

Mikropočítačová vstupně / výstupní jednotka pro řízení tepelných modelů

Microcontroller Based Input / Output Unit for Control of Heat Plant
Models

Bc. Zdeněk Oborný



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk Oborný**
Osobní číslo: **A11425**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mikropočítačová vstupně / výstupní jednotka pro
řízení tepelných modelů**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na téma měření neelektrických veličin a ovládání akčních členů.
2. Provedte analýzu současného stavu řízení výukových tepelných soustav v laboratoři jak po stránce hardwarové, tak i softwarové.
3. Na základě provedené analýzy navrhnete možnosti zlepšení a rozšíření funkcí vstupně / výstupní jednotky.
4. Provedte hardwarový návrh nové jednotky na bázi jednočipového mikropočítače, která bude z pohledu vstupů a výstupů plně kompatibilní s původním řešením.
5. Realizujte prototyp jednotky a vytvořte její obslužné programové vybavení.
6. Ověřte funkci jednotky a provedte kontrolní měření na zvolené tepelné soustavě.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. FREESCALE SEMICONDUCTOR. MCF51AC256 ColdFire Integrated Microcontroller Reference Manual, Rev. 6 [online]. 2011. Dostupné z: [www.freescale.com]
2. FREESCALE SEMICONDUCTOR. MCF51AC256 Series ColdFire Microcontroller Data Sheet, Rev.7 [online]. 2011. Dostupné z: [www.freescale.com]
3. GOFTON, Peter W. Sériová komunikace. 1. vyd. Praha: Grada, 1994, 234 s. ISBN 80-716-9131-3.
4. HRUŠKA, František. Senzory v systémech informatiky a automatizace. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 177 s. ISBN 978-807-3186-302.
5. JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. EAGLE pro začátečníky /: uživatelská a referenční příručka :. 2. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 80-730-0213-2.
6. MATOUŠEK, David. Práce s inteligentními displeji LCD: [znakové a grafické displeje, přípravy a programy]. 1 vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 222 s. ISBN 80-730-0121-7.
7. VAŠEK, Vladimír. Teorie automatického řízení. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1990, 139 s. ISBN 802140115x.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Dostálek, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

24. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

11. června 2013

Ve Zlíně dne 24. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o konstrukční a programové realizaci mikropočítačové vstupně / výstupní jednotky pro řízení tepelných modelů. Začátek práce se věnuje teorii měření teploty a ovládání diskretních akčních členů. Následně je analyzován současný stav řízení tepelných modelů. Dále je vysvětleno hardwarové a programové vybavení, včetně uživatelského manuálu. Na závěr práce je provedeno kontrolní měření a srovnání se stávajícím řešením. Příloha obsahuje kompletní schéma celého zařízení, zdrojový kód pro mikrokontrolér a ukázkovou aplikaci sériové komunikace v Matlab/SIMULINK.

Klíčová slova: Mikropočítač, Coldfire V1, Převodník, Tepelná soustava.

ABSTRACT

This master thesis describes the design and implementation of microcomputer software input / output units for the heat models. First part deals with the theory of temperature measurement and control of discrete actuators. Then we analyze the current status of the proceedings thermal models. Step by step is explained hardware and software solution and user manual. As the conclusion of the work is done control measurements and comparison with the actual solution. Appendix contains a complete diagram of the entire device, the source code for a sample application microcontroller serial communication in Matlab / SIMULINK.

Keywords: Microcomputer, Coldfire V1, Converter, heat plant.

Vedoucím diplomové práce je Ing. Petr Dostálek Ph.D., kterému chci poděkovat za cenné rady při hardwarové realizaci a za čas věnovaný diplomové práci.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 MĚŘENÍ TEPLoty	11
1.1 ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty	11
1.1.1 Kovové senzory	12
1.1.2 Polovodičové odporové senzory	18
1.1.3 Zapojení odporových senzorů	22
1.1.4 Vyhodnocovací obvody pro odporové senzory.....	23
1.2 TEPLOTNÍ SENZORY S P-N PŘECHODEM.....	25
1.2.1 Diodové senzory teploty	25
1.2.2 Tranzistorové senzory teploty	26
1.2.3 Teplotní integrované senzory	27
1.3 TERMOČLÁNKY	28
1.3.1 Materiál a typy termočlánků	30
1.3.2 Měření termočlánků	31
1.4 BEZDOTYKOVÉ TEPLoměRY	32
1.4.1 Pyrometry	32
1.4.2 Termovizní systémy	34
1.5 SPECIÁLNÍ TEPLOTNÍ SENZORY	35
2 PROSTŘEDKY PRO OVLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	36
2.1 ELEKTROMECHANICKÉ RELÉ A STYKAČ.....	36
2.2 TRANZISTOR.....	37
2.2.1 Výkonové tranzistory MOS	37
2.2.2 Tranzistory IGBT	38
2.3 TYRISTOR.....	38
2.3.1 Tyristory GTO.....	38
2.3.2 Tyristory IGCT.....	38
2.4 TRIAK.....	39
2.5 SSR RELÉ	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
3 ANALÝZA SOUČASNÉHO ŘÍZENÍ VÝUKOVÝCH TEPELNÝCH SOUSTAV V LABORATOŘI.....	41
3.1 HARDWAROVÉ USPOŘÁDÁNÍ	41
3.2 SOFTWAREVÉ PROSTŘEDÍ.....	42
4 HARDWAROVÝ NÁVRH NOvé PŘEVODNÍKOVÉ JEDNOTKY	44
4.1 OBECNÉ VLASTNOSTI	44
4.2 ZDROJ.....	45
4.3 ŘÍDÍCÍ DESKA	45
4.3.1 Horní deska	45
4.3.2 Spodní deska	47

4.4	DESKA TLAČÍTEK	47
4.5	DESKA DISPLEJE	48
4.6	DESKA PŘEVODNÍKU Pt100	49
4.7	DESKA OVLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉHO VÝKONU	49
4.8	OSTATNÍ POMOCNÉ DESKY	50
4.9	TECHNICKÉ ŘEŠENÍ PŘEVODNÍKOVÉ JEDNOTKY	51
5	PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....	52
5.1	POPIS PROGRAMU	52
5.2	UŽIVATELSKÝ MANUÁL.....	55
5.2.1	Vnitřní uspořádání jednotky.....	55
5.2.2	Ovládání zařízení	57
5.2.3	Sériová komunikace Matlab/SIMULINK	60
5.2.4	Komunikační protokol RS-232	62
6	OVĚŘENÍ FUNKCÍ.....	63
6.1	MĚŘENÍ POMOCÍ STÁVAJÍCÍ JEDNOTKY	63
6.2	MĚŘENÍ POMOCÍ KARTY ADVANTECH.....	63
6.3	MĚŘENÍ V APLIKACI MATLAB/SIMULINK.....	64
	ZÁVĚR	66
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK.....	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

ÚVOD

Téma této diplomové práce se zabývá hardwarovým a softwarovým návrhem převodníkové jednotky. Tato jednotka nebo její části tvoří nedílnou součást regulačního obvodu. Základní regulační obvod je složen z řídicího systému a řízeného systému. Řídicí systém působí na podřazený řízený systém s účelem dosažení předepsaného cíle. Řízený systém, v závislosti na působení řídicího systému, poskytuje informace o probíhajícím procesu. Řídicí systém obvykle pracuje s unifikovanými signály a neumožňuje bez přídavného zařízení přímo působit na řízený systém. Převodníková jednotka slouží jako rozhraní mezi řídicím a řízeným systémem a je navržena podle parametrů řízeného systému. Úkolem převodníkové jednotky je tedy převést unifikovaný signál na neunifikovaný, který dále umožní působit na řízený systém a poskytovat informace o výstupní veličině řízeného systému.

Cílem této diplomové práce tedy bylo navrhnout a zkonstruovat zařízení k nahrazení stávající převodníkové jednotky pro tepelné modely používané pro výukové účely. Původní převodníkové jednotky jsou v provozu již přes deset let a při jakékoliv jejich poruše nastává problém s opravitelností tohoto zařízení, jelikož součástky, ze kterých byly zkonstruovány, již nejsou běžně k dispozici. Nově navržená náhrada této jednotky, má za úkol obsáhnout všechny vlastnosti stávající jednotky a rozšířit další možnosti tohoto zařízení.

Teoretická část diplomové práce se zabývá literární rešerší na téma měření neelektrických veličin a ovládání akčních členů. Protože je toto téma velice obsáhlé, jsou z této oblasti vybrána pouze témata, vztahující se k diplomové práci. Z tohoto důvodu se teoretická část věnuje pouze měřením teploty a diskrétnímu ovládání akčních členů. Praktická část analyzuje současný stav řízení tepelných modelů. Z této analýzy je následně vytvořen hardwarový návrh zařízení, který popisuje konstrukční řešení jednotlivých částí zařízení. Dále je nastíněn princip řídicího algoritmu, který je popsán v blocích. Tyto bloky jsou následně podrobně vysvětleny. Součástí diplomové práce je i uživatelský manuál, který popisuje ovládání zařízení, rozmístění jednotlivých komponent a ukázkou nastavení sériové komunikace v aplikaci Matlab/SIMULINK. Posledním bodem diplomové práce je ověření funkce zařízení a provedení kontrolního měření na tepelném modelu se srovnáním stávajících převodníkových jednotek.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MĚŘENÍ TEPLOTY

Teplota je termodynamická stavová veličina, která je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Účinnost vratného Carnotova cyklu, se dá definovat jako nejvyšší, teoreticky dosažitelná účinnost oběhu, v němž se přivádí teplo pracovní látky při teplotě T_1 a odvádí při teplotě T_2 . Z tohoto důvodu lze stanovit teplotní stupnici pomocí termodynamických zákonů, nezávisle na vlastnostech teploměrné látky. Lord Kelvin definoval termodynamickou stupnici na základě rovnovážného stavu třech skupenství vody. Teplota trojného bodu vody má na termodynamické stupnici hodnotu 273,16 K. V roce 1989 byla přijata Mezinárodní stupnice ITS-90. ITS-90 definuje Mezinárodní Jelcinovu teplotu, značka T_{90} a Mezinárodní Celsiovu teplotu t_{90} . Vztah mezi T_{90} a t_{90} je stejný jako mezi T a t kde [18]:

$$t_{90}(^{\circ}\text{C}) = T_{90}(\text{K}) - 273,15 \quad (1)$$

Termodynamická teplota T a teplota T_{90} mají stejnou jednotku 1K. Stejně tak i u Celsiovy teploty t a teploty t_{90} se používá stejná teplota 1°C [18].

Při měření teploty prostředí, předmětu nebo látky lze použít několik senzorů založených na odlišných fyzikálních principech závislosti změn veličin na teplotě. V technické praxi se uplatňují senzory dilatační, senzory se změnou elektrických vlastností nebo senzory se snímáním elektromagnetického záření. Dilatační senzory využívají roztažnosti tuhých, kapalných nebo plyných látek. Senzory se změnou elektrických vlastností jsou založeny na změně odporu, termoelektrického napětí nebo polovodičového jevu [15].

1.1 Odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty v současné době patří k nejpoužívanějším prostředkům pro měření teploty. Jejich využití je možné ve všech odvětví průmyslu např. ve strojírenství, automobilovém průmyslu, chemickém průmyslu, potravinářství atd. Tímto však jejich možnosti využití nekončí. Lze je použít například i jako etanoly pro další kalibraci jiných typů senzorů teploty nebo teploměrů. Jejich hlavní výhoda spočívá ve stabilitě, přesnosti a tvaru výstupního signálu.

Odporové senzory využívají závislost odporu materiálu na teplotě. Tento jev závislosti teploty na odporu lze fyzikálně vysvětlit tak, že se zvyšující se teplotou, se také zvyšuje amplituda termických kmitů krystalové mřížky daného materiálu senzoru, a tím se také

zvyšuje pravděpodobnost srážek elektronů a iontů. Zkracuje se volná dráha elektronů a doba zrychlování částic elektrickým polem. Z tohoto důvodu klesá elektrická vodivost γ , která je dána vztahem [15]:

$$\gamma = \frac{n_0 e_0^2 \tau}{2m_0} \quad (2)$$

Kde n je hlavní kvantové číslo; e_0 elementární náboj; τ střední doba poslední srážky a m hmotnost elektronu.

Závislost změn odporu podle teploty platí dle Lorentzova-Lorentzova zákona, který definuje, že podíl tepelné a elektrické vodivosti má pro všechny kovy stejnou hodnotu, úměrnou absolutní hodnotě [15]:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = T \quad (3)$$

Kde λ je tepelná vodivost; γ elektrická vodivost a T absolutní hodnota [15].

1.1.1 Kovové senzory

Tyto senzory teploty patří k nepoužívanějším. Při jejich výrobě se používají především čisté kovy jako je například platina, nikl, měď, wolfram, molybden, slitina stříbra a zlata a další kovy. Jak již bylo zmíněno, tyto senzory využívají změnu elektrického odporu v závislosti na teplotě, proto je u těchto senzorů důležité tuto změnu kvantifikovat. Tento parametr se nazývá teplotní součinitel α a podléhá normám. Jednotkou je (1/K) a pro kovové senzory je stanoven vztahem [15]:

$$\alpha = \frac{\rho_{100} - \rho_0}{100 \cdot \rho_0} \quad (4)$$

Kde ρ_{100} je měrný odpor při 100°C; ρ_0 měrný odpor při 0°C.

Dalším důležitým parametrem je také poměr odporů W_t , dříve nazývaný jako redukováný odpor. Je to podíl elektrického odporu při teplotě t a odporu při teplotě $0,01^\circ$ [27]:

$$W_t = \frac{R_t}{R_{0,01}}, \text{ starší definice } W_t = \frac{R_t}{R_0} \quad (5)$$

Elektrický odpor kovových senzorů vzrůstá s teplotou a dá se u čistých kovů vyjádřit polynomem [27]:

$$R = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 (t - 100)] \quad (6)$$

Kde R_0 je odpor senzoru při 0°C ; t teplota a A, B, C konstanty dané materiálem senzoru a normou.

Platinový odporový senzor

Platina (latinský název Platinum) s chemickou značkou Pt se zařazuje se svou vysokou rezistivitou $\rho \approx 0,1 \mu\Omega \cdot m$ při teplotě 20°C mezi odporové materiály. Je to stříbrolesklý kov, který se vyznačuje dobrou kujností a tažností. Platina je ze všech kovů chemicky nejodolnější. Její teplota tání je 1769°C . Platina se v elektrotechnice používá jako chemicky odolný materiál pro výrobu elektrod, kontaktů, odporových drátů atd. Také se používá na výrobu termočlánků (platina slouží jako jeden z vodičů) a v neposlední řadě slouží pro výrobu teplotních odporových senzorů [4].

U provozních teploměrů je důležitá jejich možná záměnnost, která umožňuje měřit s určitými chybami v dohodnutých mezích. Proto jsou normami vymezeny základní hodnoty rezistorů a odchylek. Standardní hodnota odporu platinového senzoru je 100Ω při teplotě 0°C . Tento senzor je označován jako Pt100. Vedle tohoto senzoru se dále vyrábějí i platinové senzory s hodnotami 50, 200, 500, 1000 a více Ω [27].

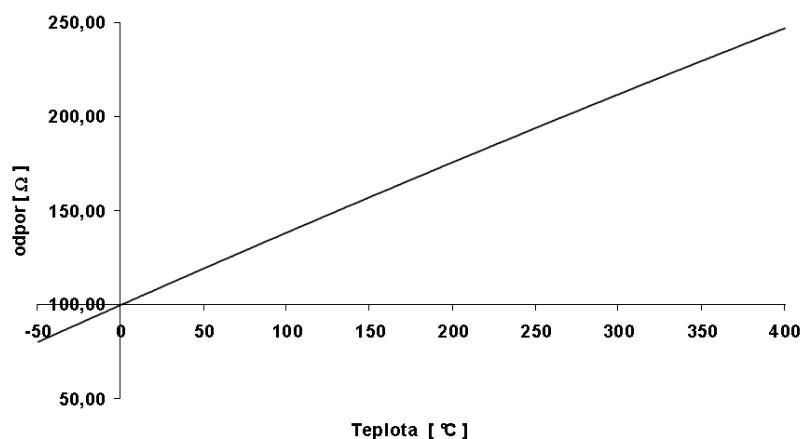
Norma ČSN EN 60 751 platná v ČR definuje základní hodnotu odporu $R_0 = 100\Omega$ a teplotní koeficient odporu $\alpha = 3,851 \cdot 10^{-3} K^{-1}$. Z čehož vyplývá, že poměr odporů je $W_t = 1,3850$. Teplotní závislost odporu platinového senzoru v oblasti záporných teplot od -200°C do 0°C lze dle normy vyjádřit polynomem ve tvaru [27]:

$$R = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 (t - 100)] \quad (7)$$

V teplotním rozsahu od 0°C do 850°C pak platí [27]:

$$R = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2] \quad (8)$$

Kde R_0 odpovídá hodnotě 100Ω ; $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$; $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$.



Obrázek 1: Charakteristika PT100 [27].

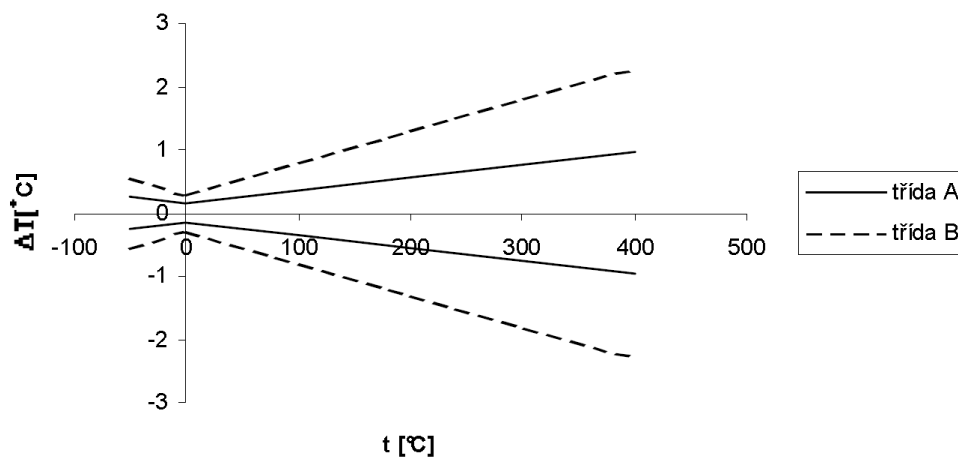
Platinové senzory teploty se vyznačují dlouhodobou stabilitou, kde změna odporové hodnoty je 0,03% při 1000 hodinách a při maximální teplotě v rozsahu senzoru. Nevýhodou senzoru je samo ohřev při průchodu elektrickým proudem, přičemž vzniká tepelná energie, ovlivňující chybu měření. Proto je důležité volit měřicí proud udávaný výrobcem daného senzoru. Obvykle se volí tento proud 1mA nebo menší [17].

Norma ČSN EN 60 751 definuje pro platinové senzory čtyři základní třídy přesnosti, a to AA, A, B a C s tolerančními poli [27].

Tabulka 1: Třídy tolerancí Pt100 [27].

Toleranční třída	Drátové senzory	Tenkovrstvé senzory	Toleranční pásmo [°C]
	Teplotní rozsah [°C]		
AA	-50 až +250	0 až +150	$\Delta T = \pm(0,1 + 0,0017 t)$
A	-100 až +450	-30 až +300	$\Delta T = \pm(0,15 + 0,002 t)$
B	-196 až +600	-50 až +500	$\Delta T = \pm(0,3 + 0,005 t)$
C	-196 až +600	-50 až +600	$\Delta T = \pm(0,6 + 0,01 t)$

kde $|t|$ je absolutní hodnota teploty v °C.



Obrázek 2: Toleranční pole Pt100 [27].

Senzor Pt100 je nejpoužívanějším typem odporových senzorů teploty. Nejčastěji nachází uplatnění v měřicí a regulační technice, potravinářství, automobilovém průmyslu atd. Pt100 se používá nejvíce tam, kde je potřeba přesné měření, jako jsou laboratoře nebo při výrobě etalonů pro kalibraci jiných senzorů teploty či teploměrů. Pt1000 přejímá vlastnosti Pt100, avšak pro svůj vysoký základní odpor je vhodný v aplikacích, kde je potřeba senzor připojovat delším kabelem. Uplatnění má například ve výrobních halách, chladírenství a plynárenství [27].

Niklový odporový senzor

Nikl (latinský název Niccolum) chemická značka Ni je bílo lesklý feromagnetický kov. Měrný odpor je $\rho \approx 0,06 \mu\Omega \cdot m$ při teplotě 20°C . Nikl se používá nejvíce v ocelářském průmyslu. V elektrotechnice slouží slitiny niklu pro výrobu baterií s možností mnohonásobného nabíjení. Také se používá pro výrobu topných spirál a drátů. Nikl však patří mezi prvky, které mají negativní vliv na zdravotní stav lidského organismu [4].

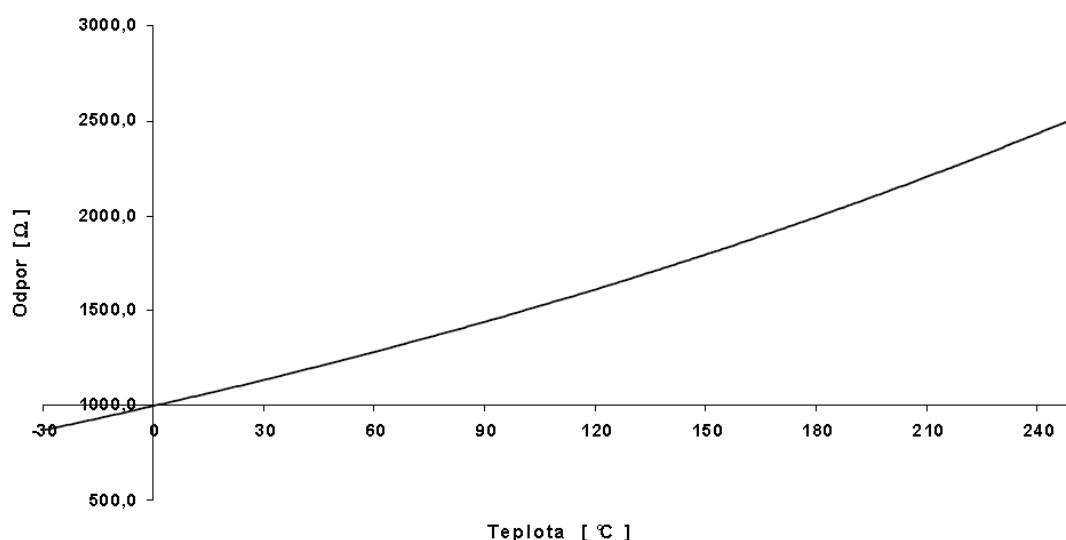
Předností niklových teplotních senzorů je vyšší úroveň citlivosti, rychlá odezva a cena. Teplotní rozsah je od -60 do 250°C . Při teplotě vyšší než 300°C dochází ke změně krystalické modifikace niklu, a tím dochází i ke změně teplotního součinitele odporu. Niklové senzory teploty se vyznačují dlouhodobou stabilitou, kde změna odporové hodnoty je menší než $0,1\%$ při 1000 hodinách a při maximální teplotě v rozsahu senzoru teploty [27].

Niklové teplotní senzory se používají s $R_0 = 1000\Omega$ a $R_0 = 10000\Omega$, kde teplotní součinitel je $5000\left[\frac{ppm}{^\circ C}\right]$ nebo $6180\left[\frac{ppm}{^\circ C}\right]$ u senzoru s $R_0 = 891\Omega$ je teplotní součinitel $6370\left[\frac{ppm}{^\circ C}\right]$ [27].

Teplotní závislost odporu niklového senzoru Ni1000 od $-60^\circ C$ do $250^\circ C$ lze vyjádřit polynomem ve tvaru [27]:

$$R = 1000 \left[1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 \right] \quad (9)$$

Kde $A = 4,427 \cdot 10^{-3} ^\circ C^{-1}$; $B = -5,172 \cdot 10^{-6} ^\circ C^{-2}$; $C = 5,585 \cdot 10^{-9} ^\circ C^{-3}$.



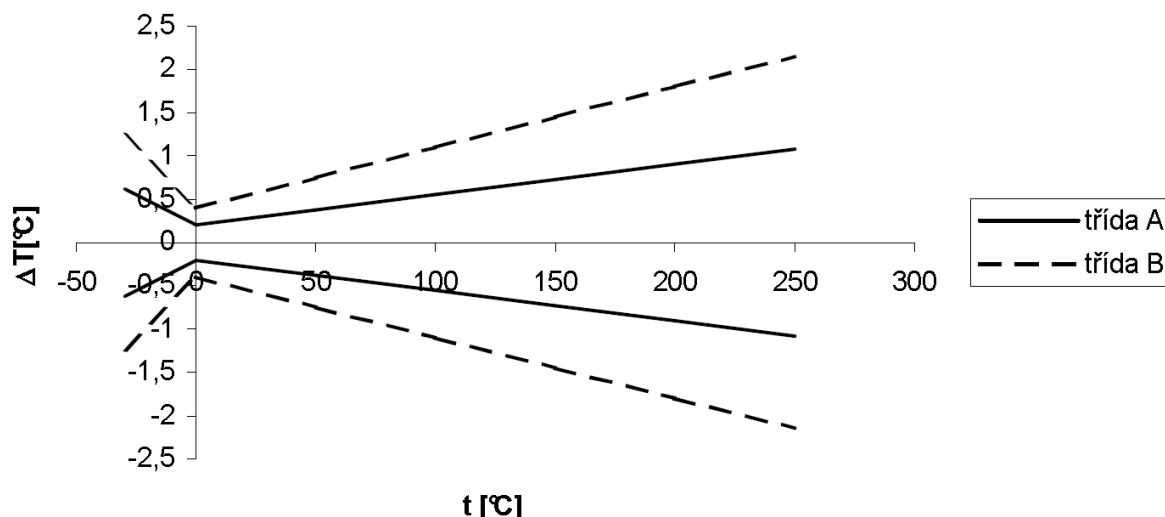
Obrázek 3: Charakteristika Ni1000 [27].

