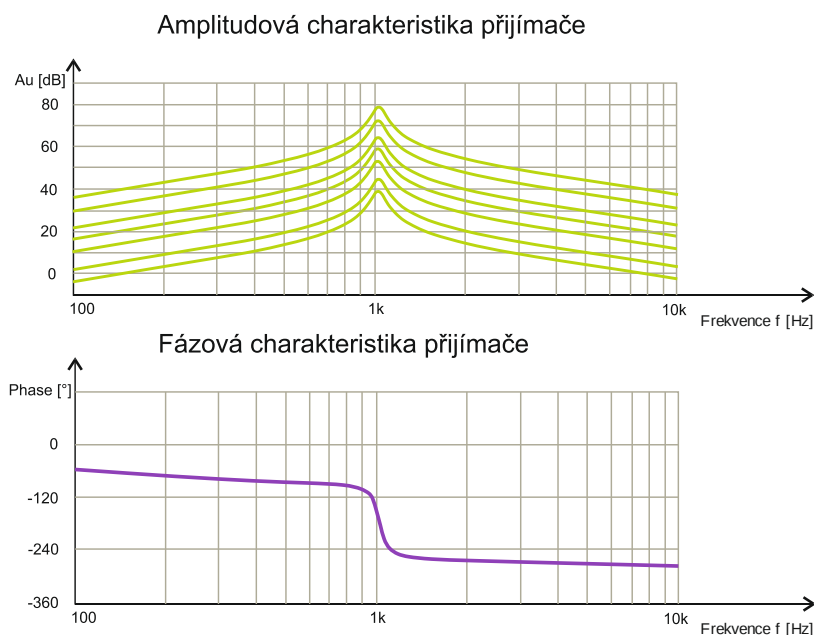
$$R_1 = \frac{R_2}{-2 \cdot A_m} = \frac{9,94 \cdot 10^4}{100} = 0,99 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{-A_m \cdot R_1}{2 \cdot Q^2 + A_m} = \frac{50 \cdot 9,94 \cdot 10^2}{7^2 - 50} = 1,04 \text{ k}\Omega$$

Výstupní zesilovač

Výstupní zesilovač optického přijímače je tvořen OZ s programovatelným zesílením. Je použit obvod firmy Linear Technology, konkrétně LTC1864. U přijímače je nutné přizpůsobovat hodnotu zesílení přijímanému výkonu, jelikož výkon není konstantní a závisí na měřeném povrchu materiálu a vzdálenosti měřeného objektu. Potřebný dynamický rozsah optického přijímače je 40 dB. Řešením je obvod LT6910, kde potřebné zesílení je nastaveno binárně pomocí vývodů G0, G1 a G2 v rozmezí 0 až 100. Tím je přijímaný výkon ideálně přizpůsoben rozsahu AD převodníku. Příslušné nastavení obstarává mikrokontrolér ATmega324P. Odporový dělič R1, R2 a P1 slouží k nastavení polohy umělé země optického přijímače na požadovanou hodnotu. Dioda D2 ořezává záporné půlvlny signálu, na kondenzátoru C3 je výstupní maximální hodnota napětí pro AD převodník.

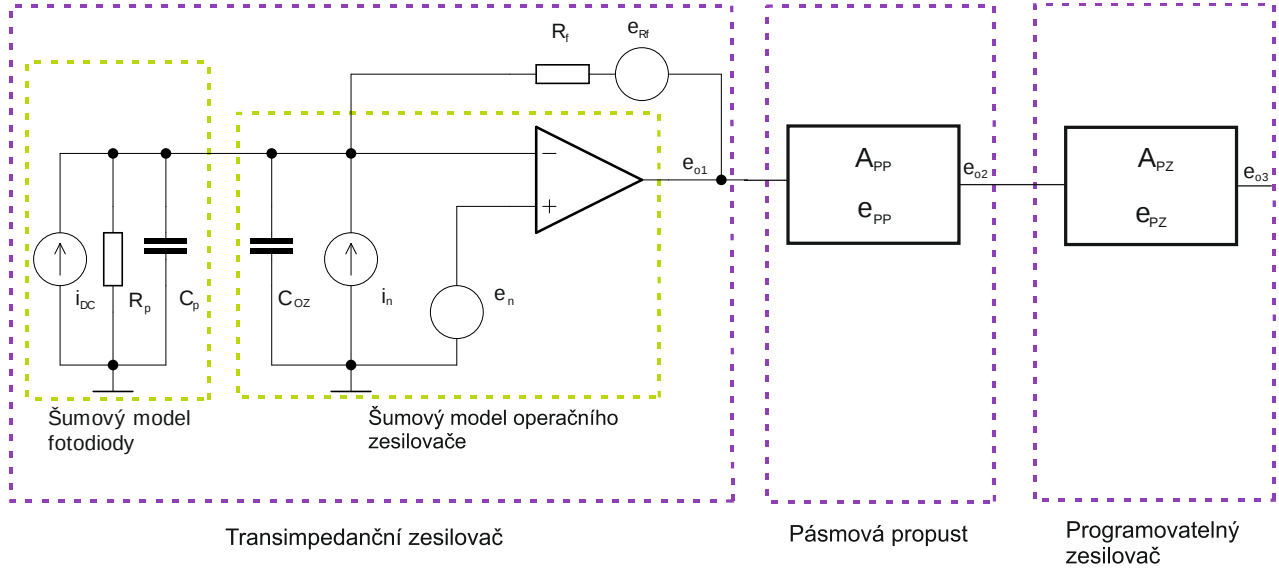
Na následujícím obrázku 3.12 je amplitudová a fázová charakteristika optického přijímače.



Obrázek 3.12: Amplitudová a fázová charakteristika optického přijímače

Šumová analýza optického přijímače

Jeden z klíčových parametrů optického přijímače je jeho vlastní šum dodávaný do obvodu. Na následujícím obrázku 3.13 je schéma zapojení prvního stupně, konkrétně transimpedančního zesilovače s náhradním šumovým zapojení fotodiody a OZ. Hlavní složky šumu tohoto zapojení způsobuje zpětnovazební rezistor R_f , vstupní šumový proud OZ i_n a šumové napětí OZ e_n [14].



Obrázek 3.13: Šumový model optického přijímače

Šumové napětí, které na výstup obvodu dodává rezistor R_f odpovídá tepelnému šumu tohoto rezistoru, který se vypočítá podle vztahu 3.21:

$$e_{Rf} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R_f} \quad \left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right], \quad (3.21)$$

kde e_{Rf} je šumové napětí rezistoru $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$, R_f je odpor transimpedančního rezistoru $[\Omega]$.

Další složka šumu je tzv. vstupní proudový šum OZ, který je přepočtený na výstup OZ podle vztahu 3.22:

$$e_i = i_n \cdot R_f \quad \left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right], \quad (3.22)$$

kde e_i je šumové napětí na výstupu OZ $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$, i_n vstupní proudový šum OZ $\left[\text{A}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$.

Vstupní napěťový šum OZ přepočtený na výstup OZ se vypočítá podle vztahu 3.23:

$$e_u = e_n \cdot \left[1 + \frac{R_f}{\frac{R_p}{1 + j \cdot \omega \cdot R_p \cdot (C_p + C_{OZ})}} \right] \quad \left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right], \quad (3.23)$$

kde e_u je šumové napětí na výstupu OZ $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$, R_p je odpor fotodiody $[\Omega]$, C_p je kapacita fotodiody $[\text{F}]$ a C_{OZ} je kapacita OZ $[\text{F}]$.

Poslední významný příspěvek šumového napětí způsobuje výstřelový šum fotodiody, který je přepočtený na výstup OZ podle vztahu 3.24:

$$e_f = R_f \cdot \sqrt{2 \cdot q \cdot i_{DC}} \quad \left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right], \quad (3.24)$$

kde e_f je šumové napětí fotodiody na výstupu OZ $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$, q je hodnota elementárního náboje $[q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}]$ a i_{DC} je temný proud tekoucí fotodiodou $[\text{A}]$.

Celkový napěťový šum na výstupu transimpedančního zesilovače se vypočítá podle vztahu 3.25:

$$e_{o1} = \sqrt{e_{Rf}^2 + e_i^2 + e_u^2 + e_f^2} \quad \left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right], \quad (3.25)$$

kde e_{o1} je celkové šumové napětí na výstupu OZ transimpedančního zesilovače $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$.

Výpočet napěťového šumu pro následující bloky pásmové propusti a programovatelného zesilovače podléhá analogii výpočtu prvního stupně transimpedančního zesilovače podle vztahů 3.26 a 3.27:

$$e_{o2} = \sqrt{(e_{o1} \cdot A_{PP})^2 + e_{PP}^2} \quad \left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right], \quad (3.26)$$

kde e_{o2} je celkové šumové napětí na výstupu OZ pásmové propusti $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$, A_{PP} je zesílení pásmové propusti $[-]$ a e_{PP} je napěťový šum pásmové propusti $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$.

$$e_{o3} = \sqrt{(e_{o2} \cdot A_{PZ})^2 + e_{PZ}^2} \quad \left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right], \quad (3.27)$$

kde e_{o3} je celkové šumové napětí na výstupu OZ programovatelného zesilovače $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$, A_{PZ} je zesílení programovatelného zesilovače $[-]$ a e_{PZ} je napěťový šum programovatelného zesilovače $\left[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \right]$.

Ukázkový výpočet šumového napětí transimpedančního zesilovače e_{o1} pro šířku pásma 10 kHz s parametry $R_f = 500 \text{ k}\Omega$, $e_n = 4,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, $i_n = 4 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$, $C_P = 11 \text{ pF}$, $i_{DC} = 1 \text{ nA}$:

$$e_{Rf} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R_f} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 5 \cdot 10^5} = 90,7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$e_i = i_n \cdot R_f = 4 \cdot 10^{-15} \cdot 5 \cdot 10^5 = 2,0 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$e_u = e_n \cdot \left[1 + \frac{R_f}{\frac{R_p}{1+j\omega \cdot R_p \cdot (C_p + C_{OZ})}} \right] = 4,5 \cdot 10^{-9} \cdot \left[1 + \frac{5 \cdot 10^5}{\frac{10^8}{1+j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot 10^8 \cdot (11+9) \cdot 10^{-12}}} \right] =$$

$$5,3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$e_f = R_f \cdot \sqrt{2 \cdot q \cdot i_{DC}} = 5 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 8,9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$e_{o1} = \sqrt{e_{Rf}^2 + e_i^2 + e_u^2 + e_f^2} = \sqrt{90,7^2 + 2,0^2 + 5,3^2 + 8,9^2} = 91,3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$e_{o1} = 100 \cdot 91,3 \cdot 10^{-9} = 9,1 \text{ } \mu\text{V}$$

Měření vzdálenosti

Na základě dřívějšího odvozování a laboratorních experimentů je zřejmá závislost detekovaného výkonu na vzdálenosti měřicího přístroje od měřeného objektu. Z tohoto důvodu je potřeba opakovaně zjišťovat aktuální vzdálenost přístroje od měřeného objektu. Vzhledem k použití IR laserové diody ve vysílací části měření emisivity se nabízí minimálně dvě možnosti, jak změřit tuto vzdálenost. A sice tzv. metoda TOF (Time Of Flight), kdy se jedná o měření časového intervalu mezi vyslaným a přijatým laserovým pulsem. Alternativní metodou může být například tzv. triangulace, kde se zjišťuje úhel dopadu vyslaného a následně odraženého optického paprsku, na jehož základě je možné stanovit vzdálenost daného objektu.

Měření vzdálenosti metodou TOF

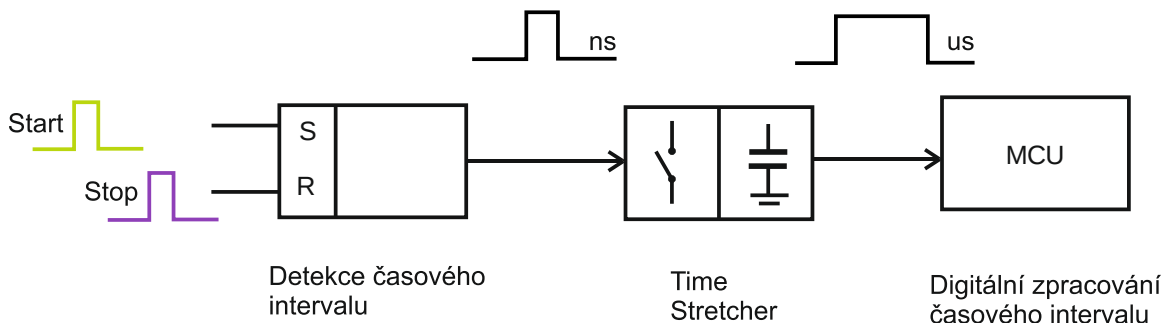
Implementaci metody TOF je možné realizovat pomocí TDC (Time to Digital Converter), kdy délka časového intervalu je převedena na digitální podobu. Poté je vzdálenost jednoduše vypočtena podle vztahu 3.28:

$$D = c \cdot \frac{\Delta T}{2} \quad [\text{m}], \quad (3.28)$$

kde ΔT je časový rozdíl mezi vyslaným a přijatým impulsem v sekundách [s].

Z předchozího vztahu vyplývá, že problém nastává u měření malých vzdáleností v řádech centimetrů a metrů. Časový interval mezi vyslaným a přijatým impulsem na vzdálenosti 1 m činí pouhých 6,66 ns, a pokud je mikrokontrolér taktován s frekvencí 8 MHz, je délka jednoho hodinového cyklu mikrokontroléru mnohem větší, v tomto případě 125 ns. Zdánlivě je nemožné měřit takto malé vzdálenosti pomocí této metody.

Řešením je použití obvodů FPGA (Field-Programmable Gate Array) nebo tzv. časové extrapolace, pomocí které je krátký časový impuls prodloužen na mikrokontrolérem zpracovatelnou hodnotu. U nízkých taktovacích kmitočtů v jednotkách MHz je nejvhodnější použít extrapolační metodu Time Stretching. Z časových intervalů nanosekund je možné získat intervaly v řádech mikrosekund, které jsou již pohodlně zpracovatelné i 8bitovým mikrokontrolérem. Na obrázku 3.14 je znázorněn princip této metody.



Obrázek 3.14: Extrapolací metoda Time stretching

Klopný obvod typu R-S, nejlépe v provedení ECL (Emitter Coupled Logic), detekuje časový rozdíl mezi vyslaným a přijatým impulsem. Tento velice krátký impuls v řádech nanosekund je prodloužený Time Stretcher obvodem na impuls v řádech mikrosekund. Princip prodloužení je velice jednoduchý. V době impulsu je kondenzátor nabíjen konstantním proudem. Následně je tento kondenzátor vybíjen řádově menším proudem a výstupním komparátorem je získán prodloužený obdélníkový impuls, který je následně digitálně zpracován mikrokontrolérem. Metoda TOF najde uplatnění především u precizních dálkoměrů vzhledem ke své přesnosti i na velké vzdálenosti. Na druhou stranu je tato metoda značně komplikovaná na implementaci [17].

