

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**ČÍSLICOVÝ REGULÁTOR TEPLoty TISKOVÉ PODLOŽKY
3D TISKÁRNY**

Petr Havel

Bakalářská práce

2017

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Havel**
Osobní číslo: **I13057**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Číslicový regulátor teploty tiskové podložky 3D tiskárny**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je návrh a realizace číslicového regulátoru teploty pro vyhřívanou tiskovou podložku 3D tiskárny. Číslicový regulátor bude realizován jednočipovým mikropočítačem. Navržený regulátor bude umožňovat programové řízení teploty tiskové podložky a vizualizaci aktuálního stavu regulačního obvodu na LCD displeji. Regulátor bude umožňovat řízení pomocí nadřazeného řídicího systému - osobního počítače přes komunikační rozhraní USB. Součástí práce bude kompletní výrobní dokumentace elektronického regulátoru, okomentované zdrojové kódy realizovaného software a přehledný uživatelský návod k obsluze regulátoru a programového vybavení osobního počítače.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - 3.díl - edice uP a praxe, 2.vydání, BEN - technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4
ZÁHLAVA, V. Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4

VÁŇA, V., Mikrokontroléry ATMEL AVR: Popis procesoru a instrukční soubor. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-083-0.

VÁŇA, V., Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce Bascom. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-115-2.

Číslicová regulace. Sylaby, elektronické učebnice [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava [cit. 2016-10-25]. Dostupné z:

<http://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/>

3D tiskárny: testy, doporučení, výběr [online]. [cit. 2016-10-25]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Havlíček, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **8. prosince 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2017**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. prosince 2016

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Petr Havel

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

V Pardubicích dne

Petr Havel

ANOTACE

Práce se zabývá návrhem číslicového regulátoru teploty, řízeného mikropočítačem ATmega32, určeného pro vyhřívanou tiskovou podložku 3D tiskárny. Získání aktuální teploty zajišťuje digitální teploměr DS18B20. Regulátor umožňuje programové řízení teploty tiskové podložky a vizualizaci aktuálního stavu regulačního obvodu na LCD displeji. Ovládání regulátoru je umožněno rotačním enkodérem a tlačítky, nebo pomocí aplikace na PC. Komunikace s PC je zajištěna přes rozhraní USB pomocí převodníku RS232-USB. Hlavní část práce je věnována vývoji programového vybavení mikropočítače. Software je vyvíjen v programovacím jazyce Bascom. Součástí práce je uživatelský návod k ovládání regulátoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

číslicový regulátor, ATmega32, mikropočítač, 3D tisk

TITLE

DIGITAL TEMPERATURE CONTROLLER FOR HEATED BED OF 3D PRINTER

ANNOTATION

The thesis deals with the design of a digital temperature controller, controlled by the ATmega32 microcomputer, designed for the heated print bed of a 3D printer. Obtaining the current temperature is provided by the digital thermometer DS18B20. The controller allows program control of the temperature of the print bed and visualization of the current state of the control circuit on the LCD display. Control of the controller is enabled by a rotary encoder and buttons, or by using a PC application. Communication with the PC is ensured by the USB interface via the RS232-USB converter. The main part is dealing with development of microcomputer software. The software is developed in the Bascom programming language. Part of the thesis is the user's manual for controlling the controller.

KEYWORDS

Digital controller, ATmega32, Microcontroller, 3D print

OBSAH

	Seznam zkratk a značek	10
	Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí	11
	Seznam ilustrací	12
	Seznam tabulek	14
0	ÚVOD	15
1	TEORETICKÁ ČÁST	16
1.1	3D tiskárny	16
1.1.1	Metoda tisku	16
1.1.2	Vyhřívání tisková podložka a její teplota	16
1.1.3	Tiskové materiály a doporučené teploty	17
1.2	Regulace teploty	18
1.2.1	Požadavky na regulátor	18
1.2.2	Číslicový regulační obvod	18
1.2.3	PSD regulace	20
1.2.4	Algoritmus výpočtu vstupu regulátoru	20
2	POUŽITÉ KOMPONENTY	23
2.1	Mikropočítač	23
2.1.1	Požadavky na mikroprocesor	23
2.1.2	ATmega32	23
2.2	Teplotní čidlo	24
2.2.1	Digitální teploměr DS18B20	24
2.2.2	Komunikace po sběrnici 1-Wire™	26
2.2.3	Komunikační příkazy pro DS18B20	28
2.3	LCD displej	29
2.3.1	Komunikace s řadičem	31
2.4	Rotační enkodér	32
2.4.1	Rotary Encoder RE24	33
2.5	Převodník UART–USB	33
2.6	Výstup (akční člen regulátoru)	34
2.6.1	PWM signál	34
2.6.2	Silový výstup	35
2.7	Napájení řídicí části	36

3	REALIZACE	37
3.1	Napájení obvodů	37
3.2	Mikropočítač	38
3.3	Teplotní čidlo	39
3.4	LCD displej	39
3.5	Tlačítka a rotační enkodér	40
3.6	Komunikace (USB)	41
3.7	Výstupní obvody	41
3.8	Zapojení periférií k mikrokontroleru	42
3.9	Schéma zapojení regulátoru	43
4	PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ REGULÁTORU (SW)	45
4.1	Programovací jazyk	45
4.2	Program	45
4.3	Komunikace se snímačem teploty	47
4.4	PSD regulace	48
4.4.1	PWM signál	50
4.5	Rotační enkodér	51
4.6	LCD displej	53
4.7	Uživatelské prostředí	53
4.8	Komunikace s PC	54
4.8.1	Komunikační protokol	54
4.8.2	Odesílání dat do PC	56
4.8.3	Příjem dat z PC	57
4.9	Aplikace v PC	57
4.9.1	Programovací jazyk	58
4.9.2	Program	58
5	VÝVOJ A REALIZACE	61
5.1	Testování	61
5.1.1	Vývojový kit EvB	61
5.1.2	Nepájivé pole	61
5.2	Návrh DPS	62
6	OVĚŘENÍ FUNKCE REGULÁTORU	66
6.1	Identifikace soustavy	66
6.1.1	Přechodová charakteristika	66

6.1.2	Ziegler-Nicholsova metoda kritického zesílení	68
6.2	Testování regulátoru v obvodu	70
6.2.1	Výsledek testování	71
6.3	Parametry regulátoru	72
7	ZÁVĚR	73
	POUŽITÁ LITERATURA	74
	PŘÍLOHY	76

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

A/D	analogově-digitální
D/A	digitálně-analogový
DC	stejnoseměrný proud
DPS	deska plošných spojů
EEPROM	elektricky mazatelná paměť typu ROM-RAM
FDM	metoda 3D tisku – nanášení roztaveného plastového materiálu
FLASH	elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem
GND	uzemnění
HW	fyzické vybavení počítače
LCD	displej z kapalných krystalů
LED	dióda emitující světlo
MOSFET	polem řízený tranzistor
PC	osobní počítač
PID	proporcionálně integračně derivační (regulátor)
PSD	proporcionálně sumačně diferenční. (regulátor)
PWM	pulsně šířková modulace
RO	regulační obvod
SW	programové vybavení počítače
UART	univerzální asynchronní přijímač/vysílač (sériové rozhraní)
USART	univerzální synchronní / asynchronní přijímač/vysílač (sériové rozhraní)
USB	univerzální sériová sběrnice
μP	mikroprocesor

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

a	amplituda regulované (výstupní) veličiny, °C
$e(kT)$	regulační odchylka, °C
I_{LED}	požadovaný procházející proud diodou, A
k	relativní diskrétní čas
kT	diskrétní reálná proměnná (diskrétní čas), s
M	akční veličina relé, V
T	vzorkovací perioda, s
T_D	derivační časová konstanta, s
T_I	integrační časová konstanta, s
T_k	perioda kritických kmitů, s
T_N	doba náběhu, s
T_U	doba průtahu, s
$u(kT)$	diskrétní akční veličina, V
U_F	požadované napětí na diodě optočlenu, V
U_{LED}	požadované napětí na LED diodách, V
U_{NAP}	napájecí napětí, V
$u_T(t)$	tvarovaná akční veličina, V
$w(kT)$	žádaná veličina, °C
$y(t)$	regulovaná (výstupní) veličina, °C
Z_R	zesílení regulátoru, V·°C ⁻¹
Z_{rk}	kritické zesílení regulátoru, V·°C ⁻¹
Z_S	zesílení soustavy, °C·V ⁻¹

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Ukázka tiskové podložky.....	17
Obr. 1.2 – Vývojový diagram regulačního obvodu s číslicovým regulátorem.....	19
Obr. 2.1 – Konfigurace pinů ATmega32	23
Obr. 2.2 – Obecné zapojení čidla DS18B20.....	25
Obr. 2.3 – Zapojení čidla k mikroprocesoru pomocí tří, a dvou vodičového zapojení	26
Obr. 2.4 – Reset na sběrnici 1-Wire™.....	26
Obr. 2.5 – Zápis na sběrnici 1-Wire™.....	27
Obr. 2.6 – Čtení na sběrnici 1-Wire™.....	28
Obr. 2.7 – Vývojový diagram průběhu komunikace s teplotním čidlem po sběrnici	29
Obr. 2.8 – Piny displeje 1602A-1	31
Obr. 2.9 – Seznam předdefinovaných znaků a odpovídajících kódů.....	31
Obr. 2.10 – Průběh spínání kanálů rotačního enkodéru.....	32
Obr. 2.11 – Aretační polohy mechanického enkodéru	32
Obr. 2.12 – Zapojení rotačního enkodéru	33
Obr. 2.13 – Zapojení pinů a schematická značka FT232RL	34
Obr. 2.14 – Převod relativní hodnoty na PWM signál.....	34
Obr. 2.15 – Vnitřní zapojení a popis pinů optočlenu.....	35
Obr. 2.16 – Vývody spínaného zdroje MC34063	36
Obr. 3.1 – Blokové schéma regulátoru	37
Obr. 3.2 – Schéma zapojení stabilizátoru napájecího napětí	37
Obr. 3.3 – Schéma zapojení ATmega32	38
Obr. 3.4 – Schéma zapojení čidla	39
Obr. 3.5 – Schéma zapojení čidla	40
Obr. 3.6 – Schéma zapojení tlačítek a enkodéru.....	40
Obr. 3.7 – Schéma zapojení převodníku UART→USB	41
Obr. 3.8 – Schéma zapojení výstupní (silové) části.....	42
Obr. 3.9 – Schéma zapojení ovládací DPS	43
Obr. 3.10 – Schéma zapojení výstupní DPS	43
Obr. 3.11 – Schéma zapojení hlavní DPS.....	44
Obr. 4.1 – Vývojový diagram průběhu inicializace a hlavní smyčky programu	46
Obr. 4.2 – Vývojový diagram práce s digitálním teploměrem	47
Obr. 4.3 – Vývojový diagram algoritmu P, PSD a dvoupolohové regulace a výstupu	50

Obr. 4.4 – Vývojový diagram algoritmu enkodéru při detekci náběžné hrany kanálu A	51
Obr. 4.5– Vývojový diagram rozšířeného algoritmu zpracování enkodéru	52
Obr. 4.6 – Vývojový diagram zpracování příchozích dat komunikace	57
Obr. 4.7 – Hlavní okno aplikace	58
Obr. 4.8 – Okno aplikace s grafem	59
Obr. 4.9 – Okno aplikace s datovou tabulkou.....	59
Obr. 5.1 – Vývojový kit EvB 5.1	61
Obr. 5.2 – Zapojení obvodu na nepájivém poli	62
Obr. 5.3 – DPS hlavní (osazovací plán).....	63
Obr. 5.4 – DPS hlavní (strana spojů)	63
Obr. 5.5 – DPS hlavní (strana spojů s vylitou mědí)	64
Obr. 5.6 – DPS ovládání (osazovací plán).....	64
Obr. 5.7 – DPS ovládání (strana spojů)	64
Obr. 5.8 – DPS ovládání (strana spojů s vylitou mědí)	64
Obr. 5.9 – DPS výstup (osazovací plán).....	64
Obr. 5.10 – DPS výstup (strana spojů)	65
Obr. 5.11 – DPS výstup (strana spojů s vylitou mědí)	65
Obr. 5.12 – Osazené DPS (strana součástek).....	65
Obr. 5.13 – Osazené DPS (strana spojů)	65
Obr. 6.1 – Graf přechodové charakteristiky 2. řádu	66
Obr. 6.2 – Graf přechodové charakteristiky	67
Obr. 6.3 – Graf chování regulátoru při provádění identifikace metodou kritického zesílení ...	69
Obr. 6.4 – Graf porovnání regulačních pochodů	71
Obr. 6.5 – Graf porovnání regulačních pochodů (výběr detailu ustálení teploty)	71

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Doporučené teploty tiskové podložky	17
Tab. 2.1 – Vztah mezi získanými daty z čidla a naměřenou teplotou	25
Tab. 2.2 – Základní příkazy DS18B20	28
Tab. 2.3 – Vývody displeje 1602A-1	30
Tab. 3.1 – Zapojení periférií do mikroprocesoru	42
Tab. 4.1 – Definované příkazy pro komunikaci mezi μP a PC	55
Tab. 6.1 – Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru	66
Tab. 6.2 – Naměřené hodnoty přechodové charakteristiky a výsledek výpočtu	68
Tab. 6.3 – Seřízení spojitého regulátoru z kritických hodnot	69
Tab. 6.4 – Zjištěné hodnoty při kritickém zesílení a výsledek výpočtu	70
Tab. 6.5 – Parametry regulátoru	72

0 ÚVOD

V posledních letech dochází k velkému rozvoji v oblasti 3D tisku a tiskáren. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících kvalitu výsledného produktu je teplota vyhřívané tiskové podložky 3D tiskárny. Teplota podložky musí být nastavena a udržována na požadované hodnotě, aby nedocházelo k deformacím tištěného produktu.

Záměr této práce je vývoj zařízení, které udržuje požadovanou teplotu tiskové podložky pomocí číslicového PID regulátoru (PSD regulace). Hlavní součástí je návrh programu mikroprocesoru, který zodpovídá za regulaci teploty, umožňuje nastavovat požadované parametry a zobrazovat aktuální stav. Dále je vyvinuta aplikace pro osobní počítač, která umožňuje komunikovat s regulátorem, zobrazovat aktuální stav, umožňovat nastavení regulátoru a další funkce.

Cílem bakalářské práce je ověření a analýza regulačních pochodů s realizovanými typy regulátorů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 3D TISKÁRNY

3D tiskárna je zařízení, ve kterém je postupným nanášením tenkých vrstev na sebe stavěn (tištěn) fyzický výrobek. Zdrojem pro výrobu je počítačový model vytvořený v grafickém 3D softwaru.

3D tiskárny využívají různé technologie 3D tisku. Vyvíjejí se stroje určené jak k profesionálnímu použití, tak i velmi levné přístroje zaměřené na technické nadšence a domácí kutily (Nová média, 2014).

1.1.1 Metoda tisku

V současné době se na trhu vyskytuje mnoho různých technologií 3D tisku. Nejběžnější a momentálně nejrozšířenější metodou 3D tisku je **metoda FDM** (a odvozená FFF), a to především z důvodu nízkých pořizovacích a provozních nákladů oproti ostatním technologiím (3Dtiskárny, nedatováno).

Při tisku metodou FDM dochází k nanášení roztaveného plastového materiálu za pomoci rozehráté tiskové trysky. Tento způsob tisku je nejvhodnější pro hobby tisk, avšak má i profesionální využití. Je možné použít širokou škálu tiskových materiálů, další výhodou, kromě již zmíněné cenové dostupnosti, je i rychlost tisku. Použití technologie FDM má však i nevýhody, např. nutné použití podpor, nebo mostů (Adeon CZ s.r.o., 2017).

1.1.2 Vyhřívání tisková podložka a její teplota

Mezi důležité faktory ovlivňující kvalitu tisku patří teplota tiskové podložky. Vhodně nastavená a stabilně udržovaná teplota zajistí lepší přilnavost první vrstvy a zamezí kroucení a deformování výtisku. Vhodná teplota je určována především na základě zvoleného materiálu – výrobce by měl vždy uvádět doporučené tiskové teploty pro daný materiál.

Na trhu se objevují podložky s celoplošným a lokálním výhřevem. Lokální (nerovnoměrně rozložený) ohřev může způsobit kroucení, případně úplné odlepení modelu, proto je vhodnější použití celo-vyhřívání podložky (Adeon CZ s.r.o., 2017).

Většina dostupných podložek vyžaduje napájení 12 V, některé umožňují výběr mezi 12 V a 24 V. Příkon topných těles běžných tiskových podložek se pohybuje přibližně od 60 W do 120 W.

Ukázka tiskové podložky je na obr. 1.1 (Siran 3D Evolution s.r.o., 2017) – zde je na výběr mezi napájením 12 a 24 V.



Obr. 1.1 – Ukázka tiskové podložky

1.1.3 Tiskové materiály a doporučené teploty

Na webu lze dohledat informace o různých typech tiskových materiálů (např. PLA, ABS, HIPS apod.) a také obecně doporučované teploty tiskových podložek, které jsou souhrnně uvedeny v tab. 1.1 (3dtiskárny, nedatováno).

Tab. 1.1 – Doporučené teploty tiskové podložky

Tiskový materiál	Teplota podložky
PLA	50 °C
ABS	85 °C
HIPS	85 °C
PVA	40 °C
Flex	40 °C
Elastic	40 °C
PETG (T-Glase)	70 °C
Laywood	40 °C
Laybrick	40 °C
Nylon (PA6)	115 °C
Polykarbonát (PC)	120 °C

1.2 REGULACE TEPLoty

Pro splnění základních požadavků na řízení teploty je možné použít analogový PID regulátor. Analogové regulátory jsou však stále častěji nahrazovány číslicovými obvody a mikroprocesory, neboť se z vývoje elektronických zařízení přechází na vývoj software a tím je možné jednodušeji splnit i náročnější požadavky, jako je vizualizace, uživatelská přívětivost, ukládání dat, jednoduchá změna funkce zařízení apod. V mikropočítači je pak analogová PID regulace nahrazena její číslicovou obdobou – PSD regulací.

1.2.1 Požadavky na regulátor

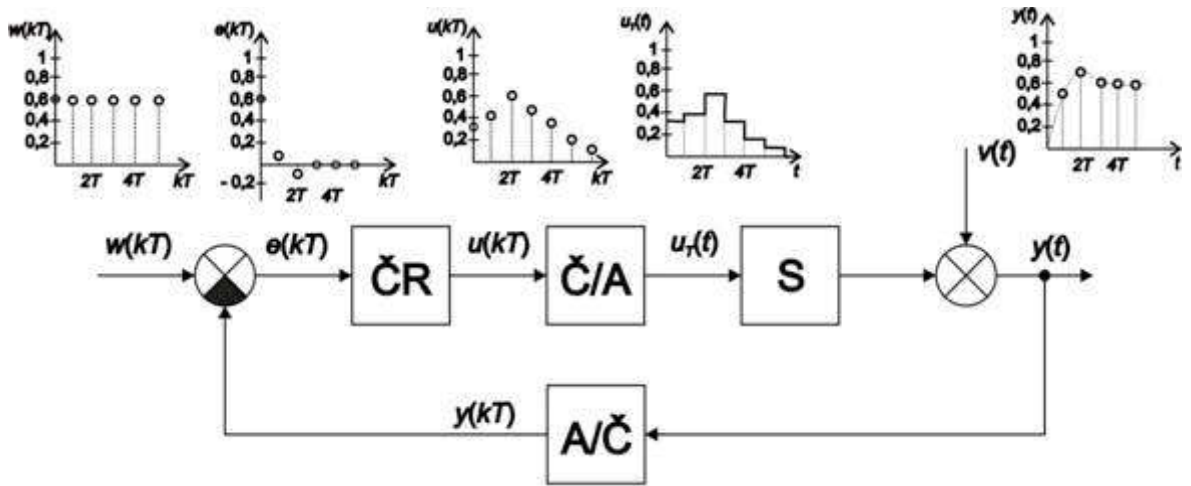
Na číslicový regulátor jsou kladeny následující základní požadavky:

- Snímání teploty pomocí teplotního čidla v dostatečném rozsahu pro zpracování požadovaných teplot. Nejnižší teplota je očekávána při startu, kdy má podložka pokojovou teplotu. Tiskový materiál s nejvyšší požadovanou teplotou pak určuje nejvyšší zpracovatelnou teplotu čidla. Obecně lze požadovat, aby teplotní čidlo a všechny následující prvky řízení dokázaly bez problému zpracovávat teploty v rozsahu $10\text{ °C} \div 125\text{ °C}$.
- Výpočet výkonu topného tělesa vyhřívané teplotní podložky (akční veličina) za pomoci číslicového PSD (proporcionálně-sumačně-diferenčního) regulátoru.
- Možnost variabilního nastavení parametrů regulátoru a možnost definování několika teplotních profilů pro jednoduché přepínání požadované teploty.
- Přenesení vypočítaného aktuálního výkonu na výstup regulátoru ve formě PWM signálu.

1.2.2 Číslicový regulační obvod

Číslicové regulátory pracují v diskrétní formě a zpravidla realizují stejné algoritmy jako analogové regulátory. Číslicový regulační obvod je definován tak, že alespoň jedna veličina má tvar posloupnosti diskrétních hodnot vytvářených v pravidelně se opakujících okamžicích označovaných jako perioda T .

Na obr. 1.2 je znázorněn vývojový diagram regulačního obvodu s číslicovým regulátorem (Ščevík, nedatováno).



Obr. 1.2 – Vývojový diagram regulačního obvodu s číslicovým regulátorem

Značení bloků:

- ČR – číslicový regulátor,
- A/Č – analogově-číslíkový převodník,
- S – regulovaná soustava,
- Č/A – číslicově-analogový převodník.

Značení veličin:

- $w(kT)$ – žádaná veličina,
- $e(kT)$ – regulační odchylka,
- $u(kT)$ – diskretní akční veličina,
- $u_T(t)$ – tvarovaná akční veličina,
- $w(t)$ – poruchová veličina,
- $y(t)$ – regulovaná (výstupní) veličina,
- T – vzorkovací perioda.

Regulovaná soustava je považována za spojitou. O převod spojitě (analogové) veličiny se stará A/Č převodník. Tento převodník je obvykle zapojen ve zpětné vazbě.

Důležitou podmínkou je, že A/Č převodník musí být přesnější než Č/A. Také se dá říci, že A/Č převodník je považován za jakýsi omezující člen, na jehož přesnosti závisí přesnost celého regulačního obvodu.

Z číslicového regulátoru vystupuje diskretní akční veličina $u(kT)$, která je následně Č/A převodníkem převedena na tzv. tvarovanou veličinu $u_T(t)$ (Ščevík, nedatováno).

1.2.3 PSD regulace

PSD regulace pracuje s diskretními hodnotami. V pravidelném časovém intervalu jsou získávána vstupní data (v tomto případě naměřená teplota), která jsou v pravidelném intervalu zpracovávána spolu se stavovými veličinami uvnitř regulátoru a výsledky jsou převáděny na výstupní akční zásah. Prodlevy mezi jednotlivými výpočty však způsobují kvantizační chybu, která se zvětšuje úměrně s délkou trvání jednoho pracovního cyklu.

V číslicovém regulátoru jsou všechny výpočty realizovány pomocí algoritmu, který je naprogramován v mikro počítači.

Aby bylo co nejvíce eliminováno zkreslení způsobené kvantizační chybou, volí se nejkratší možný časový interval. Ten je ovlivňován rychlostí zpracování algoritmu mikro počítačem a převodníky vstupních dat. Ve většině případů je ale frekvence obnovy vstupního převodníku teplotního čidla mnohonásobně kratší než rychlost zpracování algoritmu v mikro počítači, proto je časový interval výpočtů PSD regulátoru volen právě podle možností používaného převodníku senzoru teploty.

U regulátorů zpracovávajících teplotní veličiny jsou však i relativně dlouhé časové intervaly (např. 1 sekunda) přijatelné, neboť se v reálném provozu kvantizační chyba zřetelně neprojevuje.

1.2.4 Algoritmus výpočtu vstupu regulátoru

Základní tvar výstupu PSD regulátoru v čase $t = kT$ je dán vztahem

$$u(kT) = Z_R \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} [e(kT) - e[(k-1)T]] \right\}, \quad (1.1)$$

- kde k – relativní diskretní čas,
 T – vzorkovací perioda, s,
 kT – diskretní reálná proměnná (diskretní čas), s,
 Z_R – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 e – regulační odchylka, $^\circ C$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

Algoritmus realizovaný číslicovým PID regulátorem podle rovnice (1.1) je tzv. **polohový algoritmus**. V tomto případě se jedná o vzájemně se neovlivňující (paralelní)

regulátor, kdy každá složka regulátoru je řízena zvlášť a na konci sečtena s ostatními složkami (Kundera, 2008). Alternativou k polohovému algoritmu je tzv. **přírůstkový algoritmus**, který se jeví být z hlediska praktického řízení výhodnější (Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, nedatováno). Přírůstkový algoritmus je získán tak, že se pomocí rovnice (1.1) vyjádří hodnota u v čase $t = (k - 1)T$ jako

$$u [(k - 1)T] = Z_R \left\{ e[(k - 1)T] + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(iT) + \frac{T_D}{T} [e[(k - 1)T] - e[(k - 2)T]] \right\}, \quad (1.2)$$

kde k – relativní diskrétní čas,
 T – vzorkovací perioda, s,
 kT – diskrétní reálná proměnná (diskrétní čas), s,
 Z_R – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 e – regulační odchylka, $^\circ C$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s,

a rovnice (1.2) je odečtena od (1.1), dále přesunuto $u [(k - 1)T]$ na pravou stranu a výsledná rovnice je

$$u (kT) = u [(k - 1)T] + Z_R \left\{ [e(kT) - e[(k - 1)T]] + \frac{T}{T_I} e(kT) \right\} + Z_R \left\{ \frac{T_D}{T} [e(kT) - 2e[(k - 1)T] + e[(k - 2)T]] \right\}, \quad (1.3)$$

kde k – relativní diskrétní čas,
 T – vzorkovací perioda, s,
 kT – diskrétní reálná proměnná (diskrétní čas), s,
 u – diskrétní akční veličina, V,
 Z_R – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 e – regulační odchylka, $^\circ C$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

Použití tohoto tvaru rovnice PSD regulátoru je vhodným algoritmem pro jeho programovou realizaci mikropočítačem. Do paměti se, v tomto případě, neukládá absolutní hodnota součtu regulačních odchylek za celou dobu běhu regulátoru, jak by tomu bylo u polohového algoritmu, ale jsou uchovány pouze poslední hodnoty z předcházejícího pracovního cyklu (akční veličina, společně s regulační odchylkou) a předminulého pracovního cyklu (regulační odchylka). Díky prováděnému omezení akční veličiny je zamezeno wind-up efektu integrační složky.