Norma DIN 43760 definuje pro Ni senzory dvě základní třídy přesnosti A a B s tolerančními poli [27].

Tabulka 2: Třídy tolerancí Ni1000 [27].

	pro $t = -60^\circ C$ až $0^\circ C$	pro $t = 0^\circ C$ až $250^\circ C$
Třída A	$\Delta T = \pm(0,2 + 0,0014 t) [^\circ C]$	$\Delta T = \pm(0,2 + 0,0035 t) [^\circ C]$
Třída B	$\Delta T = \pm(0,4 + 0,028 t) [^\circ C]$	$\Delta T = \pm(0,4 + 0,0070 t) [^\circ C]$

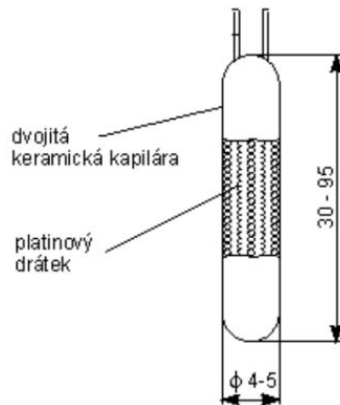
kde $|t|$ je absolutní hodnota teploty v $^\circ C$.



Obrázek 4: Toleranční pole Ni1000 [27].

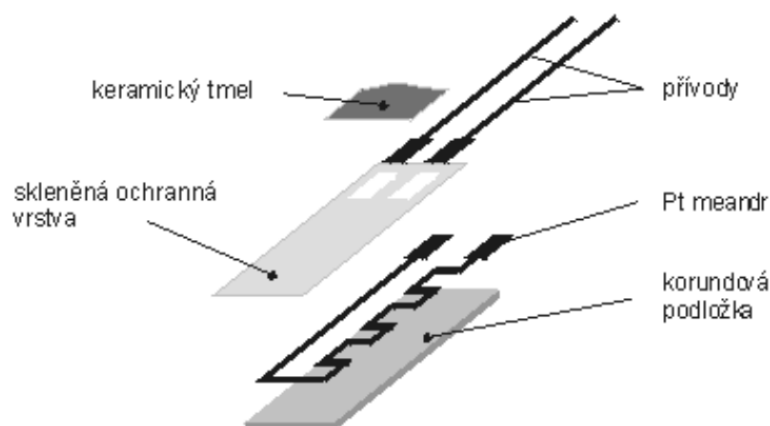
Konstrukce kovových senzorů teploty

Vinuté senzory jsou tvořeny spirálovitě namotaným odporovým vinutím, obvykle o průřezu 0,05mm, který je zatavený do keramického nebo skleněného tělíska viz obrázek 5. Toto tělísko je pak možné uložit do ochranné trubice senzoru [19].



Obrázek 5: Vinutý senzor [19].

Při výrobě vrstveného senzoru se na keramický substrát napráší vysoce kvalitní odporový materiál, kde je vrstva odporového materiálu fotolitograficky strukturována. Za pomoci laseru se odpor senzoru nastaví na velmi přesnou hodnotu. Následně se aktivní plochy senzoru překryjí skelnou vrstvou, která chrání před mechanickým a chemickým poškozením. K odporovému meandru jsou připájeny kontakty, které jsou překryty ochranou skleněnou pastou [27].



Obrázek 6: Vrstvený senzor [19].

1.1.2 Polovodičové odporové senzory

Princip polovodičových odporových senzorů spočívá v pohybu elektronů, které jsou při teplotě absolutní nuly pevně svázané se svými jádry a nemůžou tedy vést proud. Těmto elektronům je potřeba dodat energii, ať už elektromagnetickou nebo tepelnou. Tato energie způsobí, že se elektrony přesunou přes zakázaný pás do vodivostního pásu. Se zvyšující se energií se bude zvyšovat koncentrace elektronů a odpor polovodičového materiálu se sníží. Tudíž pro odporové materiály je důležitá teplotní závislost koncentrace nosiče náboje [2]:

$$n \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (10)$$

Kde n je počet elektronů v jednotkovém objemu; E rozdíl mezi energetickými hladinami mřížky; k Boltzmannova konstanta a T absolutní teplota.

Polovodičové senzory teploty mají monokrystalickou nebo polykrystalickou strukturu. Mezi senzory s monokrystalickou strukturou lze zařadit křemíkové nebo germaniové senzory. Nejvíce jsou rozšířena polykrystalická oxidová čidla, která se dále dělí na skupiny s negativním součinitelem odporu NTC termistory (negastory) a s pozitivním součinitelem odporu PTC termistory (pozistory) [15].

Termistory NTC

Termistor NTC má záporný teplotní součinitel odporu a odpor s rostoucí teplotou klesá. Polykrystalické termistory se vyrábějí práškovou metodou spékáním oxidů. Jejich teplotní rozsah je přibližně od -50°C do 150°C , ovšem lze je najít i ve speciálních aplikacích, kde

se měří velmi nízké teploty cca 4K nebo vysoké teploty až 1000°C. Závislost odporu na teplotě je značně nelineární a lze ji vyjádřit přibližným vztahem [15]:

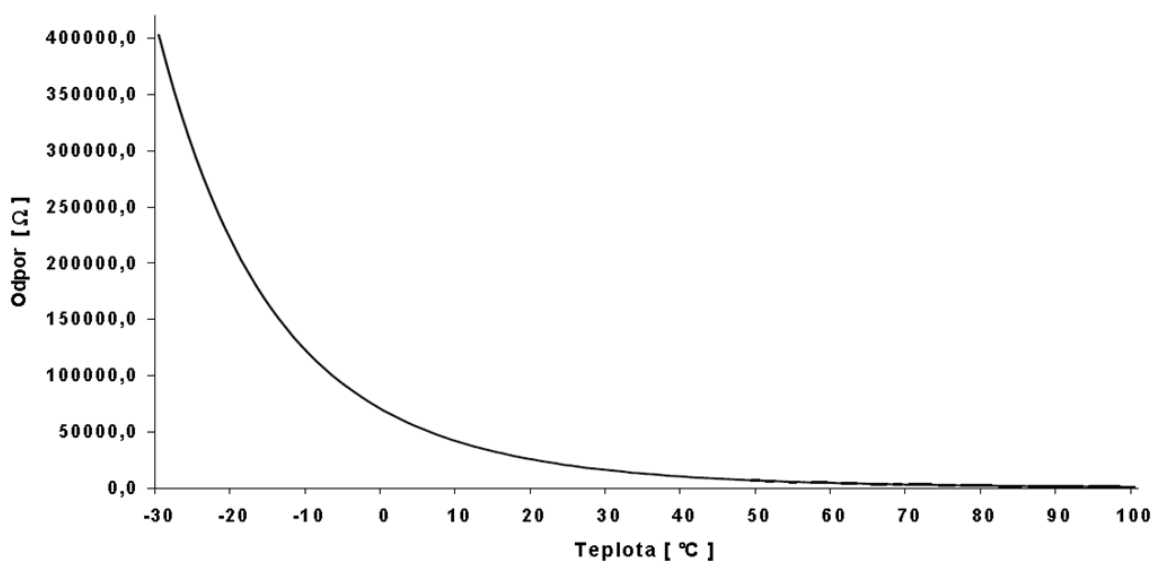
$$R = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (11)$$

Kde R je odpor termistoru; A konstanta daná geometrickým tvarem a použitým materiálem; B teplotní konstanta a T absolutní teplota.

Teplotní závislost odporu NTC senzoru lze vyjádřit polynomem ve tvaru [27]:

$$T = \left[a + b \cdot \ln(R) + c \cdot (\ln R)^3 \right]^{-1} \quad (12)$$

Kde konstanty a , b , c jsou dány výrobcem senzoru, například u senzoru NR355 20K jsou konstanty $a = 1,152085338392319 \cdot 10^{-3}$; $b = 2,13146276927388 \cdot 10^{-4}$ a $c = 9,372336566006315 \cdot 10^{-8}$.

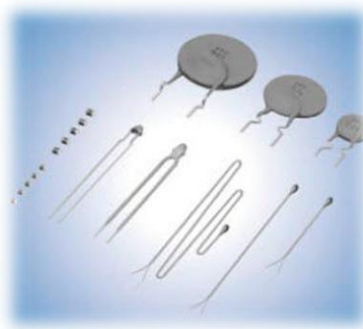


Obrázek 7: Charakteristika senzoru NR355 20K [27].

NTC senzory teploty se vyznačují velkou citlivostí s malými rozměry a hmotností. Umožňují měřit velmi rychlé teplotní změny. Mají záporný teplotní součinitel, který je přibližně o řád vyšší než u kovů. V porovnání s platinovými senzory teploty jsou NTC termistory méně stabilní. Například u NR355 je dlouhodobá stabilita 0,03% po 8760 hodin, při teplotě 70°C. U NTC termistorů je nutno řešit samo ohřívání. Výrobce daného senzoru specifikuje doporučený i maximální stejnosměrný příkon. Například u NR355

je doporučený příkon přibližně 0,05mW a maximální příkon 1mW. Zásadní nevýhodou těchto senzorů je značná nelinearita [27].

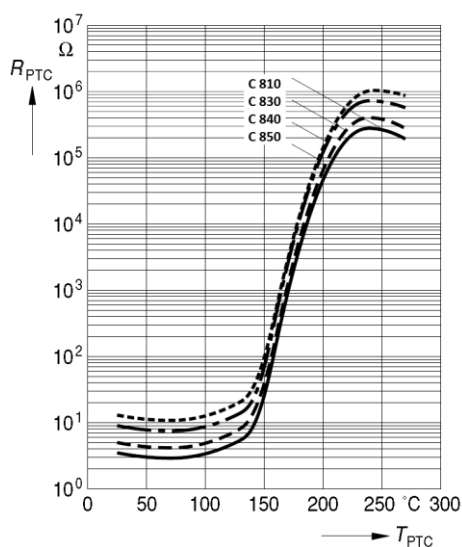
Tyto senzory teploty mají uplatnění tam, kde není potřeba velkého rozsahu teplot, například v termostatech, digitálních teploměrech, ve zdravotnictví a ve výpočetní technice [27].



Obrázek 8: Možné konstrukce NTC termistoru [3].

Termistory PTC

Termistory PTC mají kladný teplotní součinitel odporu na rozdíl od NTC. PTC termistor má nelineární závislost odporu na teplotě. Se zvětšující teplotou od záporných hodnot nejprve odpor mírně klesá, poté po takzvané Curieově teplotě strmě roste a po překročení odporu o několik řádů opět teplota začne mírně klesat. Tato Curieova teplota je závislá na použitém materiálu snímače (tento prudký nárůst teploty se vysvětluje chováním spinů) a obvykle bývá definována jako teplota, při které je odpor termistoru v určitém poměru k minimální hodnotě odporu R_{\min} nebo k R_0 [15].



Obrázek 9: Charakteristika PTC senzoru řady C800 [9].

Teplotní závislost odporu PTC termistoru v oblasti jeho nárůstu je vyjádřena vztahem [15]:

$$R = R_r e^{At} \quad (13)$$

Kde R_r je odpor termistoru při referenční teplotě; t teplota nad Curierovou teplotou a A materiálová konstanta.

PTC mají teplotní závislost na odporu značně nelineární, avšak nacházejí uplatnění například jako limitní spínače elektrických strojů, kde slouží jako tepelná ochrana vynutí. Lze je použít taky pro měření teploty v úzkém rozsahu teplot. Většina aplikací s PTC termistory využívá toho, že se termistor průchodem proudu zahřívá. Typická aplikace je vyhřívání skel u automobilů nebo vratné pojistky [16].

Monokrystalické senzory

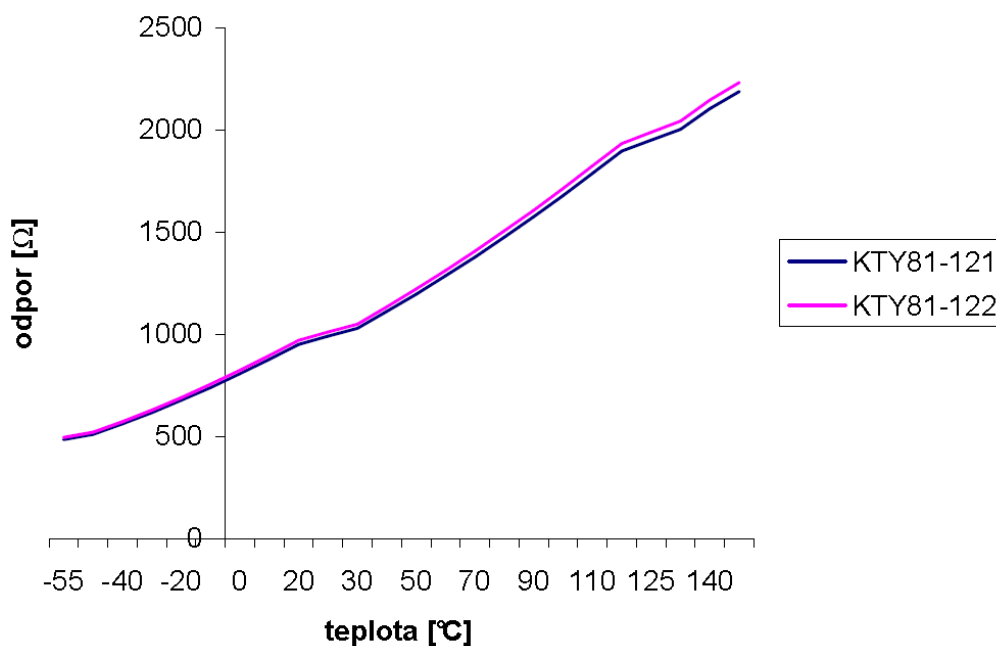
Monokrystalický senzor teploty lze vyrobit z křemíku, germania nebo india. Ovšem v odvětví měření a regulace se lze setkat výhradně se senzory vyrobenými z křemíku. Pro výrobu těchto senzorů se používá nevlastního polovodiče s dominantní elektronovou vodivostí (typ N). Monokrystalické Si senzory mají kladný teplotní součinitel a obvykle se vyrábějí v rozsahu od -50°C do 150°C , ovšem existují i senzory s horní hranicí rozsahu 300°C [16].

Teplotní součinitel odporu je téměř konstantní v celém rozsahu teplot. Jeho střední hodnota se pohybuje kolem $0,01\text{K}^{-1}$ (Platina má $0,004\text{K}^{-1}$). Teplotní drift je přibližně $0,2\text{K}$ po 10000 hodinách provozu při maximální provozní teplotě [16].

Teplotní závislost odporu monokrystalického senzoru KTY81-12x lze vyjádřit polynommem ve tvaru [27]:

$$R_{KTY} = R_{25} (1 + a \cdot T + b \cdot T^2) \quad (14)$$

Kde R_{25} je odpor při teplotě 25°C ; T rozdíl mezi měřenou teplotou a referenční teplotou a konstanty $a = 7,871 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $b = 1,861 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$.



Obrázek 10: Charakteristika senzoru KTY81-12x [27].

Monokrystalické Si senzory se v poslední době těší velké oblibě díky tvaru výstupní charakteristiky, cenové dostupnosti a různorodosti provedení. Tyto senzory nacházejí uplatnění ve výpočetní technice, vzduchotechnice, automobilovém průmyslu a jako senzory pokojových termostátů [27].



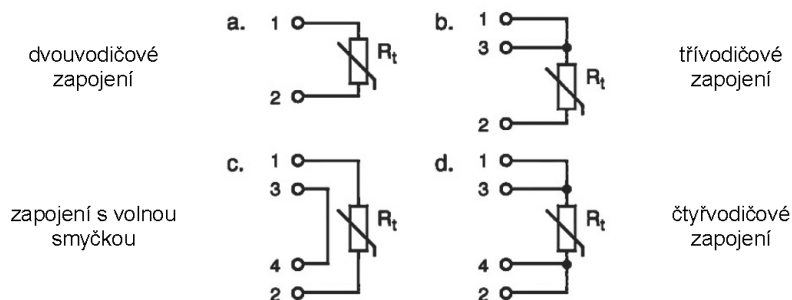
Obrázek 11: Konstrukce KTY81-121 [10].

1.1.3 Zapojení odporových senzorů

Odporový senzor je připojen pomocí kabelu k vyhodnocovacímu obvodu. Tento kabel má elektrický odpor, který je závislý na délce kabelu a materiálu. S měnící se teplotou se také mění odpor materiálu kabelu a vnáší do měření určitou nejistotu, která se připočítává k odporu senzoru. Proto existuje několik variant zapojení senzorů, které kompenzují tento problém.

Dvou vodičové zapojení se používá pro běžná měření na krátkou vzdálenost. Toto zapojení nekompensuje odpor vedení. Třívodičové zapojení kompenzuje vliv změny odporu

přívodních vodičů do délky okolo 100 metrů. Výhodou je možnost změření odporu vnitřního vedení za provozu. Zapojení s volnou smyčkou kompenzuje vliv přívodních kabelů libovolné délky. U zapojení čtyřvodičového je měřící odpor vybaven dvěma proudovými a dvěma napěťovými vodiči. Zde se měří úbytek napětí na měřícím odporu napájeného konstantním proudem. Odpor vnitřního vedení je vyloučen. Toto zapojení se používá pro přesné měření [27].

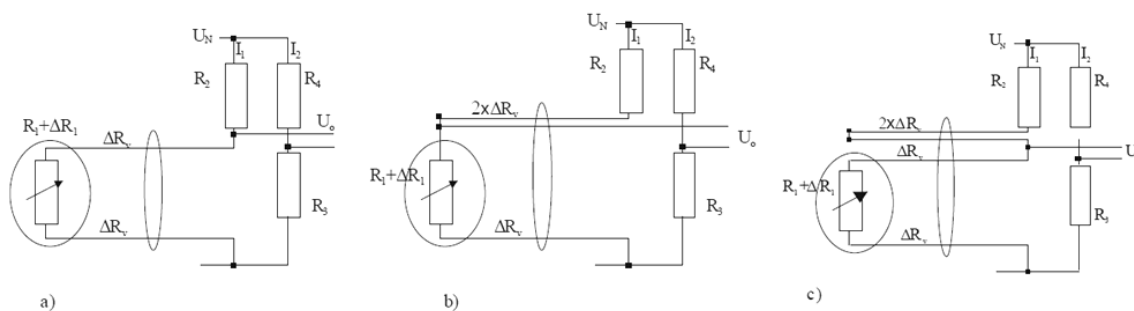


Obrázek 12: Zapojení odporových senzorů [27].

Pro snížení vlivu odporu vodičů se používají senzory s vyššími odpory například 1000Ω [27].

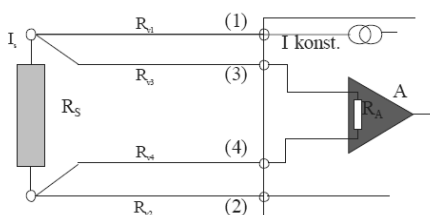
1.1.4 Vyhodnocovací obvody pro odporové senzory

Změnu elektrického odporu je nutné pro další zpracování převést na elektrický signál nebo číselný údaj. Obecně lze tento převod uskutečnit pomocí Wheatstoneova můstku. Toto zapojení je vhodné pro zapojení dvouvodičové, třívodičové a zapojení s volnou smyčkou.



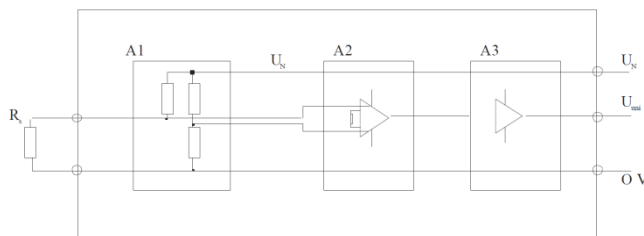
Obrázek 13: Zapojení použitím můstkové metody [15].

Pro čtyřvodičové zapojení senzoru se používá specifické zapojení, kde zdroj proud I_s napájí odporový senzor pomocí dvou vodičů o hodnotě přibližně 1 mA . Procházející proud vyvolává úbytek napětí na senzoru, který je závislý na teplotě. Tento úbytek napětí je pak druhou dvojicí vodičů přiveden na vstup operačního zesilovače [15].



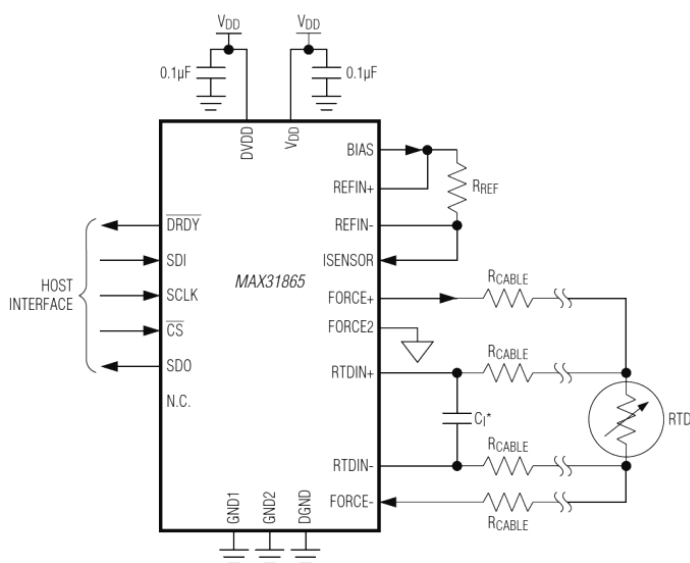
Obrázek 14: Vyhodnocení čtyřvodičového zapojení [15].

Převodník pro odporový senzor se skládá z převodu změny odporu na napětí A1, například pomocí můstku popsaného výše. Výstupní napětí z A1 je příliš nízké, aby se s ním dalo dále pracovat, proto je zesíleno kvalitními přístrojovými zesilovači A2 na potřebnou úroveň. Unifikaci výstupního signálu na 0-10V, 4-20mA popřípadě jiný typ zajišťuje blok A3 [15].



Obrázek 15: Blokové schéma převodníku pro odporový senzor [15].

Převodníky integrují bloky A1, A2 a A3 a nabízejí nespočet konstrukčních řešení. Příkladem je MAX31865 se sériovým výstupem SPI. Výhodou toho monolitického integrovaného obvodu je použití minima dalších elektronických součástek [23].



Obrázek 16: Zapojení MAX31865[23].

Moderní převodníky jsou vytvářeny pomocí mikrokontroléru. Tento způsob nabízí rozšíření funkcí o softwarovou linearizaci a možnou datovou komunikaci jako například Modbus, RS-232, RS-485, M-bus, 1-wire a mnoho dalších. Pomocí datové komunikace je možná parametrizace převodníku, jehož některé typy mají i webový server. Průmyslové převodníky se vyrábí v několika provedeních na DIN lištu nebo přímo do hlavice snímače.



Obrázek 17: Možné konstrukce průmyslových převodníků [31].

1.2 Teplotní senzory s P-N přechodem

Vytvořením dvou vrstev v krystalu polovodiče za pomoci příměsí vznikne polovodičový přechod PN. Vyrábí se z křemíku, germania atd. [15].

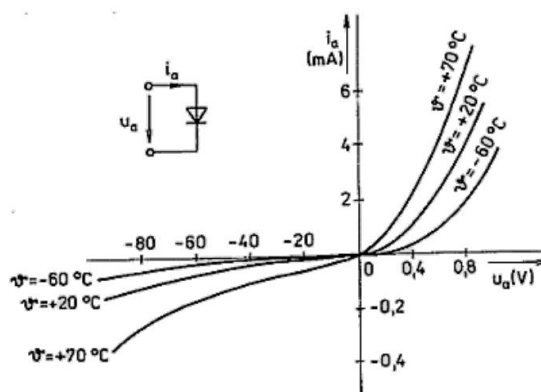
1.2.1 Diodové senzory teploty

Diody jsou polovodičové součástky s jedním PN přechodem využívající teplotní závislost PN přechodu v propustném směru. Proud PN přechodem v propustném směru I_D je dán Shockleyovou (diodovou) rovnicí [11]:

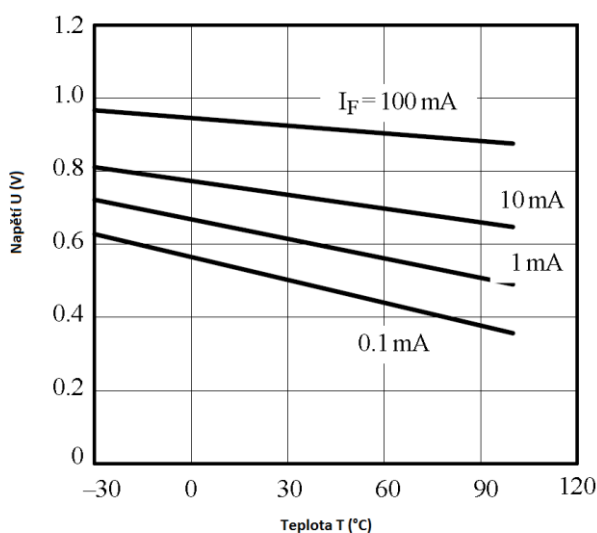
$$I_D = I_s \left(e^{\frac{eU_D}{mkT}} - 1 \right) \quad (15)$$

Kde I_D je proud PN přechodem v propustném směru; I_s proud PN přechodem v závěrném směru; U_D napětí na PN přechodu v propustném směru a m rekombinační koeficient polovodiče, který udává výrobce v rozmezí 1 až 4.