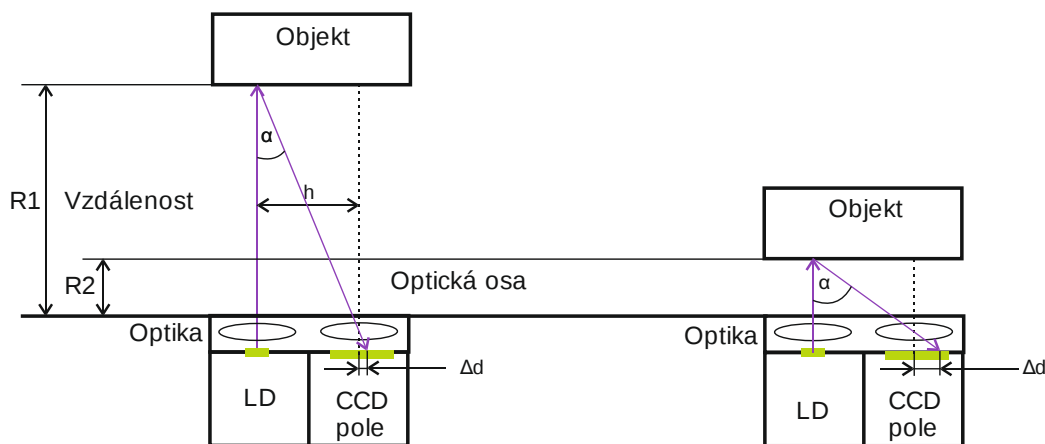
Měření vzdálenosti metodou Triangulace

K měření vzdálenosti pomocí metody triangulace je využit Pythagorův teorém. Princip měření vzdálenosti pomocí triangulace je znázorněno na obrázku 3.15. Laserová dioda LD vysílá kolimovaný IR paprsek pod určitým úhlem. V závislosti na vzdálenosti objektu se mění úhel α a tím i úhel dopadajícího laserového paprsku mezi optickou osou čočky v přijímači. Velikost tohoto úhlu zpracovává PSD (Position Sensitive Detector) pole za přijímací čočkou. Pokud je známa vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem h a úhel α , je snadné určit vzdálenost R pomocí následujícího vztahu 3.29:

$$R = \frac{h}{\tan(\alpha)} \quad [\text{m}], \quad (3.29)$$

kde ΔT je časový rozdíl mezi vyslaným a přijatým impulsem [s], h vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem [m] a α je úhel svíraný mezi vyslaným a přijatým IR paprskem.

Optický signál je převeden na signál elektrický v závislosti na pozici d v PSD poli snímače. Signál je následně zpracován vnitřní řídicí jednotkou a je vypočtena vzdálenost objektu.

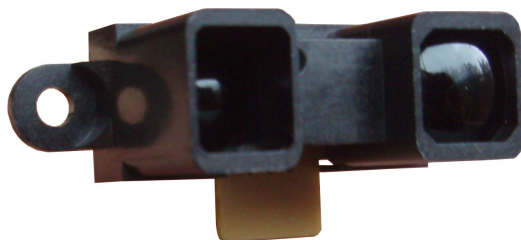


Obrázek 3.15: Princip triangulace

Hlavní nevýhodou metody triangulace je omezený rozsah měřené vzdálenosti a přesnost, která se pohybuje kolem $\pm 5 \%$ u maximálního rozsahu 5 m. Rozsah měřené vzdálenosti je nastaven vhodným hardwarovým uzpůsobením optické soustavy. Například u níže uvedeného senzoru firmy SHARP je rozsah měřené vzdálenosti nastaven pouze změnou optické části senzoru, vnitřní integrovaný senzor zůstává u všech modelů stejný. Relativní chyba měření vzdálenosti senzoru podstatně ovlivňuje přesnost měření emisivity.

Vzhledem k faktu, že by návrh a konstrukce modulu pro měření vzdálenosti kvůli své rozsáhlosti mohly být samostatným tématem celé další diplomové práce, pro účely této práce jsou uvažovány dva integrované senzory. V prvním případě integrovaný obvod firmy Acam na principu TDC s detekcí časového intervalu až 2 ns. Tento obvod je cenově nedostupný pro použití v této práci a je vhodný pro měření vzdálenosti pouze nad 10 m. Druhou možností je

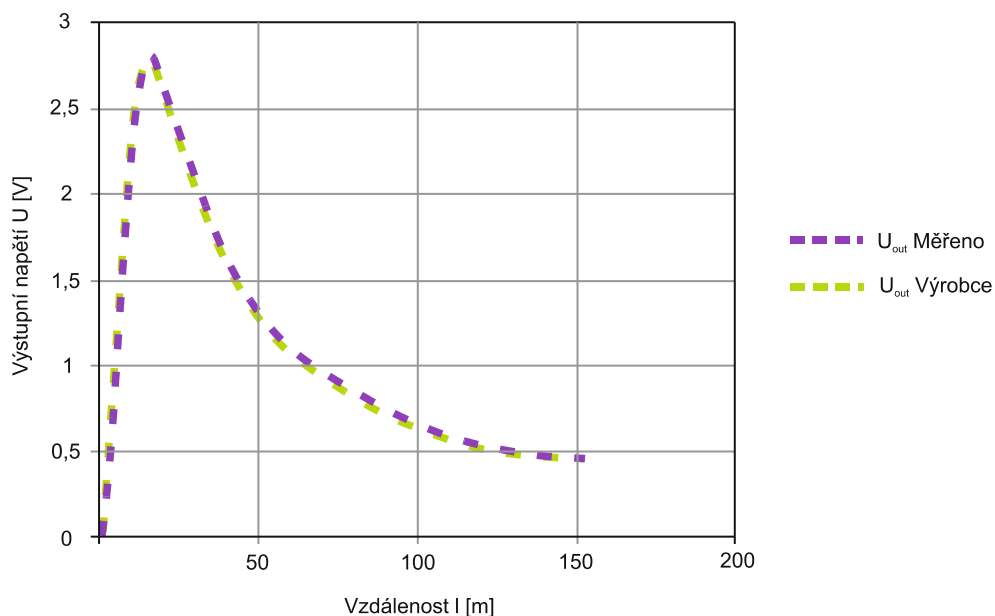
integrovaný senzor firmy SHARP fungující právě na principu triangulace. Na obrázku 3.16 je vidět fotografie tohoto senzoru.



Obrázek 3.16: Senzor SHARP

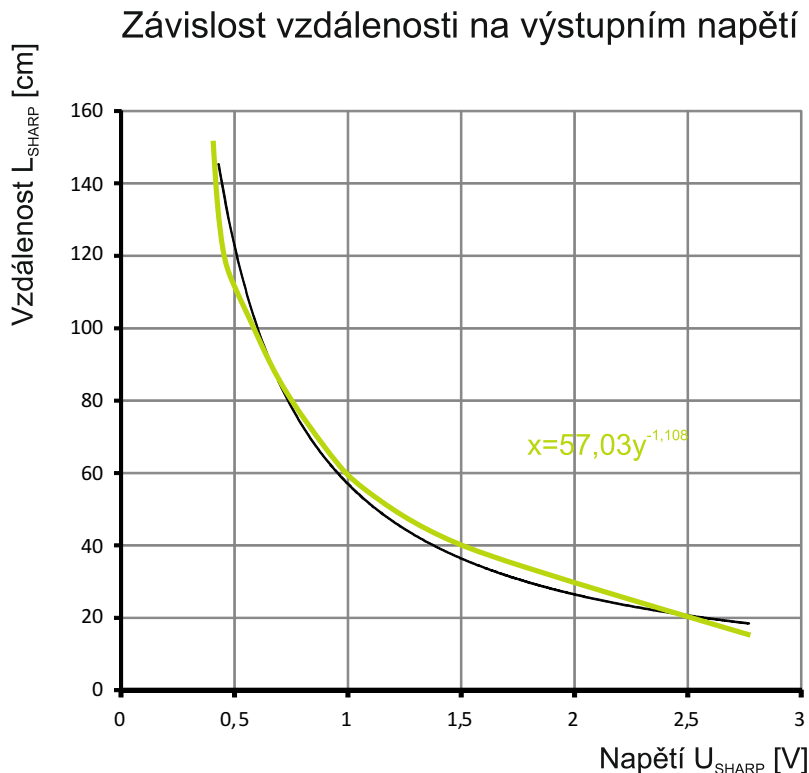
Firma SHARP nabízí několik verzí senzorů s různými vzdálenostními rozsahy. Pro experimentální účely je zvolen senzor s rozsahem 20 až 150 cm. Výstupem senzoru je analogový signál, konkrétně stejnosměrné napětí závislé na vzdálenosti měřeného objektu. Tento signál je připojen na AD převodník mikrokontroléru ATmega324P. Na obrázku 3.17 je výrobcem udávaný a laboratorně změřený průběh výstupního napětí. Podrobné informace a specifikace jsou dostupné v katalogovém listu.

Výstupní napětí v závislosti na vzdálenosti



Obrázek 3.17: Graf závislosti výstupního napětí senzoru SHARP na vzdálenosti

Na obrázku 3.18 je funkce závislosti měřené vzdálenosti senzoru SHARP v rozsahu 0,15 - 1,5 m na výstupním napětí. Proložení této funkce mocninovou regresní křivkou byl získán vztah 3.30 pro výpočet vzdálenosti v mikrokontroléru.



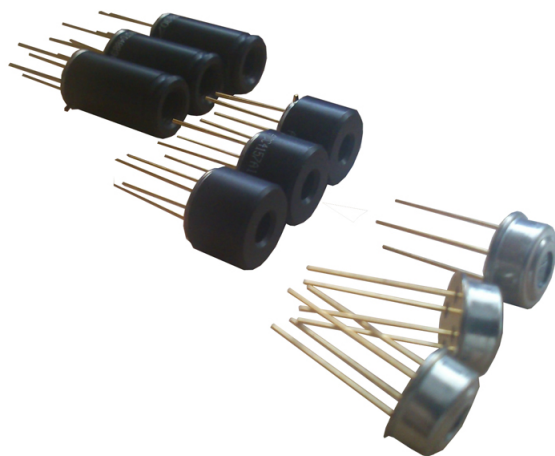
Obrázek 3.18: Proložení funkce vzdálenosti senzoru SHARP

$$L_{SHARP} = 57,03 \cdot (U_{SHARP})^{-1,108} \quad [m] \quad (3.30)$$

kde L_{SHARP} je vzdálenost senzoru SHARP [m] a U_{SHARP} je výstupní napětí senzoru [V].

3.3. Měření teploty

Základem bezkontaktního měření teploty celého zařízení je jedno-zónový, přesně kalibrovaný digitální IR senzor firmy MELEXIS umožňující bezkontaktně měřit teplotu vzdálených objektů, ale i teplotu okolí pomocí interního teplotně-kompenzačního termistoru. Senzor se skládá ze dvou integrovaných obvodů firmy MELEXIS. Z obvodu MLX81101, infra-termočlánekového senzoru a obvodu MLX90302, což je speciální digitální signálový procesor pro zpracování analogového výstupu infra-termočlánekových senzorů.



Obrázek 3.19: Senzor MLX90614

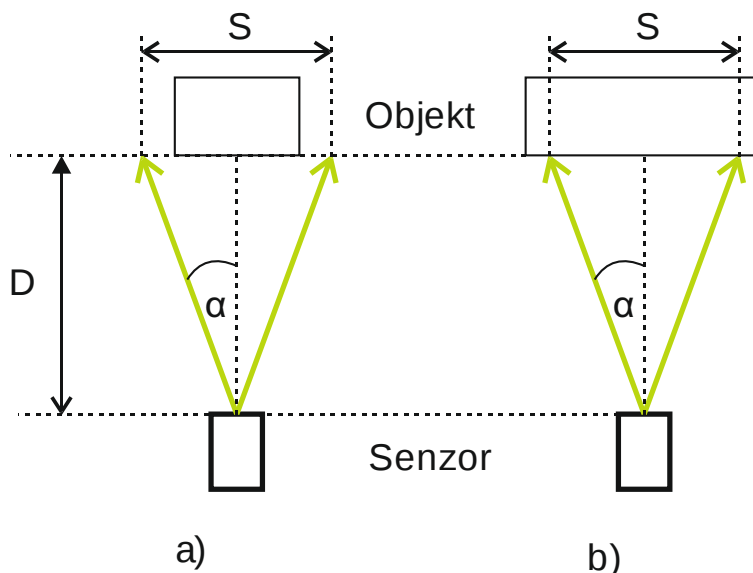
Základní vstupní veličina senzoru MLX90614 je emisivita uložená v interní paměti senzoru. Rozsah měřených teplot senzoru je u teploty okolí -40 až 125 °C, u bezkontaktního měření je to -70 až 380 °C. Na zakázku je ovšem možné si nechat vyrobit přesně kalibrované senzory s maximálním teplotním rozsahem -70 až 1030 °C. Senzor nabízí dvě možnosti komunikace, první pomocí protokolu SMBus (System Management Bus), druhou variantou je 10bitový PWM výstup. Senzor je předem továrně kalibrován pro oba typy připojení. V konstrukci je komunikace mezi senzorem zprostředkována interní periferií TWI mikrokontroléru ATmega324P, tzn. je použit protokol SMBus. Výhodou této komunikace je větší teplotní rozsah měření, přesnost s rozlišením až 0,02 °C, ale hlavně snadný přístup k vnitřním registrům senzoru, umožňující interní nastavení emisivity, nastavení vnitřních filtrů nebo nastavení SLEEP MODU. MLX90614 má dvě vnitřní paměti, paměť RAM a EEPROM. V paměti RAM jsou uloženy výstupní hodnoty veškerých naměřených teplotních dat a je pouze ke čtení. Paměť EEPROM slouží k nastavení parametrů samotného senzoru. V této paměti jsou zahrnuty registry pro nastavení komunikace, již zmiňované emisivity a vnitřních filtrů senzoru. Na obrázku 3.19 jsou vidět tři různé varianty MLX90614, lišící se pouze podle zorného úhlu, standardně zapouzdřené v pouzdru TO-39. Bližší informace k tomuto senzoru jsou dostupné v katalogovém listu a na stránkách výrobce [16].

Správné umístění měřeného objektu v zorném poli senzoru FOV (Field Of View) je jeden z klíčových parametrů pro správné bezkontaktní měření teploty. V praxi je zorné pole IR teploměrů popsáno poměrem vzdálenosti a průměru měřené oblasti D:S (Distance : Diameter). Pokud zorné pole senzoru přesahuje velikost měřené plochy objektu, není možné korektně měřit jeho teplotu. Na následujícím obrázku 3.20 je ilustrace chybného (a) a správného (b) způsobu bezkontaktního měření teploty. Jak je patrné, zorné pole senzoru je závislé na vzdálenosti měřeného objektu podle vztahu 3.31:

$$S = 2 \cdot D \cdot \tan(\alpha) \quad [\text{m}], \quad (3.31)$$

kde α je poloviční zorný úhel senzoru.

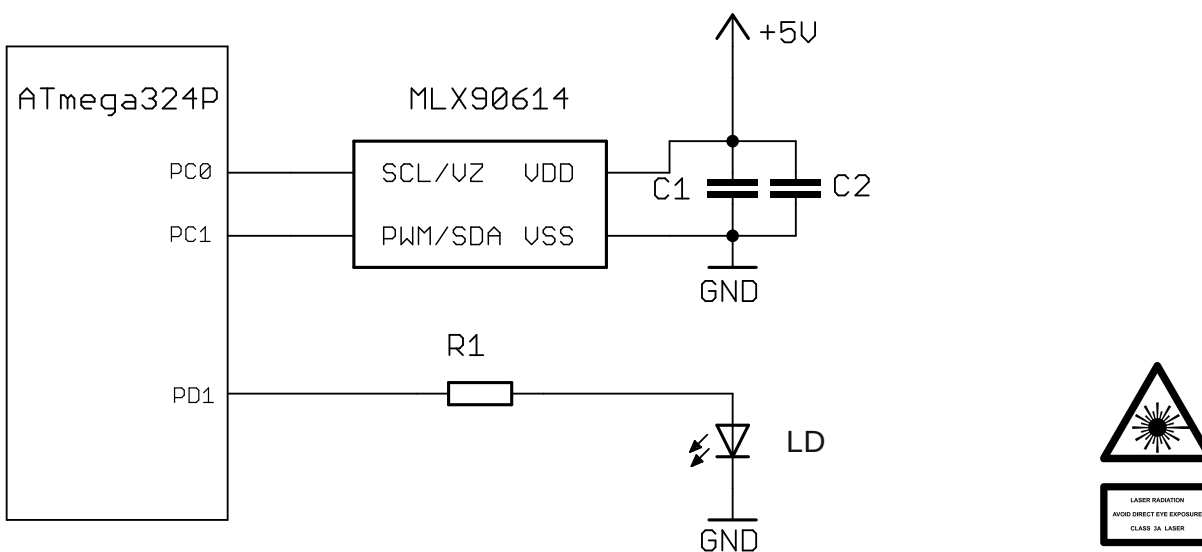
U senzorů s velkým zorným úhlem je ke zvětšení měřitelné vzdálenosti potřeba zorné pole zúžit. To je provedeno pomocí kvalitní optické čočky s co nejlepší propustností v IR oblasti spektra a následnou kalibrací senzoru. Nejčastějším řešením u bezdotykových IR teploměrů je použití Fresnelovy čočky. Ta je charakteristická svou nízkou hmotností. V této diplomové práci je pro experimentální účely použit senzor se zorným polem 10° bez optické čočky.