2 POUŽITÉ KOMPONENTY

2.1 MIKROPOČÍTAČ

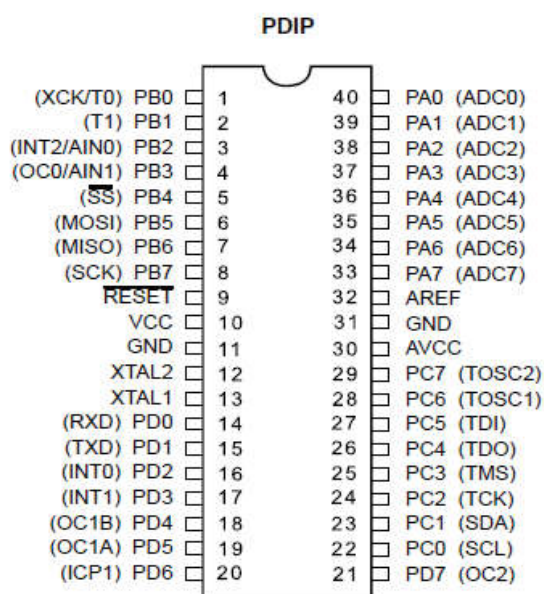
Hlavní komponentou celého zařízení je mikropočítač, který provádí výpočet PSD regulátoru a umožňuje uživateli regulátoru provádět nastavení jeho parametrů.

2.1.1 Požadavky na mikroprocesor

- Dostatečná velikost programové paměti FLASH,
- možnost ukládání dat (proměnných) do dlouhodobé paměti EEPROM,
- přerušovací systém (přerušení čítačem a externí přerušení na pinu),
- dva čítače/časovače s podporou režimu PWM,
- dostatek vstupně/výstupních portů (pinů) pro požadavky připojení tlačítek, LCD displeje, teplotního čidla, výstupu (akční člen) apod.,
- HW podpora pro sériovou komunikaci (UART).

2.1.2 ATmega32

Pro realizaci byl vybrán mikropočítač **ATmega32A**, který splňuje všechny požadavky na realizaci PSD regulátoru. Tento mikropočítač byl zvolen také z důvodu, že je součástí vývojového kitu AND-TECH EvB 5.1, na kterém probíhal vývoj a testování programu.



Obr. 2.1 – Konfigurace pinů ATmega32

Mikropočítač ATmega32 od firmy Atmel je vyráběn v několika provedeních: s pouzdrům PDIP nebo TQFP/MLF, a provozní napětí $2,7\text{ V} \div 5,5\text{ V}$ nebo $4,5\text{ V} \div 5,5\text{ V}$. Každá z těchto verzí disponuje čtyřmi 8bitovými vstupně výstupními porty a vývody pro napájení, a dále resetovacím vývodem a vývodem pro externí krystal (volba frekvence cyklu). Každý vývod vstupně výstupních portů disponuje alespoň jednou alternativní funkcí vnitřních periférií.

Konfigurace pinů je na obr. 2.1 (Atmel Corporation, 2011).

2.2 TEPLOTNÍ ČIDLO

Regulátor musí disponovat vhodným teplotním čidlem, které zajistí získávání aktuální teploty z regulované soustavy, vyhřívané podložky. Pro tyto účely je vhodné čidlo s rozsahem snímání teplot v intervalu $10\text{ °C} \div 125\text{ °C}$.

Pro zjednodušení vývoje zařízení je vhodné použít digitální čidlo, které bude zasílat naměřenou teplotu v číslicové formě. Takto se lze vyhnout problémy s možnými úbytky napětí na vedení a tím i zkreslování skutečné měřené teploty. Zároveň není nutné hledat vhodné řešení analogově-digitálního převodníku, a řešit otázku kalibrace.

2.2.1 Digitální teploměr DS18B20

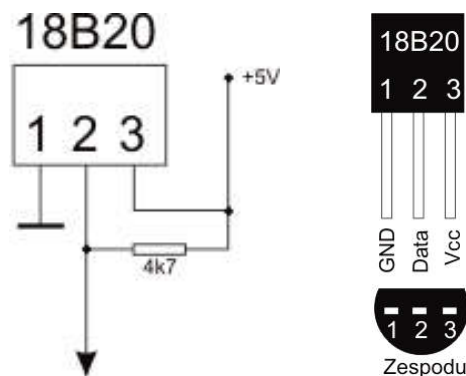
Často používaným teplotním čidlem je digitální teploměr **DS18B20** od firmy Maxim Integrated (původně Dallas). Umožňuje snímat teplotu v rozsahu $-55\text{ °C} \div 125\text{ °C}$, přičemž v rozsahu $-10\text{ °C} \div 85\text{ °C}$ má garantovanou přesnost $\pm 0,5\text{ °C}$, bez nutnosti provádění kalibrace. Rozlišení teplotního senzoru je 12 bitů, tedy $0,0625\text{ °C}$ (Maxim Integrated, 2008).

Digitální čidlo poskytuje údaj o teplotě ve formě hodnoty kvantizační hladiny, kterou je následně potřeba přepočítat na teplotu. Přičemž výstupní hodnota senzoru 0 odpovídá naměřené teplotě 0 °C . Protože rozlišení je $0,0625\text{ °C}$, je nutné získanou hodnotu podělit 16, abychom získali hodnotu teploty ve stupních Celsia. V případě teploty v záporných °C je teplota uváděna ve dvojkovém doplňku a k tomu je nastaven bit S na log. 1. Měření záporných teplot se však v této aplikaci neočekává, proto nebude nadále s touto variantou počítáno. Příklady získaných dat a jejich odpovídající teploty jsou uvedeny v tab. 2.1 (Maxim Integrated, 2008).

Tab. 2.1 – Vztah mezi získanými daty z čidla a naměřenou teplotou

Teplota, °C	Digitální výstup (binární)	Digitální výstup (hexad.)
+125	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85	0000 0101 0101 0000	0550h
+25,0625	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5	0000 0000 0000 1000	0008h
0	0000 0000 0000 0000	0000h

Pro napájení a komunikaci se využívá tří, nebo dvou vodičové provedení (tzv. parazitní režim) a je možné zapojit až 50 těchto senzorů na jeden přívodní kabel paralelně, kde má každé čidlo svoji specifickou, jedinečnou adresu, díky které lze rozlišit zasílaná data po sběrnici. Obecné zapojení čidla je znázorněno na obr. 2.2 a zapojení k mikroprocesoru na obr. 2.3 (Maxim Integrated, 2008). Vývod 2 se připojuje k mikropočítači (datová sběrnice). Vývod 2 se připojuje na pull-up rezistor, jehož doporučená hodnota je 4,7 kΩ. Dále je potřeba připojit napájecí napětí o velikosti 5 V.



Obr. 2.2 – Obecné zapojení čidla DS18B20

Tento teplotní senzor je vyráběn v pouzdře TO-92, které se používá pro standardní elektronické součástky. Je však možné i použití jeho vodotěsné varianty, kdy je senzor zataven v nerezovém pouzdru, čímž se možnosti využití dále rozšiřují.



Obr. 2.3 – Zapojení čidla k mikroprocesoru pomocí tří, a dvou vodičového zapojení

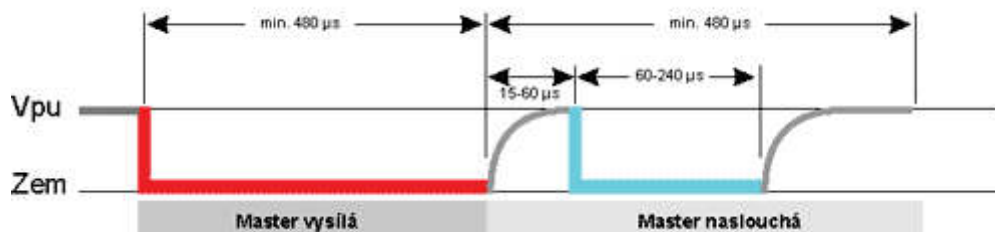
2.2.2 Komunikace po sběrnici 1-Wire™

Pro komunikaci s mikrokontrolérem je využita sběrnice 1-Wire™ (OneWire), navržená firmou Dallas Semiconductor, která umožňuje připojit několik zařízení k řídicí jednotce prostřednictvím pouhých dvou vodičů.

K řízení provozu na této sběrnici je zapotřebí jeden řídicí obvod (master), který v tomto případě zajišťuje mikroprocesor. Dále je pak zapojeno jedno nebo i více čidel (slave). Všechny obvody jsou zapojeny paralelně na společný datový vodič. Tento datový vodič je připojen přes odpor přibližně 5 kΩ na napájecí napětí a udržuje tak sběrnici do log. 1 za situace, že není vodič uzemněn ani master, ani slave zařízení.

Komunikace je vždy zahajována master **reset pulsem**, zobrazeným na obr. 2.4 (Malý, 2014), který je definován takto:

1. Datový vodič do log. 0 (uzemnit) po dobu min. 480 mikrosekund.
2. Datový vodič uvolnit a naslouchat. Připojené čidlo detekuje vzestupnou hranu a po prodlevě (15–60 μ s) stáhne sběrnici na 60–240 μ s k log. 0.
3. Po 70 μ s přečíst stav sběrnice: Je-li ve stavu log. 0, je na ní čidlo připojeno. Pokud je v log. 1, žádné zařízení připojeno není.
4. Počkat 410 μ s.



Obr. 2.4 – Reset na sběrnici 1-Wire™

Pokud se čidlo takto ohlásí, může master začít vysílat a přijímat data. Data jsou vysílána v tzv. time slotech. Slot je dlouhý 60 až 120 μs a během jednoho slotu je vyslán nebo přijat jeden bit informace. Mezi jednotlivými sloty musí být minimálně 1 μs mezera, kdy je sběrnice v klidu.

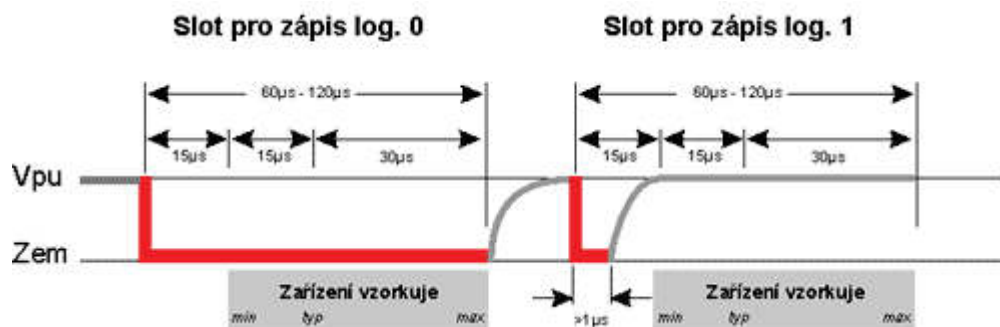
Existují 4 druhy slotů: Zápis log. 1, zápis log. 0, čtení log. 1 a čtení log. 0.

Zápis log. 1 probíhá takto (viz obr. 2.5) (Malý, 2014):

1. Stáhnout sběrnici k log. nule,
2. počkat přibližně 6 μs (min. 1, max. 15 μs),
3. uvolnit sběrnici,
4. počkat 64 μs .

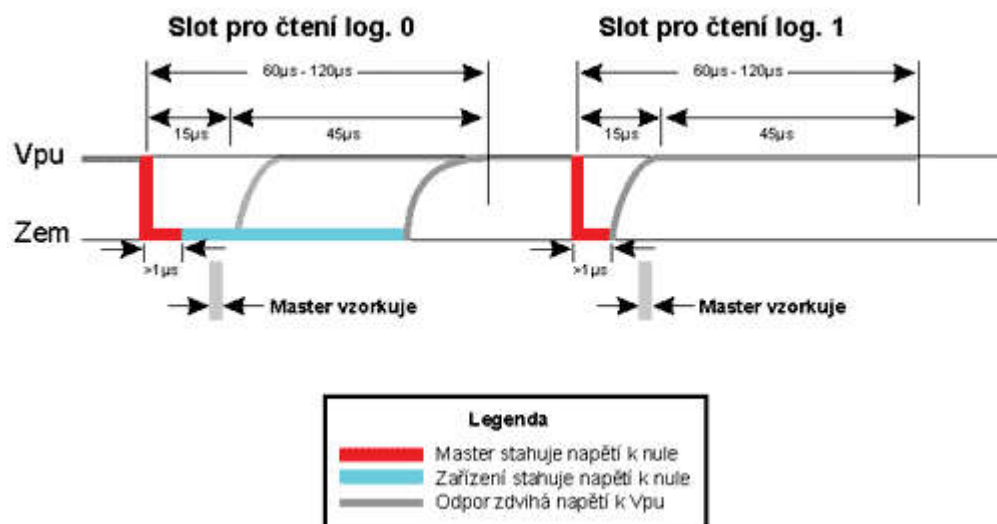
Zápis log. 0 probíhá takto:

1. Stáhne sběrnici k log. 0,
2. počkat minimálně 60 μs . Zařízení vzorkuje stav na datovém vodiči zhruba 30 μs po začátku timeslotu,
3. uvolnit sběrnici,
4. počkat 10 μs .



Obr. 2.5 – Zápis na sběrnici 1-Wire™

Čtení ze slave zařízení (čidla) je iniciováno stáhnutím sběrnice k log. nule na minimálně 1 μs a následným uvolněním (stejně jako u zápisu log. 0), jak je zobrazeno na obr. 2.6 (Malý, 2014). Po tomto zahájení může čidlo vyslat 1 bit. Pokud ponechá sběrnici v klidu, bude přečtena hodnota log. 1, pokud ji stáhne, bude přečtena hodnota log. 0.



Obr. 2.6 – Čtení na sběrnici 1-Wire™

Čidlu DS18B20 trvá jeden převod teploty od 100 ms do 750 ms. Zároveň musí být počítáno i s časem na vzájemnou komunikaci mezi čidlem a mikroprocesorem. Nikdy by však všechny operace neměly trvat v součtu déle než 1 sekundu. Z tohoto poznatku vyplývá, že časové vzorkování PID regulace bude vhodné zvolit právě jednu sekundu.

2.2.3 Komunikační příkazy pro DS18B20

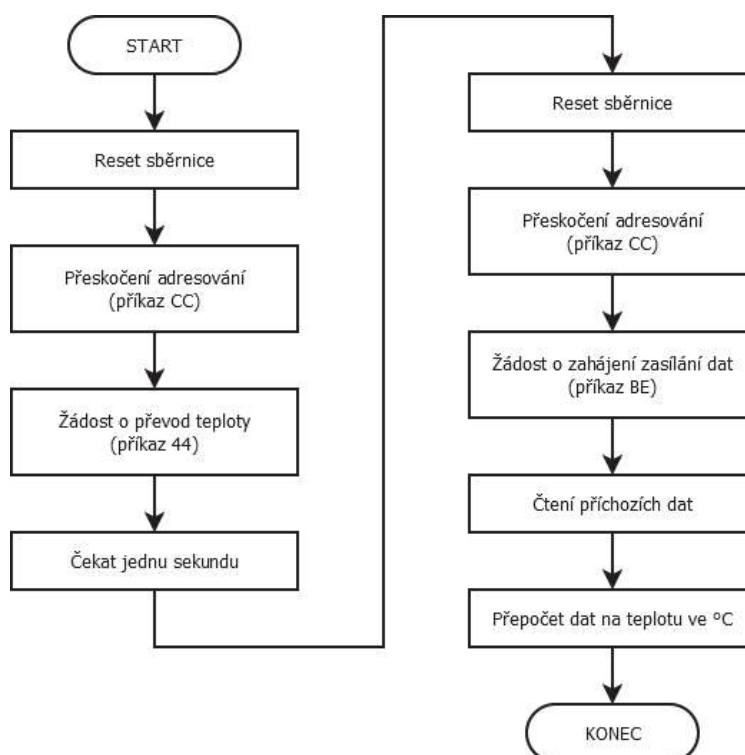
S digitálními čidly na 1-Wire™ sběrnici, v našem případě s teplotním čidlem DS18B20, se pracuje pomocí funkčních příkazů, které mají formát jednoho bajtového čísla. Čidlo disponuje mnoha funkcemi, jako jsou hledání a výběr čidla pomocí jednoznačného identifikátoru, alarm apod., pro potřeby této práce však stačí základní funkce. Základní příkazy jsou uvedeny v následující tab. 2.2 (Maxim Integrated, 2008).

Tab. 2.2 – Základní příkazy DS18B20

Příkaz	Hex. kód	Význam
SKIP ROM	CC	Adresování všech zařízení na sběrnici současně (přeskočení výběru zařízení pomocí adresy zařízení).
CONVERT T	44	Žádost o zahájení převodu teploty.
READ SCRATCHPAD	BE	Žádost o zahájení zaslání dat z paměti zařízení (čtení). První dva přijaté bajty obsahují informaci o naměřené teplotě.

Příkaz SKIP ROM se v tomto případě zasílá před každým příkazem. Za situace, že by se na sběrnici nacházelo více jak jedno slave zařízení, nesměl by být použit příkaz READ SCRATCHPAD, neboť by ve stejnou dobu začala všechna připojená čidla zasílat data – vznikla by kolize. To se však tohoto případu netýká, protože se pracuje pouze s jedním slave zařízením = teplotním čidlem.

Obvyklý cyklus běhu programu za cílem získání teploty z digitálního čidla je demonstrován na obr. 2.7.



Obr. 2.7 – Vývojový diagram průběhu komunikace s teplotním čidlem po sběrnici

2.3 LCD DISPLEJ

Pro vizualizaci informací je vhodné použít LCD displej. Vhodnost použití tohoto typu zobrazovacího zařízení se v realizované aplikaci jeví jako lepší, než použití jiných, například LED displeje a jim obdobných zobrazovacích optoelektronických prvků, protože LCD displej má možnost široké škály využití. Lze na něm zobrazovat textové údaje, umístěné v jakékoliv části displeje.

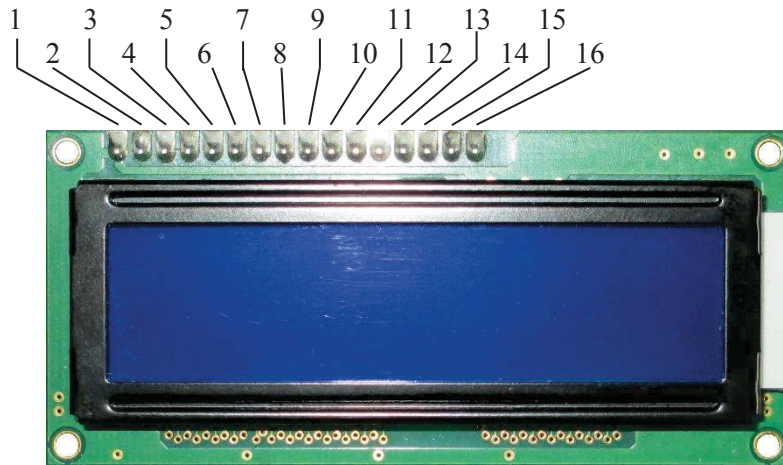
Důležitou, a hlavní, součástí je řadič displeje, který zajišťuje komunikaci pomocí standardizovaného komunikačního protokolu, disponuje pamětí pro uchování aktuálně

zobrazovaných informací a zajišťuje vykreslování znaků v maticové formě zobrazovače displeje.

V tomto případě je využit znakový displej **1602A-1** v konfiguraci: Dvouřádkový, s šestnácti znaky na řádce, kde každý znak obsahuje matici bodů 5×8. Součástí displeje je řadič **HD44780**. Zapojení displeje je popsáno v tab. 2.3 (Shenzhen Eone Electronics Co.ltd, 2005), jednotlivé piny jsou vyznačeny na obr. 2.8. Tento řadič umožňuje volbu komunikace 8-mi, nebo 4-bitovým způsobem. Pomocí jednotlivých pinů je možné zapínat podsvětlení nebo regulovat kontrast. Výrobce požaduje napájecí napětí 5 V.

Tab. 2.3 – Vývody displeje 1602A-1

Číslo pinu	Značka	Funkce
1	Vss	GND
2	Vdd	Napájecí napětí +5 V
3	V0	Nastavení kontrastu napětím (v rozmezí Vss ÷ Vdd)
4	RS	Výběr registru: 0 ...práce s instrukcemi, 1 ...práce s daty
5	R/ \bar{W}	Směr komunikace: 0 ...zápis do řadiče, 1 ...čtení z řadiče
6	E	Povoleno (sestupná hrana způsobí provedení operace zápisu nebo čtení)
7	DB0	Bit 0 (při 4-bitové komunikaci nevyužito)
8	DB1	Bit 1 (při 4-bitové komunikaci nevyužito)
9	DB2	Bit 2 (při 4-bitové komunikaci nevyužito)
10	DB3	Bit 3 (při 4-bitové komunikaci nevyužito)
11	DB4	Bit 4
12	DB5	Bit 5
13	DB6	Bit 6
14	DB7	Bit 7
15	A/Vee	Anoda podsvětlení (+4,2 V)
16	K	Katoda podsvětlení



Obr. 2.8 – Piny displeje 1602A-1

2.3.1 Komunikace s řadičem

Mikrokontrolér posílá po sběrnici do řadiče údaje o poloze kurzoru a ASCII kódy zobrazovaných znaků. Ty jsou pak automaticky zobrazeny na displeji.

Lower 4 Bits	Upper 4 Bits	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
xxxx0000	CG RAM (1)			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D
xxxx0001	(2)	!	@	A	Q	a	q			.	/	0	1	2	3	4	5
xxxx0010	(3)	"	#	\$	%	&	'	(	)	*	:	[	]	^	_	0	1
xxxx0011	(4)	#	3	C	5	c	s			]	[	0	1	2	3	4	5
xxxx0100	(5)	\$	4	D	T	d	t			\	|	0	1	2	3	4	5
xxxx0101	(6)	%	5	E	U	e	u			.	/	0	1	2	3	4	5
xxxx0110	(7)	&	6	F	V	f	v			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx0111	(8)	'	7	G	W	g	w			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1000	(1)	(	8	H	X	h	x			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1001	(2)	)	9	I	Y	i	y			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1010	(3)	*	:	J	Z	j	z			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1011	(4)	+	;	K	L	k	l			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1100	(5)	,	<	L	¥	l	l			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1101	(6)	-	=	M	J	m	>			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1110	(7)	.	>	N	^	n	~			0	1	2	3	4	5	6	7
xxxx1111	(8)	/	?	O	_	o	€			0	1	2	3	4	5	6	7

Obr. 2.9 – Seznam předdefinovaných znaků a odpovídajících kódů

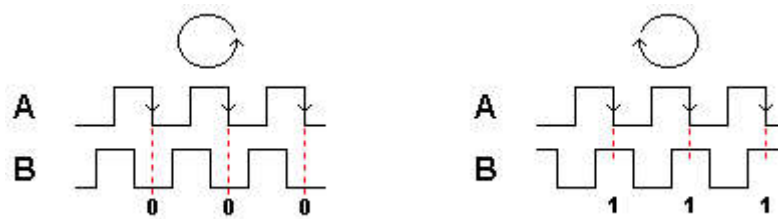
V řadiči jsou v paměti ROM uložené předdefinované znaky, které lze na displeji zobrazovat. Současně řadič umožňuje definovat až osm vlastních znaků, což je vhodné například pro české znaky nebo speciální symboly. Výčet symbolů je na obr. 2.9 (Shenzhen Eone Electronics Co.ltd, 2005).

2.4 ROTAČNÍ ENKODÉR

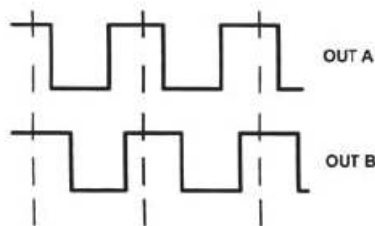
Rotační enkodér, označovaný též jako inkrementální čidlo nebo inkrementální spínač, je vstupní zařízení, funkcí podobné běžným spínacím tlačítkům, kde při otáčení dochází ke generování pulzů na jeho výstupu. Je vhodný v případech, kdy je potřeba citlivě zvyšovat, nebo snižovat obecně jakoukoliv hodnotu, ale přitom umožňovat i poměrně velké změny hodnot změnou rychlosti otáčení.

