

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulty mechatroniky a mezioborových  
inženýrských studií

## **Konstrukce regulátoru ventilátoru topného tělesa**

Jindřich Juriga

Studijní program: P 2612 – Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační systémy  
Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti  
Fakulta mechatroniky a mezioborových  
inženýrských studií  
Technická univerzita v Liberci  
Háčkova 6, 461 17 LIBEREC 1  
Školitel: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

Rozsah bakalářské práce

Počet stran: 63

Počet obrázků: 42

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení, apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářskou práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem Technické univerzity v Liberci, která má právo požadovat ode mne přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury, pod vedením školitele Ing. Jiřího Jelínka, Ph.D.

V Liberci 18. 5. 2007

.....

Jindřich Juriga

## Poděkování

Děkuji všem, kteří se podíleli na vzniku tohoto dokumentu, zejména svému vedoucímu Ing. Jiřímu Jelínkovi, Ph.D za užitečné konzultace, připomínky k této práci a jeho trpělivost. Dále můj dík patří firmě Dallas Semiconductor – MAXIM, která mě podporovala zasíláním integrovaných obvodů, bez nichž by tato práce nemohla vzniknout.

## Abstrakt

### *Konstrukce regulátoru ventilátoru topného tělesa*

Tato práce se zabývá regulací teploty topného tělesa otáčkami ventilátoru. Úkolem regulátoru je změřit teplotu topného tělesa, vyhodnotit ji a je-li to nutné, provést akční zásah změnou otáček ventilátoru. Konstrukce regulátoru nebo jeho realizace se může ubírat několika směry - čistě analogovém, kombinovaném nebo výhradně digitálním řešení. Publikace je rozdělena na dvě části.

V první části čtenář nahlédne do problematiky chlazení, podrobně se seznámí s nejčastěji používanými senzory teploty, komunikačními sběrnicemi (protokoly) digitálních senzorů teploty a jednočipovými počítači. Je zde zhodnocen i vliv teploty na spolehlivost elektronických součástek.

Druhá polovina je zaměřena na konkrétní realizaci pomocí digitálního senzoru teploty, modulátoru PWM signálu (vše jeden integrovaný obvod) a jednočipového počítače. Závěrečné zhodnocení poukazuje na výhody a nevýhody použitého řešení a nabízí k němu alternativy.

**Klíčová slova:** regulátor, senzor, jednočipový počítač, ventilátor, teplota, MAX 6640

## Abstract

### *Construction of the heating unit fan regulator*

This thesis deals with heating unit temperature regulation via fan speed control. The task of the regulator is to measure the temperature of the heating unit, evaluate it and adjust the fan speed if necessary. The construction of the regulator can be executed using several ways – purely analog, combined or entirely digital. This publication is divided into two parts.

In the first part the reader looks in the cooling issues, becomes familiar with the most commonly used temperature sensors, communication buses (protocols) of digital temperature sensors, and single-chip computers (controllers). The impact of temperature on electronic parts reliability is also evaluated.

The second part is focused on the project realization via temperature sensor, PWM signal modulator (all in single IC) and a single-chip computer. The final review points out benefits and drawbacks of the applied solution and offers any possible alternatives.

**Key words:** regulator, sensor, single-chip computer, ventilator, temperature, MAX 6640

# Obsah

<b>1 Chlazení elektronických obvodů.....</b>	<b>9</b>
1.1 Zdroje tepla .....	12
1.2 Vliv tepla na spolehlivost elektronických součástek .....	13
1.3 Pasivní a aktivní způsoby chlazení.....	15
<b>2 Senzory teploty .....</b>	<b>16</b>
2.1 Metody měření .....	16
2.1.1 Nepřímé metody měření.....	16
2.1.2 Přímé metody měření .....	17
2.2 Inteligentní senzory teploty.....	18
2.2.1 Inteligentní převodníky teploty.....	18
2.3 Používané teploměry v elektronice.....	19
2.3.1 Odporové kovové teploměry .....	19
2.3.2 Odporové polovodičové .....	20
2.3.3 Polovodičové teploměry s PN přechodem .....	22
2.3.4 Termoelektrické teploměry .....	24
2.3.5 Krystalové teploměry .....	24
2.3.6 Speciální teploměry .....	25
2.3.7 Bezdotykové měření – pyrometrie.....	26
2.4 Montáž dotykových teploměrů.....	28
<b>3 Jednočipové počítače .....</b>	<b>29</b>
3.1 Architektura počítačů.....	29
3.2 Rozdělení jednočipových počítačů.....	30
3.3 Základní struktura jednočipového počítače .....	31
3.4 Periferie jednočipových počítačů .....	32
3.5 Sběrnice pro komunikaci s okolím .....	33
3.5.1 Sériová linka.....	34
3.5.2 Sběrnice I <sup>2</sup> C (SMBus).....	35
3.5.3 Sběrnice SPI .....	37
3.5.4 Sběrnice 1 - Wire .....	38
3.5.5 Sběrnice CAN.....	41
3.6 Použití jednočipových počítačů.....	42
3.7 Programování jednočipových počítačů.....	43
3.7.1 Programovací jazyky.....	43
3.7.2 Software pro programování.....	43
3.8 Významní výrobci jednočipových počítačů.....	43

<b>4 Návrh regulátoru .....</b>	<b>44</b>
4.1 Zvolené součástky .....	44
4.1.1 Volba jednočipového počítače.....	44
4.1.2 Volba senzoru teploty .....	45
4.2 PWM modulace .....	45
4.3 Obvod MAX6640 .....	46
4.3.1 Parametry.....	47
4.3.2 Funkce .....	47
4.3.3 Možnosti.....	48
4.3.4 Použití .....	49
<b>5 Konstrukce a realizace regulátoru.....</b>	<b>50</b>
5.1 Schéma regulačního obvodu .....	51
5.2 Návrh plošného spoje.....	51
5.3 Realizace a testování funkčního vzorku .....	53
<b>6 Software pro konfiguraci regulátoru.....</b>	<b>54</b>
6.1 Volba vývojového prostředí.....	55
6.2 Komunikace s regulátorem .....	55
6.2.1 Komunikační protokol .....	55
6.2.2 Zápis dat do regulátoru.....	56
6.2.3 Čtení dat z regulátoru .....	56
6.3 Nastavení parametrů regulátoru v jazyce vyšší úrovně .....	56
6.3.1 Čtení/Zápis dat do regulátoru .....	57
6.4 Grafické uživatelské rozhraní (GUI) .....	58
Závěr .....	60
Literatura.....	61
Obsah příloženého CD.....	63

## Seznam použitých zkratek

<b>ALU</b>	Aritmeticko-logická jednotka
<b>ASSEMBLER</b>	Jazyk symbolických adres procesoru
<b>CISC</b>	Mikroprocesor s úplnou instrukční sadou
<b>CMOS</b>	Technologie výroby integrovaných obvodů
<b>DSP</b>	Deska plošného spoje
<b>EEPROM</b>	Elektronicky programovatelná (mazatelná) paměť
<b>HART</b>	Highway Addressable Remote Transducer - komunikační protokol
<b>IO port</b>	Vstupní/Výstupní port
<b>PWM</b>	Pulzně šířková modulace
<b>RAM</b>	Paměť pro čtení i zápis, neuchovává hodnoty po odpojení od napájení
<b>RISC</b>	Mikroprocesor s redukovanou instrukční sadou
<b>ROM</b>	Paměť pouze pro čtení
<b>SMD</b>	Součástky pro povrchovou montáž
<b>THT</b>	Součástky pro vývodovou montáž



## Úvod

Práce pojednává o tom, proč je nutné elektronické součástky chladit a uvede dvě hlavní metody chlazení – aktivní a pasivní. V následující kapitole Senzory teploty bude řeč o tom, jaké se nejčastěji používají senzory teploty, jejich výhody a nevýhody. Třetí část, Jednočipové počítače, se zabývá strukturou, rozdělením a rozhraními číslicových počítačů. Jsou zde popsány nejčastěji používané komunikační protokoly a sběrnice v souvislosti se senzory teploty a řízením jednočipovými počítači. Druhá polovina popisuje návrh regulátoru, zvolené součástky a jejich parametry. Poslední kapitola hovoří funkci komunikačního protokolu mezi regulátorem a nadřazeným systémem, zmiňuje postup při vytváření protokolu. Závěrem je zhodnocení celé práce a sepsání zajímavých poznatků.

# 1 Chlazení elektronických obvodů

V reálném světě neexistuje přístroj, který by měl 100% účinnost. Perpetum mobile proto z fyzikálních předpokladů nelze sestavit. Vstupní energie je vždy větší než výstupní, a vykonaná práce je menší o ztráty vyzářené v podobě tepla. Snižuje-li se množství vyzářeného tepla, zvyšuje se účinnost. U integrovaných obvodů je hlavním faktorem zvyšující se hodnoty vyzářeného tepla frekvence, na které daná součástka pracuje. Platí, čím vyšší frekvence, tím větší ztráty. V současnosti se již výrobci procesorů nepředhánějí v maximu dosažené frekvence, ale hledají jiné způsoby vedoucí k růstu výkonu. Obzvláště u CMOS obvodů, které mají napěťovou vazbu a mnoho kapacit, hraje růst frekvence velmi podstatnou roli ztrátového výkonu. Odvádění ztrátového tepla do okolí lze vyjádřit dle vztahu

$$J_j = J_a + R_J \cdot P_{tot}$$

Kde

$$R_J = R_{J_i} + R_{J_e},$$

teplota přechodu  $J_j$  (pro Si ~ max. 155 °C),

teplota okolí  $J_j$  (20 až 45 °C),

maximální výkonová ztráta  $P_{tot}$ ,

tepelný odpor interní (uvnitř pouzdra)  $R_{J_i} \sim 0,5$  K/W,

tepelný odpor externí  $R_{J_e} \sim 1 \dots 102$  K/W.



Obr. 1.1 – pasivní chladič

Množství tepla, které vyprodukuje integrovaný obvod (například CPU nebo GPU), je úměrné jeho efektivitě, technologii použité pro jeho výrobu a napájecímu napětí. Po několika letech použití se chlazení díky prachu na chladiči značně zhoršuje, což začíná růstem teploty a končí destrukcí součástky (grafické karty, procesoru).

K prevenci proti poškození součástky se v běžné praxi používají inteligentní senzory teploty, které pro překročení kritické teploty dají uživateli o tomto stavu vědět nebo samy provedou příslušnou akci (odpojení součástky od napětí). Výrobci procesorů implementují do svých výrobků ochranu, která automaticky sníží výkon procesoru, jakmile dojde k přiblížení ke kritické hodnotě teploty.

Některé komponenty, jako pevné disky a optické mechaniky jsou obvykle chlazeny kontaktem s šasi počítače (počítačovým rámem). Komponenty umístěné volně v počítači potřebují k chlazení pasivní chladič, ventilátor nebo kombinaci obou. Běžně se používají ventilátory o rozměrech 40, 60, 80, 92 a 120 mm. Největší výrobci doporučují pro vstup čerstvého vzduchu čelo počítačové skříně a záď pro výdechy tepla. Jestliže do počítače proudí více čerstvého vzduchu než se stačí odvést, hovoříme o tzv. pozitivním airflow. Když objem nasátého vzduchu bude stejný jako objem vzduchu vysátého, hovoříme o tzv. vyváženém nebo neutrálním airflow. Takový proud vzduchu má největší účinek, ačkoli mírně pozitivní airflow má za následek méně prachových usazenin uvnitř počítače.

Pro počítačové nadšence je zajisté zajímavá volba použití vodního chlazení, které vyniká vysokou účinností, velmi nízkou hlučností (hlučnost dána pouze chodem kompresoru) na úkor vysokým pořizovacím nákladům. Osobní počítače, které jsou takto chlazené, nepotřebují žádné další ventilátory a mohou být chlazeny pouze vodním chlazením. Médium je v tomto případě dielektrická kapalina (nevedoucí elektrický proud - např. FLUORINERT od firmy 3M), gel nebo speciální olej. Médium je nutno průběžně doplňovat neboť dochází k jeho vypařování.

## ***1.1 Zdroje tepla***

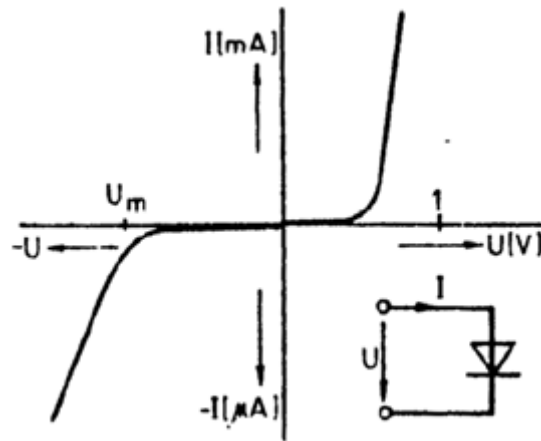
Zdroje tepla rozdělujeme na žádoucí a nežádoucí. V úvodu bylo zmíněno, že neexistuje přístroj, který by chladil. V mnoha oblastech je důsledkem chlazení produkce tepla. Do žádoucích zdrojů tepla můžeme začlenit vytápění (kamna, krby, přímotopy). Oproti tomu určitě nechceme, aby nám procesor nebo zdroj napětí zastupoval funkci elektrického přímotopu.

Chladit je proto potřeba zejména: grafické karty, procesory, výkonové zesilovače, stabilizátory, usměrňovače...Síťové zdroje (tvořené transformátorem, usměrňovačem, filtrem a stabilizátorem) mají nízkou účinnost (50-70 %) a tak se čím dál častěji nahrazují spínanými zdroji, u kterých se přechází na vyšší frekvence, které se lépe transformují a filtrují

V praxi najdeme spotřebiče, které patří do jedné z těchto dvou skupin, zároveň z nich částečně vybočují. Příkladem může být chladnička, která má za úkol chladit a uchovávat její obsah v přijatelném rozmezí teplot. Uvnitř máme požadovanou teplotu, ale u kompresoru vnikají ztráty v podobě tepla.

## 1.2 Vliv tepla na spolehlivost elektronických součástek

Polovodičové součástky jsou ze všech součástek nejvíce teplotně závislé.



Obr. 1.2 – V-A charakteristika polovodičové diody

### Dioda:

Součin napětí a proudu diody v určitém pracovním bodě definuje tzv. ztrátový výkon diody:  $P = U_{AK} \cdot I$

Hodnota ztrátového výkonu je pro každý typ diody uvedena v katalogu a nesmí být překročena. Ztrátový výkon se změní v teplo, a proto se musí dbát o dostatečné chlazení diod. Diody s malými výkony se stačí chladit okolním vzduchem, výkonové diody se připevňují na chladiče, kterými se zlepšuje odvod tepla. Při nedostatečném chlazení může dojít od určité teploty k tzv. **tepelné nestabilitě**. Vzrůst teploty vyvolá zvětšení proudu diodou a zvýšení ztrátového výkonu. Tím se ještě zvýší teplota diody a vznikne lavinový efekt, který končí zničením diody. Teplotní závislost diody lze pozorovat ze Schockleyho

rovnice  $I_A = I_D \left( e^{\frac{U_A}{U_T}} - 1 \right)$  která vyjadřuje nelineární závislost mezi napětím  $U_A$  a proudem

$I_D$  tekoucí diodou.  $I_S$  [A] je v tomto případě saturační proud, obtížně měřitelná a silně teplotně závislá veličina.

$U_A$  ... napětí na diodě [V]

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \dots \text{teplotní potenciál}$$

Po dosažení teploty zjistíme, že platí  $U_T = 26 \text{ mV} / 25^\circ \text{C}$ .

### **Tranzistor:**

Tranzistor si lze velmi zjednodušeně představit jako dvě diody, lze proto bez problémů použít Shockleyho rovnici pro kolektorový proud. Vliv teploty má u tranzistoru za následek posunutí pracovního bodu a mění se vlastnosti tranzistoru. Proto se provádí stabilizace pracovního bodu.

U každého zařízení musí být na začátku jeho vývoje definován rozsah provozních teplot za účelem správného výběru součástek. Většina součástek je určena pro rozsah teplot 0 až  $70^\circ \text{C}$ . Součástky pro průmyslové nebo vojenské použití mají výrobcem zaručený rozsah provozních teplot  $-40$  až  $+85^\circ \text{C}$ . Jejich cena je ale několikanásobně vyšší.

Zařízení, které bude trvale pracovat ve venkovním prostředí, musí být v našich klimatických podmínkách plně funkční v rozsahu venkovních teplot  $-30$  až  $+60^\circ \text{C}$  a musí být při výrobě při těchto teplotách zkoušeno. Zkouška začíná s "vymrzlým" přístrojem, který byl při nejnižší provozní teplotě ponechán několik hodin vypnutý. Po zapnutí musí přístroj bezchybně fungovat. Při maximální provozní teplotě musí být přístroj rovněž schopen trvale pracovat.

Při návrhu přístroje je třeba počítat s teplotou uvnitř přístroje o  $10$  až  $20^\circ \text{C}$  vyšší než je teplota okolí (v závislosti na ztrátovém výkonu zařízení a způsobu odvádění tepla - ventilátor).