Obrázek 3.20: Zorné pole IR senzoru

Na následujícím obrázku 3.21 je schéma zapojení bloku měření teploty. Připojení senzoru MLX90614 a zaměřovacího polovodičového laseru s vlnovou délkou 650 nm k mikrokontroléru ATmega324P. Kondenzátor C1 je blokující kondenzátor a musí být umístěn co nejbližší senzoru. Pull-up rezistory na dvojvodičové TWI sběrnici jsou aktivovány softwarově. Podrobný popis komunikace se senzorem je rozebrán v další části diplomové práce.

Polovodičový laser slouží ke snadnému zaměření měřeného objektu. Součástí laserového modulu je nastavitelná optika zajišťující správnou kolimaci laserového svazku. Pomocí rezistoru R1 je nastaven budící proud laserové diody. Střední optický výkon zaměřovacího laseru je laboratorně změřen na hodnotu 1,9 mW, což odpovídá bezpečnostní třídě laserů Class 3A.



Obrázek 3.21: Blok měření teploty

3.4. Napájení

U návrhu napájecí části každého zařízení je potřeba brát v úvahu řadu faktorů, jako je požadovaná velikost napájecího napětí, proudový odběr, nároky na používání zařízení, požadavky na elektromagnetické rušení EMI (Electro-Magnetic Interference) a mnohé další. V tomto případě se jedná o zařízení přenosné, a tudíž je ho potřeba napájet z baterie. Důležitá je správná volba baterie. Prvním krokem je zjištění velikosti předpokládaného odběru elektrické energie zařízení.

V následující tabulce 2 jsou přibližné hodnoty odběru elektrického proudu jednotlivých bloků teploměru.

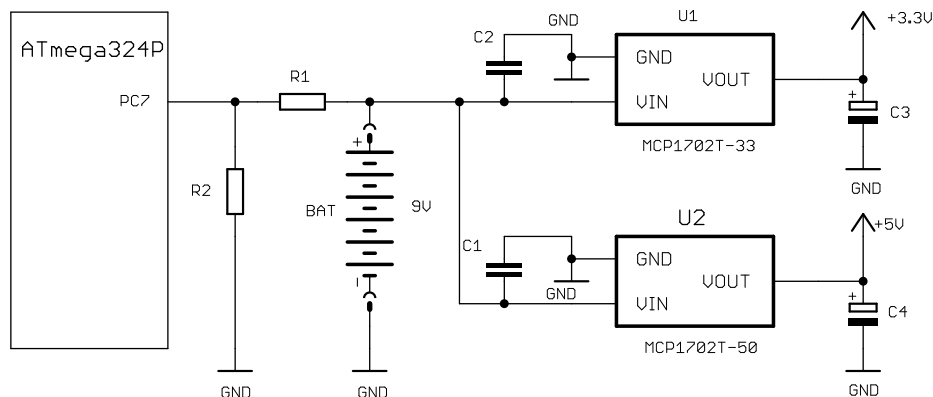
Blok teploměru	Maximální proud	Stand-by mód
Řídicí jednotka	93 mA	22 μ A
Měření teploty	21,5 mA	6 μ A
Měření emisivity	112 mA	4 μ A
Celkem	226,5 mA	32 μA

Tabulka 2: Odhad proudového odběru teploměru

Požadované napájecí napětí v obvodech IR teploměru mají standardně hodnotu 5 V a 3,3 V s maximálním proudovým odběrem kolem 230 mA za plného provozu. Ve stand-by režimu, kdy je teploměr vypnutý, je proudový odběr pouhých 32 μ A. Pro napájení IR teploměru jsou předpokládány dvě varianty napájení. První jednoduchá varianta, často využitá u nejlevnějších a uživatelsky nejdostupnějších přístrojů, má jako zdroj energie primární baterii, nejčastěji klasickou 9 V baterii. Druhá možnost je použití sekundárního článku. Napájecí článek je pevně zabudován v přístroji a je dobíjecí. V této variantě je použita v dnešním světě neodmyslitelná Li-ion (Lithium-iontová) technologie.

Napájecí zdroj s primární baterií

Na následujícím obrázku 3.22 je schéma zapojení napájecího zdroje s primární baterií s nominálním napětím 9 V. K získání požadovaných napájecích napětí obvodů je použita dvojice lineárních regulátorů s velmi malým klidovým odběrem proudu od firmy Microchip. Ten se pohybuje kolem 2 μA . Maximální proudový odběr je 250 mA, vyhovující napájení IR teploměru. Pro funkci zdroje musí být hodnota napětí primárního článku vždy vyšší, než požadované napájecí napětí.



Obrázek 3.22: Napájecí zdroj s primární baterií

Výhodou tohoto řešení je především jednoduchost, absence výskytu rušení vyšších harmonických složek. Nevýhodou jsou ztráty ve stabilizačním obvodu. Monitorování stavu baterie zajišťuje mikrokontrolér ATmega324P přes dělič napětí R1 a R2. To je možné díky vlastnosti většiny primárních článků. Ty mají velmi plochou křivku vybíjení a je možné relativně přesně monitorovat jejich energetický stav v závislosti na napětí baterie pomocí AD převodníku.

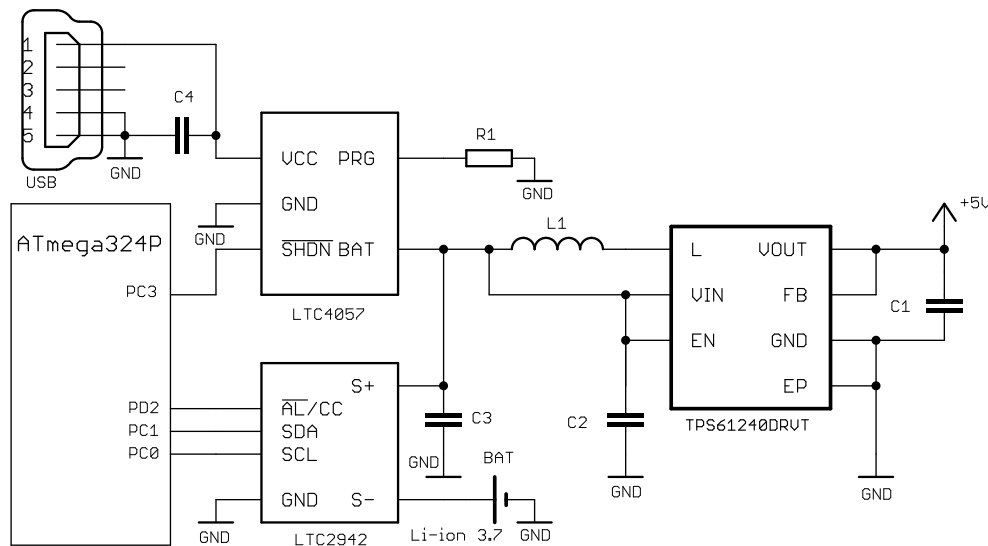
Napájecí zdroj se sekundárním článkem

Jako zdroj energie je použit Lithium-iontový článek o nominální hodnotě 3,7 V. Tento typ technologie nabízí vysokou hustotu energie článku vzhledem k jeho objemu a hmotnosti. Ideální řešení napájení u přenosných zařízení. Dalšími podstatnými výhodami Li-ion článků a baterií je, že netrpí paměťovým efektem, mají velmi malý samo-vybíjecí proud a vysokou životnost. Mezi nevýhody patří potencionální nebezpečí výbuchu a samovznícení. To je dáno vlastnostmi lithia, které je vysoce reaktivní. S organickými sloučeninami tvoří elektrolyt Li-ion článku.

Součástí každého zařízení napájeného Li-ion článkem nebo Li-ion baterií musí být vnitřní ochranná elektronika. U méně článkových baterií je to ochrana proti zkratu, přebití, podbití a ochrana teplotní. U baterií se třemi a více články v sérii je vhodné použít tzv. balancér. Napěťový rozsah Li-ion článku je 2,8 - 4,2 V. Tyto meze nesmí být nikdy překročeny.

Na následujícím obrázku 3.23 je schéma zapojení napájecího zdroje se sekundárním článkem. Použitý Li-ion článek má v sobě zabudovanou ochranu proti zkratu, přebití a podbití. Vzhledem k faktu, že napětí článku se pohybuje v rozmezí 2,8 - 4,2 V, je k získání potřebného

napětí 5 V pro obvody IR teploměru použit step-up DC-DC měnič firmy Texas Instruments TPS61240 s účinností až 90 % a s výstupním proudem 450 mA. Obvod je přímo určen pro zařízení napájené z baterie či článku. Spínací frekvence měniče je 3,5 MHz.



Obrázek 3.23: Napájecí zdroj se sekundárním článkem

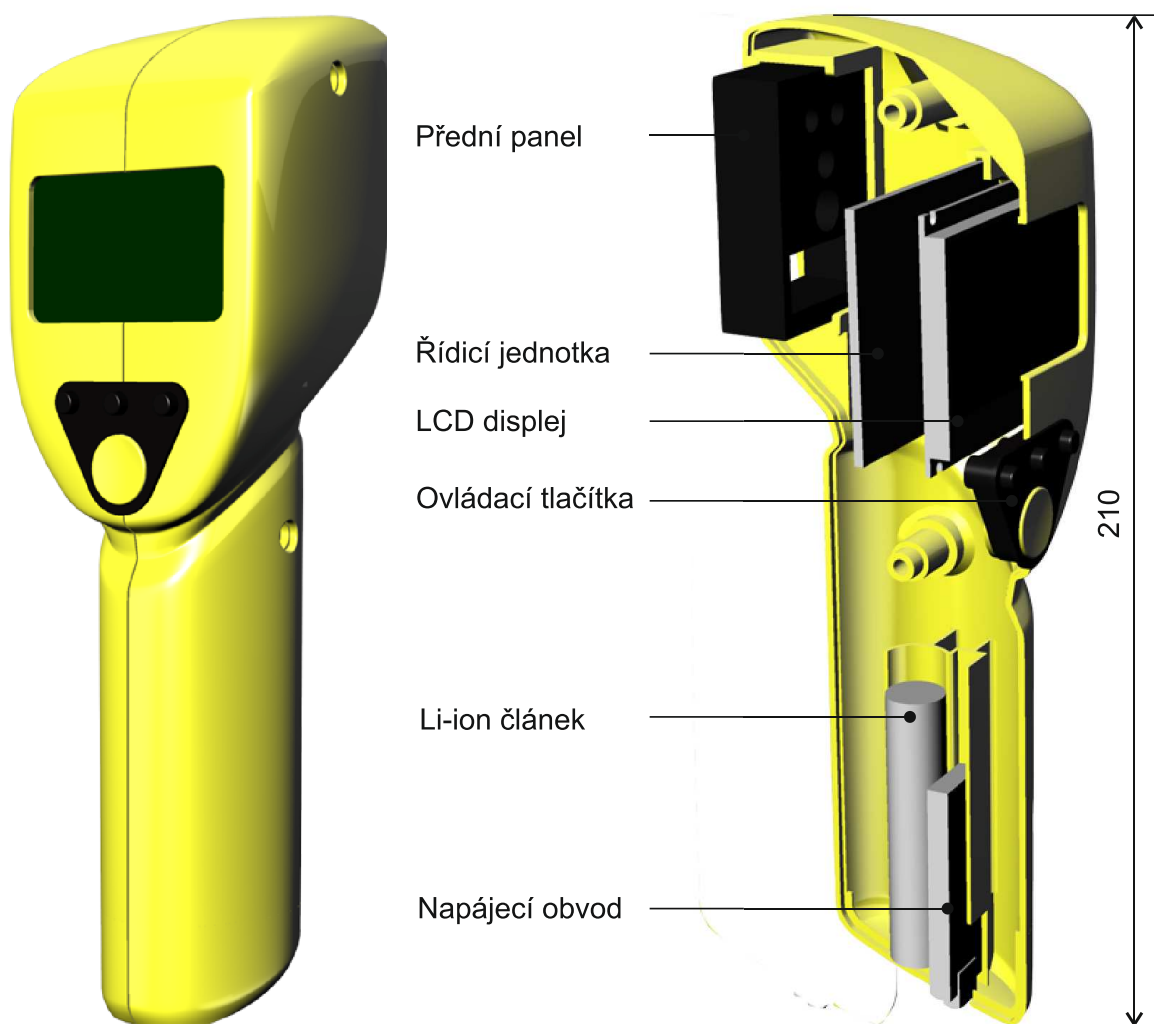
Integrovaný obvod LTC2942 firmy Linear Technology monitoruje aktuální teplotu a stav nabití článku. S ohledem na profil křivky vybíjení Li-ion článku, je nutné k přesnému stanovení množství energie v článku monitorovat vstupující a vystupující náboj. To je prioritním úkolem tohoto integrovaného obvodu, který komunikuje s mikrokontrolérem ATmega324P pomocí protokolu SMBus. Ve vnitřních 16bitových registrech LTC2942 jsou ukládána data s aktuální teplotou, množstvím uchované energie v článku a napětím na článku.

K nabíjení Li-ion článku je použitý integrovaný obvod LT4057-4,2. Tento obvod je schopen nabíjet jeden Li-ion článek proudem až 800 mA požadovaným CC, CV (Constant Current, Constant Voltage) profilem nabíjení. Vstupní nabíjecí napětí je 5 V s možností nabíjet přímo z USB (Universal Serial Bus) portu, což je současný trend nabíjení všech přenosných zařízení.

Výhodou výše popsaného řešení napájení je vysoká účinnost, životnost baterie, dobíjení přes USB, přesné monitorování baterie. Nevýhodou je již dříve zmiňovaná potenciální nebezpečnost Li-ion článku, cena a možnost nežádoucího rušení step-up měniče.

3.5. Návrh šasi teploměru

Cílem diplomové práce je kompletně realizovat IR teploměr, což samozřejmě zahrnuje návrh a výrobu šasi teploměru. Záměrem je odlišit se od všedních tvarů dostupných na trhu a navrhnout designově zaměřené šasi, samozřejmě se zachováním nutné uživatelské ergonomie a jednoduchosti. Na následujícím obrázku je 3D model vymodelovaný v programu Rhinoceros. Na veškerých návrzích a pomoci při realizaci šasi teploměru se podíleli a poskytovali konzultace designeři Bc. Michal Sedláček a Bc. David Semrád.



