České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Bakalářská práce

Laboratorní model pro výzkum prostorově distribuovaného řízení

Václav Klemš

Vedoucí práce: Ing. Zdeňek Hurák, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika a informatika, strukturovaný bakalářský

Obor: Kybernetika a měření

srpen 2008

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Václav Klemš**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Laboratorní model pro výzkum prostorově distribuovaného řízení**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je postavit jednoduchý laboratorní model pro testování nových metod řízení prostorově distribuovaných systémů. Konkrétně, cílem bude osadit asi 2m tenkou hliníkovou tyč rovnoměrně řadou (několika desítek) topných tělísek i snímačů teploty a navrhnout elektronické obvody realizující prostorově distribuovaný regulátor (každý dá buňka takového distribuovaného regulátoru čte teplotu z jednoho snímače a reguluje spínání jednoho tranzistoru, k tomu navíc komunikuje se sousedními buňkami.). Jednotlivé dílčí kroky jsou

1. Modelování, simulace, analýza
2. Stavba laboratorního modelu
3. Experimenty s laboratorním modelem, návrh jednoduchých regulátorů

Seznam odborné literatury:

1.David L. Powers. Boundary Value Problems: and Partial Di erential Equations. ff Academic Press, 5 edition, October 2005.

2.G. Stein and D. Gorinevsky, "Design of surface shape control for large twodimensional arrays," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol. 13, pp. 422-433, 2005.

3.B. Bamieh, F. Paganini, and M. Dahleh, "Distributed control of spatially invariant systems," Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 47, pp. 1091-1107, 2002.

4.R. D'Andrea and G. Dullerud, "Distributed control design for spatially interconnected systems," Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 48, pp. 1478-1495, 2003

Vedoucí: Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
L.S.

n.z. M. Dwulit
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Poděkování

Děkuji především vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňkovi Hurákovi, Ph.D. za vstřícné, trpělivé a ochotné vedení.
A dvěma nejdražším osobám v mém životě, mojí sestře Marušce a přítelkyni Zeynep za jejich toleranci, trpělivost a neustálé povzbuzování.

Prohlášení

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

V Praze dne 15.8.2008 Václav Klemš

Abstract

The purpose of the work is to build a simple laboratory model for testing of new controlling methods for spatially distributed systems. In detail, the goals are to fix a thin 2 m long aluminium rod with heating elements and temperature readers and to design electronics of regulator. (Every cell of the regulator measures temperature from one sensor, controls switching of one tranzistor and communicates with adjoining cells.)

Abstrakt

Cílem práce je postavit jednoduchý laboratorní model pro testování nových metod řízení prostorově distribuovaných systémů. Konkrétně, cílem bude osadit asi 2 m tenkou hliníkovou tyč rovnoměrně řadou (několika desítek) topných tělísek i snímačů teploty a navrhnout elektronické obvody realizující prostorově distribuovaný regulátor (každá buňka takového distribuovaného regulátoru čte teplotu z jednoho snímače a reguluje spínání jednoho tranzistoru, k tomu navíc komunikuje se sousedními buňkami.)

Obsah

Seznam obrázků **xi**

Seznam tabulek **xiii**

1 Úvod **1**
1.1 Systém s rozprostřenými parametry 1
1.1.1 Charakteristika 1
1.1.2 Příklady skutečných systémů s rozprostřenými parametry 1
1.1.3 Princip regulace systémů s rozprostřenými parametry 2
1.2 Jakých systémů se týká tento projekt 3
1.3 Cíl práce 3
1.4 Stručný popis systému, kterým se práce zabývá 3
1.4.1 Stručný popis zařízení 3
1.4.2 Modelování vedení tepla v tenké tyči 4
1.4.2.1 Obecná rovnice vedení tepla 4
1.4.2.2 Numerické řešení rovnice vedení tepla v MATLABu . . . 4
1.5 Popis řešení zadaného úkolu 5
1.6 Struktura dokumentu 6

2 Popis zařízení **7**

3 Hardwarová část **9**
3.1 Tyčka 9
3.2 Přichycení tranzistorů a senzorů k tyči 9
3.3 Uchycení tyče 10
3.4 Napájecí zdroj 11
3.5 Ohřívání tyče 11
3.6 Senzor teploty 12
3.7 Mikrokontroler 13
3.8 Desky plošných spojů 13
3.8.1 Deska realizující řídicí body 14
3.8.2 Pomocná deska 15

4 Softwarová část **17**
4.1 Měření teploty pomocí senzoru STM 160-30 17
4.1.1 Měření střídy PWM signálu 17
4.1.2 Přepočet střídy na teplotu a další zpracování 18
4.2 Komunikace mezi mikrokontrolery 19
4.3 Programování pro MATLAB 19

5 Měření na skutečném systému **21**

6 Závěr **23**
6.1 Stav projektu v době odevzdání této zprávy 23
6.2 Možné směry další práce na projektu 23

7 Literatura **25**

A Seznam použitých zkratek **27**

B Schéma hlavní desky s mikrokontrolerem **29**

C Schéma pomocné desky **31**

D Obsah přiloženého CD **33**

Seznam obrázků

1.1 Ukázka řešení rovnice pro vedení tepla v tepelně tenké tyči pomocí MATLABu 5

2.1 Schéma zařízení 7

3.1 Hliníková tyč polepená tranzistory a senzory 10
3.2 Náčrtek stojanu pro uchycení tyče. 10
3.3 Teplotní stabilizace výkonu tranzistoru 12

5.1 Teplotní průběh na tyči během ohřívání jedním tranzistorem 21
5.2 Fotografie pracoviště při identifikačním testu 22

B.1 Schéma desky s mikrokontrolerem 29

C.1 Schéma desky s pomocnými obvody 31

Seznam tabulek

3.1 Použité piny mikrokontroleru 13
3.2 Připojení výkonového tranzistoru a senzoru k desce 15
3.3 Připojení ISP programátoru 15
3.4 Připojení ISP programátoru k pomocné desce 15

5.1 Popisky k obrázku s pracovištěm 22

1 Úvod

Tato kapitola stručně charakterizuje systémy s rozprostřenými parametry a předkládá několik jejich reálných příkladů. Dále představuje cíl projektu, kterým se tento dokument zabývá, rozděluje jej do několika částí a ukazuje jeho význam pro výzkum řízení systémů s rozprostřenými parametry na Katedře řídicí techniky Českého vysokého učení technického v Praze.

1.1 Systém s rozprostřenými parametry

1.1.1 Charakteristika

Moderní výzvou v oblasti řídící techniky je řízení systémů s rozprostřenými parametry, též nazývaných jako systémy s distribuovanými parametry. Takový systém je složen z pole identických subsystémů řízených regulátory s akčními členy. Subsystém však neovlivňuje svými akčními členy pouze své nejbližší okolí, ale zasahuje svým působením i do sousedních subsystémů. Efektivní řízení by tedy mělo tento přesah působení do sousedních subsystémů zohledňovat.

Existuje několik možností, jak systém tohoto typu řídit. Centralizovaný způsob předpokládá, že od každého subsystému jsou vedeny kabely s řídícími a měřícími informacemi do jedné centrální řídicí jednotky (regulátoru). Toto řešení s sebou tedy nese velké nároky na výkonnost, spolehlivost, a tedy i cenu centrálního regulátoru. Navíc může být vzhledem k váze a počtu potřebných vodičů či rušení takové řešení nákladné nebo nereálné.

Často je tedy upřednostňováno, aby každý subsystém takovéhoto systému byl řízen samostatně malým, levným a jednoduchým regulátorem umístěným v samotném subsystému nebo v jeho blízkosti. Při řízení pak spolu sousední regulátory komunikují a předávají si zprávy o stavu regulované veličiny.

Protože regulátory činnost akčního členu (aktuátoru) řídí v závislosti na více vstupech, je možno systémy s rozprostřenými parametry zařadit mezi MISO systémy.

1.1.2 Příklady skutečných systémů s rozprostřenými parametry

Existuje celá řada systémů, kde se dá využít teorie řízení systémů s rozprostřenými parametry. Některé z nich již byly realizovány, jiné jsou ve stádiu přípravy. Lze očekávat, že jejich počet a význam v budoucnu bude narůstat.

V publikaci [3] jsou vyjmenovány oblasti, kde lze tento způsob řízení uplatnit.

Historicky první použití řízení s rozprostřenými parametry bylo uplatněno v papírenství. Při výrobě je široký pruh papíru válcován ve své šířce několika užšími válci. Po průchodu válcovací stolicí je potom měřena tloušťka papíru po celé šířce řadou senzorů a upravována sevřenost jednotlivých válců.

Později bylo toto řízení použito pro kontrolu teploty při výrobě křemíkových desek pro elektroniku. Dotace polovodiče závisí na teplotě desky a je důležité, aby byla po celé

ploše stejná. Teplota je tedy po celé ploše desky snímána polem senzorů a regulována výkonnými infračervenými lampami.

V poslední době je největším impulsem k výzkumu řízení pro systémy s rozprostřenými parametry slibný vývoj MEMS technologií. Na jedné malé ploše může být vyrobeno velké množství malých subsystémů, které jsou spolu spojeny, takže mají informace o okolních subsystémech. To je samozřejmě příležitost pro řízení systému s rozprostřenými parametry.