Enkodér disponuje dvěma kontakty – kanály A a B. Při otáčení se na každém kanálu generuje obdélníkový průběh a tyto průběhy jsou mezi sebou fázově posunuty o přibližně 90°. Podle aktuálních stavů obou kanálů při sestupné nebo náběžné hraně jakéhokoliv kanálu lze jednoduše určit, jakým směrem probíhá otáčení.

Rotační enkodéry se dělí na mechanické, které díky aretaci zůstávají vždy v určité poloze, a optické, které nedisponují aretací a mají mnohem citlivější průběh (více kroků na otáčku). Na obr. 2.10 jsou zobrazeny průběhy při otáčení jedním i opačným směrem s vyznačením sestupných hran jednoho kanálu. Na obr. 2.11 (Rotary Encoder RE24, nedatováno) jsou přerušovanou čarou vyznačeny aretační polohy mechanických enkodérů.



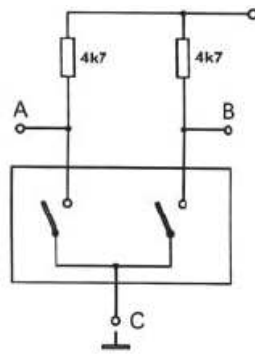
Obr. 2.10 – Průběh spínání kanálů rotačního enkodéru



Obr. 2.11 – Aretační polohy mechanického enkodéru

2.4.1 Rotary Encoder RE24

Pro potřeby této práce je využit rotační enkodér s označením **Rotary Encoder RE24**. Maximální přípustné napětí/proud je 5 V / 10 mA. Jedna otáčka o 360° projde 24 aretačními pozicemi, což je 24 náběžných hran každého kanálu. Očekávaná životnost je 100 000 otáček.



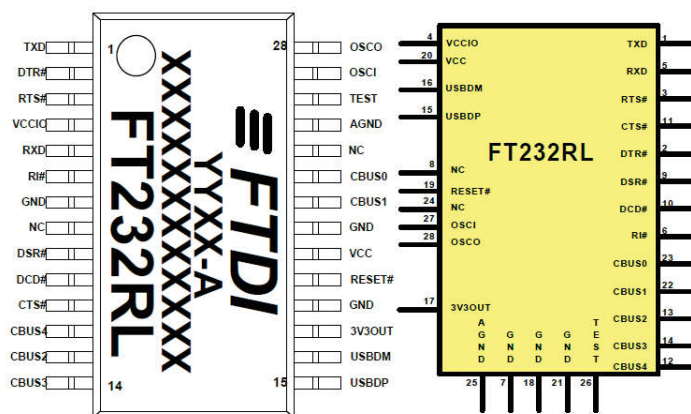
Obr. 2.12 – Zapojení rotačního enkodéru

Zapojení je znázorněno na obr. 2.12 (Rotary Encoder RE24, nedatováno).

2.5 PŘEVODNÍK UART–USB

Pro možnost komunikace s nadřazeným systémem, v tomto případě osobním počítačem, je nutné najít řešení, jak zajistit přenos dat. U osobních počítačů je nejběžnějším rozhraním sběrnice USB. Mikrokontrolery ATmega disponují zabudovaným hardwarovým rozhraním USART. Nabízí se tak řešení využít jednočipový převodník **FT232** od firmy FTDI, který připojením přes USB vytváří v počítači pomocí ovladačů virtuální sériový port COM. K mikrokontroleru ATmega je řídicí obvod FT232 připojen pomocí datových signálů TXD a RXD, s 5V logikou. Každý kanál zajišťuje komunikaci jedním směrem, jedná se tedy o plně duplexní spojení.

V tomto případě bude využita varianta FT232RL v pouzdře 28-LD SSOP. Jednotlivé piny jsou popsány na obr. 2.13 (FTDI, 2015). Využity budou piny pro napájení a uzemnění (VCC, VCCIO, GND), připojení datových vodičů USB (USBDM, USBDP) a datové vodiče k mikroprocesoru (TXD, RXD).

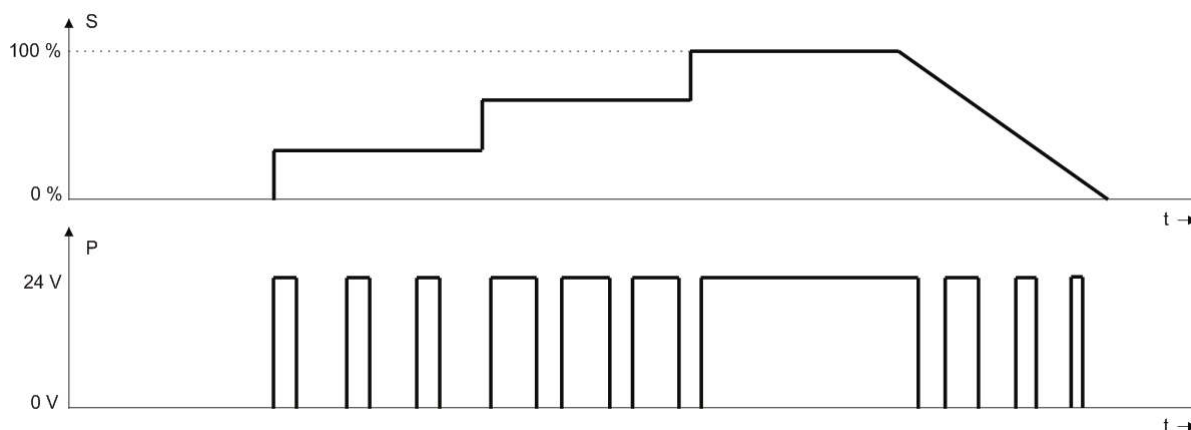


Obr. 2.13 – Zapojení pinů a schematická značka FT232RL

2.6 VÝSTUP (AKČNÍ ČLEN REGULÁTORU)

2.6.1 PWM signál

Pro možnost plynulé regulace výkonu ohřevu tiskové podložky, bude algoritmem vypočtené aktuální napětí akčního členu převedeno na PWM signál výstupního pinu mikroprocesoru. Maximální napětí, které se prakticky projevuje trvalým stavem log. 1 na výstupu, bude definováno uživatelem podle parametrů zdroje napětí pro topné těleso používané tiskové podložky.



Obr. 2.14 – Převod relativní hodnoty na PWM signál

PWM signál je takový signál, který střídá dva stavy (log. 1 / log. 0, zapnuto/vypnuto) s proměnnou délkou jednotlivých stavů. Tímto způsobem je možné pomocí střídání dvou stavů zakódovat relativní spojitou hodnotu v rozsahu od 0 do 1, neboli od 0 % do 100 %. Vzájemným poměrem délek obou stavů (tzv. střída) se udává výsledná relativní hodnota. Výstup PWM

signálu je vhodné následujícími obvody filtrovat, čímž lze obdržet příslušné stejnosměrné napětí. Při vysoké frekvenci je tak možno plynule měnit napájecí napětí topného tělesa. Díky dynamickým vlastnostem topného tělesa se přeměnění střídavé zapínání a vypínání vstupního napětí na efektivní hodnotu tepelného výkonu.

Na obr. 2.14 je demonstrován příklad s různou relativní hodnotou a odpovídající střídou PWM signálu (Domat Control System, 2013).

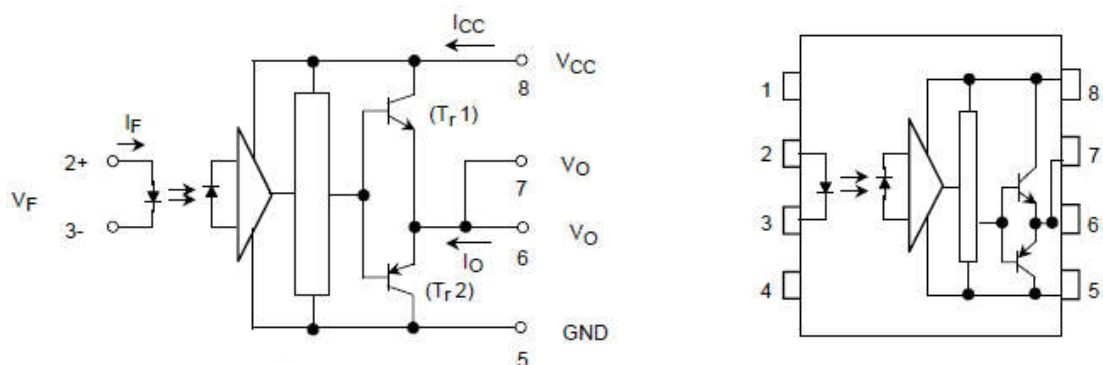
2.6.2 Silový výstup

Na výstupu mikroprocesoru se sice nachází požadovaný PWM signál, ale výstupní napětí je pouze 5 V a maximální přípustný proudový odběr může být 40,0 mA. Pro napájení tepelné tiskové podložky je však zapotřebí externího napájecího napětí 12 V nebo 24 V a proud přibližně 10 A. Proto je nutné zapojit mezičlen, který umožní spínání takto vysokých proudových odběrů.

Pro silové spínání PWM signálu je možné využít unipolární tranzistor. Aby byla silová část galvanicky oddělená od řídicí části, bude v cestě mezi tranzistorem a mikroprocesorem zapojen optočlen.

Pro účely spínání topného tělesa podložky je vhodný silový MOSFET tranzistor **IRFZ34N** TO220AB (IRFZ34NPbF) v pouzdru TO-220AB. Parametry jsou pro tuto realizaci dostačující: Maximální napětí $V_{DSS} = 55$ V, maximální proud $I_D = 29$ A (International Rectifier, 2003).

Optočlen je vybrán typ **TLP250** TOSHIBA v pouzdru DIP8. Součástí optočlenu je hradlo, které přizpůsobuje výstup pro přímé zapojení k řídicí elektrodě G tranzistoru typu MOSFET. Pro jeho sepnutí je potřeba proudu 8 mA (maximálně 10 mA) a napájecí napětí 10 V ÷ 35 V. Vstupní proud se upraví zapojením rezistoru s vhodným odporem. Mezi napájení



Obr. 2.15 – Vnitřní zapojení a popis pinů optočlenu

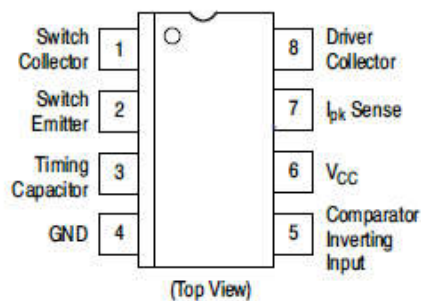
(VCC) a uzemňovací (GND) pin je výrobcem požadováno zapojení překlenovacího kondenzátoru s hodnotou 0,1 μF . Na obr. 2.15 je znázorněno vnitřní zapojení (Toshiba, 2004).

Pro přívod externího napětí a zapojení topného tělesa tiskové podložky je potřeba svorkovnice, která garantuje bezproblémové přenosy proudů dosahující až 10 A. Byla vybrána svorkovnice ARK306 2P, která umožňuje průtok proudu max. 17,5 A a zapojení kabelu s průřezem do 1,5 mm^2 .

2.7 NAPÁJENÍ ŘÍDÍCÍ ČÁSTI

Mikropočítač a další periferie v řídicí části regulátoru vyžadují pro svůj běh napájení stabilizovaným napětím 5 V. Stabilizace výstupního napětí je nutná z důvodu kolísání vstupního napětí a změn zatěžovacího proudu na výstupu.

Ke stabilizaci napětí ze zdroje je využit integrovaný obvod spínaného zdroje DC/DC měniče **MC34063AP1** v pouzdru DIP8, který vstupní stejnosměrné napětí reguluje na požadované napětí podle volby napěťového děliče výstupního napětí. Výstup děliče je přiveden na komparátor referenčního zdroje napětí 1,25 V a slouží jako zpětná vazba pro řízení spínaného zdroje. Maximální povolený výstupní proud je 1,5 A a maximální vstupní napětí je 40 V. Zapojení pinů je uvedeno na obr. 2.16 (Semiconductor Components Industries, 2009).

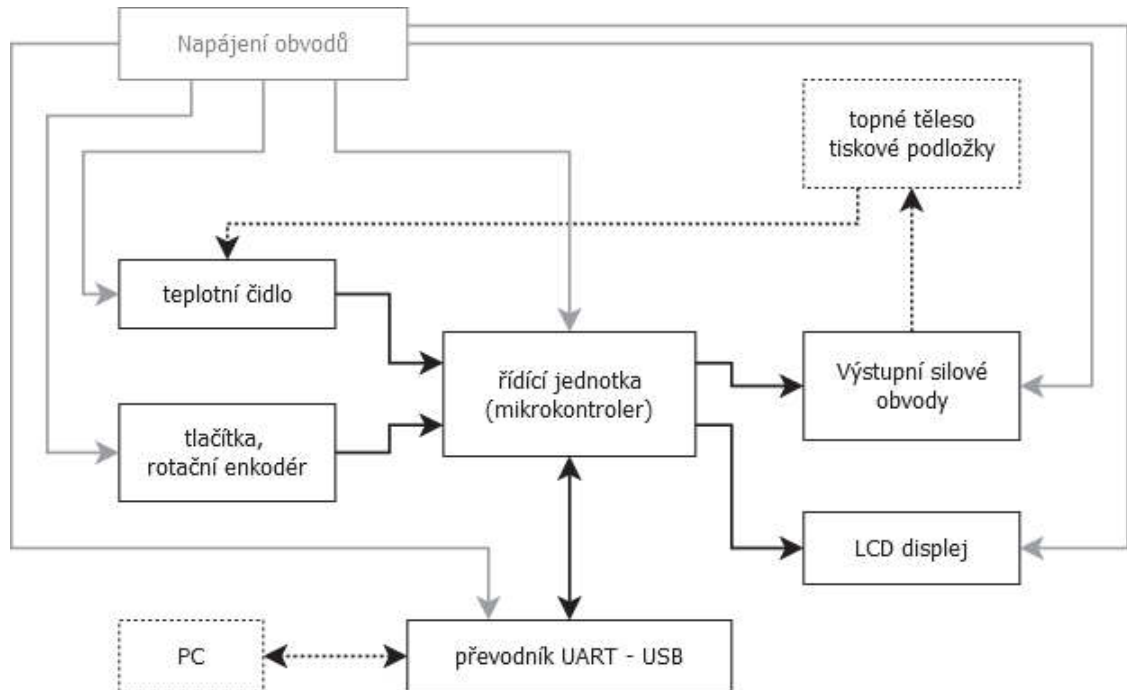


Obr. 2.16 – Vývody spínaného zdroje MC34063

Protože se jedná o spínaný zdroj, tepelné ztráty jsou zanedbatelné – chlazení integrovaného obvodu není zapotřebí.

3 REALIZACE

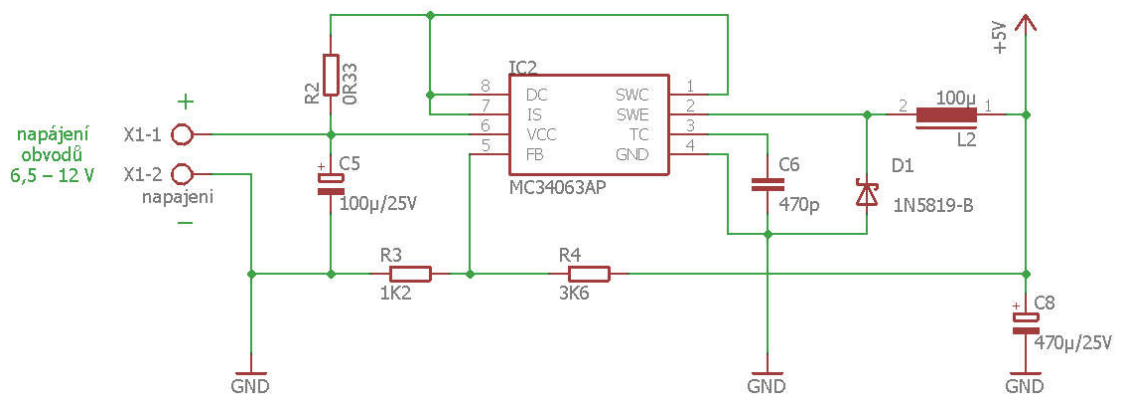
V předchozí kapitole byly přestaveny komponenty, které v celku tvoří zařízení regulátoru. Na obr. 3.1 je představeno celkové blokové schéma regulátoru.



Obr. 3.1 – Blokové schéma regulátoru

3.1 NAPÁJENÍ OBVODŮ

Jednotlivé obvody vyžadují napájení napětím o velikosti 5 V. Spínaný regulátor napětí MC34063AP1 vyžaduje pro správnou funkci napětí na vstupu alespoň o 1,5 V vyšší, než je výstupní, pro překonání saturačního napětí 1 V a případného zvlnění napětí na vstupu.



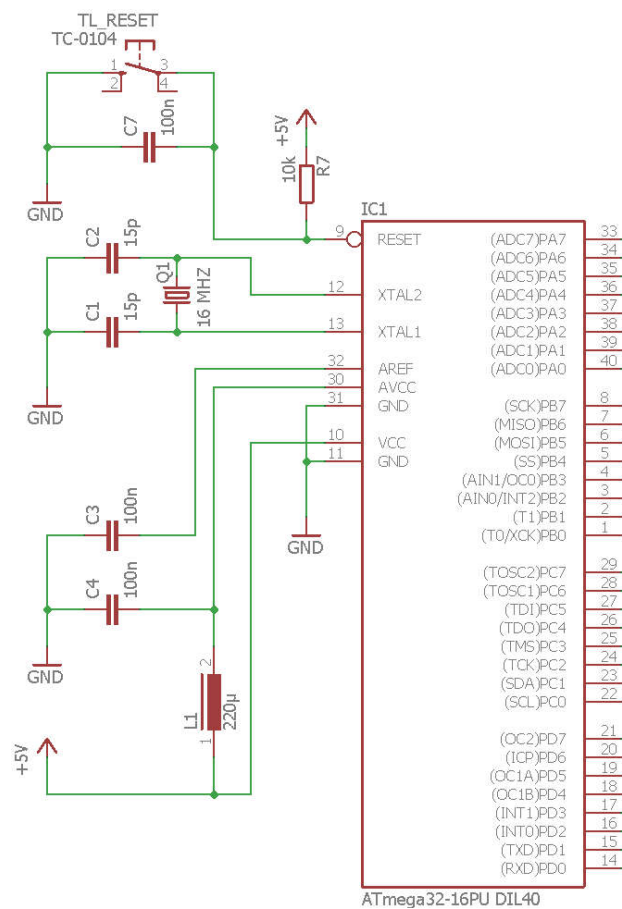
Obr. 3.2 – Schéma zapojení stabilizátoru napájecího napětí

Na obr. 3.2 je zobrazeno celkové zapojení regulátoru v režimu snížení napětí (Step-Down Converter) podle doporučení výrobce (Semiconductor Components Industries, 2009). Pro napěťový dělič jsou zvoleny rezistory 1,2 a 3,6 Ω. Tímto poměrem je dosaženo napětí na výstupu děliče 1,25 V při vstupním napětí na děliči 5 V.

Doporučené napájecí napětí připojovaného zdroje je 9 V, aby byla zajištěna dostatečná rezerva pro případ kolísání vstupního napětí.

3.2 MIKROPOČÍTAČ

Mikroprocesor ATmega32 může pracovat například s interním RC oscilátorem o kmitočtu 8 MHz, pro zrychlení zpracování instrukcí a přesnější časování je možné využít externí krystal o kmitočtu až 16 MHz, který se připojuje na piny XTAL (1/2). Pro běh mikroprocesoru je nutné připojit resetovací pin na vysokou úroveň (log. 0 se reset aktivuje). Dále je potřeba ošetřit nezapojené vstupy pro referenční napětí (využívají se pro A/D převodníky) a připojit obvod na napájecí napětí 5 V, jak je zobrazeno na obr. 3.3.



Obr. 3.3 – Schéma zapojení ATmega32

3.3 TEPLOTNÍ ČIDLO

Digitální teploměr DS18B20 se připojí k mikroprocesoru pouze jedním vodičem (DATA), dále je třeba připojit napájení a uzemnění. Rezistor mezi napájením a datovou linkou je nutný, neboť zajišťuje držení sběrnice 1-Wire v případě čekání/neaktivity v úrovni logické 1 (Maxim Integrated, 2008). Čidlo se připojuje přes třípinovou svorkovnici.



Obr. 3.4 – Schéma zapojení čidla

3.4 LCD DISPLEJ

Pro snížení počtu vodičů je použita varianta čtyřvodičové datové komunikace. Nevyužité piny sběrnice (DB0 až DB3) zůstanou nezapojeny nebo se připojí na nulový vodič.

Pro zjednodušení aplikace bude komunikace probíhat pouze jednosměrně. Program mikroprocesoru tak nebude zpracovávat příznaky BUSY, ale bude čekat pevný čas mezi odesílanými příkazy. Z tohoto důvodu je pin R/\bar{W} trvale uzemněn.

Napětí pro LED podsvícení je požadováno 4,2 V. Proud je stanoven výrobcem na 0,02 A (Shenzhen Eone Electronics Co.ltd, 2005). Mezi anodu a napájecí napětí (5 V) je potřeba zařadit rezistor, jehož výpočet je dán vztahem

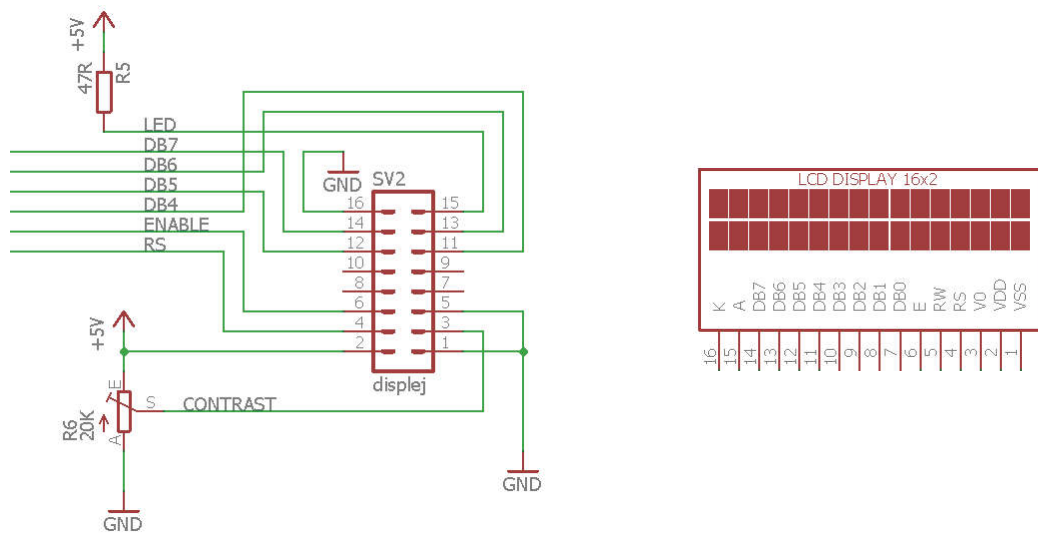
$$R_5 = \frac{U_{\text{NAP}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}} = \frac{5,0 - 4,2}{0,02} = 40 \Omega, \quad (3.1)$$

kde U_{NAP} – napájecí napětí, V,

U_{LED} – požadované napětí na LED diodách, V,

I_{LED} – požadovaný procházející proud LED diodami, A.

Hodnotou nejbližší rezistor v řadě je 47R (0,6 W). Na obr. 3.5 je znázorněno zapojení pinů displeje.

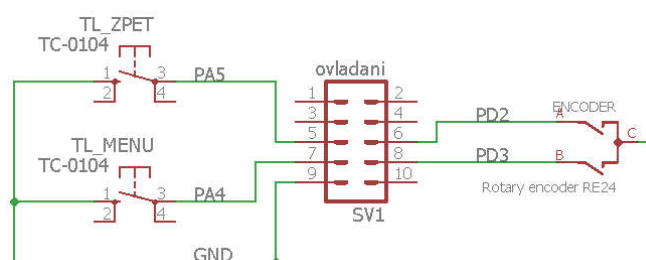


Obr. 3.5 – Schéma zapojení čidla

Displej není umístěn přímo na DPS. K obvodu se připojuje pomocí 16pinového konektoru pro ploché kabely.

3.5 TLAČÍTKA A ROTAČNÍ ENKODÉR

Zapojení tlačítek MENU a EXIT a kanálů rotačního enkodéru, které se využívají pro pohyb v menu, je velmi jednoduché a demonstruje ho obr. 3.6.



Obr. 3.6 – Schéma zapojení tlačítek a enkodéru

V mikroprocesoru je na pinech, kam jsou ovládací prvky připojeny, nastaveno zapojení interních pull-up rezistorů. Není tak nutné zapojovat externí rezistory. Kanály rotačního enkodéru musí být připojeny výhradně na piny, na kterých je možné aktivovat externí přerušení. Jedná se o piny INT0 a INT1.

Ovládací prvky jsou umístěny na vlastní DPS a k hlavnímu obvodu jsou připojeny pomocí 10pinového konektoru pro ploché kabely.

