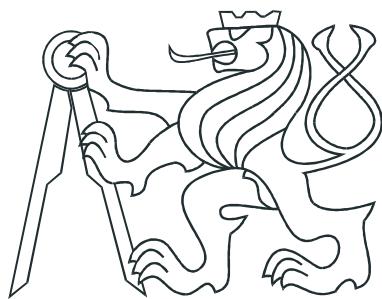


České vysoké učení technické v Praze

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh HW a SW převodníku do skenovací
hlavice čidel

Praha, 2009

Autor: Lukáš Jeřábek

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 20.5.2009

Jiříček Řehoř
podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Martinu Hlinovskému Ph.D. a kolektivu firmy Teco za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce. Dále děkuji svým rodičům za podporu při studiu.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je vývoj prototypu převodníku pro měření teploty určeného do hlavice čidel. Obsah práce se skládá z návrhu a realizace hardwarového a softwarového řešení tohoto zařízení. Převodník byl vytvářen ve spolupráci s firmou Teco a.s. a je určen jako měřící modul pro řídící systémy Tecomat Foxtrot. V rámci vývoje vznikl prototyp zařízení umožňující pracovat s několika typy nejčastěji používaných senzorů a který pro připojení k systémům Tecomat Foxtrot využívá sběrnici CIB. V práci jsou dále uvedeny základní principy měření teploty, postup vývoje zařízení a ověření jeho vlastností.

Abstract

The aim of diploma thesis is a development of head mounted converter for temperature measurement. The content of thesis consists of design and realization of hardware and software for this converter. The device was created in co-operation with company Teco a.s. for control systems Tecomat Foxtrot. The product of development is the head mounted converter enabling the use several types of temperature sensors. Device uses communication bus CIB for connection with control system. The thesis contains below principles of temperature measurement, description of development process and verification of device parameters.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Lukáš Jeřábek**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **Vývoj HW a SW převodníku do skenovací hlavice čidel**

Pokyny pro vypracování:

1. Připravit studii a návrh řešení realizace převodníku tak, aby umožňoval připojení čidla veličiny k řídicím systémům Tecomat (prostřednictvím sběrnice CIB).
2. Připravit návrh HW převodníku (mechanické řešení bude řešeno společně se zadavatelem práce).
3. Připravit, oživit a odzkoušet rutiny pro obsluhu a zpracování připojitelných čidel.
4. Připravit, oživit a odzkoušet SW pro interface CIB (základní rutiny včetně dokumentace budou dodány zadavatelem práce).
5. Realizovat a oživit prototyp převodníku (vzniklého dle vlastního návrhu).
6. Všechny rutiny a funkce dle bodů 2 až 4 implementovat do prototypu přípravku, oživit a odladit.
7. Provést základní měření parametrů realizovaného převodníku (odzkoušet pro jednotlivé typy čidel a vypracovat naměřené charakteristiky) a vypracovat stručnou verzi dokumentace pro uživatele.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Martin Hlinovský, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2009/10

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 2. 2009

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
1 Úvod	1
2 Teoretický úvod do problematiky	3
2.1 Senzory teploty	3
2.1.1 Odporové kovové senzory teploty	3
2.1.2 Termoelektrické senzory teploty	5
2.1.3 NTC termistory	6
2.2 Přehled vlastností dostupných převodníků	7
2.3 Struktura převodníku	7
3 Návrh HW řešení	9
3.1 Představa řešení převodníku	9
3.2 Výběr hardwaru	10
3.2.1 A/D převodník	10
3.2.2 Procesor	11
3.3 Komunikační rozhraní	12
3.3.1 Sběrnice CIB	12
3.3.2 Rozhraní SPI	13
4 Realizace prototypu	15
4.1 Obvodové řešení	15
4.2 Mechanické řešení	19

5 Zpracování signálů senzorů teploty	23
5.1 Odpovědové senzory teploty	23
5.1.1 Pt100 a Pt1000	25
5.1.2 Ni1000	26
5.2 Termočlánky	27
5.3 Termistory	29
6 Vývoj softwaru	31
6.1 Měření signálu	31
6.1.1 Ovládání A/D převodníku AD7792	31
6.1.2 Ovládání interního A/D převodníku Z8	33
6.1.3 Postup měření	33
6.2 Implementace protokolu CIB	35
6.3 Celková struktura programu	37
6.4 Nastavení v prostředí Mosaic	39
7 Dosažené výsledky	43
7.1 Charakteristiky převodníku	43
7.2 Úprava návrhu	49
8 Závěr	51
Literatura	53
A Ukázkový program	I
B Převodní charakteristiky převodníku	III
C Plošné spoje	VII
D Hlavice - typ B	XI
E Obsah přiloženého CD	XIII

Seznam obrázků

2.1	Měřící řetězec převodníku	8
3.1	Hlavice typ B - rozměry	10
3.2	Blokové schéma A/D převodníku 7792	11
3.3	Blokové schéma procesoru Z8F4821	12
3.4	Propojení rozhraní SPI (Master - slave)	14
4.1	Zapojení převodníku - řídící část	16
4.2	Zapojení převodníku - měřící část	16
4.3	Zapojení měřící části - varianta 1	17
4.4	Zapojení měřící části - varianta 2	18
4.5	Interface CIB - blokové schéma	18
4.6	Ukázka osazených plošných spojů	19
4.7	Prototyp převodníku	20
4.8	Označení vstupních svorek převodníku	20
4.9	Zapojení řídící jednotky	21
5.1	Závislost teploty na odporu senzoru Pt100	25
5.2	Závislost teploty na odporu senzoru Pt1000	26
5.3	Závislost teploty na odporu senzoru Ni1000	27
5.4	Závislost teploty na napětí termočlánku J	28
5.5	Závislost teploty na odporu termistoru NTC	30
6.1	Měřící cyklus	34
6.2	Vývojový diagram příjmu zprávy	36
6.3	Vývojový diagram hlavní smyčky programu	38
7.1	Charakteristika měření Pt100 $W_{100} = 1,385$	44
7.2	Chyba aproximace u Pt100 $W_{100} = 1,391$	45

7.3	Charakteristika měření Pt1000 $W_{100} = 1,385$	46
7.4	Charakteristika měření Ni1000 $W_{100} = 1,5$	46
7.5	Charakteristika měření termočlánku	47
7.6	Úprava měřící části	50
B.1	Převodní charakteristika pro senzor Pt100 $W100 = 1,385$	III
B.2	Převodní charakteristika pro senzor Pt100 $W100 = 1,391$	IV
B.3	Převodní charakteristika pro senzor Pt1000 $W100 = 1,391$	IV
B.4	Převodní charakteristika pro senzor Pt1000 $W100 = 1,391$	V
B.5	Převodní charakteristika pro senzor Ni1000 $W100 = 1.618$	V
B.6	Převodní charakteristika pro senzor Ni1000 $W100 = 1.5$	VI
B.7	Převodní charakteristika pro termočlánek typu J	VI
C.1	Návrh plošného spoje - dolní deska - vrstva BOTTOM	VII
C.2	Návrh plošného spoje - dolní deska - vrstva TOP	VIII
C.3	Návrh plošného spoje - horní deska - vrstva BOTTOM	IX
C.4	Návrh plošného spoje - horní deska - vrstva TOP	X
D.1	Hlavice čidel - typ B	XI
D.2	Osazení převodníku v hlavici	XII

Seznam tabulek

2.1	Materiály kovových teploměrů - vlastnosti	4
2.2	Typy termočlánků - vlastnosti	5
4.1	Parametry zařízení	22
5.1	Třídy přesnosti senzorů Pt100 a Pt1000	25
5.2	Třídy přesnosti senzoru Ni1000	26
6.1	Status - označení chyb	40
6.2	Senzor - označení	41
7.1	Chyby měření	48
7.2	Použité přístroje	49

Kapitola 1

Úvod

Teplota patří mezi základní veličiny, které jsou nejčastějším předmětem řízení jak v průmyslové, tak i v domovní automatizaci. V řídících systémech se pro měření teploty používají speciální moduly, které umožňují jak měření požadované veličiny, tak i její převod na určitý druh výstupního signálu. Výstupním signálem může být buď unifikovaný analogový signál, který se posléze dále zpracuje, nebo lze měřenou veličinu přímo převést do digitální podoby. Přímé digitální zpracování má několik výhod. Vstupní analogová veličina se měří pouze jednou, čímž se odstraní další nepřesnosti spojené s případným převodem a následným měřením unifikovaného signálu. Další výhodou je snadný přenos číslicových dat prostřednictvím některé průmyslové komunikační sběrnice přímo do řídícího systému. Připojení přes komunikační sběrnici pak umožňuje využívat služby spojené s konfigurací modulu, nebo rozšířit funkčnost zařízení o přídavné komponenty. Tyto měřící moduly se označují jako převodníky dané veličiny. Převodníky se v praxi vyrábějí v různém provedení a s různými vlastnostmi. Pro měření teploty se ve velké míře používá provedení určené do hlavice čidel.

Diplomová práce se zabývá vývojem hardwaru a softwaru prototypu převodníku pro měření teploty určeného do hlavice čidel. Zadavatelem této práce je firma Teco a.s. a převodník je tak určen pro řídící systémy, které právě tato firma vyrábí. Součástmi vývoje jsou návrh a realizace prototypu převodníku, který bude sloužit jako vzdálený modul pro měření teploty v systémech Tecomat Foxtrot. Navržený převodník by měl ve výsledku dosahovat srovnatelných parametrů jako podobné výrobky dostupné na součastém trhu. Vlastní projekt lze rozdělit do několika fází vývoje. První fáze projektu se zaměřuje obecně na měření teploty v souvislosti s požadovanými vlastnostmi převodníku. Obsahuje popis vybraných senzorů teploty, možnosti zpracování naměřených hodnot a přehled vlastností

převodníků dostupných na trhu. Druhá fáze projektu obsahuje vlastní návrh hardwaru zařízení. Návrh se zabývá mechanickým řešením převodníku vzhledem k jeho umístění do hlavice. Dále jsou v něm obsaženy rozbor obvodového zapojení a informace o použitých komponentách a komunikačních rozhraních. Třetí fáze projektu se poté věnuje tvorbě programu, který bude řídit funkci celého zařízení. Jednou z hlavních částí programu bude obsluha měření signálu z čidel teploty a jeho následné zpracování. Další částí bude implementace komunikačního protokolu pro výměnu dat s nadřízeným systémem, která bude sloužit pro předávání naměřených hodnot a parametrů konfigurace převodníku. Závěrečná fáze projektu se zaměřuje na ověření dosažené přesnosti a charakteristik realizovaného převodníku.

Cílem práce je především kompletní návrh a realizace zařízení pro měření teploty v systémech určených k řízení inteligentních budov. Hlavními požadavky zadavatele jsou univerzální použití převodníku pro možné připojení několika různých typů nejčastěji používaných senzorů a komunikace s řídícím systémem prostřednictvím sběrnice CIB. Motivací této práce bylo vyzkoušet si praktický vývoj reálného zařízení, naučit se pracovat s prostředky pro návrh hardwaru a softwaru, a realizovat komunikaci pomocí průmyslové sběrnice.

Kapitola 2

Teoretický úvod do problematiky

2.1 Senzory teploty

Pro měření teploty se používá velké množství senzorů, které jsou založeny na různých principech. Převodníky pro měření teploty ale v zásadě umožňují připojení pouze dvou typů čidel, kterými jsou odporové kovové senzory teploty a termočlánky. Pro účely této práce bude použit navíc ještě jeden teplotní senzor, kterým je termistor NTC.

2.1.1 Odporové kovové senzory teploty

Princip odporových kovových senzorů teploty je založen na teplotní závislosti odporu kovu na teplotě. Tuto závislost vyjadřuje teplotní součinitel odporu α . V praxi se tento součinitel definuje jako podíl rozdílu odporu při teplotách 100°C a 0°C a stonásobku odporu při nulové teplotě.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad [K^{-1}] \quad (2.1)$$

Pro rozsah senzorů při teplotách 0 až 100°C poté přibližně platí závislost odporu na teplotě, která je dána vztahem 2.2.

$$R_\vartheta = R_0(1 + \alpha T) \quad (2.2)$$

Pro větší rozsahy teplot už ale vztah 2.2 nebude přesný. Chceme-li využít plný rozsah senzoru, musíme pro výpočet měřeného odporu použít vztah 2.3. Ten vyjadřuje závislost jako polynomiální funkci a lépe tak vyjadřuje skutečnou charakteristiku čidla. Koeficienty

A, B, C ze vztahu 2.3 jsou dány normou IEC a pro různé druhy senzorů se liší.

$$R_\vartheta = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)] \quad (2.3)$$

Mezi nejčastěji používané materiály pro výrobu kovových senzorů patří platina, nikl a měď, nebo případně různé druhy slitin. Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Platinové teploměry se vyrábějí drátkovou nebo, tenkovrstvou technologií. V případě drátkové technologie tvoří měřící odpor spirálovitě stočený tenký drátek zatavený do keramiky nebo skla. U tenkovrstvé technologie se platinový odpor vytvoří na ploché korundové destičce technikou napařování a leptání. Oproti drátkovým senzorům mají rychlejší odezvu a obvykle i vyšší odpor, ale jsou méně časově stálé. Niklové senzory jsou většinou vyráběny pomocí tenkovrstvé technologie. V porovnání s platinovými senzory mají vysokou citlivost, rychlou časovou odezvu a malé rozmezí. Jejich nevýhodou je značná nelinearita a menší teplotní rozsah. Senzory vyrobené z mědi mají vůči předchozím dvěma typům menší rezistivitu i teplotní rozsah. Jejich použití není příliš časté a využívají se jen pro určité speciální aplikace.

Tabulka 2.1: Materiály kovových teploměrů - vlastnosti

Materiál	Teplotní rozsah [°C]	$\alpha 10^{-3} [K^{-1}]$
Pt	- 200 až 850	3.85 - 3.93
Ni	- 60 až 200	6.17 - 6.70
Cu	- 50 až 150	4.26 - 4.33

U odporových čidel se určuje teplota pomocí teplotní závislosti odporu senzoru. Ten se vypočte z úbytku měreného napětí na senzoru, který vzniká průchodem měřicího proudu. Nepříznivým vlivem, který působí na kovové odporové senzory je odpor přívodních vodičů k senzoru. Tento odpor se přičítá k odporu teplotního senzoru a zkresluje tak měřené napětí. Hodnota odporu se navíc mění s teplotou podobně jako u samotného senzoru. Tento vliv lze odstranit vhodným zapojením senzoru. V praxi se nejčastěji používá 3 nebo 4 vodičové zapojení. K dalším nepříznivým jevům patří vliv měřicího proudu. Průchodem měřicího proudu dochází k vlastnímu oteplení senzoru, což způsobí, že měřená teplota je zkreslena vlastním vlivem. Při měření se tedy musí zajistit, aby měřící proud neprekročil maximální hodnotu danou použitým senzorem.

2.1.2 Termoelektrické senzory teploty

Termoelektrické senzory teploty (termoelektrické články, termočlánky) jsou založeny na Seebeckově termoelektrickém jevu, neboli převodu tepelné energie na elektrickou energii. V každém vodiči, jehož teplota není v celé jeho délce konstantní, vzniká termoelektrické napětí. Napětí na obou koncích vodiče zavisí pouze na rozdílu teploty a nikoli na jejím průběhu po celé délce vodiče. Toto napětí však není přímo měřitelné. Jiná situace nastane, pokud spojíme dva vodiče s různými termoelektrickými (Seebeckovými) koeficienty. Pokud jsou v místě spoje a místě druhých volných konců vodičů rozdílné teploty, vznikne termoelektrický jev, v jehož důsledku pak vzniká mezi volnými konci obou vodičů elektrické napětí. Z popsaného principu vyplývá, že termočlánek se skládá ze dvou vodičů různých typů kovů, které jsou na jednom konci vodičů spojeny. Místo spojení obou vodičů se nazývá měřící konec termočlánku a oba volné konce vodičů se nazývají srovnávací. Vlastnosti termočlánků jsou dány volbou dvojice použitých materiálů viz. Tabulka 2.2. Vhodným výběrem dvojice kovů pak lze ovlivnit vlastnosti, jako jsou například linearita, teplotní rozsah, nebo citlivost.

Tabulka 2.2: Typy termočlánků - vlastnosti

Označení	Materiál	Teplotní rozsah [°C]	Citlivost při 25°C [μV/°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350	40.6
J	Fe-CuNi	- 200 až 750	51.7
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900	60.9
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200	40.6
S	PtRh10-Pt	0 až 1600	6
R	PtRh13-Pt	0 až 1600	6
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700	6

Termočlánek vyhodnocuje rozdíl mezi teplotami měřícího a srovnávacího konce. Pro měření teploty je tak nutné, aby byli oba srovnávací konce termočlánku udržovány na stejně teplotě. Nepříznivým vlivem na měření tak může být kolísání teploty srovnávacího konce. Vliv kolísání teploty lze minimalizovat tak, že zajistíme udržování konstantní teploty srovnávacích konců. To se v praxi realizuje umístěním srovnávacích konců do termostatu. Jinou možností jak lze omezit tento vliv, je použití kompenzačních obvodů. Příkladem kompenzačního obvodu může být například zapojení teplotně závislého rezistoru do jedné z větví odporového můstku. Můstek je vyvážen při určité vztažné te-

lotě, na které se udržují srovnávací konce. Odchýlením od vztažné teploty poté dochází k rozvážení můstku a vzniku napětí na jeho diagonále. Toto napětí lze poté využít pro kompenzaci. Další variantou může být použití diodového kompenzačního obvodu, který využívá teplotní závislosti PN přechodu. V případech kdy je možné použít digitální zpracování signálu, může být využita i číslicová korekce, která vychází z předpokladu, že známe teplotu srovnávacích konců. Toho můžeme docílit dodatečným meřením teploty v místě, kde se srovnávací konce nacházejí. Při měření se v jednom okamžiku vyhodnotí jak napětí termočláku, tak srovnávací teplota a měřená teplota se určí výpočtem. Závislost napětí termočlánku na měřené teplotě lze vyjádřit jako polynom viz. rovnice 2.4. Koeficienty polynomu se pro různé druhy termočlánků liší a jsou uvedeny v tabulkách.

$$U = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta\vartheta + \alpha_2 \Delta\vartheta^2 + \dots + \alpha_n \Delta\vartheta^n \quad (2.4)$$

2.1.3 NTC termistory

Termistory jsou polovodičové senzory, které využívají závislosti odporu na teplotě, podobně jako kovové odporové senzory. Vyrábějí se ze směsi oxidů kovů pomocí práškové technologie. NTC termistory mají záporný teplotní součinitel odporu. To znamená, že odpor s rostoucí teplotou klesá. Oproti například platinovým senzorům mají obvykle mnohem větší odpor, jehož hodnoty se pohybují v širokém rozmezí až do několika $M\Omega$, což umožňuje také potlačit vliv odporu přívodních vodičů. Dalšími vlastnostmi jsou velká citlivost, malé rozměry a malá časová konstanta, díky které lze možné měřit i rychlé teplotní změny. V porovnání s kovovými senzory jsou NTC termistory méně stabilní a jejich závislost odporu na teplotě je nelineární. Tuto závislost lze možné popsat přibližně vztahem 2.5, kde R_0 je odpor termistoru při nulové teplotě a B je materiálová konstanta.

$$R_\vartheta = R_0 e^{B \left(\frac{1}{\vartheta} - \frac{1}{\vartheta_0} \right)} \quad (2.5)$$

U reálných termistorů se spíše častěji uvádí závislost teploty na odporu jako funkce, kterou lze popsat vztahem 2.6. Koeficienty ve vztahu pak udávají skutečnou charakteristiku čidla teploty a jsou odlišné pro konkrétní typ daného termistoru.

$$\vartheta(R_\vartheta) = \left(a + bln \frac{R_\vartheta}{R_0} + cln^2 \frac{R_\vartheta}{R_0} + dln^3 \frac{R_\vartheta}{R_0} \right)^{-1} \quad (2.6)$$

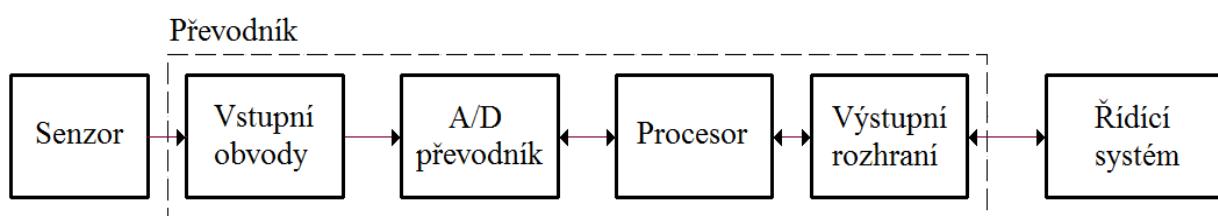
2.2 Přehled vlastností dostupných převodníků

Dnešní trh nabízí celou řadu převodníků pro měření teploty, které jsou určeny do hlavic senzorů. Z hlediska použitých druhů čidel teploty můžeme převodníky rozdělit do několika kategorií. První kategorií jsou převodníky používající k měření odporové senzory teploty. Mezi nejčastěji používané senzory, které zařízení podporují, patří platinové teploměry Pt100 a Pt1000, nebo niklové Ni100 a Ni1000. V této kategorii se pak jednotlivá zařízení liší počtem typů připojitelných senzorů, nebo možností jejich zapojení. U většiny převodníků je možné typicky připojit senzor 2-vodičově. V různých variantách se také nabízí možnost 3 nebo 4-vodičového zapojení. Typická přesnost měření se pohybuje v hodnotách od 0.1% do 0.15% z teplotního rozsahu. Druhou kategorií jsou převodníky, které používají pro měření teploty termočlánky. Standardně zařízení umožňují připojit termočlánky několika typů s možností nastavení měřícího rozsahu. V tomto případě se dosahuje přesnosti cca 1°C. Třetí kategorií jsou univerzální převodníky, které umožňují pracovat jak s odporovými senzory, tak i s termočlánky a kombinují tak vlastnosti obou předchozích kategorií. Jinou vlastností převodníků je možnost číslicového zpracování naměřených dat a nastavení parametrů převodníku. Nejjednodušší převodníky umí pouze převádět signál ze senzoru na výstupní unifikovaný signál, aniž by u nich bylo možné jednoduše upravit například měřící rozsah. Úprava signálu je tak ponechána na další obvody, nebo na řídící systém. Složitější převodníky obsahují obvody pro zpracování signálu. To umožňuje zlepšení přesnosti a stability měření, linearizaci výstupního signálu převodníku, nebo přestavení měřícího rozsahu. Některé převodníky disponují také funkcí autokalibrace či autodiagnostiky. Nejčastějším druhem výstupního signálu je proudová smyčka 4 až 20mA. Dalším druhem výstupu, který se častěji vyskytuje může být i vývod pro komunikaci pomocí protokolu HART. Vyjímkou pak nejsou ani převodníky s výstupem na sběrnici, kterými jsou například ProfiBus, nebo RS232. Mimo tyto uvedené parametry se jednotlivé převodníky liší dalšími vlastnostmi jako například možnost nasazení ve výbušném prostředí, galvanické oddělení, korekce chyby apod..

