

# **Mikroprocesorový regulátor s připojením na PC**

Microcontroller regulator with connection to PC

Bc. Halgaš Rostislav

---

Diplomová práce  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Rostislav HALGAŠ**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Mikroprocesorový regulátor s připojením na PC**

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte koncepci mikropočítačově řízeného regulátoru pro řízení časového průběhu žádané veličiny s možností nastavení parametrů z osobního počítače.
2. Podle navržené koncepce vytvořte schéma zapojení a realizujte prototyp zařízení.
3. Vytvořte programové vybavení pro použitý mikropočítač a otestujte funkci zařízení.
4. Vytvořte programové vybavení pro PC pro nastavování parametrů regulátoru

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry. Praha : BEN – technická literatura, 2004. 280 s. ISBN 80-7300-077-6.
2. PINKER, Jiří. Mikroprocesory a Mikropočítače. Praha : BEN -- technická literatura, 2004. 220 s. ISBN 80-7300-110-1.
3. BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha : BEN -- technická literatura, 2003. 664 s. ISBN 978-80-7300-148-3.
4. VLACH, Jaroslav, VLACHOVÁ, Viktorie. Počítačová rozhraní přenos dat a řídicí systémy. Praha : BEN – technická literatura, 2002. 176 s. ISBN 80-7300-010-5.
5. CATSOULIS, John. Designing Embedded Hardware. OReilly Media, 2005. 400 s. ISBN 978-0-596-00755-3.
6. VLACH, Jaroslav. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha : BEN – technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 9788086056661.
7. MARTÍNEK, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. Praha: BEN -- technická literatura, 2004. 200 s. ISBN 80-7300-114-4.
8. NEVŘIVA, Pavel. Analýza signálů a soustav. Praha: BEN -- technická literatura, 2002. 670 s. ISBN 80-7300-004-0.
9. PIC24F16KA102 [online]. Microchip, 2009. Datasheet. Dostupný z WWW: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC24F16KA102\\_Family\\_datasheet\\_39927](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC24F16KA102_Family_datasheet_39927)

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Jan Dolinay**

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

**19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce:

**8. června 2010**

Ve Zlíně dne 19. února 2010



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

*děkan*



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

*ředitel ústavu*

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem regulátoru teploty v místnostech, který využívá jednoduchou dvoupolohovou regulaci (ON/OFF), je doplněna o adaptivní nastavení periody vzorkování teploty. Regulátor využívá moderní součástky, jako například integrovaný snímač teploty komunikující s procesorem po sběrnici I<sup>2</sup>C™. Vyrobená a otestována byla zjednodušená vývojová verze regulátoru, jedna kapitola se zabývá rozšířením regulátoru o bezdrátovou síť snímačů teploty, tlaku a kombinovaného snímače teploty a vlhkosti, OLED displej, bezdrátovou komunikaci s PC.

Klíčová slova:

Akční člen, akční veličina, bistabilní relé, čidlo, ICSP, Microchip, mikrokontroler, OLED, regulátor, regulovaná soustava, RS232, senzor, snímač, stabilizátor s nízkým úbytkem, teplota, tlak, USB, vlhkost,

## ABSTRACT

This thesis deals with design of room temperature regulator using a simple two-position control (ON/OFF) with supplemented adaptive sampling period of temperature measurement. The regulator uses modern components such as integrated temperature sensor which communicates with the processor by I<sup>2</sup>C™. Constructed and tested was a simplified version of the regulator, one chapter deals with extending the controller with wireless network of temperature sensors, pressure sensors, and combined temperature and humidity sensors, OLED display and wireless communication with a PC.

Keywords:

Actuator, action variable, bistable relay, controlled system, humidity, ICSP, Low Drop Voltage Regulator, Microchip, microcontroler, OLED, regulator, RS232, sensor, temperatute, pressure, USB

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce za trpělivost a rady, dále bych chtěl poděkovat mým spolupracovníkům za trpělivost a toleranci k mým studijním povinnostem.

**Prohlašuji, že**

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

**Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLoty</b> .....	<b>13</b>
1.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK .....	13
1.2 MĚŘENÍ TEPLoty ODPOROVÝMI SENZORY .....	13
1.3 KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY .....	15
1.4 POLOVODIČE, TERMISTORY NTC.....	15
1.5 VYUŽITÍ PN PŘECHODU PRO MĚŘENÍ TEPLoty .....	16
<b>2 ALGORITMUS REGULACE</b> .....	<b>18</b>
2.1 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT ZE SNÍMAČE .....	18
2.2 DVOUPOLOHOVÁ REGULACE .....	18
2.2.1 Hystereze .....	19
2.2.2 Dvoupolohová regulace integrační regulované soustavy bez setrvačnosti.....	19
2.2.3 Dvoupolohová regulace proporcionální soustavy s dopravním zpožděním a se setrvačností 1. řádu .....	20
<b>3 STRUČNÝ POPIS SÉRIOVÝCH SBĚRNIC I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> A SPI</b> .....	<b>22</b>
3.1 SBĚRNICE I <sup>2</sup> C <sup>TM</sup> .....	22
3.2 SBĚRNICE SPI.....	23
<b>4 CHARAKTERISTIKA NĚKTERÝCH SOUČÁSTEK</b> .....	<b>25</b>
4.1 RODINA MIKROKONTROLERŮ PIC24F16KA102.....	25
4.2 JEDNOTLIVÁ HRADLA V POUZDRU SOT23-5.....	26
4.3 LOW-DROP STABILIZÁTOR 3,3V MCP1701 .....	27
4.4 KOMPLEMENTÁRNÍ DVOJICE MOSFET ZXMC3A17DN8TA.....	27
4.5 SNÍMAČ TEPLoty AD7415 .....	28
4.5.1 Princip měření teploty .....	29
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>30</b>
<b>5 VÝVOJOVÁ VERZE REGULÁTORU</b> .....	<b>31</b>
5.1 ČTYŘTÝDENNÍ CYKLUS REGULACE .....	32
5.2 KOMUNIKACE REGULÁTORU S PC .....	32
<b>6 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ VÝVOJOVÉ VERZE REGULÁTORU</b> .....	<b>33</b>
6.1 BLOKOVÉ SCHÉMA REGULÁTORU .....	33
6.2 OBVOD RESETU MIKROKONTROLERU .....	34
6.3 OSCILÁTORY, VOLBA KRYSTALŮ A OKOLÍCH SOUČÁSTEK .....	35
6.3.1 Primární oscilátor .....	37



6.3.1.1	UART.....	37
6.3.1.2	I <sup>2</sup> C™.....	37
6.3.2	Sekundární oscilátor.....	38
6.3.3	Měření napětí záložní baterie.....	38
6.3.4	Snížený odběr při napájení ze záložní baterie.....	39
6.3.5	Obvod ovládání cívky relé.....	40
6.4	KOMUNIKACE S PC.....	42
6.5	PROGRAMOVÁNÍ MIKROKONTROLERU.....	42
<b>7</b>	<b>SCHÉMA A DPS VÝVOJOVÉ VERZE REGULÁTORU.....</b>	<b>43</b>
7.1	FOTOGRAFIE PLOŠNÉHO SPOJE REGULÁTORU S POPISKY.....	46
<b>8</b>	<b>PROGRAM PRO KOMUNIKACI PC S REGULÁTOREM.....</b>	<b>48</b>
8.1	ALGORITMUS URČENÍ ČÍSLA TÝDNE CYKLU REGULACE.....	49
8.1.1	Výpočet dne v týdnu pro datum dle Gregoriánského kalendáře.....	50
8.1.2	Výpočet čísla týdne pro datum dle Gregoriánského kalendáře.....	50
8.1.3	Kompletní algoritmus pro určení týdne cyklu regulace v jazyce Pascal.....	51
8.2	ARCHIVACE PRŮBĚHU REGULACE.....	51
8.2.1	Formát souboru zaznamenaných dat.....	52
<b>9</b>	<b>PROGRAM PRO MIKROKONTROLER.....</b>	<b>53</b>
9.1	KOMUNIKACE SE SNÍMAČEM TEPLoty AD7415.....	53
9.2	REGULACE ON/OFF S ADAPTIVNÍM NASTAVENÍM PERIODY VZORKOVÁNÍ.....	53
9.2.1	Výpočet periody vzorkování.....	55
9.3	ČEKACÍ SMYČKY.....	59
9.4	OPTIMALIZACE PROGRAMU PRO MIKROKONTROLER.....	61
<b>10</b>	<b>TESTOVACÍ SESTAVA REGULÁTORU.....</b>	<b>63</b>
<b>11</b>	<b>ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU.....</b>	<b>65</b>
11.1	BEZDRÁTOVÁ SÍŤ ČIDEL ZIGBEE™.....	67
11.2	POPIS NĚKTERÝCH OBVODOVÝCH ČÁSTÍ A SOUČÁSTEK.....	68
11.2.1	Indikace napětí baterie.....	68
11.2.2	Obvod výběru zařízení SPI.....	70
11.2.3	Modul klávesnice rozšířené verze regulátoru.....	70
11.2.4	Modul displeje čidla.....	71
11.2.5	Snímač tlaku MPX4250A.....	71
11.2.5.1	StepUp DC/DC měnič L6920DB.....	71
11.2.5.2	Zdroj referenčního napětí pro AD převodník.....	72
11.2.6	Snímač vlhkosti a teploty SHT71, SHT75.....	73
11.2.7	Záložní zdroj energie.....	73
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>74</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>80</b>

SEZNAM TABULEK.....	82
SEZNAM PŘÍLOH.....	83

## ÚVOD

O elektroniku a programování jsem se zajímal již od základní školy, ale teprve díky vysoké škole jsem získal podstatně větší rozhled a nadhled, ne jen co se týká matematického aparátu používaného v oborech elektroniky a elektrotechniky, ale také možností součástkové základny, využití moderních komponent, návrhu plošných spojů v SMT technologii a kusová „domácí“ výroba s použitím SMD součástek.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLoty

V této kapitole se budeme zabývat základními způsoby měření teploty pomocí odporových a polovodičových senzorů.

### 1.1 Elektrické vlastnosti pevných látek

Pevné látky můžeme rozdělit podle tří základních parametrů [3]:

- Rezistance**  $R[\Omega]$  neboli odpor, je převrácená hodnota vodivosti (konduktance), určuje odpor kladený vodičem procházejícímu elektrickému proudu. Rezistance je vlastnost ideální součástky bez parazitních vlivů, odpor je vlastnost reálné součástky, ta může mít jistou parazitní kapacitu a indukčnost.
- Rezistivita**  $\rho[\Omega\text{m}]$  neboli měrný odpor je odpor na jednotku délky vodiče
- Teplotní součinitel rezistivity**  $\alpha[\text{K}^{-1}]$  je důležitý parametr pro měření teploty. Určuje závislost rezistance vodiče nebo polovodiče na teplotě. Rezistance vodiče se zvyšující se teplotou stoupá (rezistivita je kladná), rezistance polovodiče s teplotou klesá (rezistivita je záporná).

Materiál	$\rho[\Omega\text{m}]$	$\alpha[\text{K}^{-1}]$
Stříbro	$1,62 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Měď	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$4,33 \cdot 10^{-3}$
Hliník	$2,75 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Železo	$9,68 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
<b>Platina</b>	<b><math>10,58 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,92 \cdot 10^{-3}</math></b>
Manganin	$48,2 \cdot 10^{-8}$	$0,002 \cdot 10^{-3}$
Konstantan	$43 \cdot 10^{-8}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Čistý křemík	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$-70 \cdot 10^{-3}$
Křemík typu $n$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	
Křemík typu $p$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	

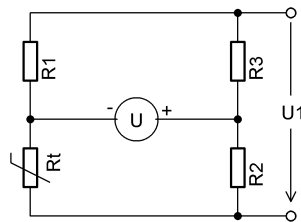
Tabulka 1 Rezistivity a teplotní součinitelé některých materiálů při teplotě 20°C

### 1.2 Měření teploty odporovými senzory

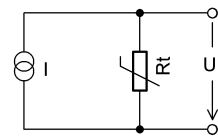
Odporové snímače teploty se často zapojují do odporového můstku, nebo se napájí konstantním proudem. Můstkové zapojení odporového snímače teploty je na obr. 1-1. Na

výstupu je nulové napětí, pokud je můstek vyvážený. Odporů  $R_1$  s  $R_t$  a  $R_3$  s  $R_2$  tvoří dělič napětí, z toho plyne, že můstek bude vyvážený v případě stejných poměrů odporů obou děličů, názorně ve vztahu 1.

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_t}{R_2} \quad (1)$$



Obr. 1-1 Můstkové  
zapojení odporového  
snímače teploty



Obr. 1-2 Odporový  
snímač se zdrojem  
konst. proudu

Změnou odporu  $R_3$  nebo  $R_2$  můstek vyvážíme při dané teplotě, při změně teploty se změní odpor tepelně závislého rezistoru  $R_t$ , napětí  $U_1$  se změní a to bude úměrné aktuální teplotě. Toto napětí můžeme přímo měřit voltmetrem s patřičnou stupnicí, nebo vyhodnocovat další elektronikou (A/D převodník, mikrokontroler...).

Pokud rezistor budeme napájet konstantním proudem (viz. obr. 1-2, změnou odporu rezistoru se změní i napětí na tomto rezistoru dle známého Ohmova zákona. Proud procházející odporovým čidlem musí být tak malý, aby způsobil pouze zanedbatelné vlastní oteplení. U odporových čidel výrobce udává zatěžovací konstantu  $D$ , která číselně odpovídá příkonu, který čidlo zahřeje o 1K nad teplotu okolí. Chybu, kterou způsobí zahřátí čidla, určíme pomocí vztahu 2 [12].

$$\Delta t = \frac{R_t I^2}{D} \quad (2)$$

Dejme tomu že výrobce určí zatěžovací konstantu termistoru  $15\text{mWK}^{-1}$ , termistor má odpor  $100\Omega$ . Protéká jím proud  $10\text{mA}$  a nad teplotu okolí se ohřeje o  $0,67\text{K}$ . Pokud jím bude protékat proud  $1\text{mA}$ , nad teplotu okolí se ohřeje o  $0,0067\text{K}$ .

### 1.3 Kovové odporové senzory

Kovové odporové senzory využívají závislosti odporu kovu na teplotě. Se zvyšující se teplotou se zvyšuje amplituda termických kmitů krystalové mřížky materiálu a zvyšuje se pravděpodobnost srážek elektronů a iontů, zkracuje se volná dráha elektronů a také doba zrychlování částic v elektrickém poli.

Z tabulky 1 plyne, že rezistance kovů s rostoucí teplotou stoupá, ale rezistance polovodičů naopak klesá. Závislost rezistance na teplotě je u kovů téměř lineární, pouze při teplotách blízkých absolutní nule se od lineárního průběhu odchyluje, u některých kovů a slitin dochází k supravodivému stavu, kdy je rezistance nulová.

V lineární části charakteristiky můžeme rezistanci počítat podle vztahu 3 [12]:

$$R = R_1 [1 + \alpha (t - t_1)] \quad (3)$$

Kde  $R_1$  je rezistance a  $\alpha$  je rezistivita při vztažené teplotě  $t_1$ ,  $R$  je počítaná rezistance při aktuální teplotě  $t$ . Pro rezistory jakožto elektronické součástky využívající elektrického odporu jako své základní vlastnosti se používají materiály s malým nebo velmi malým teplotním součinitelem. Zvláště pro měřicí účely v prostředích, kde lze předpokládat změny teploty, které by mohly negativně ovlivnit měření, je nutno použít rezistory s vysokou teplotní stabilitou. Existují rezistory s teplotní stabilitou až 15ppm/°C. ppm je zkratka „část z miliontiny celku“, takže 15ppm/°C znamená, že pokud stoupne teplota o 1°C, změní se hodnota rezistoru o 15 miliontin své hodnoty. Má-li rezistor 100kΩ při 20°C a teplota stoupne o 10°C, hodnota rezistoru se změní na  $(100 + (100/1000000) * 15) * 20 = 100,03k\Omega$ .

### 1.4 Polovodiče, termistory NTC

NTC jsou termistory se záporným součinitelem odporu, jsou to lisované směsi prášků oxidů kovů ( $Fe_2O_3 + TiO_2$ ,  $MnO + CoO$  a jiné). U termistorů NTC se uplatňuje vlastní vodivost polovodiče. Při zvyšující se teplotě se zvyšuje koncentrace volných elektronů a děr a rezistance se zmenšuje. V běžných teplotách je závislost rezistance na teplotě daná vztahem 4 [12]. Závislost rezistance na teplotě je značně nelineární.

$$R = A e^{\frac{B}{T}} \quad (4)$$

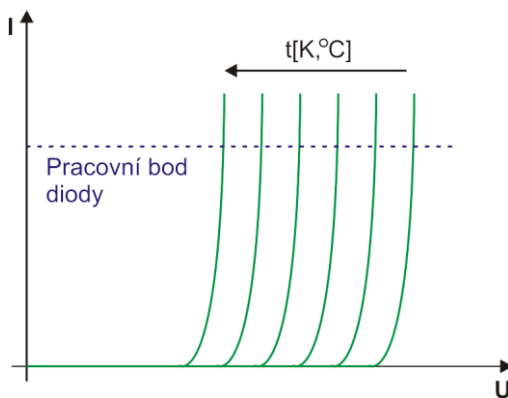
kde  $A$  je konstanta daná rozměry a zároveň materiálem,  $B$  je konstanta daná jen materiálem termistoru.

## 1.5 Využití PN přechodu pro měření teploty

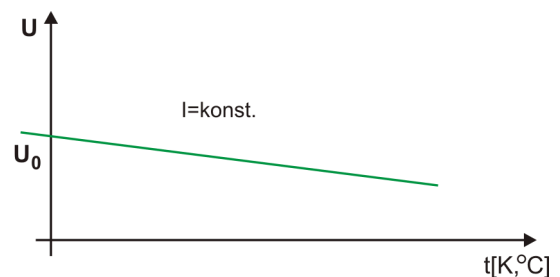
Pro měření teploty můžeme použít i polovodičovou Si diodu, nebo tranzistorovou diodu, která vznikne spojením báze a kolektoru bipolárního tranzistoru. Takto zapojený tranzistor je často používán v integrovaných snímačích teploty. Pokud je tranzistor nebo dioda napájena konstantním proudem, úbytek napětí na PN přechodu má lineární závislost na teplotě podle průběhu VA charakteristiky diody. S rostoucí teplotou se VA charakteristika posouvá k nižším hodnotám. Tuto lineární závislost můžeme vyjádřit vztahem 5 [12],

$$U = U_0 - At \quad (5)$$

kde  $U_0$  je vztažné napětí při  $0^\circ\text{C}$ , koeficient  $A$  se pohybuje v intervalu  $[2; 2,5] \text{ mVK}^{-1}$  a  $t$  je aktuální teplota. Na obr. 1-3 je patrný lineární posun VA charakteristiky s teplotou. Na obr. 1-4 pak lineární závislost napětí  $U_0$  na teplotě při konstantním proudu.



Obr. 1-3 Graf závislosti úbytku napětí na PN přechodu na teplotě



Obr. 1-4 Graf závislosti  $U_0$  na teplotě

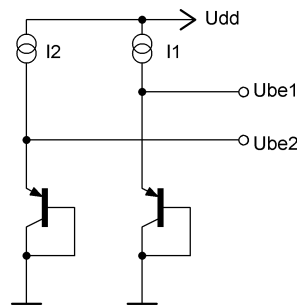
VA charakteristika v propustném směru je však silně závislá na teplotě, tato závislost vnáší do měření nezanedbatelnou nepřesnost. Navíc se tato VA charakteristika liší s každým kusem součástky. Vztah 6 [13], což je rovnice modelu PN přechodu, toto chování popisuje.



$$I = I_S \left[ e^{\left( \frac{qU_{BE}}{\eta kT} \right)} - 1 \right] \quad (6)$$

$T$  je měřená teplota v kelvinech,  $\eta$  je korekční činitel diody (korekce skutečné diody vůči ideální. V případě ideální diody  $\eta=1$ , u skutečné diody může  $\eta$  nabývat až hodnoty 2),  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $q$  je elementární náboj elektronu,  $U_{BE}$  je napětí báze-emitor.  $I_S$  je saturační závěrný proud a  $I$  je použitý pracovní proud, který závisí na technologii a materiálu diody a je značně závislý na teplotě.

Pro precizní měření teploty lze použít dvě diody či tranzistory, kterými budou protékat dva různé proudy a měřit budeme rozdíl napětí  $U_{BE}$  obou diod/tranzistorů.



Obr. 1-5 Princip měření  
teploty dvěma proudy

Proto zapojení na obr. 1-5 platí vztah 7 [13] za předpokladu, že  $I_1 > I_2$ .

$$\Delta U_{BE} = U_{BE1} - U_{BE2} = \eta \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \quad (7)$$

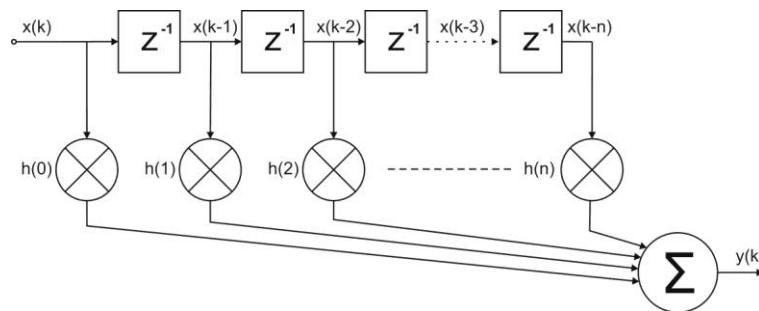
Tranzistory musí mít totožné parametry, toho lze dosáhnout jejich společnou integrací na jeden křemíkový čip. Tato metoda dvou proudů se používá v mnohých integrovaných snímačích teploty řady firem. Po vyjádření teploty ze vztahu 1-7 dostaneme přímý výpočet teploty, ke kterému stačí jen přesné zdroje konstantního proudu a měřit napětí  $U_{BE1}$  a  $U_{BE2}$ .

## 2 ALGORITMUS REGULACE

V této kapitole budou popsány principy vyhodnocení údajů ze snímače a principy algoritmu regulace, použitého v navrženém regulátoru.

### 2.1 Zpracování naměřených hodnot ze snímače

Naměřené hodnoty ze snímače mohou podléhat rušení či náhodným rychlým změnám, které nevypovídají o skutečné teplotě a je nutno je odfiltrovat. To můžeme provést několikabodovým klouzavým průměrem.



Obr. 2-1 (n+1) bodový klouzavý průměr

Rovnice (n+1) bodového klouzavého průměru bude (2-1), (n+1) bodový, protože pořadové číslo prvního bodu začíná nulou  $h(0)$ .

$$y(k) = h(0)x(k) + h(1)x(k-1) + \dots + h(n)x(k-n) \quad (8)$$

V případě, že všechny koeficienty  $h$  jsou si rovny, jedná se o klouzavý průměr s lineárním zapomínáním, a v případě, že jsou rovny  $1/(n+1)$ , výsledný tvar rovnice bude totožný s průměrnou diferencí. V tom případě bude mít výsledná rovnice tvar

$$y(k) = \frac{x(k) + x(k-1) + x(k-2) + \dots + x(k-n)}{n+1} \quad (9)$$

Což je obdoba průměrné diference regulační odchylky:

$$\bar{e}(kT) = \frac{e(kT) + e[(k-1)T] + e[(k-2)T] + \dots + e[(k-n)T]}{n+1} \quad (10)$$

### 2.2 Dvupolohová regulace

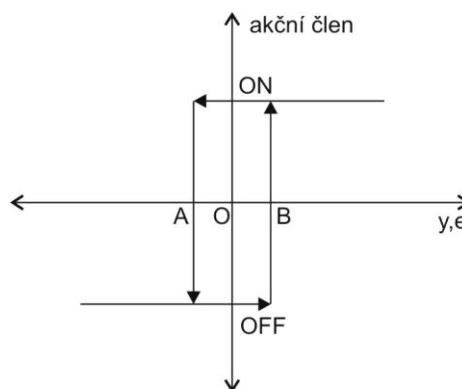
Dvupolohová regulace (ON/OFF) je jedna z nejjednodušších, pro účely regulace teploty místnosti plně dostačující. Přenáší jen dva stavy – zapnuto a vypnuto. Řadí se mezi

nespojité regulátory s reléovou charakteristikou, energie je vedena obvykle spínacím prvkem (relé, stykač, triak, tyristor, SSR...). Výstupním signálem je nespojitá funkce regulační odchylky.

### 2.2.1 Hystereze

Kolem rozhodovací úrovně sepnutí (požadované veličiny  $w$ ) je vhodné zavést hysterezi (což je jedna z úmyslně zaváděných nelinearit), protože jinak by v hodnotách naměřené veličiny těsně kolem hodnoty  $w$  byl akční člen (a případný spínací výkonový prvek) příliš rychle a relativně nahodile spínán, což u stykačů, relé ani u ventilů není vhodné.

Hystereze zavádí odlišné rozhodovací úrovně pro sepnutí a rozepnutí akčního členu podle směru změny (derivace) regulační odchylky (příp. regulované veličiny).



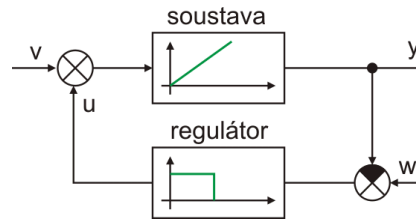
Obr. 2-2 Průběh akční veličiny  
(regulační odchylky) s hysterezí

Bod O je nulová regulační odchylka, body A a B jsou rozhodovací úrovně, při jejichž dosažení se akční člen sepne (B, akční veličina  $u=1$ ) nebo rozepne (A, akční veličina  $u=0$ ).

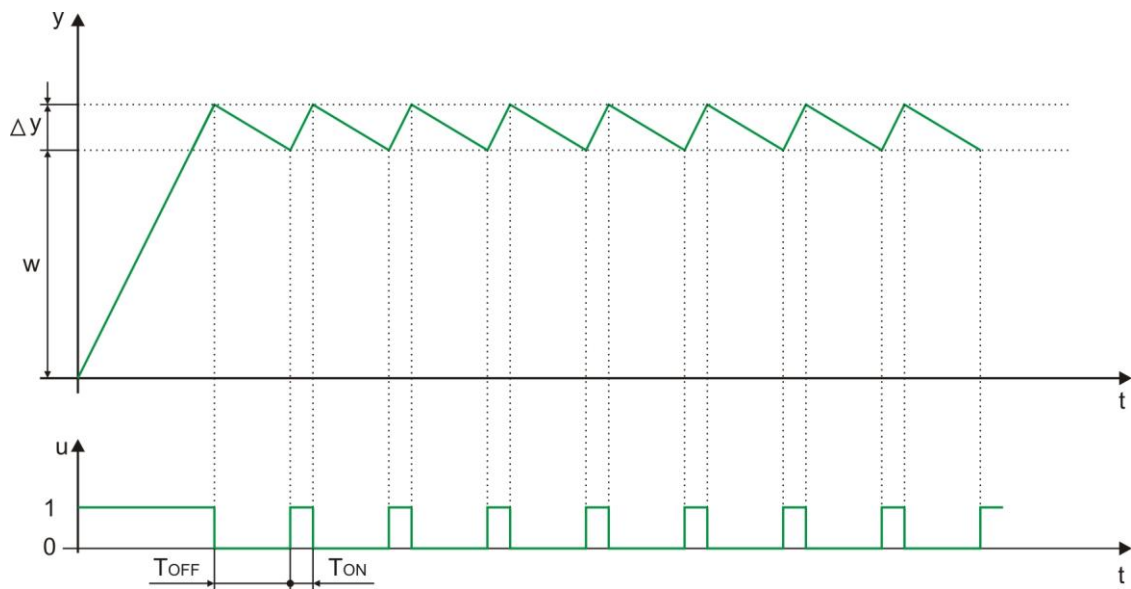
### 2.2.2 Dvupolohová regulace integrační regulované soustavy bez setrvačnosti

Na obr. 2-3 je příklad regulačního obvodu s astatickou regulovanou soustavou a s dvupolohovým regulátorem. Na obr.2-4 je průběh regulace, horní graf je průběh regulované veličiny, spodní graf je průběh akční veličiny (např. relé). Po sepnutí relé regulovaná veličina lineárně stoupá, po dosažení horní hranice dané  $\Delta y$  relé vypne a

regulovaná veličina lineárně klesá až ke spodní hranici, kdy relé opět sepne. Hranice  $\Delta y$  odpovídají oknu hystereze.