Obrázek 3.24: 3D model IR teploměru

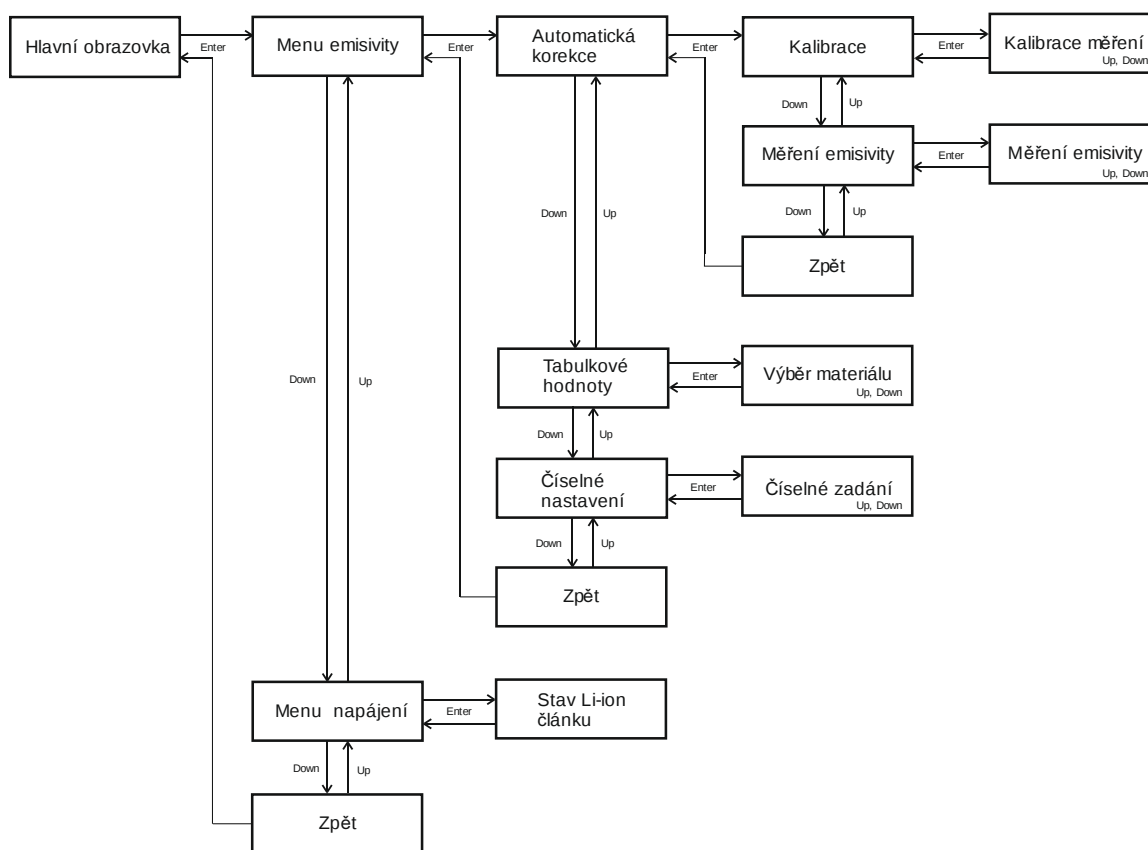
Návrh modelu teploměru počítá s promyšleným a systematickým rozmístěním elektronických a optických prvků uvnitř teploměru. Z přední strany nápadně zaujmají velkou plochu senzory umístěné v předním panelu. Přední panel je vyroben ze slitiny hliníku a následně povrchově upraven černým eloxem. Výkres předního panelu je součástí přílohy (6). Na přední straně vně teploměru je patrný velký grafický LCD pod nímž jsou umístěna čtyři nastavovací

a jedno měřicí tlačítko. Mezi senzory a displejem uvnitř šasi je umístěna řídicí elektronika. V rukojeti IR teploměru je umístěn Li-ion článek spolu s obvody napájecí části. Je možné si všimnout provedení šasi v okolí senzorů a displeje, které chrání tyto komponenty před poškrábáním a mechanickým poškozením.

Skořepina IR teploměru je vytisknuta na prototypové 3D tiskárně RapMan3. Materiál teploměru je ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) plast. Vrchní úprava šasi teploměru je realizována syntetickou barvou.

4. Řídicí program

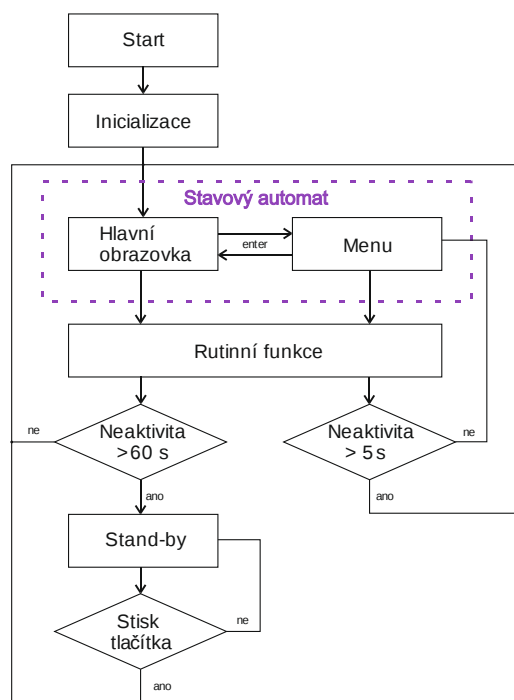
Nedílnou součástí IR teploměru je řídicí program pro mikrokontrolér ATmega324P, který je napsán v jazyce C. Součástí řídicího programu je vytvořená sada knihoven pro LCD, SMBus komunikaci, napájení, aj. Podrobněji jsou jednotlivé knihovny popsány níže v této kapitole. Na následujícím obrázku 4.1 je strukturální rozdělení uživatelského menu IR teploměru. Ve výchozím stavu menu je teploměr připraven k okamžitému měření teploty objektu a samotné měření se provádí stiskem hlavního měřicího tlačítka. Mimo jiné je v tomto stavu na displeji informace o okolní teplotě, přednastavené emisivitě a stavu baterie. Ostatní částí menu, kde je pohyb realizován třemi tlačítky “Enter”, “Up” a “Down” slouží k nastavení emisivity nebo k podrobné informaci o stavu Li-ion článku.



Obrázek 4.1: Rozdělení a pohyb v menu IR teploměru

4.1. Hlavní program

Hlavní program funguje na principu super smyčky a všechny úkony jsou vykonávány sekvenčně v rámci nekonečné smyčky. V úvahu byla brána i možnost použití RTOS (Real Time Operating System), ale vzhledem k povaze zařízení a jednoduchosti řídicího programu je zvolena právě architektura super smyčky. Na obrázku 4.2 je vývojový diagram hlavní funkce.



Obrázek 4.2: Vývojový diagram hlavní funkce

Klíčovou částí hlavního programu je stavový automat, který tvoří struktura “Menu_States”. Ukázkový kód naplnění dané struktury je na obrázku 1.

Po zapnutí přístroje přivedením napájecího napětí je provedena inicializace IR teploměru a na displeji se vypíše úvodní logo. Nyní je program uzavřen v nekonečné smyčce a stavový automat je ve stavu “*IDLE*”. Teploměr je v základním stavu a připraven k měření. Na displeji je zobrazena aktuální velikost okolní teploty a stav baterie. Měření teploty objektu se provádí stiskem hlavního tlačítka, které je připojeno na přerušení “*Pin Change Interrupt*”. To je aktivní pouze ve stavu “*IDLE*”. Stiskem tlačítka “*Enter*” se vstupuje do menu IR teploměru. Pohybu v menu odpovídá obrázek 4.1 a je realizován pomocí tří tlačítek “*Enter, Up, Down*” připojených také na “*Pin Change Interrupt*” přerušení. Aktualizace stavu ve struktuře je prováděna v rámci nekonečné smyčky, kde stavový automat čeká právě na podnět z přerušení zmíněných tří tlačítek. Pokud je IR teploměr mimo stav “*IDLE*” déle než 5 s, je proveden automatický návrat na hlavní obrazovku. Pokud je přístroj neaktivní více než minutu, je teploměr uveden do “*Stand-by*” režimu, tzn. přístroj je vypnut a má minimální odběr. Opětovné zapnutí je provedeno stiskem hlavního měřicího tlačítka.

Algorithmus 1 Struktur Menu_States

```

MENUSTATE STATES[] = {
//| ACTUAL | | ENTER BUTTON|UP BUTTON|DOWN BUTTON| | DISPLAY |
{.ACTUAL=IDLE, {MENUE ,IDLE ,IDLE }, &PRINT_IDLE },// IDLE

{.ACTUAL=MENUE, {EMISA ,BACK1 ,MENUB }, &PRINT_MENU },// MENU
{.ACTUAL=MENUB, {BAT ,MENUE ,BACK1 }, &PRINT_MENU },
{.ACTUAL=BACK1, {IDLE ,MENUB ,MENUE }, &PRINT_MENU },

{.ACTUAL=BAT, {MENUE ,BAT ,BAT }, &PRINT_BAT },// BATTERY

{.ACTUAL=EMISA, {AEMIS ,BACK2 ,EMISS }, &PRINT_EMIS },// EMISSIVITY
{.ACTUAL=EMISS, {sEMIS ,EMISA ,EMIST }, &PRINT_EMIS },
{.ACTUAL=EMIST, {tEMIS1 ,EMISS ,BACK2 }, &PRINT_EMIS },
{.ACTUAL=BACK2, {MENUE ,EMIST ,EMISA }, &PRINT_EMIS },

{.ACTUAL=AEMIS, {EMISA ,AEMIS ,AEMIS }, &PRINT_DIS },// AUTOMATIC EMISSIVITY

{.ACTUAL=sEMIS, {sEMIS1 ,WRITE ,sBACK }, &PRINT_SET },// SET EMISSIVITY
{.ACTUAL=sEMIS1, {sEMIS2 ,sEMIS1 ,sEMIS1 }, &PRINT_SET },
{.ACTUAL=sEMIS2, {WRITE ,sEMIS2 ,sEMIS2 }, &PRINT_SET },
{.ACTUAL=sBACK , {EMISS ,sEMIS ,WRITE }, &PRINT_SET },
{.ACTUAL=WRITE , {WRITE ,sBACK ,sEMIS }, &PRINT_SET },

{.ACTUAL=tEMIS1, {tEMIS2 ,tBACK ,tWRITE }, &PRINT_TABLE },// TABLE EMISSIVITY
{.ACTUAL=tEMIS2, {tWRITE ,tEMIS2 ,tEMIS2 }, &PRINT_TABLE },
{.ACTUAL=tBACK , {EMIST ,tWRITE ,tEMIS1 }, &PRINT_TABLE },
{.ACTUAL=tWRITE , {tWRITE ,tEMIS1 ,tBACK }, &PRINT_TABLE },

};

```

4.2. Knihovny IR teploměru a komunikační protokol SMBus

Komunikační protokol SMBus

SMBus protokol je obdobou známého dvouvodičového komunikačního protokolu I2C firmy Philips umožňující na jednu sběrnici připojit až 128 zařízení. SMBus protokol byl vyvinutý firmou Intel k monitorování kritických parametrů hardwaru základních desek osobních počítačů a embedded systémů. Kompatibilita SMBus a I2C je zaručena pro rychlosti komunikace do 100 kHz. Hlavní rozdíly mezi těmito dvěma protokoly jsou zřejmé z tabulky 3.

	I2C	SMBus
PEC	ne	ano
Timeout	ne	35 ms
Minimální f_{clk}	0	10 kHz
Maximální f_{clk}	100 kHz, 400 kHz, 2 MHz	100 kHz
Maximální proud I	3 mA	350 μA
Funkce Alert	ne	ano
Funkce General Call	ano	ano
Log. 1	$0,7 \cdot V_{\text{DD}}, 3,0 \text{ V}$	$2,1 \text{ V} - V_{\text{DD}}$
Log. 0	$0,3 \cdot V_{\text{DD}}, 1,5 \text{ V}$	$< 0,8 \text{ V}$

Tabulka 3: Porovnání SMBus a I2C

PEC (Packet Error Checking) v protokolu SMBus slouží k zabezpečení správnosti komunikace a hodnota PEC je vypočítána pomocí polynomického kódu CRC-8 z dat přenášených v dané instrukci.

Funkce „Alert” z tabulky 3 umožňuje identifikovat zařízení v pozici slave, které vyvolalo přerušení v rámci jedné společné linky přerušení. Univerzální adresa této události na sběrnici je 0b0001100.

Funkce „General Call” slouží k souběžné komunikaci zařízení master s více zařízeními v pozici slave na stejné sběrnici. Univerzální adresa této události je 0b0000000.

Rutinní funkce SMBus komunikace obsahuje knihovna „SMBus.c”.

Knihovna senzoru MLX90614

Ke komunikaci mezi mikrokontrolérem a senzorem MLX90614 slouží knihovna „SMBus.c” spolu s knihovnou „MLX90614.c” obsahující základní funkce pro zápis a čtení vnitřních registrů teplotního senzoru. MLX90614 obsahuje dva typy paměti. Paměť EEPROM, v níž je uloženo nastavení vnitřních filtrů senzoru, hodnota emisivity, adresa zařízení, aj. Do této paměti je možné omezeně zapisovat. Druhým typem paměti je paměť RAM, ve které jsou uloženy aktuální naměřené hodnoty teplot. Na následujícím obrázku 4.3 je protokol zápisu a čtení vnitřních pamětí senzoru protokolem SMBus. Z diagramu plyne nutnost výpočtu PEC při zápisu dat do senzoru. Funkce výpočtu CRC-8 kódu je součástí knihovny „MLX90614.c”.

Čtení



Zápis



Obrázek 4.3: Protokol čtení a zápisu senzoru MLX90614

Na obrázku 2 je ukázka funkce “*uint16_t read_sensor(unsigned char adress)*” pro čtení dat z teplotního senzoru. Sled příkazů této funkce sekvenčně odpovídá diagramu z předchozího obrázku 2 pro čtení dat. Vstupem funkce je adresa senzoru. Návrátová hodnota funkce je 16bitové číslo odpovídající naměřené teplotě.

Algoritmus 2 Funkce “*uint16_t read_sensor(unsigned char adress)*”

```

UINT16_T READ_SENSOR(UNSIGNED CHAR ADDRESS) {                               // READ SENSOR
    CLI();                                                                   
    SMBUS_INIT(SMBUS_F);                                                      
    SMBUS_START();                                                             
    SMBUS_WRITE_BYTE(SAW);                                                      // LSB SET TO 0, WRITING
    SMBUS_WRITE_BYTE(ADDRESS);                                                 
    SMBUS_START();                                                              // LSB SET TO 1, READING
    SMBUS_WRITE_BYTE(SAW|0x01);                                                
    SMBUS_READ_BYTE_ACK();                                                      
    SMBUS_READ_BYTE_ACK();                                                      
    SMBUS_READ_BYTE_NACK();                                                     // READ PACKET ERROR CODE (PEC)
    SMBUS_STOP();                                                               
    SEI();                                                                       
    RETURN ((H_BYTE<<8)+(L_BYTE));                                              // 16BIT VALUE
}

```

Knihovna obvodu LTC2942-1

Integrovaný obvod LTC2942-1 připojený na SMBus sběrnici monitoruje stav Li-ion článku. Konkrétně je tímto obvodem hlídána aktuální teplota, velikost napětí a množství akumulovaného náboje v Li-ion článku. Pro komunikaci s obvodem slouží knihovna “Battery.c” spolu s knihovnou “SMBus.c”. Bližší specifikace komunikace je k dohledání v katalogovém listu a je obdobná jako u senzoru MLX90614.

LTC2942-1 obsahuje 16 interních registrů, z toho první dva registry jsou “STATUS” - stavový a “CONTROL” - kontrolní. V ostatních registrech jsou nastavitelné mezní hodnoty měřených veličin a jejich samotné 16bitové hodnoty rozdělené vždy do dvou 8bitových registrů. Překročení nastavených mezních hodnot veličin indikuje stavový registr “STATUS”. Kontrolní registr slouží k nastavení pracovního režimu obvodu. Bity [7,6] nastavují režim AD převodníku. Je použit automatický mód. Bity [5:3] definují předděličku M počítadla akumulovaného náboje v závislosti na použité kapacitě Li-ion článku. Bity [2:1] konfiguruji chování vývodu $\overline{AL}/CC$. Zde je nastaven režim $\overline{AL}$, který v případě překročení jakékoliv přednastavené mezní hodnoty měřené veličiny, vyvolá změnu výstupní úrovně na tomto vývodu. Mikrokontrolér ATmega324P v rámci externího přerušení “INT0” následně vyhodnotí událost. Tím je možné předejít havarijnímu stavu článku. Poslední bit [1] slouží k uvedení analogových částí LTC2942-1 do režimu spánku, kde hodnoty v registrech jsou zachovávány.

Na obrázku 3 je ukázka inicializační funkce “*void battery_gauge_init(void)*” obvodu LTC2942-1. Do proměnné “*SET*” je vložena binární hodnota pro nastavení kontrolního registru “*CONTROL*”. Následně je tato hodnota zapsána do daného registru. Další tři řádky zapisují mezní hodnoty měřených veličin do odpovídajících registrů.