Připojením diody ke konstantnímu zdroji proudu v propustném směru, se bude napětí na PN přechodu měnit s teplotou. Se zvyšující se teplotou napětí na PN přechodu klesá, viz obrázek 18.



Obrázek 18: Závislost VA charakteristiky diody na teplotě [24].



Obrázek 19: Závislost napětí PN přechodu v propustném směru diody 1N4148 [30].

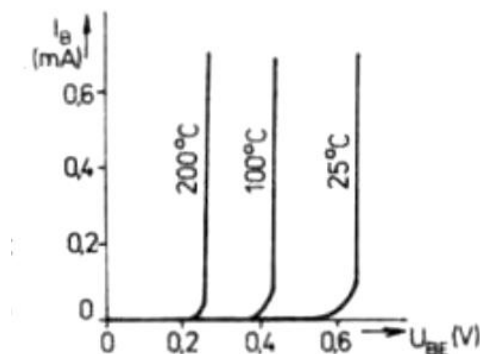
1.2.2 Tranzistorové senzory teploty

Tranzistorové senzory jsou polovodičové součástky se dvěma PN přechody. Princip měření teploty tranzistorovými senzory je založeno na stejném principu jako u diodových senzorů. Využívá se zde teplotní závislosti napětí na přechodu báze - emitor v propustném směru. Napětí na přechodu báze - emitor je dán vztahem [11]:

$$U_{BE} = \frac{mkT}{e} \ln \frac{I_c}{I_s} \quad (16)$$

Kde m je rekombinační koeficient polovodiče pro tranzistor = 1; k Boltzmanova konstanta; I_c kolektorový proud a I_s saturační napětí.

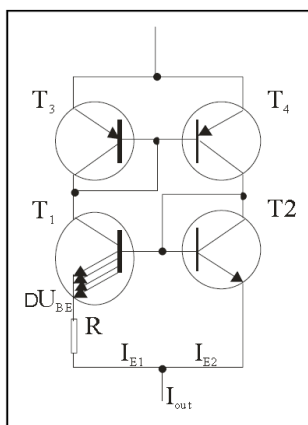
Jestliže je PN přechod báze - emitor napájen konstantním proudem I_B , pak i proud protékající kolektorem I_C bude konstantní a napětí na přechodu báze - emitor U_{BE} se bude měnit s teplotou. S rostoucí teplotou při konstantním proudu klesá napětí na přechodu báze – emitor [11].



Obrázek 20: Závislost VA charakteristiky tranzistoru na teplotě [31].

1.2.3 Teplotní integrované senzory

Integrované teplotní senzory s PN přechodem spolu s několika tranzistory a polovodičovými prvky vytváří monolitický integrovaný obvod. Tento senzor je zpravidla tvořen dvěma PN tranzistory citlivými na teplotu, přičemž jeden z nich má více emitorů [15].



Obrázek 21: Integrovaný PN senzor teploty [15].

Teplotně citlivé PN přechody báze - emitor tranzistorů T_1 a T_2 , které jsou napájeny stejným proudem I_1 a I_2 z takzvaného proudového zrcadla tvořeného tranzistory T_3 a T_4 . T_1 a T_2 mají rozdílnou hustotu proudu emitovaných přechodů. Tranzistor T_1 je složen

z r ($r \leq 10$) paralelně spojených tranzistorů. Výsledný vztah je pak dán [2]:

$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{e} \ln r \quad (17)$$

Kde k je konstanta; T absolutní teplota a r počet emitorů.

Výsledný proud je pak dán vztahem [2]:

$$I = mI_{E1} + I_{E2} = (m+1) \frac{kT}{e} \ln r \frac{1}{R} \quad (18)$$

Kde m je poměr ploch tranzistorů; T_3 a T_4 a R odpor obvodu.

Jako příklad lze uvést senzor SMT160-30-92 s integrovaným převodníkem s digitálním PWM výstupem 1 až 4 kHz.



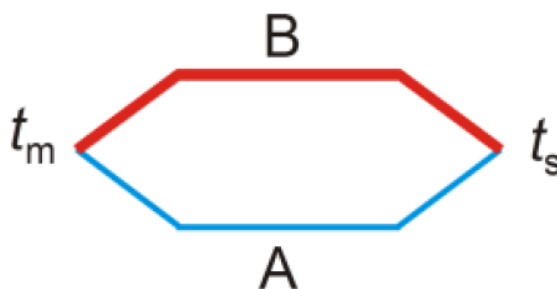
Obrázek 22: Senzor SMT160-30-92 [13].

1.3 Termočlánky

Spojením dvou odlišných kovů vznikne uzavřený elektrický obvod. Jestliže bude teplota obou spojů stejná, obvodem nebude protékat elektrický proud, protože platí [19]:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_{BA} \\ I &= \frac{U_{AB} - U_{BA}}{R} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Kde U_{AB}, U_{BA} je kontaktní napětí spojů.



Obrázek 23: Obvod termočláunku (t_m je měřicí spoj a t_s srovnávací spoj) [2].

Když bude teplota spojů různá, kontaktní napětí spojů nebude stejné a obvodem poteče elektrický proud. Toto chování se nazývá Seebeckův jev. Proud protékající obvodem se nazývá termoelektrický proud, pro který platí vztah [19]:

$$I = \frac{U_{AB}(T_1) - U_{BA}(T_2)}{R} \quad (20)$$

Kde $U_{AB}(T_1), U_{BA}(T_2)$ je kontaktní napětí spojů při teplotách T_1 a T_2 .

Velikost termoelektrického proudu závisí na druhu použitých kovů a na rozdílu teplot mezi oběma spoji. Rozdíl konstantního napětí obou spojů je rovno celkovému napětí nazývaného Seebeckovo termoelektrické napětí U_s . Tato závislost je v malém rozsahu měřených teplot téměř lineární [19]:

$$U_s = \alpha_{AB}T_m + \alpha_{BA}T_0 = \alpha_{AB}(T_m - T_0) \quad (21)$$

Kde α_{AB} je koeficient závislý na materiálech použitých kovů a zároveň platí $\alpha_{AB} = -\alpha_{BA}$.

Pro přesnější vyhodnocení teplotní závislosti je vhodnější použít vztah [19]:

$$U_s = \sum_{i=0}^n \alpha_i \Delta T^i \quad (22)$$

Kde n je rovno 2 a 14, záleží na požadované přesnosti rozsahu teplot a typu termoelektrického článku.

1.3.1 Materiál a typy termočlánků

Materiál na výrobu termočlánku by měl vykazovat co největší přírůstek termoelektrického napětí v závislosti na teplotě, dlouhodobou stabilitu a odolnost vůči korozím a chemickým vlivům včetně odolnosti vůči teplotě ve velkém rozsahu. Důležitým požadavkem je také dokonalé provedení kovového spoje. V současné době se doporučuje používat termočlánky a kompenzační vedení, jejichž parametry, označení, přesnost a teplotní rozsah odpovídá mezinárodní normě IEC 584 a národním normám odvozených z ní. Pro Českou republiku je to norma ČSN EN 60 584 [6].

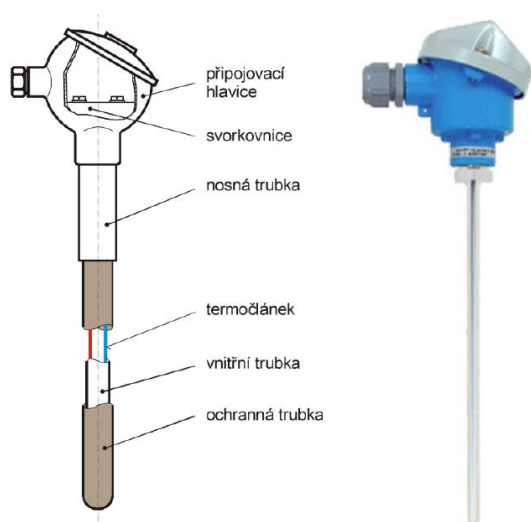
Tabulka 3: Typy termoelektrických článků [26].

Typ	materiálové složení		barevné označení		měřicí rozsah krátkodobý	měřicí rozsah trvalý
	+ pól	- pól	+ pól	- pól	$\Delta\vartheta$ (°C)	$\Delta\vartheta$ (°C)
B	Pt - 30% Rh	Pt - 6% Rh	šedá	bílá	200 až 1820	0 až 1700
E	Ni-Cr	Cu-Ni	fialová	bílá	-40 až 900	0 až 800
J	Fe	Cu-Ni	černá	bílá	-180 až 800	0 až 750
K	Ni-Cr	Ni-Al	zelená	bílá	-180 až 1300	0 až 1100
N	Ni-Cr-Si	Ni-Si	růžová	bílá	-270 až 1300	0 až 1100
R	Pt - 13% Rh	Pt	oranžová	bílá	-50 až 1700	0 až 1600
S	Pt - 10% Rh	Pt	oranžová	bílá	-50 až 1750	0 až 1600
T	Cu	Cu-Ni	hnědá	bílá	-250 až 400	-185 až 300
C*	W - 5% Re	W - 26% Re	není definováno		0 až 2320	
G*	W	W - 26% Re				
D*	W - 3% Re	W - 25% Re				

* uvedené typy termočlánků nejsou definovány v příslušných normách

V průmyslovém použití jsou nejrozšířenější termočlánky typu J, K a S [6].

Provedení termoelektrického snímače je patrné z obrázku 24. Kde termočlánek je umístěn v ochranné armatuře, která jej chrání před mechanickým poškozením a nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy. Vlastní termočlánek je umístěn v ochranné trubce, která je zakončena přírubou. Příruba obsahuje také svorkovnici s připojenými vývody termočlánku. Materiál vnější ochranné trubice závisí na velikosti měřené teploty a charakteru okolního prostředí. Tato ochranná trubice zhoršuje dynamické vlastnosti senzoru. Toto uspořádání používají i odporové teplotní senzory [19].



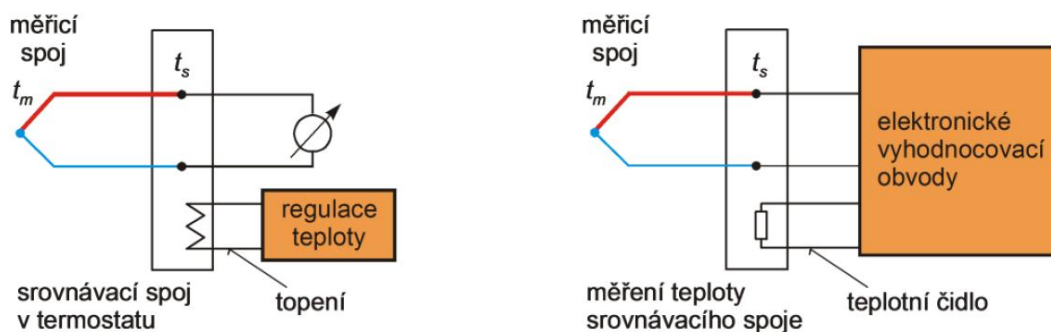
Obrázek 24: Provedení termoelektrického snímače [19].

Moderním typem kompaktních termočlánků jsou plášťové termočlánky, u kterých jsou dráty uloženy v niklové nebo nerezové trubičce, vyplněné keramickým práškem. Výhodou jsou malé rozměry, které se pohybují od 0,15 až 10 mm a mají malou časovou konstantu [19].

1.3.2 Měření termočlánků

Aby bylo možné měřit velikost termoelektrického napětí, je nutné zapojit do obvodu termočlánek měřicí přístroj. Lze to učinit rozpojením srovnávacího spoje nebo přerušením jedné větve termočlánu. Obě tyto svorky připojeného měřicího přístroje musí mít stejnou teplotu, aby nedošlo ke změně termoelektrického napětí. Pro prodloužení vzdálenosti mezi termočlánkem a měřicím přístrojem se používá takzvané kompenzační vedení, u kterého se upravuje velikost odporu justačným odporem, obvykle 20Ω [19].

Z výše uvedených rovnic vyplývá, že je nutné udržovat teplotu srovnávacího spoje konstantní nebo ji vhodným způsobem kompenzovat. Vliv kolísání teploty srovnávacích spojů lze odstranit jejich umístěním do termostatu, kde budou udržovány na konstantní teplotě. V laboratorních podmínkách je to obvykle při teplotě 0°C a u průmyslových aplikací při teplotě 50°C . Dalším způsobem kompenzace je použití izotermické svorkovnice, kde se teplota srovnávacích spojů měří například pomocí odporového senzoru. Příslušná korekce se pak vyhodnotí číselně [19].



Obrázek 25: Kompenzace srovnávacího spoje [19].

1.4 Bezdotykové teploměry

Bezdotykové teploměry měří teplotu tělesa na základě skutečnosti, že každý povrch každého tělesa emituje do svého okolí tepelné záření. Měřicí zařízení potom zpracuje a vyhodnotí intenzitu nebo poměr intenzit emitovaného záření. Bezdotykové teploměry lze rozdělit na přímo měřicí, kam patří pyrometry nebo zobrazovací teploměry, kam se řadí termovize [22].

1.4.1 Pyrometry

Pyrometr určí teplotu tělesa vyhodnocením tepelného záření emitovaného tímto tělesem. Pyrometry jsou schopny měřit v rozsahu od -50°C až do 3500°C . Podle způsobu detekce lze pyrometry rozdělit na subjektivní a objektivní. Subjektivní pyrometry používají jako detektor lidské oko. Do této kategorie se řadí jasové a barvové pyrometry. Objektivní pyrometry používají kvantové nebo tepelné detektory. Kvantové detektory jsou fotorezistory, fotodiody, PIN diody, lavinové ADP diody. Mezi tepelné detektory se řadí bolometry, pyrodetektory a termočláňkové baterie. V praxi se pyrometry dělí podle spektrální oblasti využitého záření na radiační, spektrální, pásmové a barvové [22].

Radiační pyrometry

Radiační pyrometry vyhodnocují tepelné záření emitované tělesem v širokém rozsahu vlnových délek. Tento rozsah závisí na absorpčních schopnostech detektoru a propustnosti čočky pyrometru. K výrobě radiačních pyrometrů se používají pouze tepelné detektory. Teplota tělesa se určí ze Stefan - Boltzmannova zákona. Pro každý měřený materiál je nutné nastavit v měřicím zařízení vhodnou emisivitu, což je poměr intenzity měřeného tělesa k intenzitě absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Emisivitu snímaného povrchu je velmi obtížné správně nastavit a nesprávná volba je jedním ze zdrojů chyb.

Dále je nutné zajistit, aby na detektor dopadalo pouze tepelné záření z měřeného tělesa [22].

Spektrální pyrometry

Spektrální pyrometry vyhodnocují tepelné záření emitované tělesem ve velmi úzkém rozsahu vlnových délek. Teplota tělesa se určí z Wienova zákona, kdy spektrální intenzita vyzařování tělesa závisí na dané vlnové délce a jeho teplotě. K výrobě spektrálních pyrometrů se používají kvantové detektory. Pásmo vlnových délek je ovlivněno spektrální citlivostí detektoru, spektrální prostupností čoček nebo spektrální propustností optických filtrů. Princip určení teploty je podobný jako u radiačních pyrometrů a spočívá v porovnávání spektrální intenzity vyzařovaného tělesa se spektrální intenzitou vyzařovanou vnitřním referenčním zdrojem ve velmi úzkém vlnovém pásmu. Porovnání intenzit se provádí lidským okem nebo automaticky. Teplota naměřená pyrometrem pak odpovídá teplotě, při které je spektrální intenzita vyzařování referenčního zdroje právě rovna spektrální intenzitě vyzařování měřeného tělesa. Teplotní rozsah spektrálních pyrometrů je v rozmezí 800°C až 3000°C [22].

Pásmové pyrometry

Pásmové pyrometry vyhodnocují tepelné záření emitované tělesem v určitém rozsahu vlnových délek, který je širší než u spektrálních pyrometrů, ale užší než u radiačních pyrometrů. K jejich výrobě se používají kvantové detektory, přičemž šířka pásma vlnových délek závisí na spektrální citlivosti fotodetektoru záření, spektrální propustnosti optiky pyrometru a optických filtrů. Tepelné záření emitované tělesem prochází optikou pyrometru a dopadá na fotodetektor přes optický filtr, který vymezuje požadovanou šířku vlnového pásma. Princip měření teploty pásmového pyrometru je založena na srovnávání spektrální intenzity měřeného tělesa se spektrální intenzitou černého tělesa ve vymezeném pásmu daném optickým filtrem. Teplota tělesa odpovídá teplotě, při které je spektrální intenzita vyzařování černého tělesa rovna spektrální intenzitě měřeného tělesa [22].

Barvové pyrometry

Barvové pyrometry vyhodnocují tepelné záření emitované tělesem při dvou odlišných vlnových délkách, které jsou vymezeny dvěma optickými filtry. Běžně je jeden filtr zelený a druhý červený. Barvové pyrometry jsou vhodné pro měření teploty těles, u kterých emisivita kolísá. K měření teploty stačí znát pouze interval, ve kterém se intenzita povrchu pohybuje. K výrobě se používají kvantové detektory. Barvový pyrometr je tvořen dvěma

spektrálními pyrometry, z nichž jeden obsahuje zelený filtr a druhý červený filtr. Emitované záření se po dopadu na hranol rozdělí na dva svazky. Jeden svazek prochází červeným filtrem o vlnové délce 650nm a dopadá na fotodetektor. Druhý svazek projde zeleným filtrem o vlnové délce 550nm a dopadá na druhý fotodetektor. Vyhodnocení teploty tělesa spočívá v porovnání poměru získaných spektrálních intenzit na jedné a druhé vlnové délce s poměrem spektrálních intenzit vyzařování černého tělesa na stejných vlnových délkách. Výsledná teplota naměřená pyrometrem odpovídá teplotě, při které je poměr spektrálních intenzit vyzařování černého tělesa na dvou vlnových délkách roven poměru spektrálních intenzit vyzařování měřeného tělesa na též vlnových délkách [22].

1.4.2 Termovizní systémy

Termovizní systémy lze rozdělit na systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu a na systémy s maticovými detektory. V současné době se termovizní systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu nepoužívají. Termovizní kamery v současnosti používají systémy s maticovými mikrobolometrickými detektory. Zpracování signálu je realizováno přímo na čipu prostřednictvím multiplexu a A/D převodníku v každém řádku matice. Pomocí amplitudového diskriminátoru lze u termovize nastavit libovolnou paletu barev a rozmezí teplot. Termovize snímá v určitém úhlu a z určité vzdálenosti emitované tepelné záření o vlnové délce, dané vlastnostmi záření, které se pak vizualizuje do určitého barevného spektra. Množství tepelného záření je závislé na emisivitě povrchu, na úhlu snímání, na snímané vlnové délce, teplotě povrchu měřeného objektu, teplotě okolí, proudění vzduchu, vzdálenosti od objektu a rozlišení termokamery [21].

K zobrazení a vyhodnocení teplotního pole povrchu se používá nedestruktivní metoda zvaná termografie, která převádí vyzařované infračervené záření povrchu objektu na obrazový signál. Tento signál se zobrazuje na displeji v řadě barevných odstínů znázorňující určitý teplotní rozsah. Zobrazení teplotního pole se nazývá termogram [21].

Termogram

Termogram respektive infračervený snímek je obraz teplotních polí pořízený termokamerou. Termovizní snímky zobrazují tepelný tok přiřazením barevné palety různým teplotám. Stejný snímek lze zobrazit v různých barevných paletách a tím zvýraznit daná místa na snímku. Termovizní snímky mohou být radiometrické nebo neradiometrické. Neradiometrické snímky jsou pouze zobrazující. Z radiometrického snímku lze provádět měření teplot povrchu objektu. V plně radiometrickém snímku lze provádět měření teplot

a upravit parametry snímku i po jeho uložení. Současné termokamery nabízejí kromě termogramu i běžnou fotografii měřeného objektu s možností jejího prolínání s termogramem [8].



Obrázek 26: Termogram [8].

1.5 Speciální teplotní senzory

Mezi speciální teplotní senzory patří [20]:

- **Ultrazvukové** - založeny na rychlosti šíření zvuku v látce, které je závislé na teplotě. Měří se čas šíření ultrazvukových impulzů.
- **Krystalové** - využívají teplotní závislost kmitočtu oscilátoru.
- **SAW** - využívají teplotní závislost rychlosti šíření povrchové akustické vlny v určitém materiálu.
- **Optické** - využívají nežádoucích vlivů okolního prostředí na parametry optických kabelů. Teplota moduluje optický signál.

2 PROSTŘEDKY PRO OVLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

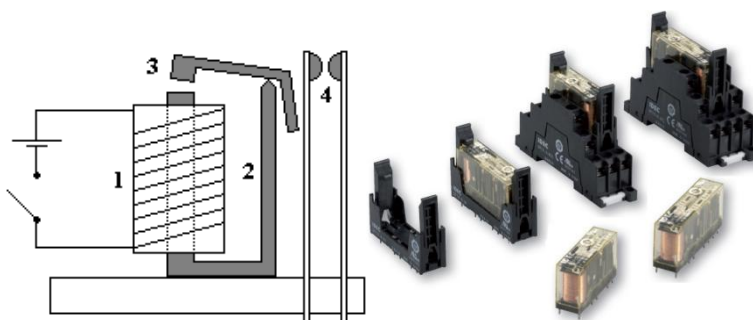
Prostředky pro ovládání elektrické energie slouží ke spojitému nebo nespojitému řízení elektrické energie. Pro nespojité řízení slouží prvky typu relé, stykač, tranzistor, triak a podobně. Spojité řízení je realizováno pomocí frekvenčních měničů nebo jednotkami pro fázové řízení elektrického výkonu. Rozsah řízeného elektrického napětí může být řádově v rozsahu jednotek až tisíců voltů. Jelikož tato diplomová práce je zaměřena na nespojité ovládání elektrické energie, nebude dále rozebíráno spojité řízení elektrické energie [14].

2.1 Elektromechanické relé a stykač

Základním prostředkem pro nespojité ovládání je relé. Relé je spínač, který lze dálkově ovládat malým proudem a napětím sloužící pro spínání malých výkonů. Obvykle jsou to ovládací a signalizační prvky. Relé lze dále dělit podle [14]:

- druhu kontaktu – spínací, rozpínací a přepínací.
- velikosti spínaných výkonů.
- druhu ovládacího napětí – střídavé nebo stejnosměrné.
- frekvence spínání.
- činnosti – pomocné, polarizované relé, bistabilní relé atd.

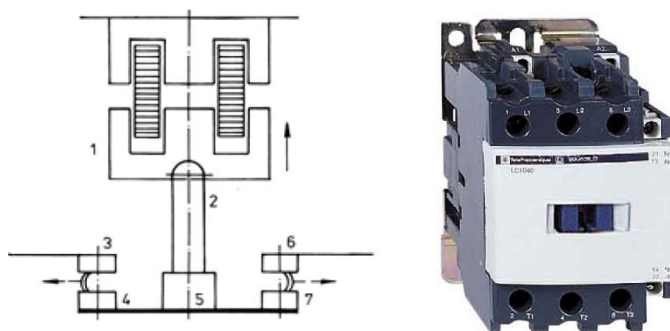
Samotnou konstrukci elektromagnetického relé můžeme vidět na obrázku 27. Relé se tedy skládá z cívky (1), jádra z magneticky měkké oceli (2), pohyblivé kotvy (3) a pružných kontaktů (4) [14].



Obrázek 27: Konstrukce elektromagnetického relé a ukázka [3,7].

Stykač vychází z obdobné konstrukce jako relé, je ovšem konstruován pro velké spínací proudy od desítek až po tisíce ampér. Stykače lze dělit dle přídržné síly na elektromagnetické, vačkové a pneumatické. Nebo dle druhu ovládacího napětí

na stejnosměrné a střídavé. Obrázek 28 zobrazuje samotnou konstrukci stykače. Stykač se skládá z kotvy elektromagnetu (1), táhla (2), pevného kontaktu přívodu (3), odvodu (6), můstku (5) a pohyblivého kontaktu (4 a 7). Stykače obsahují kromě hlavních kontaktů i několik pomocných kontaktů, které slouží k ovládání a signalizaci [14].



Obrázek 28: Konstrukce stykač a ukázka [28, 29].

2.2 Tranzistor

Tranzistory mají velké uplatnění ve výkonové elektrotechnice. Použití bipolárních tranzistorů ve výkonové elektronice pro rozsahy proudů do 10A se snižuje a využívá se více MOSFET tranzistorů, které jsou rychlejší a mohou být buzeny menším výkonem. Ze stejného důvodu se nahrazují i Darlingtonovy tranzistory pro proudy od 15A tranzistory IGBT. Vývoj Darlingtonových tranzistorů se zastavil na konci 80. let na úrovni 400A/1000V a 12ms [25].

