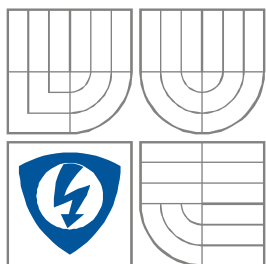




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ROZŠÍŘENÍ SENZORŮ KOTLE NA BIOMASU

EXTENSION OF SENSORS FOR BIOMASS BOILER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

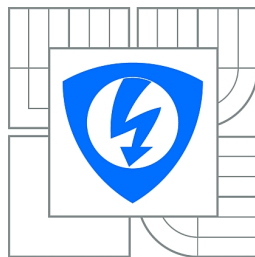
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB KASTNER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK BURIAN, Ph.D.

BRNO, 2016



**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. Jakub Kastner

ID: 171472

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/2016

NÁZEV TÉMATU:

Rozšíření senzorů kotle na biomasu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte senzorický modul použitelný jako měřicí vstup pro řízení kotle na spalování biomasy. Pro měření použijte dodanou lambda sondu, dodaný termočlánek typu K, senzor plamene ve formě fototranzistoru nebo fotoodporu. Na modulu vyved'te 8 digitálních vstupů pro 12V logiku a 8 výstupů s horním spínačem v rozmezí napájecích napětí 12V až 48V. Modul bude napájen 12VDC a měřené hodnoty z něj je možné vyčítat po RS-485 protokolem MODBUS. Upravte řídicí program v regulátoru AMREG firmy AMiT aby využíval Vámi navrženou desku a rozšířil tak možnosti řízení kotle na biomasu.

1. Proveďte rešerši v oblasti měření teploty. Zaměřte se na termočlánky.
2. Realizujte plošný spoj, řešící výše uvedený problém.
3. Navrhněte a realizujte vhodné krytí plošného spoje.
4. Analyzujte chyby měření teploty a navrhněte korekci.
5. Ověřte funkci senzoru plamene a lambda sondy v reálných podmínkách kotle.
6. Rozšiřte existující software v regulátoru o funkci spojení s Vámi navrženým senzorickým modulem.
7. Na základě naměřených dat se pokuste o lepší řízení kotle oproti současnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

CHIPKIN, Peter. Modbus For Field Technicians. ISBN 1456376446.

KHALED ELLEITHY..[ET AL.], Khaled Elleithy..[et al.Editors. Technological developments in networking, education and automation. 1. ed. Dordrecht: Springer, 2010. ISBN 978-904-8191-505.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 16.5.2016

Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Luděk Winter

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout, vytvořit a zapojit do řídicího systému kotle rozšiřující desku senzorů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se práce zabývá způsobem měření teploty. Způsobem měření spalin kotle a následně zařazováním kotlů do jednotlivých tříd podle normy ČSN EN 303-5:2013. Praktická část se zabývá návrhem vhodných schématických obvodů pro měření požadovaných veličin (lambda sonda, termočlánek, měření intenzity světla pomocí fotorezistoru), mechanickým krytím desky, oživením desky, testováním desky v reálných podmínkách a zapojením desky do řídicích algoritmů kotle. Při ožívování první verze desky se objevily chyby, které byly v druhé verzi odstraněny. Při pokusech o zlepšení řízení dvou předložených kotlů na biomasu byly však objeveny chyby v jejich konstrukci vedoucí k nemožnosti jakéhokoli zlepšení jejich provozu.

Klíčová slova

Termočlánek, Lambda sonda, spalování

Abstract

Goal of this work is design and create extension data acquisition unit for existing system of heating boiler. Work is divided to theoretical and practical part. In theoretical part is mentioned methods of measuring temperature. Methods of measuring flue gas and placement of boilers into different classes according to standard ČSN EN 303-5:2013. The practical part deals with the design of schematic circuit for measuring the required parameters (lambda probe, thermocouple, measuring the light intensity using the photo-resist). Mechanical cover, testing created board under real conditions and the involvement of extension board into existing system of boiler. When commissioning the first version of the board appeared errors that were removed in the second version. In attempts to improve the operations of two boilers were found errors leading to the impossibility of any improvements.

Key words

Thermocouple, lambda probe, combustion

Bibliografická citace:

KASTNER J. *Rozšíření senzorů kotle na biomasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016.

Vedoucí diplomové práce byl Ing. František Burian, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem vypracoval svou diplomovou práci na téma *Rozšíření senzorů kotle na biomasu* samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a jiných informačních zdrojů, které jsou uvedeny v práci a 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 následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 16. května 2016

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Františku Burianovi, Ph.D. za vypsání a vedení takto zajímavé práce. Dále bych rád poděkoval vedení firmy ConTeK s.r.o. za možnost používat pro práci firemní zařízení a softwarové vybavení, včetně napsané podpory pro čip použitý v diplomové práci. Tomáši Příbylovi za rady při vytváření hardware a pomoc při výměně zničeného procesoru. Nemalé díky patří také rodině a přátelům za pomoc a podporu při studiu.

V Brně dne 16 května 2016

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Měření teploty.....	11
2.1 Rozdělení senzorů.....	11
2.2 Dilatační senzory.....	11
2.3 Elektrické senzory.....	12
2.3.1 Odporové senzory.....	12
2.3.2 Termoelektrické senzory (termočlánky).....	13
3 Teorie ke spalování v kotli.....	15
3.1 Kvalita spalování.....	15
3.2 Spaliny.....	15
3.3 Účinnost.....	16
3.3.1 Přímá metoda výpočtu účinnosti.....	16
3.3.2 Nepřímá metoda výpočtu účinnosti.....	16
4 Teoretický rozbor zapojení desky senzorů.....	18
4.1 Napájení.....	18
4.1.1 Napájení 5V pro logické obvody.....	18
4.1.2 Napájení 5V pro analogové obvody.....	18
4.1.3 Napájení 3V3.....	19
4.2 Logické obvody.....	19
4.2.1 MCU.....	19
4.2.2 Komunikační obvody.....	19
4.2.3 Paměti.....	19
4.2.4 Hlídání napájecího napětí.....	19
4.3 Lambda sonda.....	19
4.4 Termočlánek.....	19
4.5 FOTOSenzory.....	20
4.6 Modbus.....	20
4.6.1 Princip protokolu.....	20
4.6.2 Vysílací režimy.....	20
4.6.3 Zpráva na Modbus.....	21
5 Realizace rozšiřující desky.....	22
5.1 Schéma.....	22
5.1.1 Napájení.....	22
5.1.2 Termočlánek.....	22
5.1.3 Lambda sonda.....	23
5.1.4 FotoX.....	23
5.1.5 Digitální vstupy.....	24
5.1.6 Digitální výstupy.....	24
5.1.7 Logické a komunikační obvody.....	24
5.2 PCB.....	25
5.3 Krytí desky.....	26
6 Ověření funkčnosti desky.....	28
6.1 Ověření funkčnosti zařízení na desce v01.....	28
6.1.1 Sériová komunikace (RS-232 a RS 485).....	28
6.1.2 Digitální vstupy a výstupy.....	28
6.1.3 Přístrojové zesilovače s dvěma operačními zesilovači.....	29
6.1.4 Vyhřívací část lambda sondy.....	29
6.1.5 Fotocitlivé členy.....	30
6.2 Ověření funkčnosti zařízení na desce v02.....	30

6.3	Ověření měření teploty.....	30
6.3.1	Kalibrace termočlánku.....	32
6.4	Ověření měření lambda sondy.....	32
6.4.1	Zkouška při oživování.....	32
6.4.2	Kalibrace.....	33
6.5	Ověření funkčnosti desky na reálném zařízení.....	33
7	Programové vybavení.....	34
7.1	Bootloader.....	34
7.2	Simulátor.....	34
7.3	Implementace Modbus.....	35
7.3.1	Holding registr.....	35
8	Zapojení desky do systému kotle.....	38
9	Úprava řídicího software kotle.....	39
9.1	Vytvoření komunikace mezi rozšiřující deskou a stávajícím řízením kotle.....	39
9.2	Úprava řízení kotle.....	40
10	Testy prováděné na kotlích.....	42
10.1	Kotel A pro ústřední vytápění.....	42
10.2	Kotel B pro přímé vytápění.....	43
11	Závěr.....	45
12	Literatura.....	46
13	Seznam zkratk.....	47
14	Přílohy.....	48
14.1	Schéma desky.....	48
14.2	Ukázka horní a spodní vrstvy PCB.....	56
14.3	Umístění součástek na PCB.....	59
14.4	Rozměry desky.....	62
14.5	Schéma zapojení kotle.....	64

Seznam ilustrací

Ilustrace 1: Seebeckův jev.....	13
Ilustrace 2: Spojování termočlánků 1.....	14
Ilustrace 3: Spojování termočlánků 2.....	14
Ilustrace 4: Blokové schéma rozřazení jednotlivých částí na rozšiřující desce.....	18
Ilustrace 5: Tvar zprávy definovaný protokolem Modbus pro sériovou linku.....	21
Ilustrace 6: Veřejné funkce protokolu Modbus [4].....	21
Ilustrace 7: Vstup napájení.....	22
Ilustrace 8: Přístrojový zesilovač se dvěma operačními zesilovači.....	22
Ilustrace 9: Připínání vyhřívání lambda sondy.....	23
Ilustrace 10: Zapojení proudového zdroje pro měření odporu.....	23
Ilustrace 11: Dělič vstupního napětí digitálního vstupu (DI0).....	24
Ilustrace 12: Ukázka 3D modelu desky.....	25
Ilustrace 13: Fotka osázené desky.....	25
Ilustrace 14: Model vrchního krytu desky.....	26
Ilustrace 15: Model spodního krytu desky.....	26
Ilustrace 16: Ukázka desky zavřené v krabici.....	27
Ilustrace 17: Rozkreslení svorkovnic na modelu desky v krabici.....	27
Ilustrace 18: Schéma opravy spínače vyhřívání lambda sondy.....	29
Ilustrace 19: Ukázka simulátoru rozšiřující desky.....	34
Ilustrace 20: Vložený objekt v komunikaci.....	39
Ilustrace 21: Definice parametrů s kterými se bude komunikovat s návrhem servisního okna	39
Ilustrace 22: Ukázka kódu žádajícího o aktuální data z komunikace.....	39
Ilustrace 23: Regulační schéma kotle před úpravou.....	40
Ilustrace 24: Regulační schéma po přidání regulace kvality spalování.....	40
Ilustrace 25: Foto a blokové schéma chyby.....	42
Ilustrace 26: Graf měření napětí na lambda sondě a teploty spalin během pokusného měření.	43

Seznam tabulek

Tabulka 1: Mezní emisní limity pro třídění kotlů s výkonem do 50kW.....	15
Tabulka 2: Minimální účinnost kotlů pro jednotlivé třídy.....	16
Tabulka 3: Hodnoty použitých koeficientů při výpočtu teploty z napětí.....	31
Tabulka 4: Naměřené teploty pomocí termočlánku v kalibrátoru termočlánků.....	32
Tabulka 5: Porovnání teplot měřených rozšiřující deskou s referenčním měřidlem GMH 3710	32
Tabulka 6: Identifikátory holding registrů.....	35
Tabulka 7: Popis jednotlivých bitů holding registru ComCommand.....	36
Tabulka 8: Popis jednotlivých bitů holding registru STATUS.....	37

1 Úvod

Dne 13.6.2012 vešel v platnost zákon o ochraně ovzduší (201/2013 Sb.). Tento zákon se mimo jiné zabývá emisními limity pro kotle ústředního topení. Zakazuje prodej technologicky starých kotlů a postupně zpřísňuje emisní limity pro kotle nově uváděné do provozu až do roku 2018. V návaznosti na tento zákon se upravila norma zabývající se výrobou kotlů pro ústřední vytápění (ČSN EN 303-5). Tato norma rozděluje kotle do kvalitativních tříd podle vypouštěných emisí a účinnosti kotle. Výrobce kotlů byl dán požadavek na měření teploty, měření lambdy a určování plamene podle fotocitlivého prvku. Současný řídicí systém se skládá z řídicí jednotky a desky vstupů a výstupů. Probíhá mezi nimi komunikace na fyzickém rozhraní RS-485 s protokolem Modbus RTU. Cílem této práce je tedy navrhnout a realizovat rozšiřující desku senzorů umožňující zlepšení řízení spalování v kotli. Ověřit její funkčnost a na předloženém kotli se reálně pokusit o zlepšení stávajícího řízení spalování. Tímto vylepšením se může kotel spadající do kvalitativní třídy 3 posunout alespoň o třídu výše, aby se tento model kotle mohl prodávat i po roce 2018. Předložený kotel se dá charakterizovat jako kotel na tuhá paliva, s relativně velkým obsahem vody, s roštovým trvalým přemísťováním paliva (řetězový rošt), žárotrubý, nízkotlaký. Jako palivo jsou uváděny dřevěné peletky.

2 Měření teploty

[1] Teplotní stupnice je definována na základě trojného bodu vody, tj na základě rovnovážného stavu tří skupenství vody (led, voda a sytá pára). Hodnota teploty trojného bodu vody byla pevně stanovena na

$$T = 273,16 \text{ K} \quad (1)$$

Základní jednotkou termodynamické teploty je Kelvin [K] definovaný jako 273,16-tá část termodynamické teploty trojného bodu vody. Jednotkou teploty je také stupeň Celsia [°C] definovaný vztahem:

$$\Theta = T - T_0 \quad (2)$$

kde $T_0 = 273,16 \text{ K}$

Stanovení teploty trojného bodu bylo zvoleno tak, aby platilo

$$\Delta \Theta = \Delta T \quad (3)$$

2.1 Rozdělení senzorů

Senzory můžeme dělit pomocí několika kritérií a to sice podle:

- Fyzikálního principu
 - Dilatační
 - Elektrické
 - odporové
 - termoelektrické
 - Speciální
- Vztahem mezi čidlem a měřeným objektem
 - Dotyková
 - Bezdotyková
- Typu výstupního signálu
 - Analogové
 - Digitální (spínače)

2.2 Dilatační senzory

Jedná se o senzory využívající teplotní roztažnost materiálů. Využívá se roztažnost objemová nebo délková. Závislost délky na teplotě je dána vztahem:

$$l = l_0(1 + \alpha_s T) \quad (4)$$

Kde : l_0 Délka při teplotě 0°C
 α Koeficient roztažnosti

Představitelem skupiny využívající tepelnou délkovou roztažnost je bimetalový teploměr, využívající různou roztažnost dvou materiálů. Zahřátím se rovná destička, složená ze dvou desek různých materiálů na konci pevně spojených, vlivem teplotní roztažnosti zkroutí a tím ztratí/získá kontakt s druhým kontaktem senzoru. Senzor využívající objemovou roztažnost je například rtuťový teploměr. Dilatační senzory se používají tam, kde není potřeba znát přesnou teplotu nebo v zařízeních, kde indikují překročení teploty (například pračka nebo žehlička). Hlavní výhodou těchto snímačů je jejich velmi nízká výrobní cena.

2.3 Elektrické senzory

2.3.1 Odporové senzory

Odporové senzory využívají závislosti měrného odporu na teplotě. Materiál ovlivňuje rozsah měřitelných hodnot, přesnost senzoru, možnou konstrukci a chemickou stabilitu. Požadavkem na senzory je aby teplotní závislost odporu byla lineární, teplotní součinitel odporu byl co největší (citlivost senzoru) a stálý. Při měření pomocí těchto senzorů musí být proud, kterým měříme co nejmenší, abychom si neovlivňovali měření „vyhříváním“ senzoru. (Jouleovo teplo $Q = R \cdot I^2 \cdot t$).

Kovové senzory

Pro rozsah teplot 0 – 100 °C platí pro odpor senzorů vztah:

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (5)$$

Kde	R_0	Odpor při teplotě 0°C
	α	Teplotní součinitel odporu
	T	Teplota

Pro větší rozsahy teplot platí nelineární rovnice, které jsou závislé na materiálu použitým při výrobě senzoru. Nejrozšířenějšími materiály jsou platina, nikl a molybden. Pro extrémně nízké teploty (<0,5K) jsou to slitiny Rh-Fe, Pt-Co...

Platina

Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí, a vysokou teplotou tání. Odpor se mohou vyrábět drátkovou, tenkovrstvou a tlustovrstvou technologií. Vyrábí se ve dvou tolerančních třídách. Třída A je pro rozsah -200 až 650°C, třída B je pro rozsah -200 až 850°C. Teploměry se vyrábí s odporem 50, 100, 200, 500, 1000 a 2000 Ω , tato hodnota je pro teplotu 0°C. Mimo jiné se pomocí odporů identifikují teploměry např. Pt100... Pro odpor platí vztah

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A \vartheta + B \vartheta^2 + C \vartheta^3(\vartheta - 100)) \quad (6)$$

Kde	R_0	Odpor při 0°C
	A	$3,90803 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
	B	$5,802 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$
	C	$-4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-3}$ pro $\vartheta > 0^\circ\text{C}$
	C	0 K^{-3} pro $\vartheta < 0^\circ\text{C}$
	ϑ	Teplota v Kelvinech

Nikl

Výhodou niklových teploměrů je vysoká citlivost, rychlá časová odezva a malé rozměry. Nevýhodou oproti platině je značná nelinearita. Používají se pro rozsah -60 až 180°C, pro tento rozsah platí rovnice

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A \vartheta + B \vartheta^2 + C \vartheta^3(\vartheta - 100)) \quad (7)$$

Kde	R_0	Odpor při 0°C
	A	$5,49 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
	B	$6,80 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$
	C	$9,24 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-3}$ pro $\vartheta > 0^\circ\text{C}$
	C	0 K^{-3} pro $\vartheta < 0^\circ\text{C}$

Měď

Měděné teploměry se přímo nevyrobí, ale změny odporu se využívá při měření například teploty ve vinutí motoru. Podle rovnice

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (8)$$

Kde	R_0	Odpor při teplotě 0°C
	α	$4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (Dle čistoty mědi)
	T	Teplota ve °C

Polovodičové Senzory

Termistory

Jsou to teplotně závislé odpory dělí se na dva druhy NTC a PTC. Průběh odporu je u obou nelineární a oproti kovovým teploměrům mají velký teplotní koeficient. NTC termistory mají zápornou změnu odporu vzhledem k teplotě. Jejich typický rozsah je -50 až 150 °C. Používají se pro měření teploty v nejrůznějších aplikacích od automotive, přes potravinářský průmysl až v bílé elektronice. PTC termistorům se s rostoucí teplotou zvětšuje odpor. Toho se využívá například jako ochrana motorů před přehřátím, nebo v jednoduchých vyhřívacích zařízeních jako automatický regulátor. V této práci je na podobném principu založeno vyhřívání lambda sondy

Monokrystalické senzory (Si)

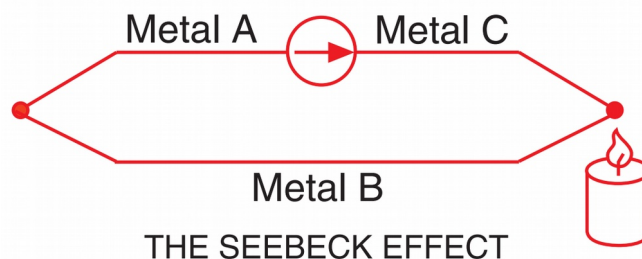
Pro výrobu těchto senzorů se používá nevlastního polovodiče typu N. Změna odporu je dána změnou pohyblivosti nosičů náboje čímž narůstá odpor. Teplotní koeficient je kladný a větší než u platinových teploměrů, ale je mírně nelineární. Používají se zejména pro teploty -55 až 150°C.