Požadovanému rozsahu teplot musí vyhovovat všechny součástky. Při zvýšené teplotě klesá dovolené výkonové zatížení rezistorů a polovodičů. Mohou se měnit parametry jednotlivých součástek a tím i funkce zařízení. Jsou-li některé součástky nadměrně zahřívány, zkracuje se jejich životnost a vznikají tak typické, často se opakující závady. Skládá-li se zařízení z většího počtu funkčních celků, musíme při jeho vývoji každý díl důkladně proměřit v celém teplotním rozsahu.

### ***1.3 Pasivní a aktivní způsoby chlazení***

Pasivní odvod tepla zajišťuje strojově obrobený kus kovu, který je vázán k součástce, jenž potřebuje chladit. Spoj může být realizován pomocí speciálního tepelně vodivého lepidla nebo sponkou přimontovanou k desce tištěného spoje. Důraz klademe na dokonalý kontakt mezi součástkou a chladičem. K tomu slouží tepelně vodivá pasta na bázi silikonu nebo s částičky stříbra.

Blok chladiče je navržen tak, aby byl schopen odvést co největší množství tepla při co nejmenších rozměrech. Volí se proto vhodný tvar a materiál. Chladič je tvořen žebry, aby byla co největší plocha chladiče vystavena (nejlépe proudícímu) vzduchu. Tepelná vodivost kovu je mnohem lepší než to vzduchu, a jeho schopnost k tomu, aby vyzařovala teplo je lepší než součástka, kterou chrání (obvykle integrovaný obvod nebo CPU). Z materiálů je nejrozšířenější hliník a měď. Měď má lepší tepelnou vodivost, je stálejší a pevnější, avšak oproti hliníku také dražší. Pasivní odvody tepla jsou obvykle k nalezení na starších CPU - částech, které se nepříliš hřejí (chipset), nízkonapěťových stabilizátorů, výkonových tranzistorů.

Mezi **aktivní metody** řízení teploty součástek řadíme všechny metody, využívající vnější energii pro dosažení požadované teploty součástky. Aktivní chlazení je takřka totožné s pasivním s rozdílem, že chladič je vybaven ventilátorkem, který ofukuje žebra chladiče a zajišťuje tak lepší odvod tepla. Aktivní způsob chlazení má uplatnění zejména tam, kde je dochází k větším ztrátám, tedy například u procesoru, grafické karty, zdroje napětí.

## 2 Senzory teploty

Teplota je jednou z nejdůležitějších fyzikálních veličin, proto se jejím měřením využívá takřka ve všech procesech výrobní i nevýrobní sféry. Zároveň je nutné zdůraznit, že teplota je zároveň nejčastěji rušivou veličinou při vyhodnocování jiných fyzikálních veličin.

### 2.1 Metody měření

U měření teploty rozlišujeme dvě základní metody. Jsou to přímé a nepřímé metody. Každá z nich má svá pro a proti. V praxi nelze jednoznačně říci, která metoda je lepší. Vždy proto záleží na konkrétní aplikaci.

#### 2.1.1 Nepřímé metody měření

Tyto metody využívají převodníků, které měřenou fyzikální veličinu transformují na tzv. **měronosnou veličinu**.

Měronosná veličina musí splňovat tyto požadavky:

- 1) je v jednoznačném funkčním vztahu k měřené veličině,
- 2) je snázeji zpracovatelná měřicím řetězcem než původní měřená veličina.

Nejčastěji používané měronosné veličiny jsou: tlak vzduchu u pneumatických převodníků, tlak kapalin u hydraulických převodníků a elektrické veličiny (napětí, proud, kapacita, odpor, indukčnost) u elektrických převodníků.

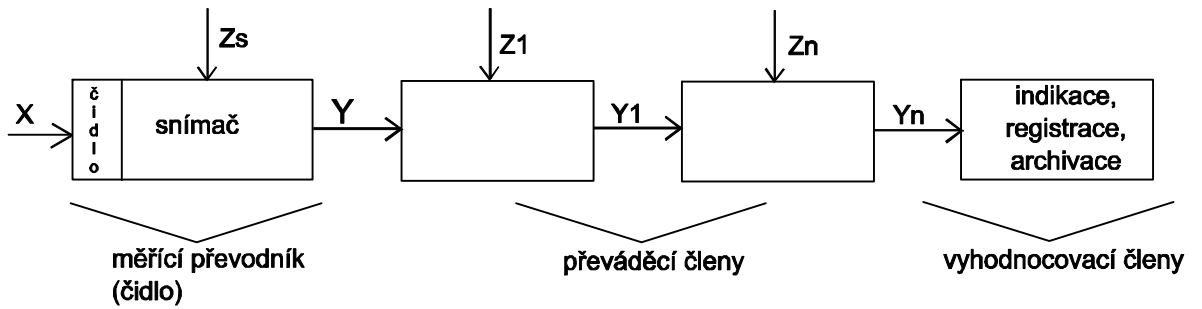
##### **Výhody nepřímé metody měření:**

- 1) Možnost dálkového přenosu naměřených hodnot.
- 2) Možnost použití jednotného regulačního obvodu a pracovat pouze s elektrickými veličinami.
- 3) Možnost soustředit údaje z několika míst do jednoho centra.
- 4) Možnost registrace a archivace.
- 5) Možnost sledovat rychle měnících se hodnot.

##### **Nevýhody:**

- 1) Relativně vysoké pozorovací náklady
- 2) Zvýšení možnosti rušení
- 3) Snížení spolehlivosti

Obrázek (2.1) představuje měřicí řetězec pro získání naměřené teploty.



Obr. 2.1 – Měřicí řetězec

x...měřená veličina (fyzikální)

y...měronosná veličina (elektrická)

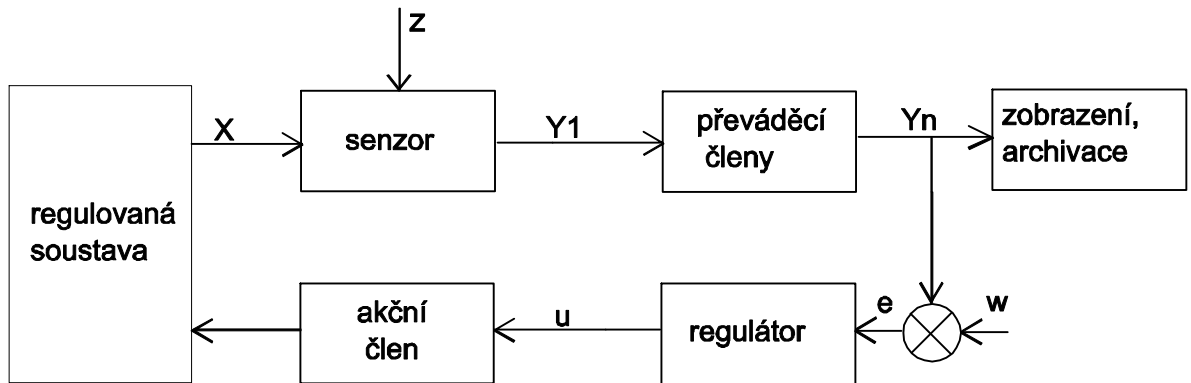
z...poruchová veličina

**Čidlo** – v přímém kontaktu s měřeným objektem, jeho výstupní veličina je zpravidla neelektrická (např. deformace – ohyb u snímače tlaku).

**Snímač** – převádí neelektrickou veličinu z čidla na elektrickou měronosnou veličinu.

**Převáděcí členy** – upravují veličinu Y na tvar a velikost požadovanou pro další zpracování (filtry, převodníky...).

Začlenění měřicího řetězce do regulačního obvodu:



Obr. 2.2 – Začlenění měřicího řetězce do regulačního obvodu

### 2.1.2 Přímé metody měření

U přímé metody měření vycházíme z definice měřené veličiny. Např. chceme-li spočítat

odpor, měříme napětí (U) a proud (I). Odpor  $R = \frac{U}{I}$

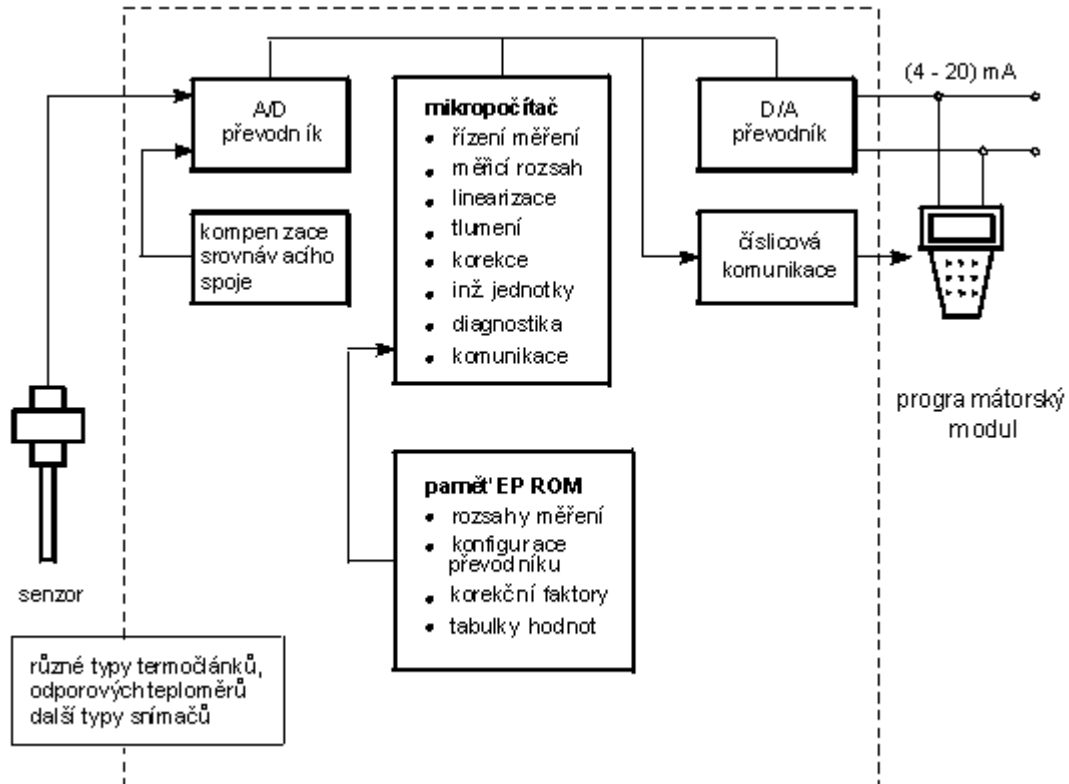


## 2.2 Inteligentní senzory teploty

Inteligentní snímače teploty [1] (smart temperature senzore) se v poslední době čím dál více rozšiřují a nalézají své uplatnění nejen v mnoha průmyslových odvětvích, ale také v domácnostech. Hlavním rozdílem od ostatních senzorů je jejich **digitální výstup**. Často mají snímač teploty integrovaný přímo na chipu nebo přímé rozhraní pro připojení externího teplotně citlivého snímače (PN přechod tranzistoru). Elektronika uvnitř je velmi sofistikovaná, signál dokáže dokonale zpracovat (linearizace, kalibrace, redukce šumu...) a poslat ho nadřazenému systému po sériové sběrnici (I2C, SPI, 1-Wire). Problematika bude blíže popsána v kapitole 3.2.

### 2.2.1 Inteligentní převodníky teploty

Teploměry popsané v kapitole 2.3 naměřenou teplotu vyhodnocují jako změnu napětí termočlánu nebo změnu odporu (u odporových senzorů). Tyto hodnoty nelze přímo použít pro vyhodnocení. Proto je nutné připojit na výstupní svorky termočlánu (obecně senzoru) vhodný převodník – Inteligentní (SMART) převodník, který napěťový signál termočlánu nebo změnu odporu senzoru převede na unifikovaný proudový nebo napěťový výstupní signál. Následná komunikace se odehrává po protokolu HART, kdy na standardní proudovou smyčku  $4 \div 20mA$  namodulujeme frekvenční signál. Analogový signál je jednosměrný, zatímco digitální komunikace obousměrná. Z počítače lze tak vhodným programem pohodlně zkonfigurovat univerzálně programovatelný převodník pro konkrétní aplikaci, tj. zvolit odpovídající vstup (termočlánek, odporový senzor apod.) a k němu i nastavení dolní a horní meze měřicího rozsahu, zajistit kalibraci aj. Počítač může číst konfigurační data naprogramovaného převodníku, uložit je do paměti a použít pro naprogramování dalších převodníků. Zároveň může číst až 4 proměnné ve fyzikálních jednotkách. Na jedné dvoulince dokážeme pomocí HART protokolu obsloužit až 15 zařízení (sít MULTIDROP) [1].



Obr. 2.3 – SMART převodník

## 2.3 Používané teploměry v elektronice

Volba správného teploměru (senzoru) pro danou aplikaci vyžaduje alespoň obecný přehled o typech teploměru, neboť nevhodný výběr může celý regulační systém zbytečně prodražit nebo v nejhorším případě zcela vyřadit regulaci obvodu. Rozhodující parametry jsou teplotní rozsah, třída přesnosti, odezva, rozhraní (zejména pokud se jedná o inteligentní snímač) a v neposlední řadě také cena. Dále je nutno zabudovat teploměr tak, aby správně měřil a aby byly eliminovány nebo potlačeny rušivé vlivy na jeho údaje.

### 2.3.1 Odporové kovové teploměry

Odporové senzory teploty [2] využívají vlastnosti odporu čistého kovu (např. Pt, Ni, Cu). Jejich odpor se s rostoucí teplotou takřka lineárně mění. Je to způsobeno tím, jak se s rostoucí teplotou zvětšují amplitudy harmonických oscilací krystalové mřížky, snižuje se pohyblivost elektronů a odpor kovu stoupá.

Pro teplotní rozsah  $J = 0^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$  lze psát

$$R = R_0(1 + a_J)$$

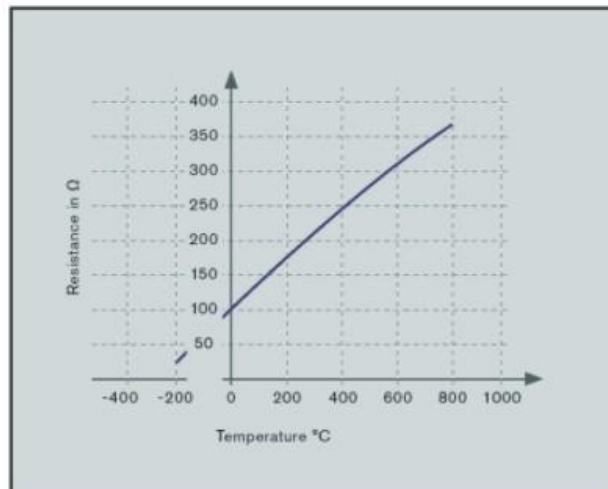
kde  $R_0$  je odpor při  $\vartheta=0^\circ\text{C}$ ,  $R_{100}$  odpor při  $\vartheta=100^\circ\text{C}$ . Teplotní součinitel odporu  $\alpha$  se spočte jako

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}$$



Obr. 2.4 – Platinový teploměr Pt100

Nejpoužívanější odporový teploměr je **Platinový** (Pt100). Platina je chemicky netečná, stálá a má vysokou teplotu tání. Pro různé teploty se liší i konstrukční provedení. Konkrétně například spirálovitě stočený tenký platinový drátek ( $d=0.05\text{mm}$ ) zatavený do keramického nebo skleněného tělíska, které bývá uloženo v ochranné trubici. Pro teploty do  $150^\circ\text{C}$  se platinový drátek nechá navinout kolem pertinaxové nebo slídové destičky.



Obr. 2.5 - Závislost odporu Pt teploměru na teplotě

### 2.3.2 Odporové polovodičové

U polovodičových senzorů teploty [2] se podobně jako u kovových využívá teplotní závislosti odporu na teplotě. Na rozdíl od kovů je ale princip vodivosti polovodičů odlišný, a proto jsou jiné i vlastnosti těchto senzorů. Tuto skupinu můžeme dále dělit na dvě podskupiny, tj. POLYKRYSTALICKÉ a MONOKRYSTALICKÉ (bez PN přechodu).

**POLYKRISTALICKÉ** senzory (termistory) dělíme do několika větví podle toho, jak se jejich odpor mění se změnou teploty.

Termistory NTC (negastory) [2] – termistory se záporným teplotním součinitelem odporu. S rostoucí teplotou se zvyšuje koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor klesá.

