

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Bakalářská práce

**Realizace úlohy regulace teploty pomocí PLC Siemens
LOGO!**

Vojtěch Brotánek

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vojtěch Brotánek

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Realizace úlohy regulace teploty pomocí PLC Siemens LOGO!

Název anglicky

Implementation of temperature control task using PLC Siemens LOGO!

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je navrhnout a realizovat úlohu pro regulaci teploty pece pomocí PLC Siemens LOGO!. Regulace teploty bude zajištěna pomocí dvoustavové regulace a dále pomocí PI regulátoru, který je součástí PLC.

Metodika

- 1) Prostudování problematiky automatizace a její nasazení v průmyslu
- 2) Seznámení se s řídicím systémem Siemens LOGO!
- 3) Popis jednotlivých programovacích jazyků PLC dle normy IEC 61131 (zejména LD a FBD)
- 4) Navržení zapojení úlohy pro regulaci pece
- 5) Sestavení SW pro řízení a regulaci teploty

Doporučený rozsah práce

50stran, bez příloh

Klíčová slova

PLC, regulace teploty, PI regulace, Siemens LOGO!, automatizace

Doporučené zdroje informací

BAYER, Jiří, Richard ŠUSTA a Zdeněk HANZÁLEK. Logické systémy pro řízení. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02147-5.

BENEŠ, P. *Automatizace a automatizační technika. 3, Prostředky automatizační techniky*. Brno: Computer Press, 2003. ISBN 80-7226-239-4.

MARTINÁSKOVÁ, Marie a Ladislav ŠMEJKAL. Řízení programovatelnými automaty. Vyd. 2. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02925-5

RIPKA, Pavel, ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel a NOVÁK, Jiří. Senzory a převodníky. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 135 stran. ISBN 80-01-03123-3 (CS)

ŠVARC, I. – VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. *Automatizace : automatické řízení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-2943-7.

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jiří Kuře

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Konzultant

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 7. 12. 2020

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 27. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Realizace úlohy regulace teploty pomocí PLC Siemens LOGO!" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. 3. 2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Kuřeti za ochotu a cenné rady. Také chci poděkovat doc. Ing. Miloslavu Lindovi, Ph.D. za pomoc při realizaci praktické části.

Realizace úlohy regulace teploty pomocí PLC Siemens LOGO!

Abstrakt

Cílem práce je navrhnout úlohu regulace teploty a následně ji realizovat pomocí PLC automatu Siemens LOGO!. Teoretická část se zaměřuje na obecný popis regulace a druhy regulátorů používaných v automatizaci. Dále jsou stručně zmíněny metody výpočtu vhodných parametrů spojitých regulátorů a metody hodnocení kvality regulačního procesu. Teoretickou část zakončuje představení programovacích jazyků pro PLC automaty definované normou IEC 61131. Praktická část se věnuje realizaci úlohy a následnému vyhodnocení výsledků měření. To zahrnuje popis zapojení PLC a elektrické trouby, následně vytvoření programu pro dvoustavovou a PI regulaci, a nakonec zhodnocení naměřených dat.

Klíčová slova: Automatizace, dvoustavová regulace, PI regulace, Logo! Soft Comfort, PLC

Realization of the task of temperature regulation using PLC Siemens LOGO!

Abstract

The aim of the thesis is to design a temperature control task and then implement it using a Siemens LOGO! PLC. The theoretical part focuses on a general description of regulation and the types of regulators used in automation. Furthermore, methods for calculating suitable parameters of continuous regulators and methods for evaluating the quality of the regulation process are briefly mentioned. The theoretical part ends with the presentation of programming languages for PLC defined by the IEC 61131 standard. The practical part is devoted to the implementation of the task and the subsequent evaluation of the measurement results. This includes the description of the connection of the PLC and the electric oven, followed by the creation of a program for two-state and PI regulation, and finally the evaluation of the measured data.

Keywords: Automation, two-state control, PI control, Logo! Soft Comfort, PLC

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1 Úvod..... | 1 |
| 2 Cíl práce a metodika | 2 |
| 3 Teoretická východiska | 3 |
| 3.1 Regulace..... | 3 |
| 3.1.1 Druhy regulace..... | 3 |
| 3.1.2 Rozdělení regulátorů..... | 3 |
| 3.1.3 Veličiny v regulačním obvodu..... | 4 |
| 3.1.4 Regulační obvod | 5 |
| 3.1.5 Spojité regulátory..... | 6 |
| 3.1.6 Sdružené regulátory | 7 |
| 3.1.7 Metody pro určení parametrů spojitých regulátorů | 8 |
| 3.1.8 Stabilita regulačního obvodu | 9 |
| 3.1.9 Kvalita regulace | 10 |
| 3.1.10 Dvupolohový regulátor | 11 |
| 3.2 PLC automaty..... | 12 |
| 3.2.1 Architektura PLC | 12 |
| 3.2.2 Princip činnosti | 13 |
| 3.2.3 Typy PLC..... | 14 |
| 3.2.4 Požadavky na PLC..... | 14 |
| 3.2.5 Norma IEC 61131 | 15 |
| 3.2.6 Programovací jazyky PLC | 16 |
| 3.2.7 Logo! Soft Comfort | 22 |
| 4 Vlastní práce | 25 |
| 4.1 Realizace úlohy | 25 |
| 4.1.1 Prvky použité při realizaci úlohy | 25 |
| 4.1.2 Původní zapojení trouby | 28 |
| 4.1.3 Nové zapojení trouby..... | 29 |
| 4.1.4 Propojení s PLC..... | 31 |
| 4.2 Dvoustavová regulace | 32 |
| 4.2.1 Řešení dvoustavové regulace..... | 32 |
| 4.2.2 Nastavení parametrů a měření | 35 |
| 4.3 PI regulace..... | 38 |
| 4.3.1 Řešení PI regulace | 38 |
| 4.3.2 Nastavení parametrů a měření | 40 |
| 4.4 Další faktory ovlivňující regulaci..... | 44 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 4.4.1 | Zvolený režim topných těles..... | 44 |
| 4.4.2 | Měření teploty..... | 45 |
| 5 | Závěr..... | 47 |
| 6 | Seznam použitých zdrojů | 49 |

1 Úvod

Počátky automatizace sahají až do starověku, kdy vznikaly první jednoduché stroje využívající vodu nebo vodní páru. Opravdu důležité milníky v historii automatizace ale přišly mnohem později, v 18. a zejména 19. století, kdy se především díky vynálezu parního stroje začala široce rozvíjet průmyslová výroba. Začátkem 20. století přišla americká firma Ford jako první na světě s pásovou výrobou. Stále však nelze mluvit o automatizaci jako takové, skutečnou automatizaci umožnil až vznik prvního reléového počítače MARK I (1937) a později elektronkový počítač ENIAC (1947). Díky samočinným počítačům bylo možné, aby byly stroje řízeny automaticky, nikoli ovládány člověkem. Rozvoj technologie umožňoval stále lepší podmínky pro automatizované řízení, důležitým milníkem byl nástup mikroprocesorů, které umožnily pružnou automatizaci. To znamená, že ke změně procesu stačilo změnit program, nikoli fyzicky měnit obvod řídicího systému, jak tomu bylo dříve například s využitím reléové logiky. S dalším technologickým rozvojem se stále zvyšuje výkonnost a spolehlivost automatizační techniky a snižuje se její cena. V současnosti je automatizace nedílnou součástí ve všech průmyslových odvětvích. [1]

Důvodů pro zavedení automatizace existuje celá řada. K těm hlavním patří bezpečnost zaměstnanců, tedy nahrazení lidské síly strojem v nebezpečných podmínkách. To platí nejen v prostředí se zvýšeným rizikem nehody, ale i v místech, kde je lidské zdraví dlouhodobě poškozováno a projeví se až po letech. Tím jsou myšlena třeba pracoviště s vysokou prašností (v hutním průmyslu), chemický průmysl, kde je člověk vystaven výparům z chemikálií a podobných příkladů by šlo vyjmenovat ještě mnohem víc. Stroje také nahrazují fyzicky namáhavá povolání, čímž se také snižuje počet nehod a zranění zaměstnanců. [1]

Stroje nejsou limitovány základními lidskými potřebami a mohou pracovat delší dobu, mnohem vyšším tempem a s vyšší přesností, než by byl člověk schopen. Tím se zvyšuje produktivita a objem výroby. Celková kvalita výrobků je obecně vzato vyšší, ale nutno dodat, že jsou i odvětví, ve kterých se naopak více cení ruční výroba. Stroje se také dopouští mnohem menšího počtu chyb než člověk. [1]

I když zavedení automatizace do výroby není rozhodně levná záležitost, díky vyjmenovaným faktorům se většinou úvodní vklad rychle vrátí. Větší množství kvalitnějších výrobků s menší chybovostí, menší počet potřebných zaměstnanců, to vše jsou důvody, proč je automatizace výhodnější i po finanční stránce. [1]

2 Cíl práce a metodika

Cíl práce

Cílem práce je navržení úlohy na regulaci teploty a její následná realizace. Účelem realizace není dosažení co nejlepších výsledků regulace, jde hlavně o názorné předvedení, jak je možné takovou úlohu řešit. Následné měření slouží především k ověření toho, jak jednotlivé parametry, které lze u regulátoru nastavit, ovlivňují regulační proces a zda tato zjištění souhlasí s informacemi uvedenými v teoretické části.