2.3.2 Termoelektrické senzory (termočlánky)

Jsou založeny na Seebeckově jevu. Jsou jednoduché, mechanicky odolné, mají široký rozsah teplot (-270 – 1372 °C typ K), malé rozměry. Z toho plynoucí hmotnost a tepelná setrvačnost. Nevýhodou je nelinearita při velkých rozsazích termočláunku a přesnost ovlivněná čistotou materiálu ze kterého se vyrábí.

Seebeckův jev

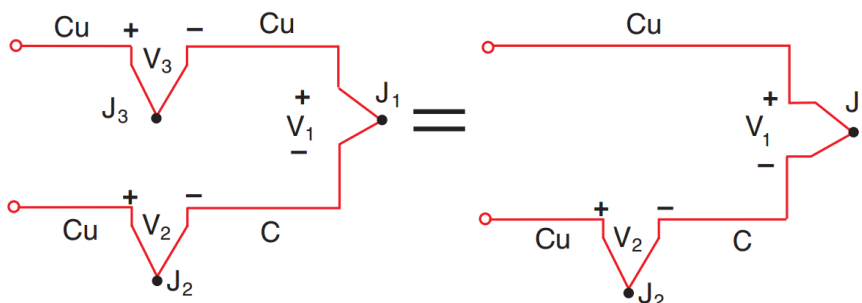
Jsou-li dva dráty z různého materiálu spojené na obou stranách a jeden spoj se začne zahřívát. Začne obvodem protékat proud. Tento jev objevil a popsal Thomas Seebeck v roce 1821. Pokud obvod na jedné straně rozpojíme naměříme napětí odpovídající teplotnímu rozdílu zahřívajícího a chladného konce termočláunku.



Ilustrace 1: Seebeckův jev

Pravidla pro spojování termočlánků

Termoelektrické napětí vzniká na každém spoji dvou různých kovových (i polovodičových) materiálů. Chceme-li zvětšit citlivost, nebo změřit teplotu zahřívaného konce musí se využít pravidel pro spojování termočlánků. Níže je uveden příklad pro měření reálného termočlánku, za předpokladu, že měřící voltmetr má svorky vyrobené z mědi.



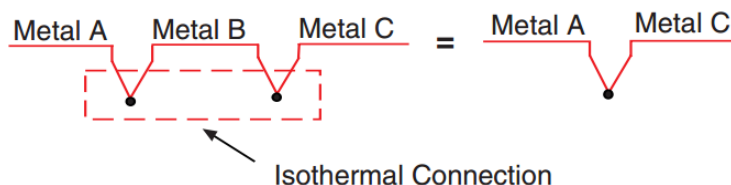
Ilustrace 2: Spojování termočlánků 1

Termoelektrické napětí nevzniká na spoji dvou stejných materiálů, proto napětí V_3 je rovno nule. Měřené napětí odpovídá rozdílu teplot mezi spoji J_1 a J_2 .

$$V = V_1 - V_2 \sim \alpha T_1 - \alpha T_2 = \alpha (T_1 - T_2) \quad (9)$$

Kde: V Napětí ve voltech
 T_1, T_2 Teplota na spoji materiálů (termočlánku)
 α Seebeckův koeficient (**není konstantní pro celý rozsah termočlánku**)

Dalším důležitým jevem je spojování různých materiálů při stejné teplotě je na ilustraci [3](#)



Ilustrace 3: Spojování termočlánků 2

Tohoto pravidla se využije při korekci vypočítaného napětí na přechodu obecného termočlánku do měřícího obvodu. Svorky měřícího přístroje budou jako kov B.

Výpočet teploty termočlánku

Převod mezi napětím termočlánku a jeho teplotou se provádí pomocí veřejně dostupných polynomů. Tyto polynomy jsou vyššího řádu (do 10) a jsou pro normované termočlánky, pokud se vyhodnocuje nenormovaný termočlánek musí se nejdřív tento polynom proměřit a vypočítat. Další, ale méně přesná metoda je výpočet teploty pomocí seebeckova koeficientu. Ten je udávaný pro rozsah teplot, tak aby chyba měření byla zanedbatelná. V praxi se nejběžněji uvažuje chyba měření teploty pomocí termočlánku $\pm 0,5$ °C.

3 Teorie ke spalování v kotli

Spalování je exotermická reakce uhlíku (C), vodíku (H) a kyslíku (O₂). Výsledkem této reakce jsou spaliny s vysokou teplotou. Tyto spaliny se v kotli využívají k ohřevu oběhové vody, například v ústředním topení. Palivo dodávané do kotle zajišťuje přísun C a H. O₂ je získáváno z dodávaného vzduchu, obsahující v naší nadmořské výšce přibližně 21% O₂. Rychlost reakce je přímo úměrná teplotě, při které dochází ke spalování. Hoření je speciální případ spalování, kde teplota spalin dosáhla hranice viditelného spektra.

3.1 Kvalita spalování

V ideálním případě spalování je všechen uhlík (C) v reakci s kyslíkem přeměněn na oxid uhličitý (CO₂) a zároveň je vodík (H) v reakci s kyslíkem přeměněn na vodní páru (H₂O). Přeměna uhlíku (C) probíhá postupně, nejprve se změní na oxid uhelnatý (CO) a teprve další reakcí je přeměněn na oxid uhličitý (CO₂). Oxid uhelnatý vzniká nedokonalým spalováním při nízké teplotě nebo při nedostatku kyslíku, je lehčí než vzduch a je jedovatý. Z toho vyplývá, že do topeniště musí být dodáno dostatečné množství vzduchu. Kyslík musí mít zároveň dostatečný čas na reakci s uhlíkem, aby vznikl oxid uhličitý (CO₂). Rychlost a tedy i dobu reakce ovlivňuje teplota v místě reakce, proto není dobré ochlazovat topeniště zbytečným přebytkem vzduchu. V ideálním případě ve spalinách nebude zbytkový kyslík (O₂) ani nespálený oxid uhelnatý (CO), v takovém případě je $\lambda = 1$. V praxi bývá s ohledem na nerovnoměrné spalování v kotlích $\lambda = 1,2$ až $1,5$, aby ve spalinách nebyl přítomen oxid uhelnatý (CO).

3.2 Spaliny

Produktem spalování jsou ohřáté plyny (emise), jimž se ve výměníku odebere teplo. Norma ČSN EN 303-5 rozděluje kotle do kvalitativních tříd. V normě vydané roku 1999 jsou uvedeny třídy 1, 2 a 3. Nová norma přidává třídu 4, 5 a odebírá třídy 1 a 2, které dnes (rok 2016) již nelze koupit, tak jak nařizuje zákon o ochraně ovzduší (201/2012 Sb.). Z níže zobrazené tabulky jsou vidět limity pro všechny třídy (i ty dnes k prodeji nepřístupné). Limity platí pro jmenovitý i snížený výkon.

Mezní emisní hodnoty pro kotle se samočinnou dodávkou biologického paliva do výkonu 50kW															
CO					OGC					prach					
mg/m ³ při 10% O ₂ při suchých spalinách, 0°C, 1013mbar															
Třída 1	Třída 2	Třída 3	Třída 4	Třída 5	Třída 1	Třída 2	Třída 3	Třída 4	Třída 5	Třída 1	Třída 2	Třída 3	Třída 4	Třída 5	
15000	5000	3000	1000	500	1750	200	100	30	20	200	180	150	60	40	

Tabulka 1: Mezní emisní limity pro třídění kotlů s výkonem do 50kW

OGC - Organic Gaseous Compounds (organické plynné látky THC (uhlovodíky))

Tyto limity stanovuje evropská norma EN 303-5, jednotlivé členské země mohou mít přísnější požadavky. Třeba Rakousko stanovuje navíc limity pro sloučeniny NO_x. Limity v České republice jsou shodné s limity EU.

3.3 Účinnost

Mimo emisních limitů udává norma[2] také minimální účinnosti kotle. Tato účinnost se vypočítává z jmenovitého výkonu kotle a musí jí být dosaženo i při sníženém výkonu kotle.

	Třída 3	Třída 4	Třída 5
η_K [%]	$67 + 6 \log Q$	$80 + 2 \log Q$	$87 + \log Q$

Tabulka 2: Minimální účinnost kotlů pro jednotlivé třídy

Účinnost se může vypočítat pomocí přímé a nepřímé metody. Norma nařizuje při zkouškách kotlů použít přímou metodu s tím, že nepřímá metoda se může být použita jako kontrolní.

3.3.1 Přímá metoda výpočtu účinnosti

Účinnost je poměr dodaného využitelného tepelného výkonu a tepelného příkonu, vyjádřený v procentech [2]

$$\eta_K = \frac{Q}{Q_B} * 100 [\%] \quad (10)$$

Kde Q dodaný využitelný tepelný výkon
 Q_B Tepelný příkon (množství tepla vytvořeného spálením paliva o dané výhřevnosti za jednotku času).

3.3.2 Nepřímá metoda výpočtu účinnosti

Vychází z předpokladu, že ideální stroj pracuje se stoprocentní účinností. Tudiž se budou sumarizovat ztráty a tím se dostaneme k účinnosti kotle.

$$\eta_K = (1 - q_a - q_U - q_s - q_B) * 100 [\%] \quad (11)$$

Kde q_a ztráta citelným teplem spalin (v dobře spalujících kamnech zcela dominantní)
 q_U ztráta neúplným spalováním (při nespálení CO uniká nevyužitá energie s kterou se počítalo vzhledem k dodanému příkonu)
 q_s ztráta sáláním, konvekcí a kondukcí (Odevzdané teplo do prostoru kotelny)
 q_B ztráta podílem uhlíku v tuhých zbytcích po spalování (Nedopalky uhlíku jako jsou saze a černý popel)

Měření a požadavky pro návrh desky

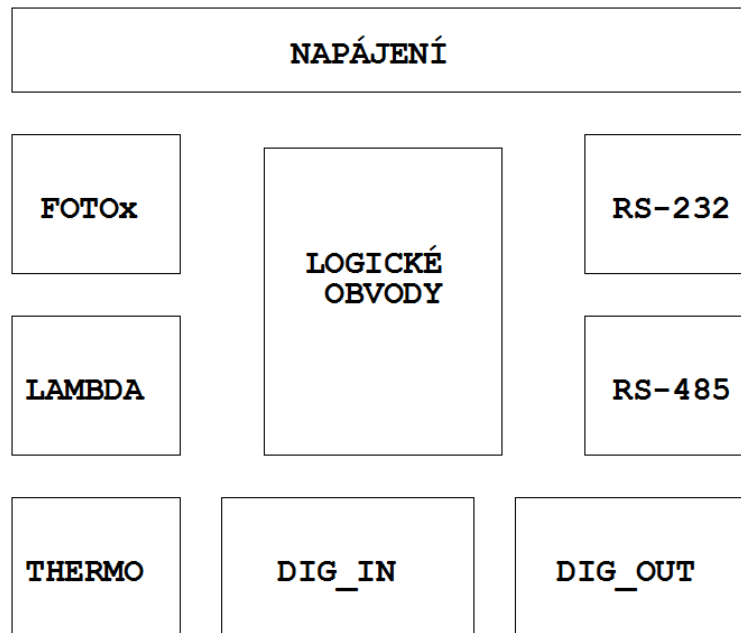
Z pohledu účinnosti kotle je zcela zásadní měřit a regulovat množství kyslíku obsaženého ve spalinách. Tím se zásadním způsobem ovlivňuje tvorba CO. Pro měření zbytkové koncentrace kyslíku je vhodná lambda sonda. Jde o chemický senzor na bázi porovnávání koncentrací kyslíku. Nejběžnější typ má jako elektrolyt oxid zirkoničitý (ZrO_2). Tento materiál se od 300°C stává vodivým pro ionty kyslíku v elektrolytu, které se snaží vyrovnat koncentraci O_2 mezi měřeným a referenčním (okolním) vzduchem. Tím je vytvářen napěťový potenciál, který lze snadno měřit.

Z tabulky emisních limitů plyne potřeba měřit oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (OGC) a prach. Tyto hodnoty jsou měřeny z kotlů ve zkušební laboratoři při palivu daném výrobcem a normou. V pozdějším provozu se tyto hodnoty budou kontrolovat jednou za dva roky kontrolním měřením (od 1.1 2017). Měření koncentrace CO a OGC lze provádět kontinuálně, jelikož v obou případech jde o hořlavý plyn a mohl by se použít například pellistor. Ten sice nerozliší o jakou zbytkovou plynnou složku jde, ale mohl by sloužit jako doplňková informace o kvalitě spalování. OGC jsou plyny vznikající z paliva zahřátého nad mez jeho termické stability. Vzhledem k jejich relativně nízké teplotě vznícení (metan – 600°C, propan – 470°C) se při spalování s přebytkem kyslíku v kotli spálí a ve spalinách by se už neměly vykytovat. Na jejich spalování jsou založeny zplynovací kotle. Po domluvě se zadavatelem práce se od snímání CO a OGC plynů ve spalinách upustilo z cenových důvodů a minimální přidané hodnotě.

Měření prachových částic lze provádět gravimetrickou filtrační metodou. Prvním krokem je opakované sušení filtru, dokud klesá jeho hmotnost. Dalším krokem je odběr spalin. Tyto spaliny se filtrují přes vysušený a zvážený filtr. Po ukončení měření se filtr opět suší dokud klesá jeho hmotnost. Rozdílem hmotností naměřeného filtru před a po měření referenčního množství spalin je zjištěna hmotnost prachových částic na m^3 spalin. Norma [2] povoluje filtrovat spaliny pro určení prachových částic dále pomocí elektrostatického odlučovače. V něm se působí na procházející spaliny silným elektrostatickým polem. Prachové částice se „přilepí“ na elektrody a výstupní spaliny jsou po průchodu už bez prachu (účinnost těchto odlučovačů se udává okolo 99%). Obě tyto metody jsou založeny na odběru spalin a následném vážení prachových částic. Jelikož měření neprobíhají bez zásahu obsluhy, dají se měřit v laboratorních podmínkách. Při provozu kotlů s takto nízkými výkony (do 50 kW) by se ekonomicky nevyplatilo vymýšlet nějaký jiný způsob měření, který by dosahoval přesnosti $\pm 10 \text{ mg/m}^3$ (požadavek normy [2]).

4 Teoretický rozbor zapojení desky senzorů

Pro přehlednost jsou rozřazeny jednotlivé prvky schématu do logických celků podle následujícího obrázku. Protože výrobce PCB jako nejmenší cenu účtuje cenu za rozměr 1dm^2 , byl tento rozměr použit navrhovanou deskou. Je na desce senzorů je proto dostatek místa a rozložení součástek na desce přibližně odpovídá tomuto blokovému schématu.



Ilustrace 4: Blokové schéma rozřazení jednotlivých částí na rozšiřující desce

4.1 Napájení

V zadání desky bylo stanoveno napájecí napětí 12V stejnosměrných. Z toto napětí jsou vytvářena další potřebná napětí: logické obvody 5V, procesor 3V3 (1V2 je vytvářeno interním LDO regulátorem), analogové obvody 5V, napájení lambda sondy 12V.

4.1.1 Napájení 5V pro logické obvody

Jelikož vstupní napájení je 12V na LDO by byl úbytek napětí 7V. Při předpokládaném odběru proudu 100mA (rezerva okolo 50mA) by byl ztrátový výkon 0,7W a jelikož logickým obvodům nevadí mírně zvlněné napájení, byla zvolena možnost použití spínaného zdroje. Zdroj stepdown bude pulzně odebírat proud z napájecího napětí. Pro omezení rušení do napájecího napětí bude potřeba přidat filtrační člen do napájecí větve.

4.1.2 Napájení 5V pro analogové obvody

Na desce bude 6 analogových vstupů. Jelikož odebíraný výkon nebude velký a analogové obvody by měli mít co nejstabilnější a nezvlněné napájení, byl zvolen LDO. Ten je z pohledu stability výstupního napětí výrazně lepší než spínaný zdroj.

4.1.3 Napájení 3V3

Jako zdroj napětí vyjdu z 5V pro logické obvody, použiji LDO na 3V3. Zvlnění 5V zdroje bude vyhovující, protože tímto napětím budou opět napájeny pouze digitální obvody a zdroj LDO toto zvlnění výrazně ztlumí. Referenční napětí pro A/D převodník zajistí referenční zdroj REF196, která je velice přesná a je minimálně závislá na změnách zatížení a teploty.

4.2 Logické obvody

4.2.1 MCU

Byl vybrán a schválen procesor od firmy Atmel konkrétně at91sam4e16e. Jedná se o 32-bitový RISC procesor s jádrem ARM® Cortex®-M4, který může pracovat až na 120MHz a obsahuje FPU. Je to výkonnostně a cenově přijatelný procesor i pro takto jednoduchou senzorovou desku. Zároveň byl zvolen, protože pro něj v době návrhu už byla napsaná a vyzkoušená podpora pro jiné projekty.

4.2.2 Komunikační obvody

V zadání je komunikace pomocí protokolu Modbus nad rozhraním RS-485. Další komunikací byla zvolena komunikace firmy ConTeK nad rozhraním RS-232. Tato komunikace bude sloužit jako servisní (nahrávání nového SW, debug, atd...)

4.2.3 Paměti

Přestože by stačila interní Flash paměť v čipu procesoru, jsou na desce dvě další paměti, 16Kb FRAM a 32Mb DATAFLASH pro ukládání parametrů.

4.2.4 Hlídaní napájecího napětí

Pro hlídání přípustného napájecího napětí procesoru a ostatních součástek bude použit napěťový monitor, který v případě nepřijatelného napětí vygeneruje signál RESET. Tímto je splněn základní požadavek správného chodu procesoru i tím celé desky senzorů.