Dalším zajímavou oblastí uplatnění těchto systémů je například stavba velkých zrcadel pro pozorování vesmíru. V současné době neexistuje technologie umožňující výrobu dokonale zakřivených zrcadel s velkými rozměry. Proto je potřeba složit zrcadlo z mnoha malých dílů a ty společně poskládat do požadovaného tvaru. Pro udržení zrcadla v požadovaném zakřivení je potom potřeba použít pole aktuátorů a účinný princip řízení.

Možnosti řízení systémů s rozprostřenými parametry mohou být dále použity například v zemědělství při řízení zavlažovacích systémů nebo při řízení rozložení tepla v kovových konstrukcích. Zajímavá je i otázka použití těchto principů při řízení formací vesmírných lodí.

1.1.3 Princip regulace systémů s rozprostřenými parametry

K návrhu regulátorů pro systémy s rozprostřenými parametry lze přistupovat těmito třemi způsoby:

- Centralizovaný regulátor
- Decentralizovaný regulátor (nezohledňuje vliv okolních subsystémů)
- Regulátor pro systémy s rozprostřenými parametry

Rovnici regulátoru pro systémy s rozprostřenými parametry je možno si zjednodušeně představit jako polynom (1.1). $u(x)$ je zde velikost akčního zásahu regulátoru, e je odchylka od reference, k je parametr regulátoru, t je čas a x relativní vzdálenost subsystému. Tato rovnice a konstanty k jsou pro všechny regulátory v systému stejné.

$$\begin{aligned} u(x(0)) &= e(x(0),t(0)) * k(x(0),t(0)) + e(x(0),t(-1)) * k(x(0),t(-1)) + \cdots \\ &+ e(x(1),t(0)) * k(x(1),t(0)) + e(x(1),t(-1)) * k(x(1),t(-1)) + \cdots \\ &+ e(x(-1),t(0)) * k(x(-1),t(0)) + e(x(-1),t(-1)) * k(x(-1),t(-1)) + \cdots \end{aligned} \tag{1.1}$$

První řádek rovnice zahrnuje do odezvy regulátoru současný stav subsystému, který je regulován, a stavy předchozí. Další řádky polynomu přidávají regulátoru možnost reagovat na stavy okolních subsystémů. Decentralizované regulátory neberou v potaz okolní subsystémy, takže by k jejich popisu stačil pouze první řádek polynomu.

1.2 Jakých systémů se týká tento projekt

Tento projekt se zabývá pouze určitou podmnožinou systémů s rozprostřenými parametry. Tuto podmnožinu vymezují následující tři požadavky:

1. **Systém je prostorově homogenní (tj. invariantní vzhledem k posunutí).** Ať je tedy akční zásah proveden v jakémkoliv místě systému, odezva bude vždy stejná. To implikuje, že systém by nesměl mít žádné okraje. To bohužel není možné, protože každý reálný systém je prostorově omezen. V praxi je proto nutno zkoumat i vliv okrajových podmínek.

2. **Systém je vybaven rovnoměrným a relativně hustým (rozsáhlým) polem (sítí, maticí) akčních členů a senzorů.** Donedávna nebyla žádná motivace se těmito systémy zabývat. To se změnilo s příchodem nových MEMS technologií. Pomocí nich lze vyrobit pole mnoha akčních členů (například 32 x 32), což už představuje pro centralizované řízení problém.

3. **Odezva systému je lokalizovaná.** Tedy akční člen neovlivní celý systém, ale změna je měřitelná pouze v několika okolních subsystémech.

1.3 Cíl práce

Přestože v praxi je možností uplatnění pro řízení systému s distribuovanými parametry celá řada, nalézt vhodný laboratorní model takového systému pro testování teoretických závěrů při výzkumu je obtížné. Tento projekt si tedy vzal za cíl připravit vhodný laboratorní model tohoto typu systému. Model bude použit k výzkumné práci v této oblasti, která je prováděna na Katedře řídicí techniky ČVUT.

Zadaní této práce bylo brzy po jejím schválení rozděleno mezi dva studenty. Analýzou, modelováním a návrhem regulátorů (první a třetí část zadání) se ve své diplomové práci [3] zabýval Chris Rapson. Tato práce se stala i jakýmsi shrnutím doposud zkoumaných přístupů a výsledků. Protože tyto dvě práce spolu blízce souvisejí, v této zprávě je na tuto práci často odkazováno.

Tento díl práce je zaměřen na samotnou stavbu zařízení a řešení problémů s tím spojených, čemuž odpovídá druhý bod ze zadání.

1.4 Stručný popis systému, kterým se práce zabývá

1.4.1 Stručný popis zařízení

Jako vhodný model systému pro laboratorní účely byl vybrán systém skládající se z kovové tyče, na níž jsou uchycena topná tělíska se senzory. Pokud jedno tělísko začne topit, teplo se začne šířit tyčkou a ovlivní i teplotu u sousedních tělísek.

Pro řízení jednotlivých bodů (subsystémů) byly použity jednoduché mikrokontrolery, které jsou spojeny do řetězce a předávají si mezi sebou informace o teplotě v ostatních bodech.

Řetězec mikrokontrolerů je na jednom konci připojen k počítači s programem MATLAB, který jednak slouží k monitorování průběhu teploty na tyči a jednak také může realizovat centrální regulátor. Výsledky řízení centrálního regulátoru mohou sloužit jako reference ke srovnání s decentralizovaným způsobem řízení.

1.4.2 Modelování vedení tepla v tenké tyči

Modelováním vedení tepla v tenké kovové tyči pro potřeby tohoto projektu se zabývají publikace [3] a [4].

Obecně existují dva přístupy, jak modelovat šíření tepla tyčí:

Zjednodušení tyče do jednoho rozměru, kdy se uvažuje pouze dominantní směr vedení tepla podél tyče. Tato aproximace se nazývá *tepelně tenká tyč*, jejíž vlastností je konstantní teplota v celém průžezu. Tento postup vede k řešení parciální diferenciální rovnici, obvykle řešené numericky.

Ve trojrozměrném prostředí se k modelování rozložení tepla používá metoda FEM (Finite Element Modelling). K tomuto typu numerického modelování lze například použít program FEMLAB.

1.4.2.1 Obecná rovnice vedení tepla

Rovnice (1.2) je výchozím bodem při modelování vedení tepla v tepelně tenké tyči. $T(x,t)$ je teplota, funkce $g(x,t)$ $[\frac{W}{m^3}]$ pak zastupuje teplo vyměněné s okolím. Konstanty prostředí jsou hustota ρ $[\frac{kg}{m^3}]$, tepelná kapacita c_p $[\frac{J}{K \cdot g}]$ a součinitel tepelné vodivosti κ $[\frac{W}{m \cdot K}]$, který je pro homogenní prostředí konstantní.

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial^2 x} + \frac{1}{\kappa} g(x,t) = \frac{\rho c_p}{\kappa} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \tag{1.2}$$

Pro potřeby modelování v této práci stačí uvažovat příjem tepla topením a ztráty tepla vyzařováním do okolí. Za funkci $g(x,t)$ lze tedy dosadit rovnici (1.3), kde C je obvod tyčky $[m]$, dx je jednotkový element délky tyče $[m]$, $S_\perp$ je velikost průřezu $[m^2]$, $q_s(x,t)$ je teplo dodané ohřívačem a přepočítané na jednotkou povrchu $[\frac{J}{m^2}]$, h_c je koeficient přestupu tepla vyzařováním $[\frac{W}{m^2 K}]$ a T_{env} je teplota okolí tyče.

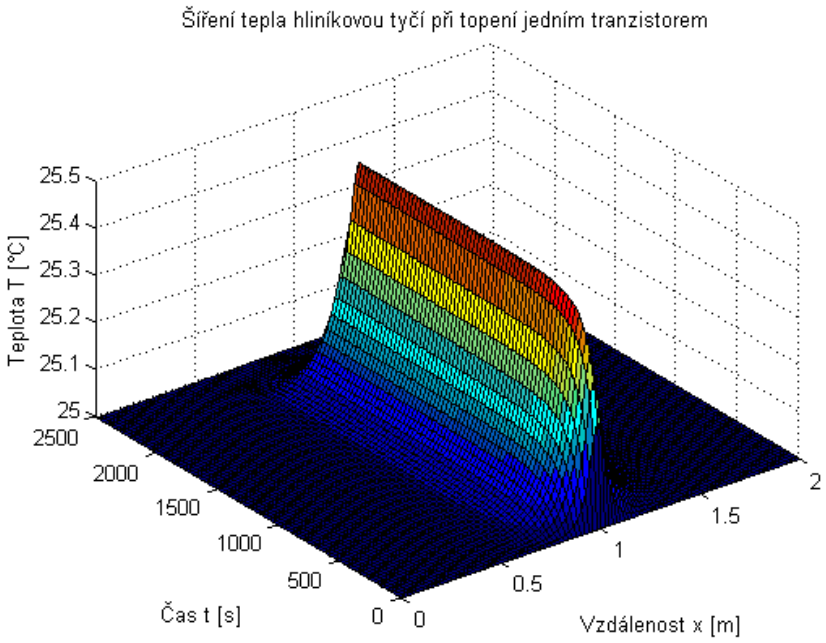
$$g(x,t) S_\perp dx = \underbrace{q_s(x,t) C dx}_{\texttt{topení}} + \underbrace{h_c (T_{env} - T(x,t)) C dx}_{\texttt{ztráty vyzařováním}} \tag{1.3}$$

1.4.2.2 Numerické řešení rovnice vedení tepla v MATLABu

Jako jednoduchá ukázka modelování byl v rámci této práce připraven spustitelný soubor pro MATLAB, který pomocí funkce `pdepe` numericky řeší rovnici (1.2) pro případ

hliníkové tyče. Při jeho přípravě bylo postupováno přesně podle návodu pro tuto funkci v programu MATLAB. Zmíněný soubor lze nalézt na přiloženém CD.