Metodika

Teoretická část je rozdělena na dvě části. První se zabývá regulací, konkrétně popisem regulačního obvodu, spojitou regulací, kde jsou uvedeny typy regulátorů a dále dvoustavovou regulací. Druhá část se věnuje PLC automatům a jejich programování, včetně představení programu Logo! Soft Comfort. V praktické části jsou nejprve představena zařízení použitá při řešení úlohy, dále je popsáno původní a nové zapojení elektrické trouby, pomocí které je úloha realizována. Praktická část dále pokračuje představením programu pro dvoustavovou a PI regulaci a následně jsou prostřednictvím grafu uvedeny průběhy regulačního procesu. U dvoustavové i PI regulace je vždy uvedeno více měření s různě nastavenými parametry, aby byl dobře viditelný efekt těchto parametrů na průběh regulace.

3 Teoretická východiska

3.1 Regulace

Regulace je pokročilejší formou řízení, při kterém má řídicí systém k dispozici zpětnou vazbu. Na rozdíl od ovládní bez zpětné vazby, kdy má veškerou kontrolu obsluha systému, regulační proces funguje bez obsluhy. zásah do řízené soustavy určuje samotný regulátor právě na základě zpětné vazby. [2]

3.1.1 Druhy regulace

Regulace na konstantní hodnotu

- Regulovaná veličina je udržována na konkrétní hodnotě. Řídící veličina je konstantní. [2]

Vlečná regulace

- Regulovaná veličina je závislá na jiné fyzikální veličině. Řídící veličina není konstantní. [2]

Programovaná regulace

- Speciální případ vlečné regulace. Regulovaná veličina se v čase mění podle předem daného programu. [2]

3.1.2 Rozdělení regulátorů

Dle napájení

Přímé – nepotřebují vlastní zdroj energie, energii získávají přímo z regulované soustavy. Typickým příkladem je regulace výšky hladiny, kde energii zajišťuje pohyb plováku na hladině. Přímé regulátory se používají jen zřídka, hlavně v domácích podmínkách. V průmyslové automatizaci se s tímto typem regulátoru téměř nesetkáme. [2]

Nepřímé – mají vlastní zdroj energie, buď pneumatický, hydraulický nebo elektrický. Pneumatické regulátory se využívají převážně v nebezpečných prostředích, kde hrozí riziko vzplanutí nebo výbuchu. Realizace je složitější kvůli

potřebným rozvodům stlačeného vzduchu. Hydraulické prvky se využívají v případech, kdy musí akční člen vyvinout větší sílu. Nejčastější jsou regulátory elektrické, které mají výhodu malých rozměrů, vysoké účinnosti a jednodušší realizaci. Ve speciálním provedení mohou být nasazeny i v nebezpečném prostředí. [2]

Dle průběhu signálu

Podle toho, zda regulátor pracuje se spojitými signály (proporcionální, integrační, derivační složka) nebo nespojitými signály (diskrétní, dvoupolohové regulátory). [2]

3.1.3 Veličiny v regulačním obvodu

Řídicí veličina w

Udává hodnotu, na které se má regulovaná veličina udržovat. Je přivedena na vstup regulátoru. [3]

Regulovaná veličina y

Skutečná hodnota sledované veličiny, je výstupem z regulované soustavy. Pomocí zpětné vazby je tato hodnota přivedena zpět na vstup, kde se porovnává s požadovanou hodnotou. [3]

Regulační odchylka e

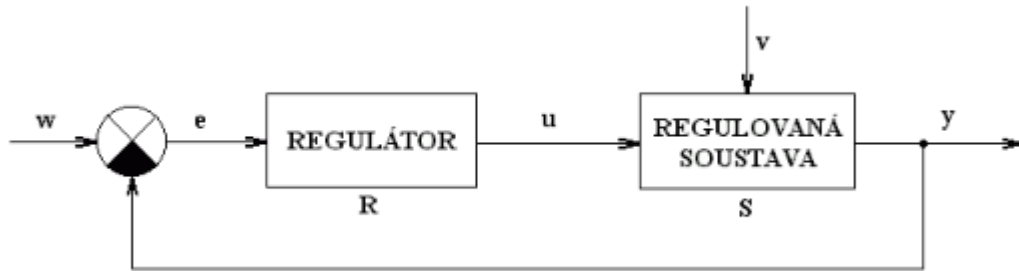
Vzniká rozdílem řídicí a regulované veličiny, tedy rozdílem mezi skutečnou a požadovanou hodnotou. Cílem regulace je udržovat odchylku co nejmenší, v ideálním případě nulovou. [3]

Akční veličina u

Akční veličina je výstupní veličina regulátoru. Je to výsledek, který na základě regulační odchylky vypočítal ústřední člen regulátoru s cílem snížit regulační odchylku na minimum, zároveň je to vstupní veličina regulované soustavy. [3]

Poruchová veličina v

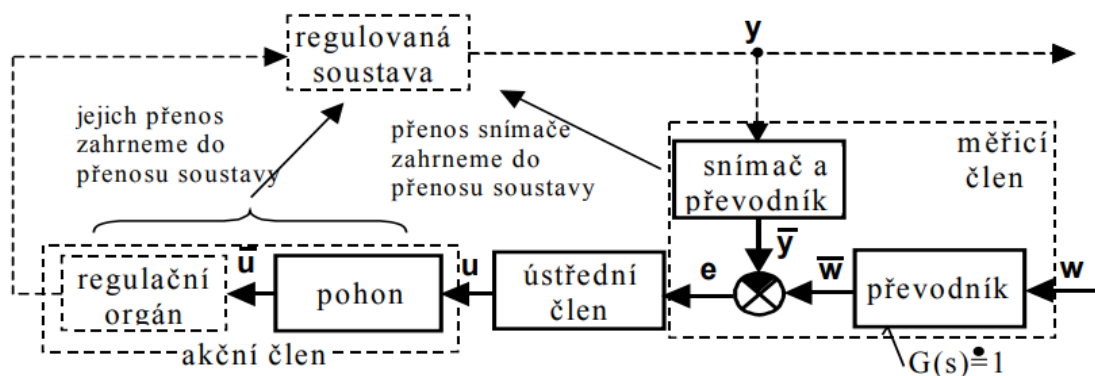
Působí na regulovanou soustavu, nepředvídatelně ovlivňuje regulovanou veličinu. Cílem regulace je potlačit vliv poruchové veličiny, aby i přes její působení zůstala regulovaná veličina na požadované hodnotě. [3] Na obrázku 1 je zobrazeno jednoduché schéma regulačního obvodu se zmíněnými veličinami.



Obrázek 1: Schéma regulačního obvodu [4]

3.1.4 Regulační obvod

Regulační obvod se skládá z regulátoru a regulované soustavy, také je lze označit jako řídicí a řízený systém. Regulátor, zobrazen na obr. 2, se dále skládá z měřicího, ústředního a akčního členu. Měřicí člen zjišťuje regulační odchylku tím, že pomocí záporné zpětné vazby odečítá skutečnou hodnotu regulované veličiny od žádané hodnoty. Skutečná hodnota je výstupem ze snímače (následně převedena převodníkem). U snímače je důležitá jeho přesnost. Samotný rozdíl skutečné a žádané hodnoty provádí porovnávací člen. [2]



Obrázek 2: Členy regulačního obvodu [4]

Regulační odchylka je přivedena na vstup ústředního členu, který hodnotu zesílí, integruje nebo derivuje (případně kombinace, záleží na typu regulátoru). Ústřední člen je hlavní částí regulátoru, závisí na něm kvalita regulace. V užitím

slova smyslu se pojmem regulátor může myslet právě jen ústřední člen. Výstupem je akční veličina, která vstupuje do akčního členu. Akční člen na základě této hodnoty přímo ovlivňuje regulovanou soustavu. Čím větší je regulační odchylka, tím větší musí být reakce regulátoru prostřednictvím akční veličiny. [2]

Akční člen se skládá z regulačního orgánu, který ovládá akční veličinu. Regulační orgán lze považovat i za součást regulované soustavy. Další částí akčního členu je pohon, který dodává regulačnímu orgánu energii. [2]

3.1.5 Spojité regulátory

Proporcionální

Proporcionální regulátor pouze zesiluje regulační odchylku. Akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce. Jedná se o nejjednodušší typ regulátoru, je tvořen operačním zesilovačem. P regulátor nedokáže zcela odstranit regulační odchylku. Vyznačuje se dobrou stabilitou a vysokou rychlostí průběhu regulace, ale není vhodný pro soustavy vyššího řádu a nedokáže účinně regulovat soustavy s dopravním zpožděním. [4]

