



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

JEDNOTKA PRO MONITOROVÁNÍ HODNOTY INDEXU LOMU VZDUCHU

MEASUREMENT UNIT FOR MONITORING OF REFRACTION INDEX OF AIR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VÁCLAV HUCL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Václav Hucl

ID: 106481

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Jednotka pro monitorování hodnoty indexu lomu vzduchu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Podrobně teoreticky prostudujte problematiku vlivu indexu lomu vzduchu na přesná měření pomocí laserového interferometru. Stanovte, které veličiny nejvýznamněji ovlivňují hodnotu indexu, a prostudujte možnosti měření těchto veličin příslušnými snímači a definujte jejich parametry tak, aby bylo možné zjistit hodnotu indexu lomu vzduchu s rozlišením v řádu $1.0 \exp(-5)$.
- 2) Navrhněte obvodové řešení jednotky pro monitorování hodnoty indexu lomu vzduchu, při návrhu respektujte požadavky zadavatele - laboratoře Oddělení Koherenční optiky, ÚPT AV ČR, v.v.i. Při návrhu rovněž respektujte minimální výkonovou ztrátu jednotky. Jednotlivé elektrické funkční prvky jednotky volte dle výše uvedených požadavků a požadavků na přesnost měření.
- 3) Navrhněte hardwarové řešení jednotky pro monitorování indexu lomu a realizujte ji.
- 4) Prakticky ověřte metrologické parametry jednotky s ohledem na zadavatelem požadovanou přesnost určení indexu lomu vzduchu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Edlén, B. The refractive index of air. Metrologia 2, pp. 71-80, 1966.
- [2] Fang, H., Pikard, A. A heterodyne refractometer for air index of refraction and air density measurements. Review of Scientific Instruments 73, pp. 1934-1938, 2002.
- [3] Číp, O., Petrů, F. Methods of direct measurement of the refraction index of air using high-resolution laser interferometry. Precision mechanics and optics 3, pp. 88-90, 2004.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

První část práce je zaměřena na popis existujících metod pro měření indexu lomu vzduchu. Druhá část se zabývá konkrétní úlohou realizace jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu. Index lomu vzduchu je měřen nepřímou metodou založenou na modifikované Edlénově formuli.

Klíčová slova

Index lomu vzduchu, senzor teploty, senzor tlaku, senzor vlhkosti, Edlénova formule

Abstract

First part of this work is focused on the description exist methods for measuring refraction index of air. Second part deal with concrete problem realization measurement unit for monitoring of refraction index of air. Refraction index of air is measured indirect method which is based on a modified Edlen formula.

Keywords

Refraction index of air, temperature sensor, pressure sensor, humidity sensor, Edlen formula

Bibliografická citace:

HUCL, V. Jednotka pro monitorování hodnoty indexu lomu vzduchu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Jednotka pro monitorování hodnoty indexu lomu vzduchu 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 a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **21. května 2012**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Ondřeji Čípovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **21. května 2012**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	9
2	Přehled metod měření indexu lomu vzduchu	10
2.1	Výpočetem z Edlénovy formule	10
2.2	Měření s využitím Michelsonova interferometru.....	11
3	Návrh jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu.....	13
3.1	Stanovení požadavků na části obvodu	13
3.2	Vybrané součástky odpovídající požadavkům.....	15
3.2.1	Senzor teploty a vlhkosti	15
3.2.2	Senzor tlaku.....	15
3.2.3	A/D převodník.....	16
3.2.4	Mikrokontroler	16
3.2.5	Zdroj hodinových pulsů.....	17
3.3	Komunikační sběrnice CAN	17
3.3.1	PDO protokol	19
3.3.2	SDO protokol	19
4	Návrh schématu jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu	20
4.1	Návrh zapojení mikrokontroléru	20
4.2	Návrh zapojení obvodu pro komunikaci s okolím	21
4.3	Návrh zapojení propojení s napájecí deskou.....	22
4.4	Návrh zapojení pro připojení snímače Vlhkosti a teploty.....	22
4.5	Návrh zapojení pro připojení snímače tlaku	23
4.6	Návrh zapojení pro připojení doplňkových snímačů teploty	23
4.7	Návrh zapojení oscilátoru	24
5	Návrh schématu napájecí desky	25
6	Návrh desek plošných spojů.....	26
6.1	Monitorovací jednotka	26
6.2	Napájecí deska	28
7	Program mikrokontroléru	30
7.1	Zasílání naměřených dat	30
7.2	Editace přepočtených konstant.....	30

8	Úživatelské rozhraní	33
8.1	Základní rozhraní	33
8.2	Rozšířené rozhraní	34
8.2.1	Editace parametrů.....	34
8.2.2	Záznam naměřených hodnot	35
9	Konečná realizace.....	38
9.1	Zhodnocení přesnosti navržené jednotky	40
10	Závěr	43

1 ÚVOD

Cílem této práce je teoreticky prostudovat problematiku vlivu indexu lomu vzduchu na přesná měření pomocí laserového interferometru. Stanovit, které veličiny nejdůležitěji ovlivňují hodnotu indexu, a prostudovat možnosti měření těchto veličin příslušnými snímači a definovat jejich parametry tak, aby bylo možné zjistit hodnotu indexu lomu vzduchu s rozlišením v řádu $1 \cdot 10^{-5}$.

První část semestrálního projektu je věnována popisu existuj342jících metod pro měření indexu lomu vzduchu [1], [2], [3], [4] a [5].

Další část se zabývá vlastním návrhem zapojení jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu a výběrem vhodných součástek [8], návrhem schématu jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu a napájecí desky a návrhu desek plošných spojů k nim.

V další části jsou popsány funkce programu v mikrokontroléru a možnosti uživatelského rozhraní.

Na závěr je ukázána konečná realizace navržené jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu a zhodnocení její přesnosti.

kde n je index lomu vzduchu a σ je vlnčet ve vakuu.

Jelikož byl v tomto vzorci použit disperzní člen a tlak vodních par, což jsou veličiny, které se špatně měří, byl tento vzorec dále přepracován. Byl upraven pro nynější podmínky složení vzduchu a také z něj byl odstraněn disperzní člen tím, že byl normován pro vlnovou délku červeného HeNe laseru ($\lambda = 633\text{nm}$), který se v metrologii používá pro realizaci délkového etalonu. Takto upravený vzorec má tvar:

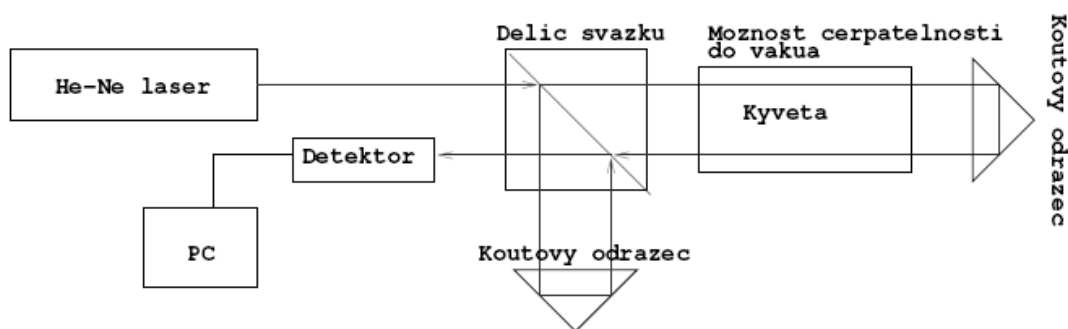
$$(n-1) \cdot 10^6 = 2,87782 \cdot p \cdot \frac{[1 + p \cdot (6,01 - 0,972 \cdot t) \cdot 10^{-6}]}{1 + 0,003661 \cdot t} - 6,49 \cdot H \cdot (1,00050 + 2,3 \cdot t + 3,1 \cdot p) \left(\frac{-532}{t+273,15} \right) \quad (2.1)$$

kde n je index lomu vzduchu, p je tlak vzduchu [Pa], H je relativní vlhkost vzduchu [%] a t je teplota [$^{\circ}\text{C}$].

Jelikož všechny hodnoty obsažené ve vzorci je možno přímo měřit, je tento vzorec lépe použitelný.

2.2 Měření s využitím Michelsonova interferometru

Metoda je založena na použití laserového interferometru, který sleduje změny optické dráhy v prostor, jímž prochází laserový svazek. [5]



Obrázek 2.1: Blokové schéma sestavy proměření indexu lomu s Michelsonovým interferometrem [5]

Laserový paprsek prochází přes dělič svazku, kde se rozdělí do měřicí a referenční větve. Referenční větev je přístupná atmosférickému proudění a měřicí větev prochází přes čerpateľnou kyvetu.

Odčerpání vzduchu z kyvety má přímý vliv na délku optické dráhy svazku v měřicí větvi. Vlivem indexu lomu vzduchu je optická dráha ve vakuu odlišná od optické dráhy v libovolném prostředí s indexem lomu vzduchu $n > 1$. Čerpáním se tlak vzduchu v kyvetě snižuje, což má za důsledek zkrácení optické dráhy laserového svazku v měřicí větvi.

Detekční řetězec snímá a vyhodnocuje interferogram vzniklý interferencí laserového svazku z referenční a měřicí větve. Změna optické dráhy svazku v měřicí větvi má za následek změnu vzájemného fázového posuvu interferujících svazků, která se projevuje změnou struktury interferogramu. Přechod od světlého k tmavému proužku představuje v refraktometru podle obrázku 2.1 změnu optické dráhy svazku v měřicí větvi o $\lambda/2$. Tato hodnota představuje základní rozlišení refraktometru. Výsledná rozlišovací schopnost je pak otázka použitého A/D převodníku a zpracování digitalizovaného signálu. Přesnost zpracování díky výpočetní technice dosahuje až osmého řádu.

Senzor vlhkosti:

Měření vlhkosti vzduchu znamená určení poměrné vlhkosti vzduchu, tlaku vodní páry nebo teploty rosného bodu v určitém místě atmosféry. Vlhkoměry (hygrometry), které slouží k měření vlhkosti vzduchu, pracují na principech deformačním, absorpčním a kondenzačním.

Senzor tlaku:

Hlavním požadavkem na tlakový senzor je, aby se jeho rozsah pohyboval v okolí normálního atmosférického tlaku. V našem obvodu bude optimální, pokud bude senzor tlaku uvnitř přístroje v provedení SMD, aby výsledné zařízení mělo co nejmenší rozměry.

A/D převodník:

Při výběru A/D převodníku je třeba se zaměřit hlavně na přesnost převodu a nízkou nelinearitu. Jako vhodné řešení je možno použít sigma-delta převodník.

Mikrokontroler:

Mikrokontroler bude v obvodu sloužit pro shromáždění dat ze senzorů, k výpočtu indexu lomu a ke komunikaci s počítačem. Dle zadání bude použitý mikrokontroler z řady HC/HCS08.



Obrázek 3.3: Senzor tlaku MPXH6101A [8]

3.2.3 A/D převodník

Jako vhodný A/D převodník jsem vybral AD7715 od firmy Analog Devices. Jedná se 16-ti bitový sigma-delta převodník s programovatelným zesílením 1, 2, 32 a 128 krát. Vstup je vybaven diferenčním zesilovačem. Obvod pro svou funkci vyžaduje zdroj 3V nebo 5V. Obvod je vybaven sériovým rozhraním SPI.