2.2.1 Výkonové tranzistory MOS

Předností tranzistorů MOS ve výkonových aplikacích je vysoká vstupní impedance, velké výkonové zesílení, teplotní stabilita, dobré kmitočtové vlastnosti a napěťové řízení. Nevýhoda MOS je kladný teplotní koeficient kolektorového proudu při malých a středních proudech, velké vstupní a zpětnovazební kapacity a pro některé aplikace příliš vysoké prahové napětí. Maximální dosažitelné napětí nebo proud mezi kolektorem a emitorem může být až 1000V nebo 200A s mezním kmitočtem až 10MHz. Výkonové tranzistory MOS patří k nejrozšířenějším součástkám v oblasti řízení výkonů do 10kW. Tranzistory MOS mohou obsahovat řídicí elektroniku k ochraně proti proudovému přetížení [25].

2.2.2 Tranzistory IGBT

Tranzistor IGBT vychází z myšlenky kombinace vlastností tranzistorů MOS a bipolárních tranzistorů. Lze si jej představit jako bipolární tranzistor NPN řízený do báze tranzistorem MOS. Tranzistory IGBT jsou vhodné v aplikacích vyžadující vysoká blokovací napětí a velké proudy. Díky dobrým dynamickým vlastnostem umožňují pracovat při vysokých frekvencích. V současné době jsou vyráběny v rozsahu napětí $600\text{V} < U_{\text{CEM}} < 3\,500\text{V}$ a pro proudy $2\text{A} < I_{\text{C}} < 1\,800\text{A}$. Na rozdíl od MOS tranzistorů má IGBT tranzistor delší vypínací dobu tudíž i nižší mezní kmitočet, který může být až 40kHz. Z hlediska ovládání IGBT tranzistoru se řídící elektroda chová stejně jako u MOS a její chování mezi emitorem a kolektorem je podobné tranzistoru NPN. Pro vysokonapěťové aplikace je předností IGBT tranzistorů, oproti MOS, schopnost vydržet proudová přetížení [25].

Výkonové tranzistory se používají ve statických nebo mobilních zdrojích elektrické energie, jako jsou střídače DC/AC a usměrňovače DC/DC.

2.3 Tyristor

Tyristor je polovodičová součástka se třemi PN přechody a je základní součástí pro stavbu měničů s fázovým řízením výkonu do zátěže. Tyto měniče jsou napájeny ze střídavé sítě, která zajišťuje periodickou změnu polaritu napětí komutace tyristorů. Tyto měniče patří do skupiny se síťovou komutací. Sem patří řízené usměrňovače a měniče střídavého proudu. Výkonové tyristory se řízeným sepnutím se vyrábí pro napětí až 12 000V nebo pro proud až 5000A [25].

2.3.1 Tyristory GTO

GTO tyristor pracuje obdobně jako klasický tyristor, ovšem jeho struktura je odlišná. Je složen z několika stovek menších paralelně zapojených tyristorů. Výhodou tohoto tyristoru je, že přivedením záporného proudu na řídící elektrodu se tyristor vypne. GTO tyristory vyžadují ochranné obvody, které omezují rychlý náběh napětí při vypínání tyristoru a tím zamezují parazitnímu sepnutí. Tato ochrana se značí jako RCD ochrana [1].

2.3.2 Tyristory IGCT

Tyristory IGCT vychází z činnosti GTO s rozdílem procesu vypínání. U IGCT je kladen důraz na rychlost a tvrdost procesu vypínání. IGCT se skládá z tyristorové struktury GCT a z řídícího obvodu. Řídící obvod je integrován co nejbližší silové části pro potlačení

parazitních indukčností. Díky rychlému procesu vypínání odpadají problémy spojené s dozníváním proudu a tím odpadá použití odlehčovacích sítí. Vypínací doba je 1 až 3 μs což je pětikrát menší než u GTO. Spínací frekvence IGCT může být 3 kHz a krátkodobě až 20 kHz [1].

2.4 Triak

Triak je pětivrstvá polovodičová součástka obsahující dvě výkonové elektrody a jednu řídící elektrodu. Triak oproti tyristoru vede napětí v obou směrech. V obvodu se chová jako dvojice tyristorů v antiparalelním zapojení. Triak se vypíná, jakmile anodový proud klesne pod velikost vratného proudu, stejně jak je tomu u tyristoru. Triak se používá pro řízení výkonu spotřebičů zapojených v elektrorozvodné síti [1].

2.5 SSR relé

SSR relé jsou moderní polovodičové spínací jednotky, které v některých aplikacích plně nahrazují elektromechanická relé a stykače. Jejich výhodou je bezhlučnost a rychlost spínání umožňující použití i PWM. Rozsah vstupního řídícího signálu může být 3 až 32V DC, 24 až 190V DC nebo 24 až 265V AC. SSR relé může spínat zátěž až 100A. Výrobci SSR relé nabízejí několik variant rozlišených podle spínané zátěže od spínání v nule přes spínání v maximu až po proporcionální řízení pomocí triaku. Řídící vstup a výkonový výstup je galvanicky oddělen, nejčastěji pomocí optočlenu. Spínacím prvkem silové části relé obvykle bývá triak nebo IGBT tranzistor. Nevýhodou SSR je velký úbytek napětí na spínacím prvku, které se projevuje zahříváním relé. SSR relé je vhodné pro spínání odporové, kapacitní i indukční zátěže [17].



Obrázek 29: SSR relé [5].

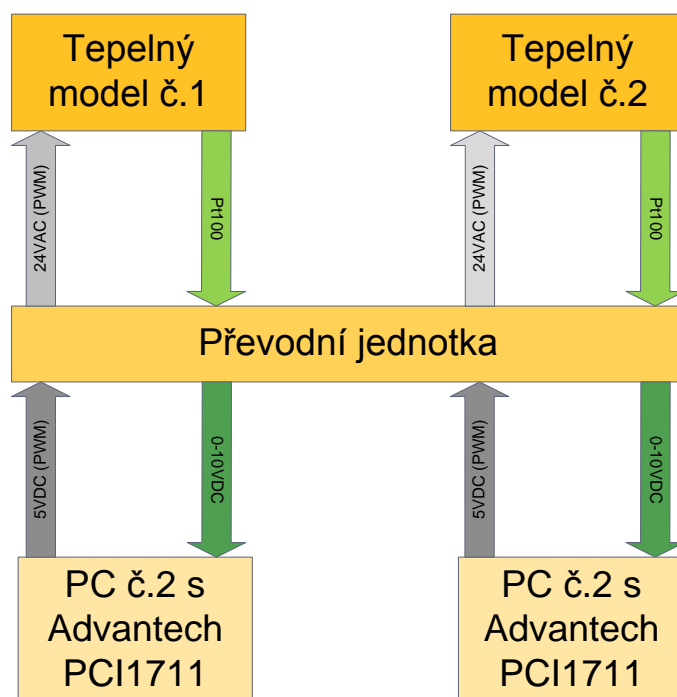
II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 ANALÝZA SOUČASNÉHO ŘÍZENÍ VÝUKOVÝCH TEPELNÝCH SOUSTAV V LABORATOŘI

Následující kapitola se věnuje popisu současného stavu řízení tepelných modelů v laboratoři.

3.1 Hardwarové uspořádání

Stávající řešení měření a regulace modelů tepelných soustav spočívá v propojení počítače s měřicí kartou ADVANTECH PCI 1711. Rozhraní této měřicí karty je prodlouženo kabelem a zakončeno svorkovnicí. Tepelný model obsahuje malý reostat, uvnitř kterého je instalován teplotní senzor Pt100. Součástí tepelného modelu je hlavní vypínač, ovladač výkonu topného tělesa, přepínač pro volbu vstupního signálu topného tělesa a chlazení, ovladač výkonu chlazení, a signalizační dioda přítomnosti elektrického napětí na reostatu a chlazení. Ohřev reostatu je realizován pomocí střídavého napětí 24V. Teplotní senzor je připojen k převodníku pomocí dvou vodičů.



Obrázek 30: Blokové schéma stávajícího řešení v laboratoři [31].

Převodníková jednotka slouží jako rozhraní mezi počítačem a tepelným modelem. Je to plně modulární systém s dvěma kanály. Obsahuje dvě převodníkové karty pro odporový senzor Pt100 a dvě karty pro ovládání střídavého výkonu odporové zátěže v tepelném modelu. Karta pro ovládání elektrického výkonu umožňuje TTL řízení pomocí počítače

nebo ruční režim, kde je možné nastavit hodnotou výkonu pomocí potenciometru umístěného

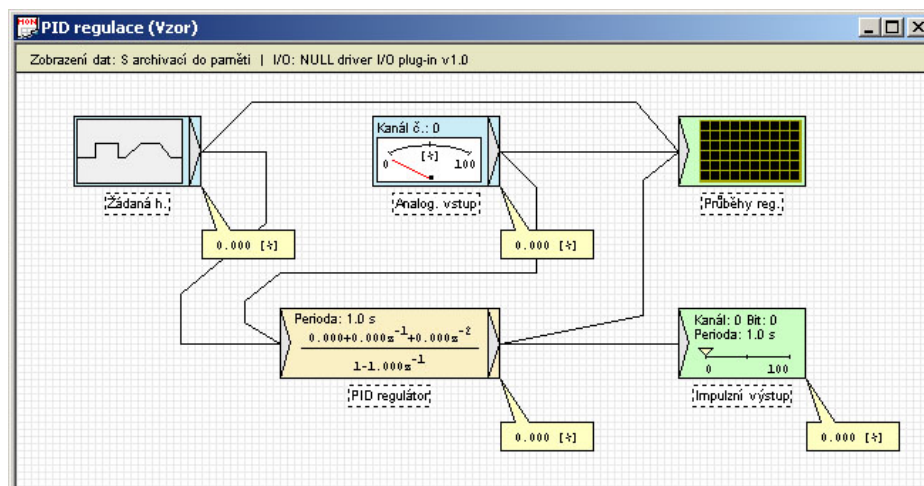
na předním panelu karty. Výstup o aktuální měřené teplotě udává převodník podle rozsahu dané převodníkové karty Pt100 v rozsahu 0 - 10V. Komunikace s počítačem je řešena pomocí již zmíněné měřicí karty ADVANTECH, pomocí jednoho analogového vstupu a binárního výstupu, který generuje PWM. signál s TTL úrovněmi. Převodníková jednotka obsahuje segmentový displej, pomocí kterého lze zobrazovat aktuální měřenou hodnotu daného kanálu. Tato hodnota je udávána ve voltech. Jednotka je napájena ze sítě 230VAC.



Obrázek 31: Stávající převodníková jednotka [31].

3.2 Softwarové prostředí

Aplikace pro měření, regulaci a archivaci hodnot se jmenuje WControl. V této aplikaci si uživatel vytvoří projektové okno, do kterého lze vkládat jednotlivé objekty. Tyto objekty lze rozdělit jako rozhraní aplikace a výstupu měřicí karty v počítači, objekty sloužící ke generování a archivaci hodnot a objekty regulátorů. V aplikaci pro regulaci lze použít regulátor pro dvoupolohovou regulaci s penalizací, PID regulátor, případně tento regulátor s Takahashiho modifikací nebo s průměrnou diferencí. Posledním objektem regulátorů je obecný lineární regulátor.



Obrázek 32: Projektové okno WControl [31].

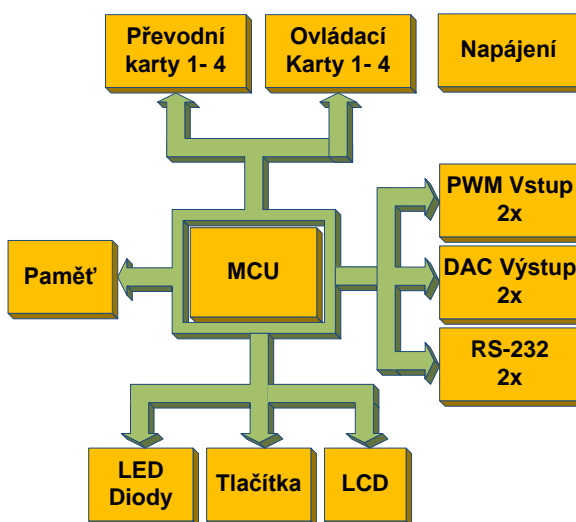
Omezený počet regulátorů umožňuje WControl používat pouze při jednoduchých aplikacích měření a regulace, což však postačuje pro výuku předmětu automatizace. Pro složitější algoritmy regulátorů je nutné použít prostředí Matlab/SIMULINK.

4 HARDWAROVÝ NÁVRH NOVÉ PŘEVODNÍKOVÉ JEDNOTKY

Z výše uvedené analýzy současného řízení tepelných modelů, byla navržena nová převodníková jednotka, která přebírá vlastnosti stávající jednotky a přidává některé nové vlastnosti. Oproti původnímu řešení je nová jednotka napájena bezpečným napětím 24VAC ze školní rozvodné sítě. Použitím mikrokontroléru jako řídicího prvku je umožněno přesnější vyhodnocení měřené teploty s možností softwarové linearizace. Dalším rozšířením je použití displeje k zobrazení hodnot v daných jednotkách nebo použití sériového komunikačního rozhraní a paměti k uchování kalibračních konstant.

4.1 Obecné vlastnosti

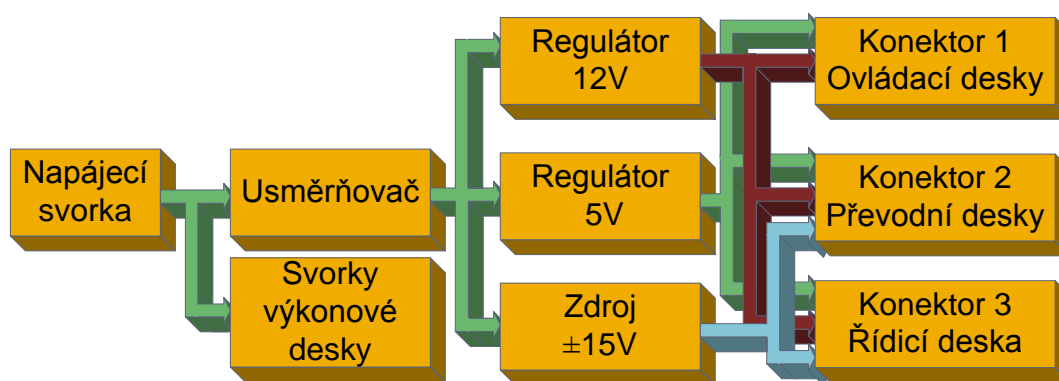
Nově navržená převodníková jednotka zachovává kompatibilitu se stávajícím stavem. Tato kompatibilita spočívá v zachování dvou analogových výstupů nesoucí informaci o měřené teplotě, dvou binárních vstupů pro generování akčního zásahu a způsobu ovládání odporové zátěže spolu s měřením teploty. Oproti původnímu řešení, zde bude možnost připojit až čtyři vstupní převodníkové karty a čtyři výstupní karty pro ovládání elektrického výkonu. Současně toto zařízení dokáže zobrazit aktuální vstupní a výstupní hodnoty v daných jednotkách na čtyřřádkovém displeji. Součástí zařízení jsou dva nezávislé porty RS-232 sloužící pro komunikaci s počítačem. Pomocí tlačítek lze změnit nastavení jednotky a toto nové nastavení bude možné uložit do paměti. Výhoda oproti původnímu řešení je nezávislost na měřicí kartě a tudíž je zde možnost, připojení jakéhokoliv počítače vybaveného COM portem.



Obrázek 33: Blokové schéma nové řídicí jednotky [31].

4.2 Zdroj

Zařízení je napájeno střídavým napětím 24V a jištěno pojistkou 4A. Z této pojistky se dále napětí větví na svorky pro vstup řízeného napětí do ovládacích desek a do usměrňovacího můstku GBU1002. Toto usměrňované napětí je dále sníženo pomocí dvou step-down regulátorů napětí typu LM2576 na napětí 5V a 12V s maximální proudovou zatížitelností 3A. Pomocí DC-DC měniče Tracopower TEN 15-2423 je vytvořeno symetrické napětí $\pm 15V$ s proudovým zatížením 500mA pro napájení operačních zesilovačů. Všechna tato napětí jsou vedena na okraj desky zdroje a rozdělena do třech konektorů Molex, které slouží k napájení jednotlivých karet.



Obrázek 34: Blokové schéma zdroje [31].

Kompletní schéma zdroje je uvedeno v příloze PI.

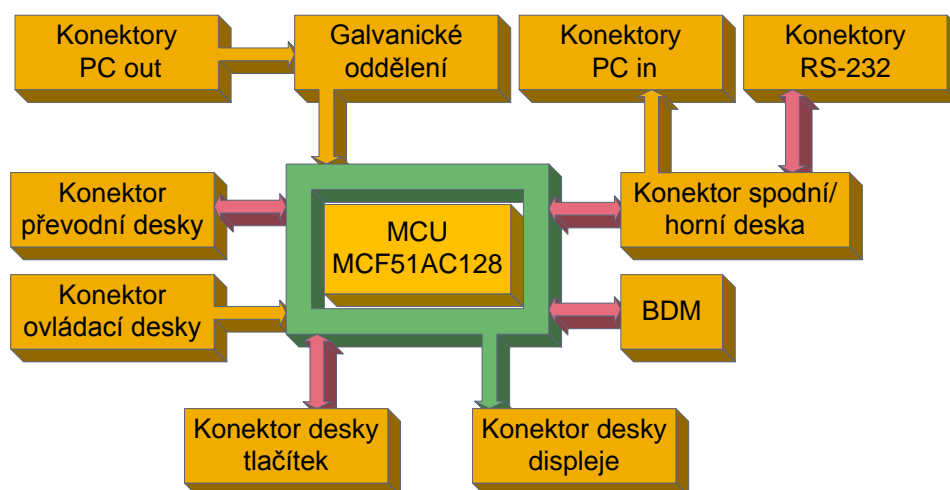
4.3 Řídicí deska

Řídicí deska byla z konstrukčních a rozměrových důvodů rozčleněna na dvě, nad sebou propojené desky.

4.3.1 Horní deska

Horní deska obsahuje konektory k propojení jednotlivých komponent a řídicího mikrokontroléru firmy Freescale MCF51AC128. Tyto komponenty jsou propojeny pomocí 10-pinových konektorů MLW pro ploché kabely k řídicímu prvku. Pro připojení převodníkových karet slouží konektor s názvem PREVODNIKY. Do tohoto konektoru je přiveden analogový signál 0 - 5V, který je připojen na piny PTB0-PTB3. Piny PTB4-PTB7 slouží k určení přítomnosti převodníkové karty na daném kanálu. K připojení karet pro ovládání elektrického výkonu slouží konektor s názvem VYKONOVE_DESKY. Tento konektor je připojen k časovači FTM1 na pinech PTF0-PTF3. Piny PTF4, PTF5,

PTF7 a PTC6 slouží také k určení přítomnosti karty na daném kanálu. Konektor pro připojení displeje obsahuje napájení a datové piny, které jsou zapojeny na port PTA0-PTA6. V těsné blízkosti je umístěn potenciometr pro nastavení jasu displeje. K připojení desky s tlačítky slouží jediný 14-pinový konektor, který obsahuje napájení 5V, čtyři piny PTD4-PTD7 pro ovládání LED diod a 7 pinů s funkcí KBI pro přerušení tlačítek. Nedílnou součástí této desky je programovací rozhraní BDM a napájecí konektor MOLEX. Výstupy z měřicích karet počítače, které ovládají akční veličinu generováním PWM v TTL úrovních jsou přivedeny na konektory K1 a K2. Tento signál je následně posílen pomocí budiče sběrnice 74HC125. Výstupy z toho budiče jsou pak přivedeny na optočleny PC827, které spínají vstup do flexibilního časovače FTM1 v módu input capture na pinech PTE2 a PTE3. Dvojice konektorů COM1 a COM2 slouží k připojení konektorů Canon 9, které jsou přivedeny přes propoj z obvodu na spodní desce. Propojení se spodní deskou je řešeno pomocí třech dutinkových lišt umístěných po stranách DPS. Tyto propoje přivádí napájení a datové signály na spodní desku.



Obrázek 35: Blokové schéma horní desky [31].

Kompletní schémata horní desky je uvedeno v příloze P II.

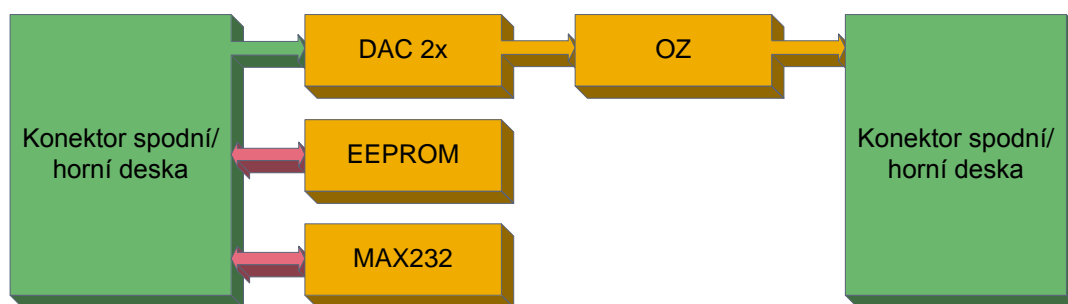
Mikrokontrolér MCF51AC128

MCF51AC128 je 32-bitový mikrokontrolér s jádrem procesoru ColdFire V1. Jedná se o řadu Flexis, která značí, že uspořádání pinů je kompatibilní i s 8-bitovými mikrokontroléry této řady. V této konstrukci byl použit mikrokontrolér v pouzdru QFP s 64 piny. Zmíněný mikrokontrolér je napájen 5V, při kterých může takt procesoru dosahovat až 50,33MHz při frekvenci sběrnice 25MHz. Mikrokontrolér využívá dvou pamětí, a to 128KB flash paměti a 32KB RAM. Mikrokontrolér umožňuje až 8 přerušení

pomocí tlačítek s volbou reakční hrany. Pro komunikaci s jinými periferiemi lze použít dvě SPI, SCI a jedno I²C, CAN rozhraní. Pro měření analogových hodnot je mikrokontrolér vybaven dvaceti kanálovým 12-bitovým AD převodníkem. K porovnání napěťových úrovní lze použít dva analogové komparátory. Mikrokontrolér disponuje třemi 16-bitovými časovači/čítači, které mohou být konfigurovány jako vstupně výstupní PWM periferie [12].

4.3.2 Spodní deska

Spodní deska obsahuje paměť EEPROM 25LC256 s velikostí 256KB a dva dvanáctibitové DA převodníky MCP4821. Tyto obvody komunikují s horní deskou pomocí SPI rozhraní připojeného na pinech PTE5 až PTE7. Výstup z DA převodníků je dále zesílen pomocí operačního zesilovače LM358 na úroveň 0 - 10V, který je ochráněn Zenerovou diodou proti cizímu napětí. Následně je tento výstup přiveden pomocí propojovacího konektoru na horní desku, na konektor K3 a K4. Tento výstup je propojen s analogovým vstupem měřících karet ADVANTECH a poskytuje informaci o aktuální měřené teplotě. Dále jsou na spodní desku přivedeny oba sériové porty, které jsou pomocí obvodu MAX232 převedeny na napěťové úrovně používané standardem RS-232. Veškeré tyto výstupy a vstupy do obvodů spodní desky jsou propojeny s horní deskou pomocí třech dutinkových lišt.



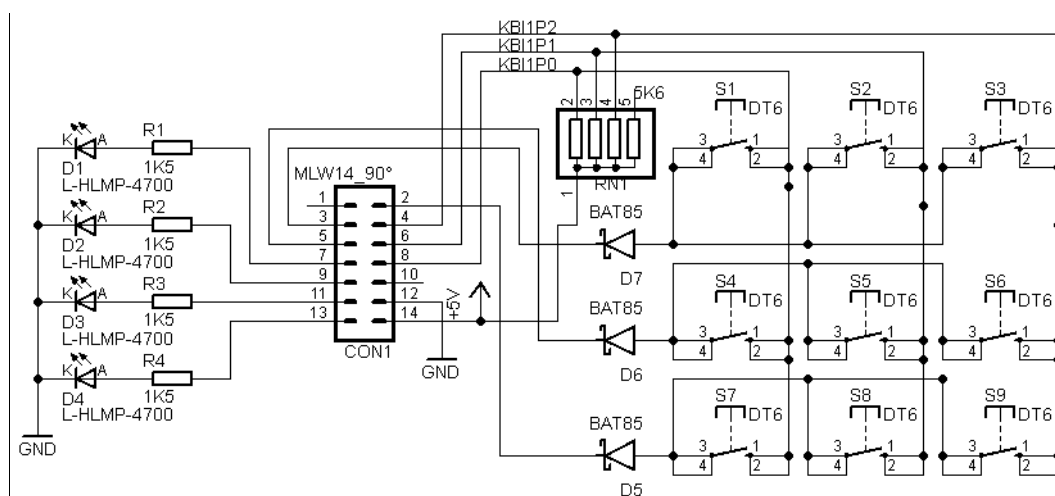
Obrázek 36: Blokové schéma spodní desky [31].

Kompletní schémata horní desky je uvedeno v příloze PIII.