Obrázek 1.1 je výsledek simulace, kdy je tyč ohřívána jedním tranzistorem. Ve skutečném systému by tato funkce tvarově odpovídala provedené simulaci, ovšem vlivem nesprávného nastavení některých parametrů nebylo dosaženo věrnosti teplotního měřítka. Jako jednoduchá ukázka to ale v rámci této práce stačí, protože modelováním tohoto systému se zabývá ve své práci [3] Chris Rapson. Dobře popsaný postup při řešení tohoto konkrétního příkladu lze nalézt v [4].



Obrázek 1.1: Ukázka řešení rovnice pro vedení tepla v tepelně tenké tyči pomocí MATLABu

1.5 Popis řešení zadaného úkolu

Práce při stavbě modelu byla rozdělena do několika bodů:

- Výběr tyče a osazení tyče topnými tranzistory a vhodnými senzory
- Uchycení tyče
- Návrh elektroniky teplotně stabilizující výkon tranzistoru
- Návrh desky s vhodným mikrokontrolerem a ostatní elektronikou
- Návrh pomocné desky se zdrojem synchronizačního signálu a obvodem MAX232 pro komunikaci s počítačem

- Programování mikrokontroleru:
  - Odečítání teploty ze senzoru
  - Komunikace mezi mikrokontrolery a mezi mikrokontrolerem a počítačem
  - Použití funkce regulátoru (ta byla navržena v rámci práce [3])
- Program pro MATLAB
  - Komunikace s mikrokontrolery
  - Nastavování systému
  - Použití funkce centrálního regulátoru (ta byla navržena v rámci práce [3])

1.6 Struktura dokumentu

Tento dokument byl rozčleněn do následujících kapitol:

2. kapitola popisuje systém jako celek.

3. kapitola detailně popisuje jednotlivé části systému.

4. kapitola se zabývá programováním pro mikrokontrolery a MATLAB.

5. kapitola popisuje identifikační test, který mnoho napověděl o chování hotového modelu.

6. kapitola je závěrečná. Bylo v ní shrnuto čeho bylo dosaženo a co zatím dokončeno nebylo a proč. Naznačuje také, kam by měly vést kroky při dalším postupu vývoje zařízení.

2 Popis zařízení

Tato část detailněji popisuje systém jako celek, vyjmenovává jeho části a součinnost mezi nimi. Pro podrobnější popis jednotlivých částí odkazuje do kapitoly 3 a pro podrobnější popis programového řešení do kapitoly 4.

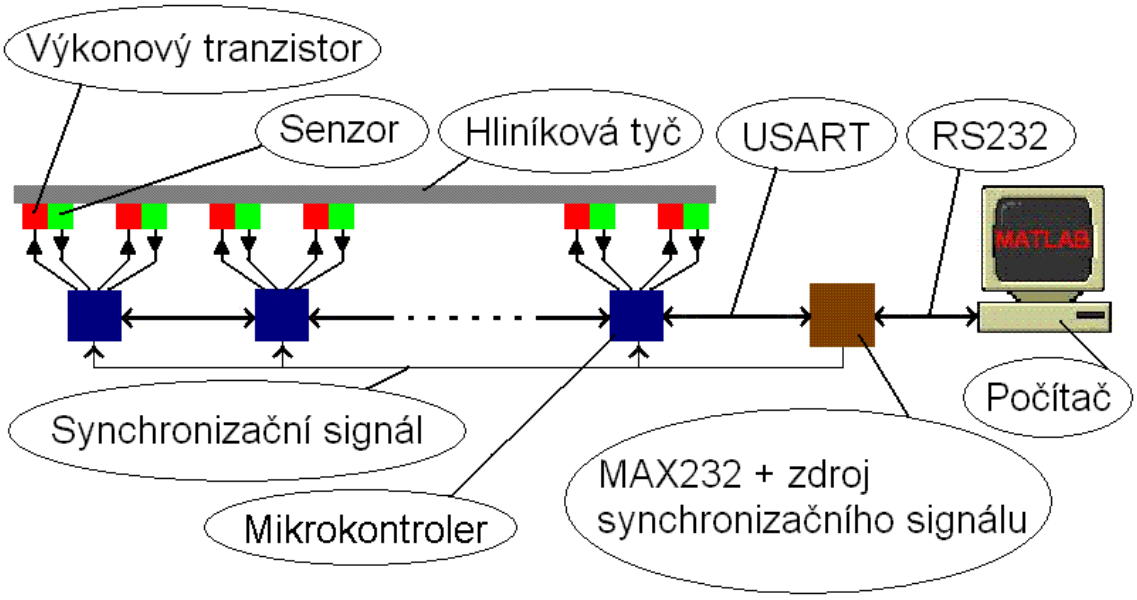
Obrázek 2.1 schématicky znázorňuje celé zařízení.

Základem celého testovacího modelu je hliníková tyčka (sekce 3.1) uchycená stojanem (sekce 3.3) ve vodorovné poloze tak, aby kolem ní mohl volně proudit vzduch. Systém byl totiž počítačově modelován za zjednodušujícího předpokladu, že tyčka je obklopena volně proudícím vzduchem.

Tato tyč je po své délce pokryta body, ve kterých je regulována teplota. Bod je tvořen výkonovým tranzistorem (sekce 3.5), senzorem (sekce 3.6) a regulátorem. Tranzistor je v páru se senzorem uchycen speciálním lepidlem (sekce 3.2) na tyč. Výkon tranzistoru je řízen PWM signálem z regulátoru. Ten je realizován mikrokontrolerem (sekce 3.7), který je umístěn společně s potřebnou elektronikou na desce plošných spojů pod tyčí (sekce 3.8.1).

Předpokládaný výkon tranzistoru je v rozmezí 10-20 W a maximální provozní teplota zařízení by neměla překračovat 110 °C.

Všechny body jsou navzájem stejné a jsou od sebe umístěny v konstantní vzdálenosti 5 cm. Tato vzdálenost byla určena na základě výsledků identifikačního testu (viz kap. 5 str. 21). Body od sebe musí být vzdáleny tak, aby se teplotní vlivy tranzistorů překrývaly, ale zároveň úplně nesplývaly.



Obrázek 2.1: Schéma zařízení

Regulační cyklus bodů bude synchronizován externím signálem. Zdroj tohoto signálu bude umístěn na zvláštní desce (sekce 3.8.2). Časové intervaly mezi cykly bude možné měnit a je plánováno, že budou trvat zhruba 1-5 s.

Každé dva sousední body mají možnost vzájemně komunikovat, takže všechny mikrokontrolery společně tvoří řetěz. Každý mikrokontroler disponuje dvěma sériovými komunikačními rozhraními USART. Sousedé na obou stranách jsou tedy připojeni vlastní komunikační linkou. Komunikace je dále rozvedena v kapitole 4.2.

Oba krajní mikrokontrolery mají jeden USART volný. Jeden mikrokontroler tento volný USART nepoužívá a druhý jej používá na připojení k počítači. Počítač je však vybaven rozhraním RS232, které se liší v napěťových úrovních. Ke konverzi je proto použit obvod MAX232, který je umístěn na pomocné desce společně se zdrojem synchronizačního signálu (sekce 3.8.2).

Pro účely této práce byl jako pracovní prostředí v počítači použit program MATLAB, viz sekce 4.3

Původní záměr projektu spočíval ve snaze, aby byl každý regulátor realizován jedním mikrokontrolerem. Přípravek by tak lépe demonstroval systém s rozprostřenými parametry, protože každý bod by byl na první pohled oddělený od ostatních. Kvůli velkému objemu práce s přípravou desek plošných spojů však bylo z tohoto záměru nakonec ustoupeno. Jeden mikrokontroler tedy bude obsluhovat více bodů. V současném návrhu je počítáno s obsluhou dvou bodů jedním mikrokontrolerem.

Práce mikrokontrolerů je následující: v reakci na externí signál každý mikrokontroler postupně odměří teplotu v každém z bodů, které obsluhuje. Následně si vymění informaci o teplotě se sousedními mikrokontrolery a pro každý z bodů, který obsluhuje vypočítá akční zásah.

Celé zařízení může fungovat ve dvou módech regulace:

Centralizovaná regulace, kdy jsou všechny body na tyči řízeny centrálně z počítače. V tomto režimu regulátory podél tyče pouze měří teplotu a posílají ji po sériové lince do počítače. Ten jim následně zašle velikost regulačního zásahu, který regulátory nastaví na svém výstupu.