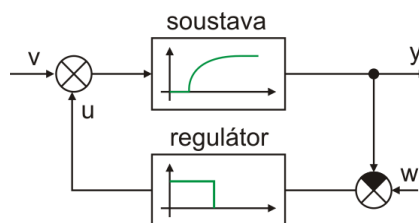
Obr. 2-3 Blokové schéma  
regulačního obvodu  
s dvupolohovým regulátorem



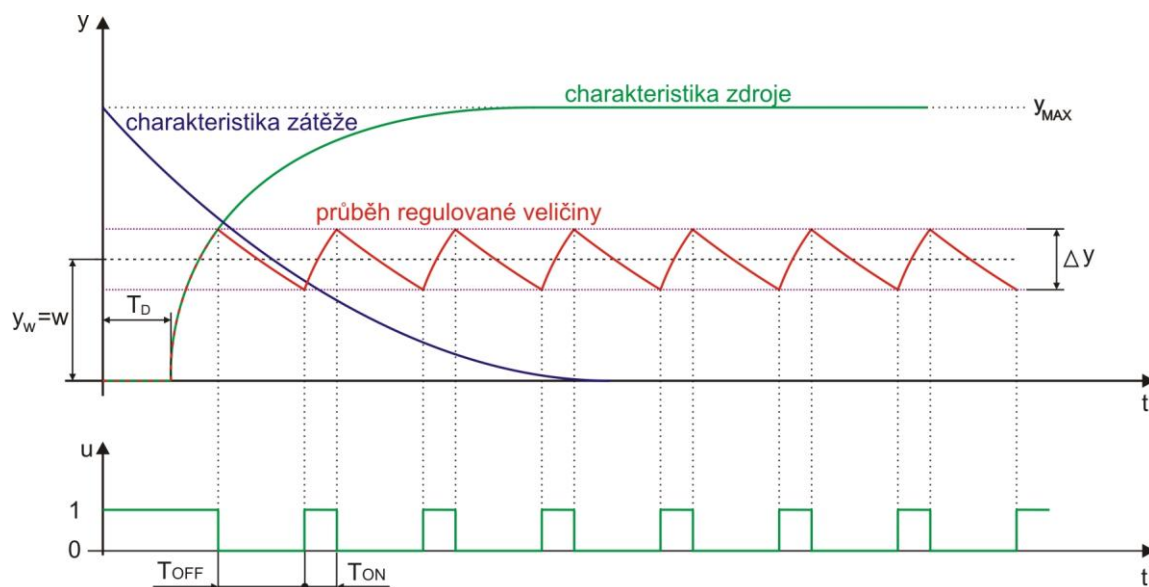
Obr. 2-4 Průběh regulované veličiny a akční veličiny-dvupolohový regulátor a  
proporcionální soustava s dopravním zpožděním se setrvačností 1. řádu

### 2.2.3 Dvupolohová regulace proporcionální soustavy s dopravním zpožděním a se setrvačností 1. řádu

Mezi proporcionální regulované soustavy s dopravním zpožděním a se setrvačností můžeme zařadit i bytové a jiné místnosti. Mezi sepnutím akčního členu a dosažením požadované teploty topného tělesa je jistá prodleva (např. než se topné medium ohřeje a než doteče v trubkách až do topného tělesa), vzduch v místnosti se pak ohřívá postupně podle exponenciální křivky a podobně také chladne.



Obr. 2-5 Blokové schéma reg. obvodu s dvupolohovou reg. a proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu



Obr. 2-6 Průběh regulované veličiny a akční veličiny-dvupolohový regulátor a proporcionální soustava s dopravním zpožděním se setrvačností 1. řádu

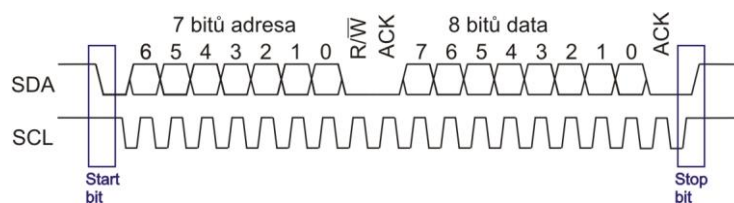
Z grafu na obr. 2-6 plyne, že žádaná hodnota nesmí dosáhnout  $y_{\max}$ , protože její regulace by byla fyzikálně těžko realizovatelná, nasycení regulované soustavy dosáhlo maxima a jedině další vlivy zatěžující soustavu by mohly hodnotu regulované veličiny snížit a pak by měl smysl regulační zásah. Analogie takového případu je RC člen, kdy je kondenzátor střídavě nabíjen přes rezistor ze zdroje konstantního napětí a vybíjen do zátěže s převažující reálnou (odporovou) složkou. Průběh proudu, který protéká kondenzátorem, bude odpovídat průběhu regulované veličiny. Žádaná hodnota by měla dosahovat hodnot 20-80% maximální hodnoty regulované veličiny.

### 3 STRUČNÝ POPIS SÉRIOVÝCH SBĚRNIC I<sup>2</sup>C™ A SPI

#### 3.1 Sběrnice I<sup>2</sup>C™

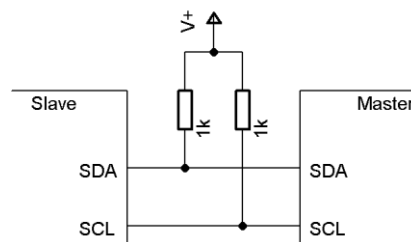
Sběrnice I<sup>2</sup>C™ (Inter Integrated Circuit) je dvou vodičová sériová synchronní sběrnice, jeden vodič je určený pro hodiny, což je jednosměrný výstup z nadřazeného zařízení (master), druhý vodič je pro data a je obousměrný. V jednom okamžiku může jen jedno zařízení vysílat data, ostatní mohou buď přijímat data nebo být nečinná. (Třetím vodičem je zem, společný nulový potenciál).

I<sup>2</sup>C™ může pracovat v single master nebo v multimaster režimu.



Obr. 3-1 Průběh signálů sběrnice I<sup>2</sup>C™

Průběh signálů sběrnice I<sup>2</sup>C™ je na obr. 3-1. Signál SDA jsou data, signál SCL jsou hodiny. V klidovém stavu je SDA i SCL v logické 1, začátek přenosu určuje zařízení master přechodem signálu SDA do log. 0. Poté následuje osm bitů, z nichž sedm je adresa zařízení slave, se kterým chce master komunikovat, jeden bit určuje směr přenosu následujících dat, tedy zda se bude do slave zařízení zapisovat (log. 0) nebo ze zařízení slave číst (log. 1). Po této bitové sekvenci slave vyšle ACK bit, kterým akceptuje přijatou adresu a R/W bit. Poté následují data, za každými osmi bity následuje ACK bit, který vyšle to zařízení, které data přijalo. Těchto sekvencí dat může být několik za sebou, na konci přenosu master vyšle stop bit a sběrnici uvede do klidového stavu.



Obr. 3-2 Zapojení master a jednoho slave zařízení na sběrnici I<sup>2</sup>C™

V klidovém stavu mohou být všechny vývody SDA i SCL ve stavu vysoké impedance, proto je doporučeno zapojit pull-up rezistory o odporu 1-10k $\Omega$ .

Sběrnice I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> může pracovat v několika základních frekvencích hodinových impulzů, kterým zhruba odpovídají rychlosti přenosu. Reálná rychlost přenosu je však o něco nižší, protože kromě datových bitů se přenáší i devátý bit ACK, a na začátku a konci sekvence start a stop bit, které nejsou nositeli informace.

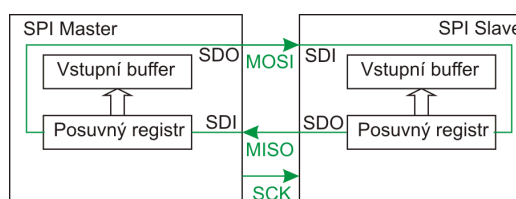
Přenosová rychlost	Označení
10kbps	Low Speed Mode
100kbps	Standard Mode
400kbps	Fast Mode
1Mbps	Fast Mode+
3,4Mbps	High Speed Mode

Tabulka 2 Přenosové rychlosti sběrnice I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup>

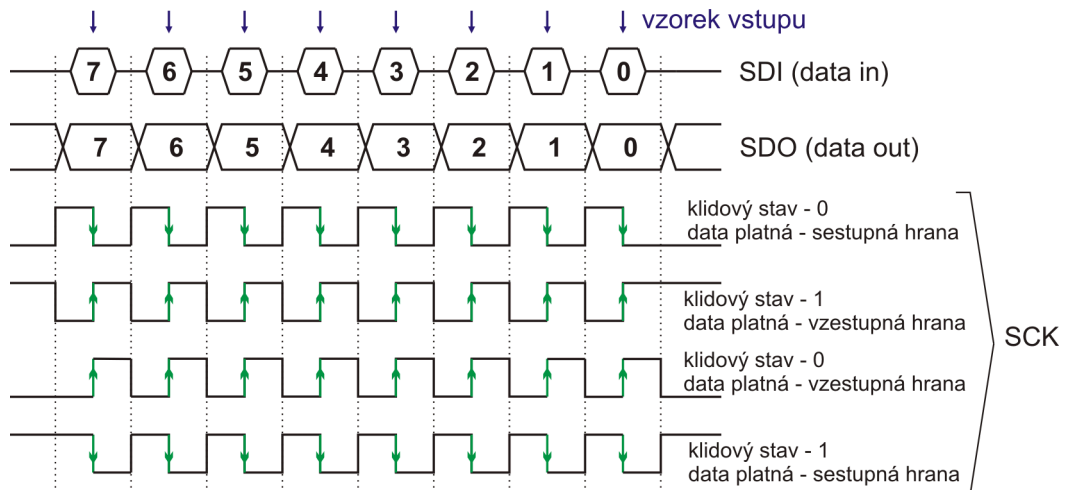
### 3.2 Sběrnice SPI

Sběrnice SPI je třívodičová synchronní sběrnice, běžně je jedno zařízení master a ostatní slave. Jeden vodič přenáší hodinové impulzy (SCK), kterým master určuje platný bit na výstupním datovém vodiči (SDO), nebo vysílá požadavek pro slave zařízení na vyslání platného datového bitu (SDI). Hodinový signál vždy generuje master, SCK je tedy u mastera výstup, u podřízených obvodů je to vstup. (Čtvrtým vodičem je zem, společný nulový potenciál). Data se přenáší dvojicí vodičů MOSI (vodič SDO→SDI z pohledu master-slave) a MISO (vodič SDI→SDO z pohledu master-slave).

K přenosu platného bitu z datového vodiče do posuvného registru může dojít jak při sestupné, tak i vzestupné hraně, to se obvykle volí nastavením konfiguračního registru mikrokontroleru (bit je v procesorech PIC označován CKE). Dále se může lišit klidový stav linky, který je daný logickou hodnotou na hodinovém vodiči, to se opět volí v konfiguračním registru mikrokontroleru (bit je v procesorech PIC označován CKP).

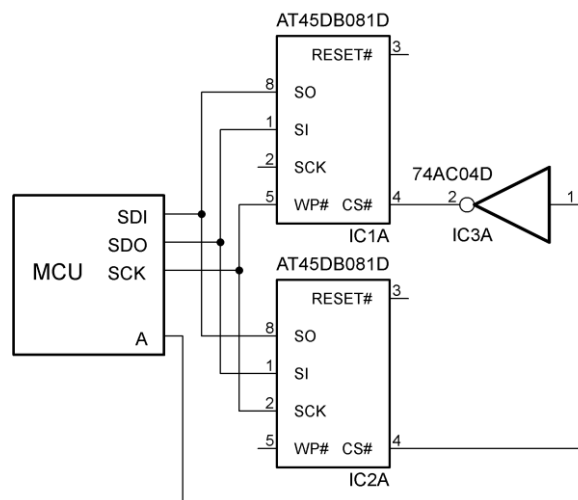


Obr. 3-3 Princip propojení zařízení SPI



Obr. 3-4 Průběhy signálů sběrnice SPI, 4 možné synchronizace

Pokud potřebujeme zapojit více zařízení na sběrnici SPI, musíme každé adresovat. K tomu použijeme vstupy CS (chip select), který výstupy ostatních zařízení uvede do stavu vysoké impedance, pouze právě vybrané zařízení bude mít výstupy aktivní.



Obr. 3-5 Příklad zapojení dvou FLASH pamětí na sběrnici SPI

Na obr. 3-5 je příklad zapojení dvou zařízení na sběrnici SPI. Někteří výrobci označují datové vodiče jinak, např. SI a SO místo SDI a SDO. Hodinové vstupy všech zařízení spojíme s hodinovým výstupem mastera, SDO mastera bude zapojen ve všech SDI podřízených obvodů a SDI mastera zase ve všech SDO podřízených obvodů. Vstupy výběru obvodu (CS) zapojíme buď přímo na výstupní bránu mikrokontroleru, nebo lépe mezi mikrokontroler a zařízení zařadíme převodník BIN/(1z n) (demultiplexer), v tomto případě je to BIN/(1 ze 2) a tvoří jej pouze jeden invertor.



## 4 CHARAKTERISTIKA NĚKTERÝCH SOUČÁSTEK

### 4.1 Rodina mikrokontrolerů PIC24F16KA102

PIC24F16KA102 jsou 16ti bitové mikrokontrolery založené na architektuře RISC. Napájecí napětí se pohybuje v rozmezí 1,8 až 3,6V. V Tabulce 4 [15] jsou uvedené typické proudové odběry při různých napájecích napětích a frekvencích oscilátoru. Proud odebíraný mikrokontrolerem závisí také na zvolených modulech (nepoužité lze vypnout a odběr může být nižší). Obsahují dva oscilátory (s externími krystaly nebo RC obvodem), primární oscilátor je určený pro generování hodinových impulzů pro jádro a periferie, sekundární oscilátor je nízkopříkonový, určený hlavně pro časovač TIMER1 a modul reálného času RTCC, lze jej v konfiguraci procesoru zvolit i jako zdroj hodin pro jádro. Dále umožňuje zvolit jeden z vnitřních RC oscilátorů bez potřeby externích součástek (31kHz, 500kHz a 8MHz). Zpracování většiny instrukcí trvá 1 strojový cyklus a strojový cyklus trvá 2 hodinové cykly.

V tabulce 3 [16] jsou uvedené rozdíly mezi jednotlivými klony mikrokontroleru z uvedené rodiny (liší se pouze velikostí paměti programu a počtem vývodů).

Periferie a moduly:

- Tři 16 bitové časovače TIMER1, TIMER2 a TIMER3. Druhé dva lze nakonfigurovat jako jeden 32 bitový.
- Input capture-hranou impulzu se přenesení stav časovače do bufferu, registru IC1BUFF. Tento modul je vhodný pro měření délky impulzu nebo periody (frekvence) vstupních impulzů.
- Output compare-PWM modulace, využívá dva 16 bitové časovače.
- Sériové sběrnice SPI a I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup>-synchronní sběrnice pro komunikaci se zařízeními jako například displeje, snímače fyzikálních veličin, EEPROM a FLASH paměti atd.
- UART-asynchronní sériový vysílač/přijímač, spolu s externím převodníkem úrovní (např.. MAX3232) je to standardní RS232. Lze zvolit i protokol IRDA.
- RTCC-modul hodin reálného času, kalendář a alarm
- CRC generátor

- 10 bitový A/D převodník
- Komparátor napětí, vhodný pro sledování dosažení nějaké hranice napětí na vstupu
- Programovatelný zdroj referenčního napětí pro komparátor
- digitální vstupně výstupní brány s možností vyvolání přerušení při změně stavu na vstupu (Input Change Notification)
- Hardwarová násobička

Procesor	Vývody	Paměť programu	SRAM	EEPROM	Časovače	Capture input	PWM	UART/IRDA	SPI	I <sup>2</sup> C <sup>TM</sup>	Kanály A/D	komparátory
24F08KA101	20	8KiB	1,5KiB	512B	3	1	1	2	1	1	9	2
24F16KA101	20	16KiB	1,5KiB	512B	3	1	1	2	1	1	9	2
24F08KA102	28	8KiB	1,5KiB	512B	3	1	1	2	1	1	9	2
24F16KA102	28	16KiB	1,5KiB	512B	3	1	1	2	1	1	9	2

Tabulka 3 Klony mikrokontroleru PIC24F16KA102

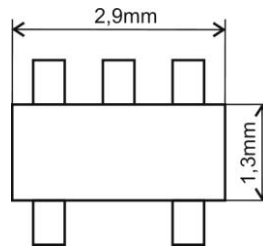
Proud typicky	Napájecí napětí	Frekvence
195μA	1,8V	1MHz
365μA	3,3V	
363μA	1,8V	2MHz
695μA	3,3V	
11mA	3,3V	32MHz
2,25mA	2,5V	8MHz
3,05mA	3,3V	
8μA	1,8V	31kHz (interní oscilátor LPRC)
15μA	3,3V	

Tabulka 4 Pracovní napájecí proudy

## 4.2 Jednotlivá hradla v pouzdru SOT23-5

I v jednoduchých zapojeních je často nutné použít několik logických členů, jejich počet však může být v jednotkách kusů. Klasické integrované obvody obsahují logických členů několik, podle typu a počtu vstupů od jednoho do šesti hradel. Dnes jsou však dostupná i jednotlivá hradla v pětivývodovém pouzdru SOT23, ale i v menších pouzdrech,

tím můžeme značně ušetřit místo na plošném spoji. Tyto obvody často jsou v nízkopříkonovém provedení HCMOS s napájecím napětí od 1,2V. Například 74LVC1G08 je jedno hradlo AND, 74LVC1G00 je hradlo NAND, 74LX1G04STR je jeden invertor.



Obr. 4-1 Pouzdro  
SOT23-5

### 4.3 Low-Drop stabilizátor 3,3V MCP1701

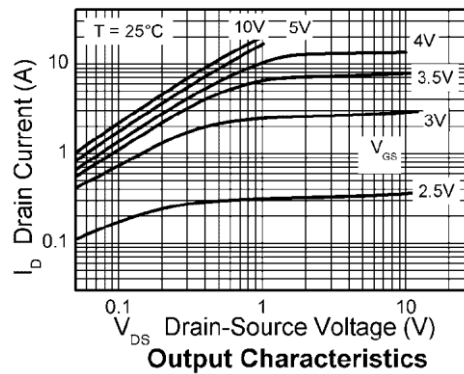
Pro bateriové napájení je vhodné použít stabilizátory s velmi nízkým vlastním odběrem, které zároveň mívají nízký úbytek napětí v řádu stovek mA. Stabilizátor MCP1701 vyrábí firma Microchip, klidový proud má  $2\mu\text{A}$ , vstupní napětí do 10V, úbytek napětí 120mV při 100mA a 380mV při 200mA. Dodává se v třívývodových pouzdrech SOT-23A a SOT-89 pro SMT montáž a TO-92 pro klasickou montáž.

### 4.4 Komplementární dvojice MOSFET ZXMC3A17DN8TA

Pro spínání zátěží (cívky relé, LED atd.) lze s výhodou použít MOSFET tranzistory, protože mají typicky velmi malý odpor kanálu s sepnutém stavu (a tedy i úbytku napětí na kanálu tranzistoru, tedy napětí  $U_{DS}$ ). Odpor kanálu je závislý na napětí na řídicí elektrodě, na proudu tekoucím kanálem tranzistoru a v neposlední řadě i na typu tranzistoru. S dnešními technologiemi lze dosáhnout  $U_{DS}$  řádově setiny až desetiny voltů při relativně velkých proudech kanálem a malých napětích mezi řídicí elektrodou (hradlem) a elektrodou *source*. Další výhodou je, že na rozdíl od bipolárních tranzistorů do řídicí elektrody teče prakticky zcela zanedbatelný proud i při velkých spínaných proudech. Například N-MOSFET ZXMC3A17DN8TA má  $U_{DS}=0,2\text{V}$  při  $I_D=5\text{A}$ ,  $U_{GS}=10\text{V}$  a při teplotě okolí  $25^\circ\text{C}$ . Tato dvojice tranzistorů je v SMD pouzdru SO8 s osmi vývody.

Déle moderní MOSFET tranzistory mohou být spínané i malým napětím, zmíněný dvojitý tranzistor může být spínán napětím až 2,5V při teplotě okolí  $25^\circ\text{C}$ , a 1,5V při

150°C. Obecně však čím menší napětí  $U_{GS}$  zvolíme, tím menší proud můžeme spínat. To lze dohledat v datasheetu příslušného tranzistoru, nejlépe ve výstupní charakteristice tranzistoru. Např. výše zmíněný tranzistor může při  $U_{GS}=2,5V$  spínat  $I_D=200-250mA$  ( $U_{DS}=150mV$ ), při  $U_{GS}=3V$  a  $I_D=1A$  bude  $U_{DS}=150mV$ . Při  $U_{GS}=3V$  a  $I_D=200mA$  bude  $U_{DS}$  zcela zanedbatelné. Výstupní charakteristika je uvedena na obr. 4-2 [17].



Obr. 4-2 Výstupní charakteristika N-kanálu tranzistoru ZXMC3A17DN8TA

## 4.5 Snímač teploty AD7415

AD7415 (firma Analog Devices) je integrovaný polovodičový snímač teploty v pouzdru SOT23-5, změřená teplota je k dispozici přímo v číselné podobě na sběrnici  $I^2C^{TM}$ . Ke své funkci kromě kondenzátoru filtrujícího napájecí napětí a rezistoru mezi vstupem volby adresy a jedním napájecím potenciálem nepotřebuje žádné další vnější součástky. Teplota je kódována v binárním dvojkovém doplňku po krocích 0,25°C.

Teplota	Binární hodnota	Teplota	Binární hodnota
-55°C	11 0010 0100	10°C	00 0010 1000
-50°C	11 0011 1000	25°C	00 0110 0100
-25°C	11 1001 1100	50°C	00 1100 1000
-0,25°C	11 1111 1111	75°C	01 0010 1100
0°C	00 0000 0000	100°C	01 1001 0000
0,25°C	00 0000 0001	125°C	01 1111 0100

Tabulka 5 Příklady binárních vyjádření teploty [15]

Vzorce (11) pro výpočet skutečné teploty z jejího binárního vyjádření můžeme použít doporučené výrobcem snímače [15]:

$$T_- = \frac{ADCcode - 512}{4} \quad (11)$$

$$T_+ = \frac{ADCcode}{4}$$

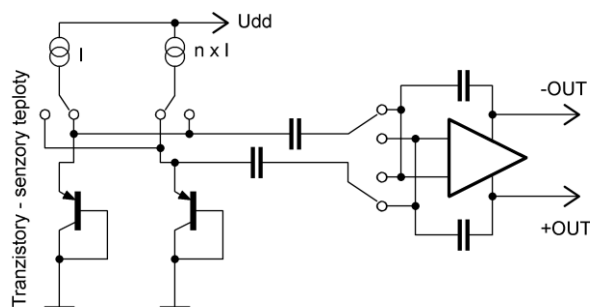
Kde ADCcode je hodnota předaná snímačem, zda počítáme teplotu kladnou nebo zápornou určíme podle bitu nejvyšší váhy (DB9), v případě záporné teploty má tento bit hodnotu 1 a při výpočtu změním jeho hodnotu na 0.

#### 4.5.1 Princip měření teploty

Snímač AD7415 využívá záporného teplotního koeficientu napětí  $U_{BE}$  bipolárního tranzistoru napájeného konstantním proudem. Měření je provedeno metodou dvou proudů, pospanou v kapitole 1-5. V datasheetu AD7415 je uvedena rovnice 12

$$\Delta U_{BE} = \frac{kT}{q \cdot \ln n} \quad (12)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ),  $q$  je elementární náboj elektronu ( $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ),  $T$  je absolutní teplota v jednotkách Kelvin a  $n$  je poměr dvou proudů. Při měření přepíná dva přepínané zdroje konstantního proudu a zjišťuje rozdíl  $U_{BE}$ , viz. obr. 4-3 [15].



Obr. 4-3 Principiální schéma zapojení měřicí části snímače AD7415

Přesnost snímače závisí na napájecím napětí a na okolní teplotě. Nejlepších výsledků dle datasheetu dosahuje při 3,3V, kdy při +40°C vykazuje chybu téměř 0°C, při +85°C a při -40°C vykazuje chybu méně jak 0,5 až 0,7°C.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 VÝVOJOVÁ VERZE REGULÁTORU

Nejprve byl vytvořen hrubý návrh regulátoru většího rozsahu (samotný regulátor, síť bezdrátových čidel, bezdrátová komunikace s PC pomocí USB adaptéru), tento návrh bude popsán v poslední kapitole. Z časových důvodů však bylo přistoupeno k podstatně zjednodušené verzi, která obsahuje pouze malý regulátor se senzorem teploty AD7415 a RS232 komunikací s PC. Tento prototyp posloužil k vyzkoušení a odladění komunikace se snímačem teploty, k odzkoušení algoritmu regulace a k odladění algoritmu výpočtu týdne cyklu regulace (bude popsáno dále) a také umožnil navrhnout a otestovat program pro PC. Program pro PC umožňuje nastavit reálný čas regulátoru, nastavit jednotlivé žádané hodnoty v různých časových intervalech, zobrazit aktuální i žádanou teplotu. Pro účely vývoje umožňuje deaktivovat čtyřtýdenní cyklus regulace a okamžitě nastavit žádanou teplotu, ve zvolených časových intervalech ukládat data regulace na disk (aktuální teplotu, žádanou teplotu, periodu vzorkování a hodnotu akční veličiny-stav relé).

Některé obvodové části přímo vychází z návrhu rozšířené verze, konkrétně čidlo teploty AD7415, měření stavu záložního zdroje vnitřním komparátorem mikrokontroleru a zvolený typ výstupního relé, které bylo vybráno s ohledem na co nejmenší odběr v případě bateriového napájení, se kterým je počítáno u rozšířené verze.

Vývojová verze je napájena univerzálním síťovým zdrojem (adaptérem), při výpadku napájení procesor přejde do režimu spánku s velmi nízkým odběrem a je napájen záložní alkalickou baterií, která zálohuje pouze modul RTCC a uložená data cyklu regulace. Napětí záložní baterie je měřeno odporovým děličem, při dosažení hodnoty 2,095V a méně začne blikat červená indikační LED. Vývojová verze se však zásadně od rozšířené liší taktovací frekvencí. Ve vývojové verzi je použit krystal 18,432MHz, avšak v rozšířené je počítáno s frekvencí do 500kHz, mikrokontroler by tedy měl mít podstatně menší odběr. Stávající program by tedy bylo nutné dále odladit pro nižší takt. frekvenci.

Data cyklu regulace by bylo vhodnější uložit do EEPROM, ale byl zvolen typ mikrokontroleru (PIC24F08KA102) s menší pamětí programu (pouze pro 2816 instrukcí) a nyní je již zcela zaplněna (po poslední úpravě kódu zbývají 2 instrukce). Lépe by bylo použít PIC24F16KA102, který umožňuje uložit do paměti programu až 5632 instrukcí.

Regulátor využívá dvoupolohovou regulaci s adaptivním nastavením vzorkovací periody podle rychlosti odezvy regulované soustavy.

## 5.1 Čtyřtýdenní cyklus regulace

Regulátor umožňuje zvolit jedno až čtyřtýdenní cyklus regulace. Jednotlivé týdny se stále v cyklu opakují a v každém dni lze nastavit individuální teplota až v pěti časových bodech. To lze využít například v případě směnného zaměstnání uživatele, kdy si může nastavit jiný průběh teplot pro noční směnu, jiný například pro 12ti hodinovou ranní směnu atd. Nejprve zvolíme kalendářní týden, ke kterému bude přiřazen první týden cyklu regulace (např. 30) a zvolíme počet týdnů regulace (např. 4). Cyklus regulace pak bude mít průběh podle tabulky 6.