Jejich klady je velká citlivost, malá hmotnost a rozměry umožňují měřit i velmi rychlé teplotní změny. Naopak v porovnání s platinovými senzory jsou NTC termistory méně stabilní a časově nestálé. Podle konkrétního provedení umožňují měřit teploty v rozsahu

-170 °C až +450 °C. Pro odpor  $R$  [ $\Omega$ ] negastoru pak platí

$$R \cong A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

kde  $A$  [ $\Omega$ ] je konstanta závislá na tvaru materiálu senzoru a  $B$  [K] teplotní “konstanta” závislá na materiálu. Tvar, který neobsahuje konstantu  $A$

$$\frac{R_1}{R_2} = e^{B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

kde  $R_1$ ...odpor při teplotě  $T_1$ ,

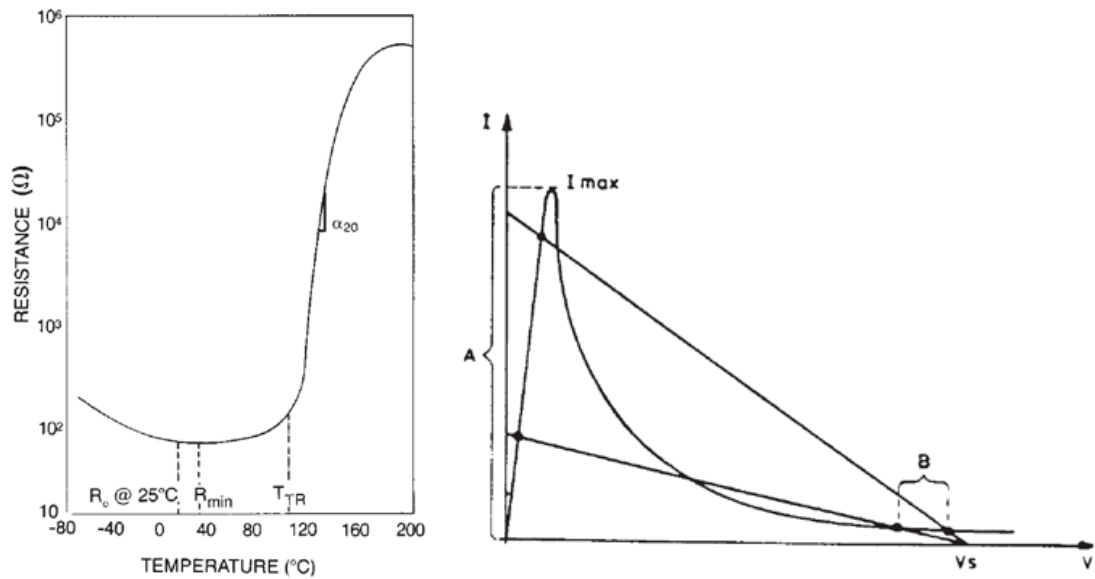
$R_2$ ...odpor při teplotě  $T_2$



Obr. 2.5 – NTC termistory [2]

Termistory PTC (pozistory) – termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. Jejich odpor s rostoucí teplotou nejprve mírně klesá a po překročení Curieovy teploty strmě roste. Nejčastěji se vyrábějí z feroelektrické keramiky např. z titaničitanu barnatého ( $\text{BaTiO}_3$ ), sintrováním přesně řízených práškových směsí obvykle do tvaru malého disku.

Nalezneme je převážně jako dvoustavové senzory (např. pro signalizaci překročení přípustné teploty vinutí motoru). Dále se používají jako tzv. vratné pojistky (resettable fuses) – nadměrný proud tekoucí součástkou způsobí její zahřátí, tím prudce vzroste její odpor.



Obr. 2.6 – (vlevo) Teplotní závislost odporu pozistoru, (vpravo) V-A charakteristika PTC [3]



Obr. 2.7 – PTC termistory [2]

**MONOKRYSTALICKÉ** senzory se vyrábějí nejčastěji z křemíku (Si) a obvykle se používají pro rozsah teplot – 50 až 150 °C. Odpor se s rostoucí teplotou parabolicky zvětšuje, nejsou tedy lineární. Nezanedbatelnou úlohu zde hraje i proud procházející čidlem, který na jeho velikosti vyvolává zvýšení teploty a tím i změnu odporu součástky. Odpor tedy není funkcí pouze teploty. Důsledkem toho je chyba v měření. Pro jednotlivé typy senzorů udává výrobce interval dovolených proudů, při nichž je změna odporu materiálu zanedbatelná.

### 2.3.3 Polovodičové teploměry s PN přechodem

Polovodičové senzory teploty [4] využívají teplotní závislost napětí PN přechodu v propustném směru. Pro měření lze využít všech diod (Si, Ge, GaAs) charakteristika je mírně nelineární.

**Tranzistor jako teplotní senzor** - využívá se přechodu  $U_{BE}$  protože má menší teplotní závislost saturačního proudu. Každý diskretní senzor teploty se musí navrhovat individuálně, neboť neexistují dva naprosto totožné tranzistory.

Z Shockleyho rovnice,

$$I_C = g \cdot I_S \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

kde  $g$  je teplotně nezávislý koeficient,  $I_C$  kolektorový proud a  $I_S$  saturační proud, pak pro

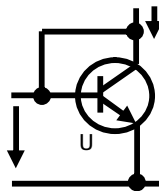
$$g = 1 \frac{I_C}{I_S} \gg 1$$

platí, že

$$U_{BE} = U_T \cdot \ln \frac{I_C}{I_S}.$$

$I_S$  zde má dominantní vliv.

Uvedený vztah pro  $U_{BE}$  neobsahuje teplotně nezávislý rekombinační koeficient  $m$  a je tedy vhodnější pracovat s tranzistorem nebo tzv. tranzistorovou diodou.



Obr. 2.8 – Tranzistor zapojený jako teplotní senzor

### Zenerova dioda jako teplotní senzor

Zenerovo napětí je funkcí teploty. Jeho volbou je možné měnit velikost teplotního koeficientu v širokém rozsahu (podle konstrukce a technologie 0 až 110 mV/K). Podle velikosti  $U_Z$  je teplotní koeficient kladný ( $U_Z > 5V$ ) nebo záporný ( $U_Z < 5V$ ).

Délka přívodních vodičů by neměla být větší než 2 m, mezi vývody se doporučuje zapojit kondenzátor k omezení okolních rušivých vlivů.

Dají se pořídit jako diskretní součástka nebo jako integrovaný obvod.

### 2.3.4 Termoelektrické teploměry

Termoelektrický teploměr (termočlánek) je teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá termoelektrický jev. Termoelektrickým jevem [5] označujeme jev, kdy dochází k přeměně tepelné energie na elektrickou. Zdroje, v nichž se přeměňuje tepelná energie na elektrickou energii, se nazývají termoelektrické zdroje nebo termoelektrické články. Termoelektrické napětí lze spočítat dle vztahu

$$E = \sum_{i=0}^n a_i \Delta J^i$$

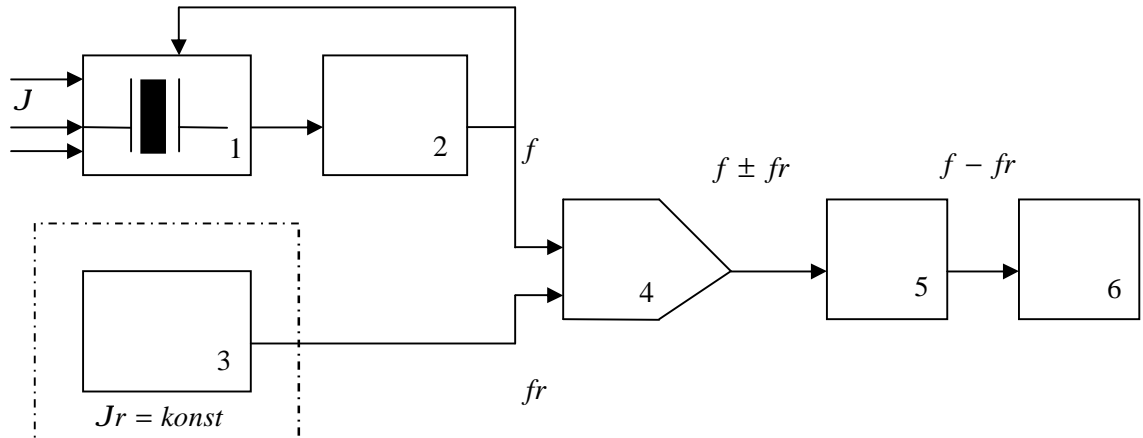
**Seebeckův jev** – mějme obvod s termočlánkem s dvěma konci o různých teplotách. Umístíme-li do obvodu voltmetr, naměříme výchylku napětí úměrnou rozdílu dvou teplot ( $T_2 - T_1$ ). Opakem Seebeckova jevu je jev **Peltierův**, kdy při průchodu elektrického proudu zmíněných elektrickým obvodem se jeden z jeho spojů zahřívá a druhý naopak ochlazuje (použití k chlazení). Materiál na výrobu termoelektrických článků má vykazovat pokud možno velký a lineární přírůstek  $E$  v závislosti na teplotě, stabilitu údaje při dlouhodobém provozu a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům. Jak již bylo zmíněno, termočlánek je tvořen dvěma materiály. Při jejich volbě dbáme hlavně na

- 1) velkou hodnotu termoelektrického napětí,
- 2) vysokou odolnost proti vlivům okolního prostředí,
- 3) časovou stálost vlastního termočlánku,
- 4) rozsah teplot.

Pro průmyslové použití je nejrozšířenější termočlánek typu J (železo-měďnikl) pro rozsah teplot od  $-200$  do  $+600$  °C. Pro vyšší teploty se používá termoelektrický článek typu K (niklchrom-niklhlíník) v rozsahu od  $-50$  do  $1\ 000$  °C.

### 2.3.5 Krystalové teploměry

Krystalové teploměry [4] ke své funkci využívají závislost rezonanční frekvence křemenného výbrusu ( $\text{SiO}_2$ ).



Obr. 2.9 – Možné zapojení Krystalového teploměru

1. křemenný krystal v ochranném krytu
2. oscilátor řízený krystalem
3. oscilátor umístěný v termostatu
4. směšovač
5. nízkofrekvenční filtr
6. čítač s displejem

Směšovačem (analogovou násobičkou), který vynásobí signály s kmitočty  $f$  a  $f_r$  získáme rozdíl těchto signálů ( $f - f_r$ ) a součet ( $f + f_r$ ). Nízkofrekvenčním filtrem (dolní propustí) odfiltrujeme složku s kmitočtem  $f + f_r$ . Displej čítače nám nyní ukazuje hodnotu  $f - f_r$ , která je přímo úměrná teplotám  $J - J_R$ . Výsledná frekvence je pak

$$f = f_r (1 + a(J - J_R))$$

Teplotní rozsah u těchto teploměrů se pohybuje v rozmezí  $-80^\circ\text{C}$  až  $+250^\circ\text{C}$  (při  $f_r = 28.2\text{MHz}$ )

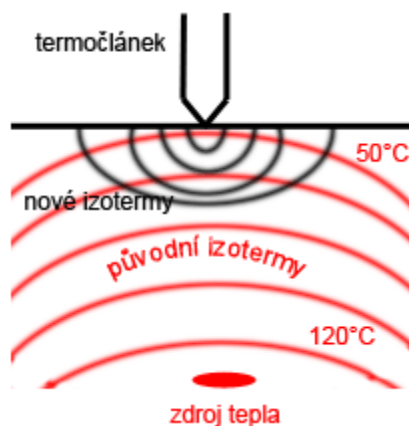
### 2.3.6 Speciální teploměry

Jsou to teploměry pro speciální použití. Těchto teploměrů se nevyužívá jako čidel v regulačních obvodech. Mezi ně patří například teploměrné barvy, pásky a tužky nebo Keramické žároměrky.



### 2.3.7 Bezdotykové měření – pyrometrie

Při měření teploty povrchu tělesa vzniká dotykem teploměru s měřeným objektem změna sdílení tepla mezi objektem a okolím. Dochází k odvádění tepelného toku  $\Phi$  [W] čímž vznikají nové izotermy. Odečtená teplota bude sice korektní, ale jiná než před začátkem měření.



Obr. 2.10 – Odvod tepla působením termočláňku

Bezdotykové měření je měření **povrchové** teploty těles [4] na základě elektromagnetického záření mezi tělesem a okolím nebo mezi dvěma tělesy.

Bezdotykové měření teploty (pyrometrie) využívá viditelné a infračervené oblasti elektromagnetického záření a to pro vlnové délky  $a = 350 \text{ nm}$  až  $30000 \text{ nm}$  čemuž odpovídá rozsah měřených teplot  $J = -400 \text{ °C}$  až  $+10000 \text{ °C}$

Oproti dotykovému měření má pyrometrie mnoho výhod:

- 1) možnost měření na pohybuících se (i rotujících) tělesech,
- 2) zanedbatelný vliv měřící techniky na měřený objekt,
- 3) lze měřit i rychlé změny teploty.

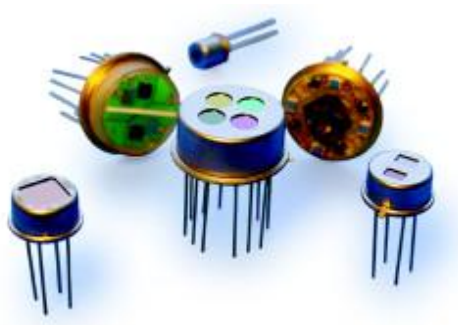
Senzory infračerveného záření:

- 1) Tepelné senzory

Infračervené termočláňky, bolometry, pyroelektrické senzory.

- 2) Kvantové senzory

Polovodičové infračervené fotodiody a fotovodivostní detektory. Jsou velmi citlivé a mají malou časovou konstantu.



Obr. 2.11 – Příklady bezdotykových senzorů teploty

### **Rozdělení pyrometrů:**

#### *1) Podle využití spektrální oblasti záření*

##### a) Monochromatické

Pracují se zářením téměř jedné vlnové délky nebo dvou vlnových délek

##### b) Pásmové

Pracují se zářením v širším pásmu vlnových délek

##### c) Úhrnné

Pracují se zářením téměř v celém spektru vlnových délek, omezeném propustností optického systému a citlivostí detektoru

#### *2) Podle způsobu detekce záření*

##### a) Subjektivní

Detektorem záření je lidské oko (jasové a barvové pyrometry)

##### b) Objektivní

Záření je detekováno selektivními (SiGe) nebo neselektivními detektory záření.

#### *3) Podle konstrukce jednotlivých částí pyrometru*

##### a) optický systém – čočkový, clonkový, zrcadlový, světlovodný

##### b) zaměřovací systém

- optický přes objektiv, světelný (např. laserový paprsek), mířidlový (puškový)

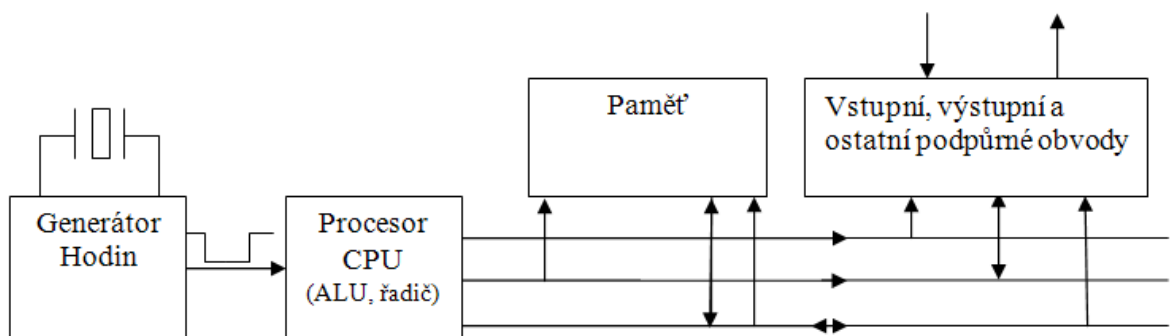
V praxi vycházíme hlavně dle dělení podle spektrální oblasti záření.

## ***2.4 Montáž dotykových teploměrů***

Jedním z hlavních faktorů ovlivňující přesnost měření je kontakt čidla se zdrojem tepla. Klademe důraz na to, aby byl zajištěn správný přestup tepla a dokonalý styk s měřeným prostředím. Měřicí místo musí být voleno vhodně tak, aby byla zajištěna snadná montáž, demontáž a údržba teploměru. Snažíme se proto senzor umístit nebo integrovat přímo do měřeného prvku. Podle aplikace volíme také vhodné pouzdro teploměru – měření teploty kapalin, plynů nebo pevných látek. Při měření teploty kapalin v nádobách se vyžaduje míchání měřené kapaliny, aby byl zvětšen součinitel přestupu tepla, a aby bylo dosaženo homogenního tep-lotního pole. Ztráty tepla vedením se omezí dostatečným ponorem teploměru. Teploměry by měly být (pokud to daná situace vyžaduje) chráněny proti okolnímu (mnohdy) mechanicky a chemicky agresivnímu prostředí. Tímto však dojde ke značnému ovlivnění dynamických vlastností senzoru, proto je s nimi potřeba v konečném vyhodnocení počítat.

### 3 Jednočipové počítače

Pod pojmem jednočipový počítač [6] (jednočip, mikrokontrolér, mikropočítač, MCU) si můžeme představit **programovatelný** integrovaný obvod umístěný v jediném pouzdře s různým počtem vývodů (podle typu). Mikrokontrolér v řadě aplikací plnohodnotně nahradí mnohem větší a dražší osobní počítač. Obrovskou výhodou díky možnosti programování je jejich univerzálnost, nízká cena, kompaktní rozměry a spolehlivost. Existuje spousta typů, je jen na nás, abychom vybrali ten nejlepší pro daný úkol. Mikrokontrolér se svým okolím standardně komunikuje pomocí portů, některé mají možnost použít i některá rozhraní (tzv. interface) jako je sběrnice SPI, I<sup>2</sup>C...



Obr. 3.1 - blokové schéma mikropočítače

**Paměť** uchovává vstupní a výstupní data a program

**Řadič** dekóduje postupně instrukce programu uložené v operační paměti a generuje signály zajišťující činnost ostatních bloků mikropočítače

**Aritmeticko-logická jednotka (ALU)** provádí aritmetické a logické operace podle signálů řadiče nad řadičem určenými veličinami.

