

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

ČÍSLICOVÝ REGULÁTOR

Pavel Prokop

Bakalářská práce
2019

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Prokop**
Osobní číslo: **I16058**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Číslicový regulátor**
Zadávající 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. Základem regulátoru bude mikropočítač řady ATmega a dotykový display, určený k realizaci HMI. Regulátor bude disponovat obvyklými funkcemi komerčně vyráběných zařízení. V úvodu práce bude provedena rešerše tématu, se zaměřením na zpracovávané téma. Pro potřeby měření a ovládání vybraných technologických veličin budou navrženy a realizovány příslušné elektronické, vstupně-výstupní obvody. Jedná se o obvody pro připojení vybraných typů snímačů teploty (termistoru, odporového snímače teploty a elektronického senzoru teploty - například DS18B20). Regulátor bude umožňovat práci jak v režimu automatické regulace (například dvoustavový a PSD regulátor), ručního řízení a monitorování stavu regulovaného procesu. Navržený regulátor bude umožňovat záznam a vizualizaci průběhu regulačních pochodů. Součástí práce bude kompletní výrobní dokumentace elektronického regulátoru, okomentované zdrojové kódy realizovaného software a přehledný uživatelský návod k obsluze regulátoru.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 40

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

MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Havlíček, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: 14. prosince 2018

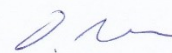
Termín odevzdání bakalářské práce: 10. května 2019



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. prosince 2018

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 10. 5. 2019

Pavel Prokop

Poděkování

Velmi děkuji Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za technickou a pedagogickou pomoc v celém průběhu zpracovávání mé bakalářské práce.

V Pardubicích dne 10. 5. 2019

Pavel Prokop

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá návrhem číslicového regulátoru pomocí mikroprocesoru řady ATmega, pro řízení teploty tiskové podložky 3D tiskárny. Srdcem celého regulátoru je mikroprocesor ATmega 2560 na vývojové platformě Arduino. Vizualizace a ovládání regulátoru probíhá pomocí dotykového displeje Nextion. Pro získání údaje o teplotě slouží digitální teplotní čidlo DS18B20, platinový odporový snímač teploty Pt100 a termistor. Pro záznam dat regulace je vytvořena aplikace na PC, se kterou mikroprocesor komunikuje po sériové lince. Největší důraz v práci je kladen na vývoj programové části regulátoru a jeho vizualizaci. Součástí je deska plošných spojů obsahující vstupně výstupní obvody. Software pro regulátor je napsán v jazyku C++ za pomoci knihovny Wiring. Program pro PC zajišťující záznam dat je napsán v jazyku C#.

KLÍČOVÁ SLOVA

regulátor, ATmega2560, Arduino, Nextion, 3D tisk.

TITLE

DIGITAL CONTROLLER

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with digital controller design by microprocessor ATmega series, for temperature control of 3D printer pad. At the heart of the controller is the ATmega 2560 microprocessor on the Arduino development platform. The controller is controlled and visualized using the Nextion touch screen. To obtain a temperature data are used a digital temperature sensor DS18B20, platinum resistance sensor Pt100 and thermistor. For data recording, is created a PC application with which the microprocessor communicates over the serial line. The greatest emphasis is put on the development of the program part and visualization of the controller. It includes a printed circuit board containing input output circuits. The controller software is written in C ++ using the Wiring library. A data logging PC program is written in C #.

KEYWORDS

controller, ATmega2560, Arduino, Nextion, 3D print.

OBSAH

Seznam zkratk a značek	9
Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí	11
Seznam ilustrací	13
Seznam tabulek	15
ÚVOD	16
1 TEORETICKÁ ČÁST	17
1.1 3D tisk	17
1.2 Tisková podložka a její teplota	17
1.3 Komerčně vyráběné regulátory	18
1.4 Číslicová regulace	19
1.4.1 Dvoustavový regulátor	20
1.4.2 PSD regulátor	20
1.5 Komunikační protokoly	23
1.5.1 1-Wire	23
1.5.2 UART	24
1.5.3 SPI	26
2 VÝBĚR KOMPONENT	28
2.1 Platforma Arduino	29
2.1.1 Arduino Mega 2560	29
2.2 Dotykový displej Nextion	30
2.3 Napájení	31
2.3.1 Napájení obvodů Arduina	31
2.3.2 Napájení měřicích obvodů	33
2.4 Teplotní senzory a snímače	33
2.4.1 DS18B20	33
2.4.2 Pt100	35
2.4.3 NTC termistor	37
2.5 Výkonový výstup	40
3 REALIZACE HARDWARU	41
3.1 Napájecí obvod	41
3.2 Obvody pro měření teploty	42
3.2.1 DS18B20	42

3.2.2	NTC termistor	42
3.2.3	Pt100	43
3.3	Obvody výkonového výstupu	44
3.4	Návrh DPS	45
4	REALIZACE SOFTWARE	50
4.1	Program mikropočítače	50
4.1.1	Měření teploty	51
4.1.2	Regulace	52
4.1.3	Nastavení regulátoru	54
4.2	Dotykový displej	55
4.2.1	Uživatelské rozhraní	55
4.2.2	Komunikace s mikropočítačem	56
4.3	Export dat do PC	59
4.3.1	Uživatelské rozhraní	59
4.3.2	Komunikační protokol	60
4.3.3	Hlavní program	60
4.4	Kalibrace teplotních snímačů	61
5	OVĚŘENÍ FUNKCE	63
5.1	Identifikace soustavy	63
5.1.1	Metoda kritického zesílení	63
5.1.2	Metoda přechodové charakteristiky	65
5.2	Regulační pochody	68
6	ZÁVĚR	70
	POUŽITÁ LITERATURA	71
	PŘÍLOHY	73

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

A/Č	analogově-číslicový
A/D	analogově-digitální
CLK	hodinový signál
COM	sériové rozhraní
CS	adresovací linka
Č/A	číslicově-analogový
DPS	deska plošných spojů
EEPROM	elektricky mazatelná paměť typu ROM-RAM
FLASH	elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem
GND	uzemnění
HMI	rozhraní mezi člověkem a strojem
HW	fyzické vybavení počítače
ID	identifikační číslo
IDE	programové vybavení pro vývojáře
LCD	displej z kapalných krystalů
LED	dióda emitující světlo
MISO	master vstup, slave výstup
MOSFET	polem řízený tranzistor
MOSI	master výstup, slave vstup
P	proporcionální (regulátor)
PC	osobní počítač
PD	proporcionálně derivační (regulátor)
PI	proporcionálně integrační (regulátor)
PID	proporcionálně integračně derivační (regulátor)
PSD	proporcionálně sumačně diferenční (regulátor)
PWM	pulzně šířková modulace
ROM	paměť pouze pro čtení
RTU	vzdálená komunikační jednotka
Rx	vysílání dat
SCLK	hodinový signál
SD	paměťová karta
SPI	sériové periferní rozhraní

SRAM	statická paměť pro čtení nebo zápis
TCP	základní protokol sady protokolů na internetu
I2C	dvouvodičové rozhraní
Tx	příjem dat
UART	univerzální asynchronní přijímač / vysílač (sériové rozhraní)
μP	mikroprocesor
USART	univerzální synchronní / asynchronní přijímač / vysílač (sériové rozhraní)
USB	univerzální sériová sběrnice

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

α	amplituda výstupní veličiny, °C
τ	časová konstanta soustavy, s
$\Delta\theta$	změna teploty, °C
e	regulační odchylka, °C
I_Z	pracovní proud napěťové reference, A
I_{REF}	proud protékající platinovým snímačem, A
I_{LED}	doporučený proud LED, A
I_{OPT}	doporučený proud diodou optočlenu, A
k	poměrný diskrétní čas
kT	diskrétní čas, s
M	akční zásah relé, V
r_0	zesílení regulátoru, V·°C ⁻¹
r_{0k}	kritické zesílení regulátoru, V·°C ⁻¹
R_{θ}	změna elektrického odporu, Ω
R_{PT}	odpor platinového snímače při teplotě 0 °C, Ω
R_{T1}	odpor termistoru při teplotě T_1 , Ω ,
R_{TERM}	odpor termistoru, Ω
t	spojitý čas, s
T	vzorkovací perioda, s
T_{0k}	kritická perioda, s
T_1	teplota, K
T_C	teplota, °C
T_D	derivační časová konstanta, s
T_I	integrační časová konstanta, s
T_n	doba náběhu, s
T_u	doba průtahu, s
u	spojitá akční veličina, V
$u(kT)$	diskrétní akční veličina, V
U_{IN}	napájecí napětí soustavy, V
U_{LED}	úbytek napětí na LED, V
U_{NAP}	napájecí napětí, V
U_{OPT}	úbytek napětí na diodě optočlenu, V

U_{OUT}	výstupní napětí napěťového děliče, V
U_{REF}	referenční napětí, V
$u_{\text{T}}(t)$	tvarovaná akční veličina
$v(t)$	poruchová veličina
$w(kT)$	žádaná veličina
$y(t)$	regulovaná (výstupní) veličina
Z_s	zesílení soustavy, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{V}^{-1}$

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Schéma číslicového regulačního obvodu (Vítečková & Ščevík, 2008)	19
Obr. 1.2 – Průběh resetovacího slotu (Malý, 2004)	23
Obr. 1.3 – Průběh vysílání dat (Malý, 2004)	24
Obr. 1.4 – Průběh přijímání dat (Malý, 2004)	24
Obr. 1.5 – Příklad synchronní a asynchronní komunikace (Electronic Note, nedatováno)	25
Obr. 1.6 – Ukázka asynchronního přenosu (Novozámský, 2008)	25
Obr. 1.7 – Ukázka zapojení sběrnice SPI (Dudka, 2016)	26
Obr. 2.1 – Blokové schéma regulátoru	28
Obr. 2.2 – Arduino Mega 2560 (Voda, 2017)	30
Obr. 2.3 – Prostředí grafického editoru (Itead.cc, 2016)	31
Obr. 2.4 – Napájecí obvod Arduina (Svoboda, 2018)	32
Obr. 2.5 – Rozložení vývodů napěťové reference (Texas Instruments, 2019)	33
Obr. 2.6 – Příklad dvou- a třívodičového zapojení	34
Obr. 2.7 – Závislost odporu Pt100 na teplotě (Špringl, 2004)	36
Obr. 2.8 – Schéma měřicího obvodu pro Pt100 (Microchip Technology Inc., 2008)	37
Obr. 2.9 – Grafické porovnání odporových snímačů teploty (Špringl, 2004)	39
Obr. 2.10 – Schéma zapojení měřicího obvodu termistoru	39
Obr. 3.1 – Schéma zapojení napěťové reference	41
Obr. 3.2 – Schéma zapojení teplotního čidla DS18B20	42
Obr. 3.3 – Schéma zapojení termistoru	42
Obr. 3.4 – Schéma zapojení měřicího obvodu Pt100	43
Obr. 3.5 – Schéma zapojení výkonové části	44
Obr. 3.6 – Schéma rozložení pinů a svorkovnic na shieldu	46
Obr. 3.7 – Schéma zapojení shieldu	47
Obr. 3.8 – Rozmístění součástek shieldu (osazovací plán)	48
Obr. 3.9 – DPS shieldu	48
Obr. 3.10 – DPS shieldu (vylitý polygon)	49
Obr. 3.11 – Osazená deska shieldu	49
Obr. 4.1 – Vývojový diagram hlavního programu	51
Obr. 4.2 – Vývojový diagram měření teploty	52
Obr. 4.3 – Vývojový diagram regulace	53
Obr. 4.4 – Vývojový diagram nastavovacího režimu regulátoru	54

Obr. 4.5 – První strana uživatelského rozhraní.....	55
Obr. 4.6 – Druhá strana uživatelského rozhraní	56
Obr. 4.7 – Vývojový diagram příjmu dat z displeje	58
Obr. 4.8 – Hlavní okno dataloggeru	60
Obr. 4.9 – Vývojový diagram zápisu dat	61
Obr. 5.1 – Graf záznamu dat při identifikaci metodou kritických parametrů.....	64
Obr. 5.2 – Přechodová charakteristika soustavy vyššího řádu	65
Obr. 5.3 – Graf přechodové charakteristiky	67
Obr. 5.4 – Graf porovnání regulačních pochodů	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Doporučené teploty vybraných materiálu pro tisk (Prusa Research s.r.o, 2019)	17
Tab. 2.1 – Souhrn možností pro napájení Arduina (Svoboda, 2018)	32
Tab. 2.2 – Rozlišení digitálního čidla (Maxim Integrated Products, Inc., 2018)	34
Tab. 3.1 – Seznam komponent připojených k Arduinu	45
Tab. 4.1 – Seznam vybraných událostí	57
Tab. 4.2 – Formát zprávy při doteku	57
Tab. 4.3 – Funkce pro komunikaci s displejem	59
Tab. 4.4 – Komunikační identifikátory a jejich význam	60
Tab. 4.5 – Záznam dat z kalibrace teplotních snímačů.....	62
Tab. 5.1 – Nastavení regulátoru z kritických hodnot.....	63
Tab. 5.2 – Hodnoty získané pomocí metody kritického zesílení.....	65
Tab. 5.3 – Parametry regulátoru získané pomocí metody kritického zesílení	65
Tab. 5.4 – Nastavení regulátoru pomocí přechodové charakteristiky	66
Tab. 5.5 – Hodnoty získané z přechodové charakteristiky	67
Tab. 5.6 – Parametry regulátoru získané pomocí metody kritického zesílení.....	67
Tab. 5.7 – Porovnání kvality regulačních pochodů	69

ÚVOD

Dříve pouze výjimečně, dnes se však již naprosto běžně objevuje 3D tiskárna i v domácnostech. Její široké využití láká spousty lidí ke koupi, avšak většina z nich nemá představu o tom, jak vůbec funguje. Nezbytnou součástí 3D tiskárny je tisková podložka, na kterou se postupně vrství materiál z trysky a vzniká navržený objekt.

Práce se zabývá regulací teploty vyhřívané tiskové podložky, což zajistí, že tisknutý objekt dokonale přilne první vrstvou k podložce a v dalších fázích tisku se již nepohybuje a nedeformuje.

Cílem této práce je navrhnout podobu komerčně vyráběného číslicového regulátoru ovládaného pomocí dotykového displeje, který bude udržovat konstantní teplotu tiskové podložky. Součástí regulátoru je PC aplikace, která slouží pro záznam dat. Teplotní rozsah topné podložky je $30\text{ °C} \div 110\text{ °C}$ a její teplota je volena v závislosti na použitém materiálu při tisku. Pro snímání teploty podložky je na výběr ze dvou teplotních snímačů a teplotního čidla.

Demonstrace funkčnosti regulátoru je předvedena na topné podložce 3D tiskárny, která vyžaduje přesně nastavenou a stabilně udržovanou teplotu. Z této demonstrace je zaznamenáno několik regulačních pochodů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 3D TISK

Jedná se o proces výroby trojrozměrných fyzických předmětů na základě předem vytvořeného digitálního 3D modelu. Princip tisku je opačný než při obrábění pomocí běžných průmyslových strojů, kde se materiál systematicky odebírá, dokud nedostane finální podobu. Při 3D tisku vzniká předmět postupným nanášením tenkých vrstev materiálu za určité teploty, čímž se předmět stává celistvým (FutLab.cc, 2018).

Pro návrh modelu se používají speciální 3D programy. „Nejprve je potřeba pomocí grafického softwaru udělat 3D model a ten následně převést do formátu, kterému rozumí tiskárna, což je tzv. Gcode. Gcode jsou souřadnice jednotlivých vrstev modelu a údaje o rychlosti, teplotě a další potřebné informace pro správný tisk objektu“ (FutLab.cc, 2018).

1.2 TISKOVÁ PODLOŽKA A JEJÍ TEPLOTA

Tisková podložka je základní prvek 3D tiskárny, na kterou se tiskne navržený předmět. Pro bezchybný tisk je zapotřebí, aby byla podložka nejen správně zkalibrována, ale i vyhřívána. Požadavek na teplotu podložky se mění v závislosti na použitém materiálu při tisku. V tab. 1.1 je uveden souhrn požadavků na teplotu u nejběžnějších materiálů (Pohořelský, 2016).

Tab. 1.1 – Doporučené teploty vybraných materiálů pro tisk (Prusa Research s.r.o, 2019)

Materiál	Teplota podložky	Teplota trysky
ABS	100 °C	255 °C
PLA	50 °C ÷ 60 °C	215 °C
PET	80 °C ÷ 100 °C	240 °C
Polypropylen (PP)	95 °C ÷ 100 °C	254 °C
NYLON	80 °C ÷ 90 °C	240 °C

Nanášený materiál opouští trysku s dostatečně vysokou teplotou na to, aby přilnul k podložce. Problémem však může být příliš nízká teplota podložky, která pokládaný materiál natolik rychle ochladí, že materiál se už k podložce není schopen přilepit. Aby se zamezilo tomuto problému, je potřeba podložku přesně vyhřívát na teplotu stanovenou použitým materiálem (Pohořelský, 2016).

Příkladem je oblíbený materiál pro tisk ABS, který se nanáší při teplotě okolo 255 °C. Tento materiál ve finální podobě vyniká svojí vysokou pevností a teplotní odolností. Daní za to je vyšší náročnost při tisku, kdy při velkém ochlazení dochází k nežádoucímu smršťování. Je tedy vyžadováno postupné chlazení a pokládání na vyhřívanou podložku o teplotě 100 °C (Pohořelský, 2016).

Co se týče nabídky vyhřívaných podložek, na trhu se objevují podložky pro napájecí napětí 12 V ÷ 24 V s výkonem do 200 W (Prusa Research s.r.o, 2019).

1.3 KOMERČNĚ VYRÁBĚNÉ REGULÁTORY

„Proporcionálně-integračně-derivační (PID) regulátory jsou bezkonkurenčně nejpoužívanějšími regulátory v průmyslu“ (Schlegel, 2001).

Komerční regulátory mají širokou škálu využití od papírenského přes farmaceutický až po potravinářský průmysl. Ve většině případů se jejich konstrukce a ovládání velmi podobá. Ovládání je zajištěno pomocí několika tlačítek (zpravidla čtveřicí) sloužící k nastavení. Pro orientaci v nastavovacím módu a jako zobrazovač měřené a žádané veličiny je použita dvojice segmentových displejů (ZPA Nová Paka, a.s., 2006).

Protože mezi nejčastější parametr regulace patří teplota, jsou regulátory vybaveny univerzálními převodníky a různými typy měřících obvodů, které umožňují připojení nejběžnějších typů senzorů jako je Pt100, Ni1000 nebo různé typy termočlánků. Pro ostatní případy jsou uzpůsobeny na standardní procesové typy signálů například 0 mA ÷ 20 mA, 4 mA ÷ 20 mA nebo 0 V ÷ 10 V. Výstupů obsahují zpravidla více. První je spínací pro dvoustavovou regulaci, nejčastěji realizován pomocí relé. Druhý je analogový výstup pro diskretní regulaci se standardními procesovými typy signálů 0 mA ÷ 20 mA, 4 mA ÷ 20 mA nebo 0 V ÷ 10 V. Mezi další výstupy patří například alarmový či datový (PROFESS, spol. s.r.o., 2014).

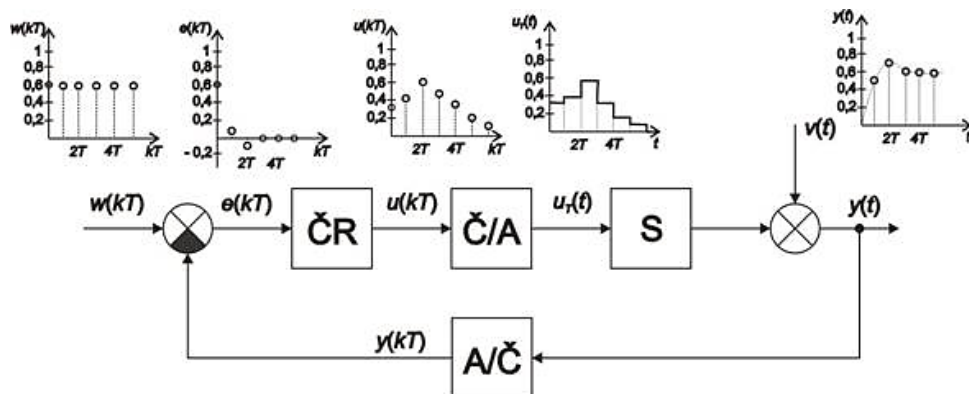
Komunikace je zajištěna po lince RS232 nebo RS485 podporující protokol Modbus RTU nebo pomocí ethernetu a protokolu Modbus TCP (PROFESS, spol. s.r.o., 2014).

Softwarové vybavení disponuje možností uchování více programů, nastavení chování při poruše, nastavení alarmových signálů, manažera údržby nebo přiřazení role mastera pro ovládání podřízených regulátorů (PROFESS, spol. s.r.o., 2014).

Některé složitější regulátory obsahují větší počet vstupních a výstupních svorek, více komunikačních portů, LCD displej a v neposlední řadě i aplikaci pro záznam dat (PROFESS, spol. s.r.o., 2014).

1.4 ČÍSLICOVÁ REGULACE

„Číslicový regulační obvod je takový obvod, ve kterém alespoň jedna veličina má tvar posloupnosti diskretních hodnot vytvářených v pravidelně se opakujících okamžicích označovaných jako perioda T “ (Vítečková & Ščevík, 2008). Cílem spojitě i diskretní regulace je minimalizovat regulační odchylku vhodným působením na regulovanou soustavu. Rozdílem je však způsob, kterým se zpracovávají a generují signály. Nezbytnou součástí diskretního regulátoru jsou analogově číslicové a číslicově analogové převodníky. Výstupem z číslicového regulátoru je hodnota akčního zásahu, která je Č/A převodníkem převedena na analogovou hodnotu a ta následně vstupuje do soustavy. Opakem je A/Č převodník, který musí být přesnější než Č/A převodník, protože má největší podíl na přesnosti celého regulačního obvodu. Nejčastěji se nachází ve zpětné vazbě, jak je uvedeno na obr. 1.1 (Vítečková & Ščevík, 2008).



Obr. 1.1 – Schéma číslicového regulačního obvodu (Vítečková & Ščevík, 2008)

Značení bloků

- ČR – číslicový regulátor,
- A/Č – analogově-číslicový 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,
- $v(t)$ – poruchová veličina,

$y(t)$ – regulovaná (výstupní) veličina,
 T – vzorkovací perioda (Vítečková & Ščevík, 2008).

Teplotní podložka disponuje velkou časovou konstantou, z čehož plyne nízká spínací frekvence. Díky tomu lze pro regulaci použít dvoustavový i PID regulátor. Ovšem v dnešní době plně logických obvodů, mikroprocesorů a vzhledem k povaze zadání této práce, bude vhodné použít číslicovou verzi PID regulátoru zvanou PSD regulátor.