Regulace systému s rozprostřenými parametry, kdy jsou body řízeny každý svým regulátorem. Tento režim řízení může také fungovat tak, že regulátory budou řídit teplotu na tyči pouze v závislosti na teplotě ve vlastním bodě. Potom se mluví pouze o řízení decetralizovaném. Počítač v tomto režimu slouží jen pro zobrazování a ukládání výsledků testu.

Počítač bude dále sloužit i jako rozhraní pro uživatele. Do mikrokontrolerů přes něj půjdou zadávat například nové parametry regulátorů nebo referenční teploty pro regulaci. V případě potřeby pak bude možno dále rozšiřovat funkce systému.

3 Hardwarová část

V této kapitole jsou detailně popsány jednotlivé části celého zařízení - jejich výběr, postup zhotovení, způsob jejich spojování, případně v jaké fázi vyhotovení byly v době odevzdání zprávy.

3.1 Tyčka

K pokusu byla zvolena hliníková tyčka o délce 1 m a průřezu 20x10 mm. Jako vhodný materiál byl zvolen hliník EN AW-1350-F. Vykazuje dobrou tepelnou vodivost (cca 230 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) a je levným, snadno dostupným materiálem. Obsah nečistot v tyčce činí asi 0,5 %. Vhodný průřez materiálu byl odvozen dle simulací popsaných v [3]. Tyčka byla zakoupena u firmy FERONA.

Základní úvahy při výběru vhodného průřezu by se daly shrnout takto: průřez by měl být dostatečně masivní, aby se jím teplo snáze šířilo. Vyhřívání příliš masivní tyče by však mohlo trvat nevhodně dlouho. Rychlost vyzařování tepla do okolí je závislá na velikosti povrchu. Nejlepším průřezem pro redukci úniku tepla je tedy kruh. Nakonec byl ale zvolen obdélníkový průřez, na jehož ploché strany lze větší plochou přichytit topné tranzistory a senzory, což je důležité pro přenos tepla.

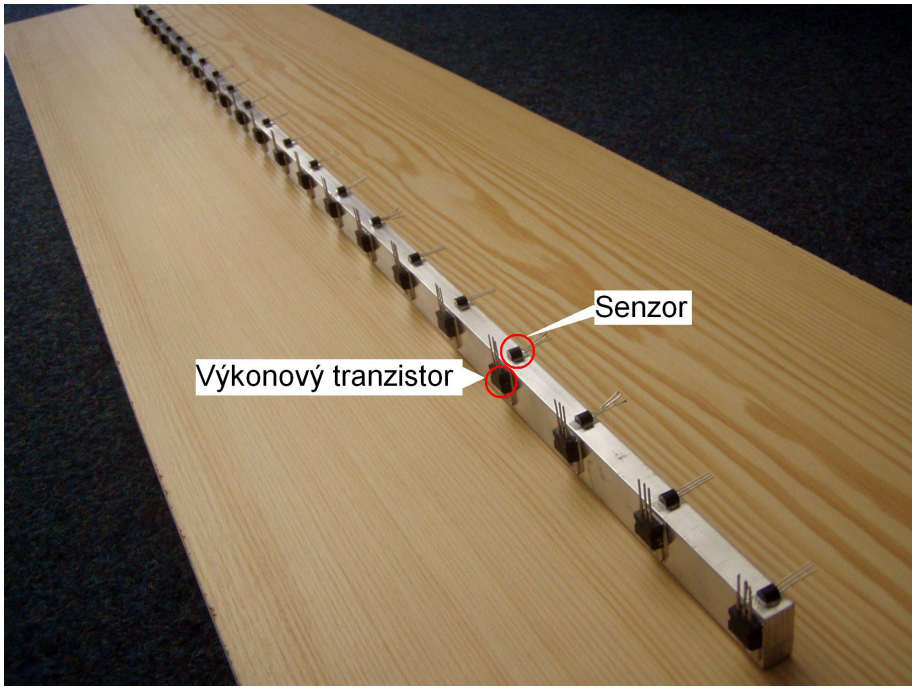
3.2 Přichycení tranzistorů a senzorů k tyči

Aby tranzistory a senzory mohly správně pracovat, je důležité jejich důkladné připevnění k tyči. Požadavkem na spoj jsou především: dobrá tepelná vodivost a odolnost vůči teplu. Není nutné, aby byl spoj rozebratelný. Nakonec bylo použito lepidlo TSE 3941 s dostatečnou teplotní vodivostí (0,8 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Byl použit zkušební vzorek tohoto lepidla od firmy ELCHEMCo, spol. s r.o., za ochotné pomoci pana Ing. Pavla Kozelky. Od podzimu 2008 bude toto lepidlo pravděpodobně dostupné v nabídce této firmy.

Před přilepením tranzistorů bylo každé místo spoje na tyči i chladič tranzistoru nejprve lehce opracovány jemným pilníkem a následně očištěny ipou (polypropylalkohol). Lepidlo je třeba nanášet ve velmi tenké vrstvě a po přiložení součástky přebývající lepidlo ze spoje vytlačit a spoj očistit. Při přilepování senzorů nebyly povrchy spojů zdrsněny pilníkem, ale spoj byl pouze očištěn ipou.

Takto přilepené tranzistory se nepovedlo silou ruky opětovně oddělit od tyčky. Senzory lze pomocí nehtu sloupnout. Pro svůj účel je však tento spoj dostatečně odolný.

Na obrázku 3.1 je fotografie polepené tyče.



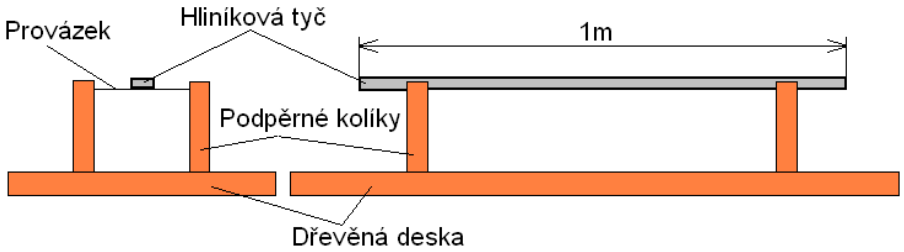
Obrázek 3.1: Hliníková tyč polepená tranzistory a senzory

3.3 Uchycení tyče

Při počítačovém modelování, kterým se zabývá [3], bylo pro zjednodušení předpokládáno, že tyčka je obklopena volně proudícím vzduchem. Proto i tyčka použitá při stavbě zařízení byla zavěšena do stojanu tak, aby volně visela ve vzduchu a nedotýkala se žádnou svou částí podložky či jiných překážek.

Základnu stojanu tvoří dřevěná deska. Na obou koncích je deska osazena dvěma kolíky, mezi nimiž je natažen provázek. Na tomto provázku potom visí hliníková tyčka. Dřevěná základna též tvoří vhodnou podložku pro umístění desek plošných spojů s mikrokontrolery a ostatní elektronikou.

Náčrtek stojanu je na obrázku 3.2. V době psaní této práce byl stojan ve výrobě u školního řemeslníka. Přesné rozměry nejsou důležité a byly ponechány na úvaze řemeslníka.



Obrázek 3.2: Náčrtek stojanu pro uchycení tyče.

3.4 Napájecí zdroj

Protože bodů na tyči je velké množství a příkon každého z nich může dosáhnout až 20 W, bylo nutno počítat s celkovým odběrem zařízení v řádu stovek wattů a tomu přizpůsobit výběr napájecího zdroje.

Dalším požadavkem při výběru nap. zdroje byla vysoká stabilita napětí i při velkých odebíraných proudech. Výkon tranzistoru musí být totiž konstantní nezávisle na tom, jak velké proudy jsou ze zdroje právě odebírány.

Elegantním nápadem proto bylo použít pro napájení počítačový zdroj. Ten se navíc hodí k tomuto účelu, protože disponuje dvěma napěťovými větvemi. Z 12 V větve je možno napájet výkonové tranzistory, zatímco 5 V větev napájí řídicí elektroniku.

Po úvaze byl vybrán výrobek z řady Fortron EPSILON s celkovým maximálním výkonem 1010 W.

Zdroj se zapíná zkratováním pinu PS_ON se zemí. Tento model zdroje nemůže běžet bez zátěže. Aby se tedy zdroj okamžitě po zapnutí opět nevypnul, je potřeba jeho 5 V větev zatížit minimální zátěží. K tomu účelu se osvědčil 5 W rezistor s odporem 15 Ω.

3.5 Ohřívání tyče

Jako nejjednodušší a nejdostupnější topný článek s dostatečným výkonem byl zvolen bipolární tranzistor. Konkrétně výkonový tranzistor BD 912 v pouzdře TO220. Toto pouzdro je vybaveno kovovým chladičem, který tvoří vhodnou plochu pro přichycení k tyči.