Integrační

Akční veličina je u I regulátoru úměrná integrálu regulační odchylky. To umožňuje regulaci bez trvalé regulační odchylky, tím pádem umožňuje vysokou přesnost regulace a dokáže si poradit i s dopravním zpožděním. Tento typ regulátoru je méně stabilní a hrozí rozkmitání. Není příliš vhodný pro regulování astatických soustav. [4]

Derivační

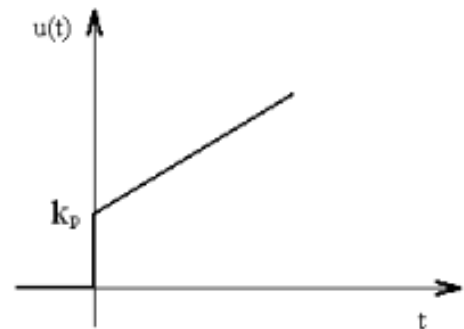
Samotný D regulátor nelze realizovat, používá se jako složka u sdružených regulátorů. Akční veličina je v tomto případě derivována. V kombinaci s ostatními druhy regulátorů se používá pro zrychlení regulačního děje. [4]

3.1.6 Sdružené regulátory

Kombinací výše zmíněných regulátorů vznikají regulátory sdružené. Základem je vždy proporcionální regulátor sdružený s derivační nebo integrační složkou, v případě PID s oběma. Vliv jednotlivých složek lze měnit vhodnou volbou konstant.

PI regulátor

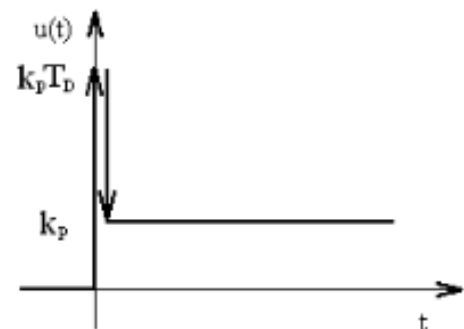
Kombinace proporcionální a integrační složky. Dokáže úplně odstranit regulační odchylku, ale díky proporcionální složce má lepší stabilitu než samotný integrační regulátor. V omezené míře lze použít také v astatických soustavách. Jedná se o nejrozšířenější spojitý regulátor. Obrázek 3 zobrazuje průběh PI regulace, do regulačního procesu nejprve zasahuje složka P, následně složka I. [5]



Obrázek 3: Přechodová charakteristika PI regulace [5]

PD regulátor

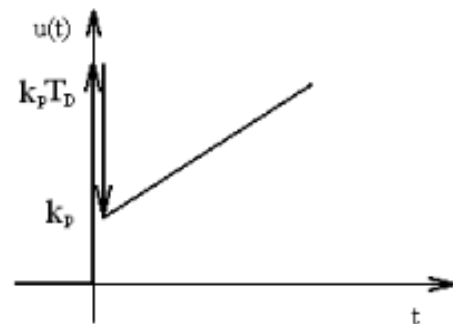
Složka D přispívá k urychlení regulace. Sice nedokáže zcela odstranit regulační odchylku, ta je ale menší než u samotného P regulátoru. Také má lepší stabilitu a je vhodný k použití u soustav vyšších řádů. Charakteristika PD regulátoru je zobrazena na obr. 4, nejprve zasahuje derivační a následně proporcionální složka. [6]



Obrázek 4: Přechodová charakteristika PD regulace [6]

PID regulátor

V porovnání s ostatními sdruženými regulátory má nejlepší vlastnosti. Díky integrační složce pracuje bez trvalé odchylky, derivační složka urychluje regulaci a zlepšuje stabilitu. Jeho průběh je na obrázku 5. Při regulaci jako první zasahuje složka D, poté P a nakonec složka I. [7]



Obrázek 5: Přechodová charakteristika PID regulace [7]

3.1.7 Metody pro určení parametrů spojitých regulátorů

Parametry určují, jak významně se na regulačním procesu podílí jednotlivé složky, tedy proporcionální, integrační a derivační – záleží na typu regulátoru. Pokud je hodnota parametru nulová, regulátor pracuje zcela bez zásahu této složky. Metod k určení optimálních parametrů je mnoho, níže jsou stručně popsány některé z nich.

Ziegler-Nicholsova metoda kritických parametrů

Tato metoda patří k nejrozšířenějším, je poměrně jednoduchá a časově nenáročná. Využívá se přímo za chodu regulačního procesu, kdy se zaznamenává odezva systému. Spočívá ve vyřazení integrační a derivační složky a postupném zvyšování proporcionální složky, až se obvod dostane na hranici stability. To je stav, kdy obvod kmitá kolem cílové hodnoty, tyto kmity jsou netlumené a mají konstantní velikost. Zesílení r_o , které vedlo k dosažení hranice stability, se nazývá kritické zesílení r_{ok} . Cílem metody je získat právě tuto hodnotu kritického zesílení r_{ok} a dále hodnotu kritické periody T_k , což je perioda zmíněných periodických kmitů. [2]

Tyto dvě hodnoty se následně dosazují do vzorce v tabulce 1, tím získáme proporcionální, integrační i derivační konstantu. Výsledný výpočet konstant z hodnoty kritického zesílení a kritické periody je již velmi jednoduchý, zároveň je ale dobré zmínit, že tato metoda nemusí vždy vést k ideálním hodnotám konstant. Metoda se nedá využít u nestabilních obvodů, protože u nich nelze dosáhnout požadované hranice stability. [2]

| typ reg. | r_o | T_i | T_d |
|----------|---------------|------------|------------|
| P | $0,5 r_{ok}$ | - | - |
| PI | $0,45 r_{ok}$ | $0,83 T_k$ | - |
| PD | $0,4 r_{ok}$ | - | $0,05 T_k$ |
| PID | $0,6 r_{ok}$ | $0,5 T_k$ | $0,12 T_k$ |
| I *) | - | $2 T_{ik}$ | - |

Tabulka 1: Ziegler-Nicholsova metoda kritických parametrů [2]

Ziegler-Nicholsova metoda přechodové charakteristiky

Stejně jako v předchozím případě, i metoda přechodové charakteristiky je rychlá a jednoduchá, díky tomu je také často používaná. Metoda vychází z přechodové charakteristiky, kde je inflexním bodem proložena tečna. Ta na časové ose odděluje dobu průtahu T_u a dobu náběhu T_n . Společně s koeficientem přenosu soustavy k_1 se tyto hodnoty opět dosazují do vzorců v tabulce 2. [4]

| Typ regulátoru | k_p^* | T_I^* | T_D^* |
|----------------|----------------------------------|-----------|------------|
| P | $\frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$ | | |
| PI | $0,9 \frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$ | $3,5 T_u$ | |
| PD | $1,2 \frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$ | | $0,25 T_u$ |
| PID | $1,25 \frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$ | $2 T_u$ | $0,05 T_u$ |

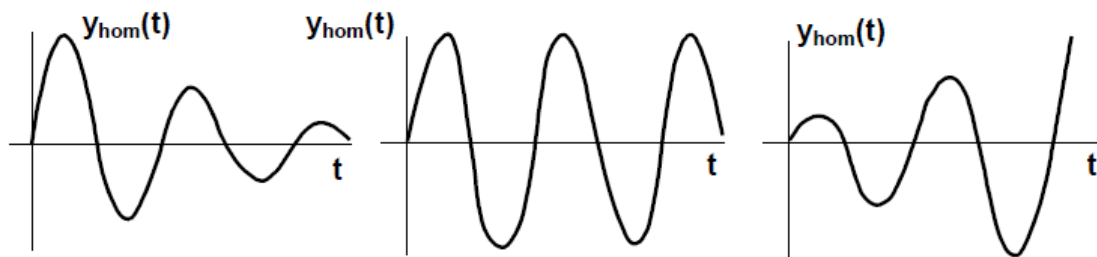
Tabulka 2: Ziegler-Nicholsova metoda přechodové charakteristiky [4]

Metoda standardních tvarů – Whiteleyho metoda

Na rozdíl od předchozích je tato metoda analytická, nevychází z přechodové charakteristiky, ale z rovnice přenosu. Pro určitý stupeň astatismu a určitý řád mnohočlenu je daný vzorový mnohočlen, který udává optimální hodnotu koeficientů. Při dodržení těchto koeficientů je zaručena maximální hodnota překmitu. [4]

3.1.8 Stabilita regulačního obvodu

Pokud je regulační obvod stabilní, pak se řízená veličina y dokáže po vychýlení vlivem poruchové veličiny ustálit na původní hodnotě nebo se ustálit na nové hodnotě při změně řídicí veličiny u . Nestabilní obvod se po změně řídicí veličiny nebo vlivem poruchové veličiny nedokáže ustálit. [2] Ukázkové průběhy jsou zobrazeny na obrázku 6.