Algoritmus 3 Funkce “*void battery_gauge_init(void)*”

```

VOID BATTERY_GAUGE_INIT(VOID){
    UINT8_T SET = 0b11111100;
    WRITE_CTRL_GAUGE(BAT_GAUGE,CONTROL,SET);

    WRITE_CTRL_GAUGE(BAT_GAUGE,VOL_TRES_H_MSB,0xAE);
    WRITE_CTRL_GAUGE(BAT_GAUGE,VOL_TRES_L_LSB,0x77);
    WRITE_CTRL_GAUGE(BAT_GAUGE,TEMP_TRES_H_MSB,0x8E);
}
// CONTROL REGISTER [7:6] ADC Mode (AUTO),
// [5:3] PRESCALER (64), [2:1] AL/CC Config (AL),
// [0] SHUTDOWN (ON)
// THRESHOLD REGISTERS
// VOLTAGE: HIGH: 4.1 V (0xAE), LOW: 2.8 V (0x77)
// TEMPERATURE:HIGH: 60 °C (0x8E), LOW: DEFAULT

```

Integrovaný obvod LTC2942-1 je v těle IR teploměru v přímém kontaktu s Li-ion článkem, proto je možné monitorovat aktuální teplotu článku. Binární hodnota teploty je uložena v registrech “*TEMP_LSB*” a “*TEMP_MSB*”. Binární hodnota napětí článku je uložena v registrech “*VOL_LSB*” a “*VOL_MSB*”.

Hlavní funkcí obvodu LTC2942-1 je měření množství náboje směřujícího do Li-ion článku nebo z něj. To se provádí integrací procházejícího proudu podle času. Takto je možné získat přesnou informaci o velikosti akumulovaného náboje uvnitř článku. Důležité je správné nastavení měření náboje. Připojením článku do obvodu není možné získat přesnou informaci o aktuální velikosti akumulovaného náboje v článku. Proto je nutné sesouhlasit hodnotu náboje v článku s hodnotou v registrech obvodu LTC2942-1 odpovídajících množství akumulovaného náboje. To je provedeno při prvním překročení mezní hodnoty spodní úrovně napětí na článku. Dojde-li k tomuto stavu, registry počítadla náboje jsou vynulovány a relativní velikost náboje v článku je nulová. Mezní hodnota je nastavena na 2,9 V.

Knihovna grafického LCD

K řízení grafického LCD LM6029A slouží knihovna “*LCD.c*”. Knihovna displeje obsahuje dvě znakové sady ukládané do programové paměti mikrokontroléru ATmega324P. První univerzální znaková sada má velikost fontu 8 pixelů, druhá omezená pouze na číslice má velikost fontu 20 pixelů. K vytvoření znakových sad byl použitý program LCD Font Maker.

Ihned po zapnutí IR teploměru je potřeba správně nastavit řadič LCD. To je provedeno sledem několika po sobě jdoucích instrukcí. Na obrázku 4 je inicializační funkce “*void lcd_init(void)*” LCD, která je vykonána v okamžiku zapnutí IR teploměru.

Algoritmus 4 Funkce “*void lcd_init(void)*”

```
VOID LCD_INIT(VOID){
    DDR(DATA_PORT) |= 0xFF; // DEFINE I/O
    DDR(CTRL_PORT) |= (1<<CS)|(1<<RST)|(1<<RS)|(1<<WR)|(1<<RD);
    CTRL_PORT |= (1<<CS)|(1<<RST)|(1<<RS)|(1<<WR)|(1<<RD);
    DATA_PORT |= 0xFF;

    CTRL_PORT &= ~(1<<RST); // RESET
    _DELAY_MS(50);
    CTRL_PORT |= (1<<RST);

    LCD_CONTROL(0xA2); // SETTING FOR NORMAL OPERATION
    LCD_CONTROL(0xA0); // LCD BIAS (1/9)
    LCD_CONTROL(0xC8); // ADC (NORMAL)
    LCD_CONTROL(0x40); // SHL (FLIPPED IN Y DIRECTION)
    LCD_CONTROL(0x2F); // INITIAL DISPLAY LINE (0)
    LCD_CONTROL(0x25); // POWER CONTROL SET: VF (ON), VR (ON), Vc(ON)
    LCD_CONTROL(0x81); LCD_CONTROL(0x20); // REGULATOR RESISTOR
    LCD_CONTROL(0xAF); // VOLUME MODE (CONTRAST)
    // DISPLAY ON/OFF (ON)

    LCD_CONTROL(0xA4); // ENTIRE DISPLAY ON/OFF (OFF)
    LCD_CONTROL(0xA6); // REVERSE DISPLAY ON/OFF (OFF)
    LCD_CONTROL(0xF8); LCD_CONTROL(0x03); // BOOSTER RATIO (6x)

    LCD_CONTROL(0xB0); // PAGE ADDRESS (0)
    LCD_CONTROL(0x10); // COLUMN ADDRESS HIGH (0)
    LCD_CONTROL(0x00); // COLUMN ADDRESS LOW (0)
}
```

V knihovně LCD jsou také elementární zobrazovací funkce a kompletní grafické zpracování menu IR teploměru. Na následující obrázku 5 je funkce “*void draw_pixel(uint8_t x, uint8_t y)*” potřebná pro zobrazení jednoho pixelu na LCD. Vstupními parametry funkce jsou souřadnice pixelu. Dělením je zjištěna stránka LCD zobrazovaného pixelu. První podmínka “*if*” zjišťuje, zda je pixel na stejné stránce jako předchozí pixel. Druhá podmínka “*if*” ověřuje, zda je pixel ve stejném sloupci jako předchozí pixel. Tímto ošetřením je možné vypisovat pixely pod sebou na jedné stránce LCD. Následuje nastavení souřadnic a samotné zobrazení daného pixelu.

Algoritmus 5 Funkce “*void draw_pixel(uint8_t x, uint8_t y)*”

```
VOID DRAW_PIXEL(UINT8_T X, UINT8_T Y){
    SHORT INT PIXEL;

    PIXEL=Y;Y/=8; // Y PIXEL COORDINATE
    PIXEL%=8;

    IF((Y != PIXEL_PAGE)){ // ANOTHER DISPLAY PAGE
        PIXEL_PAGE = Y;PIXEL = (1<<PIXEL);LAST_PX_Y = PIXEL;LAST_PX_X = X; // SAFE PIXEL COORDINATES
    }ELSE{
        IF(X != LAST_PX_X)LAST_PX_Y=0; // ANOTHER COLUMN
        PIXEL = (LAST_PX_Y | (1<<PIXEL)); LAST_PX_Y = PIXEL; // THE SAME DISPLAY PAGE AND COLUMN AS LAST PIXEL
    }
    LCD_SET_CURSOR(X,Y); // SET POSITION
    LCD_WRITE(PIXEL); // WRITE PIXEL
}
```

Na dalším obrázku 6 je ukázka funkce “*void lcd_char(unsigned char ch, unsigned char inv)*” pro výpis znaku z programové paměti mikrokontroléru ATmega324P na LCD. Vstupními parametry funkce je ASCII (American Standard Code for Information Interchange) znak a režim zobrazení. Kurzor je nastaven na požadované souřadnice. Do proměnné “*PTR*” je uložena počáteční hodnota znaku v poli znakové sady. Následuje podmínka, zda má být

zobrazení invertované. Poté je v cyklu “for” vypsán znak z programové paměti s využitím knihovny “pgmspace.h”. Globální proměnná souřadnice “cursorx” je inkrementována a připravena pro výpis dalšího znaku.

Algoritmus 6 Funkce “void lcd_char (unsigned char ch, unsigned char inv)”

```
VOID LCD_CHAR (UNSIGNED CHAR CH, UNSIGNED CHAR INV){
    UINT16_T PTR;
    UNSIGNED CHAR I;

    LCD_SET_CURSOR(CURSORY, CURSORY);           // SET POSITION
    PTR = (UINT16_T)((CH - 0x20)*7));           // CHAR IN PROGRAM MEMORY
    FOR (I = 0; I < 7; I++){                     // WRITE CHAR
        IF(INV==1){
            LCD_WRITE(~PGM_READ_BYTE(&FONT[PTR])); // INVERTED CHAR
        }ELSE{LCD_WRITE(PGM_READ_BYTE(&FONT[PTR]));}
        ++PTR;
    }
    CURSORX+=7;                                   // NEXT CHAR POSITION
}
```

5. Realizace a ověření funkčnosti návrhu IR teploměru

5.1. Návrh desky plošných spojů

IR teploměr tvoří dvě prokovené oboustranné DPS (Desky Plošných Spojů). Větší deska o rozměrech 61x52 mm tvoří hlavní řídicí jednotku teploměru. Na druhé menší DPS o rozměrech 51x15 mm je umístěna napájecí část teploměru. Schéma zapojení a předloha DPS jsou součástí přílohy (6). DPS byly navrženy v programu EAGLE firmy CadSoft Computer GmbH.

Finální verze DPS vychází z původních osvědčených vývojových desek. Minimální rozměry DPS jsou zajištěny použitím povrchové montáže SMT (Surface Mount Technology). Většina použitých pouzder pasivních součástek jsou velikosti 0603. Na hlavní řídicí desce je možné vidět mikrokontrolér ATmega324 umístěn netradičně pod úhlem 45°. Tím je ušetřeno velké množství místa na desce. Nad mikrokontrolérem je místo pro připojení LCD. DPS má stejné rozměry jako displej pro snadné zabudování elektroniky do těla IR teploměru. Vpravo na desce jsou patrně odstíněné části selektivního zesilovače a vzdálenostního senzoru SHARP. Důležité při návrhu desky je dávat pozor na správné zemnění a umístění klíčových částí teploměru. Připojení všech senzorů je realizováno vyznačenými ploškami na spodní straně DPS. Připojení ovládacích tlačítek je realizováno přes počítačový konektor. Ve spodní části DPS je FFC (Flexible Flat Cable) konektor pro připojení napájecí části k hlavní řídicí desce.

DPS napájecí části vyžaduje při návrhu největší pozornost, kvůli použitému step-up měniči. Prvky měniče musí být umístěny co nejblíže k sobě. Nesprávným rozložením prvků na desce je možné lehce způsobit nefunkčnost měniče a tím celé napájecí části. Na jedné straně DPS je USB konektor pro připojení nabíječky. Druhou stranou je deska připojena k řídicí desce.

5.2. Oživení a analýza bloku měření emisivity

Celý blok měření emisivity je umístěn v pravé části oboustranné prokovené DPS. Modulaci vysílací LD zajišťuje mikrokontrolér ATmega324P s řídicím softwarem ke generování přesného PWM signálu. Problémy se zprovozněním vývojové desky nastaly hned na počátku, jelikož tento typ mikrokontroléru nebyl součástí knihovny překladače ve WinAVR a nebylo možné mikrokontrolér naprogramovat. Problém byl vyřešen přepsáním hexadecimálního podpisu mikrokontroléru ATmega164P obsaženého v knihovně překladače, na podpis mikrokontroléru ATmega324P. Tyto dva mikrokontroléry se liší pouze velikostí pamětí. Následně proběhlo úspěšné nahrání testovacího řídicího softwaru. Jednotka vysílače generovala optický signál modulovaný na frekvenci 10,1 kHz.

Následovalo oživení části přijímače. Prvotní nefunkčnost obvodu způsobil lidským okem nespátřitelný prasklý keramický SMD (Surface Mount Device) kondenzátor ve zpětné vazbě aktivního filtru. Především keramické kondenzátory jsou náchylné na ohyby DPS, jejímž nejčastějším důsledkem je právě prasklina a jejich poškození. Jakmile byla funkční část vysílače i přijímače, byl zjištěn další zásadní nedostatek, a to vliv rušení v oblasti 10 kHz z okolního osvětlení. Tento problém byl vyřešen změnou modulační frekvence na 1,019 kHz.

U oživení bloku měření emisivity na finální DPS nastal zásadní problém. Původně použitý nízkofrekvenční OZ LTC6201 měl příliš velký offsetový proud. Ten způsoboval při zvětšení

hodnoty transimpedance příliš velký nárůst offsetového napětí, jehož velikost byla vzhledem k velikosti napájecího napětí 5 V neúnosná. Tento OZ tedy nebylo možné použít pro větší hodnoty transimpedance, a proto byla zvolena alternativa, speciální nízkošumový OZ AD8652. Po změně vstupního OZ fungovalo vše správně.

V tabulce 4 jsou teoretické hodnoty emisivity ε_T , detekovaného napětí U_{det} a vypočtené hodnoty emisivity ε_M pro různé difúzní materiály s přesností 2 %. Jako referenční materiál je použit bílý papír s odrazivostí 0,32. Výpočet odrazivosti je podle vztahu 3.6. Emisivita je následně vypočtena podle vztahu 2.8 upraveného na vztah 5.1. Jako funkce vzdálenosti je pro kalibraci zvolen typicky její druhý kvadrát.

$$\varepsilon_M = 1 - \rho_T \quad [-], \quad (5.1)$$

kde ε_M je vypočtená emisivita $[-]$.

- $\eta_{\text{sys}} = 1$
- $S_U = 3,056 \text{ GV} \cdot \text{W}^{-1}$
- $d = 1 \text{ mm}$
- $P_L = 2,5 \text{ mW}$
- $(D^n = D^2): D = 0,15 \text{ m}$

	Bílý papír (Reference)	Křída	Omítka	Polystyren	Černý papír	Žlutý papír
Detekované napětí $U_{\text{det}} [\text{V}]$	7,2	7,4	5,4	6,7	1,3	6,5
Tabulková emisivita $\varepsilon_T [-]$	0,68	0,70	0,80	0,64	0,94	0,72
Naměřená emisivita $\varepsilon_M [-]$	0,68	0,70	0,76	0,70	0,94	0,71

Tabulka 4: Hodnoty emisivity měřených materiálů

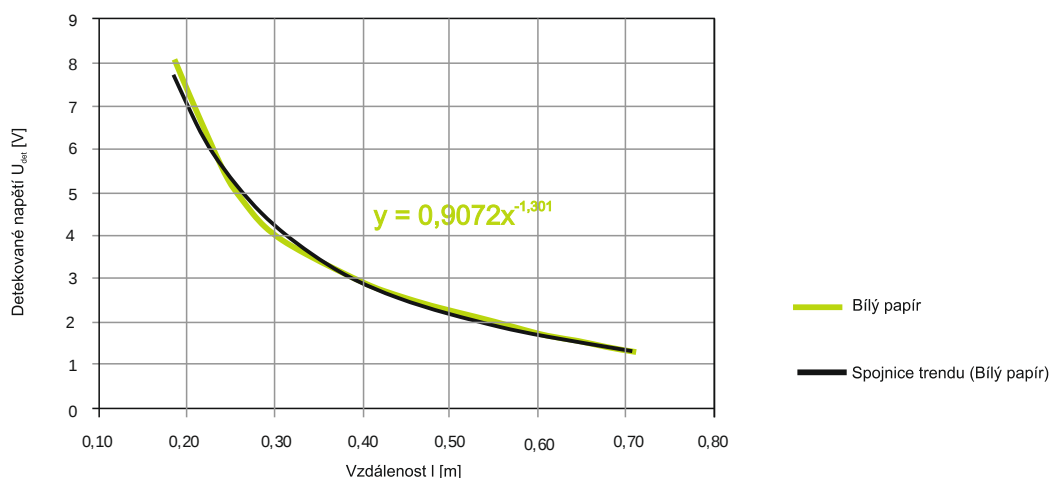
Teoretické hodnoty se velice blíží hodnotám naměřeným. Některé hodnoty se liší z důvodu nedokonalé připravenosti povrchu měřených vzorků. Měřením je ověřena správnost principu stanovení emisivity na základě odrazivosti pro pevnou vzdálenost.

V tabulce 5 jsou hodnoty detekovaného napětí referenční odrazivé plochy pro různé vzdálenosti. Pro správné měření odrazivosti nezávisle na vzdálenosti měřeného objektu je potřeba přesně zjistit funkční závislost detekovaného napětí U_{det} právě na vzdálenosti měřeného objektu. Na obrázku 5.1 je graf této závislosti.