Kalendářní týden	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Týden cyklu regulace	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Tabulka 6 Ukázka průběhu týdnů cyklu regulace

## 5.2 Komunikace regulátoru s PC

S nadřazeným PC komunikuje pomocí RS232. Pro komunikaci používá telegramy, uvedené v tabulkách 7 a 8. Telegramy jsou ASCII, hodnoty za dvojitou čarou jsou binární.

#	T	e	m	p	/	/	Požadavek na odeslání údajů o teplotě, stavu relé a vzork. periodě										
#	W	T	m	p	<u>x</u>	<u>x</u>	Vyslání žádané hodnoty ( <u>x x</u> binárně)										
#	U	p	L	<	/	/	Požadavek na odeslání nastavení cyklu regulace (z reg. do PC)										
#	D	w	L	>	/	/	Požadavek na přijetí nastavení cyklu regulace (z PC do reg.)										
#	T	i	m	e	/	/	Požadavek na vyslání reálného času a datumu										
#	T	m	S	t	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>r</u>	<u>r</u>	<u>h</u>	<u>h</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	Odeslání datumu (dd,mm,rr) a času (ss) v kódu BCD
#	C	y	k	1	Aktivace týdenního cyklu regulace												
#	C	y	k	0	Deaktivace týdenního cyklu regulace (pro účely vývoje)												

Tabulka 7 Telegramy komunikace PC→regulátor

#	T	e	m	p	<u>x</u>	<u>x</u>	<u>q</u>	<u>y</u>	<u>y</u>	<u>z</u>	<u>z</u>						Odeslání aktuální teploty <u>x x</u> , stavu relé <u>q</u> , vzorkovací periody <u>y y</u> , aktuální teploty <u>z z</u> .
#	T	i	m	e	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>r</u>	<u>r</u>	<u>h</u>	<u>h</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>s</u>	<u>s</u>	Odeslání datumu (dd,mm,rr) a času (ss) v kódu BCD

Tabulka 8 Telegramy komunikace regulátor→PC

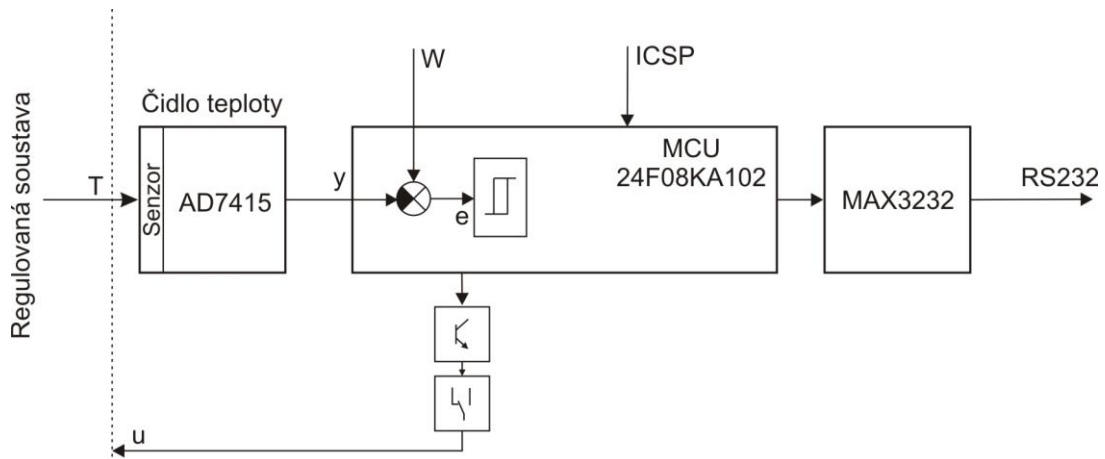
Data, která se týkají cyklu regulace jsou posílána přesně podle datové struktury (Delphi-Pascal typ record, program pro PC, jazyk C obdobný typ struktura).



## 6 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ VÝVOJOVÉ VERZE REGULÁTORU

### 6.1 Blokové schéma regulátoru

Na následujícím obrázku je blokové schéma zjednodušené vývojové verze regulátoru.



Obr. 6-1 Blokové schéma regulátoru

Hlavní částí regulátoru je mikrokontroler PIC24F08KA102, který s nadřazeným systémem komunikuje po sériové lince RS232. Teplota je snímána polovodičovým integrovaným čidlem AD7415, akční veličinu tvoří výstupní relé, spínající topné těleso (příp. ventil topné vody). Jak již bylo řečeno, vývojová verze je napájena externím adaptérem, ale obvodové řešení koresponduje s vývojovou verzí, proto je vhodné použít bistabilní relé kvůli co nejmenšímu příkonu regulátoru. Cívka běžného relé musí být napájena stále, pokud má být relé sepnuté a jeho odběr jsou desítky mA, takže při akční veličině  $u=1$  by zbytečně odebíralo energii baterie. Stav bistabilního relé se mění jen krátkým impulsem, který dle rychlosti spínání relé může mít délku v řádu desítek ms a tím tedy podstatně šetří baterii.

Mikrokontroler je programován v zapojení, je využit režim ICSP (In Circuit Serial Programming).

Všechny integrované obvody jsou zvolené ve verzích s nízkým napájecím napětím, kolem 3V, aby návrh korespondoval s návrhem rozšířené verze popsané v poslední kapitole, která je napájena bateriemi AA příp. AAA. Vývojová verze má místo baterií konektor pro napájení běžným adaptérem.

## 6.2 Obvod resetu mikrokontroleru

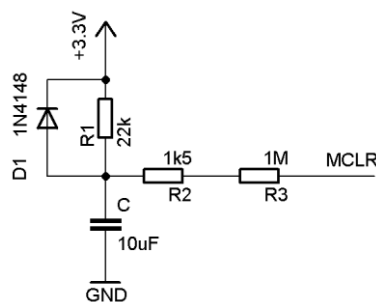
Mikrokontrolery PIC mají tři možnosti resetu po přivedení napájecího napětí.

-využít vnitřních obvodů a pin MCLR nakonfigurovat jako vstupní nebo výstupní bit brány

-MCLR připojit na log.1 (na Vcc)

-V případě pomalejšího náběhu napájecího napětí použít jednoduchý resetovací obvod. (Minimální rychlost náběhu je  $0,05\text{Vms}^{-1}$ , hodnoty 3,3V musí dosáhnout z 0V za maximálně 66ms.

Vývojová verze regulátoru je napájena z obecného externího zdroje, doba náběhu napětí na maximální hodnotu není předem známa, proto je vhodné zvolit třetí možnost, tedy resetovací obvod, který po dobu nabíjení kondenzátoru bude vstup MCLR držet na log. 0 a tedy mikrokontroler v režimu reset. Hodnoty rezistor; R1 a R2 jsou v rozsahu doporučeném výrobcem mikrokontroleru ( $R_1=22\text{k}\Omega$ ,  $R_2=1,5\Omega$ ), rezistor R3 je vstupní odpor mikrokontroleru (dle katalogu přibližně  $1\text{M}\Omega$ ), hodnotu kondenzátoru zvolíme  $10\mu\text{F}$  a pomocí vztahu 13 [14] spočítáme, za jakou dobu dosáhne napětí na vstupu MCLR hodnoty  $0,8V_{dd}$ , tedy log. 1. Při  $V_{dd}=3,3\text{V}$  to bude 2,64V.



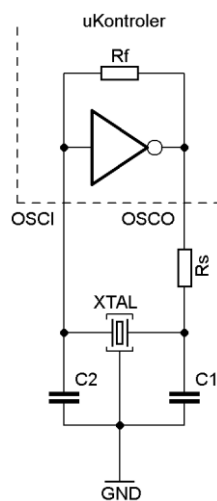
Obr. 6-2 Schéma resetovacího obvodu

$$t = \frac{R_1 R_2 C \ln \left( \frac{u_C (R_1 + R_2)}{U_{DD} R_2} - 1 \right)}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

S uvedenými hodnotami dosáhne napětí na vstupu MCLR logické 1 (hodnoty napětí  $0,8V_{dd}=2,64\text{V}$  dle datasheetu) za 114ms a hodnoty 3,3V dosáhne za 822ms.

### 6.3 Oscilátory, volba krystalů a okolích součástek

Mikrokontrolery rodiny PIC24 obsahují dva oscilátory. Primární, který může být konfigurován i pro frekvence v řádu desítek MHz jako zdroj hodin pro jádro, dále sekundární, který může být konfigurován jako nízkopříkonový, je primárně určený pro krystaly desítek kHz (např. 32,768kHz), v mikrokontrolerech bez HW RTCC modulu jej lze využít pro časovač TMR1 a pro SW RTCC, v mikrokontrolerech s HW RTCC modulem je určený pro generování taktu pro HW RTCC. Může být aktivní i v režimech spánku mikrokontroleru, kdy odběr klesne na jednotky  $\mu\text{A}$  i méně.



Obr. 6-3 Pierceův  
krystalový oscilátor

Rezistor  $R_f$  ve zpětné vazbě je součástí mikrokontroleru, jeho hodnota je závislá na frekvenci oscilátoru a může se pohybovat od stovek  $\text{k}\Omega$  do desítek  $\text{M}\Omega$ . Sériový rezistor  $R_s$  je vhodný, spolu s kondenzátorem  $C_1$  tvoří dolní propust (zabraňuje případnému kmitání na vyšších harmonických kmitočtech), odděluje výstup invertoru od komplexní impedance tvořené  $C_1$ ,  $C_2$  a  $\text{XTAL}$ , snižuje proud krystalem a tedy ztrátový výkon krystalu, s nízkým nebo nulovým  $R_s$  by mohlo dojít ke zničení krystalu. Jeho hodnotu určíme vztahem 14 [5]

$$R_s = \frac{1}{2\pi f C_2} \quad (14)$$

Hodnoty kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$  jsou totožné (někdy se  $C_1$  volí  $2 \times C_2$  až  $3 \times C_2$ ), jejich kapacitu určíme dle vztahu 15 [5].

$$C_L = \frac{C_{in} + C_2 \left( C_{out} + C_1 \right)}{C_{in} + C_2 + C_{out} + C_1} + C_{PCB} \quad (15)$$

$C_{in}$  je vstupní kapacita invertoru a  $C_{out}$  je výstupní kapacita invertoru. Pokud nejsou tyto hodnoty uvedené v datashetu, lze jejich hodnotu volit 5pF.  $C_{PCB}$  je parazitní kapacita desky plošných spojů, volí se 2-3pF.  $C_L$  je zatěžovací kapacita krystalu (load capacitance), tu najdeme v datasheetu zvoleného krystalu. Hledáme hodnoty  $C_1$  a  $C_2$ .

$$\begin{aligned} C_1 &= C_2 = C \\ C_{in} &= C_{out} = C_{io} = 5pF \\ C_{PCB} &= 3pF \\ C_L &= \frac{C_{io} + C}{2(C_{io} + C)} + C_{PCB} = \frac{C_{io}^2 + 2C_{io}C + C^2}{2(C_{io} + C)} + C_{PCB} \end{aligned}$$

Výsledná rovnice pak bude

$$C = \frac{C_{io}^2 + 2C_{PCB}C_{io} - 2C_L C_{io}}{2(C_L - C_{io} - C_{PCB}) - C} \quad (16)$$

Tu můžeme řešit např. iterační metodou, podobně jako rekurentní rovnice (pomocí jednoduchého softwarového algoritmu), nebo ji můžeme řešit klasickou metodou jako kvadratickou rovnicí:

$$C^2 + 2C(C_L - C_{io} - C_{PCB}) + C_{io}^2 + 2C_{PCB}C_{io} - 2C_L C_{io} = 0 \quad (17)$$

Záporný kořen není z fyzikálního hlediska řešením, proto budeme uvažovat pouze kladné řešení kvadratické rovnice a u iterační metody začínat na kladné hodnotě.

Krystal i s kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  i rezistor  $R_S$  je vhodné umístit co nejbližší daným vývodům mikrokontroleru, proto volíme co nejmenší pouzdra, SMD pouzdra 0603. Krystal pro primární oscilátor volíme s ohledem na použité periferie a na rychlost zpracování instrukcí. Zdroj hodinových kmitočtů pro UART a I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> je odvozen od frekvence oscilátoru, v datasheetu mikrokontroleru jsou uvedené vztahy pro výpočet výsledné rychlosti rozhraní, příp. pro výpočet dělicích hodnot, uložených v konfiguračních registrech. Rychlost UART je zvolena 9600bps, frekvence hodin I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> 100kHz. Krystal bude 18,432MHz.

### 6.3.1 Primární oscilátor

Krystal volíme s ohledem na přesnost kmitočtu, teplotní stabilitu kmitočtu, zatěžovací kapacitu s ohledem na rozsah hodnot kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ , doporučené výrobcem mikrokontroleru. Zvolený krystal:

Výrobce, typ:	Euroquartz, typ 18.432MHZ MJ/30/30/-40+90/12pF/50R
Frekvence:	18,432MHz
Stabilita frekvence:	$\pm 5\text{ppm}$ v rozsahu teplot $-10$ až $60^\circ\text{C}$ , $\pm 15\text{ppm}$ pro $-40$ až $90^\circ\text{C}$
Tolerance frekvence:	$\pm 30\text{ppm}$
Load capacitance:	12pF
Pracovní teplota:	$-40$ až $90^\circ\text{C}$



Obr. 6-4 Krystal řady MJ

Pro  $C_L$  tohoto krystalu dle rovnice 17 vyjde kladný kořen bude 14. V iterační metodě dle rovnice 16 kladný kořen vyjde 13,999 při přesnosti i kroku rovno 0,001. Kapacita kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$  bude dle řady hodnot 15pF.

Rezistor  $R_S$  bude dle rovnice 14  $680\Omega$ . Ilustrační fotografie 6-4 převzata z [4].

#### 6.3.1.1 UART

Vypočítáme hodnotu registru  $UIBRG$ , v ideálním případě musí vyjít celé číslo, pak bude rychlost UART přesně zvolená ( $baudrate=9600\text{bps}$ ) [16]:

$$UIBRG = \frac{\frac{F_{osc}}{2}}{16 \cdot baudrate} - 1 = \frac{9216000}{153600} - 1 = 59$$

#### 6.3.1.2 I<sup>2</sup>C™

Vypočítáme hodnotu registru  $I2C1BRG$  ( $F_{SCL}$  je zvolená 100kHz) [16]:

$$I2C1BRG = \left( \frac{\frac{F_{OSC}}{2}}{F_{SCL}} - \frac{\frac{F_{OSC}}{2}}{1000000} \right) - 1 = \left( \frac{9216000}{100000} - \frac{9216000}{1000000} \right) - 1 = 90,2384$$

Hodnotu  $I2C1BRG$  musí zvolit jako celé číslo, bude tedy 90. Zkontrolujeme odchylku od zvolené frekvence  $F_{SCL}$ :

$$F_{SCL} = \frac{F_{soc} / 2}{I2C1BRG + 1 + \frac{F_{osc} / 2}{10000000}} = \frac{9216000}{90 + 1 + \frac{9216000}{10000000}} = 100,259kHz$$

I<sup>2</sup>C™ je synchronní sběrnice, skutečná frekvence hodin vyhovuje.

### 6.3.2 Sekundární oscilátor

Krystal opět volíme s ohledem na přesnost kmitočtu, teplotní stabilitu kmitočtu, zatěžovací kapacitu s ohledem na rozsah hodnot kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ , doporučené výrobcem mikrokontroleru. Zvolený krystal:

Výrobce, typ: Micro Crystal, typ MS2V-T1S 32.768kHz 12.5pF ±20ppm

Frekvence: 32,768kHz

Stabilita frekvence: ±20ppm v rozsahu teplot -40 až 85°C

Tolerance frekvence: ±20ppm

Load capacitance: 12,5pF

Pracovní teplota: -40 až 85°C



Obr. 6-5 Krystal řady MS2V-T1S

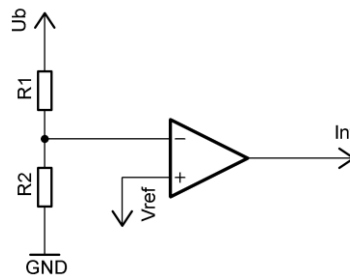
Pro  $C_L$  tohoto krystalu dle rovnice 17 vyjde kladný kořen vyjde 15. V iterační metodě dle rovnice 16 kladný kořen vyjde 14,999 při přesnosti přesnosti i kroku rovno 0,001. Kapacita kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$  bude dle řady hodnot 15pF.

Rezistor  $R_S$  bude dle rovnice (4-2) 470kΩ. Ilustrační fotografie 6-5 převzata z [4].

### 6.3.3 Měření napětí záložní baterie

Napětí záložní baterie je měřeno jedním analogovým komparátorem, který je součástí procesoru. Napětí plně nabitě záložní baterie je 3V, vybitý stav a nutná výměna je indikována červenou LED při poklesu napětí na 2,095V a méně.

Modul komparátoru podle konfigurace umožňuje porovnávat napětí dvou vstupů nebo napětí vstupu s referenčním napětím, které podle konfigurace modulu referenčního napětí může být odvozené od napájecího napětí nebo od vstupu, na který přivedeme napětí z externího referenčního zdroje. V regulátoru je zvolena první možnost.



Obr. 6-6 Komparátor  
napětí baterie

Zvolíme rozhodovací úroveň, napětí  $V_{ref}$ . Zdroj referenčního napětí v mikrokontroleru má 16 úrovní děliče a podle konfigurace děliče dva vzorce pro výpočet  $V_{ref}$ . Zvolena byla jednodušší rovnice 18 [16].

$$V_{ref} = \frac{CVR_{30}}{24} CVR_{SRC} \quad (18)$$

$CRV_{30}$  jsou bity 0 až 3 konfiguračního registru  $CVRCON$ , které určují dělicí poměr,  $CRV_{SRC}$  je napětí na děliči (zdroj napětí pro dělič). Při  $CRV_{30}=4$  a  $CRV_{SRC}=3,3V$  bude referenční napětí  $V_{ref}=0,55V$ . Toto bude zároveň rozhodovací úroveň komparátoru. Nyní musíme určit hodnotu rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  tak (vztah 19), aby při poklesu napětí baterie na 2,095V bylo napětí na rezistoru  $R_2$  rovno 0,55V. Rezistory  $R_1$  a  $R_2$  by měly mít co nejmenší výrobní toleranci a nejlepší teplotní stabilitu. Zvoleny byly rezistory TYCO ELECTRONICS, tolerance 0,1% a teplotní stabilita 15ppm/°C. Podle nabídky dodavatele zvolíme hodnotu jednoho rezistoru, např.  $R_1$ , spočítáme hodnotu druhého rezistoru a zjistíme, zda je tato hodnota dostupná v požadované přesnosti a teplotní stabilitě.

$$U_{R2} = U_b \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (19)$$

$$R_2 = \frac{U_{R2} R_1}{U_b - U_{R2}} = \frac{0,55 \cdot 37400}{2,095 - 0,55}$$

$$R_2 = 13314\Omega$$

Nejbližší dostupná hodnota (dle řady hodnot a nabídky dodavatele) je 13,3kΩ. S tímto rezistorem bude mezní napětí baterie pro indikaci nutné výměny 2,097V.

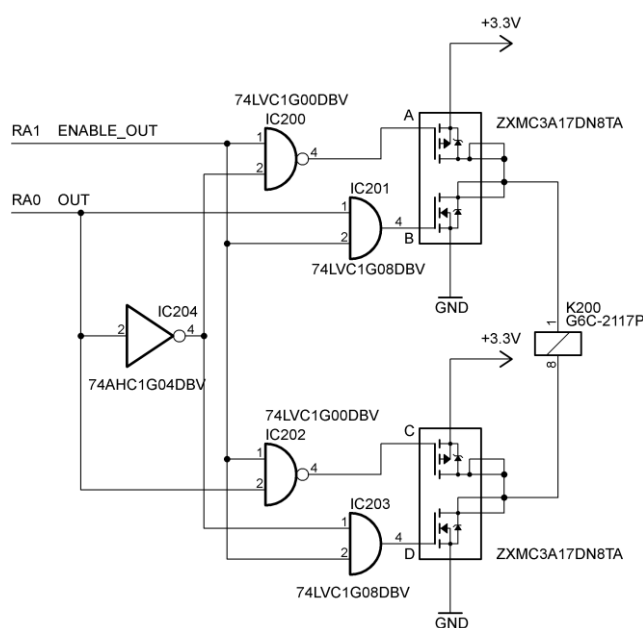
### 6.3.4 Snížený odběr při napájení ze záložní baterie

Záložní baterie je použita jen pro chod RTCC modulu. Všechny ostatní části procesoru jsou odpojeny, včetně primárního oscilátoru voláním instrukce SLEEP. Které

moduly se mají vypnout se volí v konfiguračních registrech daných modulů. Stav hlavního napájecího napětí je měřen děličem, který v případě výpadku přivede na vstup RB7 logickou 0, pak dojde k vyvolání přerušení (CNxx - change notification, přerušení při změně hodnoty na vstupu). Přerušení je vyvoláno i při obnovení hlavního napájecího napětí, proto se v příslušné rutině musí zjistit stav vstupu, pokud je vstup v logické 1, instrukce SLEEP se neprovede. Hodnoty rezistorů jsou voleny s ohledem na proud odebíraný děličem ( $47\mu\text{A}$ ) a na spolehlivě definované logické hodnoty na vstupu mikrokontroleru s ohledem na vstupní proud mikrokontroleru ( $0,1\mu\text{A}$  maximálně).

### 6.3.5 Obvod ovládání cívky relé

Jak již bylo řečeno, relé je použito bistabilní z důvodu nízkého odběru (nulového) ve stavu sepnutí i vypnutí relé. Existují dva druhy bistabilních relé, se dvěma cívkami, kdy přivedením napětí na jednu cívku relé sepne a přivedením na napětí na druhou cívku relé vypne (příp. přepne, má-li přepínací kontakty). Další typ má jednu cívku a stavy relé se volí změnou polarity přivedeného napětí. Během držení daného stavu jsou cívky bez napětí. Při volbě relé musíme brát ohled také na pracovní napětí cívky a max. spínaný proud a napětí kontakty. Regulátor je napájen 3,3V, takže napětí cívky musí být 3V. Kontakty musí spínat až 250V AC. S těmito kritérii bylo v době vývoje regulátoru běžně dostupné jen relé s jednou cívkou s kontakty schopnými spínat až 8A, a to relé OMRON G6CU-2114P, které je kompatibilní s G6CU-2117P.



Obr. 6-7 Obvod ovládání výstupního relé



Pro ovládání relé byl navržen obvod uvedený na obr. 6-7. Hradla a invertor jsou v jednotlivých pouzdrech SOT23-5, tranzistory jsou komplementární dvojice N-MOSFET a P-MOSFET v jednom pouzdru.

V případě že nebude výstup povolen ( $\text{ENABLE\_OUT}=0$ ), budou kanály všech tranzistorů zavřeny. Logické funkce budou podle tabulky 9.

RA1	RA0	A	B	C	D	Poznámka
0	0	1	0	1	0	Tranzistory A,B,C,D zavřeny
0	1	1	0	1	0	Tranzistory A,B,C,D zavřeny
1	0	0	0	1	1	Tranzistory A, D otevřeny, B, C zavřeny
1	1	1	1	0	0	Tranzistory B, C otevřeny, A, D zavřeny

Tabulka 9 Pravdivostní tabulka pro jednotlivé hradla tranzistorů

Ke všem tranzistorům vytvoříme Karnaughovu mapu a odvodíme minimalizované rovnice.

	A	B	C	D																
	$\overline{RA0}$	$\overline{RA0}$	$\overline{RA0}$	$\overline{RA0}$																
RA1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr></table>	1	1	0	1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	0	0	1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	1	1	1	0	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	0
1	1																			
0	1																			
0	0																			
0	1																			
1	1																			
1	0																			
0	0																			
1	0																			

Tabulka 10 Karnaughovy mapy jednotlivých hradel tranzistorů

$$\begin{aligned}
 A &= RA0 + \overline{RA1} \\
 B &= RA0RA1 \\
 C &= \overline{RA0} + \overline{RA1} \\
 D &= \overline{RA0}RA1
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Podle výsledných rovnic by byly nutné dva invertory pro  $RA0$  i  $RA1$ , proto zkusíme rovnice pro tranzistor A i tranzistor C upravit pomocí de-Morganových zákonů:

$$\begin{aligned}
 A &= RA0 + \overline{RA1} = \overline{\overline{RA0RA1}} \\
 C &= \overline{RA0} + \overline{RA1} = \overline{RA0RA1}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Nyní potřebujeme negovat pouze  $RA0$  v rovnici pro hradlo A a hradlo D, na což stačí jeden invertor, dále dvě hradla AND (rovnice pro tranzistory B a D) a dvě hradla NAND (rovnice pro tranzistory A a C).

## 6.4 Komunikace s PC

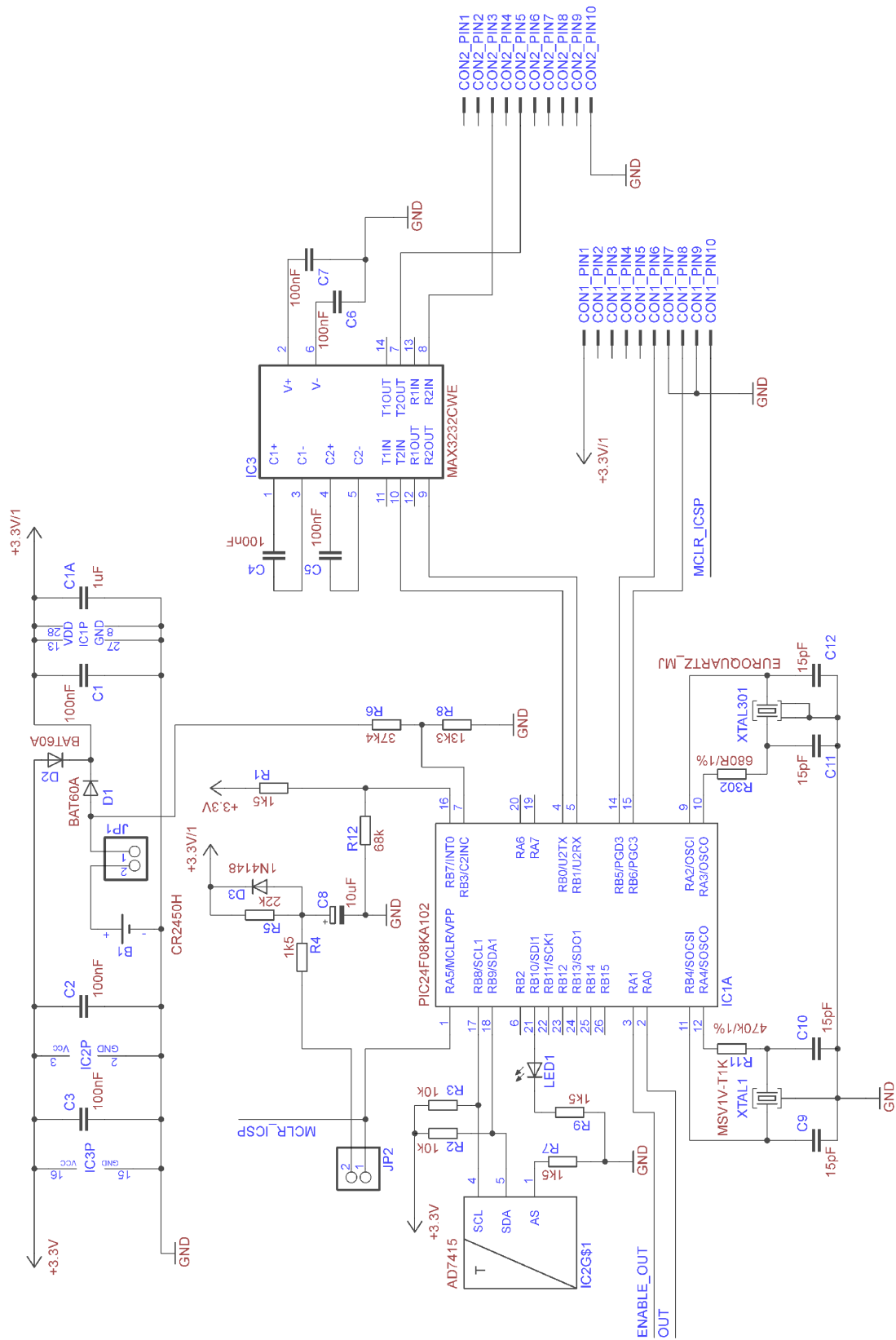
Pro komunikaci s PC pomocí RS232 musíme použít převodník úrovní. V úvahu přichází známý MAX232. Jedním z kritérií při volbě vhodného integrovaného obvodu je napájecí napětí, které je 3,3V. Standardní MAX232 má nejnižší doporučené napájecí napětí 4,5V, musíme tedy použít verzi s nižší spodní hranicí. Zvolen byl MAX3232, který má rozsah napájecího napětí 3 až 5,5V.