1.4.1 Dvoustavový regulátor

Jedná se o typ regulace vhodný pro nenáročné a pomalejší soustavy, kde akční veličina nabývá pouze dvou stavů. Největší motivací pro zavedení dvoustavového regulátoru je jeho nízká pořizovací cena, jednoduchost provedení a spolehlivost. Jako typický příklad dvoustavové regulace si lze představit spínání elektrického obvodu topení žehličky, které je realizováno bimetalovým páskem. Uvedený princip regulace má však své nedostatky, které se projeví v případě nízkého řádu nebo nízké časové konstanty soustavy. V takovém případě by docházelo k velmi rychlému spínání akčního členu, což by se negativně projevilo na životnosti regulátoru i akčního členu (Automatizace a automatizační technika, 2014).

Popsaný problém lze částečně odstranit zavedením hystereze. Hystereze je vlastně pásmo necitlivosti, které zabrání změně akčního zásahu, pokud je změna regulační odchylky malá. To se však negativně projeví na kvalitě regulace zvětšením regulační odchylky. Při nastavování regulátoru s hysterezí je třeba vhodně vyvážit velikost regulační odchylky a frekvenci spínání (Automatizace a automatizační technika, 2014).

1.4.2 PSD regulátor

„Číslicové regulátory se spojitým (analogovým) regulátorům svým chováním v uzavřeném regulačním obvodu pouze přibližují“ (Balátě, 2003). Důvodem je právě nespojitost, kterou ovlivňuje vzorkovací perioda. Číslicový regulátor zaznamenává informaci o měřené veličině pouze v daných intervalech, které by měly být co nejkratší. Čím menší tyto intervaly budou, tím více se přiblížíme spojitě verzi regulátoru. S kratšími intervaly však dochází k větší pravděpodobnosti zanesení šumu a následně potřebě signál filtrovat (Balátě, 2003).

Od PSD regulátoru je požadována ideálně stejná funkce jako od spojitého regulátoru, ovšem s diskrétními hodnotami, a proto je vhodné vycházet z rovnice spojitého PID regulátoru, která je dána jako

$$u(t) = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1.1)$$

kde t – spojitý čas, s,

u – spojitá akční veličina, V,

r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,

e – regulační odchylka, $^\circ C$,

τ – časová konstanta soustavy, s,

T_I – integrační časová konstanta, s,

T_D – derivační časová konstanta, s (Balátě, 2003).

Pro získání rovnice PSD regulátoru je v rovnici (1.1) integrál nahrazen sumací a derivace zpětnou diferencí. Základní rovnice PSD regulátoru je potom dána jako

$$u(kT) = r_0 \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} [e(kT) - e[(k-1)T]] \right\}, \quad (1.2)$$

kde k – poměrný diskrétní čas,

T – vzorkovací perioda, s,

kT – diskrétní čas, s,

u – diskrétní akční veličina, V,

r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,

e – regulační odchylka, $^\circ C$,

T_I – integrační časová konstanta, s,

T_D – derivační časová konstanta, s (Balátě, 2003).

Vztah (1.2) odvozený ze spojitého PID regulátoru je znám jako polohový algoritmus. Pro výpočty pomocí μP vyžaduje polohový algoritmus uložení veškerých hodnot regulační odchylky. To je nežádoucí a je proto vhodnější použít přírůstkový algoritmus. Přírůstkový algoritmus určuje pouze změnu neboli přírůstek akční veličiny oproti akčnímu zásahu

v minulém kroku. Tento tvar získáme tak, že vyjádříme akční zásah v minulém kroku a odečteme jej od rovnice (1.2). Minulý akční zásah je definován jako

$$u[(k-1)T] = r_0 \left\{ e[(k-1)T] + \frac{T}{T_1} \sum_{i=0}^{k-1} e(iT) \right\} + r_0 \left\{ \frac{T_D}{T} [e[(k-1)T] - e[(k-2)T]] \right\}, \quad (1.3)$$

kde k – poměrný diskretní čas,
 T – vzorkovací perioda, s,
 kT – diskretní čas, s,
 u – diskretní akční veličina, V,
 r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 e – regulační odchylka, $^\circ C$,
 T_1 – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

Po odečtení minulého akčního zásahu daného rovnicí (1.3) od rovnice (1.2) je přírůstkový tvar definován jako

$$u(kT) = u[(k-1)T] + r_0 \left\{ e(kT) - e[(k-1)T] \frac{T}{T_1} e(kT) \right\} + r_0 \left\{ \frac{T_D}{T} [e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]] \right\}, \quad (1.4)$$

kde k – poměrný diskretní čas,
 T – vzorkovací perioda, s,
 kT – diskretní čas, s,
 u – diskretní akční veličina, V,
 r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 e – regulační odchylka, $^\circ C$,
 T_1 – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

K realizaci přírůstkového algoritmu popsaného rovnicí (1.4) pomocí μP je potřeba uchovávat v paměti pouze hodnotu minulé, předminulé regulační odchylky a minulého akčního zásahu (Balátě, 2003).

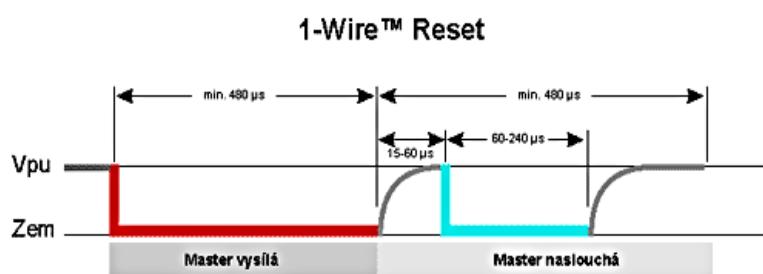
1.5 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY

V následujících podkapitolách jsou blíže popsány komunikační sběrnice a protokoly, které jsou v práci dále použity.

1.5.1 1-Wire

Je sběrnice navržená firmou Dallas Semiconductor, jejímž charakteristickým poznatkem je nutnost použít pro komunikaci pouze dva vodiče (datový a zemnicí). Sběrnice obsahuje jeden řídicí obvod master a jeden nebo více podřízených zařízení slave. Přenos po sběrnici probíhá asynchronně a poloduplexně. Zařízení podporující 1-Wire v sobě obsahují malý kondenzátor, který zajišťuje napájení během času komunikace (Malý, 2004).

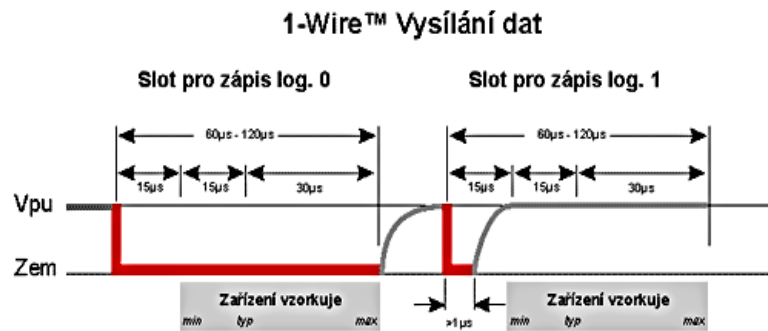
Na sběrnici je v tomto případě μP v roli master a teplotní senzor v pozici slave. Master i slave mají v klidovém stavu otevřený kolektor a na sběrnici je dovolené napětí $3\text{ V} \div 5\text{ V}$, ze kterého jsou napájeny zařízení slave. Komunikaci začne vždy master, tzv. reset pulzem, jehož průběh je na obr. 1.2. Ten stáhne datovou sběrnici po dobu minimálně $480\ \mu\text{s}$ k logické 0. Poté dojde k uvolnění sběrnice a naslouchání. Jestli se na sběrnici nachází nějaké 1-Wire zařízení, dojde k detekci náběžné hrany, která trvá $16\ \mu\text{s} \div 60\ \mu\text{s}$ a uzemní sběrnici na $60\ \mu\text{s} \div 240\ \mu\text{s}$ (Malý, 2004).



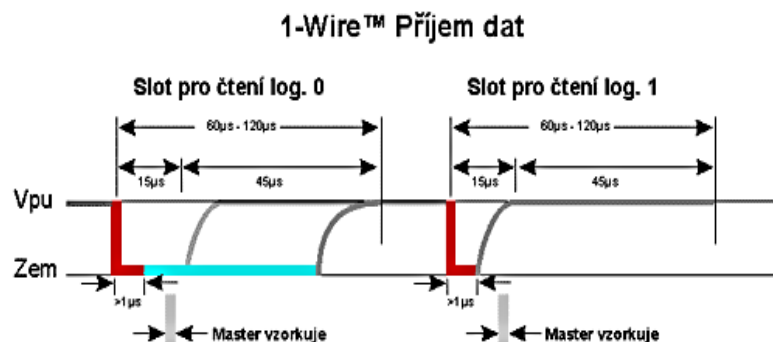
Obr. 1.2 – Průběh resetovacího slotu (Malý, 2004)

Dojde-li k úspěšnému ohlášení, může začít master a slave komunikovat. Komunikace probíhá v časových úsecích dlouhých $60\ \mu\text{s} \div 120\ \mu\text{s}$, při kterém se přeneše jeden bit informace. Časový interval mezi jednotlivými časovými úseky musí být minimálně $1\ \mu\text{s}$ (Malý, 2004).

Vysílání dat uvádí obr. 1.3 a probíhá pro přenesení logické 0 tak, že master uzemní sběrnici po celou dobu časového úseku (minimálně 60 μs). V případě přenosu logické 1 dojde k uzemnění sběrnice na 1 μs a do 15 μs od uzemnění k jejímu nastavení do logické 1 (Malý, 2004).



Čtení dat zahájí master tím, že na 1 μs uzemní sběrnici k logické 0 a slave buď ponechá sběrnici bez zásahu (vyšle logickou 1) nebo opět sběrnici uzemní a dojde k přenesení logické 0 (Malý, 2004). Průběh příjmu dat znázorňuje obr. 1.4.



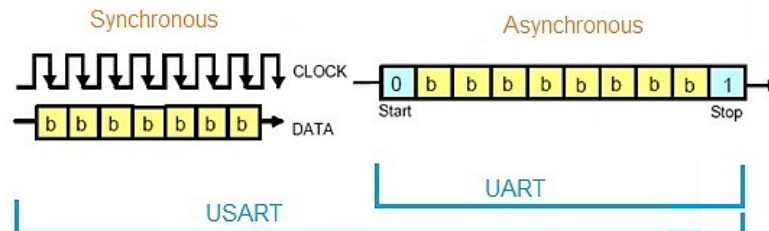
V případě realizace komunikace pomocí μP , je k dispozici přesný algoritmus s konkrétně definovanými časy pro reset pulz, zápis i čtení. V platformě Arduino toto obstarává knihovna OneWire.h (Malý, 2004).

1.5.2 UART

Je komunikační protokol typu point-to-point pro komunikaci dvou protistran. Přenos může být synchronní (USART) nebo asynchronní (UART). Přenos dat je zprostředkován

jedním vodičem pro každý směr. Pro plně duplexní přenos je potřeba minimálně dvou vodičů (Src.athaj.cz, nedatováno).

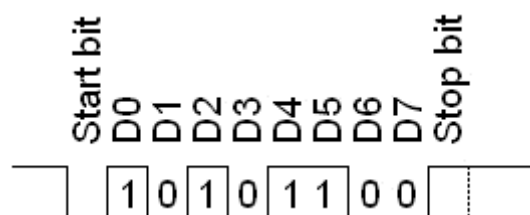
Jelikož Arduino a displej obsahují komunikaci asynchronní, bude synchronní komunikace s hodinovým signálem dále vynechána. Rozdíl mezi nimi je znázorněn na obr. 1.5 (Src.athaj.cz, nedatováno).



Obr. 1.5 –Příklad synchronní a asynchronní komunikace (Electronic Note, nedatováno)

Přenos dat probíhá po jednom vodiči pro každý směr. Může tedy současně vysílat i přijímat data po sběrnici. Tyto vodiče jsou typicky označovány jako Rx (receive) pro příjem a Tx (transmit) pro vysílání. Propojení mezi zařízeními je typicky do kříže. Přenos dat je prováděn sériově po jednotlivých bitech, jak je uvedeno na obr. 1.6. Sběrnice má klidový stav definovaný logickou 1. Vysílání je zahájeno tzv. start bitem, který je definován logickou 0. Od této chvíle již dochází k přenosu jednotlivých bitů (typicky 5 ÷ 9) od nejnižšího po nejvyšší. Pro snížení chyb je možné posílat ještě paritní bit pro detekci chyb, ale není povinný. Jakmile dojde k přenosu všech bitů (nejběžněji 8) je vysílání ukončeno tzv. stop bitem, který přivede sběrnici opět na logickou 1 a následně může dojít k zahájení další komunikace (Src.athaj.cz, nedatováno).

Příjemce je řízen vlastním hodinovým signálem, který je synchronizován po přijetí start bitu, jehož vzorkovací frekvence je několikanásobně vyšší než přenosová rychlost. Přečtení hodnoty tedy proběhne několikanásobně vícekrát. Pro určení načteného bitu se používá průměrování (Src.athaj.cz, nedatováno).



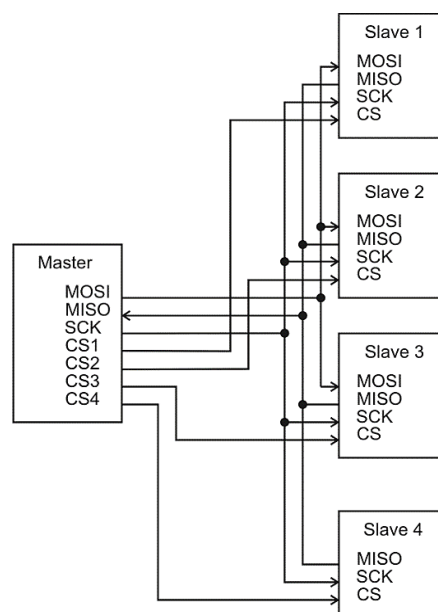
Obr. 1.6 – Ukázka asynchronního přenosu (Novozámský, 2008)

Pro úspěšné navázání komunikace je potřeba na komunikujících zařízeních nastavit shodné parametry, jako je přenosová rychlost, délka datového slova, použití parity nebo délka stop bitu (Src.athaj.cz, nedatováno).

1.5.3 SPI

Patří mezi základní sběrnici, kterou podporuje většina dnešních embedded zařízení pro komunikaci mezi μ P nebo dalšími přídatnými zařízeními jako jsou paměti, A/D převodníky, SD karty a podobně. Sběrnice je plně duplexní, synchronní a je konstruována typu master-slave. Množství zařízení typu slave není teoreticky nijak omezen (Root.cz, 2008).

Hodinový signál sloužící k synchronizaci generuje master. Tento vodič je často označován jako CLK nebo také SCLK. Aby bylo možné obousměrně komunikovat, je využito dvojice vodičů označovaných jako MOSI a MISO. Na vodiči s označením MOSI master vysílá a slave přijímá. Pomocí vodiče s označením MISO master naslouchá a slave vysílá. Tato trojice vodičů (CLK, MOSI, MISO) je v případě více zařízení slave pro všechny společná. Aby nedocházelo ke kolizím, má každé zařízení vlastní adresovací linku označovanou jako CS. Pokud je adresovací linka ve stavu logické 1, je komunikace s daným zařízením neaktivní. Master si tedy pomocí adresovacích linek vybírá, s kým bude komunikovat. Master musí být schopný obsluhovat tolik adresovacích linek, kolik je na sběrnici zařízení slave (Root.cz, 2008).

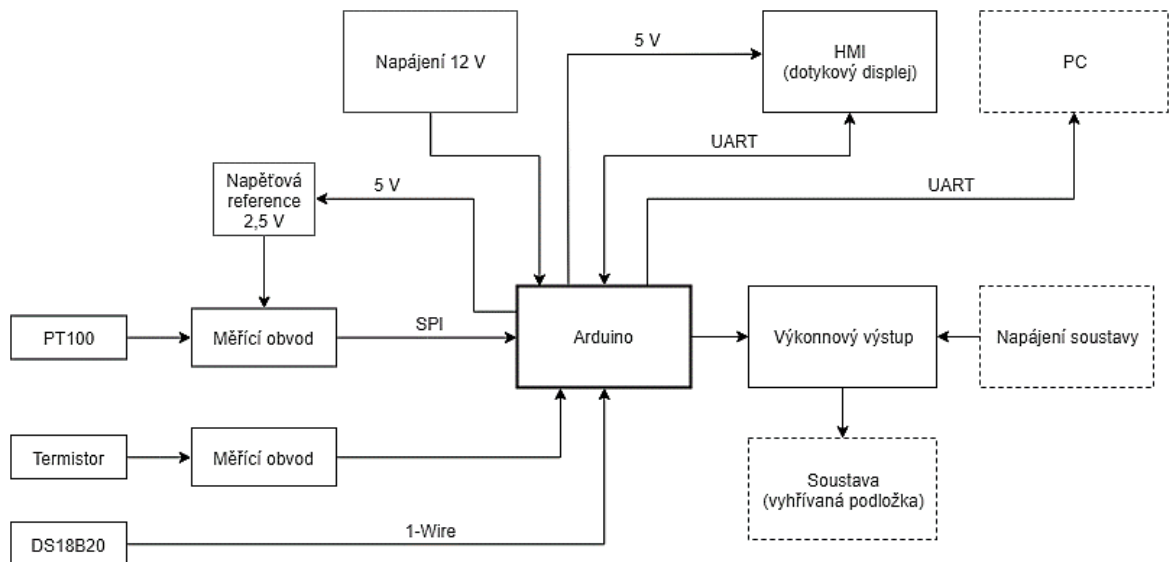


Obr. 1.7 – Ukázka zapojení sběrnice SPI (Dudka, 2016)

Na obr. 1.7 je znázorněno zapojení čtyř zařízení typu slave, z nichž čtvrté je atypické svým zapojením. Toto zařízení je schopno pouze vysílat nikoliv přijímat data. Jedná o typického zástupce A/D převodníku, který nepotřebuje pro svoji funkci žádná data přijímat a pouze je odesílá (Root.cz, 2008).

2 VÝBĚR KOMPONENT

Blokové schéma číslicového regulátoru je znázorněno na obr. 2.1. Jednotlivé bloky jsou dále popsány detailněji.



Obr. 2.1 – Blokové schéma regulátoru

Pro výběr vhodných komponent jsou sestaveny ucelené požadavky na regulátor, které jsou při výběru komponentu zohledněny. Mezi klíčové požadavky patří

- spínání výkonové zátěže až 8 A,
- minimálně dvě HW sériové komunikace UART,
- podpora sběrnice SPI a 1-Wire,
- dostatek FLASH paměti pro program,
- paměť EEPROM pro uložení nastavení,
- převodník USB/RS232,
- dotykové ovládání,
- teplotní rozsah regulace 30 °C ÷ 100 °C.

2.1 PLATFORMA ARDUINO

Dnes na trhu existuje spousta úspěšných vývojových platforem od samostatných mikročipů až po vývojové kity obsahující nejrůznější periferie na jedné desce. Jednu z těchto úspěšných platforem tvoří Arduino, které nabízí širokou škálu komplexních systémů, od základních až po ty nejvýkonnější. Jednotlivé modely se od sebe liší použitým μ P, počtem vstupně výstupních portů, komunikačním rozhraním, velikostí a v neposlední řadě cenou. Ne vždy je však k povaze řešené úlohy vhodné použít nejvýkonnější model, ať už je to z hlediska rozměrů, spotřeby nebo ceny. Ohledně zmíněných rozměrů Arduino nabízí více než 10 rozměrových modifikací (Voda, 2017).

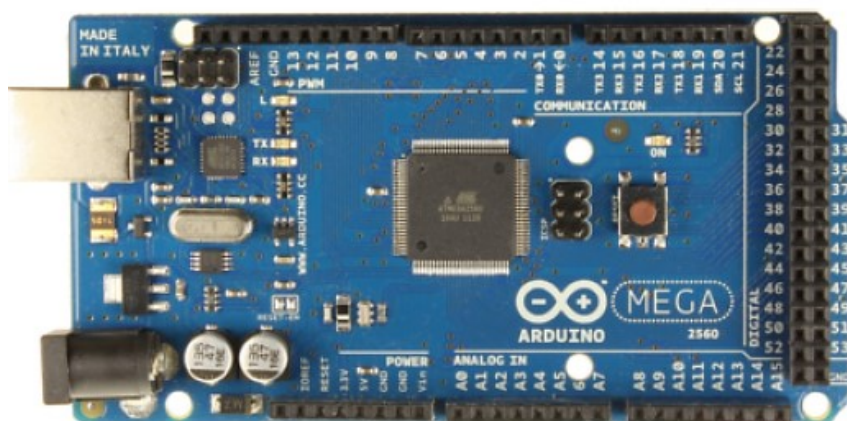
Pokud Arduino postrádá některou námi vyžadovanou funkci, je možné jej doplnit o tzv. shield. Nabídka shieldů je velmi rozsáhlá, je však potřeba dbát na kompatibilitu (Voda, 2017).

Programování Arduina je možné pomocí jazyků C nebo C++. Nejjednodušší variantou je použití knihovny Wiring, kterou obsahuje volně dostupné vývojové prostředí Arduino IDE (Voda, 2017).

2.1.1 Arduino Mega 2560

Disponuje mikroprocesorem značky Atmel s označením ATmega2560, 54 digitálními piny (15 z nich je možné použít jako PWM výstupy), 16 analogovými vstupy, 16 MHz krystalem, čipem ATmega16U2 pro převod sériové komunikace na USB rozhraní, 4 sériovými linky, konektorem pro externí napájení a tlačítkem pro restart. Paměťový prostor obsahuje 256 kB pro paměť FLASH, 4 kB pro paměť EEPROM a 8 kB pro paměť SRAM (Arduino.cc, 2019).

Doporučené napájecí napětí kitu je $7\text{ V} \div 12\text{ V}$. Součástí vývojového kitu jsou dva stabilizátory napětí na 5 V a 3,3 V. Veškeré digitální porty mohou být použity jako vstupní nebo výstupní a pracují s napětím 5 V. Maximální proudové zatížení každého portu je 20 mA. Součástí každého portu je pull-up rezistor, který je ve výchozím stavu odpojený. Analogové piny mají 10bitové rozlišení. Jako zdroj referenčního napětí pro A/D převodník může být použit port s označením AREF. Analogový výstup je realizován pomocí 8bitového PWM signálu. Spousta číselně označených pinů je možné využít pro sekundární účely jako např. externí přerušování, sériová komunikace nebo komunikační rozhraní SPI a TWI (Arduino.cc, 2019). Rozložení pinů a konektorů je uvedeno na obr. 2.2.