Vzdálenost	Bílý papír (Reference)
$D[\text{m}]$	$U_{\text{det}}[\text{V}]$
0,20	7,80
0,25	5,10
0,30	4,00
0,35	3,40
0,40	2,90
0,45	2,60
0,50	2,30
0,55	2,06
0,60	1,83
0,65	1,55
0,70	1,36

Tabulka 5: Hodnoty detekovaného napětí v závislosti na vzdálenosti

Detekované napětí v závislosti na vzdálenosti



Obrázek 5.1: Graf závislosti detekovaného napětí na vzdálenosti

Na základě sestrojeného grafu 5.1 je pomocí spojnice trendu rekurzivně zjištěna funkce závislosti detekovaného napětí U_{det} na vzdálenosti měřeného objektu D . Po zavedení substituce $U_{\text{det}} = y$ a $D = x$, získaná rovnice grafu odpovídá právě hledané funkci vzdálenosti měřeného objektu. Je patrné, že se jedná o mocninnou funkci a mocnině vzdálenosti D odpovídá hodnota 1,3. Dalším měřením pro různé vzdálenosti a materiály byla tato hodnota potvrzena. Následnou implementací zjištěné funkce vzdálenosti do vztahu 3.6 je získán konečný vztah 5.2 pro měření odrazivosti:

$$\rho_T = \frac{4 \cdot U_{\text{det}} \cdot D^n}{S_U \cdot P_L \cdot d^2} \cdot \eta_{\text{sys}} \quad [-], \quad (5.2)$$

kde n je mocnina vzdálenosti D [$n = 1, 301$].

Chyba měření emisivity

Experimentální měření fyzikálních veličin je zpravidla zatížené chybou měření. Přímé stanovení chyby měření ať relativní, či absolutní je poměrně snadné. V případě, že je potřeba stanovit chybu měřené veličiny na základě více přímých měření je situace obtížnější. Je potřeba vypočítat přenesenou chybu měření.

Pro stanovení chyby měření odrazivosti ρ_T podle ze vztahu 3.2 je potřeba použít vztah 5.3 pro výpočet přenesené chyby měření. Hlavním zdrojem chyb měření odrazivosti je měření vzdálenosti D . Je všeobecně známo, že měření vzdálenosti je velice problematická záležitost. Také proto má tato chyba největší váhu. Dalším zdrojem chyb měření je velikost detekovaného napětí U_{det} , tato chyba je ovšem zanedbatelná v porovnání s chybou měření vzdálenosti.

$$\vartheta_X = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \cdot \vartheta_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \cdot \vartheta_b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \cdot \vartheta_c\right)^2 + \dots} \quad [-], \quad (5.3)$$

kde ϑ_X je hledaná chyba veličiny X , $\frac{\partial f}{\partial a}$ je parciální derivace funkce f podle veličiny a , ϑ_a je chyba veličiny a a obdobně pro další nezávislé proměnné funkce f .

Ukázkový výpočet přenesené chyby měření: $D = (0,15 \pm 0,05)$ m, $n = (1,3 \pm 0,13)$, $P_P = 2,36$ nW, $P_L = 2,5$ mW, $d = 1$ mm:

$$\begin{aligned} \vartheta_{\rho_T} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_T}{\partial D} \cdot \vartheta_D\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_T}{\partial n} \cdot \vartheta_n\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{4 \cdot P_P \cdot D \cdot n^{(D-1)}}{P_L \cdot d^2} \cdot \vartheta_D\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot P_P \cdot D^n \cdot \ln D}{P_L \cdot d^2} \cdot \vartheta_n\right)^2} = \\ &= \sqrt{(0,45 \cdot 0,05)^2 + (-0,61 \cdot 0,13)^2} = 0,086 \end{aligned}$$

Vypočtená chyba odrazivosti pro dané vstupní parametry odpovídá velikosti chyby emisivity. Měření emisivity je pak v tomto případě s přesností $\varepsilon = (\varepsilon_{\text{mer}} \pm 0,086)$ [-]. Relativní chyba měření je $\rho_{\rho_T} = 13,9$ %.

5.3. Oživení bloku teploty a napájení

K bezkontaktnímu měření teploty a k měření teploty okolí slouží čistě senzor firmy Melexis MLX90614 připojený k mikrokontroléru ATmega324P. Pro vyzkoušení a ověření funkčnosti bloku měření teploty byl na nepájivém kontaktním poli sestaven obvod právě se zmiňovaným senzorem MLX90614, grafickým LCD LM6029A a řídicím mikrokontrolérem ATmega8. Dále byl do obvodu přidán červený zaměřovací laser včetně optiky a řídicí jednotky. K jednoduchému a názornému ovládání byl přidán mikropínač. Sestavení a zapojení obvodu bylo bezproblémové. Následně bylo toto zapojení implementováno pro komunikaci s mikrokontrolérem ATmega324 na vývojové DPS. Napoprvé byl blok měření teploty plně funkční i u finální verze DPS.

Značnou dobu ovšem zabrala studie katalogových listů dílčích komponentů a následné psaní řídicího softwaru. Byla potřeba napsat knihovnu pro grafický LCD a SMBus komunikaci. Nemalý čas trvalo právě psaní komunikace mezi senzorem a mikrokontrolérem, jelikož se v katalogovém listu senzoru vyskytly některé nejasnosti. Za zmínku stojí třeba adresování interních paměťových registrů senzoru. Důležitá byla implementace softwaru pro komunikaci mezi blokem emisivity a měření teploty, jelikož vstupním údajem senzoru MLX90614 je právě emisivita.

U oživení napájecí části IR teploměru nastal problém s rušením step-up měniče. Rušení se přenášelo na sběrnici SMBus komunikace. Problém byl vyřešen změnou a preciznějším návrhem DPS zdroje.

5.4. Cenová kalkulace

Jak bylo psáno již v úvodu práce, jedním z nejdůležitějších hledisek realizace práce je konečná cena. V níže uvedené tabulce 6 je přehled cen klíčových komponentů spolu s celkovou cenou. Jsou zde zahrnuty navíc ceny komponentů jako DPS a vnější skořepina IR teploměru.

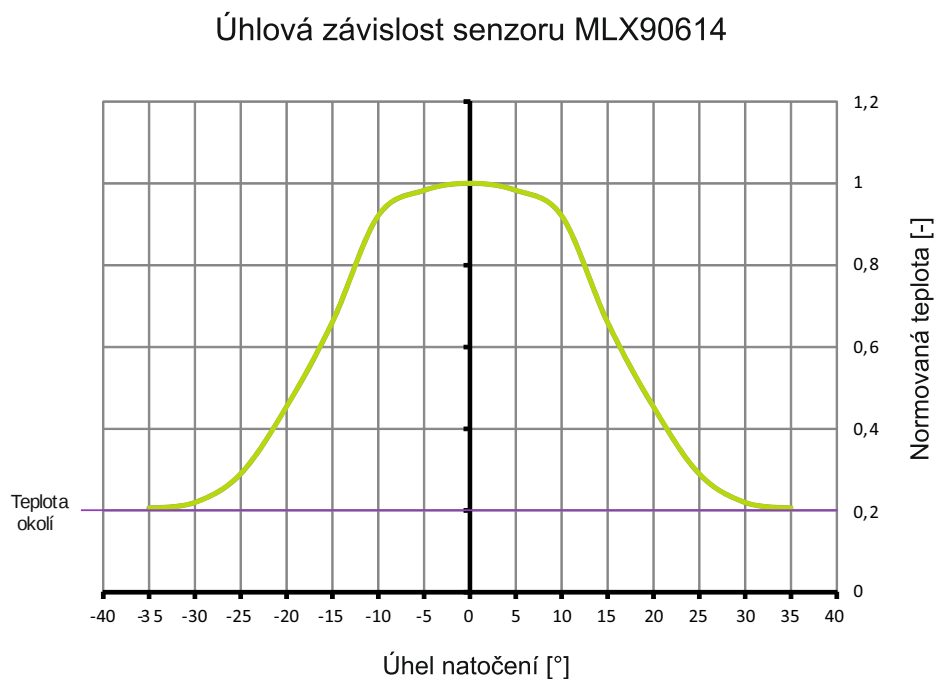
Komponent	Cena v Kč
Displej LM6029A	312
ATmega324P	92
SHARP senzor (Proximity)	353
Melexis senzor (Thermopile)	304
Optika	299
Laserová dioda 635 nm	21
Laserová dioda 850 nm	285
Baterie Li-ion	150
Elektronické součástky	400
DPS	200
Tělo IR teploměru	180
Celkem	2596

Tabulka 6: Cenový přehled cen komponentů

Součástky pro práci byly převážně objednány ze známých internetových obchodů nebo formou vzorků přímo od výrobce. Cena u sériové výroby by se podstatně redukovala, na druhou stranu je potřeba počítat s náklady na vývoj a výrobu.

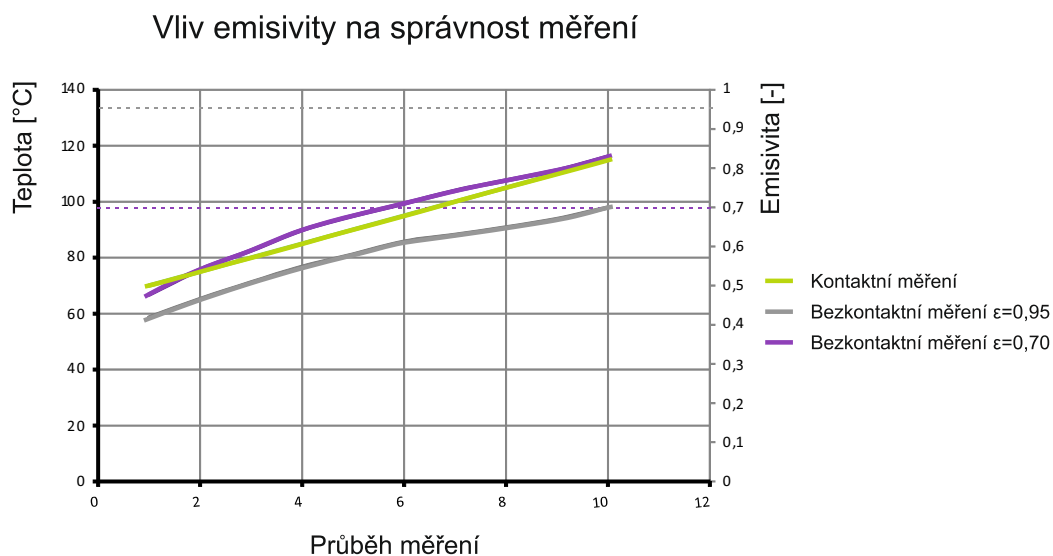
5.5. Naměřené údaje

Na následujícím obrázku 5.2 je změřená teplotní charakteristika senzoru pro bezkontaktní měření teploty MLX90614 v závislosti na úhlu natočení vůči bodovému zdroji tepelného záření. Z grafu je zřejmé, že zorný úhel senzoru odpovídá výrobcem udávané hodnotě 10° .



Obrázek 5.2: Úhlová závislost senzoru MLX90614

V následujícím grafu na obrázku 5.3 je průběh měření teploty kontaktním teploměrem, bezkontaktním teploměrem s pevně nastavenou emisivitou na hodnotu 0,95 a bezkontaktně změřenou emisivitou. Měřený materiál je polystyren, který vlastnostmi povrchu splňuje podmínky pro bezkontaktní měření emisivity. Jako referenční materiál pro měření emisivity je použit bílý papír s hodnotou emisivity 0,68.

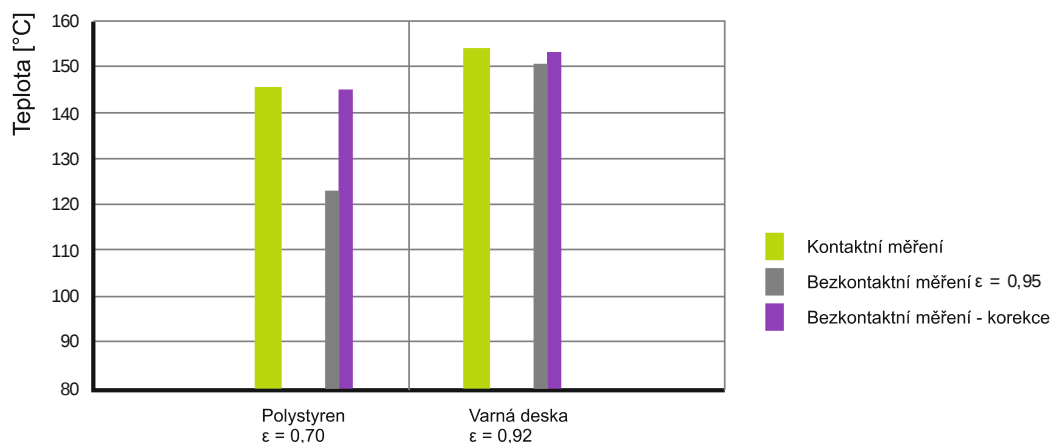


Obrázek 5.3: Porovnání kontaktního a bezkontaktního měření s korekcí

Z obrázku 5.3 je vidět nepřesnost měření vznikající měřením bezkontaktním IR teploměrem s pevně nastavenou emisivitou. Rozdíl teplot je až 18 °C. Po použití funkce automatického zjištění emisivity se naměřená teplota blíží teplotě naměřené kontaktním teploměrem.

Na obrázku 5.4 je vidět sloupcový graf s porovnáním měřených teplot dvou různých materiálů s rozdílnou hodnotou emisivity. Zelený sloupec vyznačuje teplotu změřenou kontaktně, která je pevně nastavena a slouží jako reference k bezkontaktnímu měření. Sloupec šedé barvy znázorňuje bezkontaktní měření s pevně nastavenou hodnotou emisivity na 0,95. Fialový sloupec zobrazuje bezkontaktní měření teploty s korekcí emisivity. V prvním případě je měřeným materiálem polystyren. Změřená emisivita polystyrenu je stejně jako v předchozím grafu 0,70. Rozdíl emisivity pevně nastavené a změřené je znatelný, proto se liší i porovnání bezkontaktně změřených teplot. V druhém případě se jedná o kovový povrch odpovídající požadavkům bezkontaktního měření emisivity. Konkrétně je jedná o varnou desku, jejíž emisivita je změřena na hodnotu 0,92. Tato hodnota je velice blízká hodnotě pevně nastavené v teploměru. Proto není rozdíl obou bezkontaktně změřených teplot tak znatelný jako v předchozím případě. Referenčním materiálem u tohoto měření je opět bílý papír s hodnotou emisivity 0,68.

Porovnání měření dvou materiálů s rozdílnou emisivitou



Obrázek 5.4: Porovnání měření teploty dvou materiálů s rozdílnou emisivitou

6. Závěr

Diplomová práce zahrnuje teoretický rozbor zadaného tématu a nastudování základních zákonů a jevů v oblasti termodynamiky, optiky a elektroniky. Součástí práce je ukázka základních metod měření teploty a jejich princip. Dále je objasněn princip bezkontaktního měření teploty a jeho historický vývoj. Na základě teoretických poznatků stěžejních fyzikálních zákonů je postupně navržena koncepce IR teploměru. Unikátní v této diplomové práci je bezkontaktní metoda měření emisivity pomocí odrazivosti měřeného povrchu. Teploměr je schopen automaticky a bezdotykově zjistit emisivitu měřeného povrchu pomocí kalibrační metody. Mimo jiné je možné emisivitu nastavit manuálně v číselné podobě nebo vybrat materiál z interní knihovny teploměru.

Nejprve byl realizován návrh experimentálního schématu zapojení a DPS sloužící k ověření funkčnosti navrženého konceptu a k testování dílčích klíčových prvků. Důraz v řešení konstrukce IR teploměru byl kladen na pečlivý výběr vhodných a cenově dostupných dílčích komponentů.

Úspěšně je realizována metoda měření emisivity objektu na základě odrazivosti, měřené pomocí IR laserové diody a selektivního přijímače s PIN fotodiodou. Pečlivě byl navržen selektivní optický přijímač včetně dílčích výpočtů a jeho šumové analýzy. Parametry optického přijímače byly simulovány v programu MicroCap. Dále součástí diplomové práce je analýza energetické bilance optického spoje v programu Matlab. Součástí bloku měření emisivity je také realizace a odladění měření vzdálenosti pomocí vzdálenostního senzoru firmy SHARP. V neposlední řadě je odvozen vztah pro výpočet chyby měření emisivity.