2.3 Struktura převodníku

Základní vnitřní struktura je obdobná pro širokou řadu převodníků viz. Obrázek 2.1. Počátek měřícího řetězce tvoří pomocné vstupní obvody, které slouží pro úpravu nebo převod signálu před jeho vlastním měřením. Zde se vstupní signál ze senzoru upraví do

podoby, kterou umožňuje vyhodnotit měřící obvod. Příkladem může být převod odporu senzoru na napětí. Měřící prvek poté převede získaný signál do podoby vhodné pro další zpracování. Měřícím prvkem se obvykle rozumí A/D převodník, který převádí vstupní analogový signál do digitální podoby. Naměřené hodnoty se dále zpracovávají v procesorové jednotce, kde lze provádět různé korekce chyb způsobené například použitými metodami měření, nebo rušením. Procesor slouží zároveň také jako prostředek pro komunikaci s nadřízeným systémem. Jeho výstup je připojen k vhodnému rozhraní, které převádí signál z procesoru do tvaru vhodného pro další přenos.



Obrázek 2.1: Měřící řetězec převodníku

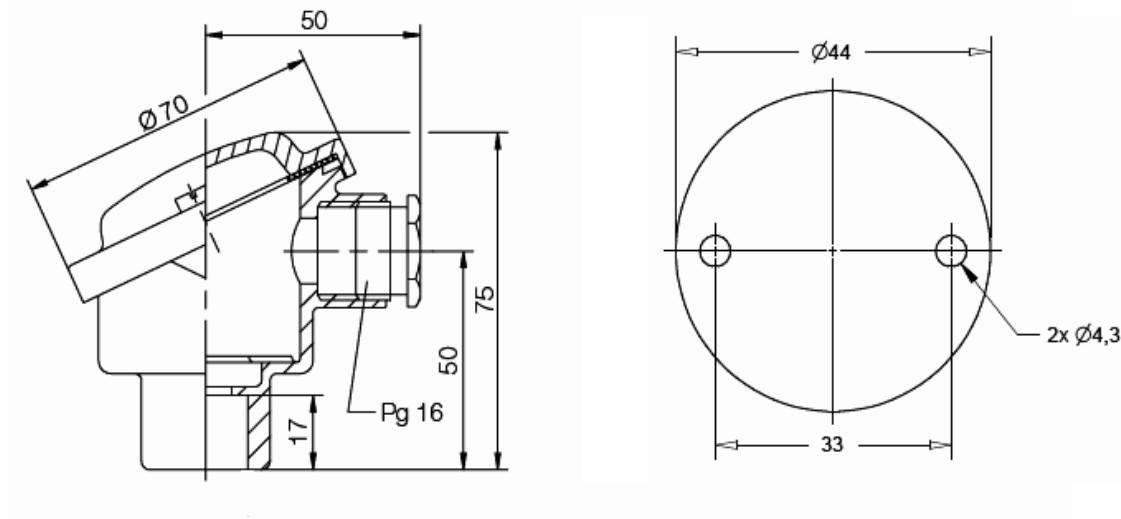
Takto popsanou vnitřní strukturu lze nalézt, jak již bylo řečeno, ve většině zařízení a ani převodník, jehož vývoj je cílem této práce, nebude výjimkou.

Kapitola 3

Návrh HW řešení

3.1 Představa řešení převodníku

Převodník má sloužit jako jednotka pro měření teploty v systémech Tecomat Foxtrot. Nejprve je tedy nutné zajistit jeho připojení k centrální řídící jednotce systému. Připojení k řídící jednotce bude realizováno prostřednictvím sběrnice CIB (Common Installation Bus), jejíž rozhraní řídící jednotka obsahuje. Součástí převodníku tedy musí být také rozhraní pro připojení zařízení na sběrnici CIB. Prostřednictvím sběrnice si bude řídící jednotka s převodníkem vyměňovat informace o konfiguraci parametrů převodníku a naměřená data. Z hlediska připojení použitelných senzorů bude převodník řešen jako univerzální. To znamená, že k němu bude možné připojit jak odporové senzory teploty, tak i termočlánky. Aby mohly být k převodníku připojeny oba druhy senzorů, musí mít převodník přizpůsobené vstupní rozhraní tak, aby bylo možné jednoduše zapojit oba typy senzorů pouhým přepojením svorek a softwarovou změnou konfigurace. Funkce celého zařízení bude řízena procesorem. Ten zajistí komunikaci s řídící jednotkou, řízení periferií a zpracování naměřených hodnot. Pro měření signálů z odporových čidel se použije A/D převodník, který bude spojen s procesorem přes seriové komunikační rozhraní SPI. Základním požadavkem je určení převodníku do hlavice čidel. Typů hlavic existuje několik, ale pro účely této práce se bude uvažovat hlavice typu B (podle DIN 43729). Rozměry hlavice jsou patrné z obrázku 3.1. V levé části obrázku je zachycen částečný řez s rozměry celé hlavice. V pravé části obrázku je zakreslen vnitřní prostor hlavice z pohledu shora.



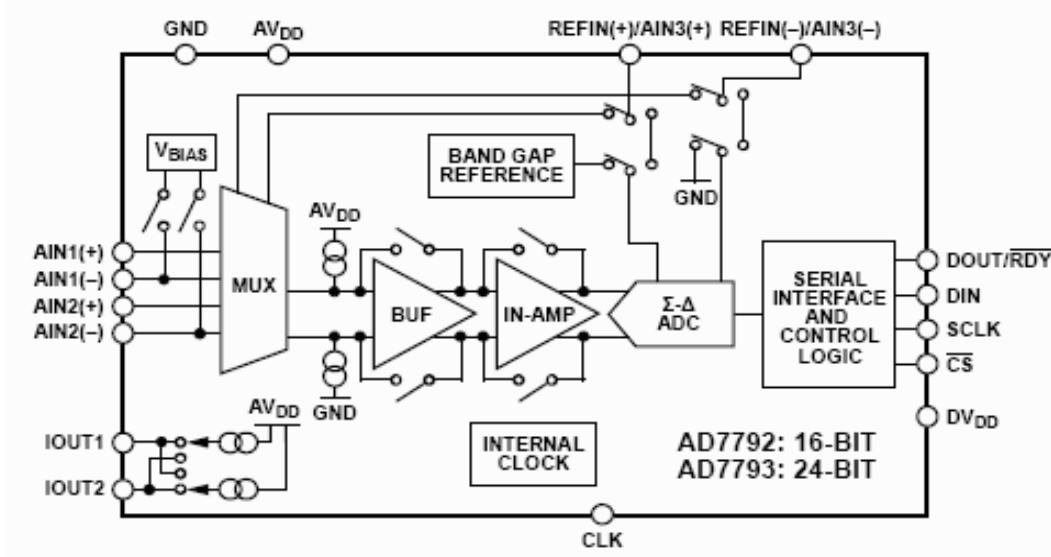
Obrázek 3.1: Hlavice typ B - rozměry

3.2 Výběr hardwaru

3.2.1 A/D převodník

Zpracování analogových signálů z čidel teploty bude zajištěno externím A/D převodníkem. Parametry převodníku pak budou mít hlavní vliv na přesnost měření a je tedy nutné vybrat převodník s co nejlepšími možnými vlastnostmi z hlediska požadované přesnosti a ceny. Pro zpracování signálů ze senzorů se nejčastěji používají převodníky se $\Sigma\Delta$ modulací. Tyto převodníky mají poměrně krátkou dobu převodu v řádu jednotek μs a velké rozlišení typicky 14-24 bitů. Z dostupných druhů A/D převodníků jsem po dohodě s vedoucím práce vybral AD7792 od firmy Analog Devices. Je to 16-bitový $\Sigma\Delta$ převodník s třemi analogovými kanály. Pro měření se typicky používají první dva analogové měřící kanály. Třetí kanál umožňuje připojení externího zdroje referenčního napětí. Tento kanál lze použít také jako měřící v případě, že se bude využívat interní napěťová reference převodníku. Pro generování napěťové reference bude sloužit obvod ADR291, který vytváří potřebné referenční napětí 2.5V. Použití externí reference je výhodnější z hlediska potlačení rušení. Rozsah vstupního napětí lze nastavit pomocí zesílení a lze ho tak po určitých krocích měnit od 19.53mV do 2.5V. Mezi součásti AD7792 patří i dva nastavitele proudové zdroje. Ty lze použít jako zdroje budícího proudu u odpovídajících

snímačů teploty. Hodnoty nastavitelných proudů u jednoho zdroje jsou 0.01mA, 0.21mA a 1mA. Oba proudové zdroje mají vývod na výstupní piny součástky. Lze tak navíc kombinovat připojení obou proudových zdrojů na jeden pin pouzdra. Pro komunikaci používá převodník sériové rozhraní SPI, které umožňuje jak nastavení parametrů A/D převodníku a tak přenos naměřených dat. Mezi další vlastnosti patří také možnost kalibrace jednotlivých kanálů. Při kalibraci provede převodník měření offsetu, nebo plného rozsahu a tyto hodnoty pak uloží do speciálního registru. Ty lze z těchto registrů vycítit a provést dodatečnou korekci měřených hodnot.

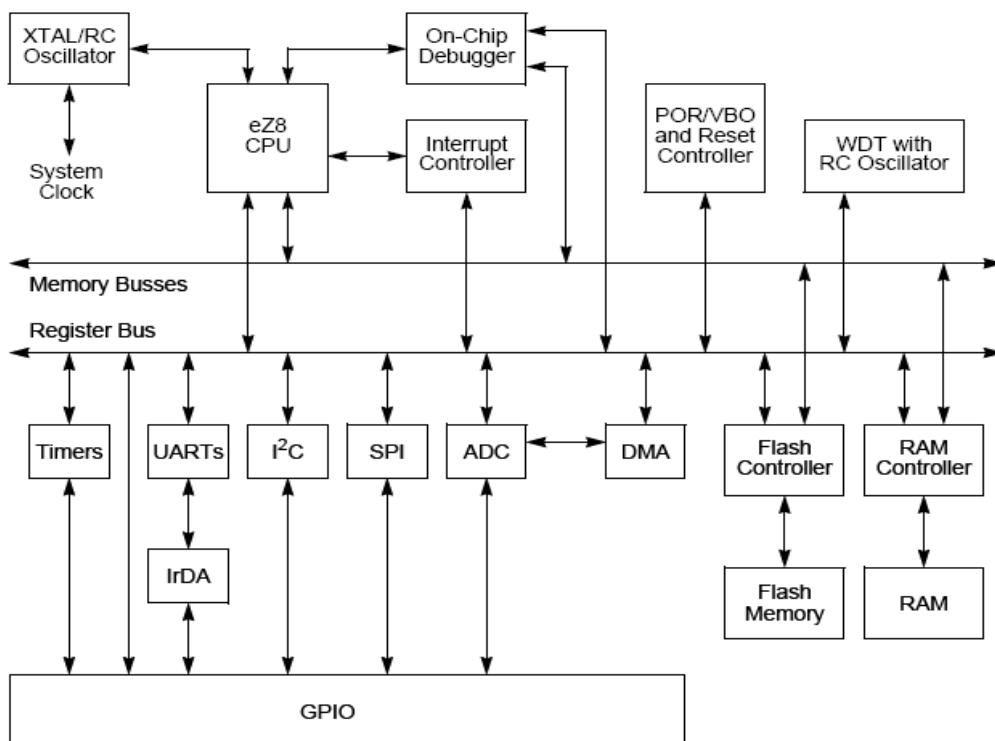


Obrázek 3.2: Blokové schéma A/D převodníku 7792

3.2.2 Procesor

Funkci celého zařízení bude řídit procesor Z8F4821 od firmy Zilog. Tento typ procesoru byl vybrán na základě požadavků zadavatele práce, vzhledem k jeho nasazení i v jiných modulech pro programovatelné automaty Tecomat Foxtrot. Z8F4821 patří do rodiny 8-bitových mikroprocesorů řady Z8 Encore!XP. Z hlediska paměťového prostoru má 48kB paměti flash a 4kB paměti RAM. Pro měření analogového napětí je procesor vybaven interním 10-bitovým A/D převodníkem, který lze připojit na jeden z osmi možných vstupů. Z interních obvodů dále obsahuje tři 16-bitové čítače s možností PWM modulace. Komunikaci s externími obvody umožňuje procesor prostřednictvím rozhraní SPI, I2C a UART. Systém přerušení dovoluje generovat až 24 druhů přerušení s třemi nastavitelnými

úrovněmi priorit. K dalšímu vybavení patří například řadič kanálu DMA nebo Watchdog. Pro tvorbu programů určených pro procesory od firmy Zilog existuje vývojové prostředí ZDS II. Výhodou použití tohoto prostředí je i možnost debugování programu přímo na procesoru, což umožňuje snadné ladění programu.



Obrázek 3.3: Blokové schéma procesoru Z8F4821

3.3 Komunikační rozhraní

3.3.1 Sběrnice CIB

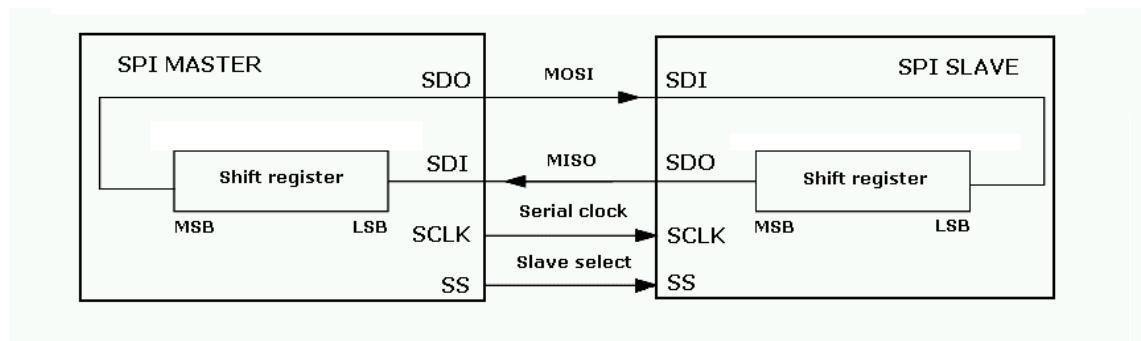
Mezi základní požadavky patří připojení zařízení na sběrnici CIB (Common Installation Bus). Tato sběrnice se používá zejména pro systémy domovní automatizace u jednotek Inels a Foxtrot ke komunikaci s distribuovanými prvky systému. CIB je dvouvodičová instalacní sběrnice, ke které je možné připojit až 32 periferních sběrnicových elektroinstalačních jednotek. Sběrnice zajišťuje jak přívod napájecího napětí, tak i komunikaci jednotlivých jednotek s nadřízeným systémem. Data pro komunikaci jsou modulována na

napájecí napětí. To umožňuje snadnou instalaci sběrnice pomocí dvouvodičového kabelu, pouze s tím, že je nutné dodržet polaritu jednotlivých vodičů. Sběrnice má volnou topologii a vyznačuje se velkým dosahem a snadnou rozšířitelností. Z hlediska přístupu na sběrnici se využívá principu master-slave. Stanice master řídí přístup na sběrnici a postupně oslovuje jednotlivé stanice slave, s kterými si vyměňuje informace o konfiguračním nastavení a datech. Pro jednoduché adresování má každá jednotka svoji vlastní unikátní šestnáctibitovou adresu. Systémy s centrálními jednotkami využívajícími CIB často obsahují rozhraní pro možnost připojení více větví sběrnice, protože na jednu větev je možné připojit pouze 32 jednotek. Například systém Tecomat Foxtrot dovoluje obsáhnout až 9 sběrnic a ve výsledku tak připojit až 288 zařízení. Aby bylo možné připojit více větví než poskytuje centrální jednotka, lze systém rozšířit pomocí externích modulů master. Tím je možné docílit rozšíření počtu možných připojitelních jednotek. Zároveň je tak možné zvýšit i rozsah celého systému, protože modul master může být spojen s řídící jednotkou až do vzdálenosti 300m pomocí metalického, nebo až 1,7km pomocí optického kabelu. Odezva systému je menší než 150ms a lze ji dosáhnout i při zapojení maximálního počtu jednotek na všech připojených větvích sběrnice CIB. Přenosová rychlosť dosahuje hodnoty 19,2 kb/s. Sběrnice má standardní napájecí napětí 24V DC, nebo 27V DC. Napájecí napětí 27V DC se používá především pro možnost trvalého dobíjení připojených akumulátorů, které v případě výpadku zajistí chod centrální jednotky včetně všech jednotek na sběrnici CIB.

3.3.2 Rozhraní SPI

Pro komunikaci mezi A/D převodníkem a procesorem se používá rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface). SPI je sériové rozhraní určené pro komunikaci procesoru s jinými integrovanými obvody systému. Metoda přístupu je založena na principu master-slave, kdy master řídí celý průběh komunikace. Pro komunikaci se používají 4 signály. K přenosu dat slouží dva vodiče. MISO (Master Input Slave Output), který se používá pro přenos dat ze stanice master do stanice slave a MOSI (Master Output Slave Input), který se používá pro přenos dat ze stanice slave do master. Data jsou tak přenášena v obou směrech po samostatných vodičích. Obvod master obsahuje generátor hodinového signálu, kterým se synchronizuje výměna dat během komunikace. Signál SS (Slave select) slouží k aktivaci obvodu slave. Obrázek 3.4 zachycuje způsob propojení dvou stanic pomocí rozhraní SPI. Jedna stanice představuje z hlediska rozhraní SPI stanici master a druhá stanici slave. Obě zařízení obsahují v zjednodušeném případě posuvný registr (Shift Register) určený pro

komunikaci. Tento registr slouží k současnému bitovému vysílání a příjmu jednoho celého bytu. Při posunu obsahu tohoto registru dojde k vyslání hodnoty bitu na výstupní pin zařízení SDO. Logická hodnota vyslaného bitu se zároveň přečte na vstupním pinu SDI druhého zařízení a je zapsána do nejnižšího bitu jeho posuvného registru. Vysílání i příjem jednoho bitu je tedy nedělitelná operace, která vždy proběhne ve stejný okamžik, takže posun registru probíhá v obou zařízeních současně. Při přenosu generuje stanice pracující v režimu master hodinové impulsy, na svém pinu SCLK. Pomocí těchto hodinových pulsů se provádí synchronizace vysílání i příjmu dat tzn., že se synchronizují okamžiky, ve kterých dochází k posunu registrů.



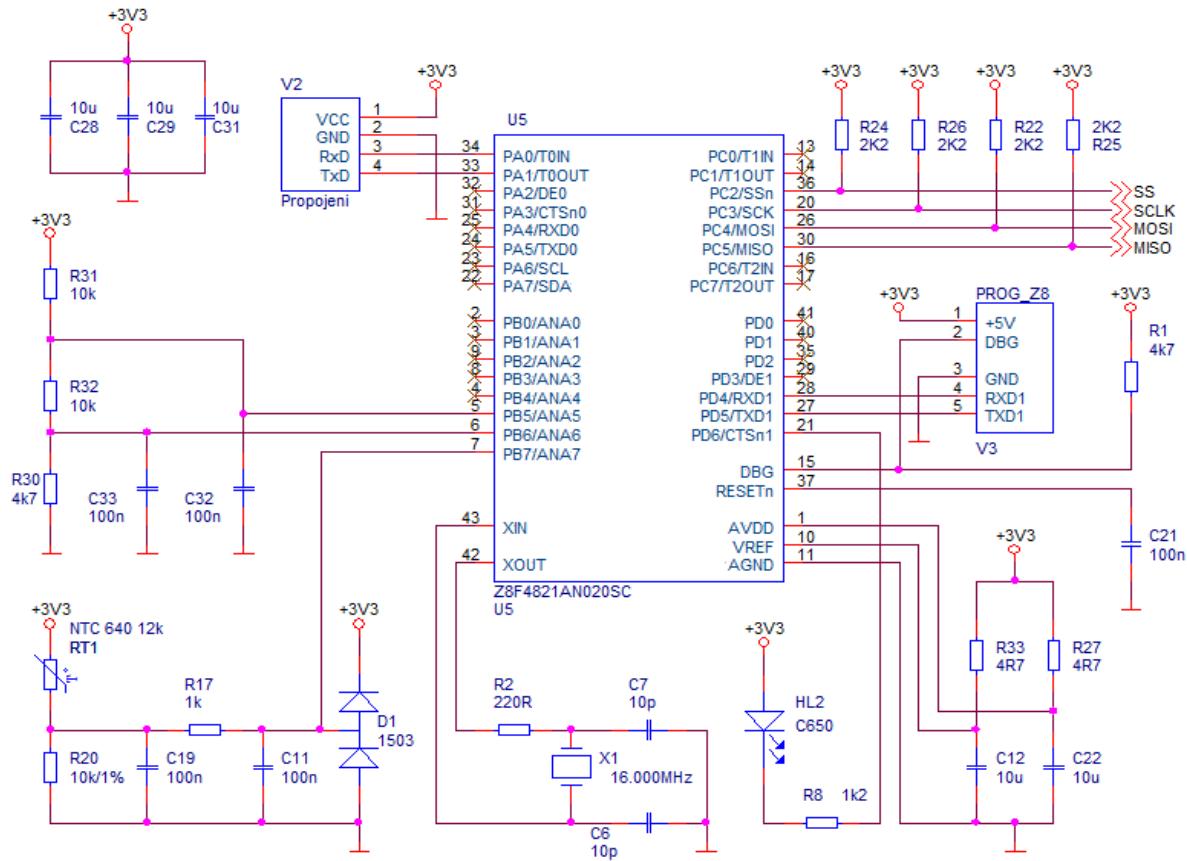
Obrázek 3.4: Propojení rozhraní SPI (Master - slave)

Kapitola 4

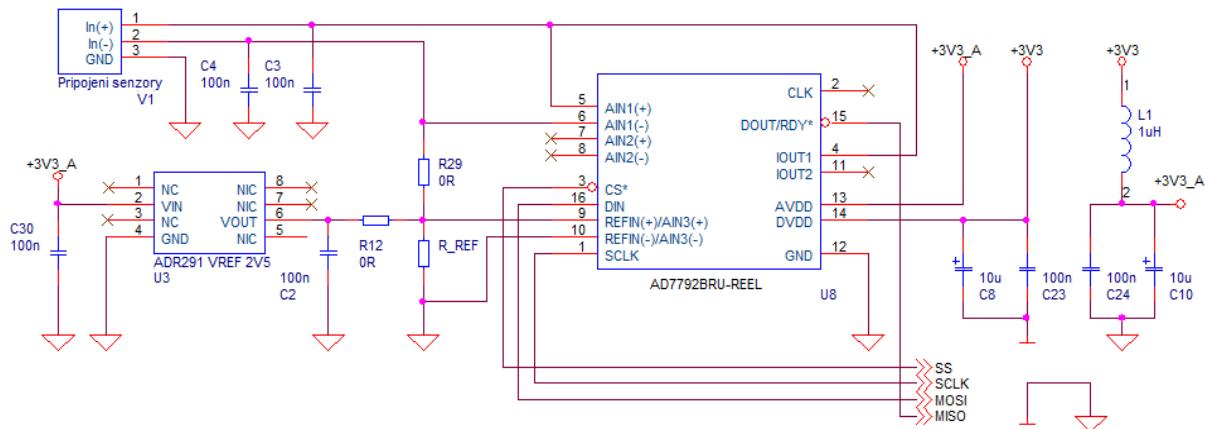
Realizace prototypu

4.1 Obvodové řešení

Obvodové zapojení lze rozdělit do tří částí. První část obsahuje zapojení řídícího obvodu viz. Obrázek 4.1. Procesor Z8F48A21 představuje centrální prvek zapojení, ke kterému jsou připojeny veškeré periferní obvody umožňující vykonávat požadované funkce zařízení. Pro vlastní chod procesoru jsou určeny obvod oscilátoru s krystalem 16MHz, kondenzátory pro blokování napájení a konektor pro programování. K měření vnitřní teploty převodníku slouží termistor NTC640 12k, který je zapojen do série s rezistorem R_{20} . Úbytek napětí na tomto rezistoru se snímá prostřednictvím interního A/D převodníku procesoru na analogovém vstupu ANA7. Na vstupy ANA5 a ANA6 se privádí napětí z odporového děliče, který lze použít pro případnou kalibraci měření vnitřní teploty. Spojení řídícího obvodu s měřící částí zařízení zajišťuje procesor prostřednictvím rozhraní SPI. Druhá část obvodového zapojení je určena pro měření signálu z externích senzorů viz. Obrázek 4.2. Pro měření signálů ze senzorů a zároveň komunikaci s měřící částí slouží externí A/D převodník AD7792. Komunikace s řídící částí (procesorem) probíhá přes rozhraní SPI. Pro generování referenčního napětí bude k převodníku připojen obvod ADR291, který dodává napětí 2.5V. Alternativně lze také využít i interní napěť využitou referenci převodníku, která poskytuje napětí 1.17V. Funkce obvodu dále vyžaduje oddělení analogového napájení pomocí filtrační tlumivky L_1 , aby nedocházelo k případnému rušení od digitální části zařízení. Pro potřeby testování různých variant měření signálu obsahuje zapojení navíc dva nulové rezistory R_{12} a R_{29} . Tyto rezistory slouží pouze jako propojky, které budou osazeny pouze v některých případech.

