

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Společná laboratoř optiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení a automatizace procesů pomocí systému LOGO!



Autor:	Antonín Opíchal
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Přístrojová Fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Termín odevzdání práce:	10.5.2013

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Antonín Opíchal
Název práce	Řízení a automatizace procesů pomocí systému LOGO!
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Společná laboratoř optiky
Vedoucí práce	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2013
Klíčová slova	Regulace teploty, systém LOGO!, snímače teploty, regulovaná soustava.
Počet stran	72
Počet příloh	12
Jazyk	Český

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá využitím systému LOGO! a jeho uvedením do provozu na vzorové úloze v oblasti řízení podmínek v regulované soustavě. Hlavní úlohou je regulace teploty na konstantní hodnotu. Je zde popsána konstrukce experimentální sestavy a program pro automatickou regulaci teploty vytvořený ve vývojovém prostředí LOGO! Soft Comfort. Během práce byly vytvořeny elektronické obvody na desce plošných spojů pro vstupní a výstupní periférie systému. Dále je část práce věnována následné linearizaci závislosti výstupního signálu ze zhotovených snímačů teploty a jejich kalibraci. Celý systém je navržen s minimálními pořizovacími náklady. Vytvořená úloha poslouží k výukovým účelům a experimentálním úlohám pro materiálový výzkum.

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname	Antonín Opíchal
Title	Process control and automation with LOGO! system
Type of thesis	Bachelor
Department	Joint Laboratory of Optics
Supervisor	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
The year of presentation	2013
Keywords	Temperature control, system LOGO!, temperature sensors, controlled system
Number of pages	72
Number of appendices	12
Language	Czech

Abstract

The LOGO! system is described in this work with its utilization on the example task in the area of controlling the operating conditions in the test system. The main task is a temperature regulation to a constant value. The construction of the experimental setup, and the program for automatic temperature control in the LOGO! Soft Comfort development environment are described in the thesis. An electronic circuits on a printed circuit board for input and output peripherals of the system were created. A part of the work focuses on output signal linearization and calibration processes of the temperature sensors, which were made. The entire system is designed with a minimal cost. The created system will be used for educational purposes, and material research.

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Jiřího Pechouška, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu RNDr. Jiřímu Pechouškovi, Ph.D. za jeho cenné připomínky, ochotu a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Poděkování si zaslouží též má partnerka Lucia Jandová za poskytnutí motivace a psychické podpory při vypracovávání této bakalářské práce.

Obsah

Úvod	7
1 Systémy pro automatizaci	8
1.1 PLC systémy a jejich využití v automatizaci	8
1.2 Definice regulace a dalších pojmů	9
1.2.1 Regulační obvod a jeho popis	11
1.3 Systém LOGO! firmy Siemens	13
2 Experimentální sestava.....	16
2.1 Použitá konfigurace LOGO!	16
2.1.2 Ztotožnění použitých prvků s regulačním obvodem.....	17
2.1.3 Zapojení vstupů a výstupů k LOGO!.....	18
2.1.4 Moduly pro řízení ventilátorů	19
2.1.5 Řízení výkonu infračervené žárovky	22
2.2 Program pro regulaci teploty a prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0.	26
2.3 Funkční bloky v prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0.	28
2.4 Použité snímače	30
2.4.1 Teplotní čidlo Pt1000.....	30
2.4.2 Teplotní čidlo NTC Termistor	35
2.4.3 Integrovaný obvod LM35	39
2.4.4 Modul s kapacitním čidlem vlhkosti.....	40
3 Výsledky a diskuze.....	42
3.1 Testy a kalibrace snímačů teploty	42
3.1.2 Druhá kalibrace snímačů.....	46
3.2 Regulace teploty	50
3.2.1 Identifikace systému a nastavení parametrů PI regulátoru	51
3.3 Vyhodnocení obslužnosti	52
3.4 Optimalizace	54
Závěr	56
Seznam použitých zdrojů:.....	57
Seznam příloh:	59
Příloha 1: Konečný program pro automatickou regulaci teploty	60
Příloha 2: Návrh převodníku pro Pt1000.....	62
Příloha 3: Návrh převodníku pro NTC Termistor.....	63
Příloha 4: Návrh převodníku pro LM35	64
Příloha 5: Parametry modulu pro měření vlhkosti	65
Příloha 6: Návrh modulu pro řízení výkonu ventilátorů	66
Příloha 7: Návrh modulu pro PWM řízení.....	67
Příloha 8: Realizace převodníků na desce plošných spojů	68
Příloha 9: Datové listy použitých součástek	69
Příloha 10 Naměřená data při první kalibraci	70
Příloha 11 Naměřená data při druhé kalibraci	71
Příloha 12 Fotodokumentace	72

Úvod

Cílem této bakalářské práce je uvedení logického modulu LOGO! do provozu na vzorové úloze v oblasti řízení podmínek v regulované soustavě. Základní úlohou je regulace teploty, kde jsou namísto konvenčních převodníků pro čidla a pohony navrženy a sestaveny alternativy v podobě jednoduchých elektronických obvodů realizovaných na desce plošných spojů. Toto řešení značně snižuje pořizovací náklady na celou regulovanou soustavu a umožňuje bližší rozbor problematiky práce se signálem při měření a automatické regulaci. A především je tak co nejvíce využít potenciál logického modulu LOGO! s jeho možnostmi programování.

Nejprve je popsáno zapojení experimentální sestavy, poté vývojové prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0. a nakonec vytvořený program pro regulaci teploty. V práci je řešeno snímání teploty a její převod na signál čitelný pro analogové vstupy logického modulu. Jsou zde testována tři teplotní čidla: platinové čidlo Pt1000, NTC perličkový termistor a integrovaný obvod LM35. Spolu s vyrobenými převodníky tvoří teplotní snímače. Část práce je věnována určení citlivosti, linearizaci, hledání vhodných převodních charakteristik a kalibraci těchto snímačů. Dále je řešeno řízení výkonu ventilátorů jakožto akčních orgánů pro umožnění rychlého snižování teploty regulované soustavy. Je zde testována metoda řízení pomocí koncového výkonového operačního zesilovače a pulzní šířkové modulace. Pro zvyšování teploty je použita infračervená žárovka, jejíž výkon je regulován stmívačem. Postupně jsou řešeny programy ve vývojovém prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0. pro dílčí části měření a regulace.

Konečný program pro automatickou regulaci umožňuje nastavení a hlídání požadované teploty a také případné přepnutí do manuálního řízení akčních členů. Na závěr je provedena analýza procesních parametrů, optimalizace řízení, vyhodnocení obslužnosti celého systému a analýza kvality řízení i měření.

Rozšířená úloha zároveň sleduje relativní vlhkost v kontrolovaném prostředí. Vytvořená úloha poslouží k výukovým účelům na učebně číslicových měřicích systémech. Zároveň bude systém využit v experimentálních úlohách pro materiálový výzkum. Předpokládané využití zhotovené soustavy je v oblasti dlouhodobého vystavování nanočástic oxidu železa konstantním zvýšeným teplotám.

1 Systémy pro automatizaci

1.1 PLC systémy a jejich využití v automatizaci

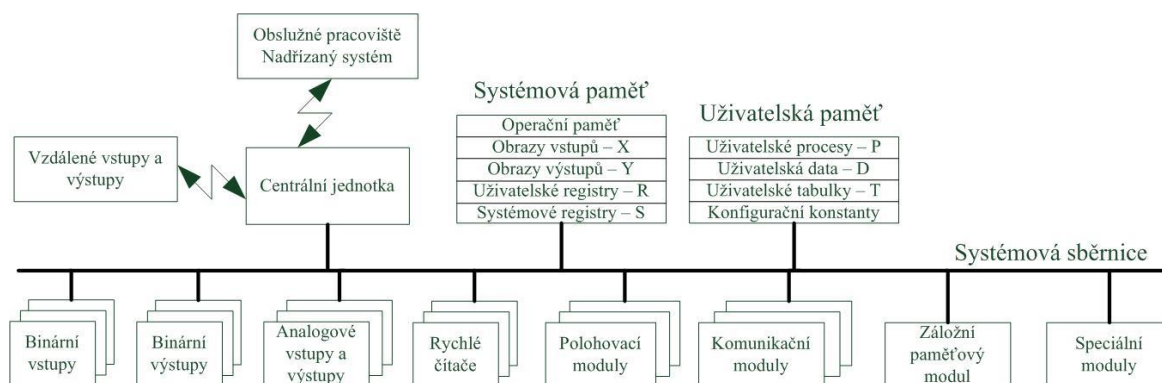
Programovatelné logické automaty (Programmable Logic Controller, dále jen PLC) vznikly za účelem nahrazení komplexních reléových (elektromechanických) řídicích systémů. Tyto systémy byly pevně propojené velkým množstvím kabelů, náročné a změnu funkce a nákladné na uvedení do provozu i údržbu. Díky rozvoji tranzistorové technologie v 70. letech přišly na svět první PLC, jež se postupem času rozvíjely a stále více používaly v mnoha odvětvích průmyslu. Dnes PLC představuje relativně malý průmyslový počítač pro automatizaci procesů v reálném čase, který řídí stroje v průmyslu, tovární linky i techniku v moderních budovách (motory, čerpadla, ventilátory, pece, osvětlení, rolety, pásové dopravníky atd.). Od klasických počítačů se PLC liší tím, že programový kód PLC vykonává v cyklech, kdy nejprve odešle informace na výstupy, provede program a načte vstupy. Jeho periférie (analogové/digitální vstupy/výstupy) jsou přímo uzpůsobeny pro připojení k technologickým procesům. PLC jsou také přizpůsobeny podmínkám v průmyslové výrobě (vyšším teplotám, vlhkosti, prachu, vibracím, elektrickému a elektromagnetickému rušení).

PLC systémy lze rozdělit podle provedení na kompaktní a modulární. **Kompaktní systém** obsahuje CPU (Central Processing Unit – procesor), vstupy/výstupy a základní uživatelské rozhraní (HMI – Human-Machine Interface) v jednom modulu. Kompaktní systémy mají omezenou rozšiřitelnost o další moduly. **Modulární systémy** mají své části roztrženy na jednotlivé oddělené moduly jako je CPU, vstupy/výstupy, funkční a komunikační moduly. Dále lze PLC rozdělit podle velikosti, počtu vstupů/výstupů (I/O) apod.[1].

Dělení systémů podle velikosti:

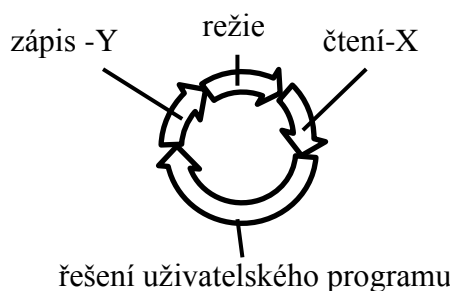
- Mikro PLC: kompaktní provedení, menší počet I/O (okolo dvaceti). Možnost komunikace pouze jako posluchač (slave). (Např. Siemens: LOGO!0BA6).
- Malá PLC: do 128 I/O s možností komunikace jako mluvčí (master), modulární provedení (např. SIMATIC S7-200).
- Středně výkonnostní třída: 128 až 512 I/O, vždy modulární provedení, neomezená komunikace (např. SIMATIC S7-300).
- Nejvyšší výkonnostní třída: až tisíce I/O, plně integrovaná automatizace pro nejnáročnější aplikace, velmi vysoká cena (např. SIMATIC S7-400) [1].

Vnitřní struktura PLC je blokově znázorněna na obr. 1 (skutečné provedení může být odlišné). U modulárního PLC jsou počty a kombinace vstupních, výstupních a speciálních modulů (jednotek) volitelné v širokém rozsahu podle potřeby aplikace. U nejjednodušších systémů kategorie „mikro PLC“ bývá kombinace vstupů a výstupů neměnná nebo variabilní v omezeném rozsahu [2].



Obr. 1: Blokové schéma vnitřní struktury programovatelného automatu; upraveno z [2, str.38].

PLC program je vykonáván v cyklu, viz obr. 2. V jeho režijní části (v otočce cyklu) jsou nejprve na výstupy vyslány aktuálně vyčíslené hodnoty obrazů výstupů Y (hodnoty uložené v registrech), pak jsou provedeny režijní operace systému, aktualizace systémových a časových proměnných, naplánována aktivace procesů pro další cyklus, ...apod.) a na závěr jsou sejmuty aktuální hodnoty fyzických vstupů, které jsou pro celý následující cyklus konzervovány, jako obrazy vstupů X [2, str.47].



Obr. 2: Cyklické vykonávání programu; upraveno z [2, str.47].

1.2 Definice regulace a dalších pojmů

V teorii regulace se zavádí následující pojmy [3,4]:

Řízení:

Aby dané zařízení (výrobní linka, důlní stroj, obráběcí stroj, lis, míchačka, vysoká pec ...) správně pracovalo (tj. podle daného technologického postupu), musí být určitým způsobem řízeno. Řízení je tedy zabezpečování správné činnosti strojů a zařízení.

Ruční řízení:

Řídicí činnost vykonává člověk (odborník, vyškolený pracovník), který musí být na pracovišti neustále přítomen – nevýhoda. Jedná se např. o spouštění motorů míchadel, čerpadel pomocí ovládacích tlačítek, ovládání jeřábu, ruční zavírání/otevírání ventilů, ruční spouštění výrobní linky. Používá se při jednoduchých úkonech, při uvádění nového složitějšího zařízení do provozu (tzv. najíždění nové technologie), poruchách, haváriích

a neočekávaných stavech. Z důvodu bezpečnosti by měl být u každého složitého systému umožněn přechod na ruční řízení.

Automatické řízení:

Řídicí činnost samočinně vykonává podle programu (algoritmu) automat (řídicí systém, průmyslový počítač, PLC, číslicový regulátor, analogový regulátor, logický obvod ...). Člověk zde jen kontroluje (sleduje, monitoruje) stav zařízení, provádí údržbu, opravy, servis a nemusí být neustále přítomen – výhoda. Řízení je mnohem přesnější, rychlejší, tj. efektivnější než ruční.

Ovládání:

Je řízení bez zpětné kontroly o provedení dané operace. Automat vykonává nastavený program, nastane-li závada, automat to nepozná a vyrábí zmetky. Používá se v jednoduchých případech např. spuštění míchadla bez zpětné kontroly, jestli se točí.

Regulace:

„Regulace je udržování dané fyzikální veličiny na předem stanovených hodnotách. Skutečná hodnota této veličiny se zjišťuje měřením a porovnává se s hodnotou žádanou. Regulace je tedy řízení se zpětnou vazbou. Uskutečňuje se působením akční veličiny na regulovanou soustavu, pomocí regulačního obvodu. Cílem regulace je zajištění stability, kompenzace vnějších i vnitřních vlivů poruchových veličin. Na dynamický systém působí často celá řada poruchových veličin, jejichž vliv je zpravidla nežádoucí. Mnohdy regulace spočívá hlavně v kompenzaci účinníků těchto poruchových veličin. Ovšem hlavním úkolem regulace je dosažení požadovaných dynamických vlastností obvodu a hodnot regulované veličiny“ [4, str.21].

Základní druhy regulace:

Nespojitá regulace:

U méně náročných aplikací, kdy akční veličina má dva stavy (zapnuto/vypnuto). Pokud je nespojitý regulátor, musí být nespojitý i akční člen.

Spojité regulace:

U náročnějších aplikací, kdy akční veličina může nabývat různých hodnot v čase. Pokud je spojitý regulátor, musí být spojitý i akční člen.

Regulace na konstantní hodnotu:

Řídicí veličina nabývá při regulaci konstantních hodnot a mění se, jen pokud chceme změnit žádanou hodnotu. Jde o velmi častý způsob regulace (teploty v pecích, teploty ve výměnících tepla, tlaku v potrubí, tlaku v tlakových nádobách, výšky hladiny ...).

Regulace programová:

Velikost řídicí veličiny se mění v čase. Např. častá regulace teploty v žíhacích nebo kalicích pecích, kdy je nutné přesně dodržet požadovaný průběh teploty v peci (při žíhání materiálu teplota nejprve pomalu roste na žíhací teplotu, poté setrvá určitou dobu na této

hodnotě, nakonec materiál pomalu ochlazuje). Např. plynulý náběh otáček motoru po tzv. rampě až na žádanou hodnotu otáček (např. motor ve výtahu).

Vlečná regulace (ekvitermní):

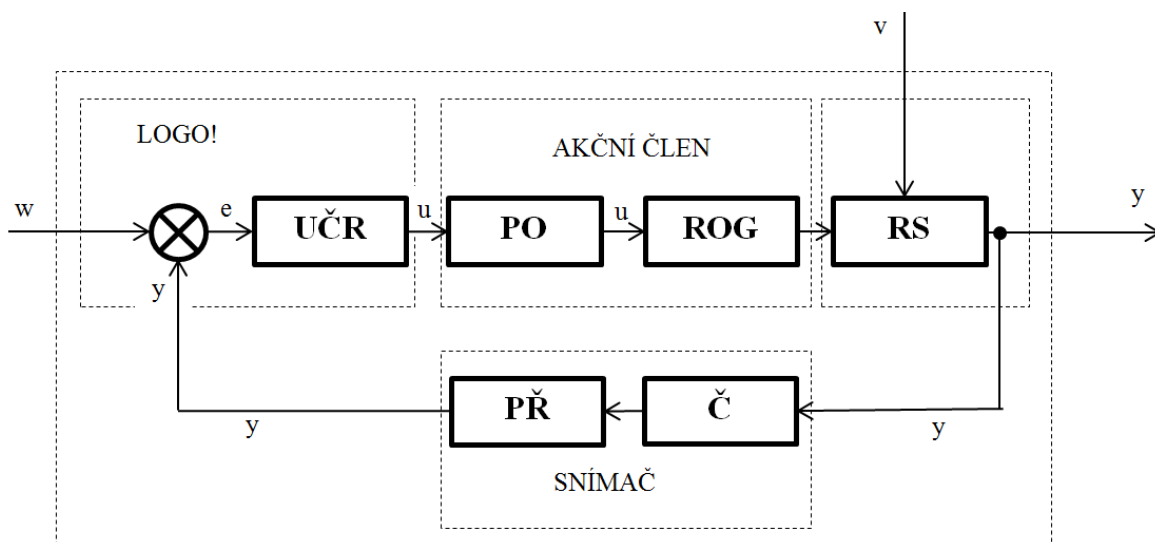
Řídicí veličina není přímo závislá na čase, ale závisí na jiné fyzikální veličině (např. teplotě, tlaku – tlak v ponorce podle hloubky ponoření ...). Časté použití při vytápění, kdy pro lepší teplotní komfort je žádaná teplota náběhové vody v místnosti nastavována podle aktuálního průběhu venkovní teploty (tzv. ekvitermní regulace).

Poměrová regulace:

Používá se v případě, kdy je nutné zachovat daný poměr dvou stejných fyzikálních veličin. Příkladem může být regulace konstantního směšovacího poměru ve spalovací peci. Aby bylo spalování efektivní, je zde požadavek na konstantní směšovací poměr vzduchu a topného plynu.

1.2.1 Regulační obvod a jeho popis

Značení a kreslení schémat regulačních obvodů se v různé literatuře značně liší. Jednotlivé prvky schématu, viz *obr. 3*, jsou voleny tak, aby odpovídaly fyzickým prvkům sestavy řešené v této práci s ohledem na teorii v hlavních zdrojích [5,6]. Systém je definován jako množina prvků, vstupních veličin, výstupních veličin a vazebních závislostí vstupních a výstupních veličin jednotlivých prvků. Vyšší rozšiřovací úrovní se rozumí rozklad systému na jednodušší prvky[5].



Obr. 3: Regulační obvod jako systém s vyšší rozlišovací úrovní.

Na *obr. 3* je

y – regulovaná veličina,

u – akční veličina,

v – poruchová veličina,

w – žádaná veličina,

e – regulační odchylka,

ÚČR – ústřední člen regulace,

PO – pohon,

Č – čidlo,

PŘ – převodník,

ROG – regulační orgán,

RS – regulovaná soustava.

Regulátor:

Za regulátor se většinou považuje celý regulační obvod bez regulované soustavy. V této práci byl za regulátor označen pouze rozdílový člen a ústřední člen regulátoru, což vede k lepšímu objasnění funkce celého systému. Podstata činnosti regulátoru spočívá ve vyhodnocení regulační odchylky $e(t)$, ve zpracování této odchylky podle zákona řízení, který je vlastní použitému regulátoru, a ve vytvoření výstupního signálu akční veličiny $u(t)$. Cílem regulace je, aby odchylka $e(t)$ byla eliminována zcela nebo aby byla co nejmenší [5, str. 144].

Rozdílový člen:

Vykonává funkci rozdílu žádané hodnoty $w(t)$ a regulované veličiny $y(t)$, jejíž hodnotu dostáváme ze snímače, aby vypočítal regulační odchylku $e(t)$,

$$e(t) = w(t) - y(t). \quad (1)$$

V obr. 3 je zobrazena jeho schématická značka (rozdílový uzel).

Ústřední člen regulátoru – ÚČR :

Ústřední člen regulátoru zpracovává regulační odchylku podle matematického zákona, který je mu určen (např. P, PI, PD, PID apod.) [5, str. 145].

Akční člen:

Akčním členem se provádí přímý zásah do regulované soustavy na základě informace z ústředního členu regulátoru. Jedná se o změnu příkonu energie nebo množství látky v rozsahu potřebném pro regulaci.

Pohon – PO:

Pohon dodává energii regulačnímu orgánu [5, str. 145]. Může být spojitý či nespojitý, např. elektrický, pneumatický nebo mechanický.

Regulační orgán – ROG:

Regulační orgán je zařízení, které převádí energii z pohonu na požadovaný typ energie, pomocí níž ovlivňuje regulovaný systém. V případě regulování toku látky jsou regulační orgány různé ventily a škrtecí prvky, které vyžadují mechanický pohon. Pokud je regulován tok energie regulovanou soustavou, např. tlak nebo teplota, je většinou zapotřebí elektrického pohonu. ROG stojí na samém konci regulační smyčky.

Snímač:

Snímač je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem snímač je ekvivalentní pojmu senzor, převodník nebo detektor. Citlivá část snímače se označuje jako čidlo. Snímač, jako primární zdroj informace, snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a dle určitého definovaného principu ji transformuje na měřicí veličinu, nejčastěji na veličinu elektrickou [6, str. 13].

Čidlo – Č:

Čidlo je citlivá část snímače, která je přímo ve styku s měřeným prostředím, viz snímač.

Převodník – PŘ:

Převodník je část snímače, která převádí elektrickou veličinu (většinou odpor, kapacitu, proud či napětí) na unifikovaný signál (0–10 V, 4–20 mA) nebo jiný podle potřeby.

Regulovaná soustava – RS:

„Je technické zařízení, na kterém se provádí regulace (např. plynová či elektrická pec, parní kotel, klimatizovaná místnost, výměník tepla, zásobník látky, vážená nádoba, dopravní pás ...). Tato zařízení slouží především k danému technickému účelu, proto jsou jejich vlastnosti dány účelem provozu zařízení a nemusí vždy dokonale vyhovovat účelům regulace. Důležitou vlastností RS je její schopnost hromadit látku nebo akumulovat energii. Říkáme, že soustava má kapacitu. Dynamické vlastnosti RS získáme její identifikací“ [3, str.78].

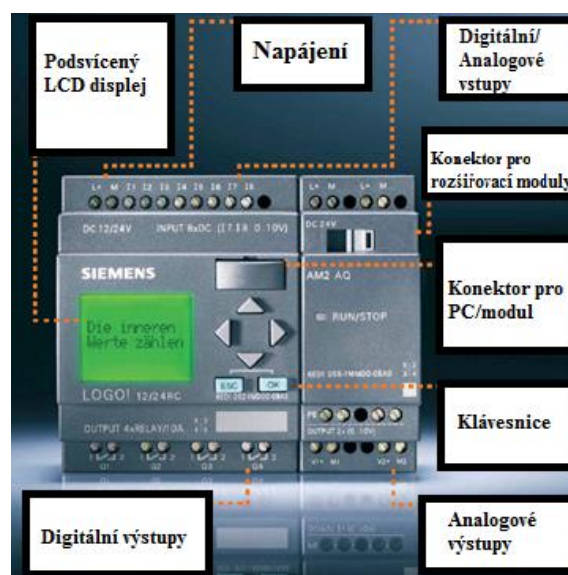
1.3 Systém LOGO! firmy Siemens

V současné době jsou k dispozici malé přístroje s různými názvy jako: nano PLC, mikro PLC, programovatelné relé, logický modul atd. Vyplňují místo mezi reléovou technikou a malými PLC (např. Simatic S7-200). V různých zdrojích je označení mikro PLC a malé PLC poněkud sporné, proto je v této práci zvolen název „logické moduly“. Tyto přístroje jsou malé svými rozměry, nikoli však svými možnostmi, což není jen reklamní heslo firmy Siemens, která přišla s touto kategorií přístrojů na trh jako první ve formě logického modulu LOGO!. Logický modul LOGO! je určen pro montáž na DIN lištu (možnost instalovat i přímo na zeď). Vyrábí se různá provedení, která se liší především napájecím napětím a typem výstupů. Postupem času jsou vyvíjeny různé řady s označením 0BA0 až 0BA7 v současnosti, každá vyšší řada disponuje určitým vylepšením oproti předešlé (např. nové funkční bloky v programování, další typy vstupů a výstupů nebo nové rozšiřovací moduly). Nyní je k dispozici modulární řada LOGO!, jejíž centrální jednotka je osazena osmi vstupy a čtyřmi výstupy. Vyrábí se ve variantě LOGO!Basic (s tlačítky a displejem) a ve variantě LOGO!Pure (bez tlačítek a displeje), viz obr. 4. U typů se stejnosměrným napájením se mohou čtyři ze vstupů použít jako analogové v rozsahu 0 až 10 V nebo jako rychlé čítací vstupy. Rozšiřovací moduly mají jednotnou velikost (šířka je oproti centrální jednotce poloviční nebo stejná) a jsou buď **digitální** (vždy v uspořádání čtyři/osm vstupů a čtyři/osm výstupů), s **analogovými vstupy** (dva vstupy 0–20 mA nebo 0–10 V), s **analogovými výstupy** (dva výstupy 0–10 V nebo 0–20 mA/4–20 mA) i s **komunikačním rozhraním** AS-Interface (AS-I) v průmyslové komunikaci nebo EIB a LON v inteligentních budovách. Je k dispozici i speciální modul, který plní funkci převodníku pro teplotní čidlo Pt100. Pro spínání vyšších proudů než 10 A je k dispozici rozšiřovací modul stykačového relé [7].



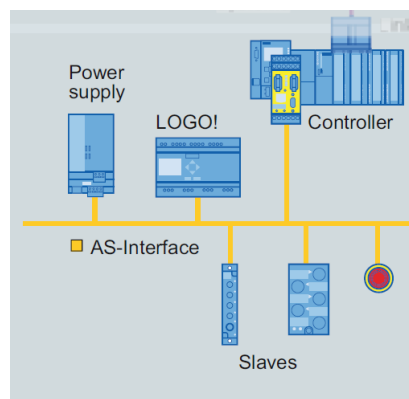
Obr. 4: Logický modul LOGO!Basic a LOGO!Pure s rozšiřovacími moduly; upraveno z [7].

Na obr. 5 je popis jednotlivých rozhraní nejběžnějšího provedení LOGO! a jeho rozšiřovacího modulu pro analogové výstupy. Logický modul je vybaven čtyřřádkovým displejem pro zobrazení semigrafických znaků. Pomocí displeje lze zobrazovat procesní hodnoty, systémové zprávy a bloky pro ruční programování nebo změnu parametrů přímo na modulu. Pro napájení se nejčastěji používá stejnosměrný zdroj 24 V, ale jsou i jiná provedení (např. 12 V DC, 24 V DC, 110–230 V AC/DC). V horní části je osm logických vstupů, z nichž některé lze použít jako analogové nebo vysokorychlostní. Rozšiřovací moduly se připojují vždy zprava pomocí speciálního konektoru, zleva se připojuje pouze panel LOGO! TD (Text Display). V přední části je konektor pro připojení k počítači pro přenos programu a online test. Tento konektor lze využít i pro paměťový modul k archivaci programu a ochraně know-how. Tlačítka na předním panelu se používají k programování přímo na modulu, zadávání parametrů nebo jako logické vstupy. Ve spodní části modulu jsou zpravidla výstupy, jež mohou být podle provedení reléové nebo tranzistorové. Rozšiřovací modul AM2 AQ poskytuje dva analogové výstupy s unifikovaným signálem 0–10 V s rozlišením 10 bit (tedy tisíc různých hodnot) [8].



Obr. 5: Popis jednotlivých rozhraní LOGO!12/24RC (řady 0BA5) a rozšiřovacího modulu AM2 AQ pro analogové výstupy; upraveno z [8].

S použitím různých rozšiřovacích modulů lze dosáhnout konfigurace s maximálně 24 digitálními vstupy, 16 digitálními výstupy, čtyřmi analogovými vstupy a dvěma analogovými výstupy. Dále lze použít komunikační moduly pro sběrnici EIB a LON (pro řízení „inteligentních budov“) nebo AS-I (slave) pro průmyslové aplikace na úrovni snímačů a akčních členů. LOGO! tedy lze zapojit do distribuovaného řídicího systému, viz obr. 6. Nejnovější řada LOGO!(0BA7) podporuje i komunikaci přes Ethernet jako master.



Obr. 6: LOGO! jako část distribuovaného řídicího systému se sběrnici AS-I; upraveno z [8].

Pro stejnosměrně napájené provedení jsou k dispozici různé spínané napájecí zdroje, které se liší jmenovitým výstupním napětím a výstupním proudem (např. 24 V/1,3 A; 24 V/4 A; 12 V/4,5 A apod.). Je možné je paralelně spojovat a přesně doladit výstupní napětí [8].