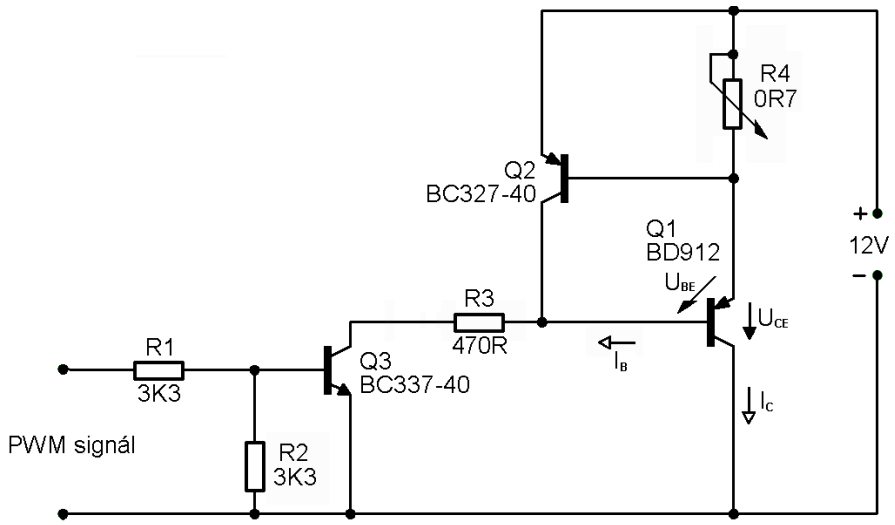
K regulaci výkonu tranzistoru byla použita pulsně-šířková modulace (PWM). Na tranzistor je tedy kladen požadavek, aby výkon jím dodaný byl nulový či blízký nule v rozepnutém stavu a nenulový - přesně definovaný a konstantní - v sepnutém stavu.

Okamžitý výkon tranzistoru lze vypočítat podle rovnice (3.1). Tento výkon je však teplotně závislý, protože vodivost polovodiče roste s teplotou a tím umožňuje protékání většího proudu. Proto musel být proud výkonovým tranzistorem teplotně stabilizován vhodným obvodem. Ing. Jaroslavem Honců, CSc. z Katedry řídící techniky byl doporučen obvod, jehož schema je na obrázku 3.3.

$$P = U_{CE} I_C + U_{BE} I_B \tag{3.1}$$

K obr. 3.3 na následující straně: Q1 je výkonový tranzistor, jehož výkon je třeba teplotně stabilizovat. Obvod funguje tak, že pokud se tranzistor Q1 začne ohřívat, jeho odpor se sníží a začne jím protékat větší proud I_C. Tento proud však více otevře tranzistor Q2 a přebytečný proud je odveden přes odpor R3 do země. Rezistor R4 v tomto případě posouvá pracovní bod tranzistoru Q2 do lineární části jeho VA charakteristiky a jeho velikostí lze regulovat velikost proudu protékajícího tranzistorem Q1.

Je třeba, aby výkon všech tranzistorů na tyči byl stejný. Kvůli odchylkám v parametrech



Obrázek 3.3: Teplotní stabilizace výkonu tranzistoru

součástek se však výkony dodané tranzistory mohou lišit. Nastavením velikosti odporu R4 lze doladit výkon každého tranzistoru zvlášť tak, aby byl na stejné úrovni s ostatními.

3.6 Senzor teploty

Z velké škály dostupných senzorů byl vybrán senzor STM 160-30 v pouzdře TO92. Tento senzor byl vybrán především proto, že teplotu kóduje do střídy výstupního signálu, tedy používá PWM. Čtení ze senzoru se tak snadněji realizuje v mikrokontroleru, neboť je snazší mikrokontrolerem měřit čas, tedy délku impulsu, než například napětí či odpor.

Signál se střídou DC je senzorem generován podle vztahu (3.2), kde t je změřená teplota ve °C. Oscilátor pro generování PWM signálu nemá stabilní frekvenci. V této práci je však odkazováno na periodu tohoto signálu, čímž se zde myslí doba mezi dvěmi náběžnými hranami.

$$DC = 0,320 + 0,00470t \tag{3.2}$$

Katalog součástky udává, že senzor má pro dané pouzdro a teplotu do 100 °C absolutní přesnost $\pm 1,2$ °C. Z prostého měření periody osciloskopem bylo ale zřejmé, že se střída signálu za konstantní teploty mění až o 5 %, což představuje teplotní rozptyl ±5 °C!

Vhodným měřením a zpracováním naměřené střídy mikrokontrolerem bylo však možno dosáhnout uspokojivějších výsledků. Měření střídy PWM signálu je věnována sekce 4.1 na straně 17.

3.7 Mikrokontroler

O řízení výkonu tranzistoru, vyčítání teploty ze senzorů, komunikaci se sousedními body a regulaci výkonu tranzistorů se starají mikrokontrolery. Jako již osvědčená a levná volba byly vybrány mikrokontrolery z řady Atmel AVR.

Na výběr konkrétního typu byly kladeny především tyto požadavky: mikrokontroler musí být vybaven dvěma komunikačními linkami USART a disponovat výstupy PWM.

Těmto požadavkům vyhověl typ AtMega162, navíc vybavený funkcí *Input Capture Mode*, kterou lze použít k měření střídy signálu při čtení ze senzorů, viz sekce 4.1.

Pro zmenšení objemu práce při výrobě desek bylo rozhodnuto, že jeden mikrokontroler bude regulovat více bodů. Zatím je v plánu obsluhovat dva body jedním mikrokontrolerem. Jedná se o kompromis mezi rychlostí a složitostí programu, nároky na paměť mikrokontroleru a poměrným zmenšením práce. Při 20 obsluhovaných bodech ušetří umístění dvou regulátorů do jednoho mikropočítače výrobu deseti desek. Při přidání dalšího bodu do stejného mikrokontroleru je to úspora už jen pouze o tří další desky.

Využití pinů mikrokontroleru AtMega162 zobrazuje tabulka 3.1. Čísla pinů jsou platná pro pouzdro PDIL.

Tabulka 3.1: Použité piny mikrokontroleru

Číslo pinu	Funkce	Popis
40	VCC	Napájení +5V
20	GND	Země
19	XTAL1	Krystal
18	XTAL2	Krystal
9	/RESET	
10	RXD0	UART0 vstup
11	TXD0	UART0 výstup
2	RXD1	UART1 vstup
3	TXD1	UART1 výstup
31	ICP1	Vstup ze senzoru A
13	ICP3	Vstup ze senzoru B
1	OC0	PWM výstup na tranzistor A
2	OC2	PWM výstup na tranzistor B
*		Externí synchronizace

*) Pro externí přerušení je možno vybírat z většího množství pinů. Konkrétní volba může být proto přizpůsobena návrhu desky plošných spojů.

3.8 Desky plošných spojů

Stavba zařízení vyžaduje návrh dvou druhů desek plošných spojů. První deska slouží jako základna pro mikrokontroler. Existuje tedy v tolika kopiích, kolik je použito mikro-

kontrolerů. Tyto desky jsou umístěny pod tyčí.

Druhá deska je deskou pomocnou. Je na ní umístěn zdroj externího přerušovacího signálu, obvod MAX232 a tlačítko centrálního resetu, kterým je možno ovládat pin /RESET na všech mikrokontrolerech realizujících regulátory.

V současné době jsou hotova obvodová schémata obou desek v programu Eagle, verze 4.13. Obě schémata jsou umístěna v příloze zprávy, projekt programu Eagle potom na přiloženém CD. Následujícím krokem je, s využitím stejného programu, návrh desek plošných spojů a jejich otestování.

3.8.1 Deska realizující řídicí body

Obvody na této desce je možno rozdělit na dvě hlavní části: a) mikrokontroler s jeho obvody, b) obvody pro stabilizaci výkonu topného tranzistoru, kterých musí být na desce tolik, kolik je z mikrokontroleru řízeno tranzistorů.

Odpor R4A a trimr R4B slouží k nastavení proudu procházejícího topným tranzistorem a řídí tak jeho výkon. Odpor i trimr musí být uzpůsobeny pro výkon až 1W.

Pro správnou funkci stabilizačního obvodu je důležité, aby proudový zesilovací činitel tranzistoru Q2 byl co největší. Při stavbě zařízení je potřeba nakoupit více těchto tranzistorů a vybrat z nich ty, které mají proudový zesilovací činitel alespoň 250. Tato hodnota byla stanovena při testování obvodu jako dostatečná.

Mikrokontrolery AtMega162 jsou vyráběny v klasických paticových pouzdrech PDIL nebo SMD pouzdrech TQFP/MLF. Výběr pouzdra závisí na možnostech zvolené technologie výroby desky.

Popis konektorů umístěných na desce

Deska obsahuje několik konektorů pro připojení napájení a komunikaci s okolím:

BUS_0 a BUS_1 slouží k připojení společných vodičů vedoucích mezi deskami. Vedle společného resetu je to také společný synchronizační signál (zdroje obou signálů budou umístěny na pomocné desce). Dále je přes tyto konektory připojeno napájení 12 V a 5 V větve se společnou zemí. Zejména 12 V větev by však neměla být kvůli velkým proudům připojena k napájení jen na obou koncích řetězce ale též raději v několika bodech mezi deskami. Poslední dva vodiče jsou pro sériovou komunikaci přes rozhraní USART. To však netvoří společnou sběrnici. Dvojice vodičů je vždy vedena jen mezi dvěma sousedními mikrokontrolery a to vždy tak, že pin RXD0 je připojen k pinu TXD1 druhého mikropočítače.

NODE_0 a NODE_1 slouží pro připojení dvou bodů, které mikrokontroler obsluhuje. Piny jsou zapojeny dle tabulky 3.2.

ISP slouží pro připojení programátoru při programování mikrokontroleru pomocí sběrnice ISP. Přesný popis zapojení pinů je v tabulce 3.3.