Obrázek 6: zleva - stabilní obvod, hranice stability a nestabilní obvod [2]

Obecná podmínka stability říká, že je obvod stabilní, pokud všechny kořeny charakteristického mnohočlenu jsou záporné, respektive mají zápornou reálnou část (u komplexních kořenů). To znamená, že se kořeny musí nacházet pouze v levé polovině komplexní roviny. V případě, že alespoň jeden kořen leží přímo na imaginární ose, je obvod na hranici stability. Kromě obecné podmínky je nutná i podmínka, podle které musí být všechny koeficienty charakteristického polynomu kladné. K určování stability byla sestavena kritéria, díky kterým lze zjistit splnění obecné podmínky bez nutnosti řešit charakteristickou rovnici, což je výhodné zvláště u rovnic vyšších stupňů, jejichž řešení je náročné. [2]

3.1.9 Kvalita regulace

Kvalita regulačního pochodu může být posuzována podle různých faktorů, záleží na tom, jakého průběhu se snažíme docílit – zda jde například o rychlost ustálení, co nejmenší překmit nebo o co nejmenší hodnotu regulační odchylky, případně její úplné odstranění. Kvůli tomu se kvalita hodnotí podle několika různých kritérií, a to na základě průběhu přechodové charakteristiky nebo ve frekvenční oblasti. [8]

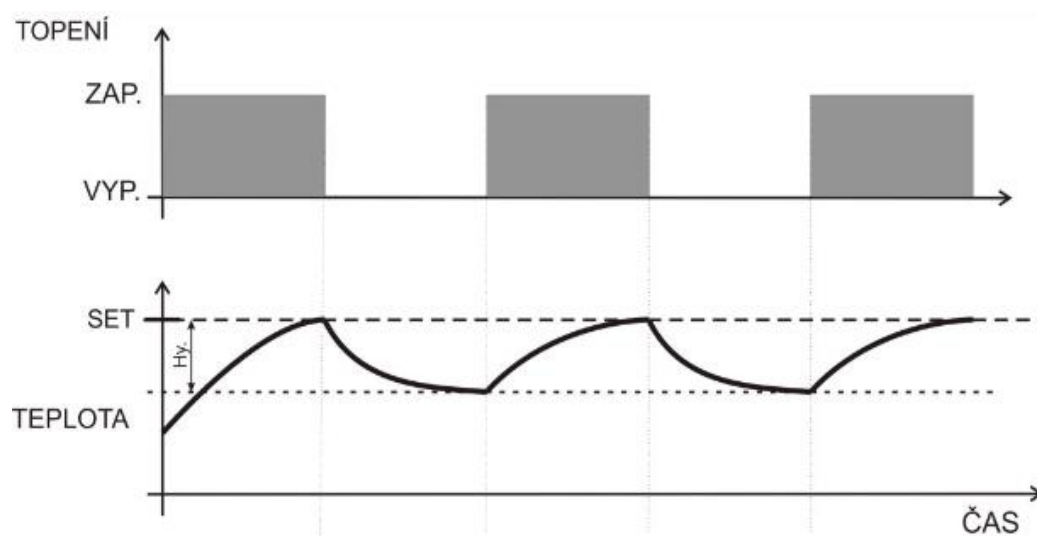
- Maximální hodnota y_{\max} , kterou dosáhne regulovaná veličina, neboli hodnota maximálního překmitu. V poměru s žádanou veličinou získáme hodnotu maximálního přeregulování, které ukazuje, jak velký byl prvotní překmit regulované veličiny. [8]
- Velikost regulační odchylky v ustáleném stavu, tedy horní a dolní mez, ve které se regulovaná veličina pohybuje. [8]
- Doba ustálení (také doba odezvy), což je čas, za který regulovaná veličina dosáhne žádané veličiny (respektive určité hodnoty žádané veličiny, často platí odchylka $\pm 5\%$). [8]

- Počet přeregulování – udává počet kmitů, které leží mimo horní a dolní mez. [8]
- Ve frekvenční oblasti se sleduje maximální hodnota amplitudy A_r a hodnota úhlové frekvence, při které bylo dosaženo maximální amplitudy. [8]

3.1.10 Dvoupolohový regulátor

Při dvoupolohové regulaci může akční člen nabývat pouze dvou hodnot. Tento způsob regulace se používá hlavně v případě, kdy není kladen nárok na vysokou přesnost regulace. Konstrukce dvoupolohového regulátoru je velmi jednoduchá a levná, proto se často využívá například u domácích spotřebičů, termostatů apod. [9]

Regulátor má definovanou necitlivost $\pm\delta$ (hystereze), to je rozmezí, ve kterém udržuje řízenou veličinu. To je nutné, aby akční člen nekmital až příliš rychle, čímž by mohlo dojít k jeho poškození. Akční člen obvykle bývá stykač nebo relé. Princip fungování dvoupolohové regulace je naznačen na obrázku 7, v tomto případě jde o regulaci teploty. Dokud je teplota v povoleném rozmezí, zůstává akční člen vypnutý. Teplota se samovolně snižuje, až se dostane pod spodní hranici pásma hystereze. V tu chvíli se zapíná topení a zůstává zapnuté až do dosažení horní hranice, kdy se opět vypíná. Teplota následně opět postupně klesá a celý proces se znovu opakuje. [9]



Obrázek 7: Typický průběh dvoupolohové regulace [20]

Z průběhu regulace je jasně patrné, že tímto způsobem není možné úplně odstranit regulační odchylku. Jak již bylo zmíněno, na rozdíl od spojitých regulátorů je tento způsob mnohem jednodušší, jediný nastavitelný parametr je zde velikost pásma necitlivosti, tedy horní a dolní mez. Průběh a rychlost regulace lze změnou těchto parametrů ovlivnit jen ve velmi omezené míře.

3.2 PLC automaty

PLC (Programmable logic controller) je malý počítač určený k využití v průmyslu. Jeho hlavní výhoda spočívá v univerzálnosti, je možné pomocí něj jednoduše řídit procesy v reálném čase. Ke komunikaci disponuje PLC jak analogovými, tak digitálními vstupy a výstupy – lze rozšířit dalšími moduly, kterými je možné v případě potřeby navýšit počet vstupů nebo výstupů. [10]

3.2.1 Architektura PLC

Hlavní částí PLC je řídicí jednotka CPU obsahující jeden nebo více procesorů. Celkový výkon CPU závisí na tom, pro jak složité procesy je PLC určen. Protože automat řídí procesy v reálném čase, je naprosto klíčové, aby doba odezvy byla co nejnižší, u výkonných PLC je činnost rozdělena mezi více procesorů, z nichž se každý věnuje jedné konkrétní oblasti (programový, periferní, komunikační). [11]

PLC obsahuje paměť ROM, kam se ukládá program, který následně CPU vykonává. Paměť typu RAM je určena na ukládání dat. Komunikace mezi PLC a PC obvykle probíhá po ethernetu. [11]

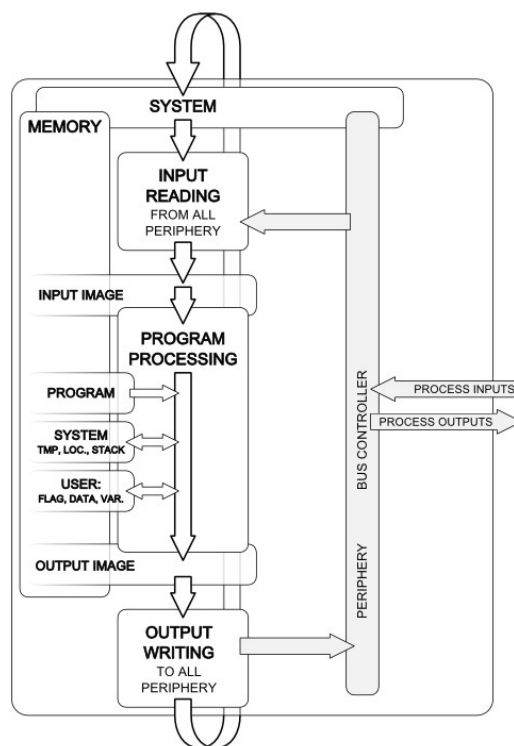
PLC je vybaven vstupními a výstupními perifériemi. Na vstupy jsou přivedeny signály z řízeného procesu. Vstupy a výstupy mohou být digitální nebo analogové. Digitální vstupy zpracovávají data v podobě dvou stavů, např. vypnuto/zapnuto, zatímco analogové vstupy podávají složitější informace ve formě spojitého signálu. CPU dokáže pracovat pouze s digitálním signálem, analogový signál na vstupu se tedy musí převést na digitální a výstupní analogový signál je naopak z digitální formy převeden na analogovu. Na výstupu jsou připojeny akční prvky řízeného procesu, opět prostřednictvím analogového nebo digitálního

signálu. Komunikace mezi PLC a periferiemi, případně mezi jednotlivými moduly, je zajištěna pomocí sběrnic nebo ethernetu. [11]

3.2.2 Princip činnosti

Vstupní periferie sbírají data z měřicích členů a posílají je do řídicí jednotky, jak bylo zmíněno, analogový signál je nejprve převeden na digitální. Na základě uloženého programu řídicí jednotka ovládá výstupní periferie tak, aby bylo dosaženo požadovaného stavu. Výstup může být v závislosti na programu digitální nebo analogový. Daný program se pak provádí stále dokola. [12]

Cyklus je základem fungování všech programovatelných automatů. Prvním krokem při provádění každého cyklu je vždy vykonání systémových operací v řídicí jednotce, především dojde k vnitřní kontrole systému. Následně se načítají data ze vstupů a dochází k uložení současného stavu do paměti jako obraz vstupů. Po načtení hodnot dochází ke zpracování programu, během zpracování se využívá pomocná paměť pro ukládání mezivýsledků. Výsledkem jsou výstupní data, která se ukládají do paměti jako obraz procesních výstupů. Poté, co je program dokončen, se výstupní data přenáší přímo na výstupní periferie. Výstupní zařízení pak provedou požadované činnosti. Následně začíná celý cyklus znovu. [12] Průběh cyklu je naznačen na obrázku 8.