4.3 Lambda sonda

V úvahu připadala lehce dostupná a cenově přijatelná lambda sonda, která se při měření bude pohybovat v rozmezí 0 – 30 mV. Účelem použité lambda sondy není měřit koncentraci O₂ v celém rozsahu, ale jen v omezeném pásmu od 3% do 10% O₂. Při referenčním napětí 3,3V a 12 bitovém základním rozlišení vnitřního A/D převodníku (možnost rozlišení až 16 bit) by její byla citlivost 0,8mV/LSB. Měřilo by se tedy pouze v rozmezí dolních 6 bitů. Z toho důvodu signál z lambda sondy bude zesílen a to 100krát. Tím bude měřené napětí v rozmezí 0 – 3V. Z toho plyne, že A/D převodník bude převádět téměř v celém jeho rozsahu.

4.4 Termočlánek

Byl vybrán termočlánek typu „K“, který má závislost Seebeckova napětí na teplotě téměř konstantní. Toto napětí je přibližně 40uV/°C. Termočlánek má měřit teplotu spalin v komíně. Tato teplota nebude překračovat teplotu 300°C. Při této teplotě by měl termočlánek napětí okolo 12 mV. Proto bude napětí opět 100krát zesíleno.

Měření termočlánekem je zajímavé kvůli nutnosti vytvořit umělý srovnávací konec o známé teplotě. Další problém při měření termočlánekem je fakt, že na každém přechodu dvou různých

kovů se vytvoří další termočlánek, který působí s/proti měřenému termočlátku. Tyto napětí se musejí eliminovat pomocí vhodného HW, nebo znát teplotu přechodu a při výpočtu měřenou teplotu přepočítat. Jelikož na desce bude dostatečně výkonný procesor není potřeba ošetřovat srovnávací konec pomocí HW, ale stačí počítat s napětím vytvořeném na přechodových svorkách. Takto vzniklé termočláanky budou mít neznámý jeden kov, který bude ale u obou stejný. Za předpokladu stejné teploty obou svorek se vytvoří termočlánek složený z materiálu termočlánekového drátu. Jeho napětí ale nebudeme znát, ale může se dopočítat pokud by byla známá teplota přechodového konektoru. Z toho důvodu bude na desce v těsné blízkosti konektoru ještě jeden teploměr (LM35 výstupní napětí 10mV/°C). Ten určí teplotu přechodu. MCU na této informaci vypočítá napětí vytvořené na přechodu. Vypočtené napětí poté přičte k změřenému napětí na svorkách a doplní do polynomu, pomocí kterého se počítá teplota.

4.5 Fotosenzory

Třetím požadavkem na desku bylo měření přítomnosti plamene v topeništi. A to pomocí fotocitlivých prvků foto-rezistoru nebo foto-tranzistoru. Na desce budou obě varianty s tím že lepší se vybere a bude používat.

4.6 Modbus

Modbus je komunikační protokol na úrovni aplikační vrstvy ISO/OSI modelu, umožňující komunikaci typu klient-server mezi zařízeními na různých typech sítí a sběrnic. Je definován na více fyzických rozhraních, v zadání je požadováno rozhraní fyzické vrstvy RS-485.

4.6.1 Princip protokolu

Jedná se o Master/Slave protokol. V jeden okamžik může být na sběrnici pouze jeden master a 1 až 247 slave jednotek. Komunikaci vždy zahajuje master, slave nesmí nikdy vysílat data bez pověření mastera. Master posílá požadavky slave jednotkám ve dvou režimech:

- unicast režim – master adresuje požadavek jedné konkrétní slave jednotce a ta pošle odpověď.
- broadcast režim – master posílá požadavek všem jednotkám, žádná jednotka neodpoví.

V dokumentu [3] jsou popsány nejčastější chyby vyskytující se při implementaci protokolu.

4.6.2 Vysílací režimy

Modbus protokol definuje dva vysílací režimy. Modbus RTU a Modbus ASCII. Všechny jednotky musí podporovat režim Modbus RTU, režim Modbus ASCII je dobrovolný. Všechny jednotky na síti musí vysílat a přijímat v jednom formátu.

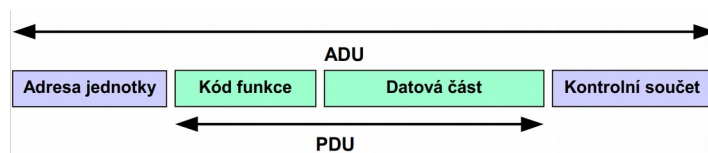
- Modbus RTU

Vysílací zprávy musí být souvislé, mezera mezi znaky může být max 1,5 doby znaku. Jeden znak na sériové lince má 11bitů (start, 8bit zprava, parita, stop). Parita nemusí být implementována, na místo ní musí být druhý stop bit. Konec zprávy se pozná podle uplynutí doby od posledního znaku (doba 3,5 znaku). Pro vyšší přenosové rychlosti jsou doby prodlevy omezeny minimálními hodnotami.

- Modbus ASCII

Odesílají se znaky čitelné pro člověka. Zpráva má trochu jiný tvar. Sekce jsou dvakrát tak velké, protože se čísla posílají jako znaky v ASCII. (Byte 0x5B se přenáší jako dva znaky 0x35{"5"} a 0x42{"B"}). Vhodné pro ověření komunikačního automatu, pro výslednou komunikaci nevhodné kvůli výraznému snížení přenosové kapacity kanálu.

4.6.3 Zpráva na Modbus



Ilustrace 5: Tvar zprávy definovaný protokolem Modbus pro sériovou linku

Adresa jednotky (1 Byte)

Adresy určuje uživatel, tak aby dvě zařízení neměli stejnou adresu. Adresa 0 znamená broadcast zprávu, 1-247 jsou použitelné adresy, 248-255 jsou rezervovány. Master NEMÁ adresu, je v celé síti jediný.

Kód funkce (1 Byte)

Protokol definuje některé funkce jako veřejné (addr: 1-64, 73-99, 111-127). Tyto funkce jsou veřejně přístupné a definované. Dále to jsou uživatelsky definované (addr: 65-72, 100-110). Tyto funkce si může výrobce zadefinovat jak se mu zlíbí. Poslední skupinou jsou uzavřené kódy, které používají některé firmy, tyto kódy nejsou dostupné veřejnosti.

				Function Codes			
				code	Sub code	(hex)	
Data Access	Bit access	Physical Discrete Inputs	Read Discrete Inputs	02		02	
		Internal Bits Or Physical coils	Read Coils		01		01
			Write Single Coil		05		05
	Write Multiple Coils			15		0F	
	16 bits access	Physical Input Registers	Read Input Register		04		04
			Read Holding Registers		03		03
		Internal Registers Or Physical Output Registers	Write Single Register		06		06
			Write Multiple Registers		16		10
			Read/Write Multiple Registers		23		17
			Mask Write Register		22		16
			Read FIFO queue		24		18
		File record access	Read File record		20		14
	Write File record			21		15	
	Diagnostics		Read Exception status		07		07
		Diagnostic		08	00-18,20	08	
		Get Com event counter		11		0B	
		Get Com Event Log		12		0C	
		Report Server ID		17		11	
Other		Read device Identification		43	14	2B	
		Encapsulated Interface Transport		43	13,14	2B	
		CANopen General Reference		43	13	2B	

Ilustrace 6: Veřejné funkce protokolu Modbus [4]

Datová část (0 - 252 Byte)

Obsah a velikost datové zprávy je definována pro každou funkci jinak viz dokument .

Kontrolní součet (2 Byte)

Kontrolní součet slouží jako kontrola nepoškození paketu během přenosu (detekce chyb). Generovan polynomem $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$. Podrobnější popis je v dokumentu [5] příloha B.

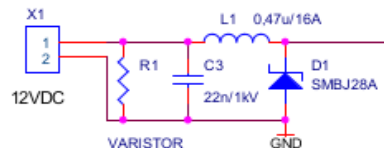
5 Realizace rozšiřující desky

5.1 Schéma

Schéma desky bylo vytvořeno v programu Orcad stejně jako návrh PCB. Dále jsou pouze výňatky ze schémat, které považuji za zajímavé. Celé schéma je v příloze.

5.1.1 Napájení

Za vstupními svorkami je přepětová ochrana realizována varistorem následuje LC filtr. Dále je ochrana proti přepólování.

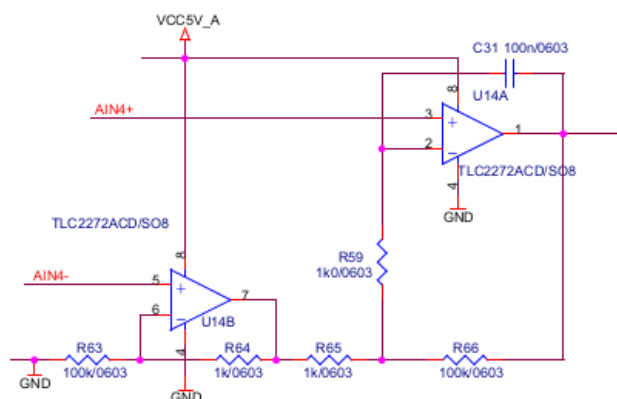


Ilustrace 7: Vstup napájení

Spínaný zdroj z 12V na 5V je navržen s parametry: výstupní proud 300mA, maximální zvlnění výstupního napájení 0,5V V_{pp} . Potřebné vzorce pro výpočty jsou v datasheetu, pro návrh byl použit kalkulátor na internetu (<http://www.nomad.ee/micros/mc34063a/>). Před spínaný zdroj byla přidána indukčnost, aby se zmenšily proudové špičky, které by se mohly šířit do napájecího zdroje. Pro zbylé napájecí zdroje je voleno doporučené zapojení od výrobců čipů.

5.1.2 Termočlánek

Pro zesílení signálu jsem použil přístrojový zesilovač se dvěma operačními zesilovači. Takto zapojený zesilovač má zesílení 100. Zbytek zapojení ve schématu vytváří trvalý offset, minimalizuje vstupní nesymetrii operačních zesilovačů a v případě rozpojení/upadnutí termočláneku se výstupní napětí dostane do kladné saturace. Tím se dají identifikovat stavy zkrat vstupu a rozpojení vstupu. Oba tyto případy jsou nežádoucí a je dobré o nich vědět. U termočláneku se ovšem zkrat rovná teplotě desky, a pokud měříme napětí nižší než offset znamená to, že měřená teplota je nižší než teplota v okolí přechodu termočláneku na desku.

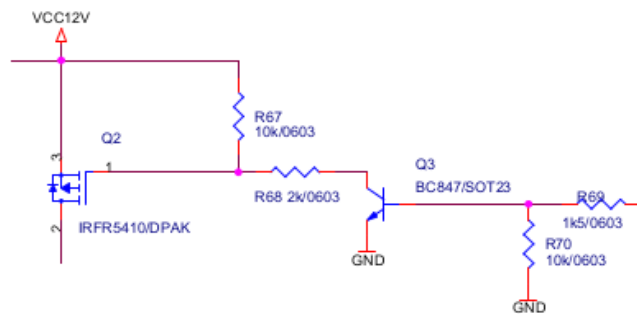


Ilustrace 8: Přístrojový zesilovač se dvěma operačními zesilovači.

Pro správný výpočet hodnoty teploty je potřeba měřit teplotu přechodu termočlánku do desky. Teploměr pro tento účel bude LM33. Jde o kalibrovaný teploměr udávající svým napětím teplotu v °C, který má lineární závislost výstupu na teplotě a to 10mV/°C. Maximální chyba v celém rozsahu je ±1°C . chyba v okolí 25°C je pouze ±0,5°C. V provozu se bude pohybovat v teplotách 20 – 50 °C, výstupní napětí tedy bude v rozmezí 0,2-0,5V.

5.1.3 Lambda sonda

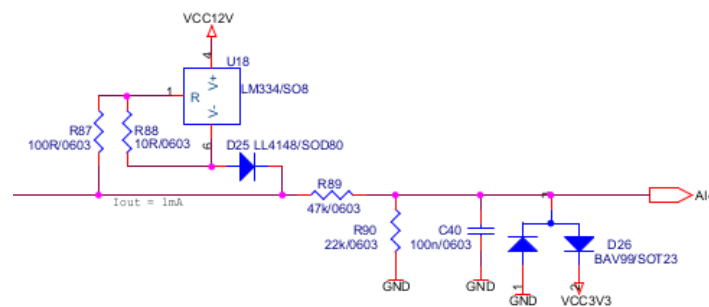
Pro zesílení signálu lambda sondy bylo použito stejné zapojení jako u termočlánku (přístrojový zesilovač se dvěma operačními zesilovači). Dále byla vytvořena možnost zapínat a vypínat vyhřívání lambda sondy. Proud tekoucí Lambda sondou je měřen hallovou sondou, která zvládne měřit +5A. Její výstup je 5V, MCU může měřit pouze do 3,3V, proto bude výstup z hallovy sond děleno odporovým děličem.



Ilustrace 9: Připínání vyhřívání lambda sondy

5.1.4 FotoX

Pro měření fotorezistoru je vytvořen proudový zdroj, který do odporu pouští 12mA. Výpočty pro toto zapojení jsou v datasheetu [6]. Tím z měření odporu dělám měření napětí. Toto napětí přivádím na A/D převodník procesoru. Takto zapojený zdroj proudu v sobě má i teplotní kompenzaci.



Ilustrace 10: Zapojení proudového zdroje pro měření odporu

Měření foto-tranzistoru je založeno na propouštění proudu v závislosti na osvětlení (chová se podobně jako fotodioda).

5.1.5 Digitální vstupy

Jsou definovány úrovně pro digitální signály takto LOW ~ 0-5V a HI ~ 11-30V, musí se vstupy na to připravit a to tak že se vstupní napětí sníží vhodným odporovým děličem. Pro bezpečnější oddělení jsou všechny vstupy a výstupy vyvedeny přes samostatné budící brány. V zapojení se využívá minimální výrobcem garantované napětí pro úroveň HI. To že součástka vydrží i vyšší napětí je díky omezovacímu odporu (v tomto případě R20), který zabrání spálení ochranné diody v součástce.



Ilustrace 11: Dělič vstupního napětí digitálního vstupu (DIO)

5.1.6 Digitální výstupy

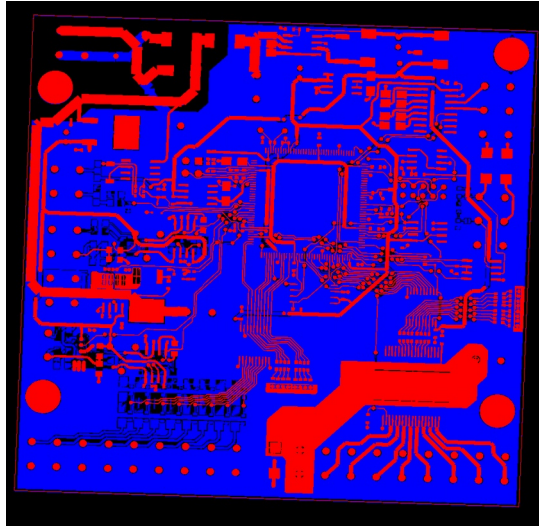
Stejně jako digitální vstupy i digitální výstupy nemůžou zůstat v CMOS úrovni ale musí být přizpůsobeny potřebám rozvaděče. Pro jednoduchou konverzi postačí dvě součástky a to 74HCT541, která převede CMOS na TTL, a VN808CM, která funguje jako tranzistorový prepínač. Výhodou této součástky je možnost připojení napájecího napětí 11-40V, tomto rozsahu je schopna spínat výstupy. Tato výhoda je na desce ponechána, proto je potřeba na konektor digitálních vstupů zapotřebí přivádět napětí, kterým definujeme úroveň HI. Digitální výstupy se při poklesu napájecího napětí převedou do úrovně LOW.

5.1.7 Logické a komunikační obvody

Zbylé obvody jsou zapojeny tak jak požadoval výrobce, proto je zde nejsou podrobně rozepsány. U každého integrovaného obvodu musí být v napájení blokovací keramický kondenzátor.

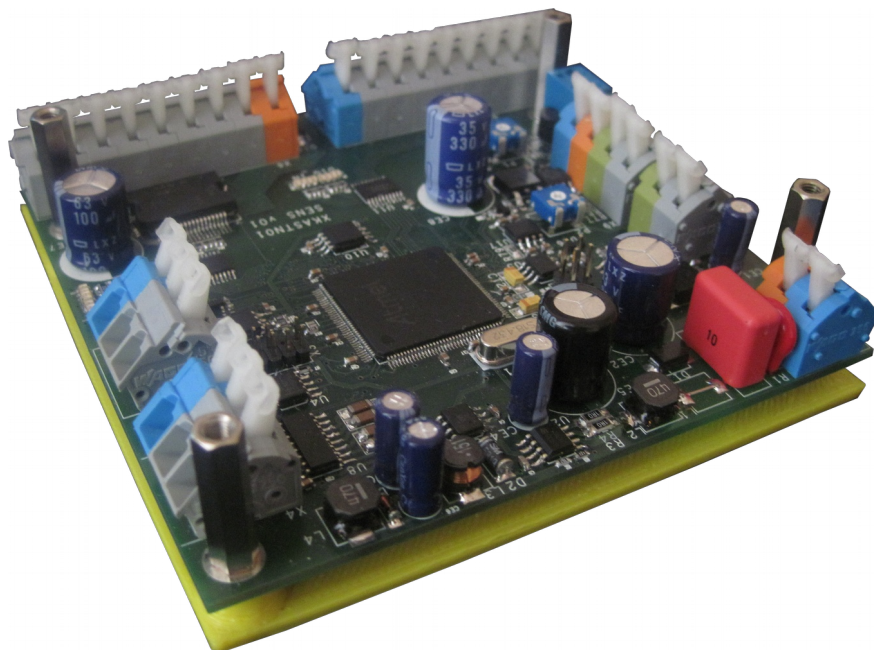
5.2 PCB

Před posláním desky do výroby proběhla vizuální kontrola na 3D Modelu. Vytvořeném programem Orcad. Poté byly vygenerované gerbrovské soubory nahrány na on-line gerber wiewer (<http://www.gerber-viewer.com/>), pro ověření správnosti sesazení. Po zkontrolování byla data poslána k výrobě PCB do firmy PragoBoard.



Ilustrace 12: Ukázka 3D modelu desky

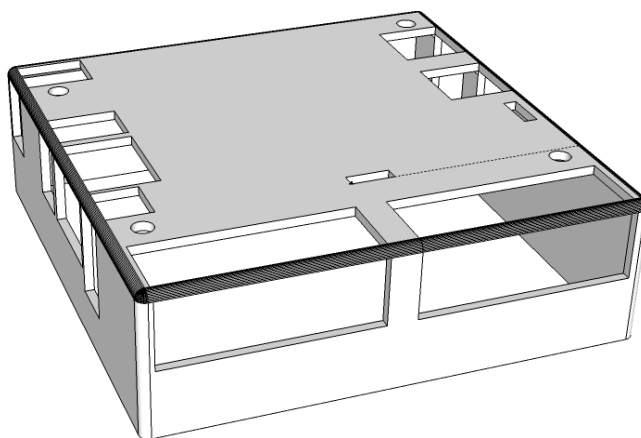
Deska byla vytvářena jako prototyp. Z tohoto důvodu není montáž jednostranná, ale na spodní straně desky jsou odpory určené pro nastavování zesílení operační zesilovačů a součástky, u kterých při návrhu nebyly přesně stanoveny hodnoty. Přístup k těmto součástkám je na osazené desce lepší a umožňuje jejich dodatečnou snadnou výměnu. Desku jsem osadil vlastnoručně za pomoci pájky a horkovzdušné stanice.