LOGO! lze použít v budovách i průmyslu např. pro řízení motorů, čerpadel, regulace hladiny v nádrži, pro automatické záskoky, řízení osvětlení, řízení žaluzií či markýz, řízení vrat a dveří, topení, chlazení, klimatizace, dopravníkové pásy, výtahy, zavlažování, řízení skleníků. Díky analogovým vstupům lze vyhodnocovat signály z nejrůznějších druhů snímačů a pomocí analogových výstupů lze řídit frekvenční měniče nebo regulovat např. teplotu, tlak, vlhkost apod. s využitím PI regulátoru (Proporcionálně Integrovní regulátor) [8].

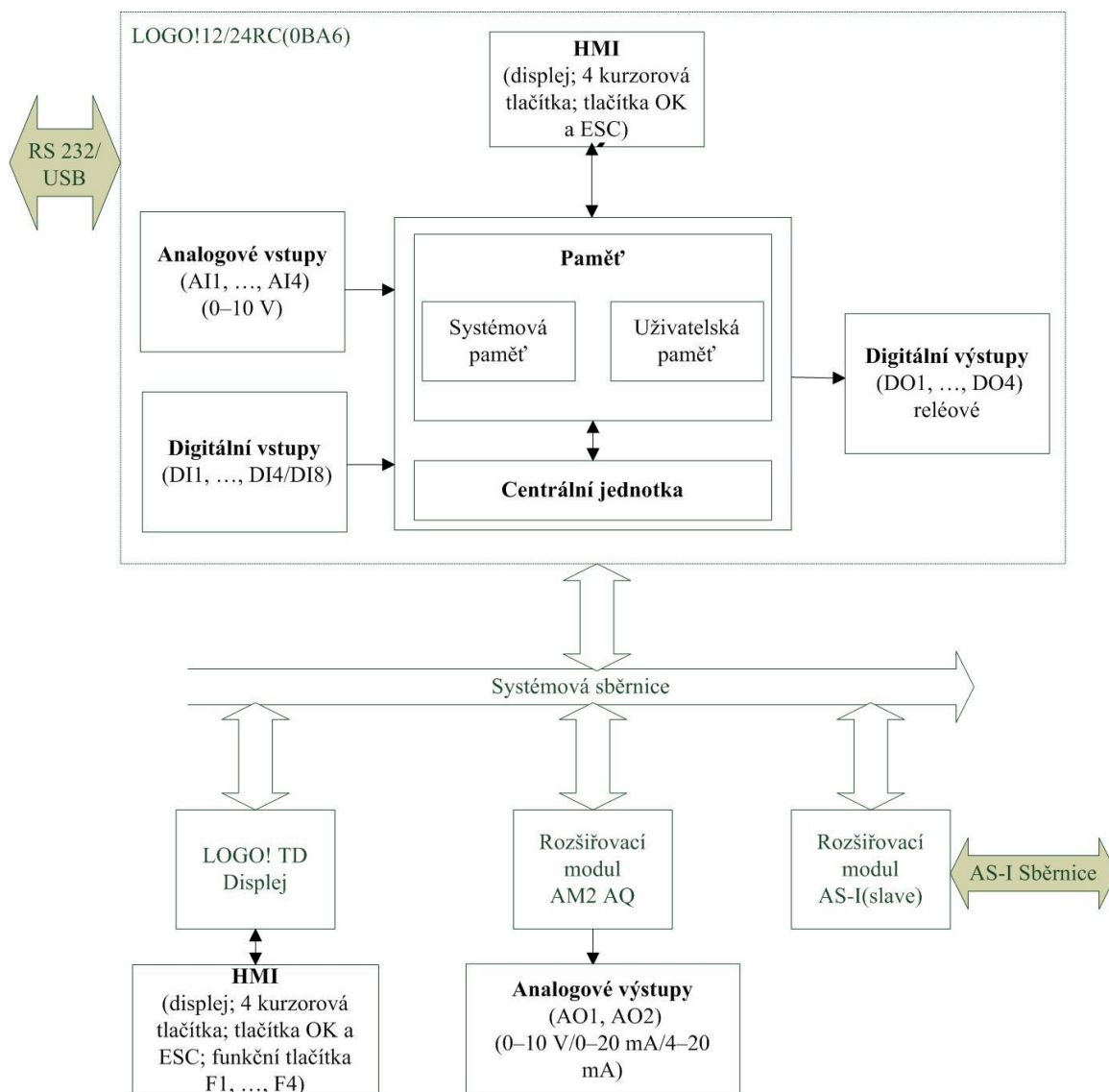
2 Experimentální sestava

2.1 Použitá konfigurace LOGO!

V této práci je k dispozici LOGO!12/24RC řady 0BA6. Rozšiřovací modul pro analogové výstupy AM2 AQ, zobrazovací panel LOGO! TD a komunikační modul pro AS-I¹, viz obr. 7. Blokové schéma konfigurace je na obr. 8.



Obr. 7: Použitá konfigurace LOGO! a ovládací panel LOGO! TD.



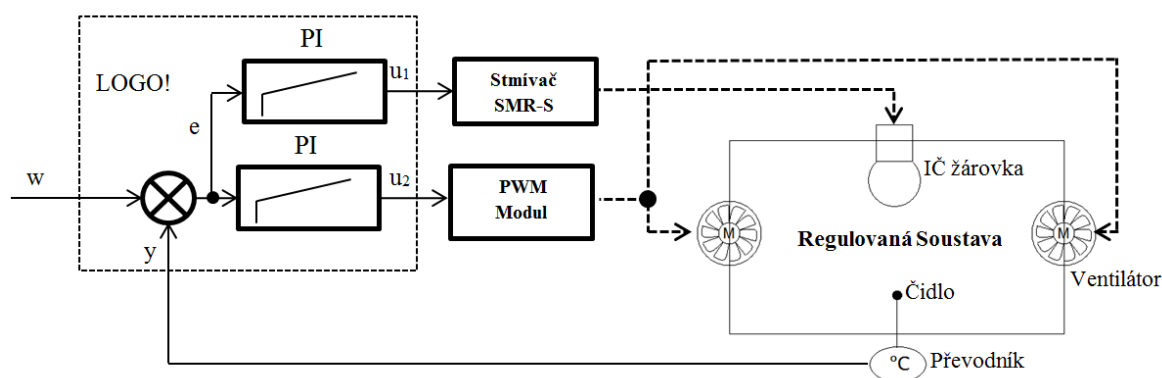
Obr. 8: Blokové schéma použité konfigurace LOGO! s rozšiřovacími moduly.

¹ Komunikační modul pro AS-I však není využit, protože LOGO! zde může plnit pouze funkci slave a pro jeho řízení by bylo zapotřebí řídicí zařízení, které plní funkci master (např. SIMATIC S7-200), viz obr. 6.

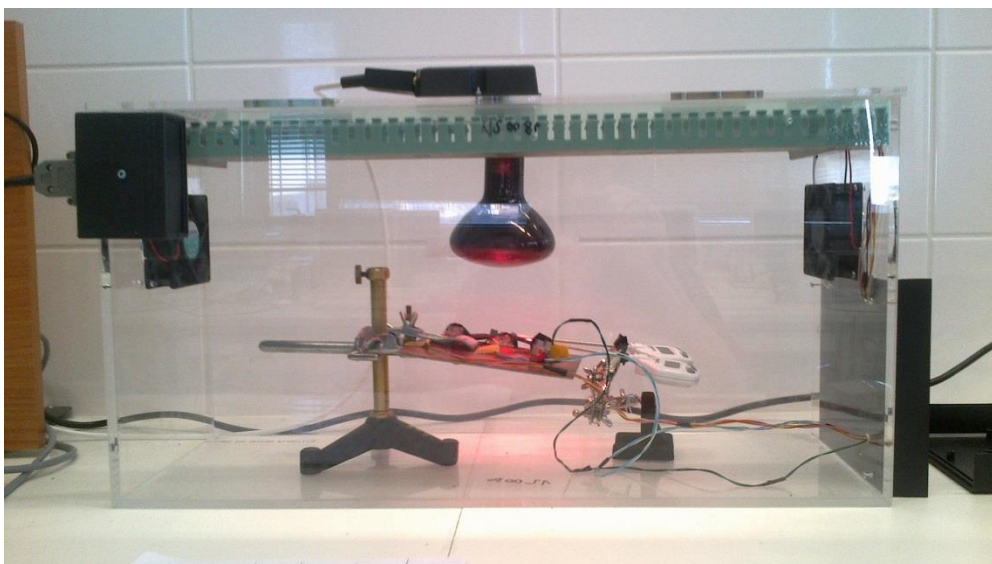
K dispozici jsou tedy čtyři analogové vstupy (0–10 V) s rozlišením 10 bit, čtyři digitální vstupy nebo osm, pokud by nebyly použity analogové vstupy. Digitální výstupy jsou čtyři v reléovém provedení (max. proud 10 A). Dva analogové výstupy s rozlišením 10 bit (různé režimy: 0–10 V/0–20 mA/4–20 mA). Dva zobrazovací displeje, jeden přímo na logickém modulu a druhý na panelu LOGO! TD. Dále čtyři kurzorová tlačítka, která lze naprogramovat jako digitální vstupy, a čtyři funkční tlačítka, která fungují jako digitální vstupy.

2.1.2 Ztotožnění použitých prvků s regulačním obvodem

Z hlediska složení regulačního obvodu z jednotlivých prvků, viz *obr. 3*, lze považovat logický modul LOGO! s jeho rozšiřovacím modulem pro analogové výstupy za samotný *regulátor*. Vytvořený program pro regulaci na konstantní hodnotu v sobě obsahuje *rozdílový člen* v podobě funkčního bloku *analogového komparátoru*. Za *ústřední člen regulace* je možno označit funkční bloky *PI regulátoru*, rovněž obsažené ve vytvořeném programu pro regulaci. *Akční členy* přivádí tepelnou energii, tepelné záření a proudění vzduchu do regulované soustavy. První *regulační orgán* je dvojice PC ventilátorů, které za pomoci proudění vzduchu snižují teplotu v regulované soustavě. Jejich *pohon* je elektronický obvod pro spínání na základě pulzní šířkové modulace (PWM). Druhý regulační orgán je infračervená žárovka, která za pomoci tepelného proudění a záření zvyšuje teplotu uvnitř regulované soustavy. Její pohon je řízený stmívač SMR-S firmy ELKO EP, jež reguluje výkon rovněž pomocí PWM. Použité pohony jsou tedy elektrické a nespojitě. Hlavním cílem je regulace teploty v regulované soustavě na konstantní hodnotu. Na *obr. 9* je blokové schéma zapojení sestavy. *Regulovaná soustava* je plexisklový box, viz *obr. 10*, který je schopen akumulovat teplo.



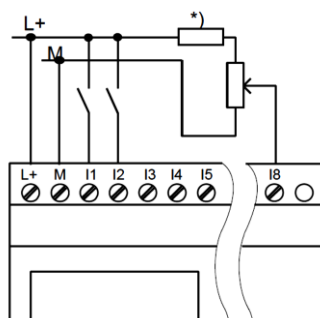
Obr. 9: Blokové schéma zapojení sestavy.



Obr. 10: Regulovaná soustava v podobě plexisklového boxu.

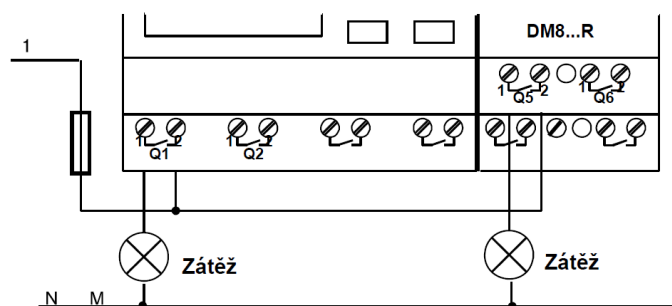
2.1.3 Zapojení vstupů a výstupů k LOGO!

Digitální i analogové vstupy nejsou galvanicky oddělené, a proto vyžadují společné referenční napětí s napájecím napětím logického modulu. Zapojují se tedy se společnou zemí (uzemnění kostry). Na obr. 11 je příklad zapojení snímače podle manuálu v podobě potenciometru mezi napájecí napětí a uzemněním kostry. Analogové vstupy mají rozsah 0–10 V. Při nastavení potenciometru na nejmenší hodnotu by bylo na analogovém vstupu napájecí napětí, tedy 24 V, což je mimo měřicí rozsah. Z tohoto důvodu je k potenciometru sériově připojen rezistor, na kterém vzniká takový úbytek napětí, aby při plné výchylce potenciometru bylo na analogovém vstupu napětí deset voltů. Z toho plyne, že napětí ze snímačů musí být upraveno tak, aby při maximální hodnotě měřené veličiny v měřicím rozsahu bylo na jeho výstupu deset voltů. Na vstupy lze přivést maximální napětí 28,8 V, avšak napětí vyšší než deset voltů je vyhodnoceno vždy jako deset voltů a tím měření postrádá smysl.



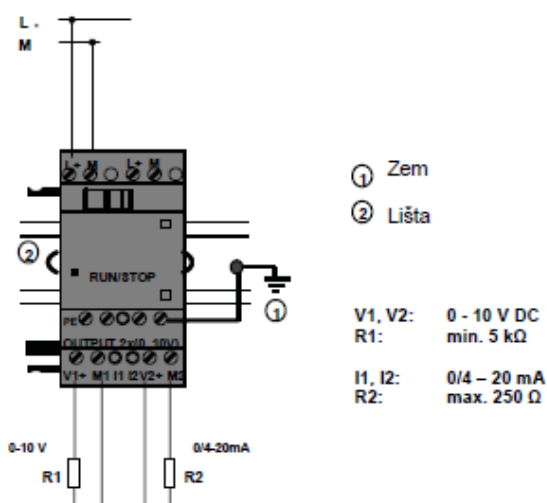
Obr. 11: Připojení snímače na analogový vstup; převzato z [9].

Digitální reléové výstupy jsou galvanicky oddělené od napájení a vstupů. Lze k nim připojit různé zátěže jako motory, žárovky, zářivky, stykače atd., viz obr. 12. Maximální stejnosměrný proud je 10 A a nárazový proud 30 A. Je nutné brát v potaz životnost výstupních relé, která klesá s narůstající hodnotou spínaného proudu a počtem cyklů (sepnutí/rozepnutí).



Obr. 12: Připojení zátěže na digitální reléové výstupy; převzato z [9].

Analogové výstupy se zapojují podle obr. 13. Stanovená napěťová zátěž je minimálně 5 k Ω a proudová maximálně 250 mA. Z toho plyne, že analogový výstup nemůže poskytnout potřebný výkon pro akční členy. Akční členy je tedy nutné impedančně nebo galvanicky oddělit od analogového výstupu.



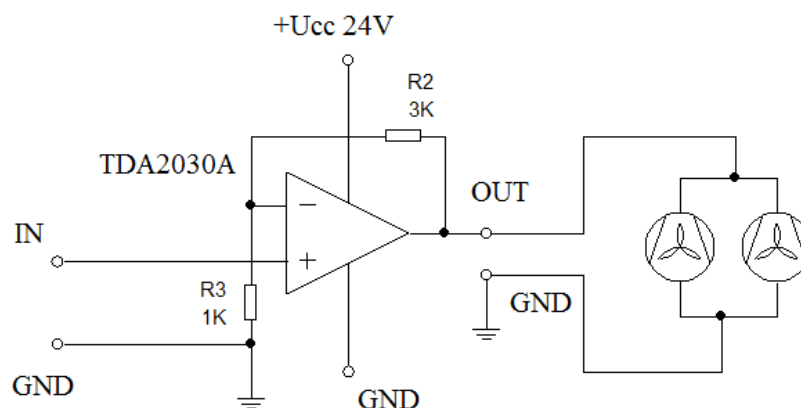
Obr. 13: Rozšiřovací modul AM2 AQ a zapojení analogových výstupů; převzato z [9].

2.1.4 Moduly pro řízení ventilátorů

Jak již bylo řečeno, analogové výstupy nemohou poskytnout potřebný výkon pro napájení ventilátorů. Toto omezení bylo vyřešeno impedančním oddělením pomocí operačního zesilovače, viz obr. 14 a galvanickým oddělením pomocí optočlenu, viz obr. 15. Pro řízení výkonu pomocí stejnosměrného napětí je zapotřebí zesilovač.

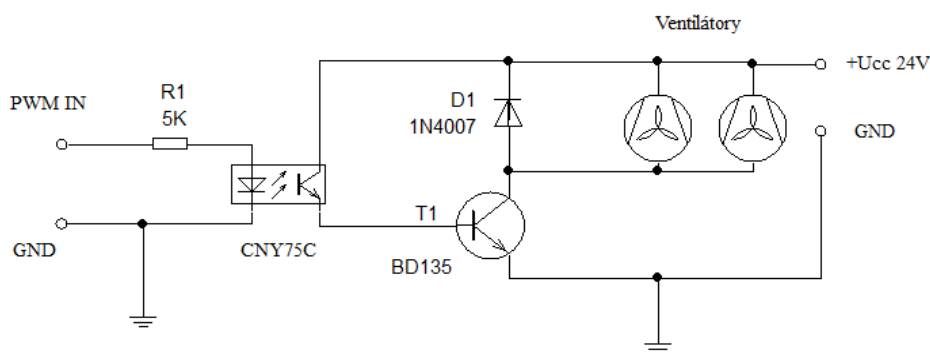
Z důvodu stejnosměrného řídicího napětí nelze použít běžný tranzistorový zesilovač s kapacitní vazbou. Pokud odebereme kapacitní vazbu, tak na zesilovač působí mnoho vlivů, které posouvají pracovní bod a řízení je nepřesné. Základem stejnosměrných zesilovačů je Darlingtonova dvojice (zapojení dvou tranzistorů za sebou), která má velké zesílení a velký vstupní odpor. V dnešní době se pro stejnosměrné zesilovače využívají především operační zesilovače [10, str. 177].

V této práci bylo testováno zapojení s koncovým výkonovým operačním zesilovačem TDA 2030A, viz obr. 14. Použité ventilátory Sunon KD2408PTS1-6 mají příkon 5,8 W (každý 2,9 W) při plném výkonu a vyžadují napájení 24 V. Řídicí napětí z analogového výstupu bylo v rozsahu 0–10 V a zesílení zesilovače bylo nastaveno na tři.



Obr. 14: Schéma zapojení modulu s operačním zesilovačem TDA 2030A pro řízení ventilátorů.

Řízení fungovalo při testování plynule a lineárně, avšak operační zesilovač se neúměrně zahříval už při malých výkonech. Vzhledem k tomu, že je určen pro symetrické napájení, byla využita pouze polovina zesilovače a vznikal na něm příliš velký ztrátový výkon. Naprostá většina výkonových operačních zesilovačů je konstruovaná tímto způsobem, protože jejich hlavní využití je v oblasti audio zesilovačů. Pro dlouhodobý provoz tohoto zapojení by bylo potřeba velkého chladiče a životnost zesilovače by ani tak nebyla velká. Proto bylo navrženo a zkonstruováno zapojení pro PWM řízení. Pulzní šířková modulace je přenos dvoustavového analogového signálu, kde je informace přenášena pomocí střídavy (tzv. duty cycle). Pokud je tento signál využit pro spínání tranzistoru, tak je tranzistor buď uzavřen, tedy nepropouští žádný proud, nebo je plně otevřen v tzv. stavu saturace. V obou těchto stavech má tranzistor velmi malý ztrátový výkon a jeho zahřívání je tedy minimální, navíc odpadá nastavování pracovního bodu. Na obr. 15 je schéma modulu pro pulzní šířkovou modulaci.

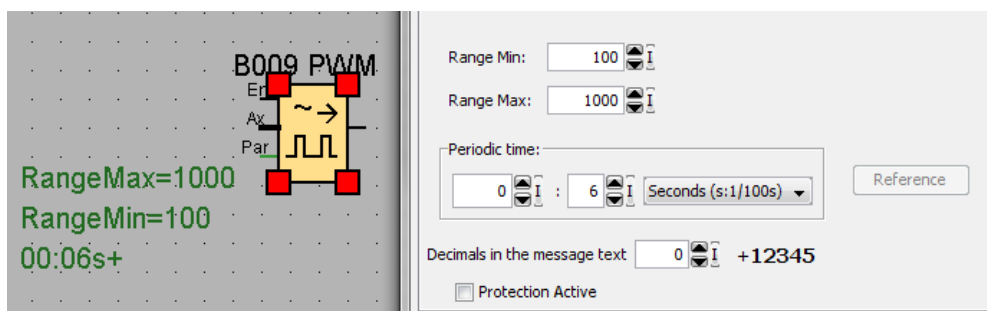


Obr. 15: Schéma zapojení modulu pro PWM řízení ventilátorů.

Optočlen galvanicky odděluje výkonovou větev a analogový výstup LOGO!. Tranzistor obsažený v optočlenu nedokáže propouštět vysoký proud, a proto je výkonově posílen dalším tranzistorem BD135 a spolu s ním tvoří Darlingtonovu dvojici. Vstupní PWM signál byl nastaven na dvoustavovou hodnotu nula nebo deset voltů. Rezistor 5 kΩ vytváří potřebnou vstupní impedanci obvodu. Ventilátory potřebují proud 0,24 A pro plný výkon. Zesílení tranzistoru BD135 je 200 a pro saturaci je tedy zapotřebí přivést 1,2 mA do báze. Pokud je na vstupu deset voltů, tak je při tomto zapojení na bázi tranzistoru proud

okolo 3 mA, což je zhruba třikrát více, než je minimálně zapotřebí. Pro správný chod se saturační proud nastavuje třikrát větší, čehož bylo docíleno. Dioda je v obvodu z toho důvodu, aby zredukovala naindukované napětí na cívkách elektromotoru ventilátorů, které by mohlo poškodit tranzistor při přechodu ze zapnutého do vypnutého stavu (v takovém zapojení se nazývá damper dioda) a je možno použít běžnou usměrňovací diodu.

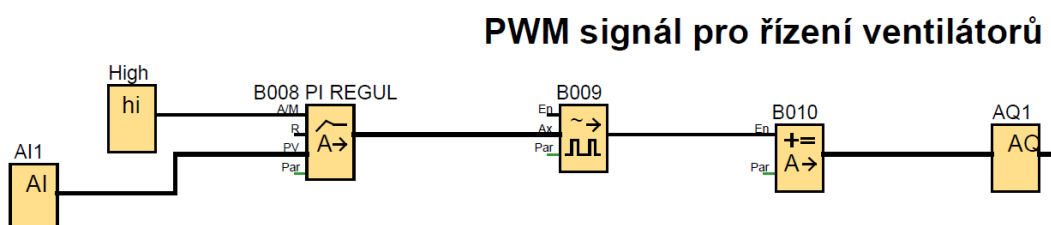
V programování LOGO! lze využít funkční blok přímo pro generaci PWM signálu. V nastavení parametrů je možno nastavit rozsah vstupní hodnoty, při které je zapnut výstup a hlavně periodu samotného PWM signálu, viz *obr. 16*.



Obr. 16: Funkční blok pro generování PWM signálu.

Analogový výstup se aktualizuje každých 50 ms, proto je nutné nastavit periodu větší. Byla vybrána hodnota 60 ms, což odpovídá frekvenci zhruba 17 Hz. Pro správný chod ventilátoru by byla vhodnější vyšší frekvence, aby byl jeho chod plynulý i při malých výkonech, avšak tato frekvence je i tak dost velká z hlediska aktualizací doby analogového výstupu. Proto byla zvolena kompromisní frekvence 17 Hz, při které je plynulost chodu ventilátorů dostačující a regulace je lineární. Logický modul LOGO! je určen pro průmyslové aplikace, kde většinou řídí motory s velkým momentem setrvačnosti pro turbíny apod., zde je malá frekvence PWM signálu žádoucí. Na základě vstupního signálu v rozsahu 0–1000 je nastavována štika 0–100 % na výstupu PWM funkčního bloku.

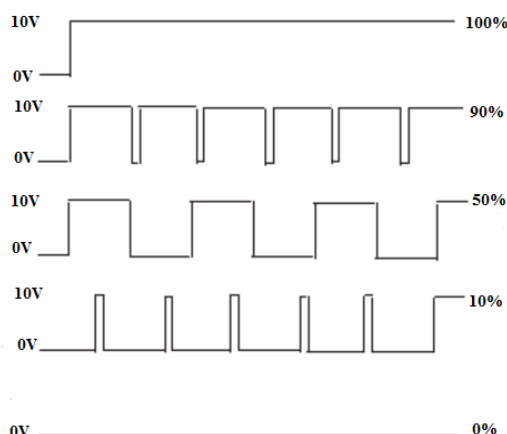
Ukázka programu pro řízení ventilátorů je na *obr. 17*, kde na základě teploty z analogového vstupu *PI regulátor* generuje hodnotu v rozsahu 0–1000 a ta je přivedena na vstup *PWM* funkčního bloku.



Obr. 17: Jednoduchý program pro regulaci teploty pro demonstraci PWM řízení ventilátorů.

PWM funkční blok nastaví štika podle signálu z *PI regulátoru*, podle které je zapínán a vypínán funkční blok *analogová matematika*. Ve funkčním bloku *analogová matematika* je nastavena hodnota 1000, která je přivedena na *analogový výstup* pokud je

blok zapnut, kde interpretuje napětí 10 V. Příklady PWM signálu na analogovém výstupu jsou na obr. 18.



Obr. 18: Příklady různého nastavení střídy pro výstupní PWM signál.

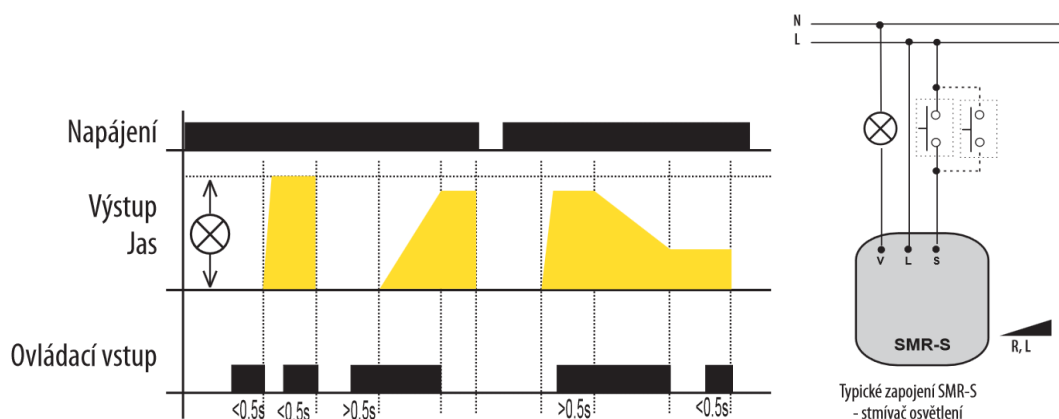
Podle nastavené střídy je pak řízen výkon ventilátorů, tedy počet otáček za jednotku času. Střída 0% znamená vypnuté ventilátory, 50 % znamená poloviční výkon a 100 % maximální výkon atd.

2.1.5 Řízení výkonu infračervené žárovky

Pro řízení výkonu žárovek pro síťové napětí se obecně používají stmívače. Stmívač je elektronický obvod, který ve většině případech pracuje na principu PWM. Pro řízení vysokých výkonů je to nezbytné z hlediska eliminace ztrátového výkonu na aktivním prvku zesilovače. Při PWM řízení se tranzistor zahřívá minimálně, jak již bylo demonstrováno v případě řízení ventilátorů. Pro síťové napětí je tranzistor nutné nahradit triakem, jež je konstruován pro spínání síťového střídavého napětí. Na trhu jsou k dostání stmívací jednotky, které je možné řídit unifikovaným signálem např. 0–10 V přímo z PLC, určené pro aplikace v inteligentních budovách. Jejich cena je však vysoká a většina z nich by převýšila cenu použitého logického modulu. Konstrukce vlastního stmívače by byla náročná, především z nutnosti dodržet velké množství norem a ochranných prvků, které jsou při práci se síťovým napětím nutností. Navíc pro řízení síťového napětí pomocí PWM je nutná vyšší frekvence než 50 Hz, což logický modul nedokáže poskytnout, a byla by nutná další konstrukce oscilátoru. Na základě těchto skutečností byl zvolen kompromis ve formě řízeného stmívače SMR-S firmy ELKO EP, viz obr. 19. Jeho cena se pohybuje okolo 350 Kč, což je oproti konvenčním spínacím jednotkám markantní rozdíl. Je určen pro montáž do instalační krabice pod vypínač a řídí se tlačítkem. Protože je tento stmívač řízen tlačítkem, je nutné použít digitální výstup pro jeho ovládání. Program pro řízení pomocí digitálního výstupu je vytvořen tak, aby imitoval vypínač ovládaný lidskou obsluhou, pro který je stmívač určen. Řízení spočívá v tom, že pokud je tlačítko sepnuto kratší dobu než 0,5 s, tak se stmívač zapíná či vypíná jako klasický vypínač. Pokud je však sepnuto déle než 0,5 s, tak lineárně zvyšuje či snižuje výkon spotřebiče v rozsahu 0–100 %, podle délky sepnutí v rozsahu 0,5–3 s (mezní délku sepnutí pro dosažení maximálního výkonu výrobce neuvádí, ale byla experimentálně ověřena na čtyři sekundy). Nastavený výkon zůstává uložen ve stmívači i po jeho vypnutí a následném zapnutí, viz obr. 20.