4.4 Deska tlačítek

Deska tlačítek slouží jako ovládací rozhraní převodníkové jednotky, která je umístěna na předním panelu přístrojové krabice. Na této desce jsou umístěny čtyři nízko odběrové zelené LED diody, které slouží k zobrazení stavu jednotlivých kanálů. Tlačítka jsou zapojeny jako maticová klávesnice 3x3. V současnosti je zapojeno pouze 6 tlačítek, zbývající tři tlačítka jsou určeny jako rezerva pro případné rozšíření funkcí. Tlačítka slouží

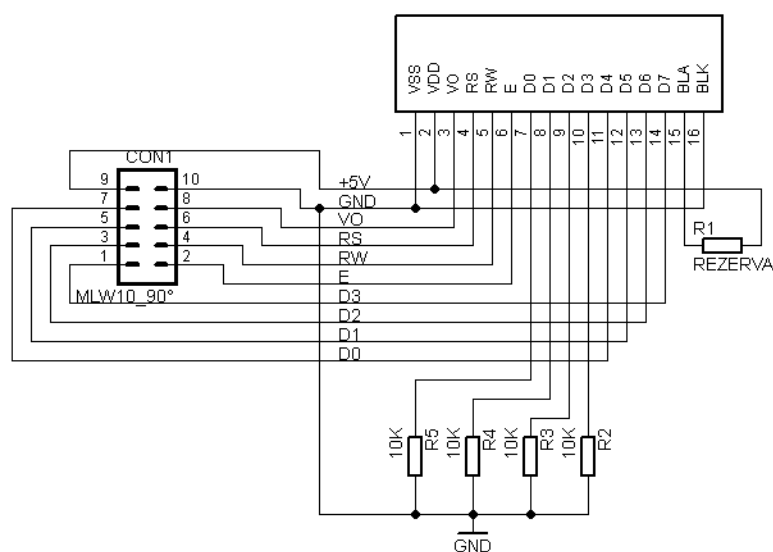
pro pohyb doprava, doleva, nahoru, dolu a pro potvrzení a zrušení. Tato deska je připojena pomocí plochého kabelu do řídicí desky.



Obrázek 37: Schéma zapojení desky tlačítek [31].

4.5 Deska displeje

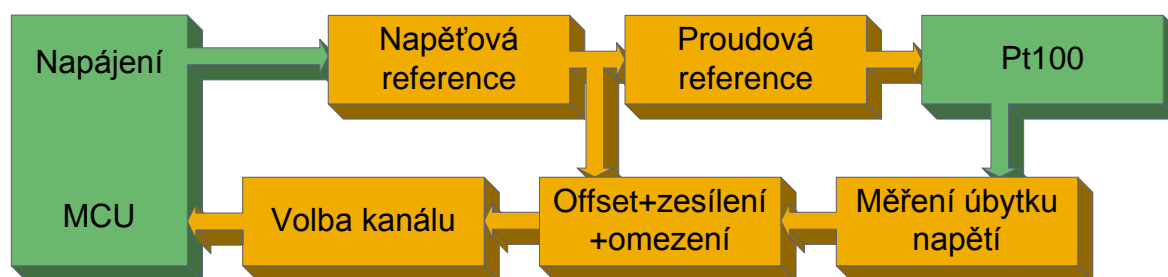
Z potřeby umístit displej do předního panelu přístrojové krabice byla vytvořena redukce z konektoru čtyřřádkového displeje MC2004E-SYL na plochý konektor pro propojení jednotlivých pinů. Tato redukce obsahuje již zmíněný konektor pro plochý kabel a potřebné odpory pro propojení nepoužitých pinů displeje s napětíovou zemí a odpor pro omezení proudu pro podsvícení displeje. Komunikace s displejem probíhá pomocí 4-vodičové sběrnice. Nastavení kontrastu displeje se provádí pomocí trimru umístěného na řídicí desce.



Obrázek 38: Schéma zapojení displeje [31].

4.6 Deska převodníku Pt100

Převodníková deska slouží k měření teploty odporového senzoru PT100 ve dvou vodičovém zapojení. Základem je napěťová reference TL431 s výstupem 2,5V, která je napájena 12V. Toto napětí dále vstupuje do proudové reference tvořené dvěma operačními zesilovači LM324. Výstup z proudové reference je přiveden na konektor, ke kterému se připojí odporový senzor Pt100. Úbytek napětí na tomto senzoru měřený na konektoru je vyhodnocen operačním zesilovačem v rozdílovém zapojení. Následně je tento signál posunut přibližně o 100mV směrem k nule a zesílen. Tento výstup je pak omezen na rozsah 0 - 5V, pomocí dvojice Schottky diod. Převodník obsahuje jumpery, pomocí kterých se nastaví vstupní signál a přítomnost karty na příslušný kanál 1 - 4. Následně je tento výstup přiveden na konektor pro plochý kabel, pro připojení do řídicí desky. Tato převodníková karta je nastavena pro rozsah měřených teplot 0 - 300°C.



Obrázek 39: Blokové schéma převodníku Pt100 [31].

Kompletní schémata převodníku Pt100 je uvedeno v příloze PIV.

4.7 Deska ovládání elektrického výkonu

Mikropočítačem generované PWM pulzy s periodou 1s a rozlišením 8bitů plně postačuje pro ovládání elektrického výkonu topného tělesa v modelu. Tyto pulzy spínají bipolární tranzistor BC337, který je použit z důvodu potřeby snížit proudové zatížení výstupu mikrokontroléru. Tento tranzistor následně spíná optotriak MOC3022, který zajišťuje galvanické oddělení silové části od řídicí s izolačním napětím 7500VAC. Tento optotriak spíná v okamžiku přivedení napětí na řídicí elektrodu (nеспíná v nule). Následně optotriak spíná výkonový triak TIC226 opatřený chladičem. Výstup střídavého napětí ze svorky umístěné na zdroji, je přivedeno ke svorce K1 na desce ovládání výkonu. Z této svorky je vedeno napětí na vstup do triaku, který je opatřen 1A pojistkou. Na svorku K2 se připojí topné těleso. Ovládací deska obsahuje jumpery, stejně jako převodníková deska, pomocí

4.9 Technické řešení převodníkové jednotky

Čelní panel obsahuje čtyřřádkový alfanumerický displej zobrazující aktuální měřené hodnoty nebo menu pro nastavení zařízení. Vpravo od displeje se nachází navigační tlačítka pro ovládání a změnu nastavení. Nad těmito tlačítky se nachází čtyři LED diody, které signalizují připojené vstupní/výstupní karty. Zadní panel jednotky disponuje čtyřmi modrými konektory Canon, které slouží pro připojení teplotních senzorů. Dále jsou zde dvě násuvné svorkovnice. Menší svorkovnice slouží k připojení topného tělesa modelu. Větší svorkovnice vyvádí interní napájení pro další použití. Je zde vyvedeno $\pm 15V$, 12V, 5V a GND. Bílé Canon konektory slouží pro připojení měřících karet ADVANTECH a černé konektory pro komunikaci RS-232. Tlačítko napájení je umístěno na boku zařízení.



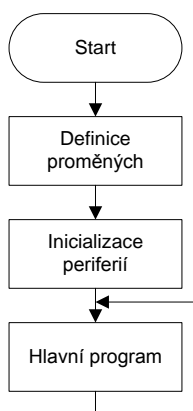
Obrázek 42: Konstrukce převodníkové jednotky [31].

5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

V následující části bude popsána realizace převodníkové jednotky z hlediska softwaru. Program pro mikrokontrolér je napsán v jazyce C. Pro zvolené MCU je k dispozici vývojové prostředí CodeWarrior. Pro programování této aplikace byl použit CodeWarrior verze 10.3, který je založený na platformě Eclipse IDE. Projekt této aplikace byl vytvořen pomocí utility Processor Expert integrované v CodeWarrior, která usnadňuje nastavení a práci s jednotlivými periferiemi mikrokontroléru. Samotný program v jazyce C je v rozsahu přibližně 2000 řádků. Následně bude program popsán v blocích, které ho podrobněji popisují. Program nebude popsán celý, ale pouze důležité části. Kompletní zdrojový kód programu je přiložen v příloze na CD-ROM.

5.1 Popis programu

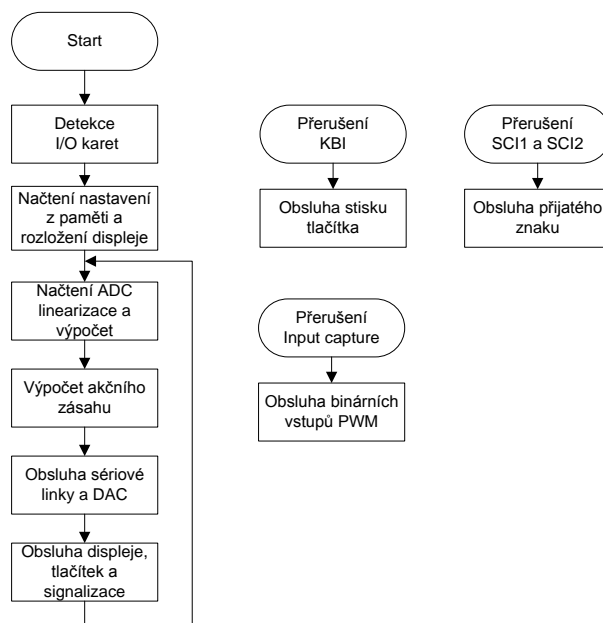
Zdrojový kód lze rozdělit do tří skupin. Při každém startu nebo restartu mikropočítače se provede inicializační sekvence, která obsahuje definici proměnných a nastavení periferií. Poté následuje cyklický blok, který obsahuje hlavní program.



Obrázek 43: Diagram celého programu [31].

Blok definice proměnných slouží k definicím globálních proměnných a funkcí. Program převodníkové jednotky obsahuje několik proměnných, které nesou informace, například o aktuální hodnotě akční veličiny nebo o aktuální teplotě. Jsou tu i pomocné proměnné, které nesou informaci o výchozím nastavení zařízení. Nastavení periferií mikrokontroléru v utilitě Processor Expert, generující vlastní inicializační funkci, je společně s dalšími, mnou vytvořenými inicializačními funkcemi, spuštěna v bloku inicializace periferií.

Hlavní program před vstupem do smyčky načte konfiguraci zařízení a dle toho nastaví jednotku. Paralelně k hlavnímu programu je použito přerušení od sériové linky při přijatém znaku, přerušení KBI a přerušení od binárních vstupů PWM, které generují měřicí karty.



Obrázek 44: Diagram hlavního programu [31].

Blok detekce I/O karet

Pokud je připojená vstupně/výstupní karta blok detekce I/O karet uloží se do proměnného pole informace o přítomnosti karty na daném kanále. Tento údaj je pak použit v dalších blocích a určuje, s kterými kanály se má pracovat.

Blok načtení z paměti a rozložení displeje

Tento blok zajišťuje načtení konstant pro linearizaci a parametry nastavení sériové linky z paměti EEPROM. V závislosti na počtu připojených vstupně / výstupních karet se zvolí rozložení displeje. Například pokud jsou připojeny pouze dvě karty I/O, tak bude na displeji zobrazena aktuální teplota daného kanálu a aktuální velikost akční veličiny. Pokud budou připojeny všechny převodníkové karty, tak bude zobrazena pouze teplota všech kanálů.

Blok načtení ADC, linearizace a výpočet

Načtení hodnot z AD převodníků je prováděno každou otočkou cyklu, kde se pokaždé uloží měřená hodnota do zásobníku o velikosti šestnácti hodnot pro každý kanál. Tento zásobník je pak zprůměrován a výsledek odpovídá měřené hodnotě. Následně je tato

hodnota, vložena do řešení kvadratické závislosti odporu na teplotě pro Pt100, viz rovnice 8.

Blok výpočtu akčního zásahu

Pokud je aktivní komunikace pomocí sériové linky, pak je v tomto bloku proveden přepočítání z hodnoty přijaté sériovou linkou. Následně je realizován akční zásah, který je proveden vygenerováním PWM pulzu. Rozlišení PWM časovače je 8-bitů s periodou 1 sekunda, která je dostačující pro ovládání výkonu elektrické energie o frekvenci 50Hz, kde jedna půl perioda trvá 10ms.

Blok obsluha sériové linky a DAC

Při aktivní sériové lince je každou otočkou cyklu odeslána na daný sériový port aktuální teplota řízeného kanálu. Tato hodnota může nabývat teoreticky 0.0 až 999.9. S tímto úzce souvisí i blok přerušení SCI1 a SCI2, který zajišťuje příjem akčního zásahu. Tento akční zásah může nabývat hodnoty 0 - 100%. Přijatý řetězec musí být ve tvaru a100\r, pro stoprocentní velikost akční veličiny. Výhodou tohoto přerušení je, že není potřeba odesílat neustále akční zásah, ale pouze změnu této veličiny. D/A převodníky odesílají měřenou hodnotu na výstup pouze pro kanál 1 a 2, nezávisle na tom, zda je aktivní sériová linka.

Blok obsluha displeje, tlačítek a signalizace.

Obsluha displeje zajišťuje zobrazení aktuální měřené teploty, hodnoty PWM nebo menu nastavení jednotky. Stisk tlačítek je řešen pomocí přerušení KBI. Tyto tlačítka se starají o jednotlivé změny zobrazení displeje, pohyb v menu a změnu parametrů konstant výpočtů pro jednotlivé kanály jednotky. Signalizace ovládá čtyři LED diody na předním panelu, které zobrazují, zda je na daném kanále připojena převodníková karta spolu s ovládací kartou. Při ovládání kanálu přes binární vstup zobrazuje tato dioda aktuální stav vstupu.

Blok obsluha binárních vstupů PWM

Dva binární vstupy jsou připojeny k flexibilnímu časovači FTM1 na kanál 0 a 1, pro které je nastavena funkce input capture. Tato funkce slouží ke snímání binárního vstupu a měří délku jeho jednotlivých logických úrovní. V režimu řízení pomocí měřicí karty ADVANTECH je deaktivována funkce PWM pro daný kanál. Při změně logické úrovně binárního vstupu je generováno přerušení. V tomto přerušení je následně zjištěna logická úroveň vstupního signálu, která je zkopírována na výstup MCU, který řídí výkon topného

tělesa. Zároveň je změřen poměr jednotlivých logických úrovní, který je následně zobrazen na displeji o aktuální hodnotě PWM.

5.2 Uživatelský manuál

V následující části bude popsána obsluha zařízení, včetně vnitřního uspořádání pro orientaci při možném rozšíření o další vstupně/výstupní karty nebo případné výměny pojistky. Dále bude popsán způsob ovládání zařízení a s tím spojené nastavení a také ukázka nastavení komunikace pomocí sériové linky pomocí Matlab/SIMULINK.

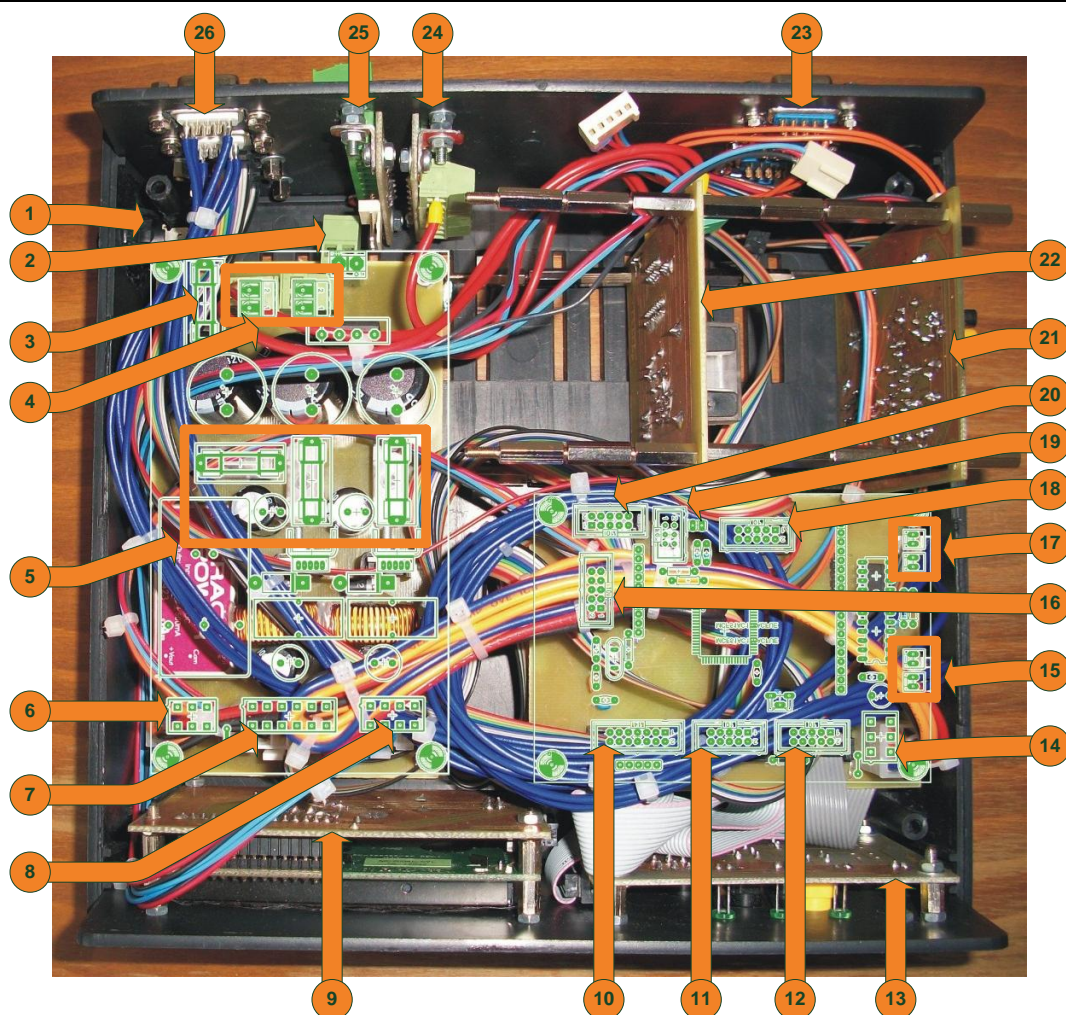
5.2.1 Vnitřní uspořádání jednotky

Jak již bylo zmíněno v části hardwarového návrhu, toto zařízení obsahuje 4 různá napětí. Aby bylo možné je rozlišit, bylo zvoleno barevné značení jednotlivých potenciálů. Pro napěťovou zem je barva kabelu černá, pro 5V barva světle modrá, pro 12V tenký červený vodič, pro symetrické napájení $\pm 15V$ oranžový vodič, všechny tyto vodiče jsou s průřezem $0,35\text{mm}^2$. Napětí 24VAC, které je značeno červeným vodičem s průřezem 1mm^2 a slouží pro napájení zařízení a vstupní/výstupní napětí pro ovládací karty. Propojení mezi převodníkovou kartou a modrým Canon konektorem je provedeno oranžovým vodičem s průřezem $0,35\text{mm}^2$. Propojení mezi bílými Canon konektory sloužící pro připojení měřicí karty a řídicí deskou je řešeno pomocí tmavě modrého vodiče s průřezem $0,5\text{mm}^2$. Ostatní spoje jsou řešeny pomocí plochého kabelu. Následující tabulka popisuje rozmístění jednotlivých komponent a konektorů.

Tabulka 4: Popis komponent a konektorů [31].

1	Tlačítko napájení.
2	Svorka vstupního napětí zdroje.
3	Hlavní pojistka zařízení 4A.
4	Výstup jištěného napětí do karet pro ovládání elektrického výkonu.
5	Pojistky pro jednotlivé napájecí větve. Zleva $\pm 15V$ 500mA, 12V 2A, 5V 2A.
6	Konektor napájení řídicí desky.
7	Konektor napájení převodních karet.
8	Konektor napájení karet pro ovládání elektrického výkonu.
9	Deska displeje.
10	Konektor pro připojení desky s tlačítky.
11	Konektor pro připojení převodních desek.
12	Konektor pro připojení desky displeje.
13	Deska s tlačítky.
14	Napájecí konektor řídicí desky.
15	Konektory binárních vstupů. Horní kanál 1, spodní kanál 2.
16	Konektor sériové komunikace RS-232 COM 1.

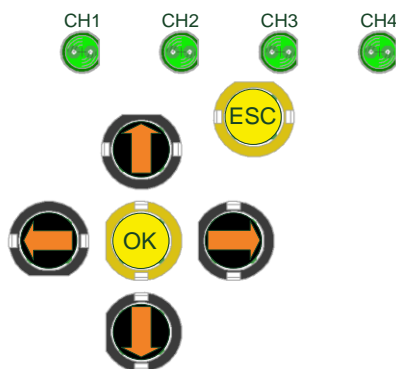
17	Konektory analogových výstupů. Horní kanál 1, spodní kanál 2.																	
18	Konektor pro připojení desek pro ovládání elektrického výkonu.																	
19	Programovací konektor BDM.																	
20	Konektor sériové komunikace RS-232 COM 2.																	
21	Převodníkové desky.																	
22	Deska pro ovládání elektrického výkonu.																	
23	Konektory pro připojení odporového senzoru kanál 1 až 4. Připojení na pin 1 a 6.																	
24	Konektor pro připojení odporové zátěže. Schéma svorkovnice:																	
											Kanál 1		Kanál 2		Kanál 3		Kanál 4	
	1	2	3	4	5	6	7	8										
25	Konektor výstupu napájení. Schéma svorkovnice:																	
	GND		12V max. 1A		-15V max.100mA		+15V max.100mA		5V max. 1A									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
26	Komunikační rozhraní. Shora bílé konektory kanál 1 a 2 pro měřicí karty. Schéma zapojení konektorů:																	
											Analogový výstup				PWM vstup			
											GND		Signál		GND		Signál	
	9		5		6		1											
Černé Canon konektory RS-232 shora COM1 a COM2																		



Obrázek 45: Popis komponent převodníkové jednotky [31].

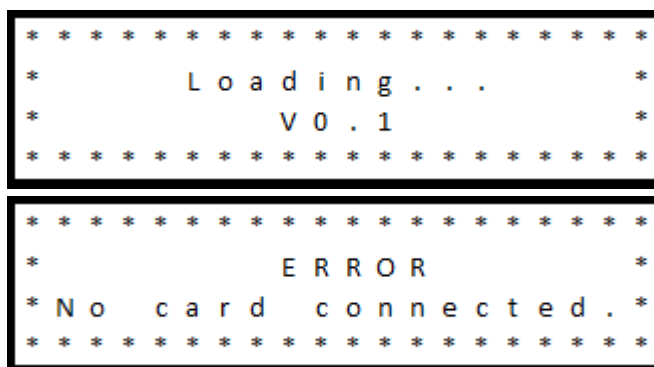
5.2.2 Ovládání zařízení

Ovládání zařízení probíhá pomocí šestice tlačítek. Černá tlačítka slouží pro pohyb nahoru, dolů, doleva a doprava. Tlačítko OK slouží pro vstup do menu a také pro vstup do dalších podúrovní menu. Tlačítko ESC slouží k posunu v menu o úroveň výše. Zelené LED diody zobrazují, zda je daný kanál připojený. Při řízení pomocí měřicí karty zobrazují aktuální stav vstupního signálu.



Obrázek 46: Ovládací tlačítka a diody [31].

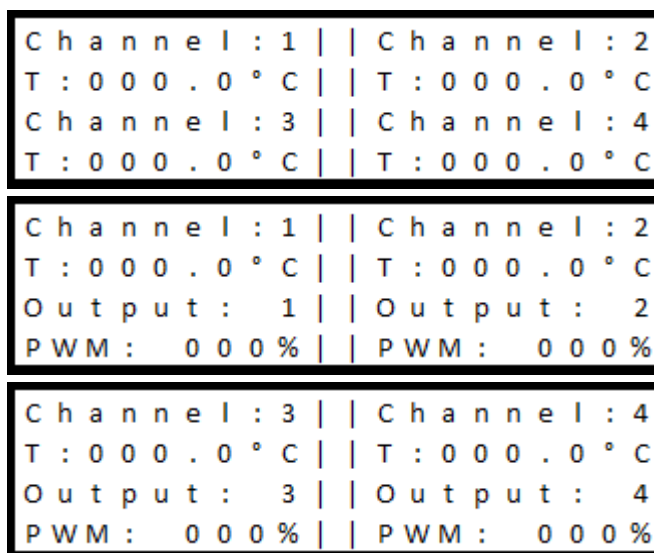
Po připojení zařízení do elektrické sítě 24VAC a stisknutím napájecího tlačítka do polohy pro zapnutí, se rozsvítí displej zařízení, na kterém se zobrazí nápis *Loading* a aktuální verze firmwaru zařízení. V tento okamžik probíhá načítání konfigurace zařízení a stav této konfigurace je zobrazen postupným rozsvícením LED diod. Pokud zařízení má připojenu alespoň jednu vstupně/výstupní kartu, zařízení po této sekvenci začne pracovat. Pokud není připojena žádná karta, zařízení zobrazí nápis *ERROR; No card connected*.



Obrázek 47: Zobrazení displeje po startu a při chybě [31].