Obrázek 8: Princip PLC [12]

3.2.3 Typy PLC

Modulární

Modulární PLC je tvořeno z několika celků (modulů), které si uživatel může přidávat dle potřeby. CPU je samostatný modul, který je vždy nezbytný, k němu je nutné připojovat moduly vstupů či výstupů, různé komunikační moduly, zkrátka jakékoliv modul, který je zapotřebí. U tohoto typu PLC se předpokládá větší počet zpracovaných signálů, proto jsou zde CPU výkonnější a paměti s větší kapacitou než v kompaktním provedení. [11]

Kompaktní

Kompaktní PLC obsahuje v jednom modulu CPU, omezený počet vstupů a výstupů a rozhraní pro komunikaci. Tento jediný modul je schopen plnohodnotně fungovat, ale je také možné přidávat další rozšiřující moduly. Kompaktní PLC je obecně určeno pro řešení méně rozsáhlých úloh s malým počtem periférií. [11]

3.2.4 Požadavky na PLC

Rychlost zpracování signálů

Zařízení musí být schopno zpracovávat větší množství signálů v co nejkratším časovém intervalu. Obecně jsou častěji zpracovávány jednodušší binární signály, analogových vstupů bývá zpravidla méně. Jejich poměr se ale samozřejmě liší u každé konkrétní úlohy. Protože automat řídí procesy v reálném čase, je důležité, aby doba potřebná k provedení jednoho cyklu byla co nejkratší. To závisí hlavně na výkonu CPU. Zároveň musí být zajištěn rychlý přenos signálů mezi vstupními/výstupními perifériemi a PLC automatem. Rychlost je ovlivněna i programem. Čím je program složitější, tím delší dobu bude každý cyklus trvat. [13]

Programování

Program musí být co nejjednodušší a zabírat v paměti co nejméně místa, čímž se urychlí provádění cyklů. Běžné programovací jazyky nejsou příliš vhodné, proto mají PLC automaty vlastní programovací jazyky, které jsou vhodnější jak pro samotný automat z hlediska rychlosti zpracování dat, tak i pro programátora díky grafickým nadstavbám. [13] Programovací jazyky jsou podrobněji zmíněny v další části.

Robustnost

Vzhledem k tomu, že PLC automaty jsou využívány především v průmyslu přímo ve výrobním procesu, musí být automat dostatečně odolný, aby dokázal pracovat s co nejmenším počtem poruch i v náročných podmínkách. Musí být dostatečně chráněn před prachem, výkyvy teploty, vlhkostí nebo mechanickým poškozením. Záleží na konkrétních podmínkách, kterým bude automat vystaven. Zároveň je požadován dostatečně odolný zdroj, který vydrží napájet PLC i při výkyvech napětí a rušení v síti. V případě výpadku energie systém ukládá poslední stav před výpadkem, aby nedošlo ke kolizi nebo ztrátě programu. [13]

Možnost rozšíření

Při zavádění automatizace je nutné pamatovat na to, aby bylo v budoucnu možné snadno rozšířit nebo inovovat stávající systém. Činnost PLC lze snadno rozšířit přidáním dalších modulů, a to jak u kompaktních, tak u modulárních. kompaktní verze ale není koncipovaná na zpracování příliš velkého množství signálů, proto je potřeba se zamyslet u výběru typu PLC. I když to současný stav nevyžaduje, kvůli možnosti rozšíření může být výhodnější investovat do modulárního PLC. [13]

3.2.5 Norma IEC 61131

Norma udává pravidla určující jak technické provedení PLC, tak programovací jazyky. Smyslem této normy je standardizace PLC automatů. Je rozdělena do několika částí, které se věnují konkrétním oblastem. [14]

Konkrétně třetí část normy se zaměřuje na programovací jazyky. Před vznikem této normy měl každý výrobce v oblasti programování svobodu, což ale vedlo k tomu, že programovací jazyky od každého výrobce byly naprosto odlišné. To komplikuje práci programátorům PLC automatů a zbytečně to ztěžuje proces zavádění automatizace. Zavedením této normy se jasně určují pravidla a společné prvky v programování PLC automatů. [14]

Norma ovšem nedefinuje jen jediný jazyk, udává celkem pět programovacích jazyků, z nichž dva jsou textové a tři grafické. Programátor má tedy poměrně velkou svobodu ve výběru pro něj nejvhodnějšího jazyku. Všechny pět jazyků sdílí společné prvky a přechod z jednoho na druhý je tím pádem snazší a intuitivní. [14]

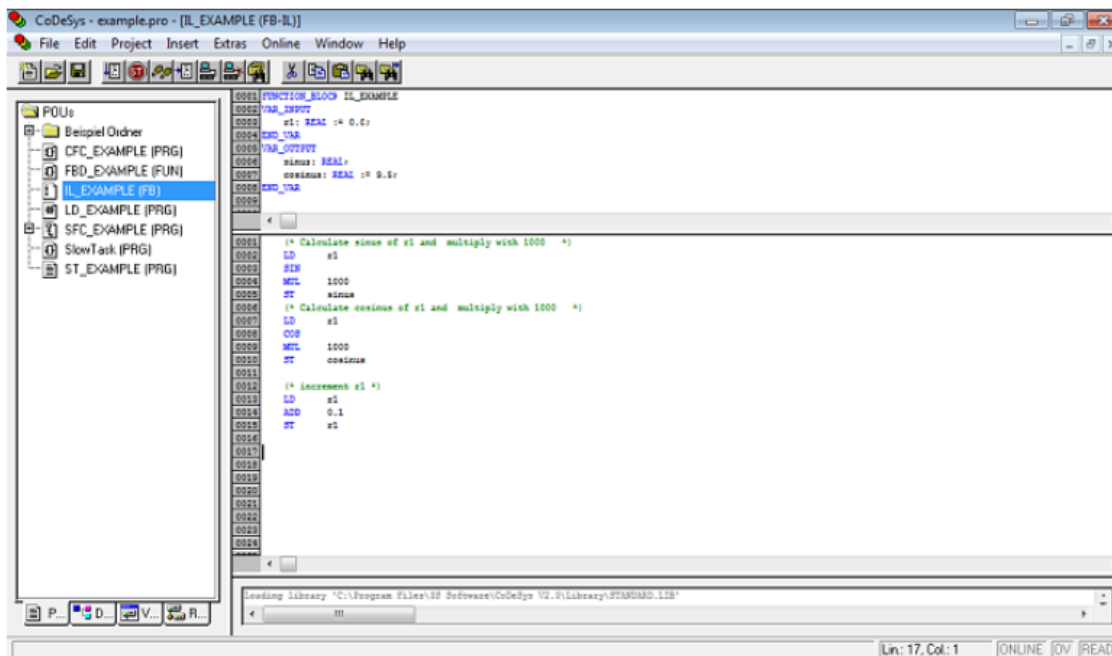
Společné prvky

Jak bylo zmíněno, norma obsahuje pět jazyků, u kterých se liší způsob zobrazení a zápisu programu, ale všechny mají společné prvky. Těmi základními jsou identifikátory sloužící k pojmenování funkcí, konstant a proměnných, dále to jsou oddělovače, klíčová slova nebo literály, které reprezentují hodnoty proměnných. Všechny jazyky pro PLC mají předdefinované datové typy, zároveň je možné vytvářet i vlastní – ty může vytvářet buď uživatel nebo výrobce konkrétního PLC. Základní funkce a funkční bloky jsou také definované normou a stejně jako u datových typů je možné vytvářet i vlastní. [14]

3.2.6 Programovací jazyky PLC

IL - Instruction list

Tento jazyk je čistě textový a vystačí si s naprosto základními, jednoduchými instrukcemi. Způsob zápisu je zde velmi podobný jako například v assembleru. Programátor má tak mnohem větší kontrolu nad programem než u ostatních jazyků a lze tak program velmi dobře optimalizovat podle konkrétních potřeb. [15] Obrázek 9 ukazuje, jak vypadá zápis.