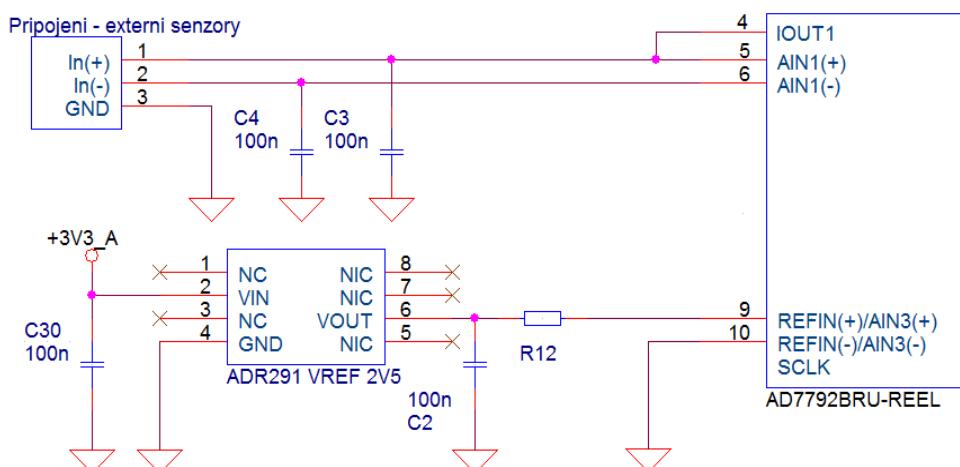


Obrázek 4.1: Zapojení převodníku - řídící část



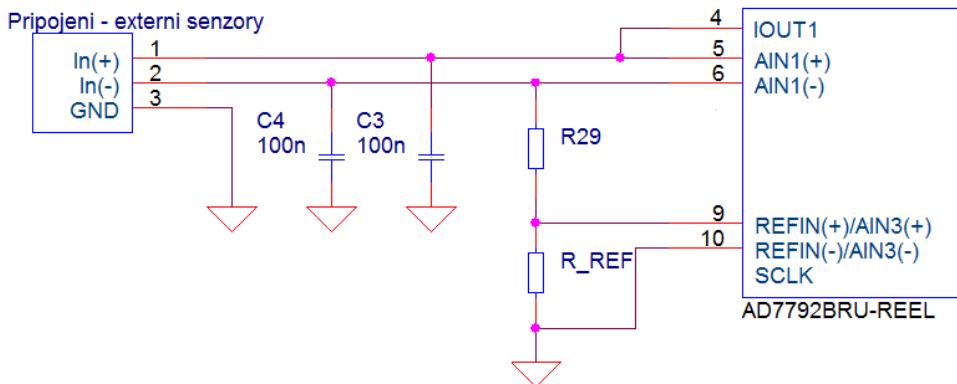
Obrázek 4.2: Zapojení převodníku - měřící část

Pro realizaci různých možností vyhodnocení signálu z externích čidel jsem vytvořil několik variant měřící části obvodu viz. Obrázek 4.2. Po dohodě s vedoucím práce bylo rozhodnuto pro hardwarovou realizaci následujících dvou možností. U první varianty zapojení viz. Obrázek 4.3 zůstanou neosazeny rezistory R_{REF} a R_{29} . Osazen bude pouze rezistor R_{12} , kterým se připojí napěťová referece k A/D převodníku. Výstup proudového zdroje IOUT1 je přiveden na vstup měřícího kanálu AIN1(+). Nastavení proudového zdroje se liší podle druhu použitého senzoru. Při měření s odporovými senzory dodává zdroj měřící proud do obvodu. Ten pak protéká přes senzor, na kterém vzniká úbytek napětí. Pro správnou funkci, musí být navíc propojeny svorky IN(-) a GND na vstupní svorkovnici. U měření pomocí termočlánků nesmí být naopak zdroj proudu aktivní, aby neovlivňoval měření. Čidla se pak k převodníku připojují přes svorky IN(+) a IN(-).



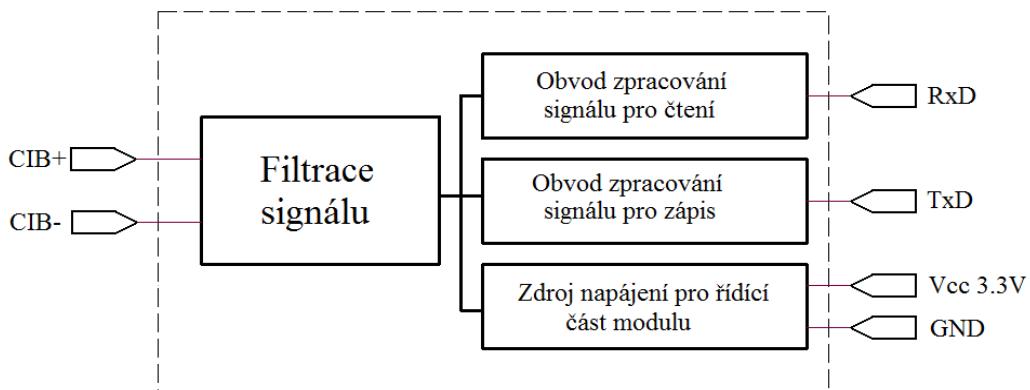
Obrázek 4.3: Zapojení měřící části - varianta 1

V případě druhé varianty zapojení viz. Obrázek 4.4 není zapojena externí napěťová reference, neboli není osazen rezistor R_{12} . Naopak jsou osazeny rezistory R_{REF} a R_{29} . K vstupu AIN1(+) je jako v předchozím případě připojen proudový zdroj IOUT1. Proud ze zdroje protéká přes odporový senzor a zároveň také přes referenční rezistor R_{REF} . Tento rezistor se využívá pro korekci chyby zbůsobenou nepřesností proudového zdroje. Ze znalosti velikosti odporu a úbytku napětí na něm lze určit skutečnou velikost měřícího proudu. Zjištěná hodnota se tak použije při výpočtu měřeného odporu senzoru a tak koriguje chybu, která vznikla nepřesností proudového zdroje. U měření teploty termočlánkem musí opět zůstat neaktivní proudový výstup. Senzory se připojují na svorkovnici přes svorky IN1(+) a IN1(-).



Obrázek 4.4: Zapojení měřící části - varianta 2

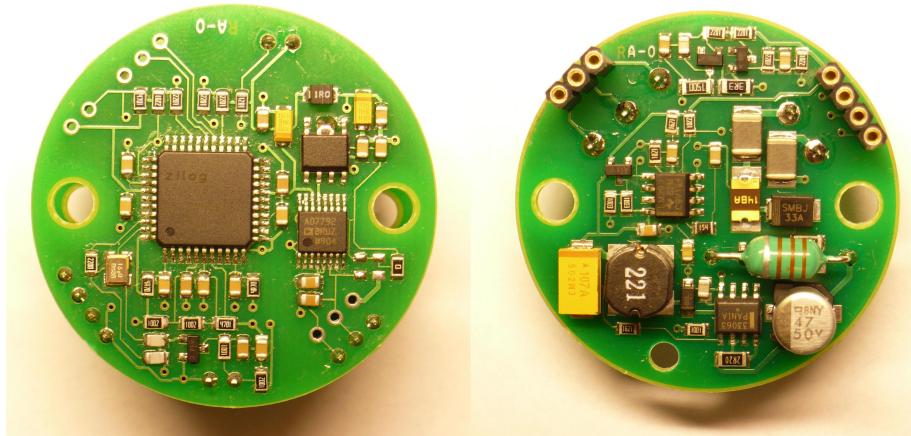
Třetí část obvodového zapojení představuje interface sběrnice CIB, jehož blokové schéma je uvedeno na obrázku 4.5. Vstupní signál se nejprve přivádí do obvodu určeného pro filtraci signálu, aby se zamezilo případnému rušení ze sběrnice. Po sběrnici se vysílá jak komunikační signál, tak i napájení. V dalších obvodech se tedy následně odděluje datový signál od napájecího napětí. Výstupem z obvodů zpracování jsou signály RxD pro čtení a TxD pro zápis na sběrnici CIB. Zařízení je napájeno přímo ze sběrnice CIB napětím 24V DC a nepotřebuje další napájecí zdroj. Měřením jsem ověřil příkon převodníku $P = 0.141W$. Rozhraní CIB obsahuje obvod napájení, který vytváří napětí o velikosti 3.3V pro řídící a měřící část zařízení. Podklady pro realizaci obvodového řešení interface CIB poskytla firma Teco, která považuje sběrnici CIB za součást jejího technologického know-how. Vzhledem k tomu tedy není možné v této práci uvést podrobné schéma zapojení.



Obrázek 4.5: Interface CIB - blokové schéma

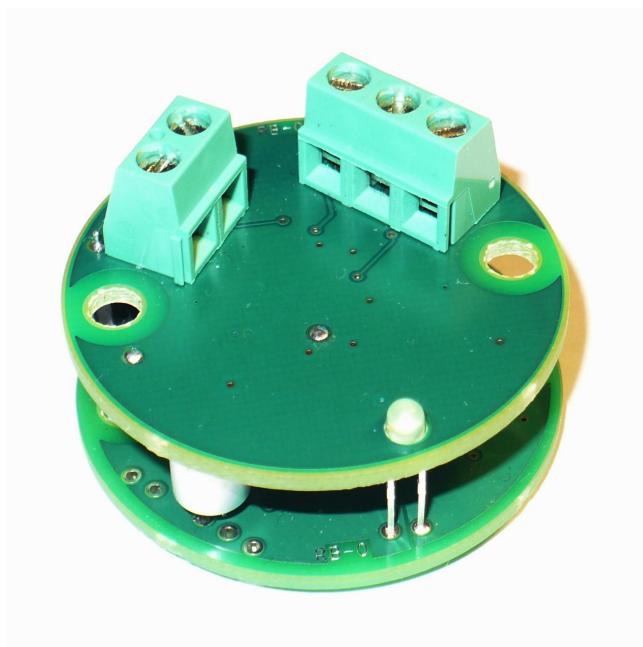
4.2 Mechanické řešení

Mechanické řešení musí vyhovovat požadavku umístění převodníku do hlavice čidel viz. Obrázek 2.1. To vyžaduje přizpůsobit zejména výsledné rozměry zařízení. Obvodové zapojení je realizováno na desce plošného spoje a výsledné rozměry tak budou dány právě velikostí této desky. Při návrhu jsem vyzkoušel několik možností rozmístění součástek a tvaru plošného spoje, aby bylo možné výslednou realizaci umístit do hlavice čidel. Původní záměr realizovat všechny obvody na jednu desku nebylo možné docílit vzhledem k množství součástek a maximální velikosti jednoho plošného spoje. Dalším problémem bylo připojení přívodních vodičů a montáž zařízení do hlavice. Nejlepším řešením se ukázalo použití dvou desek ve tvaru kruhu kopírující tvar hlavice. Zařízení lze rozdělit jak z hlediska plošných spojů, tak i funkčně na dvě části. Prototyp převodníku se skládá ze dvou desek plošných spojů tvaru kruhu o průměru 42mm. Ty se fyzicky nachází nad sebou ve vzdálenosti cca 9mm. Horní část (deska) zařízení představuje vstupní rozhraní převodníku. Na vrchní stranu této desky byly umístěny svorkovnice pro připojení vodičů sběrnice CIB a senzorů teploty. Z tohoto důvodu nejsou na této straně osazeny žádné součástky, aby je nebylo možné poškodit při montáži přívodních vodičů. Popis jednotlivých svorek je uveden na obrázku 4.8. Na spodní straně desky jsou osazeny součástky rozhraní CIB a vyvedeny konektory pro přechod signálů do spodní části zařízení. Dolní část zařízení, neboli spodní deska, obsahuje zapojení částí pro řízení funkce převodníku a měření signálu. Návrhy obou plošných spojů jsem vytvořil v programu OrCAD. Z důvodů minimalizace rozměrů byla použita většina součástek v provedení SMD. Pro realizaci jsem použil dvoustranné desky s možností povrchové montáže součástek také z obou stran.

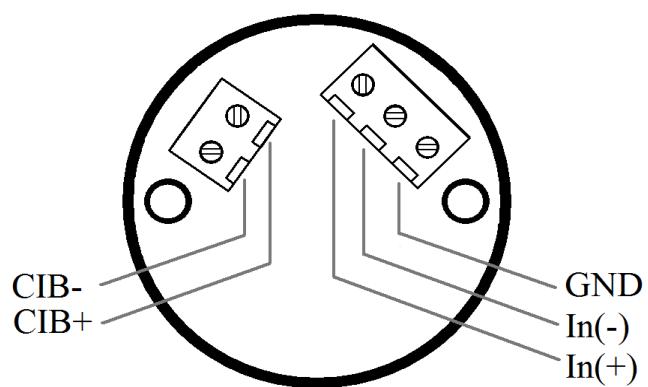


Obrázek 4.6: Ukázka osazených plošných spojů

Převodník se upevňuje do hlavice pomocí dvou šroubů. Pro účely montáže tak jsou v plošných spojích vytvořeny díry o průměru 4.3mm. Mezi oběma deskami jsou v místě děr pro šrouby dva duté válečky zajišťující odstup obou desek. Ve výsledku tak upevňovací šrouby prochází oběma válečky. Obrázek 4.6 obsahuje ukázku osazených plošných spojů. Na obrázku 4.7 je pak zachycen celý převodník. Obrázky návrhu plošných spojů z programu OrCAD Layout jsou součástí práce jako příloha C.

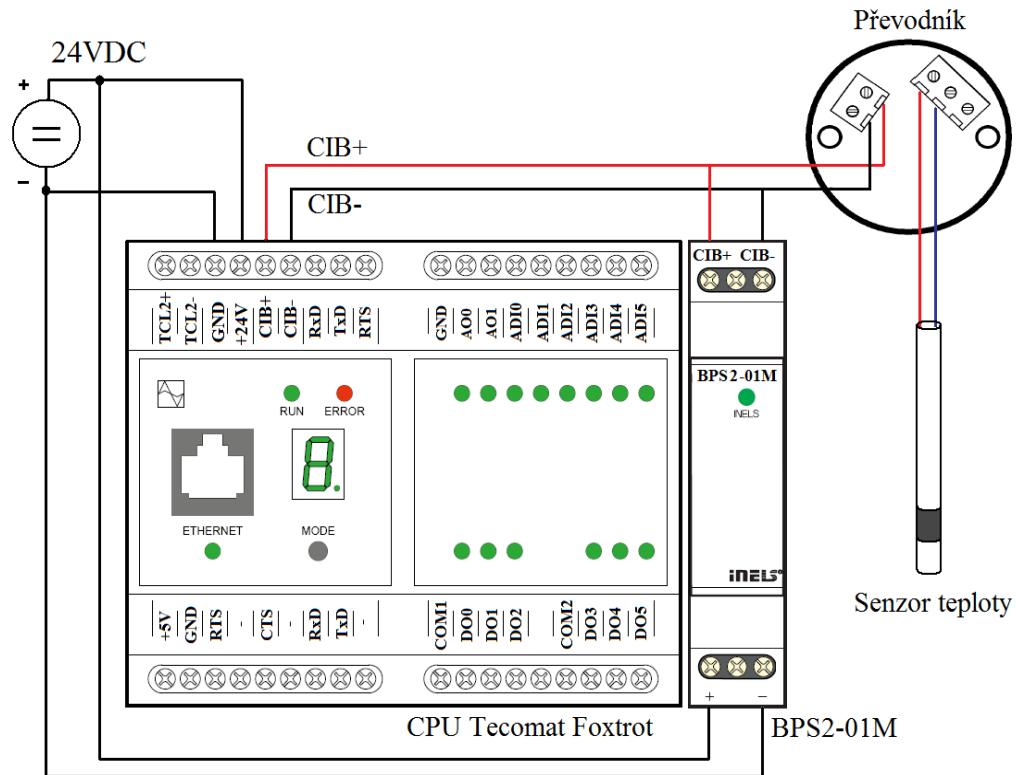


Obrázek 4.7: Prototyp převodníku



Obrázek 4.8: Označení vstupních svorek převodníku

Na obrázku 4.9 je uvedeno schéma zapojení, které jsem použil pro připojení prototypu převodníku k řídícímu systému Tecomat Foxtrot pomocí sběrnice CIB. Pro testování jsem měl k dispozici centrální jednotku CP-1005. Tato jednotka obsahuje několik vlastních digitálních i analogových vstupů, a také vývody pro připojení komunikačních sběrnic jako jsou například TCL2 a CIB. Ke spojení PC a centrální jednotky jsem využil rozhraní Ethernet, které je přímo součástí jednotky. Prostřednictvím Ethernetu lze realizovat spojení s vývojovým prostředím Mosaic. Z tohoto prostředí lze ovládat režim jednotky, nahrávat aplikační program a provádět konfiguraci systému. Zároveň je možné sledovat stav jednotky a jednotlivé proměnné za běhu programu. Těchto možností jsem využil při testování chodu zařízení, ladění komunikace a měření. Jednotka CP-1005 obsahuje jednoho interního mastera sběrnice CIB jehož rozhraní je vyvedeno na svorkách pouzdra. Jmenovité napájecí napětí sběrnice CIB i jednotky Tecomat je 24V DC. U sběrnice se navíc pro správnou funkci musí provést oddělení komunikačního signálu od napájení. K tomu jsem použil oddělovací zařízení BPS2-01M, které se používá pro impedanční přizpůsobení napájení sběrnice. Výstupy z oddělovače BPS2-01M jsem přivedl na vodiče sběrnice.



Obrázek 4.9: Zapojení řídící jednotky

Tyto vodiče CIB+ a CIB- jsem podle označení připojil k centrální jednotce i převodníku. K vstupním svorkám převodníku, které popisuje obrázek 4.8, jsem připojoval externí senzor teploty. Externí senzor je umístěn ve stonku, který vychází z hlavice. Zařízení má navíc ještě jeden vnitřní teploměr, který je přímo součástí převodníku. Signály ze senzorů, kterými mohou být hodnota odporu nebo napětí, se zpracovávají přímo a do centrální jednotky se posílá převedená hodnota teploty. Kompletní zařízení není jen samotný převodník, ale celá sestava společně s hlavicí. Některé mechanické parametry zařízení jsou tak dány právě vlastnostmi použité hlavice. V tabulce 4.1 je uvedeno shrnutí základních parametrů kompletного zařízení.

Tabulka 4.1: Parametry zařízení

Napájecí napětí	Ze sběrnice CIB/ 24 (27) VDC
Odběr ze sběrnice CIB	6.4mA (0.141W)
Provozní teplota	-20 ÷ + 70°C
Stupeň krytí	IP54
Montáž přívodních kabelů	1x průchodka
Připojení CIB	Pevná svorkovnice

Kapitola 5

Zpracování signálů senzorů teploty

Pro měření teploty se uvažuje několik různých druhů senzorů, jejichž základní fyzikální principy a vlastnosti jsou popsány v 2. kapitole. Tato kapitola se zabývá zpracováním měřených veličin a výpočtem hodnoty teploty pro jednotlivé typy použitých čidel v závislosti na vlastnostech měřícího řetězce. Fyzikální veličinou, kterou lze prostřednictvím realizovaného převodníku měřit, je elektrické napětí. Musí se tedy bud' použít senzory s napěťovým výstupem jako jsou termočlánky, nebo zajistit převod teplotně závislé veličiny na napětí, jako v případě odporových senzorů.