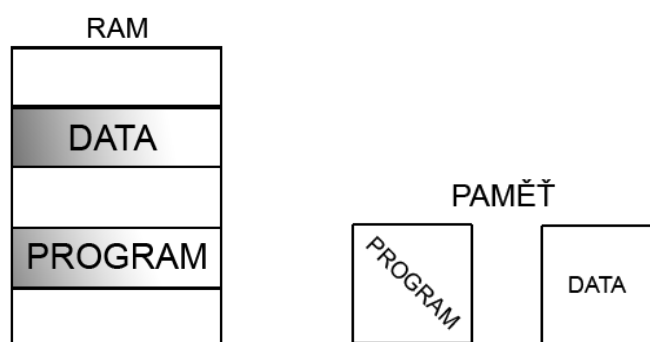
**Vstupní a výstupní jednotka** zabezpečuje komunikaci mikropočítače s vnějším (I/O) okolím pomocí přídatných zařízení umožňujících komunikaci s mikropočítačem, např. klávesnice, tiskárna apod.

#### 3.1 Architektura počítačů

- 1) U osobních počítačů, kde je použita tzv. architektura **Von Neumann** má paměť pro data i program společný datový prostor (paměť typu RAM). Navíc je zde paměť typu ROM (Flash, EPROM) pro pevně uložený obsah, který začne procesor provádět (interpretovat) po zapnutí či po reset. Podle této koncepce

jsou programové instrukce a data členěny do slov nebo slabik stejného formátu a jsou uloženy ve stejném paměťovém prostoru.

- 2) U mikrokontrolérů je použita tzv. Harwardská architektura, kdy paměť programu (typu ROM) má samostatný adresový prostor a paměť pro data rovněž. Z paměti programu může procesor číst program nebo pevná data, nemůže do ní zapisovat. V paměti pro data nemůže být uložen program, pouze uživatelská data. Podle této koncepce jsou instrukce a data uloženy v různých paměťových prostorech a dosti často mají různé formáty. Současně se mohou zpracovávat instrukce i data.

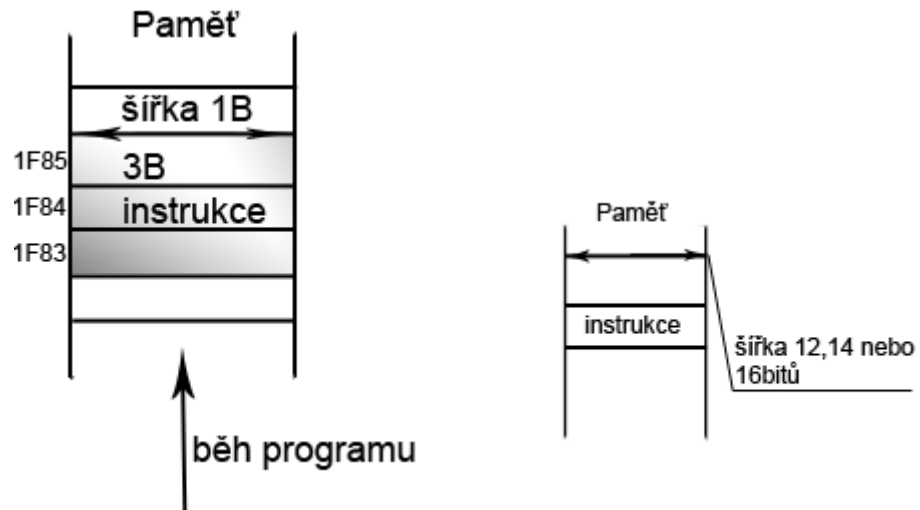


Obr. 3.2 – (vlevo) Architektura Von Neumann, (vpravo) Harwardská architektura

### 3.2 Rozdělení jednočipových počítačů

- 1) CISC (Complex Instruction Set Computer), procesory s úplnou instrukční sadou. Jsou zatím stále nejrozšířenější, jejich instrukční soubor obsahuje více jak 100 instrukcí, které jsou jedno, dvou, tří nebo více bytové (bajtové). Mohou jedním ze svých komplexních příkazů provádět více paměťových operací současně. To zjednodušuje práci kompilátoru a omezuje počet požadovaných registrů. Na druhou stranu musí nejprve přes sběrnici načíst všechny byty instrukce a pak danou instrukci provést a provedení více-bytových instrukcí zabere delší čas.
- 2) RISC (Reduced Instruction Set Computer) [15], procesory s redukovanou instrukční sadou. Někdy v 70. letech 20. století vědci prováděli výzkum, jehož výsledky ukázaly, že 80% všech výpočtů prováděných na osobním počítači bylo provedeno pouze s 20% všech dostupných instrukcí procesoru (cca 30 instrukcí). Tato myšlenka stála u zrodu RISCových procesorů. Instrukce zabírá v paměti 1

adresu, je tedy procesorem načtena v jednom hodinovém cyklu. RISC procesory jsou rychlejší (při srovnatelném kmitočtu), používají jednodušší hardware, jsou s nimi spojeny nižší náklady na vývoj a výrobu. Naopak programy pro RISC jsou delší a komplexnější než pro CISC a programátoři musejí dávat pozor, aby procesor často nečekal dlouho na dokončení instrukce.



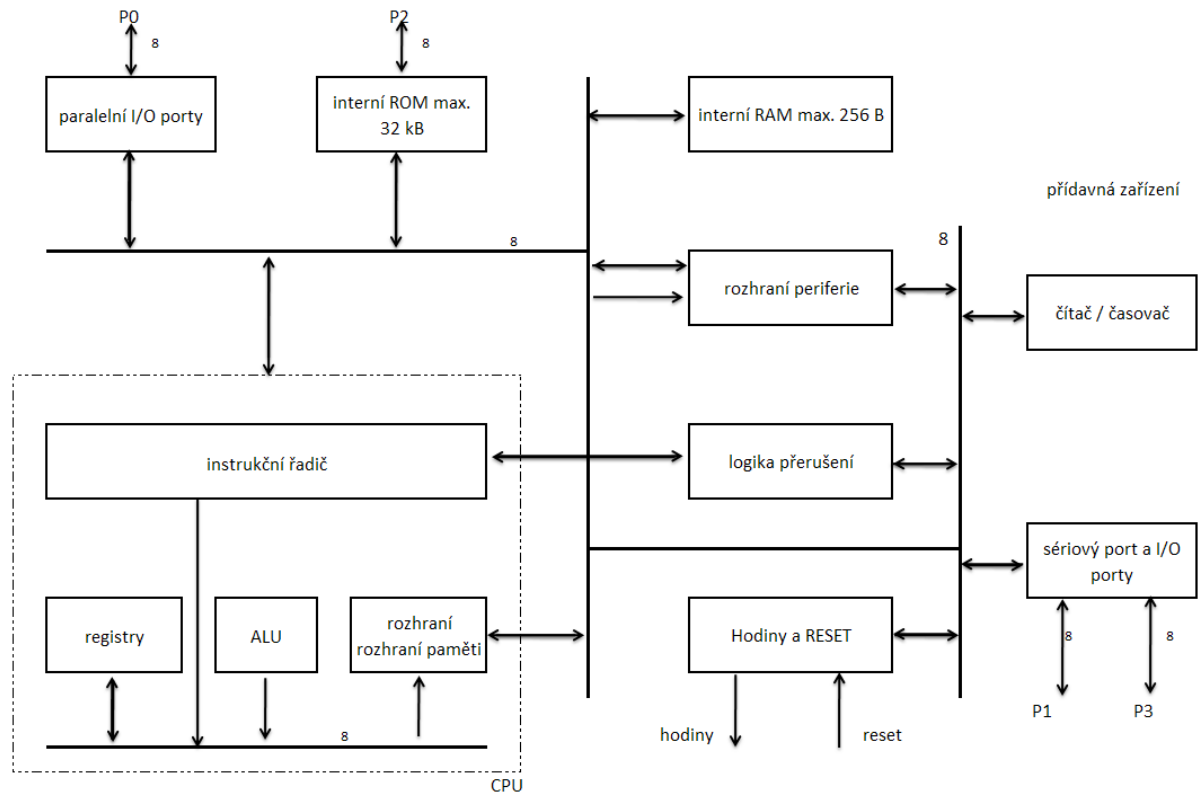
Obr. 3.3 - (vlevo) Instrukční soubor CISC, (vpravo) Instrukční soubor RISC

Hlavní výrobci jako je firma Intel nebo AMD vyrábějí procesory, které obsahují prvky obou architektur. Do budoucna se toto prolínání bude stále zvyšovat a procesory budou obsahovat jen to nejlepší z obou struktur.

### 3.3 Základní struktura jednočipového počítače

Každý mikropočítač se skládá z těchto základních částí [7]:

- Procesor (CPU) – jeho hlavními parametry jsou taktovací kmitočet (MHz až GHz) a šířka datové sběrnice (4 až 64 bitů),
- paměť programu – většinou se jedná o paměť typu ROM nebo flash obsahující řídicí program. Její velikost je řádově v desítkách až stovkách kB,
- paměť dat - paměť typu RAM, velikost od jednotek byte po desítky kB,
- oscilátor - RC nebo řízený krystalem,
- vstupně/výstupní rozhraní - takzvané porty,
- výkonové budiče řídicích číslicových signálů apod.



Obr. 3.4 – základní struktura jednočipového počítače

Základním prvkem každého mikropočítače je centrální procesorová jednotka CPU. Náš procesor je 8bitový, proto šířka datové sběrnice (obousměrné) je 8bitů, tudíž je potřeba 8 vodičů. U mikropočítačů je jakousi zvláštností, že jejich adresová sběrnice má šířku 16 bit a nikoli 8 bitu, jak by se podle typu procesoru zdálo. Mikrokontrolér je vybaven čtyřmi I/O porty pro komunikaci s okolím a jedním sériovým portem pro komunikaci s nadřazeným systémem. Vykonávaný program lze přerušit z několika externího přerušení (např. od čítače).

### 3.4 Periferie jednočipových počítačů

Periferie neboli prvky, pomocí kterých jednočip komunikuje s okolím, jsou jeho velmi důležitou součástí. Bez rozhraní (interface) bychom k mikrokontroléru nemohli přistupovat a programovat ho. Neexistovala by žádná zpětná vazba a mikropočítač by nereagoval na jakékoli změny prostředí. Potřebná rozhraní volíme podle aplikace použití, nemá smysl kupovat něco, co nevyužijeme. Některá rozhraní lze dokonce softwarově doprogramovat, stačí nám k tomu znalost komunikačního protokolu a přítomnost alespoň jednoho

čítače/časovače. Za standardní lze považovat vybavení mikrokontroléru následujícími periferními obvody:

**1. Paralelní IO porty.** Téměř každá mikrokontrolér je vybaven alespoň jedním paralelním portem, které lze použít pro vstup a výstup binárních dat. Lze pracovat s celým portem najednou nebo samostatně ovládat jednotlivé bity portu.

**2. Sériové rozhraní.** Pro komunikaci s okolím (další mikrokontrolér), nadřazený počítač, ovládací panely. Kromě standardního asynchronního přenosu dat (UART) se můžeme setkat i s podporou protokolů jako I<sup>2</sup>C, SPI, CAN.... Sériová rozhraní s těmito protokoly jsou používána pro připojování vnějších pamětí se sériovým rozhraním, vnějších A/D převodníků, digitálních potenciometrů v různých elektroakustických přístrojích nebo teplotních čidel.

**3. Obvody čítačů a časovačů.** Také tyto obvody představují standardní vybavení mikrokontrolérů. Používají se jako čítače externích událostí nebo pro vytvoření časového zpoždění.

### ***3.5 Sběrnice pro komunikaci s okolím***

Sběrnice pro komunikaci s okolím [8] by se daly rozdělit do několika kategorií podle pokryté plochy, kterou jsou schopny obsloužit.

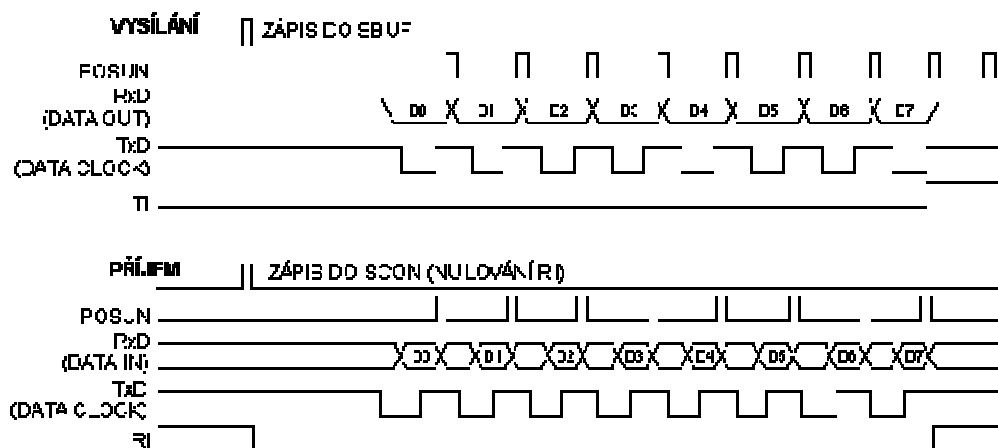
- V elektronice, pro přenos dat přímo na desce tištěného spoje, tedy pro krátký dosah (cca10-20cm) to jsou I<sup>2</sup>C, SMBus a1-wire atd.
- Průmyslové sběrnice, pro vysokorychlostní i pomalou komunikaci od jednotek metrů až po několik set metrů jsou to Field Bus – CAN, Profi Bus, průmyslový Ethernet atd.
- Obecně použitelné sběrnice jako je RS232, RS485, USB, IEEE 1394 (Fire-Wire)

Zmíním se pouze o nejpoužívanějších sběrnících v elektronice a o jedné průmyslové (CAN Bus). Ostatní jsou nad rámec této publikace.



### 3.5.1 Sériová linka

Sériová linka [7] je plně duplexní tzn., data se vysílají nezávisle oběma směry současně. Umožňuje komunikovat ve standardním 8 a 9bitovém asynchronním režimu nebo 8bitovém synchronním režimu. Komunikační rozhraní tvoří 3 vodiče – RxD (příjem), TxD (vysílání) a GND (zem). Příjímač stejně jako vysílač je vybaven vyrovnávací pamětí (bufferem) o velikosti jednoho znaku. V souvislosti k mikropočítači řady x51 je tento znak uložen v registru SBUF. Zápisem do toho registru se plní vysílač a jeho čtením se odebírají data z příjímače. Sériový kanál má možnost práce v jednom ze čtyř módů. Na obrázku je graficky znázorněn příjem a vysílání.



Obr. 3.5 – sériová linka, MÓD 0 [9]

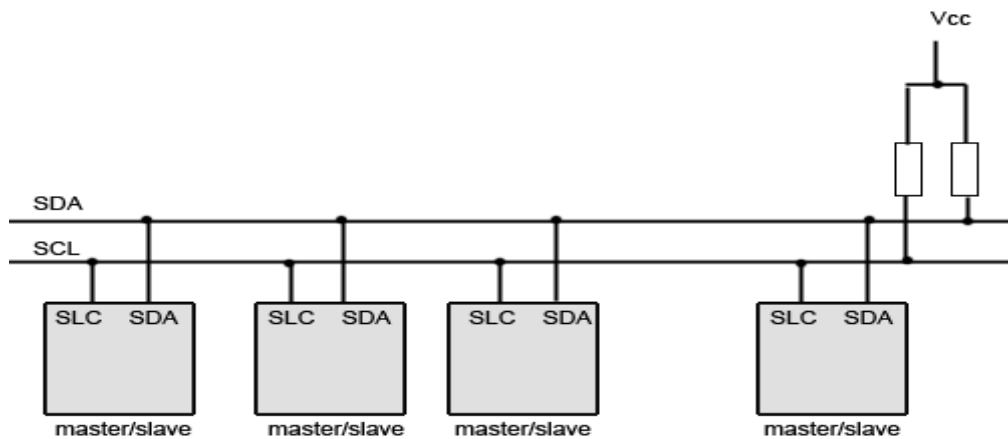
- Mód 0. Linka RxD slouží pro vstup i výstup dat současně. Vývodem TxD v tomto případě vystupují synchronizační impulzy (8 impulsů – šířka datového slova). Režim není duplexní, maximální teoretická rychlost přenosu je 1/12 frekvence oscilátoru.
- Mód 1. Asynchronní, duplexní přenos. Přenášejí se 10bitová slova – 8bitů data a 2bity pro signalizaci začátku a konce vysílání (START a STOP bit).
- Mód 2. Také asynchronní, duplexní přenos. Ovšem na rozdíl od Módu 1 se přenášejí 11bitová data, kde poslední tzv. paritní bit slouží pro kontrolu přenosu. Rychlost přenosu se volí ze dvou základních rychlostí, tj. 1/32 nebo 1/64 frekvence oscilátoru
- Mód 3. Totožný s módem 2, pouze přenosová rychlost se generuje od přetečení časovače/čítače.

### 3.5.2 Sběrnice I2C (SMBus)

Jedná se obousměrnou komunikaci pomocí dvou vodičů, kterou pro svá zařízení navrhla firma Philips. Philips si toto rozhraní nechal patentovat a tak někteří výrobci nehovoří o I2C (Inter IC), ale používají označení např. SMBus – označení firmy INTEL, TWI (Two Wire Serial Interface - dvoudrátové sériové rozhraní). Sběrnice typu multimaster, řeší proto i arbitraci pro přístup. Každá stanice má určenou svou vlastní adresu o délce 7 nebo 10 bitů, která slouží k jejímu výběru i k arbitraci.