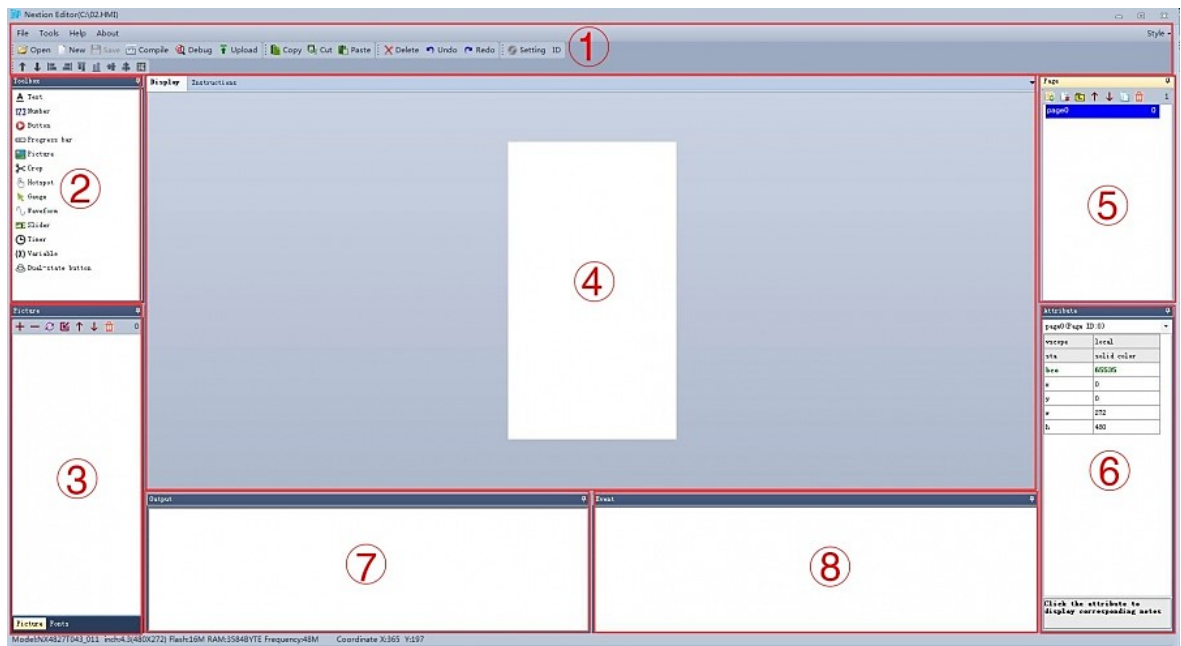
Obr. 2.2 – Arduino Mega 2560 (Voda, 2017)

Arduino s mikroprocesorem ATmega 2560 plně vyhovuje požadavkům na realizaci číslicového regulátoru.

2.2 DOTYKOVÝ DISPLEJ NEXTION

Displeje značky Nextion jsou vhodné pro veškerou vizualizaci procesů (HMI). Všechny displeje z nabídky mají dotykový TFT displej s vlastním procesorem a pamětí, čímž značně sníží zatížení řídicího systému. Displeje jsou dostupné od úhlopříčky 2,4“ s rozlišením 320×240 až po 7,0“ s rozlišením 800×480. Displej obsahuje komunikační rozhraní UART a pro napájení používá stejnosměrné napětí 5 V. Displej je schopný vykreslit až 65536 barev. Dotyková plocha je odporová, tudíž dokáže zaznamenat pouze jeden dotek v čase. Hlavní výhodou oproti ostatním dostupným displejům je bezplatný grafický editor pro definici grafického prostředí a komponentů. Editor obsahuje simulátor, pomocí něhož lze pracovat i bez momentálně fyzicky dostupného displeje. Dalším příjemným nástrojem je debugger, který je vhodný při hledání vzniklých problémů (Nextion, nedatováno).

Veškeré zatížení vzniklé zobrazováním grafiky je v režii integrovaného procesoru a řídicí systém zajišťuje pouze komunikaci s displejem, jako je zaslání a přijímání dat nebo ovládací příkazy (Nextion, nedatováno).



Obr. 2.3 – Prostředí grafického editoru (Itead.cc, 2016)

Popis grafického prostředí zobrazeného na obr. 2.3

- 1 – hlavní ovládací panel,
- 2 – seznam dostupných komponent,
- 3 – seznam obrázků a stylů písma,
- 4 – displej (pracovní plocha),
- 5 – seznam jednotlivých stránek,
- 6 – atributy komponenty,
- 7 – výstup kompilátoru,
- 8 – program komponenty.

Pro ovládání a vizualizaci řízené soustavy je použit dotykový displej s úhlopříčkou 3,5“, rozlišením 480×320 a 16 MB FLASH paměti. Displej bude komunikovat s μP pomocí UART.

2.3 NAPÁJENÍ

2.3.1 Napájení obvodů Arduina

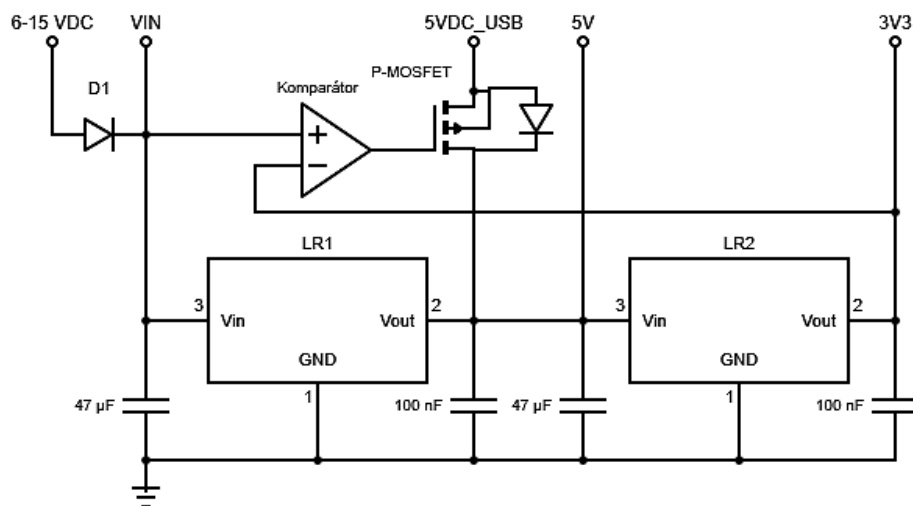
Napájení Arduina a potažmo celého regulátoru je realizováno ze síťového adaptéru poskytujícího stejnosměrné napětí 12 V a proud 1 A. Ze samotného Arduina je stabilizované napětí (5 V a 3,3 V) dále rozvedeno pomocí nasouvacího shieldu k měřicím obvodům

a napájecímu konektoru pro displej. K Arduino je dále zapojen USB kabel pro komunikaci s PC zajišťující export dat do aplikace.

Tab. 2.1 – Souhrn možností pro napájení Arduino (Svoboda, 2018)

Typ připojení	Rozsah napájecího napětí, V	Max. proud, mA
Souosý konektor	6,0 ÷ 15,0	1000
USB port	4,75 ÷ 5,25	500
VIN + GND	5,8 ÷ 14,8	1000
5 V + GND	4,75 ÷ 5,25	1000

Pro zvolení napájecího zdroje obsahuje Arduino obvod s komparátorem znázorněný na obr. 2.4, který v přítomnosti obou napájecích zdrojů potlačí ten méně výkonný. Upřednostněno je napájení ze souosého konektoru, které dokáže podle tab. 2.1 poskytnout větší proud (Svoboda, 2018).



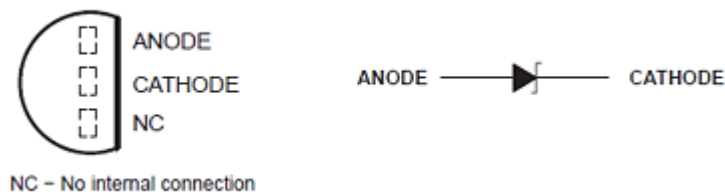
Obr. 2.4 – Napájecí obvod Arduino (Svoboda, 2018)

V případě přítomnosti napájení pomocí USB a souosého konektoru zároveň se na neinvertujícím vstupu komparátoru objeví napájecí napětí ze souosého konektoru snížené o úbytek napětí na diodě D1 a na invertujícím vstupu bude referenční napětí 3,3 V. Na výstupu komparátoru bude hodnota napětí rovna neinvertujícím vstupu, P-MOSFET tranzistor zůstane zavřený a z konektoru USB nebude přitékat žádný proud. Proud nebude přitékat ani přes diodu v tranzistoru, dokud bude na výstupu lineárního regulátoru LR1 stejný napěťový potenciál, jako na anodě diody. Tím je zajištěno, že pomocí USB rozhraní bude probíhat pouze komunikace s PC, nikoliv napájení (Svoboda, 2018).

2.3.2 Napájení měřicích obvodů

Jako zdroj napětí 2,5 V, který je využit pro realizaci proudového zdroje a napěťové reference A/D převodníku, je použita napěťová reference s označením LM385B-2.5 v pouzdře TO92. Napěťová reference se chová jako Zenerova dioda a v pouzdře TO92 využívá pouze dva piny, jak znázorňuje obr. 2.5.

Maximální proudové zatížení je 20 mA, které vyhovuje účelům regulátoru (Texas Instruments, 2019).



Obr. 2.5 – Rozložení vývodů napěťové reference (Texas Instruments, 2019)

2.4 TEPLOTNÍ SENZORY A SNÍMAČE

Zpětná vazba regulátoru o regulované teplotě je umožněna použitím dvou teplotních snímačů a teplotního senzoru. Teplotní senzor i oba teplotní snímače mají své specifické vlastnosti a rozdílný způsob předání informace μ P. V následujících podkapitolách jsou vybrané snímače a čidlo popsány blíže.

2.4.1 DS18B20

Jedná se o digitální teplotní senzor od firmy Dallas s teplotním rozsahem $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \div 125\text{ }^{\circ}\text{C}$. V rozmezí $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \div 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ má garantovanou přesnost $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozlišení čidla je volitelné v rozsahu 9 bitů \div 12 bitů. Vhodné napájecí napětí je $3,3\text{ V} \div 5\text{ V}$. Senzor se vyrábí ve standardizovaném pouzdře TO92, ale i v nerezovém voděodolném pouzdře (Maxim Integrated Products, Inc., 2018).

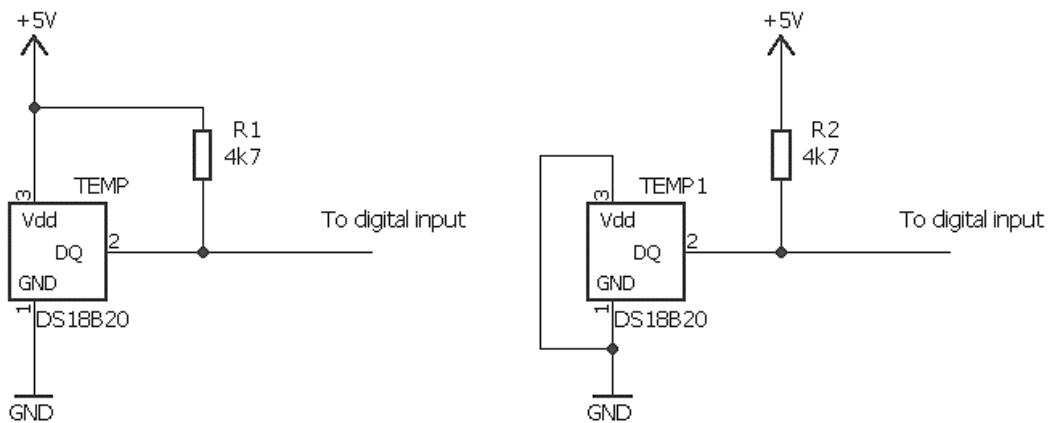
Každý senzor má ve své ROM paměti zapsanou 64bitovou unikátní adresu, na které se hlásí. Protože má každý senzor svoji unikátní adresu, není teoreticky jejich počet na sběrnici nijak omezen (Maxim Integrated Products, Inc., 2018).

Výchozí nastavení rozlišení po zapnutí je 12 bitů. Dobu konverze při daném rozlišení senzoru shrnuje tab. 2.2.

Tab. 2.2 – Rozlišení digitálního čidla (Maxim Integrated Products, Inc., 2018)

Rozlišení, bit	Rozlišení, °C	Čas konverze, ms
9	0,5	93,7
10	0,25	187,5
11	0,125	375,0
12	0,0625	750,0

Se senzorem lze komunikovat standardně pomocí tří vodičů, kdy jeden slouží pro napájení, druhý pro signál z čidla a třetí jako společná zem pro oba vodiče. Existuje však i tzv. parazitní režim komunikace pouze pomocí dvou vodičů po sběrnici 1-Wire (Maxim Integrated Products, Inc., 2018).



Obr. 2.6 – Příklad dvou- a třívodičového zapojení

V obou případech zapojení znázorněných na obr. 2.6 je mezi datový a napájecí vodič zapojen pull-up rezistor o doporučené hodnotě 4,7 kΩ, který definuje klidový stav sběrnice.

Komunikace se senzorem po sběrnici 1-Wire se dá rozdělit na tři zásadní části. První část je nazývána jako inicializační a spočívá ve vyslání reset pulzu po sběrnici, čímž dá master najevo zahájení komunikace a všechna slave zařízení jsou připravena. Ve druhé fázi se master snaží na sběrnici pomocí tzv. ROM příkazů navázat komunikaci. To zařízení, které odpovídá dané adrese, mu pomocí ROM instrukční sady odpoví. V posledním kroku dochází ke čtení samotné paměti senzoru, nastavování rozlišení nebo zápisu konfiguračních registrů (Maxim Integrated Products, Inc., 2018).

2.4.2 Pt100

Pt100 spadá do kategorie odporových snímačů teploty, která využívá závislosti odporu kovů na teplotě. Změna elektrického odporu kovů je dána jako

$$R_{\vartheta} = R_{PT} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta), \quad (2.1)$$

kde R_{ϑ} – změna elektrického odporu, Ω ,
 R_{PT} – odpor platinového snímače při teplotě 0 °C, Ω ,
 α – teplotní koeficient odporu, K^{-1} ,
 $\Delta\vartheta$ – změna teploty, °C.

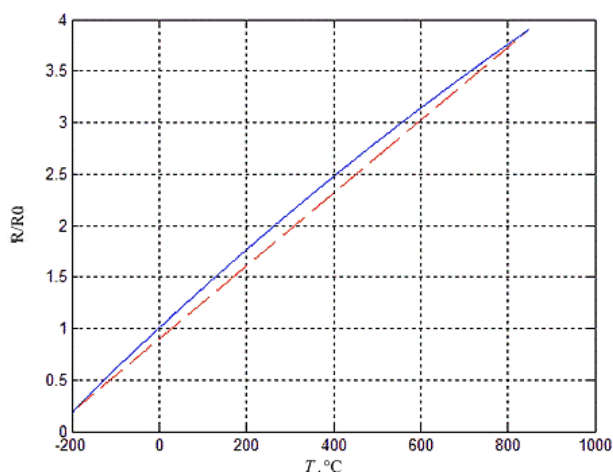
Z důvodu nestálosti teplotního koeficientu je vztah (2.1) platný pouze pro rozsah teplot od 0 °C do 100 °C, kde je možné jeho nestabilitu ignorovat. Pro použití v širším rozsahu teplot je potřeba vztah (2.2), který je upravený do tvaru polynomu vyššího stupně (Chlebný, 2009).

Pro rozsah teplot 0 °C až 850 °C platí

$$R_{\vartheta} = R_{PT} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta + \beta \cdot \Delta\vartheta^2), \quad (2.2)$$

kde R_{ϑ} – změna elektrického odporu, Ω ,
 R_{PT} – odpor platinového snímače při teplotě 0 °C, Ω ,
 $\Delta\vartheta$ – změna teploty, °C.
 $\alpha = 3,908 \cdot 10^{-3}$, K^{-1} ,
 $\beta = -5,802 \cdot 10^{-7}$, K^{-2} ,
 $\gamma = -4,2735 \cdot 10^{-12}$, K^{-4} (Chlebný, 2009).

Platinové teploměry se vyrábí drátkovou nebo vrstvou technologií. V případě drátkové metody je čidlo zhotoveno z odporového drátu bifilárně navinutého na vnější povrch keramického tělesa. Teploměry vyráběné vrstvou technologií využívají keramické destičky, na které se platinový odpor vytvoří kombinací napařování a leptání. Na povrchu je čidlo obvykle zalito do speciálního laku pro dlouhodobou stabilitu (Chlebný, 2009).



Obr. 2.7 – Závislost odporu Pt100 na teplotě (Špringl, 2004)

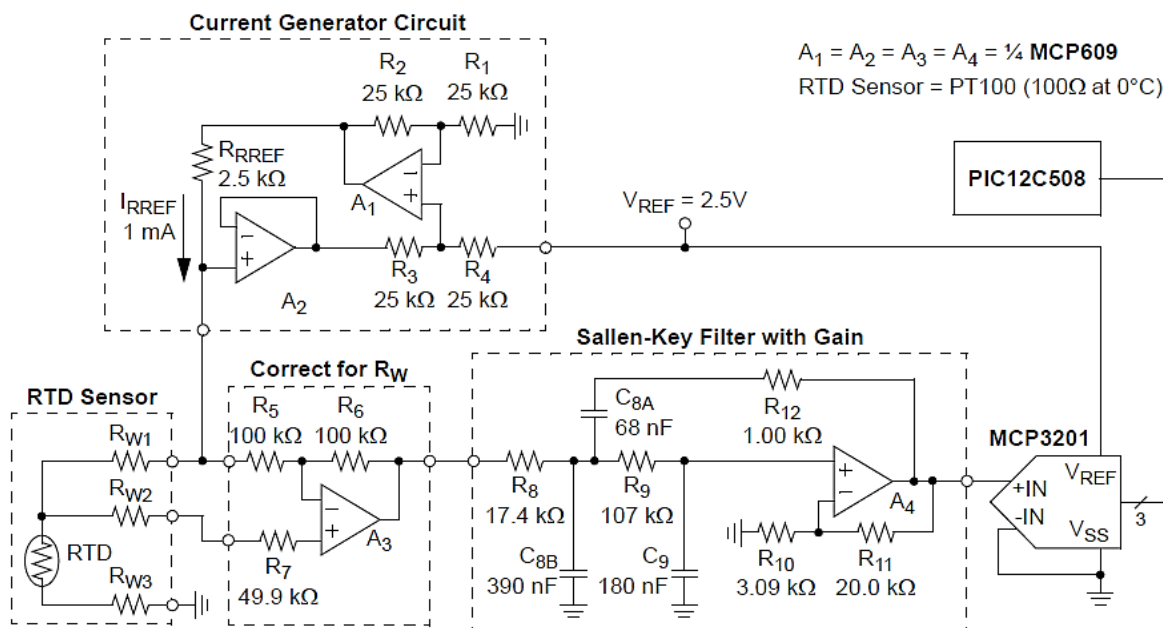
Modrá křivka na obr. 2.7 reprezentuje závislost odporu platinového snímače na teplotě. Červená přímka zde je pouze pro ukázkou nelinearity (Špringl, 2004).

Pro zpracování hodnoty odporu snímače je vhodné jej převést na veličiny jako je napětí nebo proud, které lze dále reprodukovat a přenášet. Pro to se využívá např. odporových můstků, které jsou schopny potlačit nežádoucí rušení, nebo vliv odporu přívodních vodičů (Chlebný, 2009).

Pro zabránění vlastnímu vyhřívání snímače je vhodné udržovat proud procházející senzorem pod 1,5 mA. Je tedy zapotřebí použití proudového zdroje (Chlebný, 2009).

Také se můžeme setkat se snímači s odlišnou základní hodnotou R_0 . Mezi další běžné hodnoty patří Pt1000 nebo Pt5000. Hlavní výhodou platinového snímače je vysoká linearita průběhu charakteristiky, vysoká teplotní a chemická odolnost. Jejich nedostatkem je však velká časová konstanta, kterou způsobují ochranné vrstvy senzoru a následné umístění do pouzdra nebo jímky (Chlebný, 2009).

K získání údaje o teplotě z platinového odporového snímače je použit obvod na obr. 2.8 poskytující měřicí rozsah $-200\text{ °C} \div 600\text{ °C}$.



Obr. 2.8 – Schéma měřicího obvodu pro Pt100 (Microchip Technology Inc., 2008)

Zapojení využívá pro snímání odporu platinového snímače proudového zdroje známého jako Howlandova proudová pumpa. Pro korekci odporu přívodních vodičů je snímač připojen třemi vodiči. Korekci zajišťuje operační zesilovač A3, který měří úbytek napětí na přívodních vodičích. Na výstupu operačního zesilovače A3 se nachází vykompenzované napětí odpovídající napětí na platinovém snímači. Následně je napětí na snímači pomocí čtvrtého operačního zesilovače tvořící filtr druhého řadu zesíleno a filtrováno. Signál je poté 12bitovým převodníkem s napěťovou referencí 2,5 V převeden na digitální hodnotu, která je předána pomocí sběrnice SPI (Microchip Technology Inc., 2008).

2.4.3 NTC termistor

NTC termistor patří do kategorie polovodičových odporových snímačů teploty, jehož odpor se zvyšující se teplotou klesá. Tato závislost odporu na teplotě je přibližně exponenciální a lze popsat vztahem jako

$$R_{\text{TERM}} = A \cdot e^{\frac{B}{T_1}}, \quad (2.3)$$

kde R_{TERM} – odpor termistoru, Ω ,

A – konstanta závislá na geometrii snímače, Ω ,

B – teplotní konstanta závislá na materiálu snímače, K,

T_1 – teplota, K.

Protože se však konstanta A v katalogích běžně neudává, je termistor charakterizován teplotní konstantou B a známou hodnotou R_0 při definované teplotě T_0 . Nejčastěji je tento odpor uváděn za teploty 298,15 K a pohybuje se v rozmezí jednotek Ω až jednotek $M\Omega$. Vztah potom získá tvar

$$R_{T_1} = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (2.4)$$

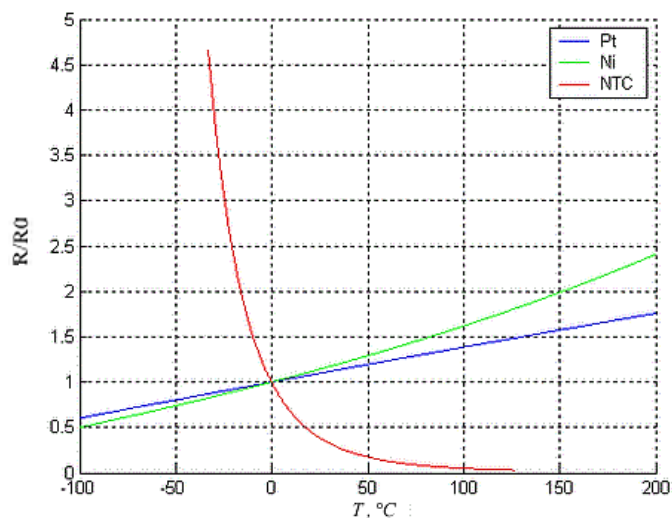
kde R_{T_1} – odpor termistoru při teplotě T_1 , Ω ,
 R_0 – známý odpor termistoru při definované teplotě T_0 , Ω ,
 B – teplotní konstanta, K,
 T_1 – teplota, K,
 T_0 – definovaná teplota, K (Špringl, 2004).