5.1 Odpovědě senzory teploty

Průchodem měřícího proudu vzniká na senzoru úbytek napětí, který se měří externím A/D převodníkem. Výpočet měřeného napětí z kódového slova A/D převodníku udává rovnice 5.1., kde *Code* vyjadřuje zakódovanou hodnotu napětí, V_{REF} referenční napětí, $GAIN$ zesílení a N počet bitů rozlišení.

$$U_{AI} = \frac{\text{Code } V_{REF}}{GAIN \ 2^N} \quad [V] \quad (5.1)$$

Pro zpřesnění měřené hodnoty můžeme využít interní kalibraci A/D převodníku. Kalibrace umožňuje určit hodnotu napěťového offsetu. Tato hodnota se použije pro korekci napětí při výpočtu odporu senzoru. Výsledný odpor pak můžeme určit dle Ohmova zákona pomocí vztahu 5.2., kde U_{AI} představuje měřené napětí na senzoru, U_{OFFSET} napěťový offset a I_{OUT} měřící proud. Přesný výpočet hodnoty odporu zavisí na přesnosti všech proměnných ve vzorci. I malá odchylka od nominální hodnoty může například způsobit

chybu až několik desetin Ohmu, což může u některých druhů čidel vést k chybě teploty až kolem jednoho stupně. Tato chyba vzniká nepřesností parametrů součástek a nelze ji kompenzovat univerzální úpravou hodnot ve výpočtu, pro všechna zařízení. Jednou z možností jak tuto chybu korigovat, je kalibrace každého zařízení zvlášť, kdy se určí přesně jednotlivé hodnoty parametrů, které způsobují největší chybu. Tento způsob korekce výpočtu však není příliš vhodný z hlediska hromadné sériové výroby zařízení. Jinou možností je přímé měření parametrů, které způsobují chybu a jejich následná automatická úprava. U této metody se ovšem musí navíc zajistit měření chybové veličiny, což ovšem není vždy možné.

$$R_{RTD} = \frac{U_{AI} + U_{OFFSET}}{I_{OUT}} \quad [\Omega] \quad (5.2)$$

Vztah 5.2 platí pro první variantu zapojení viz. podkapitola 4.1.2. Pokud budeme uvažovat druhou variantu zapojení, musíme do vzorce zahrnout i výpočet měřícího proudu viz. rovnice 5.3 Hodnotu proudu určíme jako podíl napětí, naměřeného na referenčním rezistoru a jeho odporu.

$$R_{RTD} = \frac{(U_{AI} + U_{OFFSET}) R_{REF}}{U_{R-REF}} \quad [\Omega] \quad (5.3)$$

Největší vliv na přesnost určení teploty resp. odporu senzoru má proudový zdroj A/D převodníku. Velikost chyby měřícího proudu od nominální hodnoty se pohybuje v rozsahu 5%. To způsobuje problém u první varianty zapojení, kde uvažujeme pevnou hodnotu měřícího proudu při výpočtu. Při testování této varianty jsem měl možnost ověřit přesnost proudového zdroje na několika kusech zařízení. Výsledná chyba výpočtu odporu se pohybovala v řádu jednotek ohmů. Tento nedostatek lze odstranit externí kalibrací, kdy se skutečná hodnota měřícího proudu určí pro každý kus výrobku zvlášť. Jako výhodnější se tedy jeví druhá varianta zapojení, při níž se navíc měří i hodnota měřícího proudu. Zařízení je tak v podstatě schopné provádět korekci vzniklé chyby automaticky. Vliv na přesnost měření má i zvolená velikost měřícího proudu. Při malé hodnotě vzniká na senzoru malý úbytek napětí. Signál má tak malý odstup od šumu a dochází ovlivnění měřené hodnoty. Naopak při velké hodnotě proudu může dojít k vlastnímu ohřátí čidla a to pak měří nejen teplotu okolí, ale navíc i svou vlastní.

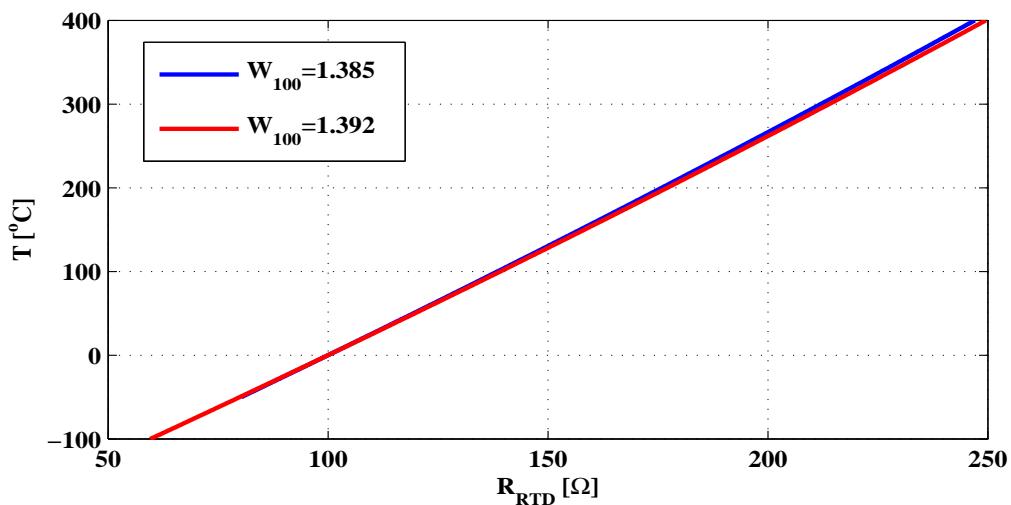
5.1.1 Pt100 a Pt1000

Tyto odporové senzory se vyrábí ve dvou variantách podle rozdílných druhů norem. Varianty se liší různým teplotním koeficientem $W_{100} = 1.385$ a $W_{100} = 1.391$, a také svým průběhem závislosti odporu na teplotě. Pro účely této práce uvažujeme senzory od firmy Regmet. Jak pro senzory Pt100, tak i Pt1000 se rozlišují dvě třídy přesnosti viz. Tabulka 5.1.

Tabulka 5.1: Třídy přesnosti senzorů Pt100 a Pt1000

Třída přesnosti	Tolerance
A	$\Delta T = \pm(0,15 + 0,002 \cdot t) [^{\circ}\text{C}]$
B	$\Delta T = \pm(0,3 + 0,005 \cdot t) [^{\circ}\text{C}]$

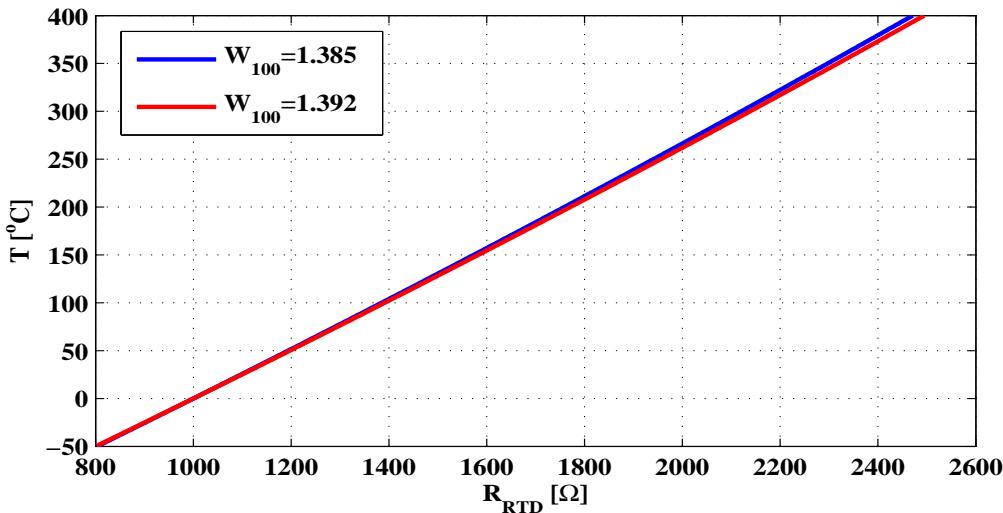
Teplotní rozsah je stejný u obou typů a pohybuje se v hodnotách od -50 do 400°C. Doporučená a maximální velikost měřícího proudu pro čidlo Pt100 mají hodnotu 1mA a 5mA. Pro Pt1000 jsou poté doporučená hodnota měřícího proudu 0.3mA a maximálního 2mA. Velikost měřícího proudu není možné nastavit libovolně vzhledem k jeho generování A/D převodníkem. Z tohoto důvodu tak bude jeho hodnota 1mA pro senzory Pt100 a 210μA pro Pt1000. Závislost teploty na odporu senzoru je vidět na obrázcích 5.1 a 5.2. Měřenou teplotu můžeme určit pomocí vztahů 5.4 a 5.5 pro Pt100, 5.6 a 5.7 pro Pt1000.



Obrázek 5.1: Závislost teploty na odporu senzoru Pt100

$$\vartheta_{W1.385}(R) = (((2.28 \cdot 10^{-9} \cdot R - 6.33 \cdot 10^{-7}) \cdot R + 1.071 \cdot 10^{-3}) \cdot R + 2.353) \cdot R - 245.6 \quad (5.4)$$

$$\vartheta_{W1.392}(R) = -242.4964 + 2.343 \cdot R + 7.385 \cdot 10^{-4} R^2 + 0.744 \cdot 10^{-7} R^3 \quad (5.5)$$



Obrázek 5.2: Závislost teploty na odporu senzoru Pt1000

$$\vartheta_{W1.385}(R) = (((2.28 \cdot 10^{-12} \cdot R - 6.33 \cdot 10^{-9}) \cdot R + 1.071 \cdot 10^{-4}) \cdot R + 2.353) \cdot 0.1 \cdot R - 245.6 \quad (5.6)$$

$$\vartheta_{W1.392}(R) = -242.496 + 2.343 + 0.738598317 \cdot 10^{-4} R^2 + 7.4402 \cdot 10^{-7} R^3 \quad (5.7)$$

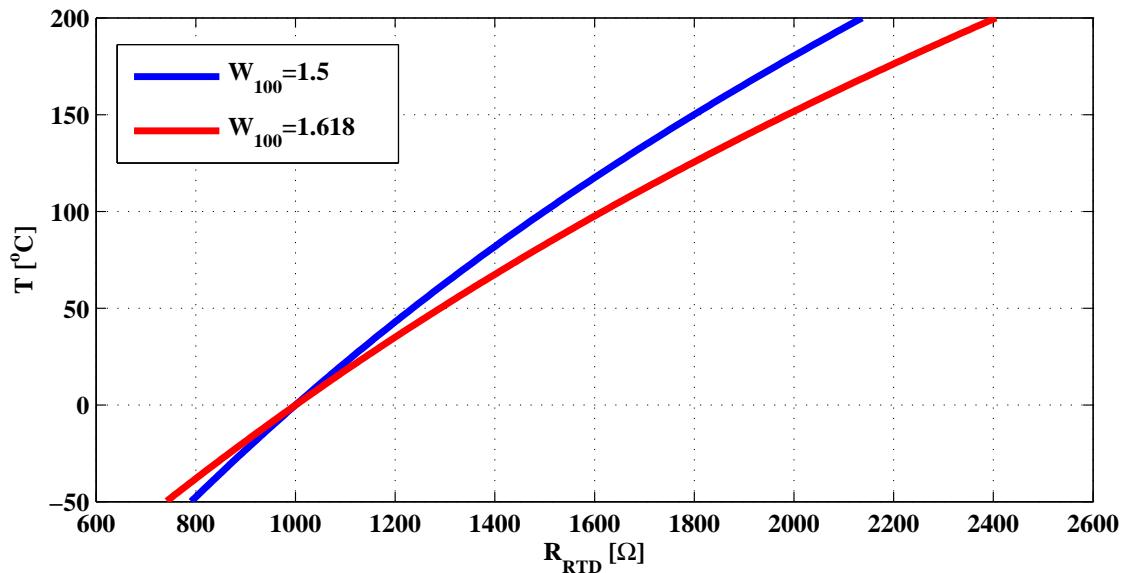
5.1.2 Ni1000

Senzory Ni1000 se opět vyrábí ve dvou variantách s teplotními koeficienty $W_{100} = 1.5$ a $W_{100} = 1.618$. Pro tato čidla jsou definovány dvě třídy přesnosti viz. Tabulka 5.2.

Tabulka 5.2: Třídy přesnosti senzoru Ni1000

Třída přesnosti	Tolerance pto t = - 50 až 0 °C	Tolerance pro t = 0 až 200 °C
A	$\Delta T = \pm(0,2 + 0,014 \cdot t) [°C]$	$\Delta T = \pm(0,2 + 0,0035 \cdot t) [°C]$
B	$\Delta T = \pm(0,4 + 0,028 \cdot t) [°C]$	$\Delta T = \pm(0,4 + 0,0070 \cdot t) [°C]$

Šířka teplotního rozsahu se pohybuje od -50 do 200°C. Doporučená velikost pro měřící proud je 0.3mA a pro maximální 2mA. Skutečná hodnota ale opět závisí na možnostech proudového zdroje a tak velikost budícího proudu bude 210μA. Závislost teploty na odporu senzoru lze vidět z průběhů viz. obrázek 5.3. Teplotu můžeme určit pomocí vztahů 5.8 a 5.9.



Obrázek 5.3: Závislost teploty na odporu senzoru Ni1000

$$\vartheta_{W1.5}(R) = (((-4.783 \cdot 10^{-11} \cdot R + 3.375 \cdot 10^{-7}) \cdot R - 1.132 \cdot 10^{-3}) \cdot R + 3.268) \cdot 0.1 \cdot R - 242.56 \quad (5.8)$$

$$\vartheta_{W1.618}(R) = 5.289 \cdot 10^{-7} R^3 - 5.1829 \cdot 10^{-5} R^2 + 0.2702 R - 223.8024 \quad (5.9)$$

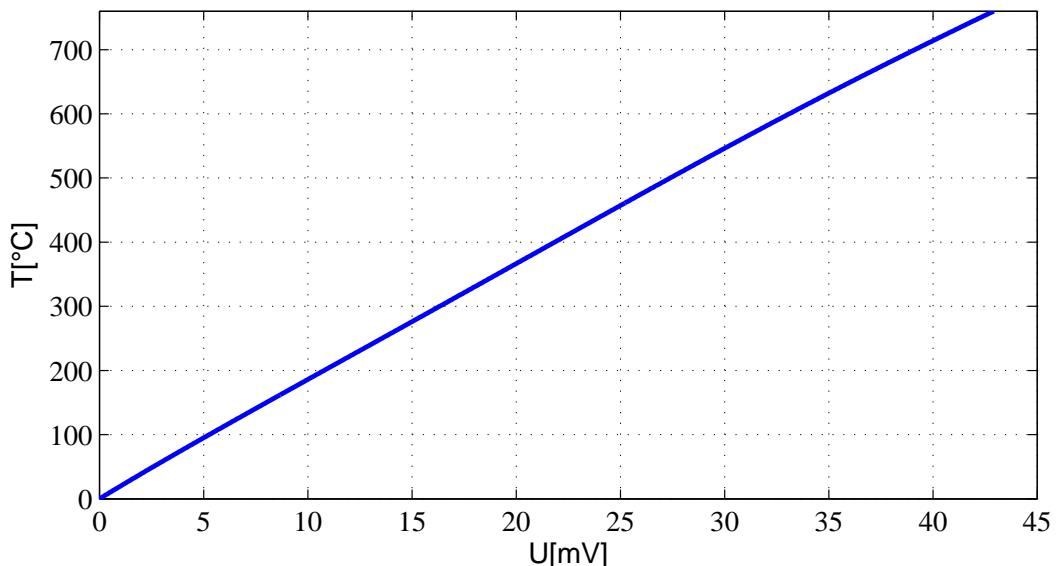
5.2 Termočlánky

Druhou kategoríí čidel, které bude možné připojit k převodníku jsou termočlánky. Termočlánky fungují na principu Seebeckova jevu. Na jejich srovnávacích koncích se objevuje napětí úměrné rozdílu teplot srovnávacího a měřícího konce. Toto napětí se měří pomocí A/D

převodníku. Z kódového slova A/D převodníku lze vypočítat hodnotu napětí podle vztahu 5.1. Pro účely této práce uvažujeme použití termočlánku typu J. Teplotní rozsah jeho použití je 0 až 760°C . Charakteristiku termočlánku můžeme vyjádřit polynomem pátého řádu podle vztahu 5.10.

$$\vartheta(U) = a_0 + a_1U + a_2U^2 + a_3U^3 + a_4U^4 + a_5U^5 \quad (5.10)$$

Teplota vypočtená podle vztahu 5.10 odpovídá pouze rozdílu teplot obou konců termočlánku. Skutečnou hodnotu v místě měřícího konce dostaneme, pokud sečteme teplotu v místě srovnávacího konce a hodnotu vypočtenou podle vzorce.



Obrázek 5.4: Závislost teploty na napětí termočlánku J

Konstanty termočlánku J:

- $a_0 = -0.048868252$
- $a_1 = 19873.14503$
- $a_2 = 218614.5353$
- $a_3 = 11569199.78$
- $a_4 = 264917531.4$
- $a_5 = 2018441314$

5.3 Termistory

Pro měření vnitřní teploty převodníku se používá termistor NTC640 12k. Termistor je zapojen do série s pomocným rezistorem R_S o hodnotě $10k\Omega$ viz. Obrázek 4.1. Zapojení představuje napěťový dělič připojený ke zdroji napětí 3.3V. Napětí se měří na pomocném rezistoru prostřednictvím interního A/D převodníku procesoru. Výpočet úbytku napětí U_{RS} na referenčním rezistoru z kódového slova lze určit podobně jako u kovových odpovových senzorů pomocí vztahu 5.1, kde $GAIN$ odpovídá jednotkovému zesílení a $N=10$. Hodnotu odporu termistoru pak můžeme vypočítat podle vztahu 5.11.

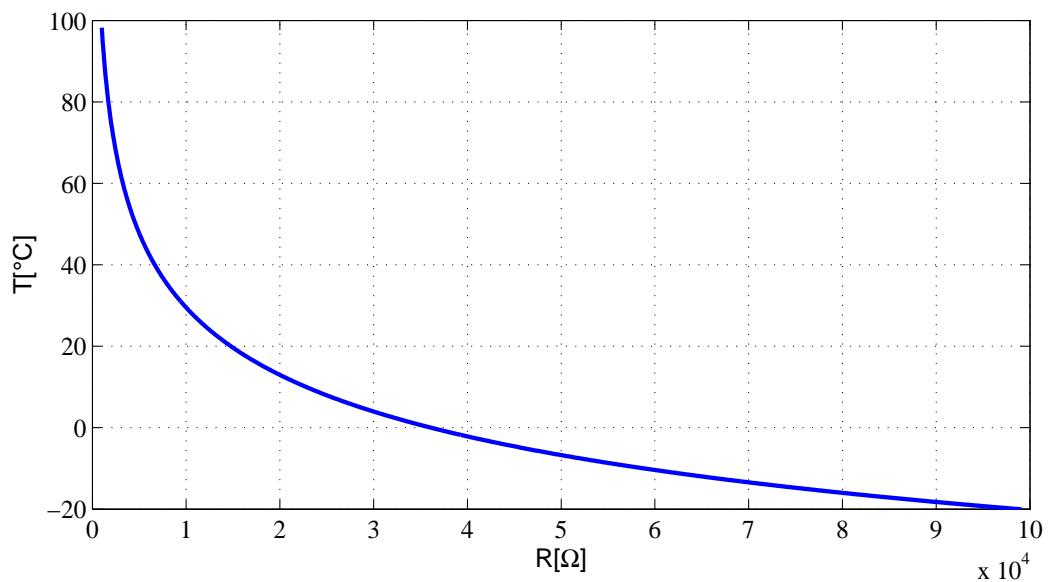
$$R_{NTC} = \left(\frac{R_S}{U_{REF}} U_{REF} \right) - R_S \quad [\Omega] \quad (5.11)$$

Hodnota odporu termistoru $12k\Omega$ odpovídá $25^\circ C$. Teplotu můžeme určit pomocí změřeného odporu podle vztahu 5.12, který udává výrobce. Konstanty A, B, C, D vyjadřují charakteristiku senzoru a R_{REF} odpor termistoru při referenční teplotě $25^\circ C$. Termistor NTC640 se používá nejen k orientačnímu měření vnitřní teploty zařízení, ale také k měření pomocí termočlánku. Problémem u termočlánků je vliv kolísání teploty srovnávacích konců. V tomto případě můžeme tento problém odstranit číslicovou korekcí, ke které lze využít právě interní čidlo. Senzor v podstatě meří teplotu srovnávacího konce, která se používá při výpočtu skutečné hodnoty viz. předchozí část.

$$\vartheta(R_{NTC}) = \left(A + B \ln \frac{R_{NTC}}{R_{REF}} + C \ln^2 \frac{R_{NTC}}{R_{REF}} + D \ln^3 \frac{R_{NTC}}{R_{REF}} \right)^{-1} \quad [K^{-1}] \quad (5.12)$$

Konstanty termistoru NTC640 12k:

$$\begin{aligned} -A &= 3.354016 \cdot 10^{-3} \\ -B &= 2.744032 \cdot 10^{-4} \quad K^{-1} \\ -C &= 3.666944 \cdot 10^{-6} \quad K^{-2} \\ -D &= 1.375492 \cdot 10^{-7} \quad K^{-3} \end{aligned}$$



Obrázek 5.5: Závislost teploty na odporu termistoru NTC

Kapitola 6

Vývoj softwaru

Vývoj softwaru spočívá ve vytvoření programu pro řízení funkcí celého zařízení. Řídícím prvkem zařízení je procesor Z8F4821, který bude daný program vykovavat. Pro psaní kódu jsem využil vývojové prostředí určené pro procesory od firmy Zilog ZDSII ve verzi 4.9.6. Vlastní program jsem poté napsal v jazyce C. Program se skládá zhruba ze dvou větších celků. První část obsahuje funkce a metody pro měření signálu. Druhá část pak obsahuje rutiny pro komunikaci procesoru s nadřízeným systémem po sběrnici CIB.

6.1 Měření signálu

6.1.1 Ovládání A/D převodníku AD7792

Pro měření signálu z externích čidel teploty slouží A/D převodník AD7792. Výměna dat mezi A/D převodníkem a procesorem probíhá prostřednictvím seriového rozhraní SPI. Aby byl procesor schopen po tomto rozhraní komunikovat, musí se nejprve upravit jeho nastavení. Pro komunikaci po SPI jsou vyčleněny čtyři piny procesoru u nichž je nutné nastavit funkci pro podporu SPI. To se provádí v registrech GPIO procesoru povolením a přiřazením alternativní funkce na jednotlivé piny. Dále se konfiguruje nastavení rozhraní SPI, u kterého se musí nastavit procesor jako zařízení typu master, délka datového slova na 8 bitů, a frekvence hodinového signálu pro synchronizaci přenosu s jednotkou slave. Rychlosť komunikace lze nastavit až na maximální hodnotu 8 Mbit/s.

A/D převodník AD7792 obsahuje několik interních registrů, které slouží pro nastavení konfigurace, nebo pro uchování naměřených dat. Komunikace přes vstupní rozhraní využívá

komunikační registr. Každý příkaz začíná zápisem datového slova právě do tohoto registru. Data specifikují, zda bude následující operace typu čtení nebo zápis a s jakým funkčním registrem tato operace souvisí. AD7792 může pracovat v osmi různých operačních módech, z nichž jsem k účelům měření využil pouze tři. Pro měření na analogových kanálech lze použít buď mód jediné konverze, nebo mód průběžné konverze. V módu jedné konverze setrvává převodník v klidovém režimu a v okamžiku příchodu příkazu se provede měření na zvoleném analogovém kanálu. Poté se opět přepne do klidového režimu. U průběžné konverze provádí převodník měření periodicky ve zvoleném časovém intervalu. K měření napětí na analogových signálech jsem použil mód jedné konverze. Ověřil jsem také použití módu průběžné konverze, ale ve zvolené posloupnosti akcí, kdy dochází k přepínání různých módu měření, nemá jeho použití význam. Z dalších možných módů jsem využil už pouze kalibraci offsetu. V tomto módu se provede automatické měření offsetu napětí na zvoleném analogovém kanálu a získaná hodnota se poté může využít ke korekci výsledku. Operační mód se nastavuje v tzv. "mode" registru. V tomto registru je dále možné nastavit zdroj hodinového signálu převodníku a frekvenci měření u módu průběžné konverze. Pro generování hodinového signálu A/D převodníku jsem využil interní oscilátor s frekvencí 64kHz. Další parametry lze nastavit v konfiguračním registru. Prvním z nich je zesílení, které umožňuje zlepšit přesnost měření. Zesílení jsem ale pro většinu měření nechal jednotkové vzhledem k velikosti měřených úbytků napětí. Výběr napěťové reference ovlivňuje varianta zapojení vstupní části A/D převodníku viz. 4. kapitola. Zatím co první varianta využívá externí referenci, druhá varianta používá interní. Vzhledem ke kladnému napětí na senzorech jsem nastavil parametr - režim měřené hodnoty na unipolární. Převodník dále umožňuje i připojení interní impedance paralelně ke svému vstupu. Tato impedance by měla způsobit větší stálost měřené hodnoty, ale během testování jsem zjistil, že nemá výrazný efekt a navíc u odporových snímačů zkresluje měřenou hodnotu, protože vytvoří paralelní kombinaci společně s odporem senzoru. Výsledná hodnota by se tak musela korigovat dalším výpočtem. Tuto přídavnou impedanci jsem tak z této důvodů nevyužíval. V konfiguračním registru se také provádí výběr analogového kanálu, na kterém bude probíhat měření. Tento výběr opět závisí na volbě varianty zapojení. Pro uchování naměřených dat z analogových kanálů slouží datový registr. Data naměřená při kalibraci se pak uchovávají ve speciálních registrech převodníku. Nastavení proudových zdrojů převodníku se provádí prostřednictvím dalšího speciálního registru, ve kterém lze nastavit jak velikost proudu, tak i kombinaci výstupů zdrojů na jednotlivé piny. Velikost proudu se nastavuje podle použitého typu senzoru odporového snímače a vstupního rozsahu A/D převodníku.