Tabulka 3.2: Připojení výkonového tranzistoru a senzoru k desce

Pin	Signál
1	Emitor
2	Báze
3	Kolektor
4	Signál ze senzoru

Tabulka 3.3: Připojení ISP programátoru

Pin	Signál
1	GND
2	MOSI
3	+5V
4	MISO
5	/RESET
6	SCK

Obvodové schéma desky s mikrokontrolerem je umístěno v příloze B.

3.8.2 Pomocná deska

Na desce je umístěn zdroj synchronizačního signálu, obvod MAX232 pro konverzi signálů mezi USART a RS232 a tlačítko centrálního resetu.

Jako zdroj synchronizačního signálu byl zvolen mikrokontroler AtMega162. Tento mikrokontroler samozřejmě svými možnostmi přesahuje toto použití a bylo by vhodné ho nahradit jednodušším mikrokontrolerem. Protože však tento přípravek je pouze testovacím zařízením, není to nutné.

Podobně jako u předcházející desky je k dispozici slot pro připojení ISP programátoru, takže perioda externího synchronizačního signálu může být přeprogramováním mikrokontroleru snadno změněna. Zapojení pinů konektoru pro připojení ISP programátoru je v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4: Připojení ISP programátoru k pomocné desce

Pin	Signál
1	/RESET
2	SCK
3	GND
4	MISO
5	+5V
6	MOSI

Obvodové schéma pomocné desky je v příloze C.

4 Softwarová část

Tato kapitola se zabývá programováním mikrokontrolerů a tvorbou programu pro počítač v prostředí MATLAB. Nejprve je programování rozděleno do několika částí a potom jsou tyto části podrobněji popsány v jednotlivých podkapitolách.

K vývoji programů pro mikrokontrolery v jazyku C bylo použito prostředí AVR Studio ve verzi 4 a překladač WinAVR ve verzi 20080610 společně s knihovnami distribuovanými s tímto překladačem.

Programování mikroprocesoru bylo řešeno v těchto částech s následujícími výsledky:

Měření teploty — Funkce byly úspěšně dokončeny a otestovány.

Komunikace — Implementace z velké části vedla špatnou cestou a v době odevzdání této zprávy nebyla dořešena.

Regulace — Implementace regulátoru byla řešena Chrisem Rapsonem a je popsána v [3]. Zdrojové kódy funkcí realizujících regulátor jsou dostupné na [2]. Pro vývoj zařízení je pouze potřeba funkce regulátoru začlenit do programu mikrokontroleru, případně je upravit tak, aby byla možná jejich kompilace zvoleným překladačem.

4.1 Měření teploty pomocí senzoru STM 160-30

Teplotní senzory kódují informaci o naměřené teplotě do střídy obdélníkového signálu pomocí PWM modulace. V mikrokontroleru je tedy potřeba střídu tohoto PWM signálu nejdříve změřit a poté, za využití vztahu (3.2), přepočítat na teplotu.

4.1.1 Měření střídy PWM signálu

Frekvence výstupního signálu senzoru není konstantní. Proto je nutné změřit zároveň délku i aktivní část periody (tak jak je chápána v sekci 3.6). K tomu je možné použít funkci mikrokontroleru, která se nazývá *Input Capture Mode*. Mikrokontroler AtMega162 je vybaven třemi vstupy s čítači, které tuto funkci podporují.

Input Capture Mode je způsob zpracování přerušení, kdy má mikrokontroler spuštěný čítač a na jednom ze svých vstupů naslouchá externímu přerušení. To je vyvoláno buď náběžnou nebo sestupnou hranou. Přesně ve stejném cyklu, ve kterém došlo k přerušení, je obsah čítače je přepsán do pomocného bufferu, zatímco čítač bez přerušení počítá dále. V okamžiku přerušení je také nastaven příznak požadavku na obsluhu přerušení. Obslužná rutina potom zpracuje obsah bufferu, případně muže změnit citlivost přerušení ze sestupné hrany na náběžnou nebo obráceně.

Výhoda tohoto způsobu zpracování spočívá v tom, že obslužná rutina přerušení není obyčejně spuštěna okamžitě ve stejném cyklu, ve kterém bylo přerušení vyvoláno. Kdyby se

tedy obsah čítače četl až v obslužné rutině, jeho obsah už by neodpovídal času přerušení, ale byl by vyšší v závislosti na tom, jak rychle by se při kterém přerušení povedlo mikrokontroleru spustit obslužnou rutinu. Takto je tedy možno měřit cykly mikrokontroleru bez toho, aniž by se musel čítač v okamžiku přerušení zastavovat. To se je užitečné právě při měření střídy.

Při návrhu programu však bylo nutno zajistit, aby k obsluze přerušení a zpracování informace z bufferu došlo dříve, než nastane další přerušení, protože to by byl obsah bufferu přepsán. K dalším přerušení však musí dojít dříve, než čítač přeteče a opět dopočítá do čísla uloženého jako počáteční čas, protože potom by při vyhodnocování nebyla započítána doba jednoho či více naplnění bufferu.

Program při měření střídy postupuje v těchto krocích:

1. V okamžiku příchodu pulzu externího synchronizačního signálu je spuštěna funkce odměru teploty. Tato funkce nejprve nastaví citlivost přerušení na náběžnou hranu a spustí čítač.

2. V okamžiku příchodu náběžné hrany je obsah čítače překopírován do pomocného bufferu a nastaven příznak požadavku na obsluhu přerušení.

3. Obslužná rutina přerušení uloží obsah bufferu do proměnné start_time a změní citlivost přerušení tak, aby reagovalo na sestupnou hranu.

4. Při příchodu následující sestupné hrany je opět obsah čítače uložen do pomocného bufferu. V obslužné rutině tohoto přerušení je buffer uložen do proměnné falling_time a citlivost přerušení změněna zpět na náběžnou hranu.

5. Další náběžná hrana je počátkem další periody. Obsah čítače překopírovaný do bufferu je uložen do proměnné stop_time. Čítač zastaven a měření ukončeno.

Rozdíl hodnot v start_time a stop_time udává délku celé periody. Délku aktivní části této periody lze vypočítat jako rozdíl proměnných start_time a falling_time. Tuto hodnotu lze samozřejmě vypočítat již při druhém přerušení v měřícím cyklu. Jak již ale bylo zmíněno, je třeba, aby obsluha přerušení proběhla co nejrychleji, protože jinak by hrozilo, že hodnota bufferu bude přepsána dříve, než je zpracována. Střída signálu je podíl délek aktivní části periody a celé periody.

4.1.2 Přepočet střídy na teplotu a další zpracování

Střída je potom pomocí vztahu (3.2) přepočítána na teplotu. Aby bylo možné údaj o teplotě snadněji zpracovávat a posílat mezi mikrokontrolery, je vynásoben 1000 a převeden na celé číslo.

Senzor má bohužel velký nežádoucí rozptyl v naměřených hodnotách. K jeho minimalizaci je v každém cyklu provedeno více odměrů střídy a výsledek určen jako jejich průměr. Postačující počet odměrů pro průměrování byl pokusy stanoven na 8. Při tomto postupu měření je rozptyl teploty odečtené ze senzorů asi ± 1 °C.

Dalším krokem pro zlepšení výsledků měření by mohla být aplikace filtru typu klouzavý průměr. Dále by systém mohl sledovat velikost změny teploty mezi odměry a v případě nereálně velkého skoku uskutečnit nový odměr. Senzory možná také bude třeba kalibrovat.

4.2 Komunikace mezi mikrokontrolery

Hned od začátku práce na projektu bylo počítáno s tím, že zařízení bude pracovat v několika režimech činnosti. Zprávy mezi mikrokontrolery a počítačem tak určitě nebudou obsahovat pouze informace o teplotě, ale například i informace o velikosti akčního zásahu (v případě centralizovaného řízení z počítače) a velké množství servisních zpráv, mezi nimi pak především nové parametry pro regulátory.

Velké úsilí bylo proto věnováno tomu, aby pro přenos po sériové lince šlo používat standardní funkce jazyka C fprinf() a fscanf(). Použití těchto funkcí by značně zpřehlednilo část programu realizující vzájemnou komunikaci mezi mikrokontrolery i jejich komunikaci s počítačem.

V tutoriálech na internetových stránkách [1] byl nalezen příklad definice pomocných funkcí get_char() a put_char(), pomocí nichž lze potom inicializovat datové streamy typu FILE, které jsou potřeba při použití funkcí fprinf() a fscanf().

Tento způsob komunikace se podařilo zprovoznit pro přenos celých čísel ve směru z mikrokontroleru do počítače. Toho bylo využito v identifikačním testu, popsaném v kapitole 5, při kterém se tento způsob komunikace osvědčil. Projekt vývojového prostředí AVR Studio s programem pro mikrokontroler je na přiloženém CD.

Při dalším rozšiřování komunikace se však přes četné pokusy ukázalo, že funkce fprinf() a fscanf() se nechovají tak, jak by měly. Především nefungoval přenos čísel s pohyblivou řádovou čárkou a jakékoliv formátování vysílaných řetězců, například vyslání více proměnných různých datových typů jedním příkazem fprinf().

Z výše uvedených důvodů nebyla tato část programu v době psaní tohoto dokumentu dořešena. V budoucnu bude muset být nalezen způsob, jak tyto problémy vyřešit, nebo zvolen jiný přístup, který bude principiálně blíže assembleru.