Ilustrace 13: Fotka osázené desky

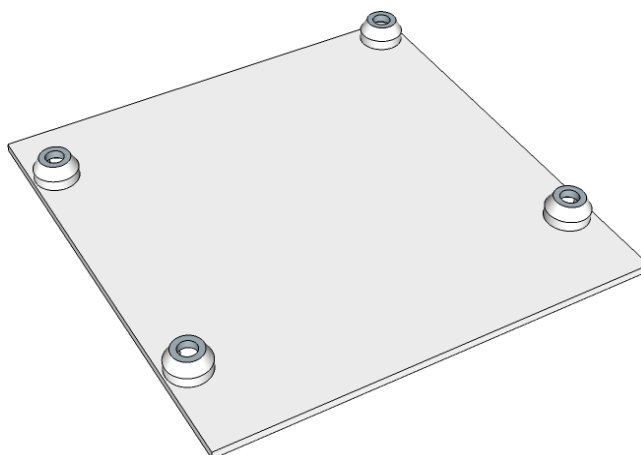
5.3 Krytí desky

Pro desku bylo navrženo mechanické krytí. Byl vytvořen model krytu v programu Trimble SketchUp. Od počátku bylo počítáno s tiskem na 3D tiskárně, proto jsou v návrhu vidět i konstrukční prvky. Nezbytné pro kvalitní vytištění.



Ilustrace 14: Model vrchního krytu desky

Takovýto kryt chrání proti nechtěnému dotyku IP20 a dále proti rozladění potenciometrů tím, že k nim je zabráněn přístup. Pro zlepšení vzhledu je možné použít nějakou dodatečnou povrchovou úpravu. Při sériové výrobě by bylo možné takovýto kryt vyrobit z kovu, aby byl mechanicky odolnější. Zároveň by se tím vytvořilo krytí proti prostorovému elektromagnetickému rušení (vysílání i příjem). Z toho plyne zvýšení EMC.



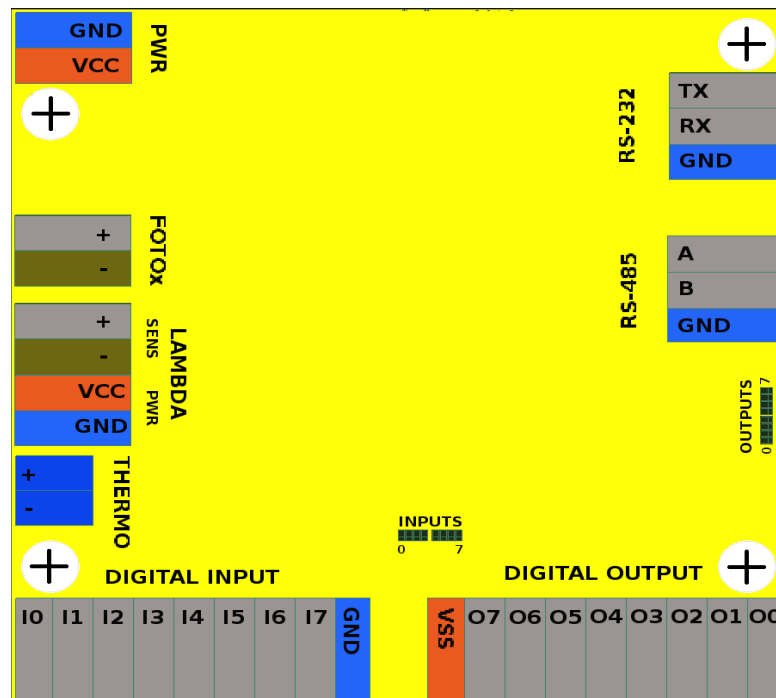
Ilustrace 15: Model spodního krytu desky

Krabičku jsem po návrhu poslal vedoucímu diplomové práce a ten ji na své 3D tiskárně vytiskl.



Ilustrace 16: Ukázka desky zavřené v krabičce.

Krabička a svorkovnice by ve výsledku mohly být potištěny tak jak ukazuje ilustrace níže.



Ilustrace 17: Rozkreslení svorkovnic na modelu desky v krabičce

6 Ověření funkčnosti desky

Po osazení desky bylo potřeba desku oživit a vyzkoušet její funkčnost. V první fázi ožívování se muselo zkontrolovat napájecí napětí. Napájecí zdroje byly v tomto zapojení vyzkoušené, proto jejich ožívování mohlo proběhnout rychlejším způsobem, připojením rovnou na vstupní napětí, při zapnutí proudové ochrany zdroje nastavené na malý proud (100mA). Poté se ověřila funkčnost jednotlivých funkčních bloků na desce a nastavily se konstanty pro výpočty v programu desky.

6.1 Ověření funkčnosti zařízení na desce v01

Při ožívování napájecího napětí byl zjištěn problém s úrovní napětí 3V3, které bylo 3V5. Závada spočívala v přímém spojení MCU s MAX485 o různých logických úrovních signálů. Po úspěšném oživení napájecích částí se začalo s ověřováním jednotlivých periférií.

6.1.1 Sériová komunikace (RS-232 a RS 485)

V obou případech se jedná se o často používané sériové komunikace. Jsou dvě cesty ověření komunikačních obvodů. První je v případě, že neexistuje protikus, se kterým by se mohlo komunikovat. V tom případě protikus vytváří počítač PC. Z počítače se přes COM odešle jeden znak a procesor ho musí správně přečíst. Poté ho poslat invertovaný zašle zpět. Druhou možností je připojit komunikaci k ověřenému zařízení, se kterým má deska komunikovat. Pokud tato komunikace probíhá, je zařízení v pořádku.

RS-232

Využita druhá možnost, kde se komunikovalo s programem pro nastavování parametrů. Výsledkem bylo odhalení chyby v návrhu, kde se zaměnily datové signály Tx a Rx mezi MAX3232 a MCU. Problém byl vyřešen překřížením vodičů.

RS-485

Využita první možnost, protože v době testování desky nebyl ještě implementován protokol Modbus. Problém s napěťovými úrovněmi signálů byl objeven již při ožívování zdrojů. Čip MAX485 pracuje v 5V logice, a proto se na nožičce RO (Read Out) snaží vytvořit napětí blízké se 5V. To napětí však nejde z důvodů ochranných diod v pouzdře MCU dosáhnout. Přes tento pin se ovlivňovalo napájecí napětí 3V3 a dorůstalo hodnoty 3V5. Odstranění závady spočívalo přidáním odporového děliče do větve Rx. Díky TTL úrovním čipu MAX485 se nemusí upravovat signál Tx.

6.1.2 Digitální vstupy a výstupy

Digitální výstupy

Všechny výstupní signály jednotky byly postupně zapínány a měřeny na konektorech.

Digitální vstupy

Na všechny digitální vstupy na konektoru bylo postupně připojeno napájecí napětí 12V a zkontrolováno zda je procesor dokáže detekovat.

6.1.3 Přístrojové zesilovače s dvěma operačními zesilovači

Při měření termočlánku i lambda sondy jde o snímání napětí v rozsahu 0-30mV. Prvním krokem je zkratování konektoru, Nyní se může nastavit offset zesilovače a to pomocí příslušného potenciometru. Offset se měří na výstupu zesilovače a pokud se nezmění kalibrační konstanta v programu, měl by být nastaven na 200mV. Dalším krokem je rozpojení konektoru. Výstupní zesilovač nyní bude v kladné saturaci. Tím jsou ověřeny dva chybové stavy zapojení. Ještě bylo potřeba změřit zesílení. Měření se provádělo tak, že se na konektor přivedlo známé napětí a změřilo se výstupní napětí zesilovače.

Termočlánek

Ověření analogového vstupu a nastavení offsetu zesilovače.

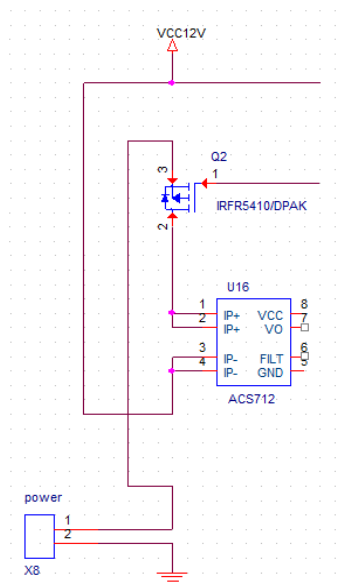
Snímací část Lambda sondy

Ověření analogového vstupu a nastavení offsetu zesilovače.

6.1.4 Vyhřívací část lambda sondy

Zde bylo třeba ověřit schopnost spínat a rozpínat MOSFET tranzistor a ověřit měření proudu pomocí hallovy sondy. Tranzistor se spíná pomocí signálu MCU. Pokud je signál LAMBDA_POWER v logické úrovni HI bude MOSFET otevřen a na konektoru se objeví 12V. Po připojení známého odporu do konektoru a zapnutí vyhřívání poteče přes tento odpor proud odpovídající hodnotě $I=R/12$. Tento proud by měla hallova sonda měřit.

V návrhu se spatně přiřadily čísla pinů k jednotlivým signálům na součástce MOSFET. K odstranění chyby bylo zapotřebí odstranit snímací odpor, proud tekoucí hallovou sondou se otočil a výsledné schéma bylo upraveno:



Ilustrace 18: Schéma opravy spínače vyhřívání lambda sondy

6.1.5 Fotocitlivé členy

U foto-odporu bylo ověření provedeno připojením známého odporu do svorek a kontroly měřené hodnoty pomocí MCU. Pokud hodnota neodpovídala, bylo třeba změřit reálný proud, který teče do měřeného odporu. **Při měření bylo nutno dát pozor na zkrat mezi odpory R89 a R88. Vyzkratováním se na vstup procesoru dostalo 12V a procesor bylo nutné vyměnit.** Změřený proud se zapsal do parametru pro výpočet hodnoty odporu.

U foto-tranzistoru byla ověřena funkčnost zapojení pomocí reálného foto-tranzistoru. Pro větší citlivost byl odpor, na kterém se měří napětí zvětšen na 36kOhm. Funkčnost se ověřovala zakrytím foto-tranzistoru. Po zakrytí by foto-tranzistor neměl propouštět proud.

6.2 Ověření funkčnosti zařízení na desce v02

V průběhu testů rozšiřující desky na reálném kotli, byla první prototypová deska mojí neopatrností zničena. Jelikož nebyla práce ještě v takové fázi, v jaké by přede mnou mohla obstat, byla vyrobena druhá deska. Chyby, odhalené při oživování první verze desky, byly ve schématech opraveny a změny byly promítnuty i na nový PCB. Tato deska byla vyrobena jako verze 02. Při oživování a následném zkoušení se žádné chyby již neobjevily.

6.3 Ověření měření teploty

Měření teploty probíhá tak, že z A/D převodníku se načte hodnota odpovídající napětí za zesilovačem a napětí teploměru (LM35).

$$U_x = \frac{AD * 3,3}{65535} \quad (12)$$

Kde	U_x	Vypočtené napětí na A/D převodníku [V]
	AD	Hodnota A/D převodníku
	3,3	Referenční napětí A/D převodníku [V]
	65535	Počet digitů na které je hodnota převedena.

Teplota přechodu se vypočítá z napětí teploměru pomocí rovnice:

$$T = U_c * 0,01 \quad (13)$$

Kde	T	Vypočítaná teplota přechodu [°C].
	U_c	Napětí vytvořené teploměrem LM35 [V]
	0,01	Převodní konstanta teploměru (10mV/°C)

Nyní je zapotřebí vypočítat napětí, které se vytváří na přechodu termočlánekového drátu na desku. Využije se zde druhého pravidla spojování termočláneků (viz ilustrace 2). Jelikož teplota přechodu se bude pohybovat v rozmezí teplot 15-35°C využijeme pro zjištění vytvořeného napětí seebeckova koeficientu pro daný termočlánek.

$$U_j = T * \alpha \quad (14)$$

Kde	U_j	Napětí vzniklé na přechodovém konektoru [V]
	T	Vypočítaná teplota přechodu [°C].
	α	Seebeckův koeficient (termočlánek typu K v okolí 25°C ~40μV/°C)

Když je vypočítané napětí na přechodovém konektoru, vypočte se napětí na měřícím konci termočlánekového drátu.

$$U = \frac{U_x - A_{offset}}{A_{gain}} + U_j \quad (15)$$

Kde U Napětí měřícího termočlátku [V]
 U_x Napětí změřené za zesilovačem [V]
 U_j Napětí vzniklé na přechodovém konektoru [V]
 A_{offset} Nastavený offset zesilovače (0,2V)
 A_{gain} Nastavené zesílení přístrojového zesilovače (100)

Posledním krokem je vypočítané napětí měřícího termočlátku doplnit do rovnice, která ho převede na teplotu.

$$T_C = U^8 * a_8 + U^7 * a_7 + U^6 * a_6 + U^5 * a_5 + U^4 * a_4 + U^3 * a_3 + U^2 * a_2 + U * a_1 + a_0 \quad (16)$$

nebo upravené pro implementaci v MCU

$$T_C = (((((((((a_8 * U) + a_7) * U + a_6) * U + a_5) * U + a_4) * U + a_3) * U + a_2) * U + a_1) * U + a_0) \quad (17)$$

Kde T_C Teplota měřícího termočlátku [°C]
 U Napětí měřícího termočlátku [V]
 a_x Koeficienty polynomu pro daný termočlánek (jsou zadány normou)

Koeficient	Hodnota
a0	2,26585E-01
a1	2,41521E+04
a2	6,72334E+04
a3	2,21034E+06
a4	-8,60964E+08
a5	4,83506E+10
a6	-1,18452E+12
a7	1,38690E+13
a8	-6,33708E+13

Tabulka 3: Hodnoty použitých koeficientů při výpočtu teploty z napětí

6.3.1 Kalibrace termočlánu

Pro zjištění chyby měření byly provedeny dvě měření. První měření bylo za použití kalibrátoru termočlánu **Ametek Jofra ETC-125A**. Měřící termočlánek byl přímo vložen do teplotní lázně přístroje. Bylo nastaveno pět teplot a těchto pět teplot bylo poté změřeno pomocí termočlánu připojeného k desce. Přesnost kalibrátoru je $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Teplota okolí při se při obou měřeních pohybovala okolo 20°C . Hodnota analogového filtru nastavena na 0,7.

Jofra ETC-125A	$^{\circ}\text{C}$	0	25	50	75	100
Termočlánek	$^{\circ}\text{C}$	1,3	25	49,9	74,8	99,9

Tabulka 4: Naměřené teploty pomocí termočlánu v kalibrátoru termočlánu

Druhé měření bylo založeno na ohřívání hliníkového bloku, do kterého byly vyvrtány tři otvory pro vložení teplotní sondy. Při tomto měření byl jako referenční přístroj použit teploměr GMH 3710 se sondou s PT100. Výrobce udává chybu teploty $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Měření probíhalo tak, že se na tepelné plotně nastavila teplota. Vyčkalo se deset minut na ustálení teploty hliníkového bloku a odečetla se teplota z teploměru GMH 3710. Ze sensorové desky se vyčítalo napětí za zesilovačem, napětí teploměru umístěného v těsné blízkosti přechodového konektoru a teplota vypočítaná MCU jako ověření výpočtů.

Referenční teplota	AD konektor	AD teploměr	Napětí konektor	Teplota konektoru	Výpočtená Teplota termočlánu	Rozdíl referenční a měřené teploty
$^{\circ}\text{C}$			mV	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
44,88	5440	5232	0,739	26,3	44,4	-0,48
100,2	10208	4880	3,140	24,6	100,1	-0,1
139,83	13504	4672	4,800	23,5	140,1	0,27
206,4	18640	4704	7,386	23,7	206,2	-0,2

Tabulka 5: Porovnání teplot měřených rozšiřující deskou s referenčním měřidlem GMH 3710

V prvním měření při teplotě výrazně nižší než byla teplota okolí byla naměřená chyba $+ 1,3^{\circ}\text{C}$. Při zbylých teplotách v obou měření nebyla překročena přesnost měření referenčních přístrojů. Závěr provedených měření je, že tento termočlánek není potřeba nijak dál kalibrovat a jeho přesnost je dostačující.

6.4 Ověření měření lambda sondy

6.4.1 Zkouška při ožívání

Pro ověření funkčnosti lambda sondy byl vytvořen jednoduchý ověřovací přípravek který se skládal ze vzduchotěsné nádoby do které byla lambda sonda namontována. Do nádoby se vložila hořící svíčka a nádoba se uzavřela. Hořením svíčky se kyslík v nádobě přeměnil na oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Lambda sonda v tuto chvíli měřila směs plynů téměř bez přítomnosti O_2 , napětí bylo naměřeno vyšší než 30mV, Toto napětí již deska snímačů nebyla schopna měřit.

6.4.2 Kalibrace

Pro zjednodušení provozu kotle se kalibrace lambda sondy neprovádí. Pro vlastní regulaci hoření kotle si řídicí jednotka, pouze na žádost certifikované osoby, zapamatuje hodnotu snímače, odpovídající požadované hodnotě lambda. Tuto hodnotu lambda získá certifikovaná osoba nezávislým měřením spalin v odběrném místě. Tato zapamatovaná hodnota snímače se použije jako požadovaná hodnota pro regulátor odtahu kotle.

6.5 *Ověření funkčnosti desky na reálném zařízení*

Prvotní funkčnost jednotlivých zařízení se testovala na kotli aniž by rozšiřující deska byla zapojena do řízení kotle. Byly nainstalovány snímače lambda a termočlánu. Oba senzory byly osazeny před odtahový ventilátor. Hodnoty měřené deskou senzorů byly srovnávány se současně měřenými hodnotami přístroje Multilyzer NG. Teplota odpovídala $\pm 10^{\circ}\text{C}$ při teplotách vyšších než 150°C . V průběhu testování bylo spalování v režimu přebytku kyslíku s koncentrací pohybující se v rozmezí 7 – 18% O₂, odpovídající napětí na sondě bylo v rozmezí 0 – 10mV. Kvalita spalování se řídila ručně pomocí přívodních škrticů primárního a sekundárního vzduchu.