K napájení IR teploměru byly navrženy dvě možné varianty. V diplomové práci je použita složitější varianta s Li-ion článkem a patřičnými ochrannými integrovanými obvody a obvody umožňující dobíjet IR teploměr z USB portu.

Po odladění všech bloků IR teploměru byla důkladně navržena oboustranná a prokovená DPS s cínovou povrchovou úpravou. Důležitou roli u DPS teploměru hraje miniaturizace.

Součástí návrhu IR teploměru je obsáhlý řídicí program napsaný v jazyce C, včetně řady vytvořených knihoven. Řídicí program obsahuje implementaci komunikace mezi senzorem měření teploty, obvodu monitorujícího Li-ion článek a mikrokontrolérem pomocí protokolu SMBus. Je vytvořena kompletní knihovna pro grafický LCD. V řídicím programu je zahrnuta interní knihovna emisivity běžně dostupných materiálů. Řídicí program zajišťuje aritmetické operace pro výpočet teploty a emisivity ze získaných vstupních dat. Uživatelsky je optimalizované grafické a ovládací rozhraní teploměru.

Uživatelská optimalizace IR teploměru je po hardwarové stránce doplněna o prototyp šasi teploměru. Skořepina teploměru je vytisknuta na 3D tiskárně z ABS plastu.

Funkčnost IR teploměru je demonstrována měřeními a porovnáním dotykového a bezdotykového měření teploty. Názorně je ukázán vliv emisivity na korektní bezkontaktní měření teploty. Měření dynamických vlastností změn teplot a emisivity nejsou zdokumentovány z důvodu problematického vytvoření daných podmínek a samotného problematického teplotního měření.

Reference

- [1] KOLEKTIV, Emanuel Svoboda a spol. Přehled středoškolské fyziky. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005. ISBN 978-807-1963-073.
- [2] HALLIDAY, David. Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky [online]. 1. vyd. Brno/Praha: VUTUM/PROMETHEUS, 2000, 1198 s. [cit. 2012-11-27]. ISBN 80-214-1869-9.
- [3] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody [online]. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. [cit. 2012-11-27]. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [4] Zpravodaj pro měření a regulaci [online]. Číslo 1, 2. 30 April 2012, [cit. 30. dubna 2012]. Dostupné na WWW: <http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf>
- [5] MASSOUD, Mahmoud. Engineering thermofluids thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer. Berlin: Springer, 2005. Print.
- [6] TESTO, Emisivita, reflexe, transmise [online]. 30 April 2012, [cit. 30. dubna 2012]. Dostupné na WWW: <[http://www.testo.cz/online/abaxx-?\\$part=PORTAL.CZE.ContentDesk&\\$event=show-from-menu&categoryid=104097941](http://www.testo.cz/online/abaxx-?$part=PORTAL.CZE.ContentDesk&$event=show-from-menu&categoryid=104097941)>
- [7] PYRO, Real Time Emissivity Measurement For Infrared Temperature Measurement [online]. 30 April 2012, [cit. 30. dubna 2012]. Dostupné na WWW: <http://www.pyrometer.com/pyro_technology.html>
- [8] JENN, David C. Radar and laser cross section engineering. 2nd ed. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005, xxi, 505 s. ISBN 15-634-7702-5.
- [9] JELALIAN, Albert V. Laser radar systems. 2nd ed. Boston: Artech House, 1992, xi, 292 s. ISBN 08-900-6554-3.
- [10] WILFERT, Otakar. Optoelektronika: přednášky [online]. 1. vyd. Brno: VUT FEKT, 2002, 121 s. [cit. 2012-11-27]. ISBN 80-214-2264-5.
- [11] Fotometrie a Radiometrie [online]. 30 April 2012, [cit. 30. dubna 2012]. Dostupné na WWW: <http://biomolecules.mff.cuni.cz/files/courses/Fotometrie_a_radiometrie.pdf>
- [12] ATMEL CORPORATION. AVR 8-Bit ATmega164/324/644P(V): Datasheet [online]. 08/2009, [cit. 16. listopadu 2012]. 439 s. Dostupné na WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8011.pdf>.
- [13] ATMEL CORPORATION. AVR 8-Bit RISC [online]. 2009, [cit. 7. prosince 2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.atmel.com/products/avr/>>.
- [14] GRAEME, Jerald G. Photodiode amplifiers: op amp solutions. Boston: McGraw-Hill, 1996, xii, 252 s. ISBN 00-702-4247-X.
- [15] DEVICES, Walter G. Jung ed. Analog. Op Amp applications: op amp solutions. Norwood, Mass: Analog Devices, Inc, 2002, xii, 252 s. ISBN 09-165-5026-5.
- [16] MELEXIS SEMICONDUCTORS. MLX90614: Datasheet. [online]. 08/2009, [cit. 16. listopadu 2012]. 439 s. Dostupné na WWW: <<http://www.melexis.com/Assets/IR-sensor-thermometer-MLX90614-Datasheet-5152.aspx>>.
- [17] BENGTTSSON E. Lars, Implementation of high-resolution time-to-digital converter in 8-bit microcontrollers, Department of Physics, University of Gothenburg, Sweden 17 March 2012.

Seznam zkratk a použitých symbolů

IR	- Infra-Red, Infra-Červený
SI	- Le Système International d'Unités, Mezinárodně domluvená soustava jednotek fyzikálních veličin
η	- <i>Éta</i> , Účinnost
ϑ	- <i>Théta</i> , Teplota
Q	- <i>Množství tepla</i>
K	- Kelvin, Základní jednotka SI soustavy termodynamické teploty
J	- Joule, jednotka práce, energie
T	- <i>Termodynamická teplota</i>
m	- Metr, Základní jednotka délky SI soustavy
°C	- Celsiův stupeň
°F	- Stupeň Fahrenheita
P-N	- Přejchod mezi polovodičem typu P a polovodičem typu N
W	- Watt, Jednotka výkonu
M_λ	- <i>Spektrální hustota vyzařování</i>
M_e	- <i>Celková intenzita tepelného záření</i>
λ	- <i>Lambda</i> , Vlnová délka
s	- Sekunda, Základní jednotka SI soustavy času
σ	- <i>Sigma</i> , Stefanova, Boltzmannova konstanta
b	- <i>Wienova konstanta</i>
h	- <i>Planckova konstanta</i>
$\hbar$	- <i>Planckova redukovaná konstanta</i>
f	- <i>Frekvence</i>
E	- <i>Energie</i>
c	- <i>Rychlost světla</i>
I	- <i>Intenzita záření</i>
ω	- <i>Omega</i> , Úhlová frekvence
k	- <i>Boltzmannova konstanta</i>
π	- <i>Pí</i> , Ludolfovo číslo
α	- <i>Alfa</i> , Absorbce
ε	- <i>Epsilon</i> , Emisivita
ρ	- <i>Ró</i> , Odrazivost
τ	- <i>Tau</i> , Transmise
LD	- Laserová Dioda
PWM	- Pulse Width Modulation, Pulzně šířková modulace
TQFP	- Thin Quad Flat Pack, Tenké hranaté poudro integrovaného obvodu pro plošnou montáž

LCD	- Liquid Crystal Display, Displej z tekutých krystalů
ISP	- In System Programming, Zařízení je možné programovat v systému
RISC	- Reduced Instruction Set Computer, Redukovaná instrukční sada
EEPROM	- Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, Elektricky smazatelná programovatelná paměť
RAM	- Random Acces Memory, Druh paměti umožňující čtení i zápis
MOSI	- Master Out - Slave In
MISO	- Master In - Slave Out
SCK	- Serial Data Clock
LED	- Light-Emitting Diode
OZ	- Operační Zesilovač
TOF	- Time Of Flight, Metoda měření vzdálenosti pomocí rychlosti světla
TDC	- Time to Digital Converter, Časově-Digitální převodník
FPGA	- Field-Programmable Gate Array, Hradlové programovatelné integrované obvody
ECL	- Emitter-coupled logic
PSD	- Position Sensitive Detector, Snímač polohy
AD	- Analogově-Digitální
SMBus	- System Management Bus, Komunikační sběrnice
FOV	- Field Of View, Zorné pole
EMI	- Electro-Magnetic Interference, Elektro-magnetické rušení
CC,CV	- Constant Current, Constant Voltage, Profil nabíjení Li-ion článků
TO	- Transistor Outline, Typ pouzdra
TWI	- Komunikační sběrnice identická s I2C
USB	- Universal Serial Interface, Univerzální sériové rozhraní
DPS	- Deska Plošných Spojů
DIP	- Dual In-line Package, Klasické poudro integrovaného obvodu
SMD	- Surface Mount Device, Součástka pro povrchovou montáž
SMT	- Surface Mount Technology, Technologie povrchové montáže
EBOS	- Energetická Balance Optického Spoje
Li-ion	- Lithium-iontový
RTOS	- Real Time Operating System, Operační systém v reálném čase
PEC	- Packet Error Checking, Kontrola chybných paketů
FFC	- Flexible Flat Cable, Druh kabelu
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange, Americký standardní kód pro výměnu informací

Příloha

A. Seznam součástek

Řídící jednotka

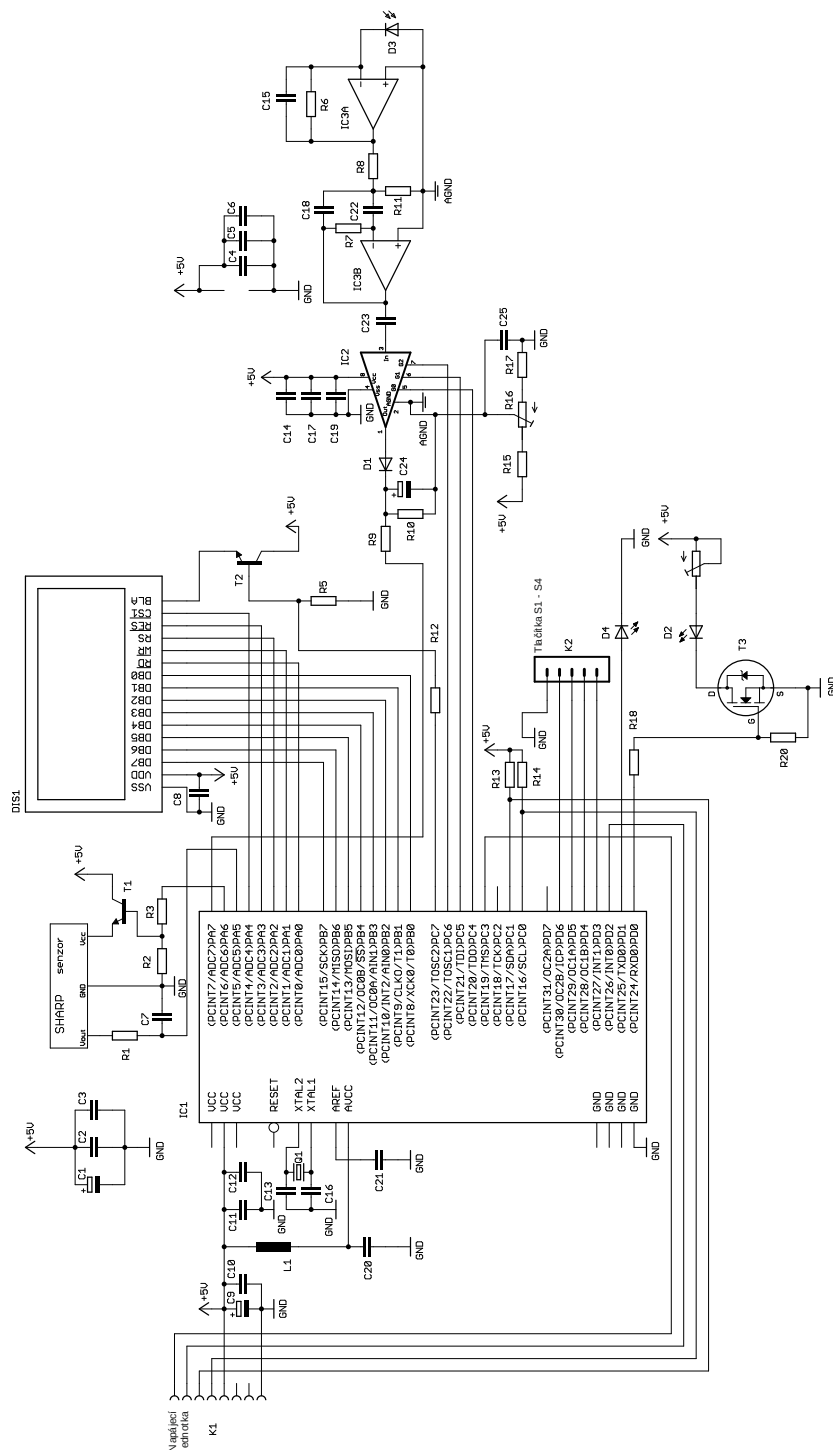
Součástka	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1, R12	100 r	R0603	Rezistor
R6	500 k	R0603	Rezistor
R7, R20	100 k	R0603	Rezistor
R8, R10 R11, R18	1 k	R0603	Rezistor
R13, R14, R15, R17	10 k	R0603	Rezistor
R2, R5	Neosazen	-	Rezistor
R9	0 r	R0603	Rezistor
R16	10k	TRIMM4G/J	Trimr
R19	50k	TRIMM4G/J	Trimr
C1	10 u	SMD_A	Tantalový kondenzátor
C2	1 u	C1206	Keramický kondenzátor
C4, C12, C14, C23, C25	1 u	C0603	Keramický kondenzátor
C9, C24	1 u	SMD_A	Tantalový kondenzátor
C3, C5, C7, C8, C10, C11, C20, C21	100 n	C0603	Keramický kondenzátor
C13, C16	22 p	C0603	Keramický kondenzátor
C15	15 p	C0603	Keramický kondenzátor
C18, C22	22 n	C0603	Keramický kondenzátor
C6, C19	10 n	C0603	Keramický kondenzátor
L1	LQH1N150K04	L1206	Tlumivka
D1	1N4148	D0603	Univerzální dioda
D2	OPV310	TO-46	Laserová dioda
D3	SFH 213 FA	5 mm	Fotodioda
D4			Laserový modul
T1, T2	BC846	SOT23	Bipolární tranzistor
T3	2N7002	SOT23	Unipolární tranzistor
IC1	ATmega324P	TQFP44	Mikrokontrolér
IC2	LTC6910-1	TSOT23-8	PGA
IC3	AD8652	SOIC-8	OZ
DIS1	LM6029A		LCD
Q1	8 MHz	HC49/S	Krystal
K1			FFC konektor 10, 1 mm
K2			PC konektor 5
S1, S2, S3, S4	B3F-10XX		Mikrospínač

Napájecí jednotka

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	1,25 k	R0603	Rezistor
C1, C5, C6	100n	C0603	Keramický kondenzátor
C2, C3	4u7	C1206	Keramický kondenzátor
C4	3u3	C1206	Keramický kondenzátor
L1	10uH	C1206	Tlumivka
IC1	LTC4057-42	TSOT-23	Nabíjení Li-ion článku
IC2	LTC2942-1	DFN-6	Monitorování Li-ion článku
IC3	TPS61240	PWSON-6	Step-up měnič
K1			FFC konektor 10, 1 mm
K2			Mini-USB PCB konektor C

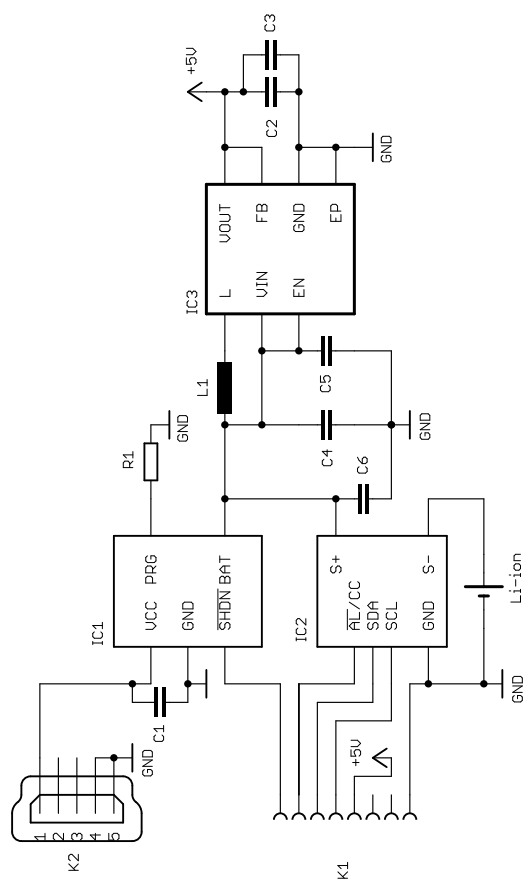
B. Schéma zapojení a desky plošných spojů