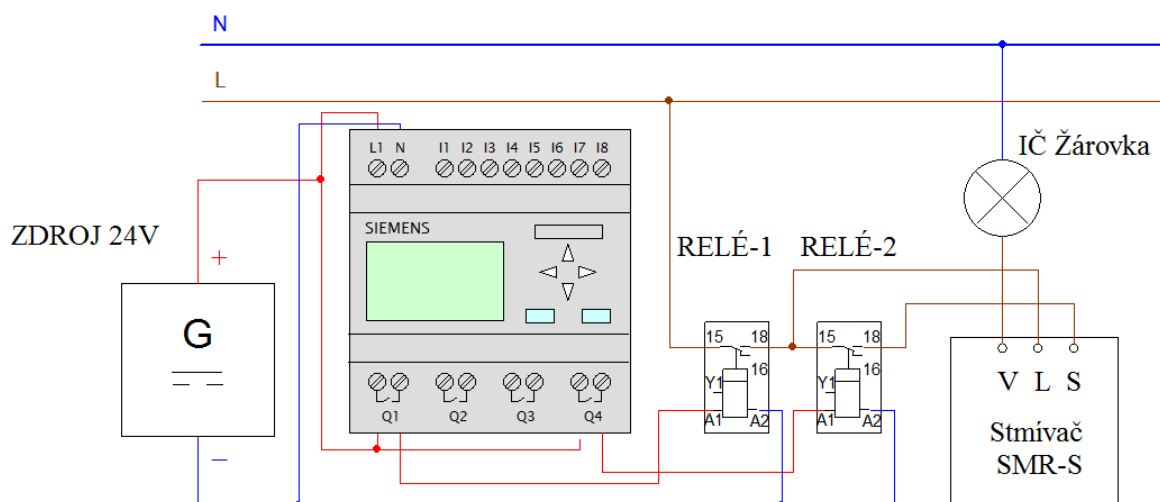


Obr. 19: Tlačítkem řízený stmívač SMR-S firmy ELKO EP pro odporové a induktivní zátěže; převzato z [11].

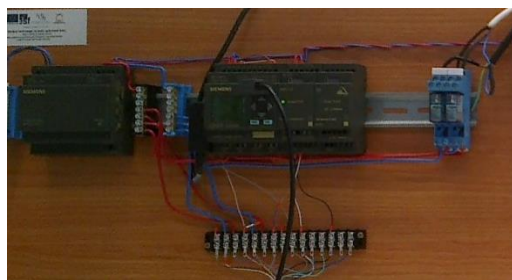


Obr. 20: Řízení výkonu pomocí délky sepnutí řídicího tlačítka stmívače SMR-S a typické zapojení; převzato z [11].

Pokud digitální reléové výstupy LOGO! spínají vysoké proudy, tak klesá jejich životnost spolu s počtem cyklů (sepnutí/rozepnutí). Z toho důvodu byla použita dvě externí relé, která spínají síťové napětí a digitální výstupy LOGO! spínají pouze řídicí napětí 24 V pro tato externí relé, viz obr. 21. Takto bylo docíleno i dostatečného odstupu síťového kabelu od sdělovacího kabelu s informacemi ze snímačů a nevzniká tak rušení. Externí relé je zasezeno do objímky, která je instalována přímo na Din liště, viz obr. 22. Výměna poškozeného relé je velmi snadná oproti výměně interního relé v logickém modulu.



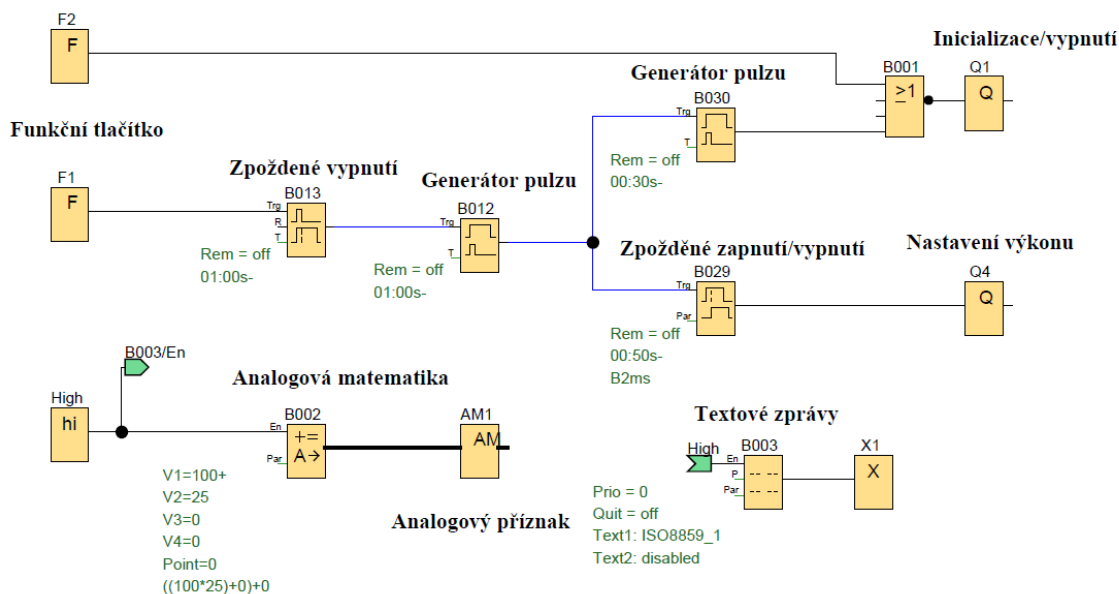
Obr. 21: Zapojení stmívače pro žárovku se dvěma externími relé.



Obr. 22: Montáž externích relé pro ovládání stmívače.

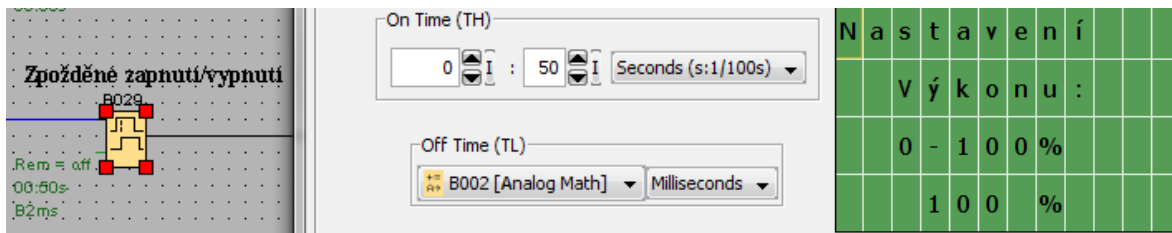
Z obr. 21 je patrné, že relé číslo jedna (tedy digitální výstup Q1) je použito pro zapínání a vypínání napájení stmívače a relé číslo dva (tedy digitální výstup Q4) je použito jako řídicí tlačítko pro ovládání výkonu. Doba setrvání digitálního výstupu Q4 na hodnotě logická jedna tedy určuje nastavení výkonu infračervené žárovky. Výstup Q1 je schopen odpojit stmívač od napájení, což je vhodné i pro odpojení stmívače při vypnutí logického modulu. Krátkým pulzem výstupu Q1 do logické nuly je možné stmívač dostat do inicializačního stavu (do stavu, který pro LOGO! jednoznačně znamená, že je stmívač připojen k napájení, žárovka je vypnuta a je možné nastavit novou hodnotu výkonu pomocí výstupu Q4). Toto řešení se po zvážení všech možností ukázalo jako nejvhodnější z hlediska funkčnosti celého systému.

Na obr. 23 je program pro manuální ovládání výkonu infračervené žárovky.



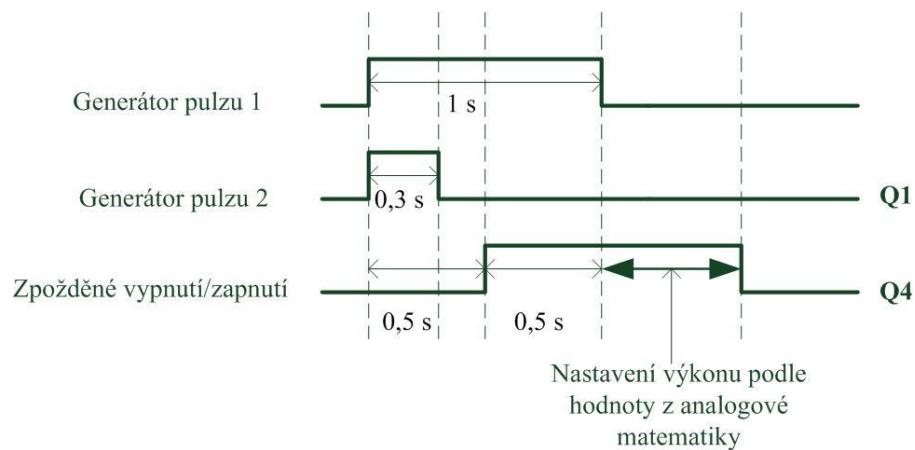
Obr. 23: Ukázka programu pro manuální ovládání výkonu infračervené žárovky.

Na textovém displeji je nastavena hodnota analogové matematiky V1 v rozsahu 0–100 „%“. Analogová matematika tuto hodnotu vynásobí hodnotou V2 = 25 a na jejím výstupu bude tedy hodnota v rozsahu 0–2500 (v konečném programu upraveno na V2 = 40, tedy, tedy rozsah 0–4000). Hodnota na výstupu analogové matematiky je použita jako parametr ve funkčním bloku zpožděné zapnutí/vypnutí pro délku trvání zpožděného vypnutí v milisekundách, viz obr. 24.



Obr. 24: Nastavení parametrů funkčního bloku zpožděné zapnutí/vypnutí a zobrazení výkonu na textovém displeji v procentech.

Délka zpožděného zapnutí je nastavena na 0,5 s. Na vstup zpožděného vypnutí/zapnutí je poslán pulz o délce 1 s a tímto je nastavena délka sepnutí digitálního výstupu $Q4$. Pulz 1 s je tedy poslán na blok zpožděného vypnutí/zapnutí, to sepne svůj výstup až po nastaveném čase 0,5 s a mezitím proběhne inicializace výstupu $Q1$ vypínacím pulzem 0,3 s. Po uplynutí času 0,5 s je výstup bloku zpožděného vypnutí/zapnutí zapnut podobu další 0,5 s plus nastavenou hodnotu v milisekundách z výstupu analogové matematiky v rozsahu 0–2,5 s, viz obr. 25.



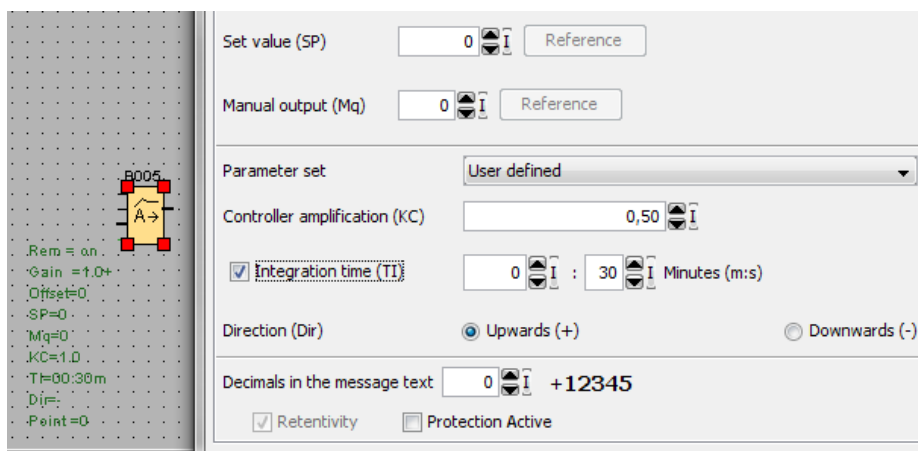
Obr. 25: Časování pro řízení digitálních výstupů $Q1$ a $Q4$.

Funkční tlačítko $F1$ je v módu (Momentary pushbutton make) jako klasické spínací tlačítko a slouží k aktualizaci hodnoty výkonu. Blok zpožděného vypnutí zajistí logickou hodnotu jedna na vstupu generátoru pulzů po dobu nejméně jedné sekundy, ať už je tlačítko stisknuto jakkoliv dlouho. Funkční tlačítko $F2$ je v módu (switch), jako spínač a má uloženou logickou hodnotu nula, která se po stisknutí změní na jedna a naopak.

Tento program lze použít pro automatickou regulaci teploty, pokud je místo analogové matematiky pro výpočet délky pulzu použit výstup z PI regulátoru. A funkční tlačítko $F1$ pro aktualizaci hodnoty je nahrazeno prvkem pro diskrétní aktualizaci výkonu v čase. S použitým stmívačem je sice možné spojitě nastavovat hodnotu výkonu, ale diskrétně v čase. Periodu diskrétního nastavování je nutné správně zvolit s ohledem na životnost relé a je nutno brát v potaz, že při každé aktualizaci výkonu je infračervená žárovka krátkou dobu vypnuta a výkon narůstá od nejmenší hodnoty, než dosáhne cílové. To může mít vliv na teplotu v regulované soustavě a ztěžovat tak její regulaci.

2.2 Program pro regulaci teploty a prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0.

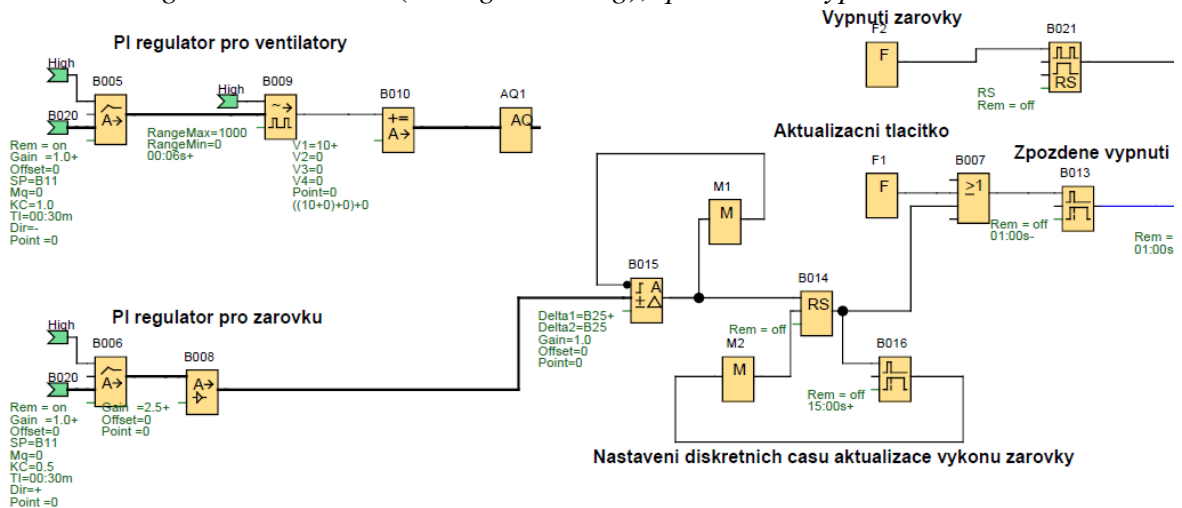
Základem spojitě automatické regulace je ústřední člen regulátoru, jenž je v tomto případě funkční blok *PI regulátor*, viz obr. 26. Na jeho analogový vstup se přivádí regulovaná veličina, tedy aktuální teplota v regulované soustavě. Dále má dva digitální vstupy, první slouží k resetování (nastaví nulu na výstupu regulátoru) a druhý slouží k přepínání mezi automatickým a manuálním režimem. Hlavním parametrem *PI regulátoru* je požadovaná hodnota (Set value), v této práci požadovaná teplota. Dále je k dispozici parametr manuálního výstupu, pomocí kterého se nastaví hodnota na výstupu *PI regulátoru*, pokud je aktivován manuální režim. Tyto parametry lze nastavit podle výstupu jiných funkčních bloků, např. *analogové matematiky* nebo *analogového zesilovače*, přes tlačítko reference. Pro optimální chod regulace se nastavuje proporcionální a integrační parametr *PI regulátoru*, s takovým cílem, aby bylo požadované hodnoty dosaženo co nejrychleji a s co možná nejmenším překmitem. Je možné využít některé přednastavené hodnoty proporcionální a integrační složky jako např. temperature fast, pressure 1 atd. Dále se nastavuje směr složky regulátoru (Upwards /Downwards), počet desetinných míst na textovém displeji a ochrana parametrů (Protection Active), což zakáže měnit parametry přes uživatelský panel. Remanence (Retentivity) je vždy zapnuta, takže při každém výpadku proudu nebo vypnutí programu bude uložena poslední výstupní hodnota *PI regulátoru*.



Obr. 26: Nastavení parametrů *PI regulátoru*.

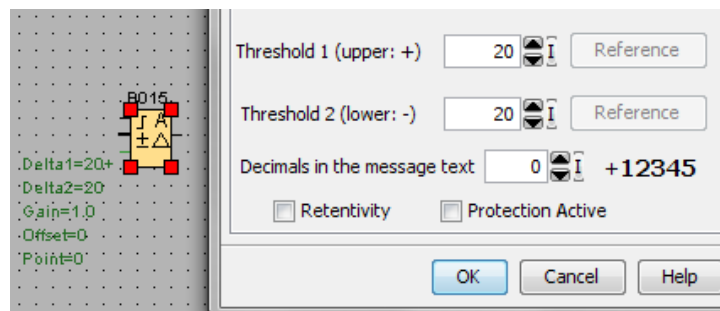
PI regulátor sám vypočítá regulační odchylku $e(t) = w(t) - y(t)$. Proporcionální složka pak tuto odchylku zesílí podle nastaveného proporcionálního parametru *KC*. Integrační složka funguje tak, že na výstupu regulátoru se nastaví hodnota regulační odchylky za integrační čas *TI*. To znamená, že hodnota na výstupu bude lineárně narůstat v čase s takovou rychlostí, aby za integrační čas dosáhla hodnoty regulační odchylky. Díky tomuto chování *PI regulátoru* se hodnota na jeho výstupu postupně ustálí na takové hodnotě, při které je aktuální teplota v regulované soustavě rovna požadované teplotě (Set value). Při regulaci výkonu ventilátorů je výstupní hodnota *PI regulátoru* přivedena na funkční blok *PWM*, jak již bylo popsáno v kapitole 2.1.4. Další funkční blok *PI regulátoru* je použit pro řízení výkonu infračervené žárovky, viz obr. 27, obdobně jako v kapitole

2.1.5. Je zde však vyřešena diskretní aktualizace výkonu žárovky v čase, pomocí funkčního bloku *analogového sledovače (analog watchdog)*, *zpožděného vypnutí* a *samodržného relé*.



Obr. 27: Část finálního programu pro automatickou regulaci teploty.

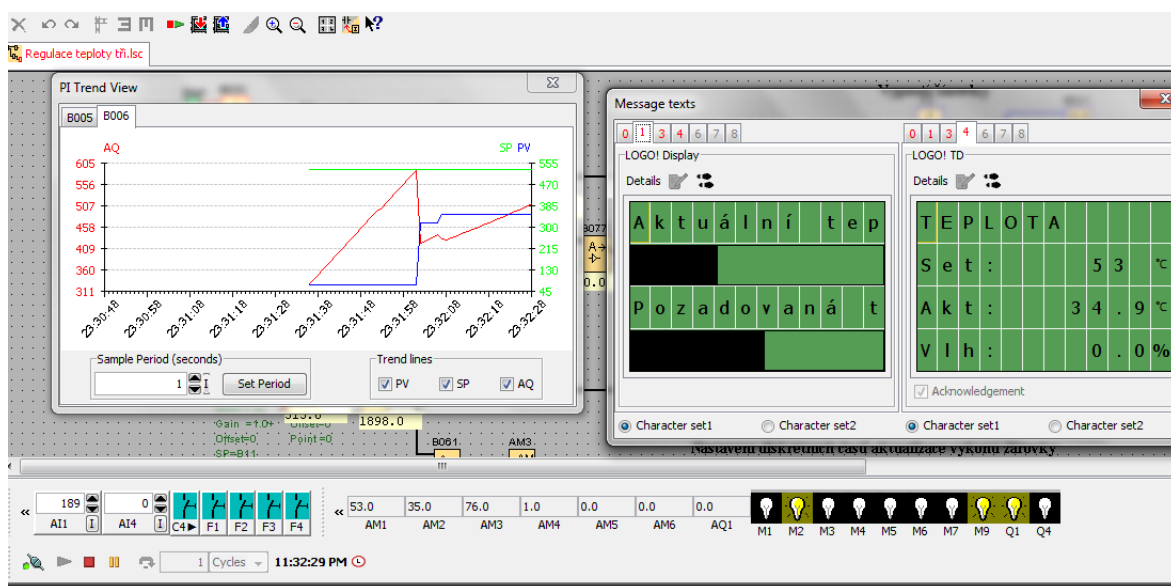
Analogový sledovač je na obr. 28. Má dva vstupy, jeden slouží pro uložení aktuální analogové hodnoty (při přechodu z logické nuly na jedna), která je přivedena na druhý vstup. V jeho parametrech se nastavuje horní a dolní diferenční hodnota.



Obr. 28: Nastavení parametrů analogového sledovače.

Výstup analogového sledovače se zapne, pokud je na jeho analogovém vstupu překročena uložená hodnota o hodnotu nastavené diference. Toto je využito pro aktualizaci výkonu infračervené žárovky. Pokud se tedy změní výstup *PI regulátoru* o nastavenou diferenci, je aktualizován výkon. Výkon by se však aktualizoval příliš rychle, pokud by se rychle měnila akční veličina např. při změně požadované hodnoty teploty. Aby se relé neopotřebovala, je povolena aktualizace nejdříve po patnácti sekundách od poslední aktualizace pomocí *samodržného relé* a *zpožděného vypnutí*. Aby se uložila nová hodnota v analogovém sledovači, po tom co je výkon aktualizován, je přiveden výstup analogového sledovače na jeho vstup. Ovšem přivedení výstupu jednoho bloku na vstup toho samého je rekurze, což je v programování LOGO! zakázáno. Z toho důvodu je do této smyčky implementován digitální příznak (M), který má stejnou hodnotu na svém výstupu jako na svém vstupu se zpožděním jednoho strojového cyklu. Rekurzi je tímto způsobem možno vyřešit i v případě *samodržného relé* a *zpožděného vypnutí*, viz obr. 27. Celý program pro automatickou regulaci, viz [přl.1], je o něco složitější, protože obsahuje textové zprávy, bloky pro ukončení větví, větve pro linearizaci snímače, větve pro manuální režim, větve pro mód nespojitě regulace, příznaky určené pro monitoring, bloky pro zadávání parametrů, měření délky cyklu, měření vlhkosti atd.

V prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0. lze provádět simulaci vykonávání programu, což je velmi užitečné při testování funkčnosti složitějších programů, viz obr. 29.



Obr. 29: Ukázka simulace programu pro automatickou regulaci teploty.

V simulaci je možno měnit hodnoty na analogových a digitálních vstupech včetně funkčních tlačítek. Zároveň lze sledovat hodnoty na výstupech a příznacích. Pro *PI* regulátor je k dispozici graf s průběhem regulované, požadované a akční veličiny v reálném čase. Je možné simulovat výpadek proudu a spouštět program po jednotlivých cyklech nebo jiných časových intervalech. Nastavení konkrétního času nebo data slouží pro testování týdenních a ročních spínacích hodin. Lze simulovat výstupy na displeji a zadávání parametrů pomocí HMI.

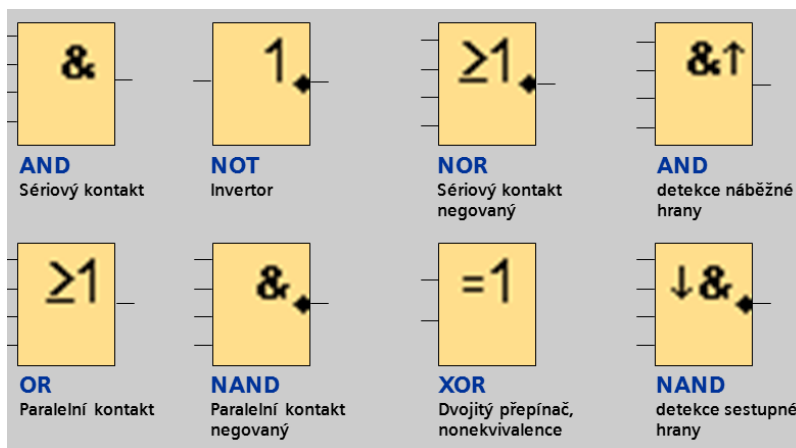
Dále je možné nahrávat program do logického modulu pomocí sériového kabelu nebo USB redukce společně se softwarem pro vytvoření virtuálního sériového portu. Aby bylo možné program nahrát do paměti LOGO!, musí být řádně zakončeny všechny větve programu. Program lze převést i z logického modulu do PC. Pro ochranu know-how je možno program zaheslovat. Je možné zapnout i online simulaci a sledovat skutečné hodnoty z logického modulu v reálném čase při běhu programu. Ale při každé změně parametrů je nutné online simulaci zapnout od znova, což znemožňuje porovnání dat, navíc archivace dat není také možná. Z toho důvodu byla použita demoverze softwaru pro monitoring hodnot ze systému LOGO! od firmy Quirex.² Pro monitoring pomocí softwaru přímo od firmy Siemens by bylo nutné LOGO! zapojit do distribuovaného systému s vyšším PLC či procesním počítačem.

2.3 Funkční bloky v prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0.

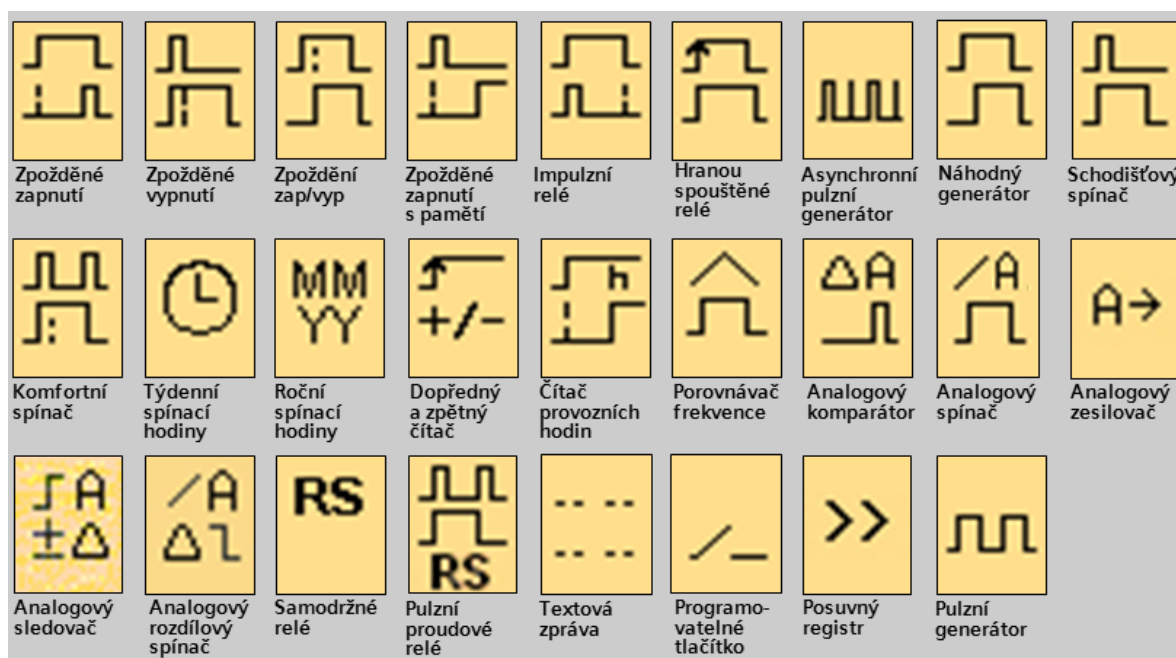
Pro tvorbu programu lze využít širokou škálu funkčních bloků. Programovat lze přímo na displeji logického modulu, avšak tento postup se hodí pouze pro krátké programy, neboť při větším počtu funkčních bloků je orientace v programu velmi

² Je k dispozici i software pro monitoring na bázi programovacího prostředí LabVIEW, ale zdá se, že tyto softwary jsou zatím ve fázi vývoje a jejich možnosti neodpovídají jejich ceně.

nepřehledná. Používá se spíše pro rychlou opravu již hotového programu. V prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0. je možné programovat v jazyku LAD (Ladder Diagram) tzv. jazyk reléových schémat. Nebo v jazyku FBD (Function Block Diagram) tzv. jazyk funkčních bloků, tento jazyk je grafický a uživatelsky přívětivý (vyšší PLC podporují i jazyk strukturovaného textu nebo mnemokódů). Pro programování byl vybrán jazyk FBD, který je nejpoužívanější. K dispozici je mnoho logických funkčních bloků, pomocí nichž je možné vytvořit téměř jakoukoliv logickou funkci, viz *obr. 30*. Dále jsou k dispozici různé časovače, které umožňují vytvořit velkou škálu časových sekvencí, generátory a čítače. Velké možnosti poskytují funkční bloky pro zpracování analogového signálu, viz *obr. 31*.



Obr. 30: Logické funkční bloky; převzato z [8].



Obr. 31: Funkční bloky speciálních funkcí; převzato z [8].

Programování je omezeno počtem funkčních bloků, kterých může být maximálně 200, uživatelskou pamětí, která má velikost 3800 bytů a pamětí pro remanentní hodnoty, jejíž velikost je 250 bytů. Z toho důvodu je nutné vytvořit program co možná

nejjednodušeji s ohledem na požadovanou funkčnost. Dále je nutno šetřit s analogovými příznaky, kterých lze použít pouze šest a digitálních příznaků 24.