The screenshot shows the CoDeSys software interface. The main window displays the IL code for a function block named 'IL_EXAMPLE'. The code is as follows:

```
00001 FUNCTION_BLOCK IL_EXAMPLE
00002 VAR_INPUT
00003   x1: REAL := 0.5;
00004 END_VAR
00005 VAR_OUTPUT
00006   minus: REAL;
00007   cosine: REAL := 0.5;
00008 END_VAR
00009
00010
00011 (* Calculate sine of x1 and multiply with 1000 *)
00012 LD   x1
00013 SIN
00014 MTL 1000
00015 ST   minus
00016
00017 (* Calculate cosine of x1 and multiply with 1000 *)
00018 LD   x1
00019 COS
00020 MTL 1000
00021 ST   cosine
00022
00023 (* Increment x1 *)
00024 LD   x1
00025 ADD 0.1
00026 ST   x1
00027
00028
00029
00030
00031
00032
00033
00034
00035
00036
00037
00038
00039
00040
00041
00042
00043
00044
00045
00046
00047
00048
00049
00050
```

The interface also shows a project tree on the left with 'IL_EXAMPLE (FB)' selected. The status bar at the bottom indicates 'Ln: 17, Col: 1' and 'ONLINE [OV] [READ]'.

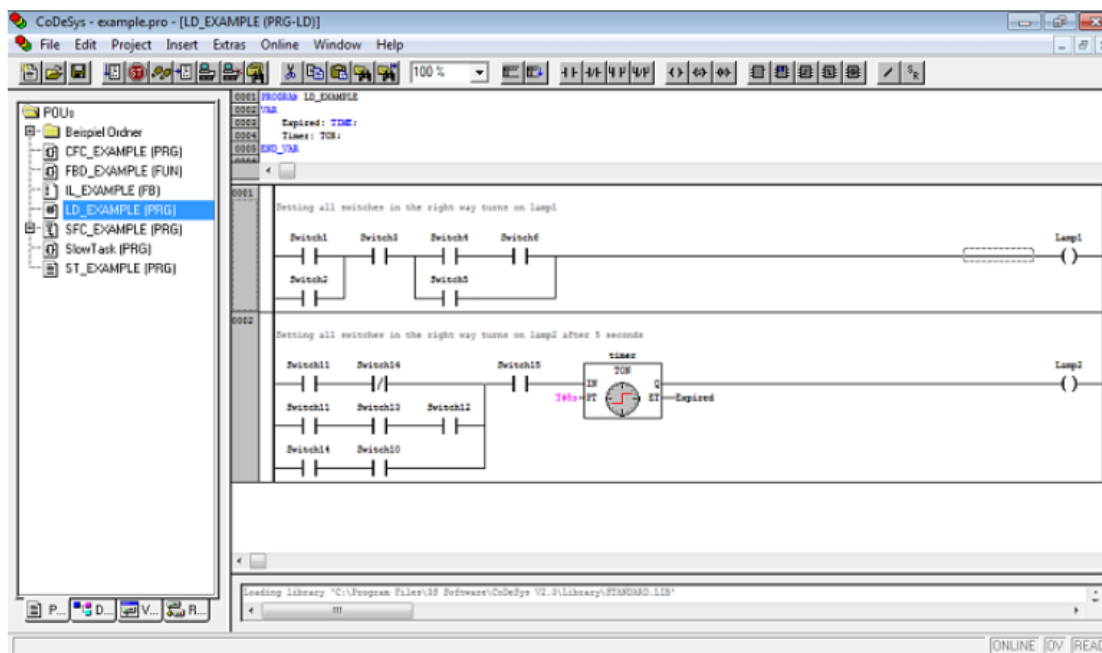
Obrázek 9: Příklad zápisu v IL [15]

Protože je program tvořen posloupností jen těch nezákladnějších instrukcí, je nenáročný na paměť a vyznačuje se vysokou rychlostí. U jednoduchých programů je zápis stručný a přehledný. Problém nastává při zápisu složitějšího programu, například při zpracování většího množství vstupů. V tu chvíli se množství těchto jednoduchých instrukcí mnohonásobně zvyšuje a zápis se stává nepřehledným. Napsat obsáhlejší program je i časově mnohem náročnější. [15]

Instruction list je zvláště vhodný pro psaní krátkých programů a podprogramů, jejichž zápis je přehledný, stručný a chování programu je jasně definované programátorem. Díky tomu fungují programy velmi rychle a zabírají málo místa v paměti. Zápis složitějších programů je zbytečně zdlouhavý a nepřehledný. [15]

LD - Ladder diagram

Tento jazyk vychází z historické realizace logických úloh pomocí vzájemně propojených relé. Jedná se o grafické zobrazení relétek, které vzájemným propojením tvoří logické funkce. Například funkce AND se zde realizuje jako dvě či více sériově zapojených relétek, funkce OR jako paralelně zapojená relé. Příklad takového zápisu je zobrazen na obrázku 10. Složitější funkce, jako časovač nebo čítač, jsou reprezentovány vlastním blokem s kontakty, tento blok má již předdefinovanou funkci a programátor ji tedy nemusí sám definovat. [15]



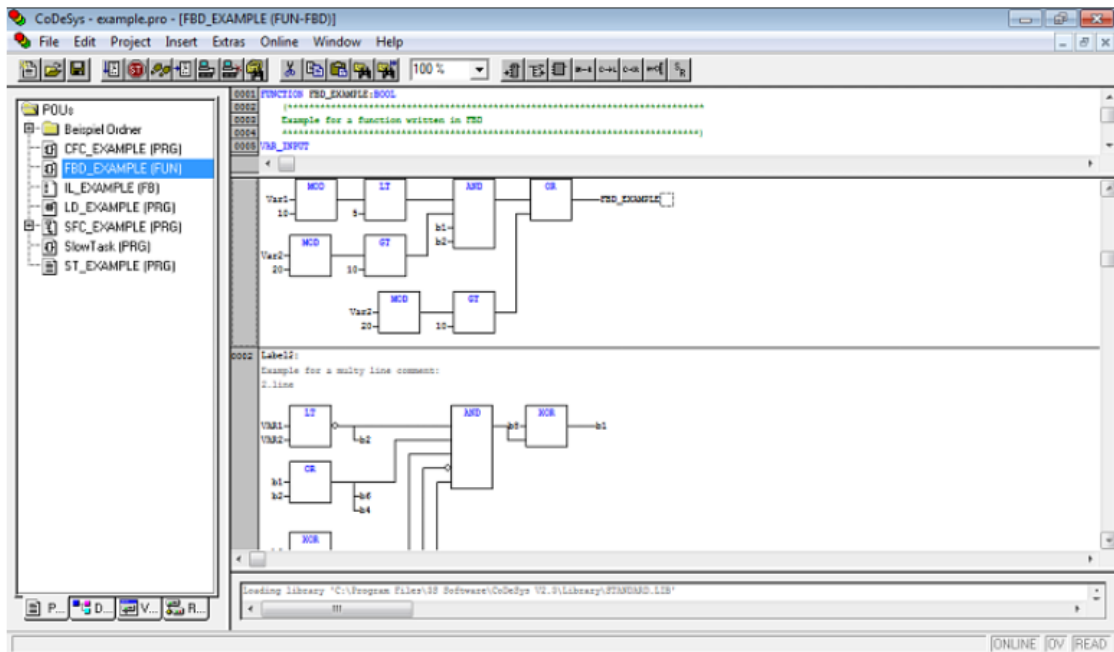
Obrázek 10: Příklad zápisu v LD [15]

Program je tvořen posloupností zapojených relé, případně s dalšími funkčními bloky. Je grafický, zápis spočívá ve spojování kontaktů jednotlivých relátek a bloků na pracovní ploše. Protože princip tohoto zápisu vychází z historického zapojování reléových schémat, může být více intuitivní i pro lidi, kteří nejsou zvyklí na klasické psaní textových příkazů. Stejně jako IL se zde program skládá ze sledu jednoduchých příkazů (i když jsou vyjádřeny graficky a nikoli slovně) a program tak není příliš náročný na paměť. [15]

Zápis v prostředí LD je přehledný a je zde na první pohled jasně viditelná posloupnost příkazů. S vyšší složitostí programu přibývá počet zapojených relátek a celková přehlednost se tak opět snižuje, na rozdíl od prostého textového zápisu je ale stále na první pohled zřetelná struktura a posloupnost programu. U složitějšího programu má LD stejný problém jako výše zmíněný IL, program je tvořen nejzákladnějšími funkcemi a zápis velkého množství těchto funkcí je časově náročný. Vhodné využití je stejné jako u IL, jsou to buď krátké, jednoduché programy nebo krátké volané podprogramy. [15]

FBD – Function block diagram

Jazyk FBD využívá k sestavení programu funkční bloky, tedy bloky s již předdefinovanou funkcí. Kromě složitějších funkcí jsou ve formě bloku i funkce základní, jako je AND nebo OR. Bloky se mezi sebou spojují čarou, která představuje vodič. V souvislosti se schématem funkčních bloků je možné se setkat i s pojmem CFC - Continuous function chart (volně propojované bloky). Podle definice se v FBD řadí bloky do jedné linie, stejně jako u LD, zatímco v prostředí CFC se bloky mohou uspořádat volně kdekoliv po pracovní ploše – nejsou striktně řazeny do jedné linie. Princip zápisu v obou prostředích je až na tento detail v zásadě stejný, proto se pojmy často zaměňují nebo splývají v jeden. Mnoho výrobců pro souhrnné označení blokového schématu běžně používá zkratku FBD a nerozlišuje, zda se bloky řadí do linie nebo jsou volně v prostoru. Ale v některých prostředích, jako třeba CoDeSys, jsou naopak režimy CFC a FBD rozděleny jako dva samostatné programovací jazyky. [15] Příklad zápisu v režimu FBD je na obrázku 11.