Převodník AD7715 používá pro komunikaci s procesorem čtyř registrů. Jsou to komunikační registr, testovací registr, nastavovací registr a datový registr. První tři jsou osmi bitové a datový registr je šestnácti bitový. [8]

3.2.4 Mikrokontroler

Pro řízení jednotky jsem vybral mikrokontroler MC68HC908GZ60 od firmy Freescale Semiconductor. [8]

Základní parametry mikrokontroléru:

Vysoce výkonná MC68HC08 architektura optimalizovaná pro C-kompilátor

8MHz vnitřní frekvence sběrnice

Generátor hodinových pulsů podporující krystaly od 1MHz do 8MHz

MSCAN řadič

Standardní nízko-napěťové módy: wait mód a stop mód

FLASH paměť: 60KB

RAM paměť: 2048B

SPI modul

3.2.5 Zdroj hodinových pulsů

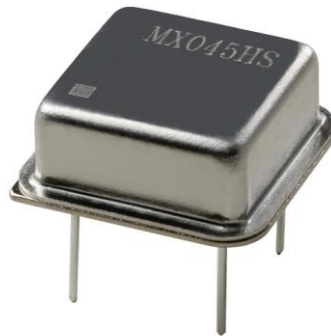
Jako zdroj hodinových pulsů pro A/D převodníky jsem vybral hodinový oscilátor MXO45HS od firmy CTS. [8]

Základní parametry oscilátoru:

Frekvenční stabilita: ± 50 ppm

Napájecí napětí: 5V

Provozní teplota: -40° až 85°C



Obrázek 3.4: Oscilátor MXO45HS [8]

3.3 Komunikační sběrnice CAN

Controller Area Network (CAN) představuje datovou sběrnici pro místní síť. Jedná se o protokol multiplexní sériové komunikace, který byl vytvořen v laboratořích společnosti Bosch pro potřeby automobilového průmyslu. V dnešní době se používá v širokém spektru průmyslových aplikací. [6], [7]

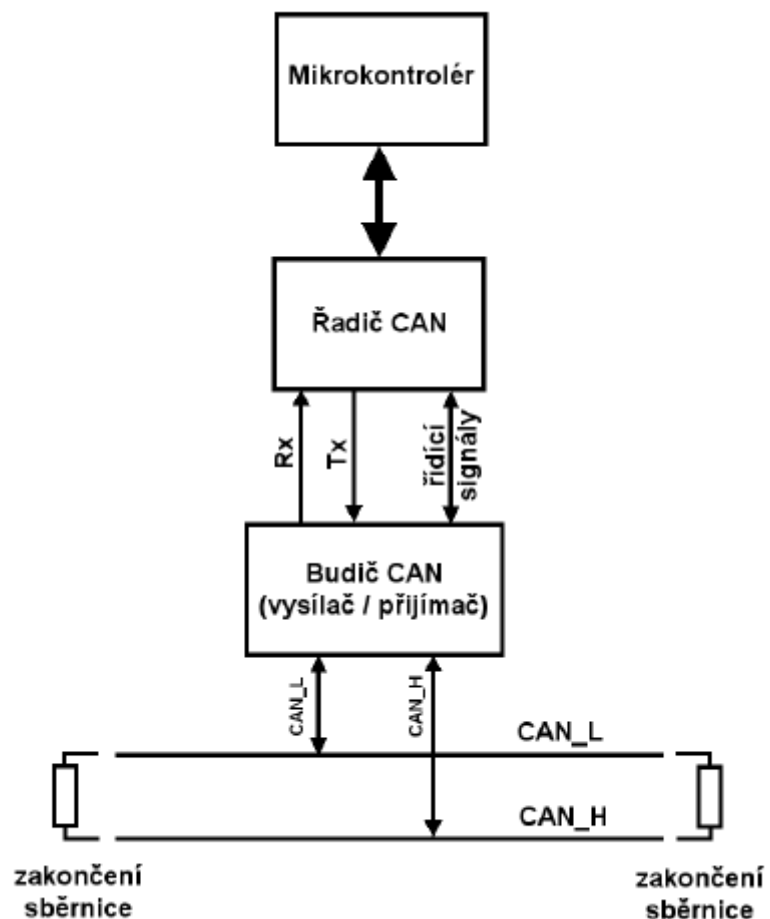
Systém přenosu dat pracuje podobně jako konference po telefonu. Jeden účastník (řídící) posílá do sítě data a ostatní tato data přijmou a vyhodnotí. Ten účastník, který shledá, že data jsou určena pro něj, je přijme a vyhodnotí. Díky tomuto systému může být v síti zapojeno velké množství účastníků. Výhodou této komunikace je, že veškerá data jsou přenášena pouze po dvou vedeních.

Výhody CAN sběrnice:

- Vysoká rychlost přenosu dat 1Mbit/s při sběrnici do 40m.
- Selektce přijímaných zpráv na základě jejich identifikátoru.
- Prioritní přístup zabezpečující urychlené doručení významných zpráv.
- Diagnostika sběrnice (chyba doručení zprávy, přetečení bufferu, chyba CRC)
- Vysoká úroveň zabezpečení přenosu

Nevýhody CAN sběrnice

- Omezený počet dat přenášených v rámci jedné zprávy (0 až 8 bytů)



Obrázek 3.5: Jednotka s podporou sběrnice CAN [6]

3.3.1 PDO protokol

Process Data Objects (PDO) jsou krátké zprávy s vysokou prioritou, které jsou přenášeny ve vysílání. Proto jsou PDO zprávy vhodné pro přenášení dat v reálném čase, jako jsou řídicí a stavové informace z motoru nebo vstupně/výstupní moduly, nebo měřené údaje senzorů apod. Přesto musíme mít na paměti, že PDO zprávy jsou přenášeny nepotvrzeným způsobem, to znamená, že nemáme informaci o tom, jestli danou zprávu přijal konkrétní účastník v síti, kterému jsme její zaslání zamýšlely. [7]

3.3.2 SDO protokol

Service Data Objects (SDO) umožňují přístup ke všem vstupům z CANopen objektového slovníku. SDO zařizují vzájemný komunikační kanál mezi dvěma zařízeními. K tomu ještě SDO protokol umožňuje přenesení libovolného množství dat po částech. Proto se SDO protokol používá hlavně za účelem předávání konfiguračních údajů. SDO spojení mezi dvěma zařízeními je vytvořeno konfigurací SDO server/klient kanálu.

4 NÁVRH SCHÉMATU JEDNOTKY PRO MONITOROVÁNÍ INDEXU LOMU VZDUCHU

Celkové schéma zapojení je vloženo v příloze. Schéma a deska plošných spojů byly navrhovány v programu Eagle 5.6.0. Soubory návrhu jsou uloženy na přiloženém CD-R.

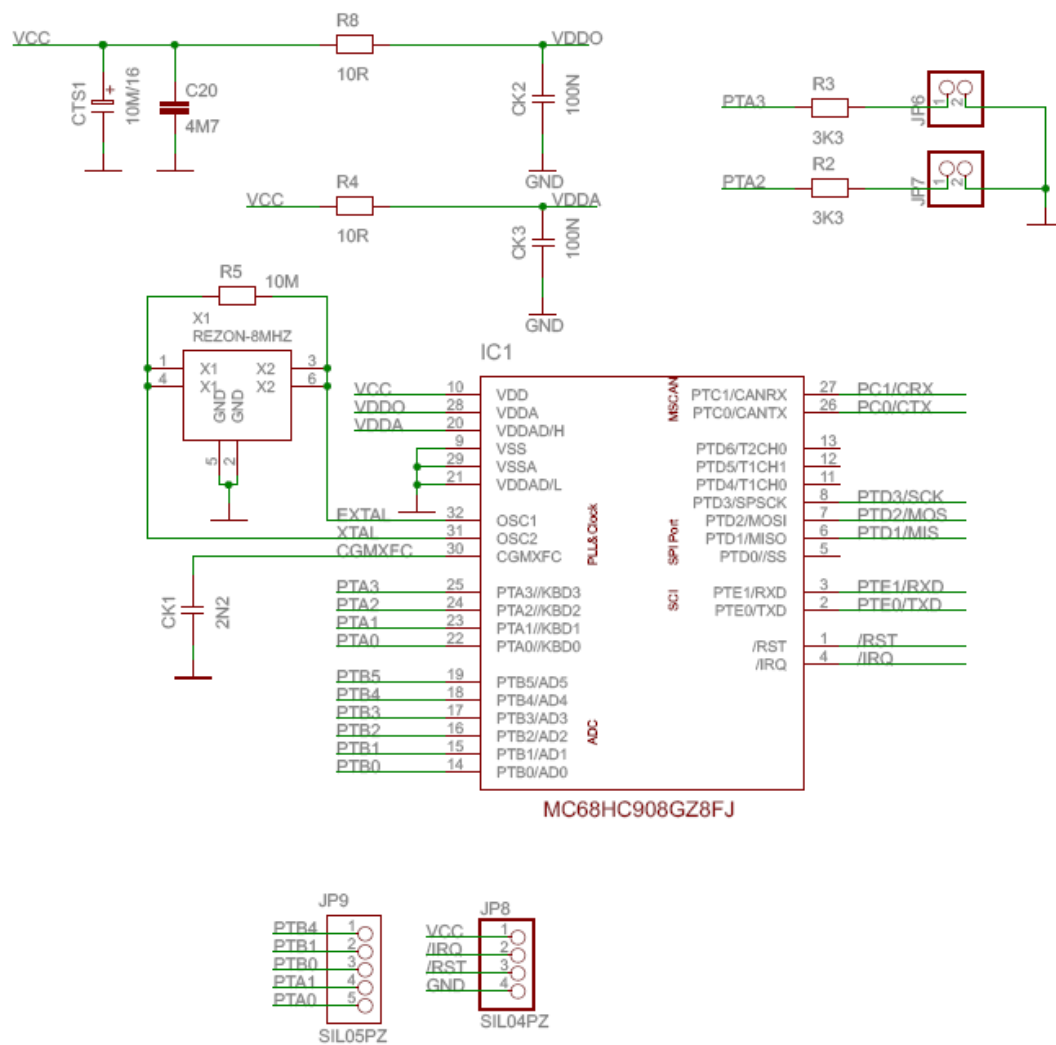
4.1 Návrh zapojení mikrokontroléru

Pro návrh základního zapojení mikrokontroléru jsem se řídil doporučeným zapojením udávaným výrobcem.

Komunikaci s počítačem provádíme signály CANRX a CANTX, které přivádíme do obvodu ISO1050, který je následně převede na normovanou komunikaci pomocí sběrnice CAN.

Porty PTA2 a PTA3 jsou vyvedeny přes odpory $3,3k\Omega$ na hřebeny, na které se ve výsledné jednotce budou moci připojit LED diody pro indikaci stavu jednotky.

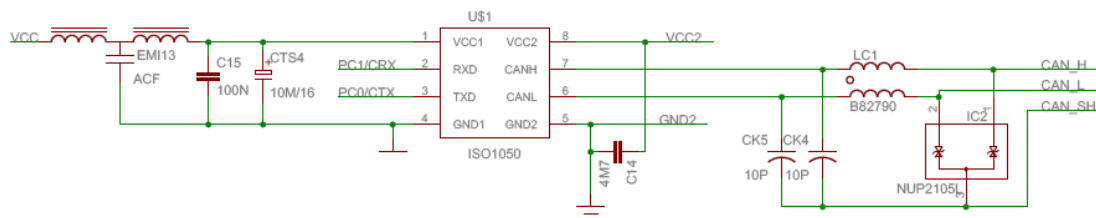
Hřebeny JP8 a JP9 jsou určeny pro programování mikrokontroléru.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení mikrokontroléru

4.2 Návrh zapojení obvodu pro komunikaci s okolím

Obvod ISO1050 je vysílač a přijímač pro sběrnici CAN s vnitřním galvanickým oddělením komunikace s mikrokontrolérem a se sběrnicí CAN.

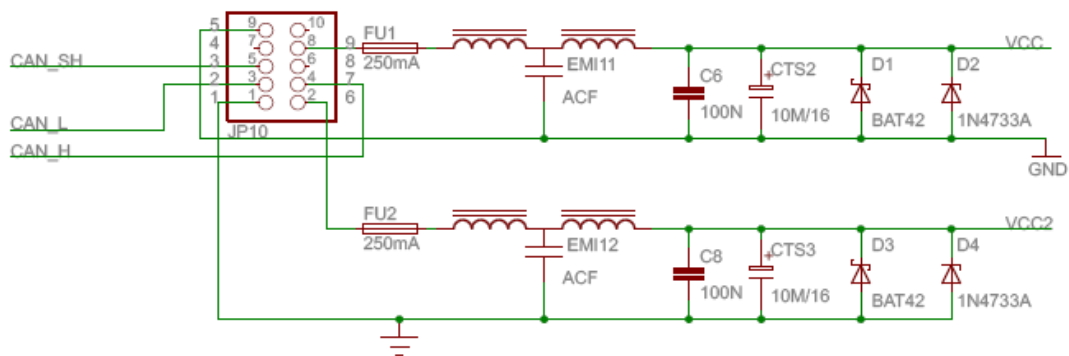


Obrázek 4.2: Schéma zapojení obvodu pro komunikaci

4.3 Návrh zapojení propojení s napájecí deskou

Hřeben JP10 je určen k propojení s napájecí deskou. Jsou do něj přivedeny komunikační signály CAN_H, CAN_L a CAN_SH, které jsou dále přes napájecí desku a zdroj připojeny do PC.

Přes hřeben JP10 se dále do navrhované jednotky přivádějí dvě oddělená napájení. VCC2 slouží k napájení oddělené části komunikace za ISO1050. VCC napájí celý zbytek desky.