2.4 Použité snímače

Použité snímače můžeme označovat za **dotykové**, na základě styku s měřeným prostředím, a za **pasivní**, na základě transformace signálu (jejich elektrickou veličinu např. odpor, kapacitu je tedy nutné dále transformovat na analogový napěťový signál). Pasivní snímače je nutné napájet, na rozdíl od aktivních. Aktivní snímač se chová jako zdroj elektrické energie díky vlivům měřené veličiny (např. termočlánek). Transformovaný elektrický signál je většinou nutné zesílit. Právě ve zpracování elektrických signálů je podstatná výhoda v transformaci neelektrické veličiny na elektrickou, neboť se signály lze provádět libovolné matematické operace (sčítání, odečítání, násobení, dělení, derivace, integrace atd.) [6].

V této práci snímač představují čidla (Pt1000, NTC termistor, LM35 a modul pro měření vlhkosti) se svými převodníky na unifikovaný signál. Převodníky představují elektronické obvody zkonstruované tak, aby zajistili potřebnou citlivost, rozsah či linearitu celkového snímače. Jejich výstupní signál se blíží unifikovanému (0–10 V) v měřicím rozsahu (0–100 °C). Hlavní převod signálu na skutečnou hodnotu však provádí logický modul LOGO! pomocí vytvořeného programu, jež vykonává na základě známých převodních charakteristik snímačů.

V této části je popsán návrh a konstrukce jednoduchých převodníků pro použítá teplotní čidla. Jedná se především o napájení čidla a zesílení transformovaného signálu. Z hlediska jednoduchosti návrhu se nepřepokládá, že budou zhotovené snímače dosahovat velké přesnosti měření. Podstatná část chyby měření je pak eliminována vytvořeným programem, který vykonává logický modul LOGO!. Získané hodnoty teploty v regulované soustavě jsou spíše orientační, ale pro daný účel postačující.

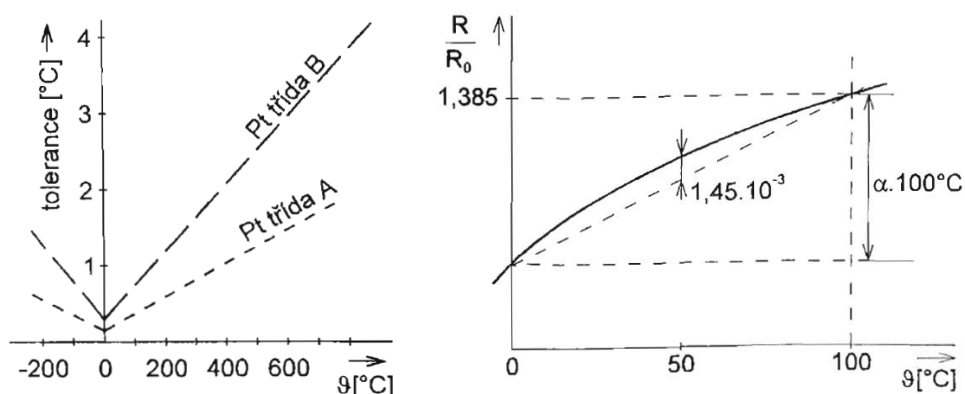
2.4.1 Teplotní čidlo Pt1000

Principem odporových kovových teplotních čidel je teplotní závislost odporu kovu na teplotě. Velmi častým materiálem pro odporové snímače teploty je platina, která se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Dnes se platinová čidla vyrábí tzv. tenkovrstvou technologií, kde je platinová vrstva napařována na korundovou destičku a ta je pak často ukládána do keramického pouzdra. Jejich teplotní součinitel odporu je velmi malý $\alpha = 0,00385 \text{ K}^{-1}$ a proto se zapojují do můstku pro zvýšení jejich citlivosti. Dle doporučení IEC (mezinárodní elektrotechnická komise) se platinové měřicí odpory dělí do dvou tolerančních tříd. Třída A je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 650 °C , třída B je pro rozsah od -200 °C do 850 °C , viz obr. 32. Standardní hodnotou Pt čidla je $100 \text{ } \Omega$ při 0 °C , ale kromě této hodnoty se vyrábějí Pt čidla 50 , 200 , 500 , 1000 a $2000 \text{ } \Omega$. Pro Pt1000 v rozsahu teplot větších než 0 °C platí vztah [6]

$$R_t = R_0(1 + A_t + B_t^2), \quad (2)$$

kde R_t = odpor [Ω] při teplotě t [K], $R_0=1000 \text{ } \Omega$ při $273,15 \text{ K}$ (0 °C),
 $A=3,9020 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B=-5,802 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$.

Na obr. 32 je zřejmá chyba nelinearity Pt čidla v rozsahu (0–100 °C), jež není velká, ale při větších rozsazích se projeví a má vliv na přesnost měření.



Obr. 32: Vlevo: Tolerance Pt čidel dle IEC; převzato z [6]. Vpravo: Chyba nelinearity Pt čidla; převzato z [6].

V této práci byl použit platinový snímač teploty Pt1000 toleranční třídy B v keramickém pouzdře, viz [přl.2].

Parametry:

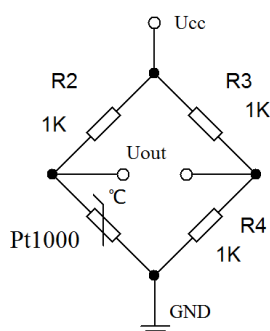
Teplotní časová konstanta ... $t_{c(0,5)} = 24,8$ s; $t_{c(0,9)} = 78,8$ s

Teplotní rozsah ... od -70 °C do 500 °C

Tolerance odporu ... ± 2 %

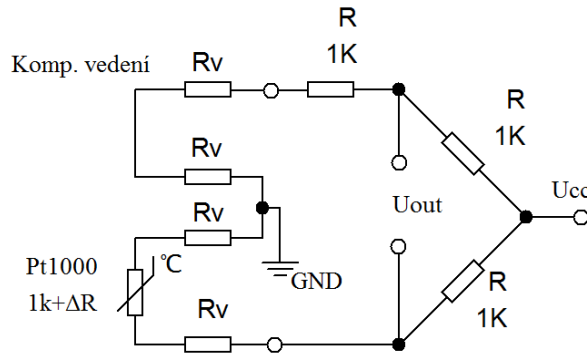
Maximální výkon ... 1 mW

Jak již bylo řečeno, platinové čidlo teploty má malý teplotní součinitel odporu $\alpha = 0,00385$ K⁻¹. Z toho důvodu je nutné čidlo zapojit do Wheatstoneova můstku pro zvýšení jeho citlivosti, viz obr. 33.



Obr. 33: Wheatstoneův můstek s Pt1000; upraveno z [12].

Pro eliminaci chyby vzniklé na vedení od čidla je nutné použít tzv. čtyřvodičové zapojení, viz obr. 34. Princip je takový, že k čidlu je vedeno tzv. kompenzační vedení, které je identické s vedením, jež je napojeno na kontakty čidla. Obě vedení jsou distribuované stejnou cestou a podléhají stejným podmínkám. Změny odporu v závislosti na teplotě se projeví na každém vedení stejně. Kompenzační vedení je pak zapojeno do protější větve Wheatstoneova můstku a chyba vzniklá na vedení k čidlu se tak vynuluje.



Obr. 34: Wheatstoneův můstek pro Pt1000 s kompenzačním vedením; upraveno z [12].

Na obr. 34 je R_v odpor vedení; U_{cc} je napájecí napětí, U_{out} je výstupní napětí, R jsou odpory v můstku a ΔR je změna odporu čidla vůči referenční hodnotě $1\text{ k}\Omega$ při $0\text{ }^\circ\text{C}$. Pro výpočet výstupního napětí U_{out} lze použít následující vztah [12],

$$U_{out} = \frac{U_{cc}}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right). \quad (3)$$

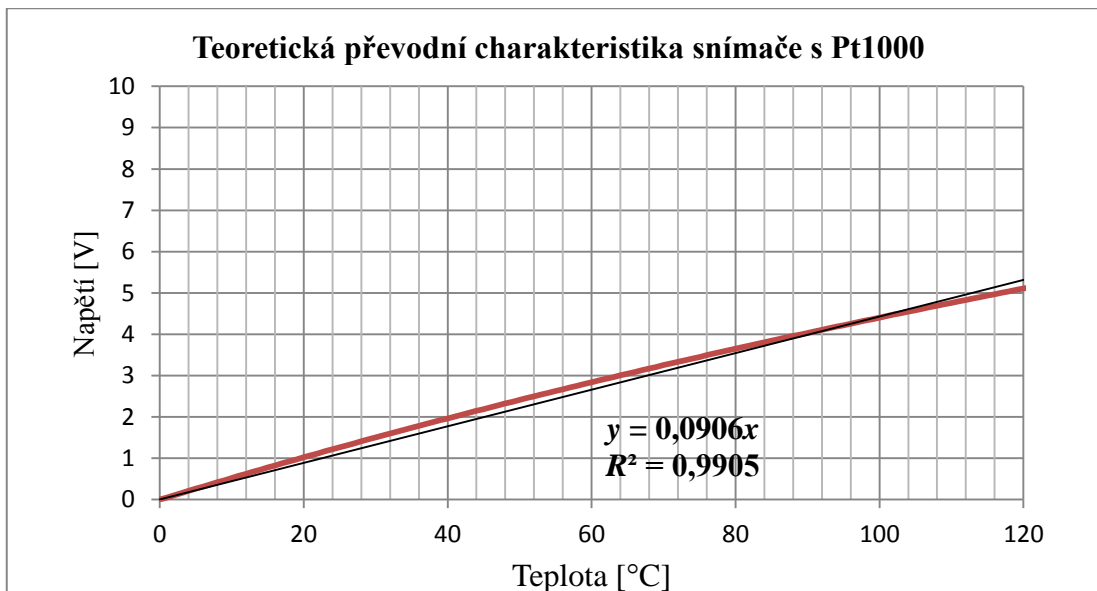
Vzhledem k minimalizaci nežádoucího sebeohřevu čidla jím musí protékat co nejmenší proud ($<1\text{ mA}$ aby chyba nepřesáhla hodnotu stanovenou v normě pro třídu B). Můstek je proto nutné napájet nízkým napětím. Z toho plyne, že výstupní napětí můstku je velmi nízké a je potřeba ho zesílit s co možná nejmenší chybou. Pro tyto účely byl vybrán přístrojový zesilovač INA125 firmy Texas Instruments specializovaný pro můstková zapojení, který je možné napájet jednotným napětím (není zapotřebí symetrický zdroj) a dokáže poskytnout referenční napětí pro napájení můstku, viz [přl.2]. Zesílení tohoto zesilovače se nastavuje hodnotou jednoho rezistoru R_G , jak je u přístrojových zesilovačů běžné. Pokud není použito zapojení pro vytvoření umělé země (pseudoground), tak pro zesílení platí vztah

$$G = 4 + \frac{60\text{ k}\Omega}{R_G}, \quad (4)$$

kde G je zesílení (Gain) a R_G je odpor, kterým se nastavuje zesílení.

Celé schéma i s návrhem DPS (Deska Plošných Spojů) je v [přl.2].

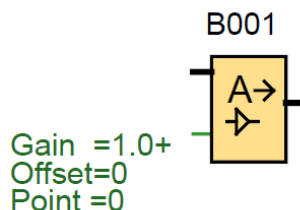
Na základě vztahů (2), (3) a (4) byl zhotoven graf teoretické převodní charakteristiky hotového snímače, viz graf 1. Napájecí napětí můstku bylo zvoleno ($U = 1,24\text{ V}$) a zesílení přístrojového zesilovače bylo nastaveno na ($G = 90 \dots R_G = 698\ \Omega \cong 700\ \Omega$).



Graf 1

Z grafu 1 je patrná nelinearita snímače daná především vlastnostmi teplotního čidla Pt1000. Malý podíl na nelinearitě má i zapojení čidla do Wheatstoneova můstku. V grafu je znázorněna i ideální lineární rovnice s koeficientem determinace R^2 (Pearsonův korelační koeficient na druhou).

Analogově digitální převodník v LOGO! převádí vstupní analogový signál na číselný v poměru (0–10 V/0–1000 jednotek), tedy napětí ve voltech vynásobí stem. Pro vyhodnocení teploty na základě napěťové hodnoty ze snímače přivedené do logického modulu LOGO! se využívá funkčního bloku *analogového zesilovače*, viz obr. 35.



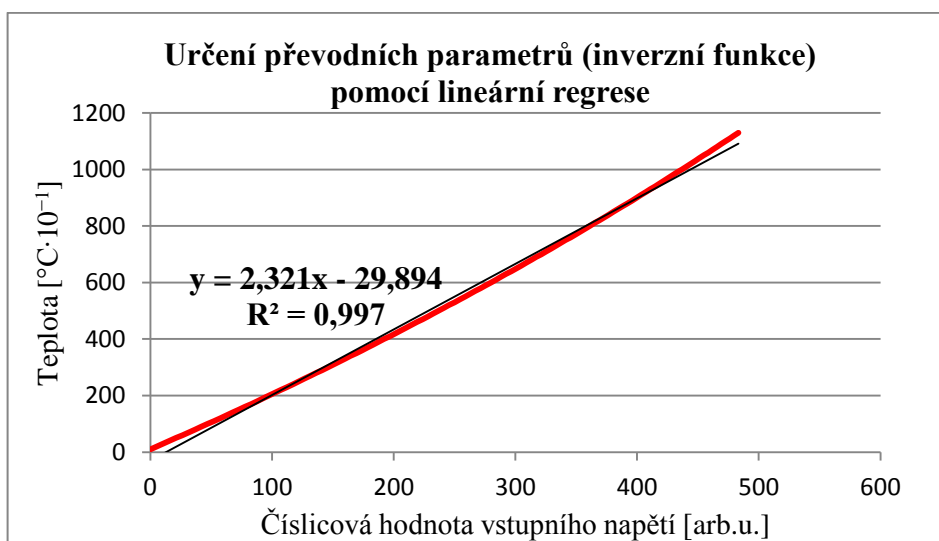
Obr. 35: Analogový zesilovač (Analog amplifier).

Pomocí parametrů *Gain* (Zisk) a *Offset* (Posunutí) se nastaví lineární inverzní převodní charakteristika mezi údajem o vstupním napětí (číselné hodnotě) a skutečnou teplotou. Charakteristika se nazývá inverzní, protože jde o inverzní funkci převodní charakteristiky napětí/teplota snímače v grafu 2. Parametr *Point* slouží k zobrazení desetinné čárky na displeji LOGO! nebo LOGO! TD. V tab. 1 jsou příklady nastavení parametrů analogového zesilovače.

Procesní proměnná	Napětí (V)	Vnitřní hodnota	Zisk	Posunutí	Zobrazená hodnota (Ax)
-30 °C	0	0	0.1	-30	-30
0 °C	3	300	0.1	-30	0
+70 °C	10	1000	0.1	-30	70
1000 mbar	0	0	4	1000	1000
3700 mbar	6.75	675	4	1000	3700
5000 mbar	10	1000	4	1000	5000

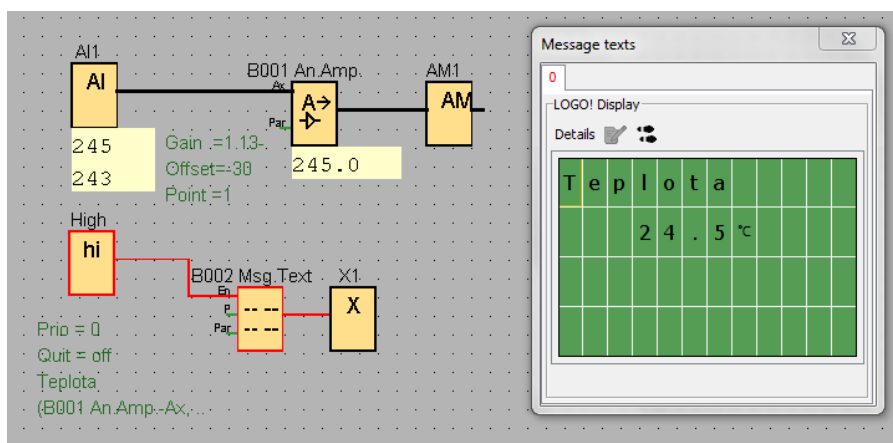
Tab. 1: Příklady nastavení parametrů analogového zesilovače; převzato z [9]

Vzhledem k tomu, že LOGO! provádí operace s plovoucí desetinnou čárkou pouze pro interní operace, je nutné nastavit počet desetinných míst pomocí parametru *Point*, který má vliv na hodnotu pouze při zobrazení na displeji. Proto se inverzní převodní charakteristika určuje následovně, viz grafu 2.



Graf 2

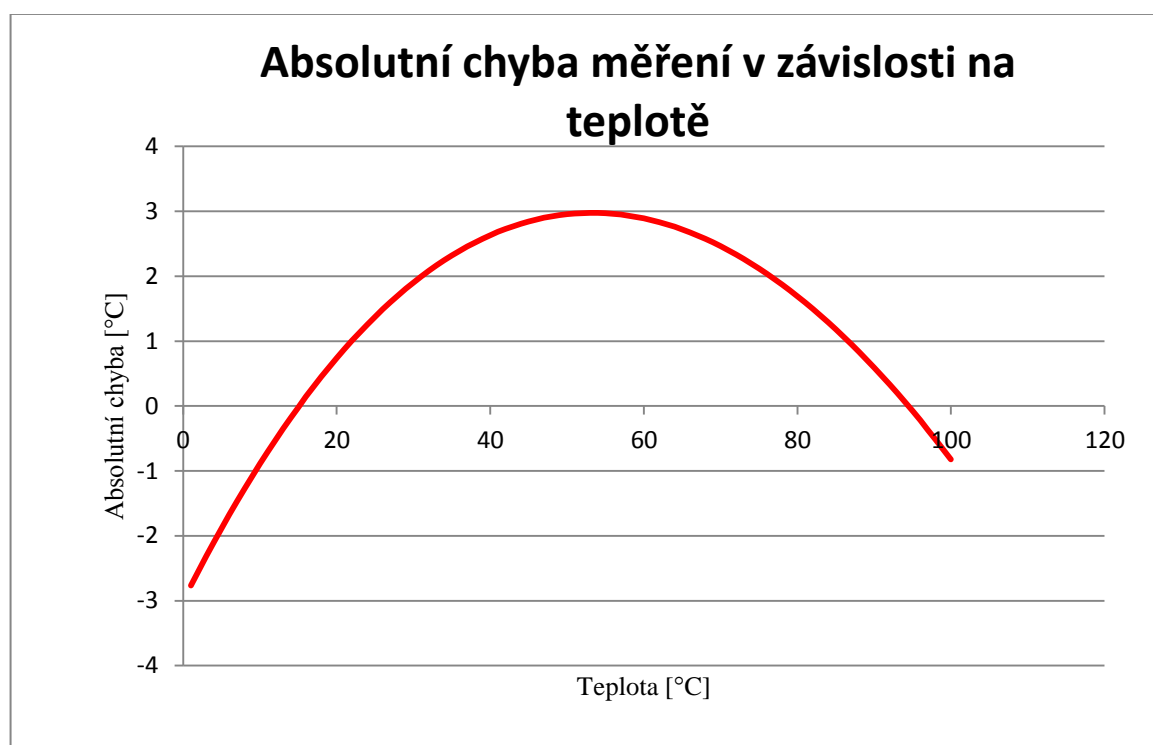
Lineární regresi byly určeny parametry $Gain = 1,13$ a $Offset = -30$. Parametr *Point* byl nastaven na **jedna**, tím pádem je hodnota na displeji „vydělena deseti“ a zobrazuje se ve °C. Parametry je vždy nutné nastavovat tímto způsobem, jinak se snižuje rozsah i přesnost měření. Na obr. 36 je program pro zobrazení teploty. Je v něm názorně ukázáno, jak LOGO! pracuje s hodnotami.



Obr. 36: Program pro měření a zobrazení teploty.

Na analogovém vstupu je 2,43 V. A/D (Analogově Digitální) převodník převede napětí na hodnotu 243. Analogový zesilovač převede hodnotu 243 na 245 na základě nastavených parametrů. Na displeji se zobrazí 24,5 °C díky parametru *Point* nastavenému na **jedna**. Bloky **AM1** (*Analogový příznak*) a **X1** (*Otevřený konektor*) jsou zařazeny v programu, protože každá větev musí být ukončena výstupem, příznakem nebo otevřeným konektorem, aby šel program nahrát do LOGO!. Blok **High** (*High* tj. *Logická jedna*) povoluje zobrazení *Message text* tj. *Textová zpráva*.

Takto zhotovený měřicí řetězec má podle teoretických předpokladů tyto parametry: Měřicí rozsah... od -3 °C do 110 °C; rozlišení... 0,113 °C; ovšem přesnost je velmi malá (viz *graf 3*), kvůli nelinearitě čidla a vlivem zapojení.

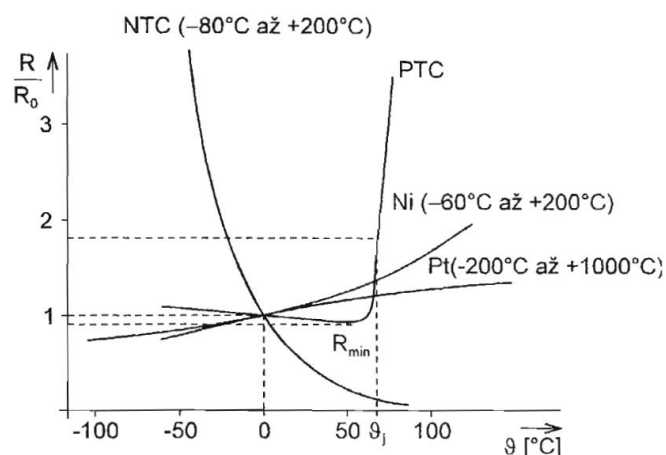


Graf 3

Absolutní chyba se v celém rozsahu pohybuje od -2,77 °C do 2,76 °C, viz *graf 3*. Je nutno také brát v potaz, že relativní chyba měření napětí pomocí LOGO! je 1,5 % v celém rozsahu. Skutečná chyba měření je však ještě větší, protože mohlo dojít k náhodné, soustavné i hrubé chybě. Ve třetí kapitole je řešena kalibrace a eliminace chyby metodou nahrazení nelineární inverzní funkce přímkovými úseky.

2.4.2 Teplotní čidlo NTC Termistor

Termistor je polovodičové čidlo teploty, jež se dělí na negastory a pozistory. Negastor je termistor se záporným součinitelem odporu, odtud zkratka NTC (Negative Temperature Coefficient). Jejich odpor klesá při narůstající teplotě. Mají o řád vyšší teplotní součinitel odporu ($\alpha = -0,03 \text{ K}^{-1}$ až $-0,06 \text{ K}^{-1}$) než kovové čidla a z toho plyne, že mají velkou citlivost na změnu teploty. Vyrábějí se tenkovrstvou technologií a práškovou metalurgií ze směsi oxidů kovů (např. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$ apod.). Vylisovaná čidla se zpevňují slinováním za vysokých teplot. Jejich nevýhodou je velká nelinearita převodní charakteristiky, která má exponenciální tvar, viz *obr. 37*.



Obr. 37: Teplotní závislost odporových čidel teploty; převzato z [6].

Pro vyhodnocení teplotní závislosti odporu termistoru na teplotě lze použít vztah,

$$R_1 = R_r e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r}\right)}, \quad (3)$$

kde R_1 je odpor termistoru při teplotě T_1 , R_r je odpor termistoru při referenční teplotě T_r (většinou 273,15 K, 25 °C), B [K] je teplotní konstanta (závisí na materiálu) [6].

Konstanta B vlastně není konstanta, protože je závislá na teplotě. Hodnoty teplotní konstanty se u vyráběných termistorů pohybují v rozsahu $1500 \text{ K} < B < 7000 \text{ K}$ a hodnoty odporu $1 \text{ } \Omega < R_r < 1 \text{ M } \Omega$ [6].

V této práci byl použit NTC perličkový termistor, viz [přl.3].

Parametry:

Odpor při referenční teplotě ... $R_r = 5 \text{ k}\Omega$ (25 °C)

Teplotní časová konstanta ... $t_c = 7 \text{ s}$

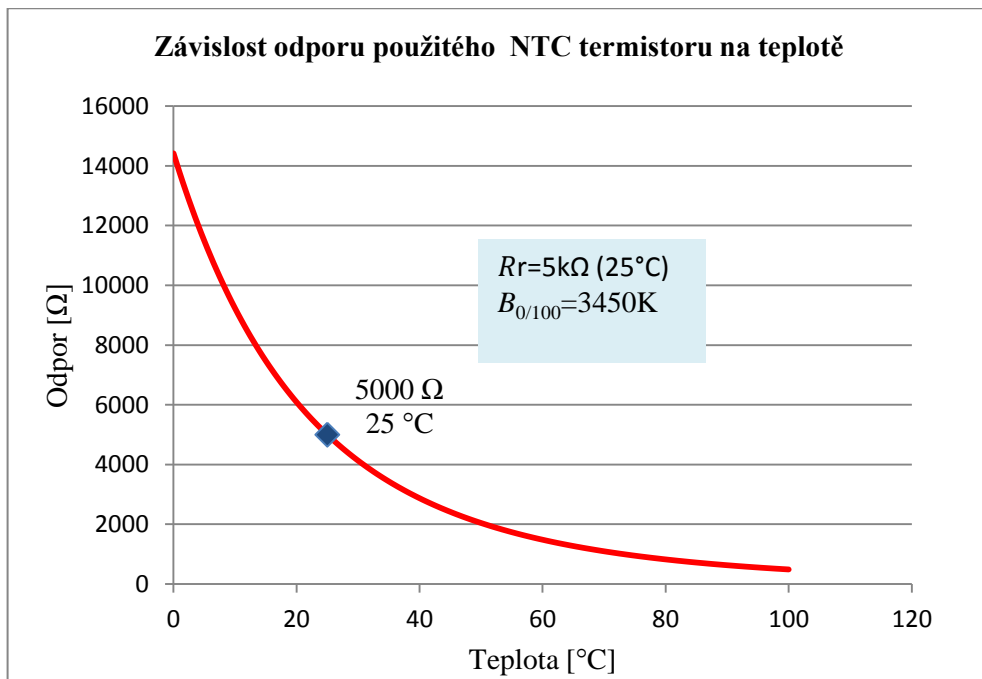
Teplotní koeficient ... $B_{0/100} = 3450 \text{ K}$

Maximální výkon ... 32 mW (25 °C)

Teplotní rozsah ... od -55 °C do 300 °C

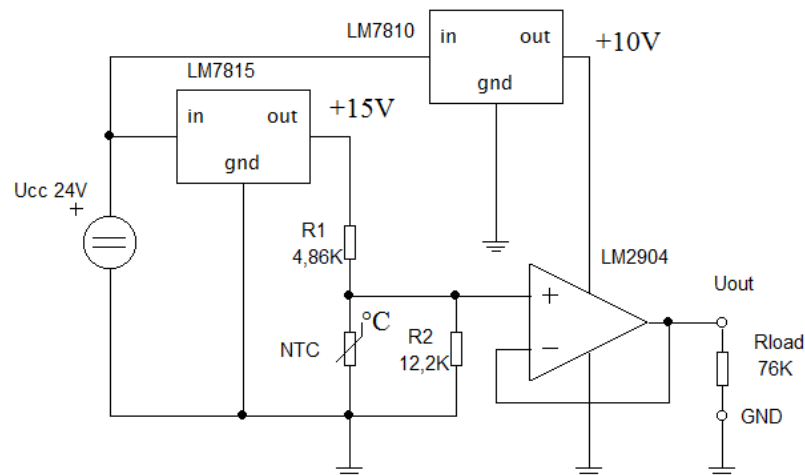
Tolerance odporu ... $\pm 1 \%$

Nelinearita termistoru je jeho největší nevýhodou, jak již bylo řečeno, viz graf 4. Ostatní jeho vlastnosti jako citlivost, teplotní časová konstanta a maximální výkon jsou velmi dobré. Jeho charakteristiku lze částečně linearizovat připojením sériového a paralelního odporu, viz „Pasivní linearizace [6, str.197–198]”.



Graf 4

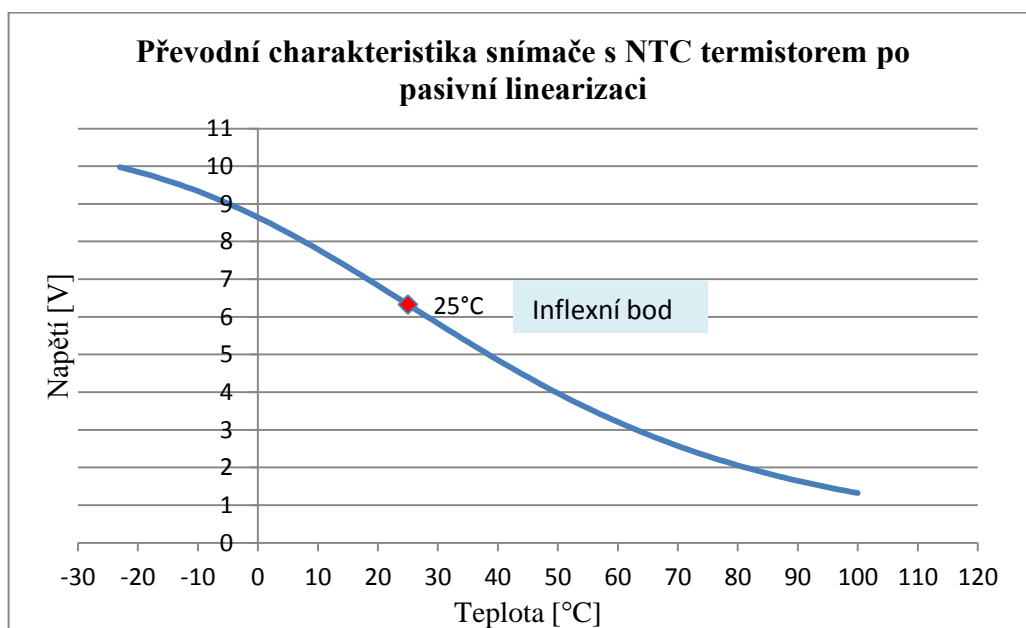
Na obr. 38 je schéma zapojení NTC termistoru s paralelním a sériovým odporem pro pasivní linearizaci.