## 6.5 Programování mikrokontroleru

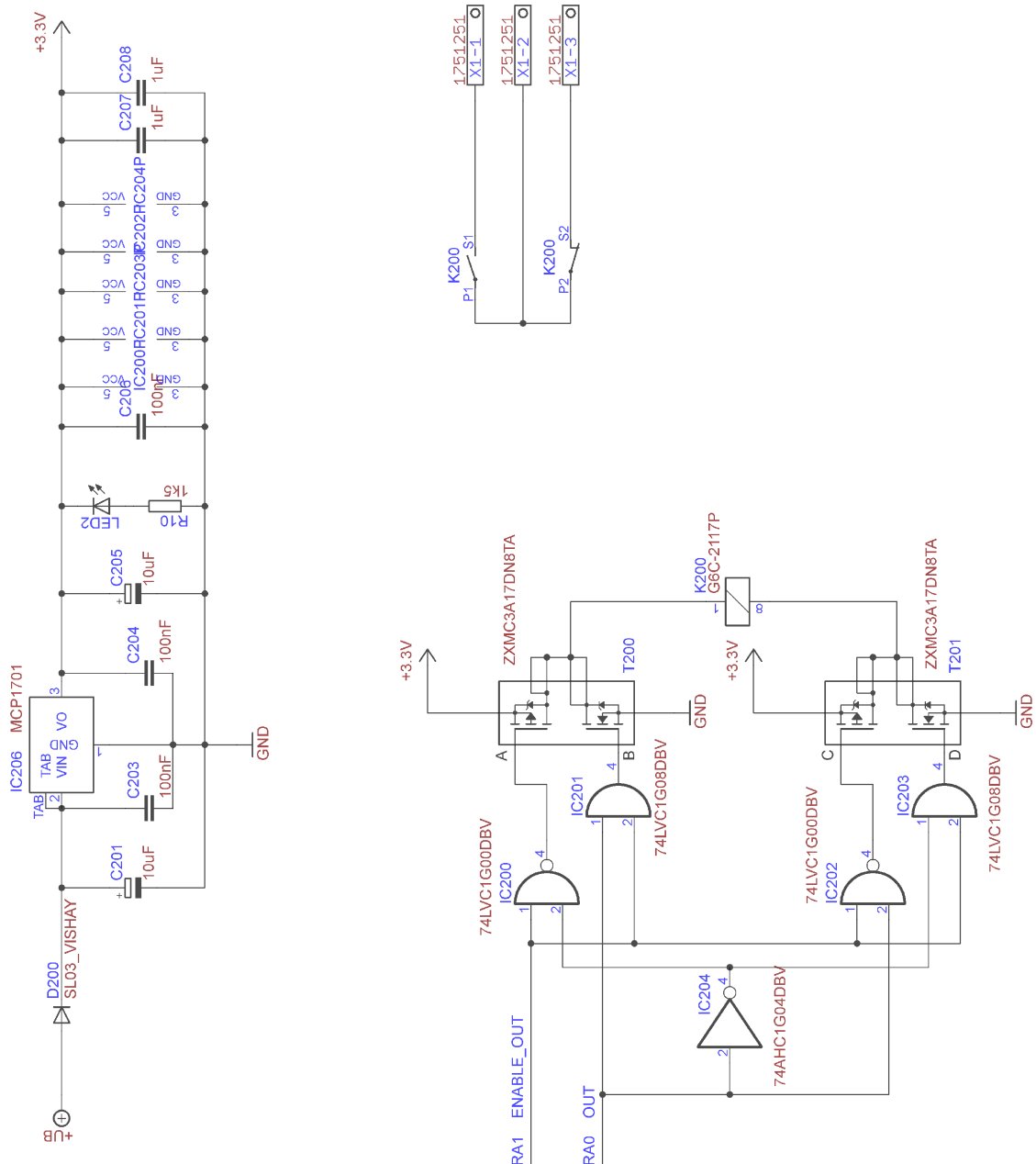
Programování mikrokontroleru je zvoleno ICSP, tedy programování přímo v obvodu. Pro programování byl použit programátor Elnec PikProg2 s program Elnec Pg4uwMC.

Před spuštěním programovacího algoritmu odpojíme regulátor od napájení, odpojíme konektor sériové komunikace (CON2), odpojíme propojku JP2 v obvodu resetu a propojku JP1 (může být trvale odpojená), zapojíme ICSP konektor (CON1) a spustíme programování. Po dokončení nesmíme zapomenout zpět zapojit propojku JP2 a můžeme zapojit napájecí napětí, příp. konektor CON2 a můžeme testovat část algoritmu. Takto můžeme mnohokrát postupovat až do odladění programu.

## 7 SCHÉMA A DPS VÝVOJOVÉ VERZE REGULÁTORU



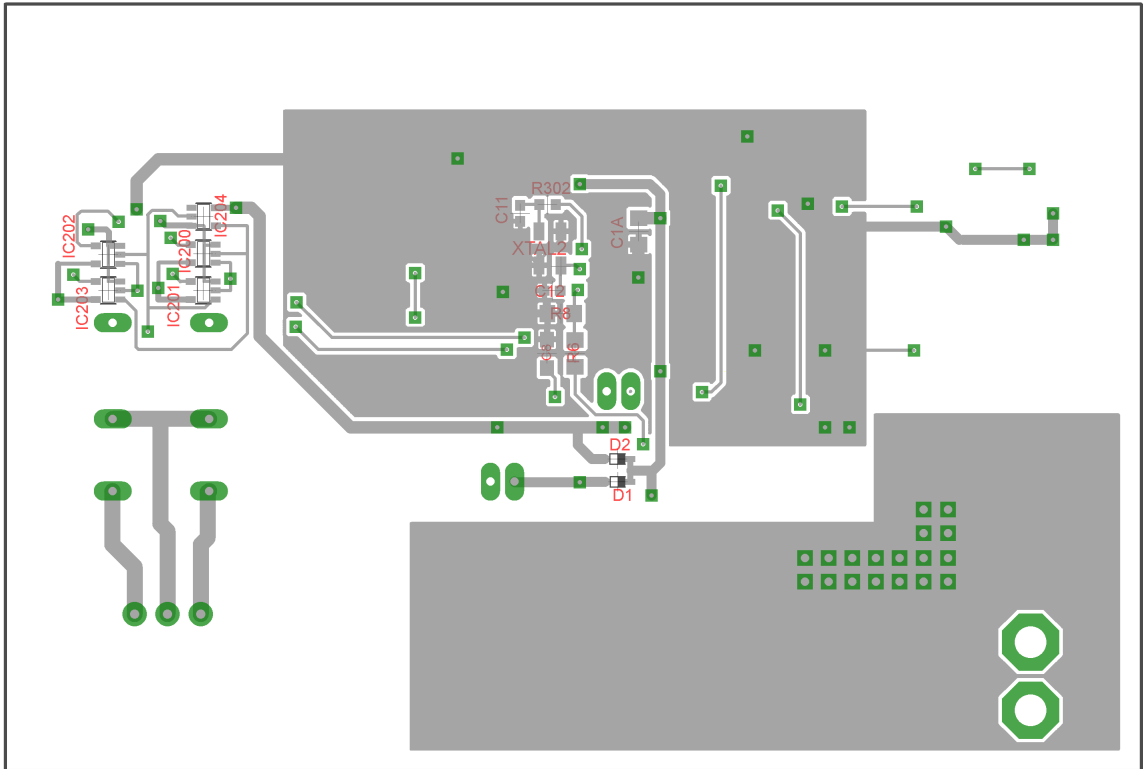
Obr. 7-1 Schéma vývoje verze regulátoru-řídící část



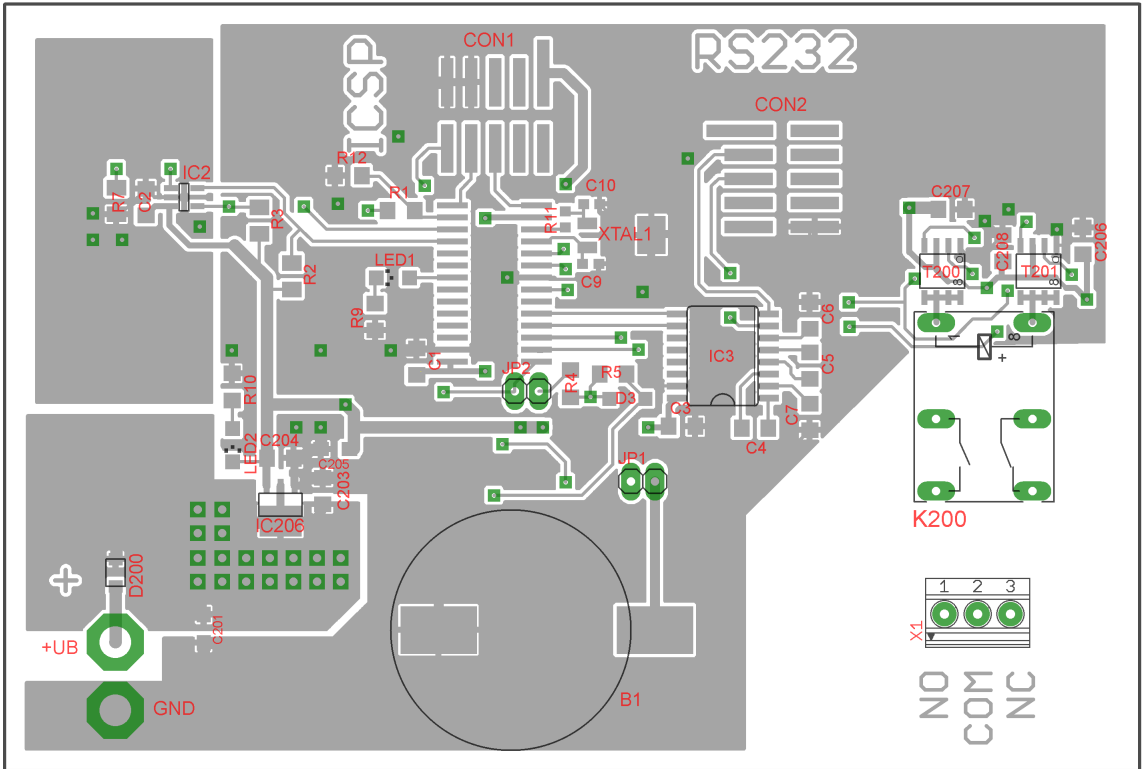
Obr. 7-2 Schéma vývojové verze regulátoru-část napájení a výstupní relé

Před stabilizátorem je použita schottky dioda SL03 (výrobce Vishay) s velmi malým úbytkem napětí, při proudu 100mA a teplotě okolí 25°C má úbytek 300mV. Maximální závěrné napětí má 30V a maximální proud v propustném směru 1,1A. Tato dioda slouží jako ochrana regulátoru při chybně zapojenému napájení („přepólování“).

Napětí ze stabilizátoru a ze záložní baterie je na mikrokontroler přivedeno před diodový logický člen OR (díody D1 a D2), opět jsou použity schottky diody BAT60A, při proudu 100mA a teplotě okolí 25°C má úbytek 190mV. Maximální závěrné napětí 10V a maximální propustný proud 3A.

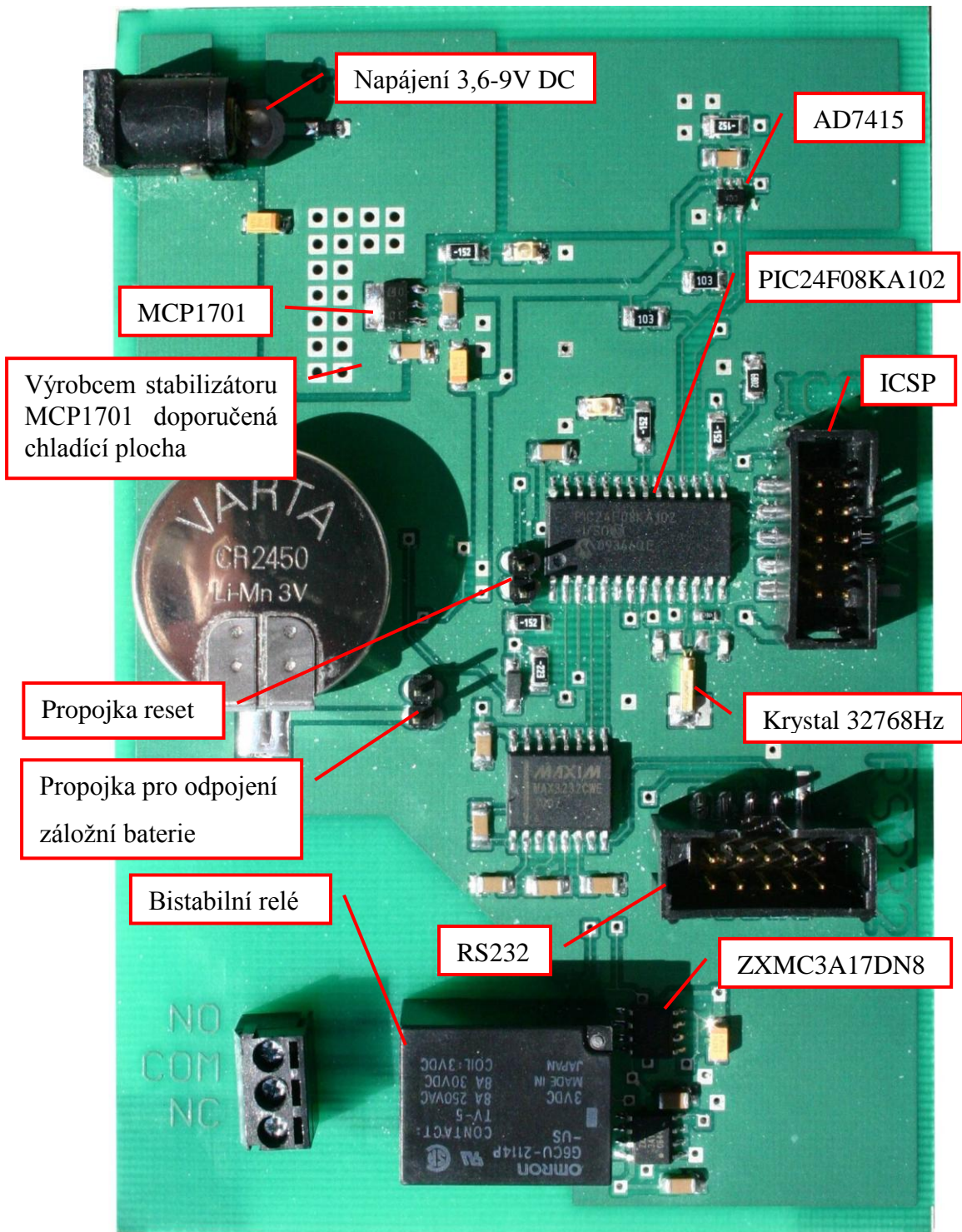


Obr. 7-3 Spodní strana plošného spoje, spodní pohled

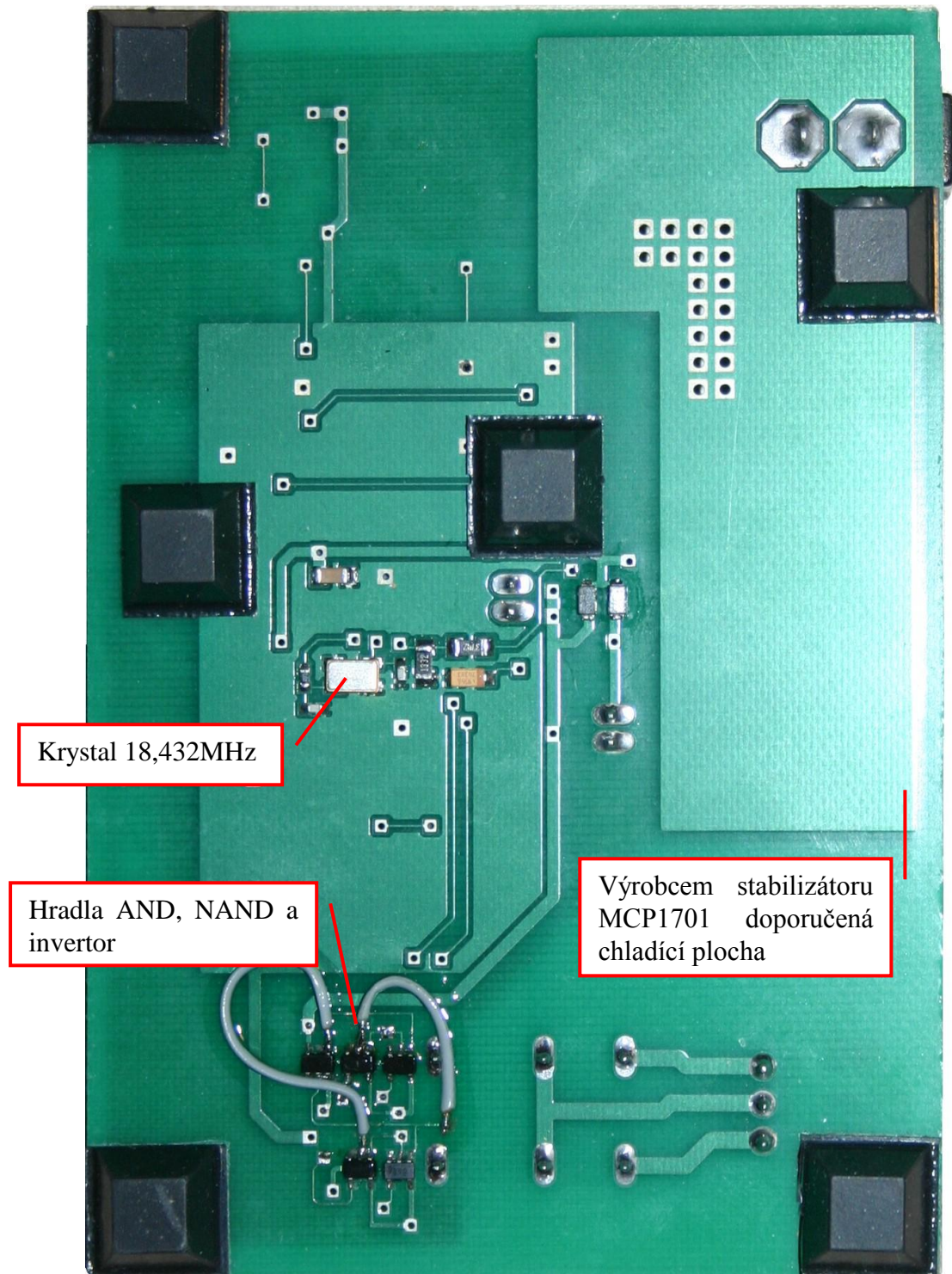


Obr. 7-4 Horní strana plošného spoje, horní pohled

7.1 Fotografie plošného spoje regulátoru s popisky



Obr. 7-5 Fotografie plošného spoje regulátoru-horní strana

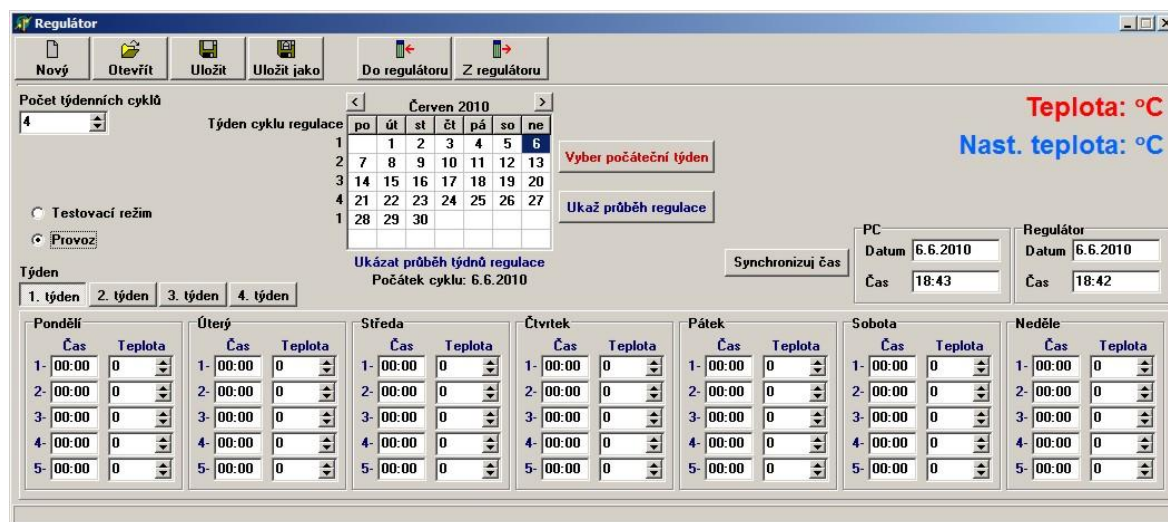


Obr. 7-6 Fotografie plošného spoje regulátoru-spodní strana

Pozn.: Při kreslení schématu v návrhovém programu Eagle došlo k chybě, která byla opravena dvěma drátovými propojkami. Ty jsou patrné na zadní straně DPS. Chyba je v této práci uvedených schématech a v obrazech plošných spojů opravena. Drátové propojky jsou zajištěny proti nežádoucímu pohybu ochranným lakem.

## 8 PROGRAM PRO KOMUNIKACI PC S REGULÁTOREM

Regulátor je možné nastavit z PC a do PC zapisovat průběh regulace, pro tento účel byl vyvinut program pro operační systém Windows XP/Vista/7.



Obr. 8-1 Ukázka programu pro nastavení regulátoru (provozní režim)

Program umožňuje zvolit počet týdnů cyklu regulace od jednoho do čtyř týdnů, v každém dni pak až pět bodů (čas a teplota). Pokud je čas 00:00 a teplota nulová, je bod ignorován. Vlevo vedle kalendáře je sloupec nadepsaný „Týden cyklu regulace“, který nám ukazuje který týden cyklu regulace je přiřazen k danému kalendářnímu týdnu. Kliknutím na některý den (týden) v kalendáři se zobrazí průběh regulace ve spodních polích pro nastavení časů a jim příslušejících teplot v případě modré volby „ukaz průběh regulace“. Cyklus regulace je určován i zpětně. V případě volby „vyber počáteční týden“ kliknutím na den (týden) v kalendáři přiřazujeme příslušnému kalendářnímu dni první týden cyklu regulace. Časy a teploty jednotlivé týdny cyklu regulace můžeme nastavit ve spodním poli editačních oken nadepsaných dnem v týdnu a modře „čas“, „teplota“.

Program dále umožňuje toto nastavení uložit na disk, zapsat do regulátoru nebo z regulátoru nastavení načíst a zobrazit aktuální a žádanou teplotu. Umožňuje také ve zvolených intervalech zaznamenávat do souboru průběh regulace (aktuální teplotu, žádanou teplotu, stav relé, hodnotu registru PR1). Toto bylo využito jen pro testování, vizuální komponenty pro nastavení parametrů této funkce jsou v ukázce na obr. 8-1 neviditelné, protože je zvolen režim „Provoz“. Mezi režimem „Provoz“ a „Testovací režim“ se lze přepínat kliknutím na stejnojmenné radiobuttony.



## 8.1 Algoritmus určení čísla týdne cyklu regulace

Pomocí tohoto algoritmu pro každé datum určíme pořadové číslo týdne cyklu regulace (algoritmus předá hodnotu 1 až 4), a to i zpětně od zvoleného výchozího týdne v roce, pro který je určeno pořadové číslo týdne regulace 1.

V algoritmu je nutné zjistit číslo prvního týdne v aktuálním měsíci a číslo aktuálního týdne v měsíci. Pro zjištění aktuálního týdne v měsíci můžeme použít rovnici 22, kterou určíme následujícím postupem:

-vybereme měsíc, ve kterém první týden nezačíná ani v pondělí, ani v neděli. Například měsíc začíná čtvrtkem, dnem číslo 6.

-týden má 7 dní, ale zvolený měsíc začíná až 6. dnem, a další týdny musí začínat násobky sedmi, např. druhý týden musí začínat dnem číslo 7. Musíme určit offset, o který budeme dny posouvat:

$$7 = a + b + x$$

Kde  $a$  je týdenní číslo prvního dne v prvním týdnu ve zvoleném měsíci,  $b$  je měsíční číslo prvního dne v druhém týdnu ve zvoleném měsíci. Tyto proměnné známe, pro zvolený měsíc  $a=6$  a  $b=3$ . Pak

$$\begin{aligned} 7 &= 6 + 3 + x \\ x &= -2 \end{aligned}$$

Postup aplikujeme i na jiné měsíce, vždy nám musí vyjít buď posunutí -2 nebo pro pondělí druhého týdne číslo dne 7, příp. celé násobky v dalších týdnech. Nyní stačí posunutá čísla dnů celočíselně dělit sedmi a získáme číslo týdne v měsíci. Výsledná rovnice pak je

$$TydenVMesici = \text{DenVTydnulden} - 2 + \text{Den} \div 7 \quad (22)$$

Kde  $\text{DenVTydnulden}$  je skutečné týdenní číslo prvního dne v měsíci,  $\text{Den}$  je aktuální den v měsíci a  $TydenVMesici$  je hledané číslo týdne. Opět zkontrolujeme vzorec v různých měsících a dnech.

V algoritmu určení týdne cyklu regulace jsou také použité funkce  $TydenVRoce$  a  $\text{DenVTydnulden}$ , které předají číslo týdne dle zadaného datumu (resp. číslo dne v týdnu dle zadaného datumu) a mají ekvivalent i v knihovně dodávané s Delphi, vypadají však příliš složitě, nepřehledně, používají několik dalších funkcí z dodávané knihovny a jejich

implementace na mikrokontroler by byla problematická. Proto jsem zvolil jiné algoritmy výpočtu čísla týdne v roce a čísla dne v týdnu.

### 8.1.1 Výpočet dne v týdnu pro datum dle Gregoriánského kalendáře

Pro výpočet dne v týdnu dle datumu existuje několik více či méně podobných algoritmů. Vybral jsem algoritmus uvedený například v [6]. Algoritmus pracuje s převodní tabulkou měsíců, kdy každému měsíci odpovídá číslo odlišné od pořadového čísla měsíce v roce, a u měsíců leden a únor se navíc liší v přestupném roce. Den v týdnu vyjde 1 pro pondělí, 2 pro úterý...6 pro sobotu, ale 0 pro neděli. Proto na konci musíme ověřit, zda byl výsledek 0 a v tomto případě použít výsledek 7.

Měsíc	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
Číslo	0	3	3	6	1	4	6	2	5	0	3	5
V přest. roce	6	2										

Tabulka 11 Převodní tabulka měsíců

Algoritmus je popsán v pseudojazyku:

```

1 A=(Rok div 4)+Rok
2 B=A-(Rok div 100)
3 C=B+(Rok div 400)+Den
4 D=C+číslo z převodní tabulky měsíců
5 Den v týdnu=(D-1) mod 7
6 Když den v týdnu=0, pak den v týdnu=7

```

### 8.1.2 Výpočet čísla týdne pro datum dle Gregoriánského kalendáře

Číslo týdne v roce můžeme určit pomocí následujícího algoritmu (v pseudojazyku):

```

1 Dny=(0, 31, 59, 90, 120, 151, 181, 212, 243, 273, 304, 334);
2 DnyPrest=(0, 31, 60, 91, 121, 152, 182, 213, 244, 274, 305, 335);
3 Když je přestupný rok, použij:
4 Tyden:=(DnyPrest[Mesic]+Den-DenVTyden(Den,Mesic,Rok)+10) div 7;
5 Když není přestupný rok, použij:
6 Tyden:=(Dny[Mesic]+Den-DenVTyden(Den,Mesic,Rok)+10) div 7;

```

### 8.1.3 Kompletní algoritmus pro určení týdne cyklu regulace v jazyce Pascal

Proměnné StartYear a StartWeek jsou počáteční zvolené roky a týdny, ke kterým je přiřazen první týden cyklu regulace.