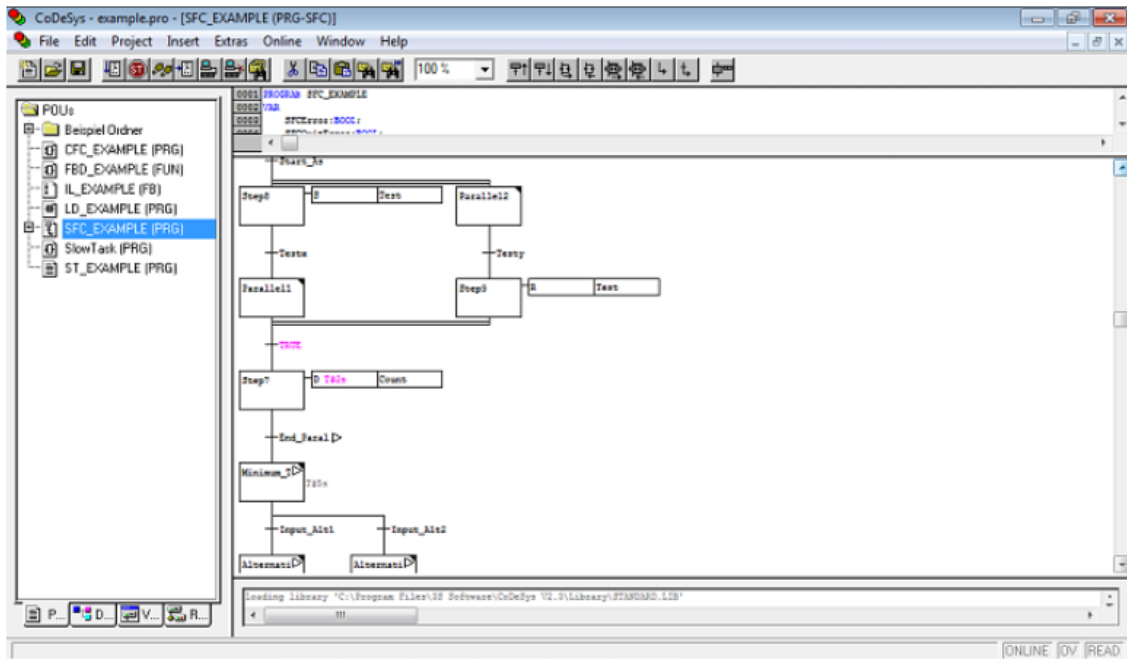
Obrázek 11: Příklad zápisu v FBD [15]

Hlavní změna oproti LD a IL spočívá v tom, že zatímco v těchto dvou jazycích se program sestavuje z těch nejzákladnějších funkcí, bloky už mají tyto funkce předdefinované a zápis složitějšího programu je výrazně stručnější. Například funkce OR by se v LD vyjádřila jako dvě nebo více paralelně zapojených relé, v FBD stačí jediný blok (se dvěma nebo více vstupy). To znamená rychlejší zápis většího počtu funkcí a zápis složitějšího programu není tak rozsáhlý, jak by byl v režimu LD nebo IL. [15]

Přehlednost zápisu je obecně lepší než u dříve jmenovaných režimů, je to znát hlavně u zápisu většího množství funkcí. I složitější program s větším počtem funkčních bloků je možné uspořádat tak, aby se v zápisu bylo možné vyznat. Zde záleží ale především na programátorovi. Protože má k dispozici celou pracovní plochu, je jen na něm, jak si bloky na ploše rozdělí a uspořádá. Při nevhodném uspořádání může být zápis naprosto chaotický, a to i u méně obsáhlého programu. [15]

SFC - Sequential function chart

SFC je další grafický programovací jazyk, který zobrazuje celý program jako vývojový diagram. Diagram je orientovaný svisle (odshora dolů) s větvením do stran. Vždy, když dojde na rozhodovací podmínku, diagram se rozkládá do dvou či více větví. Na základě podmínky se rozhoduje, po které větvi se pokračuje dál. [15] Příklad diagramu ukazuje obrázek 12.



Obrázek 12: Příklad zápisu v SFC [15]

SFC není úplně vhodný přímo ke zpracování analogových signálů ani většího množství logických signálů. K tomu účelu jsou vhodnější ostatní jazyky, SFC je vhodný k zápisu "kostry" programu, která na základě splněných podmínek vyvolává podprogramy. Podprogramy jsou reprezentovány pomocí bloků ve schématu a mohou být zapsané jakýmkoli jiným jazykem daným normou. [15]

K vytvoření celkového schématu programu s vyvoláváním podprogramů je SFC jednoznačně nejvhodnější, tento styl zápisu je přehledný, je jasně dané pořadí a podmínky k vyvolávání daných podprogramů. Přímou realizaci logických funkcí nebo zpracování analogových signálů je ale lepší dát přednost jiným, vhodnějším jazykům. [15]

ST - Structured text

ST je druhým textovým jazykem definovaným normou. Na rozdíl od IL, kde se zapisovaly ty nejzákladnější příkazy, v ST jsou již předdefinované instrukce. Zápis jednoho příkazu v ST by v IL zabral několik řádků. Strukturovaný text je tedy jazykem vyšší úrovně a více se podobá běžně používaným programovacím jazykům jako např. Pascal. Pro klasické programátory by byl přechod na ST mnohem jednodušší, než třeba na jeden z grafických jazyků. ST je obecně vhodný i pro složitější aritmetické operace, práci s velkým množstvím dat a databázemi, tedy přesně operace, které mohou být u grafických jazyků problematické. [15] Ukázka zápisu je zobrazena na obrázku 13.

```
0001 PROGRAM ST_EXAMPLE;
0002 VAR
0003 aVal:INT := 0;
0004 yVal:INT := -250;
0005
0006
0007 run_string:='Start';
0008 IF NOT run THEN
0009 RETURN;
0010 END_IF;
0011 run_string:='Stop';
0012
0013 var := var + offset;
0014
0015 IF (yVal < 0) THEN
0016 yVal := yVal + offset;
0017 button := yVal + offset;
0018 ELSE
0019 IF (aVal < 470) THEN
0020 aVal := aVal + offset;
0021 END_IF;
0022 IF (button > -250) THEN
0023 button := button - offset;
0024 END_IF;
0025 END_IF;
0026
0027 a := 0;
0028
0029 IF aVal >= 470 THEN
0030 wait (' wait +');
0031 IF (wait >= 50 MS wait <= 20) THEN
0032 var := 250;
0033 var2 := 250;
0034 ELSE
0035 var := 250;
0036 var2 := 250;
0037 END_IF;
0038 END;
0039 END_PROGRAM.
```

Obrázek 13: Příklad zápisu v ST [15]