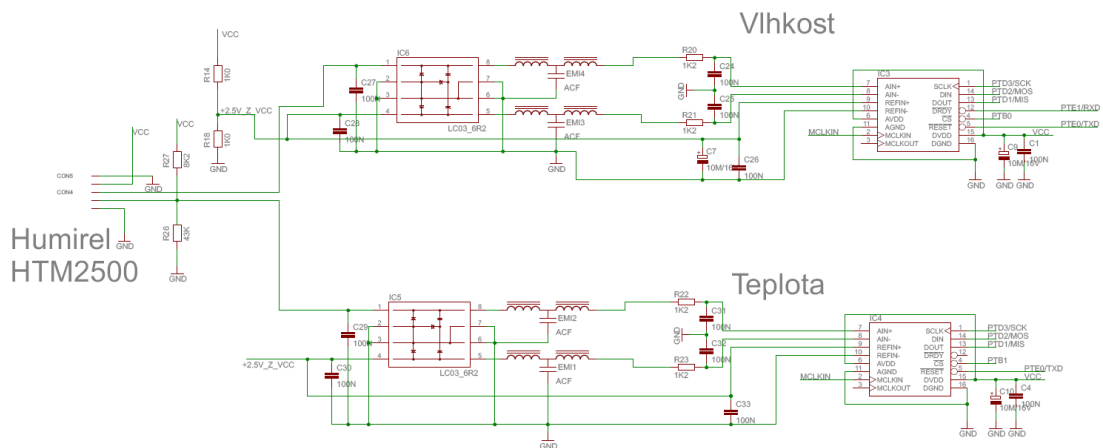


Obrázek 4.3: Schéma zapojení obvodu pro propojení s napájecí deskou

4.4 Návrh zapojení pro připojení snímače Vlhkosti a teploty

Jelikož senzor HTM2500 měří teplotu i vlhkost je připojen na dva A/D převodníky. Signál ze senzoru je přiveden přes obvod LC03 6R2, který slouží jako přepěťová ochrana pro A/D převodník, pro případ, že by se na přívodním kabelu mezi senzorem a navrhovanou monitorovací jednotkou naindukovalo napětí.

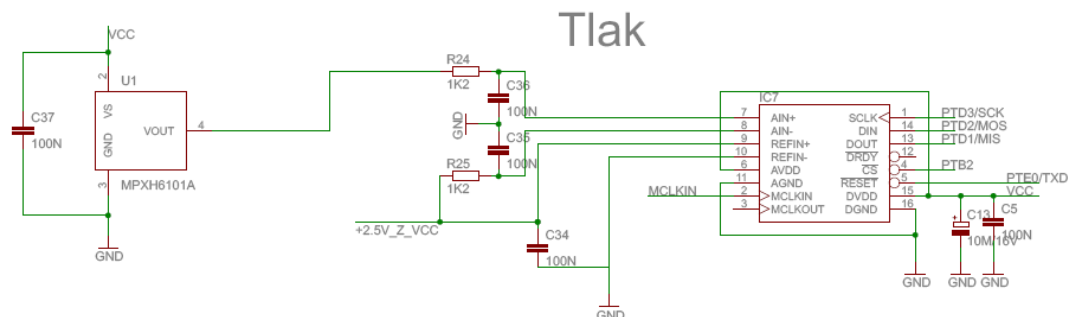
Jako referenční napětí na A/D převodníku používáme 2,5V vytvořených z napájecího napětí VCC, čímž docílíme toho, že i mírné kolísání napájecího napětí nám nebude ovlivňovat přesnost měření, jelikož výstupní signál ze senzoru a referenční napětí budou kolísat současně a tudíž se to neprojeví na výstupu z A/D převodníku.



Obrázek 4.4: Schéma zapojení obvodu pro připojení snímače vlhkosti a teploty

4.5 Návrh zapojení pro připojení snímače tlaku

Pro připojení snímače tlaku nepotřebujeme tak důkladně chránit vstup A/D převodníku, jelikož snímač MPXH3101A je v SMD pouzdře a je zapájen přímo na desce plošných spojů.



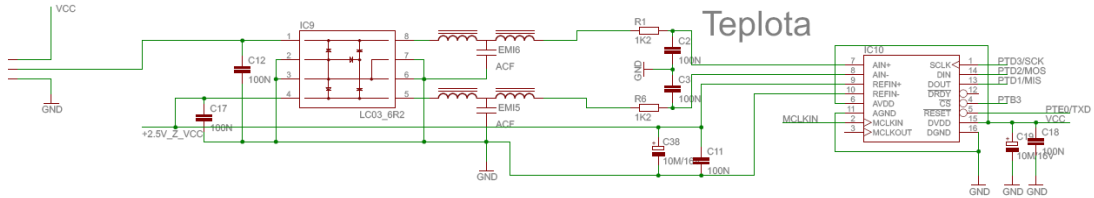
Obrázek 4.5: Schéma zapojení obvodu pro připojení snímače tlaku

4.6 Návrh zapojení pro připojení doplňkových snímačů teploty

V zapojení jsou umístěny 3 doplňkové snímače teploty AD22100, které budou v měřící sestavě, kde se bude tato jednotka pro monitorování indexu lomu používat,

sloužit k monitorování teploty v různých místech sestavy. Díky těmto snímačům bude možno ověřit, jestli je v celé měřící sestavě stejná teplota.

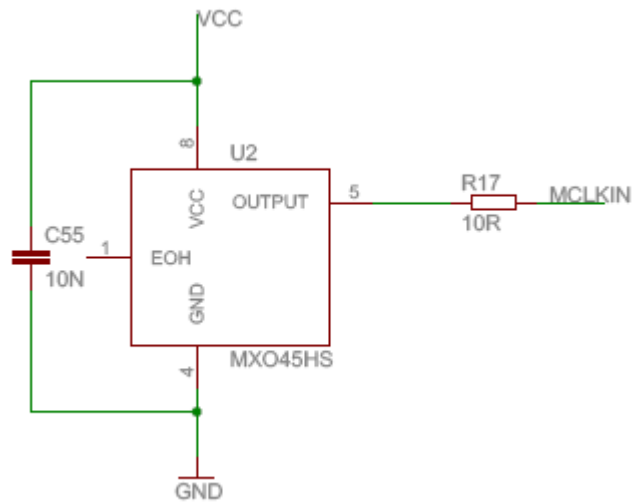
Připojení snímače do obvodu je provedeno stejným stylem jako u připojení snímače HTM2500.



Obrázek 4.6: Schéma zapojení obvodu pro připojení doplňkových snímačů teploty

4.7 Návrh zapojení oscilátoru

Oscilátor v obvodu slouží jako přesná zdroj hodinového signálu pro A/D převodníky. Oscilátor byl zapojen podle doporučeného zapojení v dokumentaci výrobce.

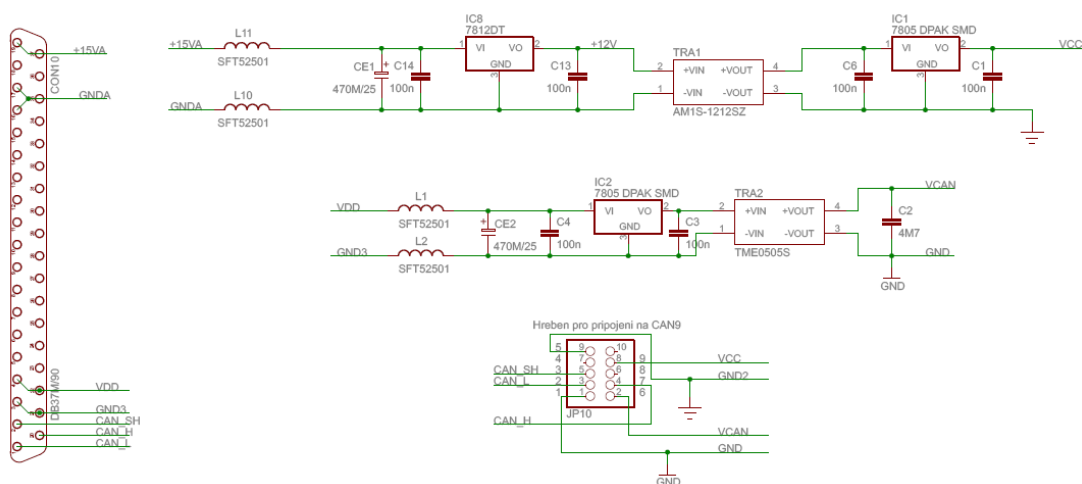


Obrázek 4.7: Schéma zapojení oscilátoru

5 NÁVRH SCHÉMATU NAPÁJECÍ DESKY

Základní funkcí napájecí desky je úprava napětí dostupného na konektoru zdroje na napětí potřebné pro náš obvod a jeho oddělení, aby se do námi navrhované jednotky nedostaly rušivé signály z ostatních zařízení připojených ke zdroji.

Druhá funkce této desky je propojení komunikačních signálů do sběrnice ve zdroji, odkud jsou dále propojeny do PC.



Obrázek 5.1: Schéma zapojení napájecí desky

6 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

6.1 Monitorovací jednotka

Při návrhu monitorovací jednotky jsou důležité malé rozměry výsledné desky, pro snadnější umístění do měřicí sestavy. Z toho důvodu je také většina součástek použitých při návrhu volena ve verzi SMD.

Deska plošných spojů byla navržena pro umístění v krabici firmy FIBOX Euronord AB081209H.

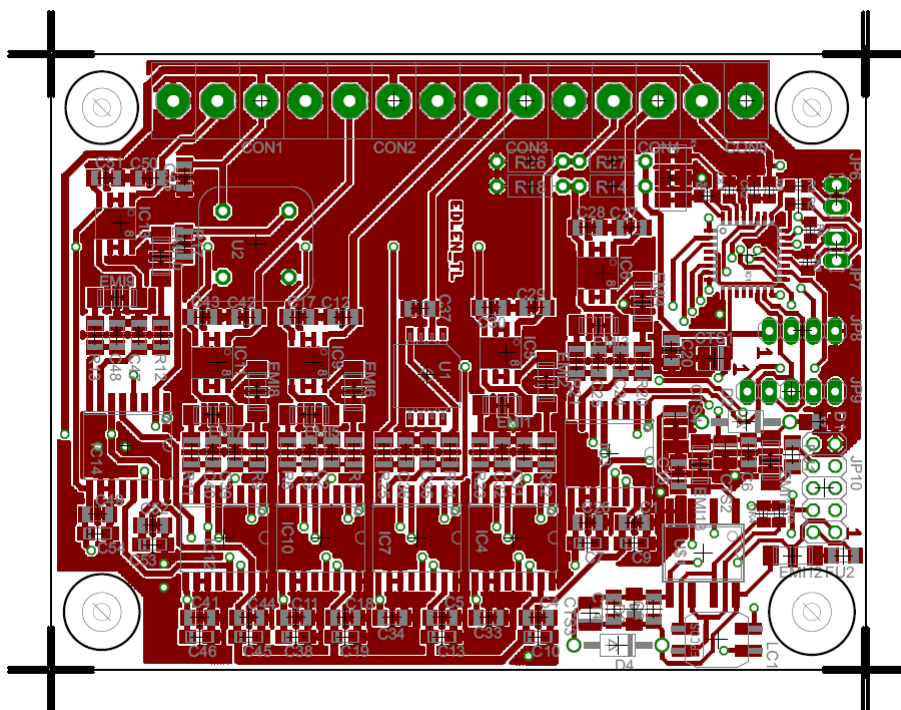
Návrh je realizován na dvouvrstvé desce, přičemž na horní i spodní straně je ponechána ve volných místech plošného spoje měď a je připojena na zem GND. Pouze v rohu desky, kde je umístěn komunikační obvod ISO1050 a jsou tam vedeny komunikační signály CAN sběrnice, je vylití mědi odstraněno pro důsledné oddělení této části obvodu od zbytku monitorovací desky.

Svorkovnice CON1 až CON3 slouží k připojení snímačů teploty AD22100 a svorkovnice CON4 a CON5 k připojení snímače teploty a vlhkosti HTM2500. Snímače budou k jednotce připojeny pomocí kabelů, které z karabáčky povedou pomocí kabelových průchodek.