Obr. 38: Schéma zapojení NTC termistoru s paralelním a sériovým odporem.

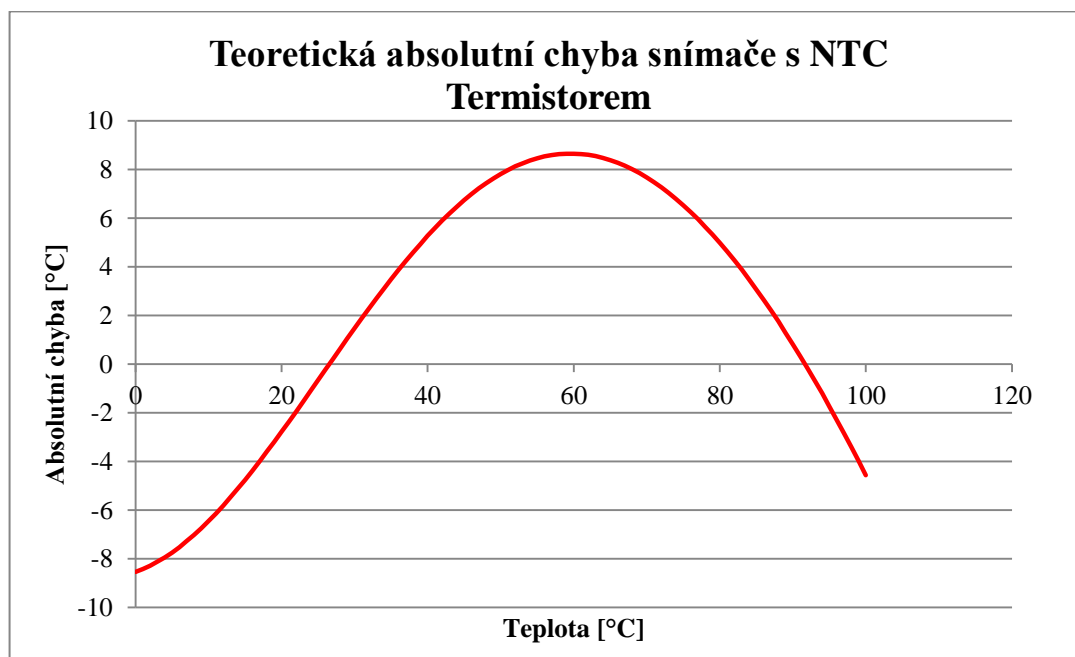
Celý návrh DPS je uveden v [přl.3]. Hodnoty sériového odporu byly stanoveny na $R_1 = 4,86 \text{ k}\Omega$ a paralelního na $R_2 = 12,2 \text{ k}\Omega$. Zapojení rezistorů je napájeno 15 V ze stabilizátoru napětí, což zajišťuje konstantní napětí. Napětí na samotném NTC termistoru je přivedeno na operační zesilovač zapojený jako napěťový sledovač. Napěťový sledovač bylo nutné zapojit, protože jinak by měl snímač příliš velkou výstupní impedanci a po připojení na analogový vstup LOGO!, který má vstupní impedanci 76 kΩ, by se zásadně změnilo výstupní napětí ze snímače. Napěťový sledovač tedy funguje jako impedanční oddělení. Operační zesilovač LM2904 lze označit za tzv. rail – to – rail zesilovač, což znamená, že jeho saturační výstupní napětí dosahuje téměř napětí napájecího. Je napájen z napěťového stabilizátoru 10 V a z toho plyne, že maximální výstupní napětí snímače bude téměř deset voltů. To je žádoucí, protože na analogový vstup LOGO! lze přivést signál o maximálním napětí deset voltů.

Podle teoretických předpokladů by měla být výstupní charakteristika snímače více lineární, jak je zobrazeno v grafu 5.



Graf 5

V grafu 5 lze vidět inflexní bod, který značí místo, kde funkce přechází z konkávní na konvexní. Pomocí odporů se dá tento bod libovolně nastavit a v jeho okolí pak bude funkce nejvíce lineární. Tímto způsobem lze však linearizovat pouze malý rozsah měření. Cílem je měřit teplotu v rozsahu alespoň od nuly do sta stupňů Celsia a proto je zapotřebí užít dalších linearizačních metod. Inverzní převodní charakteristika pro nastavení parametrů *analogového zesilovače* se určuje lineární regresí obdobně jako u Pt1000, viz graf 2.

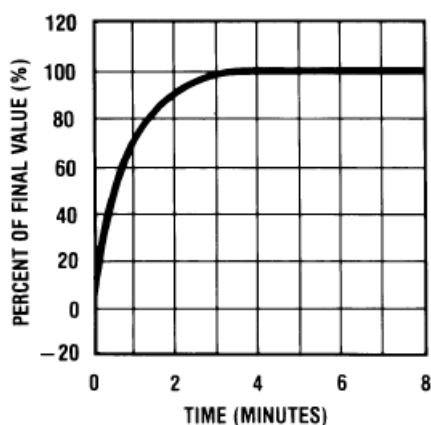


Graf 6

Byly určeny parametry $Gain = -1,42$ a $Offset = 1142$. Parametr $Point$ byl nastaven na **jedna**. Takto zhotovený měřicí řetězec má podle teoretických předpokladů tyto parametry: Měřicí rozsah...od $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $114\text{ }^{\circ}\text{C}$; rozlišení... $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$; ovšem přesnost je obdobně jako u Pt1000 velmi malá, viz *graf 6*, kvůli nelinearitě čidla. Absolutní chyba se v rozsahu, od nuly do sta stupňů Celsia pohybuje od $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je natolik velká chyba, že bez dalších úprav je tento snímač nepoužitelný. Obdobně jako u Pt1000 bude skutečná chyba větší. Ve třetí kapitole je řešena kalibrace a eliminace chyby.

2.4.3 Integrovaný obvod LM35

LM35 je převodník teplota/napětí v podobě integrovaného obvodu. Vzhledem k tomu, že po připojení napájení je na jeho výstupu napětí odpovídající měřené teplotě, lze jej označit za samotný snímač. Jeho výstupní napětí je lineárně úměrné teplotě ve stupních Celsia. Má výhodu oproti převodníkům kalibrovaným ve stupních Kelvina, protože není nutné odečítat velké konstantní napětí pro převod na správné měřítko. Nevyžaduje žádné další kalibrace a dosahuje přesnosti $\pm 3/4\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu teplot od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Funguje na principu teplotní závislosti zesílení tranzistoru v jeho vnitřním zapojení, má malou výstupní impedanci, malou spotřebu a nízké zahřívání v závislosti na protékajícím proudu (tzv. self-heating) [přl.4]. Nevýhodou je velká teplotní časová konstanta (v ustáleném vzduchu), viz *obr. 39*.



Obr. 39: Teplotní časová konstanta LM35 v neproudícím vzduchu; převzato z [přl.4].

V této práci byl použit integrovaný obvod LM35DZ viz [přl.4]

Parametry:

Lineární převod teplota napětí ... $+10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

Rozsah teplot ... od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Napájecí napětí ... od 4 V do 30 V

Odběr proudu... méně než $60\text{ }\mu\text{A}$

Sebeohřev... $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$

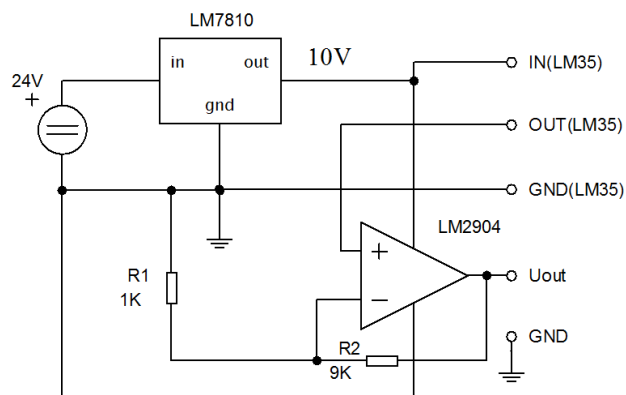
Přesnost... $\pm 3/4\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu teplot od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Výstupní impedance... $0,1\text{ }\Omega$ (při odběru zátěže 1 mA)

Teplotní časová konstanta ... $t_c = 3\text{ min}$

Pouzdro... TO-92

Pro zvýšení citlivosti je výstupní signál z LM35 zesílen operačním zesilovačem desetkrát, viz *obr. 40*. Konečný převod teplota/napětí je tedy $100 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Díky tomuto zapojení eliminujeme chybu, která vzniká na analogovém vstupu LOGO! (jeho A/D převodníku). Jednotky mV totiž fluktuují vlivem okolního rušení a rozlišovací schopností analogového vstupu.

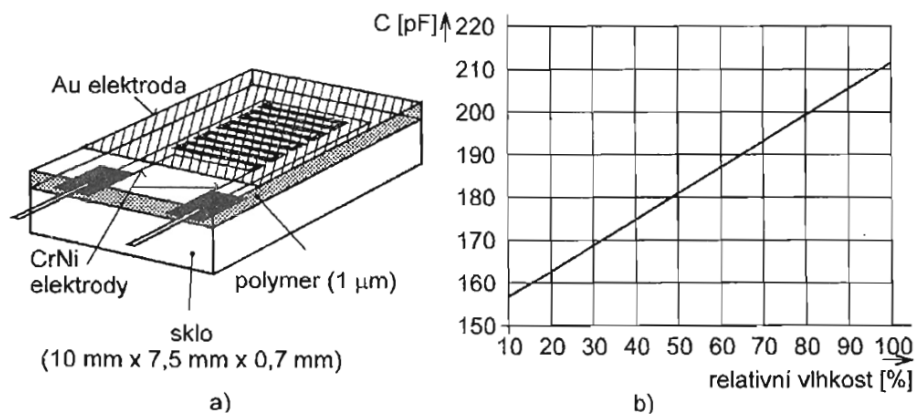


Obr. 40: Schéma zapojení převodníku pro LM35.

Byly určeny parametry $Gain = (1)$ a $Offset = 0$. Parametr $Point$ byl nastaven na jedna. Takto zhotovený měřicí řetězec má podle teoretických předpokladů tyto parametry: Měřicí rozsah...od $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ do $100 \text{ } ^\circ\text{C}$; rozlišení... $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$; přesnost $\pm 3/4 \text{ } ^\circ\text{C}$. Avšak skutečná chyba měření bude obdobně větší.

2.4.4 Modul s kapacitním čidlem vlhkosti (LinPicco™ A05 Basic)

Kapacitní čidla vlhkosti jsou založena na závislosti impedance sorpčního materiálu na relativní nebo absolutní vlhkosti okolního plynu. Dle toho, která impedanční složka má větší citlivost na měřenou veličinu, dělíme tato čidla na odporová a kapacitní. Na *obr. 41a* je jeden z typů kapacitního čidla. Čidlo je tvořeno kondenzátorem, jehož dielektrikum je z hygroskopického materiálu (obvykle polymeru). Kapacita senzoru je dána sorpční rovnováhou s prostředím a je funkcí relativní vlhkosti, viz *obr. 41b*. Sensor se vyrábí tenkovrstvou technologií [6].



Obr. 41: Kapacitní čidlo vlhkosti (a – struktura, b – typická charakteristika); převzato z [6].

V této práci byl použit hotový modul pro převod vlhkosti na napětí LinPicco™ A05 Basic, viz [přl.5]. Tento snímač má vysokou přesnost, vysokou stabilitu díky velké aktivní ploše čidla a kalibrovaný lineární výstup.

Parametry:

Měřicí rozsah... 0–100 % (ϕ – relativní vlhkost)

Pracovní rozsah ... od $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

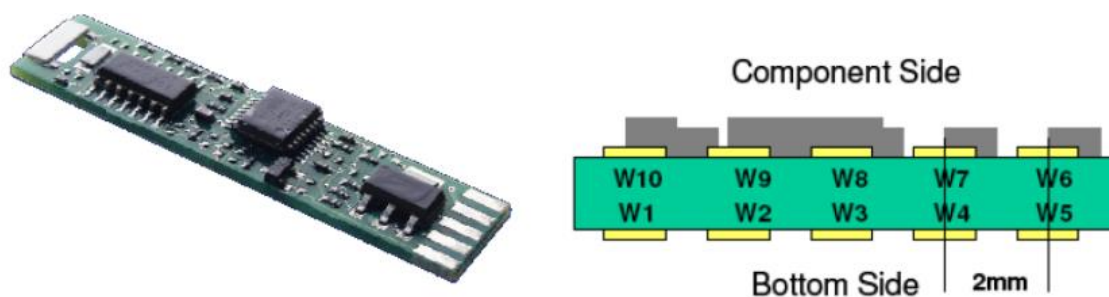
Napájecí napětí... 8–32 V (DC)

Odběr proudu... $<3\text{ mA}$

Výstupní signál... 0–5 V/0–100 % (ϕ)

Přesnost... $<3\%$ (ϕ) v rozsahu 15–85 % (ϕ) při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Integrovan SMD čidlo teploty Pt1000 s vyvedenými kontakty [přl.5].



Obr. 42: Rozmístění kontaktů modulu s čidlem vlhkosti.

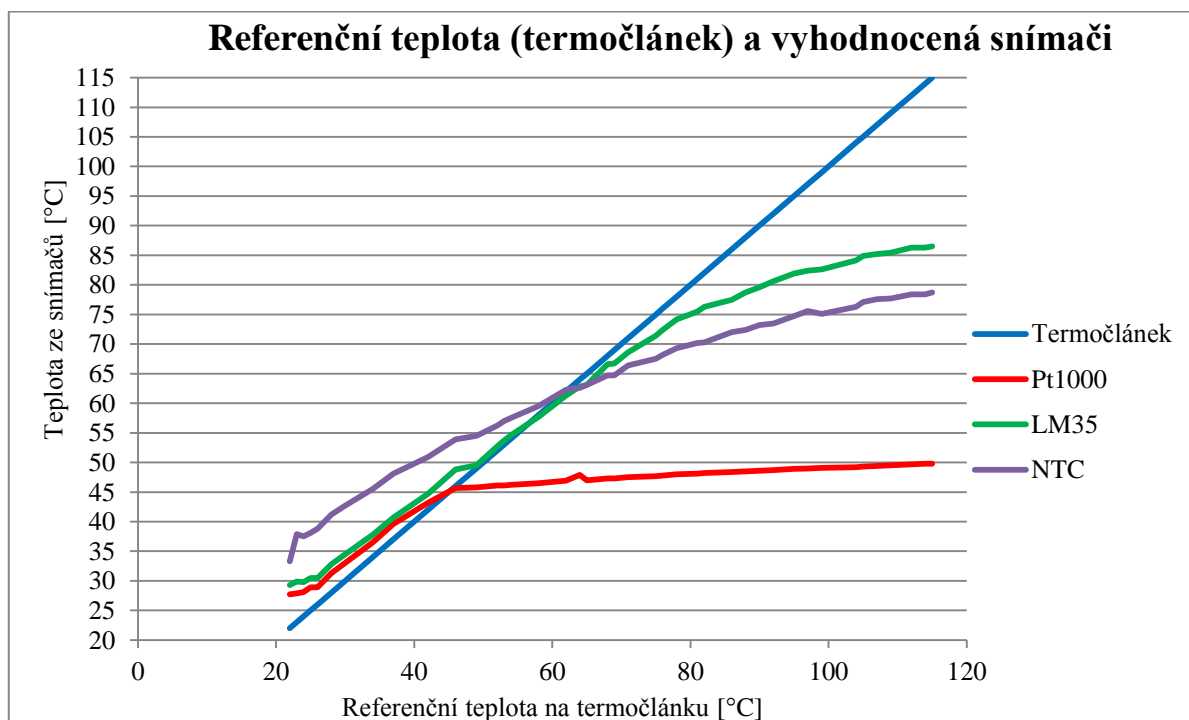
Na obr. 42 jsou W5, W6... vyvedené kontakty SMD čidla Pt1000; W7... signál GND; W8... GND; W9... Analog OUT; W10... U_{cc+} .

Pro vyhodnocení relativní vlhkosti pomocí programu postačí *analogový zesilovač* s nastaveným parametrem zesílení na hodnotu dva a parametr desetinné čárky pro zobrazení hodnoty na textovém displeji na jedna.

3 Výsledky a diskuze

3.1 Testy a kalibrace snímačů teploty

Při prvním testu byly snímače umístěny do bezprostřední vzdálenosti od infračervené žárovky (konkrétně 30 mm), aby bylo možné proměřit velký rozsah teplot. Výkon infračervené žárovky byl postupně zvyšován od nuly do sta procent. Vždy po dvou minutách (pro ustálení teploty na čidlech) bylo odečteno napětí na výstupu snímačů zobrazené na displeji LOGO! TD a teplota zobrazená taktéž na displeji LOGO! TD. Jako referenční snímač teploty byl použit termočlánek typu K zapojený do multimetru METEX M-3850D, který má speciální vstup na tento druh čidla pro měření teploty. Výsledky těchto prvních měření nebyly uspokojivé, viz *graf 7*.

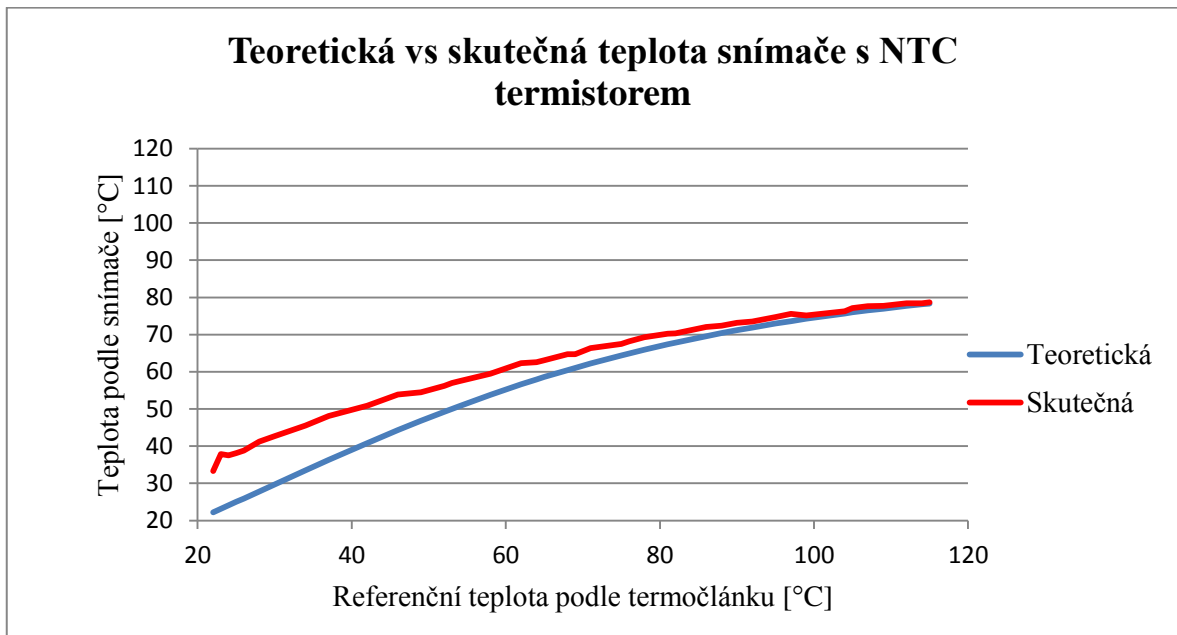


Graf 7

Z *grafu 7* lze pozorovat, že při teplotě 45 °C skokově poklesla citlivost snímače s Pt1000. Při této teplotě bylo na snímači s Pt1000 napětí 4,6 V. Po prověření příčin tohoto chování bylo zjištěno, že výstupní napětí přístrojového zesilovače INA125 může dosahovat pouze hodnot v rozmezí mínus pěti až plus pěti voltů, i když je napájen mnohem vyšším napětím. Vzhledem k tomu, že je napájen nesymetrickým zdrojem, tak se jeho výstupní napětí může pohybovat od nuly do pěti voltů. Tato informace byla v datovém listu velmi nespécificky sdělena i přesto, že je to informace zásadní, viz [přl.2]. V tomto případě se tedy vyskytla hrubá chyba, kterou lze odstranit snížením zesílení tak, aby při stech stupních Celsia bylo na výstupu přístrojového zesilovače méně než pět voltů.

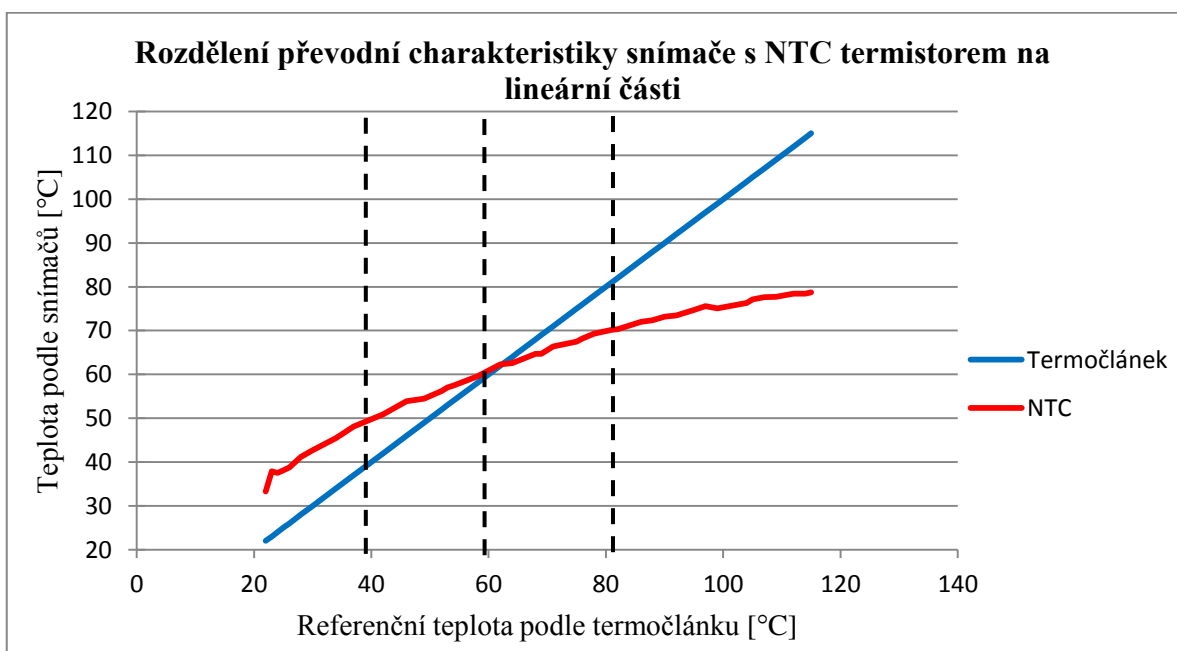
Snímač s NTC termistorem vykazoval větší chybu, než bylo teoreticky vypočteno, viz *graf 8*. Po prověření příčiny bylo zjištěno, že zapojením sériového a paralelního odporu do obvodu poklesla jejich rezistivita. To mohlo být způsobeno nízkou vstupní impedancí napěťového sledovače a velkou výstupní impedancí napěťového stabilizátoru nebo chybným návrhem obvodu, což nebylo zjištěno. Tato skutečnost však zásadně

neovlivnila požadovanou funkčnost snímače. Pouze se posunul inflexní bod a je nutné propočítat novou převodní charakteristiku.



Graf 8

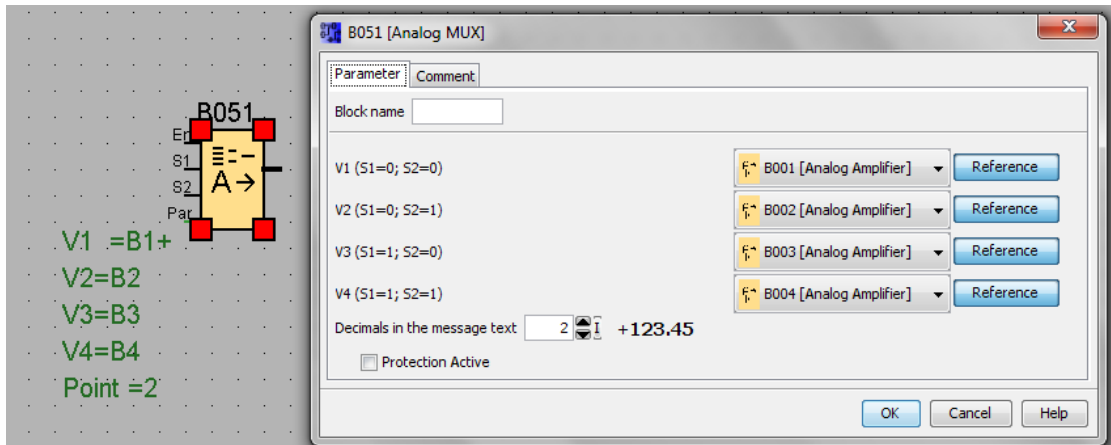
Pro dosažení vyšší přesnosti je převodní charakteristika snímače s NTC termistorem rozdělena na přímkové úseky, viz *graf 9*.



Graf 9

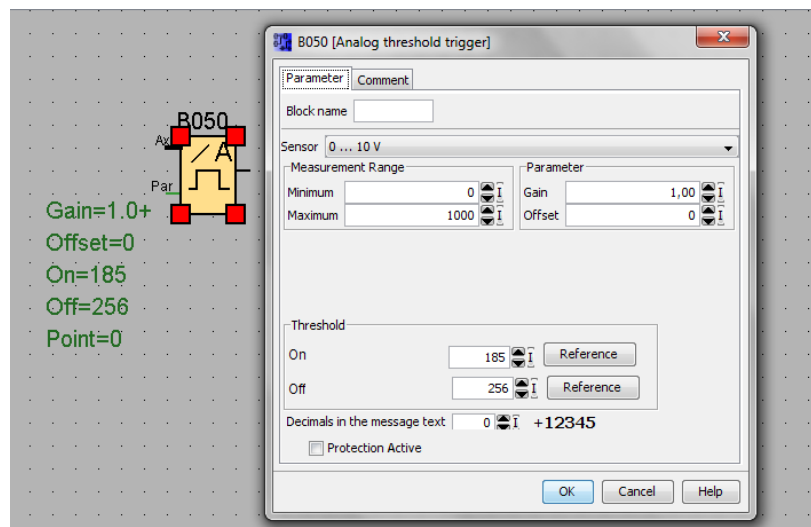
Pro každý úsek byly pomocí lineární regrese vypočteny parametry pro *analogové zesilovače*. V programu je každý *analogový zesilovač* použit pro vybraný rozsah hodnot pomocí *analogového multiplexoru*, viz *obr. 43* a *analogového spínače*, viz *obr. 44*. Díky tomuto řešení je charakteristika rozdělena na čtyři lineární části, což vede k větší přesnosti měření. Pro dosažení větší přesnosti je možno rozdělit charakteristiku na více částí, ale vzhledem k tomu, že program může obsahovat pouze 200 funkčních bloků, je třeba

nechat místo na zbytek programu, navíc s počtem funkčních bloků roste i délka cyklu. Pro rozdělení charakteristiky na čtyři části je zapotřebí dvacet funkčních bloků. Z toho plyne, že je nutné zvolit kompromis mezi přesností a funkčností.



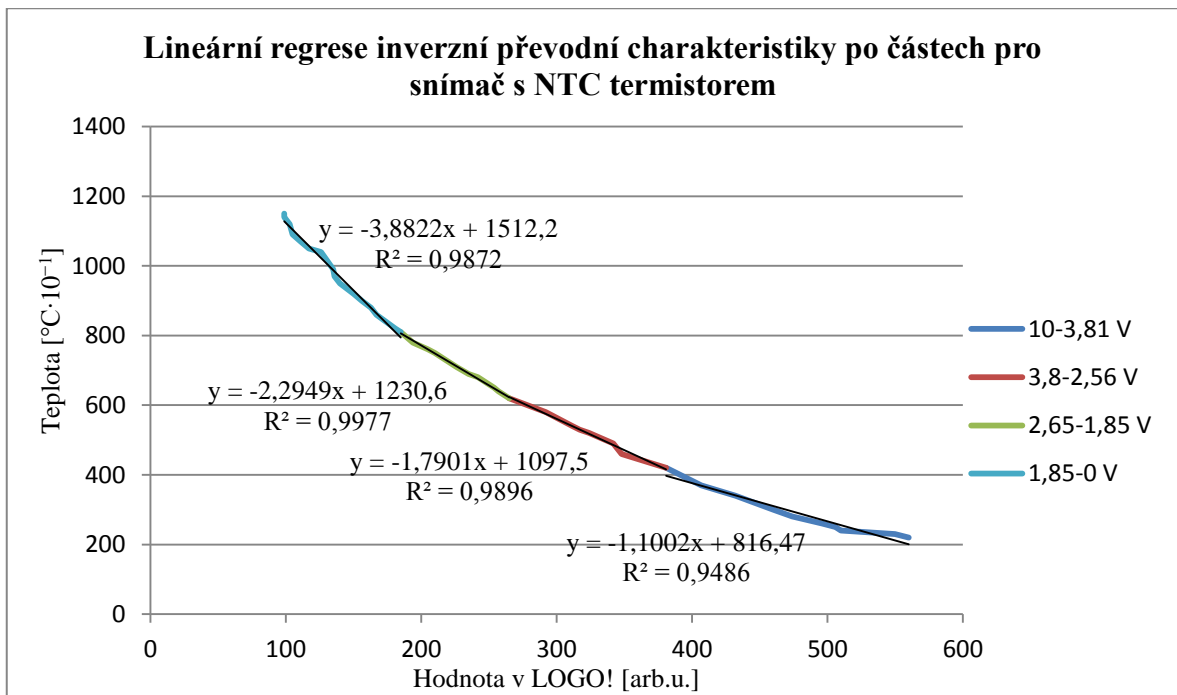
Obr. 43: Nastavení parametrů analogového multiplexoru.