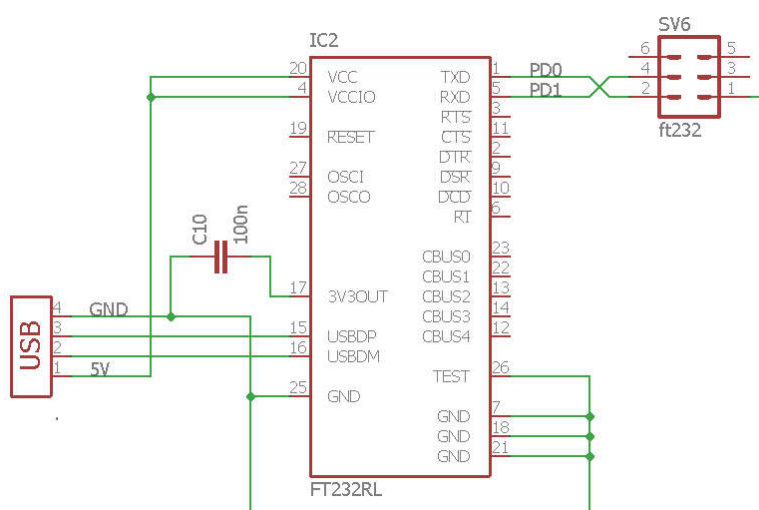
3.6 KOMUNIKACE (USB)

Na převodníku FT232RL jsou pro komunikaci využity pouze dva kanály TXD a RXD, které slouží k přenosu dat. Ostatní kanály rozhraní RS232 slouží především pro signalizaci, která v tomto případě není zapotřebí.

Výstup pro počítač je připojen do konektoru USB1X90 (USB typu A). Kromě připojení datových vodičů do převodníku se navíc připojuje vodič GND k uzemnění za účelem vyrovnání potenciálů mezi regulátorem a připojeným počítačem přes rozhraní USB.

Výrobce je uvedeno, že nevyužívaný pin 3V3OUT je vhodné uzemnit přes kondenzátor 100 nF (FTDI, 2015). Ostatní nevyužité piny nemusí být ošetřeny.

Zapojení převodníku je vyobrazeno na obr. 3.7.



Obr. 3.7 – Schéma zapojení převodníku UART→USB

Obvod převodníku je umístěn na vlastní DPS a k hlavnímu obvodu je připojen pomocí 6pinového konektoru pro ploché kabely.

3.7 VÝSTUPNÍ OBVODY

Napětí pro emitující diodu optočlenu je udáváno 1,6 V. Proud je stanoven výrobcem na 8 mA (Toshiba, 2004). Hodnota omezujícího rezistoru je dána výpočtem

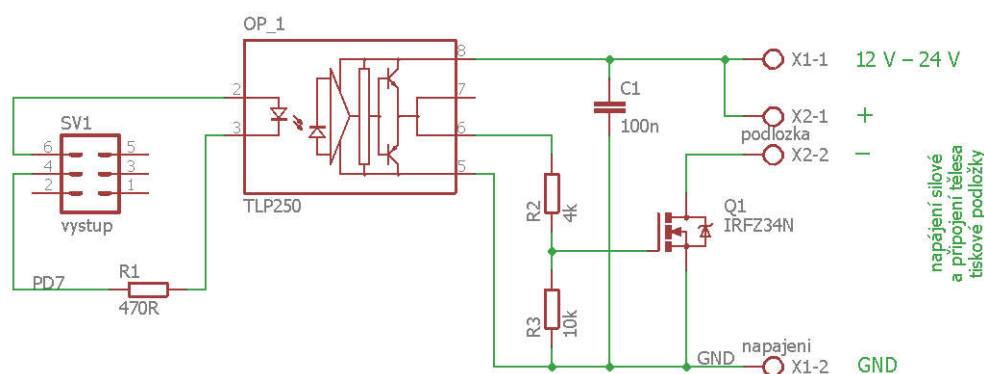
$$R_1 = \frac{U_{\text{NAP}} - U_F}{I_F} = \frac{5,0 - 1,6}{0,008} = 425 \Omega, \quad (3.2)$$

kde U_{NAP} – napájecí napětí, V,

U_F – požadované napětí na diodě optočlenu, V,

I_{LED} – požadovaný procházející proud diodou optočlenu, A.

Nejblížejší hodnota z rezistorové řady je 470R. Zapojení na obr. 3.8.



Obr. 3.8 – Schéma zapojení výstupní (silové) části

Tato část disponuje čtyřpinovou svorkovnicí ARK306. První dvojice svorek (X1) slouží k připojení externího zdroje napětí pro napájení topného tělesa teplotní tiskové podložky v požadovaném napětí (obvykle 12 V nebo 24 V). Druhá dvojice svorek (X2) slouží k připojení samotného topného tělesa. Napětí na tomto výstupu je regulováno pomocí PWM.

Obvody výstupní (silové) části jsou umístěny na vlastní DPS a k hlavnímu obvodu jsou připojen pomocí 6pinového konektoru pro ploché kabely.

3.8 ZAPOJENÍ PERIFERIÍ K MIKROKONTROLERU

Dosud byly popsány jednotlivé bloky (periferie) zařízení regulátoru. V následující tab. 3.1 jsou přiřazeny piny mikroprocesoru k vodičům jednotlivých bloků.

Tab. 3.1 – Zapojení periferií do mikroprocesoru

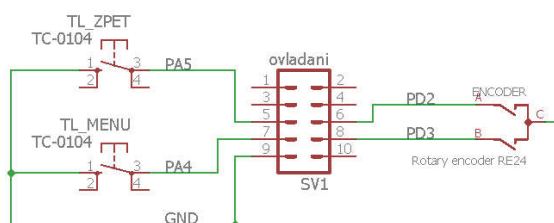
Pin μP	Blok	Pin bloku
PortA.0	Teplotní čidlo DS18B20	DATA
PortA.4	Tlačítko MENU	–
PortA.5	Tlačítko EXIT	–

Tab. 3.2 – Zapojení periférií do mikroprocesoru – pokračování

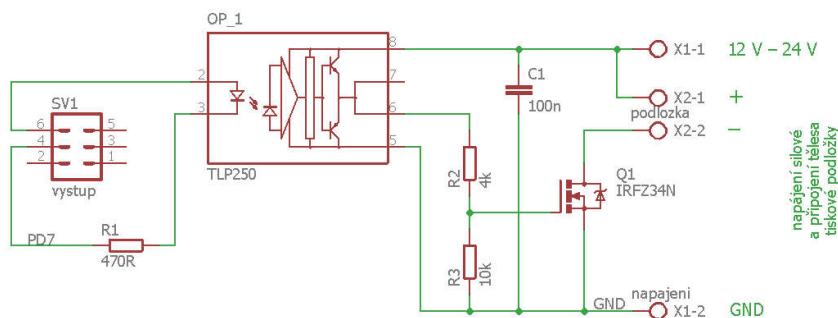
Pin μ P	Blok	Pin bloku
PortC.2	LCD displej	RS
PortC.3	LCD displej	E
PortC.4	LCD displej	Db4
PortC.5	LCD displej	Db5
PortC.6	LCD displej	Db6
PortC.7	LCD displej	Db7
PortD.0	FT232RL	TXD
PortD.1	FT232RL	RXD
PortD.2	Rotační enkodér	kanál A
PortD.3	Rotační enkodér	kanál B
PortD.7	Výstup (optočlen)	–

3.9 SCHÉMA ZAPOJENÍ REGULÁTORU

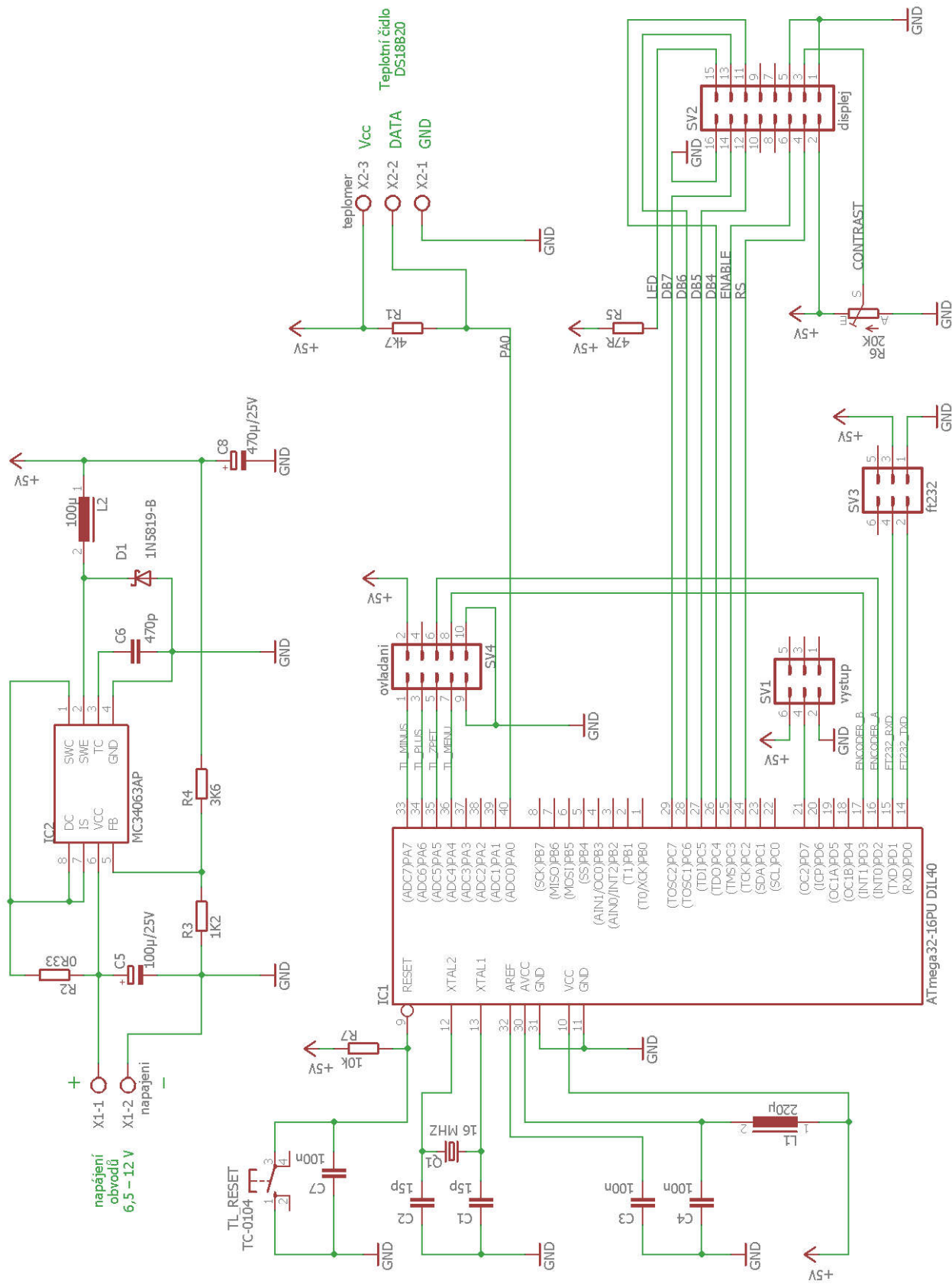
Celkové schéma zapojení všech komponent regulátoru s rozdělením na jednotlivé DPS je uvedeno na následujících stránkách:



Obr. 3.9 – Schéma zapojení ovládací DPS



Obr. 3.10 – Schéma zapojení výstupní DPS



Obr. 3.11 – Schéma zapojení hlavní DPS

4 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ REGULÁTORU (SW)

V této kapitole jsou popsány jednotlivé bloky programu, které provádí výpočet regulátoru, komunikují s vnějšími periferiemi, přijímají pokyny od uživatele, zobrazují stavy na zobrazovacím zařízení a zajišťují komunikaci s PC.

4.1 PROGRAMOVACÍ JAZYK

Pro účely naprogramování jednočipového mikropočítače bylo vybráno vývojové prostředí BASCOM AVR, ve kterém se pracuje s programovacím jazykem Bascom, vyvíjeným firmou MCS Electronics. Prostředí je vyvíjeno a určeno výhradně pro RISCové mikrokontrolery ATMEL AVR (Váňa, 2004).

Ačkoliv je jazyk Bascom, oproti rozšířenějšímu jazyku C, určen spíše pro začátečníky, přesto v něm lze pracovat i se složitými operacemi, a tak mohou tento programovací jazyk využívat i náročnější uživatelé. Prostřední BASCOM AVR disponuje mnohými zabudovanými funkcemi a knihovnamy pro obsluhu vnitřních periferií mikrokontroleru a běžně používaných zařízení připojovaných k μP , a tím usnadňuje práci programátora.

4.2 PROGRAM

Program je rozdělen na několik částí.

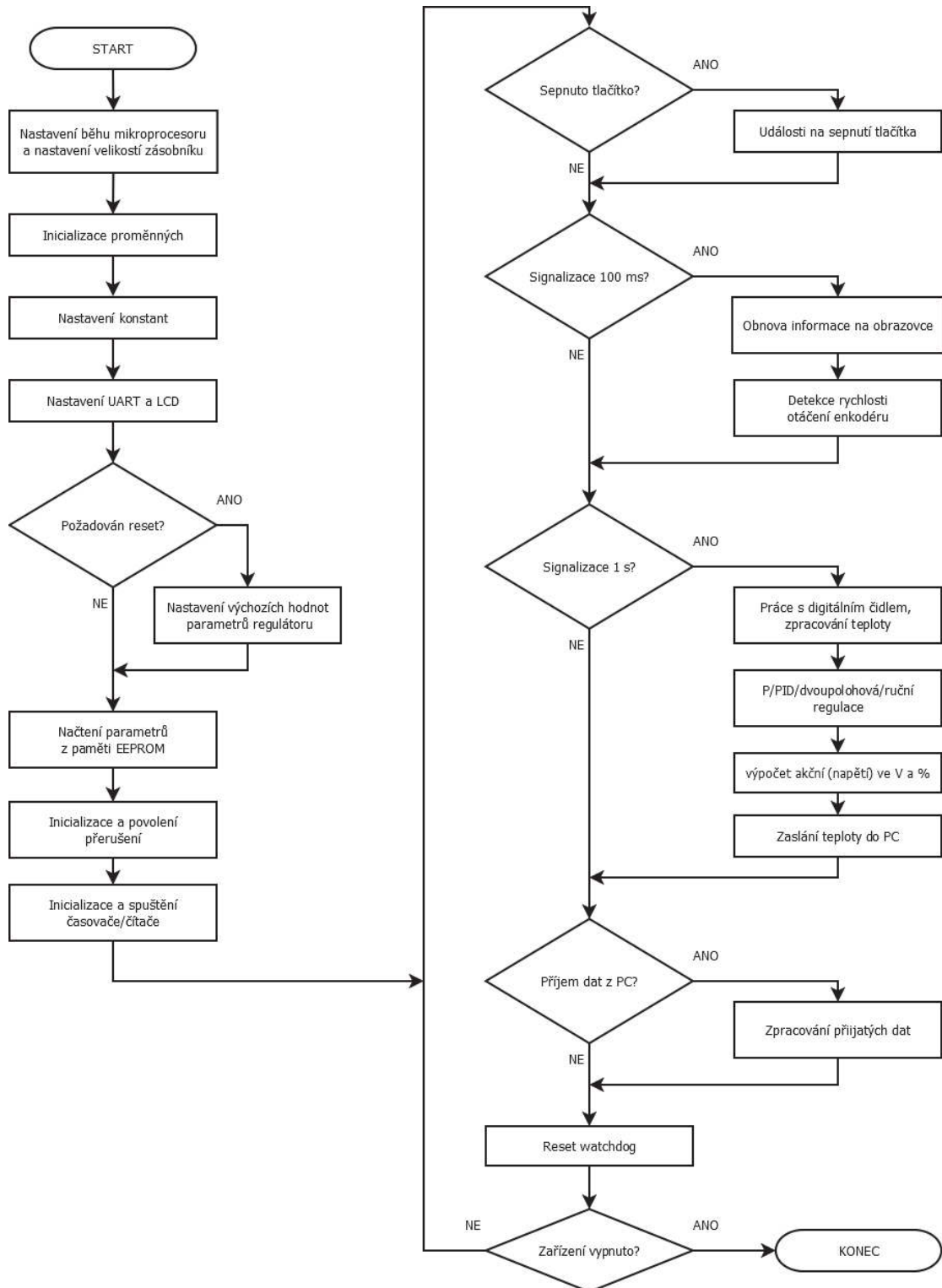
Při spuštění zařízení se nejprve provede úvodní část programu, která má za úkol inicializaci proměnných, nastavení konstant, nastavení parametrů připojovaných periferií, načtení dat z dlouhodobé paměti EEPROM, či nastavení a spuštění potřebných čítačů/časovačů a povolení přerušení.

Po provedení úvodní části programu (inicializace) se program dostává do hlavní smyčky, jejíž cyklus se za běžných okolností nikdy neukončuje. V této smyčce je prováděna většina činností. Z těch méně náročných činností se jedná o detekci sepnutí tlačítek, zpracování událostí na stisknutá tlačítka, či resetování počítadla watchdog. V této části jsou umístěny i instrukce, které je potřeba vykovávat v přesně definovaném intervalu. Zda budou v daném cyklu vykonány instrukce určuje čítač/časovač, který po určeném čase nastavuje příznak povolující provedení těchto příkazů. Tyto příkazy jsou tak spuštěny jen tehdy, když je příznak nastaven.

Dále jsou v programu definovány obsahy funkcí/podprogramů, jejichž kód je spuštěn ve chvíli, kdy je daná funkce volána. Funkce mohou být volány jak z hlavního programu, tak

i přerušovací procedurou. Přerušování může nastat např. signalizací časovače/čítače nebo externě změnou stavu na portu mikropočítače. Po vykonání podprogramu se běh programu vrací zpět do hlavní smyčky do místa, kde došlo k volání nebo přerušování.

Průběh inicializace a hlavní smyčky programu shrnuje diagram na obr. 4.1.



Obr. 4.1 – Vývojový diagram průběhu inicializace a hlavní smyčky programu

V následujících oddílech jsou jednotlivě rozebrány a popsány důležité bloky programu.

4.3 KOMUNIKACE SE SNÍMAČEM TEPLoty

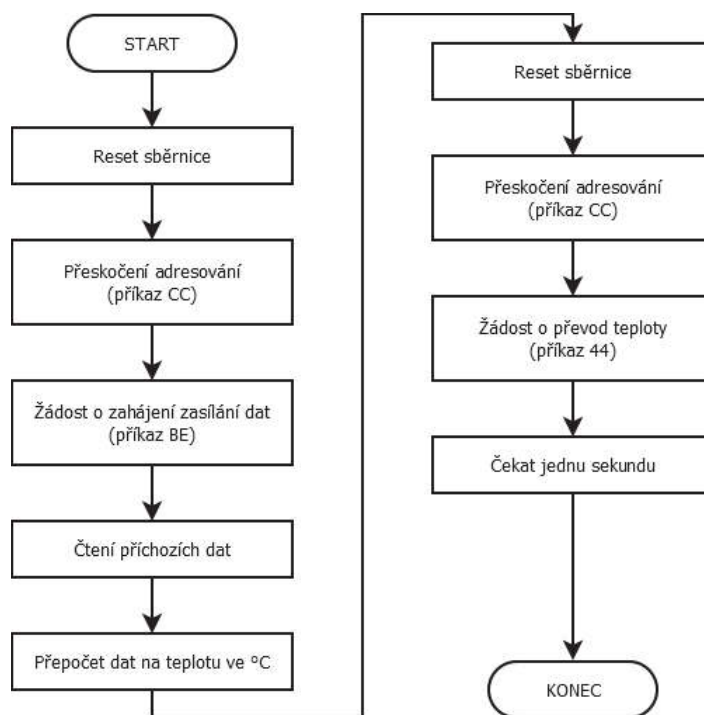
V programovacím jazyce Bascom jsou zabudovány funkce zajišťující zpracování komunikace s digitálním teploměrem DS18B20, proto není potřeba zabývat se detailním fungováním komunikace po 1-Wire sběrnici. Ke komunikaci stačí znát tři funkce:

- *Iwreset* – provedení resetu sběrnice,
- *Iwwrite <byte>* – zápis bajtu na sběrnici,
- *temp = Iwread(x)* – čtení ze sběrnice a uložení *x* bajtů do proměnné *temp*.

Samotný převod teploty v čidlu trvá kolem 800 ms, proto byl zvolen interval 1 sekunda, kdy se opakovaně provádí následující činnosti:

1. Čtení dat z čidla,
2. přepočítání na teplotu ve °C,
3. žádost o provedení nového převodu.

Detailní průběh, prováděný každou sekundu, je uveden na obr. 4.2



Obr. 4.2 – Vývojový diagram práce s digitálním teploměrem

Během činnosti se sleduje, zda není detekována chyba čidla nebo překročení minimální nebo maximální teplotní meze čidla. V kladném případě je nastaven příznak chyby, aby mohly ostatní funkce adekvátně reagovat na chybu čidla.

4.4 PSD REGULACE

Jak bylo uvedeno v teoretické části, program vykonávající funkci PSD regulátoru bude vycházet z přírůstkového algoritmu (rovnice 1.3).

V regulátoru je umožněno volit vzorkovací periodu diskrétního regulačního pochodu. Nejnižší možná hodnota periody se odvíjí od rychlosti měření digitálního teploměru a je zvolena na 1 sekundu.

V případě, že je vzorkovací perioda 1 sekunda, je možné rovnici 1.3 zkrátit vyjmutím proměnné T a výsledná rovnice je vyjádřena vztahem

$$u(k) = u(k-1) + Z_R \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{e(k)}{T_I} + T_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\}, \quad (4.1)$$

- kde k – relativní diskrétní čas,
 u – diskrétní akční veličina, V,
 Z_R – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 e – regulační odchylka, $^\circ C$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

Pro zamezení wind-up efektu způsobeným neomezenou sumací integrační složky je v algoritmu zaveden kontrolní součet skládající se ze všech složek algoritmu vyjma integrační složky. V případě, že je tento kontrolní součet převyšuje maximální povolený akční zásah a regulační odchylka je kladná nebo kontrolní součet je záporný a regulační odchylka je záporná, nebude v algoritmu pro danou iteraci zahrnuta integrační složka a rovnice je dána vztahem

$$u(kT) = u[(k-1)T] + Z_R \{ [e(kT) - e[(k-1)T]] \} + Z_R \left\{ \frac{T_D}{T} [e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]] \right\}, \quad (4.2)$$

- kde k – relativní diskrétní čas,
 T – vzorkovací perioda, s,
 kT – diskrétní reálná proměnná (diskrétní čas), s,

- u – diskrétní akční veličina, V,
- Z_R – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
- e – regulační odchylka, $^\circ C$,
- T_I – integrační časová konstanta, s,
- T_D – derivační časová konstanta, s,

v opačném případě bude algoritmus regulátoru v dané iteraci vycházet z rovnice 1.3.

V každé iteraci jsou do paměti uloženy vnitřní stavy regulátoru – akční veličina (bez saturace) a regulační odchylka – pro další krok, kde se pracuje s předchozími stavy.

Výsledná akční veličina na výstupu je saturována. V případě, že po výpočtu nabývá hodnotou vyšší, než je nastavené maximální napětí, bude hodnota snížena na maximální výkon. Pokud nabývá záporné hodnoty, bude nastavena na nulu.

Dále je možné regulátor nastavit na proporcionální regulaci, kdy je algoritmus realizující výpočet akční veličiny mnohem jednodušší a je vyjádřen vztahem

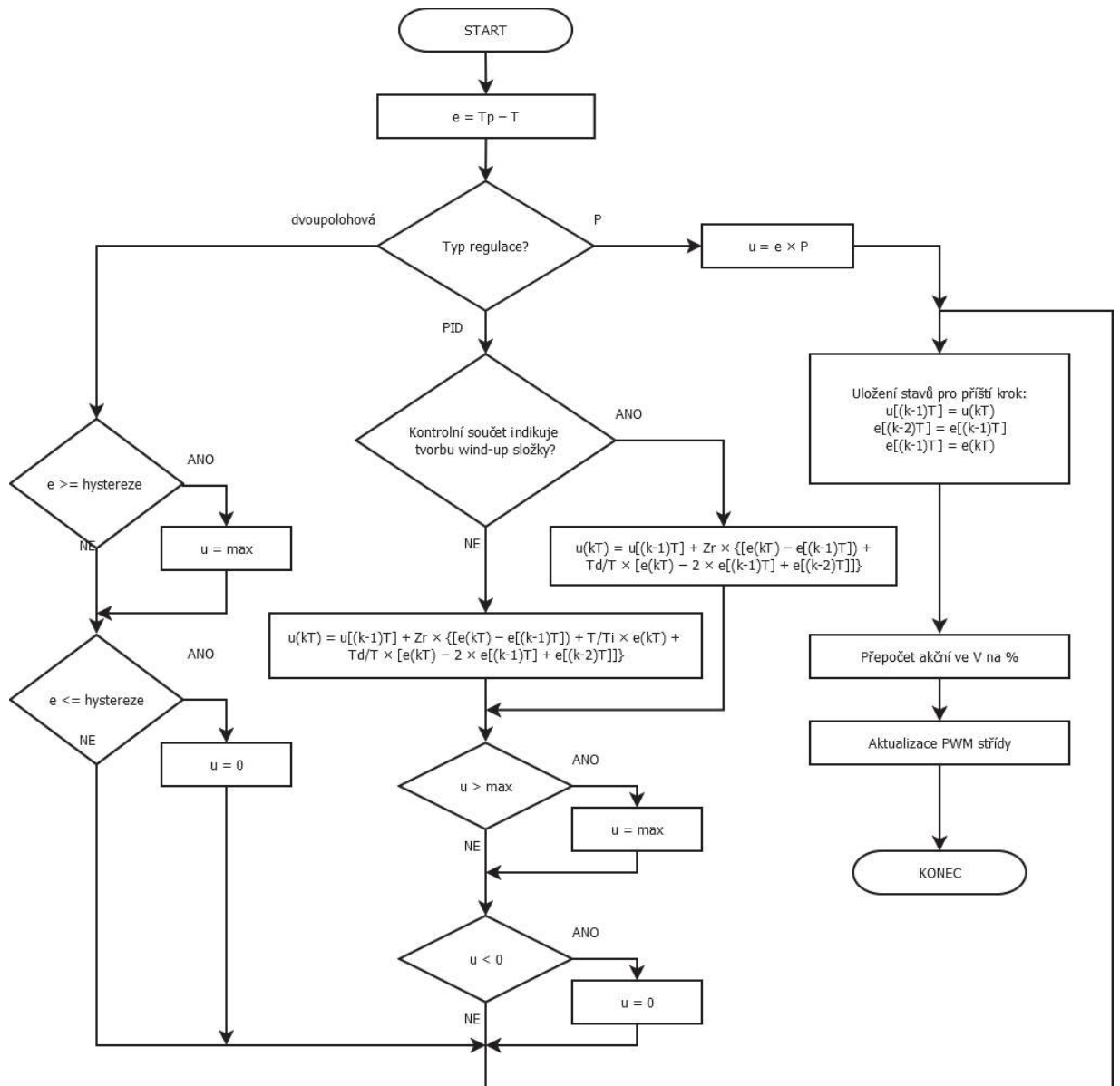
$$u(k) = Z_R e(k), \quad (4.3)$$

- kde k – relativní diskrétní čas,
- Z_R – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
- e – regulační odchylka, $^\circ C$.