Schéma zapojení řídicí jednotky



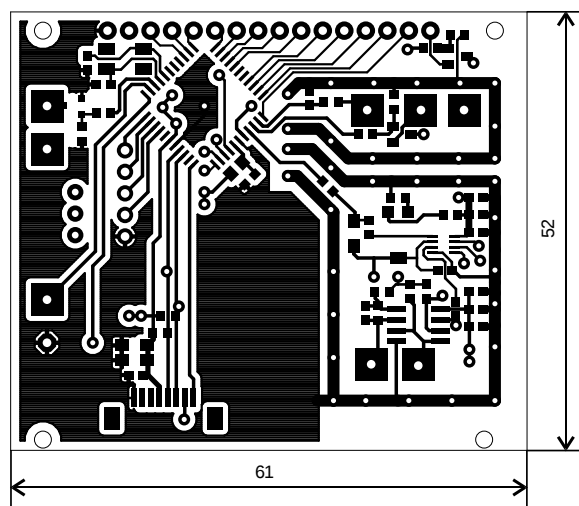
Obrázek 6.1: Schéma zapojení IR teploměru - Řídicí jednotka

Schéma zapojení napájecí jednotky

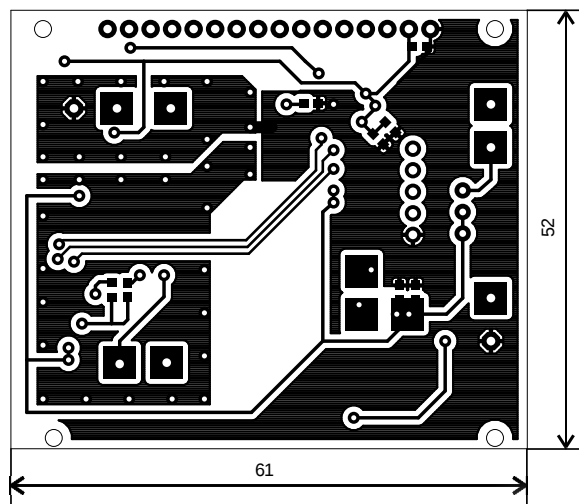


Obrázek 6.2: Schéma zapojení IR teploměru - Napájecí jednotka

DPS řídicí jednotky

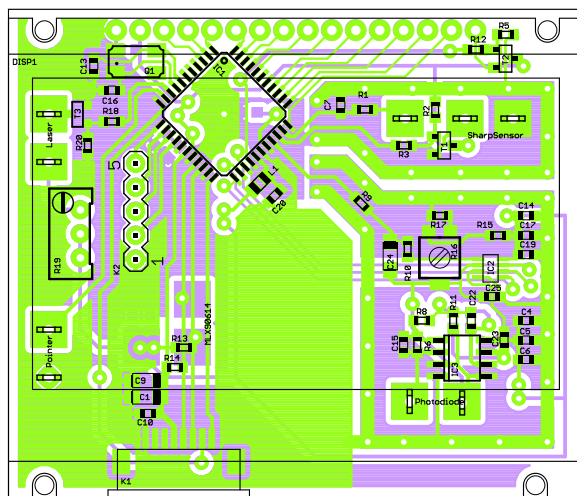


Obrázek 6.3: DPS řídicí jednotky TOP

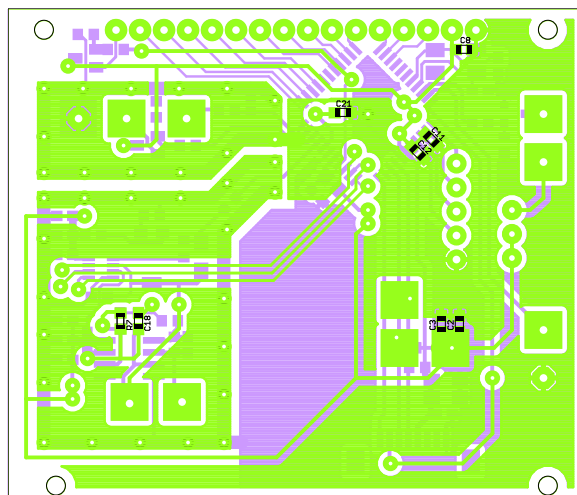


Obrázek 6.4: DPS řídicí jednotky BOTTOM

Osazení DPS řídicí jednotky

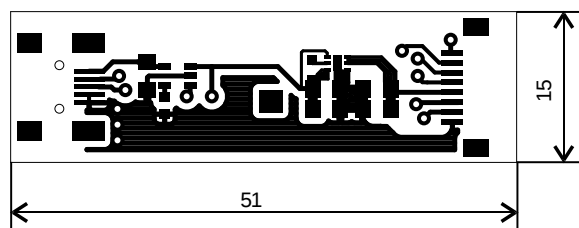


Obrázek 6.5: Osazení DPS řídicí jednotky TOP

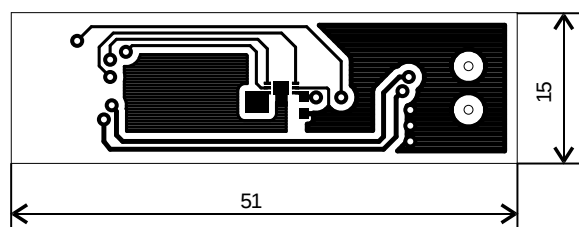


Obrázek 6.6: Osazení DPS řídicí jednotky BOTTOM

DPS napájecí jednotky

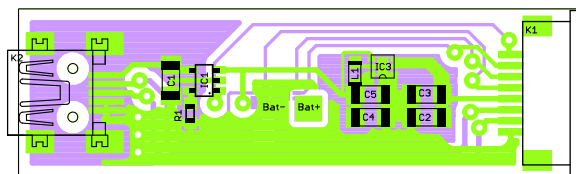


Obrázek 6.7: DPS napájecí jednotky TOP

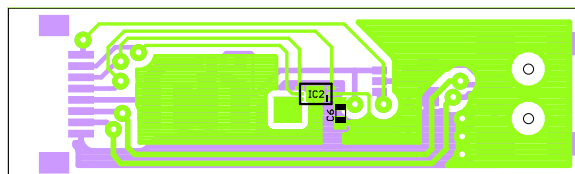


Obrázek 6.8: DPS napájecí jednotky BOTTOM

Osazení DPS napájecí jednotky



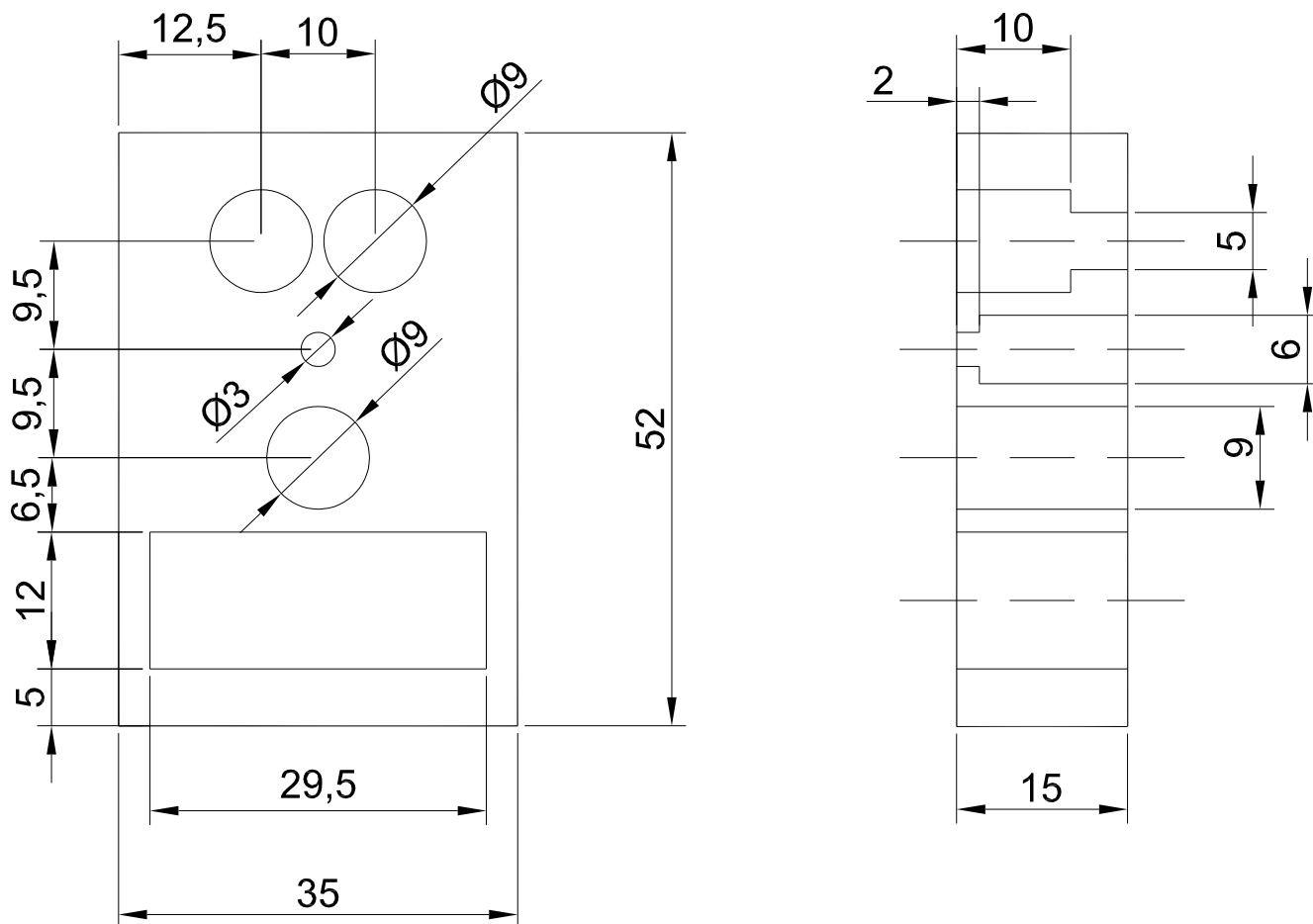
Obrázek 6.9: Osazení DPS napájecí jednotky TOP



Obrázek 6.10: Osazení DPS napájecí jednotky BOTTOM

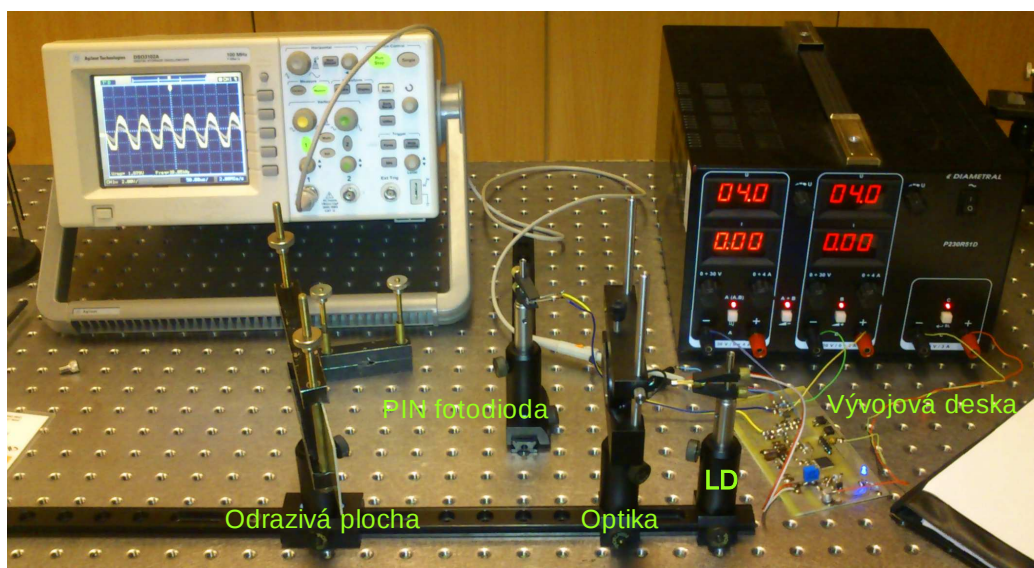
C. Výkresy

Přední panel

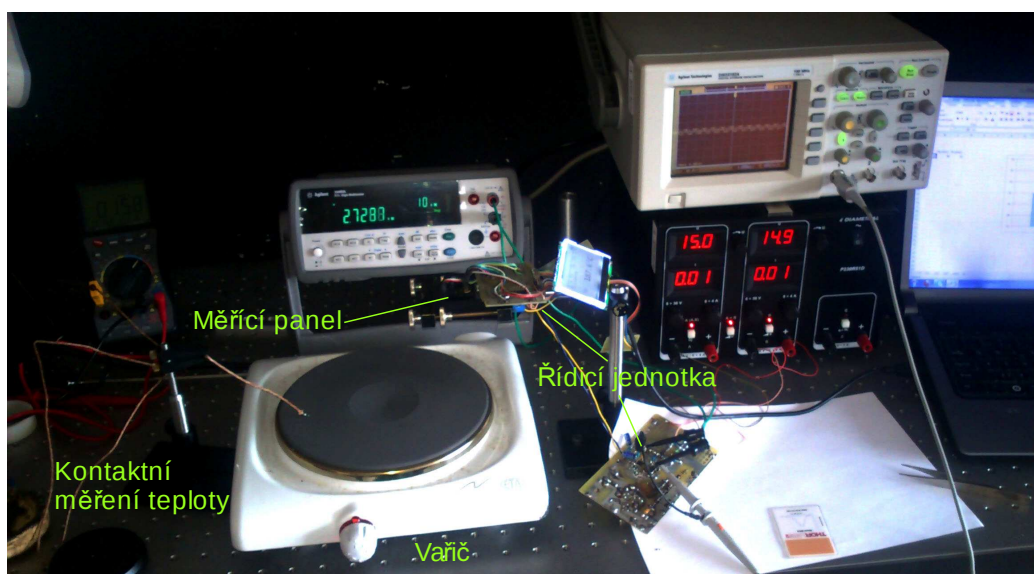


Obrázek 6.11: Výkres předního panelu

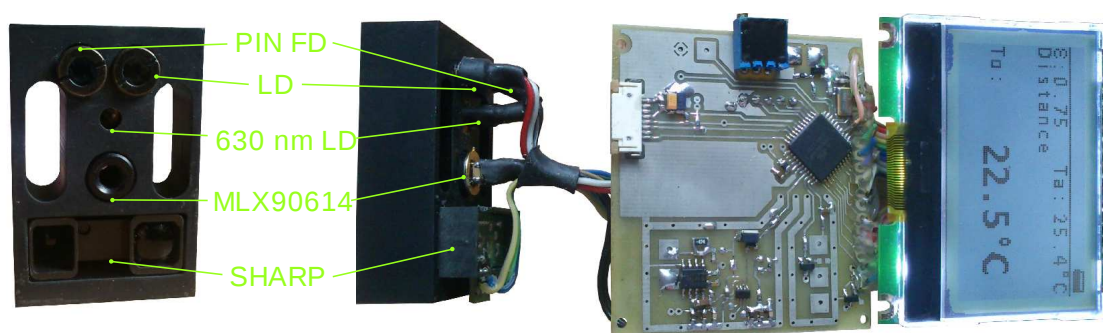
D. Fotogalerie



Obrázek 6.12: Fotografie 1 - Experimentální měření odrazivosti



Obrázek 6.13: Fotografie 2 - Experimentální měření teploty



Obrázek 6.14: Fotografie 3 - DPS IR teploměru + přední panel



Obrázek 6.15: Fotografie 4 - IR teploměr