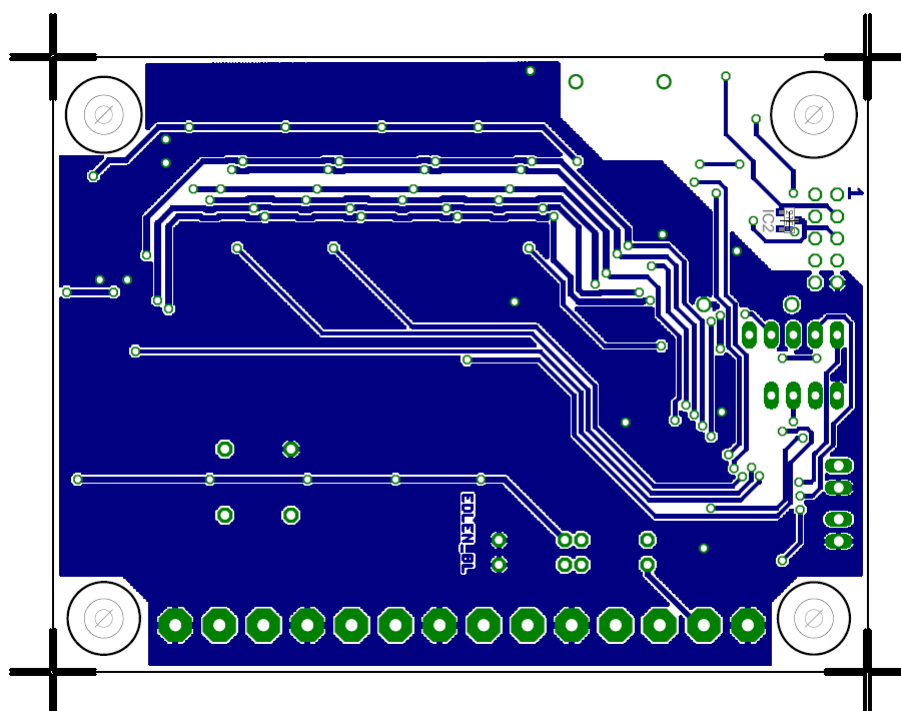
Hřebeny JP5 a JP6 představují vývody pro připojení signalizačních LED diod, pro jejich snadné vyvedení z desky a připevnění do krabčky, ve které bude monitorovací jednotka zabudována.

V blízkosti mikrokontroléru jsou umístěny dutinkové lišty JP8 a JP9, pomocí kterých bude mikrokontrolér naprogramován.

Přivedení napájení do desky a komunikace s okolím je zajišťována hřebenem JP10, který bude po zabudování jednotky do krabčky propojen s konektorem na boku krabčky. Tento konektor musí mít pro pokrytí požadavků této desky alespoň 7 pinů. Jako vhodný vzhledem k rozměrům, tvaru a počtu pinů se jeví konektor CANON9.



Obrázek 6.1: Deska plošných spojů monitorovací jednotky (horní strana)



Obrázek 6.2: Deska plošných spojů monitorovací jednotky (spodní strana)

6.2 Napájecí deska

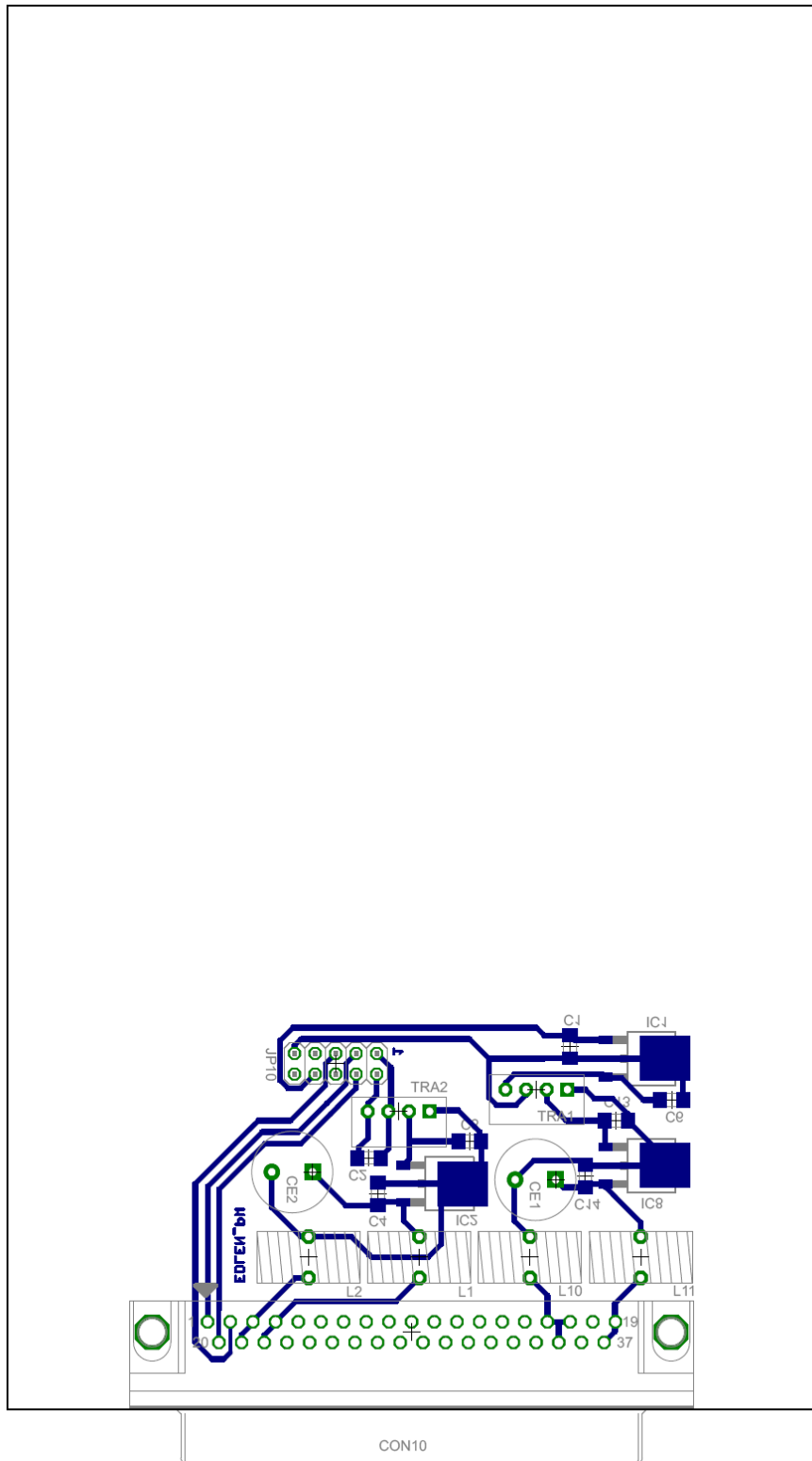
Rozměry desky plošných spojů pro napájecí desku byly voleny tak, aby ji bylo možno použít jako zásuvnou kartu do zdrojové skříně používané k napájení v Ústavu přístrojové techniky AV ČR.

Jelikož se jedná o poměrně jednoduché zapojení, je použita pouze jednovrstvá deska. Propojení jsou vedena na spodní straně desky, kde jsou také umístěny součástky s SMD montáží. Součástky s klasickou montáží jsou umístěny na vrchní straně desky.

Napájecí napětí pro monitorovací desku jsou získána upravením napětí dostupných na konektoru CON10, který se po vložení desky do zdrojové skříně připojí na sběrnici zdroje. Upravená napětí jsou dále přivedena hřebenem JP10, který má stejné zapojení jako na monitorovací jednotce.

Hřeben JP10 bude propojen s konektorem umístěným na čelním panelu karty. Bude se jednat o stejný typ konektoru, jaký bude na monitorovací jednotce. Délka propojovacího kabelu bude volena na základě rozvržení konkrétní měřicí sestavy, do které bude monitorovací jednotka umístěna.

Komunikační signály CAN sběrnice z hřebenu JP10, jsou propojena na piny konektoru CON10 a dále jsou přes zdrojovou skřín připojeny do řídicího počítače společně s komunikačními signály z ostatních zásuvných karet ve zdroji.



Obrázek 6.3: Deska plošných spojů napájecí desky

7 PROGRAM MIKROKONTROLÉRU

Program pro mikrokontrolér byl vytvořen pomocí prostředí CodeWarrior IDE v.5.9.0. Kompletní zdrojový kód je na přiloženém CD-ROM.

Mikrokontrolér v měřicí jednotce slouží ke sběru dat z výstupů AD převodníků, přepočítání získaných dat na hodnoty teploty, tlaku a vlhkosti potřebných pro výpočet indexu lomu vzduchu. Dále v mikrokontroléru probíhá samotný výpočet indexu lomu vzduchu. Takto získané hodnoty jsou pomocí PDO protokolu následně posílány po CAN sběrnice do počítače, kde jsou zobrazeny a zaznamenány pomocí uživatelského rozhraní.

Přepočetni konstanty pro jednotlivé senzory a AD převodníky jsou uloženy v mikrokontroléru, ale pomocí SDO protokolu je možno je editovat. Uživatelské rozhraní je navrženo pro jednoduchou orientaci v parametrech a jejich snadnou změnu.

7.1 Zasílání naměřených dat

Naměřené hodnoty jsou zasílány pomocí dvou zpráv pomocí PDO protokolu. První zpráva obsahuje hodnoty teplot 1,2 a 3, které slouží pouze jako informativní hodnoty, a hodnotu indexu lomu. Druhá zpráva obsahuje hodnoty teploty, tlaku a vlhkosti, ze kterých byla vypočtena hodnota indexu lomu vzduchu. Tyto zprávy jsou zasílány pravidelně v každém cyklu programu, tudíž hodnoty zobrazené v uživatelském rozhraní jsou stále aktuální.

7.2 Editace přepočetních konstant

Přepočetni konstanty jsou uloženy v mikrokontroléru jako objekty, ke kterým lze přistupovat pomocí SDO protokolu. Hodnoty těchto konstant jsou do uživatelského rozhraní zaslány, pouze pokud je mikrokontroler o jejich zaslání požádán. Z toho vyplývá, že hodnoty uvedené v uživatelském rozhraní nemusí být aktuální.

Tabulka všech parametrů přístupných přes SDO protokol:

Index	Název	Stav	Popis
0x1000	Typ zařízení	Jen pro čtení	Obsahují informace o připojeném modulu
0x1008	Název zařízení	Jen pro čtení	
0x1009	Verze hardwaru	Jen pro čtení	
0x100a	Verze softwaru	Jen pro čtení	
0x1018	Identifikační objekt	Jen pro čtení	
0x2100	CANopen ID	Lze editovat	Editovatelné konstanty
0x2101	CANopen rychlost	Lze editovat	
0x2107	Povolení vysílání TPDO1	Lze editovat	
0x2108	Povolení vysílání TPDO2	Lze editovat	
0x2109	Povolení přehození pořadí bytů	Lze editovat	
0x2110	Konstanty pro přepočet hodnoty vlhkostního snímače HUMIREL HTM2500	Lze editovat	
0x2111		Lze editovat	
0x2112		Lze editovat	
0x2113		Lze editovat	
0x2114		Lze editovat	
0x2115	Konstanty pro přepočet hodnoty teplotního snímače HUMIREL HTM2500	Lze editovat	
0x2116		Lze editovat	
0x2117		Lze editovat	
0x2118		Lze editovat	
0x2119	Konstanty pro přepočet hodnoty tlakového snímače MPXH6101A	Lze editovat	
0x2120		Lze editovat	
0x2121	Konstanty pro přepočet hodnoty 1. teplotního snímače AD22100	Lze editovat	
0x2122		Lze editovat	
0x2123	Konstanty pro přepočet hodnoty 2. teplotního snímače AD22100	Lze editovat	
0x2124		Lze editovat	
0x2125	Konstanty pro přepočet hodnoty 3. teplotního snímače AD22100	Lze editovat	
0x2126		Lze editovat	
0x2127	Konstanta AD převodníku	Lze editovat	
0x2130	Stavový registr CAN rx	Jen pro čtení	
0x2131	Stavový registr CAN tx	Jen pro čtení	
0x2132	Počet CAN tx Packet	Jen pro čtení	
0x2133	Počet CAN rx Packet	Jen pro čtení	
0x2134	Počet CAN tx Warning	Jen pro čtení	
0x2135	Počet CAN rx Warning	Jen pro čtení	
0x2136	Počet CAN tx Error	Jen pro čtení	
0x2137	Počet CAN rx Error	Jen pro čtení	
0x2138	Počet CAN_Bus_Off	Jen pro čtení	
0x2139	Počet CAN_Bus_Off_Rst	Jen pro čtení	
0x213a	Počet CTXERR	Jen pro čtení	
0x213b	Počet CTXERR	Jen pro čtení	