6.1.2 Ovládání interního A/D převodníku Z8

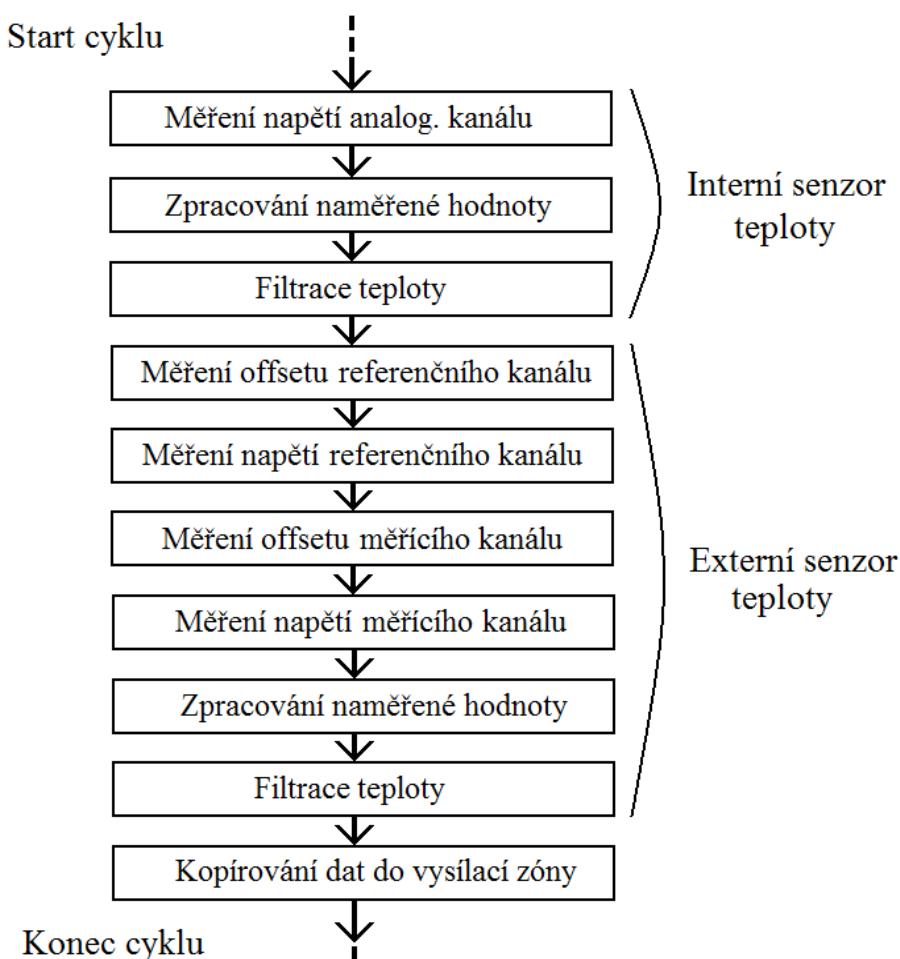
Pro měření signálu z interního senzoru teploty, kterým je NTC termistor, se využívá interní A/D převodník procesoru Z8F4821. Funkce převodníku opět vyžaduje nastavení funkčních registrů procesoru. Nejprve se musí nastavit použití analogových vstupů v registrech GPIO. Spuštění měření na zvoleném analogovém kanálu se poté provádí ve funkčním registru ADCCTL a naměřené hodnoty jsou dostupné v registru ADCCD. V porovnání s AD7792 se interní převodník liší zejména v možném nastavení parametrů měření. Zpracování naměřené hodnoty je ale pro oba převodníky téměř totožné.

6.1.3 Postup měření

Při měření signálu převodníkem AD7792 je potřeba dodržet určitou posloupnost akcí. První z nich je nastavení proudových zdrojů. Hodnota proudu na výstupu se určí volbou velikosti proudu zdrojů a volbou připojení jednotlivých zdrojů na konkrétní výstup. Další akce spočívá v nastavení parametrů konfiguračního registru podle zvolené varianty zapojení vstupní části A/D převodníku viz. předchozí část. Měření na zvoleném analogovém kanálu se spouští zápisem do registru operačního módu. Konverze měřené hodnoty trvá několik hodinových cyklů a její ukončení signalizuje změnu logické hodnoty na pinu RDY/DOUT převodníku. Výsledek konverze je uložen v datovém registru, ze kterého se získaná hodnota následně přečte. Obdobným způsobem se provede i určení hodnoty napěťového offsetu s tím rozdílem, že proudové zdroje zůstanou vypnuty, zvolí se mód příslušné kalibrace a měřená hodnota se načte z ”offset” registru. Podle popsaného postupu jsem vytvořil rutiny pro jednotlivá měření, z kterých jsem sestavil část měřícího cyklu. Posloupnost volání rutin závisí opět na dané variantě zapojení. Následující popis použitého měřícího cyklu bude uveden pro variantu s referenčním měřením budícího proudu. Měřící cyklus se tedy skládá z několika částí. Nejprve se provede měření offsetu na kanálu měřícím referenční napětí. Na této kanálu následuje měření napětí na referenčním rezistoru. Získané hodnoty offsetu a měření se uloží do paměti pro pozdější zpracování. Další měření probíhá na měřícím kanálu. Zde se opět nejprve vyhodnotí offset a posléze i napětí na senzoru jako v předchozím případě. Výsledky měření se opět uloží a spolu s hodnotami z referenčního kanálu se použijí k výpočtu teploty. Měřící cyklus pro termočlánek se liší pouze vynecháním měření na referenčním kanálu a offsetu.

Měřící cyklus je dále doplněn o měření teploty interním čidlem. Referenční napětí analogového vstupu je v tomto cyklu měřen v referenčním kanálu.

gové části procesoru se shoduje s napájecím napětím. To by mělo být v ideálním případě 3.3V, ale vzhledem k toleranci napájecího zdroje není tato hodnota zcela přesná. To způsobuje chybu při výpočtu skutečného napětí na analogovém vstupu teplotního čidla. Proto se musí nejprve hodnota skutečného napájecího napětí určit pomocí měření na referenčním děliči, který je připojen k analogovému vstupu ANA6 procesoru viz. schéma zapojení. Poté lze provést měření úbytku napětí na interním čidle a následný výpočet měřené teploty.



Obrázek 6.1: Měřící cyklus

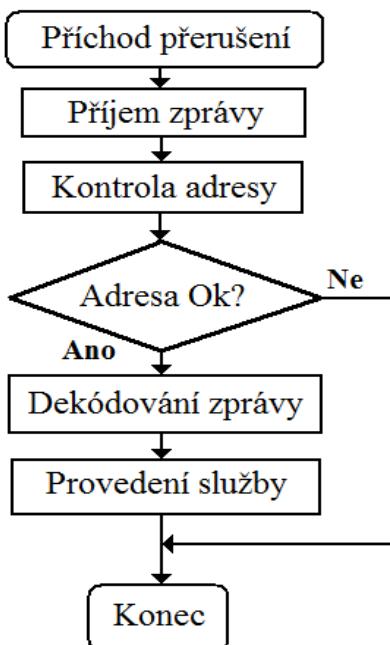
Hodnoty získané měřením se dále zpracovávají podle postupů uvedených v 5. kapitole. Tyto postupy jsem implementoval do rutin, které z naměřených hodnot určí výslednou teplotu. Postup zpracování spočívá ve výpočtu napětí ze senzoru, korekci hodnoty, mezipřevodu na odpor a výpočtu teploty z charakteristiky senzoru. Mimo korekci při výpočtu

se navíc provádí softwarová filtrace naměřených hodnot pomocí klouzavého průměru z posledních deseti měření. Tím se zamezí kolísání měřené hodnoty a redukuje se tak i případný šum. Filtrovaná hodnota se dále převede do podoby, vhodné pro přenos do řídící jednotky a nakopíruje se do zóny pro odeslání.

6.2 Implementace protokolu CIB

Komunikace s řídícím systémem Tecomat Foxtrot probíhá prostřednictvím sběrnice CIB. Do programu tak bylo nutné implementovat rutiny pro obsluhu komunikace. Součástí hardwarového návrhu bylo připojení rozhraní sběrnice CIB k procesoru. Z obvodů rozhraní se přivádí signály pro čtení a zápis na sběrnici. Ty jsou připojeny na piny procesoru PA0 a PA1 viz. Obrázek 4.1. Operace čtení zprávy vyžaduje pro svou funkci nastavení vektorů přerušení komparátoru na pinu PA0 a časovače Timer0. Vývojový diagram zpracování příchozí zprávy je uveden za obrázku 4.2. Metoda přístupu na sběrnici je typu master-slave. Stanice master zahajuje komunikaci a vysílá zprávu určenou pro vybranou stanici slave. Příchodem zprávy se vyvolá přerušení komparátoru na bitu PA0. V rutině obsluhy tohoto přerušení se inicializuje funkce příjmu zprávy. Jako generátor časové osy pro příjem jednotlivých bitů zprávy se používá časovač Timer0. Funkce příjmu provede načtení celé zprávy a její obsah uloží do paměti. Po obdržení celé zprávy dojde k vyhodnocení adresy zařízení. Každá jednotka pro sběrnici CIB má přidělenu vlastní unikátní šestnáctibitovou adresu. Tato adresa slouží jen k počáteční identifikaci stanice slave a používá pouze při navázání komunikace. Po spojení se stanicí master, je automaticky přidělena jednotce logická adresa v rozsahu 0-31, která se namísto původní fyzické posléze využívá v dálší fázi komunikace. Při kontrole adresy se ověřuje, zda-li je příchozí zpráva určena pro dané zařízení. Pokud tomu tak není, proces příjmu zprávy se ukončí. Pokud se adresa ve zprávě shoduje s adresou zařízení přistupuje algoritmus k dekódování zprávy. Protokol sběrnice CIB rozlišuje několik typů služeb, kterými mohou být například žádost o data, inicializace jednotky, přiřazení logické adresy apod.. Dekódováním se určí o jaký typ služby se jedná a poté se zavolá její obslužná funkce. K jedné z hlavních služeb patří inicializace jednotky. Pro každou jednotku je definována inicializační tabulka, která obsahuje datovou strukturu s informacemi o typu a parametrech jednotky. Tato struktura je uložena jak v paměti stanice master, tak i ve vlastní paměti převodníku a slouží pro zachování konzistence dat při příjmu a odesílání zprávy. Při inicializaci pak dochází k

ověření konzistence této tabulky. Po dokončení inicializace se přechází do režimu výměny dat. Master v pravidelném intervalu posílá zprávu s žádostí o data. Na základě tohoto požadavku se vyvolá odpovídající funkce. V této funkci se vytvoří zpráva, která obsahuje příslušná data. Po každém provedení služby následuje odpověď, kterou vysílá stanice slave. Odpověď má zároveň funkci potvrzení komunikace. Pokud nedojde k potvrzení příchozí zprávy, master detekuje chybu jednotky.



Obrázek 6.2: Vývojový diagram příjmu zprávy

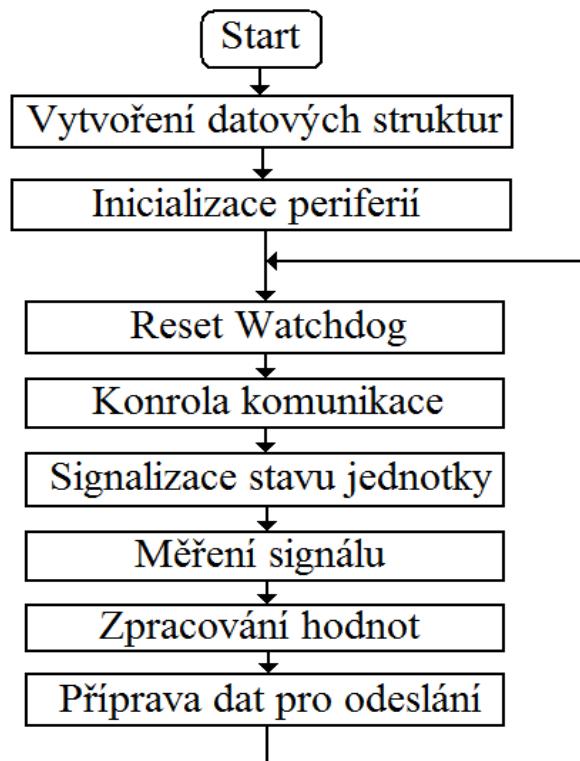
Funkce zápisu na sběrnici obdobně jako čtení využívá časovač Timer0 pro generování časové osy při vysílání odpovědi. Tato zpráva je sestavena v rámci dané služby a po jejím provedení se automaticky odešle. Režim výměny dat probíhá do té doby, dokud nedojde k ukončení komunikace, nebo chybě komunikace. Je-li detekována chyba, provádí master pokus o novou inicializaci jednotky. Při krátkém výpadku spojení tak automaticky dojde k obnovení přenosu.

Komunikační protokol sběrnice CIB podléhá interním předpisům firmy Teco, které nedovolují zveřejnění podrobného obsahu. Z tohoto důvodu tak není možné v této práci uvést veškeré podrobnosti.

6.3 Celková struktura programu

V rámci této práce jsem vytvořil rutiny pro kompletní měření signálu ze senzorů a řízení chodu programu. Podle materiálů dodaných zadavatelem práce jsem odladil ovládání komunikace po sběrnici CIB. Do programu jsem implementoval linkovou a síťovou vrstvu protokolu a upravil příslušné rutiny pro potřeby funkcí vyvíjeného převodníku. Hlavní části programu, ke kterým patří zpracování signálu a výměna dat po sběrnici CIB, jsou podrobněji popsány v předchozí části kapitoly. Obsluha celého zařízení probíhá v tzv. hlavní smyčce programu (main), jejíž vývojový diagram zachycuje obrázek 6.3. Po zapnutí napájení nebo restartu začíná program inicializaci zařízení. Při inicializaci se provádí nastavení funkčních obvodů procesoru a definují se datové struktury. Pro jednotlivé funkční obvody se konfigurují jejich parametry a použití pinů procesoru které využívají. Mezi tyto obvody patří interní a externí A/D převodník, komunikační rozhraní SPI a časovače. Poté se provede nastavení přerušení časovačů a komparátoru pro příjem signálu ze sběrnice. Na počátku programu se dále definují datové zóny pro komunikaci a struktury pro měření interním a externím čidlem. Datové zóny se používají pro data, která jsou určena pro vysílání a příjem zpráv ze sběrnice CIB. Struktury pro měření slouží pro uchování dat jakými jsou status, hodnoty posledních deseti měření a filtrovaná hodnota teploty. Pro komunikaci na sběrnici CIB se definují speciální struktury, které obsahují data o parametrech jednotky a předávaných datech. Ty umožňují zajistit předávání správného formátu informací mezi jednotkou a nadřízeným systémem, a korektní funkci z hlediska komunikačního protokolu. Po inicializaci zařízení se spustí nekonečná smyčka programu a zařízení přejde do režimu normálního chodu. Na začátku každého cyklu této smyčky se resetuje časovač watchdog sloužící jako ochrana proti zacyklení programu. Kontrola komunikace s nadřízeným systémem se používá pro signalizaci průběhu výměny dat a detekci výpadku komunikace. Pro kontrolu komunikace slouží časovač Timer1, který cyklicky generuje přerušení v časovém rastru 10ms. Příchod přerušení inkrementuje hodnotu čítače. Hodnota tohoto čítače se příchodem zprávy ze sběrnice nuluje. Pokud ale jeho hodnota dosáhne 50, což odpovídá 500ms, je detekována chyba spojení a musí se provést nová inicializace komunikace. Detekce přetečení čítače se kontroluje v každém průchodu hlavní smyčky programu. Aktuální stav jednotky se signalizuje pomocí LED diody. Při zapnutí napájení nebo restartu jednotky dioda desetkrát rozsvítí a zhasne, a poté zůstane rozsvícena. Pokud probíhá komunikace s nadřízeným systémem, dioda bliká s periodou 300ms. K časování blikání slouží opět rastr časovače Timer1 obdobně jako v předchozím případě. V hlavní smyčce programu se tak opět kontroluje přetečení

čítače podle kterého se dioda rozsvítí či naopak zhasne. Pokud dojde ke ztrátě spojení zůstane dioda rozsvícena. Po signalizaci následuje cyklus měření teploty. Ten se skládá z měření signálu pomocí interního a externího A/D převodníku. Získané hodnoty signálu se korigují a převádějí do požadované podoby. Výsledkem jsou teploty naměřené pomocí interního a externího čidla. Z výsledků měření se poté určí jejich status, nebo-li zda jsou měřená data ve správném rozsahu. Po ukončení měření se získaná data přenesou do datových zón pro komunikaci. K zajištění konzistence dat při kopírování je definována navíc ještě jedna záložní zóna. Do této zóny se kopírují totožná data jako do hlavní. Dojde-li při přenosu do hlavní zóny k přerušení procesu příchodem zprávy ze sběrnice, berou se data pro odeslání ze záložní zóny. Po ukončení aktualizace dat v hlavní zóně se obnoví i záložní data. Tím končí i cyklus hlavní smyčky programu a začíná nový. Příjem a vysílání signálu ze sběrnice CIB jsou zajištěny pomocí přerušení. Příchodem zprávy ze sběrnice se vyvolá příslušná obsluha přerušení. Přijatá zpráva se zpracuje a podle jejího významu se připraví příslušná odpověď. Ta se následně odešle do řídícího systému.



Obrázek 6.3: Vývojový diagram hlavní smyčky programu

6.4 Nastavení v prostředí Mosaic

Pro programování řídících systému firmy Teco se používá vývojové prostředí Mosaic. Toto prostředí slouží pro tvorbu programů a nastavení jednotlivých komponent systému. Pomocí něj lze tak konfigurovat připojení převodníku k řídícímu systému pomocí sběrnice CIB. Aby bylo možné s převodníkem komunikovat, musí se do řídícího programu importovat soubor *.mos, který obsahuje inicializační struktury jednotky.

Inicializační tabulka CIB mastera:

```
#struct tiunit_C_IT_0100H_A "
    word code,          ;01 kód jednotky
    word mode_,         ;03 režim výměny dat = 0x0000
    word fadr,          ;05 fyzická adresa jednotky
    byte ladr,          ;07 logická adresa jednotky
    byte ndev,          ;08 počet zařízení na jednotce= 4
    tdev dev[4],        ;09 řádek informací o zařízení
    word temp10fs,      ;offset interního teploměru v 0.01°C
    word temp20fs       ;offset externího teploměru v 0.01°C
```

Inicializační tabulka jednotky:

```
#table tiunit_C_IT_0100H_A INI_C_IT_0100H_A =""
    3317,              ;kodové označení jednotky
    $0000,              ;režim výměny dat
    $0000,              ;fyzická adresa
    $00,                ;logická adresa
    4,                  ;počet zařízení
    $80, 0, 8, 0, ;zařízení 1, vstupní, STATUS
    $80, 0, 16, 0, ;zařízení 2, vstupní, (int. teploměr v setinách °C)
    $80, 0, 16, 0, ;zařízení 3, vstupní, (ext. teploměr v setinách °C)
    $81, 0, 0, 8, ;zařízení 4, vystupní, SENZOR
    0,                 ;offset interního teploměru
    0                  ;offset externího teploměru
```

Inicializační tabulka mastera obsahuje definice jednotlivých parametrů jednotky. V inicializační tabulce jednotky je pak uvedeno defaultní nastavení těchto parametrů. Tato struktura musí být implementována v řídícím systému i samotném převodníku a slouží k dodržení správného formátu předávaných dat a komunikace. Realizovanému převodníku bylo přiděleno katalogové označení C-IT-0100H-A. Kód 3317 vyjadřuje kódové označení pro jednotky CIB. V inicializační tabulce jsou dále obsaženy informace o režimu výměny dat, adrese jednotky a počtu zařízení. Každá jednotka CIB obsahuje určitý počet tzv. zařízení, kterými se rozumí jednotlivé předávané údaje. Ta se dále dělí na vstupní a výstupní. V tomto případě má jednotka celkově čtyři taková zařízení, z nichž tři jsou výstupní a jedno vstupní. Označení jako výstupní (\$80 v řádku inicializační tabulky) znamená, že tento údaj posílá jednotka masterovi sběrnice. V případě označení jako vstupní (\$81 v tabulce) je tomu naopak. Prvním výstupním zařízením je "status" měření, který vyjadřuje platnost příchozí hodnoty viz. Tabulka 6.1. V inicializační tabulce je dále definováno, že očekávaná hodnota má rozsah jeden byte (8 bitů). Dalšími zařízeními jsou teplota interního čidla v desetinách °C a teplota externího čidla v desetinách °C. Tyto hodnoty mají rozsah dva byty (16 bitů).

Tabulka 6.1: Status - označení chyb

Hodnota	Popis
.0	Bez poruchy
.1	Přetečení/podtečení rozsahu interního senzoru
.2	Platnost naměřených dat intenšího senzoru
.3	Přetečení/podtečení rozsahu externího čidla
.4	Platnost naměřených dat extenšího čidla
.5	Chyba při zadání senzoru

Jedinným vstupním zařízením je údaj o typu připojeného senzoru k převodníku. Do programu jsem implementoval možnost připojení sedmi různých typů čidel. Každý typ senzoru se odlišuje číselným kódem viz. Tabulka 6.2. Z řídícího systému se tak posílá informace o nastavení typu externího čidla, podle kterého pak převodník přizpůsobí parametry měření. V inicializační tabulce jsou navíc definována další dvě zařízení, která by měla reprezentovat teplotní offset senzorů. Ta se však pro účely této práce se nevyužívají.