Při ověřování funkčnosti senzoru plamene byly odhaleny nedostatky v podobě nízkého horního limitu snímání. Úprava senzorové části proběhla tak aby bylo možné snímat odpor fotorezistoru do 100k Ω .

Foto-tranzistor v tomto zapojení nebyl dostatečně citlivý. Senzor plamene byl umístěn v 10cm dlouhé trubce směřované vodorovně ve výšce cca 15cm nad roštem. Tím byla výrazně snížena intenzita světla dopadajícího na senzor.

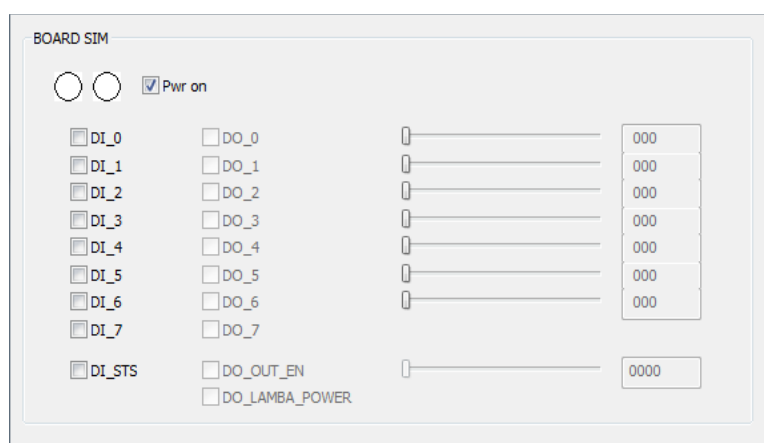
7 Programové vybavení

7.1 Bootloader

Jedná se o zaváděcí program, který se nahraje do flash paměti procesoru. Po zapnutí napájení inicializuje obvody pro řízení krystalu, paměti a zkontroluje přítomnost aplikačního programového vybavení. Pokud se aplikace najde, bootloader se ukončí a předá řízení na začátek aplikace. Pokud se aplikaci nenajde nebo je spojena propojka JP4.1-2, zůstává bootloader aktivní a inicializuje sériovou komunikační linku RS-232. Po této komunikační lince je možné připojit počítač PC s programem DebugMonitor. Pomocí této firemní aplikace se může zapisovat a číst z paměti, nahrávat aplikační programy a pokud to daná aplikace podporuje, je možné provádět i její ladění za chodu. Bootloader je napsán tak, aby se pro různé desky a čipy měnily pouze jejich ovladače. Proto je v elektronických přílohách pouze jeho .hex soubor (boot_sens.hex). Tento kód se zavádí do procesoru pomocí rozhraní JTAG.

7.2 Simulátor

Pro rychlý vývoj aplikace a její ladění bez nutné přítomnosti HW je vhodné vytvořit na počítači PC programový simulátor výsledné aplikace. Na tomto simulátoru lze vytvořit a prověřit všechny algoritmy aplikace, včetně simulací analogových a digitálních vstupů a výstupů.



Ilustrace 19: Ukázka simulátoru rozšiřující desky

Simulátor je schopen plně zastat funkce rozšiřující desky. Včetně komunikace nad virtuální nebo fyzickou komunikací s protokolem Modbus. Vytvoření takového simulátoru zabere množství času, ale při ladění jednotlivých knihoven a i celé aplikace je velmi mocným nástrojem. Výrazně zkrátí dobu, která byla potřeba pro vytvoření a ověření programu.

Pro ladění a nastavení programu v podobě simulátoru nebo na fyzické jednotce je výtáním pomocníkem firemní program ParamTreeView. S jeho pomocí je možné číst a nastavovat všechny dostupné parametry aplikace.

V elektronických přílohách je spustitelný simulátor komunikující pomocí virtuálního kanálu s programem ParamTreeView a s Modbus komunikací přes COM7. Použitý převodník na fyzické rozhraní byl použit převodník USB-458-v2 s malou úpravou. Úprava spočívá v zakázání příjmu v době vysílání zprávy. Při komunikaci s reálným zařízením nebyly vždy dodrženy doby pro odpověď, nicméně vždy se komunikace opět obnovila.

7.3 Implementace Modbus

Knihovna Modbus komunikace podporuje jen potřebné telegramy, je implementována komunikace pomocí holding registrů. Komunikace má pevnou komunikační rychlost 38400 baud/sec, lichou paritu, a jeden stop bit. Pomocí parametrů lze změnit adresu desky senzorů v rozmezí 1 až 255, standardně je nastavena adresa 2.

7.3.1 Holding registr

Je to místo v paměti, které je určeno k libovolnému využití. Význam registrů vytváří až programové vybavení. Program desky podporuje čtení a zápis do holding registrů a to pomocí funkcí Read holding registr (0x03), Write single registr (0x06) a Write multiple registers (0x10). Do registrů označených jako „W“ lze zapisovat.

Adresa registru	R/W	Jméno	Popis
0	R	DI 0-15	Digitální Vstupy
1	R/W	DO 0-15	Digitální výstupy
2	R/W	ComCommand	Příkazy desce
3	R	TempCouple	Teplota termočlánku
4	R	TempJunction	Teplota přechodového konektoru
5	R	LambdaCurrent	Proud tekoucí vyhříváním lambda
6	R	LambdaVolt	Napětí lambda sondy
7	R	PhotoRes	Odpor foto-rezistoru
8	R	PhotoTransVolt	Napětí foto-tranzistoru
9	R	STATUS	Status desky

Tabulka 6: Identifikátory holding registrů

DI 0-15 (holding registr 0x00)

Registr pouze pro čtení. Poskytuje hodnoty digitálních vstupů DI0-7 (vstupy na konektoru) a 8 bit je využit pro získání STATUSu výkonového členu digitálních výstupů.

DO 0-15 (holding registr 0x01)

Registr pro čtení a zápis. Poskytuje nebo nastavuje hodnoty digitálních výstupů DO0-7 (výstupy na konektoru), 8 bit zakazuje hodnotou log.1 budiče výstupních signálů, 9 bit zapíná hodnotou log.1 vyhřívání lambda sondy.

ComCommand (holding registr 0x02)

BIT	0	1	2	3	4	5	6	7
Význam	GLOW	BLOW	Lam Power	X	X	X	X	X

Tabulka 7: Popis jednotlivých bitů holding registru ComCommand

Registr pro čtení a zápis. Zápisem příkazů je požadována daná činnost desky Čtením se získá poslední požadované příkazy.

GLOW

Příkaz pro zapnutí žhavicí patrony. Před sepnutím je definovaná doba pro start ventilátoru a po vypnutí je definována doba, po kterou je ještě ventilátor v chodu, aby se žhavicí patrona nespálila. Zároveň probíhá kontrola chodu ventilátoru

BLOW

Příkaz pro zapnutí žhavicího ventilátoru. Není nutné při žhavení patrony.

Lam Power

Příkaz pro zapnutí vyhřívání lambda sondy.

TempCouple (holding registr 0x03)

Registr pro čtení. Poskytne teplotu termočládku ve [°C] jako celé číslo ve formátu $x = \text{floor}(\text{temp} [^{\circ}\text{C}] * 10)$

TempJunction (holding registr 0x04)

Registr pro čtení. Poskytne teplotu konektoru ve [°C] jako celé číslo ve formátu $x = \text{floor}(\text{temp} [^{\circ}\text{C}] * 10)$

LambdaCurrent (holding registr 0x05)

Registr pro čtení. Poskytne proud tekoucí vyhříváním lambda sondy v [A] ve formátu $x = \text{floor}(\text{current} [\text{A}] * 100)$

LambdaVolt(holding registr 0x06)

Registr pro čtení. Poskytne napětí lambda sondy v [mV] ve formátu $x = \text{floor}(\text{volt} [\text{mV}] * 10)$

PhotoRes (holding registr 0x07)

Registr pro čtení. Poskytne odpor foto-rezistoru v [kΩ] ve formátu $x = \text{floor}(\text{resist} [\text{k}\Omega] * 10)$

PhotoTransVolt (holding registr 0x08)

Registr pro čtení. Poskytne napětí vytvořené na snímacím odporu foto-tranzistoru ve [V] ve formátu $x = \text{floor}(\text{volt [V]} * 10)$

STATUS (holding registr 0x09)

Registr pro čtení. Podává status desky

BIT	0	1	2	3	4	5	6	7
Význam	FLAME	HEAT_EN	nFIRE	PressureOK	X	X	X	X

Tabulka 8: Popis jednotlivých bitů holding registru STATUS

Flame

Příznak detekovaného plamene v topeništi

HEAT_EN

Příznak bezchybného žhavení

nFIRE

Příznak zahoření přívodu paliva. palivo nehoří log.1;

PressOK

Příznak minimálního tlaku vody v kotli. tlak vody je vyšší než minimální log.1

8 Zapojení desky do systému kotle

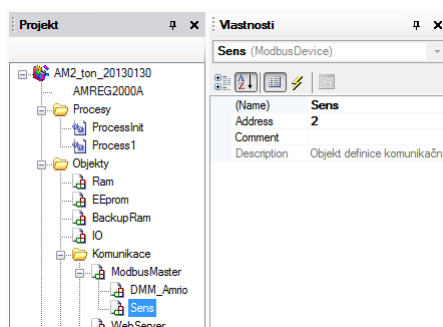
Připojení rozšiřující desky do stávajícího systému přineslo několik změn v jeho zapojení. Především odstranění zdvojených 12V zdrojů. Významná změna je také v identifikaci chyb kotle. V původním zapojení nelze rozlišit o jakou chybu se jedná, protože všechny poruchové snímače jsou zapojeny v sérii. Po přidání rozšiřující desky se snímače mohou zapojit do vlastního digitálního vstupu. Umožní se tím reagovat individuálně na každou poruchu. Na rozšiřující desce nebude osazen terminátorový odpor u RS485. Oba zakončovací odpory jsou zapojeny v již původních zařízeních (řídící terminál a vstupně výstupní deska). Nové schéma zapojení je v příloze [Schéma zapojení kotle](#)

9 Úprava řídicího software kotle

Řídicí program kotle je napsán ve vývojovém prostředí firmy AMIT. Programování je objektové. Celý program je napsán v jediném opakujícím se cyklu s periodou 1 sec. Řízení je založeno na jednoduchém stavovém automatu.

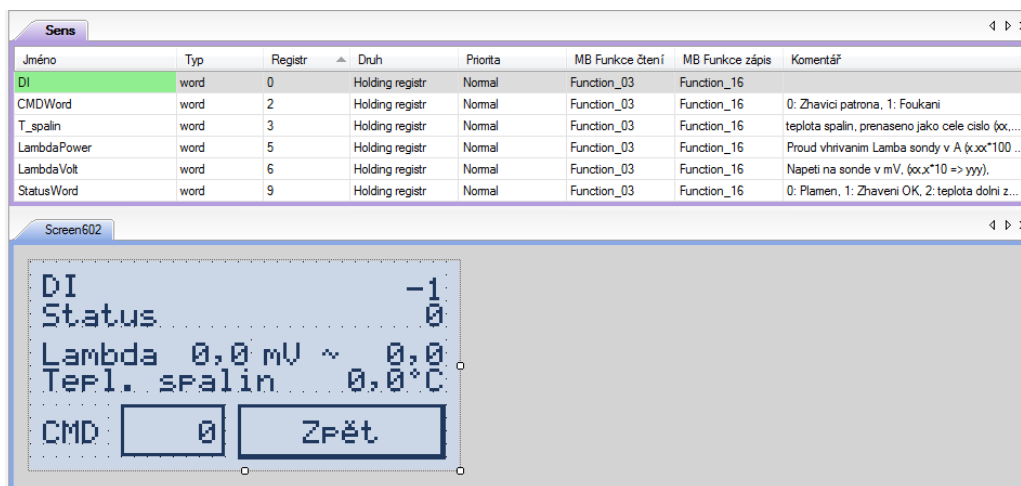
9.1 Vytvoření komunikace mezi rozšiřující deskou a stávajícím řízením kotle

Jak již bylo zmíněno, stávající systém komunikuje s deskou senzorů přes rozhraní RS-485 pomocí protokolu Modbus. Parametry komunikace jsou: Baudrate 38400, 8 bit Data, lichá parita, jeden stop bit. V tomto systému Modbus je mastrem regulační terminál Amreg. Jeho program musí být upraven tak aby vysílal požadavky s adresou desky senzorů. Tato úprava se provede tak, že se do objektu komunikace vloží obecný prvek, nastaví se jeho jméno a adresa.



Ilustrace 20: Vložený objekt v komunikaci

Dalším krokem je určení jaké parametry se budou komunikovat. Pro vizualizaci důležitých parametrů byla vytvořena obrazovka do servisního menu.



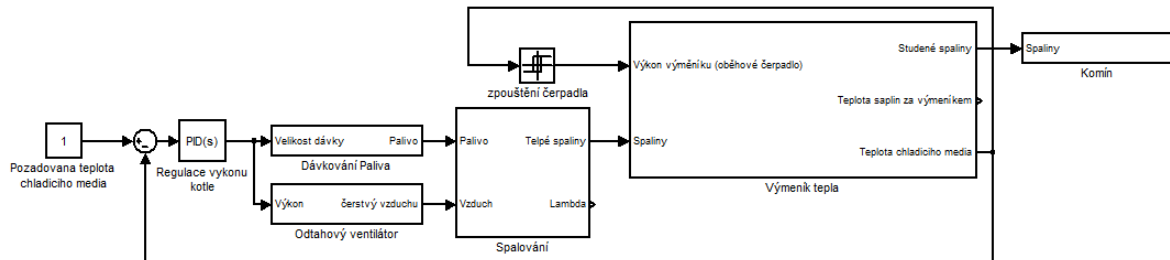
Ilustrace 21: Definice parametrů s kterými se bude komunikovat s návrhem servisního okna

```
Ram.SensHoriPrivodPaliva = Sens.StatusWord & 0x4;  
Ram.SensLambda_mV = Sens.LambdaVolt / 10;  
Ram.SensTemp = Sens.T_spalin / 10;
```

Ilustrace 22: Ukázka kódu žádajícího o aktuální data z komunikace

9.2 Úprava řízení kotle

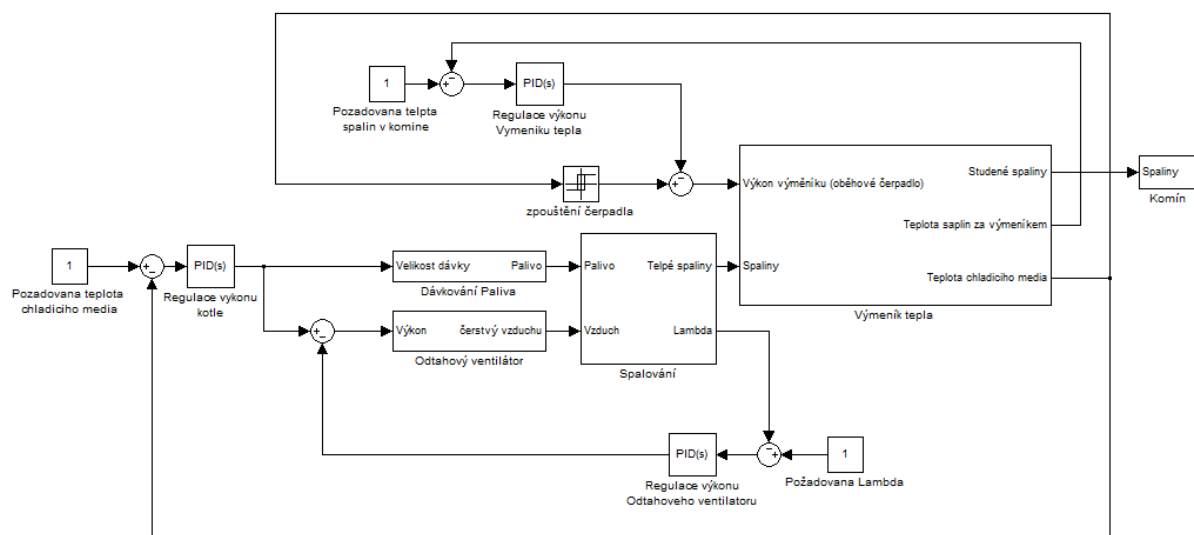
Kotel se řídí výkonově až ve fázi kdy je roztopen. Regulační schéma je vyobrazeno níž. Takto řízený kotel může spalovat velmi kvalitně, ale kvalita spalování závisí na kvalitě paliva, na nastavení dávkování paliva a otáček odtahového ventilátoru v závislosti na požadovanému výkonu kotle, ručně se nastavují škrtky poměru primárního a sekundárního vzduchu.



Ilustrace 23: Regulační schéma kotle před úpravou

Dávkování paliva sestává z pevně stanovené doby, po kterou se podává palivo, z doby po kterou se čeká. Od požadovaného výkonu kotle je odvozena doba čekání a výkon odtahového ventilátoru. Ventilátor může pracovat v rozsahu od 40% do 100% výkonu. Nelinearitu v regulačním systému tvoří spalování, které je závislé na množství paliva, teplotě hoření a přísunu kyslíku. Zkušenost mého konzultanta práce je ovšem taková, že tato nelinearita se dá potlačit způsobem přikládání. Čím větší dávka paliva a poté doba prodlevy tím bude tato nelinearita větší. Proto by se mělo přikládat často a málo.

Z pohledu zkvalitnění spalování je nejjednodušší měřit lambda sondou zbytkový kyslík ve spalinách a v omezené míře ovlivňovat výkon odtahového ventilátoru. Druhou přidanou regulační smyčkou je ovládání výkonu výměníku tepla. Tato regulační smyčka by měla udržovat v komíně teplotu spalin pod nastaveným maximem. Tím se zvýší účinnost kotle, protože budou minimalizovány ztráty tepla nazývané jako ztráty citelným teplem spalin.



Ilustrace 24: Regulační schéma po přidání regulace kvality spalování

Přidané regulátory se nebudou podílet na požadovaném výkonu v plném rozsahu, ale jen v omezeném pásmu. K tomuto řešení jsou dva důvody. Prvním důvodem je možné poškození senzorů a i v tomto případě musí zůstat kotel schopný provozu. Druhým důvodem je možnost rychlých akčních zásahů regulátorů.

Ovládání výkonu odtahového ventilátoru bude i nadále řízeno dle nastaveného výkonového předpisu, doplněný regulátor bude mít možnost ovládat otáčky v rozmezí okolo $\pm 10\%$ a bude eliminovat vliv vlhkosti a kvality dodávaného paliva.

Ovládání výkonu ventilátoru výměníku bude i nadále řízeno dle nastaveného minimálního výkonu, regulátor výměníku bude mít možnost zasahovat v rozmezí okolo $+30\%$ a bude eliminovat maximální teplotu výstupních spalin.