4.3 Programování pro MATLAB

Program MATLAB tvoří vhodné prostředí pro příjem, zpracování, zobrazení a uložení přijatých dat ze sériové linky. Navíc v něm lze jednoduše realizovat funkci centralizovaného regulátoru.

Pro identifikační test (kapitola 5) byl napsán program, který ukazuje možnosti MATLABu při práci se sériovou linkou, při jednoduchém zpracování přijatých dat a při jejich uložení a zobrazení v podobě 3D grafu přímo v průběhu testu. Kód programu je na přiloženém CD.

Do jaké míry bude možno stejný princip sériové komunikace použít pro program hotového zařízení závisí na tom, jestli se povede v programu pro mikrokontroler upravit funkci get_char() tak, aby bylo možno přijímat řetězce znaků vyslané z MATLABu funkcí fprintf(), viz sekce 4.2.

5 Měření na skutečném systému

V době odevzdání této zprávy byl zatím proveden pouze jeden test, který ale významně naznačuje, jak by se mohl výsledný systém chovat. Tento test posloužil k identifikaci systému, která byla nutná pro návrh a nastavení parametrů regulátorů a také pro přesnější stanovení konstant při simulacích v práci [3].

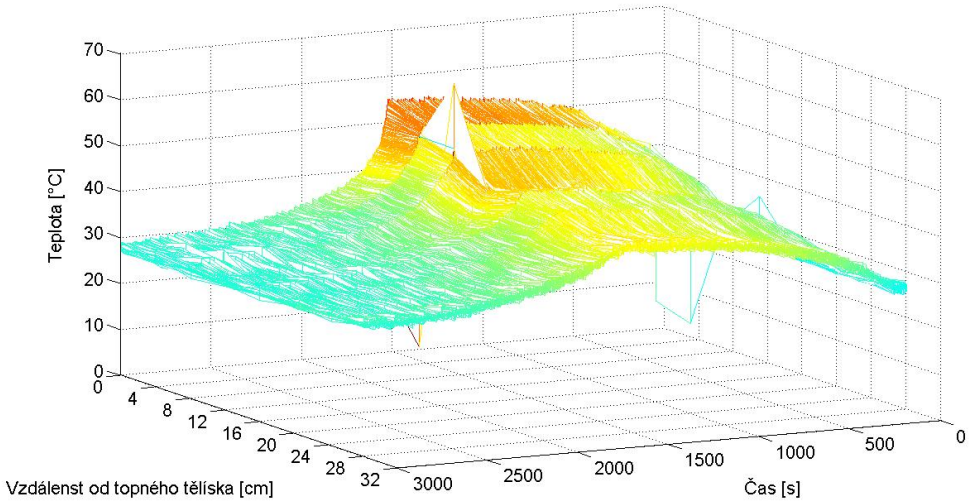
Identifikační test

Tato část popisuje uspořádání identifikačního testu a ukazuje výsledná naměřená data. Cílem testu bylo změřit rozložení teplotního průběhu na tyči v čase při topení jedním topným článkem se známým výkonem.

Na hliníkovou tyč byl tedy umístěn tranzistor, který byl napájen z laboratorního zdroje. Napětím na zdroji byl tranzistoru nastaven výkon 14 W. Předpokládá se, že tato velikost výkonu by mohla být nastavena tranzistorům i v hotovém zařízení. Ke snímání teplotního průběhu bylo použito osmi snímačů od sebe navzájem vzdálených 4 cm. Aby nebyla tyčka poškozena a mohla být použita i pro samotnou stavbu zařízení, bylo upevnění provedeno pouze provizorním omotáním pomocí drátků.

Ke čtení PWM výstupů ze senzorů byl použit jeden mikrokontroler, který byl zasazen ve vývojové desce AVR STK500. Senzory byly připojeny přes multiplexor a mikrokontroler z nich sekvenčně četl teplotu. Odečty ze senzoru byly prováděny s periodou 0,5 s. Informace o teplotě potom byla zasílána přes rozhraní RS232 do počítače, kde byla zpracována v programu MATLAB.

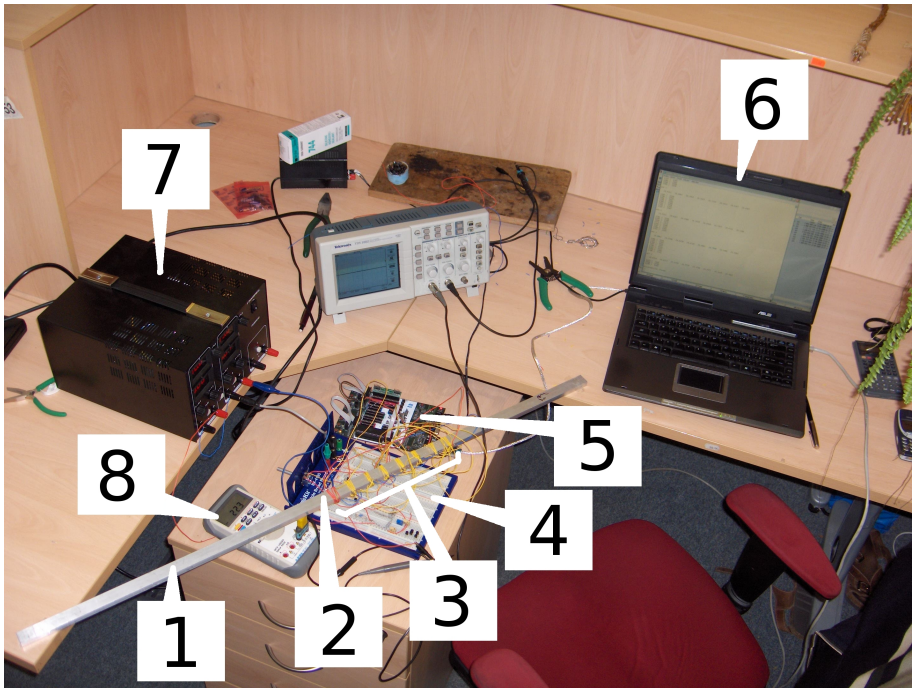
Na obrázku 5.1 je grafické znázornění naměřených teplotních průběhů na tyči během testu. Soubor s naměřenými daty je k dispozici na přiloženém CD.



Obrázek 5.1: Teplotní průběh na tyči během ohřívání jedním tranzistorem

Kromě identifikace systému byl tento test také užitečný pro konečné rozhodnutí o vzdálenosti jednotlivých tranzistorů na tyči a otestování měřících algoritmů. Z naměřených dat lze odhadnout, že senzory bude možná potřeba kalibrovat.

Na obrázku 5.2 je fotografie pracoviště v průběhu identifikačního testu s číselnými popisky a v tabulce 5.1 jsou k tomuto obrázku přidány vysvětlivky.



Obrázek 5.2: Fotografie pracoviště při identifikačním testu

Tabulka 5.1: Popisky k obrázku s pracovištěm

Číslo	Popisek
1	Hliníková tyč
2	Topný tranzistor
3	Senzory
4	Nepájivé pole s pomocnou elektronikou
5	Vývojová deska s mikrokontrolerem
6	Počítač s MATLABem
7	Napájecí zdroj
8	Referenční teploměr

6 Závěr

6.1 Stav projektu v době odevzdání této zprávy

V době odevzdání této zprávy nebylo zařízení dokončeno. Důvodem je velký objem práce jak při návrhu, tak při samotné výrobě laboratorního modelu.

Z hardwarové části byla připravena hliníková tyč, která byla polepena tranzistory a senzory. Dále byl vybrán vhodný mikrokontroler a dokončen návrh elektroniky pro stabilizaci výkonu tranzistoru. Na tomto základě byla následně připravena elektronická schémata pro návrh desek plošných spojů.

Z programovací části byl odladěn algoritmus pro odečítání teploty ze senzorů. Zároveň byly vyzkoušeny funkce MATLABu, které budou dále užitečné pro tento projekt. Vzájemná komunikace mikrokontrolerů a celého řetězce mikrokontrolerů s počítačem zatím zůstává nedořešena a postup při její implementaci bude pravděpodobně muset vést jinou cestou než doposud.

O chování hotového systému hodně prozradil identifikační test, ten zatím zůstává jediným důležitým měřením, které bylo na systému provedeno.

6.2 Možné směry další práce na projektu

Dalšími kroky bude podle navrhnutých elektronických schémat připravit desky plošných spojů a otestovat je. Nelze vyloučit, že bude potřeba provést i drobné úpravy v těchto schématech.

Nejdůležitějším krokem pro dokončení programů pro mikrokontroler je dořešení komunikace mezi mikrokontrolery. Dále bude nutné začlenit do programu již navržený regulátor. Pro uspokojující funkci zařízení možná bude třeba vylepšit měření teploty o kalibraci senzorů, filtrování dat klouzavým průměrováním a detekci nereálně velkých skoků teploty mezi jednotlivými odměry.

Po dokončení zařízení bude možno projekt dále rozvíjet zpřesněním simulací provedených v [3] tak, aby lépe odpovídaly skutečnému systému. Možná bude též zapotřebí upravit parametry navržených regulátorů.

Pokud mi to bude umožněno, rád bych pokračoval v práci na projektu i v následujícím období.