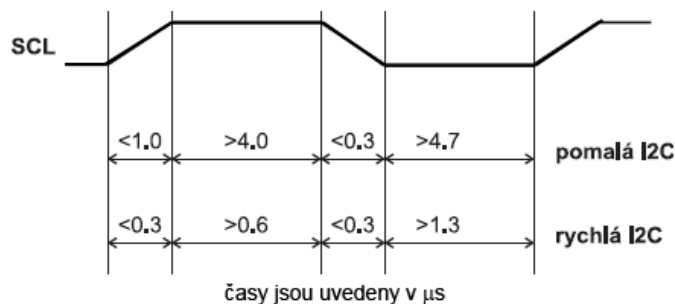
#### Způsob komunikace:

Vodiče pro komunikaci se standardně označují jako SDA (data) a SCL (clock). Signál SDA může svou úroveň měnit pouze tehdy, když jsou hodiny (SCL) ve stavu L (log. 0). Výjimkou je případ začátku a konce komunikace. Maximální přípustná frekvence signálu SCL je podle verze I<sup>2</sup>C 100 kHz (pomalá I2C) nebo 400 kHz (rychlá I2C).



Obr. 3.6 - celková koncepce sběrnice I2C

U pomalé verze je minimální doba setrvání SCL ve stavu logická 1 rovna  $4\mu\text{s}$ , u rychlé je to  $6\mu\text{s}$ .



Obr. 3.7 – pomalá vs. rychlá I2C linka [8]

Vyslání vlastního rámce s adresou příjemce (7 nebo 10bitová) je podmíněno vysláním START bitu. Následně je vysílána 7bitová adresa příjemce a jeden bit R/W, který indikuje požadovanou operaci (čtení/zápis). Další bit ACK je vyslán s úrovní H a je určen k potvrzení přijímací stanicí. Dále jsou přenášena data ve směru určeném předchozím bitem R/W. Každý byte je následován jedním bitem ACK. Komunikace je ukončena vysláním STOP bitu [8].

#### Adresace:

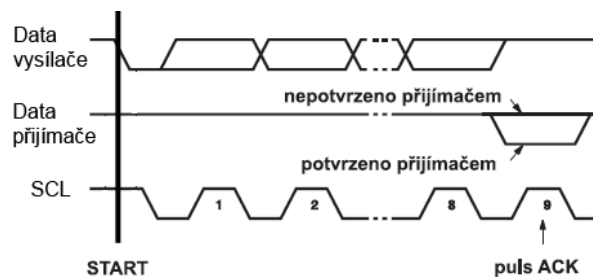
Každá stanice připojená na I<sup>2</sup>C má přidělenou 7bitovou adresu. Po zahájení vysílání každé zařízení naslouchá a porovnává svou adresu s právě vysílanou adresou. Zjistí-li některý z obvodů shodu, je vysílání určeno právě jemu a musí přijetí adresy potvrdit bitem ACK. Potom přijímá, resp. vysílá další data.

#### Obsazení linky:

Stanice může zahájit vysílání, pokud je sběrnice v tzv. klidovém stavu. I<sup>2</sup>C používá metodu s detekcí kolize. Stanice kolizi detekuje tím, že vysílaná data neodpovídají signálu SDA. Nastane-li toto, musí stanice, která právě začala přenos, bezprostředně uvolnit médium.

#### Potvrzování:

Každý vysílaný rámec je potvrzen vysláním jednoho bitu ACK. Vysílající stanice jej vysílá v úrovni H. Přijímající stanice přijetí potvrdí tím, že v době vysílání ACK připojí SDA na úroveň. Pokud vysílající stanice nedostane potvrzení příjmu, ukončí vysílání podmínkou STOP.



Obr. 3.8 - potvrzovací bit ACK

Formát Bytu Pro Zápis

S	ADDRESS	WR	ACK	COMMAND	ACK	DATA	ACK	P
	7 bits			8 bits		8 bits		1
	Adresa zařízení			Příkaz, do kterého registru se bude zapisovat		Data, která budeme zapisovat		

Formát Bytu Pro Čtení

S	ADDRESS	WR	ACK	COMMAND	ACK	S	ADDRESS	RD	ACK	DATA	///	P
	7 bits			8 bits			7 bits			8 bits		
	Adresa zařízení			Příkaz, ze kterého registru se bude číst		Adresa zařízení, opakuje se do doby než dojde k její změně			Přečtená data, budou posílána dokud nebudou poslána všechna			

Formát Bytu Pro Odeslání

S	ADDRESS	WR	ACK	COMMAND	ACK	P
	7 bits			8 bits		

Formát Bytu Pro Příjem

S	ADDRESS	RD	ACK	DATA	///	P
	7 bits			8 bits		

S = Start

P = Stop

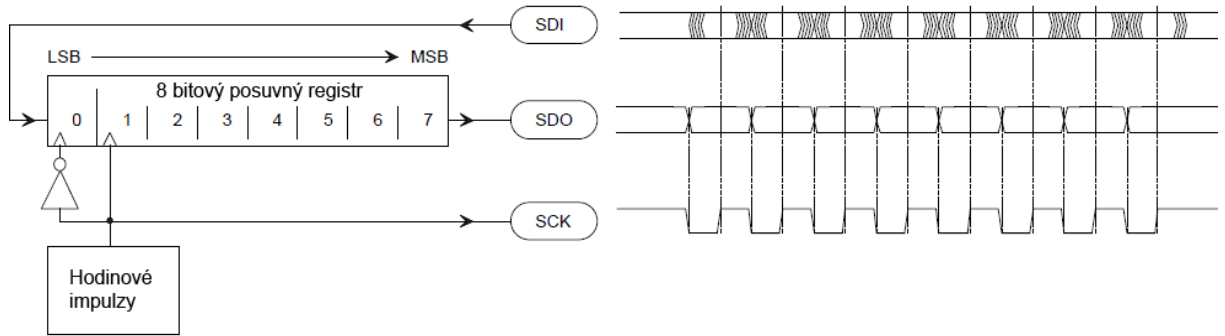
Obr. 3.9 – formát bytu pro zápis, čtení, odeslání a příjem [10]

I2C má své využití v multiprocesorové komunikaci, výměně dat mezi pamětí a úložištěm dat, používá se pro kontrolu parametrů displejů LCD/OLED např. u mobilních telefonů, k měnění parametrů v monitorech (kontrast, barevná hloubka, jas...) a v neposlední řadě také ke čtení a ukládání parametrů do různých senzorů (teploty, otáček).

### 3.5.3 Sběrnice SPI

Rozhraní SPI [8] je založeno na 8 bitovém posuvném registru, kterým je vybaven Master i Slave zařízení. Hodiny posunu (SCK) generuje hlavní zařízení – Master (obvykle procesor). SCK jsou hradlové hodiny a jsou generovány pouze během posunování. Během vlastního přenosu dat je SCK nečinné (log. 1). Vysílání a přijímání probíhá současně oběma směry. Mezitím co Master posouvá z registru ven přenesená data, Slave data do registru zapisuje. To má za následek, že master musí vždy upřednostnit generování hodin nad odesíláním dat, když je požadován příjem.

Následující schéma ukazuje základní rozhraní a vzorový přesun dat. Data na lince SDO jsou posouvány ven s padajícím signálem SCK, data na SDI jsou vzorkovány na náběžnou hranu. SCK je nečinný ve stavu H.



Obr. 3.10 - vzorový přesun dat po sběrnici SPI [8]

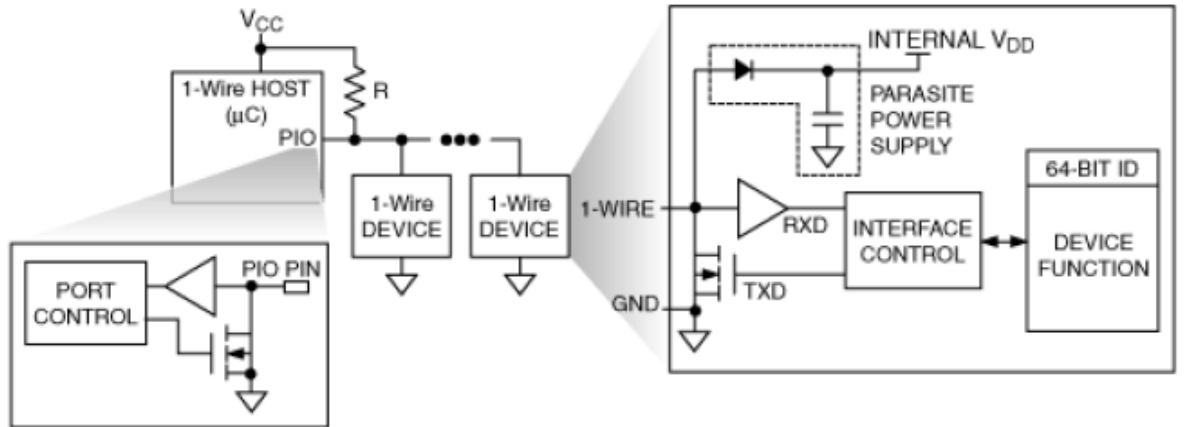
Každý obvod Slave (podřízený obvod) má vstup SS (Slave Select) pro výběr obvodu. Je-li SS v neaktivní úrovni, je rozhraní SPI daného obvodu neaktivní a jeho výstup MISO je ve vysoko impedančním stavu. Vstupy SS jednotlivých obvodů jsou samostatnými vodiči propojeny s obvodem Master. Je-li obvodem Master mikrokontrolér, bývají tyto vodiče připojeny k některému z jeho portů. Tak lze snadno vybírat obvod, se kterým má být v daném okamžiku vedena komunikace.

Napěťové úrovně jednotlivých signálů rozhraní SPI jsou dány použitou technologií. Maximální frekvence hodinového signálu je 2 MHz.

Rozhraní SPI je určeno především pro připojení vnějších pamětí, A/D převodníků a dalších obvodů k mikrokontroléru, případně pro vzájemnou komunikaci mezi mikrokontroléry.

### 3.5.4 Sběrnice 1 - Wire

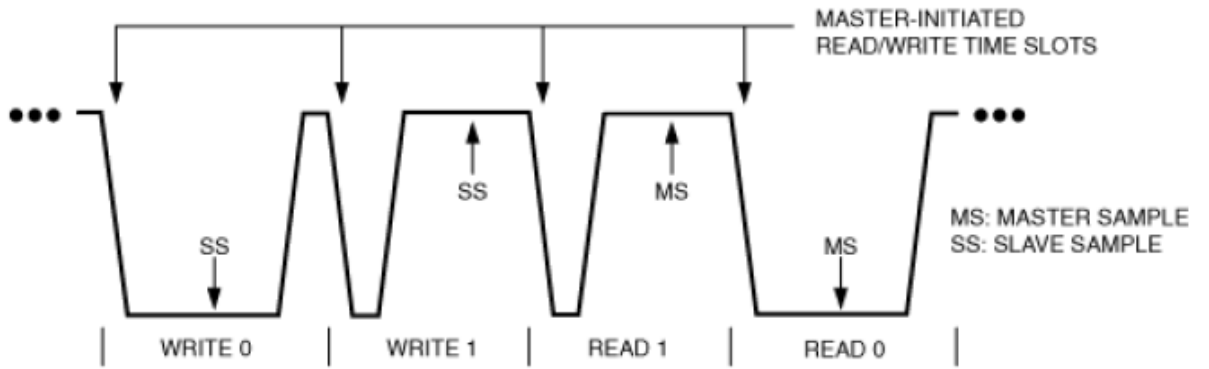
1-Wire (1-vodič), ve volném překladu jednovodičová sériová linka je velice jednoduché řešení přenosu dat od firmy Dallas Semiconductor [11]. Simplexní, obousměrná komunikace mezi hostitelem (mikrokontrolérem) a jedním nebo více podřízených systémů (slave) na běžném datovém kanálu (obr. 3.12). Signál i napájení je dostupné na jediném vodiči. U slave je signál od napětí oddělen vhodnou kapacitou kondenzátoru. Výstup masteru je svým charakterem s otevřeným kolektorem, proto je pro správnou funkci komunikační linky nutno mezi výstup (PIO) a napájecí napětí Vcc připojit odpor, který zajistí log. 1 i v rozepnutém stavu.



Obr. 3.12 - komunikace 1 – Wire [11]

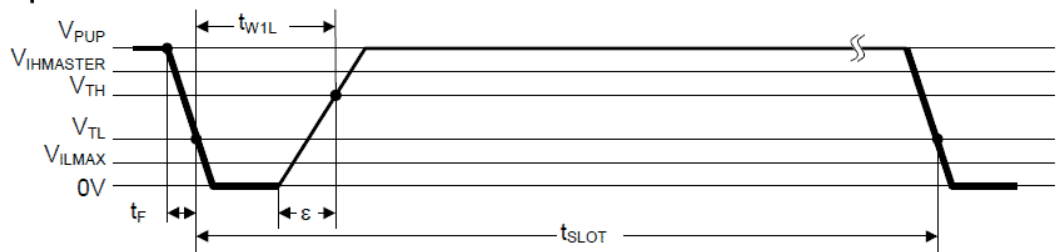
### Komunikace:

Master zahajuje a kontroluje veškerou komunikaci na 1-Wire. Jak je zřejmé na obrázku 3.13, komunikace je podobná pulzně šířkové modulaci (PWM), protože data jsou přenášena šířkou impulsu datového bitu během daného časového úseku. Přenos se uskutečňuje v tzv. slotech, o konstantní délce (min. 65  $\mu\text{s}$ ) a pro zápis logické jedničky musí být úroveň „1“ alespoň (15 - délka slotu)  $\mu\text{s}$ . Zapsání logické nuly vypadá přesně obráceně (obr. 3.14). Komunikační sekvence začíná když master zašle "Reset" (definovaný pulz), který synchronizuje sběrnici. Každý slave na Resetovací impuls reaguje změnou "současného" průběhu na logickou 0. Pro zápis dat, master inicializuje časový rámec tím, že po určitý čas (šířku pulsu) vysílá log. 0 nebo uvolní linku vysláním krátkého impulsu, kterým se sběrnice uvede do stavu 1. Pro zápis dat master znovu inicializuje časový rámec řízením linky s úzkým (log. 0) pulzem. Slave může pak buď vracet logickou 0 sepnutím k zemi, nebo zanechat log. 1. Slave zařízení má možnost stav sběrnice ovlivnit pouze jejím „shozením“ log. 0. Je to dáno z koncepce této 1 vodičové sběrnice. 1-Wire zařízení podporují dvě rychlosti přenosu dat: standardní rychlost asi 15kbps, a Overdrive rychlost asi 111kbps.

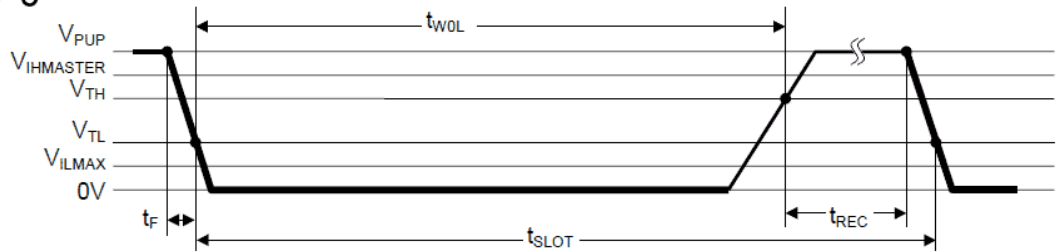


Obr. 3.13 - průběh signalizace [11]

### Zápis '1'



### Zápis '0'



Obr. 3.14 – zápis dat [11]

### **Rozlišení zařízení slave:**

V každém zařízení hraje klíčovou roli jeho jedinečná, 64bit adresa (ID). Tu má každá součástka z výroby uloženou v paměti ROM a nelze nějak dál upravit. Tato 64 - bitová ID hodnota dovoluje hlavnímu zařízení k tomu, aby vybralo slave zařízení mezi několika, které mohou být připojené ke stejnému vodiči. Částí ID je také 8bit kód který identifikuje typ zařízení a podporovanou funkci.

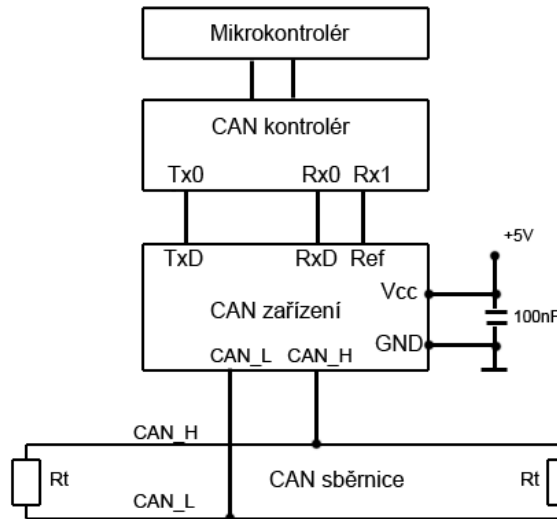
### **Výběr zařízení:**

V obvodu s jedním zařízením je výběr jasný, po inicializační sekvenci stanice odpoví. V prostředí s několika zařízeními (multidevice) posíláme příkaz všem zařízením nebo cílenému zařízení. Adresu cíleného obvodu známe nebo existují sofistikované metody pro prohledávání sběrnice. Tzv. dvojitý algoritmus vyhledávání umožňuje masteru učít se (dozvědět se) a následovně vybrat příslušný 64 - bitový ID nějakého, každého, žádného Slave zařízení na lince.