Třetí možností je nastavení regulátoru do stavu dvoupolohové regulace s hysterezí. V případě kladné hodnoty součtu regulační odchylky a hystereze je nastavena akční veličina na maximální možnou hodnotu (100 %). V případě záporné hodnoty součtu regulační odchylky a záporné hystereze je nastavena akční veličina na nulovou hodnotu (0 %).

Poslední možností je nastavení regulátoru do stavu ruční (manuální) regulace akční veličiny.

Algoritmus regulace je ve vývojovém diagramu zobrazen na obr. 4.3.



Obr. 4.3 – Vývojový diagram algoritmu P, PSD a dvoupolohové regulace a výstupu

4.4.1 PWM signál

Akční veličinu, jejíž hodnota je stanovena ve voltech, je potřeba nejprve převést na procentuální hodnotu. Přepočítání je provedeno tak, že 100 % odpovídá saturaci akční veličiny (což odpovídá nastavenému maximálnímu napájecímu napětí topného tělesa).

Procentuální hodnota výkonu je přepočítána na rozsah 0 ÷ 255. Jedná se o rozsah bajtového registru PWM2 časovače/čítače 2, podle kterého je nastavována aktuální střída PWM signálu na výstupu mikroprocesoru.

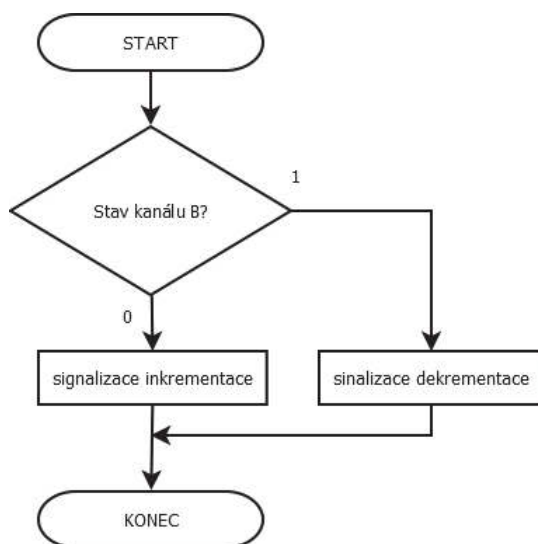
Čítač/časovač 2 je nutno nastavit pro funkci PWM a spustit, což se provede v inicializační části programu.

4.5 ROTAČNÍ ENKODÉR

Základní algoritmus zpracovávající pohyb mechanického rotačního enkodéru je prostý. Stačí sledovat sestupnou nebo náběžnou hranu jednoho z kanálů. Pokud dojde k uvedené změně, je nutné zjistit, v jakém stavu se nachází druhý kanál a podle toho se vybere reakce na otočení o jednu pozici jedním nebo druhým směrem.

K detekci náběžné (nebo sestupné) hrany je využito externí přerušování, které může mikroprocesor ATmega32 zpracovávat na dvou pinech – PD2 (INT0) a PD3 (INT1).

Pro demonstraci průběhu algoritmu byla vybrána reakce na náběžnou hranu kanálu A.



Obr. 4.4 – Vývojový diagram algoritmu enkodéru při detekci náběžné hrany kanálu A

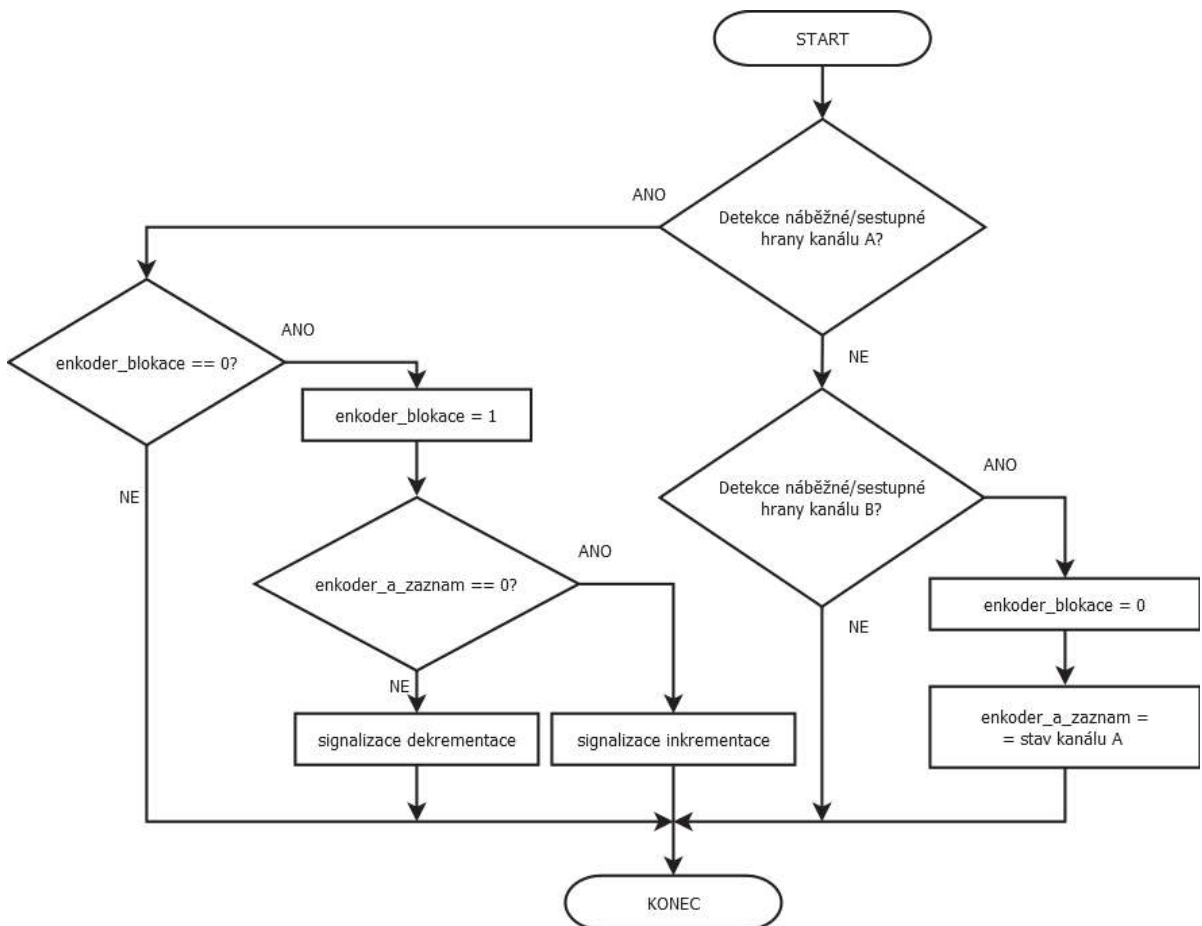
Protože se jedná o mechanický spínač, dochází při změně polohy na kontaktech k zákmitům. Pokud by se výše uvedený algoritmus neupravil, chování čítače by bylo nekorektní, neboť by při změně o jeden krok bylo započten náhodný počet kroků.

Problém se zákmity je vyřešen rozšířením původního algoritmu: Jsou sledovány změny obou kanálů.

Při změně stavu kanálu B je nulován příznak *enkoder_blokace* a do proměnné *enkoder_a_zaznam* je uložen stav kanálu A. Jelikož k zákmitům dochází pouze při změně kanálu, je tím zajištěno, že ukládaný stav kanálu A je korektní, neboť se pin detekuje v době, kdy na kanálu neprobíhá změna (fázový posun oproti kanálu B).

Při změně stavu kanálu A je dotaz, zda *enkoder_blokace* je rovno 0. Pokud je podmínka splněna, je tato proměnná nastavena na 1 a podle stavu proměnné *enkoder_a_zaznam* se provede odpovídající reakce na otočení o jednu pozici jedním nebo druhým směrem.

Tento rozšířený model práce s rotačním enkodérem v programu je znázorněn na obr. 4.5.



Obr. 4.5– Vývojový diagram rozšířeného algoritmu zpracování enkodéru

Přerušení INT0 a INT1 se musí v inicializační části programu nastavit do režimu *change*, aby bylo přerušení na příslušných pinech generováno pro sestupnou i náběžnou hranu.

Součástí ovládání enkodéru je algoritmus zajišťující rychlou změnu upravovaných hodnot v případě, že je kolečkem rychle otáčeno. Během 100 ms se počítá počet pootočení a při překročení určité meze jsou hodnoty měněny v násobcích.

4.6 LCD DISPLEJ

V programovacím jazyce Bascom jsou zabudovány funkce zajišťující komunikaci s rozšířenými řadiči LCD displejů. Pro ovládání je tak zapotřebí znát pouze ty funkce, které komunikaci obstarávají:

- *Lcd* – zápis řetězce na displej,
- *Cls* – smazání celé obrazovky,
- *Locate* – nastavení pozice kurzoru displeje,
- *Cursor* – nastavení zobrazení/schování nebo blikání pozice kurzoru.

V inicializační části programu je třeba displej nakonfigurovat. Je nutné uvést, na jakých pinech portů mikroprocesoru budou zapojeny dané vývody řadiče, jaké jsou rozměry matice displeje nebo zda je datová sběrnice čtyř- nebo osmibitová.

V programu je také možné nadefinovat až 8 vlastních znaků/symbolů. K tomu je určena funkce *Deflcdchar*.

4.7 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ

Po startu regulátoru je zobrazena úvodní obrazovka, na které se vykresluje aktuální teplota čidla, požadovaná teplota aktuálně zvoleného profilu, název profilu a informace o akční veličině – napětí ve voltech nebo procentech (podle nastavení). Pokud je provoz regulátoru vypnut nebo došlo k chybě čidla, jsou na úvodní obrazovce tyto stavy zobrazeny.

Regulátor se ovládá pomocí dvou tlačítek a rotačního enkodéru. Přímo na úvodní obrazovce je možno měnit aktuálně zvolený profil. Další parametry se nastavují v menu regulátoru, do něhož je možné dostat se stisknutím tl. MENU. V menu se položky vybírají otáčením enkodéru, v případě zobrazeného kurzoru se otáčením mění nastavovaná hodnota. Tlačítkem MENU se vnoří do menu, případně se jím povoluje kurzor pro změnu položky a přechází mezi položkami na jedné stránce menu. Tlačítkem EXIT se opouští úprava položek a vrací se zpět z menu.

Všechny měnitelné parametry a nastavení regulátoru jsou uloženy v dlouhodobé EEPROM paměti. Po obnovení napájení se načtou data z této paměti a individuální nastavení zůstává zachováno. Časté používání paměti EEPROM (především zápis) snižuje životnost této paměti, proto se s pamětí pracuje v omezené míře: Ukládání do této paměti se provádí pouze při opuštění editace konkrétní položky menu nebo při obnově nastavení do výchozích hodnot.

V příloze B této práce je k dispozici uživatelský návod, ve kterém jsou podrobně rozepsány instrukce pro práci s regulátorem.

4.8 KOMUNIKACE S PC

V osobním počítači je možné spustit obsluhující program, který zjednodušuje práci s regulátorem a rozšiřuje možnosti využití, jako je například zobrazení průběhu teploty v grafu nebo export naměřených hodnot. Aby bylo možné předávat data mezi regulátorem a PC, je využit přenos dat po sběrnici USB skrze převodník FT232.

Ke komunikaci se využívají zavedené funkce pro práci se zabudovaným UARTem (ve vývojovém prostředí též označováno jako RS232). Pomocí příkazů je možné přijímat nebo odesílat jednotlivé bajty nebo celé řetězce znaků. V inicializační části programu je nutné definovat přenosovou rychlost UARTu a velikost vstupní a výstupní vyrovnávací paměti (bufferu).

Pro komunikaci je zvolena modulační rychlost (baud rate) 2 400 Bd/s. Během realizace bylo zjištěno, že při nastavení vyšších rychlostí komunikace dochází k chybným přenosům dat, a naopak při nižších rychlostech dochází k pozdnímu doručení požadovaných informací.

4.8.1 Komunikační protokol

Posílaná a přijímaná data mají následující strukturu:

- $0x01 + \langle \text{číslo příkazu} \rangle$ – pro přenos příkazu,
- $0x02 + \langle \text{znak} \rangle + \langle \text{znak} \rangle + \langle \text{znak} \rangle + \dots + 0x03$ – pro přenos dat.

Bajt s hodnotou 1 informuje o tom, že následující bajt nese příkaz. Bajt 2 (respektive 3) zahajuje/ukončuje přenos dat. Mezi těmito řídicími bajty jsou všechny příchozí bajty převáděny na znak (ASCII) a přidávány na konec řetězce dočasné proměnné. Počet přijatých/odeslaných bajtů se rovná počtu znaků zasílané proměnné.

Zasílání dat probíhá vždy před voláním příkazu, který definuje práci s přijatými/zaslanými daty. Příkladem je zaslání aktuální teploty:

V následující tab. 4.1 jsou sepsány příkazy, které se v komunikaci vyskytují.

Tab. 4.1 – Definované příkazy pro komunikaci mezi μP a PC

Číslo	Význam ($\mu\text{P} \rightarrow \text{PC}$)	Význam ($\text{PC} \rightarrow \mu\text{P}$)	Očekávána data (vzor)
001		Žádost o zaslání všech informací	
007	Oznámení zaslání dat		
008	Hodinový signál 1 s		
009	Signál periody PSD regul.		
010	Provoz: STOP	Nastav: STOP	
011	Provoz: v provozu	Nastav: v provozu	
012	Menu: 0: hlavní obrazovka		
013	Menu: >0: pohyb v menu		
020	Čidlo: chyba!		
021	Čidlo: OK		
022	Čidlo: probíhá první převod		
023	Čidlo: čeká na první převod		
024	Čidlo: chyba MAX		
025	Čidlo: chyba MIN		
031	Aktuální profil 1	Navolit profil 1	
032	Aktuální profil 2	Navolit profil 2	
033	Aktuální profil 3	Navolit profil 3	
034	Aktuální profil 4	Navolit profil 4	
035	Aktuální profil 5	Navolit profil 5	
036	Aktuální profil 6	Navolit profil 6	
040	Teplota (aktuální)		999,9
041	Akční veličina (V)		999,9
042	Akční veličina (%)		999
051	Profil 1 – teplota	Profil 1 – teplota (nastavit)	999
052	Profil 2 – teplota	Profil 2 – teplota (nastavit)	999
053	Profil 3 – teplota	Profil 3 – teplota (nastavit)	999
054	Profil 4 – teplota	Profil 4 – teplota (nastavit)	999
055	Profil 5 – teplota	Profil 5 – teplota (nastavit)	999
056	Profil 6 – teplota	Profil 6 – teplota (nastavit)	999

Tab. 4.1 – Definované příkazy pro komunikaci mezi μ P a PC – pokračování

Číslo	Význam (μ P \rightarrow PC)	Význam (PC \rightarrow μ P)	Očekávaná data (vzor)
061	Profil 1 – název	Profil 1 – název (nastavit)	aaaaaa
062	Profil 2 – název	Profil 2 – název (nastavit)	aaaaaa
063	Profil 3 – název	Profil 3 – název (nastavit)	aaaaaa
064	Profil 4 – název	Profil 4 – název (nastavit)	aaaaaa
065	Profil 5 – název	Profil 5 – název (nastavit)	aaaaaa
066	Profil 6 – název	Profil 6 – název (nastavit)	aaaaaa
070	Zesílení (Zr)	Zesílení (Zr) (nastav)	999,9
071	Integrační konst. (Ti)	Integrační konst. (Ti) (nastav)	999,9
072	Derivační konst. (Td)	Derivační konst. (Td) (nastav)	999,9
073	Max. výstup regulace (V)	Max. výstup regulace (nastav)	999,9
074	Typ regulace: P	P regulace (nastav)	
075	Typ regulace: PID	PID regulace (nastav)	
076	Zobrazit: akční ve V	Zobrazit: akční ve V (nastav)	
077	Zobrazit: akční v %	Zobrazit: akční v % (nastav)	
078	Typ regulace: dvoupolohová	Typ regulace: dvoupolohová (nastav)	
079	Hystereze	Hystereze (nastav)	9,9
080	Vzorkovací perioda	Vzorkovací perioda (nastav)	999
081	Typ regulace: ruční	Typ regulace: ruční (nastav)	
098		Požadavek na RESET do továrních hodnot	
099		Požadavek na vzdálený restart zařízení	

Těsně před odesláním čísla příkazu dochází k přidání offsetu k číslu příkazu, aby nedošlo ke konfliktu s rezervovanými řetězci znaků využívanými k signalizaci v komunikaci (signalizace příkazu, signalizace začátku a konce přenosu dat).

4.8.2 Odesílání dat do PC

Pro zápis dat na sériovou linku poslouží zabudovaná funkce *Printbin*, která vloží na výstupní frontu sériového rozhraní jeden bajt a pokud je to možné, bajt se odešle.

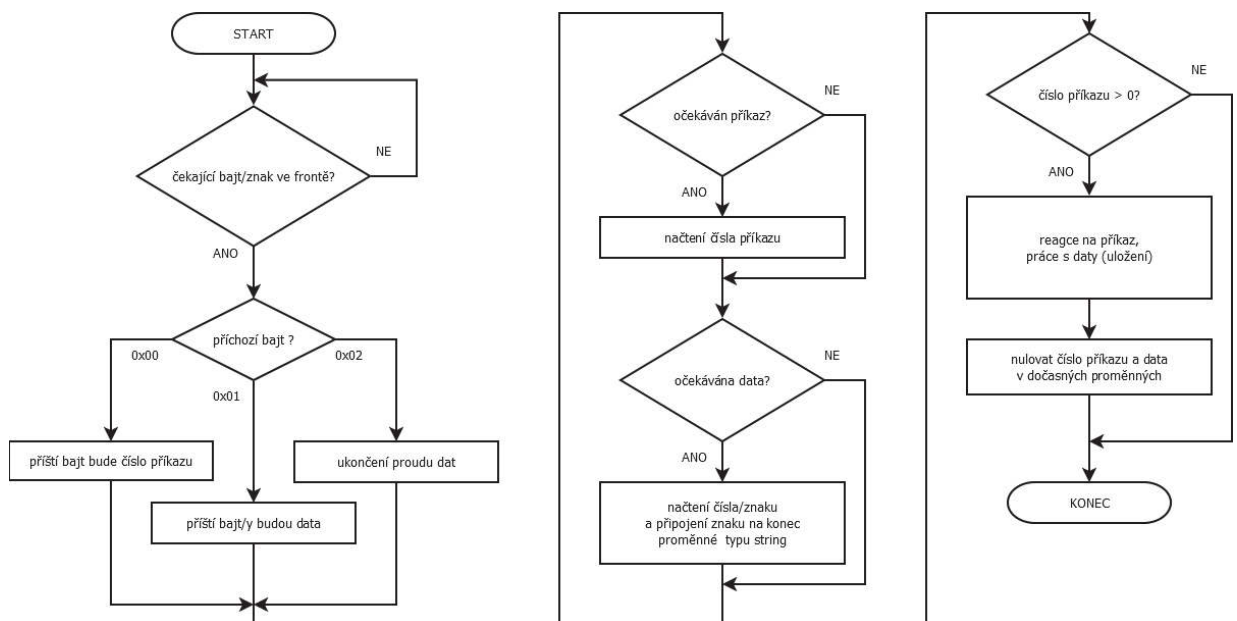
V pravidelných 1s cyklech jsou do PC zasílány aktuální hodnoty teploty a stavu teplotního čidla. Ostatní informace o stavu regulátoru jsou zasílány individuálně při změnách. Všechna data jsou zasílána hromadně při zapnutí komunikace anebo po přijetí žádosti z PC o zaslání všech informací.

4.8.3 Příjem dat z PC

Příchozí komunikaci zpracovává, nezávisle na běhu programu, integrovaný hardwarový obvod UART. Příchozí data (bajty) ukládá do příchozí fronty.

V hlavní smyčce programu dochází ke zpracování příchozích dat. V případě, že se v příchozí frontě nachází data, dojde k přečtení nejstaršího bajtu. Podle hodnoty se dále program větví, nastavují se pomocné proměnné a vykonávají se určité funkce na základě typu příchozího požadavku (číselného označení příkazu).

Prostup zpracování přijatých dat znázorňuje diagram na obr. 4.6.



Obr. 4.6 – Vývojový diagram zpracování příchozích dat komunikace

4.9 APLIKACE V PC

Pro zvýšení komfortu ovládání regulátoru a umožnění rozšíření funkcí regulátoru je navržena klientská aplikace pro osobní počítač, která komunikuje s regulátorem po sběrnici USB. Aplikace je určena pro operační systém Windows.

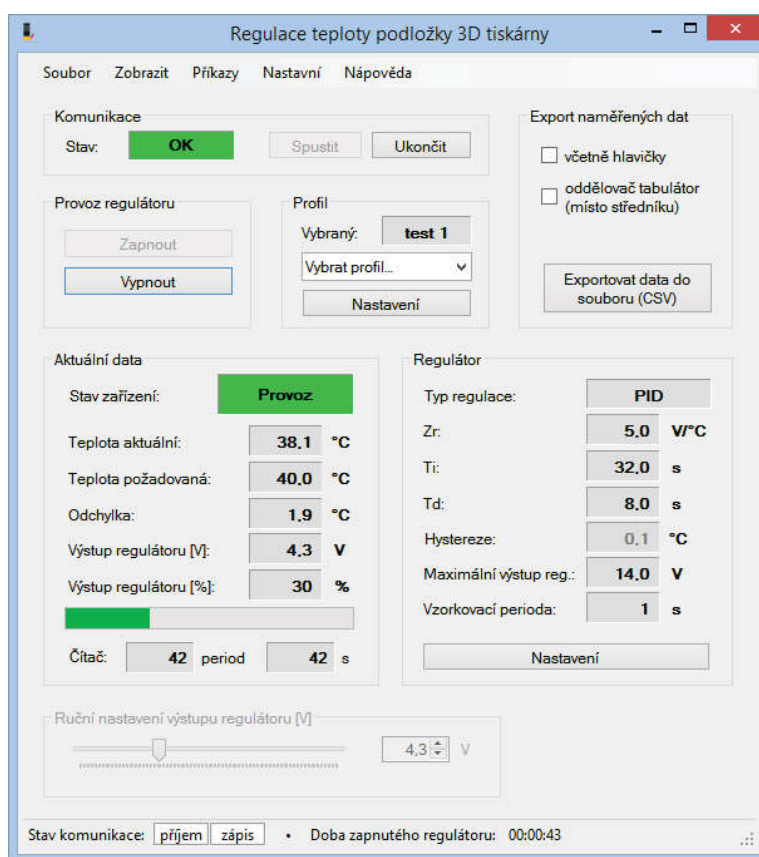
Aplikace umožňuje zobrazovat aktuální stav regulátoru, nastavovat parametry regulátoru, ukládat přijaté hodnoty do tabulky, exportovat data do souboru nebo vykreslovat graf.

4.9.1 Programovací jazyk

Pro účely naprogramování klientské aplikace bylo vybráno vývojové prostředí Microsoft Visual Studio a samotný program je napsán v programovacím jazyce C# a frameworku .NET.

Jazyk C# a framework .NET disponuje mnoha knihovnamí (např. sériová komunikace přes port COM) a nástroji pro tvorbu formulářových aplikací, usnadňuje tím tak práci programátora.