7 Literatura

[1] AVR Libc - Online manual.
http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/group__demos.html.

[2] Internetová adresa na níž jsou dostupné zdrojové kódy regulátorů do Chrise Rapsona.
http://dce.felk.cvut.cz/heat/.

[3] Chris Rapson. Spatially distributed control: Heat conduction in a rod. Master's thesis, České vysoké učení technické v Praze, 2008.

[4] Zdeňek Hurák. Spatially distributed control of heat conduction in an aluminum rod. Technical report, České vyskoké učení technické v Praze, 2008.

A Seznam použitých zkratek

ČVUT České vysoké učení technické

FEM Finite Element Model

ISP In-System Programming

MISO Multiple Input Single Output

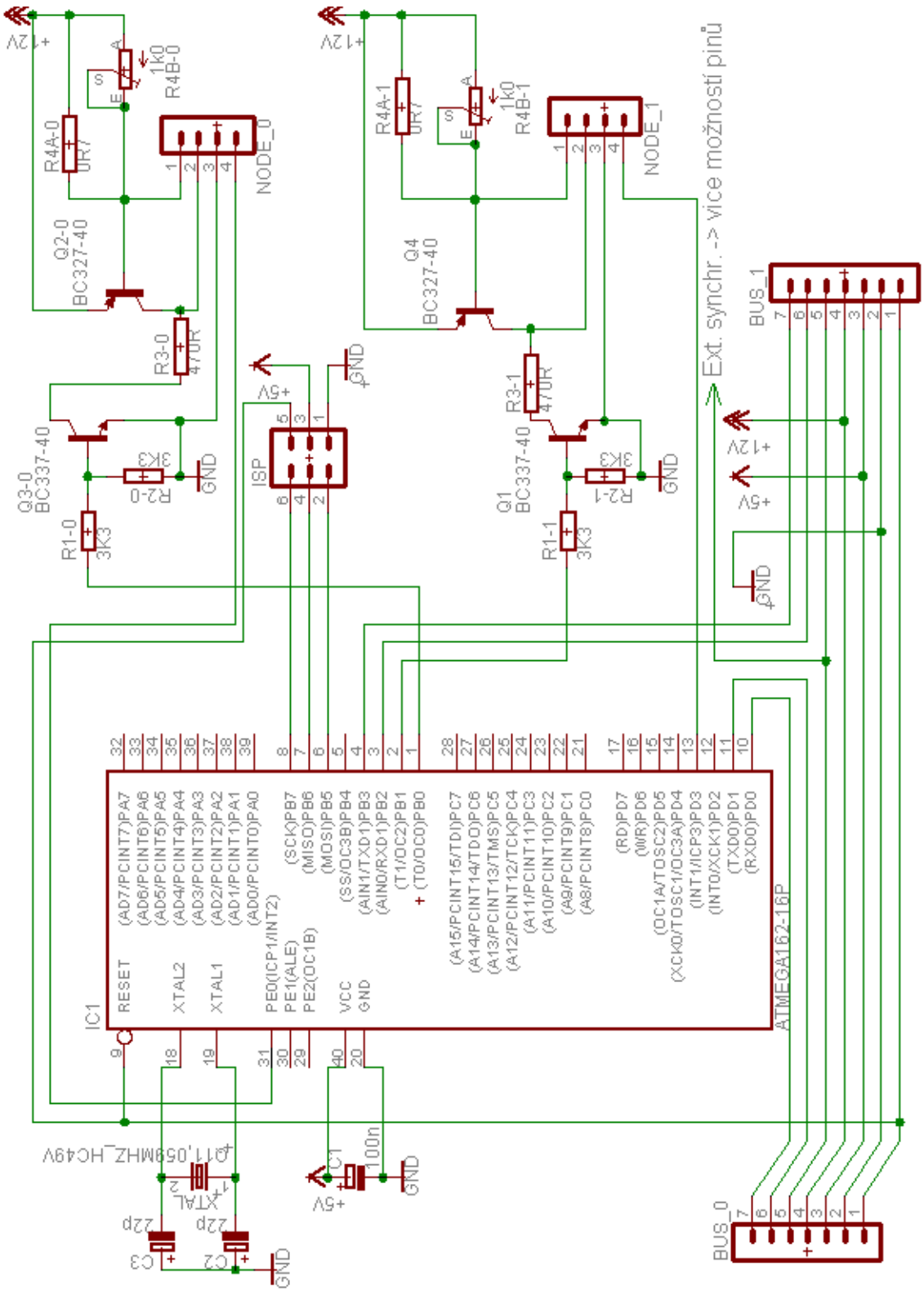
MEMS Micro Electro-Mechanical System

PWM Pulse-Wide Modulation

SMD Surface-Mount Device

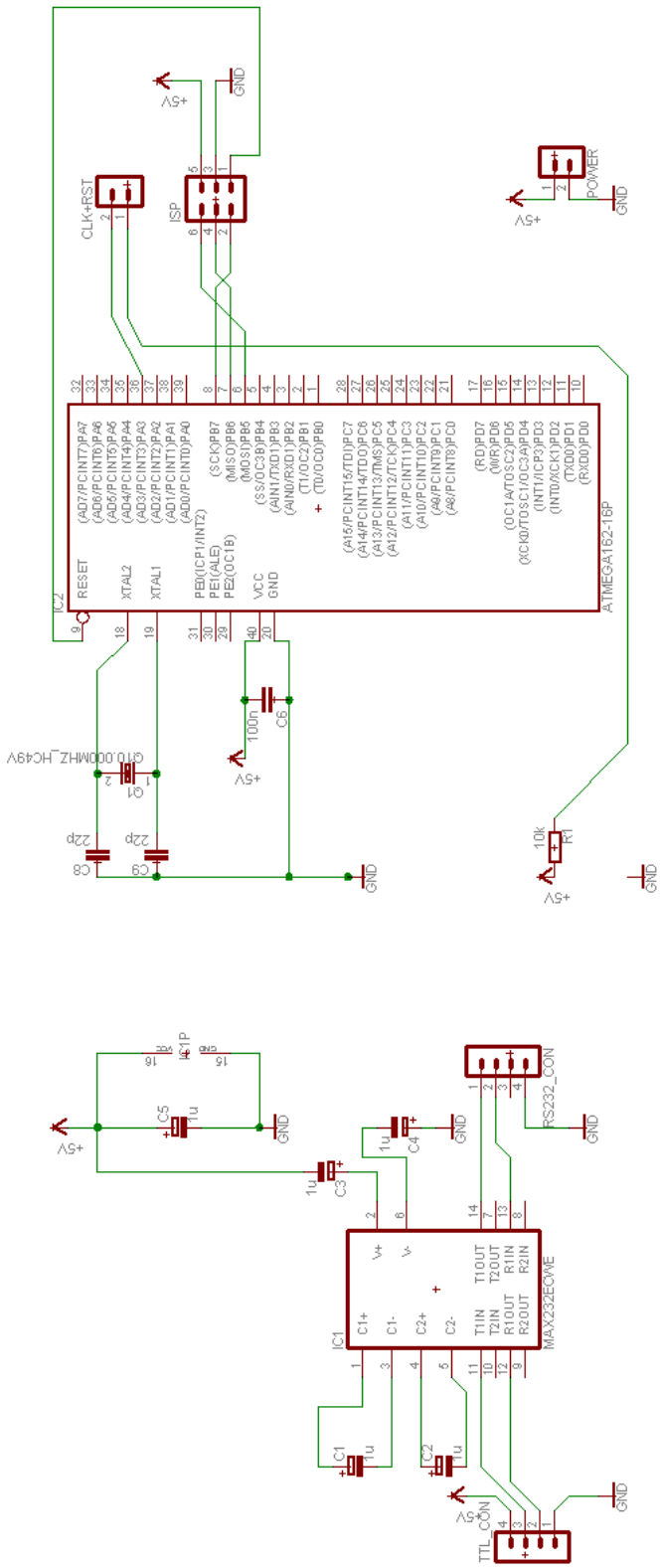
USART Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

B Schéma hlavní desky s mikrokontrolerem



Obrázek B.1: Schéma desky s mikrokontrolerem

C Schéma pomocné desky



Obrázek C.1: Schéma desky s pomocnými obvody

D Obsah přiloženého CD

CD obsahuje tyto soubory a složky:

bakalarka.pdf — bakalářská práce

/bakalarka — složka obsahující zdrojové soubory bakalářské práce v jazyku LaTeX

/datasheets — složka s katalogovými listy použitých součástek

/Eagle — složka projektu návrhu desek plošných spojů v programu Eagle

- **mainBoard** — schéma hlavní desky s mikrokontrolerem
- **addBoard** — schéma pomocné desky

/AVR_Studio — složka s projekty programů pro mikrokontroler z prostředí AVR Studio

- **/bachelor** — program použitý při identifikačním testu

/Matlab — složka se soubory programu MATLAB

- **heat.m** — ukázka simulace šíření tepla hliníkovou tyčí
- **connect.m** — program použitý při identifikačním testu
- **ident_test.mat** — data z identifikačního testu

/Obrazky — složka s obrázky

- **/bakalarka** — obrázky z bakalářské práce
- **screen_matlab.jpg** — snímek okna MATLABu v průběhu identifikačního testu