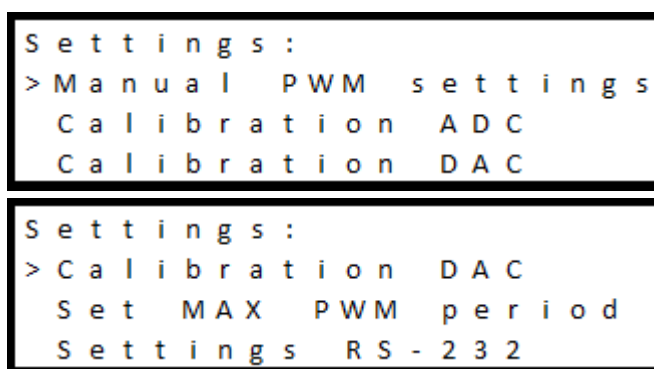
Při plném obsazení vstupně/výstupních karet se zobrazení displeje rozloží tak, aby bylo možné sledovat aktuální měřenou teplotu všech čtyř kanálů. Stiskem tlačítka dolů a nahoru lze pak přepínat z tohoto úsporného zobrazení na zobrazení, kde jsou po dvojicích zobrazeny aktuální hodnoty, a to jak teploty, tak i aktuálního akčního zásahu v rozsahu

0 až 100%. Pokud je připojen pouze jedna z těchto dvojic, je zobrazení stejné jako u plného obsazení kartami, pouze hodnota nepřipojeného kanálu se změní z nuly na *Unc.* Ovšem pokud je připojena pouze jedna karta nebo jen jedna dvojice karet, tak se displej automaticky nastaví do zobrazení, kde jsou zobrazeny hodnoty teploty a akční veličiny.



Obrázek 48: Zobrazení displeje při řízení a měření [31].

Zařízení umožňuje ručně nastavit hodnotu akční veličiny přes ovládací tlačítka a taktéž umožňuje konfiguraci jednotlivých vstupně/výstupních kanálů včetně sériové linky. Toto nastavení je zobrazeno stiskem tlačítka OK, které vyvolá menu zařízení.



Obrázek 49: Zobrazení rozložení menu [31].

Pohybem tlačítka nahoru a dolů je uskutečněn pohyb v menu. Ukazatel > zobrazuje aktuálně vybrané nastavení periferie. Dalším stiskem tlačítka je proveden skok do další úrovně nastavení. Následující obrázek zobrazuje ruční nastavení hodnoty PWM. Po provedení výběru daného kanálu tlačítky nahoru a dolů a stiskem tlačítka OK, se ukazatel přesune těsně před měněnou hodnotu. Stiskem tlačítka nahoru a dolů se buď k hodnotě inkrementuje, nebo dekrementuje hodnota o 1 větší či menší. Stiskem tlačítka

doleva nebo doprava se zvětšuje násobek inkrementace. Dalším stiskem tlačítka se v tomto případě hodnota vynuluje. Stiskem tlačítka ESC nastavená hodnota zůstane uchována a ukazatel odskočí o úroveň výše.

```
> P W M   C h a n n e l   1 :   0 0 0 %
P W M   C h a n n e l   2 :   0 0 0 %
P W M   C h a n n e l   3 :   0 0 0 %
P W M   C h a n n e l   4 :   0 0 0 %
```

Obrázek 50: Ruční nastavení hodnoty PWM [31].

Jak již bylo zmíněno, v nastavení jednotky lze měnit parametry jednotlivých kanálů převodníkových karet. Současná verze firmwaru umožňuje měnit offset a zesílení vstupního signálu generovaného převodníkovou kartou. Následující obrázek zobrazuje výběr kanálu, na kterém se bude provádět změna. Dalším stiskem tlačítka OK se zobrazí na displeji aktuální hodnoty. Tyto hodnoty lze měnit stejným způsobem, jak již bylo zmíněno u nastavení PWM s tím rozdílem, že stiskem tlačítka OK se nastavená hodnota uloží do paměti. U každého kanálu lze obnovit přednastavené hodnoty výběrem default.

```
C a l i b . A D C : > C h a n n e l   1
                      C h a n n e l   2
                      C h a n n e l   3
                      C h a n n e l   4

C h a n n e l   1 :
> R _ G a i n :       + 0 0 0 . 0 0 0
R _ O f f s e t :     + 0 0 0 . 0 0 0
D e f a u l t
```

Obrázek 51: Kalibrace jednotlivých ADC kanálů [31].

Obdobným způsobem jako u předchozího nastavení ADC se nastavují i parametry analogového výstupu, kde hodnota zesílení a offsetu se vztahují na výstupní hodnotu teploty.

```

C a l i b r a t i o n   D A C
> C h a n n e l   1
   C h a n n e l   2

D A C   C h a n n e l   1 :
> G a i n :           + 0 0 0 . 0 0 0
   O f f s e t :       + 0 0 0 . 0 0 0
   D e f a u l t

```

Obrázek 52: Kalibrace jednotlivých DAC kanálů [31].

Pro správné zobrazení hodnoty akční veličiny v režimu měření pomocí karty ADVANTECH je nutné nastavit maximální délku periody PWM.

```

S e t   M A X   P W M   p e r i o d
> P e r i o d :           0 0 0 s

```

Obrázek 53: Nastavení maximální délky periody [31].

Aby mohl počítač komunikovat s převodníkovou jednotkou pomocí sériové linky, je nutné mít povolenou komunikaci v nastavení jednotky pro daný COM port. Další nutností je mít nastavený správný kanál, který bude řízen.

```

S e t t i n g s   R S - 2 3 2
> C o m   1
   C o m   2

C o m   1 :
> E n a b l e :         O n
   C h a n n e l :       3
   D e f a u l t

```

Obrázek 54: Nastavení RS-232 [31].

5.2.3 Sériová komunikace Matlab/SIMULINK

Po připojení propojovacího kabelu mezi počítačem a převodníkovou jednotkou, je nutné nastavit v aplikaci Matlab parametry přenosu. Toto nastavení se provede příkazem `serial()`, viz následující příklad:

```
s = serial('COM8','BaudRate',9600,'Terminator','CR');
```

COM8 je port, ke kterému je připojená převodníková jednotka. Přenosová rychlost je nastavena na 9600 Bd pro oba kanály a terminátor je nutné nastavit na CR.

Pro vypsaní nastavení lze použít příkaz `get()`, vypsané nastavení by mělo být stejné jako v následující ukázce:

```
>> get(s)
    SERIAL specific properties:
    BaudRate = 9600
    BreakInterruptFcn =
    DataBits = 8
    DataTerminalReady = on
    FlowControl = none
    Parity = none
    PinStatus = [1x1 struct]
    PinStatusFcn =
    Port = COM8
    ReadAsyncMode = continuous
    RequestToSend = off
    StopBits = 1
    Terminator = CR
```

Jakmile jsou parametry komunikace nastaveny, je nutné otevřít komunikační kanál, který se provede příkazem `fopen()`. Pro ukončení komunikace nebo uvolnění kanálu se použije příkaz `fclose()`.

```
>>fopen(s)
>>fclose(s)
```

Pro příjem hodnot z převodníkové jednotky lze použít následující příklad. V prostředí příkazového okna nebo použitím `mfile` použitím funkce `fgets()`, která následně vrátí přijatou hodnotu.

```
>>fgets(s)
```

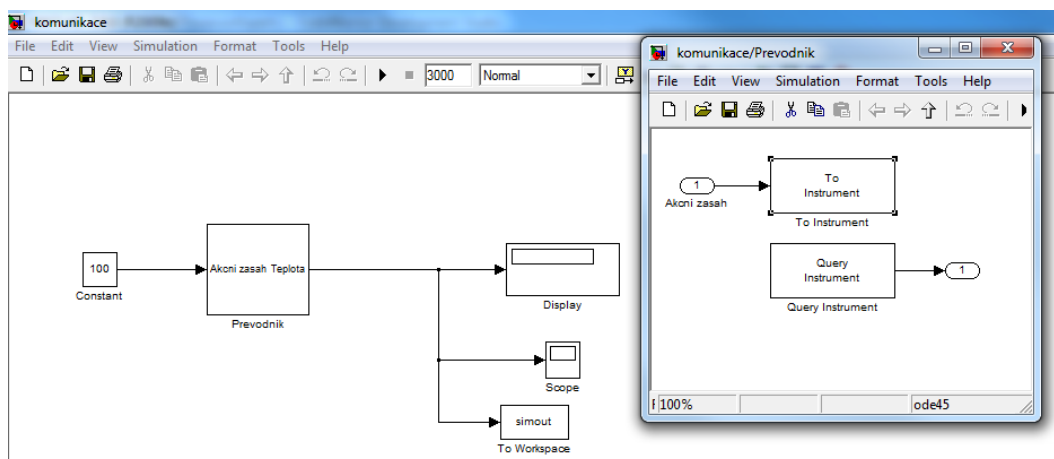
Odeslání hodnoty z příkazového okna nebo z `mfile` lze provést příkazem `fprintf()`, který musí být ve tvaru:

```
>>fprintf(s, 'a100');
```

Kde `a100` udává maximální akční zásah v rozsahu 0-100%.

Nastavení komunikace v aplikaci SIMULINK je stejná, proto je tedy nutné nastavit komunikaci a otevřít komunikační kanál pomocí příkazového řádku Matlab. Pro komunikaci s převodníkovou jednotkou se osvědčilo použití bloku To Instrument a Query Instrument z knihovny Instrument Control Toolbox. V nastavení pro tyto bloky je

potřeba definovat hardwarovou konfiguraci z workspace. Pro blok To Instrument v záložce Send se nastaví výstupní formát jako ASCII a formát tohoto řetězce jako 'a%3d'. V bloku Query Instrument v záložce Query se nastaví datový formát ASCII a formát řetězce '%f'. Ukázková aplikace komunikace v Matlab/SIMULINK je přiložena v příloze na CD-ROM.



Obrázek 55: Sériová komunikace Matlab/SIMULINK [31].

5.2.4 Komunikační protokol RS-232

Jak již bylo zmíněno výše, převodníková jednotka disponuje dvěma nezávislými porty RS-232. Pro správnou funkci komunikace je nutné nastavit parametry sériové komunikace mezi počítačem a převodníkovou jednotkou dle následujících parametrů:

Parita: žádná

Délka dat: 8bitů

Stop bit: 1

Přenosová rychlost: 9600Bd

Řízení přenosu: vypnuto

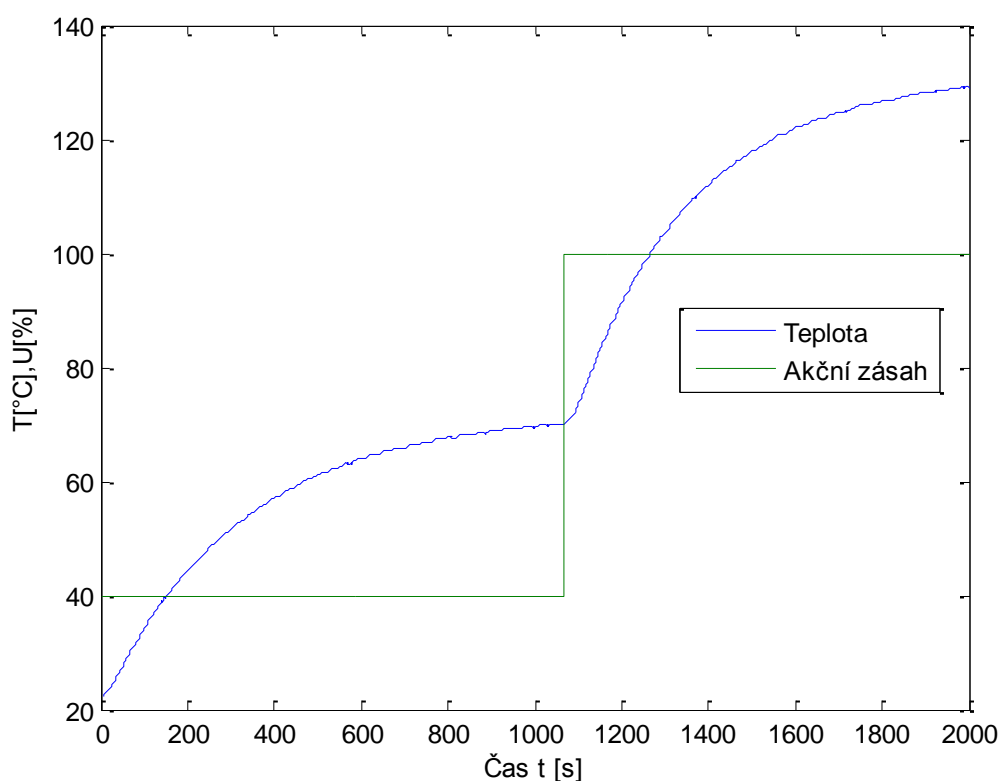
Komunikace mezi počítačem a převodníkovou jednotkou probíhá v ASCII znacích. Odesílání měřené hodnoty z převodníkové jednotky po sériové lince pro oba kanály probíhá v každém cyklu. Tato hodnota je ve formátu čísla s jedním desetinným místem ve tvaru `000.0` a je zakončená terminátorem - přesun na začátek aktuálního řádku `\r`. Tedy celý odeslaný řetězec je ve tvaru `"000.0\r"`. Příjem hodnoty do převodníkové jednotky o velikosti akčního zásahu je nezávislý na tom, v které fázi se program nachází, což dovoluje odesílat z počítače pouze změnu této hodnoty. Formát tohoto řetězce musí být ve tvaru `"a000"`, kde `a` je identifikátor přijatých dat a `000` je odeslaná hodnota, která může nabývat hodnot 0 - 100, což je procentuální vyjádření akčního zásahu.

6 OVĚŘENÍ FUNKCÍ

Následující kapitola se zabývá ověřením funkcí nového zařízení s porovnáním funkcí stávajícího řešení. Ověření je realizováno měřením přechodové charakteristiky jednotkovým skokem na 40% výkonu topného tělesa. Po ustálení teploty je proveden skok na 100%. Ověření proběhlo oběma možnými způsoby komunikace, a to jak za pomoci karty ADVANTECH, tak prostřednictvím sériové linky v aplikaci Matlab/SIMULINK.

6.1 Měření pomocí stávající jednotky

Stávající zařízení řídí teplotní model pomocí karty ADVANTECH, kde vyhodnocení měřené teploty je řešeno pomocí analogových obvodů. Průběh měřené teploty akční veličiny je zobrazeno na obrázku 56.

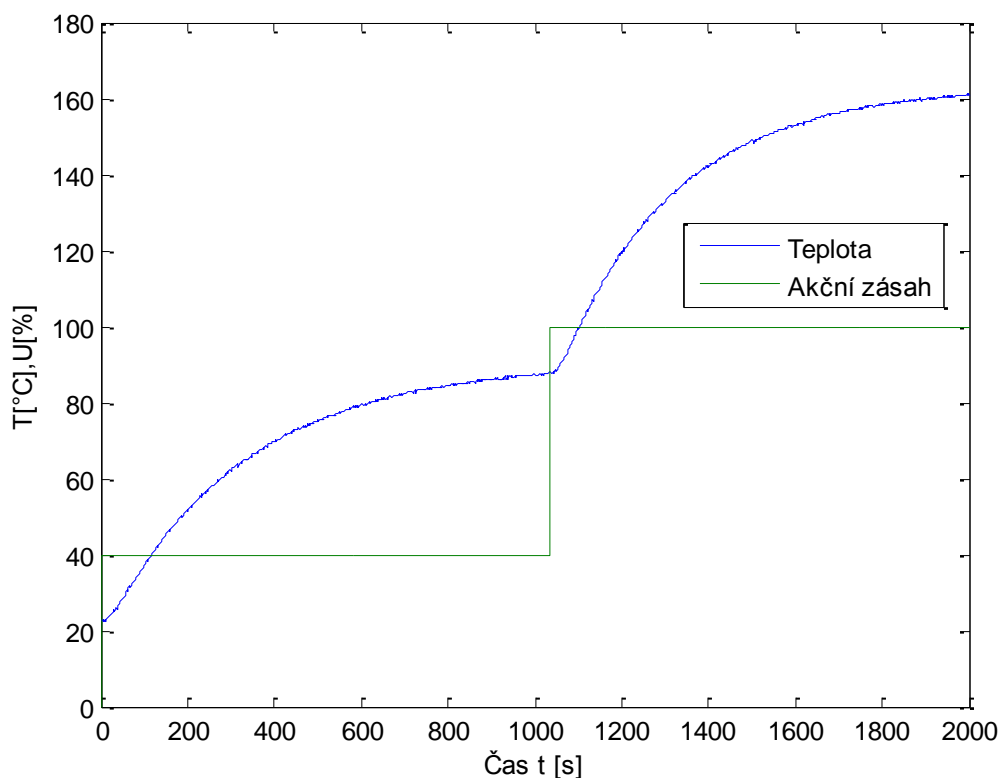


Obrázek 56: Průběh měření stávající řešení [31].

6.2 Měření pomocí karty ADVANTECH

Jak již bylo zmíněno výše, měřená teplota je pomocí tohoto zařízení převedena na unifikovaný signál 0 – 10V, který odpovídá teplotnímu rozsahu 0 – 300°C. Na rozdíl od stávajícího zařízení, inovovaná jednotka vyhodnocuje výstupní hodnotu číslicově.

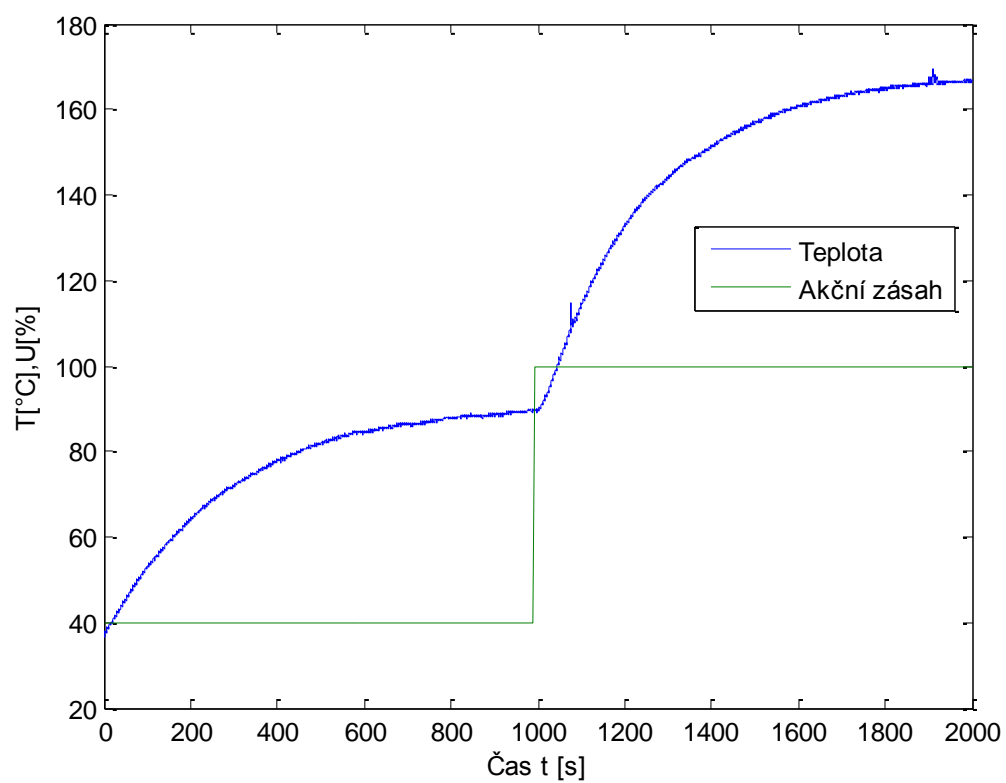
Naměřené hodnoty byly zaznamenány pomocí aplikace WControl a data byla zpracována pomocí aplikace Matlab. Průběh měřené teploty a akčního zásahu je zaznamenán v obrázku 57.



Obrázek 57: Průběh měření WControl [31].

6.3 Měření v aplikaci Matlab/SIMULINK

Poslední měření proběhlo pomocí propojení převodníkové jednotky s počítačem pomocí sériové linky. V aplikaci Matlab/SIMULINK bylo vytvořeno schéma pro měření přechodové charakteristiky. Průběh měřené hodnoty zobrazuje obrázek 58. Oproti měření pomocí karty ADVANTECH a aplikace WControl, je naměřená hodnota mírně zašuměná. Aplikace WControl na rozdíl od aplikace Matlab/SIMULINK měřenou hodnotu filtruje. Vzniklý šum je způsoben nedokonalostí převodníkové karty teplotního senzoru a rozkmitává měřenou hodnotu. Nová revize převodníkové karty teplotního senzoru, která se nachází v příloze, již tento problém eliminuje pomocí RC filtračního členu.



Obrázek 58: Průběh měření Matlab/SIMULINK [31].

ZÁVĚR

Podnětem pro vypracování této diplomové práce byla zastaralost stávajícího způsobu řízení tepelných modelů, sloužících především pro výukové účely. Riziko spočívá v možné poruše zařízení a v její následné opravě. Oprava by pravděpodobně nebyla možná, z důvodu již nevyráběných elektronických součástek.

Cílem diplomové práce tedy bylo navrhnout a zkonstruovat mikropočítačovou jednotku pro řízení tepelných modelů, včetně podpůrného programového vybavení. Toto zařízení se v současné době nachází ve fázi prototypu, nicméně je kompletně funkční a odzkoušené. Oproti původní převodníkové jednotce umožňuje nová jednotka řídit až čtyři kanály. Měřená hodnota teploty spolu s aktuální hodnotou akční veličiny je zobrazena na alfanumerickém displeji v daných jednotkách. Jednotlivé vstupní a výstupní kanály lze kalibrovat pomocí ovládacích tlačítek a toto natavení lze uložit do paměti zařízení. Pomocí softwarové linearizace je dosaženo přesnějšího vyhodnocení měřené teploty. Všechny periferie jsou oproti původnímu řešení připojeny k jednotce pomocí konektorů a svorkovnic, což umožňuje jednoduché připojení tepelného modelu nebo počítače. Hlavní přínos spočívá v možné komunikaci se zařízením pomocí sériové komunikace RS-232, díky které je možné provádět měření a regulaci pomocí jakéhokoliv počítače vybaveného COM portem. Jediný nedostatek zařízení spočívá v přesnosti měření teploty, která je v současné době udávána s přesností na stupeň celsia. Je to způsobeno tím, že výstupní signál z převodníkové karty je zašuměný. Tento šum by měla odstranit revize převodníkové karty vybavené RC filtrem na výstupu.

Dále návrh nového zařízení nabízí v případě potřeby možnost dalšího rozšíření svých funkcí. Například vstupní převodníkové karty lze nahradit jinými převodníkovými kartami, které by umožnily měření teploty pomocí termočlánku nebo jiných odporových senzorů jako jsou třeba Pt1000. Úprava karet pro ovládání elektrického výkonu nabízí možnost řízení stejnosměrného napětí.

Cílů diplomové práce bylo dosaženo konstrukcí prototypu a vytvořením programového vybavení. Tato práce může sloužit jako námět pro další konstrukce převodníkových jednotek. Výsledek práce byl prezentován v rámci školního kola soutěže firmy Freescale Semiconductor, kde získal třetí místo.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The main impulse for writing this master thesis was obsolescence of the existing method for heat plant models control. This equipment is mainly used for teaching purposes. The risk is about possibilities of equipment failure and subsequent repair. Repairs would not be probably possible, because needed electronic components are no longer produced.

The aim of the master thesis was to design and construct a microcomputer control unit for heat plant models including software support. This device is currently in the prototype stage, but is fully functional and tested. Comparing to the original converting unit enables a new unit to control up to four channels. The measured temperature value with the current value of the manipulated variable is displayed on the alphanumeric display in corresponding units. Each input and output channels can be calibrated by using the control buttons and these settings can be stored in memory. By using linearization software is achieved a more accurate evaluation of the measured temperature. All peripherals are connected to the unit via connectors and terminals, allowing easy connection of the thermal model or computer. The main benefit is possibility to communicate with the device via serial communication RS-232 interface that makes it possible to measure and control via any PC with COM port. The only deficient is in device temperature measurement accuracy, which is currently expressed in degree Celsius. It is due to the fact that the output signal from the transfer card is noisy. This noise should be removed by a revision of transfer cards equipped with RC filter on the output.

The proposal also offers the possibility of further expansion of its functions. For example, the input transfer cards can be replaced by other transfer cards, which would allow temperature measurement using a thermocouple or other resistive sensors as is Pt1000. Moreover, treatment cards for electric power offers the possibility to control the DC voltage.

The objectives of this thesis were achieved by designing of prototype and its software. This work may serve as a topic for further construction of transfer units. Result of this work was presented at the school's contest Freescale Technology Application, where it won third place.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK, 2011. *Elektronické prvky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-426-2.
- [2] ĎAĎO, Stanislav, 1996. *Senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 80-010-1500-9.
- [3] Direct Industry. The Virtual Industrial Exhibition. *Detection – Measurement*. [online]. ©2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com>.
- [4] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA, 2012. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [5] ECOM. Distributor elektronických součástek. *SSR AC triak*. [online]. ©2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/e-shop/ksd210ac8/?sReferer=ZS1zaG9wPTE7YWN0aW9uPXMob3BfcHJvZHVjdF9saXN0O2IDYXRlZ29yeUlkPTE2OTc7c0FjdGlvbj1zaG9wX3Byb2R1Y3RfbGlzdDs=>.
- [6] Elektro revue. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. *Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi*. [online]. ©2012, [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000866-cf8b1d0853>.
- [7] Encyklopedie fyziky. Multimediální Encyklopedie Fyziky. *Elektromagnetické relé*. [online]. ©2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/298-elektromagneticke-rele>.
- [8] ENERGY CONSULTING SERVICE. Termovize ve stavebnictví. *Využití inftrakamery a bezdotykových teploměru ve stavebnictví*. [online]. ©2009. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.e-c.cz/download1.php?id=138>.
- [9] EPCOS. PTC thermistor for overcurrent protection. *Overcurrent Protection*. [online]. ©2011. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.epcos.com/inf/55/db/PTC_09/OC_Leaded_230V_C_B598.pdf.
- [10] Farnell. Element 14. *GE2SOD70-40*. [online]. ©2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://uk.farnell.com/productimages/farnell/standard/GE2SOD70-40.jpg>.
- [11] FRANK, Helmar a Václav ŠNEJDAR, 1976. *Principy a vlastnosti polovodičových součástek*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.