Standardně bývá konstanta B v katalogích uvedena a její hodnota se pohybuje mezi 1500 K ÷ 7000 K. Doporučené teploty pro výpočet konstanty B jsou $T_0 = 358,15$ K a $T_1 = 291,15$ K. Použité teploty pro výpočet jsou uvedeny ve spodním indexu ve $^{\circ}\text{C}$ (Špringl, 2004).

Pro výpočet teploty v omezeném rozsahu -50 $^{\circ}\text{C}$ ÷ 150 $^{\circ}\text{C}$ lze s chybou $\pm 0,15$ $^{\circ}\text{C}$ linearizovat charakteristiku termistoru vztahem

$$\frac{1}{T_C} = a + b \ln R_{\text{TERM}} + c(\ln R_{\text{TERM}})^3, \quad (2.5)$$

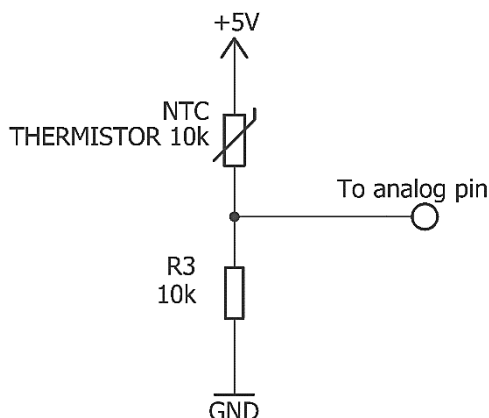
kde T_C – teplota, $^{\circ}\text{C}$,
 R_{TERM} – odpor termistoru, Ω ,
 a, b, c – konstanty určené při teplotě 25 $^{\circ}\text{C}$, 40 $^{\circ}\text{C}$ a 70 $^{\circ}\text{C}$ (Špringl, 2004).



Obr. 2.9 – Grafické porovnání odporových snímačů teploty (Špringl, 2004)

Termistor je vyráběn práškovou technologií ze směsi oxidů kovů. Po vylisování se za vysokých teplot zpevní slinováním. Hlavní výhodou NTC termistoru je jeho vysoká citlivost a rychlost reakce na malé teplotní změny. Je vhodný pro měření teplot v rozsahu $-50\text{ °C} \div 150\text{ °C}$. Díky své vysoké citlivosti se zde problémy s odporem přívodních vodičů projevují méně než u platinového senzoru. Nevýhodou je však jeho nestabilita, časová nestálost a značná nelinearita charakteristiky, kterou znázorňuje obr. 2.9 (Špringl, 2004).

Měřicí obvod termistoru je díky své vysoké citlivosti velmi zjednodušen. Pro získání teploty z termistoru je použito zapojení napěťového děliče zobrazeného na obr. 2.10. Napětí na děliči je snímáno pomocí 10bitového A/D převodníku μP . Pro měření je použit NTC termistor s označením B57164K0103. Jeho odpor při teplotě 25 °C je $10\text{ k}\Omega$. Teplotní konstantu B výrobce definoval jako 4300 K (EPCOS AG, 2009).



Obr. 2.10 – Schéma zapojení měřicího obvodu termistoru

2.5 VÝKONOVÝ VÝSTUP

Pro řízení teploty vyhřívané podložky musíme uvažovat hodnoty při maximálním možném akčním zásahu. Napájecí napětí podložky je 12 V a proud při maximálním výkonu přibližně 8 A. Maximální výstupní proud mikroprocesoru ATmega 2560 je však 20 mA na jeden port při 5 V.

Teplotní podložka proto vyžaduje vlastní napájecí zdroj, který je vhodné od řídicí části galvanicky oddělit a následně regulovat. Galvanické oddělení je provedeno pomocí optočlenu s označením PC817 od značky SHARP. Arduino generující PWM signál rozsvěcí LED uvnitř pouzdra optočlenu a tím reguluje otevření tranzistoru na výkonové straně.

Pro výkonové spínání a regulaci vyhřívané podložky je použit MOSFET tranzistor IRLZ44N v pouzdře TO220. Tranzistor je dimenzován na napětí o hodnotě 55 V a proud až 47 A. Jedná se o logic-level tranzistor, což znamená, že reaguje pootevřením již na hodnoty napětí od přibližně 2 V (International Rectifier. Com, nedatováno).

K ochraně MOSFET tranzistoru je paralelně na výstupní svorkovnici připojena dioda, která při odpojení případné indukční zátěže pohltí vzniklou napěťovou špičku. Dioda musí být v závěrném směru dimenzovaná na větší než napájecí napětí. Pro ochranu tranzistoru byla vybrána Schottkyho dioda SB360 s maximálním závěrným napětím 60 V (Bezstarosti, 2012).

Jmenovité hodnoty tepelné podložky je potřeba brát v úvahu i při volbě připojovacích svorkovnic. Pro tyto účely je zvolena svorkovnice DG301-5.0, která je přizpůsobena na jmenovité napětí 250 V, jmenovitý proud 17,5 A a průřez připojovacího vodiče až 1,5 mm² (Degson electronics co., LTD., nedatováno).

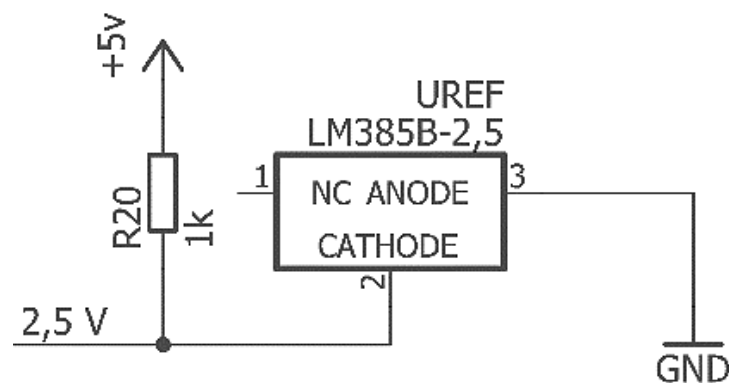
3 REALIZACE HARDWARU

Veškeré měřicí a komunikační zprostředkovávající obvody jsou umístěny na DPS, vyrobené jako shield k Arduinu Mega 2560. Shield také obsahuje galvanicky oddělený výkonový výstup. Připojení teplotních snímačů, displeje a výkonových částí je pomocí svorkovnic, které jsou vhodně rozmístěny, aby nedocházelo k záměně nebo rušení.

3.1 NAPÁJECÍ OBVOD

Napětí referenci napájí integrovaný lineární regulátor Arduina napětím 5 V. Napětí referenci se v zapojení uvedeném na obr. 3.1 chová jako Zenerova dioda.

Pracovní proud I_Z je v rozmezí 20 μA až 20 mA (Texas Instruments Incorporated, 2019).



Obr. 3.1 – Schéma zapojení napětí referenci

Hodnota omezujícího rezistoru se vypočítá jako

$$I_Z = \frac{U_{\text{NAP}} - U_{\text{REF}}}{R_{20}} = \frac{5 - 2,5}{1000} = 0,0025 \text{ A}, \quad (3.1)$$

kde I_Z – pracovní proud napětí referenci, A,

U_{NAP} – napájecí napětí, V,

U_{REF} – referenční napětí, V,

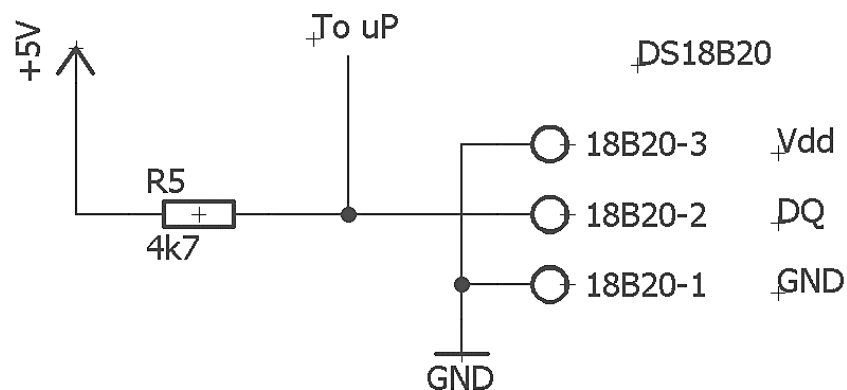
R_{20} – rezistor, Ω .

Maximální hodnota proudu je omezujícím rezistorem o hodnotě 1 k Ω stanovena na 2,5 mA, což je pro napájení proudového zdroje i A/D převodníku dostačující.

3.2 OBVODY PRO MĚŘENÍ TEPLOTY

3.2.1 DS18B20

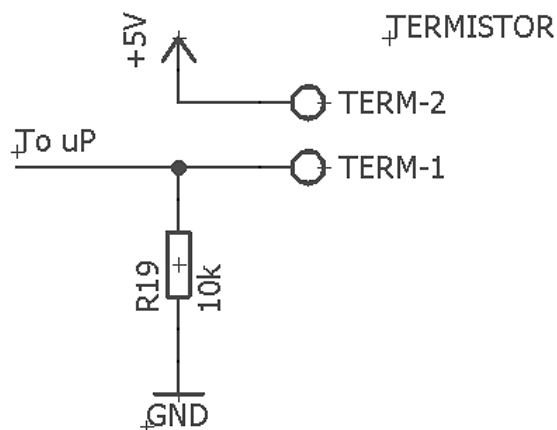
Pro komunikaci teplotního čidla s μP je využita sběrnice 1-Wire vyžadující pouze jeden datový a jeden zemní vodič. Rezistor znázorněný na obr. 3.2 mezi datovým vodičem a napájením slouží pro definici klidového stavu sběrnice. Krajiní piny (1 a 3) svorkovnice jsou na shieldu vzájemně propojeny a uzemněny (Maxim Integrated Products, Inc., 2018).



Obr. 3.2 – Schéma zapojení teplotního čidla DS18B20

3.2.2 NTC termistor

Měření teploty pomocí termistoru je realizováno sériovým spojením termistoru o proměnné hodnotě odporu a rezistoru s pevně daným a známým odporem tak jak uvádí obr. 3.3.



Obr. 3.3 – Schéma zapojení termistoru

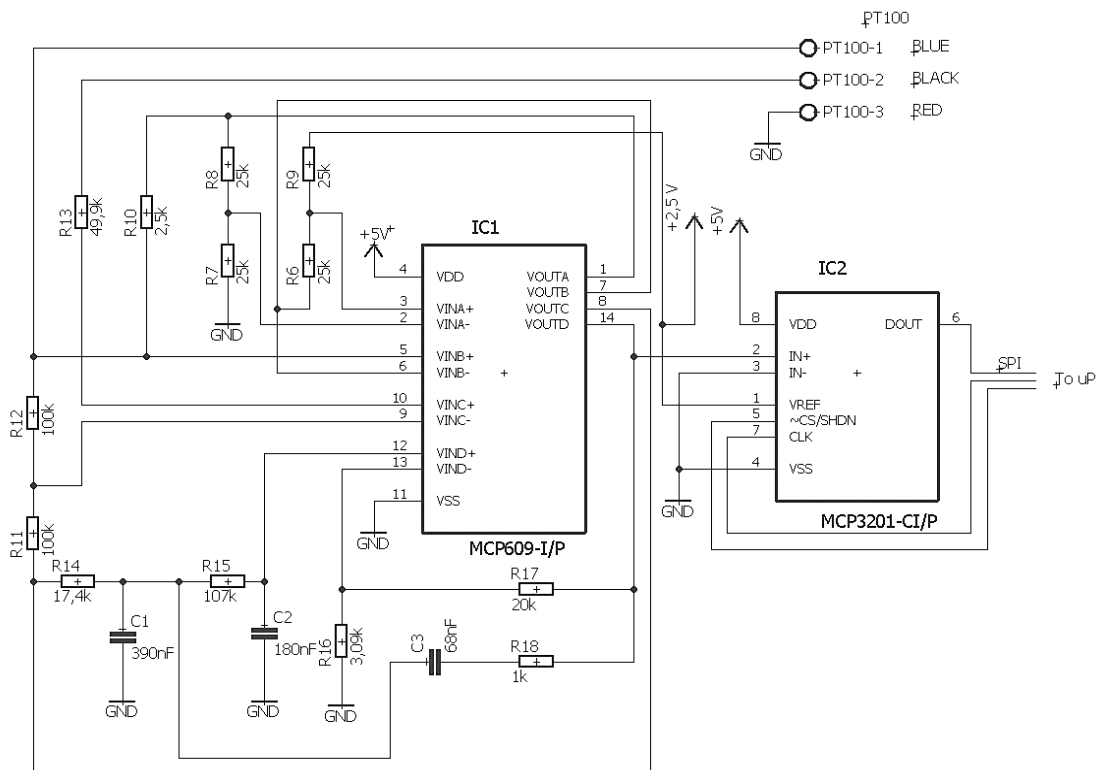
Výstupní napětí odporového děliče je dáno vztahem

$$U_{\text{OUT}} = \frac{U_{\text{NAP}} \cdot R_{\text{TERM}}}{R_{19} + R_{\text{TERM}}}, \quad (3.2)$$

kde U_{OUT} – výstupní napětí napěťového děliče, V,
 U_{NAP} – napájecí napětí, V,
 R_{19} – rezistor, Ω ,
 R_{TERM} – odpor termistoru, Ω (Khatri, 2017).

3.2.3 Pt100

Přenos informace o teplotě platinového snímače je zajištěn měřicím obvodem znázorněným na obr. 3.4. Hodnota o teplotě je přenesena do μP pomocí A/D převodníku podporující SPI.



Obr. 3.4 – Schéma zapojení měřicího obvodu Pt100

Hodnota proudu protékajícího platinovým snímačem teploty lze za předpokladu stejných hodnot rezistorů použitých pro realizaci proudového zdroje (R_6 , R_7 , R_8 , R_9) určit ze vztahu

$$I_{REF} = \frac{U_{REF}}{R_{10}} = \frac{2,5}{2500} = 0,001 \text{ A}, \quad (3.3)$$

kde I_{REF} – proud protékající platinovým snímačem, A,
 U_{REF} – referenční napětí, V,
 R_{10} – referenční rezistor, Ω (Punčochář, 2002).

3.3 OBVOD VÝKONOVÉHO VÝSTUPU

Úbytek napětí na diodě optočlenu stanovený výrobcem při proudu 20 mA je 1,2 V (SHARP Corporation, 2003).

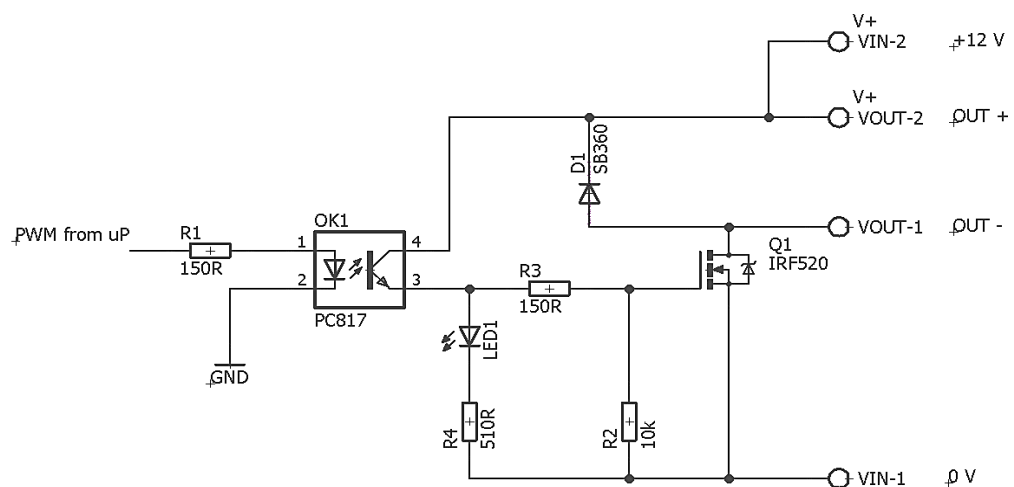
Předřadný rezistor pro diodu optočlenu byl vypočten ze vztahu

$$R_{21} = \frac{U_{NAP} - U_{OPT}}{I_{OPT}} = \frac{5,0 - 1,2}{0,02} = 190 \Omega, \quad (3.4)$$

kde U_{NAP} – napájecí napětí, V,
 U_{OPT} – úbytek napětí na diodě optočlenu, V,
 I_{OPT} – doporučený proud diodou optočlenu, A.

Nejbližší větší hodnota z odporové řady je 220R.

Podobně jako předřadný rezistor diody optočlenu je vypočten předřadný rezistor pro LED indikující míru otevření výkonového tranzistoru. Úbytek napětí červené diody je při proudu 20 mA přibližně 2 V.



Obr. 3.5 – Schéma zapojení výkonové části

Vztah pro výpočet předřadného rezistoru pro LED je definován jako

$$R_4 = \frac{U_{IN} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{12,0 - 2,0}{0,02} = 500 \Omega, \quad (3.5)$$

kde U_{IN} – napájecí napětí soustavy, V,

U_{LED} – úbytek napětí na červené LED, V,

I_{LED} – doporučený proud červenou LED, A.

Nejbližší větší hodnota z odporové řady je 510R.

3.4 NÁVRH DPS

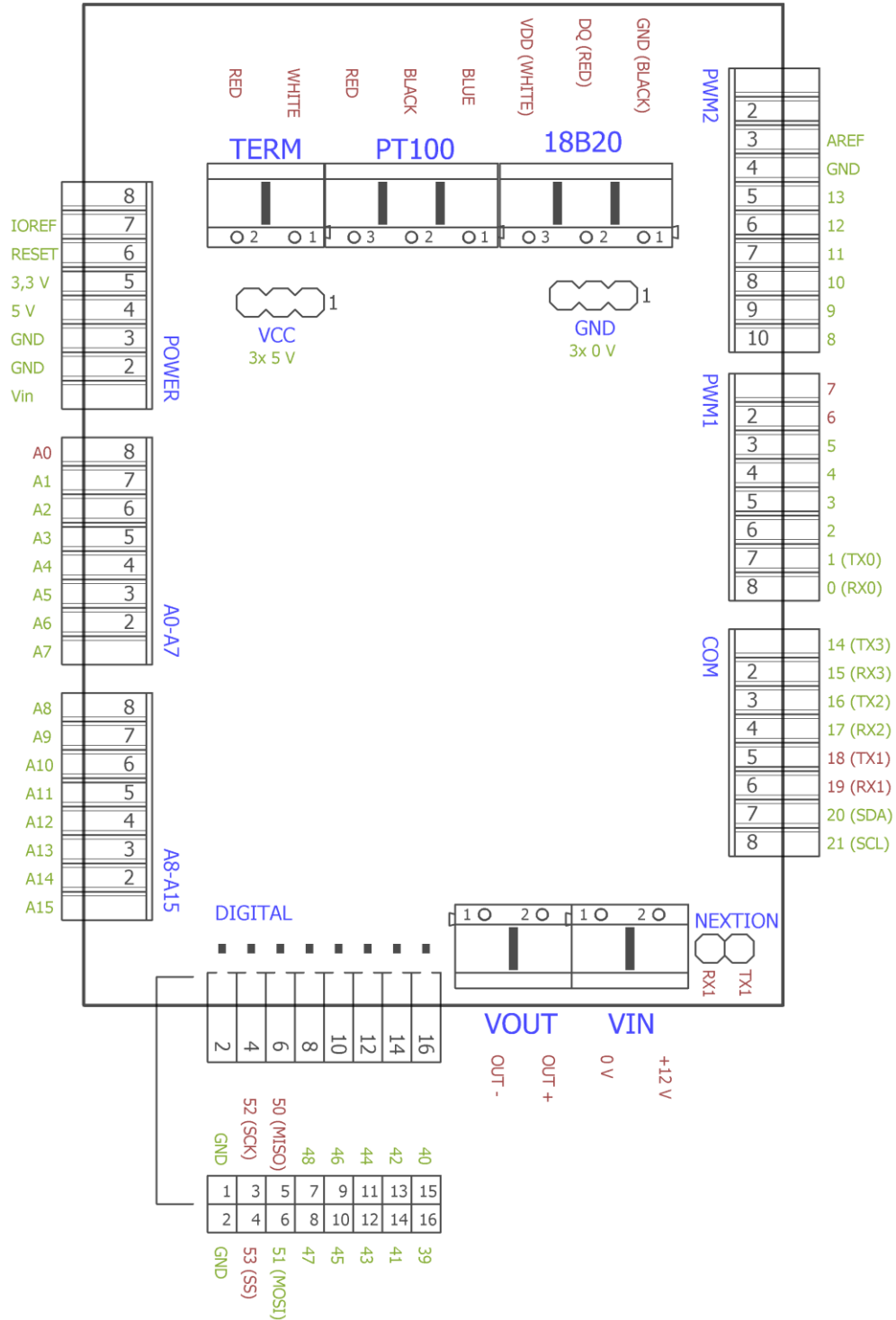
Návrh desky plošných spojů je realizován v softwaru Eagle jako jednostranný o rozměrech 92 mm × 60 mm. Při návrhu bylo zamýšleno propojit s Arduinem co nejvíce pinů pro možné připojení dalších periférií. Seznam připojených komponent je uveden v tab. 3.1.

Na dalších stránkách je zobrazeno schéma rozložení jednotlivých pinů, kompletní schéma zapojení, osazovací plány DPS včetně strany spojů s vylitým polygonem a pohled na osazenou DPS.