## **3.5.5 Sběrnice CAN**

CAN - Controller Area Network [8] volně přeloženo jako Lokální síť řídicích jednotek. Tento komunikační protokol nechala vzniknout firma BOSCH zejména pro komunikaci mezi řídicími jednotkami v automobilech. Díky jejímu masovému rozšíření ji můžeme nalézt v širokém odvětví průmyslových aplikací. Kromě automobilů se používá k propojování mikropočítačů, různých inteligentních čidel a akčních členů. Na rozdíl od sběrnic popsaných v předcházejících kapitolách se CAN bus řadí mezi sběrnice průmyslové, kde hraje robustnost i dosah velkou roli. K přenosu informace nepotřebujeme znát adresu příjemce, datový rámec obsahuje pouze tzv. identifikátor (CAN 2.0A 11bitů a CAN 2.0B 29bitů). Stanice tak vysílají svá data bez ohledu na to, je-li v systému nějaký „zájemce“ nebo nikoliv. Data přijímá každá stanice, identifikuje rámec podle identifikátoru a rozhodne, zdali má být právě přijatý rámec akceptován, tj. předán k dalšímu zpracování nebo má-li být vymazán. CAN je definován normou ISO 11898. Ta popisuje fyzickou vrstvu protokolu a specifikaci CAN 2.0A(B).





Obr. 3.15 - komunikace na sběrnici CAN

Sběrnici tvoří dva vodiče (označované CAN\_H a CAN\_L). Pro eliminaci odrazů na vedení je sběrnice na obou koncích přizpůsobena zakončovacími odpory  $R_t$  o velikosti  $120 \Omega$ . Jednotlivá zařízení jsou na sběrnici připojena pomocí konektorů, nejčastěji jsou používány konektory D-SUB (15 pin třířadý) nebo CANNON (9 pin dvouřadý).

Výhody této koncepce jsou: velká provozní spolehlivost, nízká cena, vysoká úroveň zabezpečení přenosu proti chybám, prioritní přístup zabezpečující urychlené doručení významných zpráv, diagnostika sběrnice, vysoká rychlost přenosu dat až 1Mbit/s při délce sběrnice do 40m (500kbit/s – 130m, 125kbit/s – 560m).

Nevýhodou je omezený počet dat přenášených v rámci jedné zprávy (max. 8 Byte)

### 3.6 Použití jednočipových počítačů

Zejména v řízení a průmyslu, většina elektronických zařízení je řízena právě některým z jednočipových počítačů. Setkáme se s nimi např. v televizi, moderních pračkách, mikrovlnných troubách, hračkách, nových automobilech, v mobilních telefonech, elektronické pokladny, IP telefony, herní konzole, kalkulačky, GPS navigace. Aplikační rozsah těchto řídicích systémů je prakticky neomezený.

## **3.7 Programování jednočipových počítačů**

### **3.7.1 Programovací jazyky**

Programovací jazyky pro mikropočítače se dělí do dvou skupin podle kompilátoru. Kód pro mikroprocesor lze psát v jazyce C (překladač GNU Assembler) nebo v některé z mutací Assembleru, podle konkrétního typu procesoru. Assembler je strojově závislý, proto má v podstatě každý procesor trochu odlišný assembler.

### **3.7.2 Software pro programování**

Programátor má velmi široké možnosti při výběru vývojového prostředí pro mikroprocesory. Nenáročnému uživateli stačí poznámkový blok, běžná součást windows nebo v prostředí linuxu třeba editor Vim. Oba tyto nenáročné programy umožňují psát čistý kód, bez kontroly syntaxe. Výhoda je nenáročnost na systémové prostředky, stačí sednout k jakémukoli PC a začít programovat. Nadstavbou jsou programy, zobrazující barevně syntax a dávají tak programátorovi nástroj k hledání překlepů nebo chyb. Profesionální nástroj k programování je software  $\mu$ Vision od firmy Keil. Mimo programování slouží i jako tzv. simulátor a hotový program lze nanečisto vyzkoušet bez nutnosti programovat mikrokotrolér. Program podporuje mnoho druhů mikropočítačů snad od všech výrobců. Uvedené produkty jsou uzpůsobeny pro psaní v tzv. Assembleru, což je nejnižší programovací jazyk. Výsledný kód se musí zkompilovat do HEX kódu a teprve pak je připraven pro nahrání do paměti jednočipu. Program Small Device C Compiler (SDCC) oprostí uživatele od znalosti assembleru, dovede kompilovat kód napsaný v jazyce C.

## **3.8 Významní výrobci jednočipových počítačů**

Mezi nejvýznamnější výrobce procesorů pro osobní počítače patří bezesporu firma Intel, AMD a Via. U jednočipových počítačů je situace trochu rozmanitější. Na trhu je spousta výrobců, všichni se snaží upoutat naši pozornost a získat nás pro koupi jejich výrobku. Klíčovými hráči z hlediska produkce mikrokotrolérů jsou: ATMEL, PHILIPS, DALLAS SEMICONDUCTOR, MAXIM, ASIX, MOTOROLA, ZILOG, MICROCHIP, INTEL, ST MICROELECTRONICS, TEXAS INSTRUMENTS atd.

## 4 Návrh regulátoru

Úkolem bylo navrhnout regulátor, splňující určitá kritéria a s možností širokého uplatnění. Proto jsem se rozhodl navrhnout programovatelný regulátor, který bude samozřejmě více než jen dvoustavový. Požadavky byly kladeny na regulaci v určitém teplotním rozsahu a se zpětnou vazbou dávající najevo, zda se daří nebo nedaří obvod uchládit.

### 4.1 Zvolené součástky

Když jsem se rozhodoval, jakým způsobem budu dané téma zpracovávat, napadly mne dvě varianty.

*Digitálně* – pomocí programovatelného počítače bych generoval pulzně šířkovou modulaci (PWM) k řízení otáček ventilátoru, vyhodnocoval teplotu a prováděl akční zásah k regulaci.

*Analogově* – sestavil bych regulační obvod z tranzistoru, operačního zesilovače, snímače teploty (termistoru). Tato varianta by byla jednoduchá, levná, ale docházelo by na rozdíl od regulace PWM ke ztrátám. Princip PWM modulace bude nadále popsán v kapitole 4.2

Po dlouhém rozmýšlení jsem se rozhodl pro první z variant. Našel jsem na internetu a nechal si poslat vzorky teplotních senzorů od firmy DALLAS SEMICONDUCTOR, od stejné firmy jsem měl k dispozici i mikropočítač DS89C430, PWM budič a externí paměť.

Finální verze výrobku zjednodušeně obsahuje jen tři součástky – mikrokontrolér, regulátor (skládá se ze senzoru teploty, PWM generátore, snímače otáček ventilátoru) a externí paměť pro uchování nastavených parametrů i po odpojení od napájení.

#### 4.1.1 Volba jednočipového počítače

Zpočátku jsem kalkuloval s tím, že celou funkci regulátoru ponechám na jednočipovém počítači. Proto bylo zapotřebí relativně vysoký výpočetní výkon a dostatek volných portů. Nebylo podmínkou, aby jednočip obsahoval i speciální rozhraní ke komunikaci se senzory (I<sup>2</sup>C, SPI nebo SMBus). Každý z těchto interface lze totiž řešit programově.

Ve výsledku byl potřeba pouze jednoduchý mikrokontrolér, protože takřka celou regulaci obstará sám obvod MAX 6640. Nároky na zvolený jednočipový počítač (AT89C2051) tedy razantně klesly. Volil jsem jednoduchý a malý obvod, s vnitřní pamětí pro program alespoň 2Kb. Paměť pro data nebyla nutná – je připojena externí paměť typu

EEPROM. Naopak podmínkou byl alespoň jeden čítač/časovač, jeden programovatelný sériový port a 4 porty pro komunikaci s okolím.



Obr. 4.1 - mikropočítač Atmel AT89C2051

#### 4.1.2 Volba senzoru teploty

Volba vlastního senzoru teploty [4] přímo závisí na koncepci regulátoru – analogový/digitální.

- Pro zcela digitální řešení jsem se rozhodoval mezi několika senzory převážně od firmy DALLAS SEMICONDUCTOR, které jsou vybaveny 12bitovým převodníkem teploty. Příkladem může být MAXIM DS75L, který slouží jako dvoustavový regulátor (termostat). Hodnoty mezních teplot se nahrají přes dvouvodičovou sériovou linku. MAXIM 6627, pouze pro měření teploty, s nadřazeným systémem komunikuje po sběrnici SPI. Převodník teplota/střída SMT160, jeho výstupem je obdélníkový signál na frekvenci 1-4 kHz, jehož střída se mění lineárně s teplotou.

Některé z monitorů teploty nabízejí možnost použít pro měření teploty přímo čidlo v integrovaném obvodu nebo externí, realizované tranzistorem, kde je využita teplotní závislost PN přechodu. Upřednostňoval jsem monitor teploty s externím čidlem. Dalším kritériem byl rozsah měřitelných teplot a rozhraní pro komunikaci. Roli hrála i velikost součástky a její cena.

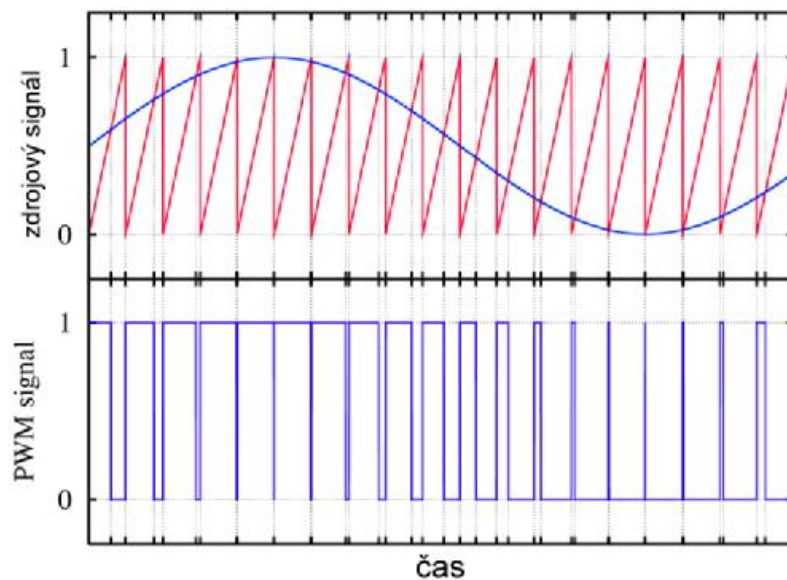
- Analogovou formou bych teplotu mohl získat jako napětí, například z čidla LM35 nebo jako odpor z termistoru.

Pro senzory teploty jsou rozhodující parametry popsané v kapitole 2. – Senzory teploty

#### 4.2 PWM modulace

Jak jednoduše a efektivně měnit jas diody nebo displeje, jak plynule měnit otáčky motoru, jak přenášet digitální data atd. Všechny tyto a mnohem více problémů řeší Pulzně šířková modulace (PWM). **PWM** (12) využívá obdélníkový průběh, jehož střída je modulována na

základě odchylky od průměrné hodnoty nosného signálu. Mění se pouze střída, perioda  $T$  zůstává konstantní. Nejjednodušší způsob jak generovat PWM signál je metoda, která vyžaduje jen pilovitý nebo trojúhelníkový signál (snadno generovatelné jednoduchým oscilátorem) a komparátor. Když je hodnota referenčního signálu (modrá sinusovka na obr. 4.2) větší než modulovací signál, PWM je v horní úrovni, jinak v nízké.



Obr. 4.2 - PWM modulace [12]

Z několika variant generování PWM je pro nás nejzajímavější číslicový způsob, kterým jsou vybaveny některé číslicové obvody (např. mikrořadiče). Většinou používají čítač, který je nebo není přímo napojen na hodiny obvodu. Čítač může fungovat v režimu zkráceného cyklu nebo může čítat až do svého maxima a pak "přetéct". Hodnota čítače se porovnává s referencí, která když je dosažena, tak se změní úroveň výstupu.

### 4.3 Obvod MAX6640

Výsledný návrh jsem se rozhodl postavit na tomto obvodu, protože splňuje všechny požadavky na regulaci v jednu jediné pouzdře. Zlepší se tak spolehlivost, klesne cena a díky jeho jednoduchosti by se mohl velmi rychle rozšířit do praxe a vytlačit svého největšího konkurenta – obvod LM78 (Microprocessor System Hardware Monitor), který se od roku 1996 používá zejména pro monitorování a řízení teploty na základních deskách počítačů.

MAX 6640 (10) se skládá ze čtyř hlavních bloků, tj. generátor PWM signálu pro řízení otáček ventilátorů, obvodem pro zpracování teploty, rozhraním SMBus a logikou pro vyhodnocování otáček ventilátorů. Měří a reguluje teplotu na dvou kanálech, pro regulaci dvou zařízení (např. grafická karta, procesor). Hardwarová adresu (prvních 8bitů) je pro všechny obvody MAX6640 stejná - 05Eh.

### 4.3.1 Parametry

Obvod umožňuje měření až tří na sobě nezávislých teplot (vlastní čidlo a dvě externí – piny DXP1, DXP2). Pro teplotní rozsah +60 °C až 100 °C je udávána přesnost 1°C. Dva PWM výstupy. Zpětná vazba dána měřením otáček ventilátoru (nutno použít ventilátor se třemi vývody-Vcc,GND, ROTATION) s přesností ±4%.

Je vybaven i dvěma výstupy (OT a THERM) pro vypnutí zařízení nebo ke snížení výkonu, dojde-li k překročení maximální povolené teploty. Výstup FAINFAIL, který se nastaví, dojde-li k překročení maximálních přípustných otáček ventilátoru. Maximální měřitelná teplota je +150°C. Maximální nastavitelná hodnota otáček motoru ventilátoru je 16000 ot./min. Operační napětí +4V až +5.5V

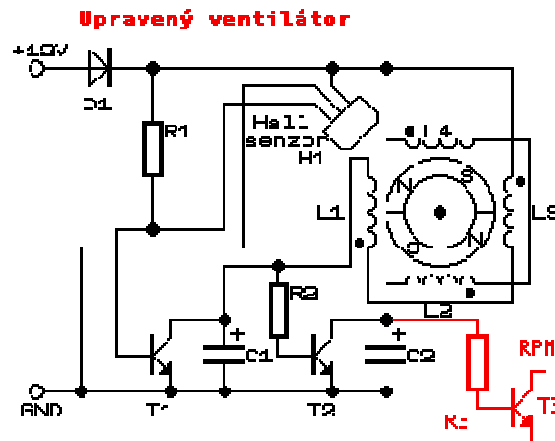
### 4.3.2 Funkce

#### Snímání otáček ventilátoru:

Naprostá většina ventilátorů [13] je vybavena tzv. Hallovou sondou, která je citlivá na změnu magnetického pole. Výstup třetího vodiče Rotation tvoří obdélníkový signál s frekvencí 2x větší než je frekvence otáček ventilátoru. Tento průběh zpracovává logika MAX6640 pravděpodobně tak, že změří času několika (dvou) pulsů a podle vzorce

$$RPM = 60 \cdot \frac{1}{t} [\text{ot.} / \text{min.}]$$

3vodičový ventilátor je možné lehce vyrobit z jakéhokoliv 2vodičového ventilátoru pomocí jednoho tranzistoru a dvou odporů. Stačí upravit zapojení podle originálního 3vodičového ventilátoru (obr. 4.3).



Obr. 4.3 - zapojení ventilátoru [13]

**Měření teploty:**

Koncepce využívá teplotní závislost PN přechodu a je popsána v kapitole 2.3.3.

**Akční zásah:**

Akční zásah jednotka provede zvýšením otáček, tedy změnou střídý PWM signálu. Frekvence PWM by měla být vhodně zvolena. Během experimentů mě při  $f_{PWM} \cong 3.4kHz$  u některých ventilátorů zaskočil jejich velmi nepříjemný akustický projev – pískot, daný kvalitou použitých cívek, vůlemi v ložisku atd. Tento „pískot“ se odborně nazývá Elektromagnetických hlukem. MAX6640 toto řeší vhodně zvolenou modulační frekvencí PWM (nejlépe mimo slyšitelné akustické pásmo)  $f_{PWM} \cong 100 Hz$

Pokud to lze, ventilátory ochladí topné těleso o 5°C méně než je nastavená minimální teplota. Jejich chod se tak může i na několik sekund zastavit, právě díky vzniklé hysterezi.

**4.3.3 Možnosti**

MAX6640 [10] je vysoce výkonným systémem pro regulaci teploty. Dovoluje totiž uživateli naprogramovat jeho vlastnosti a ponechat regulaci nezávislou na obsluze. K přístupu do paměti tohoto obvodu složí mikrokontrolér připojený k osobnímu počítači a aplikace napsána v prostředí MS Windows. Komunikace mikropočítač – MAX6640 se uskutečňuje prostřednictvím sběrnice SMBus (kapitola 3.5.2). Proto je možnost zapojit a řídit několik senzorů najednou, díky jedinečné identifikační adrese každého z nich.