- [12] FREESCALE SEMICONDUCTOR. Making the world a smarter place. *MCF51AC256 ColdFire Integrated Microcontroller Reference Manual*. [online]. ©2011. [cit. 2013-05-23] Dostupné z: www.freescale.com.
- [13] GME. GM Electronic. *Teplotní čidla s číslicovým výstupem*. [online]. ©2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/teplotni-cidla-s-cislicovym-vystupem/smt160-30-92-p530-063/>.
- [14] HRUŠKA, František, 2007. *Senzory v systémech informatiky a automatizace. 1. vyd.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. ISBN 978-80-7318-630-2.
- [15] HRUŠKA, František, 2010. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití. 1. vyd.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [16] HW. Měření teploty. *Polovodičové odporové senzory teploty*. [online]. ©2004 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>.
- [17] HW. SSR. *Nejdůležitější parametry i stinné stránky*. [online]. ©2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/vykonove-obvody/ssr-nejdulezitejsi-parametry-i-stinne-stranky.html>.
- [18] CHUDÝ, Vladimír, 1999. *Meranie technických veličín. 1. vyd.* Bratislava: STU. ISBN 80-227-1275-2.
- [19] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. VŠCHT v Praze. *Měřicí a řídicí technika*. [online]. ©2005 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/>.
- [20] KATEDRA MIKROELEKTRONIKY. ČVUT. *Teplotní senzory*. [online]. ©2010 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/05aTeplotn%A1%20senzory.pdf>.
- [21] KREIDL, Marcel, 2005. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd.* Praha: BEN – technická literatura. ISBN 80-730-0145-4.
- [22] LYSENKO, Vladimír, 2005. *Detektory pro bezdotykové měření teplot. 1. vyd.* Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-730-0180-2.
- [23] Maxim Integrated. MAX31865. *RTD-to-Digital Converter*. [online]. ©2012 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>.

- [24] Moravec, Zdeněk. Osobní stránka. *Hrotová dioda*. [online]. ©2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://z-moravec.net/ext_el/diod/hrot.php.
- [25] Musil, Vladislav. Elektro revue. *Výkonové elektronické součástky*. [online]. ©2000 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00014/index.html>.
- [26] Newport. Newport Electronics. *Technické informace*. [online]. ©2005 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://newport.cz/techinfo/>.
- [27] SENSIT. Odporové snímače teploty. *Příručka pro konstruktéry, projektanty a realizátory měřící a regulační techniky*. [online]. ©2010, [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.sensit.cz/ke-stazeni/soubory/Prirucka_CZ_A5_2012_08.pdf.
- [28] Schneider-electric. Katalog stykačů. *Stykače v novém provedení se svorkami EverLink*. [online]. ©2006 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www2.schneider-electric.cz/firma/ceska-republika/archiv-novinek/4830-stykace-40-50-65a-v-novem-provedeni-se-svorkami-everlink.html>.
- [29] ÚVSSR – Odbor elektrotechniky. Fakulta strojního inženýrství VUT Brno. *Úvod do laboratorních cvičení z elektrotechniky*. [online]. ©2006 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.elektro.fme.vutbr.cz/studopory/elektrot/lab_09_cv.htm.
- [30] VISHAY. Vishay Semiconductors. *Small Signal Fast Switching Diodes*. [online]. ©2012 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>.
- [31] Vlastní zpracování.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	Střídavé napětí
A/D	Analogově digitální
BDM	Rozhraní pro programování mikropočítačů
ČSN	Československá státní norma
DC	Stojnosměrné napětí
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Elektronicky mazatelná a programovatelná paměť
EN	Evropská norma
FLASH	FLASH paměť
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
ITS-90	Mezinárodní teplotní stupnice 1990
I2C	Multi-master sériová sběrnice
kHz	Kilo hertz jednotka frekvence
LED	Elektroluminiscenční dioda
mA	Miliampér jednotka proudu.
MCU	Jednočipový počítač
ms	Milisekunda jednotka času
OZ	Operační zesilovač
PID	Proporcionální, integrační a derivační
PWM	Pulsně šířková modulace
SPI	Sériové periferní rozhraní
TTL	Tranzistorově - tranzistorová logika
V	Volt jednotka napětí
Ω	Ohm jednotka odporu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Charakteristika PT100 [27].	14
Obrázek 2: Toleranční pole Pt100 [27].	15
Obrázek 3: Charakteristika Ni1000 [27].	16
Obrázek 4: Toleranční pole Ni1000 [27].	17
Obrázek 5: Vinutý senzor [19].	17
Obrázek 6: Vrstvený senzor [19].	18
Obrázek 7: Charakteristika senzoru NR355 20K [27].	19
Obrázek 8: Možné konstrukce NTC termistoru [3].	20
Obrázek 9: Charakteristika PTC senzoru řady C800 [9].	20
Obrázek 10: Charakteristika senzoru KTY81-12x [27].	22
Obrázek 11: Konstrukce KTY81-121 [10].	22
Obrázek 12: Zapojení odporových senzorů [27].	23
Obrázek 13: Zapojení použitím můstkové metody [15].	23
Obrázek 14: Vyhodnocení čtyřvodičového zapojení [15].	24
Obrázek 15: Blokové schéma převodníku pro odporový senzor [15].	24
Obrázek 16: Zapojení MAX31865[23].	24
Obrázek 17: Možné konstrukce průmyslových převodníků [31].	25
Obrázek 18: Závislost VA charakteristiky diody na teplotě [24].	26
Obrázek 19: Závislost napětí PN přechodu v propustném směru diody 1N4148 [30].	26
Obrázek 20: Závislost VA charakteristiky tranzistoru na teplotě [31].	27
Obrázek 21: Integrovaný PN senzor teploty [15].	27
Obrázek 22: Senzor SMT160-30-92 [13].	28
Obrázek 23: Obvod termočlánku (t_m je měřicí spoj a t_s srovnávací spoj) [2].	29
Obrázek 24: Provedení termoelektrického snímače [19].	31
Obrázek 25: Kompenzace srovnávacího spoje [19].	32
Obrázek 26: Termogram [8].	35
Obrázek 27: Konstrukce elektromagnetického relé a ukázka [3,7].	36
Obrázek 28: Konstrukce stykač a ukázka [28, 29].	37
Obrázek 29: SSR relé [5].	39
Obrázek 30: Blokové schéma stávajícího řešení v laboratoři [31].	41
Obrázek 31: Stávající převodníková jednotka [31].	42
Obrázek 32: Projektové okno WControl [31].	43

Obrázek 33: Blokové schéma nové řídící jednotky [31].	44
Obrázek 34: Blokové schéma zdroje [31].	45
Obrázek 35: Blokové schéma horní desky [31].	46
Obrázek 36: Blokové schéma spodní desky [31].	47
Obrázek 37: Schéma zapojení desky tlačítek [31].	48
Obrázek 38: Schéma zapojení displeje [31].	48
Obrázek 39: Blokové schéma převodníku Pt100 [31].	49
Obrázek 40: Schéma desky pro ovládání elektrického výkonu [31].	50
Obrázek 41: Schéma pomocných desek [31].	50
Obrázek 42: Konstrukce převodníkové jednotky [31].	51
Obrázek 43: Diagram celého programu [31].	52
Obrázek 44: Diagram hlavního programu [31].	53
Obrázek 45: Popis komponent převodníkové jednotky [31].	56
Obrázek 46: Ovládací tlačítka a diody [31].	57
Obrázek 47: Zobrazení displeje po startu a při chybě [31].	57
Obrázek 48: Zobrazení displeje při řízení a měření [31].	58
Obrázek 49: Zobrazení rozložení menu [31].	58
Obrázek 50: Ruční nastavení hodnoty PWM [31].	59
Obrázek 51: Kalibrace jednotlivých ADC kanálů [31].	59
Obrázek 52: Kalibrace jednotlivých DAC kanálů [31].	60
Obrázek 53: Nastavení maximální délky periody [31].	60
Obrázek 54: Nastavení RS-232 [31].	60
Obrázek 55: Sériová komunikace Matlab/SIMULINK [31].	62
Obrázek 56: Průběh měření stávající řešení [31].	63
Obrázek 57: Průběh měření WControl [31].	64
Obrázek 58: Průběh měření Matlab/SIMULINK [31].	65

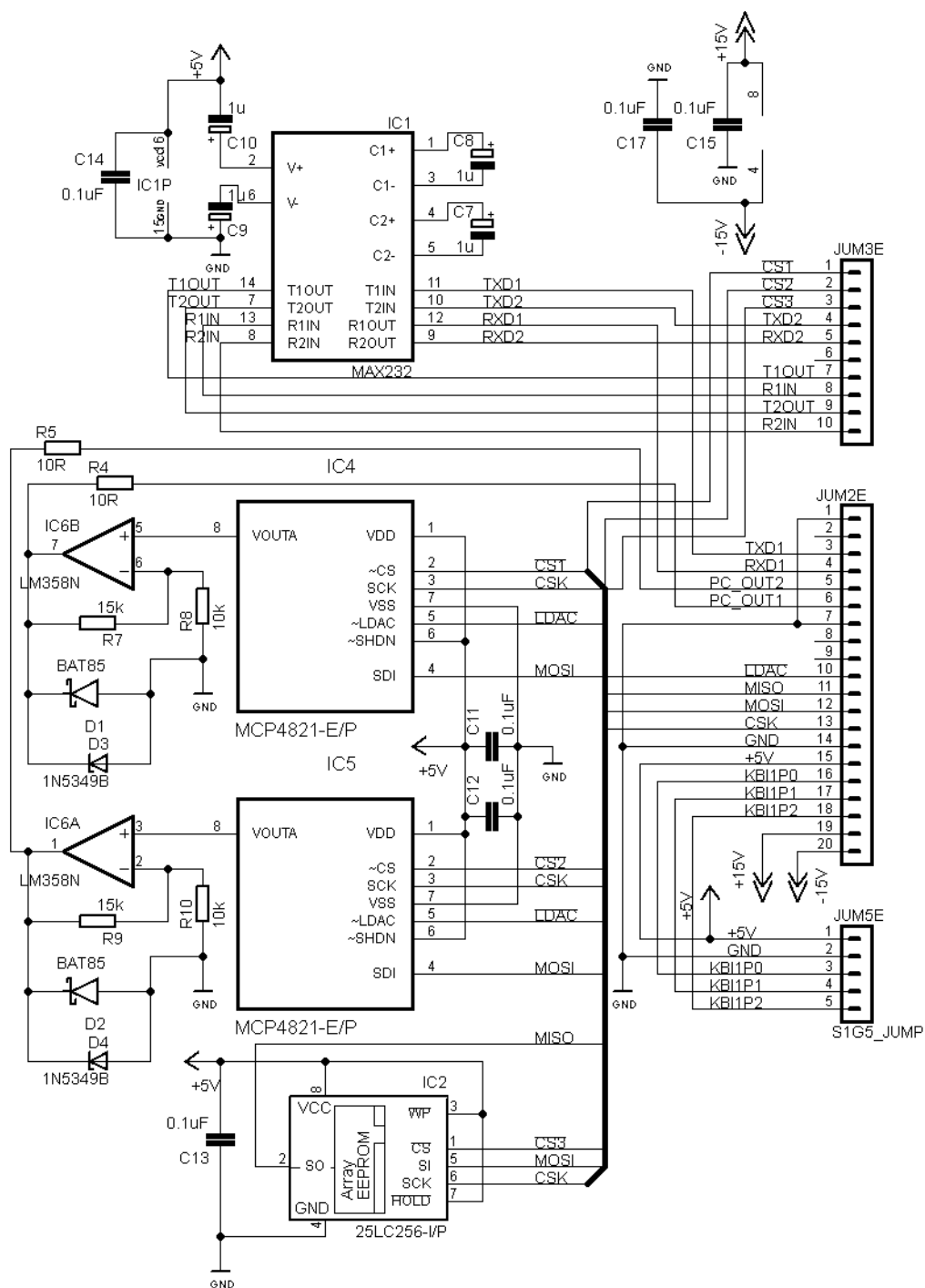
SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Třídy tolerancí Pt100 [27].	14
Tabulka 2: Třídy tolerancí Ni1000 [27].	16
Tabulka 3: Typy termoelektrických článků [26].	30
Tabulka 4: Popis komponent a konektorů [31].	55

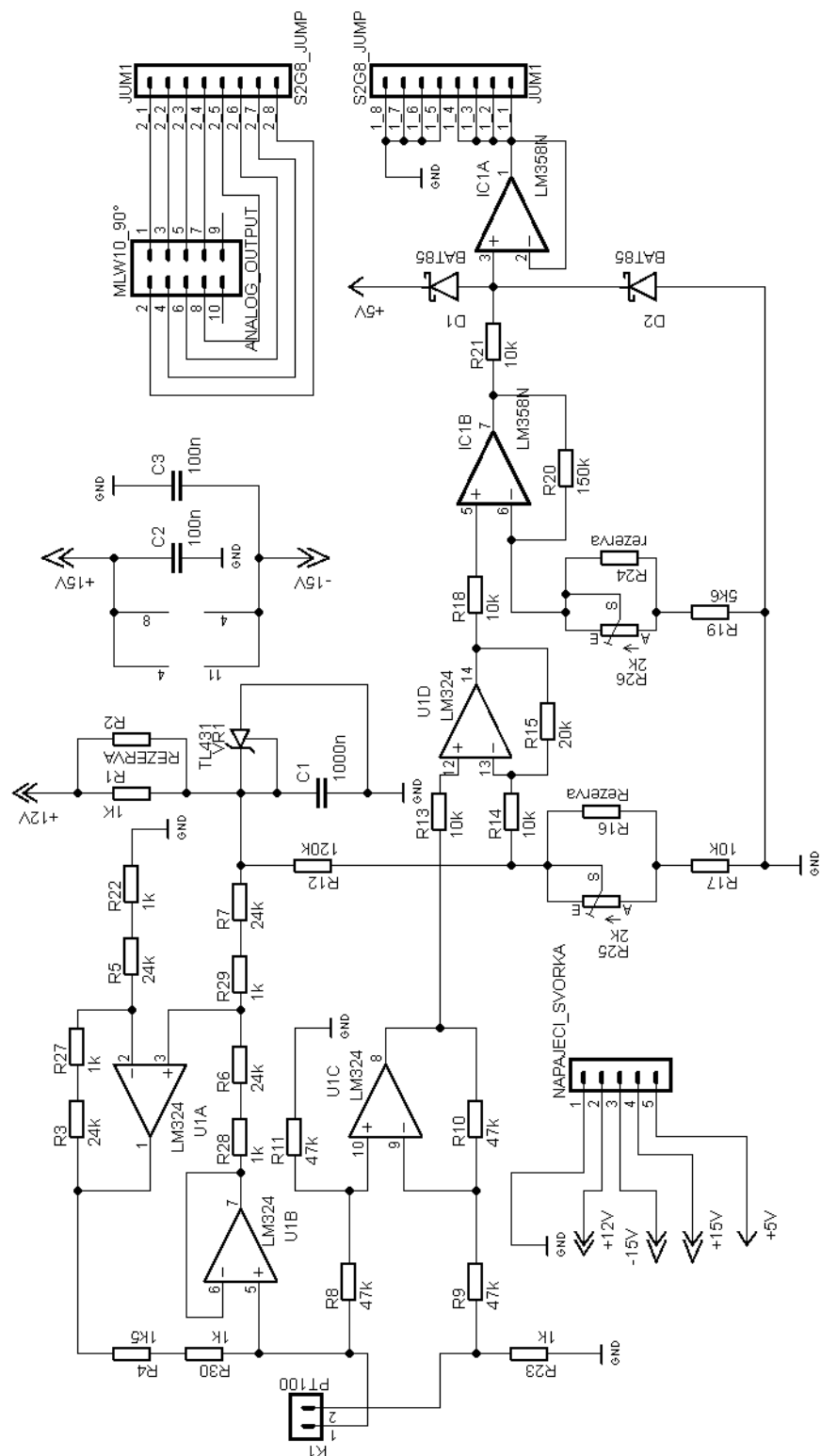
SEZNAM PŘÍLOH

- P I Schéma zapojení zdroje napájení
- P II Schéma zapojení horní desky
- P III Schéma zapojení spodní desky
- P IV Schéma zapojení převodníku Pt100
- P V Schéma zapojení konektorů
- P VI Motiv plošného spoje a osazovací plán zdroje
- P VII Motiv plošného spoje a osazovací plán horní řídicí desky
- P VIII Motiv plošného spoje a osazovací plán spodní řídicí desky
- P IX Motiv plošného spoje a osazovací plán převodníkové desky Pt100
- P X Motiv plošného spoje a osazovací plán desky pro ovládaní elektrického výkonu
- P XI Motiv plošného spoje a osazovací plán desky displeje
- P XII Motiv plošného spoje a osazovací plán desky tlačítek
- P XIII Motiv plošného spoje a osazovací plán ostatních pomocných desek
- P XIV Seznam součástek

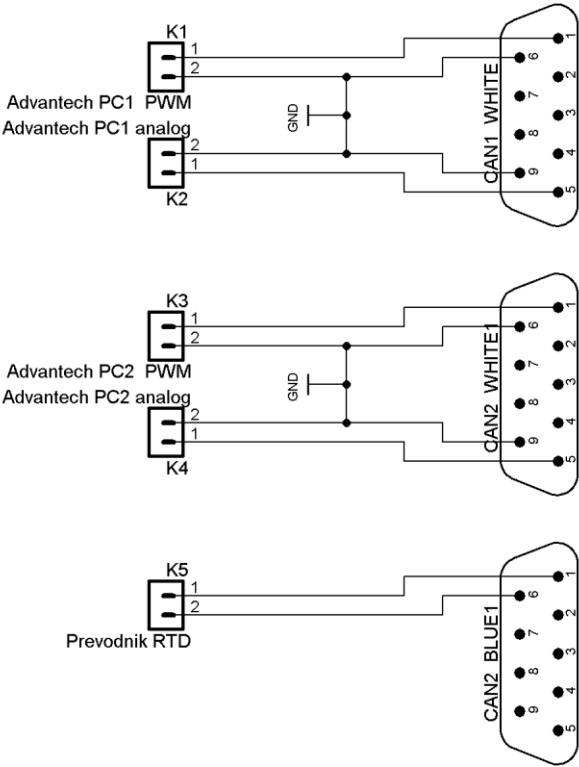
PŘÍLOHA P III: SCHÉMA ZAPOJENÍ SPODNÍ DESKY



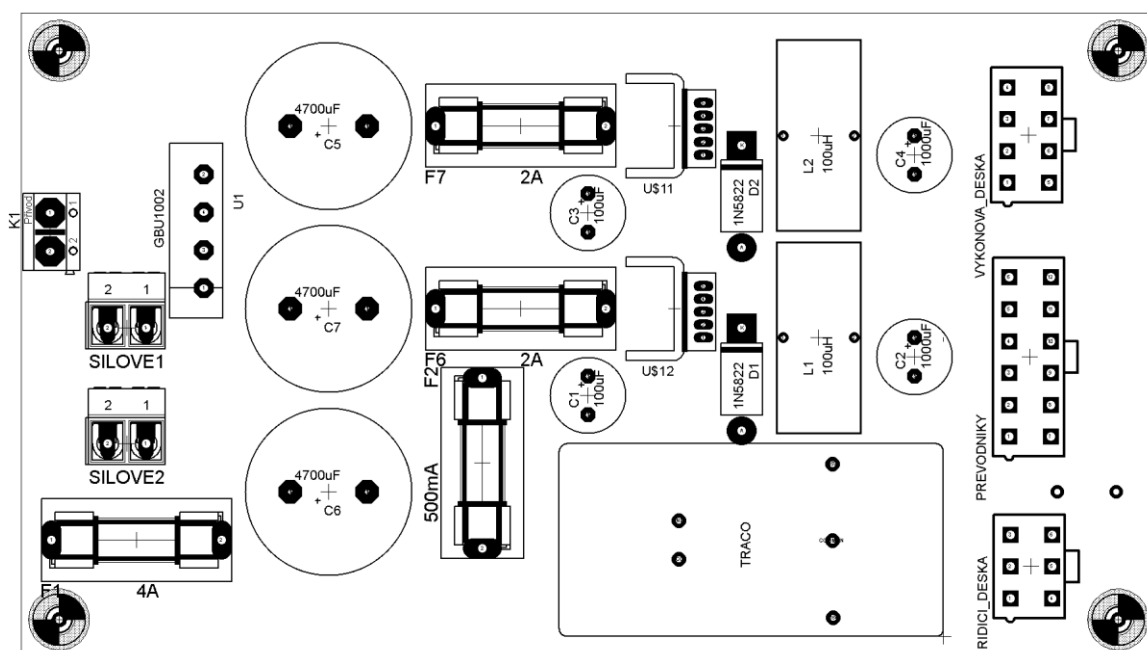
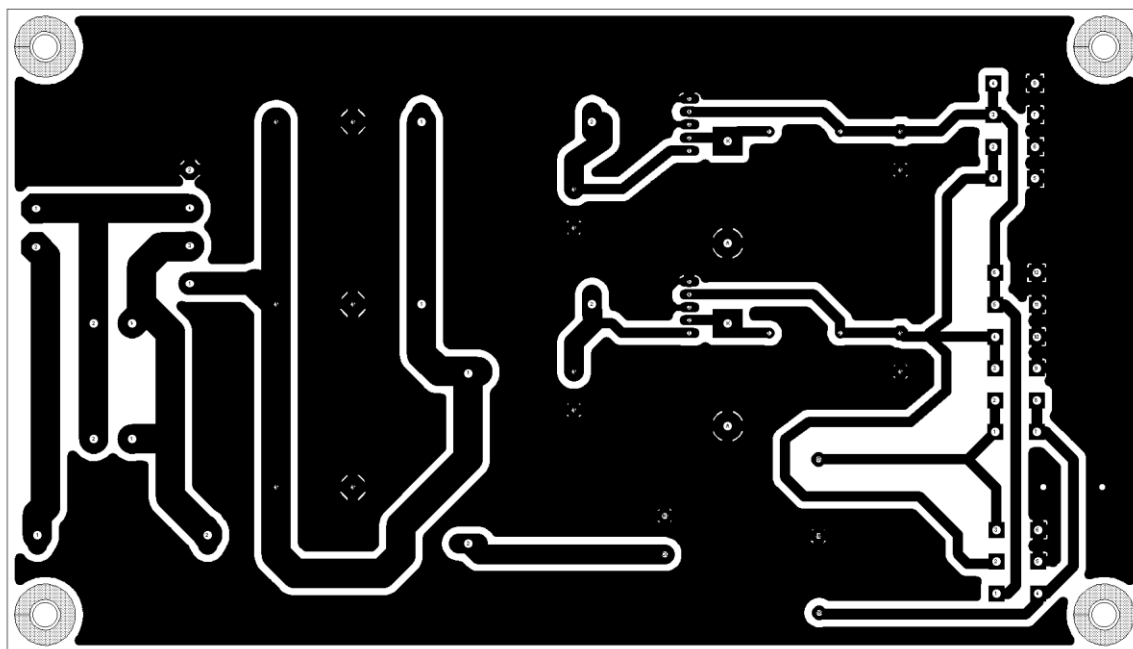
PŘÍLOHA P IV: SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘEVODNÍKU Pt100