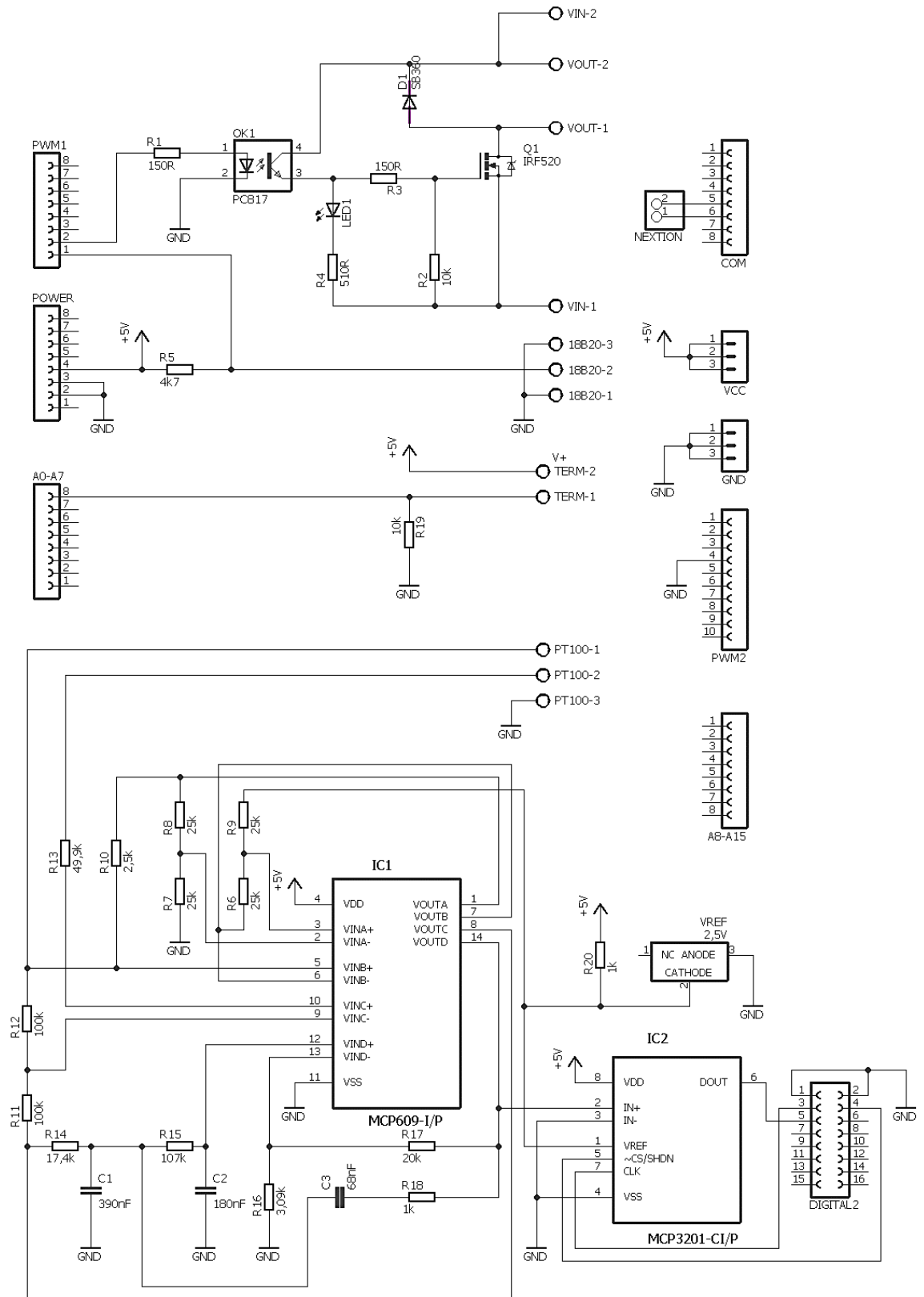
Tab. 3.1 – Seznam komponent připojených k Arduinu

Pin Arduina	Svorkovnice / pin	Periferie	Typ signálu
A0	A0-A7 / 8	Termistor	Analogový vstup
6	PWM1 / 2	Výkonový výstup	Analogový výstup
7	PWM1 / 1	DS18B20	1-Wire
18	COM / 6	Dotykový displej	UART (TX1)
19	COM / 5	Dotykový displej	UART(RX1)
50	DIGITAL / 5	A/D převodník (Pt100)	SPI(MISO)
52	DIGITAL / 3	A/D převodník (Pt100)	SPI(SCK)
53	DIGITAL / 4	A/D převodník (Pt100)	SPI(SS)

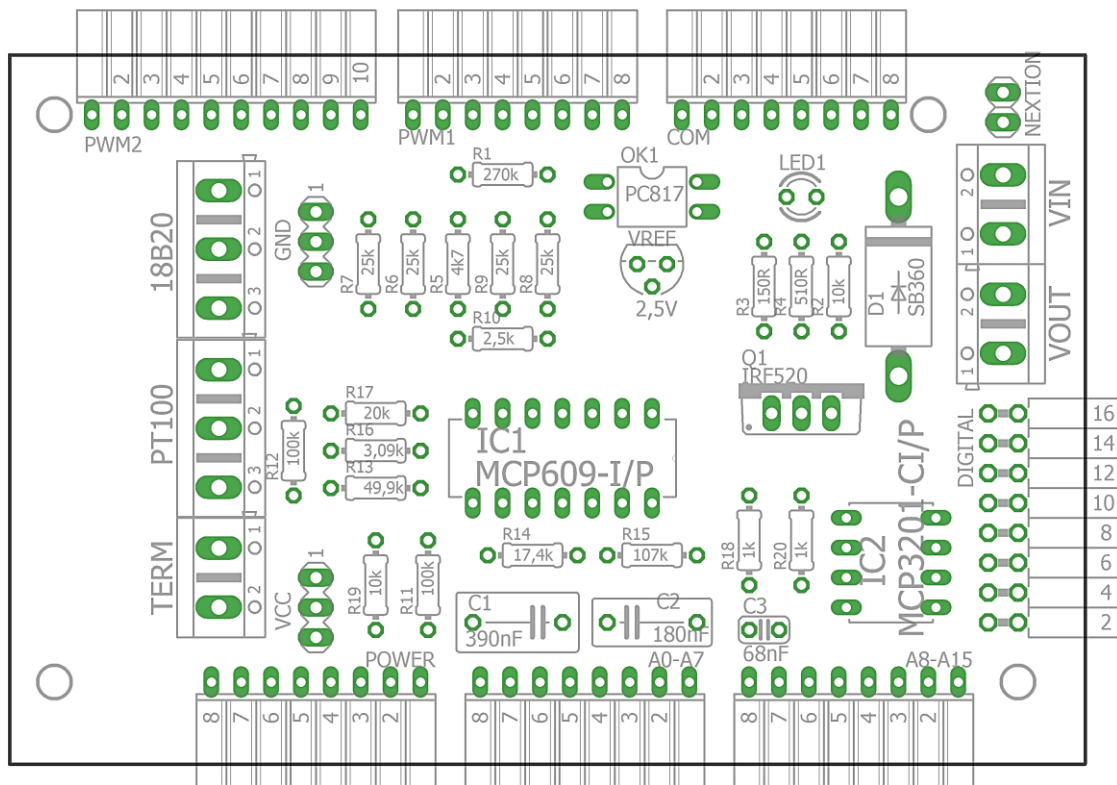
Na obr. 3.6 je znázorněno rozložení pinů a svorkovnic shieldu. Popis jednotlivých pinů je převzat ze samotného Arduina. Červené popisy značí obsazenost pinu nebo svorkovnice. Naopak zelené popisy znázorňují možnost připojení dalších komponentů.



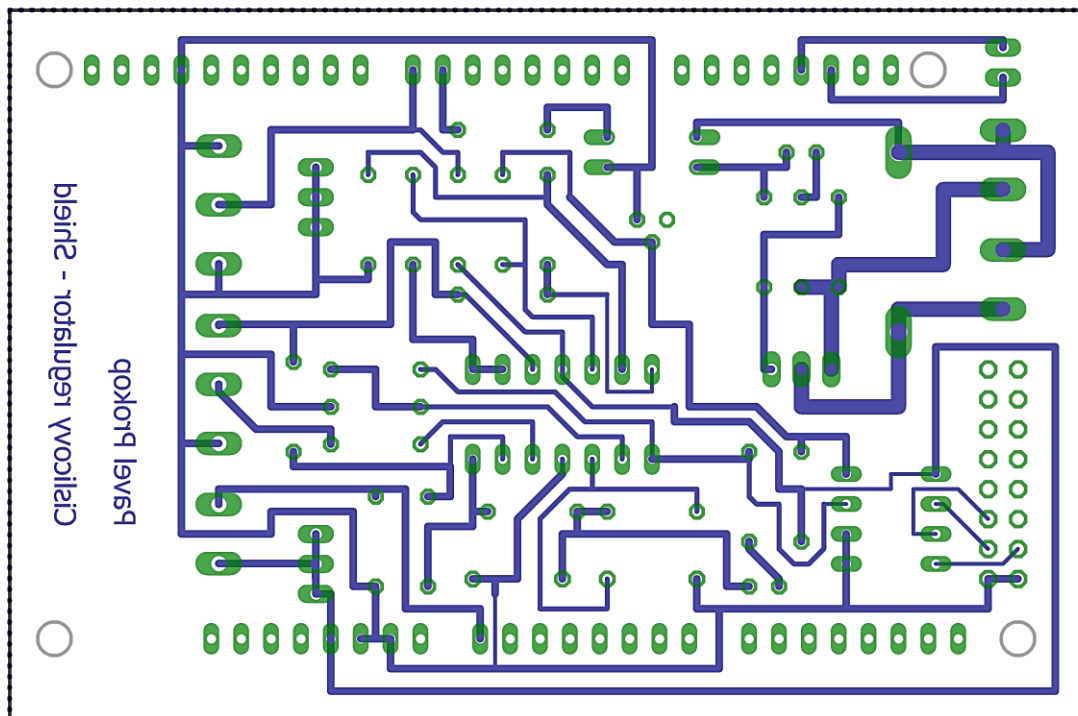
Obr. 3.6 – Schéma rozložení pinů a svorkovnic na shieldu



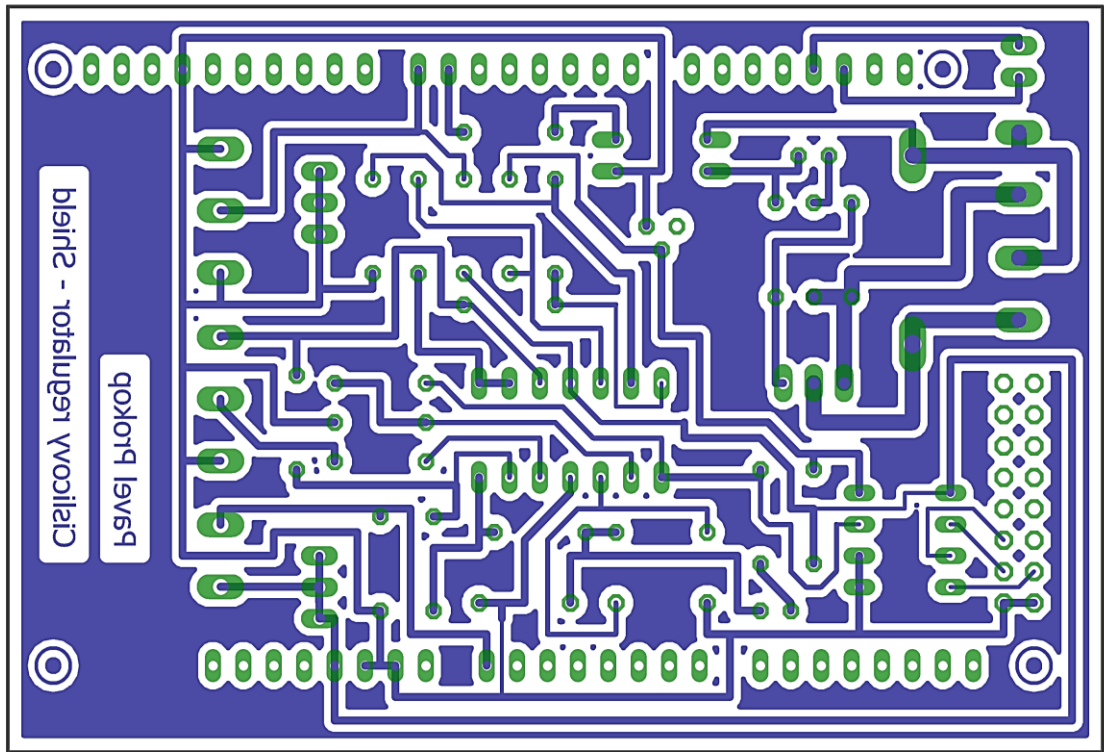
Obr. 3.7 – Schéma zapojení shieldu



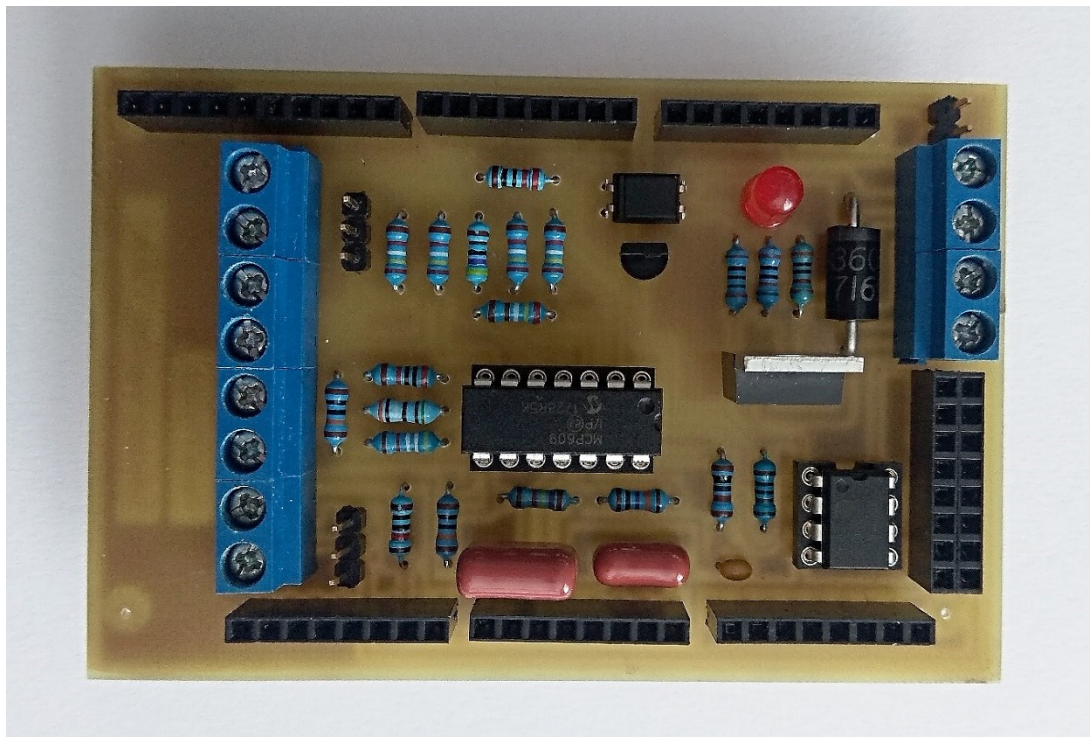
Obr. 3.8 – Rozmístění součástek shieldu (osazovací plán)



Obr. 3.9 – DPS shieldu



Obr. 3.10 – DPS shieldu (vylitý polygon)



Obr. 3.11 – Osazená deska shieldu

4 REALIZACE SOFTWARE

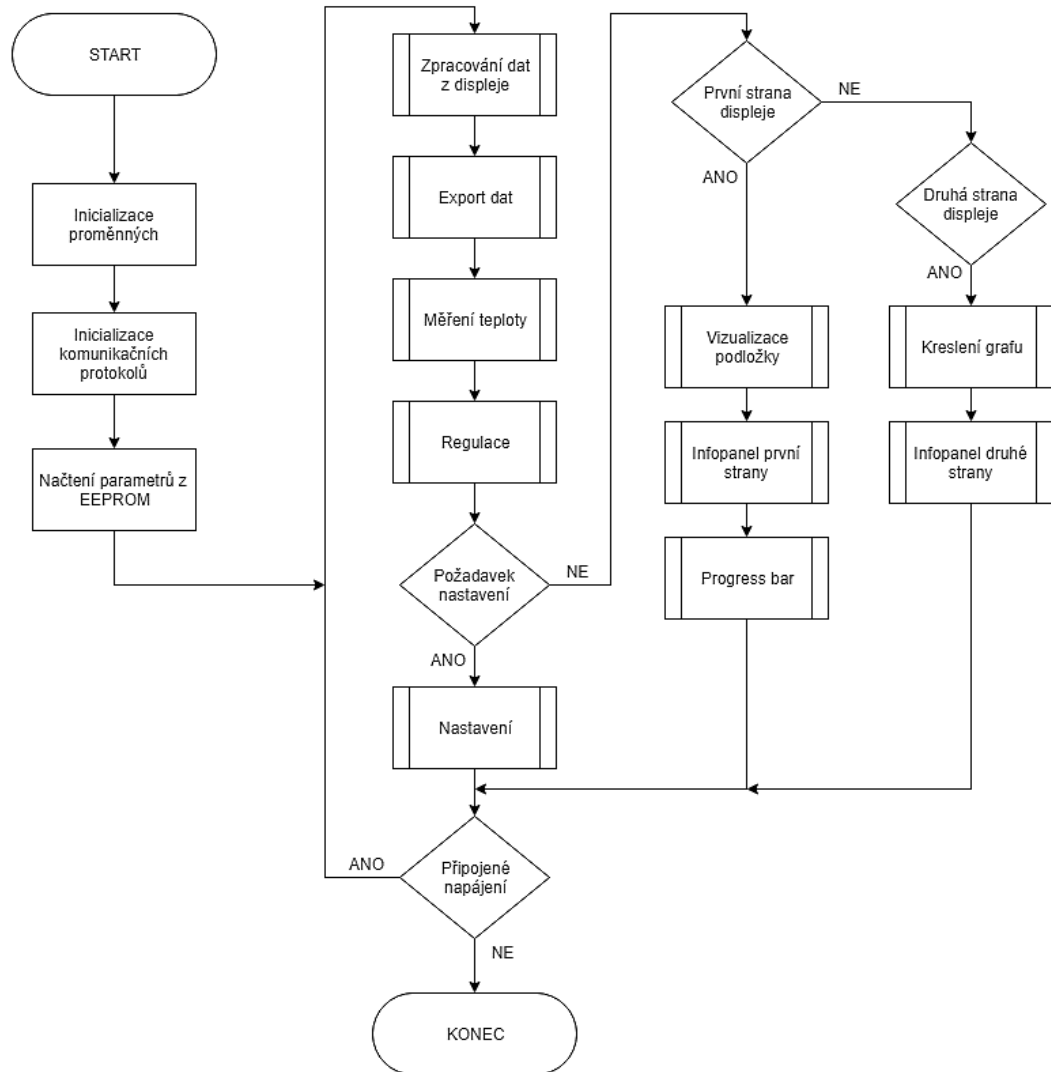
Tato kapitola popisuje princip fungování a výpočtů samotného regulátoru. Dále je blíže popsáno uživatelné prostředí displeje, princip komunikace s PC pro záznam dat a průběh kalibrace odporových teplotních snímačů.

4.1 PROGRAM MIKROPOČÍTAČE

Srdce celého regulátoru tvoří tato část programu, která je vytvořena ve volně dostupném softwaru Arduino IDE ve verzi 1.8.5. Programování probíhá v jazyce C++ za pomoci implementované knihovny Wiring, která zjednodušuje psaní kódu.

Program probíhá v nekonečné smyčce, ze které jsou volané jednotlivé podprogramy, po jejímž provedení dojde k návratu zpět do smyčky hlavního programu. K ukončení dojde až samotným vypnutím. Po prvním spuštění programu dojde k inicializaci všech komunikací, a načtení počátečního nastavení, které je uloženo v paměti EEPROM. Při průchodu smyčkou dochází k volání jednotlivých podprogramů, jejichž spuštění je nějakým způsobem podmíněné. Podmínění jsou typu čas od posledního průchodu, dotek tlačítka nebo stránka displeje. Po proběhnutí podprogramu dojde k návratu do smyčky, která se prochází dál. Celý průběh programu je znázorněn na obr. 4.1.

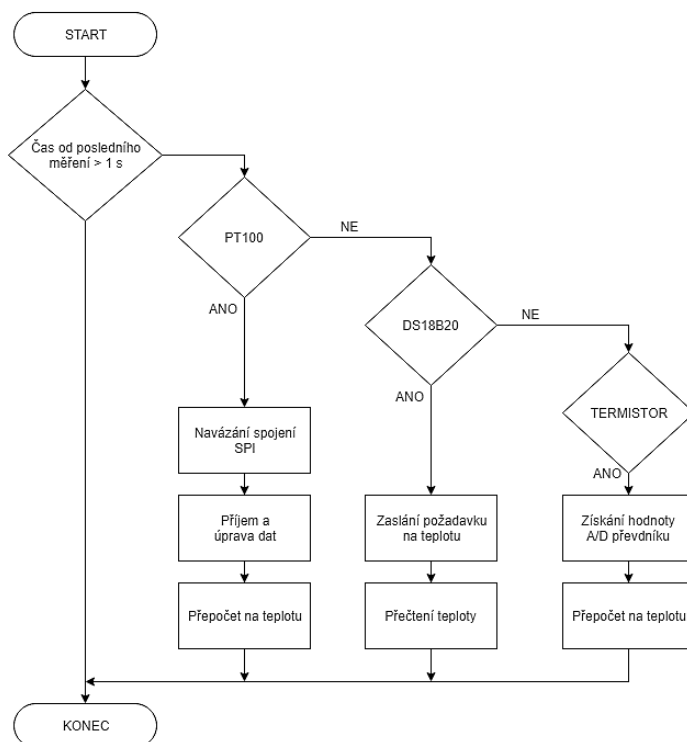
Vybrané podprogramy jsou v podkapitolách popsány blíže s příslušným vývojovým diagramem. První dva podprogramy uvedené na obr. 4.1 zajišťující komunikaci s displejem a aplikací na PC jsou rozsáhlejší a obsahují samostatné komunikační protokoly, které jsou vysvětleny v samostatných kapitolách.



Obr. 4.1 – Vývojový diagram hlavního programu

4.1.1 Měření teploty

Měření teploty probíhá s ohledem na povahu regulované soustavy s periodou 1 s. V případě, že čas od posledního měření je větší než 1 s, dochází k výběru teplotního snímače podle nastavení regulátoru. Každý teplotní snímač má svůj specifický způsob a postup získání údaje o teplotě. Za nejvěrohodnější zdroj údaje o teplotě je považován digitální senzor DS18B20, který je již z výroby zkalibrován. Zbylé dva teplotní snímače jsou zkalibrovány právě za pomoci digitálního senzoru. Algoritmus měření teploty je znázorněn na obr. 4.2.



Obr. 4.2 – Vývojový diagram měření teploty

4.1.2 Regulace

Po získání teploty je na řadě podprogram regulace pro výpočet vhodného akčního zásahu. Vzhledem k tomu, že k měření teploty dochází jednou za vteřinu, je zbytečné provádět výpočet akčního zásahu v intervalech menších, než je právě měření teploty. Jak popisuje obr. 4.3 v první řadě dojde k výpočtu aktuální regulační odchylky a na základě uživatelského nastavení k výběru typu regulace. Po výpočtu akčního zásahu zvoleným regulátorem dochází ke kontrole hodnoty akčního zásahu a případnému omezení.