Programovatelné parametry jsou:

- ALERT – nastavíme hodnotu teploty, která může být kritická. Po překročení této teploty se sepne výstup ALERT. Výstup se přestane být aktivní, až když aktuálně měřená teplota klesne pod nebo stoupne nad 5 °C velikosti ALERT.
- OT (Over Temperature) – prakticky stejný jako ALERT
- THERM limit – jako předchozí s tím rozdílem, že při jeho aktivaci roztočí oba ventilátory na max.
- Minimum temperature to start fan – minimální teplota, při které se začnou točit ventilátory
- Maximum fan speed – maximální hodnota otáček ventilátoru, máme na výběr z 2000, 4000, 8000 nebo 16000 otáček za minutu.

Z dalších parametrů lze číst hodnoty, jako je například aktuální teplota, rychlost otáčení ventilátoru (každý kanál zvlášť).

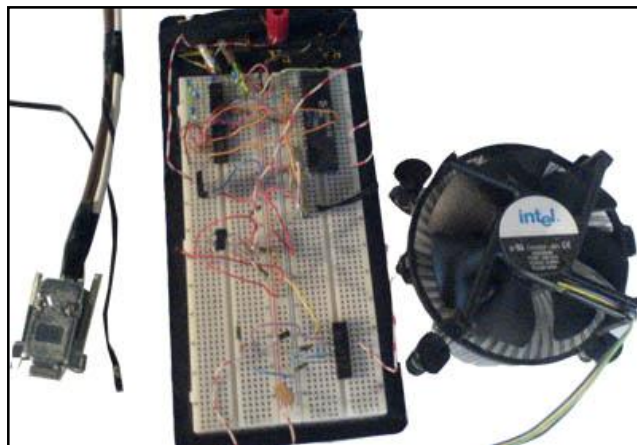
#### **4.3.4 Použití**

Jak jsem již předeslal v úvodu, tento obvod má veliké uplatnění, zejména v regulaci teploty u osobních počítačů, notebooků, pracovních stanic, serverů, elektrických zdrojů....



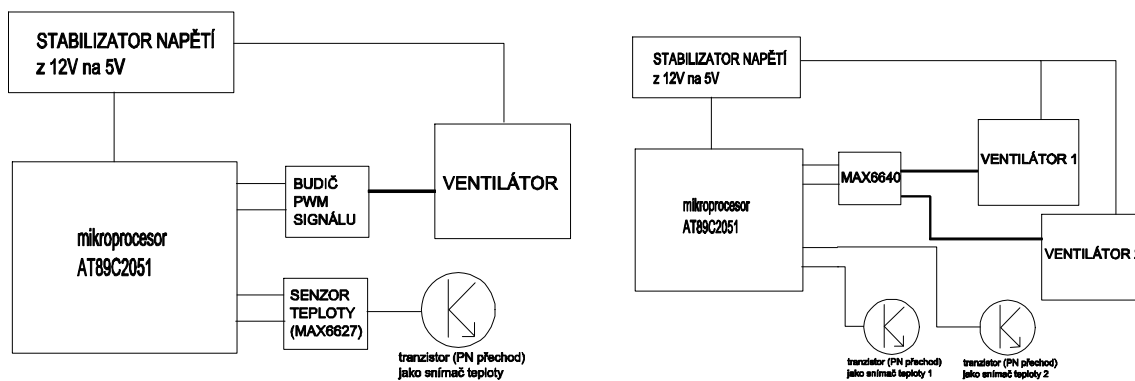
## 5 Konstrukce a realizace regulátoru

Na obrázku (obr. 5.1) je „první generace regulátoru“, která měřila jedno topné těleso a byla schopná obsloužit až 4 ventilátory nezávisle na sobě. Podle hesla „nevymýšlej vymyšlené“ jsem od toho opustil a použil obvod MAX6640.



Obr. 5.1 - první experimenty regulátoru

Obrázek (5.2) ilustruje dvě různá řešení úlohy. V prvním případě je použit integrovaný obvod MAX 6627, který měří jen teplotu, v druhém případě je konečné řešení s obvodem MAX 6640.



Obr. 5.2 – (vlevo) experiment, (vpravo) konečná verze

## 5.1 Schéma regulačního obvodu

Schéma regulačního obvodu (obr. 5.2) se skládá ze čtyř hlavních částí, jak je vidět na schématu.

Obvod je připojen k napětí 12 V a jsou přímo z něho napájeny oba ventilátory. Úpravu napětí pro integrované obvody tvoří stabilizátor L7805T, který stabilizuje napětí z 12 V na 5 V. Obvod je vybaven elektronickou pojistkou (NTC 500 mA). Ochranná dioda D1 slouží jako ochrana proti přechození napájecího napětí. Kondenzátor C2 vyhlazuje napájecí napětí.

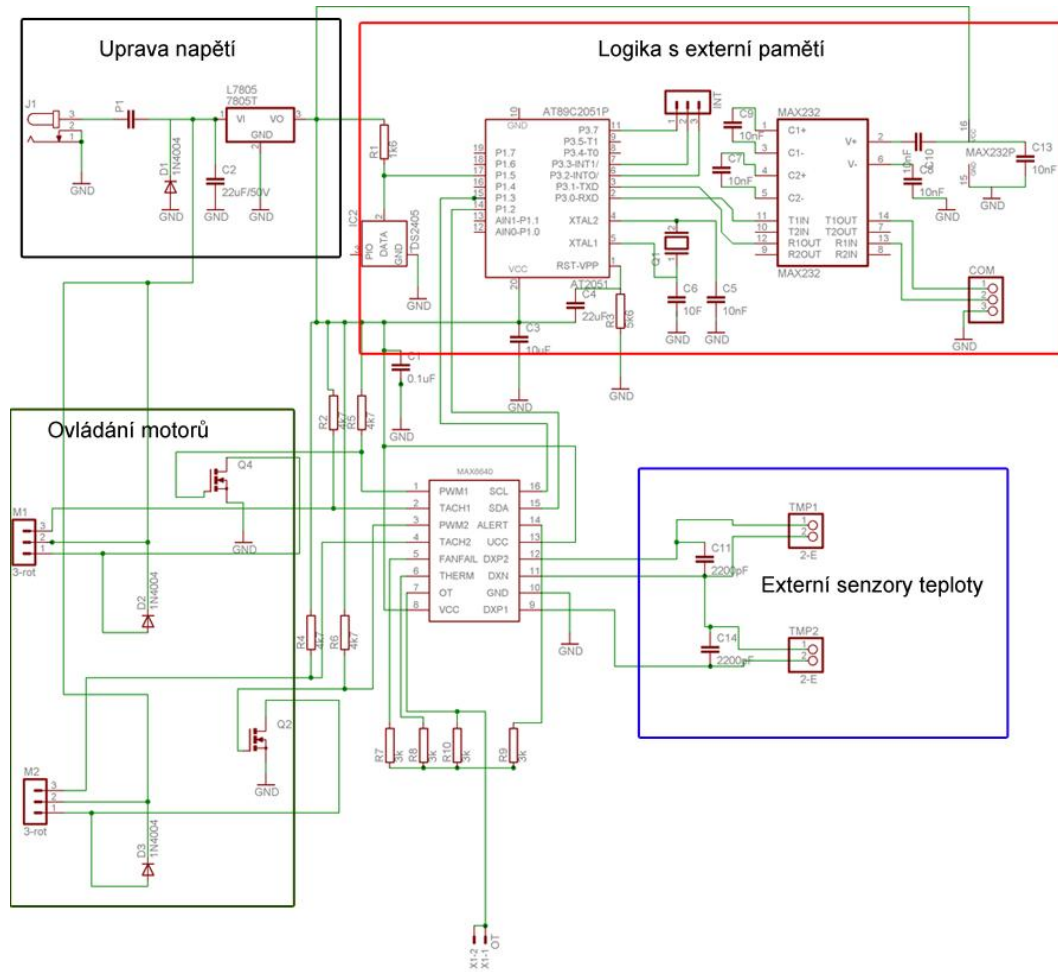
Logika s externí pamětí zahrnuje několik obvodů. MAX232 k převodu úrovní TTL na RS232 pro komunikaci s osobním počítačem. Mikroprocesor Atmel AT89C2051 a externí paměť pro uchování nastavených parametrů regulátoru. Externí paměť DS2431 zde zastupuje paměť mikrokontroléru, ten sám neumí ukládat uživatelská data do paměti EEPROM (paměť EEPROM uchovává své hodnoty i po odpojení od napájecího napětí). Do této struktury bychom mohli zařadit ještě samotný obvod MAX6640, který je zvlášť popsán v kapitole 4.3.

Ovládání motorů (ventilátorů) tvoří výkonovou část obvodu. Je tvořena dvěma tranzistory FET s vodivým N-kanálem ke spínání ventilátorů a dvěma konektory pro připojení třívodičových ventilátorů (moderní chladiče mívají i čtyři vodiče, v tomto případě zůstane čtvrtý vodič nevyužit).

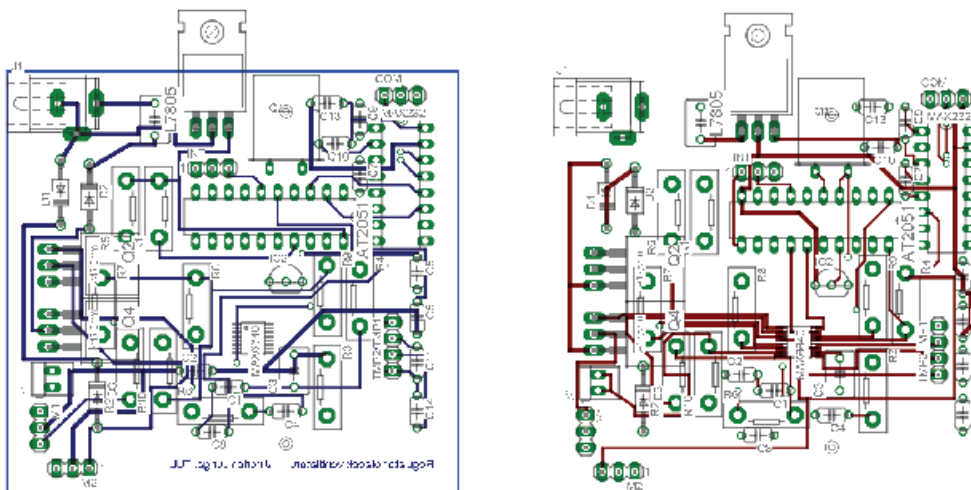
Externí senzory teploty - slouží k připojení externích senzorů teploty. Senzorem se myslí tranzistor zapojený (B+E) – C.

## 5.2 Návrh plošného spoje

Desku plošného spoje (DPS) jsem navrhoval v software Eagle od firmy Cadsoft. Pracoval jsem se součástkami THT (vývodová montáž) i SMT (povrchová montáž), proto jsem zvolil oboustranný DPS. Snažil jsem se dbát na to, aby veškeré konektory byly na kraji desky pro lepší přístup. Na spodní straně je „rozlitá měď“ pro omezení rušení okolních spotřebičů nebo součástek. Tuto desku, o celkových rozměrech 6x6cm, lze přišroubovat například k vnitřní stěně počítače, zdroje nebo zařízení, jejíž teplotu bude regulátor regulovat.



Obr. 5.2 - schéma regulačního obvodu



Obr. 5.3 - deska plošného spoje regulátoru topného tělesa

### **5.3 Realizace a testování funkčního vzorku**

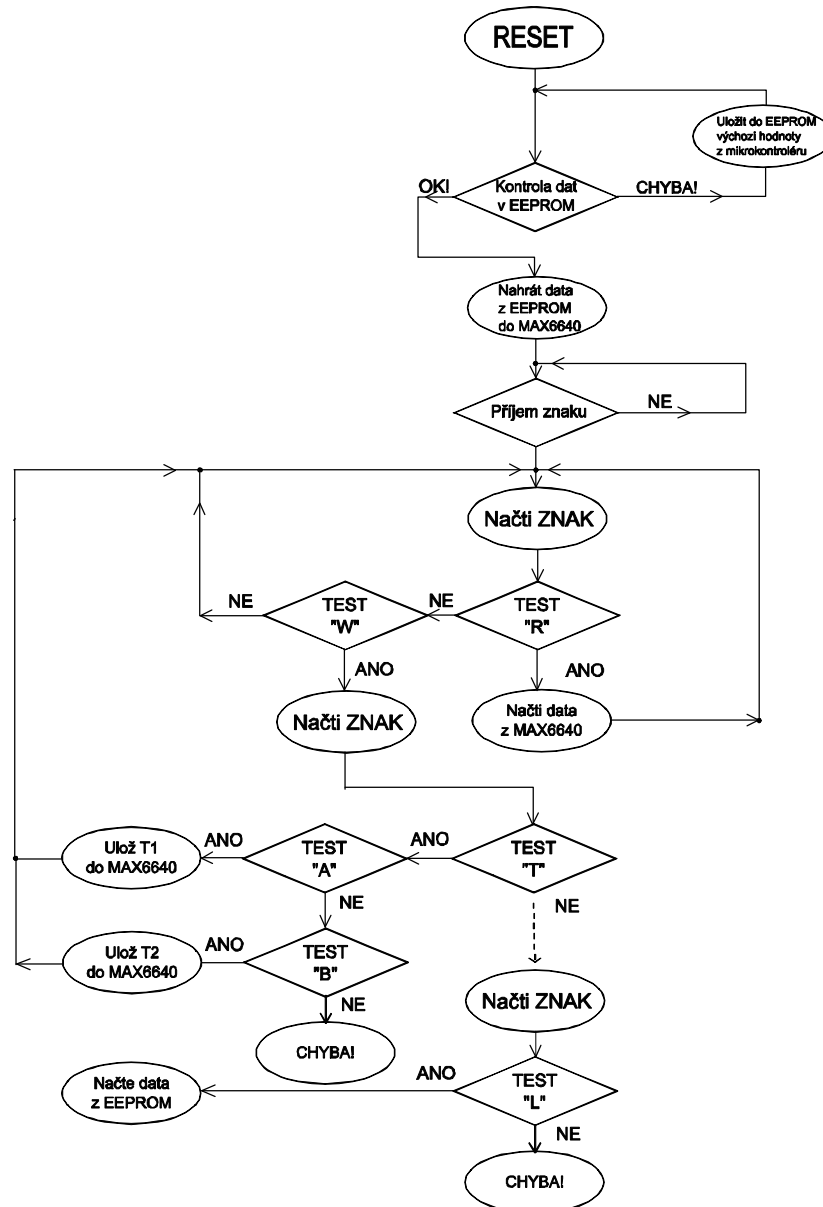
Nejprve jsem celé zapojení realizoval na nepájivém poli a odzkoušel, zda je schopné spolehlivě fungovat. Po té jsem v laboratoři PCB Lab nechal zhotovit desku plošného spoje, navrženou v programu Eagle, jenž byl i součástí výuky v Elektrických zařízeních.

DSP (deska plošného spoje) bylo nejprve nutné osadit součástkami. Začal jsem obvodem MAX6640, jelikož byl nejmenší a jeho pájení vyžadovalo největší úsilí. Zásadou dobrého vybavení v laboratoři pro SMD montáž a demontáž součástek nebyl ani velký problém tak malou součástku zapájet. Běžně je totiž nutné opatřit DSP nepájivou maskou, aby nedošlo ke „slití“ nožiček obvodu. Následně jsem za pomoci voltmetru měřil napětí a proudy v obvodu, zda souhlasí s návrhem. Vše se zdálo být v pořádku, nastal proto test komunikace s regulátorem. Jelikož jednočipový počítač Atmel AT89C2051 potřebuje k nahrání programu do paměti externí programátor, nahradil jsem ho provizorně mikrokontrolérem Dallas DS89C430, který lze programovat přímo po sériové lince bez nutnosti vlastnit speciální programátor. Nezbývalo nic jiného, než zapojit k mikročipu tzv. loader a převodník úrovní z RS232 na TTL a z patice pro AT89C2051 vyvést potřebné piny do nepájivého pole.

Vyzkoušel jsem komunikaci mikrokontrolér – MAX6640 tím, že jsem postupně na všechny adresy (rozsah 0-255) posílal inicializační impuls a čekal jsem potvrzení. Regulátor by se měl ozvat na adrese 05Eh a skutečně tomu tak bylo. Zpočátku se však vyskytly problémy, dány špatným časováním protokolu SMBus. Toto bylo velmi jednoduše vyřešeno, když jsem zvýšil zpoždovací smyčku asi o 30 instrukcí, čemuž při frekvenci krystalu 12 MHz odpovídá asi 30  $\mu$ s. Dále už nebyl problém přečíst či zapsat libovolný příkaz do regulátoru.

Testování čtení a zápisu do externí paměti EEPROM jsem prováděl nezávisle na zbytku obvodu. Nejsložitější bylo naprogramovat přesné zpoždovací smyčky, na kterých závisela celá komunikace.

## 6 Software pro konfiguraci regulátoru



Obr. 6.1 - vývojový diagram

### Význam použitých zkratk ve vývojovém diagramu:

- R...Načtení parametrů (teplota, otáčky ventilátoru,...) a zobrazení v aplikaci
- L...Načte aktuální data v EEPROM
- S...Uloží všechny nastavené parametry do MAX6640 a zároveň do EEPROM
- TA...teplota čidla č. 1
- TB...teplota čidla č. 2
- MA...max. otáčky ventilátoru č. 1
- MB...max. otáčky ventilátoru č. 2
- NA...minimální teplota č. 1, kdy se začne chladit

NB... minimální teplota č. 1, kdy se začne chladit

Dle nastavení v aplikaci, program automaticky stanoví maximální otáčky ventilátoru (8000 ot./min. a 4000 ot./min.).