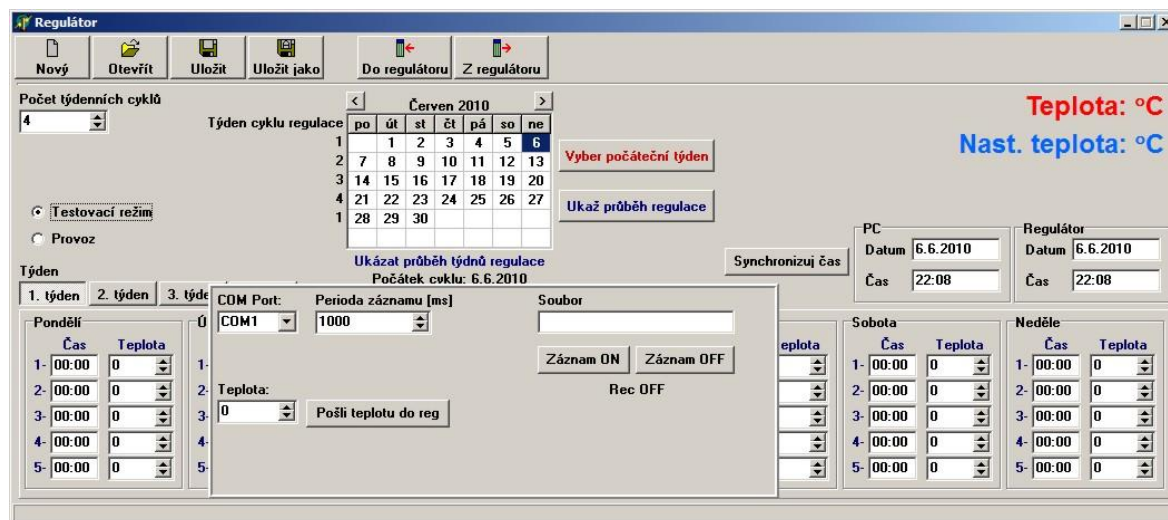
```

1 function GetWeekReg(Den,Mesic,Rok: Word) : Byte;
2 var q,B,TydenVMesici: Word;
3     FirstWeekOfMonth: Integer;
4     Posun, PocetTydnu, i: Integer;
5 begin
6     FirstWeekOfMonth:=TydenVRoce(1,Mesic,Rok);
7     Posun:=0;
8     PocetTydnu:=0;
9     if StartYear<Rok then begin
10         for i:=StartYear to (Rok-1) do
11             PocetTydnu:=PocetTydnu+WeeksInAYear(i);
12         FirstWeekOfMonth:=FirstWeekOfMonth+PocetTydnu;
13     end;
14     if StartYear>Rok then begin
15         for i:=Rok to (StartYear-1) do
16             PocetTydnu:=PocetTydnu+WeeksInAYear(i);
17         Posun:=-PocetTydnu;
18     end;
19     TydenVMesici:=DenVTyden(1,Mesic,Rok)-2+Den) div 7;
20     B:=FirstWeekOfMonth+TydenVMesici+Posun;
21     q:=Form1.WeekCount.Value;
22     if B>=StartWeek then
23         Result:=1+B-StartWeek-((B-StartWeek) div q)*q
24     else
25         Result:=1+(((StartWeek+q-1)-B) div q)*q-StartWeek+B;
26 end;
```

## 8.2 Archivace průběhu regulace

Program umožňuje také záznam průběhu regulace do textového souboru. Zaznamenává aktuální teplotu, žádanou teplotu, stav relé a periodu vzorkování regulované veličiny. Pro tento režim je nutné zvolit testovací režim kliknutím na radio button „Testovací režim“ umístěný vlevo. Poté se zobrazí panel, ve kterém volíme COM port, žádanou teplotu, která může být okamžitě poslána do regulátoru, název souboru, do kterého

se data budou ukládat a spustit nebo zastavit záznam do souboru. Ukázka tohoto režimu programu je na obr. 8-2.



Obr. 8-2 Ukázka programu pro nastavení regulátoru (testovací režim)

### 8.2.1 Formát souboru zaznamenaných dat

Soubor pro záznam dat byl zvolen textový, na každém řádku jeden záznam, jednotlivá data jsou oddělená středníkem. Zaznamenaná aktuální teplota je nefiltrovaná, na každý požadavek PC na vyslání aktuálních dat regulátor změří okamžitou teplotu a tu poskytne programu v PC.

Ukázka tří řádků datového souboru:

500

25,50;255;128;20,0

25,50;0;128;20,0

První řádek vždy obsahuje zvolenou periodu záznamu v ms. Další řádky jsou již data, první číslo je aktuální teplota, druhé číslo je stav akční veličiny, nebo jinak řečeno stav výstupního relé (0=relé vypnuto, 255=relé sepnuto). Další číslo je vzorkovací perioda, přesněji hodnota registru PR1 časovače TIMER1 mikrokontroleru (bude popsáno dále). Poslední číslo je žádaná teplota. Protože aktuální teplota je v záznamu nefiltrovaná, byl vytvořen jednoduchý program (pro PC) pro filtraci, která používá stejný postup jako mikrokontroler. Na každý řádek přidá páté číslo, což je filtrovaná teplota v daném okamžiku.

## 9 PROGRAM PRO MIKROKONTROLER

Firma Microchip nabízí zdarma vývojové prostředí MPLAB, v základní verzi pouze jazykové prostředí Assembler (např. MPASM a ASM30). Prostředí MPLAB lze rozšířit o další kompilátory z jazyka C (Hi-Tech C, MPLAB C30...), které jsou již placené. MPLAB Cxx kompilátory lze po registraci získat ve studentské LITE, plně funkční verzi zdarma, která byla také použita pro tento projekt.

### 9.1 Komunikace se snímačem teploty AD7415

Jak již bylo uvedeno, v návrhu je použit integrovaný snímač teploty, který s nadřazeným mikrokontrolerem komunikuje po sběrnici I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup>. Pro softwarové řešení je praktické vytvořit samostatnou knihovnu, která obsahuje potřebné podprogramy pro řízení sběrnice a vysílání/přijem dat. Takováto knihovna byla vytvořena a obsahuje následující funkce:

<i>void I2C_ResetBus()</i>	vyšle stop bit, uvede sběrnici do IDLE režimu
<i>void I2C_Initialize(unsigned char BRG)</i>	nastaví rychlost sběrnice podle parametru BRG, volá ResetBus
<i>void I2C_Start(void)</i>	vyšle start bit
<i>unsigned char I2C_SendByte(unsigned char data)</i>	vyšle jeden bajt (proměnná <i>data</i> ). Pokud slave zařízení data potvrdí (vyšle potvrzovací bit ACK), funkce vrátí hodnotu 255, jinak vrátí hodnotu 0.
<i>unsigned char I2C_ReadAndACK()</i>	přijme jeden bajt a vyšle potvrzovací bit (ACK – Acknowledge)

### 9.2 Regulace ON/OFF s adaptivním nastavením periody vzorkování

Pro regulaci teploty místností je postačující regulace typu ON/OFF. Bytové i jiné místnosti mají obecně velkou kapacitu, regulovaná veličina má pomalou reakci na skokovou změnu požadované veličiny. Změna regulované veličiny *y* (teploty) může být 0,5°C i za řádově několik desítek sekund až minut, podle velikosti místnosti, zateplení,

těsnosti oken, výkonu topného tělesa, umístění regulátoru (jehož součástí snímač teploty bývá). Proto není třeba měřit teplotu v krátkých časových intervalech, dostačuje interval desítky sekund, podle typické rychlosti odezvy teploty dané místnosti. Tím můžeme dále šetřit energii baterie, protože snímač AD7574 můžeme v době mezi měřeními uvést do režimu spánku (ShutDown Mode), kdy má odběr typicky  $3\mu\text{A}$  dle datasheetu. Během měření teploty má ve špičce odběr až  $1,2\text{mA}$  a doba měření teploty je typicky  $25\mu\text{s}$ .

V případě periody vzorkování  $10\text{s}$  bude střední hodnota proudu odebíraného snímačem AD7415 dle rovnice [9-1].



Obr. 9-1 Příklad průběhu proudu odebíraného snímačem AD7415

$$I_{ef} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{t_1} i_1 dt + \int_{t_1}^T i_2 dt \right) = \frac{1}{10} \left( \int_0^{25 \cdot 10^{-6}} 1,2 dt + \int_{25 \cdot 10^{-6}}^{10} 3 \cdot 10^{-6} dt \right) = 6 \mu\text{A} \quad (23)$$

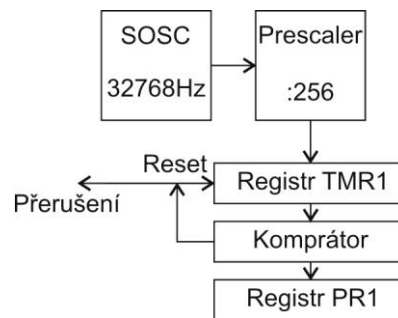
V případě periody vzorkování delší, než je rychlost změny regulované veličiny, může naopak docházet k nežádoucím velkým překmitům regulované veličiny. Když budeme průběžně měřit rychlost změny regulované veličiny a podle toho upravovat periodu vzorkování, dosáhneme adaptivního nastavení vzorkovací periody podle odezvy dané regulované soustavy, regulátor může pak dosáhnout optimálního průběhu regulované veličiny jak pro soustavy s odezvou v řádu sekund a méně, tak pro soustavy s odezvou řádu desítek sekund i minut při zachování optimálního odběru proudu snímače teploty.

V praktickém řešení regulátoru je pro vzorkování regulované veličiny použit vnitřní časovač mikrokontroleru, perioda vzorkování je nastavena změnou dělicího poměru časovače (registr PR1, časovač TIMER1). Periodu vzorkování počítáme dvojnásobně, a to jinou pro akční člen aktivní (proměnná `RelIsOn=true`) a jinou pro akční člen neaktivní (proměnná `RelIsOn=False`), protože v některých regulovaných soustavách může teplota pomalu vzrůstat (akční člen aktivní), ale rychle klesat (akční člen neaktivní, vyplý), například s relativně výkonným topným tělesem a aktivně chlazenou regulovanou

soustavou (ventilátorem). Mimo jiné i tento případ byl simulován při testování zde popsaného algoritmu regulace.

### 9.2.1 Výpočet periody vzorkování

Periodu vzorkování začínáme určovat při změně stavu akční veličiny  $u$ , která je v našem případě v rámci programu totožná s rozhodovacími úrovněmi hystereze (skutečná akční veličina je teplo vydávané topným tělesem). Vzorky jsou měřeny v přerušení od časovače TIMER1, který je taktován sekundárním oscilátorem SOSC, frekvence oscilátoru je 32,768kHz. Předdělička je nastavená na 256 a výchozí stav registru PR1 je 128, takže výchozí perioda vzorkování bude  $32768/256/128=1s$ . Na obr. 9-3 je blokové schéma časovače tak, jak je nastaven pomocí konfiguračních registrů.



Obr. 9-2 Blokové schéma  
časovače dle jeho konfigurace

Ve stejné konfiguraci jsou nastaveny ostatní časovače. TIMER3 má periodu přerušení 50ms, je použit pro měření doby poklesu nebo vzestupu teploty o více než 0,5°C.

TIMER1 počáteční perioda 1s, měření vzorků teploty a výpočet prům. difference

TIMER2 perioda 0,1s, výpočet regulační odchylky.

TIMER3 perioda 0,05s, měření doby změny teploty a výpočet PR1. V každém dalším přerušení se zpřesní perioda vzorkování teploty.

Změřená doba změny teploty od více jak 0,5°C se vydělí 10, vzorkovací perioda bude tedy 10x rychlejší a výsledek bude ohraničen intervalem [50ms; 10s], vyjde-li tedy menší než 50ms, bude 50ms a vyjde-li větší než 10s, bude 10s.

Algoritmus v C pro mikrokontrolery PIC:

TIMER1:

```

1 void __attribute__((__interrupt__, auto_psv)) _T1Interrupt(void)
2 {
3     unsigned char k;
4     IFS0bits.T1IF=0;
5     for (k=0; k<3; k++) {
6         TempArr[k]=TempArr[k+1];
7     }
8     TempArr[3]=TempSenzor_Teplota();
9     Teplota=0;
10    for (k=0; k<4; k++) {
11        Teplota=Teplota+TempArr[k];
12    }
13    Teplota=Teplota/4;
14    return;}

```

Pole TempArr obsahuje předchozí vzorky teploty, v prvním cyklu se vzorky posunou o jeden do minulosti a čtvrtý vzorek bude aktuální. V druhém cyklu se vzorky sečtou a po dokončení cyklu se výsledek vydělí 4.

TIMER2:

```

15 void __attribute__((__interrupt__, auto_psv)) _T2Interrupt(void)
16 {
17     float e_;
18     IFS0bits.T2IF=0;
19     e_=TeplotaW-Teplota;
20     e_=-1*e_;
21     if (e_>=Hystereze) {
22         if (ReleIsOn==0) {
23             ReleOn(); Teplota_start=Teplota; CitejTepUp=255;
24             CitacTepUp=0; CitejTepDown=0; PR1=PR1_Up; TMR1=0;
25         }
26         ReleIsOn=255;
27     }
28     else if (e_>=Hystereze) {
29         PrvniStart=0;
30         if (ReleIsOn==255) {
31             ReleOff(); Teplota_start=Teplota; PR1=PR1_Down; TMR1=0;
32             CitejTepDown=255; CitacTepDown=0; CitejTepUp=0;

```



```

33     }
34     ReleIsOn=0;
35     }
36 }

```

Vypočítá se odchylka  $e$  a její ekvivalent s opačným znaménkem  $e_{-}$ . V případě, že bude teplota klesat, bude po dosažení spodní hranice regulační odchylky splněna první podmínka  $e \geq Hystereze$ , sepne se relé, povolí se měření času vzestupu teploty (proměnná  $CitejTepUp=255$ ), do proměnné  $Teplota\_start$  se uloží aktuální teplota, která bude výchozí pro měření času změny, do registru PR1 se uloží předchozí hodnota dělicího poměru pro stoupající teplotu. V případě, že bude teplota stoupat, bude po dosažení horní hranice regulační odchylky splněna druhá podmínka  $e_{-} \geq Hystereze$  a provedou se obdobné operace, jako v první podmínce. Tyto operace se provedou jen jednou právě po dosažení nebo překročení hranice odchylky, aby nebyla cívka relé cyklicky vybavována.

#### TIMER3:

```

37 void __attribute__((__interrupt__, auto_psv)) _T3Interrupt(void)
38 {
39     IFS0bits.T3IF=0;
40     if (PrvniStart==0) {
41         if (CitejTepUp==255) {
42             if ((Teplota-Teplota_start)>0.5) {
43                 if (CitacTepUp<1) CitacTepUp=1;
44                 //CitacTepUp=(6.4)*(CitacTepUp)/10;
45                 CitacTepUp=0.64*CitacTepUp;
46                 if (CitacTepUp<6) CitacTepUp=6;
47                 PR1=CitacTepUp;
48                 PR1_Up=PR1;
49                 TMR1=0;
50                 CitejTepUp=0;
51             }
52             CitacTepUp++;
53             if (CitacTepUp>2000) {
54                 CitacTepUp=2000;
55                 CitacTepUp=0.64*CitacTepUp;
56                 PR1=CitacTepUp;
57                 PR1_Up=PR1;
58                 TMR1=0;
59                 CitejTepUp=0;

```

```
60     }
61 } else CitacTepUp=0;
62 if (CitejTepDown==255) {
63     if ((Teplota_start-Teplota)>0.5) {
64         if (CitacTepDown<1) CitacTepDown=1;
65         CitacTepDown=0.64*CitacTepDown;
66         if (CitacTepDown<6) CitacTepDown=6;
67         PR1=CitacTepDown;
68         PR1_Down=PR1;
69         TMR1=0;
70         CitejTepDown=0;
71     }
72     CitacTepDown++;
73     if (CitacTepDown>2000) {
74         CitacTepDown=2000;
75         CitacTepDown=0.64*CitacTepDown;
76         PR1=CitacTepDown;
77         PR1_Down=PR1;
78         TMR1=0;
79         CitejTepDown=0;
80     }
81 } else CitacTepDown=0;
82 }
83 return;
84 }
```

Dokud není splněna podmínka rozdílu `Teplota_start` a aktuální teploty větší než 0,5, je proměnná `CitacTepUp`, resp. `CitacTepDown` v každém cyklu zvyšována o 1. Po splnění podmínky rozdílu teplot je v této proměnné číslo odpovídající počtu 50ms intervalů. Hodnota 128 v registru PR1 časovače TMR1 odpovídá intervalu přerušování 1s, číslo 6 pak odpovídá přibližně 50ms (přesně 6,4. Registr je však celočíselný), takže hodnotu v proměnné `CitacTepUp` (resp. `CitacTepDown`) vynásobíme 6,4 a po převodu na celočíselný typ získáme odpovídající periodu časovače TMR1. Výsledná perioda by měla být podle Shannon-Kotelnikova teorému nejméně 2x kratší, volíme periodu 10x kratší z důvodu bezpečnostní rezervy, aby byly obsaženy i případné náhlé rychlé změny teploty. Toto zkrácení periody vzorkování bylo i experimentálně ověřené, kdy v regulované soustavě s rychlou odezvou dosahuje registr PR1 hodnoty řádově desítek a v soustavách s pomalou odezvou (s velkou kapacitou, se setrvačností vyšších řádů) bez problému

dosáhne hodnoty 1280, což odpovídá periodě 10s. Periodu 10x kratší získáme vynásobením proměnné `CitacTepUp` konstantou 0,64.

Dále jsou ošetřeny nejmenší a největší periody vzorkování, proměnná `CitacTepUp` (resp. `CitacTepDown`) je testována na hodnotu 6 (50ms interval přerušení TMR1), a mimo podmínku rozdílu teplot je testována na hodnotu 2000, což po vynásobení koeficientem 0,64 odpovídá 10s intervalu přerušení TMR1. Osamostatněním této podmínky je ošetřen stav, kdy by se teplota nezměnila o více než 0,5°C ani za 10s.

### 9.3 Čekací smyčky

Pro komunikaci I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> a pro spínání bistabilního relé jsou nutné čekací smyčky, v prvním případě v řádu  $\mu$ s, ve druhém případě v řádu ms. Jsou dvě možnosti, jak čekací smyčku řešit, a to pomocí časovače, nebo pomocí prostého cyklu. Časovač je vhodný v případech, kdy je předpoklad, že procesor bude během čekací smyčky vykonávat jiné větve kódu. Pro náš účel postačí prostý cyklus.

Pro algoritmus čekací smyčky je rozhodující frekvence oscilátoru, kolik taktů oscilátoru je třeba pro vykonání instrukcí ve smyčce (procesory rodiny PIC24 mají jeden strojový cyklus trvající 2 takty oscilátoru a převážná většina instrukcí trvá jeden strojový cyklus) a požadovaná doba čekání. V Assembleru může smyčka vypadat například takto:

```

1 MOV prodleva, W0           //do registru W0 vloží prodlevu
2 MOV W0, LoopCount         //hodnotou reg. W0 naplní registr LoopCount
3 Loop: DEC LoopCount       //LoopCount=LoopCount-1
4 NOP                       //instrukce NOP nedělá nic, několik jich
5 .                          //je nutné vložit do těla cyklu a zjišťovat
6 .                          //délku trvání cyklu pro různé hodnoty
7 NOP                       //prodlevy a takto „kalibrovat“ cyklus
8 BRA NZ, Loop              //instrukce DEC nastavuje příznaky C,Z.
                             Pokud je výsledek odčítání nula, nastaví příznak Z. Instrukce BRA je
                             podmíněný skok, pokud je příznak Z nulový (výsledek po provedení DEC
                             není nula), skočí na začátek cyklu na návěští Loop.

```

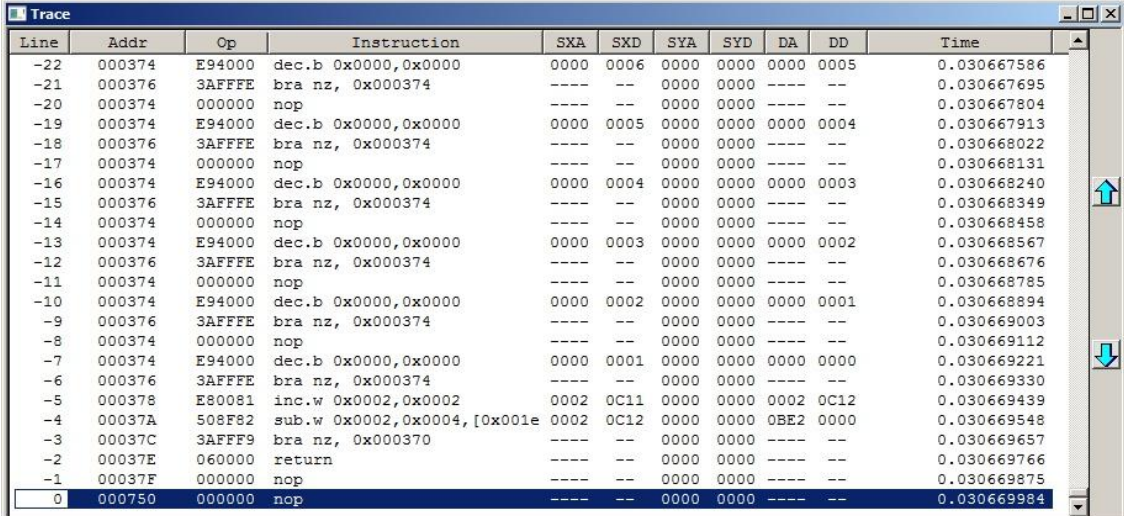
V C jazyce můžeme použít cyklus *While*. Pro smyčku  $\mu$ s použijeme jeden cyklus, proměnnou typu *unsigned char* (byte). Pro smyčku ms použijeme dva vnořené cykly *While*, vnější cyklus bude používat proměnnou typu *unsigned int* (word) a vnitřní cyklus proměnnou typu *unsigned char* (byte).

Počet instrukcí NOP a v cyklu Delay\_ms konstanta 103, kterou se násobí vstupní hodnota funkce a konstanta 28 (délka trvání vnitřního cyklu) byly určeny empiricky podle trasování a měření doby provádění kódu (modul Simulator Trace).

```

1 void Delay_us(unsigned char Value)
2 {
3     while (Value!=0) {
4         Value--;
5         Nop(); Nop(); Nop(); Nop(); Nop();
6     }
7 }
8
9 void Delay_ms(unsigned char Value)
10 {
11 unsigned int ValueInt;
12 unsigned char HelpLoop;
13     ValueInt=Value*103;
14     while (ValueInt!=0) {
15         ValueInt--;
16         Nop();
17         HelpLoop=28;
18         while (HelpLoop!=0) {
19             HelpLoop--;
20         }
21     }
22 }

```



Line	Addr	Op	Instruction	SXA	SXD	SYA	SYD	DA	DD	Time
-22	000374	E94000	dec.b 0x0000,0x0000	0000	0006	0000	0000	0000	0005	0.030667586
-21	000376	3AFFFE	bra nz, 0x000374	----	--	0000	0000	----	--	0.030667695
-20	000374	000000	nop	----	--	0000	0000	----	--	0.030667804
-19	000374	E94000	dec.b 0x0000,0x0000	0000	0005	0000	0000	0000	0004	0.030667913
-18	000376	3AFFFE	bra nz, 0x000374	----	--	0000	0000	----	--	0.030668022
-17	000374	000000	nop	----	--	0000	0000	----	--	0.030668131
-16	000374	E94000	dec.b 0x0000,0x0000	0000	0004	0000	0000	0000	0003	0.030668240
-15	000376	3AFFFE	bra nz, 0x000374	----	--	0000	0000	----	--	0.030668349
-14	000374	000000	nop	----	--	0000	0000	----	--	0.030668458
-13	000374	E94000	dec.b 0x0000,0x0000	0000	0003	0000	0000	0000	0002	0.030668567
-12	000376	3AFFFE	bra nz, 0x000374	----	--	0000	0000	----	--	0.030668676
-11	000374	000000	nop	----	--	0000	0000	----	--	0.030668785
-10	000374	E94000	dec.b 0x0000,0x0000	0000	0002	0000	0000	0000	0001	0.030668894
-9	000376	3AFFFE	bra nz, 0x000374	----	--	0000	0000	----	--	0.030669003
-8	000374	000000	nop	----	--	0000	0000	----	--	0.030669112
-7	000374	E94000	dec.b 0x0000,0x0000	0000	0001	0000	0000	0000	0000	0.030669221
-6	000376	3AFFFE	bra nz, 0x000374	----	--	0000	0000	----	--	0.030669330
-5	000378	E80081	inc.w 0x0002,0x0002	0002	0C11	0000	0000	0002	0C12	0.030669439
-4	00037A	508F82	sub.w 0x0002,0x0004,[0x001e	0002	0C12	0000	0000	0BE2	0000	0.030669548
-3	00037C	3AFFF9	bra nz, 0x000370	----	--	0000	0000	----	--	0.030669657
-2	00037E	060000	return	----	--	0000	0000	----	--	0.030669766
-1	00037F	000000	nop	----	--	0000	0000	----	--	0.030669875
0	000750	000000	nop	----	--	0000	0000	----	--	0.030669984

Obr. 9-3 Ukázka výstupu modulu Trace

Na obr. 9-3 je ukázka okna trasování programu. V pravém sloupci („Time“) je čas v sekundách od resetu procesoru. Můžeme zvolit také počet strojových cyklů. Měřený úsek programu ohraničíme breakpointy a odečteme od sebe časy, ve kterých se simulace zastavila. Takto můžeme přesně určit dobu trvání čekacích smyček pro různé vstupní hodnoty a smyčky odladit.

## 9.4 Optimalizace programu pro mikrokontroler

Firma Microchip nabízí volně dostupné vývojové prostředí MPLAB IDE, v základní verzi pouze assembler. Lze jej rozšířit o kompilátor C30, tedy jazyk C, který je pro komerční účely placený, nabízí také volně dostupnou studentskou verzi. Nemálo algoritmů se díky C zjednoduší, ovšem vyvstává otázka optimálního překladu (ve studentské verzi). Záleží také na zvolené úrovni optimalizace.

Jako příklad uvedu negaci jednoho bitu registru (výstupní brány) při nejnižší úrovni optimalizace překladače:

C (první verze):

```
_RB10=~_RB10;
```

Zkompilovaný kód:

```
1 mov.b 0x02cb,0x0000
2 ze 0x0000,0x0000
3 lsr 0x0000,#2,0x0000
4 and.b 0x0000,#1,0x0000
5 mov.b 0x0000,0x0004
6 mov.b 0x0004,0x0000
7 com.w 0x0000,0x0000
8 com.w 0x0002,0x0002
9 and.b 0x0000,#1,0x0000
10 and.b 0x0000,#1,0x0000
11 sl 0x0000,#2,0x0004
12 mov.w #0x2cb,0x0002
13 mov.b [0x0002],0x0002
14 mov.b #0xfb,0x0000
15 and.b 0x0002,0x0000,0x0000
16 ior.b 0x0000,0x0004,0x0000
17 mov.b 0x0000,0x02cb
```

C (druhá verze):

```
if (_RB10) _RB10=0; else _RB10=1;
```

Zkompilovaný kód je úspornější, než v prvním případě:

```
1 mov.b 0x02cb,0x0000
2 and.b 0x0000,#4,0x0000
3 cp0.b 0x0000
4 bra z,nasetuj_bit
5 bclr.b 0x02cb,#2
6 bra konec
7 nasetuj_bit: bset 0x02cb,#2
8 konec:
```

Kód napsaný přímo v assembleru:

```
1 btss portb, #0x0A           -když daný bit=1, přeskoč násl. instr.
2 bra nasetuj                -jinak skoč na nasetuj
3 bclr portb, #0x0A          -resetuj daný bit
4 bra konec                  -skoč na konec
5 nasetuj: bset portb, 0x0A   -nasetuj daný bit
6 konec:
```

Stejný kód překladač vygeneruje při nejvyšší úrovni optimalizace.