PSD regulátor vypočte hodnotu akčního zásahu podle přírůstkového tvaru z rovnice (1.4). V případě, že program na základě regulační odchylky a hodnoty minulého akčního zásahu detekuje tvorbu wind-up efektu, dojde k upravení přírůstkového tvaru rovnice do tvaru

$$u(kT) = u[(k-1)T] + r_0 \{e(kT) - e[(k-1)T]\} + r_0 \left\{ \frac{T_D}{T} [e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]] \right\}, \quad (4.1)$$

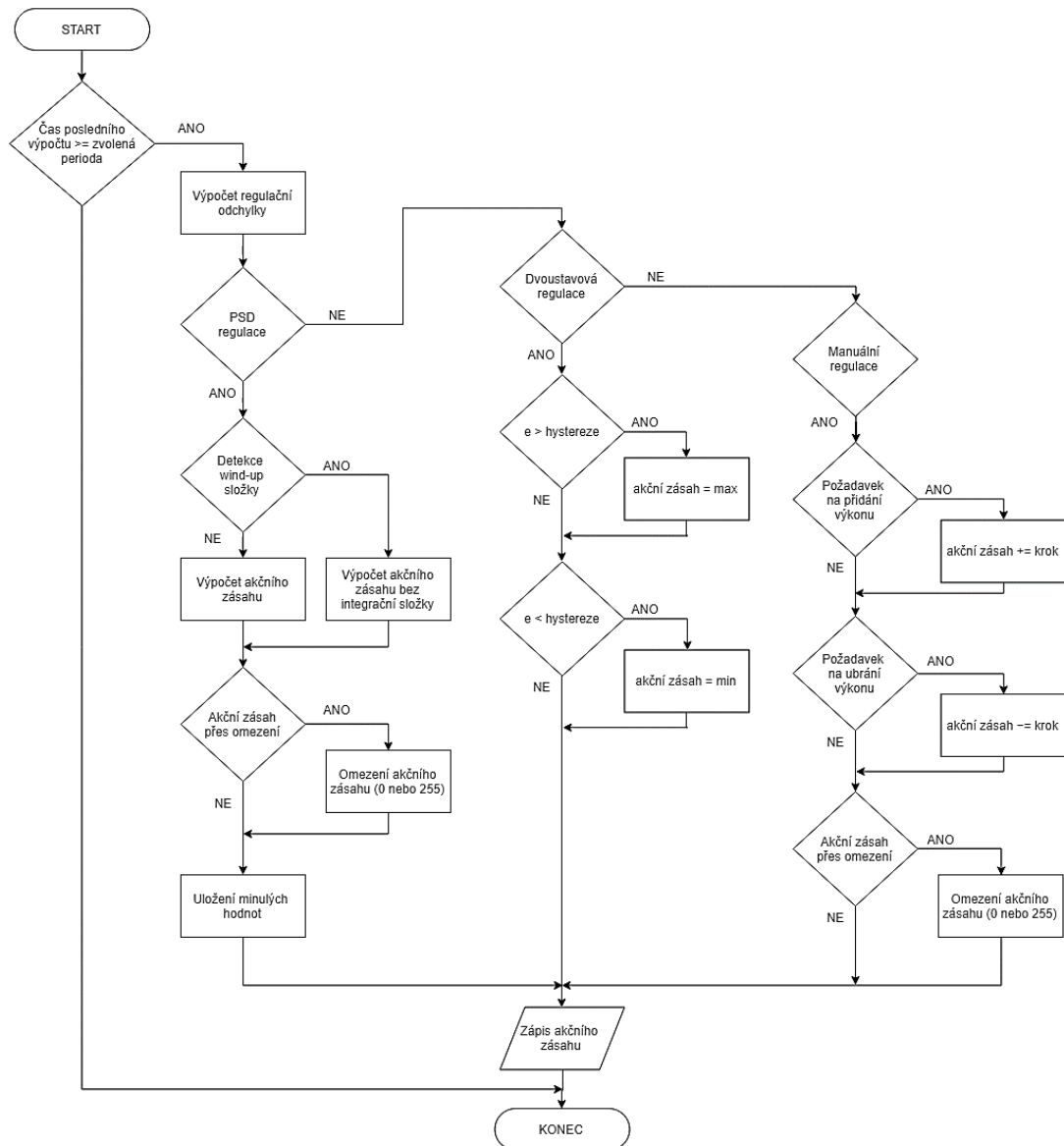
kde k – poměrný diskretní čas,

T – vzorkovací perioda, s,

kT – diskretní čas, s,

u – diskrétní akční veličina, V,
 r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 e – regulační odchylka, $^\circ C$,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

V poslední fázi PSD regulace dojde k zaznamenání nezbytných dat pro další iterace výpočtů.



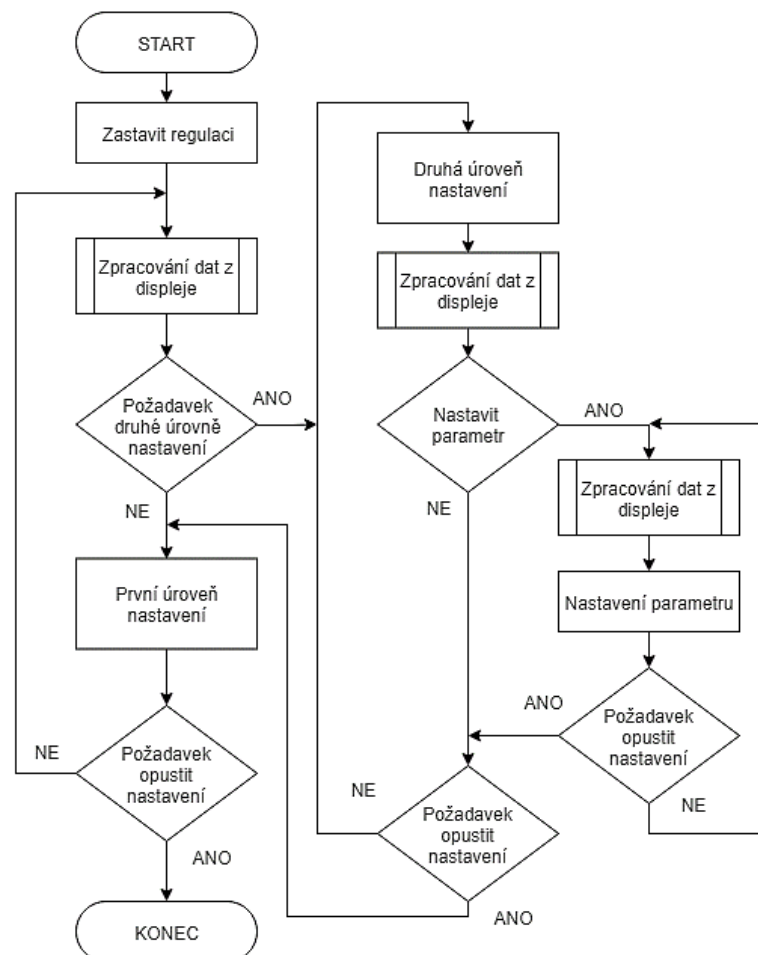
Obr. 4.3 – Vývojový diagram regulace

Dvoustavový regulátor porovnává hodnotu regulační odchylky se zadanou hysterezí a na základě této informace generuje dvě hodnoty akčního zásahu.

V manuálním režimu dochází ke zpracování požadavků od uživatele na dotykovém displeji přičtením nebo odečtením nastaveného kroku k akčnímu zásahu. Akční zásah je zde počítán v procentech.

4.1.3 Nastavení regulátoru

Nastavení regulátoru je dvouúrovňové a pohyb v něm je pomocí čtyř tlačítek simulovaného regulátoru. Každá úroveň menu pracuje ve smyčce, dokud není zaznamenán uživatelský podnět na opuštění nastavovacího režimu, čímž dojde k posunutí v menu o úroveň výše nebo v případě první úrovně menu, návratu do hlavního programu. Kompletní struktura menu je uvedena v uživatelském manuálu, který je přílohou této práce. Základní princip nastavovacího módu popisuje obr. 4.4.



Obr. 4.4 – Vývojový diagram nastavovacího režimu regulátoru

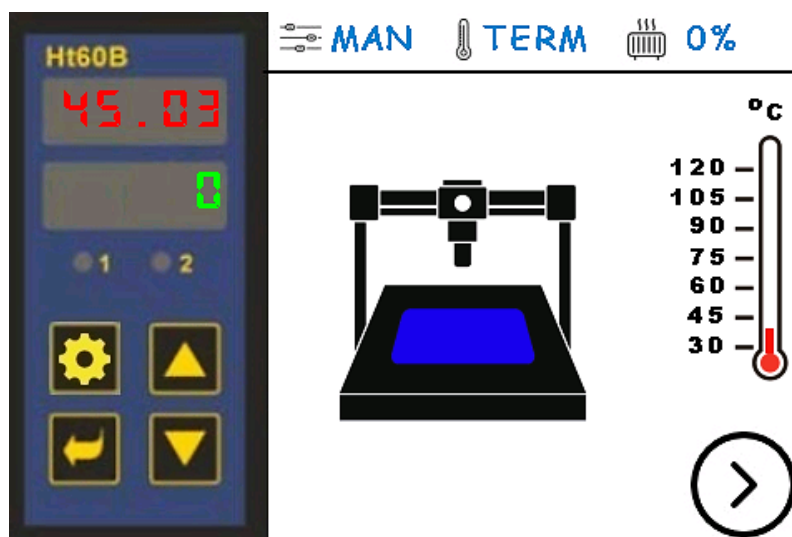
4.2 DOTYKOVÝ DISPLEJ

Tvorba grafického rozhraní pro dotykový displej probíhá v aplikaci Nextion Editor, která je volně dostupná. Editor obsahuje několik komponentů pro tvorbu, kde každý má své nastavitelné vlastnosti. Software pro tvorbu dále umožňuje vložení vlastních grafických prvků (obrázků) a stylů písma. Výstupem editoru je soubor ve formátu .tft. Ten je pomocí SD karty nahrán do paměti displeje.

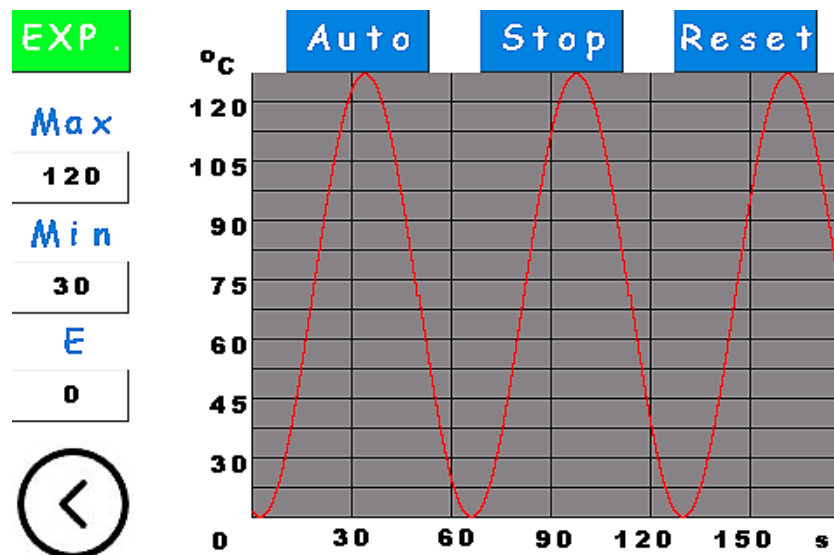
Projekt je tvořen jednotlivými stranami, které obsahují právě jednotlivé komponenty. Každá komponenta má své jedinečné příznaky jako je ID a jméno, pomocí kterých dochází k ovládní. Ke každému objektu je možný přístup pomocí tečkové konvence a příslušné vlastnosti. V případě dotykového podnětu od uživatele reaguje displej zasláním zprávy s příslušnými příznaky objektu a událostí, která nastala. Každý objekt má zpravidla dvě definované události, stránka pak čtyři.

4.2.1 Uživatelské rozhraní

Grafické prostředí číslicového regulátoru je tvořeno dvěma stranami. První strana zobrazena na obr. 4.5 obsahuje emulaci číslicového regulátoru, vizualizaci teplotní podložky, stavovou lištu a orientační teploměr.



Obr. 4.5 – První strana uživatelského rozhraní



Obr. 4.6 – Druhá strana uživatelského rozhraní

Druhá strana je zobrazena na obr. 4.6 je věnovaná k zobrazení regulačních pochodů na grafu. Graf lze provozovat v režimu auto, kdy dochází k automatickému přepočtu parametrů osy a kalkulaci nejlepšího poměru zobrazení. Mimo jiné je zobrazena nejmenší a největší naměřená teplota spolu s aktuální regulační odchylkou. Průběh grafu lze pozastavovat.

Uživatelský manuál obsahující strukturu a popis jednotlivých položek nastavení je uveden v příloze B. Součástí přílohy je i význam jednotlivých informačních ikon a tlačítek.

4.2.2 Komunikace s mikropočítačem

Pro komunikaci mezi displejem a μP je použita sériová komunikace UART o přenosové rychlosti 9600 Bd/s. Veškerá komunikace z displeje do Arduina probíhá událostně. Pro detekci komponenty a události v zasláné zprávě je v μP vytvořena přijímací rutina, která proběhne po jejím zavolání, pokud jsou v zásobníku dostupná nějaká data. Pro identifikaci konce zprávy jsou zaslány tři nastavené bajty (255, 255, 255).

Pro rozlišení událostí slouží první bajt zprávy. Události s číslem prvního bajtu od 0 do 35 jsou vyhrazeny pro chybová hlášení. Pro události s uživatelským podnětem je rezervován rozsah 101 až 254. Výčet základních událostí uvádí tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Seznam vybraných událostí

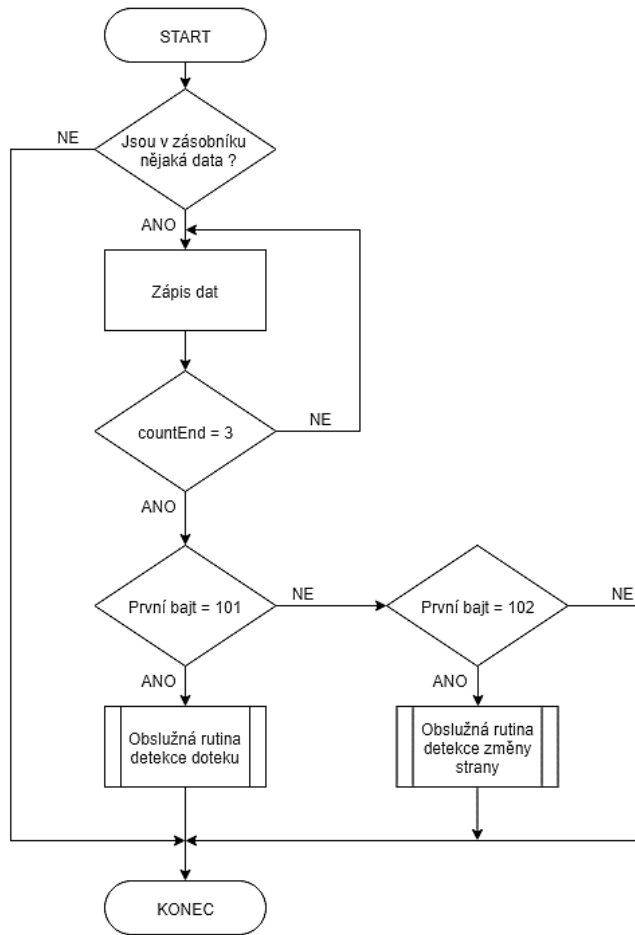
Obsah prvního bajtu	Význam
2	Chybné číslo komponenty
3	Chybné číslo stránky
101	Událost doteku
102	Změna strany (číslo strany)

Za prvním bajtem se pro každou událost objevuje různý počet dalších bajtů, podle toho, kolik informací je potřeba přenést. Příklad formátu zprávy při události doteku je uveden v tab. 4.2.

Tab. 4.2 – Formát zprávy při doteku

Číslo bajtu	Obsah bajtu	Význam
1	101	Událost doteku
2	0	Strana = 0
3	2	ID objektu = 2
4	1	Stisk displeje
5	255	Konec zprávy
6	255	
7	255	

Po zavolání obslužné rutiny pro příjem dat se kontroluje zásobník sériového rozhraní. V případě, že obsahuje data pro zpracování, probíhá zápis do proměnné, dokud není detekován konec zprávy. Dále se rozhoduje na základě prvního bajtu, která obslužná rutina se zavolá. V obslužné rutině uvedené na obr. 4.7 dojde k podrobnému zpracování přijatých dat, jak je uvedeno v tab. 4.2.



Obr. 4.7 – Vývojový diagram příjmu dat z displeje

Pro zasílání dat do displeje je třeba přistupovat k jednotlivým vlastnostem přes zmíněnou tečkovou konvenci. Pro tento účel je v programu μP implementováno několik funkcí pro formátování vstupních parametrů do správného tvaru.

V tab. 4.3 je uveden seznam použitých funkcí pro komunikaci s displejem. Účelem funkce je upravit vstupní parametry předané funkci do takové podoby, kterou je displej schopen zpracovat a odeslat tuto zprávu na sériové rozhraní. Na konci každé funkce je zavolána funkce `send_command`, která na konec formátované zprávy umístí tři nastavené bajty a odešle ji na sériovou linku.

Tab. 4.3 – Funkce pro komunikaci s displejem

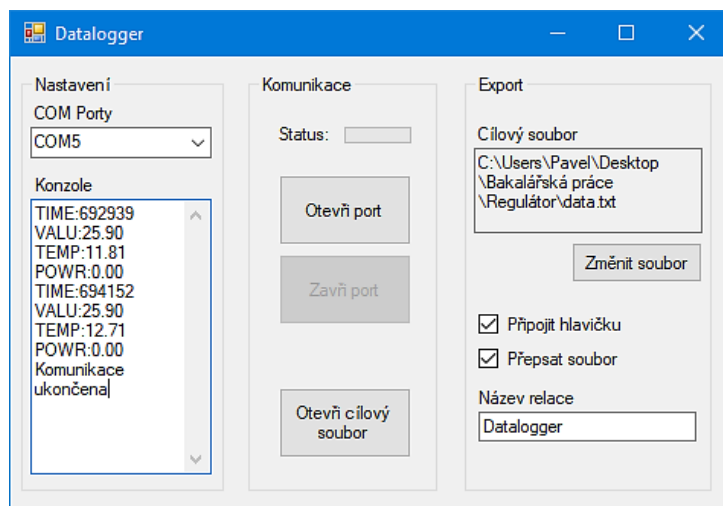
Název funkce	Formát zprávy	Význam
send_command	<zpráva> + 255 + 255 + 255	Odeslání dat na sériovou linku
send_text	<id> + <.txt=> + <text>	Změna textu
send_value	<id> + <.val=> + <hodnota>	Změna číselné hodnoty
send_waveform	<add> + <id> + <kanál> + <hodnota>	Zápis do grafu
clear_waveform	<cle> + <id> + <,> + <kanál>	Smazání grafu
visible	<vis> + <id> + <,> + <hodnota>	Skrytí / zobrazení obrázku

4.3 EXPORT DAT DO PC

Pro záznam dat je vytvořena aplikace v PC napsaná v programovacím jazyku C# prostřednictvím Visual Studia. Přenos dat mezi μ P a PC probíhá po sériové lince UART za pomoci integrovaného převodníku UART/USB a přenos je pouze jednosměrný. Přenosová rychlost je stanovena na 9600 Bd/s. Vysílání dat z μ P probíhá s periodou 1 s a komunikace musí být pro funkčnost aplikace na displeji uživatelsky povolena.

4.3.1 Uživatelské rozhraní

Aplikace uvedená na obr. 4.8 po spuštění disponuje několika ovládacími tlačítky a stavovou konzolí, do které se vypisují přijímaná data, uživatelské pokyny nebo chybová hlášení. Pro úspěšné navázání komunikace je třeba vybrat z nabídky vhodný COM port a zvolit textový soubor ve formátu .txt, do kterého se bude zapisovat. Vybraný soubor lze pro nadcházející zápis upravit přidáním hlavičky obsahující popis jednotlivých sloupců nebo zvolit jeho přepsání. Pro oddělení zaznamenaných dat a lepší orientaci v nich lze jednotlivé relace pojmenovat. Pro následné použití v dalších softwarech je použito oddělení sloupců pomocí tabulátoru a oddělení desetinného čísla desetinnou čárkou.



Obr. 4.8 – Hlavní okno dataloggeru

4.3.2 Komunikační protokol

Pro jednosměrný přenos dat do PC je vytvořen jednoduchý komunikační protokol, který je uveden v tab. 4.4. Protokol je tvořen pětiznakovým identifikátorem pro rozlišení typu dat a za ním následujícími měřeními daty. Data jsou vysílána s periodou 1 s v přesně daném pořadí, což zajišťuje konzistenci dat. Pokud se v zásobníku nacházejí data ke čtení, ověřuje se jejich správnost a pořadí pomocí identifikátoru. V případě, kdy by došlo k zahájení nebo ukončení komunikace uprostřed vysílání a aplikace by zachytila pouze polovinu vysílacích dat, dojde k detekci neúplnosti dat a jejich zahození. K zápisu do souboru dochází až za předpokladu, že jsou přijata veškerá data.

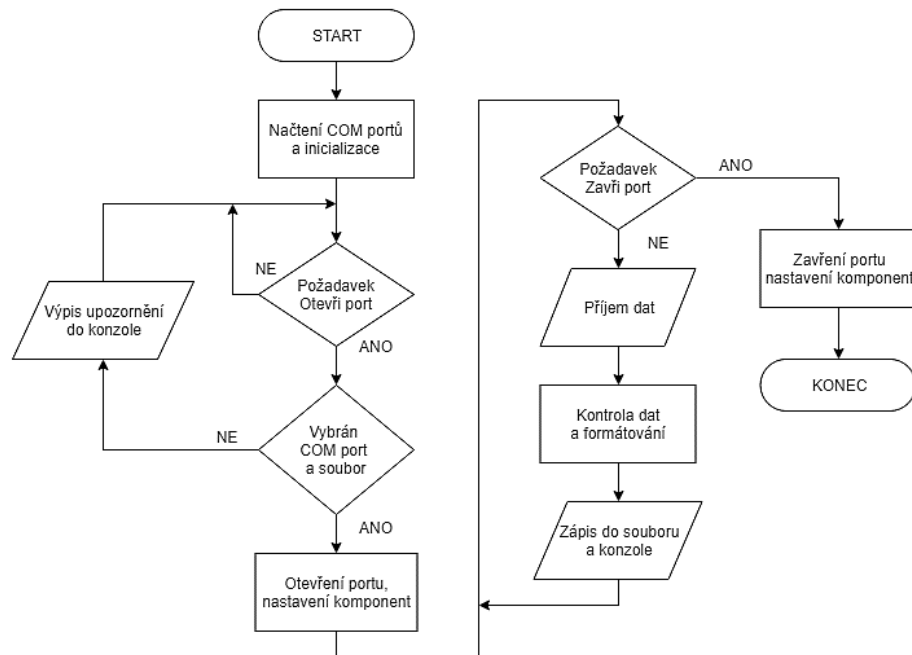
Tab. 4.4 – Komunikační identifikátory a jejich význam

Identifikátor	Význam	Jednotka
TIME:	Čas od spuštění μP	ms
VALU:	Žádaná hodnota	$^{\circ}\text{C}$
TEMP:	Hodnota teploty	$^{\circ}\text{C}$
POWR:	Výkon regulátoru	%

4.3.3 Hlavní program

Vykonávání celého programu je založeno na vzniklých událostech. Po spuštění aplikace dojde k vytvoření seznamů COM portů a inicializace komponent na jejich výchozí vlastnosti. Pro otevření komunikačního portu je potřeba mít vybrán COM port a soubor, do kterého se bude zapisovat. Po otevření portu dojde k nastavení komponenty serialPort a znemožnění

použití některých funkcí aplikace. Na přijetí dat reaguje funkce serialPort_DataReceived, která běží v pomocném vlákne. Pro sjednocení do jednoho vlákna tato funkce obsahuje pouze odkaz na funkci běžící v hlavním vlákne pomocí delegáta. Dále probíhá ověření konzistence dat a zápis do konzole a souboru. Tato přijímací rutina uvedená na obr. 4.9 probíhá, dokud není příjem dat uživatelem ukončen. Po ukončení příjmu dat dojde k inicializaci prvků a opětovnému zpřístupnění všech funkcí aplikace.