Rozšíření detekce chyb vytvořila možnosti adekvátní reakce na vzniklé poruchy.

Při výskytu chyby ztráty tlaku oběhové vody se reaguje vysypáním paliva na roštu a snížením otáček odtahového ventilátoru. Po určité době následuje vypnutí kotle. To odpovídá nejrychlejšímu odstavení kotle. Po této chybě musí přijít obsluha, která potvrdí chybu a pokud ji odstranila může kotel znovu spustit.

Při chybě přehřátí kotle (95°C) se přestane přikládat palivo a začne se snižovat teplota. Klesne-li teplota na úroveň (85°C) je možné pokračovat v topení.

Třetí rozpoznávanou chybou je oheň v podavači paliva. Na tuto chybu se reaguje vysypáním celého podavače paliva. Po vyprázdnění se přívod začne pomalu zaplňovat. Toto je pouze doplňkové opatření proti zahoření zásobníku. Hlavní zabezpečení jsou stanovena normou [2] příloha B.

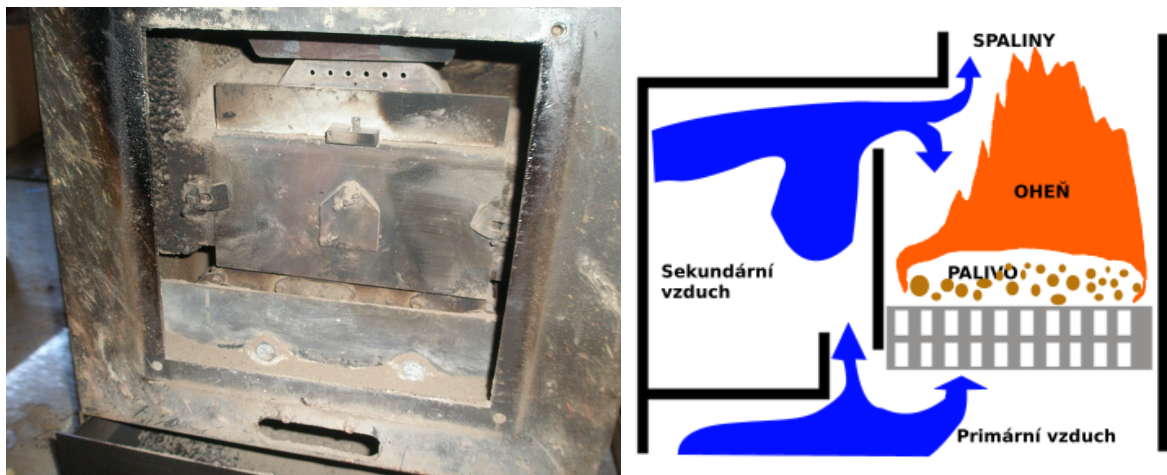
10 Testy prováděné na kotlích

10.1 Kotel A pro ústřední vytápění

První předložený kotel byl určen pro ústřední vytápění. Na tomto kotli byla vyzkoušena a ověřena funkčnost desky senzorů. Prvním testem provedeným na kotli byla zkouška těsnosti kotle. Tato zkouška se provádí aby se zjistilo, mají-li klapky na přívodu vzduchu dominantní vliv na kvalitu (výkon) spalování. Pokud by tomu tak nebylo řízení spalování pomocí odtahového ventilátoru by postrádalo smysl. Na tomto kotli po zavření přívodů vzduchu plamen výrazně pokles. To znamená že bylo možné přistoupit k testování implementovaných řídicích algoritmů. V průběhu testů se ukázala konstrukční vada topeniště. Primární vzduch se vyhýbal průchodu skrz topeniště a připojil se jako sekundární vzduch. Tato vada se projevovala tak, že při zavřeném přívodu sekundárního vzduchu a různých otáčkách odtahového ventilátoru nebylo možné na lambda sondě pozorovat odpovídající změny ve zbytkovém množství kyslíku.

Při hledání příčiny tohoto chování byla objevena chyba v okolí topeniště. Přívod primárního vzduchu měl možnost neprocházet skrz rošt a palivo. Místo toho mohl celé ohniště obejít, zahřát se a reagovat až se spalinami jako sekundární vzduch. Množství vzduchu procházející topeništěm záleželo na množství žhavého popela a množství a granulovitost paliva ležícího na roštu. Vzduch obcházel topeniště cestou nejmenšího odporu jako sekundární vzduch a proto nezáleželo na tom kolik vzduchu odtahový ventilátor odsál.

Jakákoli regulace na tomto kotli ztrácela význam.



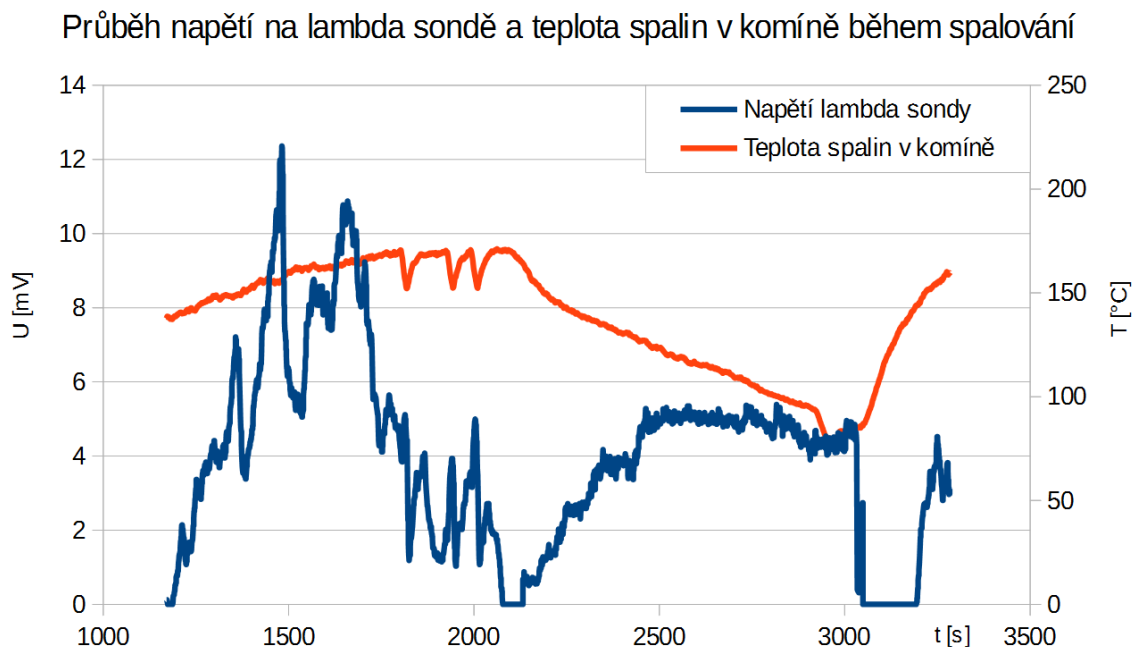
Ilustrace 25: Foto a blokové schéma chyby

V místě a v dohledné době (měsíc) nebyla k dispozici osoba, která by tento problém odstranila. Po tomto zjištění a domluvě s konzultantem diplomové práce, byla elektronika nainstalována na druhý kotel B. Tento kotel nějaký čas pracoval v galvanizovně jako přímotop, a poté se vrátil jako nefunkční.

10.2 Kotel B pro přímé vytápění

Druhý kotel měl výměník tepla založen na ohřevu vzduchu proudícího skrz něj. Byl předán jako nefunkční kotel s neznámou chybou. Prvním úkolem bylo prověření snímačů a celé elektroinstalace. Tato kontrola odhalila chybějící snímač, který signalizoval zahoření podavače paliva. Dále poté nefunkční kapacitní snímač signalizující přítomnost paliva v mezizásobníku. Důvodem byl požár této části kotle, který snímač zničil. Po odstranění závad bylo provedeno zkušební provoz kotle, který proběhl úspěšně. Po odstavení kotle byla do elektroinstalace doplněna rozšiřující deska senzorů a doplnil software kotle o mnou vytvořené regulační části.

Před zkoušením regulace byla provedena zkouška na těsnost kotle. Výsledek byl ten, že kotel někudy přisává takové množství vzduchu, že ventily přívodního vzduchu neměli na spalování vliv. Netěsnosti v okolí topeniště byly identifikovány v okolí uchycení pohyblivého roštu, trysky žhavicího ventilátoru a netěsnost v okolí popelníku. Poté byly netěsnosti odstraněny. Kotel i po úpravě vykazoval netěsnost, která nebyla identifikována. Přívodními ventily však již byla výška plamene regulovatelná.



Ilustrace 26: Graf měření napětí na lambda sondě a teploty spalin během pokusného měření.

Po implementaci regulátorů bylo provedeno testovací měření, které podle naměřených dat prokázalo funkčnost vytvořených řídicích algoritmů. Kotel po 30 minutách chodu dosáhl požadovanou teplotu ohřívání vzduchu, poté se posunul rošt a začal klesat požadovaný výkon. V tento okamžik byla spuštěna mnou vytvořená regulace, která udržovala napětí na lambda sondě na hodnotě okolo 5 mV. Tato regulace znázorněna na přiloženém grafu v úseku mezi časem 2100 a 3000s. Z pohledu měření lambda sondou bylo dosaženo spalování se zbytkovým kyslíkem v úrovni okolo 9% podle katalogu sondy. Lambda sonda nebyla kalibrována a referenční měřicí přístroj nebyl při těchto zkouškách přítomen. Údaj o hodnotě zbytkového kyslíku ve spalinách je tedy pouze orientační. Problém však nastal při vizuální kontrole spalin. Místo očekávaného neviditelného nebo bílého kouře se z komína valil černý

kouř. Barvu kouře ovlivňoval vznik sazí, ty však vznikají při spalování s nedostatečným množstvím kyslíku.

Výsledky měření ukázaly na problém s přísávaní vzduchu (kyslíku) do spalín za spalovací komorou. Tímto se regulátor snažil omezovat dodávku okysličeného vzduchu do spalovací komory, což mělo za následek prokazatelné nedokonalé spalování, i když lambda sonda ukazovala požadovanou hodnotu.

Konzultací s výrobcem kotle, kudy by se do spalín mohl z výměníku tepla nasát vzduch, byl závěr:

Výměník tepla je konstruován pomocí lisovaných trubek do bočních plechů. Tudy by se za normálních okolností do spalín vzduchu dostat neměl. Velké množství vzduchu by se tímto způsobem do kotle dostalo pokud by byla některá trubka výměníku špatně zalisována a nebo prasklá, toto se neprokázalo.

Místem kudy by se mohl do výměníku dostat vzduch je jeho horní deska. V případě deformace nebo chybějícího/poškozeného těsnění. Tato netěsnost se prokázala.

Vrchní deska výměníku byla mírně prohnutá a jeden roh byl zvednutý cca o 1mm nad těsnění.

11 Závěr

Pro vytvoření rešerše v oblasti měření teploty, bylo mimo citované literatury [1] použity informace z [7], [8] a [9]

Bylo vytvořeno schéma desky senzorů dle požadavků zadávající osoby. Během návrhu byly vytipovány použité součástky a vypočítány jejich hodnoty ze vzorců uvedených v katalogích. Nepostradatelným pomocníkem byly při návrhu přístrojového zesilovače materiály zveřejněné firmou ANALOG DEVICES [10], jedná se o rady jak správně navrhovat problémové části analogových obvodů.

Ze schémat byla vytvořena deska plošných spojů, vyrobená byla ve firmě PragoBoard. Vyrobena deska byla mnou osazena, oživena a ozkoušena. Při oživování se vyskytly problémy s chybami ve schématech, které se mi všechny podařily zdárně odstranit.

V průběhu testování na reálném kotli byla první deska senzorů zničena. Byla vytvořena druhá verze desky, která má všechny zjištěné nedostatky odstraněny.

Byl vytvořen simulátor desky na počítači PC, na kterém bylo z velké části odladěno programové vybavení rozšiřující desky senzorů. Pro reálnou desku bylo z programového vybavení vytvořeno mimo samotné aplikace vytvořen bootloader.

Funkčnost desky byla ověřena nejprve v laboratorních podmínkách poté i na reálném kotli.

Zakomponováním rozšiřující desky senzorů se v programu kotle z univerzální reakce na chybu, reaguje odpovídajícím způsobem.

Při zkušebních měřeních se bohužel na obou předložených kotlích ukázala výrobní vada. Obě vady vylučovaly zlepšení spalování řízením rozšířeným o měření přebytku kyslíku ve spalinách.

Už při zkušebních měřeních na kotlích vyplynuly požadavky, mající vliv na jejich konstrukci. Za žádnou cenu se do vytvořených spalin nesmí dostat čistý vzduch mezi spalovací komorou a měřicí sondou určující zbytkový obsah kyslíku.

Algoritmy řízení kotle je třeba dovybavit zabezpečujícími a diagnostickými funkcemi, které při poruše kotle nebo snímačů na kotli nainstalovaných, zabezpečí alespoň nouzový provoz kotle bez regulací. Tyto diagnostické a bezpečnostní algoritmy je třeba důkladně a dlouhodobě prověřit.

12 Literatura

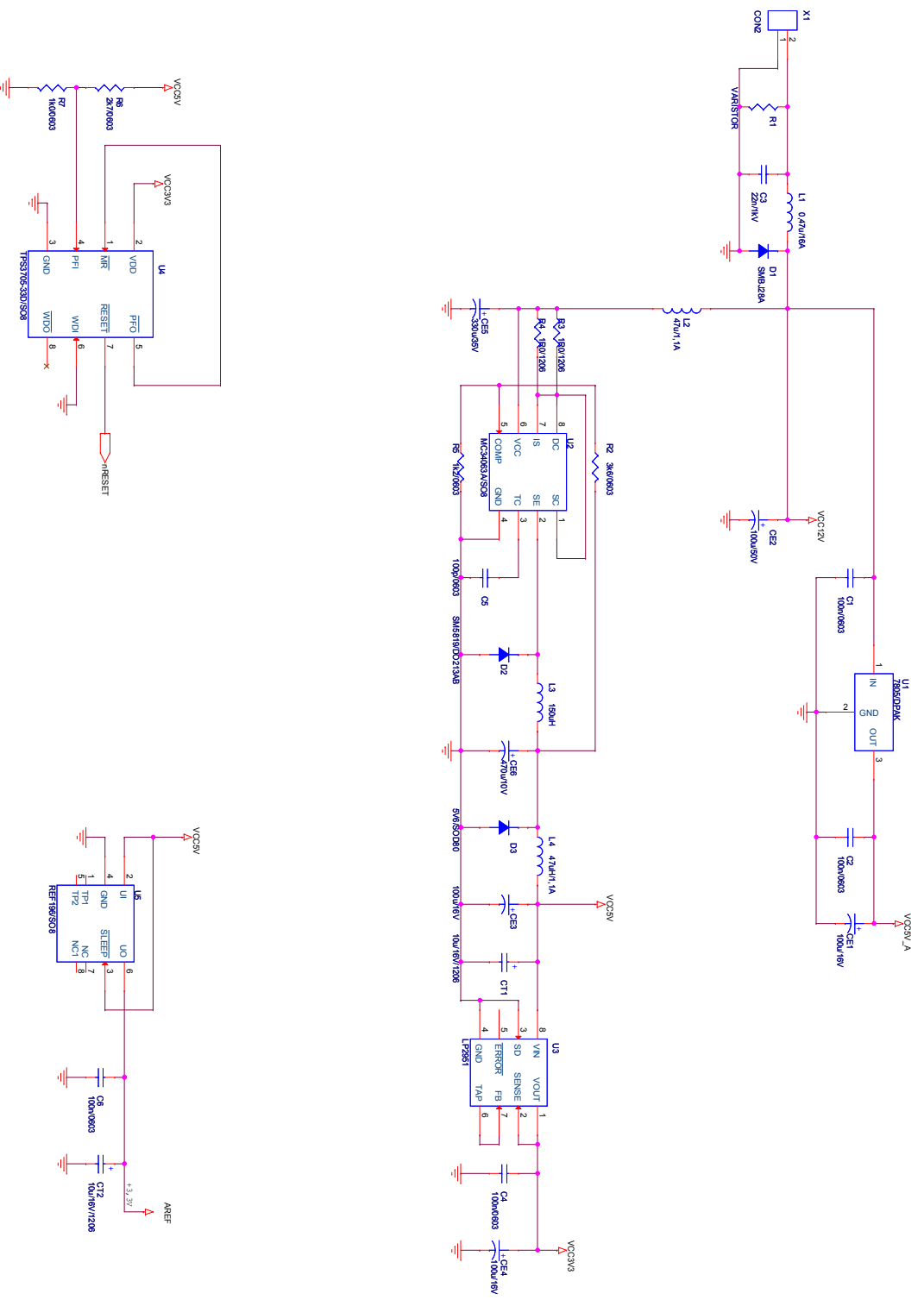
- 1: Ripka, Ďaďo Kreidl, Novák, Senzory a převodníky, ,
- 2: Úřad pro technickou normalizaci, Kotle pro ústřední vytápění –část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW –Terminologie, požadavky, zkoušení a značení, 2013,
- 3: Chipkin Peter, Modbus For Field Technicians, 2011,
- 4: modbus org, MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3, 2012,
- 5: modbus.org, MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.02, 2006,
- 5: Ti.com, LM134/LM234/LM3343-TerminalAdjustableCurrentSources, 2013, <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lm234.pdf>
- 7: Kreidl Marcel, Měření teploty : senzory a měřicí obvody, 2005,
- 8: Zehnula, Karel, Snímače neelektrických veličin , 1983,
- 9: Matthew Duff and Joseph Towey, Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility, ,
- 10: analog.com, Practical Analog Design Techniques, , <http://www.analog.com/en/search.html?q=Practical Analog Design Techniques>