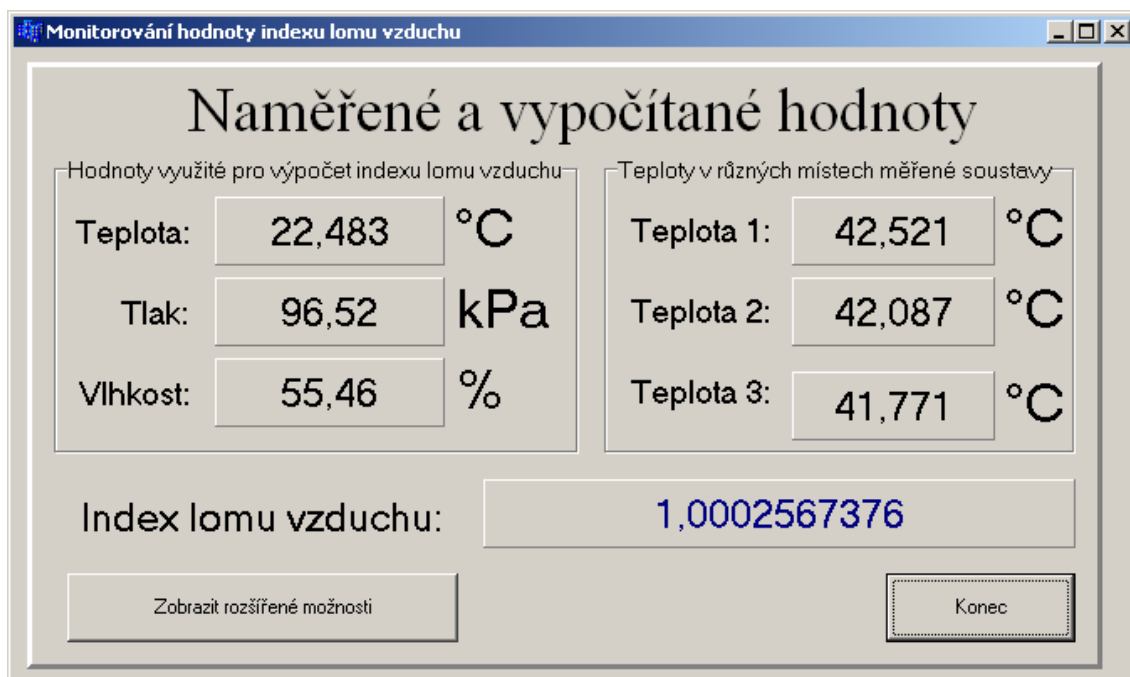
Index	Název	Stav	Popis
0x2140	Teplota 1	Jen pro čtení	Aktuální hodnota snímaných veličin
0x2141	Teplota 2	Jen pro čtení	
0x2142	Teplota 3	Jen pro čtení	
0x2143	Index lomu	Jen pro čtení	
0x2144	Teplota	Jen pro čtení	
0x2145	Tlak	Jen pro čtení	
0x2146	Vlhkost	Jen pro čtení	
0x2150	Hodnota výstupu 1. AD převodníku (senzor vlhkosti)	Jen pro čtení	Aktuální hodnoty výstupů AD převodníků
0x2151	Hodnota výstupu 2. AD převodníku (senzor teploty)	Jen pro čtení	
0x2152	Hodnota výstupu 3. AD převodníku (senzor tlaku)	Jen pro čtení	
0x2153	Hodnota výstupu 4. AD převodníku (senzor teploty 1)	Jen pro čtení	
0x2154	Hodnota výstupu 5. AD převodníku (senzor teploty 2)	Jen pro čtení	
0x2155	Hodnota výstupu 6. AD převodníku (senzor teploty 3)	Jen pro čtení	

8 ÚŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ

Ovládací program pro jednotku jsem vytvořil v prostředí Borland C++ Builder 6, zdrojový kód je na přiloženém CD-ROM. Základním účelem programu je umožnit uživateli jednoduše sledovat hodnoty měřených veličin a vypočtené hodnoty indexu lomu vzduchu. Dále program umožňuje záznam těchto hodnot a jejich vykreslování do grafu. Poslední funkcí tohoto programu je možnost změny parametrů výpočetních rovnic pro získání přesných hodnot měřených veličin. Tato možnost je zde pro přesné doladění jednotky pro konkrétní připojená čidla.

8.1 Základní rozhraní

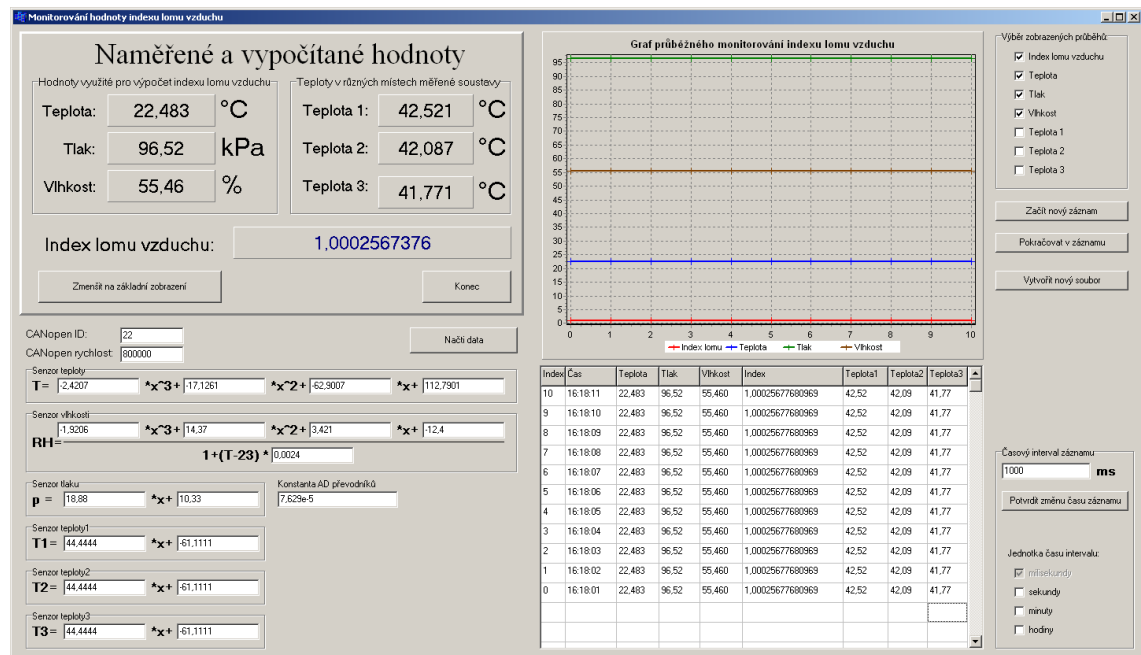
Základní okno programu (Obrázek 8.1) obsahuje měřené hodnoty teploty, tlaku a vlhkosti, které jsou použity pro výpočet indexu lomu vzduchu a dále samotnou hodnotu indexu lomu vzduchu. Dále zde jsou zobrazeny Teploty 1, 2 a 3, které slouží pro informativní sledování teploty v různých částech měřícího experimentu, ve kterém je jednotka pro monitorování indexu lomu vzduchu použita. V základní verzi tyto senzory nebyly připojeny, jelikož nemají vliv na výpočet indexu lomu vzduchu.



Obrázek 8.1: Základní okno programu

8.2 Rozšířené rozhraní

Pomocí tlačítka v základním okně programu Zobrazit rozšířené možnosti se přepneme do režimu, ve kterém můžeme editovat parametry a ukládat záznam měření (Obrázek 8.2).



Obrázek 8.2: Rozšířené okno programu

8.2.1 Editace parametrů

Editace probíhá tak, že po kliknutí do pole parametru, který chceme editovat, se objeví panel Úprava zvoleného parametru (Obrázek 8.3). Zde je uveden název editované proměnné, její základní hodnota vycházející z katalogových hodnot daného senzoru a editační pole, kde hodnotu tohoto parametru můžeme změnit.

CANopen ID: Načti data

CANopen rychlost:

Senzor teploty
 $T =$ * x^3 + * x^2 + * x +

Senzor vlhkosti
 $RH =$ * x^3 + * x^2 + * x +
 $1 + (T - 23) *$

Senzor tlaku
 $p =$ * x +

Konstanta AD převodníků

Senzor teploty1
 $T1 =$ * x +

Senzor teploty2
 $T2 =$ * x +

Senzor teploty3
 $T3 =$ * x +

Úprava zvoleného parametru
Senzor vlhkosti, parametr 2:
 Základní hodnota parametru: 14,37
 Pole pro změnu parametru:

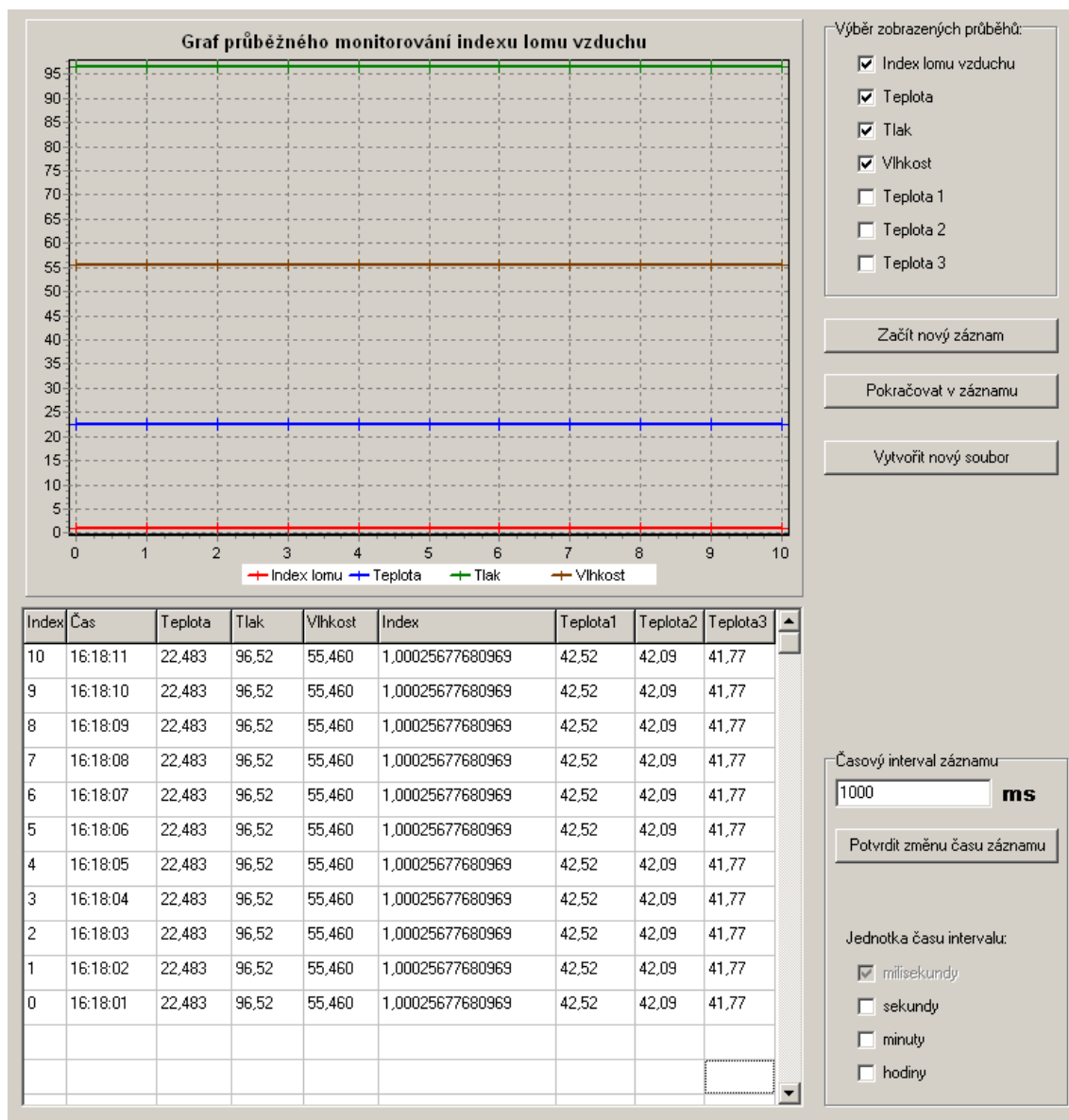
Obrázek 8.3: Detail editace parametrů

8.2.2 Záznam naměřených hodnot

Na Obrázku 8.4 je zobrazen detail okna s nastavením parametrů záznamu a grafem pro vykreslení průběhu snímaných veličin. Po spuštění nového záznamu se vytvoří soubor s názvem ve tvaru: Zaznam DD.MM. hh-mm-ss.txt (například Zaznam 10.03. 13-30-00.txt pro záznam spuštěný 10. března o půl druhé odpoledne). Do tohoto souboru se periodicky ukládá čas a jemu příslušející všechny změřené a vypočítané hodnoty.