Obr. 4.9 – Vývojový diagram zápisu dat

4.4 KALIBRACE TEPLOTNÍCH SNÍMAČŮ

Pro kalibraci teplotních snímačů (Pt100 a termistor) byl použit digitální teplotní senzor DS18B20 v režimu s 12bitovým rozlišením, který je zkalibrován již z výroby. Oba teplotní snímače byly umístěny v těsné blízkosti teplotního senzoru uprostřed vyhřívané podložky. Pomocí manuálního režimu regulátoru byla vyhřívaná podložka ustálena na celkem osmi bodech v pracovním rozsahu 30 °C až 100 °C, z nichž došlo k záznamu teploty z teplotního senzoru a dat získaných z A/D převodníků obou teplotních snímačů. Pro záznam dat byl použit upravený software regulátoru a upravená aplikace pro záznam dat na PC.

Tab. 4.5 – Záznam dat z kalibrace teplotních snímačů

Teplota, °C	Hodnota z A/D převodníku pro termistor	Hodnota z A/D převodníku pro Pt100
30,0	580	1359
40,0	688	1400
49,9	778	1443
60,0	845	1485
70,0	897	1527
80,6	935	1571
89,8	957	1614
100,4	976	1658

Z dat v tab. 4.5 byla pro každý snímač sestrojena křivka, která byla aproximována polynomem. Získaný vztah byl dosazen do řídicího softwaru. U teplotního snímače Pt100 byla potřeba z důvodu velmi malých změn napětí, které A/D převodník vyhodnocoval nejednoznačně, vytvořit digitální filtr. Ten je realizován jako průměr z posledních deseti naměřených hodnot.

5 OVĚŘENÍ FUNKCE

Pro ověření správné činnosti regulátoru bylo provedeno několik experimentálních pokusů a měření. Veškeré experimentální měření probíhalo na vyhřívané podložce, doplněné o skleněnou podložku běžně používanou při 3D tisku. K napájení byl použit zdroj stejnosměrného napětí VOLTCRAFT FSP1138 s napájecím napětím 13,8 V. Okolní teplota při identifikaci a regulaci byla 27 °C.

V první fázi testování došlo k identifikaci topné podložky pomocí Zieglerovy-Nicholsovy metody a zaznamenání přechodové charakteristiky. V další části bylo provedeno a zaznamenáno několik regulačních pochodů, které byly následně vyhodnoceny a porovnány.

5.1 IDENTIFIKACE SOUSTAVY

Nastavení parametrů regulátoru bylo provedeno na základě dvou rozdílných metod. Zieglerova-Nicholsova metoda identifikace využívá myšlenky přivést regulační obvod na mez stability. Druhá metoda spočívá v nastavení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy (Balátě, 2003).

5.1.1 Metoda kritického zesílení

Metoda využívá přivedení regulačního obvodu na mez stability (kritický stav). To je provedeno zapojením regulátoru pouze s proporcionální složkou (derivační a integrační je potlačena). Obvod je do kritického stavu přiveden postupným zvyšováním proporcionální složky regulátoru až do chvíle, kdy obvod začne kmitat s konstantní amplitudou. Ve chvíli, kdy dojde k přivedení na mez stability, se odečte hodnota proporcionální složky regulátoru (kritické zesílení) a periody kmitu (kritická perioda), ze kterých se vypočte nastavení parametrů regulátoru. Pro výpočet parametrů se vychází z tab. 5.1.

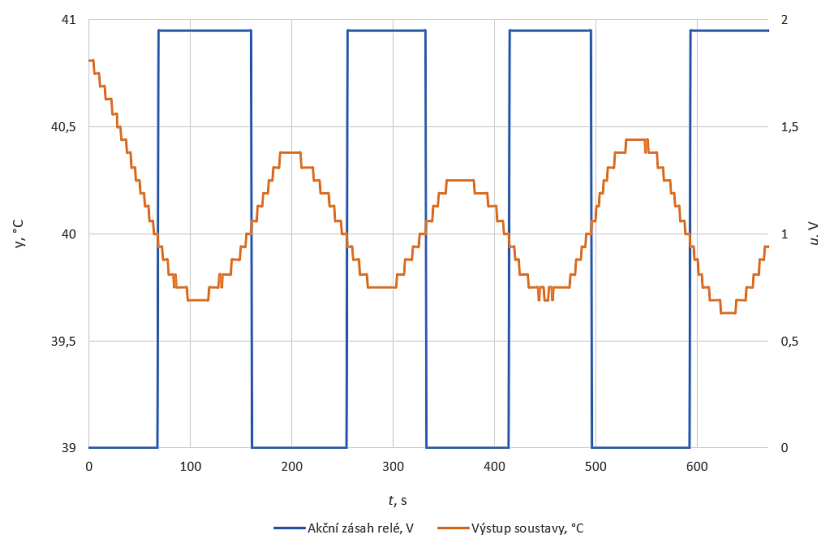
Tab. 5.1 – Nastavení regulátoru z kritických hodnot

Typ regulátoru	r_0	T_I	T_D
P	$0,5 r_{0k}$	–	–
PI	$0,45 r_{0k}$	$0,83 T_{0k}$	–
PD	$0,5 r_{0k}$	–	$0,05 T_{0k}$
PID	$0,6 r_{0k}$	$0,5 T_{0k}$	$0,12 T_{0k}$

kde r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s,
 r_{0k} – kritické zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 T_{0k} – kritická perioda, s (Balátě, 2003).

Z důvodu časové náročnosti při hledání meze stability nahrazuje proporcionální regulátor relé. Relé podle polarity regulační odchylky generuje akční zásah $+M$ nebo 0 . Výstupem soustavy bude sinusový signál s amplitudou a .

Pro změření kritických parametrů byl regulátor nastaven do režimu dvoustavové regulace s nulovou hysterezí. Průběh z identifikace je znázorněn na obr. 5.1.



Obr. 5.1 – Graf záznamu dat při identifikaci metodou kritických parametrů

Kritické zesílení bylo získáno ze vztahu

$$r_{0k} = \frac{2M}{\pi a} = \frac{2 \cdot 1,95}{\pi \cdot 0,34} = \frac{3,90}{1,08} = 3,65 \text{ V} \cdot ^\circ C^{-1} \quad (5.1)$$

kde r_{0k} – kritické zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 M – akční zásah relé, V,
 a – amplituda výstupní veličiny, $^\circ C$ (Balátě, 2003).

Hodnoty získané z identifikace pomocí relé ve zpětné vazbě uzavřeného regulačního obvodu jsou shrnuty v tab. 5.2.

Tab. 5.2 – Hodnoty získané pomocí metody kritického zesílení

Veličina	Hodnota	Jednotka
M	1,95	V
a	0,34	°C
r_{0k}	3,65	V·°C ⁻¹
T_{0k}	171	s

kde M – akční zásah relé, V,
 a – amplituda výstupní veličiny, °C,
 r_{0k} – kritické zesílení regulátoru, V·°C⁻¹,
 T_{0k} – kritická perioda, s.

Ze zjištěných kritických hodnot a za pomoci tab. 5.1 byly vypočteny parametry pro seřízení regulátoru. Tyto parametry jsou uvedeny tab. 5.3.

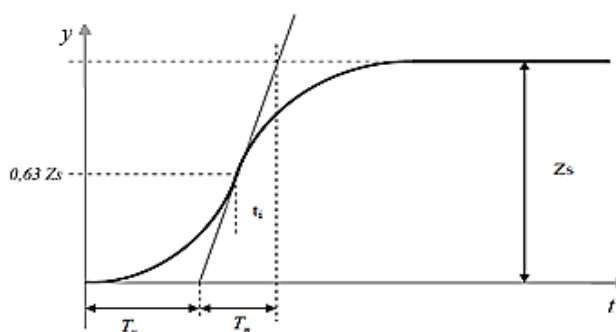
Tab. 5.3 – Parametry regulátoru získané pomocí metody kritického zesílení

Typ regulátoru	r_0	T_I	T_D
PID	2,19	85,50	20,52

kde r_0 – zesílení regulátoru, V·°C⁻¹,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

5.1.2 Metoda přechodové charakteristiky

Přechodová charakteristika je definována jako časová odezva na jednotkový skok při nulových počátečních podmínkách (Balátě, 2003).



Obr. 5.2 – Přechodová charakteristika soustavy vyššího řádu

Hodnoty pro nastavení regulátoru jsou získány odečtením parametrů (doby náběhu, doby průtahu a zesílení soustavy) z přechodové charakteristiky jako je tomu na obr. 5.2 a dosazením do tab. 5.4.

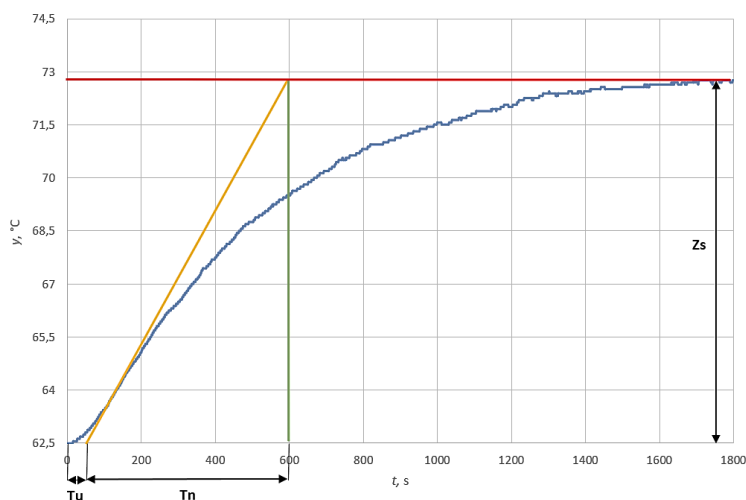
Tab. 5.4 – Nastavení regulátoru pomocí přechodové charakteristiky

Typ regulátoru	r_0	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 r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s,
 T_n – doba náběhu, s,
 T_u – doba průtahu, s,
 Z_s – zesílení soustavy, $^\circ C \cdot V^{-1}$.

Zesílení soustavy je určeno jako rozdíl ustálené teploty podložky po skokové změně a ustálené teploty podložky před skokovou změnou, podělený rozdílem napětí po skokové změně a před ní. Doba náběhu a průtahu je určena pomocí sestrojene tečny v inflexním bodě přechodové funkce. Inflexní bod je bod, kde dochází ke změně konvexní funkce na konkávní. U sestrojene tečny se zkoumají body, kdy dojde k protnutí tečny s horizontální časovou osou a kdy dojde k protnutí tečny s pomocnou přímkou, sestrojenou na základě ustálené výstupní hodnoty po skokové změně akčního zásahu.

V tomto případě byla přechodová charakteristika zobrazená na obr. 5.3 zaznamenána z ustáleného stavu podložky ($62,5 \text{ }^\circ C$) při $3,88 \text{ V}$ skokovou změnou akčního zásahu na $5,22 \text{ V}$. Teplota podložky po skokové změně se ustálila na hodnotě $72,8 \text{ }^\circ C$.



Obr. 5.3 – Graf přechodové charakteristiky

Hodnoty určené z přechodové charakteristiky soustavy (doba náběhu, doba průtahu a zesílení soustavy) vedoucí k nastavení regulátoru jsou uvedeny v tab. 5.5.

Tab. 5.5 – Hodnoty získané z přechodové charakteristiky

Veličina	Hodnota	Jednotka
T_u	48,0	s
T_n	547,0	s
Z_s	7,6	$^{\circ}\text{C}\cdot\text{V}^{-1}$

kde T_n – doba náběhu, s,
 T_u – doba průtahu, s,
 Z_s – zesílení soustavy, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{V}^{-1}$.

Na základě hodnot odečtených z přechodové charakteristiky a tab. 5.4 byly vypočteny parametry pro nastavení regulátoru, které shrnuje tab. 5.6.

Tab. 5.6 – Parametry regulátoru získané pomocí metody kritického zesílení

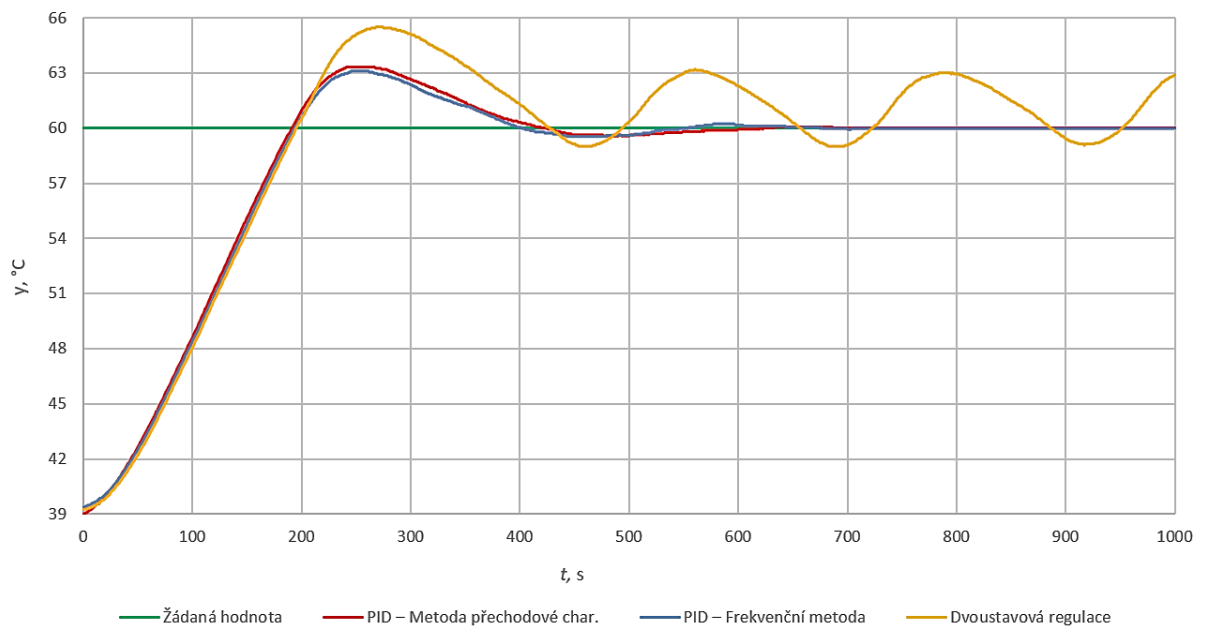
Typ regulátoru	r_0	T_I	T_D
PID	1,86	96,0	24,0

kde r_0 – zesílení regulátoru, $V \cdot ^\circ C^{-1}$,
 T_I – integrační časová konstanta, s,
 T_D – derivační časová konstanta, s.

5.2 REGULAČNÍ POCHODY

Na základě identifikace soustavy, díky které byly zjištěny vhodné parametry pro seřízení regulátoru, došlo k zaznamenání regulačních pochodů. Regulační pochody byly zaznamenány z ustálené teploty $39\text{ }^\circ\text{C}$ na žádanou hodnotu $60\text{ }^\circ\text{C}$. Průběh pochodů znázorňuje obr. 5.4.

Do grafu je pro porovnání zahrnuta i dvoustavová regulace s nulovou hysterezí a maximálním akčním zásahem. Ta vytváří největší překmit a na žádané hodnotě se nikdy neustálí, což potvrzuje předpoklady z teorie. Při srovnání PID regulátorů nastavených pomocí dvou rozdílných metod byly zaznamenány téměř podobné regulační pochody. To potvrzuje správnost identifikace.



Obr. 5.4 – Graf porovnání regulačních pochodů

Výše uvedené porovnání nastavení regulátorů včetně dvoustavové regulace potvrzuje i podrobnější srovnání regulačních pochodů, které jsou uvedeny v tab. 5.7.

Tab. 5.7 – Porovnání kvality regulačních pochodů

Typ regulátoru	Maximální překmit, %	Doba regulace, s	Trvalá regulační odchylka, °C
Regulátor nastavený frekvenční metodou	5,2	266	0
Regulátor nastavený z přechodové char.	5,5	284	0
Dvoustavový regulátor	9,2	572	–

6 ZÁVĚR

Použití regulátoru s možností přesně nastavit teplotu vyhřívané podložky pomůže ke zvýšení kvality tisknutých objektů a zkrácení doby výhřevu. Regulátor také aktivně potlačuje případné externí jevy (poruchy) působící na podložku, jako je změna teploty v místnosti během tisku. Regulátor lze za splnění určitých podmínek použít i pro regulaci dalších teplotních soustav.

V průběhu vývoje konstrukce regulátoru byl z důvodu nedostatečného počtu sériových komunikačních portů zaměněn model vývojové platformy Arduino Uno za Arduino Mega 2560. Tento požadavek vznikl kvůli možnosti zápisu dat přímo do PC místo původně plánovaného zápisu dat na paměťovou SD kartu. Později se také ukázalo, že program zajišťující funkci regulátoru by se do modelu vývojového kitu Arduino Uno nevešel z důvodu malého rozsahu programové paměti.

Z provedených měření je patrné, že dvoustavová regulace vykazuje v uzavřeném regulačním obvodu trvalou regulační odchylku a její kvalita je tím v porovnání s PID regulátorem výrazně horší. Měření také potvrdila správnost identifikace soustavy pro seřízení regulátoru. Výsledné regulační pochody pro sadu použitých regulátorů vykazují značnou shodu, avšak pro další využití je vhodné nastavení parametrů jemně uživatelsky upravit, aby nedocházelo k nežádoucím překmitům.

Budoucí vývoj projektu by se měl dále zabývat rozšířením funkcí regulátoru, např. autodetekce nastavení parametrů regulátoru. Ke zlepšení by také vedlo rozšíření komunikace s PC na obousměrnou, což by umožnilo přímé ovládání regulátoru z aplikace na PC. Dalším přiblížením k průmyslově vyráběným regulátorům by byla možnost rozšíření komunikace o standardní komunikační rozhraní, např. sběrnice Modbus.

POUŽITÁ LITERATURA

- 3D tisk: Vše, co jste chtěli vědět.* 2018. [online]. FutLab.cc. Praha. [cit. 2019-03-06].
Dostupné z: <https://futlab.cc/3d-tisk/>.
- Arduino Mega 2560 Rev3.* [on-line]. Arduino. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na:
<https://store.arduino.cc/mega-2560-r3>.
- BAKER, B. 2008. *Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits.* [on-line]. Microchip Technology Inc. 8 s. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00687c.pdf>.
- BALÁTEĚ, J. 2003. *Automatické řízení.* Praha: BEN – technická literatura. 663 s.
ISBN 80-7300-020-2.
- BEZSTAROSTI, J. 2012. *Tranzistor jako spínač.* [on-line]. RoboDoupě. [cit. 2019-03-28].
Dostupné na: <http://robodoupe.cz/2012/tranzistor-jako-spinac/>.
- Degson electronics co., LTD.* [on-line]. Degson. 1 s. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na:
<https://www.tme.eu/cz/Document/72ad9f371bb0c16572574ac47903b3a1/DG301-5.0.pdf>.
- DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer.* [online]. Maxim Integrated, 20 s. [cit. 2019-03-29]. Dostupné z:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- DUDKA, M. 2016. *SPI rozhraní.* [on-line]. tajned.cz. [cit. 2019-03-27]. Dostupné na:
<http://www.tajned.cz/2016/12/spi-rozhrani/>.
- Externí sériové sběrnice SPI a I²C.* 2008. [on-line]. Root.cz. Praha. [cit. 2019-03-27].
Dostupné na: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/>.
- GUNNAR, K. 2014. *Automatizace a automatizační technika: systémové pojetí automatizace.*
Brno: Computer Press, 248 s. ISBN 978-80-251-4106-9.
- CHLEBNÝ, J. 2009. *Automatizace a automatizační technika* 3. 4. vyd. Brno: Computer Press,
304 s. ISBN 978-80-251-2523-6.
- IRLZ44N.* [on-line]. International Rectifier 9 s. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na:
<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlz44n.pdf>.
- Jednoduchý PID regulátor.* 2006. [online]. ZPA Nová Paka, a.s. Nová Paka. [cit. 2019-03-26].
Dostupné z: <https://www.zpanp.cz/files/doc/jednoduchy-pid-regulator-24-4.pdf>.
- KHATRI, P. 2017. *Interfacing Thermistor with Arduino to Measure and Display Temperature on LCD.* [on-line]. CircuitDigest. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na:
<https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-thermistor-interfacing-code-circuit>.
- LMx85-2.5, LM385B-2.5 Micropower Voltage References.* [on-line]. Texas Instruments. Dallas. [cit. 2019-03-29]. Dostupné na: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm385-2.5.pdf>.
- MALÝ, M. 2004. *Sběrnice 1-Wire™.* [on-line]. HW.cz. Praha. [cit. 2019-03-27]. Dostupné na:
<https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/sbernice-1-wiretm.html>.
- Nextion Basic HMI Display.* [on-line]. Nextion. Shenzhen. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na:
<https://nextion.itead.cc>.
- Nextion editor.* 2016. [on-line]. ITEAD Wiki. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na:
https://www.itead.cc/wiki/Nextion_Editor_Quick_Start_Guide.