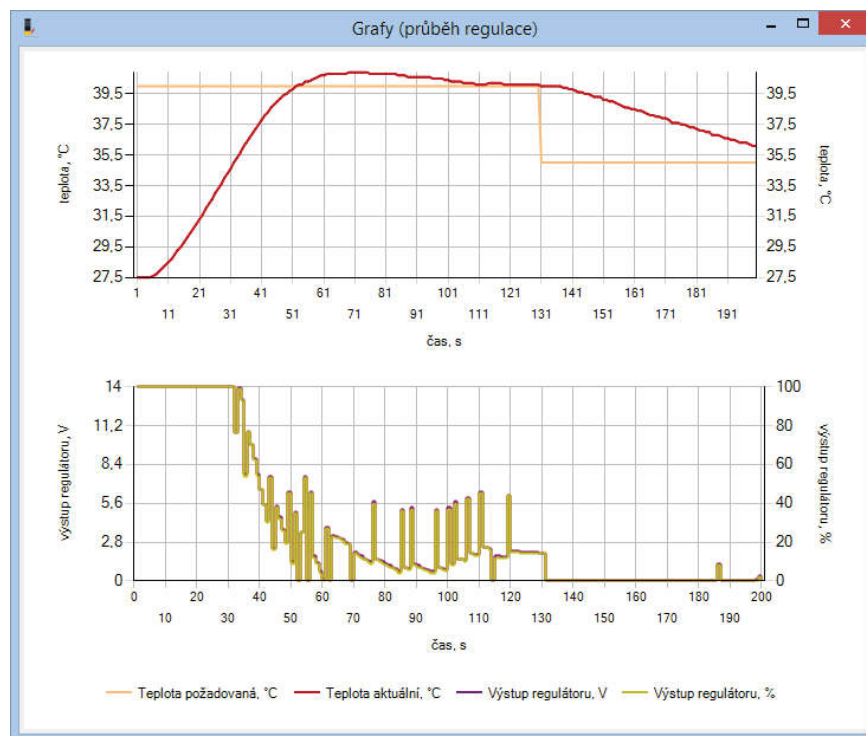
4.9.2 Program



Obr. 4.7 – Hlavní okno aplikace

Při spuštění aplikace je zobrazeno hlavní okno aplikace (obr. 4.7). Zde je možné nastavit komunikaci s regulátorem, výběr teplotního profilu a zobrazit veškeré parametry a stavy

regulátoru. Pomocí dialogových oken nastavení je možné upravit požadované teploty a názvy jednotlivých profilů nebo upravit ostatní parametry regulátoru. Po výběru názvu souboru lze exportovat naměřená data do souboru CSV.



Obr. 4.8 – Okno aplikace s grafem

Čas [s]	Teplota aktuální [°C]	Teplota požadovaná [°C]	Výstup reg. [V]	Výstup reg. [%]	PWM střída
28	31,0	35,0	7,3	52	0,52
29	31,0	35,0	7,3	52	0,52
29	31,3	35,0	10,4	74	0,74
30	31,6	35,0	9,4	67	0,67
31	31,8	35,0	12,9	92	0,92
32	32,1	35,0	7,8	55	0,55
33	32,5	35,0	2,2	15	0,15
34	32,7	35,0	9,6	68	0,68
35	33,0	35,0	4,4	31	0,31
36	33,3	35,0	3,2	22	0,22
37	33,6	35,0	1,9	13	0,13
38	33,8	35,0	5,1	36	0,36
39	34,0	35,0	4,2	29	0,29
40	34,3	35,0	0,0	0	0,00
41	34,4	35,0	6,4	45	0,45
42	34,6	35,0	1,5	10	0,10
43	34,8	35,0	0,5	3	0,03
44	34,9	35,0	4,0	28	0,28
45	35,0	35,0	3,5	25	0,25
46	35,1	35,0	3,0	21	0,21
47	35,3	35,0	0,0	0	0,00
48	35,4	35,0	1,5	10	0,10
49	35,5	35,0	0,9	6	0,06

Obr. 4.9 – Okno aplikace s datovou tabulkou

V tlačítku *Zobrazit* umístěném na hlavním panelu lze zobrazit okno s grafem nebo tabulku dat. V grafu jsou vykreslovány hodnoty aktuální a požadované teploty, odděleně pak výstup regulátoru uváděný ve voltech a procentech (obr. 4.8). Tabulka zobrazuje přehledně všechna naměřená data z regulátoru (obr. 4.9). Jednotlivé řádky, sloupce nebo buňky tabulky lze hromadně označit a data z nich kopírovat do schránky pro použití v jiné aplikaci.

V příloze B této práce je k dispozici uživatelský návod, ve kterém jsou podrobně rozepsány instrukce pro práci s aplikací pro PC.

5 VÝVOJ A REALIZACE

5.1 TESTOVÁNÍ

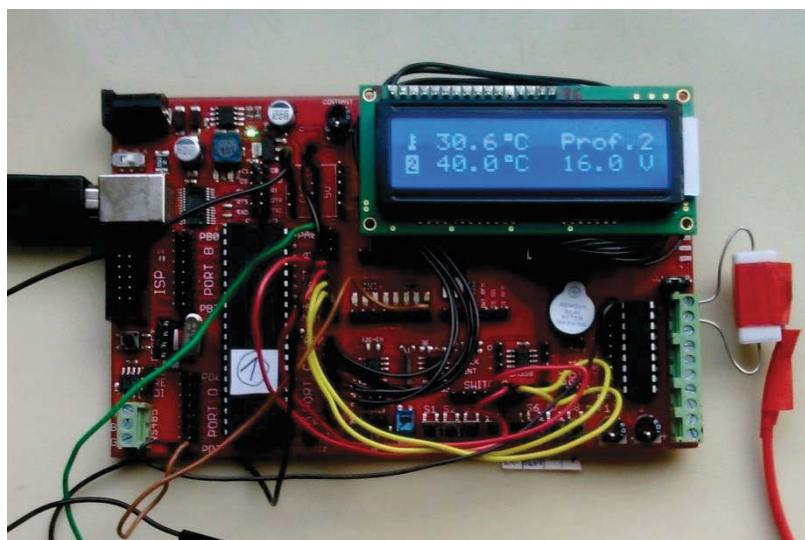
5.1.1 Vývojový kit EvB

Pro vývoj a testování programového vybavení mikroprocesoru byl použit vývojový kit EvB 5.1 v5 firmy AND-TECH, který je osazen množstvím periférií využitelných pro realizaci regulátoru teploty. Kit je určen pro procesory Atmel ATmega16, ATmega32 a ATmega644p.

Mezi použité periferie patří krystal 16 MHz, teplotní čidlo DS18B20, tlačítka, výkonový výstup ULN2803, displej LCD, převodník FT232 a USB konektor.

Programování mikroprocesoru lze provést přes rozhraní USB a UART pomocí zavaděče v paměti mikroprocesoru (bootloaderu) a aplikace AND-Load pro PC. Tento způsob ukládání programu do mikroprocesoru je jednodušší než přes rozhraní ISP, ale vyžaduje přítomnost zavaděče v programové paměti mikroprocesoru (And-tech, nedatováno).

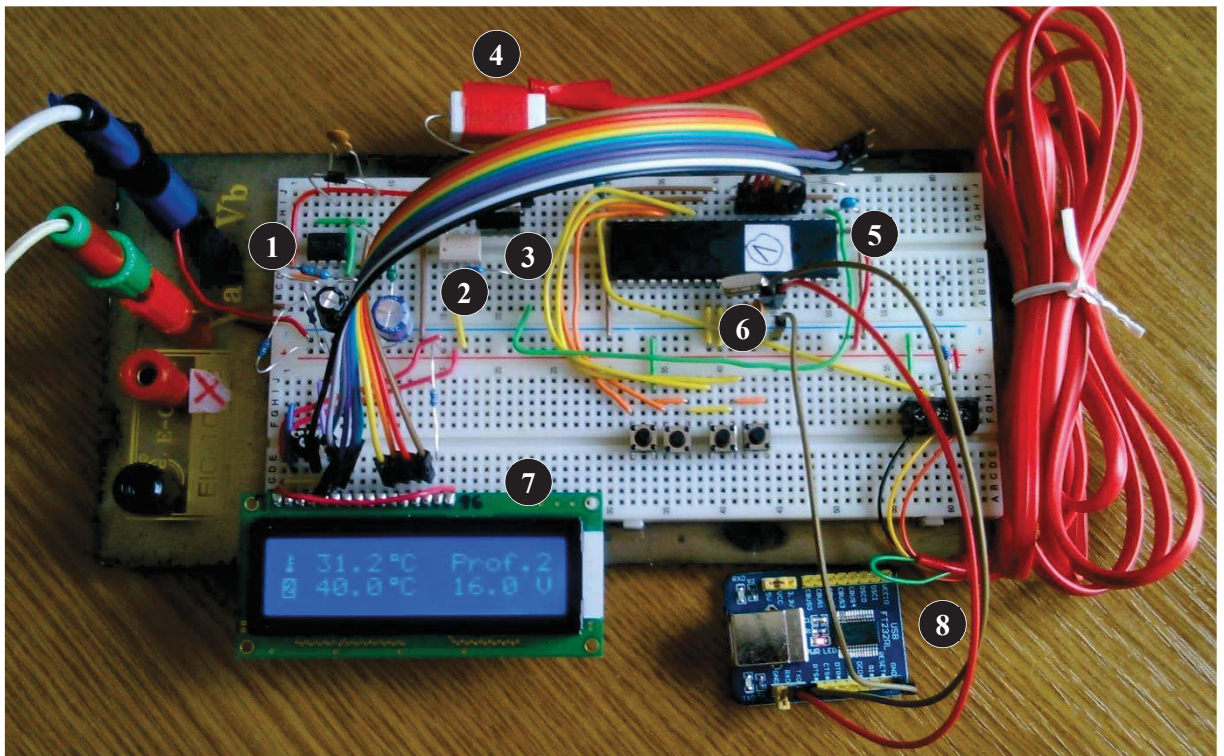
Zapojení a praktické využití kitu během testování je zobrazeno na obr. 5.1.



Obr. 5.1 – Vývojový kit EvB 5.1

5.1.2 Nepájivé pole

Pro ověření správného výběru součástek a správného návrhu zapojení byl obvod sestaven a otestován na nepájivém poli, což je možné vidět na obr. 5.2 včetně popisu významných součástek.



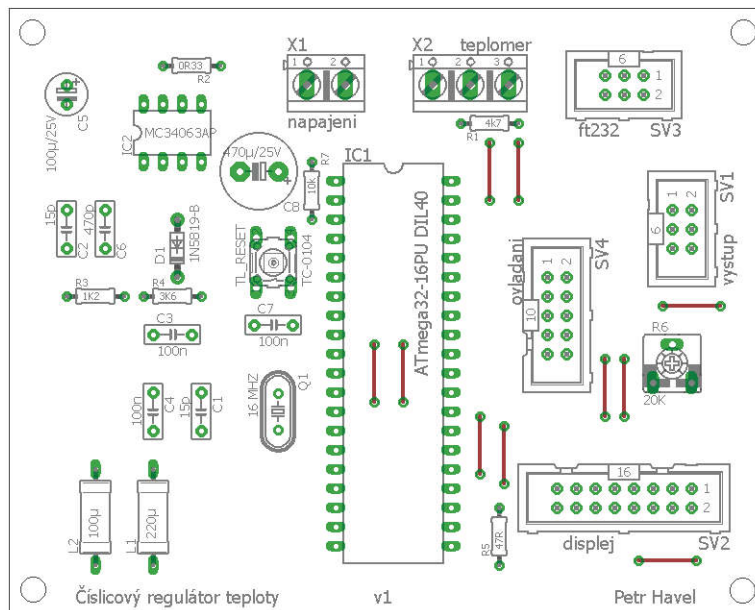
Obr. 5.2 – Zapojení obvodu na nepájivém poli

1. Spínaný zdroj MC34063AP1,
2. optočlen TLP250,
3. transistor MOSFET IRFZ34N,
4. teplotní čidlo DS18B2,
5. mikroprocesor ATmega32,
6. krystal 16 MHz,
7. displej LCD,
8. převodník FT232.

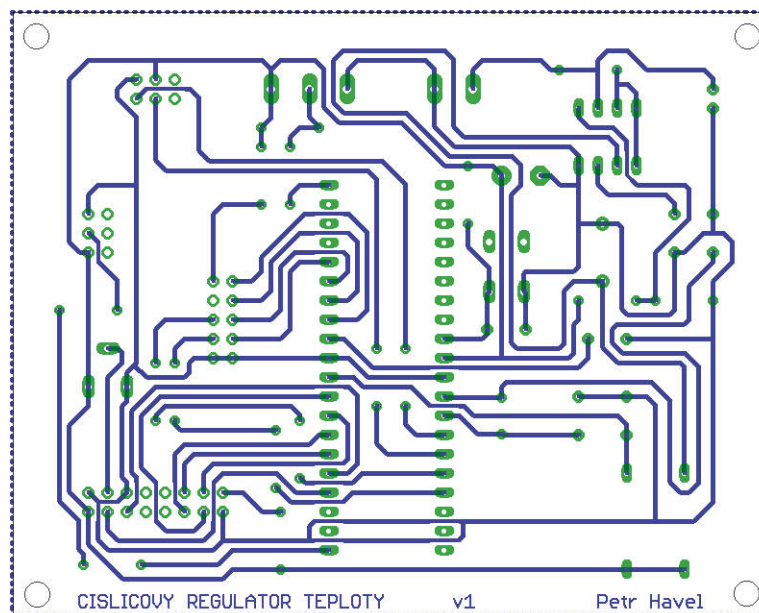
5.2 NÁVRH DPS

Obvod zařízení bude realizován na 3 deskách plošných spojů. Na hlavní desce budou umístěny napájecí a řídicí část. Druhá deska je určena pro osazení ovládacích prvků a třetí deska pro silové součástky výstupního obvodu. Displej nebude umístěn na žádné DPS a bude přímo propojen plošným kabelem s řídicím obvodem, stejně jako ostatní desky.

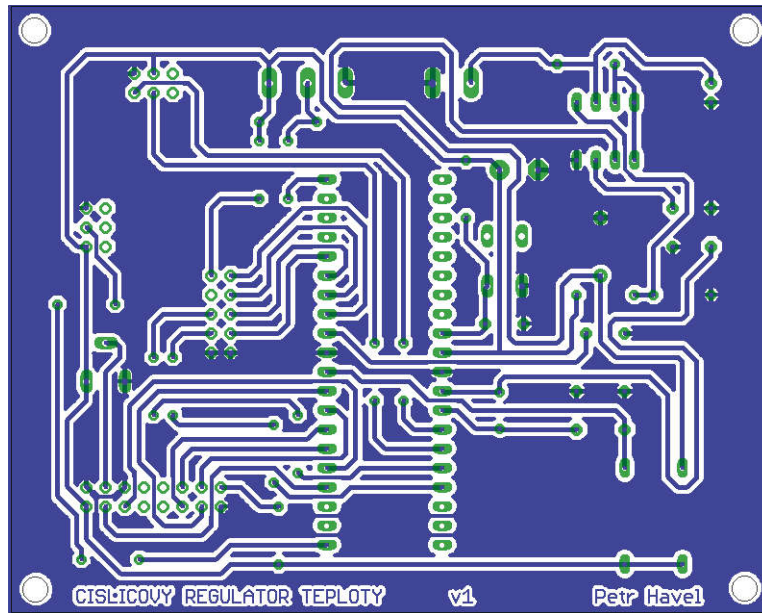
Návrhy DPS jsou realizovány v návrhovém systému CadSoft Eagle. Pro každou desku byly vyexportovány osazovací plán, strana spojů a strana spojů s vylitou mědí.



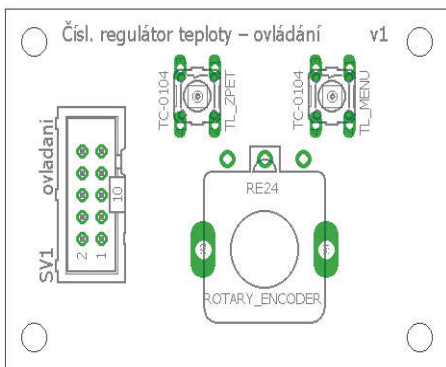
Obr. 5.3 – DPS hlavní (osazovací plán)



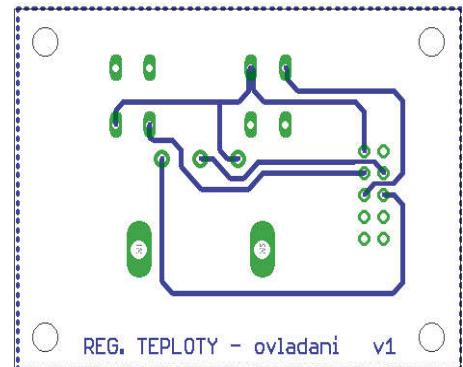
Obr. 5.4 – DPS hlavní (strana spojů)



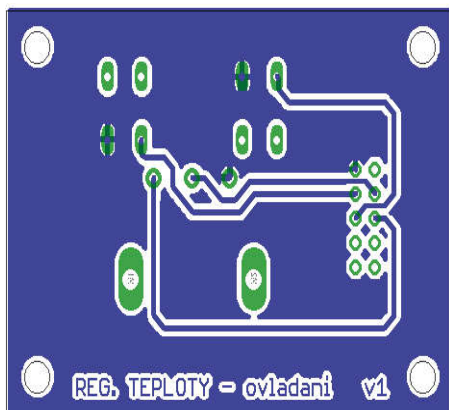
Obr. 5.5 – DPS hlavní (strana spojů s vylitou mědí)



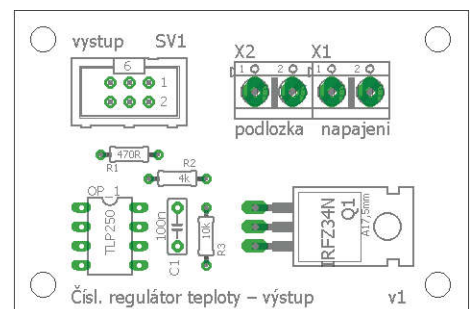
Obr. 5.6 – DPS ovládání
(osazovací plán)



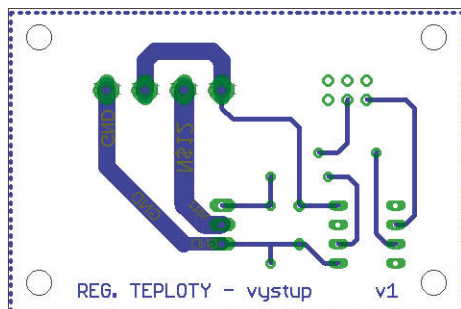
Obr. 5.7 – DPS ovládání (strana spojů)



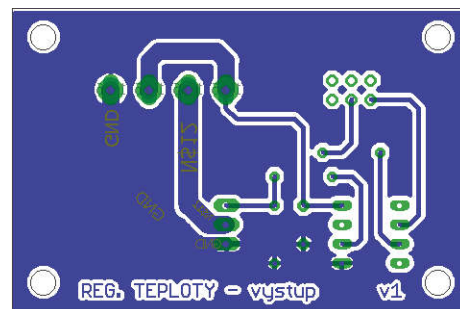
Obr. 5.8 – DPS ovládání (strana spojů s vylitou mědí)



Obr. 5.9 – DPS výstup (osazovací plán)

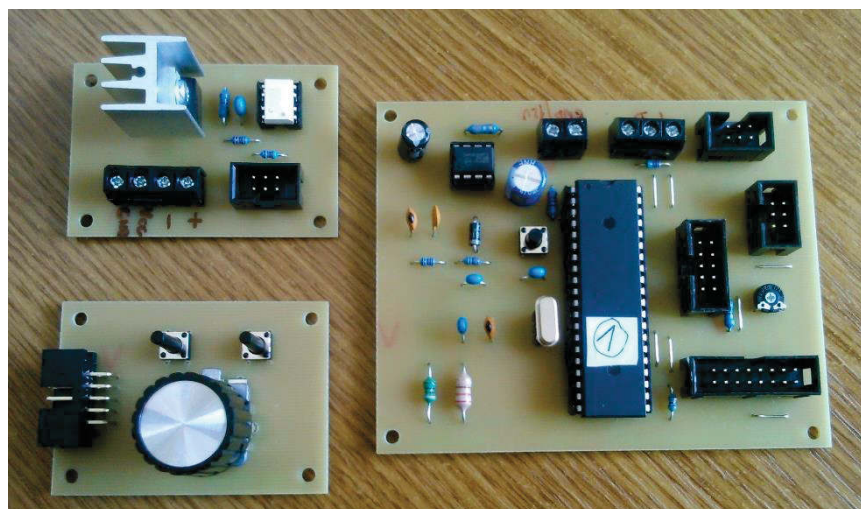


Obr. 5.10 – DPS výstup (strana spojů)

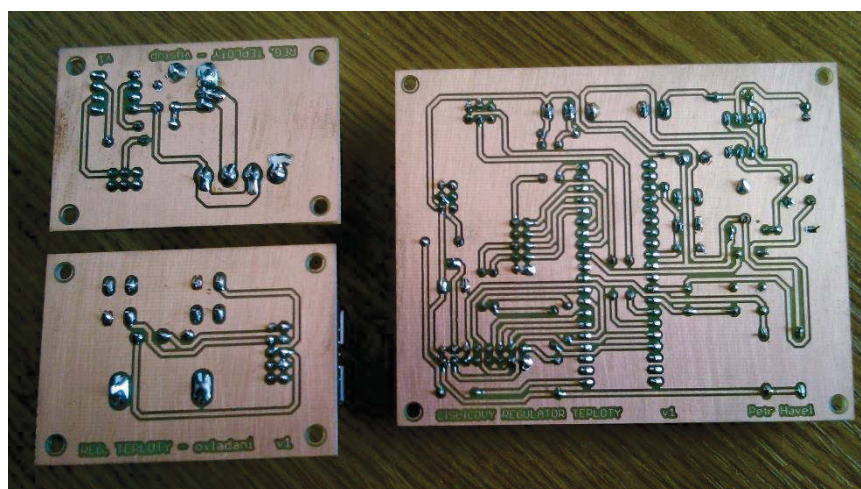


Obr. 5.11 – DPS výstup (strana spojů s vylitou mědí)

Na následujících obrázcích lze vidět jednotlivé osazené DPS.



Obr. 5.12 – Osazené DPS (strana součástek)



Obr. 5.13 – Osazené DPS (strana spojů)

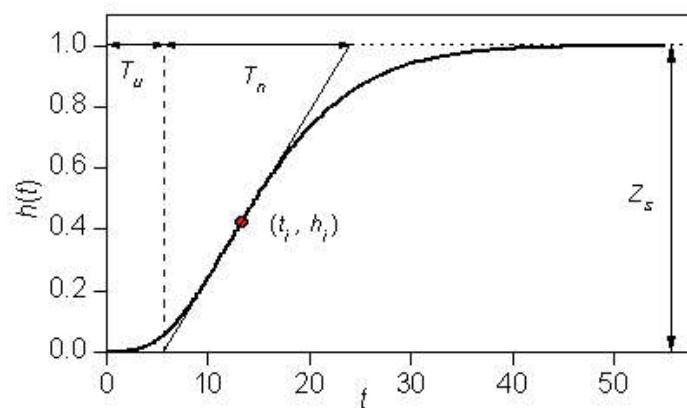
6 OVĚŘENÍ FUNKCE REGULÁTORU

6.1 IDENTIFIKACE SOUSTAVY

Identifikace tepelné soustavy byla provedena experimentálně podle metody z přechodové charakteristiky a Ziegler-Nicholsovy metody kritického zesílení.

6.1.1 Přechodová charakteristika

Přechodová charakteristika je měřena na základě změny akční veličiny (napětí na topném tělese). Z přechodové funkce získáváme parametry uvedené na obr. 6.1 (Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, nedatováno).



Obr. 6.1 – Graf přechodové charakteristiky 2. řádu

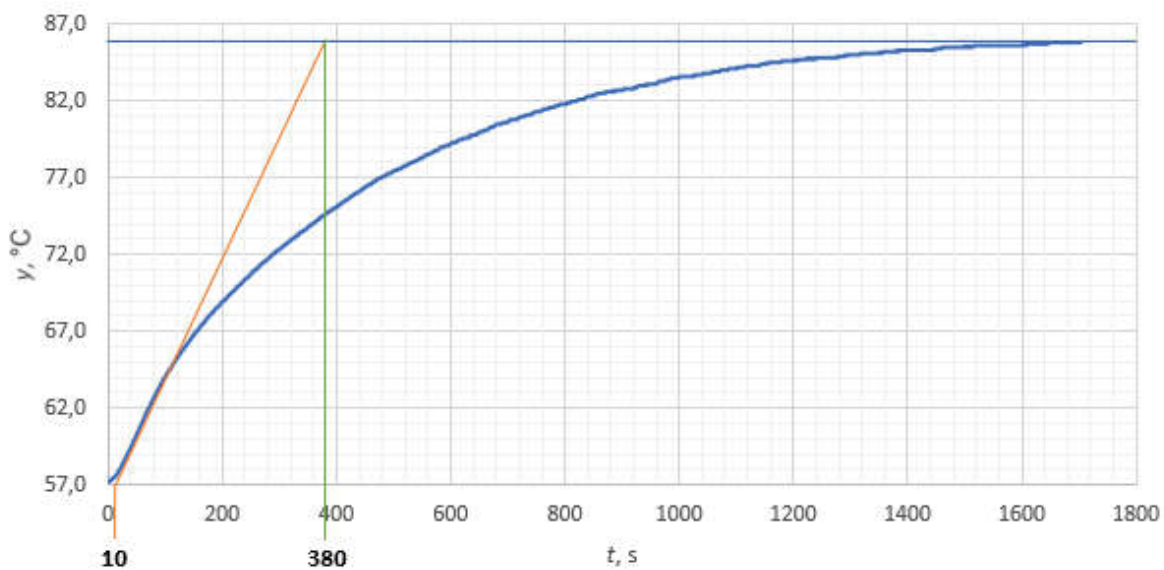
Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru, které se vypočítávají ze získaných dat z přechodové charakteristiky, jsou uvedeny v tab. 6.1 (Balátě, 2003).