Na obr. 43 je zobrazeno, jak se nastavuje *analogový multiplexor*. Podle kombinace logických nul a jedniček na vstupech *S1* a *S2* multiplexor použije hodnoty z různých *analogových zesilovačů* na svůj výstup. Správnou kombinací na vstupech *S1*, *S2* zajistí *analogové spínače*, které plní tu funkci, že na jejich výstupech je logická jedna, pouze pokud je napětí na snímači v přednastaveném rozsahu, viz obr. 44.



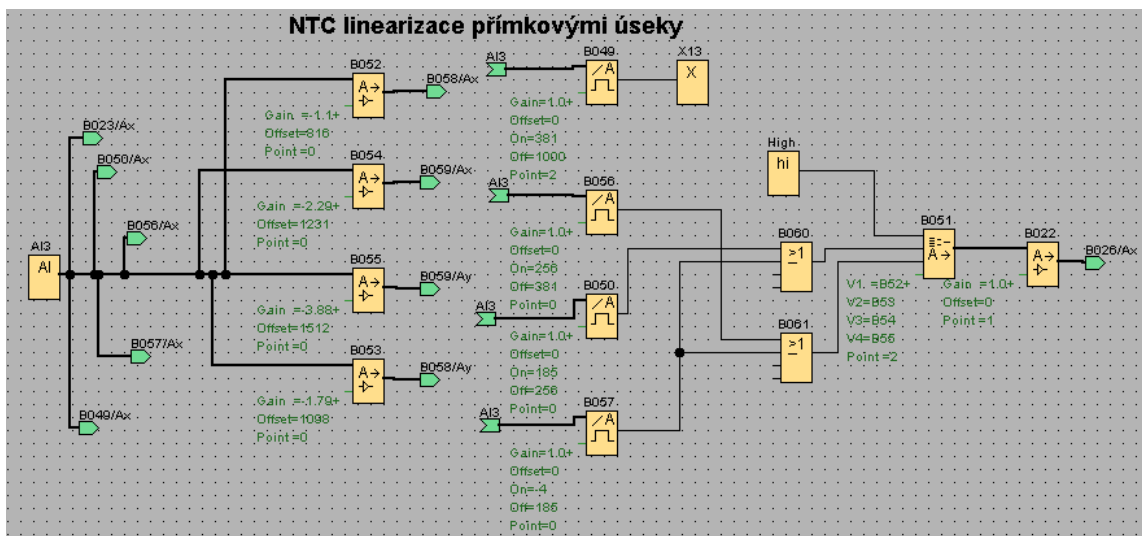
Obr. 44: Nastavení parametrů analogového spínače.

Na obr. 44 je příklad nastavení parametrů $On = 185$ a $Off = 256$, tudíž na výstupu analogového spínače bude logická jedna, pouze pokud je napětí na snímači v rozsahu 1,85 V až 2,56 V. V grafu 10 je znázorněno rozdělení inverzní převodní charakteristiky na lineární úseky a určení parametrů pro *analogové zesilovače*.



Graf 10

Na obr. 45 je ukázka programu pro linearizaci inverzní převodní charakteristiky přímkovými úseky. Pro přehlednost nejsou zobrazeny bloky pro ukončení větví a spoje jsou rozděleny jumpery. Lze vidět i dvě hradla typu OR, která slouží pro dosažení správné logické kombinace na *analogovém multiplexoru*. Správná kombinace byla vyhodnocena metodou výčtu prvků z pravdivostní tabulky.



Obr. 45: Program pro linearizaci přímkovými úseky.

Z grafu 7 lze pozorovat velkou nepřesnost čidla LM35, která se naprosto neshoduje s hodnotami uvedenými v datovém listu. Bylo zjištěno, že čidlo bylo zničeno vystavením vysoké teploty při pájení přívodního vedení k jeho kontaktům. Vzhledem k tomu, že pořizovací cena čidla nebyla vysoká, bylo pořízeno čidlo nové. Následně bylo čidlo

do měřicího řetězce zapojeno pomocí svorkovnice z důvodu jeho neodolnosti vůči vysokým teplotám při pájení.

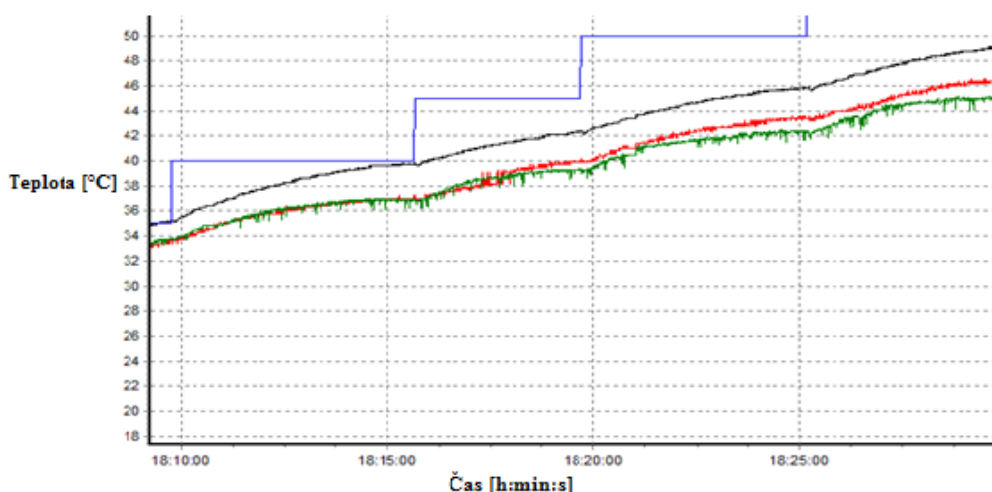
3.1.2 Druhá kalibrace snímačů

Po odstranění hrubých chyb, které byly odhaleny při první kalibraci, byla provedena druhá kalibrace. Multimetr METEX M-3850D s termočlánkem pro měření teploty se ukázal jako nevhodný referenční teploměr, protože je určen pro měření velkého rozsahu teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kvůli velkému rozsahu má i velkou chybu $\pm 3\%$ z č.h. $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Proto byly použity dva digitální vpichovací teploměry určené pro rozsah od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ se základní přesností $\pm 5\%$ z č.h. a rozlišením $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako referenční teplota byl použit průměr naměřených teplot z obou teploměrů. Na obr. 46 je znázorněno umístění snímačů v regulované soustavě.



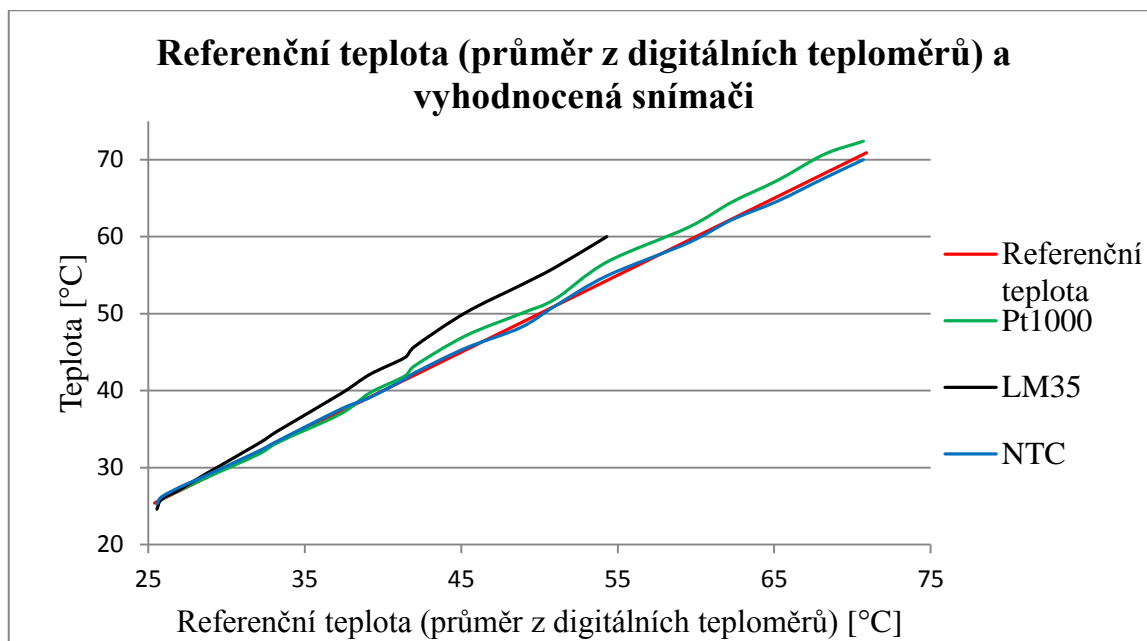
Obr. 46: Umístění snímačů v regulované soustavě pro kalibrační měření.

Z grafu 11 je patrné, že teplota na snímačích se ustálí až zhruba po pěti minutách. Na NTC termistoru se ustaluje nejrychleji a na čidlu LM35 nejpomaleji, což odpovídá již zmíněným parametrům čidel. Pro odečítání hodnot pro kalibraci byl tedy zvolen interval pět minut oproti předešlým dvěma minutám v prvním kalibračním měření.



Graf 11: Monitoring průběhů teplot v programu LOGO!Monitor (zeleně – NTC, červeně – Pt 1000, černě – LM35, modře – výkon infračervené žárovky [40 %; 45 %; 50 %]).

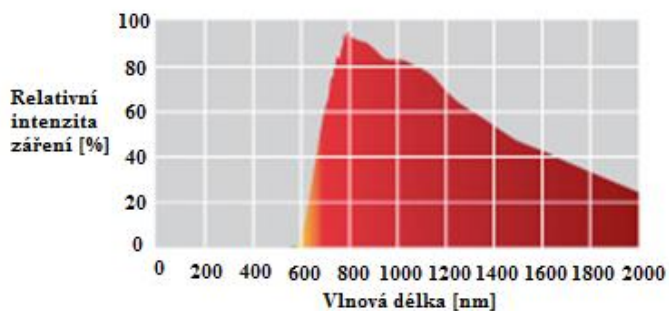
Při měření teplot ze snímačů pro kalibraci bylo dosaženo lepších výsledků než při prvním kalibračním měření, viz graf 12. Měření bylo prováděno ve vzdálenosti 7 cm od infračervené žárovky, na které byl postupně nastavován výkon od nuly do sta procent.



Graf 12

Z grafu 12 je patrné, že snímač s čidlem LM35 vykazuje podstatně vyšší teploty než referenční teploměry a ostatní snímače. Použitelné byly jen hodnoty odpovídající do 55 °C z celého rozsahu měření od 25 °C do 75 °C. To je pravděpodobně způsobeno materiálem jeho ochranného pouzdra, který absorbuje široké spektrum infračerveného záření ze žárovky, která jej produkuje ve velké míře. Černá barva pouzdra napovídá, že odchylka měření je ovlivněna tímto faktorem. Tento problém by vyřešilo zasazení čidla do ochranné jímky, která záření absorbuje méně. Avšak ochranná jímka by prodloužila reakční dobu čidla na změnu teploty, která je už tak velká. Proto je tento snímač možné použít jen pro měření teplot v okrajových částech plexisklového boxu, kde záření nemá takovou intenzitu jako v centrální části boxu pod infračervenou žárovkou. V okrajových částech boxu je teplota ovlivněna především prouděním tepla a nedosahuje tak vysokých hodnot jako v centrální části.

V grafu 13 je znázorněno vyzařovací spektrum infračervené žárovky. Záření má samozřejmě vliv na všechna čidla.

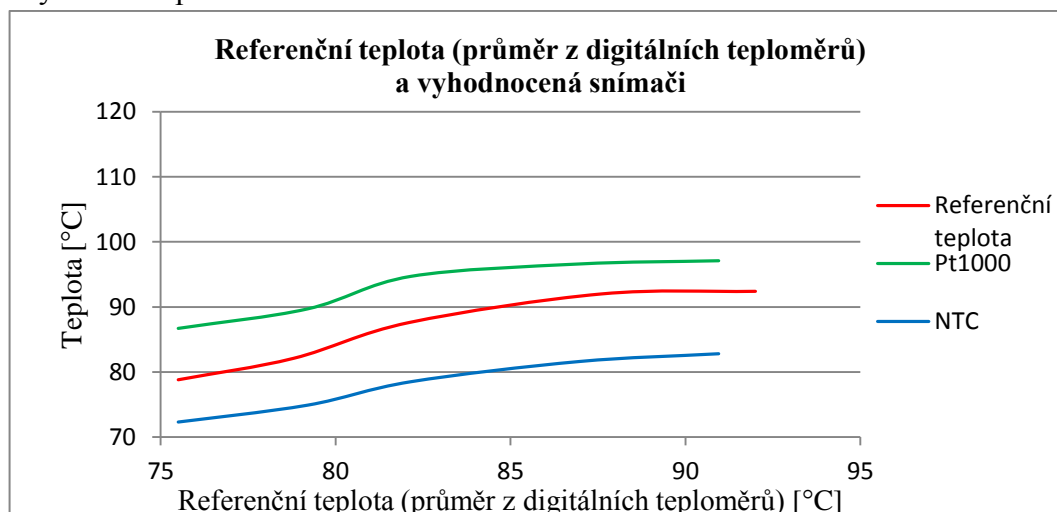


Graf 13: Vyzařovací spektrum infračervené žárovky; upraveno z [13].

Snímače jsou tedy kalibrovány podle toho, jakým způsobem záření působí na referenční teploměry. S ohledem na to, že regulace teploty je prováděna pro centrální část boxu, je tato skutečnost žádoucí.

Průběh teplot pro čidlo Pt1000 se lišil od referenční teploty více, než průběh teplot NTC termistoru. Avšak teploty získané ze snímače s NTC termistorem vykazovaly velký šum, viz *graf 11*, jenž může být způsoben rušením a převodem signálu z analogového na diskretní digitální hodnoty. Bylo zjištěno, že rušení nevzniká vlivem PWM řízení infračervené žárovky a ventilátorů, protože přetrvává i při odstavení těchto procesů. Je pravděpodobné, že je poškozen napěťový stabilizátor a neposkytuje stabilní napětí pro čidlo, což by vysvětlovalo i snížení rezistivity zapojených linearizačních odporů do obvodu převodníku. Pro měření teploty pro regulaci v konečné aplikaci byl tedy použit snímač s čidlem Pt1000.

Pro kalibraci vyšších teplot než 75°C byly snímače umístěny blíže k žárovce (konkrétně 2 cm). A měření probíhalo obdobně jako při vzdálenosti 7 cm od infračervené žárovky, pro výkon v rozsahu 80–90 %. V *grafu 14* jsou zobrazeny výsledky. Teploty se lišily více než při měření do 75 °C.

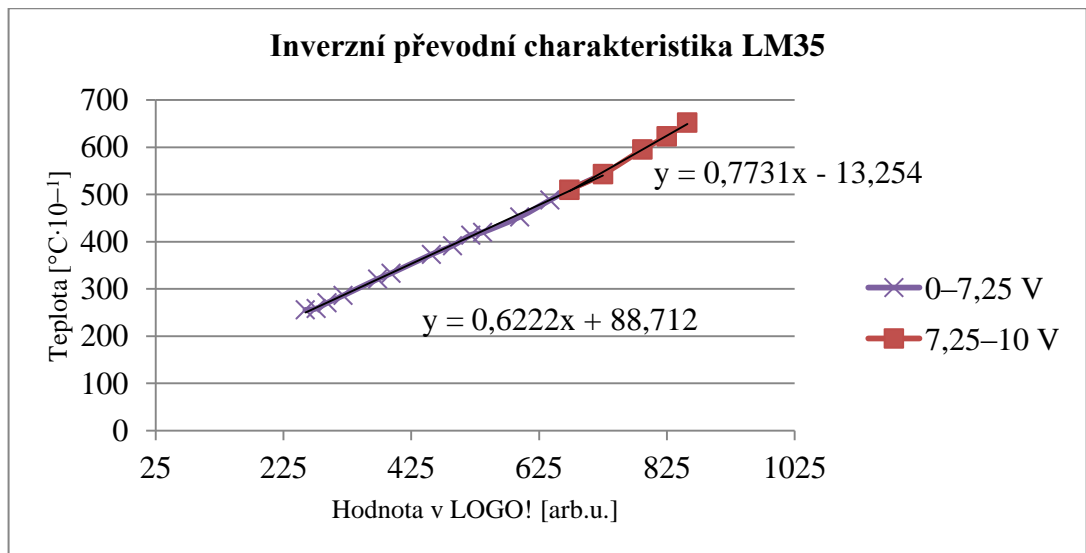


Graf 14

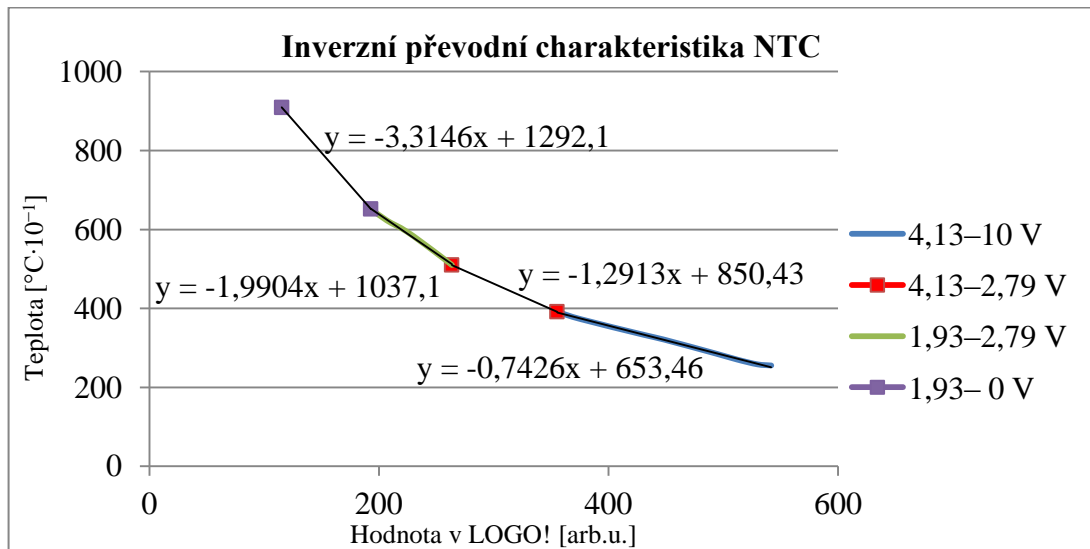
V následujících *grafech (15, 16, 17)* jsou inverzní převodní charakteristiky pro výpočet parametrů. Křivky byly upraveny tak, aby se hraniční body lineárních částí co nejvíce dotýkaly a nevznikaly tak skokové změny teploty při měření na jejich rozhraních. V *tab. 2* jsou vypočtené parametry pro nastavení programu pro linearizaci snímačů, které jsou kalibrovány podle digitálních teploměrů.

Pt1000			NTC Termistor			LM35		
Zesílení	Posunutí	Oblast	Zesílení	Posunutí	Oblast	Zesílení	Posunutí	Oblast
1,47	71	0–2,35 V	-3,15	1292	01–93 V	0,62	89	0–7,25 V
2	-55	2,35–3,70 V	-1,99	1037	1,93–2,79 V	0,62	89	0–7,25 V
1,3	207	3,70–4,81 V	-1,29	850	2,79–4,13 V	0,77	-13	7,25–10 V
7,24	-2663	4,81–10 V	-0,74	653	4,13–10 V	0,77	-13	7,25–10 V

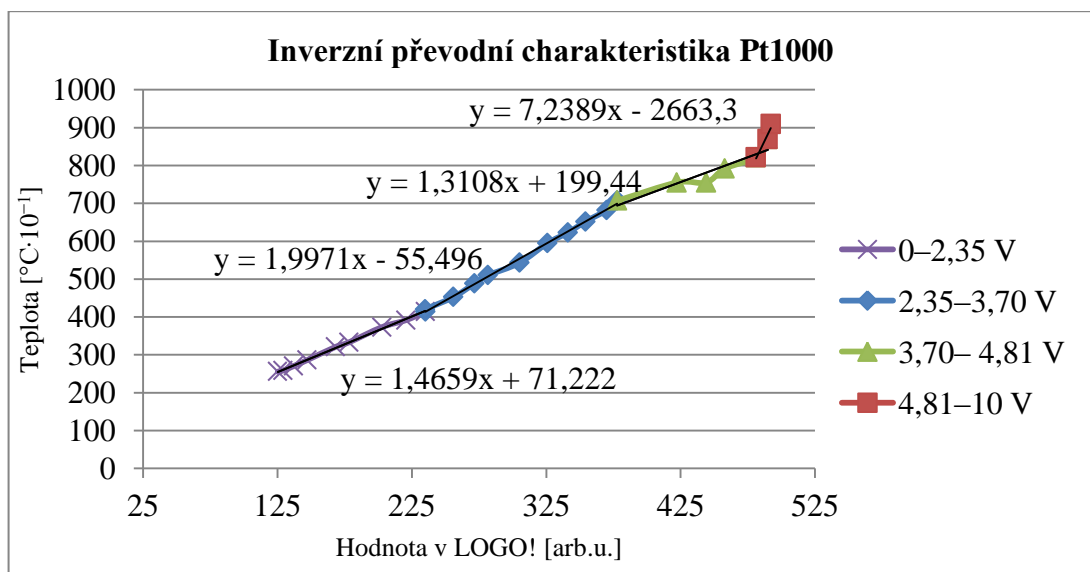
Tab. 2: Nastavení parametrů pro snímače po kalibraci.



Graf 15

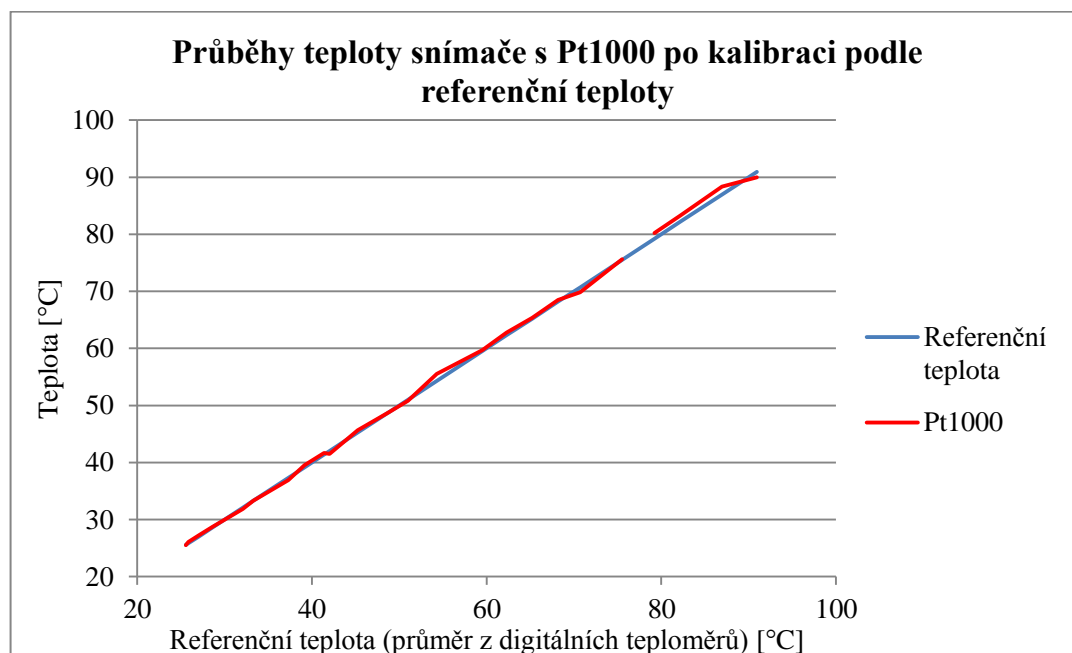


Graf 16



Graf 17

V *grafu 18* je znázorněn průběh teploty snímače Pt1000 z kalibračního měření po změně parametrů podle kalibrace. Pro nalezení vhodných parametrů pro přesnější měření by bylo nutné provést mnoho sérií měření a pomocí statistiky určit inverzní převodní charakteristiku. Pro stanovení chyby by bylo nutné provést další sérii měření a vypočítat nejistotu, což vyžaduje minimálně deset měření. Tato měření by byla náročná na čas i zpracování a bylo od nich upuštěno, protože kalibrace není hlavní náplní této práce. Přesnost měření při současných parametrech snímače je však pro daný účel dostačující.

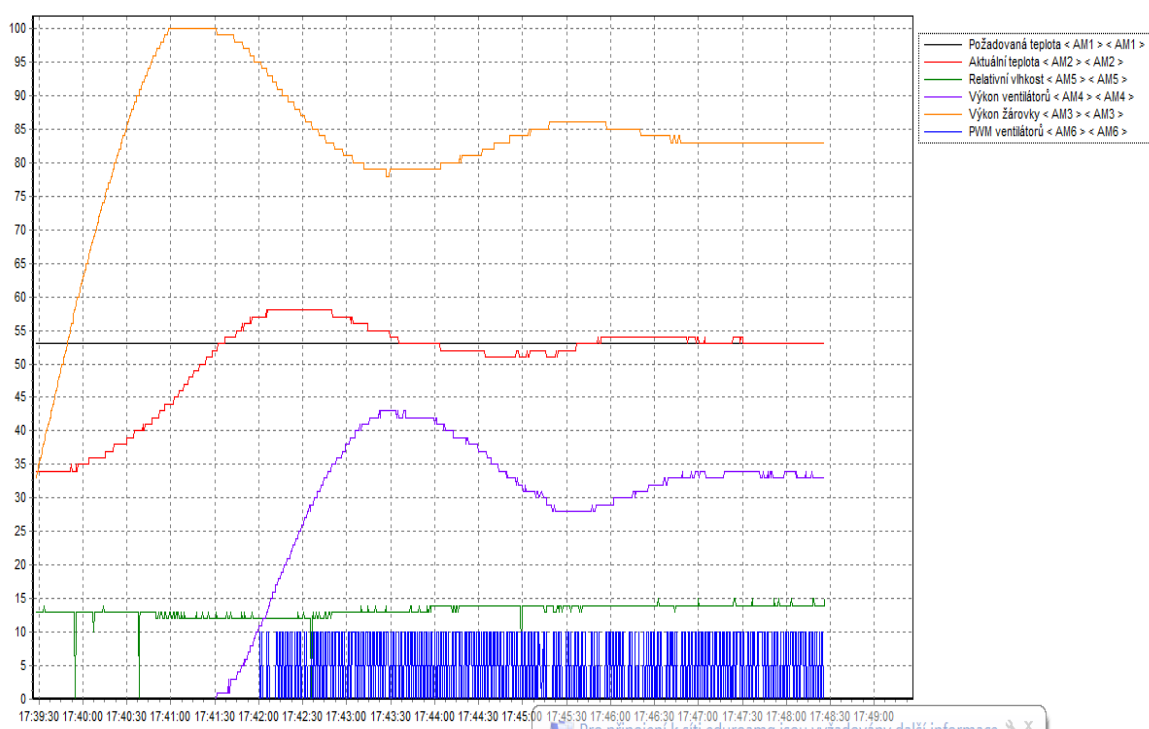


Graf 18

3.2 Regulace teploty

Hodnota napětí ze snímače je na analogovém vstupu aktualizována každých 300 ms, délka cyklu (jednoho vykonání programu) je změřena na 2,7 ms a aktualizace analogového výstupu je 50 ms. Z toho plyne, že ventilátory mohou zareagovat na změnu teploty v regulované soustavě nejpozději za součet těchto časů, což je 352,7 ms. Rychlost reakce infračervené žárovky na změnu teploty závisí na nastavených parametrech *analogového sledovače a zpožděného vypnutí* ve větvi pro diskretní aktualizaci výkonu v čase, také na zpoždění, které vzniká při spínání relé, na aktualizaci analogového vstupu a na velikosti změny teploty v regulované soustavě. Z toho plyne, že reakce infračervené žárovky na změnu teploty je podstatně pomalejší, než reakce ventilátorů. Proto je žárovka určena především k velkým změnám teploty v regulované soustavě a k dosahování vysokých teplot. Kdežto ventilátory jsou určeny k rychlé a malé změně teploty, fungují jako stabilizátor teploty a akcelérátor snižování teploty. Navíc proudění vzduchu urychluje čas, za jaký se ustálí teplota měřená teplotním čidlem na konečné hodnotě. Čas, za jaký se aktuální teplota ustálí na požadované, závisí především na počátečním rozdílu těchto teplot, na časové konstantě čidla a na nastavených parametrech *PI regulátoru*, menší vliv

mají rychlosti reakce akčních členů. Na obrázku *obr. 47* je průběh automatické regulace na konstantní hodnotu.