Tabulka 6.2: Senzor - označení

Hodnota	Druh senzoru	Měřící rozsah
1	Pt100 $W_{100} = 1,385$	-50 až 400 °C
2	Pt100 $W_{100} = 1,391$	-50 až 400 °C
3	Pt1000 $W_{100} = 1,385$	-50 až 400 °C
4	Pt1000 $W_{100} = 1,391$	-50 až 400 °C
5	Ni1000 $W_{100} = 1,617$	-50 až 200 °C
6	Ni1000 $W_{100} = 1,500$	-50 až 200 °C
7	Termočlánek typu J	0 až 760 °C

V konfiguračním souboru jsou dále definovány datové zóny, do kterých se ukládají přenášená data ze sběrnice. Deklarovány jsou zóny INE_DataIn pro příchozí data z jednotky a INE_DataOut pro odesílání parametrů do jednotky. INE_Stat slouží pro zaznamenání stavu komunikace na sběrnici CIB. Pokud probíhá přenos bez problémů, je v této zóně uložena hodnota 87h. INE_Err souvisí také s monitorováním správného přenosu a obsahuje hodnotu chybového čítače. Po CIB sběrnici jsou některá data přenášena v úspornějším datovém formátu. Pro potřeby zpracování aplikačním programem jsou však vhodnější některé standartizované formáty. Řídící jednotka tedy může automaticky provádět tyto datové konverze přímo v předávaných datových zónách prostřednictvím konverzní tabulky.

Definice datových zón kanálu CIB:

```
byte INE_DataIn[LEN_INEIND]      ;vstupní datová zóna
byte INE_DataOut[LEN_INEOUTD]    ;výstupní datová zóna
byte INE_Stat[MAXINE]           ;stavová zóna
byte INE_Err[MAXINE]            ;chybová zóna
```

Konverzní tabulky datových zón:

```
#table byte[INEIND] konvert_IN = 5  ;vstupní datová zóna
#table byte[INEOUTD] konvert_OUT = 1 ;výstupní datová zóna
```

Jako poslední je v konfiguračním souboru nutné vyplnit inicializační tabulku kanálu CIB. Ta slouží k nastavení příslušných parametrů vnitřního CIB kanálu procesorové jednotky

Tecomat Foxtrot. Zde se provádí přiřazení předchozích dílčích tabulek do jednotné struktury celého kanálu a přidání jednotek CIB, které jsou připojeny na sběrnici.

Inicializační tabulka kanálu CIB:

```
#table _TTS_INEINIT_CH_Table_INELS=
$00C9,$0000, ;INE režim
9,63,$0C,0,0,0,0,0, ;základní parametry
0,0,0,0, ;modem
__offset32(INE_DataIn), ;iin
__offset32(INE_DataOut), ;iout
__offset32(INE_Stat), ;istat
__offset32(INE_Err), ;ierr
__indx (konvert_IN), ;konverzní tabulka vstupní datové zóny
__indx (konvert_OUT), ;konverzní tabulka výstupní datové zóny
32+1, ;nnt
32+1, ;nline
$40,$00, __indx (INI_MI2_02) , 2,0, ;3128,interní
$80,$00, __indx (INI_C_IT_0100H_A), 5,1, ;3317
```

Dalsím nastavením v prostředí Mosaic je konfigurace sběrnice CIB v centrální jednotce řídícího systému Tecomat Foxtrot. Ta umožňuje obsloužit jednu linku sběrnice pomocí interního CIB mastera MI2-01M. Interní master v rámci řídící jednotky obsahuje jeden INE kanál a je mapován vždy do rámu 0 (proměnná rack = 0) na adresu 2 (proměnná address = 2). Přidání mastera do konfigurace řídícího systému se provádí prostřednictvím dialogu Konfigurace HW v Manažeru projektu. Řídící jednotka umožňuje obsloužit jednu CIB linku pomocí interního mastera MI2-01M a až 8 externích CIB linek pomocí 4 externích masterů MI2-02M. Aktivace obsluhy interního mastera MI2-01M se provádí na záložce Centrální modul.

V rámci testování funkce zařízení jsem vytvořil také ukázkový program v prostředí Mosaic pro zpracování příchozích dat ze sběrnice CIB. Tento program je součástí práce jako příloha A.

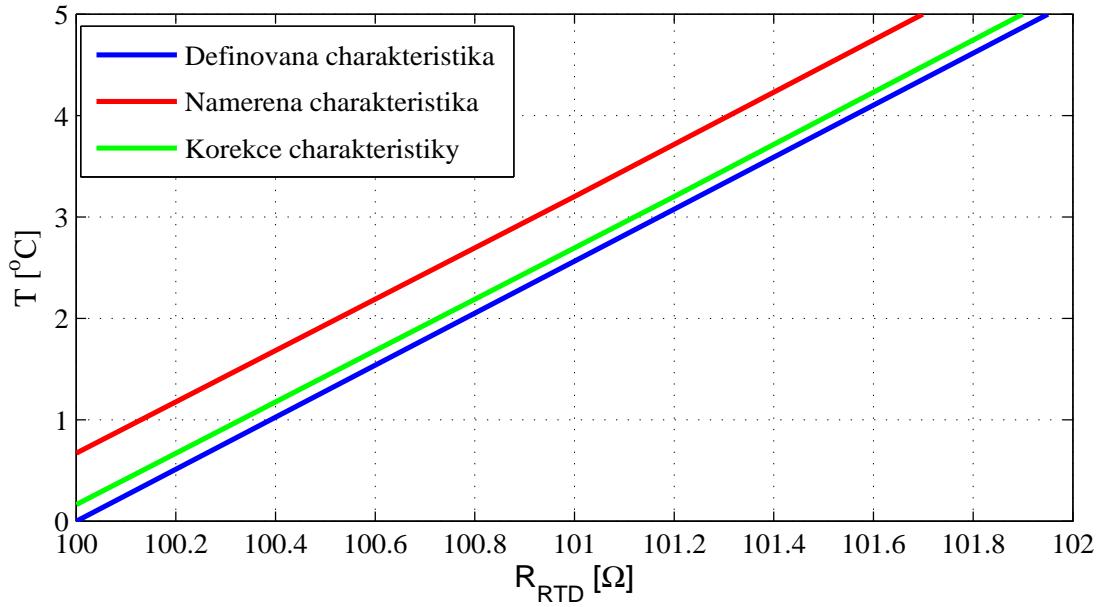
Kapitola 7

Dosažené výsledky

Výsledkem vývoje je funkční prototyp převodníku. Z testovaných možností zapojení měřící části se lépe osvědčila varianta s referenčním měřením budícího proudu. V další práci jsem se tak zaměřil pouze na tuto variantu a použil ji pro finální realizaci převodníku. U druhé varianty jsem pouze ověřil možnost jejího použití. Zařízení umožňuje pracovat s několika typy teplotních senzorů. Pro každý typ jsem provedl měření převodní charakteristiky senzoru. Z těchto charakteristik jsem poté určil dosaženou přesnost měření a vlastnosti převodníku.

7.1 Charakteristiky převodníku

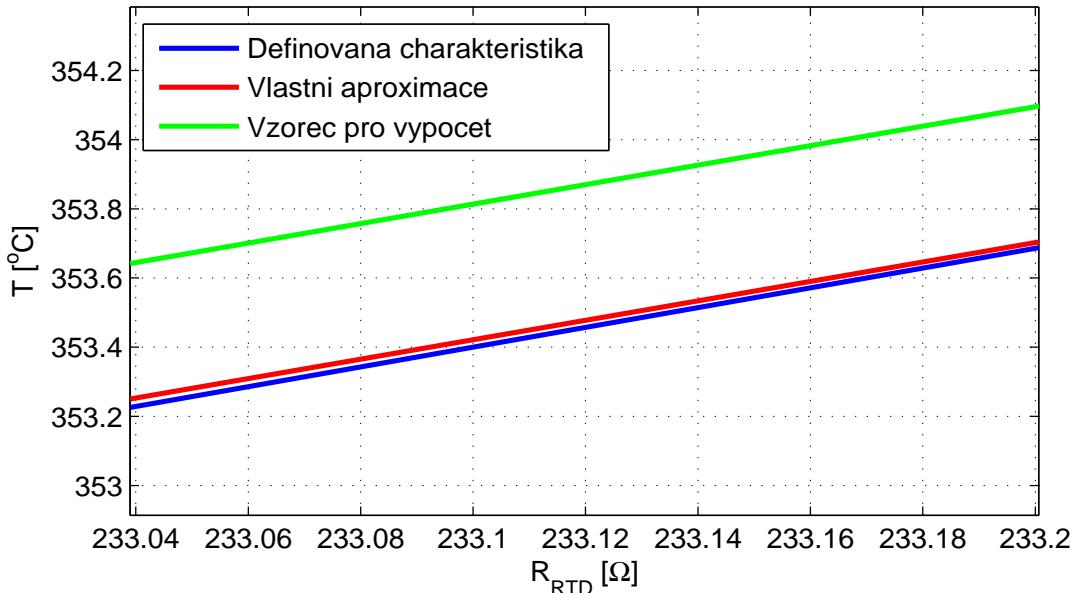
Vstupem do měřícího řetězce je senzor, který je charakterizován veličinou závislou na teplotě. Výstupem převodníku je hodnota teploty určená ze vstupní veličiny. Převodní charakteristika pak udává závislost teploty určené převodníkem na dané vstupní veličině. Vlivem měření vzniká určitá odchylka od skutečné hodnoty. Tuto chybu ovlivňuje nepřesnost měřícího prvku a vlastnosti zpracování signálu ze senzoru. Cílem práce bylo samozřejmě tuto chybu co nejvíce minimalizovat, aby se výsledná hodnota pohybovala v přijatelném rozsahu. Funkce převodníku umožňuje připojení několika různých typů čidel. Jednotlivá čidla mají různé vlastnosti a určení teploty se tak u nich liší. Proto bylo nutné ověřit dosaženou přesnost pro každý typ čidla zvlášť. U odporových senzorů jsem ověřil závislost teploty, kterou udává převodník, na odporu daného senzoru. Při měření jsem vlastní senzor simuloval odporovou dekádou a určil převodní charakteristiku v celém dovoleném rozsahu čidla.



Obrázek 7.1: Charakteristika měření Pt100 $W_{100} = 1,385$

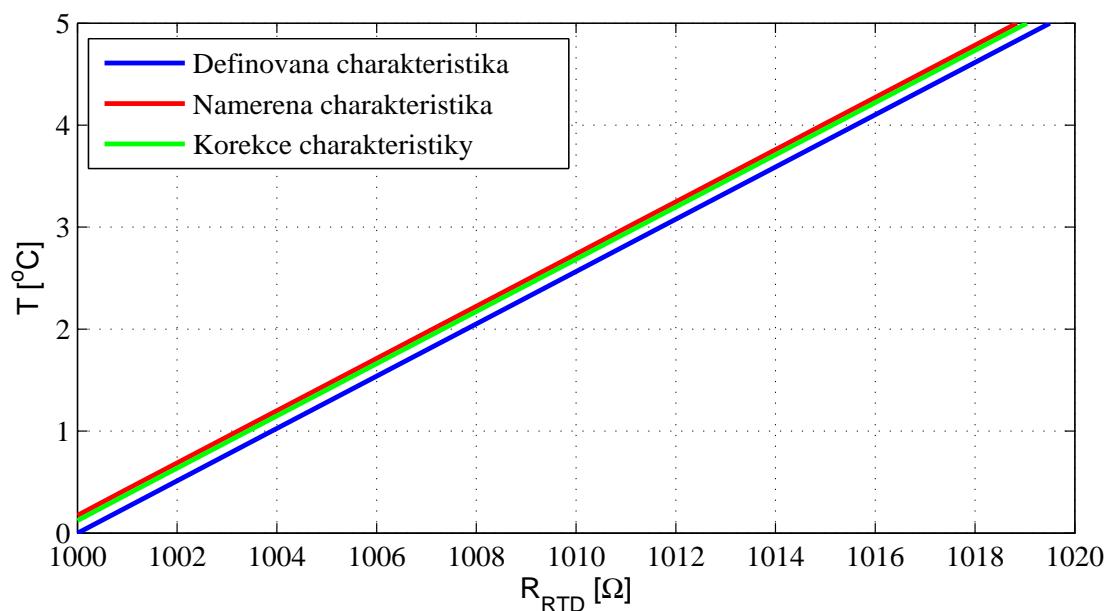
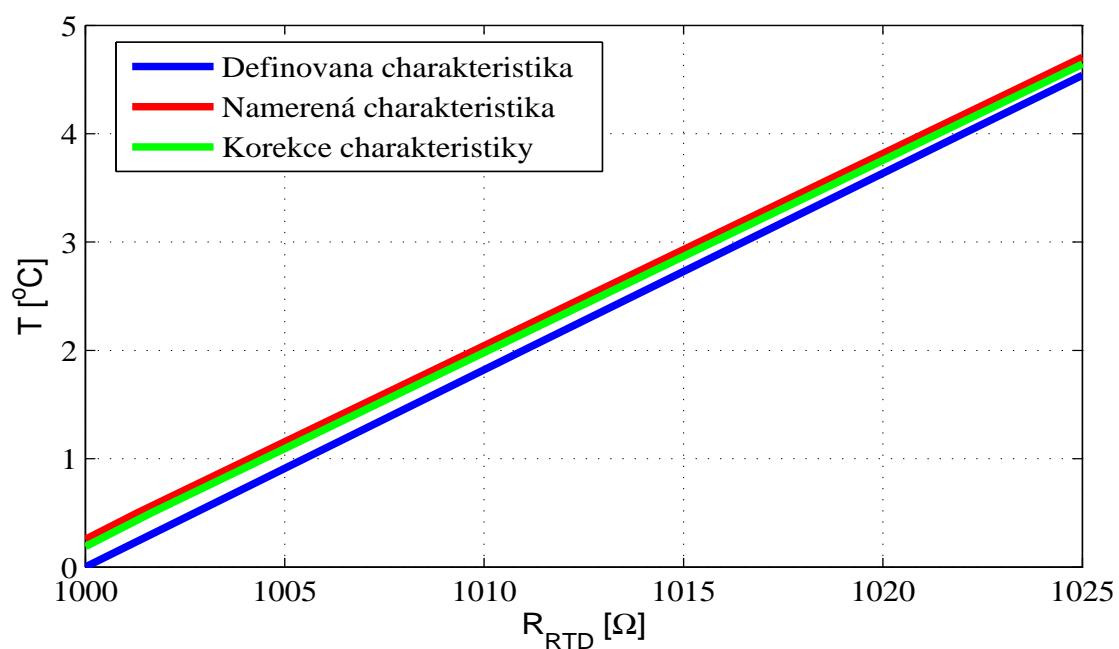
Obrázek 7.1 zachycuje výřez celkové charakteristiky senzoru Pt100 $W_{100} = 1,385$ v rozsahu 0 až 5 °C. Na obrázku jsou vidět tři různé průběhy. První udává závislost, která je pro daný senzor definována podle stanovené normy. Druhý průběh představuje naměřenou závislost pomocí převodníku. Při měření charakteristik jsem byl nucen použít k připojení dekády vodiče, jejichž odpor nebyl zanedbatelný a jeho působení se následně promítlo i do naměřených hodnot. Senzor Pt100 má citlivost řádově $0.25\text{ }{}^{\circ}\text{C}/0.1\Omega$. Vlivem odporu přívodů jako v tomto případě tak může vzniknout značná chyba měření. Z průběhů je vidět, že chyba má hodnotu cca 0.7 °C. Tyto výsledky měření jsou zkreslené a neodpovídají skutečné charakteristice převodníku. Výsledky jsem tedy dále korigoval odstraněním chybové složky dané odporem vedení. Třetí průběh na obrázku tak představuje korigovanou a zároveň skutečnou charakteristiku převodníku. Porovnáním správného a korigovaného průběhu můžeme dle obrázku 7.1 usoudit, že Pt100 má typickou chybu měření cca $\pm 0.15\text{ }{}^{\circ}\text{C}$. Tato chyba ale není v dalším průběhu celého měřícího rozsahu stejná. Ve střední části charakteristiky má hodnotu $\pm 0.15\text{ }{}^{\circ}\text{C}$ a pro krajní body rozsahu je velikost chyby až $\pm 0.5\text{ }{}^{\circ}\text{C}$. Z průběhu celé charakteristiky lze určit chybu menší než $\pm 0.5\text{ }{}^{\circ}\text{C}$. Tuto odchylku způsobuje výpočet teploty z naměřeného odporu. Skutečná závislost čidla je velmi dobře approximována ve střední části rozsahu, ale pro krajní body se nepřesnost

zvyšuje. Výpočet hodnoty teploty z odporu jsem převzal z materiálů pro jednotlivé senzory. Porovnáním s charakteristikou definovanou podle příslušné normy jsem zjistil, že chyba aproximace může být v některých případech až $\pm 0.5^{\circ}C$. Z tohoto důvodu jsem provedl vlastní approximaci charakteristiky senzoru metodou nejmenších čtverců. Pro senzory Pt100, Pt1000 $W_{100} = 1,391$ a Ni1000 $W_{100} = 1,618$ se podařilo chybu způsobenou approximací zmenšit na celém měřícím rozsahu (příklad viz. Obrázek 7.2). V tomto případě se však ukázal být největším problémem vliv přívodních vodičů, který může způsobit značnou chybu měření. Při nasazení v konkrétní aplikaci je tak nutné s touto nepřesností počítat a volit senzory s co nejkratšími přívody, nebo použít jiný typ senzoru. Stejné vlastnosti měření se vyskytují i u senzoru Pt100 $W_{100} = 1,391$.



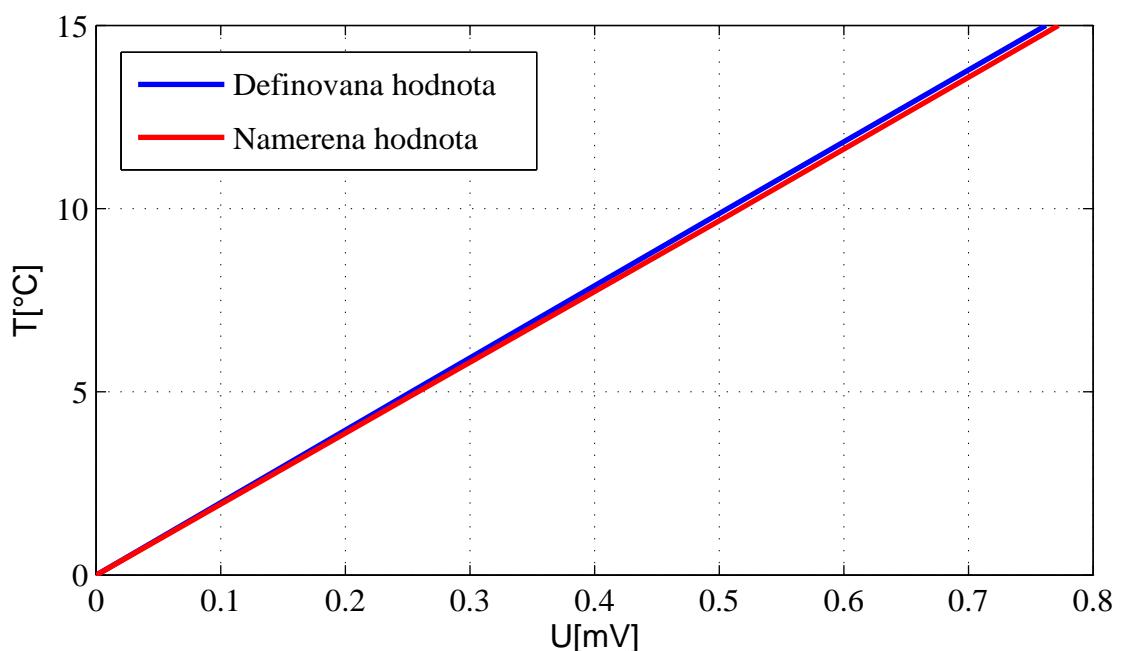
Obrázek 7.2: Chyba approximace u Pt100 $W_{100} = 1,391$

Obdobně jako v předchozím případě jsem provedl měření i u senzoru Pt1000 $W_{100} = 1,385$ viz. Obrázek 7.3. Srovnáním naměřených průběhů s definovanou závislostí vychází chyba pro celý rozsah menší než $\pm 0.2^{\circ}C$. To je dáno velmi dobrou approximací výpočtu vzhledem k definované charakteristice. Na tomto porovnání je vidět také vliv větší hodnoty odporu senzoru na potlačení chyby způsobené odporem přívodů. Rozdíl mezi naměřenou a skutečnou korigovanou charakteristikou není tak výrazný jako u Pt100, protože se poměr mezi správnou hodnotu a chybou desetkrát zvýší. Nepřesnost měření má ale ve výsledku přibližně stejnou hodnotu. Pro Pt1000 $W_{100} = 1,391$ je chyba menší než $\pm 0.3^{\circ}C$.

Obrázek 7.3: Charakteristika měření Pt1000 $W_{100} = 1,385$ Obrázek 7.4: Charakteristika měření Ni1000 $W_{100} = 1,5$

Na obrázku 7.4 je vidět výřez charakteristiky v rozsahu 0 až 5°C. V této části charakteristiky má chyba hodnotu 0.25°C. Na okrajích rozsahů opět dochází k chybě aproximace až na 0.4°C. U obou čidel Ni1000 dochází k potlačení vlivu odporu přívodu jako u Pt1000. Na rozdíl od něj je ale chyba měření cca 0.4 °C. Odlišnou hodnotu zřejmě způsobují nepřesnosti spojené s výpočtem teploty z naměřené hodnoty, neboť odpor se měří v obou případech stejně.

V případě termočlánků umožňuje převodník připojit pouze typ J. Podpora dalších typů termočlánků by nedělala potíže, protože se jedná o záměnu výpočtu teploty z naměřeného napětí. V této práci ale nemá další rozšíření sortimentu čidel význam. K ověření převodní charakteristiky převodníku jsem použil kalibrátor simulující různé typy termočlánků. Kalibrátor tak v závislosti na zadané teplotě generuje na svém výstupu odpovídající napěťový signál. Tento signál jsem poté měřil pomocí realizovaného převodníku. Chyba převodu se pohybovala v hodnotách nejvýše do 0.2°C viz. Obrázek 7.5. Tuto chybu zřejmě způsobuje nepřesnost měření napětí na vstupních svorkách převodníku. V tomto případě totiž musíme měřit napětí s přesností řádově desetin mV.



Obrázek 7.5: Charakteristika měření termočlánku

Další chybou, která má na určení přesné hodnoty podstatnější vliv je zahrnutí teploty srovnávacích konců. Ta se určuje pomocí interního senzoru teploty, kterým je termistor. Použitý senzor, může dosahovat chyby až 0.5°C . Vzhledem k tomu může být chyba až 0.7°C . I takto velkou nepřesnost lze ale označit za vyhovující, neboť přesnost srovnatelných zařízení se pohybuje okolo hodnoty 1°C .

Celkově lze tedy shrnout, že pro odporové senzory teploty má převodník maximální chybu menší než 0.5°C a pro termočlánek 0.7°C . Tato chyba ale odpovídá jednomu kusu výrobku na kterém jsem prováděl měření. Ve skutečnosti ale může být tato chyba jiná vlivem nepřesnosti použitých součástek. Pokud budeme uvažovat určitou toleranci, může se maximální chyba ještě zvýšit. U podobných zařízení je přesnost udávána v podobě chyby z rozsahu viz. Tabulka 7.1. Dosažená přesnost přibližně odpovídá stanoveným cílům, neboť pro obdobné výrobky se pohybuje chyba v hodnotách řádově 0.1 až 0.15%. Veškeré naměřené charakteristiky jsou uvedeny v příloze B.