Pro záznam je možno nastavit časový interval, ve kterém se budou snímané hodnoty ukládat. Tento časový interval lze nastavit v rozmezí milisekund až hodin v závislosti na rychlosti průběhu experimentu, ve kterém je tato jednotka pro monitorování indexu lomu použita, a přesnosti s jakou potřebujeme mít tyto hodnoty zaznamenány.

Tento záznam lze následně použít pro korekci výsledků experimentu v závislosti na změně indexu lomu v jeho průběhu.



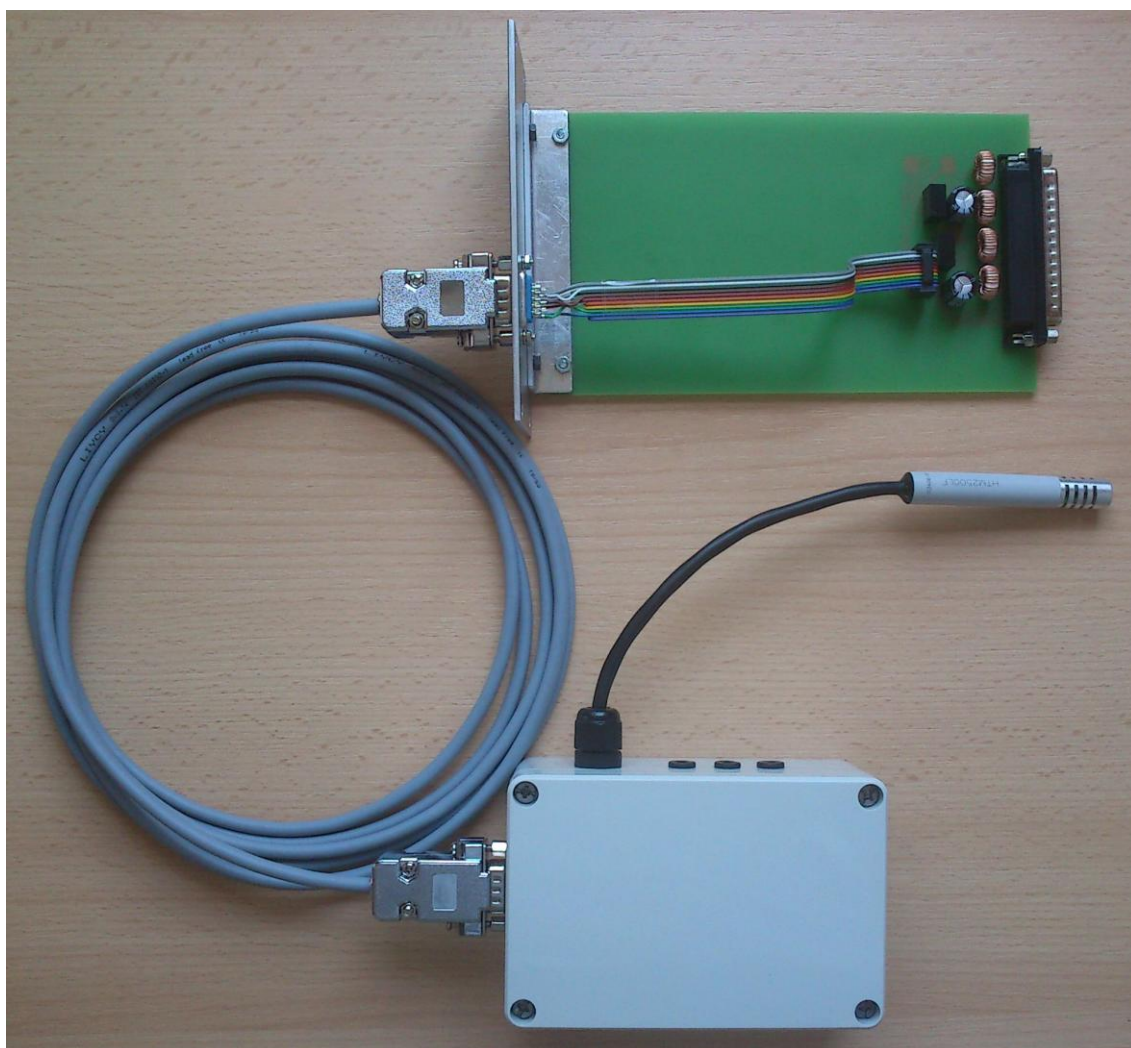
Obrázek 8.4: Detail záznamu naměřených hodnot

Dále můžeme zaznamenávaný průběh přímo vykreslovat do grafu. Pomocí panelu vedle grafu je možno nastavit, které veličiny chce, aby byly vykresleny. Při vykreslení více průběhů najednou, díky automatickému nastavení velkého měřítka grafu, nejsou patrné mírné změny zkoumaných veličin. Obzvláště změny indexu lomu vzduchu v průběhu času jsou nepozorovatelné. Vykreslení více průběhů najednou je užitečné pro dlouhodobé měření, ve kterém můžeme sledovat změny teploty tlaku a

vlhkosti v průběhu experimentu. V grafickém vykreslení průběhu hodnoty indexu lomu vzduchu je možné spatřit změnu v průběhu experimentu pouze v případě, že je tento průběh zobrazen jako jediný. Důvodem je skutečnost že změny indexu lomu vzduch se pohybují maximálně v řádu 10^{-4} .

9 KONEČNÁ REALIZACE

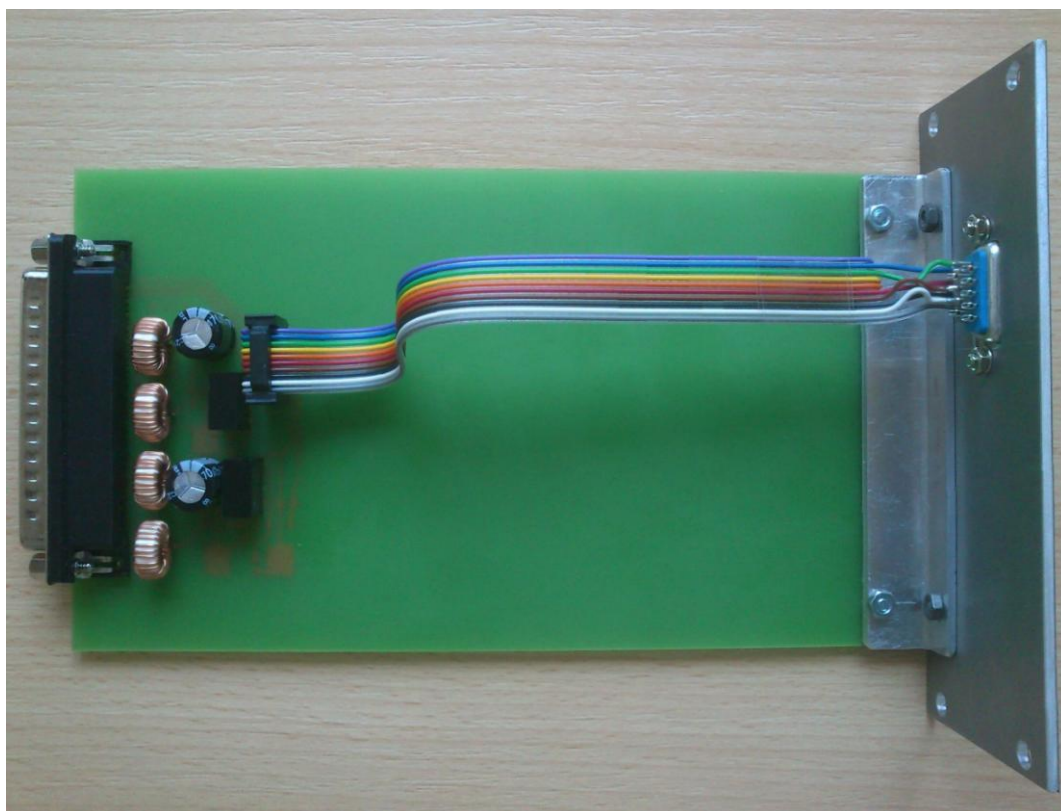
Na obrázku 9.1 je fotografie celé vytvořené sestavy. Měřicí jednotka je propojena s napájecí kartou pomocí 8-žilného stíněného kabelu. Na obrázcích 9.2 a 9.3 jsou detailní fotografie odkrytované měřicí jednotky a napájecí desky.



Obrázek 9.1: Celá sestava



Obrázek 9.2: Detail otevřené měřicí jednotky



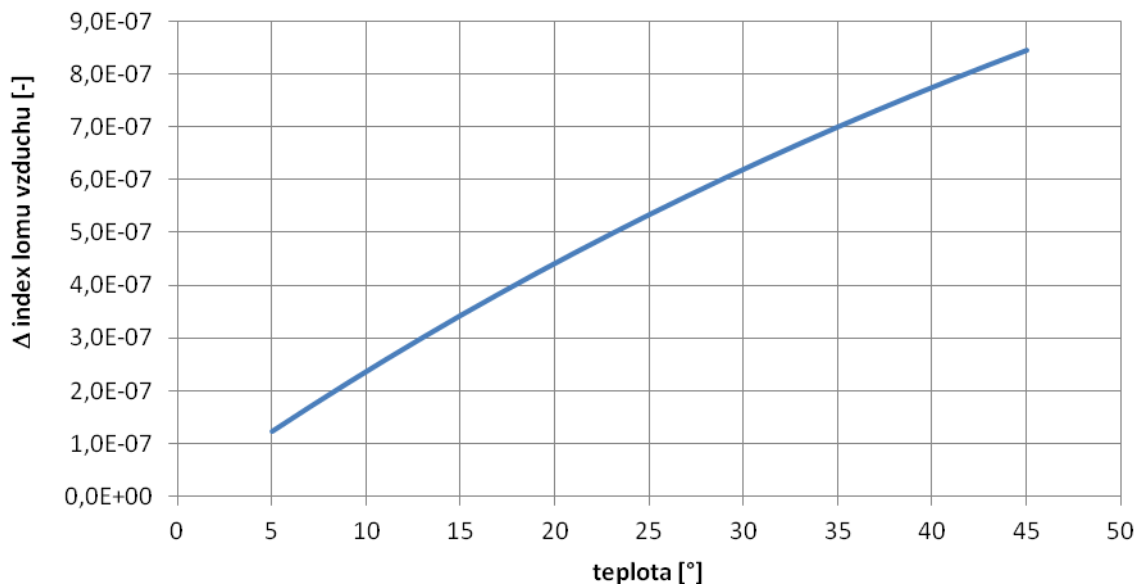
Obrázek 9.3: Detail napájecí desky

9.1 Zhodnocení přesnosti navržené jednotky

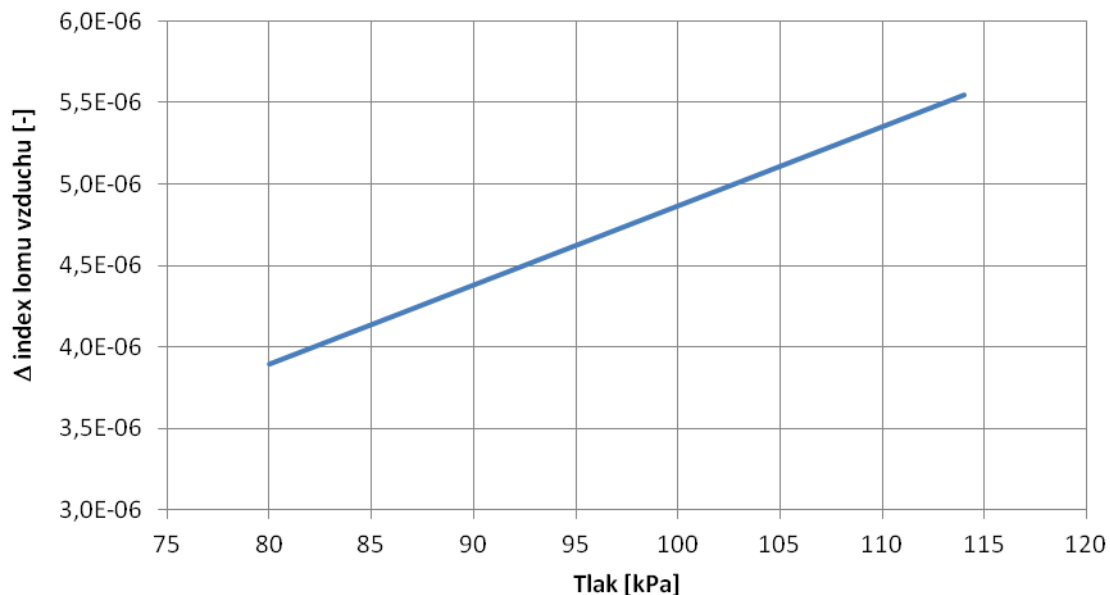
Při zjišťování chyby vycházím z přesnosti použitých senzorů, jelikož jsem bohužel neměl k dispozici žádnou jinou možnost, jak měřit index lomu vzduchu, se kterou bych mohl porovnat výsledky svého měření. Teplotní senzor má přesnost $\pm 3\%$, senzor vlhkosti má přesnost $\pm 2\%$ a senzor tlaku má přesnost $\pm 1,72\%$. Jelikož vliv chyby na výslednou hodnotu indexu lomu se liší v závislosti na hodnotě měřené veličiny, provedl jsem vyšetření maximální celkové chyby měření indexu lomu vzduchu pomocí vykreslení vlivu chyb jednotlivých senzorů na jejich hodnotě do grafů.