Tab. 6.1 – Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ reg.	Z_r	T_I	T_D
P	$\frac{T_n}{T_u} \frac{1}{Z_s}$	–	–
PI	$0,9 \frac{T_n}{T_u} \frac{1}{Z_s}$	$3,5 T_u$	–
PD	$1,2 \frac{T_n}{T_u} \frac{1}{Z_s}$	–	$0,25 T_u$
PID	$1,25 \frac{T_n}{T_u} \frac{1}{Z_s}$	$2 T_u$	$0,5 T_u$

- kde T_U – doba průtahu, s,
 T_N – doba náběhu, s,
 Z_S – zesílení soustavy, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{V}^{-1}$,
 Z_R – zesílení regulátoru, $\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

Počátečními podmínkami při měření byly nulové napětí na výstupu a ustálená teplota $57,3^{\circ}\text{C}$. Skokovou změnou akční veličiny ze 4 V na 10 V došlo k postupnému nárůstu teploty až na ustálených $85,8^{\circ}\text{C}$. Průběh změny, včetně zakreslené tečny v inflexním bodě a přímek protínajících důležité body, je zobrazen na obr. 6.2.



Obr. 6.2 – Graf přechodové charakteristiky

Pro získání konstant PID regulátoru z přechodové charakteristiky je vhodná Ziegler-Nicholsova metoda podle vztahů v tab. 6.1. Původní data a výsledné konstanty se nachází v tab. 6.2.

Tab. 6.2 – Naměřené hodnoty přechodové charakteristiky a
výsledek výpočtu

Veličina	Hodnota	Parametr	Hodnota
T_u	10 s	Z_r	$9,7 \text{ V} \cdot \text{°C}^{-1}$
T_n	370 s	T_I	20 s
Z_s	$4,8 \text{ °C} \cdot \text{V}^{-1}$	T_D	5 s

6.1.2 Ziegler-Nicholsova metoda kritického zesílení

Jedná se o metodu uzavřené smyčky regulačního obvodu na hranici stability, kdy je regulační obvod přiveden do „kritického stavu“. Toho dosáhneme zvyšováním zesílení regulátoru (integrační a derivační složka je vyřazena), až obvod začne kmitat s konstantní amplitudou. Nastavené zesílení regulátoru je nazváno kritickým zesílením (Z_{rk}) s periodou kritických kmitů T_k (Balátě, 2003).

Vyhledání kritického zesílení je ve většině případů náročné, proto se využívá metoda, při které se zapojí do zpětné vazby místo proporcionálního regulátoru relé. Podle polarity regulační odchylky přepíná relé na svém výstupu konstantní hodnoty $+M$ a 0 . Soustava tento obdélníkový vstupní signál vyfiltruje na sinusový s amplitudou a . Kritické zesílení se získá podle vztahu

$$Z_{rk} = \frac{2M}{\pi a}, \quad (6.1)$$

kde M – akční veličina relé, V,

a – amplituda regulované (výstupní) veličiny, °C,

a výsledek se dosadí do vztahu v tab. 6.3 pro použitý typ regulátoru (Balátě, 2003).

Tab. 6.3 – Seřízení spojitého regulátoru z kritických hodnot

Typ reg.	Z_r	T_I	T_D
P	$0,5 Z_{rk}$	–	–
PI	$0,45 Z_{rk}$	$\frac{T_k}{1,2}$	–
PD	$0,5 Z_{rk}$	–	$0,05 T_k$
PID	$0,6 Z_{rk}$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$

kde Z_{rk} – kritické zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,

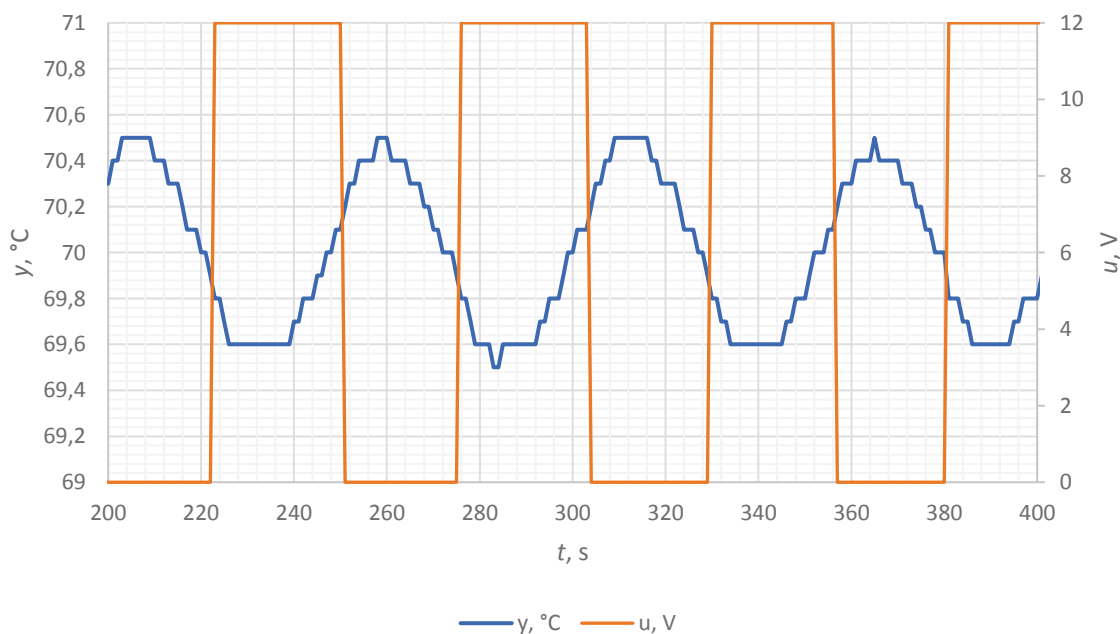
T_k – perioda kritických kmitů, s,

Z_R – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,

T_I – integrační časová konstanta, s,

T_D – derivační časová konstanta, s.

Výsledek měření metodou „relé“ je vyobrazen v grafu na obr. 6.3.



Obr. 6.3 – Graf chování regulátoru při provádění identifikace metodou kritického zesílení

Ze získaných dat z měření můžeme provést výpočet doporučeného seřízení regulátoru.

Tab. 6.4 – Zjištěné hodnoty při kritickém zesílení a výsledek výpočtu

Veličina	Hodnota	Parametr	Hodnota
M	12 V	Z_r	$10,2 \text{ V} \cdot \text{°C}^{-1}$
a	$0,45 \text{ °C}$	T_I	26,5 s
Z_{rk}	$\frac{2 \times 12}{\pi \times 0,45} = 17,0 \text{ V} \cdot \text{°C}^{-1}$	T_D	6,4 s
T_k	53 s		

- kde Z_{rk} – kritické zesílení regulátoru, $\text{V} \cdot \text{°C}^{-1}$,
 T_k – perioda kritických kmitů, s,
 r_0 – zesílení regulátoru, $\text{V} \cdot \text{°C}^{-1}$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

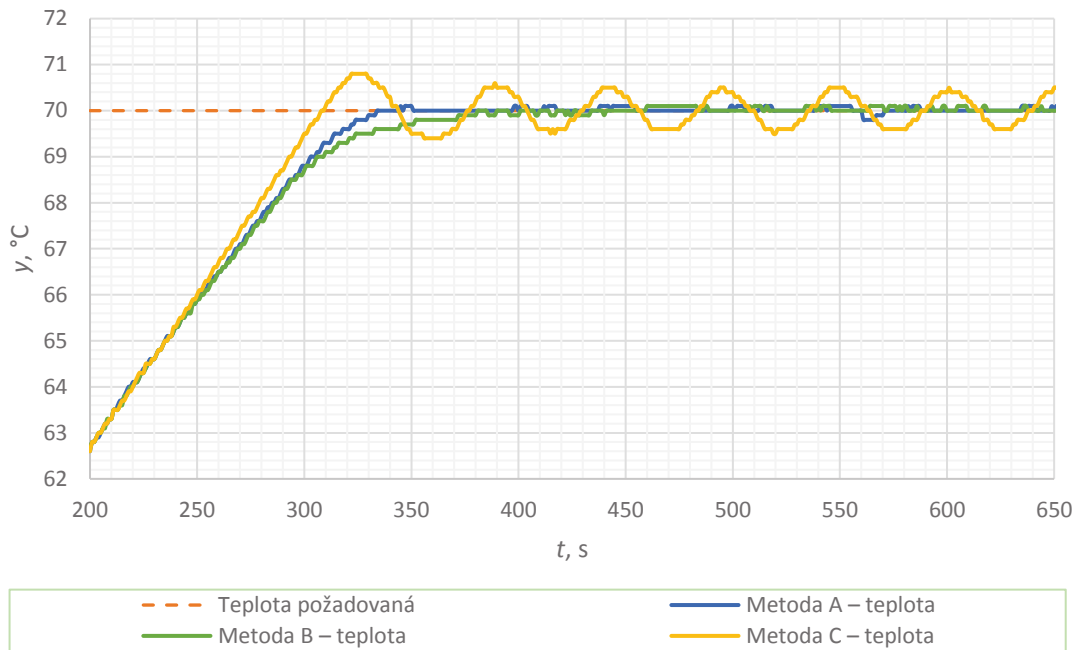
Z výsledků obou metod identifikace je možné konstatovat, že jsou nalezené hodnoty parametrů regulátoru podobné. Lze tedy předpokládat správnost provedeného měření.

6.2 TESTOVÁNÍ REGULÁTORU V OBVODU

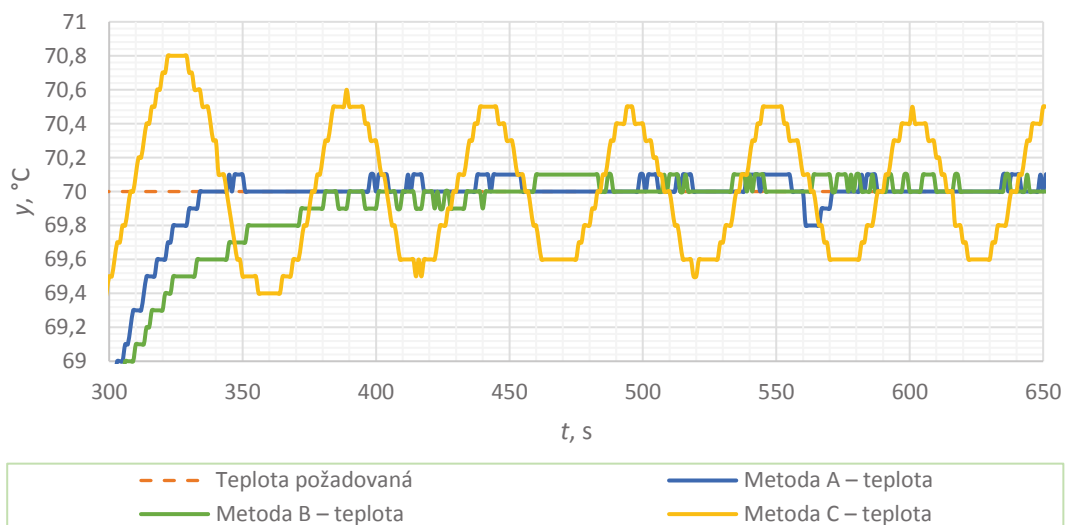
Účelem testu je ověření, zda nalezené parametry regulátoru zajistí očekávaný průběh regulace v reálném provozu.

Měření je provedeno tak, že z ustáleného stavu se požadavek na teplotu skokově změní na hodnotu 60 °C a bude sledována přechodová charakteristika měřené teploty a kvalita regulace (především schopnost ustálení na požadované teplotě). Celkem budou provedena 3 měření – první měření s parametry získanými z identifikace přechodovou charakteristikou (A), druhé měření s parametry regulátoru získanými z identifikace kritickým zesílením (B) a třetí měření regulátorem nastaveným do stavu dvupolohové regulace / relé (C) pro porovnání s PID regulací.

Z naměřených dat jsou vykresleny následující grafy. Do jednoho grafu jsou spojeny výsledky ze všech tří měření s hodnotami aktuálních naměřených teplot. Pro přehlednost je v grafech zobrazena přerušovanou čarou žádaná teplota.



Obr. 6.4 – Graf porovnání regulačních pochodů



Obr. 6.5 – Graf porovnání regulačních pochodů (výběr detailu ustálení teploty)

6.2.1 Výsledek testování

Z výše uvedených výsledků měření zanesených do grafů vyplývá, že oba typy identifikace (z přechodové charakteristiky a kritickým zesílením) poskytují při regulaci podobné výsledky.

Rozdíl v kvalitě regulace je možné pozorovat na dvupolohové regulaci („relé“). Teplota topného tělesa se nikdy neustálí, protože díky dynamickému chování soustavy bude stále docházet k přepínání stavů na výstupu regulátoru mezi krajními hodnotami (0 V a max. napětí) a tím i k pravidelným změnám teploty.

Z tohoto pohledu je možné považovat PID regulaci za kvalitnější.

6.3 PARAMETRY REGULÁTORU

Základní parametry regulátoru shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.5 – Parametry regulátoru

Napájecí napětí regulátoru	6,5 V ÷ 12 V
Napájecí napětí topného tělesa	Max. 24 V (podle varianty tiskové podložky)
Maximální přípustný proud topného tělesa	10 A
Digitální čidlo	DS18B20, třívodičové zapojení
Rozsah měření teploty	0 °C ÷ 125 °C (rozlišení 0,1 °C)
Rozsah nastavení požadované teploty	0 °C ÷ 125 °C (rozlišení 1 °C)
Typy regulací	P, PID, dvupolohová, ruční
Rozsah nastavení Z_r	0 ÷ 999,9 V·°C ⁻¹ (rozlišení 0,1 V·°C ⁻¹)
Rozsah nastavení T_i	0,1 ÷ 999,9 s (rozlišení 0,1 s)
Rozsah nastavení T_d	0 ÷ 999,9 s (rozlišení 0,1 s)
Rozsah nastavení maximálního výstupu reg.	0 ÷ 25 V (rozlišení 0,1 V)
Rozsah nastavení hystereze	0,1 °C ÷ 9,9 °C (rozlišení 0,1 °C)
Rozsah nastavení vzorkovací periody reg.	1 s ÷ 100 s (rozlišení 1 s)
Maximální počet znaků názvu profilu	6 znaků
Rozhraní	USB 2.0

7 ZÁVĚR

Kvalitní regulace teploty tiskové podložky svým dílem přispívá ke zvýšení kvality výsledných výrobků tištěných na 3D tiskárnách.

V průběhu návrhu programového vybavení bylo z důvodu nekorektního chování regulace potřeba upravit algoritmus řízení PSD regulace. Obecný algoritmus číslicového PID regulátoru byl modifikován, aby se efektivně zabránilo projevování wind-up efektu sumační složky, a přitom nedošlo k ovlivnění správné funkce regulace.

Praktickým testováním obvodů a prováděním měření bylo ověřeno, že navržený regulátor vykonává svou činnost podle teoretických předpokladů.

V závěru testování bylo provedeno měření a analýza regulačních pochodů dvou metod identifikace soustavy a dvou typů regulací. Z výsledků měření vyplývá, že oba typy identifikace (z přechodové charakteristiky a kritickým zesílením) poskytují při regulaci velmi podobné výsledky. Na testech byla také potvrzena předpokládaná nižší kvalita regulace dvoupolohové regulace (relé) oproti regulaci PID.

Očekávaným přínosem pro uživatele je pomocná aplikace pro PC umožňující lepší přehlednost o aktuálním stavu regulace, možnost exportu naměřených dat do souboru i pozdější zpětné vyhodnocování regulace. S uvedením zařízení do provozu a jeho následným používáním pro zájmové využití může potenciálním uživatelům pomoci uživatelská příručka a jednoduché ovládání regulátoru.

Případný další vývoj regulátoru by mohl směřovat k vytvoření algoritmu automatické identifikace soustavy a automatického nastavení parametrů regulátoru, pro zvýšení uživatelského komfortu při nastavení regulátoru.

POUŽITÁ LITERATURA

- 3dtiskárny [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info>
- ADEON CZ S.R.O., 2017. *Inventor 3D blog* [online] [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/>
- AND-TECH. *EvB 5.1: Uživatelská příručka* [online]. v5. 34 s. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://and-tech.pl/wp-content/uploads/downloads/2013/10/Instrukcja-EvB5.1-v1-cze.pdf>
- ATMEL CORPORATION, 2011. *ATmega32L: 8-bit AVR Microcontroller with 32KBytes In-System Programmable Flash* [online]. San Jose (USA), 346 s. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2503.pdf>
- BALÁTĚ, J., 2003. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura, 235 s.. ISBN 80-7300-020-2.
- DOMAT CONTROL SYSTEM, 2013. Domat Control System. *PWM signál a práce s ním* [online] [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://domat-int.com/produkty/online-navody/pwm-signal>
- FTDI, 2015. *FT232R USB UART IC* [Dokument PDF]. version 2.13. Glasgow (United Kingdom), 47 s. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232R.htm>
- INTERNATIONAL RECTIFIER, 2003. *IRFZ34NPbF: HEXFET® Power MOSFET* [online]. PD-94807. El Segundo (California, USA), 9 s. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ34N-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462584d1d4a0158740e51e32b82
- KUNDERA, R., 2008. *Řízení systémů při omezení akčních veličin*. Zlín. Diplomové práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav řízení procesů. 69 s. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/5099>
- MALÝ, M., 2014. *Sběrnice 1-Wire™. Vývoj.HW.cz* [online]. 17. 11. 2014 [cit. 2017-03-01]. ISSN 1803-6392
- MAXIM INTEGRATED, 2008. *DS18B20 – Programmable Resolution – 1-Wire Digital Thermometer* [online]. San Jose (USA), 22 s. [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- NOVÁ MÉDIA, S. R. O., 2014. *3D-tisk* [online] [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/>
- Rotary Encoder RE24* [online]. 1 s. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.532-089.1.pdf>
- SEMICONDUCTOR COMPONENTS INDUSTRIES, 2009. *MC34063A, MC33063A, NCV33063A – 1.5 A, Step-Up/Down/Inverting Switching Regulators* [online]. rev. 21. Colorado (USA), 15 s. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC34063A-D.PDF>
- SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO.LTD, 2005. *Specification for LCD Module 1602A-1* [online]. v1.2, 12 s. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <https://www.openhacks.com/uploadsproductos/eone-1602a1.pdf>

- SIRAN 3D EVOLUTION S.R.O., 2017. Vyhřívaná podložka MK2a 300x200mm pro 3D tisk. *Vše pro 3D tisk* [online].2017. Dostupné také z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/p/vyhrivana-tiskova-podlozka-mk2b-200x210mm>
- ŠČEVÍK, P. Číslicová regulace. *Katedra automatizační techniky a řízení, Fakulta strojní* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/>
- TOSHIBA, 2004. *TLP250: Transistor Inverter* [2017], 8 s. [cit. 6-01-online]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=16821&prodName=TLP250>
- UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. *Řízení technologických procesů* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://rtp.webzdarma.cz/>
- VÁŇA, V., 2004. *ATMEL AVR: Programování v jazyce Bascom*. Praha 10: BEN - technická literatura, 237 s.. ISBN 80-7300-115-2.

PŘÍLOHY

A – CD

B – Uživatelský návod

Příloha k bakalářské práci

Číslicový regulátor teploty tiskové podložky 3D tiskárny

Petr Havel

CD

OBSAH

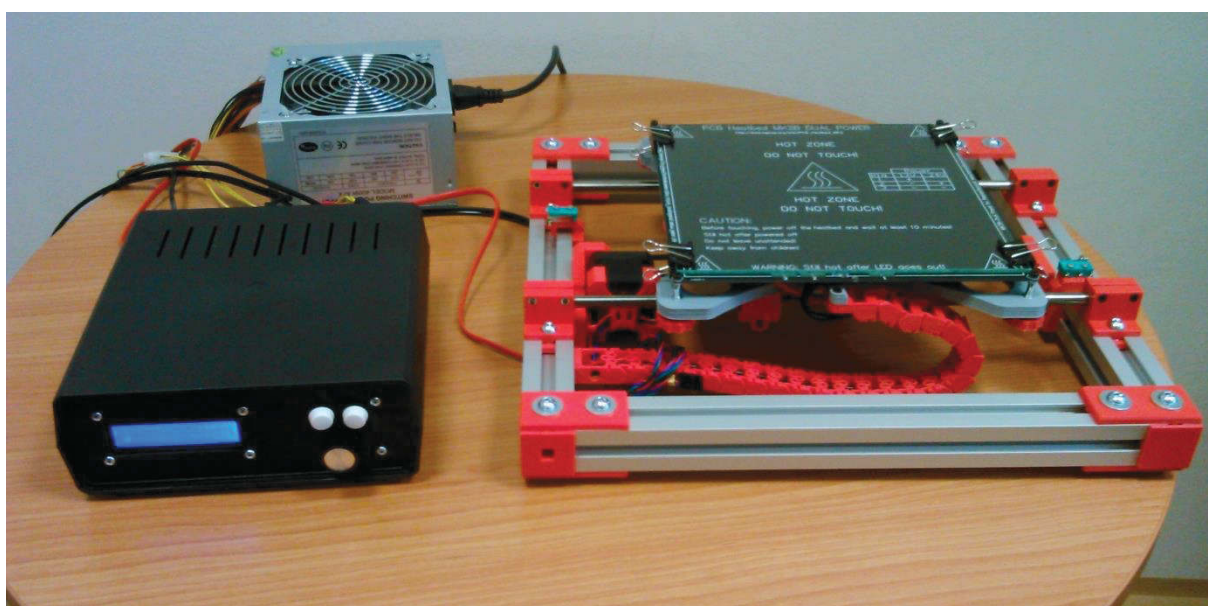
- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF
- 2 Úplné zdrojové kódy aplikace mikropočítače (Bascom) a aplikace pro PC (C# .NET)
- 3 Technická dokumentace zařízení: schémata zapojení, výkresy plošných spojů (Eagle)
- 4 Data z měření (tabulky, grafy)
- 5 Fotodokumentace zařízení

Příloha k bakalářské práci

Číslicový regulátor teploty tiskové podložky 3D tiskárny

Petr Havel

**UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA PROGRAMU
OVLÁDÁNÍ REGULÁTORU**



OBSAH

	Seznam ilustrací	B – 3
	Seznam tabulek	B – 4
0	ÚVOD	B – 5
1	ZAPOJENÍ A ZPROVOZNĚNÍ	B – 6
2	POPIS OBSLUHY	B – 7
2.1	Úvodní obrazovka	B – 7
2.2	Pohyb v menu	B – 8
3	NASTAVENÍ	B – 9
3.1	Provoz	B – 9
3.2	Profily	B – 9
3.3	Regulátor	B – 9
3.4	Zařízení	B – 10
4	APLIKACE PRO PC	B – 11
4.1	Připojení zařízení k PC	B – 11
4.2	Obsluha	B – 11
4.3	Ovládání regulátoru	B – 13
4.4	Export dat	B – 15
5	PARAMETRY REGULÁTORU	B – 16

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 2.1 – Displej (hlavní obrazovka)	B – 7
Obr. 2.2 – Položky v menu (náhled)	B – 8
Obr. 4.1 – Hlavní okno aplikace	B – 11
Obr. 4.2 – Okno nastavení komunikace.....	B – 12
Obr. 4.3 – Aplikace v provozu.....	B – 12
Obr. 4.4 – Nastavení zařízení v aplikaci	B – 13
Obr. 4.5 – Grafy v aplikaci	B – 14
Obr. 4.6 – Tabulka dat v aplikaci.....	B – 14

SEZNAM TABULEK

Tab. 0.1 – Doporučené teploty tiskové podložky	B – 5
Tab. 2.1 – Chybové stavy čidla.....	B – 7
Tab. 2.2 – Ovládání.....	B – 8
Tab. 5.1 – Parametry regulátoru	B – 16

0 ÚVOD

Zařízení je navrženo pro regulaci teploty tiskové podložky 3D tiskárny. Před prvním použitím je doporučeno prostudovat tento návod k použití.

V návodu je uvedeno zapojení a zprovoznění zařízení, jeho ovládání, propojení s osobním počítačem a ovládání obslužné aplikace.

Součástí regulátoru je toto příslušenství:

- teplotní čidlo DS18B20,
- zdroj stejnosměrného napájecího napětí 12 V,
- propojovací kabel USB.

Výstupní napájecí napětí ohřevu tělesa je regulováno pulsně-šířkovou modulací (PWM). Rozsah je od 0 V do výstupního napětí napájecího zdroje ohřevu.

Veškerá nastavení jsou ukládána do dlouhodobé paměti pro uchování nastavení i po vypnutí napájení zařízení.

Zařízení umožňuje uložit šest požadovaných teplot s vlastním názvem každého profilu. Tato funkce se hodí především pro uložení požadovaných teplot pro různé tiskové materiály. V následující tabulce jsou uvedeny doporučené teploty tiskové podložky.

Tab. 0.1 – Doporučené teploty tiskové podložky

Tiskový materiál	Teplota podložky
PLA	50 °C
ABS	85 °C
HIPS	85 °C
PVA	40 °C
Flex	40 °C
Elastic	40 °C
PETG (T-Glase)	70 °C
Laywood	40 °C
Laybrick	40 °C
Nylon (PA6)	115 °C
Polykarbonát (PC)	120 °C

1 ZAPOJENÍ A ZPROVOZNĚNÍ

Zařízení umístěte v blízkosti 3D tiskárny, jejíž ohřev tiskové podložky požadujete regulovat.