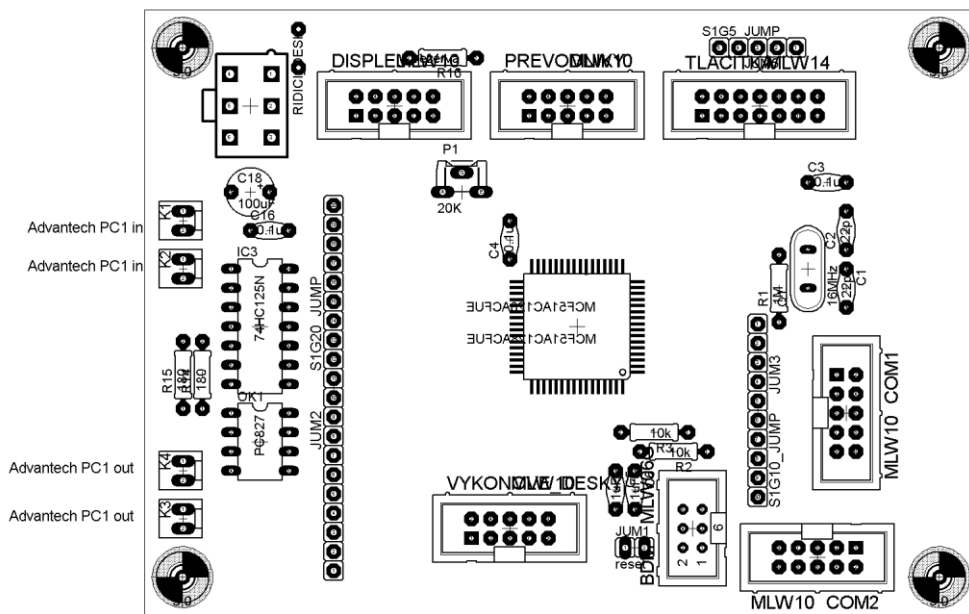
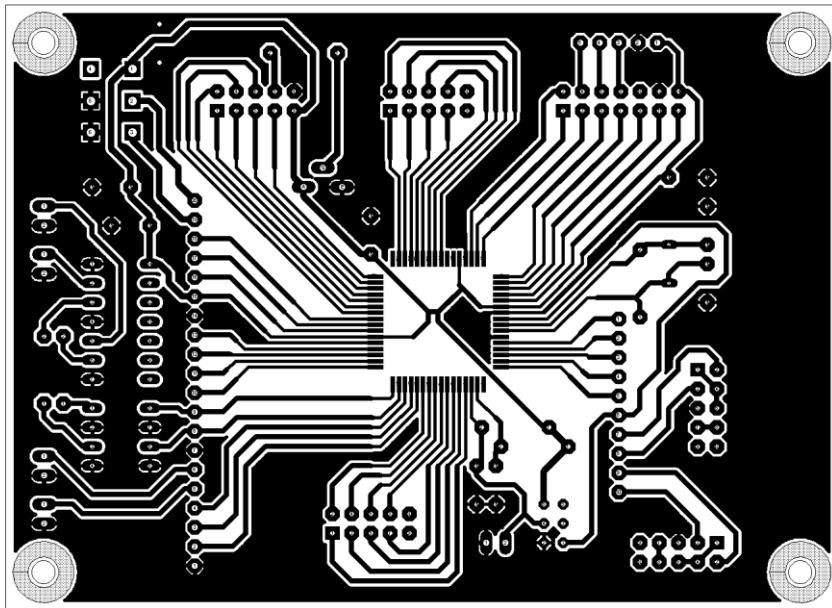
P V SCHÉMA ZAPOJENÍ KONEKTORŮ



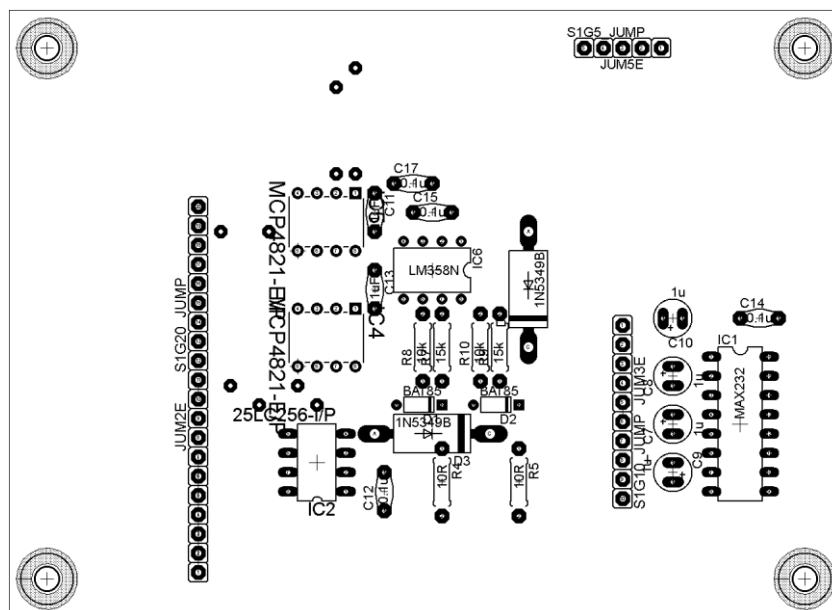
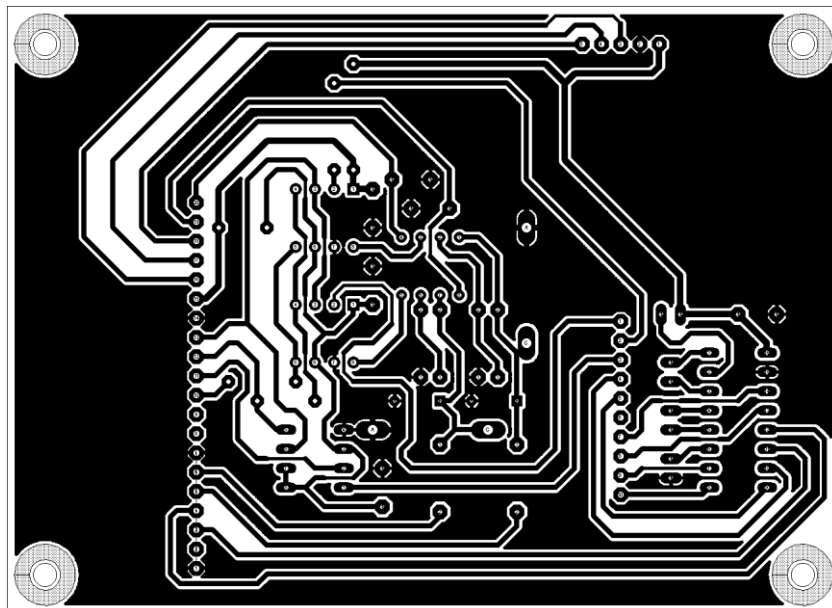
P VI MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE A OSAZOVACÍ PLÁN ZDROJE



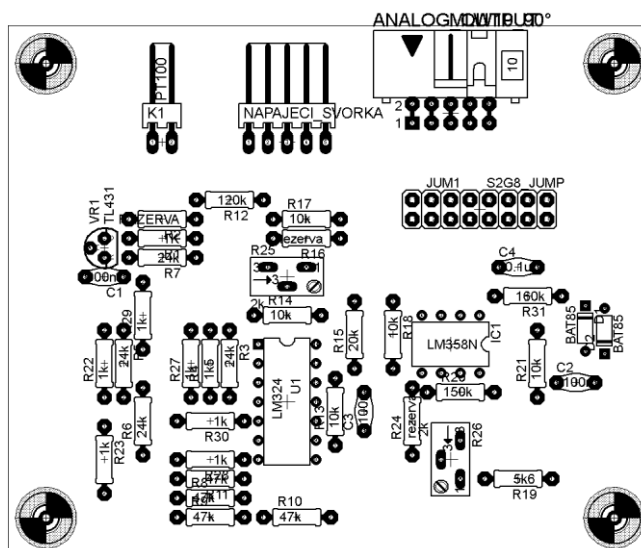
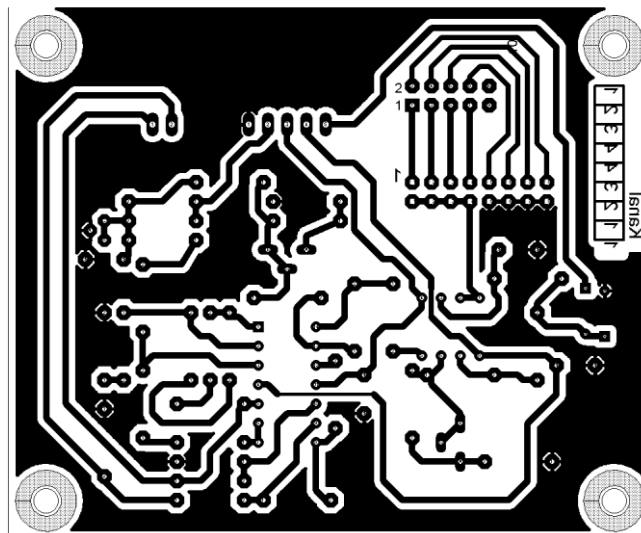
ŘÍDICÍ DESKY



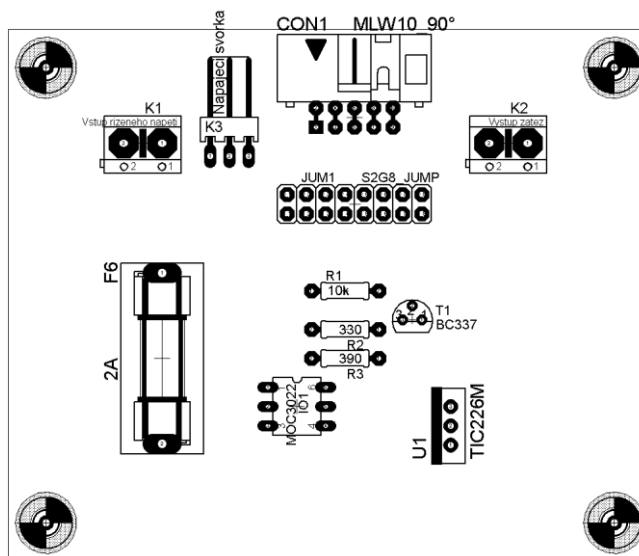
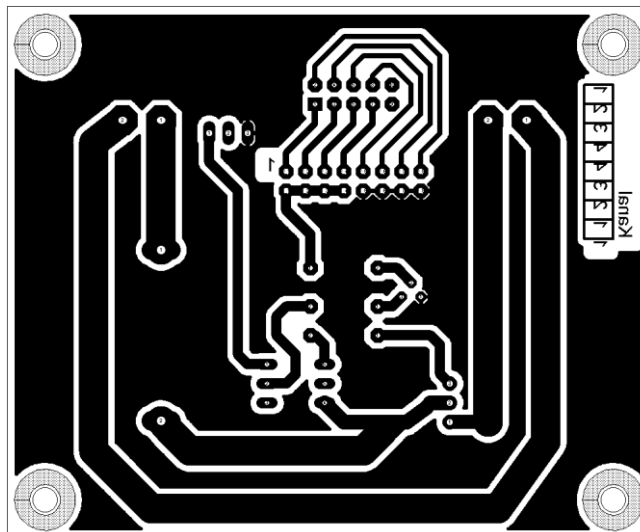
P VIII MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE A OSAZOVACÍ PLÁN
SPODNÍ ŘÍDICÍ DESKY



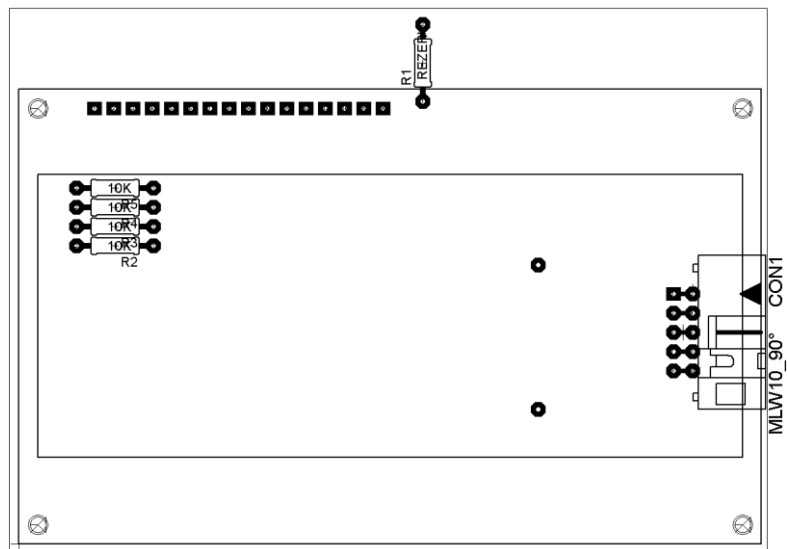
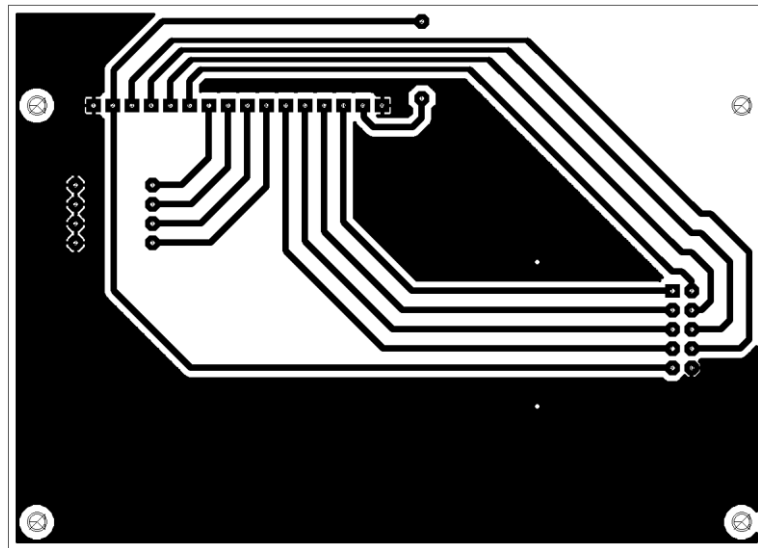
PIX MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE A OSAZOVACÍ PLÁN PŘEVODNÍKOVÉ DESKY PT100



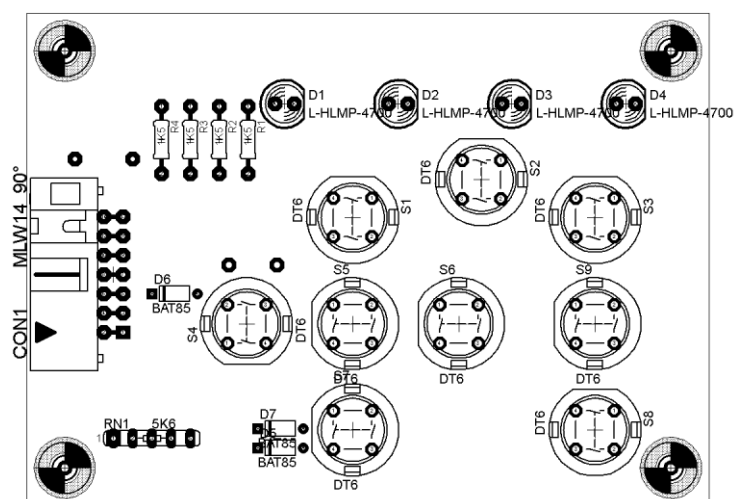
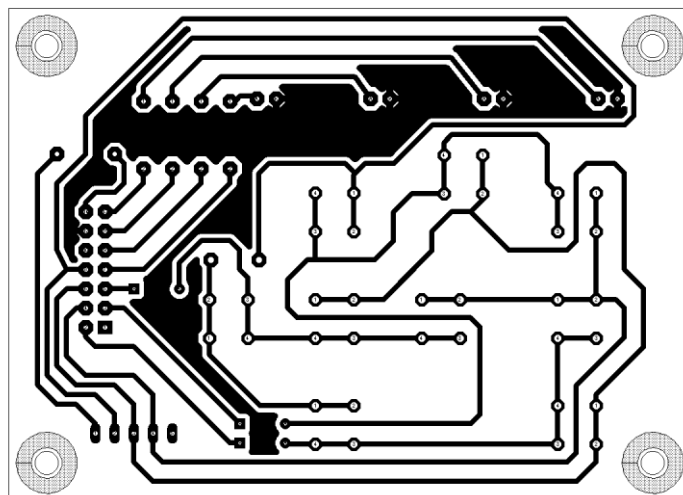
P X MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE A OSAZOVACÍ PLÁN DESKY PRO OVLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉHO VÝKONU



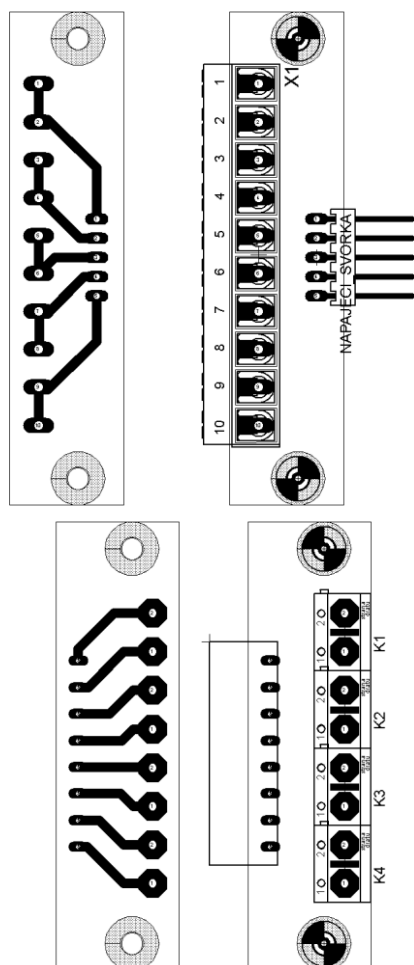
P XI MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE A OSAZOVACÍ PLÁN DESKY DISPLEJE



P XII MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE A OSAZOVACÍ PLÁN DESKY TLAČÍTEK



P XIII MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE A OSAZOVACÍ PLÁN OSTATNÍCH POMOCNÝCH DESEK



P XIV SEZNAM SOUČÁSTEK

Zdroj			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Svorky	ARK2500V-A-2P	821-104	3
Protikus svorky	ARK2500F-A-2P	821-102	3
Pojistkové pouzdro	SCHURTER 0031.8201	829-032	4
Kryty pouzder	SCHURTER 0853.0551	829-033	4
Kondenzátory 4700uF	CE 4700u/50V JAM-LP 22x40 RM10 BULK	123-306	3
Kondenzátory 100uF	CE 100u/100V JAM-SK 13x21 RM5 BULK	123-108	2
Kondenzátory 1000uF	CE 1000u/25V JAM-SK 13x21 RM5 BULK	123-175	2
Stepdown Convertor 12V	NATIONAL SEMICONDUCTOR - LM2576T-12 - SWITCHING REG 3A 12V, 2576, TO2205	FARNELL 9488111	1
Stepdown Convertor 5V	NATIONAL SEMICONDUCTOR - LM2576T-5.0 - SWITCHING REG 3A 5.0V, 2576, TO-220	FARNELL 9488138	1
Zdroj $\pm 15V$	TRACOPOWER - TEN 15-2423. - CONVERTER, DC/DC, 15W, +/-15V	FARNELL 4173600	1
Tlumivky	DPU100A3	611-022	2
Diody	1N5822	223-004	2
Chladiče	DO3A	620-061	2
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-28-1063 - HEADER, MINI-FIT, 6WAY	FARNELL 9732101	1
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-28-8120 - HEADER, MINI-FIT, DUAL ROW, 12WAY	FARNELL 1697115	1
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-28-1083 - HEADER, MINI-FIT, 8WAY	FARNELL 9732110	1
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-01-2125 - RECEPTACLE, MINI-FIT, DUAL ROW, 12WAY	FARNELL 1697123	1
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-01-2060 - RECEPTACLE, MINI-FIT, 6WAY, CRIMP	FARNELL 151868	1
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-01-2080 - RECEPTACLE, 8WAY, CRIMP, MINI-FIT	FARNELL 151869	1

Horní řídící deska			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-28-1063 - HEADER, MINI-FIT, 6WAY	FARNELL 9732101	1
Konektor MOLEX	MOLEX - 39-01-2060 - RECEPTACLE, MINI-FIT, 6WAY, CRIMP	FARNELL 151868	1
Kondenzátory 100nF	CK 100n/50V X7R HIT RM5,08 10% AMMO	120-094	5
Kondenzátory 8,2pF	CK 8,2p/50V NPO GYM RM5,08 +-0,25 pF	120-152	2
Kondenzátory 1uF	CE 1u/63V MAX-- 5x11 RM2,5	123-453	1
Konektor programátoru	MLW06G	800-083	1
Odpor 10k	RR W2 K010	114-076	2
Odpor 1M	MPR 1M	119-167	1
Odpor 180R	RR 180R	110-055	2
Optočlen	PC827-COS	523-055	1
Budič sběrnice	74HC125	425-030	1
Trimr	PT73YEK020	112-432	1
Konektor se zámkem	PSH02-02W	800-094	4
Protikus na kabel	XINYA PFH02-02P	800-084	4
Konektor plochy kabel	XINYA MLW10G	800-035	5
Protikus konektoru	XINYA PFL10	800-007	5
Konektor plochy kabel	XINYA MLW14G	800-046	1
Protikus na kabel	XINYA PFL14	800-008	1
Oboustranný kolík 20	S1G20 2,54mm	832-017	2
Mikrokontrolér	MCF51AC128ACFUE	FARNELL 1748992MPKG	1

Spodní řídící deska			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Budič RS-232	MAX232CPE	433-100	1
Kondenzátory 1uF	CE 1u/63V MAX-- 5x11 RM2,5	123-453	4
Kondenzátory 100nF	CK 100n/50V X7R HIT RM5,08 10% AMMO	120-094	6
Schottky diody	BAT85	223-009	2
Odpor 10k	MPR 10K	119-115	2
Odpor 15k	MPR 15K	119-234	2
Odpor 10R	RR 10R	110-025	2
Zenerova dioda	1N5349B	222-131	2
Paměť EEPROM	MICROCHIP - 25LC256-I/P - IC, EEPROM SERIAL 256KB, PDIP8	FARNELL 1331398	1
DA převodník	MICROCHIP - MCP4821-E/P - 12BIT DAC, SPI, VREF,	FARNELL 1439411	2

	SINGLE, PDIP8		
Operační zesilovač	LM358	310-014	1
Dutinková lišta	XINYA SIL20PZ	824-014	2

Deska displeje			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Konektor plochy kabel	XINYA MLW14A	800-045	1
Protikus konektoru	XINYA PFL14	800-008	1
Odpor 10k	RR W2 K010	114-076	4
Displej	EVERBOUQUET - MC2004E-SYL - LCD MODULE, ALPHANUMERIC, 4X20, STN	FARNELL 1220439	1
Oboustranný kolík 20	S1G20 2,54mm	832-017	1
Dutinková lišta	XINYA SIL20PZ	824-014	1

Deska tlačítek			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Odporové pole	RR 4X5K6 2%	111-232	1
LED diody	L-53LGD	511-237	4
Schottky diody	BAT85	223-009	4
Odpor 1k6	RR 1K6	110-078	4
Tlačítka žluté	P-DT6GE	630-041	2
Tlačítka černé	P-DT6SW	630-048	4
Konektor plochý kabel	XINYA MLW10A	800-005	1

Převodníková deska			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Konektor plochy kabel	XINYA MLW10A	800-005	1
Protikus konektoru	XINYA PFL10	800-007	1
Konektor se zámkem	XINIA PSH02-02W	800-094	1
Protikus na kabel	XINYA PFH02-02P	800-084	1
Konektor se zámkem	XINYA PSH02-05WG	800-172	1
Protikus na kabel	XINYA PFH02-05P	800-087	1
Schottky diody	BAT85	223-009	2
Trimr	64 Y 2K	112-133	2
Odpor 1k	MPR 1K	119-116	7
Odpor 24k	MPR 24K	119-268	4
Odpor 1k5	MPR 1K5	119-306	1
Odpor 47k	MPR 47K	119-238	4
Odpor 10k	MPR 10K	119-115	5
Odpor 20k	MPR 20K	119-118	1
Odpor 150k	MPR 150K	119-332	1
Odpor 5k6	MPR 5K6	119-166	1
Odpor 120k	MPR 120K	119-164	1
Odpor 160k	MRP160K	119-326	1

Kondenzátor 100nF	CK 100n/50V X7R HIT RM5,08 10% AMMO	120-094	2
Kondenzátor 1000nF tantal	CT 1u/50V YHC-CA42 RM2,54 20%	122-052	1
Operační zesilovač	LM358	310-014	1
Operační zesilovač	LM324	310-012	1
Napěťová reference	TL431	330-042	1
Oboustranný kolík 10	XINYA S2G20 2,54mm	832-023	1

Ovládací deska			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Konektor plochy kabel	XINYA MLW10A	800-005	1
Protikus konektoru	XINYA PFL10	800-007	1
Svorky	ARK2500R-A-2P	821-106	2
Protikus svorky	ARK2500F-A-2P	821-102	2
Odpory 10K	RR W2 K010	114-076	1
Odpory 330R	RR W2 E330	114-058	1
Odpory 390R	RR W2 E390	114-059	1
Triak	TIC226M	225-025	1
Optotriak	MOC3022	002-272	1
Pojistkové pouzdro	SCHURTER 0031.8201	829-032	1
Kryty pouzder	SCHURTER 0853.0551	829-033	1
Konektor se zámkem	XINYA PSH02-03PG	800-164	1
Protikus na kabel	XINYA PFH02-03P	800-085	1
Chladič	DO3A	620-061	2
Tranzistor	BC337-25	210-018	1
Oboustranný kolík 10	XINYA S2G20 2,54mm	832-023	1

Ostatní materiál			
Součástka	Název	Kód GME	Počet
Canon konektory	XINYA CAN 9 Z G	801-142	6
Canon konektory samořezné	XINYA CAN 9 Z S	801-043	2
Svorky	PTR STLZ950/10G-5.08-H- GREEN	821-117	1
Protikus svorky	PTR AKZ950/10-5.08-GREEN	821-116	1
Svorky	PTR STL1550/8G-3.5-H-GREEN	821-301	1
Protikus svorky	PTR AK1550/8-3.5-GREEN	821-302	1
Svorky	ARK128V-A-2P	821-097	4
Power tlačítko	ZIPPY RF-12S-DBB1-1-Z	631-392	1
Konektor se zámkem	XINYA PSH02-05WG	800-172	1
Protikus na kabel	XINYA PFH02-05P	800-087	1