Procesory rodiny 24F mají navíc instrukci negování bitu registru (bit toggle), takže u těchto procesorů lze kód redukovat na jednu jedinou instrukci, jejíž vykonání zabere jeden strojový cyklus (dva hodinové cykly), samozřejmě je tato rodina procesorů v kódu i v debuggeru MPLABu definována:

```
1 btg portb, #0x0A
```

Takto překladač nezkompiluje popsany kód ani v nejvyšší zvolené úrovni optimalizace. Zda se takto chová jen ve studentské verzi je otázka, každopádně nedá nijak najevo, že by tato úroveň optimalizace nebyla podporována. (Nebo zda se takto chová, protože debugger tuto rodinu procesorů podporuje zatím jen jako beta verze).

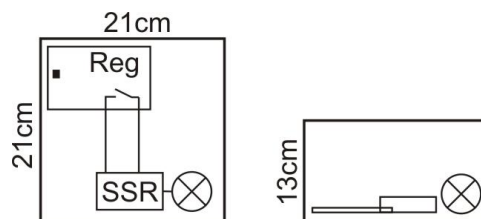
## 10 TESTOVACÍ SESTAVA REGULÁTORU

Regulátor byl testován v několika typech regulovaných soustav, včetně regulace teploty místnosti. V první fázi byl regulátor umístěn do malé kartonové krabičky 21x21x13cm s otvorem ve víku pro ventilátor a s několika malými otvory v blízkosti topného tělesa. Jako topné těleso byla použita žárovka 230V/75W. Nejprve byla regulována teplota v uzavřené krabičce se zakrytým otvorem ve víku, po proběhnutí několika regulačních zásahů byl otvor odryt a regulovaná soustava byla chlazená ventilátorem. V jednom případě vzduch proudil přímo na regulátor, ve druhém případě přímo na topné těleso.

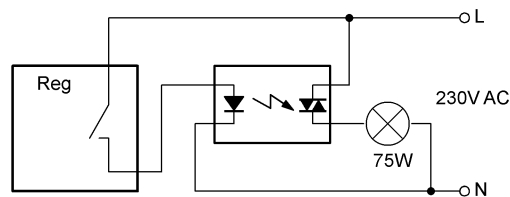
Ve druhé fázi bylo výstupní relé zapojeno kabelem na solenoidový ventil stávajícího domácího regulačního okruhu, stávající regulátor Siemens byl odpojen. Místnost měla rozměry 290x410x300cm, standardní obytná zděná místnost s venkovním zateplením a zavřenými plastovými okny. Tento test by bylo lépe provádět v zimním období. V bytě, ve kterém byl test prováděn, je sice přivedena jen studená a topná voda, topnou vodou se v malém výměníku ohřívá studená voda, takže vytápět se teoreticky dá celý rok, ale podmínky měření nebyly zcela uspokojivé. Relativně chladné dny byly proměšnáky. Při prvním testu byla počáteční teplota 22°C, na požadovanou teplotu 24°C teplota spolehlivě stoupla, ale měla dlouhodobou tendenci (nejméně 5 hodin) se na této hodnotě spolehlivě udržet. V dalších testech dosahovala počáteční teplota místnosti hodnoty až 24°C a to i ve večerních a nočních hodinách. Vytopit místnost na vyšší teplotu než 24°C až 25°C byl problém. V popsané menší místnosti je instalované topné těleso s termoregulační hlavicí, která má deklarovanou maximální teplotu právě na hodnotě 25°C až 26°C. Tentýž problém se vyskytl i v obývací místnosti, ve které je topné těleso přímo v regulační smyčce, tedy jehož tok topné vody řídí solenoidový ventil. V obou místnostech byla přes noc nastavena teplota 26°C, a po celou noc se teplota na tuto hodnotu nedostala, ačkoli akční člen byl stále sepnutý. Spolehlivějších výsledků tohoto testu by bylo možné dosáhnout při větším rozdílu venkovní a vnitřní teploty, tedy v zimním období.

V posledním pokusu se nakonec povedlo vykonat necelé dva regulační cykly během osmi hodin. Z grafu, přiloženém do přílohy, je patrná podstatně kratší doba sepnutí relé (přibližně 1 hodinu) než klidová doba (přibližně 3 hodiny). Bylo by zajímavé tento výsledek srovnat s podmínkami v zimním období.

Regulátor po seriové lince průběžně posílal hodnotu teploty, informaci o stavu relé a hodnotu registru PR1 časovače TIMER1, ze zaznamenaných hodnot byly vytvořeny grafy uvedené v příloze. Perioda záznamu hodnot regulace byla zvolena 500ms jako kompromis mezi množstvím dat a Shannon-Kotelnikovým teorémem. Nejkratší perioda vzorkování teploty v algoritmu regulace je 50ms, a tento čas je 10x kratší, než byla změřena doba nárůstu teploty o více než 0,5°C. Perioda záznamu hodnot 500ms je dostatečně názorná, pro hlubší a časově náročnější zkoumání chování regulátoru by bylo možné periodu záznamu zkrátit na 100ms.



Obr. 10-1 Uspořádání testovací regulované soustavy a regulátoru



Obr. 10-2 Zapojení testovací sestavy



## 11 ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU

Tato kapitola se zabývá již zmíněnou rozšířenou verzí regulátoru. Schémata a obrazce plošných spojů jsou uvedeny v příloze. Samostatných regulátorů je na trhu velké množství. Tento návrh se zabývá modulárním řešením regulátoru a je to pouze návrh jeho koncepce. Základem je samotný regulátor bez displeje i bez tlačítek, k němu může mít výrobce možnost volby těchto komponent (podle zvolených komponent může vyrobit několik různých podtypů regulátorů jen volbou osazení DPS, přičemž program může detekovat přítomnost jednotlivých komponent, funkce pracující s neosazeným komponentem nevolat a tedy může být pro všechny podtypy stejný):

-PMOLED displej (OLED s pasivní maticí) 64x256 pixelů, komunikace SPI. Pro tento displej je na plošném spoji připraven konektor FFC/FPC pro plochý FFC kabel s roztečí vodičů 0,5mm. V případě nepoužití displeje není nutné DPS konektorem osazovat. OLED displej byl vybrán z důvodu nízkého odběru proudu, zvolený typ DD-25664BE-3A má nejvyšší deklarovaný proud při 100% jasu 51,4mA a při 50% jasu 32,9mA. Toto jsou nejvyšší hodnoty, typické hodnoty jsou 7 až 10mA nižší a jsou platné v případě rozsvícení všech pixelů. Navíc lze tento displej uvést do režimu spánku s odběrem 1 až 5 $\mu$ A.

-FLASH paměť, komunikace SPI. Do této paměti mohou být ukládána naměřená data z čidel po dobu roku a více (podle počtu čidel a podle kapacity zvolené FLASH).

-Malá klávesnice s jednou červenou LED diodou. Tato klávesnice s LED je řešena samostatnou DPS, která je s regulátorem propojena plochým kabelem FFC kabelem s roztečí 0,5mm. LED dioda může blikáním indikovat například stav baterie, takže musí mít co nejmenší odběr. Zvolen byl typ HLMP-Q156-H0021 (výrobce Avago Technologies), která má dle datasheetu deklarovanou svítivost typicky 7mcd při proudu 500 $\mu$ A. Pokud bude například 100ms svítit a 3000ms nesvítit, bude střední hodnota proudu 16,67 $\mu$ A.

-Transceiver pro bezdrátovou komunikaci s čidly, PC a případně s bytovou centrálou (není součástí tohoto návrhu). V původním návrhu (a zde uvedených schématech v příloze) je počítáno s RF komunikací bezdrátových čidel, pro kterou byl vybrán obvod MRF49XA (výrobce Microchip) s SPI komunikací. V tomto případě by však bylo nutné navrhnout vlastní komunikační protokol s několika čidly. Na trhu však existují hotové

transceivery komunikující ve standardu IEEE 802.15.4 s protokolem ZigBee™ nebo s protokolem MiWi™, vyvinutým firmou Microchip (například transceiver MRF24J40 firmy Microchip podporuje protokoly ZigBee™ i MiWi™). Také transceiver MRF24J40 má SPI sběrnici pro komunikaci s mikrokontrolerem. Neosazením DPS transceiverem vznikne prostý regulátor.

Dále je tu volba ze tří typů čidel s bezdrátovou komunikací:

-čidlo teploty

-čidlo tlaku

-čidlo vlhkosti, teploty a tlaku

Plošný spoj je pro všechna čidla navržen totožný, typy jednotlivých čidla lze volit jen různým osazením plošného spoje různými snímači. Místo pro nepoužitý typ snímače zůstane neosazené, program opět může detekovat přítomnost čidla a výrobce může volit typy čidel jen osazením DPS. Komunikace s PC je navržena bezdrátově (MRF49XA v tomto návrhu, vhodnější by byla změna na MRF24J40, viz. výše).

Čidlo má opět s volbu displeje (LCD) a dvou tlačítek. Displej i tlačítka jsou na společném samostatném plošném spoji, k čidlu lze tedy tento modul kdykoli dodatečně připojit plochým FFC kabelem s roztečí vodičů 0,5mm.

Jako senzor teploty je zvolen AD7415 (výrobce Analog Devices, komunikace I<sup>2</sup>C™), jako senzor tlaku MPX4250AP (výrobce Freescale, analogový výstup, rozsah napětí výstupu dle napájecího napětí, výrobcem doporučené je 5,1V). Senzor vlhkosti je kombinovaný se senzorem teploty, typ SHT71 (firma Sensirion, komunikace SPI). Ilustrační fotografie 11-1 a 11-2 převzaty z [4].



Obr. 11-1 Senzor tlaku  
MPX4250AP

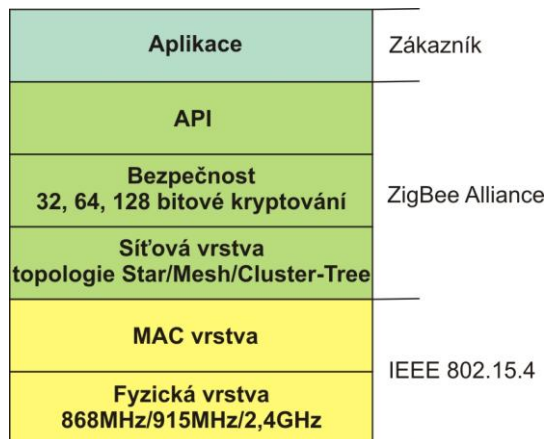


Obr. 11-2 Senzor  
vlhkosti a teploty  
SHT71

Další možností rozšíření modulárnosti systému je vyvinout bezdrátově ovládaný akční člen, takže se sítí bezdrátových čidel a akčních členů by bylo možné regulovat teplotu v několika místnostech nezávisle jedním centrálním regulátorem.

### 11.1 Bezdrátová síť čidel ZigBee™

Protokoly ZigBee™ i MiWi™ jsou vhodné pro bateriově napájené přístroje, transceivery podporující tyto protokoly mají při vysílání i příjmu nízký odběr (řádově desítky mA) a mohou se po dokončení komunikace uvést do režimu Sleep nebo Idle, ve kterém mohou mít odběr řádově  $\mu$ A. Rychlost přenosu se pohybuje od 20 do 250kpbs, dosah 100m, životnost baterií 100 až 1000 dní a více.



. 11-3 -OSI model protokolu  
ZigBee™

Standard IEEE 802.15.4 definuje fyzickou a MAC vrstvu (linkovou vrstvu), fyzická vrstva určuje konkrétní způsob komunikace a byly jí přiděleny tři frekvenční pásma:

- ISM 2,4GHz, 16 kanálů, rychlost 250kpbs, použití celosvětové
- 915MHz, 10 kanálů, rychlost 40kpbs, pouze pro americký kontinent
- 868MHz, 1 kanál, rychlost 20kpbs, pouze pro Evropu

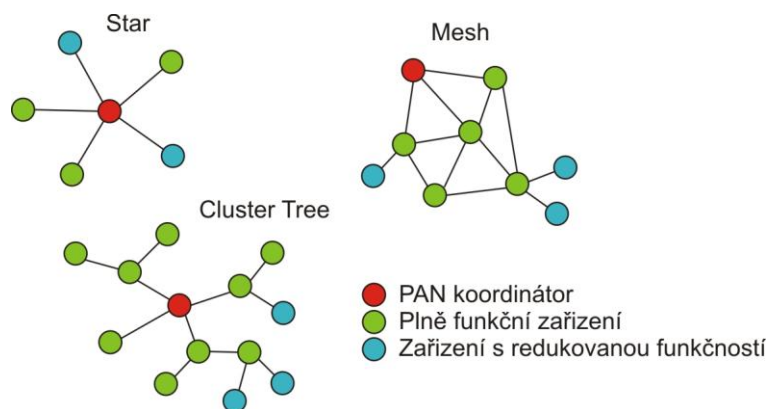
MAC vrstva definuje komunikaci mezi zařízeními (uzly sítě), komunikace se skládá ze čtyř komunikačních rámců:

- Data Frame** -rámec pro přenos užitečné informace
- Acknowledgement Frame** -potvrzující informace

**-MAC Command Frame** -rámec k centralizovanému konfigurování, nastavení a řízení klientů v síti

**-Beacon Frame** -rámec pro synchronizaci zařízení v síti, je využíván hlavně při konfiguraci sítě v režimu, ve kterém umožňuje uvedení klientů do režimů spánku s extrémně sníženou spotřebou.

Na obr. 13-4 jsou příklady topologie sítí ZigBee™. Plně funkční zařízení podporují kompletní protokolový rámec a také všechny služby, které ZigBee™ nabízí. V zařízeních s redukovanou funkčností jsou implementovány pouze pro dané zařízení potřebné protokolové knihovny z důvodu co nejvyššího snížení HW náročnosti.



Obr. 11-4 Příklady topologií sítě ZigBee™

## 11.2 Popis některých obvodových částí a součástek

V této kapitole se budeme zabývat některými částmi rozšířené verze regulátoru. Odkazovat se budeme na schémata v příloze.

### 11.2.1 Indikace napětí baterie

Napětí baterie je měřeno ve dvou úrovních dvěma vnitřními komparátory mikrokontroleru. Zvoleny byly čtyři NiHM články AA, které mají nominální napětí 1,2V. Regulátor jako celek je tedy napájen 4,8V. Napětí baterie je sníženo Low Drop stabilizátorem MCP1703 na 3,3V.

Odporový dělič tvoří rezistory R8, R9 a R10 (příloha V). Referenční napětí komparátorů zvolíme 0,55V. Z rovnice 18 uvedené v kapitole 6.3.3 vypočítáme hodnotu

registru  $CVR_{30}$ , jako zdroj referenčního napětí je zvoleno napájecí napětí mikrokontroleru, tedy  $CVR_{SRC}=3,3V$ . Registr  $CVR_{30}$  bude mít hodnotu 4.

Napětí na děliči označme  $U_{B1}$  a  $U_{B2}$  podle aktuálního stavu baterií. Napětí mezi  $GND$  spojem rezistorů  $R_8$  a  $R_9$  označme  $U_{C2INC}$  (rozhodovací úroveň prvního komparátoru, vstup  $C2INC$ ) a napětí mezi  $GND$  a spojem rezistorů  $R_9$  a  $R_{10}$  označme  $U_{C1INC}$  (rozhodovací úroveň druhého komparátoru, vstup  $C1INC$ ). Varovné napětí baterií bude  $U_{B2}=4,32V$  (napětí  $U_{C1INC}$  klesne pod  $0,55V$ ) a napětí téměř plně vybitých baterií bude  $U_{B1}=4,16V$  (napětí  $U_{C2INC}$  klesne pod  $0,55V$ ). Pro poměry napětí platí vztah 24.

$$U_{C1INC} = U_{C2INC} = U_{B1} \frac{R_9 + R_{10}}{R_8 + R_9 + R_{10}} = U_{B2} \frac{R_{10}}{R_8 + R_9 + R_{10}} \quad (24)$$

Ze vztahu 24 plyne

$$U_{B1} \frac{R_9 + R_{10}}{R_8 + R_9 + R_{10}} = U_{B2} \frac{R_{10}}{R_8 + R_9 + R_{10}}$$

$$R_9 = \frac{R_{10} (U_{B2} - U_{B1})}{U_{B1}}$$

Zvolíme hodnotu rezistoru  $R_{10}=36000\Omega$  a vypočítáme hodnotu  $R_9=1384\Omega$ . Pro hodnotu rezistoru  $R_8$  lze odvodit dva vztahy:

$$R_8 = \frac{U_{B1}}{U_{C2INC}} (R_9 + R_{10}) - R_9 - R_{10} \quad (25)$$

$$R_8 = \frac{U_{B2}}{U_{C1INC}} R_{10} - R_9 - R_{10} \quad (26)$$

$R_8$  bude mít hodnotu  $245374\Omega$ . U dodavatele nalezneme nejbližší hodnoty rezistorů a zkontrolujeme, jak se změní rozhodovací úrovně. Zvoleny byly rezistory  $R_8=249000\Omega$ ,  $R_9=1370\Omega$ ,  $R_{10}=36500\Omega$  a rozhodovací úrovně určíme podle následujících vztahů:

$$U_{B1} = U_{C2INC} \frac{R_8 + R_9 + R_{10}}{R_9 + R_{10}} = 0,55 \cdot \frac{249 + 1,37 + 36,5}{1,37 + 36,5} = 4,166V$$

$$U_{B2} = U_{C1INC} \frac{R_8 + R_9 + R_{10}}{R_{10}} = 0,55 \cdot \frac{249 + 1,37 + 36,5}{36,5} = 4,323V$$

Varovná hodnota napětí baterie bude tedy  $4,32V$  a téměř vybité baterie budou indikovány při napětí  $4,17V$ .

### 11.2.2 Obvod výběru zařízení SPI

V rozšířené verzi regulátoru jsou použity tři zařízení, které komunikují po sériové sběrnici SPI. Je tedy nutné, aby zařízení, se kterým komunikace právě neprobíhá, mělo výstup sériových dat ve stavu vysoké impedance. To se dá volit vhodnou hodnotou logické úrovně na vstupu *CS* (chip select), většinou je zařízení při  $CS=1$  neaktivní, výstupy ve stavu vysoké impedance, a při  $CS=0$  je zařízení vybráno. Navrhujeme tedy jednoduchý demultiplexer (převodník Bin/1ze3), ve schématu v příloze IV jsou to tři hradla NAND (IC4A, IC4B, IC4C) a dva invertory (IC3 a IC4D). Jako hradla NAND je použit integrovaný obvod 74LVC00, který obsahuje 4 dvouvstupé hradla, jedno hradlo má spojeno oba vstupy a je využito jako invertor. Na místě druhého invertoru je použit samostatný invertor v pouzdru SOT23-5.

Vytvoříme pravdivostní tabulku:

RB14	RB15	CS1#	CS2#	CS# (IC5A)
0	0	1	1	1
0	1	1	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1

Tabulka 12 Pravdivostní tabulka Bin/1ze3

Z tabulky 12 plyne, že rovnice pro všechny bity *CS#* mají charakter logického součinu. Pro bit *CS1#* stačí jedno hradlo NAND. Pro bity *CS2#* a *CS#* také stačí jedno hradlo a invertovat jeden z bitů *RB14* nebo *RB15*.

### 11.2.3 Modul klávesnice rozšířené verze regulátoru

V obvodu klávesnice je použit paralelně sériový posuvný registr 74HC165. Tlačítka jsou zapojena na paralelní vstupní bráně posuvného registru. Přivedením logické nuly na vstup *SH/LD#* se hodnoty z paralelních vstupů zapíší do klopných obvodů typu D a vzestupnou hranou na hodinovém vstupu *CLK* se jednotlivé bity postupně přesouvají od psoledního klopného obvodu až k výstupu *QH*. Aby mikrokontroler nemusel cyklicky zjišťovat stav kláves, jsou všechna tlačítka zapojena také do diodového členu OR (diody D102 až D109) a společné katody těchto diod zapojeny do vstupu *RA2* mikrokontroleru. Při změně stavu na tomto vstupu dojde k vyvolání přerušování, mikrokontroler zjistí stav tlačítek jen ve funkci, která toto přerušování obsluhuje.

V DPS klávesnice jsou navrženy otvory pro upevnění na horní díl krabičky regulátoru (není součástí návrhu).

#### 11.2.4 Modul displeje čidla

V modulu displeje čidla (příloha IX) je použit šestimístný sedmisegmentový LCD displej, který je buzen sérioparalelními posuvnými registry 74VHC595 zapojenými do kaskády. Mikrokontroler nejprve registry postupně naplní daty, a pak vzestupnou hranou na vstupech RCK zapíše data do výstupního latche. LCD displej nesmí být buzen stejnosměrným napětím kvůli možným elektrolytickým jevům v kapalných krystalech, proto je na jeden výstup jednoho posuvného registru přivedena i společná elektroda LCD displeju a změnu polarit napětí na elektrodách displeju může řídit programově mikrokontroler.

#### 11.2.5 Snímač tlaku MPX4250A

MPX4250A (příloha VIII) je piezorezistivní snímač absolutního tlaku s vlastní teplotní kompenzací. Rozsah měřeného tlaku 20 až 250kPa, rozsah napájecího napětí 4,85 až 5,35V. Doporučené napájecí napětí je 5,1V. Citlivost 20mV/kPa. Napětí v plném rozsahu tlaku je typicky 4,896V při napájení 5,1V. Maximální chyba měření je 1,5% v rozsahu teplot 0 až 85°C.

Výstupní napětí je lineárně závislé na měřeném tlaku, ale také na napájecím napětí. Vztah 27 [20] popisuje závislost mezi výstupním napětím, tlakem a napájecím napětím.

$$V_{OUT} = V_S (0,004P - 0,04) \quad (27)$$

$V_S$  ve vztahu 27 je napájecí napětí. Napětí na výstupu snímače tlaku může přesáhnout hodnotu napájecího napětí mikrokontroleru, které je 3,3V, proto na výstup snímače zařadíme odporový dělič (rezistory R400 a R401). Rezistory jsou voleny s nízkou výrobní tolerancí a vysokou teplotní stabilitou (0,05% a 10ppm, výrobce Panasonic, typ ERA3ARW332P, orientační cena 1 Euro do 10ks, 0,36 Euro nad 1000ks), abychom do měření tlaku vnesli co nejmenší chybu.

##### 11.2.5.1 StepUp DC/DC měnič L6920DB

Pro napájení musíme napájecí napětí 3,3V zvýšit na 5,1V. Pro tento účel byl vybrán obvod L6920DB v osmivývodovém SMD pouzdru MSOP8. (IC404, příloha VIII), výrobce

ST Microelectronics. Spínací frekvenci má 1MHz. Nejmenší napětí pro start má 0,8V. Klidový proud má maximálně 15 $\mu$ A typicky. Proud ve režimu spánku (shutdown) má 0,1 $\mu$ A typicky, 1 $\mu$ A maximálně. Výstupní napětí lze zvolit 3,3V (připojením vstupu FB, tedy vstupu zpětné vazby, na výstup), nebo 5V (připojením vstupu FB na GND), nebo nastavit odporovým děličem na hodnotu 1,8 až 5,2V (připojením vstupu FB na střed děliče, tato varianta je použita i zde, viz. příloha VIII).

Na místě kondenzátorů C409 a C411 je vhodné použít kondenzátory s co nejmenším ESR (ekvivalentní sériová rezistance, kondenzátor s nízkou impedancí), vzhledem ke kapacitě 47 $\mu$ F kvalitní elektrolytické kondenzátory, nebo dnes je možno volit i keramické kondenzátory, například keramické kondenzátory 47 $\mu$ F/16V, výrobce Murata, typ GRM32ER61C476ME15L v SMD pouzdru 1210, rozměry 3,2x3,2,2,5mm.

#### 11.2.5.2 Zdroj referenčního napětí pro AD převodník

Napětí ze snímače tlaku musíme převést na odpovídající binární číslo. K tomu poslouží modul AD převodníku mikrokontroleru. Ten ke své funkci potřebuje přesné referenční napětí. To lze konfiguračními registry volit buď jako napájecí napětí mikrokontroleru, nebo extrémní referenční napětí. Zvolena byla druhá varianta a vybrán byl přesný zdroj referenčního napětí LM4123 v SMD pouzdru SOT-23. Napájecí proud 60 $\mu$ A, má možnost přejít do režimu spánku (napájecí proud se sníží na 3 $\mu$ A). Přesnost a teplotní stabilita (a cena) závisí na variantě obvodu LM4132, viz. tabulka 13.

	Přesnost výstupního napětí	Teplotní stabilita
LM4132A	$\pm 0,05\%$	10ppm
LM4132B	$\pm 0,1\%$	20ppm
LM4132C	$\pm 0,2\%$	20ppm
LM4132D	$\pm 0,4\%$	20ppm
LM4132E	$\pm 0,5\%$	30ppm

Tabulka 13 Varianty napětíové reference LM4132



### 11.2.6 Snímač vlhkosti a teploty SHT71, SHT75

Snímač SHT71 měří relativní vlhkost a teplotu. Vzhledem ke vzájemné blízkosti senzoru vlhkosti i tlaku lze s vysokou přesností určit i teplotu rosného bodu. Tu snímač neměří přímo, ale teplotu rosného bodu je možné vypočítat vztahem 28 [23].

$$T_d = T_n \frac{\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{mT}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) - \frac{mT}{T_n + T}} \quad (28)$$

kde  $T_d$  je teplota rosného bodu,  $R_H$  je změřená relativní vlhkost (Relative Humidity),  $T$  je změřená teplota. Konstanty  $m$  a  $T_n$  určíme podle tabulky 14 [23] (konstanty závisí na teplotě  $T$ ).

Teplota T [°C]	Tn [°C]	m
0 až 50	243,12	17,62
-40 až 0	272,62	22,46

Tabulka 14 Konstanty pro výpočet rosného bodu

Snímač SHT71 má napájecí napětí 3,3V, proudový odběr 0,55mA při měření a 0,3μA v režimu spánku.

Přesnost měření relativní vlhkosti je typicky  $\pm 3$  %RH (SHT71P) a  $\pm 1,8$  %RH (SHT75). Rozlišení relativní vlhkosti je 0,05% při zvoleném bitovém rozlišení 12b a 0,4% při bitovém rozlišení 8b (bitové rozlišení lze volit konfigurací status registru). Rozsah měření vlhkosti je 0-100%. Přesnost měření teploty je 0,4°C (SHT71) a 0,3°C (SHT75), rozlišení teploty je 0,01°C při bitovém rozlišení 14b a 0,04 při bitovém rozlišení 12b. Rozsah měření teploty je -40 až 123,8°C.

### 11.2.7 Záložní zdroj energie

V rozšířené verzi je jako záložní zdroj energie zvolen vysokokapacitní kondenzátor s aerogelovým dielektrikem (C3 v příloze V), typ PM-5R0H305-R, výrobce Cooper/Bussmann. Rozměry 10.5x20.8x32mm, kapacita 3F, max. napětí 5V, ESR 50mΩ. Po vytažení baterií by zálohoval celý procesor a relé, regulace bude probíhat. Uživatel bude mít dostatek času na výměnu baterií, při odběru 100μA poklesne napětí na kondenzátoru na 3V přibližně za 2,6dní.

## ZÁVĚR

Navržený regulátor s dvupolohovým regulačním algoritmem dosahuje uspokojivého průběhu regulované veličiny v různých typech regulovaných soustav. Vykazuje však překmity různých úrovní, které by se možná dalo pokusit snížit měřením doby od sepnutí relé po dosažení překmitu a adaptivním zkrácením doby sepnutí v dalším regulačním cyklu podle předchozí změřené hodnoty.

Vývojová verze regulátoru splnila účel testování komunikace I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> i algoritmu regulace. Práce se senzorem AD7415 je jednoduchá a účelná, není nutné žádné nastavení ani kalibrace, senzor je kalibrován výrobcem.

Z návrhu rozšířené koncepce regulátoru by mohl být vyvinut systém malé domácí automatizace, například s nezávislou regulací teploty v jednotlivých místnostech, archivací naměřených hodnot, ovládání a sledování průběhu regulace vzdáleným přístupem (Internet, GSM).