13 Seznam zkratek

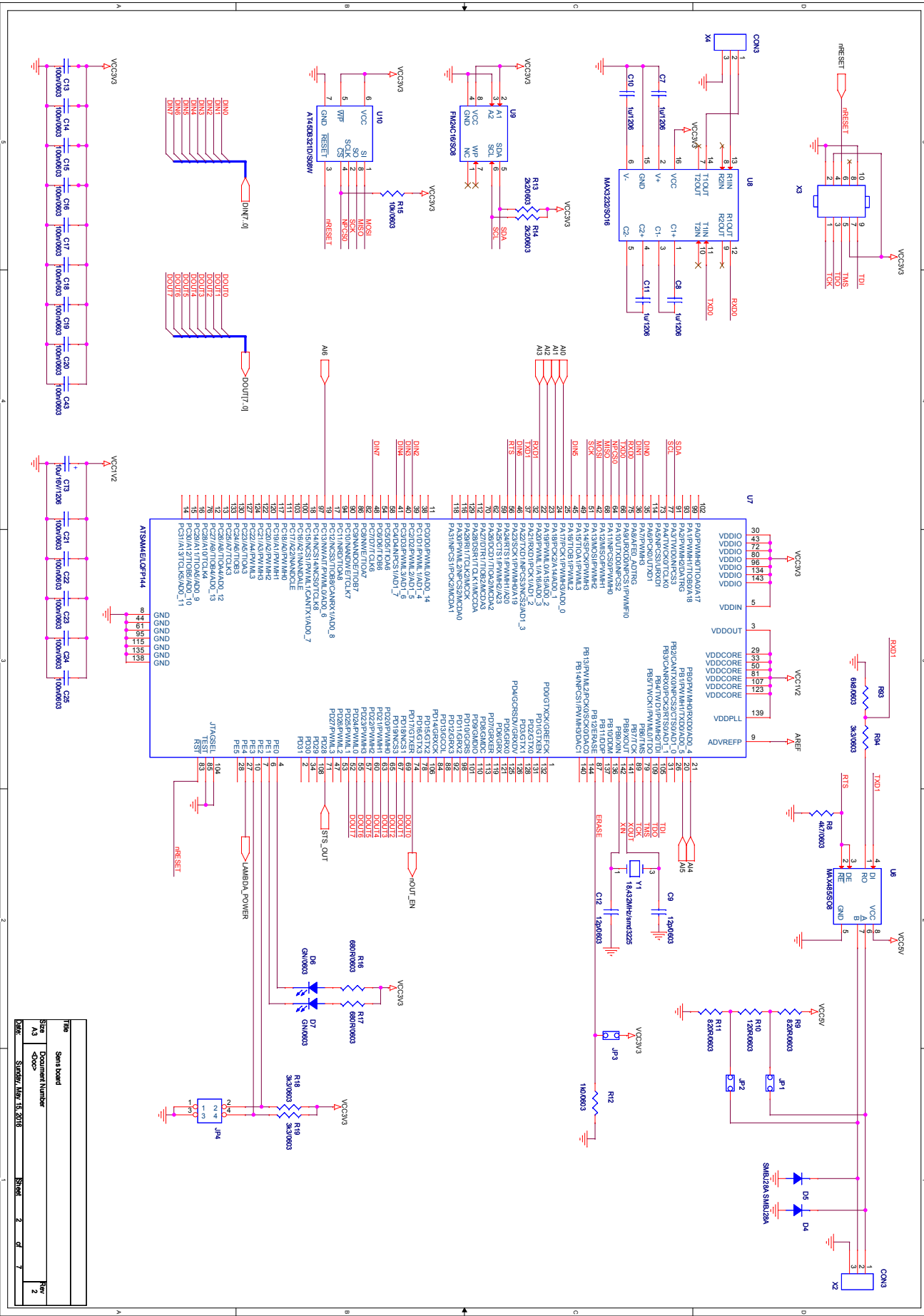
A/D	Analog to Digital convertor	
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (způsob výroby integrovaných obvodů, mimo jiné definuje napětí pro logické úrovně: LOW 0-1/3VCC HI 2/3VCC – VCC)	
CO	Chemický vzorec oxidu uhelnatého	
CO2	Chemický vzorec oxidu uhličitého	
ČSN EN	Označení státních norem převzatých od evropského normalizačního orgánu	
EMC	ElectroMagnetic Compatibility	
FPU	Floating Point Unit	
HI	Označení logické úrovně 1	
HW	HardWare	
JTAG	Joint Test Action Group (společnost zabývající se standartizací metod pro ověřování funkčnosti PCB)	
LDO	lineární Low DropOut regulátor	
LOW	Označení logické úrovně 0	
LSB	Least Significant Bit	
MCU	MicroController Unit	
O2	Chemický vzorec kyslíku	
OGC, THC	Označení pro uhlovodíky (propan, metan, ...)	
PC	Personal Computer	
PCB, DSP	Printed Circuit Board, Deska plošných spojů	
RISC	Reduced Instruction Set Computing (jedna z architektur procesorů)	
SW	SoftWare	
TTL	Tranzistor-Tranzistor Logic (definování napětí pro logické úrovně: 0-0,8V HI 2-5V)	LOW
ZrO2	Chemický vzorec oxidu zirkoničitého	

14 Přílohy

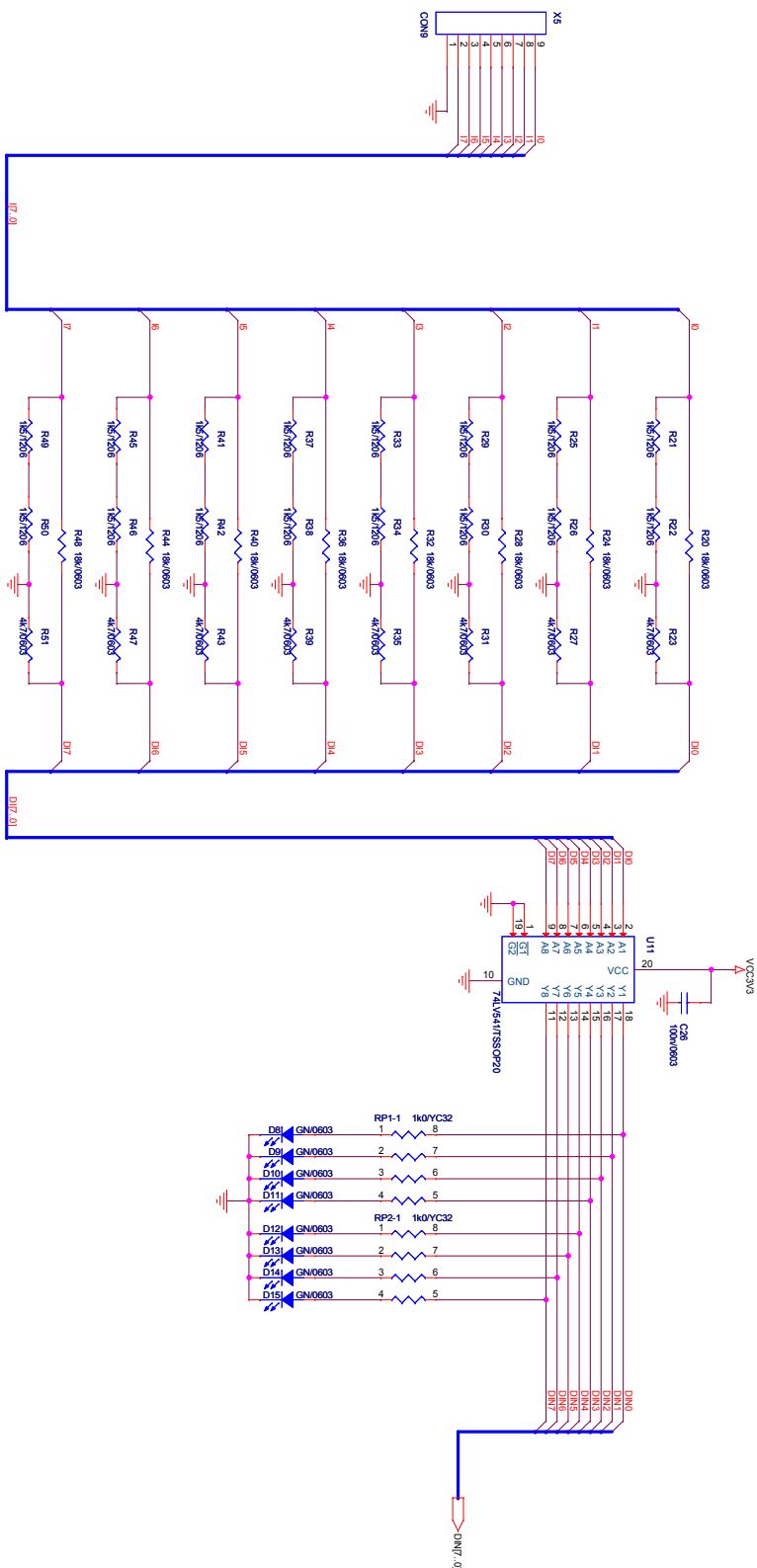
14.1 Schéma desky



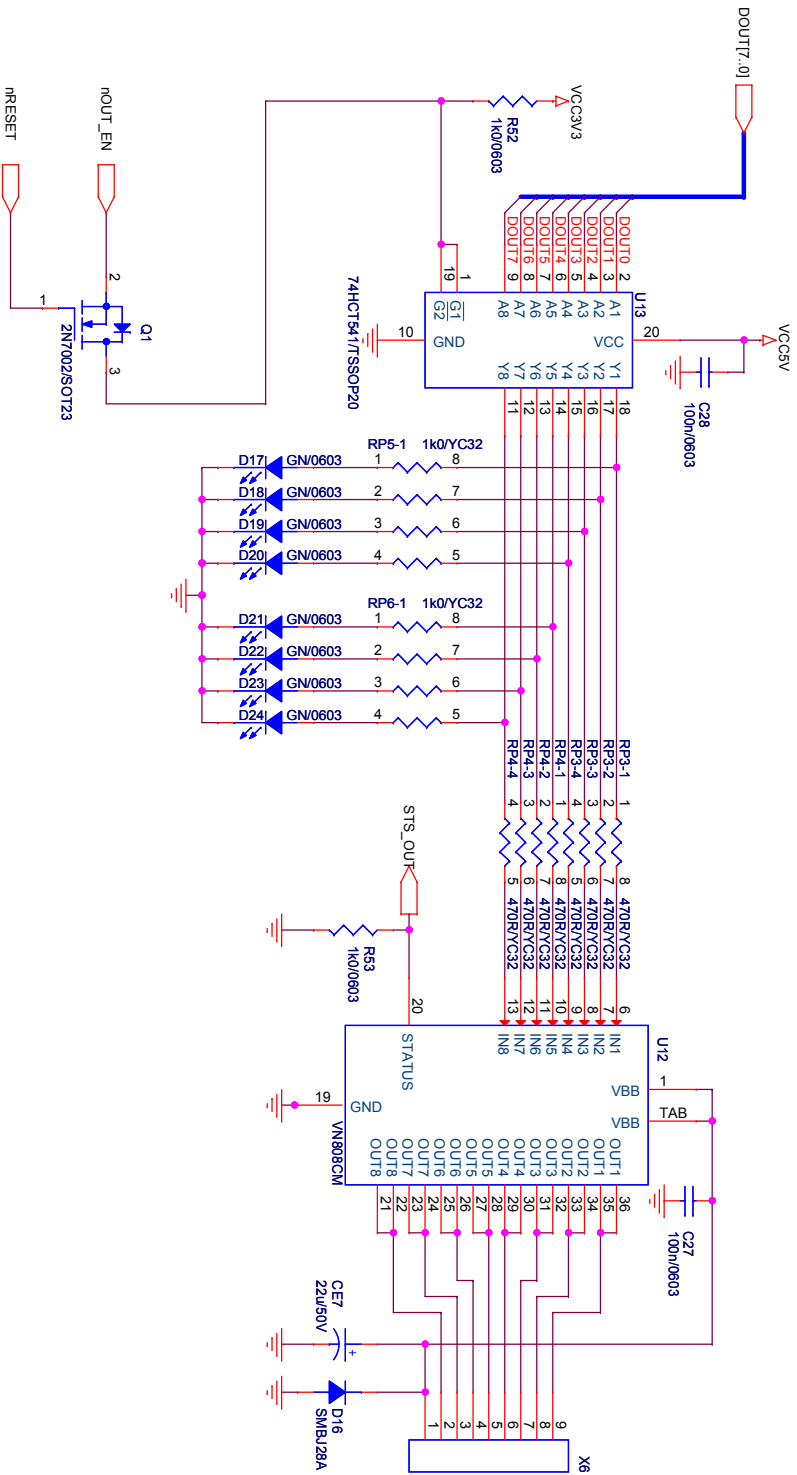
Title	Sens board
Sheet	1 of 7
Size	A3
Doc Number	00000000
Rev	5
Date	Monday, May 15, 2018



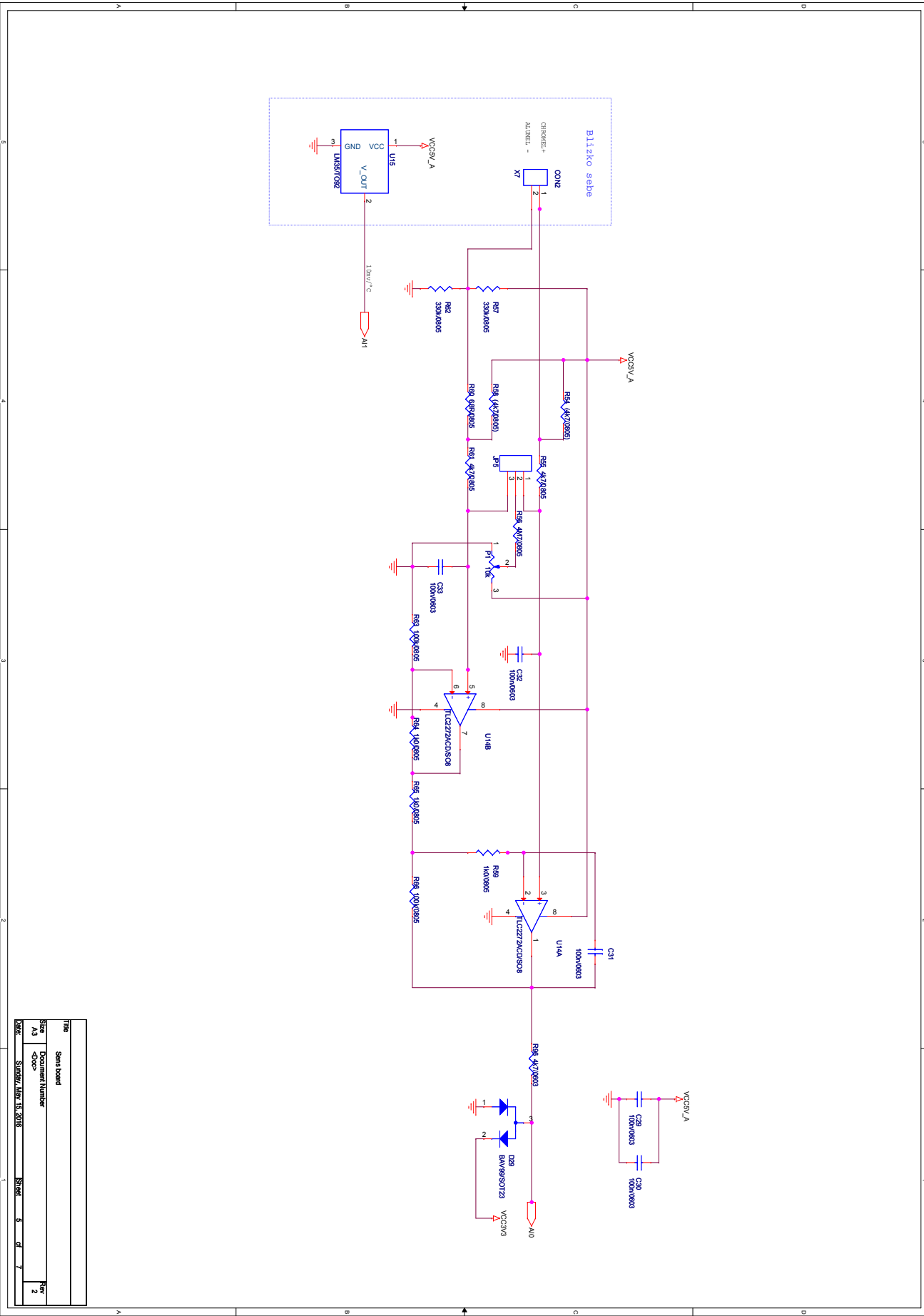
Rev	2
Doc Number	ATSM6E10CFM14
Sheet	2 of 7
Date	Monday, May 15, 2018



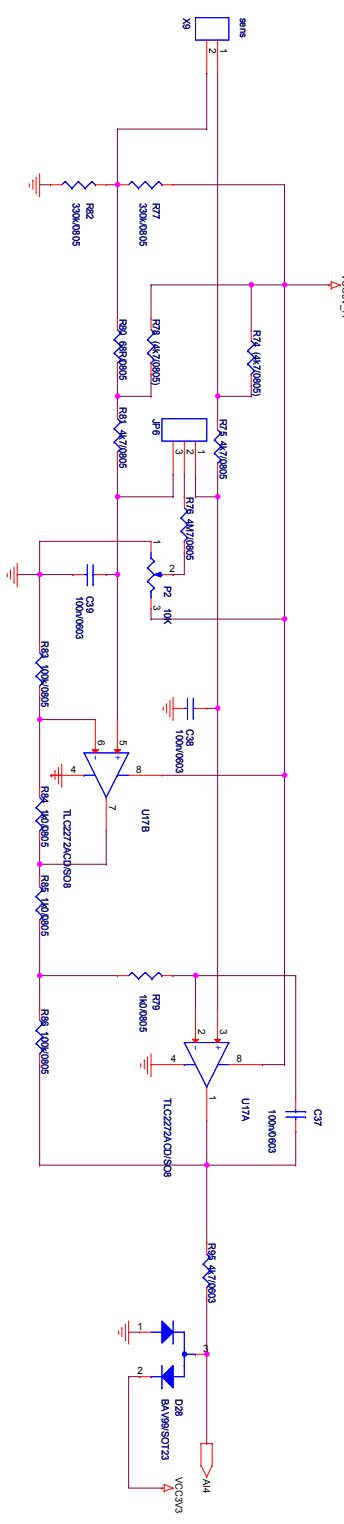
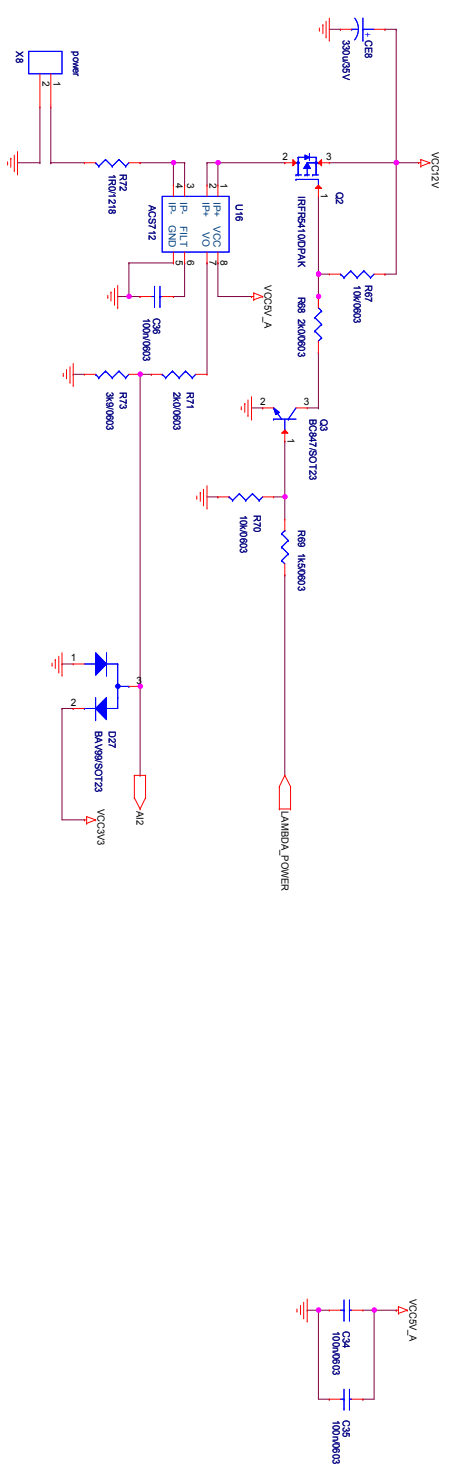
Title		Sensor board	
Sheet		3 of 7	
Date		September 15, 2018	
Author		Ravi	
Project		Sens	
Document Number		Doc-000	
Revision		1	