Rozsahy teploty, tlaku a vlhkosti vykreslených v grafech jsem zvolil dle předpokladu, že navržená měřicí jednotka je určena pro laboratorní měření a vyšší výkyvy měřených parametrů se v kontrolovaném prostředí laboratoří nevyskytují.

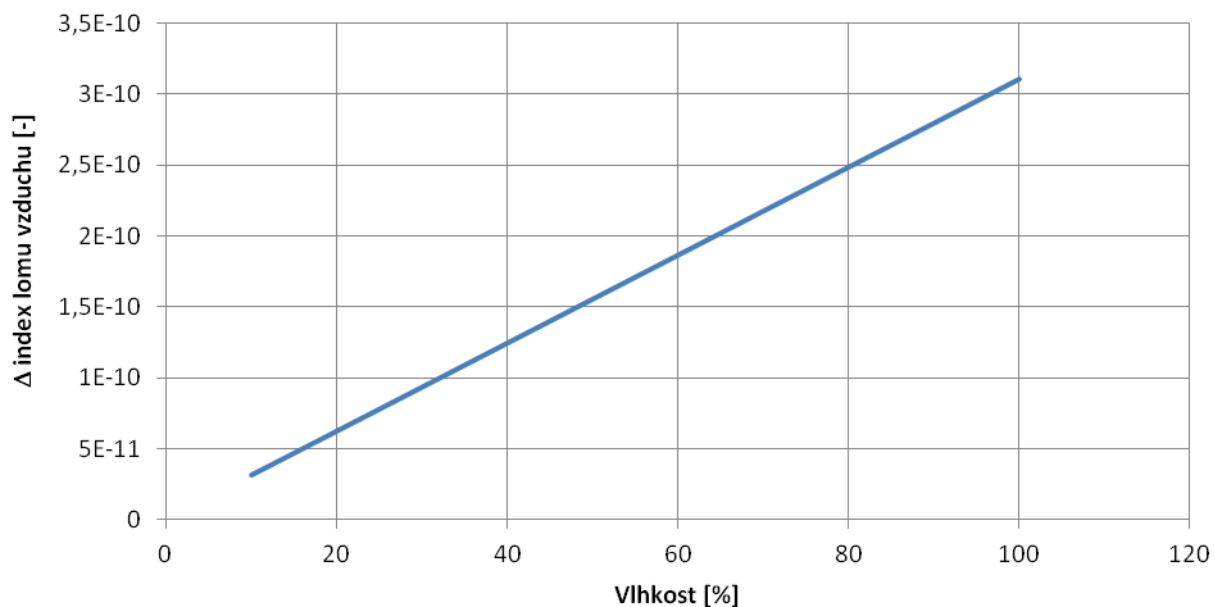
Graf 9.1: Průběh absolutní chyby způsobené chybou měření teploty



Graf 9.2: Průběh absolutní chyby způsobené chybou měření tlaku



Graf 9.3: Průběh absolutní chyby způsobené chybou měření vlhkosti



Z grafických průběhů je vidět, že při zvyšující se hodnotě měřeného parametru se zároveň s ním zvyšuje i vliv chyby snímače na přesnost hodnoty vypočítaného indexu lomu vzduchu.

Pro výpočet maximální chyby, ke které může při měření indexu lomu dojít, použijeme součet maximálních chyb pro jednotlivé senzory.

Maximální absolutní chyba měření indexu lomu vzduchu způsobená chybou měření teploty je $\pm 8,446 \cdot 10^{-7}$, měřením tlaku je $\pm 5,548 \cdot 10^{-6}$ a měřením vlhkosti je $\pm 3,109 \cdot 10^{-10}$.

Výsledná maximální absolutní chyba měření indexu lomu je tedy $\pm 6,393 \cdot 10^{-6}$. Požadovaná přesnost měření dle zadání je aby bylo možné zjistit hodnotu indexu lomu s rozlišením $1 \cdot 10^{-5}$. Jelikož námi zjištěná chyba se pohybuje v nižším řádu než požadovaná přesnost, vyplývá z toho, že vytvořená měřicí jednotka má dostatečnou přesnost.

10 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo prostudovat vliv indexu lomu vzduchu na přesná měření pomocí laserového interferometru, stanovit veličiny nejvýznamněji ovlivňující hodnotu indexu lomu vzduchu, možnosti jejich měření, navrhnout jednotku pro monitorování indexu lomu vzduchu a realizovat ji.

Navržená jednotka obsahuje senzory teploty, tlaku a vlhkosti. Hodnotu indexu lomu získávám výpočtem z upravené Edlénovy formule.

Z důvodu minimální výkonové ztráty jednotky byly všechny výkonové prvky umístěny na napájecí kartu, která při použití jednotky pro monitorování indexu lomu v experimentu je umístěna mimo měřicí oblast a tudíž nebude ovlivňovat probíhající experiment.

Prozkoumáním vlivu chyb jednotlivých senzorů jsem zjistil, že navržená jednotka splňuje i požadavek na přesnost.

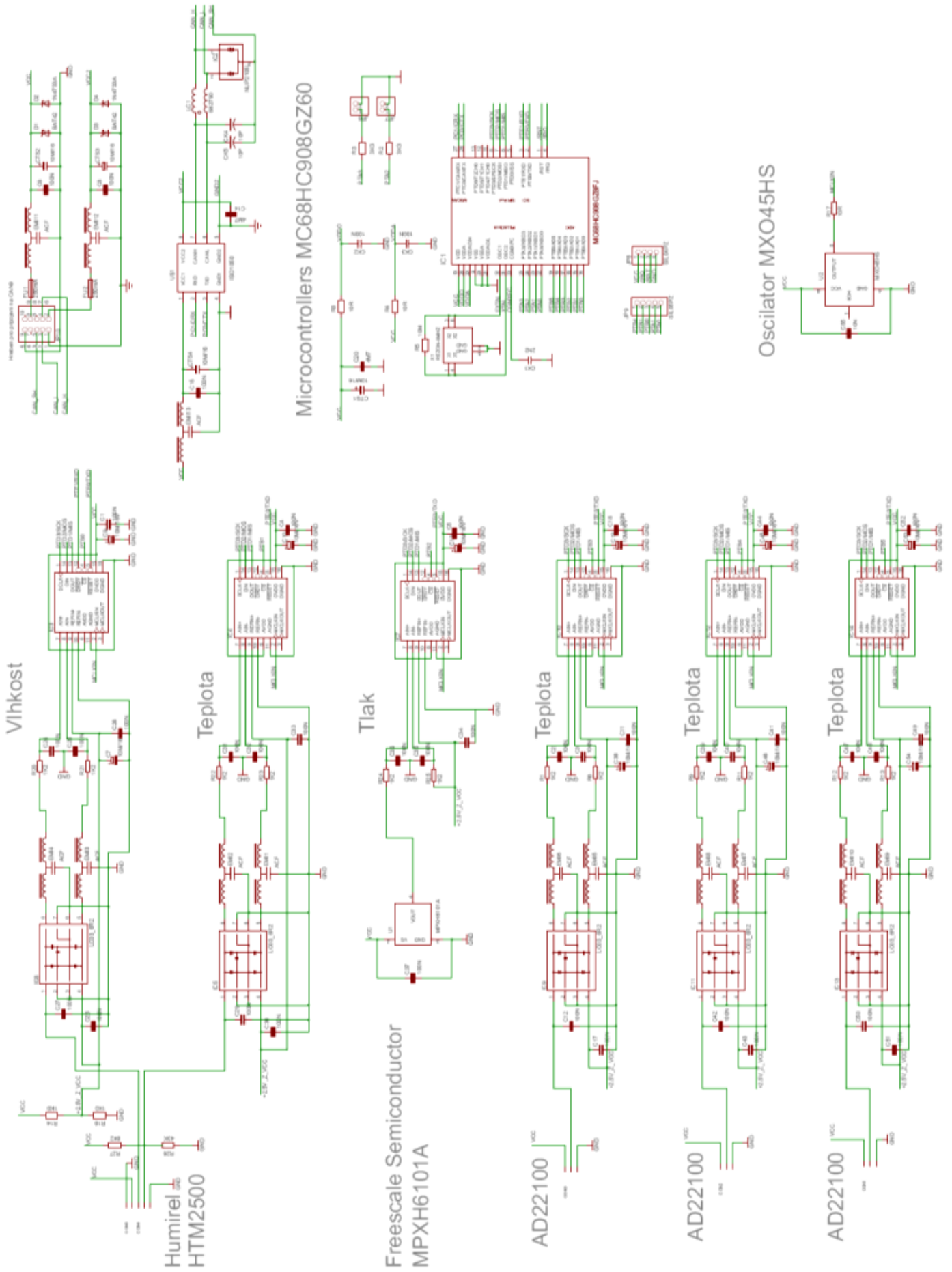
Literatura

- [1] EDLÉN. The refractive index of air. *Meteorologia*, 2, 71–80, 1966.
- [2] *Bönsch, G., Potulski, E.* Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. *Meteorologia*, 35, 133-139, 1998
- [3] FÍRA, R. Index lomu vzduchu. *JMO*, 7–8, 1996.
- [4] *Birch, K. P., Downs, M. J.* An updated Edlén equation for the refractive index of air. *Meteorologia*, 30, 155-162, 1993
- [5] ŠAFARÍK, P. *Metody měření indexu lomu vzduchu.* Brno: Masarykova Univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2008.
- [6] Bezouška, P. *CAN BUS.* Praha: České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky
- [7] Internetové stránky <http://www.can-cia.org/>
- [8] Dokumentace od výrobců součástek

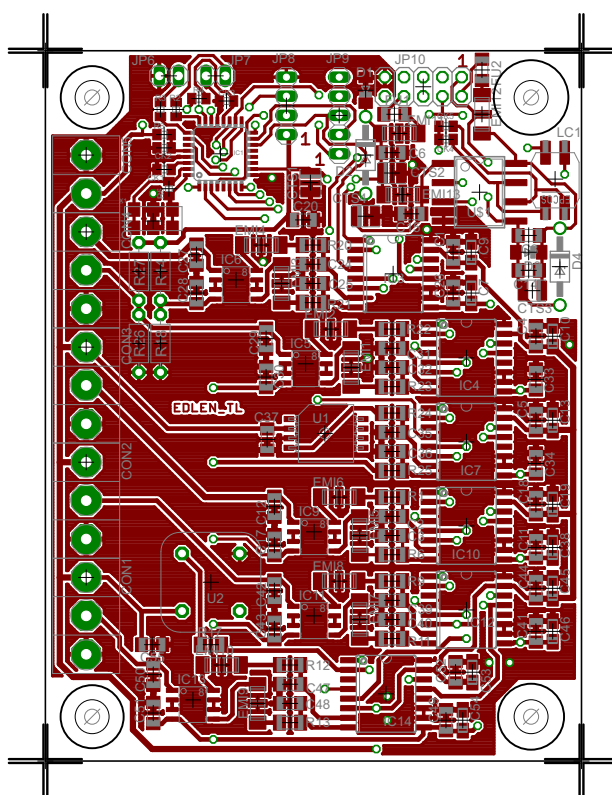
Seznam příloh

- Příloha 1: Celkové schématu jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu
- Příloha 2: Horní strana desky plošných spojů jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu
- Příloha 3: Spodní strana desky plošných spojů jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu
- Příloha 4: Soupiska součástek k jednotce pro monitorování indexu lomu vzduchu
- Příloha 5: Celkové schématu napájecí desky jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu
- Příloha 6: Desky plošných spojů napájecí desky jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu (pohled z horní strany)
- Příloha 7: Soupiska součástek k napájecí desce jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu
- Příloha 8: Přiložené CD-ROM obsahující kompletní elektronickou verzi diplomové práce a zdrojové kódy programu mikrokontroléru a obslužného programu