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The designed regulator with two-positions control achieves a satisfactory course of controlled variable in different types of regulated systems. It shows, however, some overshoots of different levels which might be worth trying to reduce by measurement of the time from the closure of relay to the attainment of overshoot and by adaptive shortening of the switching time in the next regulatory cycle according to the previous measured value.

The development version of the regulator fulfilled the purpose of testing the I2C communication and control algorithms. Working with AD7415 sensor is simple and efficient, no special setup or calibration are needed, the sensor is calibrated by the producer

A small home automation system might be developed from the design of the expanded conception of the regulator, for example, a regulator with an independent temperature control in individual rooms, with an archivation of measured values, controlling and monitoring of remote access control (Internet, GSM).

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HRUŠKA, František. *Senzory v systémech informatiky a automatizace*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati, 2007. 177 s. ISBN 978-80-7318-630-2.
- [2] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. Praha : Ben, 2004. 663 s.
- [3] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fyzika, část 5 : Moderní fyzika*. Brno : VUTIUM, 2003. 164 s. ISBN 80-214-1868-0.
- [4] *Farnell* [online]. 2010 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: <[www.farnell.com](http://www.farnell.com)>.
- [5] CERDA, Ramon. *MPD Microwave product digest* [online]. Crystek Corporation (Englewood Cliffs) : 2008 [cit. 2010-05-12]. *Pierce-Gate Crystal Oscillator, an Introduction*. Dostupné z WWW: <<http://www.mpdigest.com/issue/Articles/2008/Mar/Crystek/Default.asp>>.
- [6] RAWLE, Jonathan. *Jonathan.rawle.org* [online]. 2008 [cit. 2010-05-12]. *How to calculate the day of the week*. Dostupné z WWW: <[http://jonathan.rawle.org/hyperpedia/day\\_calculation.php](http://jonathan.rawle.org/hyperpedia/day_calculation.php)>.
- [7] Euroquartz [online]. CREWKERNE (United Kingdom) : *MJ Crystals*, 2008 [cit. 2010-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.euroquartz.co.uk/Portals/0/mj.pdf>>.
- [8] [www.hw.cz](http://www.hw.cz) [online]. 8.6.2005 [cit. 2010-05-17]. *ZigBee - novinka na poli bezdrátové komunikace*. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Rozhrani/ART1299-ZigBee---novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html>>.
- [9] FLOWERS, David; YANG, Yifeng. *MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack* [online]. 12.8.2006 [cit. 2010-05-17]. [www.microchip.com](http://www.microchip.com). Dostupné z WWW: <[http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/MiWi%20Application%20Note\\_AN1066.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/MiWi%20Application%20Note_AN1066.pdf)>.
- [10] TIŠNOVSKÝ, Pavel. [www.root.cz](http://www.root.cz) [online]. 30.12.2008 [cit. 2010-05-18]. *Externí sériové sběrnice SPI a I<sup>2</sup>C*. Dostupné z WWW: <<http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>>.
- [11] Katedra řídicí techniky ČVUT-FEL Praha [online]. 2009 [cit. 2010-06-01]. *Nespojité regulátory pro méně náročné aplikace*. Dostupné z WWW: <<http://dce.felk.cvut.cz/zri/skripta/Nespojite%20regulatory.pdf>>.

- [12] ŠEDIVÝ, Přemysl. Univerzita Karlova v Praze, Fyzikální olympiáda [online]. Hradec Králové : MAFY Hradec Králové, 2007 [cit. 2010-06-01]. *Teplotní závislosti fyzikálních veličin.* Dostupné z WWW: <<http://fo.cuni.cz/texty/teplota.pdf>>.
- [13] SCHLAEPFER, Eric. Maxim [online]. 2008 [cit. 2010-06-01]. *External Temperature Sensor Calibration for the MAX16031/MAX16032 System Monitors.* Dostupné z WWW: <<http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/4284>>
- [14] HALGAŠ, Rostislav. *Popis principu měření plošné hmotnosti a tloušťky materiálu, návrh panelových displejů pro zobrazení změřených hodnot plošné hmotnosti a tloušťky.* Zlín, 2008. 65 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati.
- [15] Analog Devices [online]. 2005 [cit. 2010-06-01]. *AD7414/7415.* Dostupné z WWW: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7414\\_7415.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7414_7415.pdf)
- [16] Microchip. [online]. 2009 [cit. 2010-06-01]. *PIC24F16KA102 Family Data Sheet* Dostupné z WWW: <[http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC24F16KA102\\_Family\\_datasheet\\_39927b.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC24F16KA102_Family_datasheet_39927b.pdf)>
- [17] Diodes incorporated (Zetex Semiconductors) [online]. 2005 [cit. 2010-06-02]. *ZXMC3A17DN8.* Dostupné z WWW: <<http://www.diodes.com/datasheets/ZXMC3A17DN8.pdf>>
- [18] Vishay [online]. 2008 [cit. 2010-06-02]. *Small Signal Schottky Diodes SL02, SL03, SL04.* Dostupné z WWW: <<http://www.vishay.com/docs/85687/sl02.pdf>>
- [19] Infineon [online]. 2007 [cit. 2010-06-02]. *Silicon Schottky Diode BAT60A.* Dostupné z WWW: <<http://www.infineon.com/dgdl/bat60aseries.pdf?folderId=db3a304313d846880113def5812204a1&fileId=db3a304313d846880113def70c9304a9>>.
- [20] Freescale [online]. 2009 [cit. 2010-06-02]. *MPX4250A Series.* Dostupné z WWW: [http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MPX4250A.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX4250A.pdf)>

- [21] ST Microelectronics [online]. 2006 [cit. 2010-06-02]. *Synchronous rectifier step up converter L6920DB*. Dostupné z WWW: <<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11378/l6920db.pdf>>.
- [22] National Semiconductor [online]. 2006 [cit. 2010-06-01]. *LM4132 SOT-23 Precision Low Dropout Voltage Reference*. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM4132.pdf>>.
- [23] Sensirion [online]. 2010 [cit. 2010-06-02]. *Humidity and Temperature Sensor SHT71, SHT75*. Dostupné z WWW: [http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT7x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT7x.pdf)
- [24] Densitron displays [online]. 2010 [cit. 2010-06-03]. *Passive Matrix OLED Displays*. Dostupné z WWW: <<http://www.densitron.com/displays/Displays.aspx?nCategoryID=10>>.
- [25] Cooper Bussmann [online]. 2009 [cit. 2010-06-08]. *Supercapacitors PM Series*. Dostupné z WWW: <<http://www.cooperbussmann.com/pdf/622e3203-c004-4016-a467-ed7c3b98b5f0.pdf>>.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

ACK	Acknowledge
FFC	Flat Flexible Cable
I <sup>2</sup> C™	Inter Integrated Circuit (ochranná známka)
ICSP	In Circuit Serial Programming
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
MISO	Master Input Slave Output
MOSI	Master Output Slave Input
NTC	Negative Temperature Coefficient
OLED	Organic Light Emitting Diode
R/W	Read/Write
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SMD	Surface Mount Device
SMT	Surface Mount Technology
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Můstkové zapojení odporového snímače teploty .....	14
Obr. 1-2 Odporový snímač se zdrojem konst. proudu .....	14
Obr. 1-3 Graf závislosti úbytku napětí na PN přechodu na teplotě .....	16
Obr. 1-4 Graf závislosti $U_0$ na teplotě.....	16
Obr. 1-5 Princip měření teploty dvěma proudy .....	17
Obr. 2-1 (n+1) bodový klouzavý průměr .....	18
Obr. 2-2 Průběh akční veličiny (regulační odchylky) s hysterezí .....	19
Obr. 2-3 Blokové schéma regulačního obvodu s dvoupolohovým regulátorem.....	20
Obr. 2-4 Průběh regulované veličiny a akční veličiny-dvoupolohový regulátor a proporcionální soustava s dopravním zpožděním se setrvačností 1. řádu.....	20
Obr. 2-5 Blokové schéma reg. obvodu s dvoupolohovou reg. a proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu.....	21
Obr. 2-6 Průběh regulované veličiny a akční veličiny-dvoupolohový regulátor a proporcionální soustava s dopravním zpožděním se setrvačností 1. řádu.....	21
Obr. 3-1 Průběh signálů sběrnice I <sup>2</sup> C <sup>TM</sup> .....	22
Obr. 3-2 Zapojení master a jednoho slave zařízení na sběrnici I <sup>2</sup> C <sup>TM</sup> .....	22
Obr. 3-3 Princip propojení zařízení SPI.....	23
Obr. 3-4 Průběhy signálů sběrnice SPI, 4 možné synchronizace.....	24
Obr. 3-5 Příklad zapojení dvou FLASH pamětí na sběrnici SPI .....	24
Obr. 4-1 Pouzdro SOT23-5.....	27
Obr. 4-2 Výstupní charakteristika N-kanálu tranzistoru ZXMC3A17DN8TA .....	28
Obr. 4-3 Principiální schéma zapojení měřicí části snímače AD7415 .....	29
Obr. 6-1 Blokové schéma regulátoru .....	33
Obr. 6-2 Schéma resetovacího obvodu .....	34
Obr. 6-3 Pierceův krystalový oscilátor.....	35
Obr. 6-4 Krystal řady MJ .....	37
Obr. 6-5 Krystal řady MS2V-T1S.....	38
Obr. 6-6 Komparátor napětí baterie .....	39
Obr. 6-7 Obvod ovládání výstupního relé.....	40
Obr. 7-1 Schéma vývojové verze regulátoru-řídící část.....	43
Obr. 7-2 Schéma vývojové verze regulátoru-část napájení a výstupní relé .....	44



---

Obr. 7-3 Spodní strana plošného spoje, spodní pohled.....	45
Obr. 7-4 Horní strana plošného spoje, horní pohled.....	45
Obr. 7-5 Fotografie plošného spoje regulátoru-horní strana.....	46
Obr. 7-6 Fotografie plošného spoje regulátoru-spodní strana.....	47
Obr. 8-1 Ukázka programu pro nastavení regulátoru (provozní režim) .....	48
Obr. 8-2 Ukázka programu pro nastavení regulátoru (testovací režim).....	52
Obr. 9-1 Příklad průběhu proudu odebíraného snímačem AD7415 .....	54
Obr. 9-2 Blokové schéma časovače dle jeho konfigurace .....	55
Obr. 9-3 Ukázka výstupu modulu Trace .....	60
Obr. 10-1 Uspořádání testovací regulované soustavy a regulátoru.....	64
Obr. 10-2 Zapojení testovací sestavy .....	64
Obr. 11-1 Senzor tlaku MPX4250AP .....	66
Obr. 11-2 Senzor vlhkosti a teploty SHT71 .....	66
. 11-3 -OSI model protokolu ZigBee™.....	67
Obr. 11-4 Příklady topologií sítě ZigBee™ .....	68

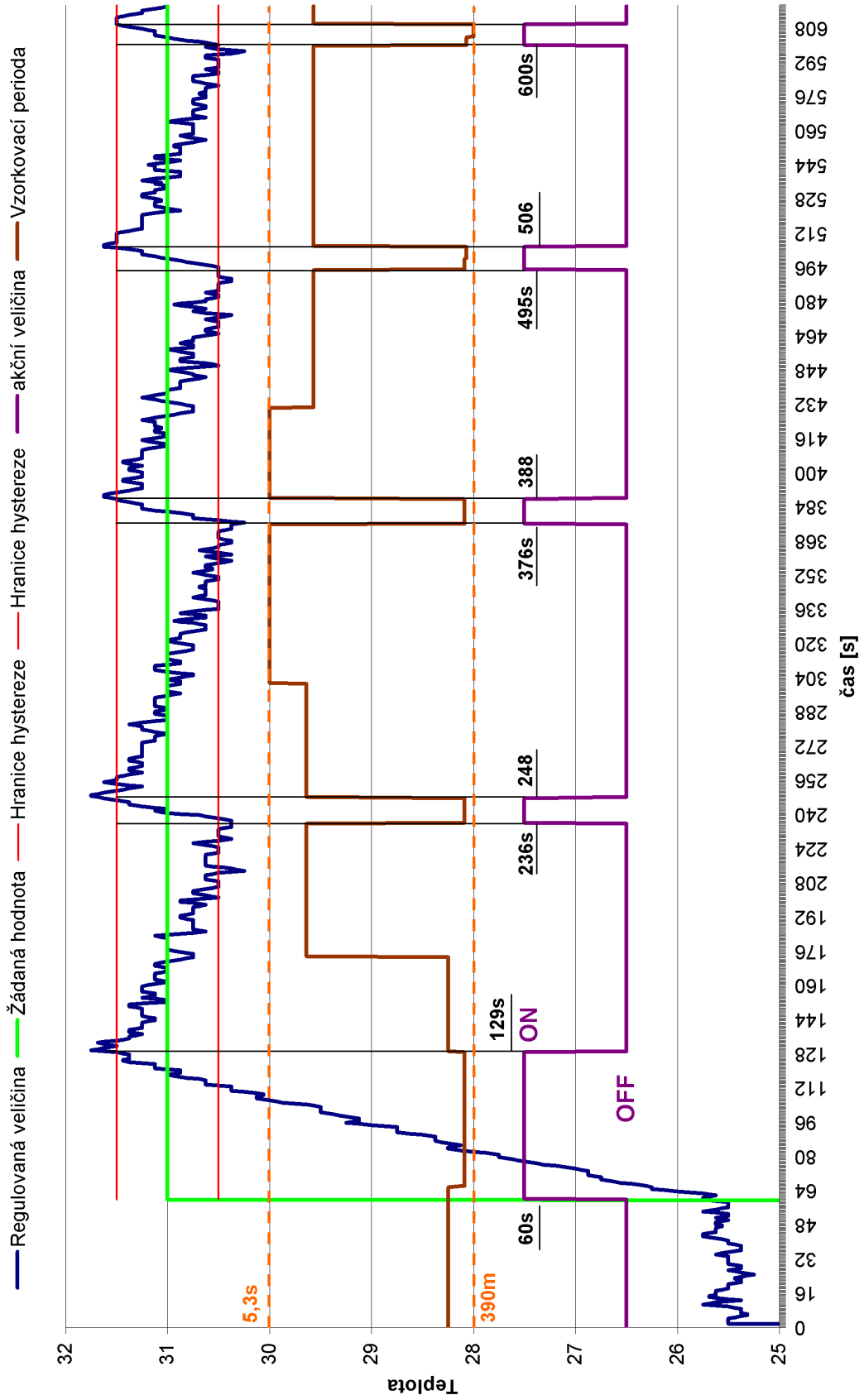
**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Rezistivity a teplotní součinitelé některých materiálů při teplotě 20°C .....	13
Tabulka 2 Přenosové rychlosti sběrnice I <sup>2</sup> C <sup>TM</sup> .....	23
Tabulka 3 Klony mikrokontroleru PIC24F16KA102 .....	26
Tabulka 4 Pracovní napájecí proudy.....	26
Tabulka 5 Příklady binárních vyjádření teploty [15] .....	28
Tabulka 6 Ukázka průběhu týdnu cyklu regulace.....	32
Tabulka 7 Telegramy komunikace PC→regulátor .....	32
Tabulka 8 Telegramy komunikace regulátor→PC .....	32
Tabulka 9 Pravdivostní tabulka pro jednotlivé hradla tranzistorů .....	41
Tabulka 10 Karnaughovy mapy jednotlivých hradel tranzistorů .....	41
Tabulka 11 Převodní tabulka měsíců.....	50
Tabulka 12 Pravdivostní tabulka Bin/1ze3 .....	70
Tabulka 13 Varianty napěťové reference LM4132.....	72
Tabulka 14 Konstanty pro výpočet rosného bodu.....	73

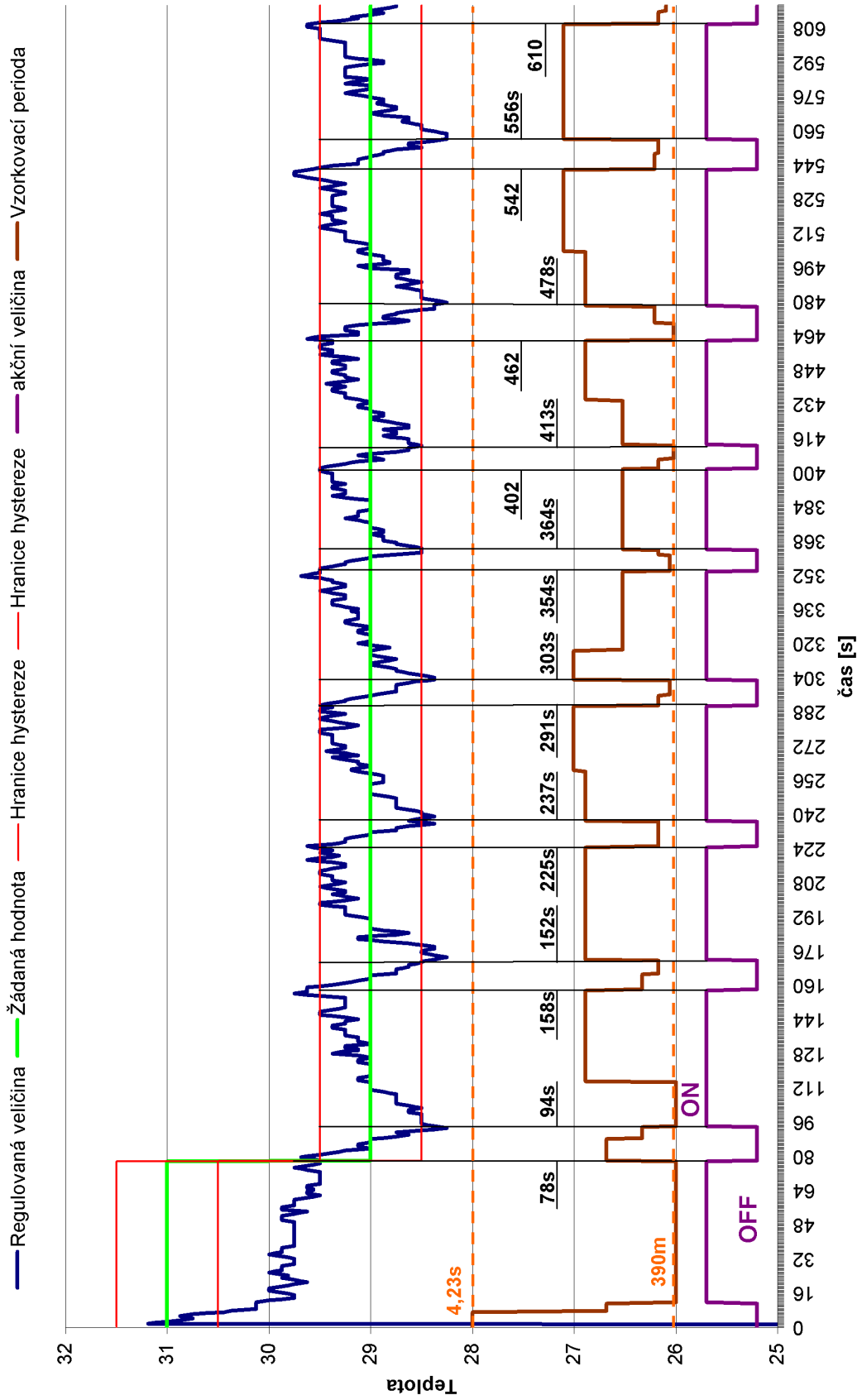
## SEZNAM PŘÍLOH

- P I: Graf průběhu regulace-kartonová krabice bez ventilace
- P II- graf průběhu regulace-kartonová krabice s ventilací nad regulátorem
- P III- graf průběhu regulace-kartonová krabice s ventilací nad topným tělesem (žárovkou)
- P IV- graf průběhu regulace obytné místnosti
- P V: rozšířená verze regulátoru-schéma základové části
- P VI: rozšířená verze regulátoru-schéma zdroje a relé, součást základové části
- P VII: rozšířená verze regulátoru-schéma klávesnice
- P VIII: rozšířená verze regulátoru-Schéma základové části čidla
- P IX: rozšířená verze regulátoru-schéma displeje čidla
- P X: rozšířená verze regulátoru-schéma USB-RF Transceiveru
- P XI: rozšířená verze regulátoru-plošný spoj základové části
- P XII: rozšířená verze regulátoru-DPS klávesnice regulátoru a USB adaptéru
- P XIII: rozšířená verze regulátoru-plošný spoj čidla a displeje čidla

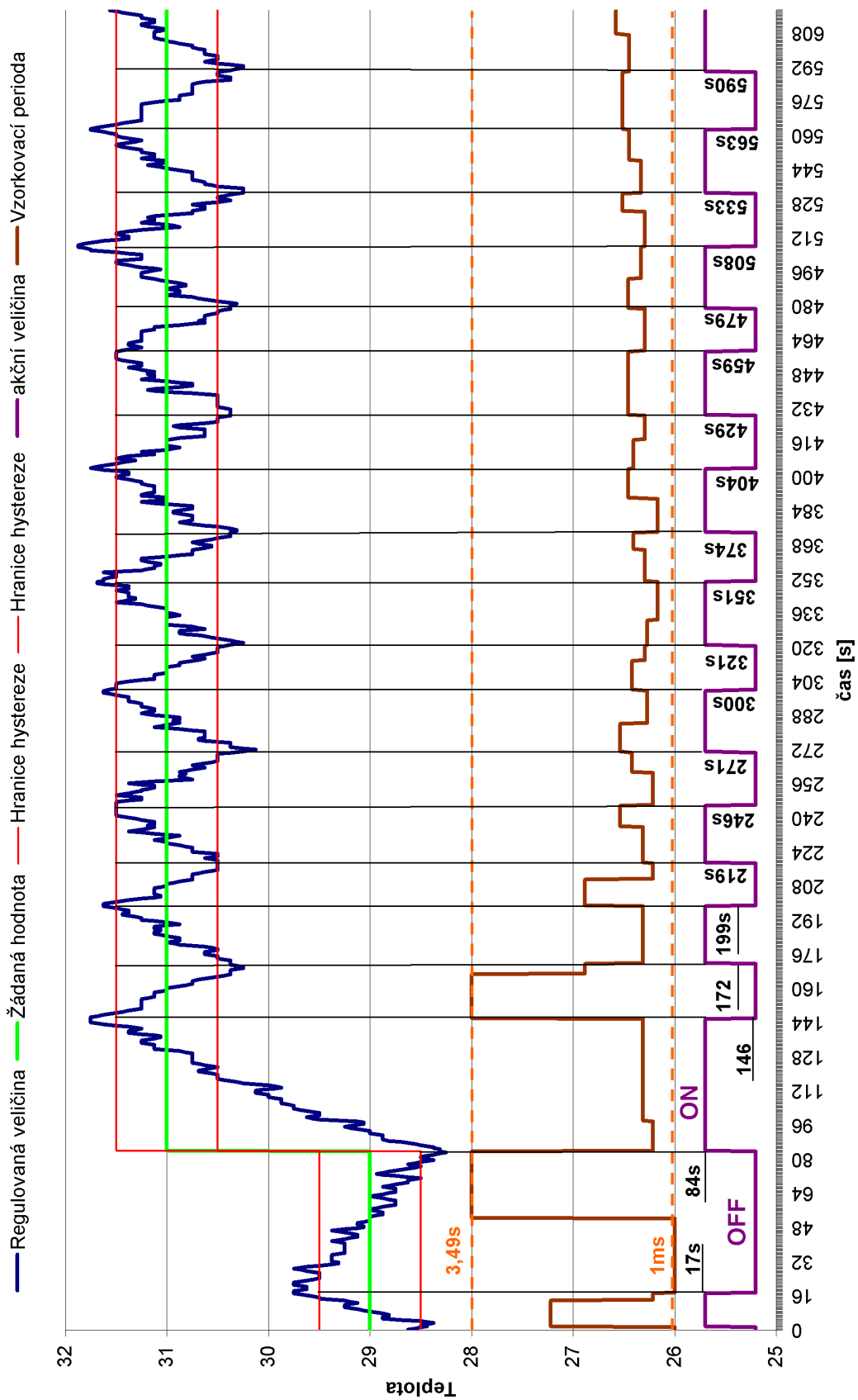
# PŘÍLOHA P I: GRAF PRŮBĚHU REGULACE-KARTONOVÁ KRABÍČKA BEZ VENTILACE



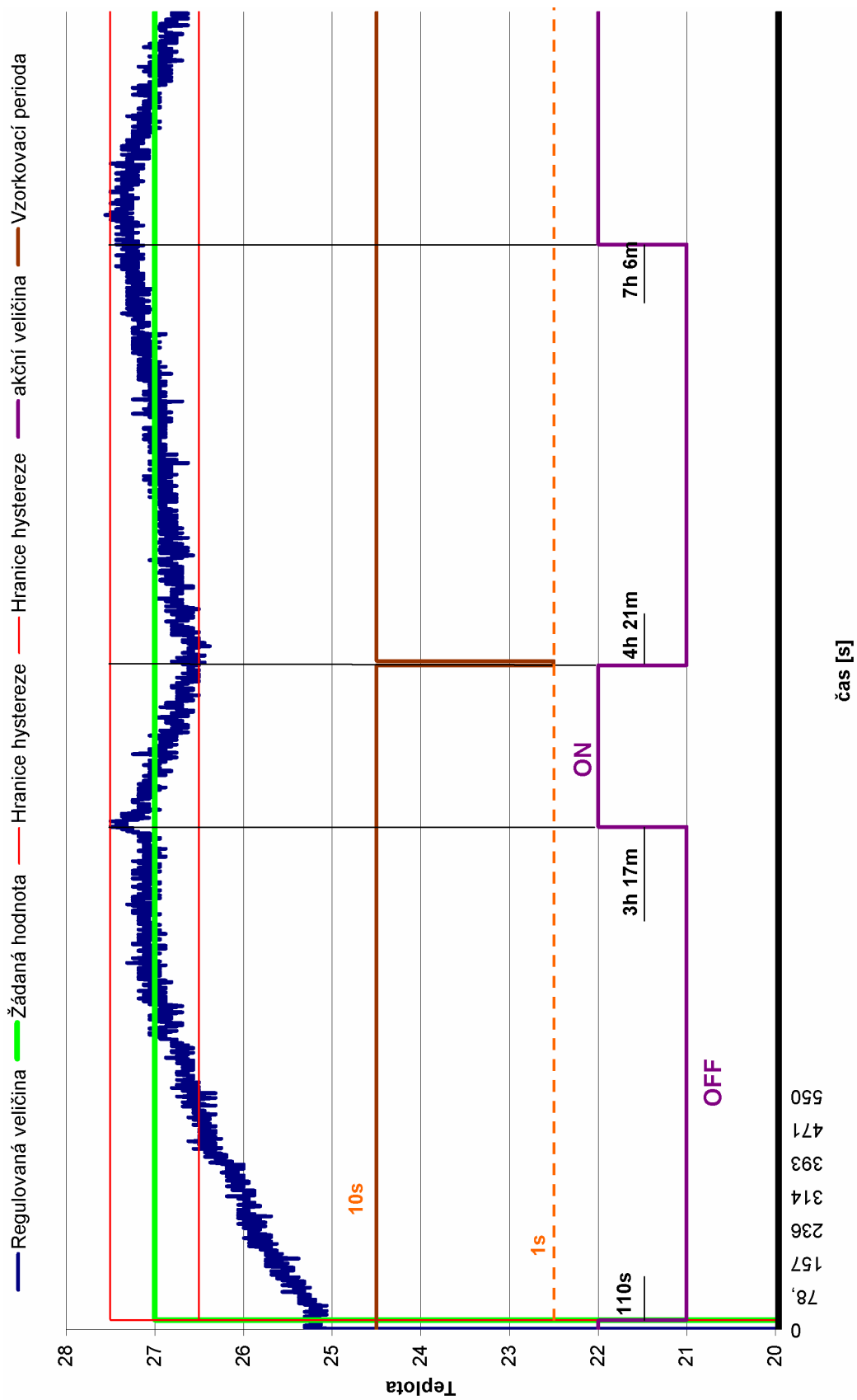
# PŘÍLOHA P II- GRAF PRŮBĚHU REGULACE-KARTONOVÁ KRABIČKA S VENTILACÍ NAD REGULÁTOREM