Tabulka 7.1: Chyby měření

Typ senzoru	Chyba určení teploty	Chyba z rozsahu	Rozsah
Pt100 $W_{100} = 1,385$	< 0.5°C	0.11%	-50 až 400°C
Pt100 $W_{100} = 1,391$	< 0.5°C	0.11%	-50 až 400°C
Pt1000 $W_{100} = 1,385$	< 0.2°C	0.045%	-50 až 400°C
Pt1000 $W_{100} = 1,391$	< 0.3°C	0.065%	-50 až 400°C
Ni1000 $W_{100} = 1,500$	< 0.4°C	0.16%	-50 až 200°C
Ni1000 $W_{100} = 1,618$	< 0.4°C	0.16%	-50 až 200°C
Termočlánek typu J	< 0.7°C	0.1%	0 až 760°C

Pro kompletní ověření výsledků jsem u varianty zapojení měřící části bez referenčního měření budícího proudu provedl orientační měření přesnosti, kterou by bylo možné případně dosáhnout. Nevýhodou je určení přesné hodnoty budícího proudu. Tu jsem zkoušel kalibrat ručně a měřením úbytku napětí na referenčním rezistoru. Při dostatečně kvalitním určení hodnoty lze dosáhnout srovnatelných výsledků s předchozí variantou. Při výrobě by se ale musela zahrnout i kalibrace každého kusu zvlášť, což by zvýšilo cenu výroby zařízení.

Pro měření jsem použil přístroje uvedené v tabulce 7.2. Schéma zapojení se shoduje se zapojením na obrázku 4.9. Jediným rozdílem je to, že pro ověření charakteristik převodníku

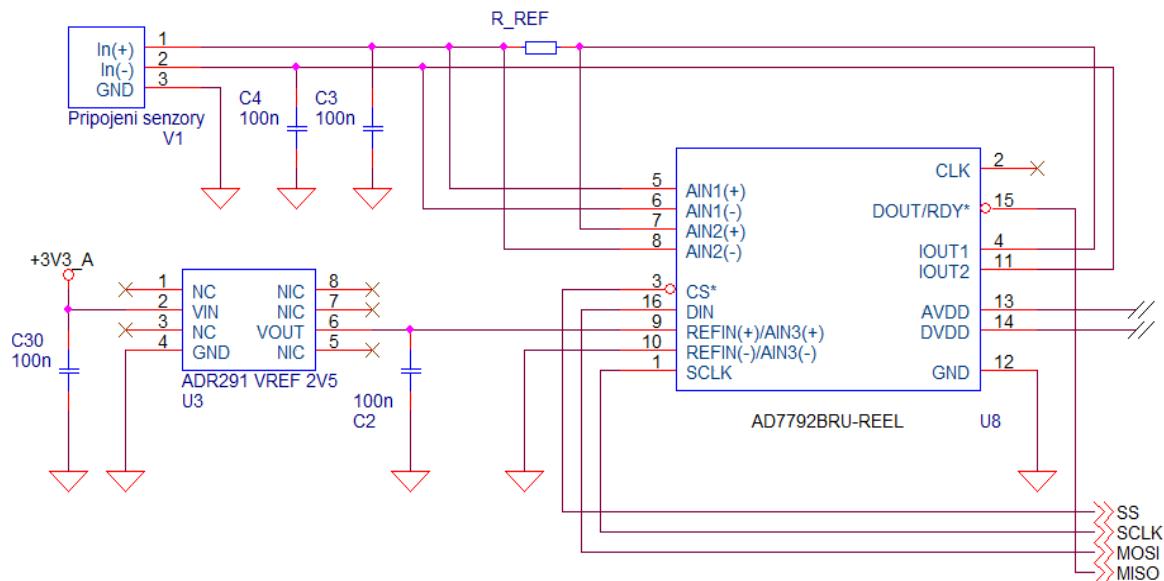
jsem místo reálného senzoru použil odporovou dekádu jako náhradu za odporové senzory a místo skutečného termočlánku jsem použil kalibrátor CA100 Compact CAL. Vzhledem k velké toleranci dekády jsem vždy ověřil skutečný odpor pomocí multimetu HP 34401A. K odečítání hodnot naměřených převodníkem jsem využil sledování stavu řídící jednotky prostřednictvím prostředí Mosaic.

Tabulka 7.2: Použité přístroje

Název a druh přístroje	Vlastnosti
Zdroj BS-525 Tesla	2x 0-30V
Odporová dekáda	0-10k Ω , tolerance $\pm 1\Omega$
Kalibrátor CA100 Compact CAL	Kalibrace termočlánků E, J, T, N, B, R, S
Multimetr HP 34401A	Přesnost měření odporu $\pm(0.002 + 0.0005)$

7.2 Úprava návrhu

U realizovaného prototypu jsem měl možnost vyzkoušet dvě varianty zapojení měřící části převodníku. Jako výhodnější se osvědčila varianta s referenčním měřením budícího proudu senzorů. Vlastnosti tohoto prototypu vyhovují zadaným požadavkům. Během vývoje jsem ale narazil na určité nedostatky, které by bylo možné odstranit a částečně tak vylepšit funkci převodníku. Prvním z nich je připojení referenčního rezistoru na analogový kanál určený pro externí napěťovou referenci. Tím se eliminuje možnost využít externí referenci, která má lepší odolnost proti rušení nežli interní a navíc zvyšuje vstupní rozsah A/D převodníku. Výhodněji se tedy jeví měření napětí na tomto rezistoru druhým analogovým kanálem A/D převodníku. Dalším nedostatkem je vliv odporu přívodních vodičů. Tento jev se výrazně projevil při ověřování charakteristiky senzoru Pt100. Jistým vylepším by tak byla možnost třívodičového připojení, které odpovídá vedení částečně potlačí. Princip třívodičového zapojení spočívá v tom, že proud stejně hodnoty protéká vodiči, které spojují senzor s kladnou a zápornou svorkou převodníku. Protékající proud vytvoří na obou vodičích napětí, které působí proti sobě a vzájemně se odečítají. V ideálním případě jsou oba úbytky napětí na vodičích stejně velké a A/D převodník měří pouze úbytek napětí na odporu senzoru a ne vodičů. Navrhnut jsem tedy úpravu měřící části převodníku, která by měla popsané nedostatky částečně potlačit viz. Obrázek 7.5.



Obrázek 7.6: Úprava měřící části

Proudový zdroj IOUT1 generuje budící proud pro odporové senzory. Zdroj IOUT2 se používá pro potlačení vlivu přívodu u třívodičového zapojení. Pro určení skutečné hodnoty budícího proudu se měří úbytek napětí druhým analogovým kanálem A/D převodníku na rezistoru R_{REF} . V případě tohoto zapojení se používá externí napěťová reference připojená na třetí analogový kanál. U třívodičového zapojení se připojí senzor přímo na vstupní svorky převodníku s tím, že odpor senzoru musí být mezi vstupy In(+) a In(-) a pomocný vodič je připojen na vstup GND. Dále musí být aktivní oba proudové zdroje, které musí dodávat proud stejné hodnoty. Při dvouvodičovém zapojení je senzor připojen opět mezi vstupy In(+) a In(-) a svorka GND musí být externě propojena s In(-). U tohoto zapojení stačí, aby byl aktivní jen zdroj IOUT1.

Kapitola 8

Závěr

Cílem této práce byl vývoj převodníku pro měření teploty určený do hlavice čidel. Tento vývoj vznikal ve spolupráci s firmou Teco a. s. a převodník je tak určen pro řídící systémy Tecomat Foxtrot. Během práce jsem se seznámil s postupy používanými při praktickém vývoji hardwaru a softwaru, které jsem aplikoval při vlastním postupu vývoje. V úvodu práce jsem se zaměřil na problematiku měření teploty z hlediska požadovaných vlastností. Základními požadavky na výsledné zařízení byly umístění do hlavice čidel, připojení na systémovou sběrnici CIB a možnost připojení několika typů senzorů pro měření teploty. Na základě daných požadavků jsem vytvořil představu o celkové struktuře zařízení a provedl základní návrh hardwarového řešení prototypu. Ten obsahuje obvodové zapojení měřící a řídící části zařízení, a popis použitých komponent. Návrh hardwarového řešení spočíval také v mechanickém provedení. Zde bylo nutné vytvořit optimální řešení vzhledem k možným rozměrům hlavice a zároveň realizaci plošných spojů. Podle vzniklého hardwarového řešení byl následně realizován i prototyp zařízení. V rámci vývoje softwaru jsem vytvořil program pro ovládání funkcí převodníku. První část programu obsahuje obslužné metody měřících prvků a umožňuje provádět automatickou konfiguraci měření v závislosti na použitém typu senzoru. Tuto část jsem řešil v úzké návaznosti na hardwarové možnosti měření, u které jsem se snažil vylepšit přesnost pomocí vybavení, které poskytuje A/D převodník. Pro zlepšení přesnosti a stability měření jsem dále aplikoval některé druhy korekcí jako jsou měření offsetu A/D převodníku, softwarová filtrace a zlepšení approximace skutečného průběhu převodní charakteristiky. V druhé části jsem podle materiálů dodaných zadavatelem práce implementoval do programu rutiny sloužící k výměně dat s řídící jednotkou přes sběrnici CIB. Následně jsem také odlaďil průběh komunikace s centrální jednotkou Tecomat Foxtrot. Zařízení tak může být jednoduše připojeno na sběrnici jako jednotka typu slave a komunikovat s nadřízeným

systémem. V části softwaru jsem také uvedl podrobný popis konfigurace převodníku z vývojového prostředí Mosaic, který by měl sloužit také jako částečný návod pro uživatele. Zároveň jsem vytvořil ukázkový program pro zpracování hodnot v řídícím systému. U realizovaného funkčního prototypu jsem ověřil jeho vlastnosti, kde jsem se především zaměřil na dosaženou přesnost měření teploty pro jednotlivé senzory a provedl vyhodnocení dosažených výsledků. Výsledkem práce je reálné zařízení, které může doplnit sortiment jednotek určených pro řídící systémy Tecomat Foxtrot.

Při vývoji jsem uvažoval dvě varianty zapojení měřící části, pro které jsem vyzkoušel jejich vlastnosti a možnost použití. Z hlediska dosažené přesnosti lze u obou variant dosáhnout téměř totožných výsledků. V porovnání z hlediska zpracování signálu má první varianta drobnou nevýhodu při měření odporovými teploměry. Tou je nutnost kalibrace měřícího proudu, který dodává proudový zdroj. Přesnou hodnotu tak lze určit až externím měřením pro každý kus zařízení zvlášť. Během práce jsem narazil na některé jevy, které mohou zkreslit výsledky měření a není možné je při stávající realizaci zařízení korigovat. Na závěr jsem tak navrhnul možnost úpravy varianty měřící části, která tyto jevy částečně potlačí.

Požadavkem vývoje bylo také dosažení přesnosti, která bude minimálně srovnatelná s výrobky dostupnými na trhu. Pro jednotlivé senzory jsem naměřil převodní charakteristiky, z kterých jsem poté určil přibližnou přesnost měření. Dosažené výsledky se částečně liší podle druhu konkrétního senzoru. To je způsobeno použitím různé konfigurace převodníku a také vlastní chybou měření převodní charakteristiky. Nepřesnost se u podobných zařízení udává jako procentní chyba z rozsahu, který se například pro senzory Pt100 pohybuje v hodnotách od 100°C do 800°C. Typická hodnota chyby je 0.1% až 0.15% z daného rozsahu, což při jeho různých velikostech znamená jinou chybu hodnoty. Při porovnání jsem tak uvažoval přibližně stejně velké rozsahy, které si vzájemně odpovídají. Po shrnutí výsledků lze tedy říci, že dosažená přesnost vyhovuje zadanému požadavku. Tato přesnost je však určena pouze pro jeden prototyp převodníku. Vlivem tolerance parametrů jednotlivých součástek se může stát, že chyba měření bude pro jiné kusy zařízení vyšší. Tento předpoklad ale není možné z důvodů existence jediného funkčního zařízení ověřit. Pro stanovení maximální chyby bylo nutné provést měření na celé sérii zařízení. Teprve poté by bylo možné stanovit celkovou chybu přesněji a v případě nepříznivého výsledku následně provést dodatečné úpravy.

Literatura

RIPKA, P.; ĎAD'Ó, S.; KREIDL, M.; NOVÁK, J. (2005), *Senzory a převodníky*, Praha: Vydavatelství ČVUT.

VEDRAL, J.; FISCHER, J. (2004), *Elektronické obvody pro měřící techniku*, Praha: Vydavatelství ČVUT.

ZÁHLAVA, V. (2005), *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*, Praha: Vydavatelství ČVUT.

ZÁHLAVA, V. (2004), *OrCAD 10*, Praha: Grada Publishing.

Převodníky teploty,
http://www.jsp.cz/files/uvod_B.pdf.

Meření teploty odporovými senzory,
http://www.jsp.cz/files/uvod_C.pdf.

Softwarová konfigurace CIB,
<http://www.tecomat.cz/docs/cze/Software/Mosaic/tvx00346.pdf>.

Programování v prostředí Mosaic,
<http://www.tecomat.cz/docs/cze/Software/Mosaic/TXV00321.pdf>.

Inels a sběrnice CIB,
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38218.

Příloha A

Ukázkový program

Příklad ukázkového programu vytvořeného ve vývojovém prostředí Mosaic pro zpracování dat přijatých z převodníku prostřednictvím sběrnice CIB.

```
// Deklarace datových zón CIB
VAR_EXTERNAL
    INE_DataIn : ARRAY [0..9] OF BYTE;
    INE_DataOut : ARRAY [0..2] OF BYTE;
    INE_Stat : ARRAY [0..2] OF BYTE;
END_VAR

// Deklarace proměnných pro zpracování hodnot
VAR_GLOBAL
    Status_Temp : BYTE;
    Temp_Int_H : REAL;
    Temp_Int_L : REAL;
    Internal_Temp : REAL; // Teplota interního čidla
    Temp_Ext_H : REAL;
    Temp_Ext_L : REAL;
    External_Temp : REAL; // Teplota externího čidla
END_VAR
```

```
// Main funkce řídícího programu
```

```
PROGRAM prgMain
```

```
// Označení druhu použitého senzoru  
// - 1: PT100E Pt100 W100 = 1,385  
// - 2: PT100U Pt100 W100 = 1,391  
// - 3: PT1000E Pt1000 W100 = 1,385  
// - 4: PT1000U Pt1000 W100 = 1,391  
// - 5: NI1000E Ni1000 W100 = 1,617  
// - 6: NI1000U Ni1000 W100 = 1,500  
// - 7: TC Termočlánek J
```

```
// Výběr druhu senzoru
```

```
INE_DataOut[0] := 5;
```

```
// Status měření
```

```
Status_Temp := INE_DataIn[0];
```

```
// Interní teplota
```

```
Temp_Int_H := BYTE_TO_REAL( INE_DataIn[1]);
```

```
Temp_Int_L := BYTE_TO_REAL( INE_DataIn[2]);
```

```
Internal_Temp := ((Temp_Int_H * 256.0 + Temp_Int_L) - 32768.0) / 10.0;
```

```
// Externí teplota
```

```
Temp_Ext_H := BYTE_TO_REAL( INE_DataIn[3]);
```

```
Temp_Ext_L := BYTE_TO_REAL( INE_DataIn[4]);
```

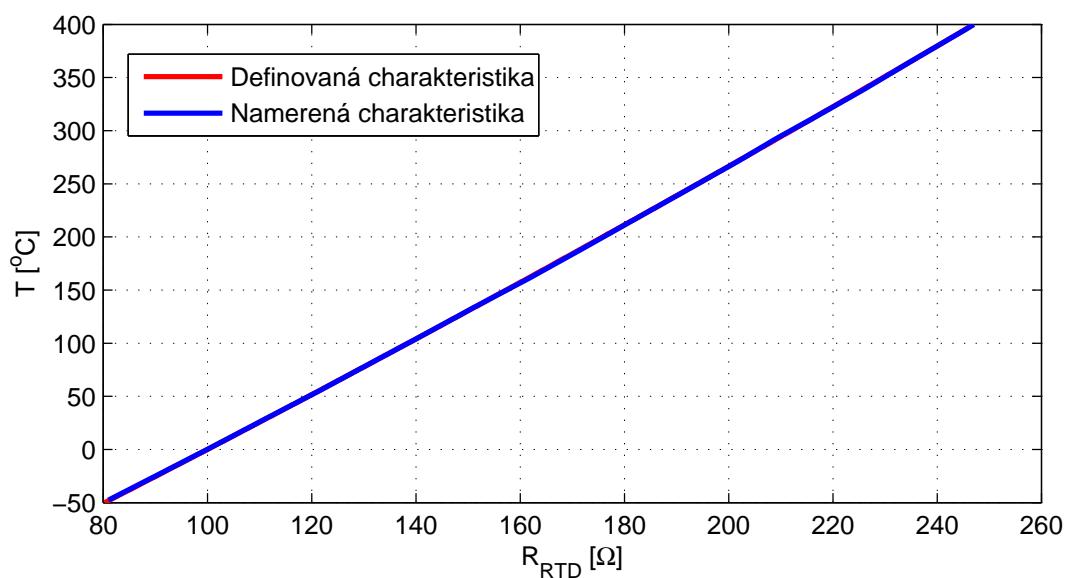
```
External_Temp := ((Temp_Ext_H * 256.0 + Temp_Ext_L) - 32768.0) / 10.0;
```

```
END_PROGRAM
```

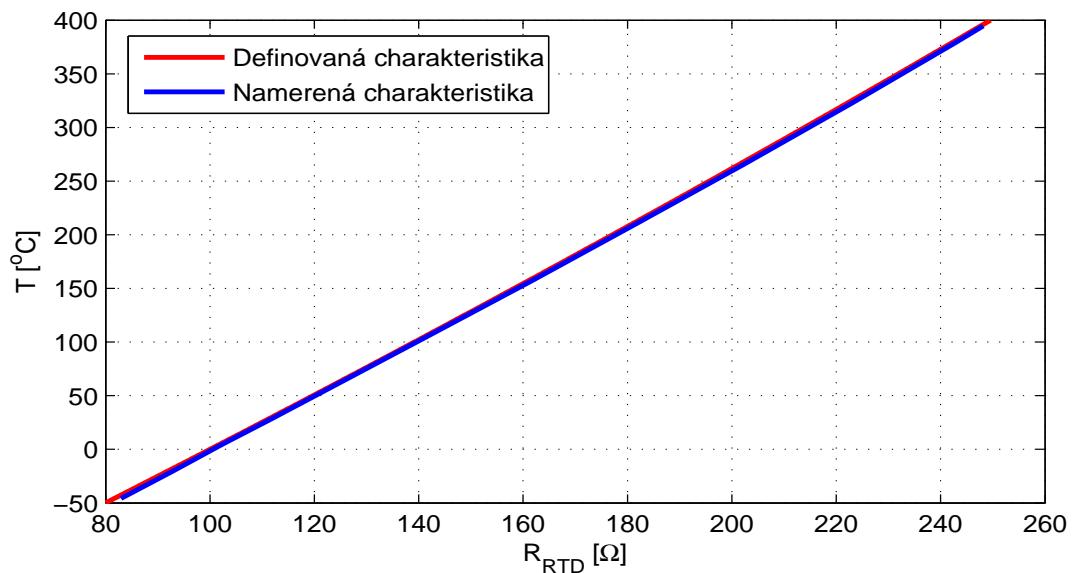
Příloha B

Převodní charakteristiky převodníku

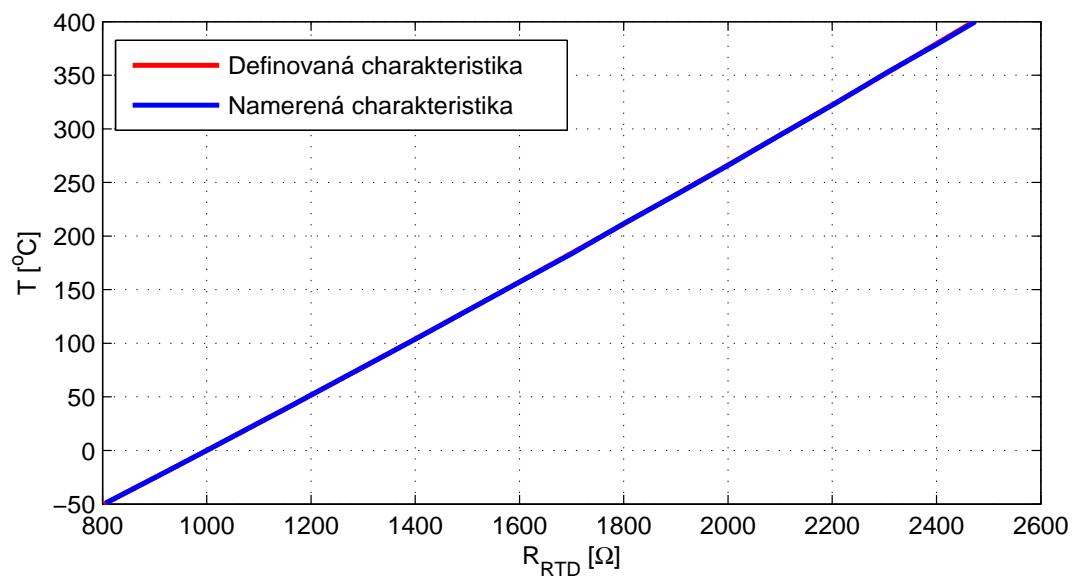
Převodní charakteristiky pro jednotlivé typy senzorů, které mohou být připojeny k převodníku. Průběhy ukazují porovnání definované charakteristiky dané normou s reálnými naměřenými daty.