- NOVOZÁMSKÝ, A. 2008. *Asynchronní 8-bitový přenos*. [on-line]. Wikipedie. [cit. 2019-03-27]. Dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/USART>.
- NTC thermistors for temperature measurement*. 2009. [on-line]. EPCOS 24 s. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.118-010.1.pdf>.
- PC817X Series*. 2003. [on-line]. SHARP Corporation. 15 s. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na: <https://www.farnell.com/datasheets/73758.pdf>.
- POHOŘELSKÝ, Z. 2016. *3D tisk – Volba materiálu a příprava podložky*. [online]. Adeon CZ s.r.o., Inventor 3D blog. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-volba-materialu/>.
- PRO EC44*. 2014. [online]. PROFESS, spol. s r.o. Plzeň. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/PRO%20EC44.pdf>.
- Protokol Serial Input Output*. [on-line]. Electronic Note. [cit. 2019-03-27]. Dostupné na: <http://myelectronicnote.blogspot.com/2018/04/protokol-serial-input-output.html>.
- PRŮŠA, J. 2019. *Průvodce materiály*. [online]. Prusa Research s.r.o. Praha. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy>.
- PUNČOCHÁŘ, J. 2002. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN – technická literatura. 496 s. ISBN 80-7300-059-8.
- SCHLEGEL, M. 2001. *Průmyslové PID regulátory: Teorie pro praxi*. [online]. Fakulta aplikovaných věd ZČU v Plzni, katedra kybernetiky, ZAT a.s. Příbram. 26 s. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://zcu.arcao.com/kky/zky/Prago1.pdf>.
- SVOBODA, A. 2018. *Vše o napájení Arduina*. [online]. Arduino návody, Havlíčkův Brod. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na: <https://navody.arduino-shop.cz/technikuv-blog/napajeni-arduina.html>.
- ŠPRINGL, V. 2004. *Měření teploty – polovodičové odporové senzory teploty*. [on-line]. HW server s.r.o., Praha. [cit. 2019-03-28]. Dostupné na: www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html.
- UART*. [on-line]. src.athaj.cz. [cit. 2019-03-27]. Dostupné na: <http://src.athaj.cz/teaching/rev/uart>.
- ŠČEVÍK, P. 2007. *Číslicová regulace*. Diplomová práce. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení. Vedoucí: M. Vítečková. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/>.
- VODA, Z. 2017. *Průvodce světem Arduina*. 2. Vyd. Bučovice: Martin Stříž, 240 s. ISBN 978-80-87106-93-8.

PŘÍLOHY

A – CD

B – Uživatelský manuál

Příloha k bakalářské práci

Číslicový regulátor

Pavel Prokop

CD

OBSAH

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF.
- 2 Úplný zdrojový kód aplikace mikropočítače, aplikace pro záznam dat na PC a grafické prostředí pro displej.
- 3 Výrobní dokumentace zařízení (schéma zapojení a návrh desky plošných spojů).
- 4 Soubor s naměřenými a zpracovanými daty v prostředí Excel.

Příloha k bakalářské práci

Číslicový regulátor

Pavel Prokop

**UŽIVATELSKÝ MANUÁL
OVLÁDÁNÍ REGULÁTORU**

OBSAH

	Seznam ilustrací	B – 3
	Seznam tabulek	B – 4
	ÚVOD	B – 5
1	ZAPOJENÍ.....	B – 6
2	OVLÁDÁNÍ REGULÁTORU	B – 7
2.1	Přehled nastavovacích úrovní	B – 8
3	UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ.....	B – 10
3.1	Dotykový displej	B – 10
3.2	Aplikace pro záznam dat.....	B – 12
4	SPECIFIKACE REGULÁTORU	B – 13

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Rozložení svorkovnic shieldu.....	B – 6
Obr. 2.1 – Popis panelu regulátoru	B – 7
Obr. 2.2 – Struktura nastavení regulátoru.....	B – 8
Obr. 3.1 – Popis hlavní stránky displeje	B – 10
Obr. 3.2 – Popis druhé stránky displeje	B – 11
Obr. 3.3 – Okno aplikace	B – 12
Obr. 3.4 – Ukázka ze zápisu dat do souboru	B – 12

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 – Přehled nastavitelných parametrů.....	B – 9
Tab. 4.1 – Parametry regulátoru	B – 13

ÚVOD

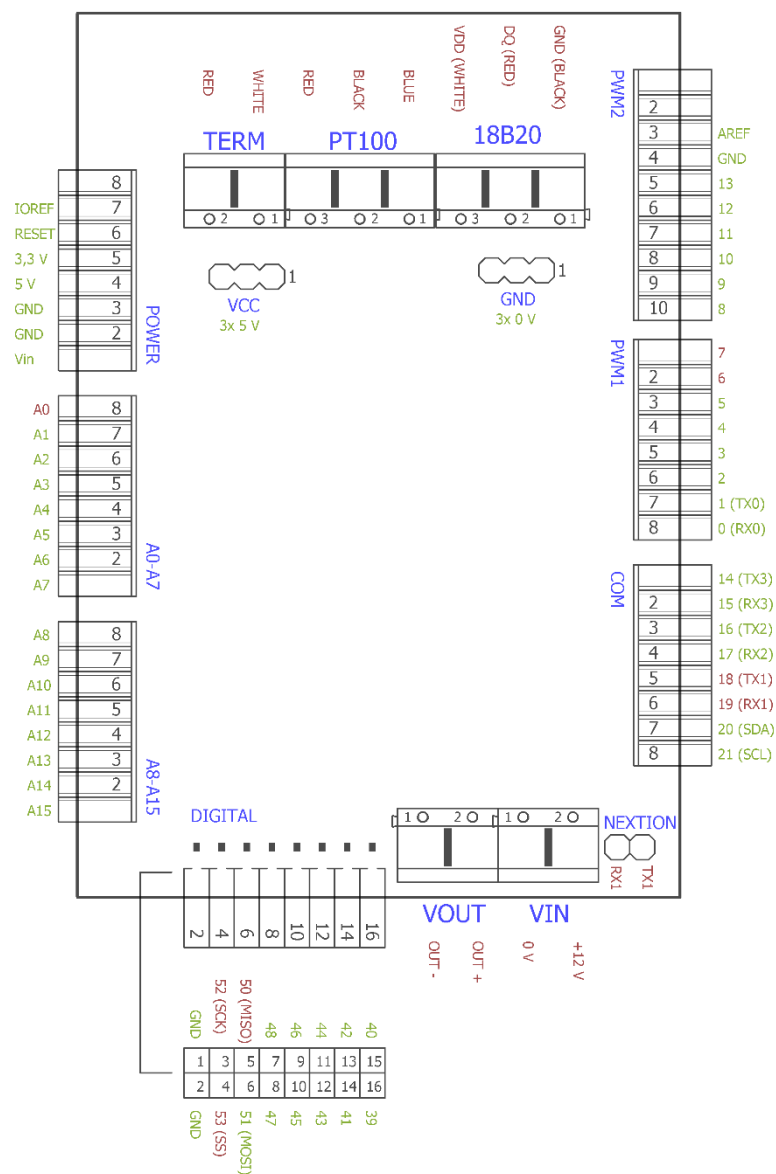
Zařízení je primárně určeno pro regulaci teploty vyhřívané podložky pro 3D tiskárnu. Regulátor umožňuje regulovat teplotu na konstantní teplotu pomocí PSD regulátoru. Dále je možné regulovat teplotu dvoustavovým regulátorem, nebo převzít řízení plně do svých rukou zvolením manuálního režimu.

Regulátor může být osazen až třemi teplotními vstupy (Pt100, DS18B20, NTC termistor) a jedním regulačním výstupem. Mimo regulační výstup obsahuje regulátor komunikační výstup, kterým je možno zaznamenané regulační pochody exportovat do PC.

Ovládání a nastavování regulátoru je jednoduché a nastavené parametry se automaticky po potvrzení ukládají do nevolatilní paměti mikroprocesoru, ze které jsou dostupné i po opětovném zapnutí zařízení. Ovládání regulátoru probíhá na dotykovém displeji, na kterém je znázorněna imitace skutečného průmyslového regulátoru. Dále je na displeji zobrazena vizualizace teplotní podložky včetně informačního panelu zobrazujícího aktuální nastavení regulátoru. Aktuální regulační pochod je možné sledovat na druhé straně displeje, kde se nachází graf.

1 ZAPOJENÍ

Pro uvedení do provozu je shield nasunut na Arduino Mega 2560 a umístěn v blízkosti regulované soustavy. Pro napájení regulátoru je použit zdroj stejnosměrného napětí 12 V. Pro záznam dat je připojen USB propojovací kabel mezi regulátor a PC. Pro správnou funkci regulátoru je nutné připojit do příslušné svorkovnice podle obr. 1.1 minimálně jedno teplotní čidlo. Pro napájení soustavy je použit stejnosměrný napájecí (ideálně počítačový) zdroj 12 V s proudovou zatížitelností minimálně 8 A. Svorkovnice pro napájení soustavy a výstupu samotné soustavy se nachází vedle sebe.



Obr. 1.1 – Rozložení svorkovnic shieldu

2 OVLÁDÁNÍ REGULÁTORU

Základem pro bezproblémovou regulaci je uživatelská znalost ovládání regulátoru. Regulátor obsahuje dvě okénka znázorňující displej, dvě kontrolky a čtveřici tlačítek, pomocí nichž se regulátor ovládá.



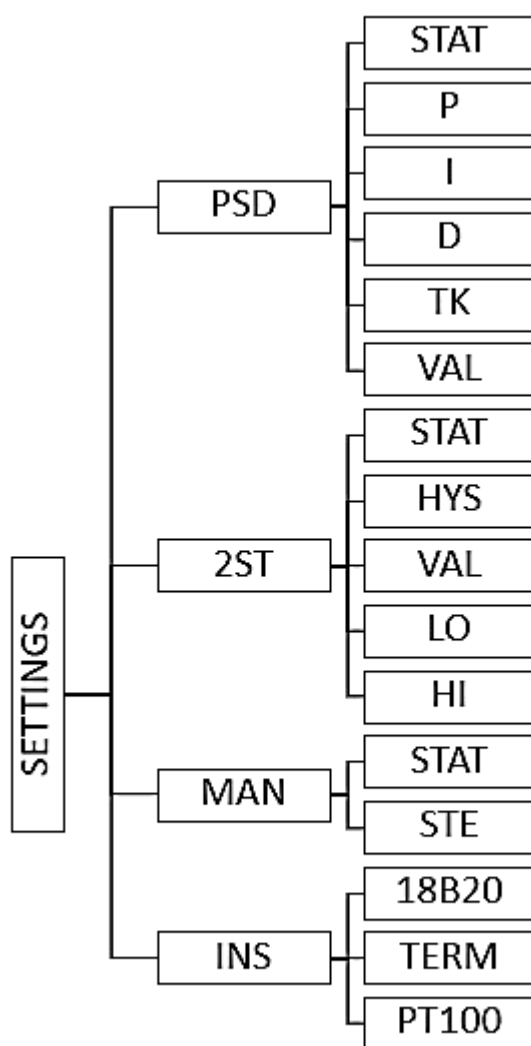
Obr. 2.1 – Popis panelu regulátoru

Kontrolka 1 se rozsvítí červeně ve chvíli, kdy je velikost akčního zásahu generovaná regulátorem větší než nula. Kontrolka 2 signalizuje povolení exportu dat, které nalezneme na druhé straně rozhraní. To znamená, že mikroprocesor vysílá na sériovou linku data z regulačního pochodu.

Čtveřice tlačítek, pomocí nichž uživatel ovládá a nastavuje regulátor, jsou popsány na obr. 2.1. Tlačítko SETTINGS slouží pro vstup do nastavovacího režimu a jeho podúrovni. Klávesa BACK je v podstatě opakem klávesy SETTINGS a slouží pro návrat z jednotlivých podúrovni regulátoru nebo opuštění nastavovacího módu. V režimu dvoustavové a PSD regulace stiskem této klávesy dojde k přepnutí z žádané hodnoty teploty na hodnotu aktuálního akčního zásahu v procentech. Tlačítka UP a DOWN zajišťují pohyb v menu regulátoru a při manuálním režimu slouží k přidávání nebo ubírání akčního zásahu uživatelem daným krokem.

2.1 PŘEHLED NASTAVOVACÍCH ÚROVNÍ

Nastavovací menu obsahuje dvě hlavní úrovně. V první se nachází jednotlivé typy regulací a vstupy. Druhá obsahuje konkrétní parametry týkající se daného typu regulace a v případě vstupů seznam připojitelných teplotních čidel a snímačů. Nastavení zvoleného parametru se provádí stiskem klávesy SETTINGS, čímž dojde k pravidelnému blikání parametru v horním displeji. Požadovaná hodnota se nastavuje na spodním displeji pomocí kláves UP a DOWN. Pro opuštění se používá klávesa BACK a tím je parametr zapsán do paměti mikropočítače. Struktura nastavovacího režimu je zobrazena na obr. 2.2.



Obr. 2.2 – Struktura nastavení regulátoru

Při listování v první úrovni menu regulátor na spodním displeji zobrazuje v případě typu regulace jejich stav (ON nebo OFF) a v případě teplotních snímačů název toho, který je aktuálně vybraný. Vysvětlení všech parametrů nacházejících se v nastavení regulátoru je uvedeno v tab. 2.1.

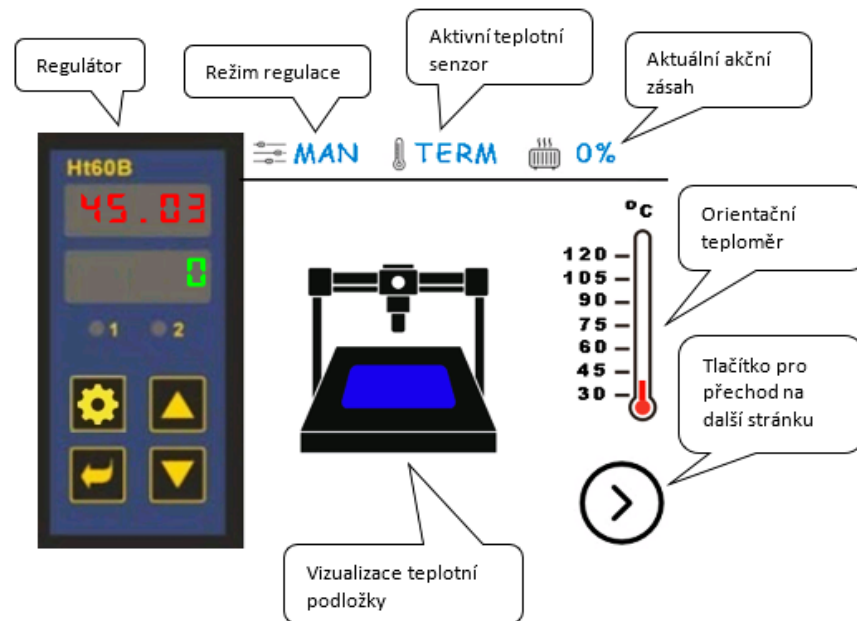
Tab. 2.1 – Přehled nastavitelných parametrů

Parametr	Popis	Rozsah hodnot	Jednotka
STAT	Status regulátoru	ON, OFF	-
P	Proporcionální složka	0 ÷ 999	s
I	Integrační složka	0 ÷ 999	s
D	Derivační složka	0 ÷ 999	s
TK	Vzorkovací perioda	1, 2, 5, 10, 20	s
VAL	Žádaná hodnota	0 ÷ 120	°C
HYS	Velikost hystereze	0 ÷ 10	°C
LO	Minimální akční zásah	0 ÷ HI	%
HI	Maximální akční zásah	LO ÷ 100	%
STE	Krok pro manuální režim	1, 2, 5, 10, 20	%
18B20	Digitální čidlo DS18B20	-	-
TERM	Polovodičový snímač teploty	-	-
PT100	Odporový snímač teploty	-	-

3 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ

3.1 DOTYKOVÝ DISPLEJ

Jak už bylo řečeno, displej obsahuje dvě ovládací stránky, kterými je uživatel spojen s regulátorem a informován o stavu regulované soustavy.



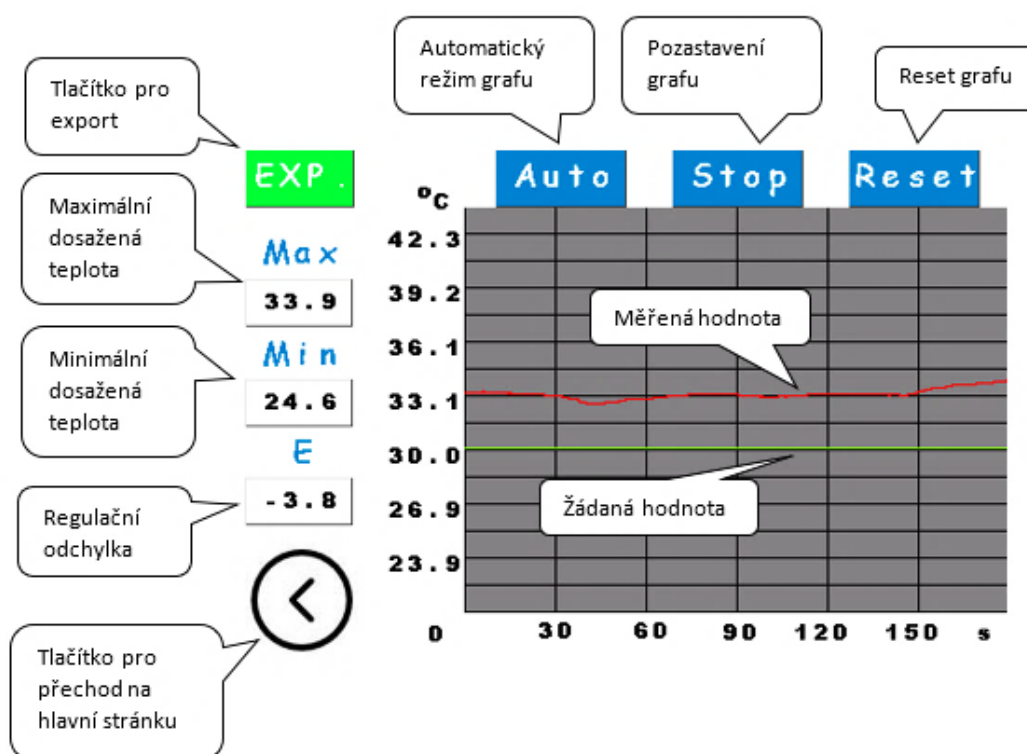
Obr. 3.1 – Popis hlavní stránky displeje

Údaje poskytující informace o regulaci znázorněny na obr. 3.1 jsou aktualizovány ihned poté, co regulátor začne plnit svoji funkci (není v režimu nastavení). Analogový teploměr zde má pouze orientační význam, aby uživatel věděl, v jaké části teplotního rozsahu podložky se nachází a nedošlo k jejímu poškození. Vizualizace teplotní podložky je formou obrázku, kde se barva podložky znázorněné 3D tiskárny mění s teplotou od modré až po červenou. Pro přechod na druhou stránku slouží tlačítko umístěné v pravém dolním rohu. Druhá strana uživatelského prostředí je věnovaná grafickému znázornění regulačních pochodů.

Hlavním prvkem druhé stany uvedené na obr. 3.2 je okno grafu, do kterého je vykreslována žádaná a měřená veličina (teplota). Nad oknem grafu jsou tři tlačítka k ovládání grafu. Po spuštění je graf zobrazen v základním rozsahu teplot 30 °C ÷ 120 °C. Po stisknutí tlačítka pro automatický režim dojde k přiblížení a zobrazení regulačního pochodu v omezeném pásmu teplot. V případě překročení šířky zobrazeného pásma teplot dojde

k automatickému rozšíření. Pro návrat maximálního rozsahu teplot slouží tlačítko Reset. Pro pozastavení vykreslování grafu pak tlačítko Stop.

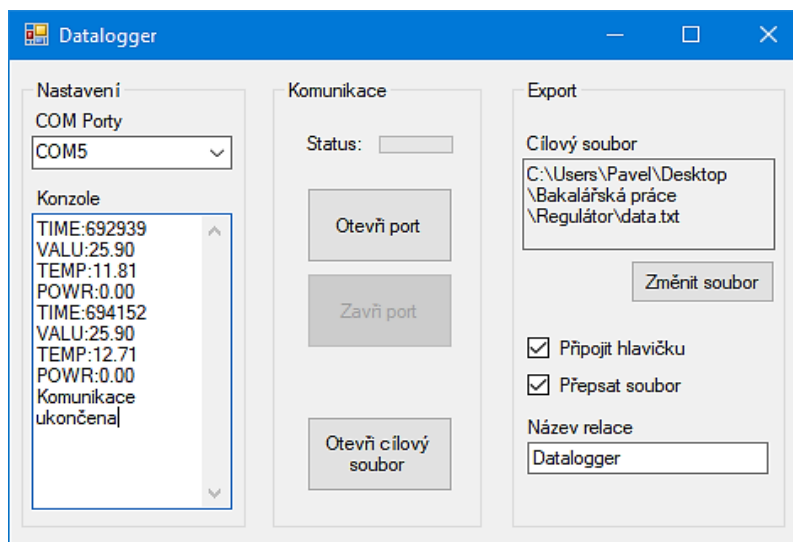
Jak byl o dříve zmíněno, pro povolení exportu dat do aplikace PC je nutno tuto funkci uživatelsky povolit. K tomu slouží tlačítko EXP, které je ve výchozím stavu vypnuto (červené). Kromě okna s grafem se na druhé stránce nachází informační panel obsahující maximální a minimální dosaženou teplotu za dobu regulace a hodnotu regulační odchylky v reálném čase. Hodnoty maximální a minimální dosažené teploty lze stiskem na nápis Max nebo Min resetovat.



Obr. 3.2 – Popis druhé stránky displeje

3.2 APLIKACE PRO ZÁZNAM DAT

Pro záznam dat slouží spustitelná aplikace Datalogger. Pro úspěšné detekování regulátoru v seznamu portů je potřeba regulátor připojit před spuštěním aplikace. Po spuštění aplikace se objeví hlavní okno aplikace uvedené na obr. 3.3.



Obr. 3.3 – Okno aplikace

K zahájení příjmu dat je potřeba zvolit port, na kterém se regulátor nachází a do kterého souboru se bude zapisovat. Po zvolení souboru se zpřístupní tlačítko pro otevření zvoleného souboru v textovém editoru, možnost zformátovat soubor před zápisem a možnost připojit hlavičku. Pro snadnější orientaci lze jednotlivé relace pojmenovat. Aplikace obsahuje konzoli, do které jsou vypisována přijatá data, instrukce pro uživatele a chybová hlášení. Příklad formátování a zarovnání naměřených dat uvádí obr. 3.4.

```
Datalogger
Čas uP   Čas   Žádaná  Měřená  Výstup v %
765,71   1,0   36,00   37,13   0
766,79   2,0   36,00   36,94   0
767,86   3,1   36,00   37,23   0
768,94   4,2   36,00   37,23   0
Datalogger
Čas uP   Čas   Žádaná  Měřená  Výstup v %
773,23   1,0   36,00   37,13   0
774,3    2,0   36,00   37,04   0
775,38   3,1   36,00   37,23   0
776,45   4,2   36,00   37,23   0
777,53   5,2   36,00   37,04   0
```

Obr. 3.4 – Ukázka ze zápisu dat do souboru

4 SPECIFIKACE REGULÁTORU

Veškeré parametry regulátoru jsou shrnuty v tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Parametry regulátoru

Napájecí napětí regulátoru	6 V ÷ 15 V ss nebo USB
Napájecí napětí regulované soustavy	12 V ss
Maximální zatížení	10 A
Galvanické oddělení	Ano
Ovládání	Dotykové
Typy regulací	PID, dvoustavová, manuální
Rozsah regulace	30 °C ÷ 100 °C
Přesnost	±0,5 °C
Vzorkovací perioda	1 s ÷ 20 s
Počet teplotních vstupů	3 (Pt100, DS18B20, NTC termistor)
Počet výkonových výstupů	1
Rozhraní	USB 2.0
Záloha dat	EEPROM
Rozměry	110 mm × 60 mm × 35 mm