# PŘÍLOHA P III- GRAF PRŮBĚHU REGULACE-KARTONOVÁ KRABIČKA S VENTILACÍ NAD TOPNÝM TĚLESEM (ŽÁROVKOU)



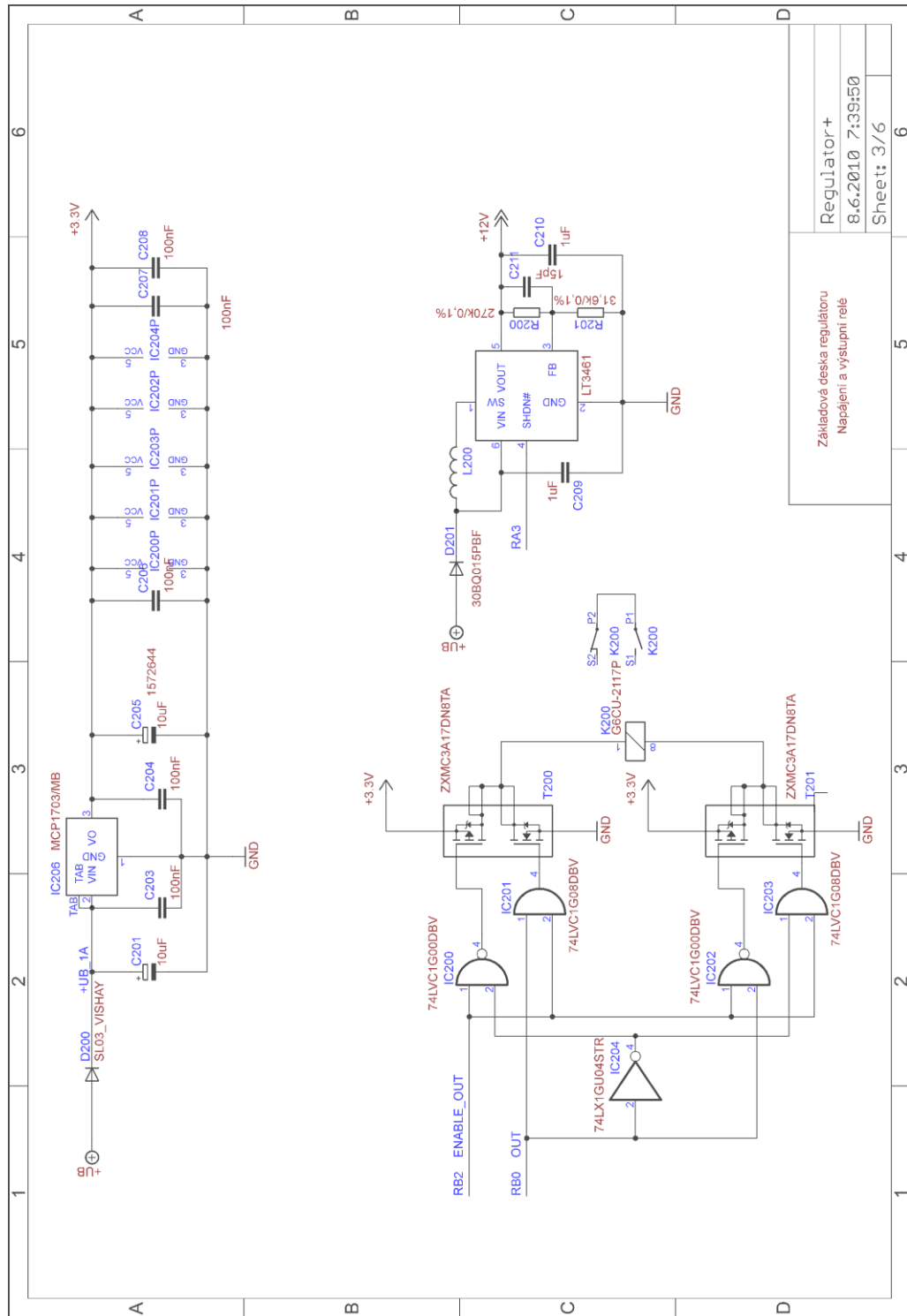
# PŘÍLOHA P IV- GRAF PRŮBĚHU REGULACE OBYTNÉ MÍSTNOSTI





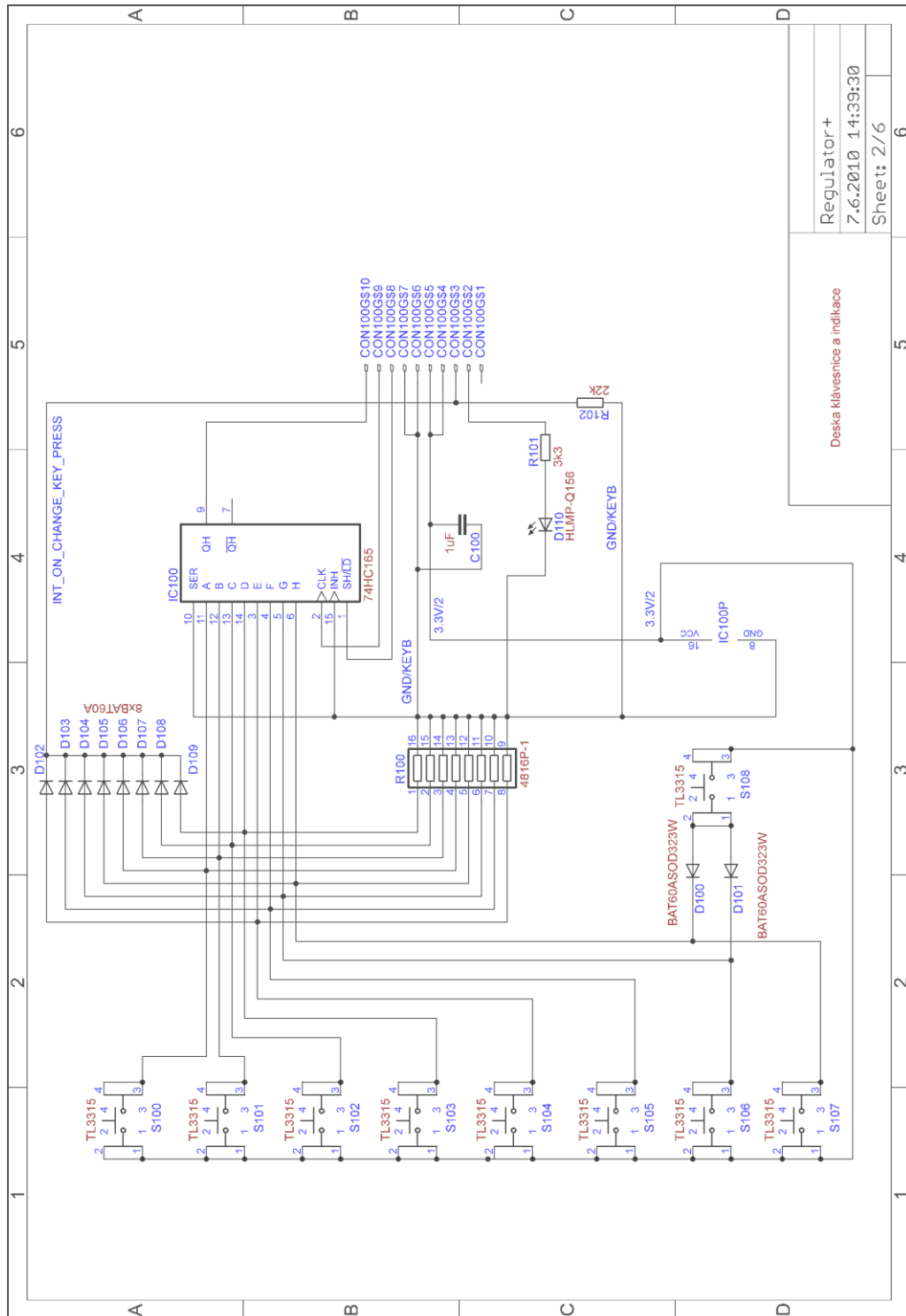


# PŘÍLOHA P VI: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU- SCHEMA ZDROJE A RELÉ, SOUČÁST ZÁKLADOVÉ ČÁSTI

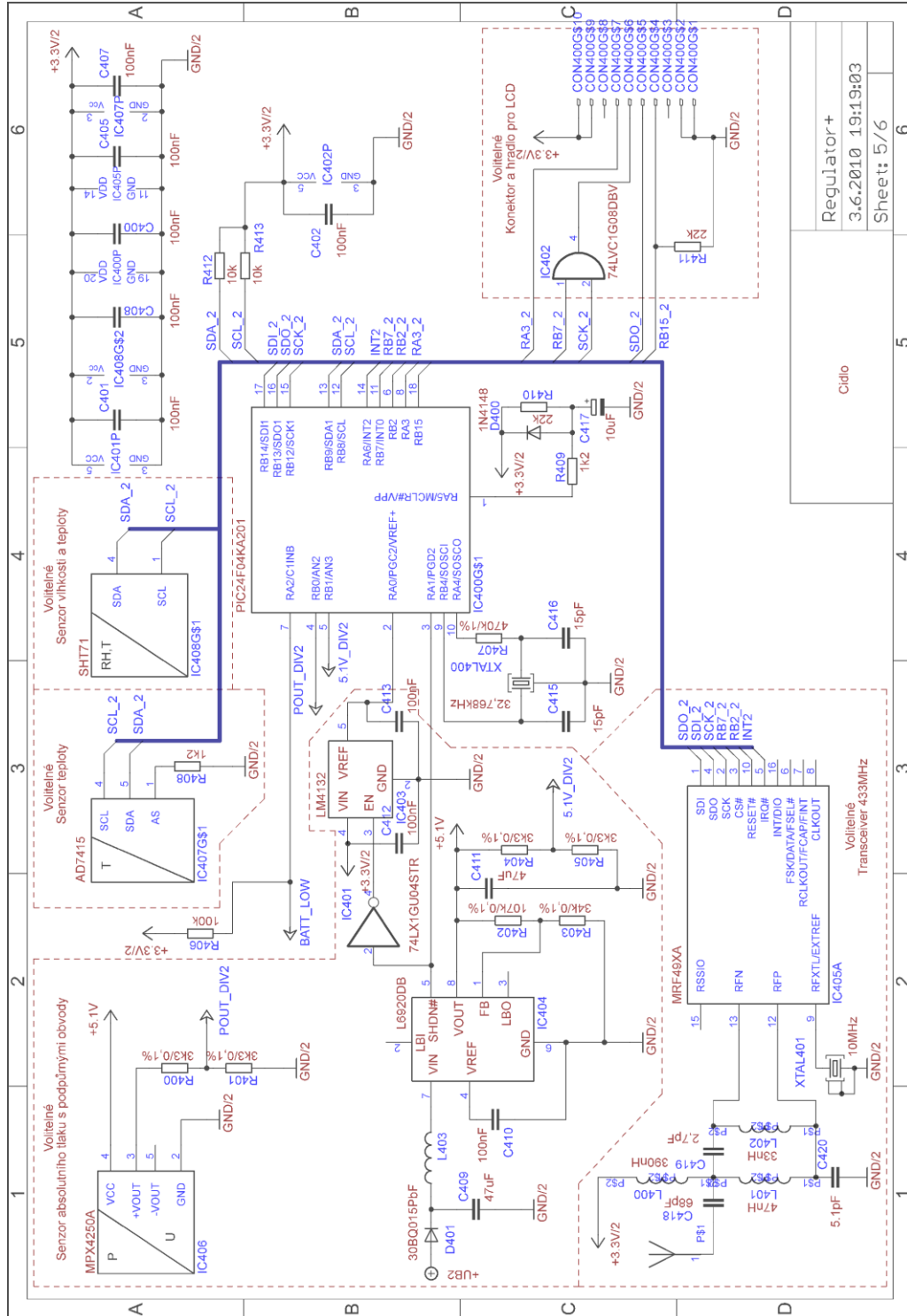


# PŘÍLOHA P VII: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU- SCHÉMA KLÁVESNICE

Volitelný komponent, klávesnice s jednou indikační LED



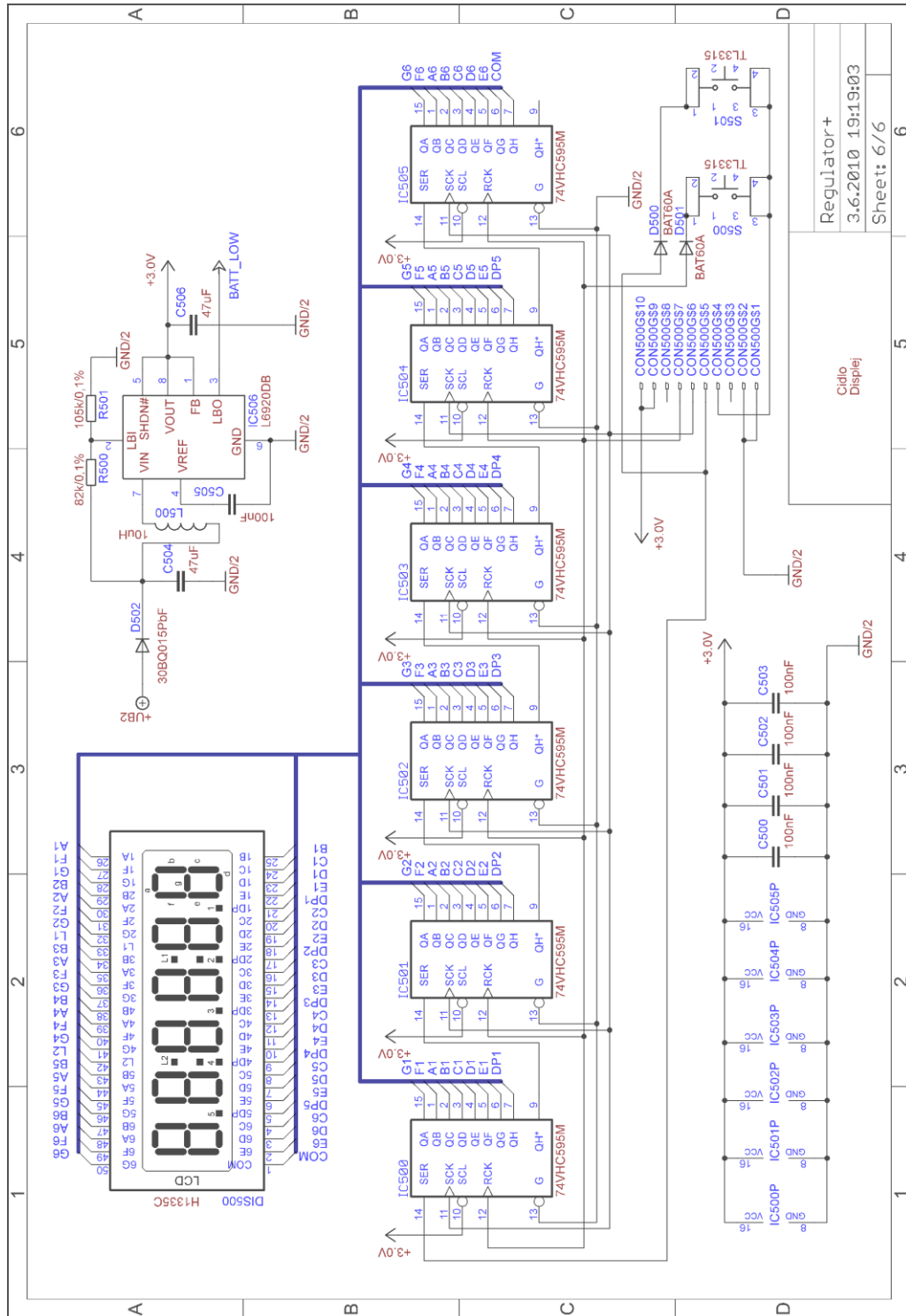
# PŘÍLOHA P VIII: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU- SCHEMA ZÁKLADOVÉ ČÁSTI ČIDLA



Cidlo  
Regulator+  
3.6.2010 19:19:03  
Sheet: 5/6

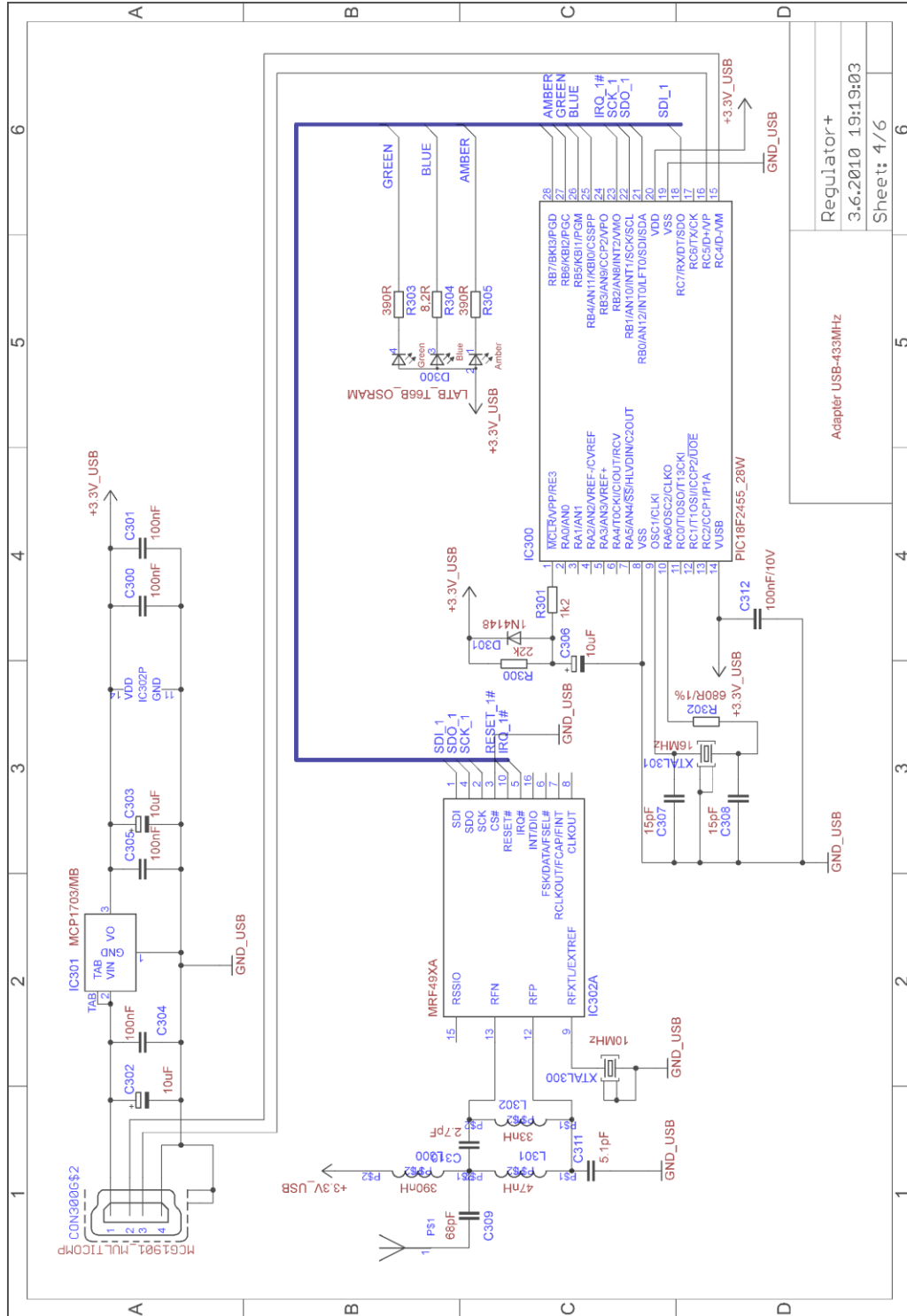
# PŘÍLOHA P IX: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU- SCHÉMA DISPLEJE ČIDLA

Volitelný komponent, LCD displej s dvěma tlačítky

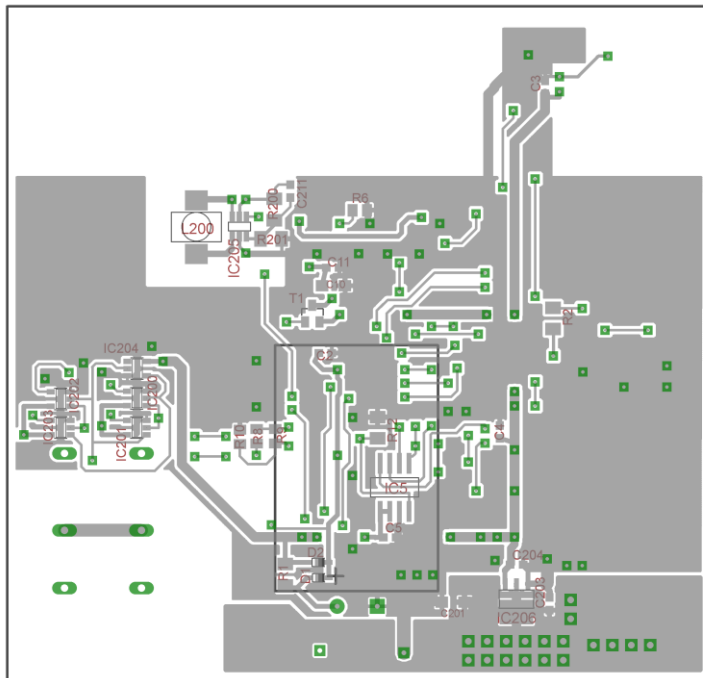


Regulator+  
3.6.2010 19:19:03  
Sheet: 6/6

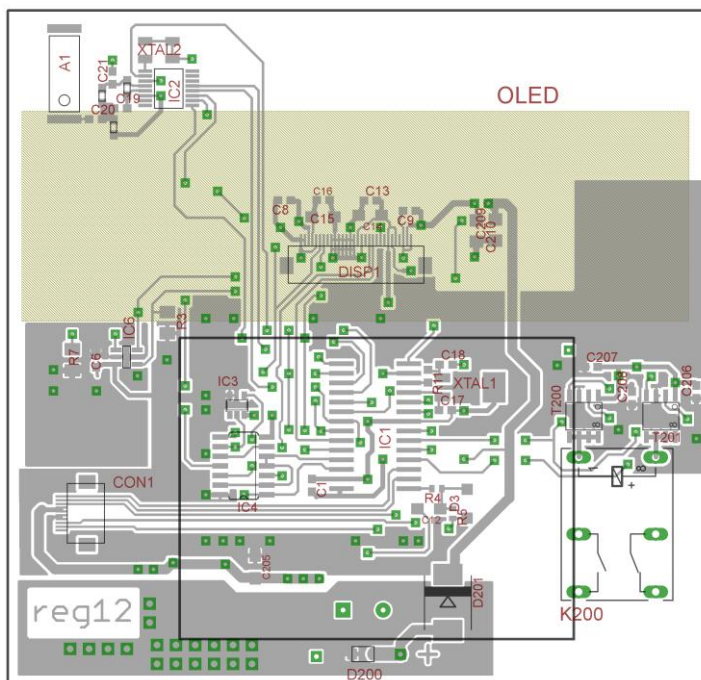
# PŘÍLOHA P X: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU-SCHÉMA USB-RF TRANSCEIVERU



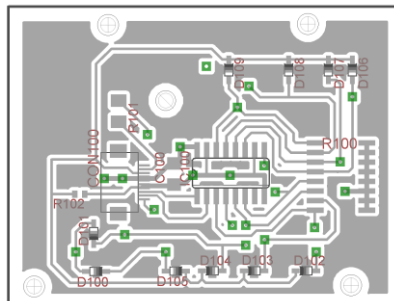
# PŘÍLOHA P XI: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU-PLOŠNÝ SPOJ ZÁKLADOVÉ ČÁSTI



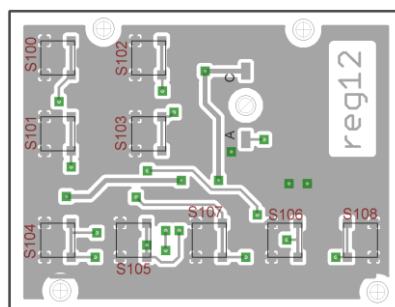
Spodní strana



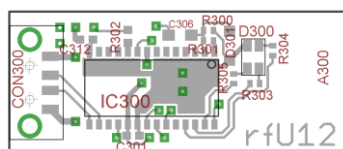
## PŘÍLOHA P XII: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU-DPS KLÁVESNICE REGULÁTORU A USB ADAPTÉRU



Klávesnice-horní strana



Klávesnice-spodní strana

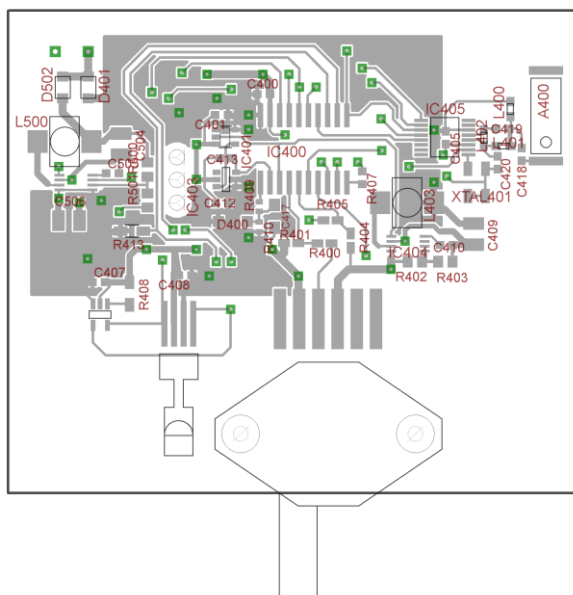


USB-horní strana

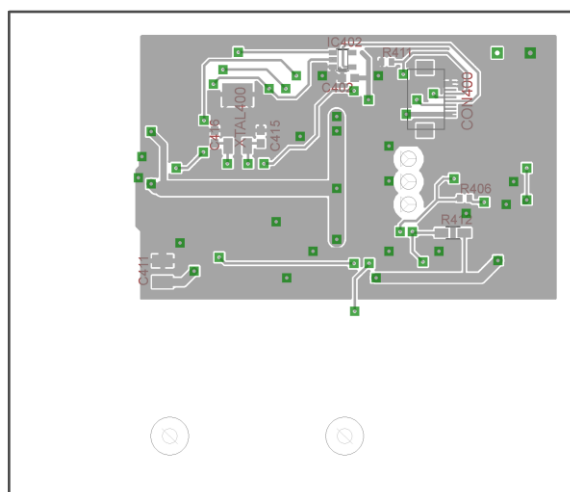


USB-spodní strana

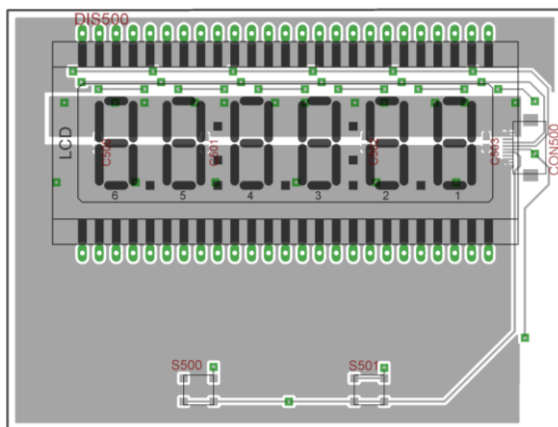
# PŘÍLOHA P XIII: ROZŠÍŘENÁ VERZE REGULÁTORU- PLOŠNÝ SPOJ ČIDLA A DISPLEJE ČIDLA



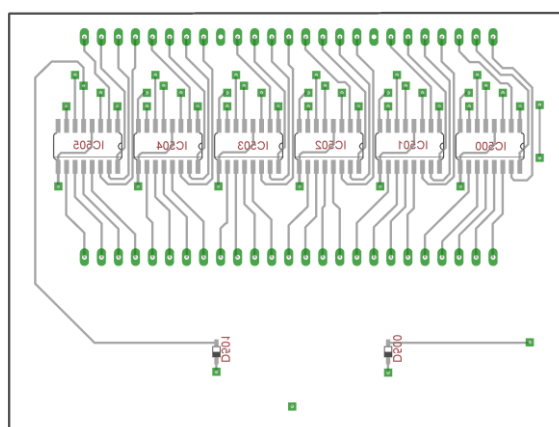
Čidlo-horní strana



Čidlo-spodní strana



Displej čidla-horní strana



Displej čidla-spodní strana



$t = -$