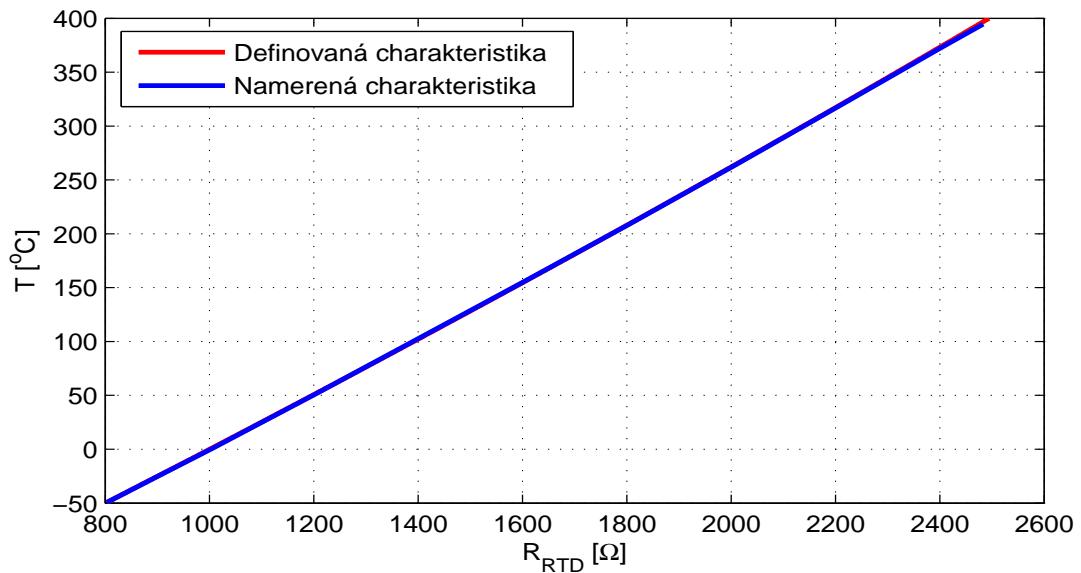
Obrázek B.1: Převodní charakteristika pro senzor Pt100 W100 = 1,385



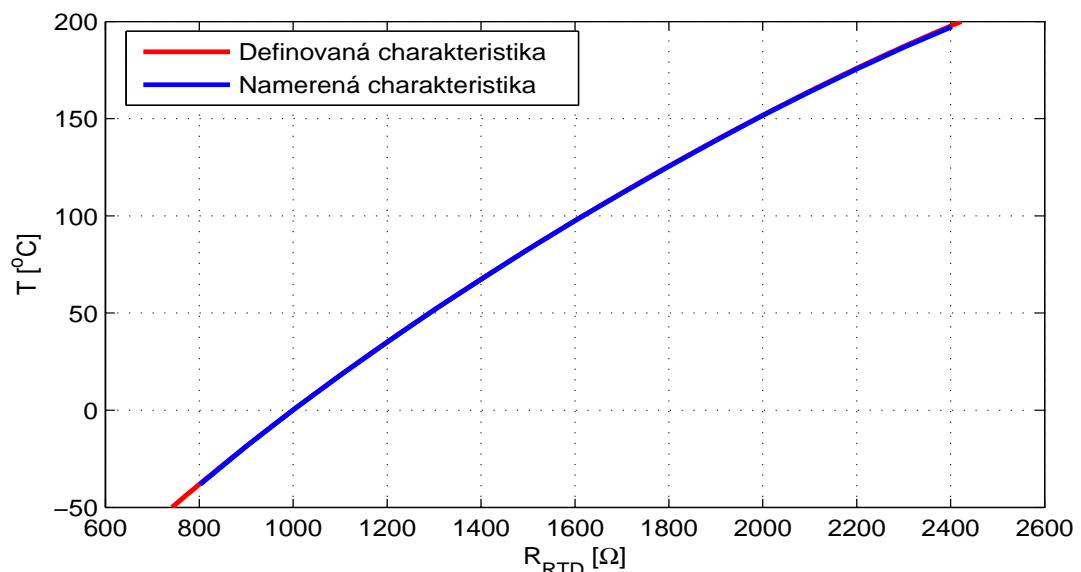
Obrázek B.2: Převodní charakteristika pro senzor Pt100 W100 = 1,391



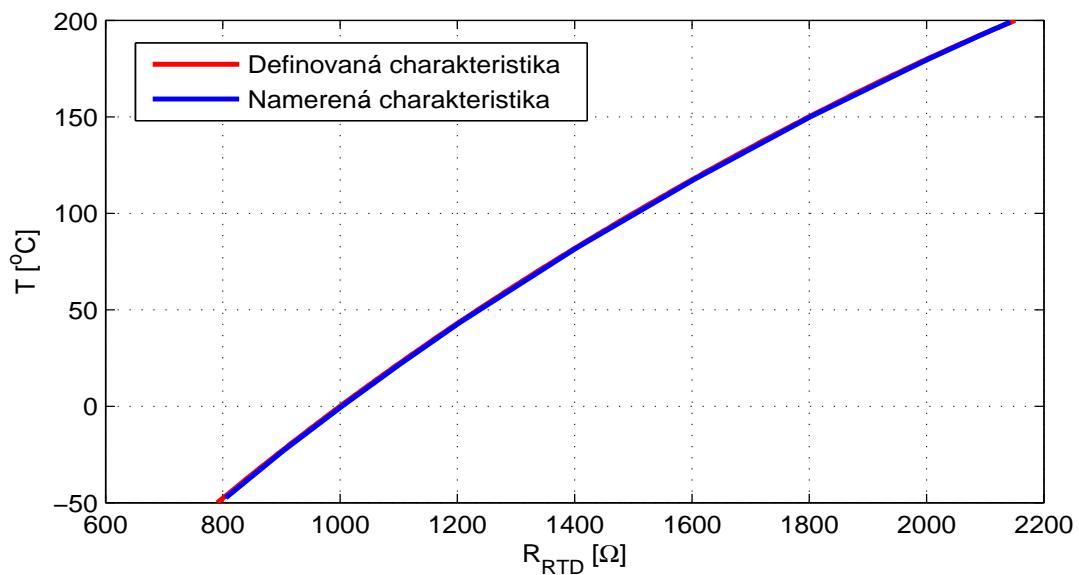
Obrázek B.3: Převodní charakteristika pro senzor Pt1000 W100 = 1,391



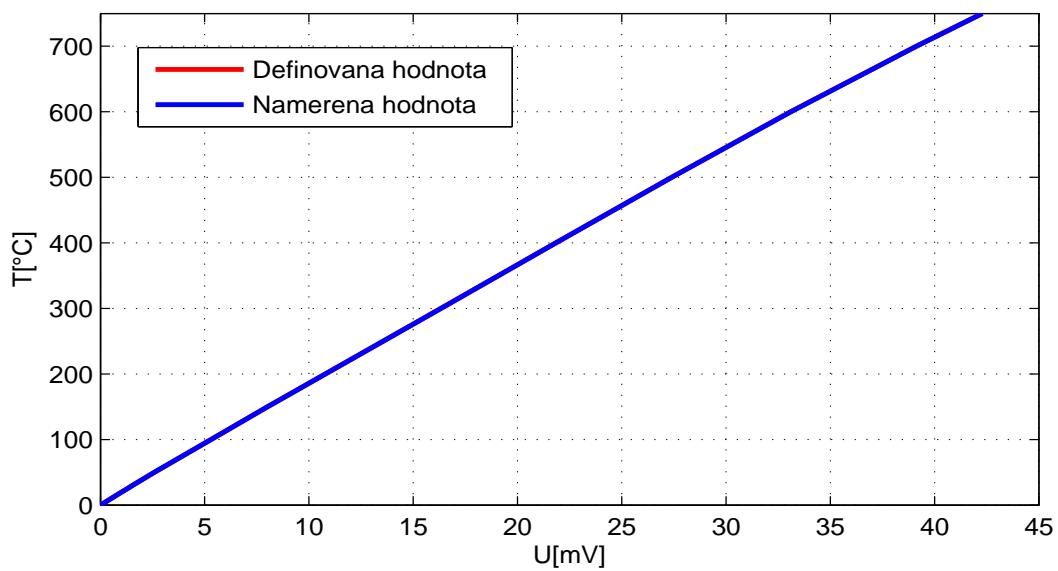
Obrázek B.4: Převodní charakteristika pro senzor Pt1000 W100 = 1,391



Obrázek B.5: Převodní charakteristika pro senzor Ni1000 W100 = 1.618



Obrázek B.6: Převodní charakteristika pro senzor Ni1000 W100 = 1.5

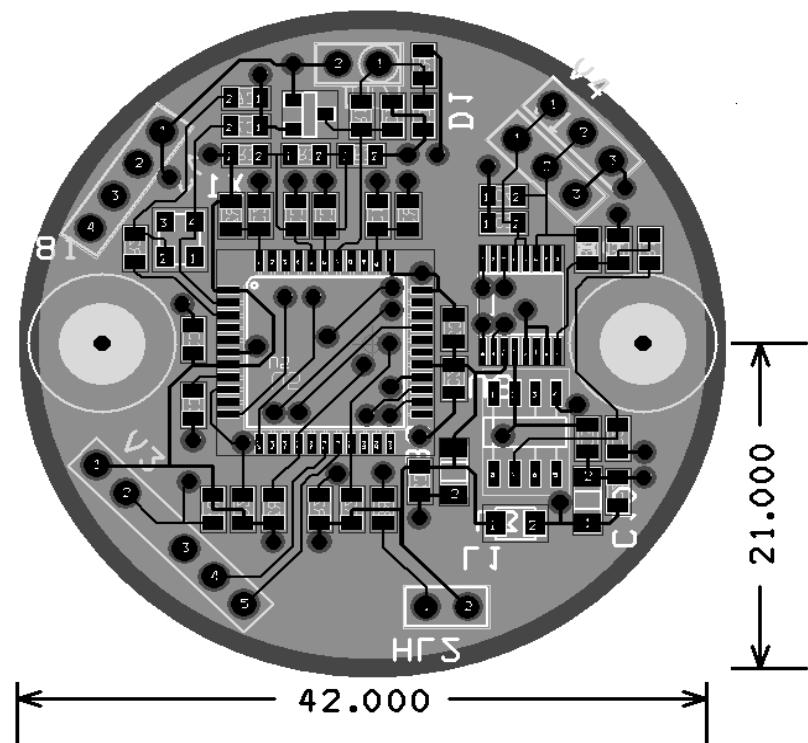


Obrázek B.7: Převodní charakteristika pro termočlánek typu J

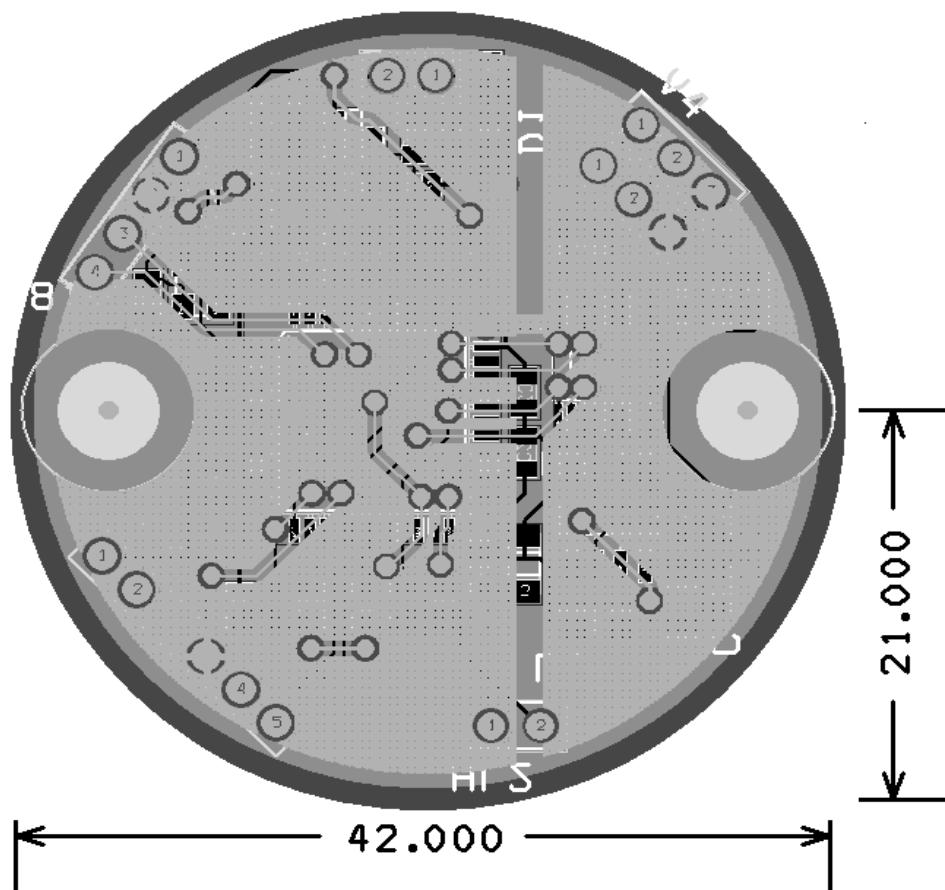
Příloha C

Plošné spoje

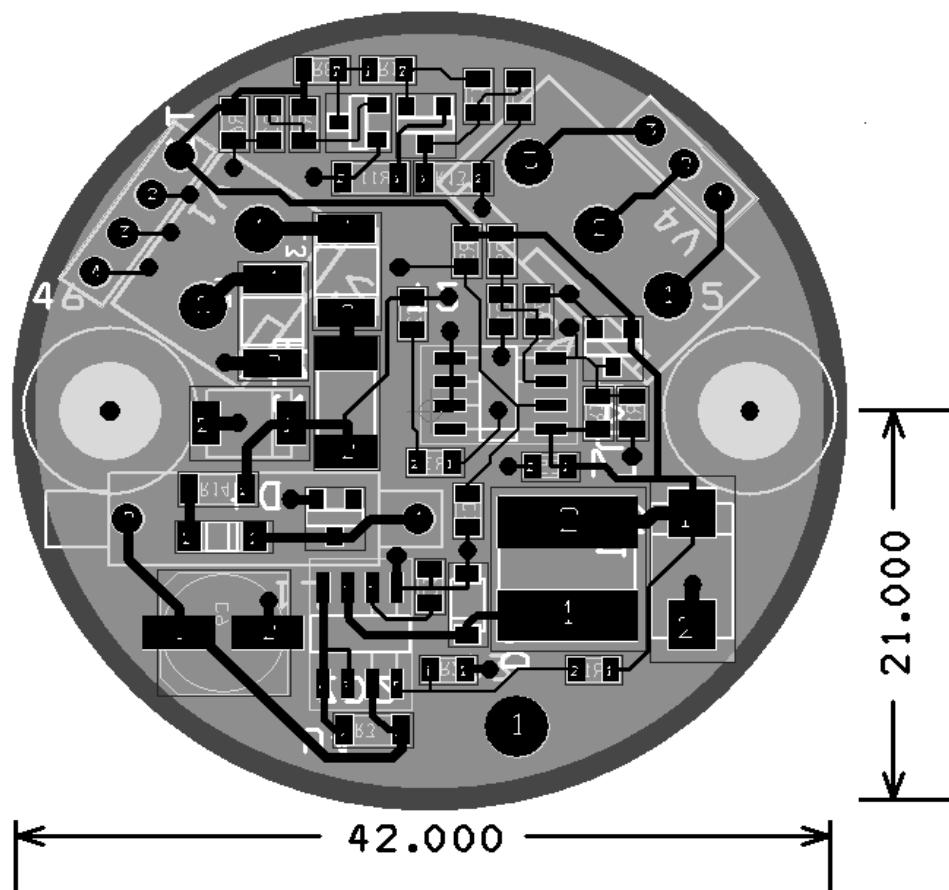
Ukázka návrhu plošných spojů z programu OrCAD Layout. Dolní deska tj. obrázky C.1 a C.2 obsahuje zapojení řídící a měřící části zařízení. Horní deska tj. obrázky C.3 a C.4 představují zapojení vstupního rozhraní převodníku.



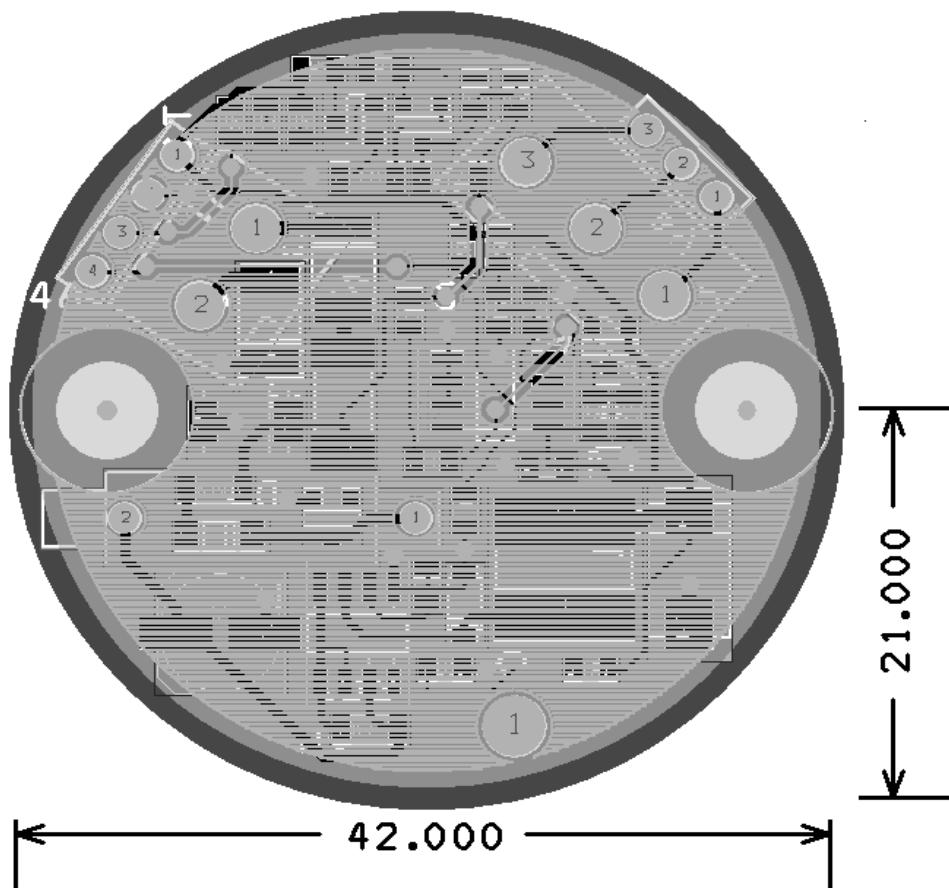
Obrázek C.1: Návrh plošného spoje - dolní deska - vrstva BOTTOM



Obrázek C.2: Návrh plošného spoje - dolní deska - vrstva TOP



Obrázek C.3: Návrh plošného spoje - horní deska - vrstva BOTTOM

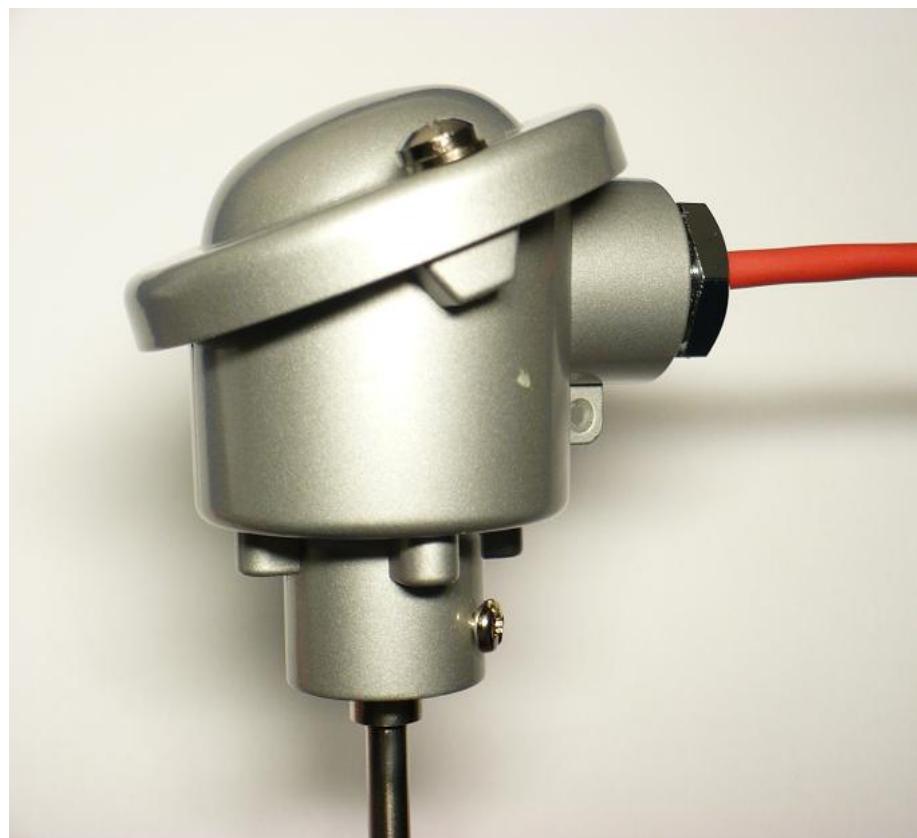


Obrázek C.4: Návrh plošného spoje - horní deska - vrstva TOP

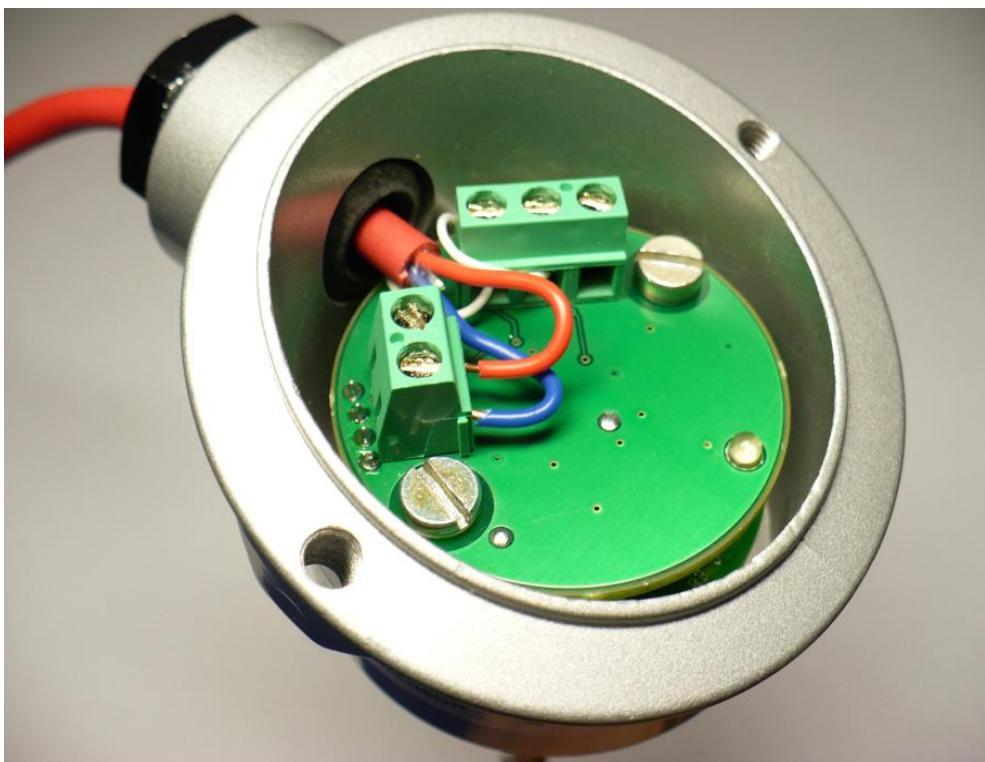
Příloha D

Hlavice - typ B

Na obrázku D.1 je vyobrazena hlavice čidel - typ B. Obrázek D.2 ukazuje umístění reálného převodníku v hlavici.



Obrázek D.1: Hlavice čidel - typ B



Obrázek D.2: Osazení převodníku v hlavici

Příloha E

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy podklady a zdrojové kódy použité v této práci.

Adresářová struktura:

Diplomová práce/...

.../DP_pdf

.../DP_Latex/...

Zdrojové kódy/...

.../Knihovny_C-IT-0100H-A/...

.../Mosaic_priklad/...

Katalogové listy/...