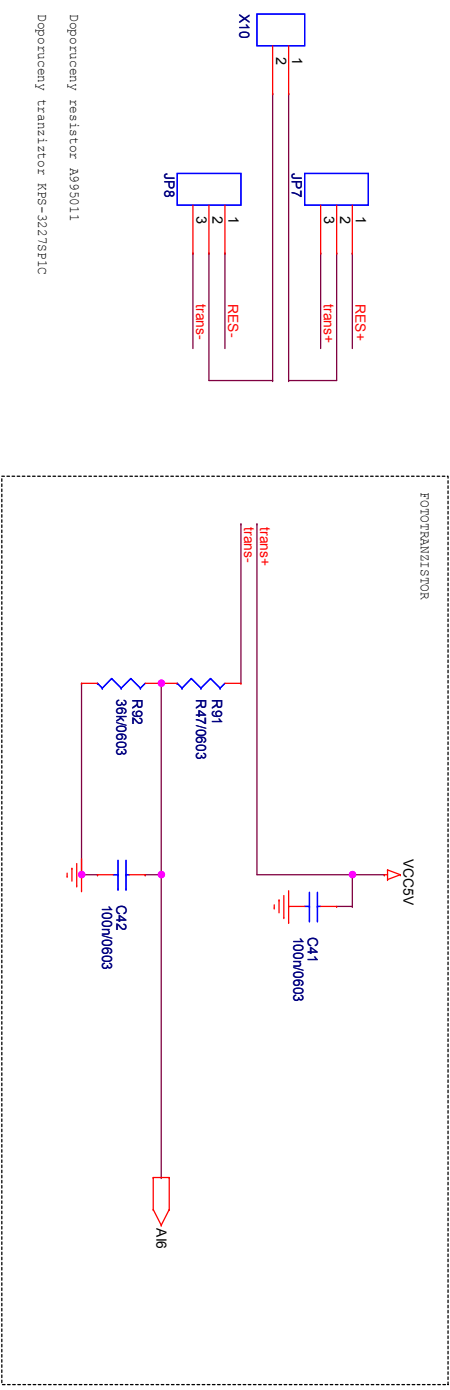
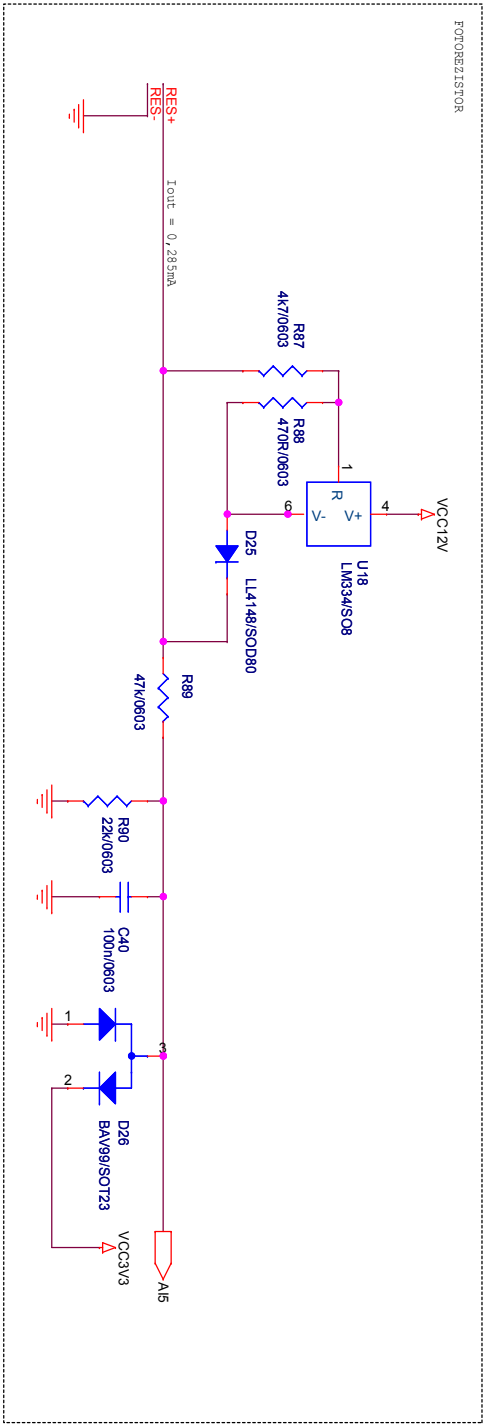
Title	Sens board		
Size	<Doc>		
Date:	Sunday, May 15, 2016	Sheet	4 of 7
Rev	2		



File	Sens board
Sheet	DocumentNumber
Tab	Doc
Date:	Sinclair May 15, 2018 Sheet 5 of 7 Rev 5



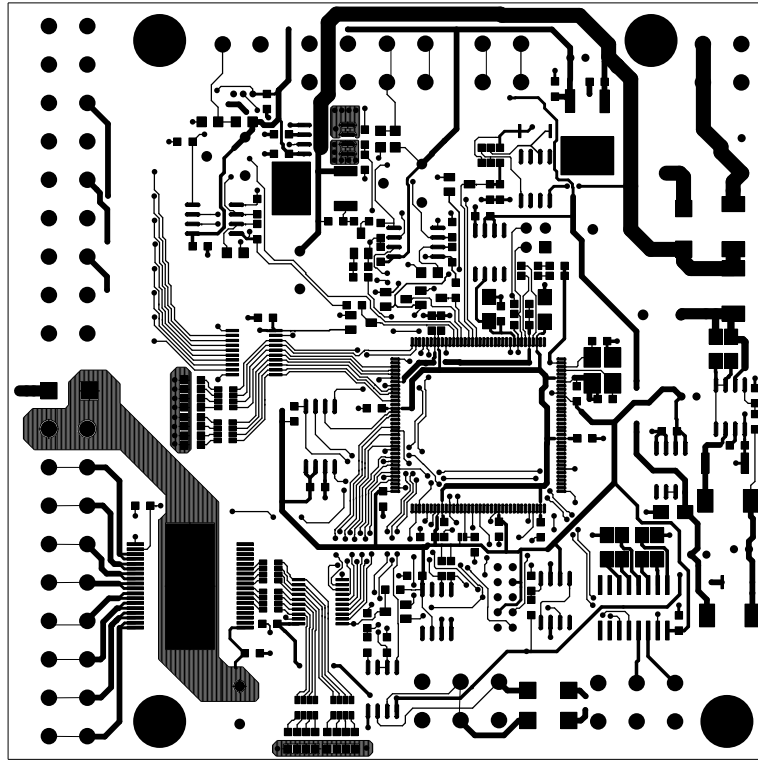
File	Sens board
Sheet	DocumentNumber
NA3	000000
Date:	Monday, May 15, 2018
Sheet	6 of 7
Rev	5

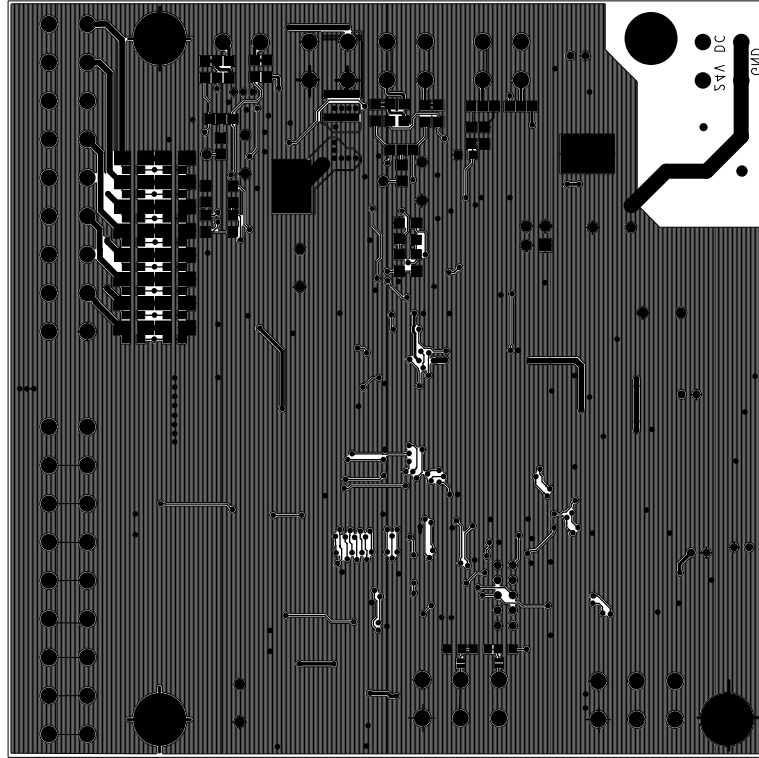


Depoucenay resistor A895011
 Depoucenay transistor KPS-327SP1C

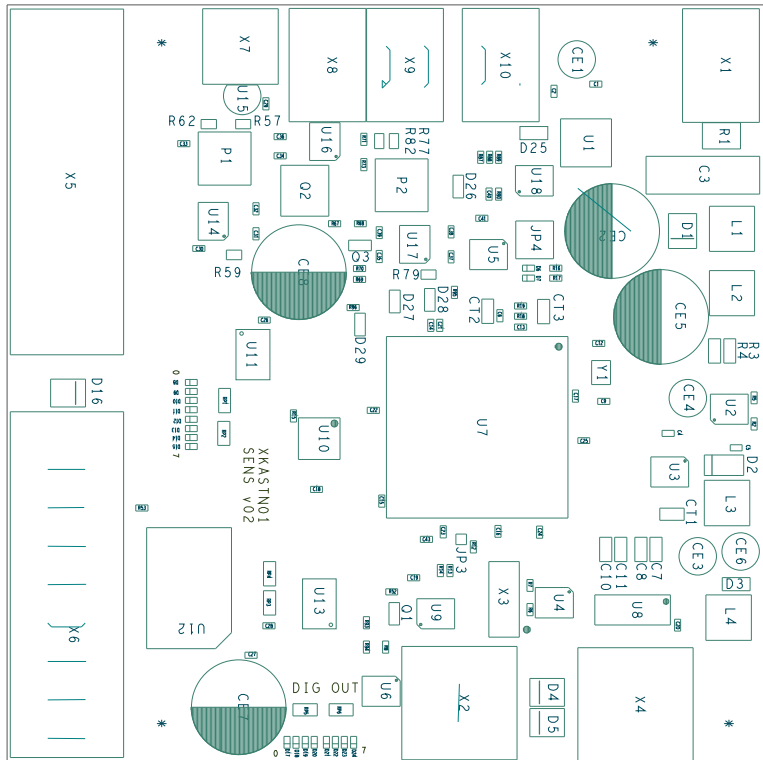
Title		Sens board	
Size		A4	
Document Number		<Doc>	
Date:	Sunday, May 15, 2016	Sheet	7 of 7
Rev		2	

14.2 Ukázka horní a spodní vrstvy PCB

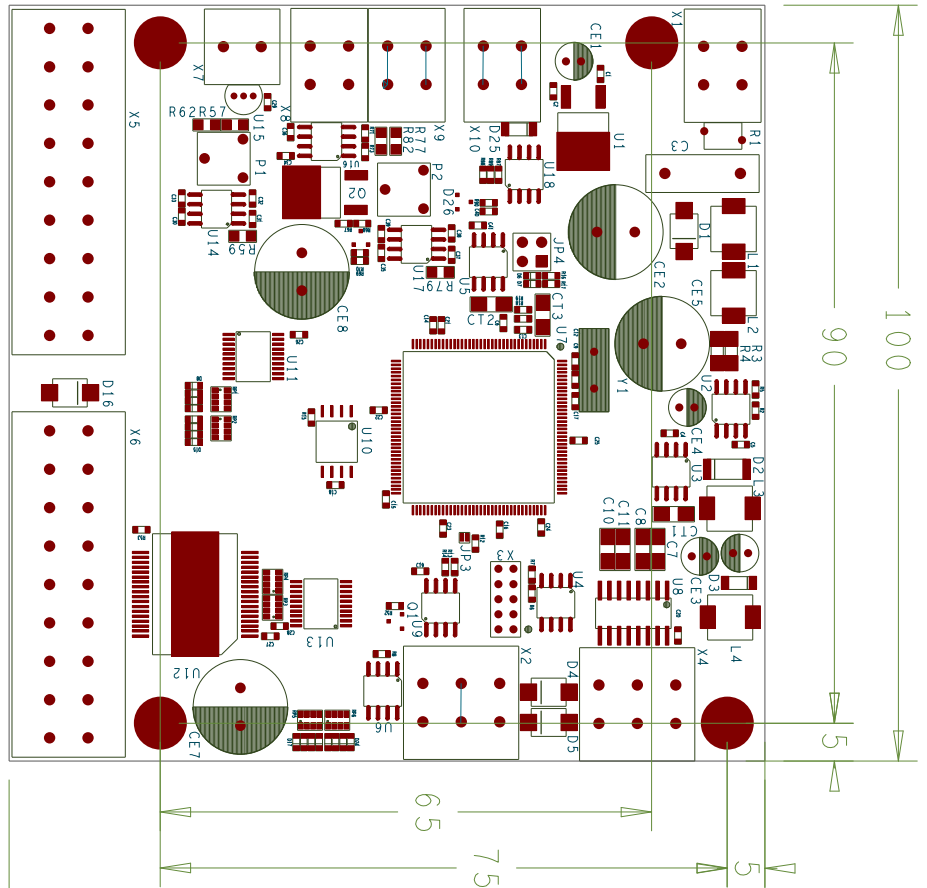




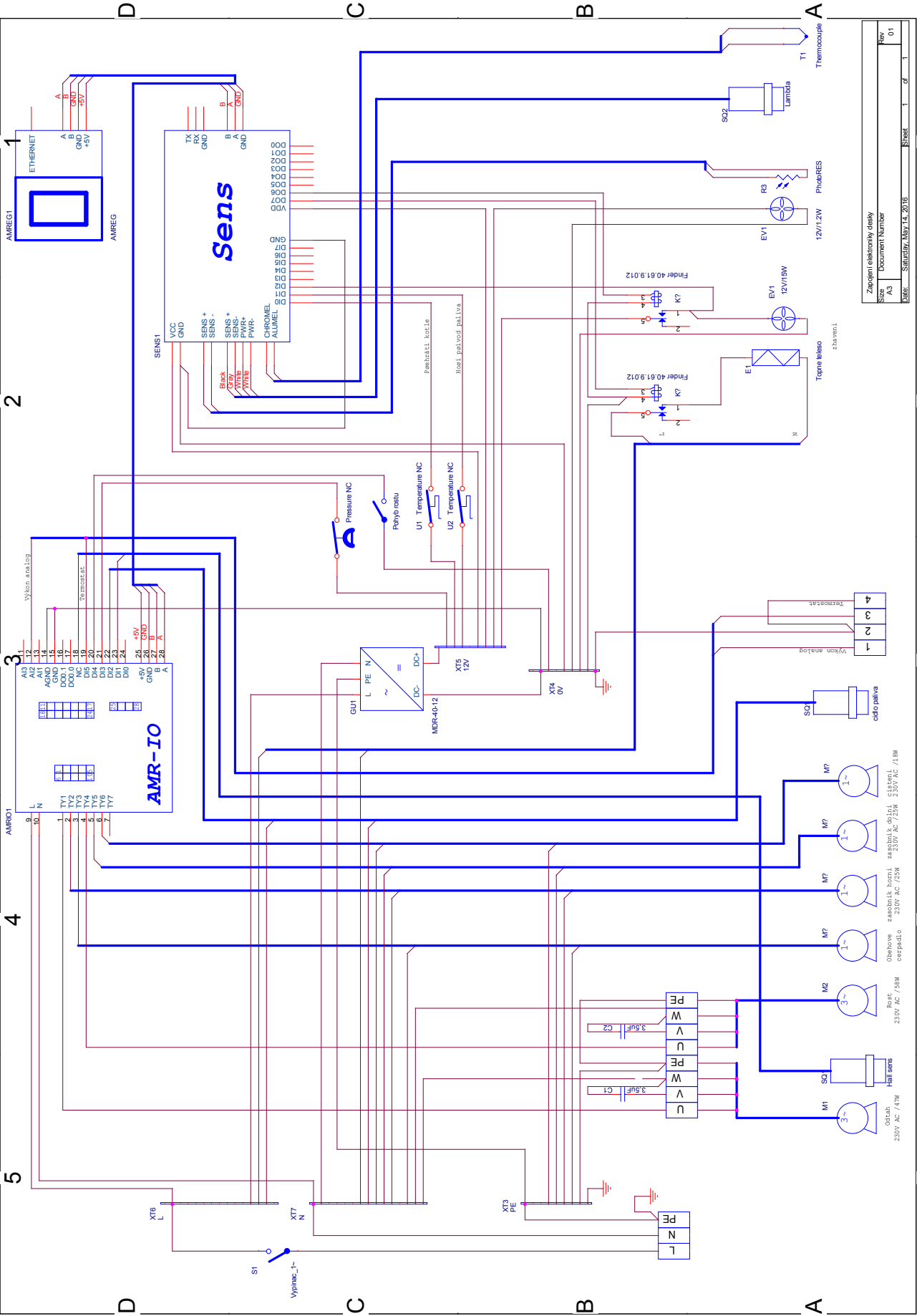
14.3 Umístění součástek na PCB



14.4 Rozměry desky



14.5 Schéma zapojení kotle



Size	A3
Document Number	
Date	Saturday, May 14, 2016
Sheet	1 of 1
Rev	01

Zaoplen elektronycky desky