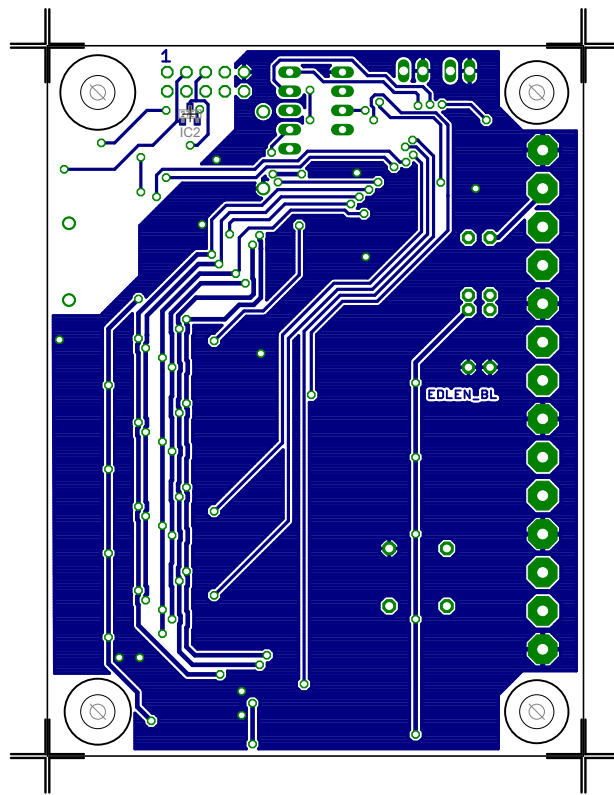
Příloha 1: Celkové schémata jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu



Příloha 2: Horní strana desky plošných spojů jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu



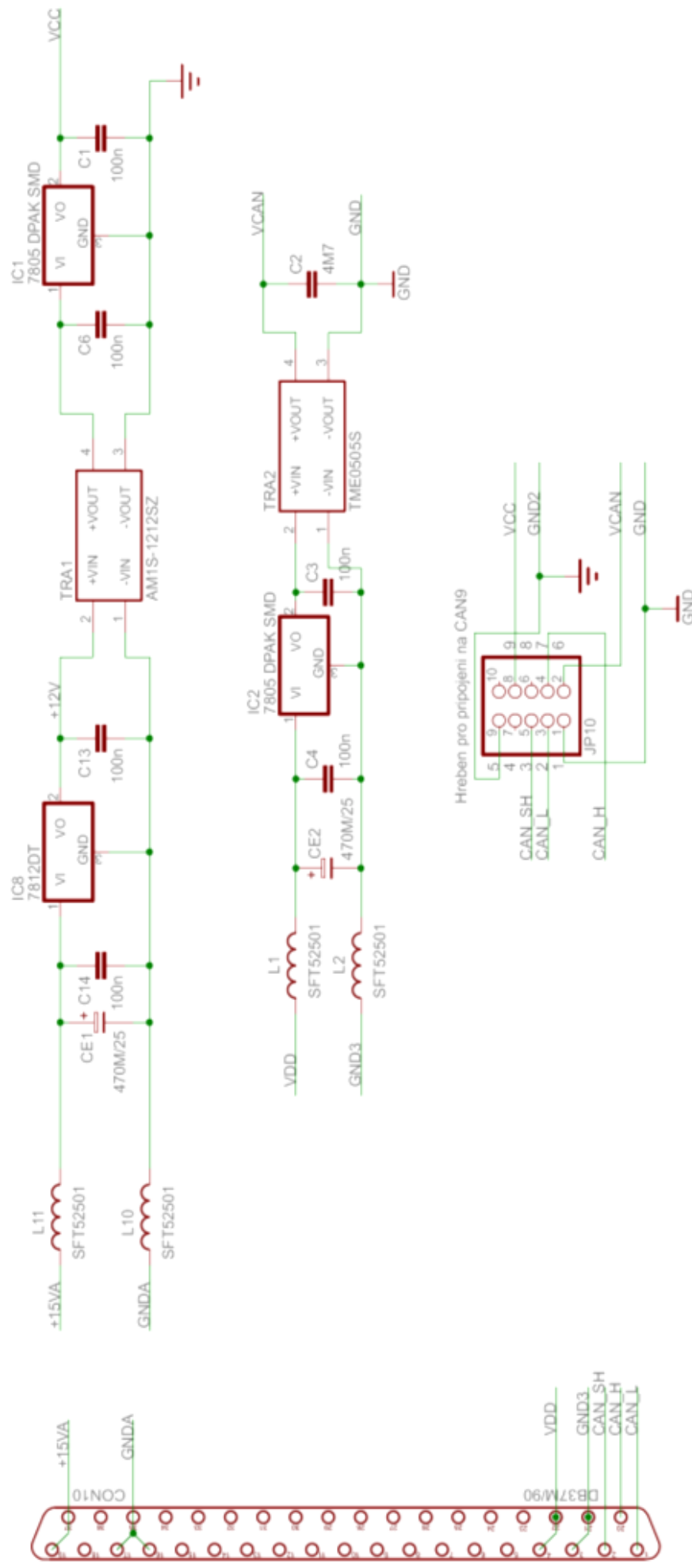
Příloha 3: Spodní strana desky plošných spojů jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu



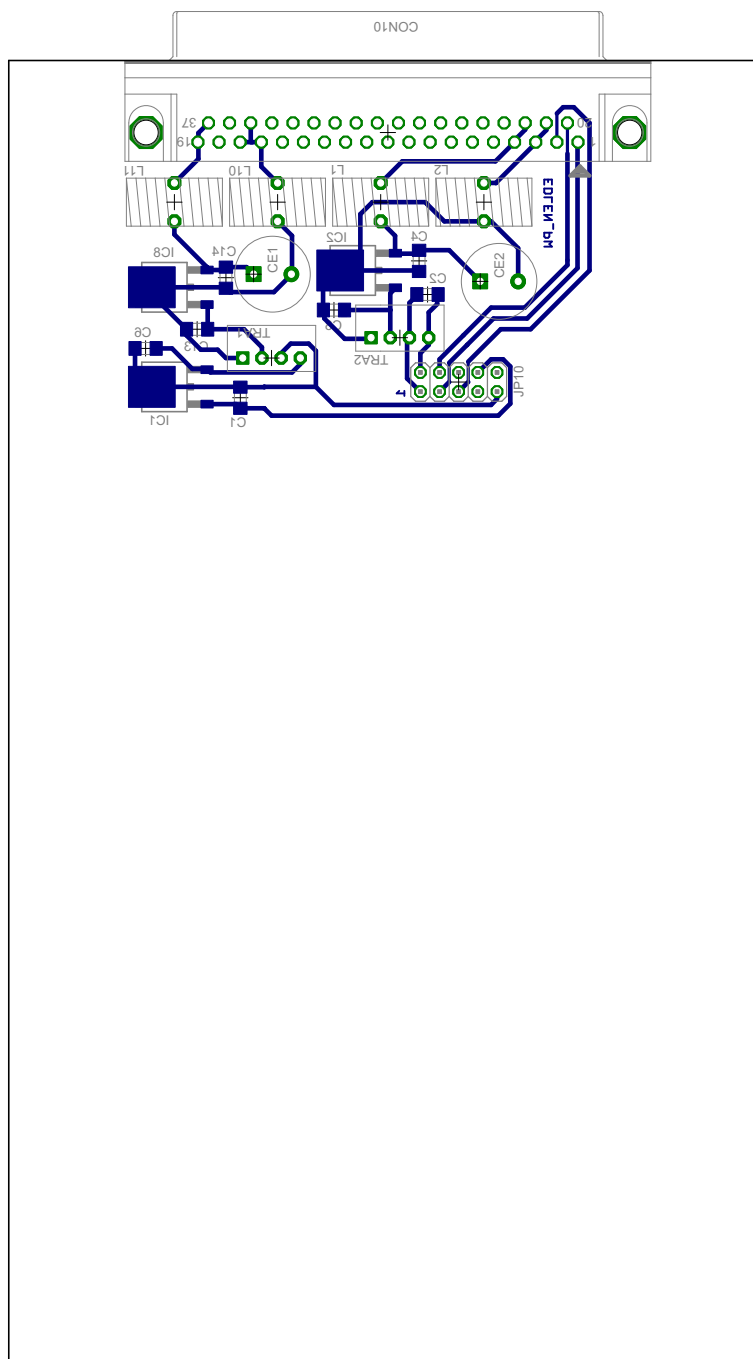
Příloha 4: Soupiska součástek k jednotce pro monitorování indexu lomu vzduchu

Počet	Hodnota	Pouzdro	Označení ve schématu
13	ACF	ACF	EMI1, EMI2, EMI3, EMI4, EMI5, EMI6, EMI7, EMI8, EMI9, EMI10, EMI11, EMI12, EMI13
6	AD7715	SOIC16	IC3, IC4, IC7, IC10, IC12, IC14
1	B82790	B82790	LC1
1	HC908GZ8FJ	LQFP-32	IC1
1	ISO1050	SOP	U\$1
5	LC03_6R2	SO-8	IC5, IC6, IC9, IC11, IC13
1	MPXH6101A	1317-04	U1
1	MXO45HS	DIP-8	U2
1	NUP2105L	SOT23	IC2
1	REZON-8MHZ	XTAL3	X1
2	PINHD-1X2	1x02	JP6, JP7
1	SIL40PZ	1x04	JP8
1	PINHD-2X5	2x05	JP10
1	SIL05PZ	1x05	JP9
1	ARK120/2	ARK120/2	CON5
4	ARK120/3	ARK120/3	CON1, CON2, CON3, CON4
2	BAT42	MINIMELF	D1, D3
2	1N4733A	DO41Z10	D2, D4
2	100N	805	CK2, CK3
2	10P	805	CK4, CK5
1	2N2	805	CK1
38	100N	1206	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C8, C11, C12, C15, C17, C18, C24, C25, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C39, C40, C41, C42, C43, C44, C47, C48, C49, C50, C51, C52
1	10N	1206	C55
2	4M7	1206	C14, C20
10	10M/16V	CTSA	C7, C9, C10, C13, C19, C38, C45, C46, C53, C54
4	10M/16	CTSB	CTS1, CTS2, CTS3, CTS4
2	250mA	KA SMD1206	FU1, FU2
2	1K0	RESEU-7,5	R14, R18
1	43K	RESEU-7,5	R26
1	8K2	RESEU-7,5	R27
1	10M	805	R5
2	10R	805	R4, R8
2	3K3	805	R2, R3
1	10R	1206	R17
12	1K2	1206	R1, R6, R9, R11, R12, R13, R20, R21, R22, R23, R24, R25

Příloha 5: Celkové schématu napájecí desky jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu



Příloha 6: Desky plošných spojů napájecí desky jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu (pohled z horní strany)



Příloha 7: Soupiska součástek k napájecí desce jednotky pro monitorování indexu lomu vzduchu

Počet	Hodnota	Pouzdro	Označení ve schématu
1	AM1S-1212SZ	TME	TRA1
1	TME0505S	TME	TRA2
1	Kolíková lišta	2x05	JP10
2	7805 DPAK SMD	TO252	IC1, IC2
1	7812DT	TO252	IC8
1	DB37M/90	D-37M/90	CON10
6	100n	1206	C1, C3, C4, C6, C13, C14
1	4M7	1206	C2
2	470M/25	ELC-5	CE1, CE2
4	SFT52501	STF-L1	L1, L2, L10, L11