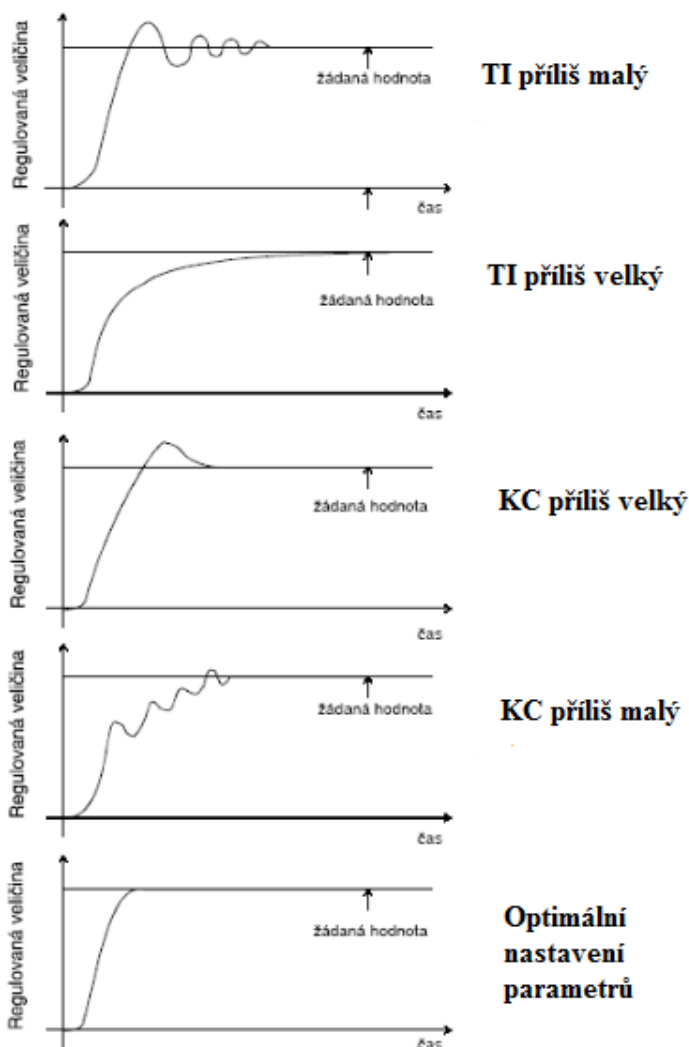
Obr. 47: Monitoring průběhu regulace teploty (Vodorovná osa – čas; svislá osa – [°C; %; V].); Oranžově – výkon infračervené žárovky [%], černě – požadovaná teplota [°C], červeně – aktuální teplota [°C], fialově – výkon ventilátorů [%], zeleně – relativní vlhkost [%], modře – PWM signál [V].

Pokud je požadovaná teplota vyšší než aktuální, začne narůstat výkon infračervené žárovky, rychlost zvyšování pomalu klesá s tím, jak se aktuální teplota přibližuje požadované teplotě. Posléze aktuální teplota překročila požadovanou teplotu a výkon žárovky začal klesat. Klesání výkonu se opět zpomalovalo s tím, jak se teplota přibližovala požadované teplotě. Mezitím se začal zvyšovat výkon ventilátorů, aby co nejrychleji eliminoval tento překmit teploty. Tento proces se opakoval, když teplota překmitla zpátky pod požadovanou teplotu, dokud se teplota neustálila na požadované hodnotě. Teplota se tedy ustálila za sedm minut se třemi překmity. Vhodnějším nastavením *PI regulátoru* se dá urychlit regulace a eliminovat překmity. Takto fungující automatická regulace je dostačující a dokáže udržovat regulovanou veličinu na požadované teplotě s přesností 1 °C, avšak je nutno brát v potaz i nenulovou chybu měření tepoty.

3.2.1 Identifikace systému a nastavení parametrů *PI regulátoru*

Díky identifikaci systému lze optimálně nastavit proporcionální a integrační složku *PI regulátoru*. Identifikace systému spočívá v matematickém popisu daného systému z pohledu vstupních a výstupních signálů regulované soustavy na základě experimentu. Pro výpočty se často užívá Laplaceovy transformace společně s obrazovým slovníkem. Parametry *PI regulátoru* lze pak určit různými metodami, např. Ziegler-Nicholsova, nebo na základě znalosti přechodové charakteristiky. Vzhledem k použité netradiční regulaci s diskrétní aktualizací výkonu infračervené žárovky v čase a implementaci ventilátorů, které

působí v opačném směru na regulovanou veličinu než infračervená žárovka, by byla identifikace systému velmi náročná a v tomto případě zbytečná. Přesnost regulace i bez bližší analýzy systému je dostačující. Navíc pro každé místo v regulované soustavě, kde je možno umístit snímač se optimální nastavení parametrů *PI regulátoru* liší a proto je vhodnější parametry nastavit metodou pokus omyl pro danou aplikaci, které bude regulovaná soustava sloužit, viz *obr. 48*, kde *KC* je proporcionální parametr a *TI* integrační čas, což jsou parametry funkčního bloku *PI regulátoru*.



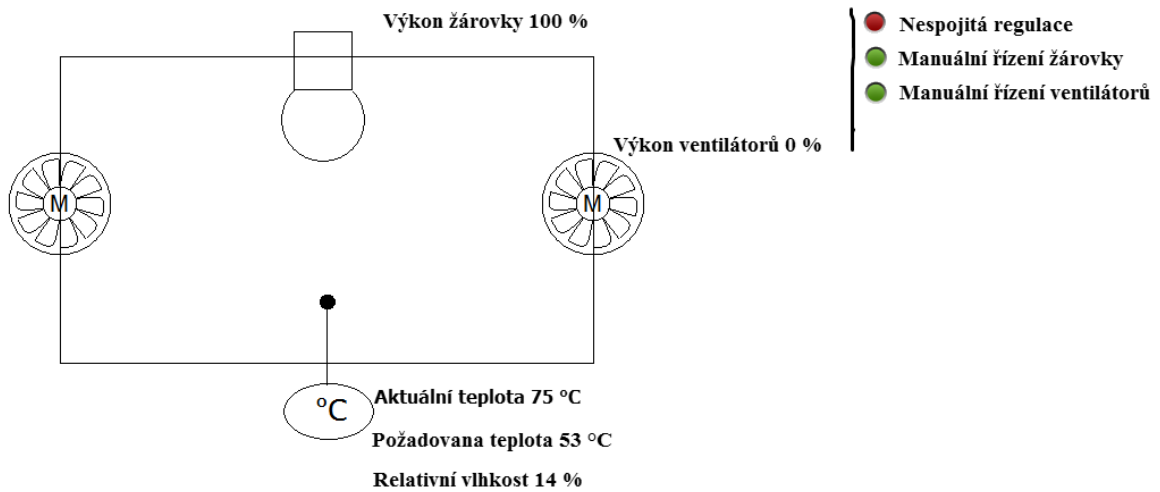
Obr. 48: Nastavení optimálních parametrů PI regulátoru metodou pokus omyl; upraveno z [4].

3.3 Vyhodnocení obslužnosti

Díky programu pro automatickou regulaci teploty je možné nastavit přesnost regulace na jednotky °C (hysterzi), kde 0°C znamená maximální možnou přesnost, nejmenší možný čas pro aktualizaci výkonu infračervené žárovky a citlivost aktualizace. Je možné zapnout manuální řízení ventilátorů i infračervené žárovky. Dále je možno zapnout mód nespojitě regulace. Monitorována je aktuální teplota a relativní vlhkost v regulované soustavě. Lze zobrazit i frekvenci vykonávání programu, ze které se vypočítá délka cyklu.

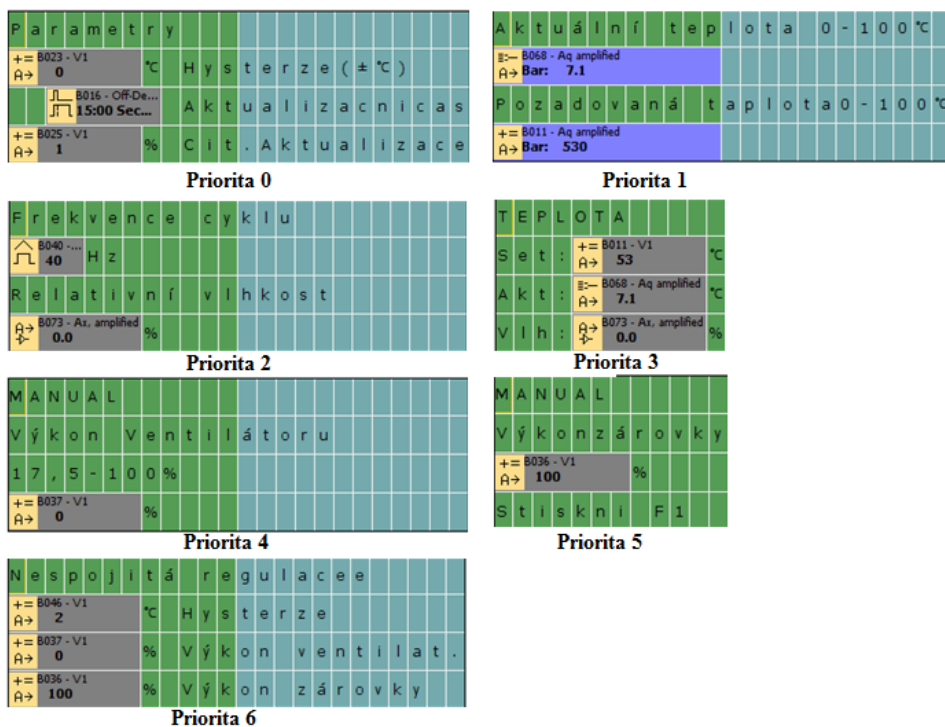
Monitoring aktuálních hodnot je možný pomocí displeje nebo pomocí softwaru LOGO!Monitor v grafu s časovou osou, viz obr. 47, a vizualizací, viz obr. 49.

Regulovaná soustava



Obr. 49: Vizualizace procesu v programu LOGO!Monitor (lze pozorovat zapnutý mód manuálního řízení výkonu infračervené žárovky a ventilátorů).

Z hlediska omezeného počtu funkčních bloků je nutno zvolit složitost *textových zpráv*. Klikací menu se nepoužívá, protože by zbytečně prodlužovalo program. V programu má přednost funkčnost a ošetření hazardních stavů před uživatelským komfortem. Obsluha systému je většinou znalá osoba, která se dobře orientuje v konkrétní aplikaci se systémem LOGO! (neplatí však vždy). Obslužnost však není nikterak složitá, kurzorovými tlačítky (▲;▼) se přepíná mezi okny textových zpráv, jež mají různou prioritu, viz obr. 50.

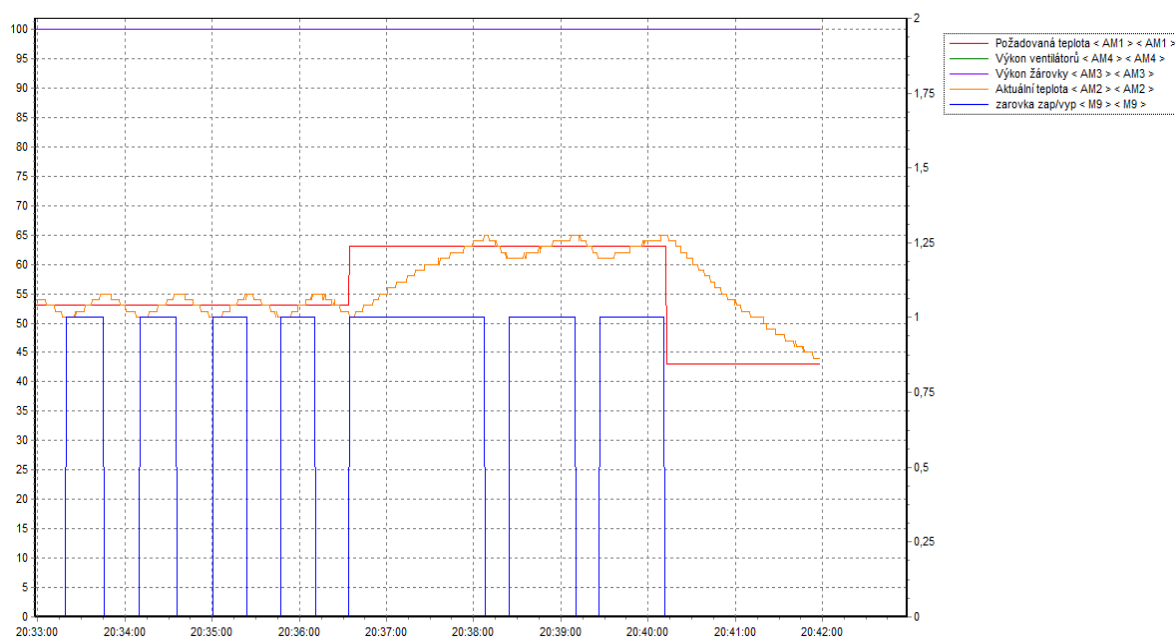


Obr. 50: Okna textových zpráv a jejich priorita.

Okno s největší prioritou je zobrazeno přednostně a kurzorovým tlačítkem ▼ se přepíná k oknům s nižší prioritou. Okna s prioritou čtyři, pět a šest se zobrazují pouze pokud jsou povolena. Dlouhé řádky se na displeji posouvají znak po znaku a je možno zobrazit i sloupcový graf hodnot (Bar Chart). Funkční tlačítka na displeji LOGO! TD jsou také využita. *F1* slouží k aktualizaci výkonu žárovky, *F2* k vypnutí žárovky, *F3* pro povolení manuálního řízení výkonu žárovky, *F4* pro povolení manuálního řízení výkonu ventilátorů a kurzorové tlačítko ► slouží pro zapnutí nespojitého módu regulace. Pokud je potřeba změnit parametr, stačí zobrazit okno, kde se parametr nachází a podržet tlačítko ESC déle než jednu sekundu, poté kurzorem najet na daný parametr, stisknout tlačítko OK, kurzorem přepsat hodnoty parametru a znovu potvrdit tlačítkem OK, pro vypnutí módu nastavení parametrů stačí stisknout tlačítko ESC.

3.4 Optimalizace

Z hlediska optimalizace systému byla konečná aplikace pro automatickou regulaci teploty doplněna o větev pro zapnutí módu nespojité regulace. V tomto módu se zapíná či vypíná infračervená žárovka na základě požadované hodnoty a nastavené hystereze, viz *obr. 51*. Hysterezi je však nutné nastavit alespoň na ± 1 °C, aby relé nespínala příliš často a neopotřebovala se.



Obr. 51: Průběh nespojité regulace s nastavenou hysterezí ± 2 °C; Vodorovná osa – čas [hod:min:sec], vertikální osa [°C] (červeně – požadovaná teplota [°C]; oranžově – aktuální teplota [°C]; modře – infračervená žárovka [logická 0/1]).

Nespojitá regulace šetří energii a nevyžaduje zvláštní pohony. Jedná se tedy o ekonomické řešení. Nevýhodou je, že regulovaná veličina neustále fluktuuje kvůli hysterezi a nikdy se neustálí.

Další optimalizace může spočívat v tom, že se manuálně nastaví výkon žárovky a regulaci teploty budou provádět pouze ventilátory, tím se odstraní nežádoucí element

spínání relé. Možné je vypnout ventilátory nebo nastavit na konkrétní stálou hodnotu a regulaci provádět pouze za pomoci infračervené žárovky, tím se sníží ztráty vzniklé chladicím účinkem ventilátorů. Takto by se však snižovala přesnost regulace.

Program by se značně zjednodušil, pokud by byl použit již linearizovaný snímač s unifikovaným výstupem a stmívač řízený unifikovaným signálem v reálném čase. Avšak pořizovací náklady by byly mnohonásobně vyšší než při současném řešení.

Další optimalizaci by přineslo použití digitálního rozšiřovacího modulu s tranzistorovými výstupy v kombinaci s polovodičovým relé. Tak by bylo možné aktualizovat výkon žárovky mnohem častěji. Ale pořizovací náklady by opět narostly.

Z hlediska dobré funkčnosti současného řešení však nejsou tyto optimalizace zapotřebí.

Závěr

Cílem této práce bylo uvést systém LOGO! do provozu v oblasti řízení podmínek v regulované soustavě. Hlavním úkolem byla regulace teploty na konstantní hodnotu.

Byly navrženy a zkonstruovány elektronické obvody převodníku pro čidla (Pt1000, NTC termistor a integrovaný obvod LM35) na unifikovaný signál. Pro regulaci byl použit snímač s Pt1000. Byla vytvořena metoda linearizace snímačů pomocí programu vykonávaného systémem LOGO!. Byl vytvořen elektronický obvod pro řízení výkonu ventilátorů pomocí signálu pulzní šířkové modulace. Byl vytvořen program pro ovládání tlačítkem řízeného stmívače pro infračervenou žárovku. V regulované soustavě je možné měřit aktuální teplotu a vlhkost. K regulaci teploty byl použit funkční blok *PI regulátoru*. V regulované soustavě lze regulovat teplotu s přesností jednoho stupně Celsia. Je možné manuální řízení akčních členů. Systém je vybaven i módem pro nespojitou regulaci.

V práci je nejprve popsáno zapojení experimentální sestavy, poté vývojové prostředí LOGO! Soft Comfort V6.0. a nakonec vytvořený program pro regulaci teploty. Část práce je věnována bližšímu rozboru zhotovených snímačů, jejich kalibraci a linearizaci. Postupně jsou popisovány metody programování a nastavování parametrů funkčních bloků.

Celý systém byl navržen a zkonstruován metodami, které vedly k minimálním pořizovacím nákladům a spolehlivé funkčnosti. Zkonstruovaná regulovaná soustava v podobě plexisklového boxu slouží k výukovým účelům na učebně číslicových měřicích systémech. Zároveň bude systém využit v experimentálních úlohách pro materiálový výzkum. Předpokládané využití zhotovené soustavy je v oblasti dlouhodobého vystavování nanočástic oxidu železa, konstantním zvýšeným teplotám a záření v infračervené oblasti.

Budoucí vylepšení může spočívat ve zdokonalení převodníků pro teplotní čidla. Dále je možné vytvořit stmívač pro spojitě řízení v čase a zapojit LOGO! do distribuovaného systému s vyšším PLC. Zajímavou úlohou bude vytvoření programu pro monitoring a datování na bázi LabVIEW a využití sběrnice AS-I s dalšími snímači a akčními členy, případně doplnění systému o regulaci relativní vlhkosti.

Závěrem lze konstatovat, že zadání práce bylo splněno. Systém LOGO! byl komplexně využit a demonstrační úloha je plně funkční, s možností dalšího rozšiřování.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] MARTINÁSKOVÁ, Marie. *PLC -programovatelné automaty*. [online]. Přednáška předmětu PSAŘ (237 1132), ČVUT. (Z webu: 109 laboratoř automatů a logiky, © Copyright Jakub Jura). [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://iat.fs.cvut.cz/109/files/psar/prednasky_2007/
- [2] ŠMEJKAL, Ladislav a Marie MARTINÁSKOVÁ. *PLC a automatizace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 223 s. ISBN 80-860-5658-9.
- [3] KYSELÝ, Libor. VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA A STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ BOŽETĚCHOVA 3, 772 00 Olomouc. *Automatizace: (učební texty pro 3. ročník)*. Olomouc, 2008.
- [4] WELSCH, Ondřej. *Levitující kulička*. Pardubice, 2009. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34992/1/WelschO_Levitujici%20kulicka_MD_2009.pdf. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.
- [5] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2. přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004, 663 s. ISBN 80-730-0148-9.
- [6] ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-010-1500-9.
- [7] MARTINÁSKOVÁ, Marie. Nejmenší řídicí systémy – programovatelné moduly. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2002, roč. 2002, č. 4. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28401
- [8] SIEMENS. *LOGO! a SIMATIC S7-200, Malé řídicí systémy: Přehledový prospekt*. [cit. 2013-03-25]Siemens s.r.o., 3/2008. Dostupné z: http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/automatizacni_systemy/mikrosystemy/_prospekty/brochure_micro_03_2008_cz.pdf
- [9] SIEMENS. *LOGO! 0BA6: Příručka*. 10. vydání. Sektor Industry, Praha 6, ČR: Siemens s.r.o., 11/2008. Dostupné z: http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=3dc1f5a3fc&ctxp=doc_manualy
- [10] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: I*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2007, 271 s. ISBN 978-80-7232-321-0.
- [11] ELKO EP. *Katalogový list, Řízený stmívač SMR-S, SMR-U*. [cit. 2013-03-25] Palackého 493, 769 01 Holešov, Všetuly, CZ. Dostupné z: http://eshop.elkoep.cz/documents/smr-s/share_dokumentace/cs/katalogovy_list_smr-s_u.pdf

[12] KESTER, Walt. ANALOG DEVICES. *BRIDGE CIRCUITS: THE WHEATSTONE BRIDGE* [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z:
http://www.analog.com/static/imported-files/seminars_webcasts/49470200sscsect2.PDF

[13] Exo Terra. *Infrared basking spot lamp PT2146 – R30/150W*. [online]. Product support. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z:
http://www.exo-terra.com/en/products/infrared_basking_spot_lighting.php

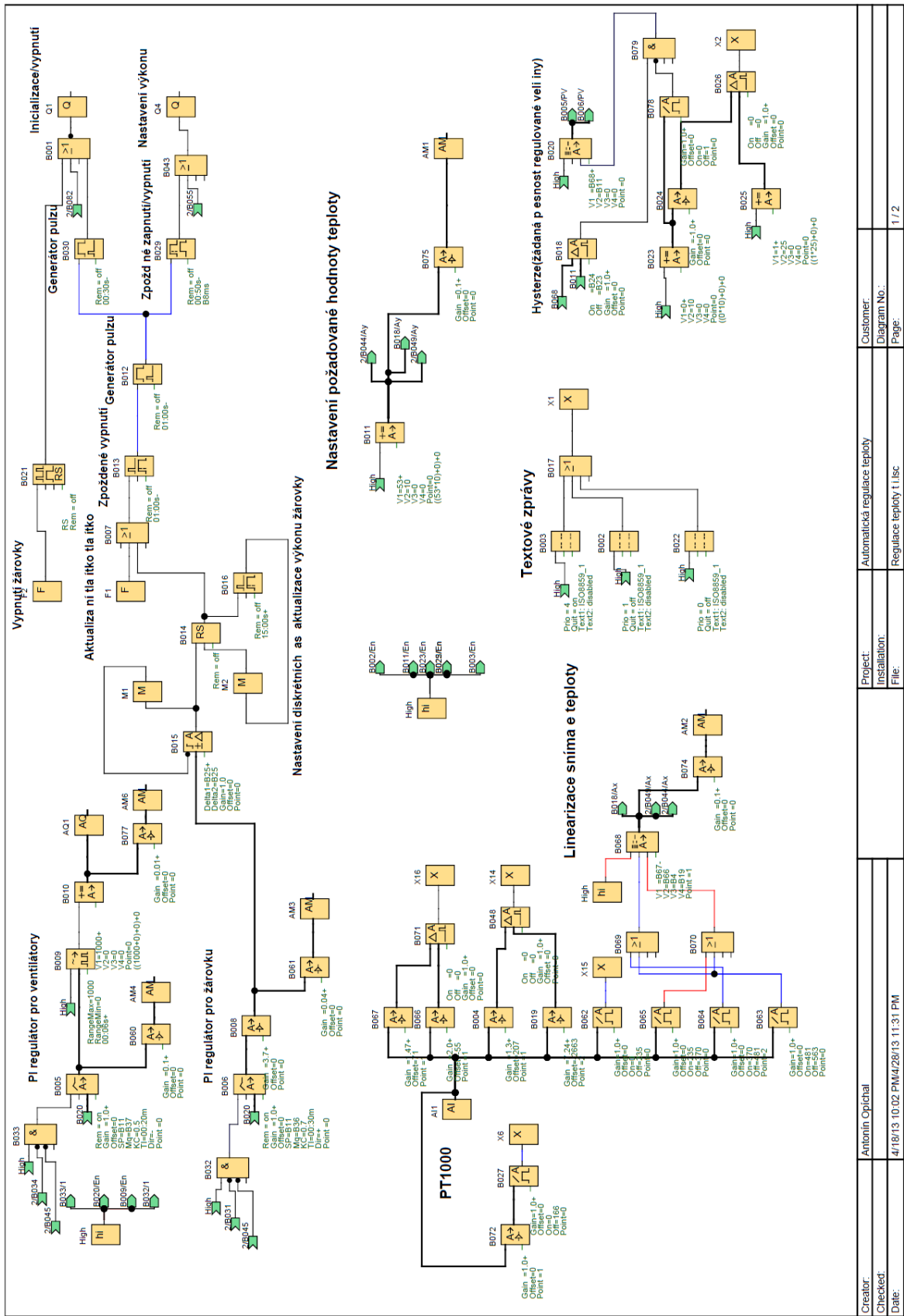
[14] KÁKONA, Jakub, LAFATA Jan a HORKEL Milan. Domácí výroba plošných spojů fotocestou: zkušenosti a ověřené postupy. *Projekt MLAB* [online]. 23.03.2013 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z:
http://www.mlab.cz/Articles/HowTo/How_to_make_PCB/DOC/HTML/How_to_make_PCB.cs.html

Seznam příloh:

- [přl.1]: Konečný program pro automatickou regulaci teploty.
- [přl.2]: Návrh převodníku pro Pt1000.
- [přl.3]: Návrh převodníku pro NTC termistor.
- [Přl.4]: Návrh převodníku pro LM35.
- [přl.5]: Parametry modulu pro měření vlhkosti.
- [přl.6]: Návrh modulu pro řízení výkonu ventilátorů
- [přl.7]: Návrh modulu pro PWM řízení
- [přl.8]: Realizace převodníků na desce plošných spojů.
- [přl.9]: Datové listy použitých součástek.
- [přl.10]: Naměřená data při první kalibraci.
- [přl.11]: Naměřená data při druhé kalibraci.
- [přl.12]: Fotodokumentace.

Příloha 1: Konečný program pro automatickou regulaci teploty

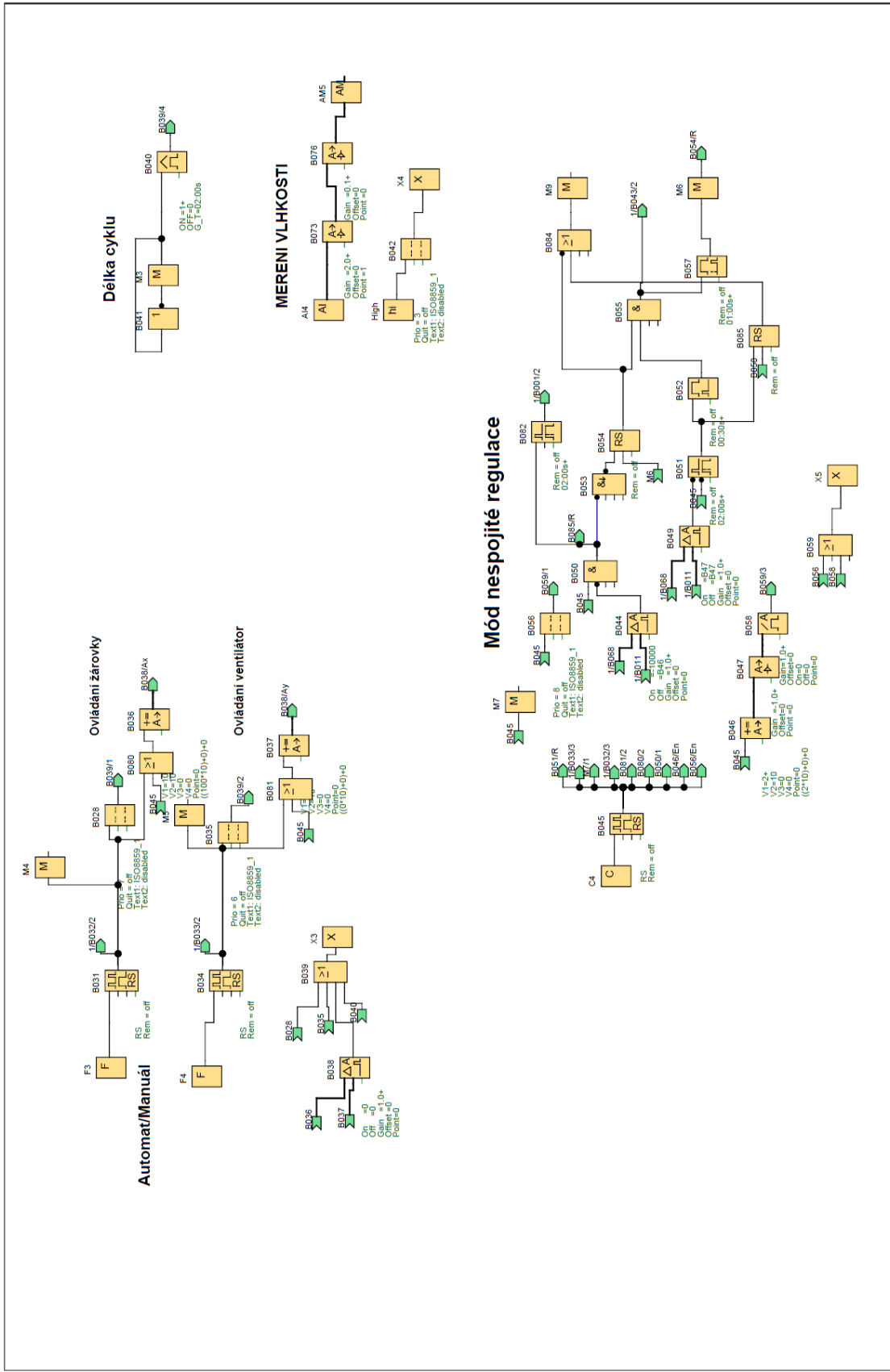
Příložený i na DVD ve formátu pdf. a isc.