## 6.1 Volba vývojového prostředí

Protože jsem programoval mikrokontrolér řady 8051, výběr vývojového prostředí souvisel s kapitolou 3.7.2 – Software pro programování. Využil jsem kombinaci jednoduchého editoru PsPad a vývojového prostředí  $\mu$ Vision, kde jsem testoval a kompiloval kód pro odzkoušení přímo v čipu. Pro komunikaci s regulátorem jsem díky naprogramovanému protokolu mohl použít i program hyperterminál (součást MS Windows). Uživatelské prostředí pro zobrazování a ukládání parametrů je vytvořeno v prostředí Borland Delphi 7.



Obr. 6.2 - použitá vývojová prostředí

## 6.2 Komunikace s regulátorem

Mikrokontrolér zprostředkovává komunikaci mezi regulátorem (MAX6640) a osobním počítačem (uživatelská aplikace) a využívá třech komunikačních protokolů – SMBus (mikrokontrolér – regulátor), 1-Wire (paměť EEPROM – mikrokontrolér) a RS232 (osobní počítač – mikrokontrolér).

### 6.2.1 Komunikační protokol

Naprogramoval jsem jednoduchý komunikační protokol, jehož cílem je odchyťvat znaky na sériovém portu, porovnat je s možnostmi, a vykonat požadovanou akci. Komunikační

protokol reaguje řetězcem „OK“ na potvrzení příkazu nebo „ERR“ hlásící chybu komunikace.

### 6.2.2 Zápis dat do regulátoru

Komunikace se uskutečňuje prostřednictvím protokolu SMBus, který je podrobně popsán v kapitole 3.5.2. Jakmile se v mikrokontroléru nastaví příznak RI (přijátého bytu), znamená to, že nadřazený systém (osobní počítač) vyslal data. Pokud se jedná o znak charakteru „zápis“ (Tx, Cx, Mx), vyhodnotí se typ dat a k tomu odpovídající adresa na kterou se bude zapisovat. Následně je očekáván příjem dvou bytu (dvou znaků) představující číselnou hodnotu (teplota, otáčky...). Tyto data se převedou do hexadecimální podoby a uloží se na danou adresu do regulátoru (MAX6640). Obrázek (3.9) znázorňuje průběh datového rámce pro zápis. Vyslání začíná počáteční podmínkou (CLK a SDA log. 1). Následuje adresa pro zápis, potvrzení (ACK) a adresa registru, do kterého se budou data ukládat (dle typu dat), potvrzená ACK. Jako předposlední se vyšle hodnota dat, také potvrzena ACK. Komunikace je ukončena ukončovací podmínkou – SDA log. 0, CLK log. 1.

#### Čtení/Zápis dat z počítače do externí paměti

Externí paměť komunikuje s mikrokontrolérem prostřednictvím sběrnice 1-Wire. Data se posílají po dvou vodičích, jedním signálovým a společnou zemí. Protokol je detailně popsán v kapitole 3.5.4. Zápis do externí paměti EEPROM spočívá v opakovaném čtení dat z adres regulátoru MAX6640, ukládání jich do bufferu (místo v paměti mikrokontroléru) a prostřednictvím 1-Wire protokolu k zapisování do EEPROM.

### 6.2.3 Čtení dat z regulátoru

Podobně jako zápis, i čtení probíhá podle předepsaných pravidel a respektuje se formát datového rámce pro čtení (READ) viz, obrázek (3.9). Hlavním rozdílem od zápisu je, že datový rámec je de facto rozdělen na dva (dvě počáteční podmínky pro začátek komunikace).

## 6.3 Nastavení parametrů regulátoru v jazyce vyšší úrovně

Využil jsem komponenty, která dokáže otevřít a obsluhovat sériové porty v PC. Uživatel má na výběr pouze z dostupných a volných portů v počítači. Po kliknutí na tlačítko

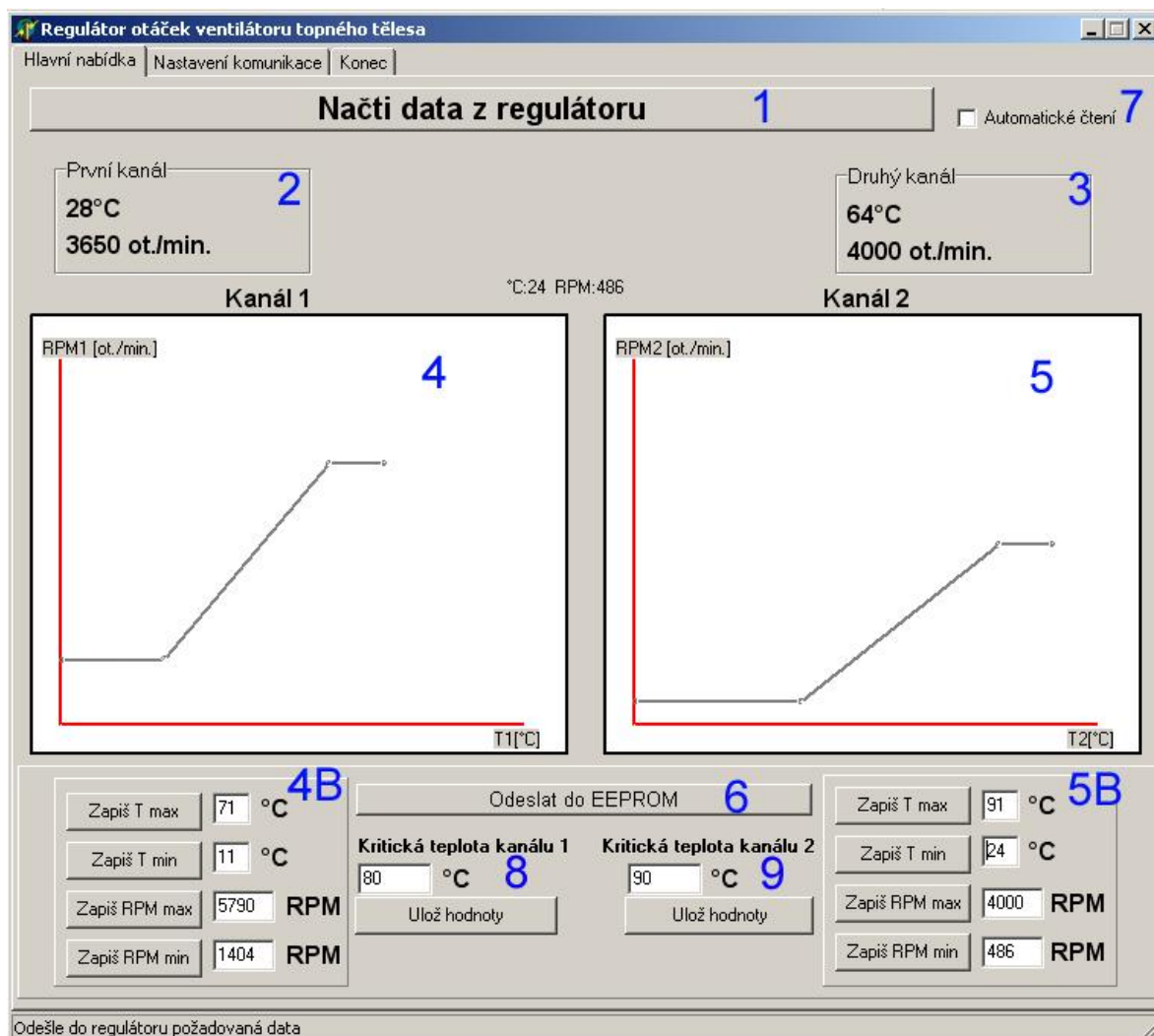
„připojit“ založí komunikační kanál mezi PC a zařízením. Čtení a zapisování dat se děje s voláním funkcí pro čtení/zápis. U zápisu se funkci předá jako parametr odesílaný znak.

### 6.3.1 Čtení/Zápis dat do regulátoru

Po navázání spojení regulátor - osobní počítač, aplikace zasílá v intervalech 2,5 sec nebo pouze po kliknutí na tlačítko „Načti data u regulátoru“ mikro počítači požadavky na zaslání aktuálních hodnot teploty a otáček. Po rozhraní RS 232 tedy vyšle znak R (read) a čeká na příjem. Přicházející data se shromažďují v zásobníku (indexované pole znaků) a k zobrazení dojde až po doručení celého řetězce, odděleného ukončovacím znakem „OK“. Data jsou zasílána postupně a právě na základě rozdělovacího znaku „OK“ jsou ukládána vzestupně do paměti počítače. Pro ilustraci - mikro počítač vyšle posloupnost dat teplota1, teplota2, otacky1, otacky2. V poli dat na pozici '[0]' bude hodnota teploty z prvního kanálu, na pozici '[1]' hodnota teploty z druhého kanálu atd. Konkrétně u teploty nemusí docházet k žádnému převodu dat jako u otáček, kde maximálním otáčkám odpovídá desítkově hodnota 255.



## 6.4 Grafické uživatelské rozhraní (GUI)



Obr. 6.3 – úvodní obrazovka programu

### Vysvětlení:

- 1...Jeli aplikace spojena s mikrokontrolérem, dojde k načtení parametrů.
- 2... Zobrazení hodnot teplota a otáčky z prvního kanálu regulátoru.
- 3... Zobrazení hodnot teplota a otáčky z druhého kanálu regulátoru.
- 4...Grafické nastavení parametrů regulátoru pro kanál č. 1, změna se provádí posouváním křivky.
- 4B...Číselné nastavení parametrů regulátoru pro kanál č. 1.
- 5...Grafické nastavení parametrů regulátoru pro kanál č. 2, změna se provádí posouváním křivky.
- 5B...Číselné nastavení parametrů regulátoru pro kanál č. 2.

6...Odešle všechna data z oblastí 4B a 5B do mikrokontroléru, který je pak uloží do paměti EEPROM

7...Možnost automatického aktualizování hodnot z regulátoru každých 2500 ms.

8...Nastavení kritické teploty na prvním kanálu. Po jejím dosažení se aktivuje výstup ALARM a měřená teplota bude indikována červeným písmem

9... Nastavení kritické teploty na druhém kanálu. Po jejím dosažení se aktivuje výstup ALARM a měřená teplota bude indikována červeným písmem

Při tvorbě jsem kladl důraz na jednoduchost řídicího programu, a proto zde není možnost nastavení úplně všech parametrů regulátoru. Komunikační protokol je natolik flexibilní, že není problém do budoucna program rozšířit o další funkce vztahující se k zápisu/čtení dat z regulátoru.

Po spuštění je program nečinný, můžeme pouze nastavovat parametry offline. K přechodu do režimu online je potřeba se přepnout do záložky „Nastavení komunikace, tam vybrat PORT, na kterém je připojen regulátor a kliknout na tlačítko „Připojit“. Nyní můžeme zpět v záložce „Hlavní nabídka“ ukládat a číst nastavení z regulátoru. Zobrazené hodnoty jsou reprezentovány celočíselně. Program automaticky rozhoduje o maximálních otáčkách ventilátorů a to mezi 4000 a 8000 ot./min. Pro představu - obsluha navolí maximální teplotu 60 °C a maximální otáčky 4580 ot./min. Jelikož jsou otáčky větší než spodní hranice (4000 ot./min), dojde k automatickému nastavení limitu 8000 ot./min.

## Závěr

Podařilo se mi navrhnout regulátor pracující s číslicovými signály a komunikující po sériové lince. Hlavním prvkem obvodu se stal integrovaný obvod MAX6640, který zajišťuje měření teploty a samotnou regulaci na dvou nezávislých kanálech. Výstupní PWM signál vykazoval konstantní nosnou frekvenci v celém rozsahu změny střídy PWM. Při generování PWM signálu procesorem AT89C2051 jsem takovýchto výsledků nedosáhl. Bylo zajímavé pozorovat, jak se nosná frekvence mění se změnou střídy a to až o 15 Hz (tedy skoro o polovinu při modulační frekvenci 33 Hz u MAX6640). Během výzkumu jsem testoval i regulátor s obvodem MAX6641, který se od MAX6640 liší zejména tím, že nemá senzor otáček ventilátoru (není zde zpětná vazba) a dovoluje měřit a obsluhovat pouze jeden kanál.

Jedny z prvních experimentů byly založeny pouze na snímání teploty z externího čidla, jehož výstupem je 12bitový digitální signál a ostatní části regulace obstará jednočipový počítač. Ukázalo se, že tento způsob by kladl podstatně větší nároky na znalost regulačních algoritmů – bylo by nutné naprogramovat řídicí algoritmus založen na PSD regulátoru. V tomto případě byl použit senzor teploty MAX6627.

Součástí obvodu je i programovatelná externí paměť, kterou bylo zapotřebí obvod doplnit, protože jednočipový počítač AT89C2051 neuchovává data po odpojení od napájení. Velmi jednoduchá koncepce 1 vodičové komunikace se z důvodu absence rozhraní 1-Wire v AT89C2051 stala složitou. Softwarová varianta protokolu zabírá téměř třetinu paměti mikroprocesoru, proto by bylo vhodné v další generaci regulátoru opatřit obvod externí pamětí komunikující po sběrnici I<sup>2</sup>C (SMBus).

Na prudkou změnu teploty (ohřev součástky zapalovačem) regulátor zareagoval roztočením ventilátoru, na příslušném kanálu, na 100% a nastavením výstupů indikujících překročení povolené teploty. To vše se zpožděním přibližně jedné sekundy. Ventilátor byl aktivní ještě 5 °C pod zadanou minimální teplotou, což koresponduje s katalogovými údaji.

Dalo by se závěrem říct, že tento regulátor splňuje požadavky na regulaci teploty integrovaných obvodů, výkonových zdrojů a jiných teplo produkujících předmětů.

## Literatura

- [1] Vojáček A.: *Inteligentní senzory teploty různých výrobců* [Online], [Citace: 15. únor 2007.], URL: <<http://automatizace.hw.cz/view.php?cislocclanku=2005090901>>
- [2] Špringl V.: Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty [Online], [Citace: 3. duben 2007], URL: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty---polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>
- [3] BOWTHORPE THERMOMETRICS: *PTC THERMISTORS* [Online], URL: <<http://www.thermometrics.com/assets/images/ptcnotes.pdf>>
- [4] Kreidl M.: *Měření teploty - senzory a měřicí obvody*, BEN, ISBN 80-7300-145-4
- [5] Termoelektrické jevy, [Online], [Citace: 01. květen 2007], URL: <[http://moon.felk.cvut.cz/~pju/Jak/\\_phys/f577/start.html](http://moon.felk.cvut.cz/~pju/Jak/_phys/f577/start.html)>
- [6] Tichý M.: *Jednočipové mikroočítače*, [Online], [Citace: 6. duben 2007], URL: <<http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/kap9/jednocpoc.html>>
- [7] Hrázský J.: *Mikroočítače a počítače I,II.*, Informatorium, 1996, ISBN 80-85427-92-3
- [8] Dudáček K.: *Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN*, [Online], [Citace 7. únor 2007], URL: <[http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova\\_rozhrani.pdf](http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova_rozhrani.pdf)>
- [9] Fuksa M.: *Sériový kanál*, [Online], [Citace: 29. prosinec 2006], URL: <<http://www.volny.cz/fuksam/povidani/serlinka.htm>>
- [10] Products, Maxim Integrated: *2-Channel Temperature Monitor with Dual Automatic PWM Fan-Speed Controller*, [Online], [Citace: 20. prosinec 2006], URL: <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX6640.pdf>>
- [11] Products, Maxim Integrated : *1-Wire interface*, [Online], [Citace: 3. květen 2007], URL: <[http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote\\_number/3989](http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/3989)>
- [12] Wikipedia.org: *Pulse-width modulation*, [Online], [Citace: 30. duben 2007.] <[http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation)>
- [13] Zeman M.: *Jak dodělat měření otáček u ventilátorů*, [Online], [Citace: 15. březen 2007], URL: <<http://www.zive.cz/h/Testcentrum/AR.asp?ARI=108358>>
- [14] Humlhan J.: *Zajímavá zapojení 3*, BEN, 2005, ISBN 80-7300-152-7.
- [15] Wikipedia.org.: *RISC*, [Online] [citace 6. březen 2007], URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/RISC>>

- [16] BOWTHORPE THERMOMETRICS: *NTC THERMISTORS.*, [Online], [Citace: 6. březen 2007], URL: <<http://www.gesensing.com/thermometricsproducts>>
- [17] Dlouhý M.: *Komunikace*, [Online], [Citace: 20. duben 2007] , URL: <<http://robotika.cz/guide/comm/en>>
- [18] Vlček J.: *Základy elektrotechniky*, [Online], [Citace: 27. únor 2007], URL: <<http://elektro.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3898>>

## ***Obsah přiloženého CD***

- Text bakalářské práce ve formátech DOC a PDF
- Použitá literatura a texty v elektronické podobě
- Schéma elektronického obvodu se schématem DPS
- Spustitelný program na nastavování parametrů regulátoru
- Zdrojové kódy realizovaného programu na nastavování parametrů regulátoru
- Zdrojové kódy programu mikrokontroléru (komunikační protokoly)
- Použité obrázky v této publikaci
- Zdrojové kódy experimentu měření teploty