Na střed spodní strany vyhřívané podložky připevněte teplotní čidlo tak, aby se čidlo této podložky přímo dotýkalo a docházelo tak ke správnému předání tepla. Čidlo připojte do konektoru „TEPLOMĚR“. Oba póly topného tělesa připojte pomocí banánkových konektorů do zdířek „TOPNÉ TĚLESO“. Do zdířek „ZDROJ NAPÁJENÍ TOPNÉHO TĚLESA“ zapojte vhodný stejnosměrný zdroj napájecího napětí pro topné těleso vyhřívané podložky, jehož výstupní napětí nepřesahuje 12 V. Na závěr připojte napájecí adaptér zařízení do zdířky „NAPÁJENÍ“ a zapojte adaptér do zásuvky 230 V.

V případě, že je zařízení správně zapojeno a nedošlo k jinému problému, dojde ke spuštění zařízení. Na krátkou dobu se na displeji rozsvítí všechny body a poté se zobrazí úvodní text. Následně se zobrazí hlavní obrazovka.

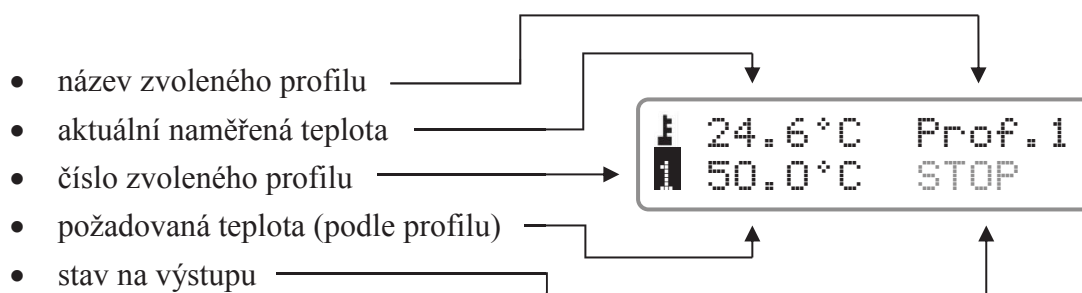
2 POPIS OBSLUHY

Na ovládacím panelu jsou umístěna tlačítka „MENU“ a „ZPĚT“, otočný knoflík (inkrementální spínač) a zobrazovací displej.

2.1 ÚVODNÍ OBRAZOVKA

Po spuštění zařízení se zobrazí hlavní obrazovka. Jsou na ní zobrazeny základní provozní údaje.

Popis údajů na hlavní obrazovce:



Obr. 2.1 – Displej (hlavní obrazovka)

Stav na výstupu je indikován hodnotou v procentech (relativně) nebo ve voltech (matematický výpočet) v závislosti na nastavení regulátoru. V případě, že je regulace ručně vypnuta nebo došlo k chybovému stavu, bude stav na výstupu indikován blikajícím „STOP“.

Volbu aktuálního teplotního profilu provedete otáčením knoflíku. Změna požadované teploty se provede okamžitě. Zároveň dojde k uložení volby do dlouhodobé paměti.

Při provozu mohou nastat chybové stavy teplotního čidla, které jsou indikovány na místě jinak zobrazené aktuální teploty. V případě chyby je vypnut ohřev (napětí na výstupu je nulové). Mohou nastat tyto stavy:

Tab. 2.1 – Chybové stavy čidla

Stav	Význam
ERR!	Chyba zapojení teplotního čidla nebo vadné čidlo.
MIN! / MAX!	Byla překročena hranice minimální/maximální teploty; čidlo je špatně zapojené nebo vadné.
[--]	Probíhá první detekce/výpočet teploty.

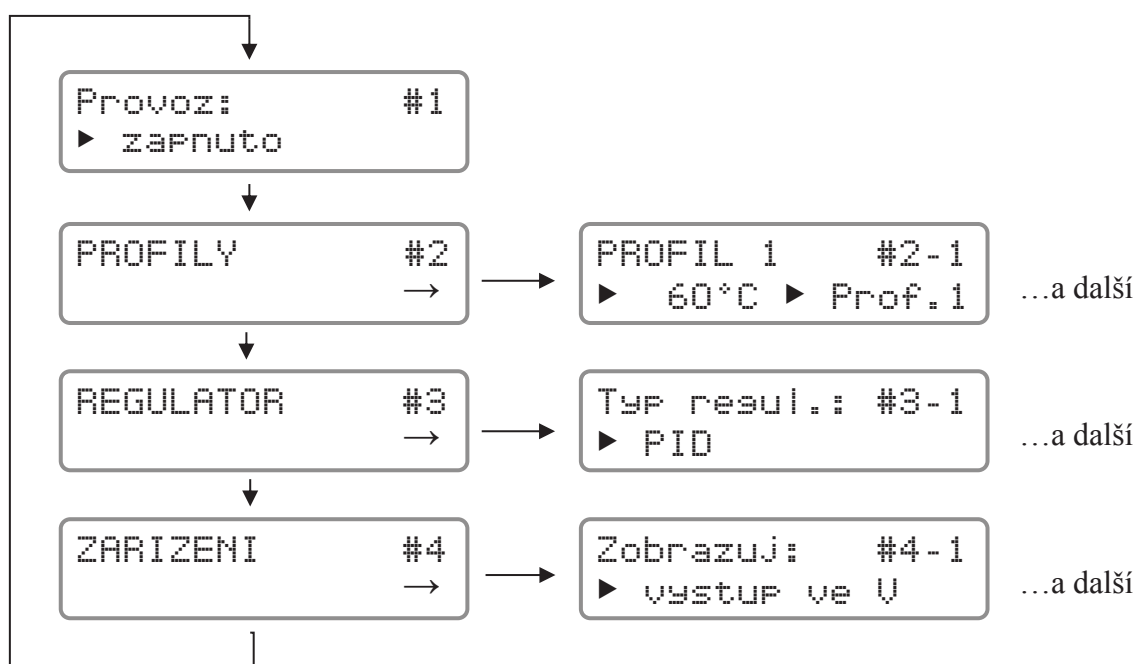
2.2 POHYB V MENU

Do menu se dostanete stiskem tl. „MENU“. Pohyb v menu (výběr položky) se provádí otáčením knoflíku. Chcete-li změnit hodnotu vybrané položky, stiskněte opět „MENU“ a hodnota začne blikat. Změnu hodnoty provedete otáčením knoflíku – v případě číselné hodnoty točením doleva hodnotu snižujete a doprava zvyšujete. Tlačítkem „ZPĚT“ hodnotu uložíte do dlouhodobé paměti a vrátíte se na výběr položek menu. Dále můžete provádět úpravu hodnot dalších položek nebo menu opustit tlačítkem „ZPĚT“ a vrátit se zpět na hlavní obrazovku. Shrnutí ovládání je uvedeno v tabulce:

Tab. 2.2 – Ovládání

Tlačítko	Akce
MENU	– vstup do menu – výběr položky pro změnu hodnoty
ZPĚT	– uložení hodnoty a návrat na výběr položky – opuštění menu
Otočný knoflík	– změna profilu – pohyb v menu – změna hodnoty

Položky v menu (v každém podmenu zobrazena pouze první položka):



Obr. 2.2 – Položky v menu (náhled)

3 NASTAVENÍ

V menu lze upravovat jednotlivá nastavení zařízení. Změny jsou ukládány do dlouhodobé paměti, aby bylo možné pokračovat v provozu se stejnými parametry i po znovuzapnutí napájení.

Následuje popis jednotlivých parametrů.

3.1 PROVOZ

#1 Provoz – zapnutí a vypnutí provozu regulace. Při vypnuté regulaci je výstupní napětí 0 V. Vhodné pro nastavování zařízení, aniž by docházelo k ovlivňování výstupu.

3.2 PROFILY

#2-1 až #2-6 – umožňuje přednastavit 6 požadovaných teplot a tyto teplotní profily jednotlivě pojmenovat pro snadnější orientaci. V každém profilu se nastavuje teplota a název profilu skládající se ze 6 znaků. Posun kurzoru mezi teplotou a jednotlivými znaky názvu se provádí tlačítkem „MENU“.

3.3 REGULÁTOR

#3-1 Typ regulace – umožňuje zvolit způsob regulace. Výchozí hodnotou je proporcionální regulace (P). Na výběr je také PID regulace, dvoupolohová regulace (relé), či manuální nastavení výstupního napětí.

Při volbě manuálního režimu je regulace vypnuta a výstupní napětí se nastavuje otočným knoflíkem při zobrazení hlavní obrazovky. Poznámka: Nastavená hodnota se v případě manuálního režimu neukládá do dlouhodobé paměti!

#3-2 Zesílení – volba proporcionální složky regulace. Využito při P a PID regulaci.

#3-3 Ti – volba integrační složky regulace. Využito při PID regulaci.

#3-4 Td – volba derivační složky regulace. Využito při PID regulaci.

#3-5 Hystereze – nastavení teplotní odchylky před přepnutím výstupu. Využito při dvoupolohové regulaci.

#3-6 Maximální výstup regulátoru – nastavení napětí na výstupu zdroje topného tělesa. V aplikaci se s touto hodnotou pracuje v algoritmu regulace a hodnota se využívá pro výpočet předpokládaného výstupního napětí regulátoru.

#3-7 Perioda – nastavení vzorkovací periody běhu algoritmu číslicového regulátoru.

3.4 ZAŘÍZENÍ

#4-1 Zobrazit výstup – volba zobrazované veličiny na hlavní obrazovce buď ve voltech nebo v procentech.

#4-2 Komunikace – zapnutí/vypnutí komunikace s obslužnou aplikací (zápis a příjem dat) po sběrnici USB. Podrobně ve 4. kapitole.

#4-3 RESET – tovární nastavení. V případě provedení resetu se nastaví všechny parametry zařízení do výchozích hodnot.

4 APLIKACE PRO PC

Aplikace je určena pro běh na osobním počítači s operačním systémem Microsoft Windows (testováno na verzi Windows 8.1).

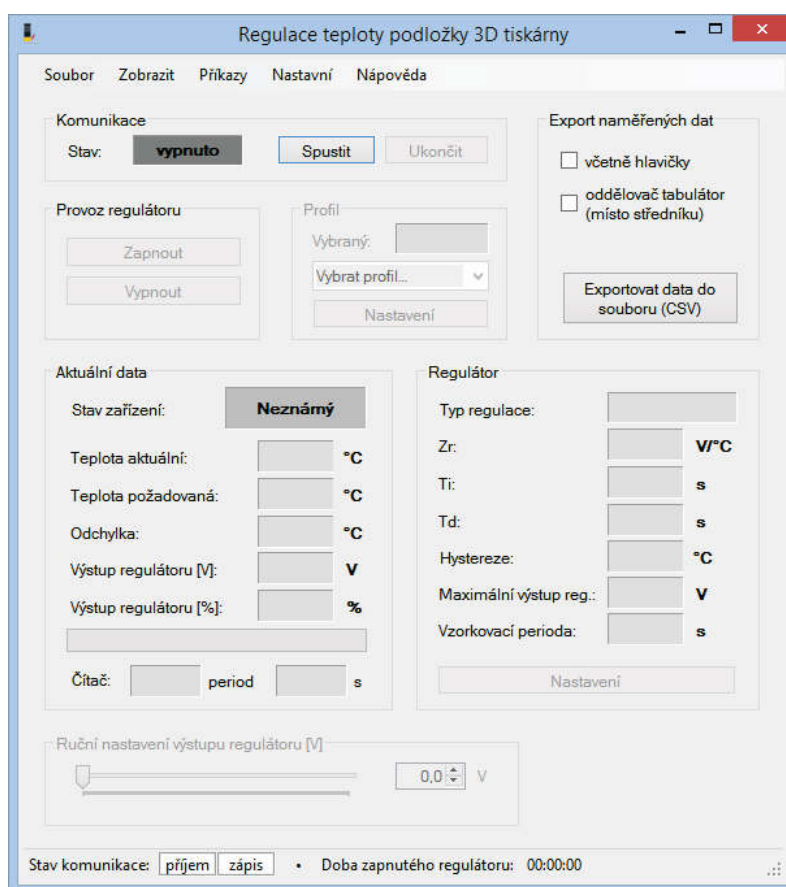
Aplikace zajišťuje přehlednější zobrazení veličin a stavů, nabízí jednodušší editaci parametrů, umožňuje zobrazit grafy a tabulky hodnot nebo export dat do souboru.

4.1 PŘIPOJENÍ ZAŘÍZENÍ K PC

Nejprve zapněte napájení zařízení (viz kapitola 1) a v menu zařízení povolte komunikaci po sběrnici USB (viz oddíl 3.4), pokud tak již nebylo učiněno dříve. Poté propojte zařízení s počítačem pomocí kabelu USB.

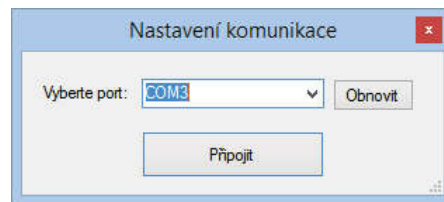
4.2 OBSLUHA

Po spuštění se zobrazí hlavní okno aplikace.



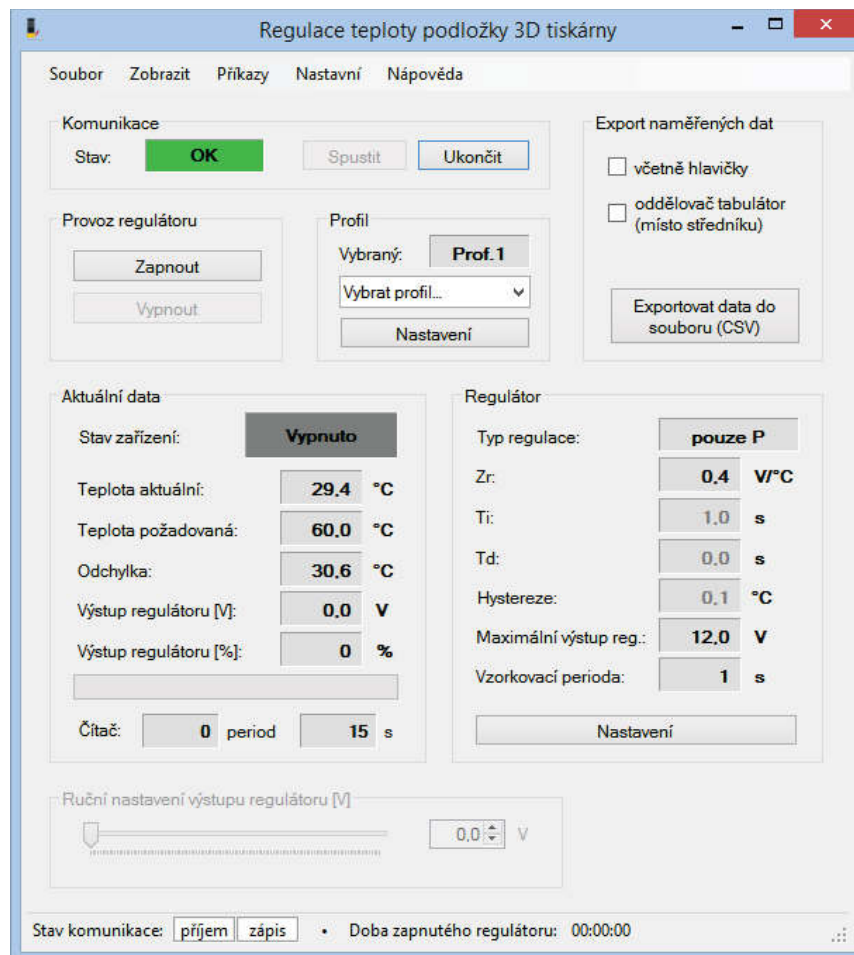
Obr. 4.1 – Hlavní okno aplikace

Tlačítkem „Spustit“ zobrazíte rozbalovací nabídku s výběrem virtuálního sériového portu, na kterém probíhá komunikace se zařízením. Tlačítkem „Připojit“ dojde k pokusu o navázání spojení a spuštění komunikace se zařízením.



Obr. 4.2 – Okno nastavení komunikace

Pokud nenastane žádný problém, změní se stav komunikace na „OK“ a textová pole se naplní aktuálními daty.

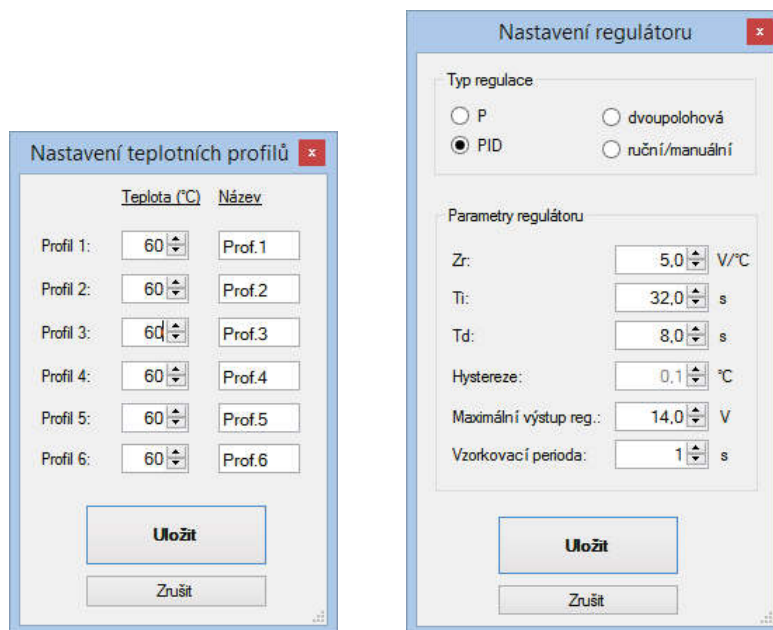


Obr. 4.3 – Aplikace v provozu

4.3 OVLÁDÁNÍ REGULÁTORU

Významy jednotlivých nastavení jsou stejné jako v případě nastavení přes menu zařízení, viz kapitola 3.

Změna teplotních profilů a změna parametrů regulátoru se provádí ve speciálním okně, které se otevře kliknutím na tl. „Nastavení“ příslušné sekce. Nastavení je blokováno v případě, že je v zařízení otevřeno menu (není zobrazena hlavní obrazovka).

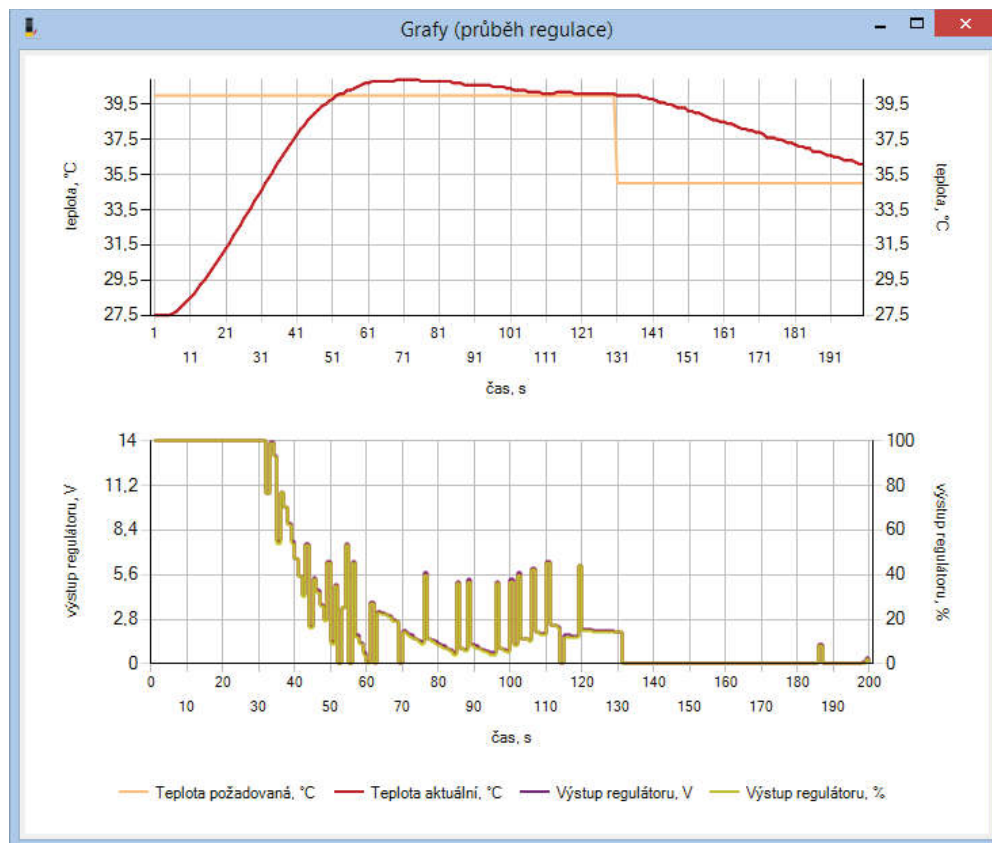


Obr. 4.4 – Nastavení zařízení v aplikaci

Další možnosti se nachází v liště pod tlačítky „Příkazy“ a „Nastavení“. Tlačítko „Vzdálený restart“ provede restart zařízení a tl. „Ruční aktualizace dat“ provede žádost o zaslání všech údajů ze zařízení do počítače.

Přes hlavní nabídku tlačítkem „Zobrazit“ je možné zobrazit nové okno s grafem průběhu regulace nebo tabulku dat. V grafu jsou vykreslovány hodnoty aktuální a požadované teploty, odděleně pak výstup regulátoru uváděný ve voltech a procentech (obr. 4.5). Tabulka zobrazuje přehledně všechna naměřená data z regulátoru (obr. 4.6). Jednotlivé řádky, sloupce nebo buňky tabulky lze hromadně označit a data z nich zkopírovat do schránky pro použití v jiné aplikaci.

Graf/tabulka je aktivní pouze dokud je regulace v provozu. Po každém zapnutí provozu regulace dojde ke smazání předchozích dat.



Obr. 4.5 – Grafy v aplikaci

Tabulka dat

Čas [s]	Teplota aktuální [°C]	Teplota požadovaná [°C]	Výstup reg. [V]	Výstup reg. [%]	PWM střída
28	31.0	35.0	7.3	52	0.52
29	31.0	35.0	7.3	52	0.52
29	31.3	35.0	10.4	74	0.74
30	31.6	35.0	9.4	67	0.67
31	31.8	35.0	12.9	92	0.92
32	32.1	35.0	7.8	55	0.55
33	32.5	35.0	2.2	15	0.15
34	32.7	35.0	9.6	68	0.68
35	33.0	35.0	4.4	31	0.31
36	33.3	35.0	3.2	22	0.22
37	33.6	35.0	1.9	13	0.13
38	33.8	35.0	5.1	36	0.36
39	34.0	35.0	4.2	29	0.29
40	34.3	35.0	0.0	0	0.00
41	34.4	35.0	6.4	45	0.45
42	34.6	35.0	1.5	10	0.10
43	34.8	35.0	0.5	3	0.03
44	34.9	35.0	4.0	28	0.28
45	35.0	35.0	3.5	25	0.25
46	35.1	35.0	3.0	21	0.21
47	35.3	35.0	0.0	0	0.00
48	35.4	35.0	1.5	10	0.10
49	35.5	35.0	0.9	6	0.06

Obr. 4.6 – Tabulka dat v aplikaci

4.4 EXPORT DAT

Naměřená data se ukládají a je možné je exportovat do souboru s formátem CSV. Před exportem je možné povolit výpis hlavičky na první řádek v tabulce nebo změnit oddělovač záznamů (středník nebo tabulátor).

Tlačítkem „Exportovat data“ se vyexportují data od posledního zapnutí provozu regulátoru, protože po každém zapnutí dochází ke smazání předchozích dat.

Výsledný soubor CSV je možné importovat do aplikace Excel („Data“ → „Načíst externí data z textu“) či jiného tabulkového procesoru.

5 PARAMETRY REGULÁTORU

Základní parametry regulátoru shrnuje následující tabulka.

Tab. 5.1 – Parametry regulátoru

Napájecí napětí regulátoru	6,5 V ÷ 12 V
Napájecí napětí topného tělesa	Max. 24 V (podle varianty tiskové podložky)
Maximální přípustný proud topného tělesa	10 A
Digitální čidlo	DS18B20, třívodičové zapojení
Rozsah měření teploty	0 °C ÷ 125 °C (rozlišení 0,1 °C)
Rozsah nastavení požadované teploty	0 °C ÷ 125 °C (rozlišení 1 °C)
Typy regulací	P, PID, dvoupolohová, ruční
Rozsah nastavení Z_r	0 ÷ 999,9 V·°C ⁻¹ (rozlišení 0,1 V·°C ⁻¹)
Rozsah nastavení T_i	0,1 ÷ 999,9 s (rozlišení 0,1 s)
Rozsah nastavení T_d	0 ÷ 999,9 s (rozlišení 0,1 s)
Rozsah nastavení maximálního výstupu reg.	0 ÷ 25 V (rozlišení 0,1 V)
Rozsah nastavení hystereze	0,1 °C ÷ 9,9 °C (rozlišení 0,1 °C)
Rozsah nastavení vzorkovací periody reg.	1 s ÷ 100 s (rozlišení 1 s)
Maximální počet znaků názvu profilu	6 znaků
Rozhraní	USB 2.0