Creator: Antonín Opálchal
Checked: 4/18/13 10:02 PM 4/28/13 11:31 PM

Project: Automatická regulace teploty
Installation: Regulace teploty 1.1sc

Customer: Diagram No.: 1/2
Page:



Creator:	Antonín Opichal	Project:	Automatická regulace teploty	Customer:	
Checked:		Installation:		Diagram No.:	
Date:	4/18/13 10:02 PM	File:	Regulace teploty t ilsc	Page:	2 / 2

Příloha 2: Návrh převodníku pro Pt1000

Použité součástky:

Datové listy součástek, viz [přl.9].

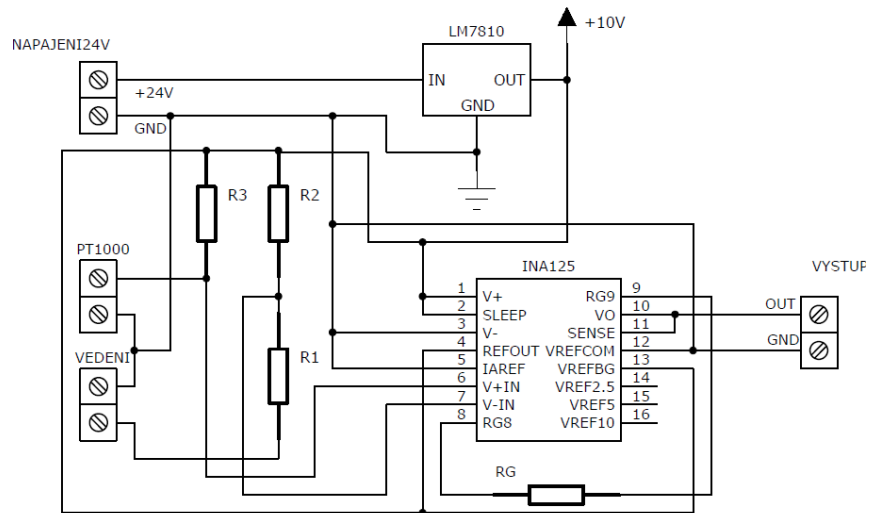
Čidlo (Pt1000)

LM7810

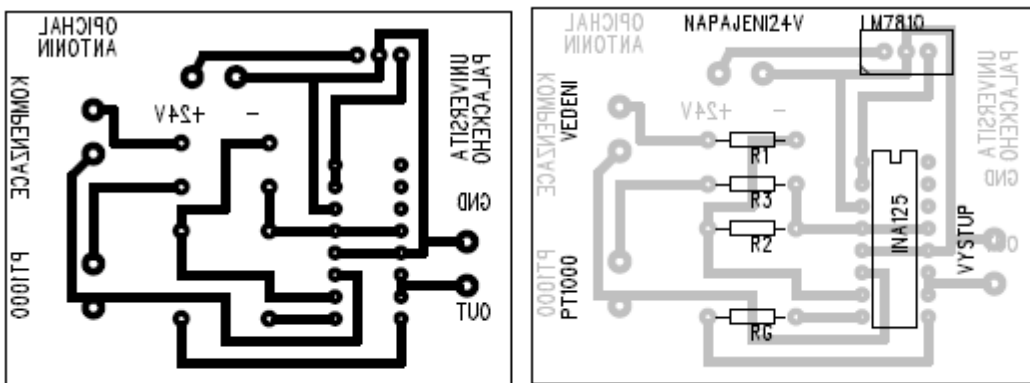
INA125

R1, R2, R3=1 k Ω (tolerance 0,1 %)

R_G=1,5 k Ω



Obr. 52: Schéma zapojení převodníku pro čidlo Pt1000.



Obr. 53: Deska plošných spojů a osazení převodníku pro Pt1000.

Příloha 3: Návrh převodníku pro NTC Termistor

Datové listy součástek, viz [přl.9].

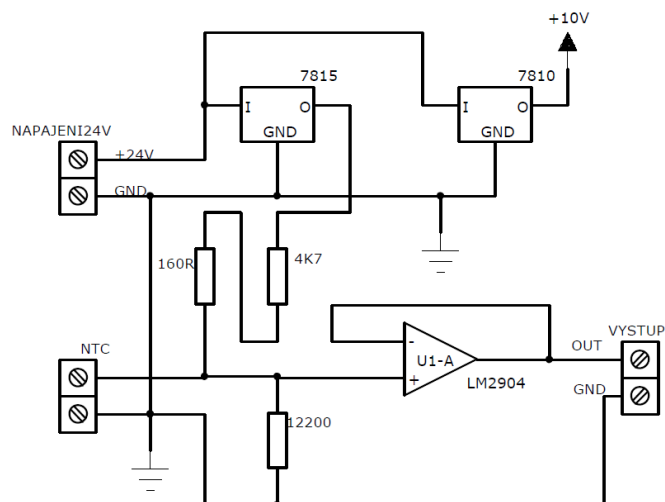
Použité součástky:

Čidlo (NTC termistor)

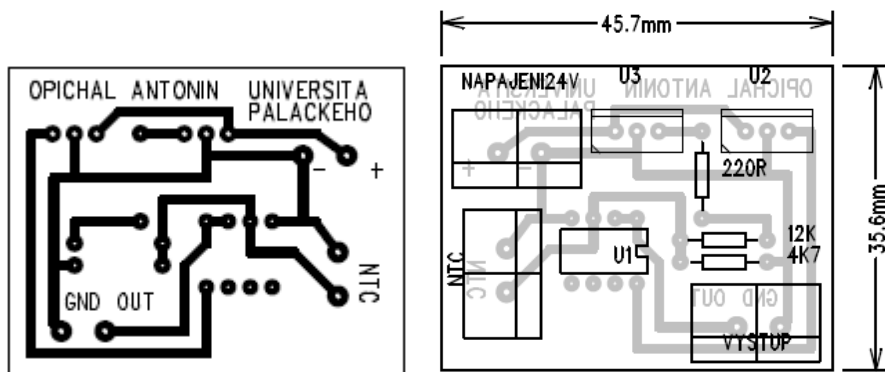
LM7810, LM7815

LM2904

$R_1=160\ \Omega$, $R_2=4,7\ \text{k}\Omega$, $R_3=12,2\ \text{k}\Omega$



Obr. 54: Schéma zapojení převodníku pro NTC termistor.



Obr. 55: Deska plošných spojů a osazení převodníku pro NTC termistor.

Příloha 4: Návrh převodníku pro LM35

Datové listy součástek, viz [přl.9].

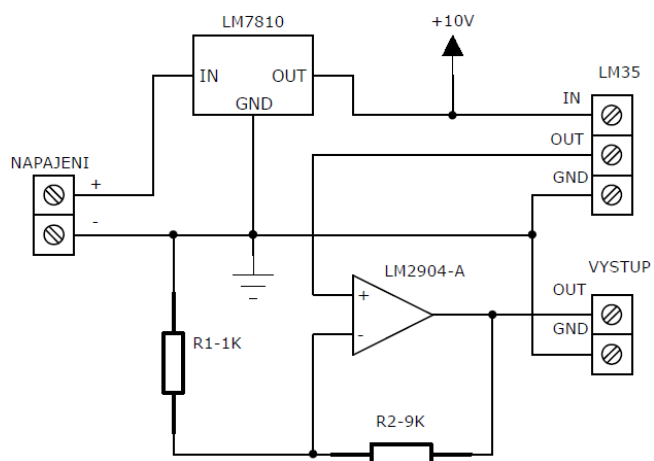
Použité součástky:

Čidlo (LM35)

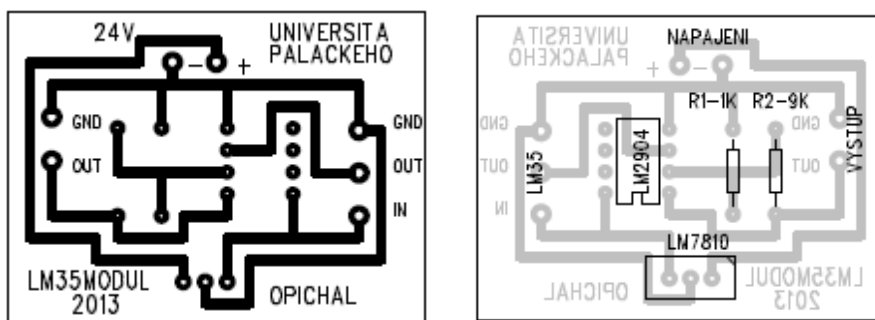
LM7810

LM2904

R1=1 k Ω , R2=9 k Ω



Obr. 56: Schéma zapojení převodníku pro integrovaný obvod LM35.



Obr. 57: Deska plošných spojů a osazení převodníku pro LM35.

Příloha 5: Parametry modulu pro měření vlhkosti

Převzato z originálního datového listu, viz [přl.9].

Sensor Type: P14 SMD

Measurement principle: Capacitive humidity sensor

Mechanical dimensions: W=10 x L=47 x T=2.8 mm

Humidity measurement range: 0 ... 100 % RH

(max. DP = 85 °C)

Operating temperature range: - 25 ... +85 °C

Operating voltage: 8...32 Volts DC

(recommended 9 Volts)

Current consumption: < 3 mA

Output signal: 0...5 Volts (0...100% RH)

Temperature sensor optional PT100/PT1000, loop-through, not stuffed
for SMD or throughhole mounting

Storage temperature range: -40...+100 °C / @ max. 95 % RH non condensing

Accuracy: < 3 % RH

(15 ... 85% RH @ 23 °C)

Terminal connectors: Soldering terminals for VCC, Analog Out,

Loop-through of optional temperature sensor

Příloha 6: Návrh modulu pro řízení výkonu ventilátorů pomocí výkonového operačního zesilovače

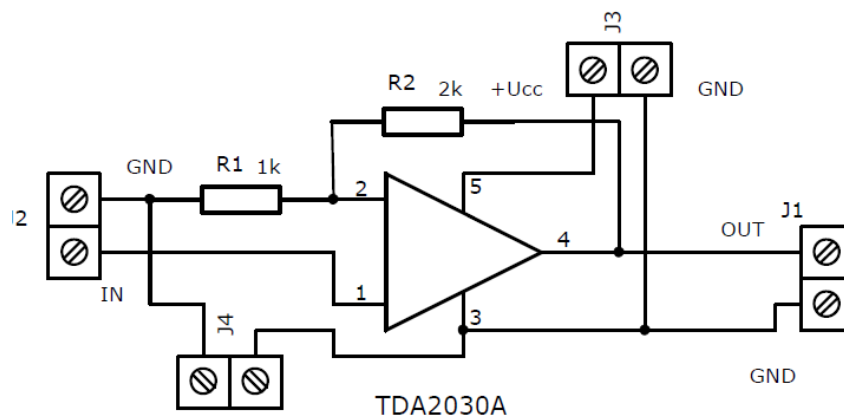
Datové listy součástek, viz [přl.9].

Použité součástky:

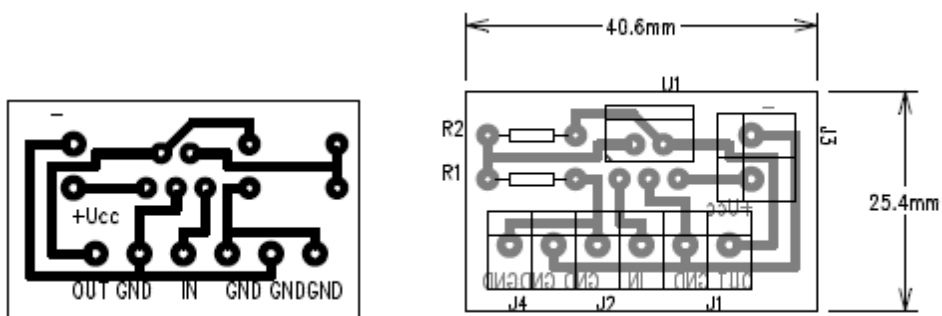
Ventilátory (Sunon KD2408PTS1-6)

TDA2030A

R1=1 k Ω , R2=2 k Ω



Obr. 58: Schéma modulu pro řízení výkonu ventilátorů pomocí výkonového operačního zesilovače.



Obr. 59: Deska plošných spojů a osazení modulu pro řízení výkonu ventilátorů pomocí výkonového operačního zesilovače.

Příloha 7: Návrh modulu pro PWM řízení

Datové listy součástek, viz [přl.9]

Použité součástky:

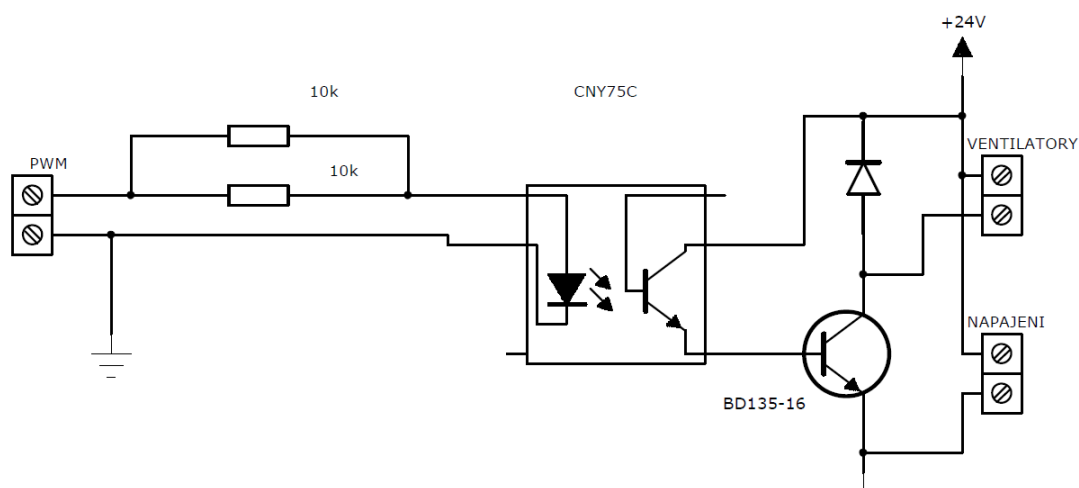
Ventilátory (Sunon KD2408PTS1-6)

CNY75C

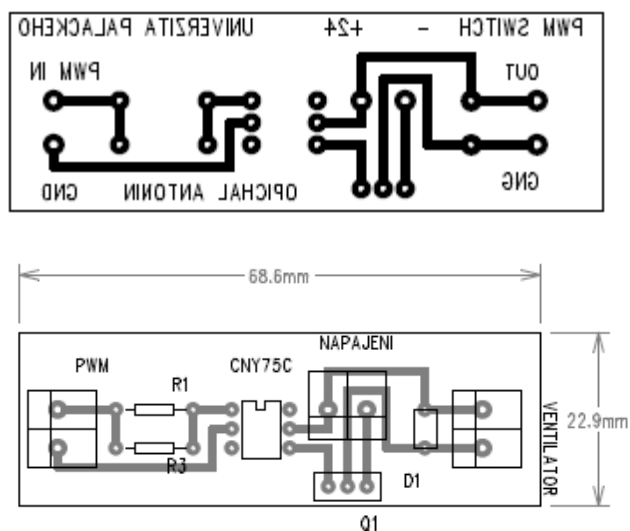
BD135

Dioda – usměrňovací

R1=10 k Ω , R2=10 k Ω



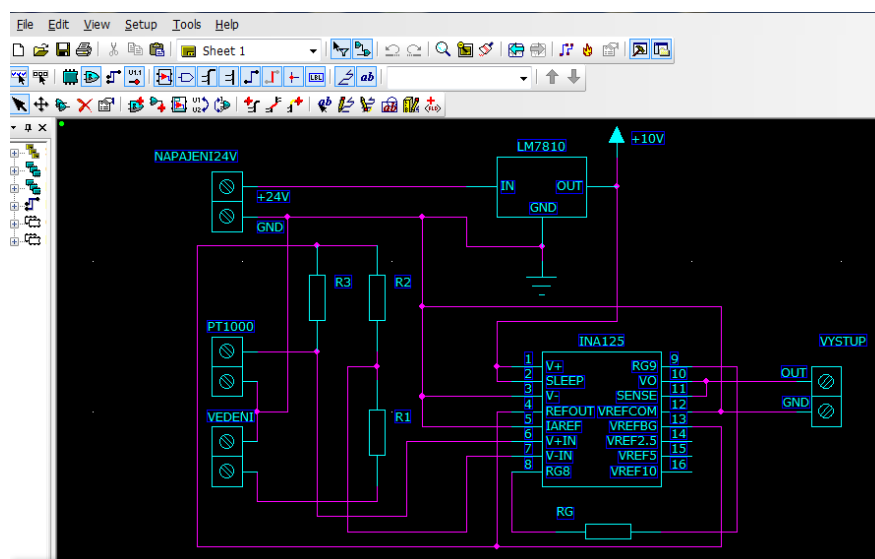
Obr. 60: Schéma modulu pro PWM řízení ventilátorů.



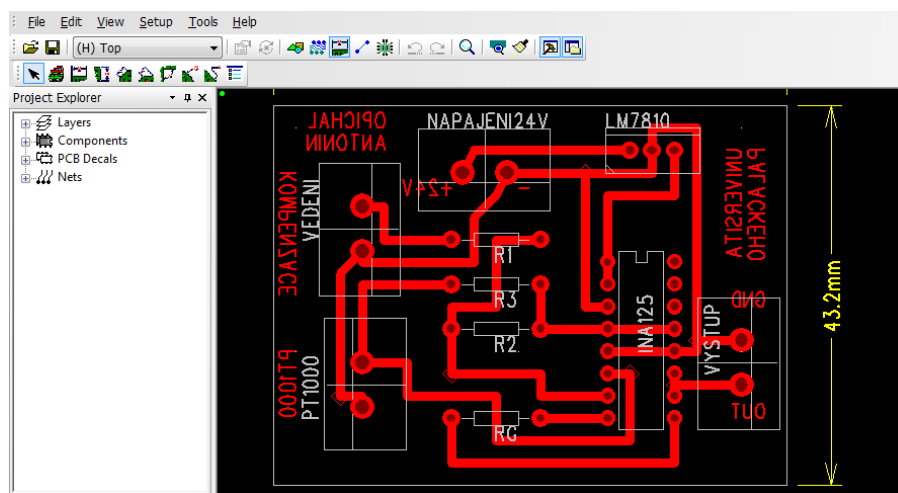
Obr. 61: Deska plošných spojů a osazení modulu pro PWM řízení ventilátorů.

Příloha 8: Realizace převodníků na desce plošných spojů

Návrh DPS byl proveden v programu PADS 2007.4 firmy Mentor Graphic. Přesněji pak v PADS Logic 2007.4 bylo navrženo schéma obvodu, viz *obr. 62*. Distribuce vodivých cest a rozmístění součástek bylo provedeno v PADS Layout 2007.4 viz, *obr. 63*.



Obr. 62: Návrh schématu převodníku pro Pt1000 v programu PADS Logic.



Obr. 63: Návrh DPS převodníku pro Pt1000 v programu PADS Layout.

Předloha pak byla vytisknuta na fólii (R0310.1123A firmy Rayfilm) laserovou tiskárnou HP LaserJet 1022. DPS pak byla zhotovena metodou fotocesty. Byla použita deska plošných spojů z materiálu FR-2 s již nanesenou pozitivní fotocitlivou vrstvou. Jako vývojka byl použit hydroxid sodný o koncentraci 1,5 %. Jako leptací roztok byl použit chlorid železitý o koncentraci 30–50 %. Bližší postup výroby DPS fotocestou je popsán v elektronickém zdroji [14]. Jako spojovací materiál byla použita trubičková cínová pájka (Sn 60 %, Pb 40 %,) s tavidlem. K zapájení součástek byla použita transformátorová páječka 100W ETP III.

Příloha 9: Datové listy použitých součástek

Pdf soubory přiloženy na DVD.

BD135; Dostupné z:

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/5238.pdf>

CNY75C; Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/83536/83536.pdf>

INA 125; Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf>

LINPICCO-(TM)-BASIC-A05-G-IST; Dostupné z:

<http://datasheet.octopart.com/LINPICCO-%28TM%29-BASIC-A05-G-IST-datasheet-61205.pdf>

LM35; Dostupné z: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/M/3/5/LM35.shtml

LM78XX; Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/9045/NSC/LM7815.html>

LM2904; Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2904.pdf>

NTC Termistor; Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.net/datasheet-pdf/view/328039/EPCOS/B57550G.html>

Pt1000; Dostupné z: http://www.hst-us.com/pdf/thinilmflat/MR_828_+_845_-e.pdf

Stmívač SMR-S; Dostupné z: http://eshop.elkoep.cz/documents/smr-s/share_dokumentace/cs/katalogovy_list_smr-s_u.pdf

Sunon KD2408PTS1-6; Dostupné z: <http://www.ondaradio.es/portals/0/doc/ve2082.pdf>

TDA2030A; Dostupné z:

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/1459.pdf>

Infračervená žárovka EXO TERRA 150W; Dostupné z: http://www.exo-terra.com/en/products/infrared_basking_spot_lighting.php

Příloha 10 Naměřená data při první kalibraci

Vzdálenost od IČ zdroje: 30 mm

Odečítání hodnot každé: 2 min

Termočlánek Metex M-3850D (přesnost ± 3 % z č.h. +5 °C)

LOGO!12/24 RC 0BA6 (přesnost $\pm 1,5$ % z č.h.)

Term.č.	Pt1000	LM35	NTC	Pt1000	LM35	NTC
$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$U[\text{V}]$	$U[\text{V}]$	$U[\text{V}]$
22	27,7	29,3	33,3	2,81	2,91	5,60
23	27,9	29,9	37,9	2,85	2,96	5,50
24	28,1	29,8	37,5	2,91	3,01	5,10
25	28,9	30,5	38,1	2,89	3,09	5,06
26	28,9	30,5	38,8	3,14	3,05	4,96
28	31,3	32,8	41,2	3,24	3,30	4,74
30	33,0	34,5	42,7	3,38	3,43	4,60
34	36,5	37,8	45,5	3,72	3,76	4,32
37	39,6	40,7	48,1	4,04	4,05	4,07
42	43,2	44,7	50,9	4,39	4,43	3,81
46	45,7	48,8	53,9	4,66	4,88	3,48
49	45,8	49,5	54,5	4,67	4,94	3,42
52	46,1	52,7	56,2	4,70	5,23	3,24
53	46,1	53,7	57,0	4,71	5,35	3,17
54	46,2	54,6	57,5	4,71	5,41	3,12
58	46,5	57,7	59,5	4,74	5,73	2,92
62	46,9	61,3	62,3	4,78	6,16	2,65
64	47,9	62,8	62,6	4,80	6,26	2,57
65	47,0	63,1	63,1	4,79	6,33	2,54
68	47,3	66,6	64,7	4,80	6,54	2,42
69	47,3	66,7	64,7	4,82	6,66	2,35
71	47,5	68,6	66,4	4,83	6,8	2,26
75	47,7	71,4	67,5	4,86	7,10	2,10
76	47,8	72,4	68,2	4,87	7,19	2,05
78	48,0	74,2	69,3	4,89	7,35	1,94
81	48,1	75,5	70,2	4,90	7,54	1,85
82	48,2	76,3	70,3	4,91	7,62	1,81
86	48,4	77,5	72	4,93	7,83	1,67
88	48,5	78,7	72,4	4,93	7,90	1,63
90	48,6	79,6	73,2	4,94	7,96	1,56
92	48,7	80,6	73,5	4,97	8,05	1,50
95	48,9	81,9	74,7	4,98	8,20	1,40
97	49,0	82,4	75,6	4,98	8,24	1,36
99	49,1	82,6	75,1	4,99	8,27	1,35
104	49,2	84,1	76,3	5,01	8,42	1,26
105	49,3	84,9	77,1	5,03	8,49	1,17
107	49,4	85,2	77,6	5,04	8,54	1,11
109	49,5	85,4	77,7	5,04	8,56	1,05
112	49,7	86,3	78,4	5,06	8,62	1,03
114	49,8	86,3	78,4	5,07	8,64	0,99
115	49,8	86,5	78,7	5,08	8,69	0,99

Tab. 3: Naměřená data při první kalibraci.

Příloha 11 Naměřená data při druhé kalibraci

Vzdálenost od IČ zdroje: 70 mm

Odečítání hodnot každých: 5 min

Digitální teploměry VOLTcraft DET1R (přesnost $\pm 5\%$ z č.h.)

LOGO!12/24 RC 0BA6 (přesnost $\pm 1,5\%$ z č.h.)

Dig1	Dig1	Průměr	Pt1000	LM35	NTC	Pt1000	LM35	NTC
$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$U[\text{V}]$	$U[\text{V}]$	$U[\text{V}]$
25,7	25,4	25,6	25,3	24,6	25,3	1,25	2,59	5,42
26,0	25,7	25,9	25,9	25,9	26,2	1,29	2,76	5,30
27,3	26,8	27,0	27,1	27,2	27,5	1,37	2,93	5,12
28,9	28,3	28,6	28,6	29,1	28,9	1,47	3,18	4,93
32,3	31,9	32,1	31,8	33,2	32,2	1,68	3,72	4,49
33,5	33,1	33,3	33,3	34,8	33,5	1,78	3,93	4,31
37,5	37,1	37,3	37,0	39,6	37,6	2,03	4,57	3,76
39,4	38,9	39,2	39,7	42,1	39,1	2,21	4,89	3,55
41,5	41,3	41,4	41,9	44,3	41,5	2,35	5,18	3,23
42,3	41,7	42,0	43,2	45,7	42,3	2,35	5,37	3,12
45,6	44,9	45,3	47,1	50,1	45,5	2,56	5,95	2,69
49,0	48,6	48,8	50,0	53,7	48,2	2,72	6,42	2,32
51,1	50,9	51,0	51,9	56,0	51,0	2,82	6,72	2,64
54,7	53,9	54,3	56,7	60,0	54,9	3,05	7,25	2,49
59,5	59,5	59,5	61,2	78,7	59,2	3,26	7,87	2,24
62,5	62,1	62,3	64,5	82,5	62,2	3,41	8,25	2,07
65,1	65,3	65,2	67,3	85,7	64,6	3,54	8,57	1,93
68,1	68,3	68,2	70,7	89,1	67,6	3,70	8,91	1,76
70,5	70,9	70,7	72,4	89,2	70,0	3,78	8,92	1,62
75,5	75,5	75,5	82,0	89,2	72,3	4,22	8,92	1,49

Tab. 4: Naměřená data při druhé kalibraci pro vzdálenost 7 cm od infračervené žárovky.

Vzdálenost od IČ zdroje: 20 mm

Odečítání hodnot každých: 5 min

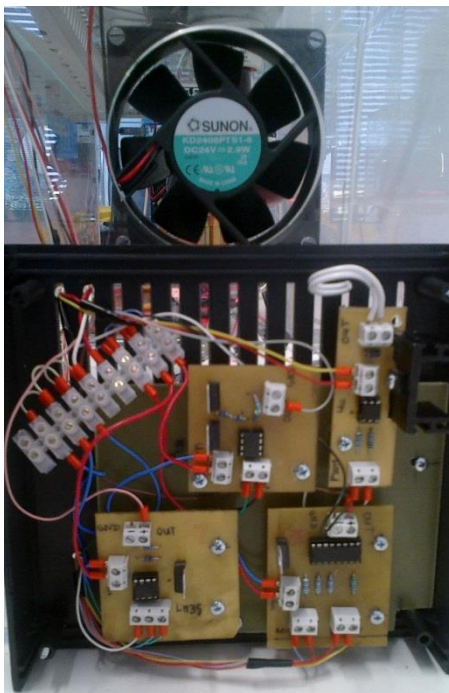
Digitální teploměry VOLTcraft DET1R (přesnost $\pm 5\%$ z č.h.)

LOGO!12/24 RC 0BA6 (přesnost $\pm 1,5\%$ z č.h.)

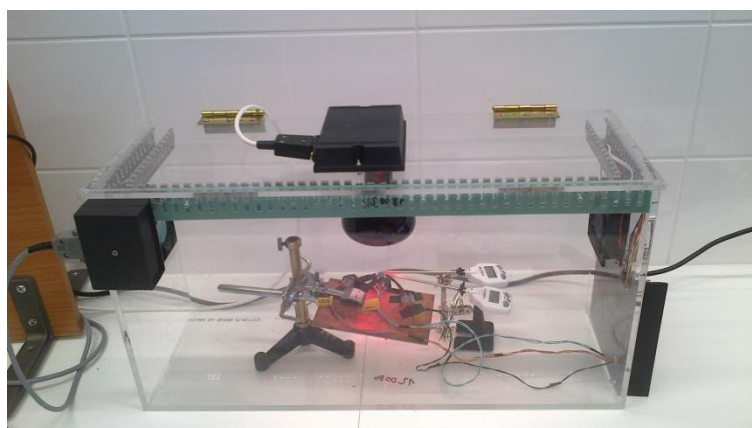
Dig1	Dig1	Průměr	Pt1000	LM35	NTC	Pt1000	LM35	NTC
$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$U[\text{V}]$	$U[\text{V}]$	$U[\text{V}]$
79,6	78,8	75,5	86,7	89,2	72,3	4,44	8,92	1,49
82,2	82,1	79,2	89,7	89,2	74,9	4,58	8,92	1,34
86,3	87,6	82,2	94,7	89,2	78,5	4,81	8,92	1,13
89,9	92,0	86,9	96,6	89,2	81,6	4,90	8,92	0,95
90,3	92,4	90,9	97,1	89,2	82,8	4,92	8,92	1,15

Tab. 5: Naměřená data při druhé kalibraci pro vzdálenost 2 cm od infračervené žárovky.

Příloha 12 Fotodokumentace



Obr. 64: Panel s deskami plošných spojů.



Obr. 65: Regulovaná soustava v podobě plexisklového boxu.



Obr. 66: Systém LOGO! a experimentální sestava.