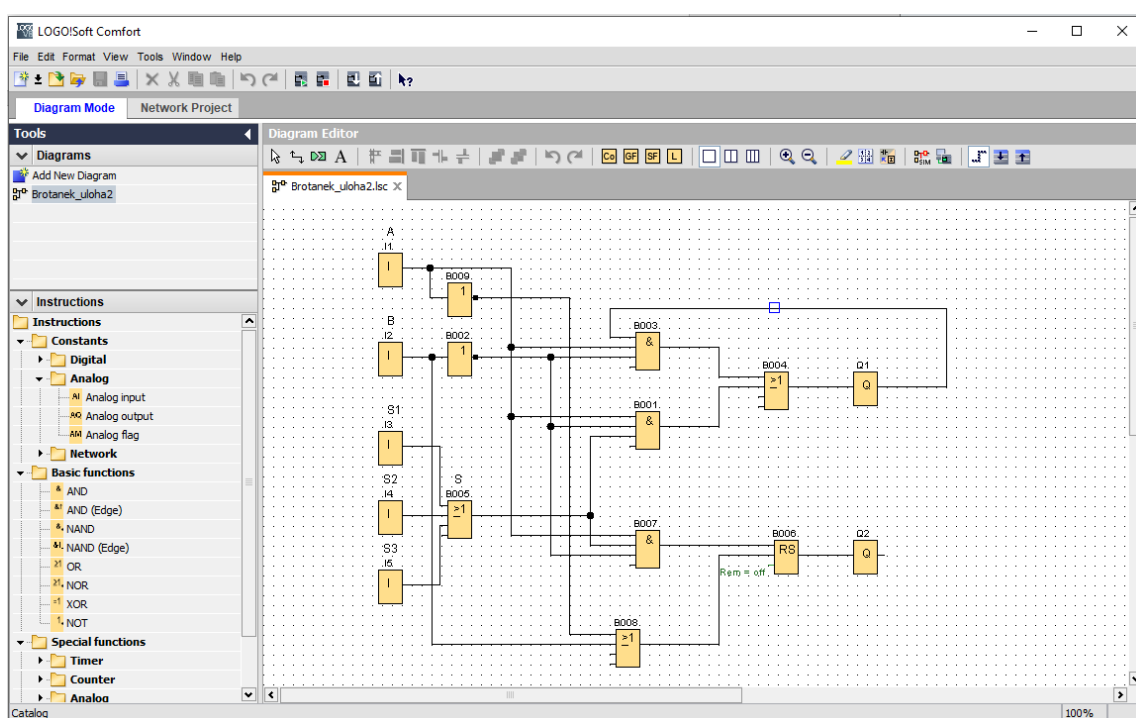
Realizace logických funkcí je v ST samozřejmě také možná, oproti grafickému provedení ale ztrácí na názornosti, což může být vnímáno jako nevýhoda. Je potřeba znát velké množství příkazů a přesnou syntaxi zápisu. Výhodou je možnost programovat složitější operace a psaní programu je při znalosti příkazů poměrně rychlé. [15]

3.2.7 Logo! Soft Comfort

Je to softwarové prostředí vyvinuté společností Siemens, které slouží k programování PLC automatů Siemens Logo!.

Popis prostředí

Logo! Soft umožňuje programování ve dvou programovacích jazycích, mezi kterými lze přepínat v nastavení. Je to FBD – diagram funkčních bloků a LD – ladder diagram. Na obrázku 14 je zobrazeno prostředí se zvoleným režimem FBD.



Obrázek 14: Prostedí Logo! Soft Comfort

Horní lišta obsahuje základní možnosti, jako je ukládání, otevření nového souboru, tisk a tak dále. Na konci této lišty je možnost start/stop a nahrát program z PLC do PC nebo naopak.

V levé části je seznam právě otevřených projektů s možností přidat nový projekt. Pod ním se nachází seznam všech funkčních bloků. Funkční bloky se vkládají na pracovní plochu. Plocha je po vytvoření nového projektu samozřejmě prázdná, na obrázku 14 je na ukázkou vložena jednoduchá logická funkce. Nad pracovní plochou je lišta s nejdůležitějšími funkcemi.

Funkce

Funkční bloky jsou rozděleny do tří základních kategorií. Jsou to konstanty, základní funkce a speciální funkce.

Konstanty se dělí na digitální, analogové a síťové. Jsou zde všechny vstupy a výstupy, mezi digitálními funkcemi jsou navíc bloky generující pouze hodnotu 1 nebo 0. Základními funkcemi jsou zde myšleny logické funkce, které není třeba vyjmenovávat.

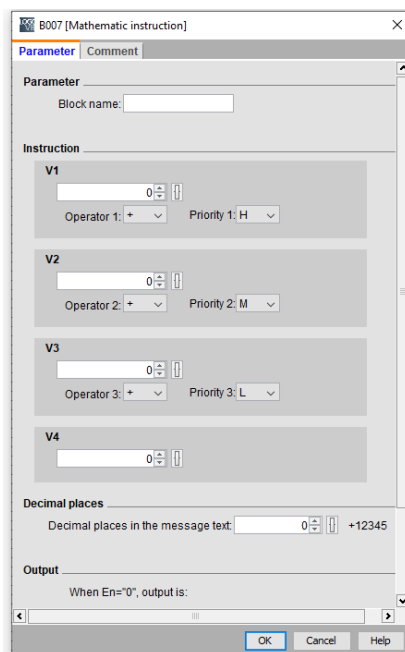
Speciální funkce se dále dělí na časovače, čítače, analogové funkce a ostatní. Mezi časovače patří bloky zpožďující zapnutí/vypnutí, generátory různých druhů pulzů a několik druhů spínačů. Čítače umožňují čítat signály až s frekvencí 5 kHz a porovnávat frekvence mezi sebou.

Mezi analogovými funkcemi lze najít analogový komparátor, zesilovač, filtr nebo multiplexor, ale patří sem i blok s matematickými instrukcemi nebo některé zajímavější funkce, jako třeba PI regulátor. Do kategorie speciálních funkcí dále spadá například RS blok, programovatelné tlačítko nebo blok, ve kterém lze nastavit text zobrazovaný na displeji PLC.

Samostatnou funkcí je Data log, blok umožňující ukládat naměřená data přímo do paměti PLC nebo na vloženou SD kartu. Pro zahájení záznamu musí být na vstup bloku přivedena logická 1, díky tomu lze snadno nastavit např. ovládání tlačítkem. Data se tak nemusí nutně ukládat po celou dobu, ale jen když je to potřeba.

Programování

Princip spočívá v přidávání funkčních bloků z nabídky na pracovní plochu a jejich následném propojování. U každého bloku je možné otevřít okno jeho parametrů a v případě potřeby je přenastavit. Příklad nastavení parametrů funkčního bloku je zobrazen na obrázku 15. Ne všechny bloky to nutně vyžadují, u jednoduchých funkcí je jejich činnost jasně daná a není co nastavovat, některé bloky naopak bez vyplnění parametrů nemohou fungovat. U každého bloku je možné vpravo dole rozkliknout tlačítko s nápovědou, kde je podrobně popsána funkce konkrétního bloku a zároveň jsou zde vysvětleny všechny parametry, které je možné upravovat. Navíc je součástí nápovědy i praktický příklad použití tohoto bloku.



Obrázek 15: Příklad nastavení funkčního bloku

Po vytvoření programu umožňuje Logo! Soft aktivovat režim simulace. Během něj se "vodiče" propojující bloky zbarví modře nebo červeně, podle toho, zda vodičem protéká logická 0 nebo 1. Tímto způsobem lze snadno otestovat průběh a výstup logických obvodů. Analogové prvky lze také předem testovat změnou hodnoty na analogových vstupech. Změněná hodnota se propisuje dál do programu a lze tak sledovat chování systému ještě před reálným spuštěním programu. V momentě, kdy je PLC připojeno k PC, je možné kdykoliv upravit program nebo nahrát zcela nový, přepsání programu v PLC je otázkou několika vteřin.

Pokud PLC provádí aktuální program a je propojeno s PC, Logo! Soft umožňuje sledovat data v reálném čase. Daty jsou myšleny aktuální hodnoty všech vstupů a výstupů, které mohou být znázorněny i formou grafu.

4 Vlastní práce

4.1 Realizace úlohy

Úloha spočívá v propojení malé elektrické trouby s PLC automatem a následné regulaci teploty uvnitř trouby prostřednictvím dvoustavové regulace a PI regulace.

4.1.1 Prvky použité při realizaci úlohy

PLC LOGO! 24 CE

Řídicí modul od výrobce Siemens z řady LOGO! Má 8 digitálních vstupů, z nichž 4 mohou být použity jako analogové (0 až 10 Voltů) a 4 tranzistorové výstupy. Provozní napětí je 24 Voltů. Modul má vlastní displej, který zobrazuje mimo jiné hodnoty napětí na všech vstupech a výstupech nebo schéma nahraného programu. Za pomoci šesti ovládacích tlačítek lze v menu přepínat aktuálně zobrazované údaje, navíc je možné i měnit nahraný program. Úprava programu ale na malém displeji není nijak zvlášť přehledná, je to spíše záložní varianta, pokud z nějakého důvodu nelze modul propojit s PC. Přimo nad tlačítky je slot na SD kartu. Modul (na obrázku 16) má rozměry 71,5 x 90 x 60 mm, splňuje stupeň krytí IP20 a lze jej namontovat na DIN lištu. [16]



Obrázek 16: PLC LOGO! [16]



Obrázek 17: Rozšiřující RTD modul [17]

Siemens LOGO! AM2 RTD

Jedná se o rozšiřující modul pro PLC LOGO!, je zobrazen na obrázku 17. Má dva analogové vstupy a provozní napětí 24V, tedy stejné jako zmíněné PLC. [17] V úloze byl RTD modul použit pro připojení teplotních senzorů.

Pt1000

Pt1000 je odporové teplotní čidlo. Funguje na principu změny odporu v kovu vlivem změny teploty. Čidlem prochází slabý proud – proud by měl být co nejnižší, aby se odporový snímač co nejméně zahříval a neovlivňoval tak měření. Hodnota odporu je závislá na teplotě, změna odporu zároveň mění hodnotu napětí, ze které se převodem získá aktuální hodnota teploty. Odporové snímače jsou v průmyslu používané nejčastěji. [18]

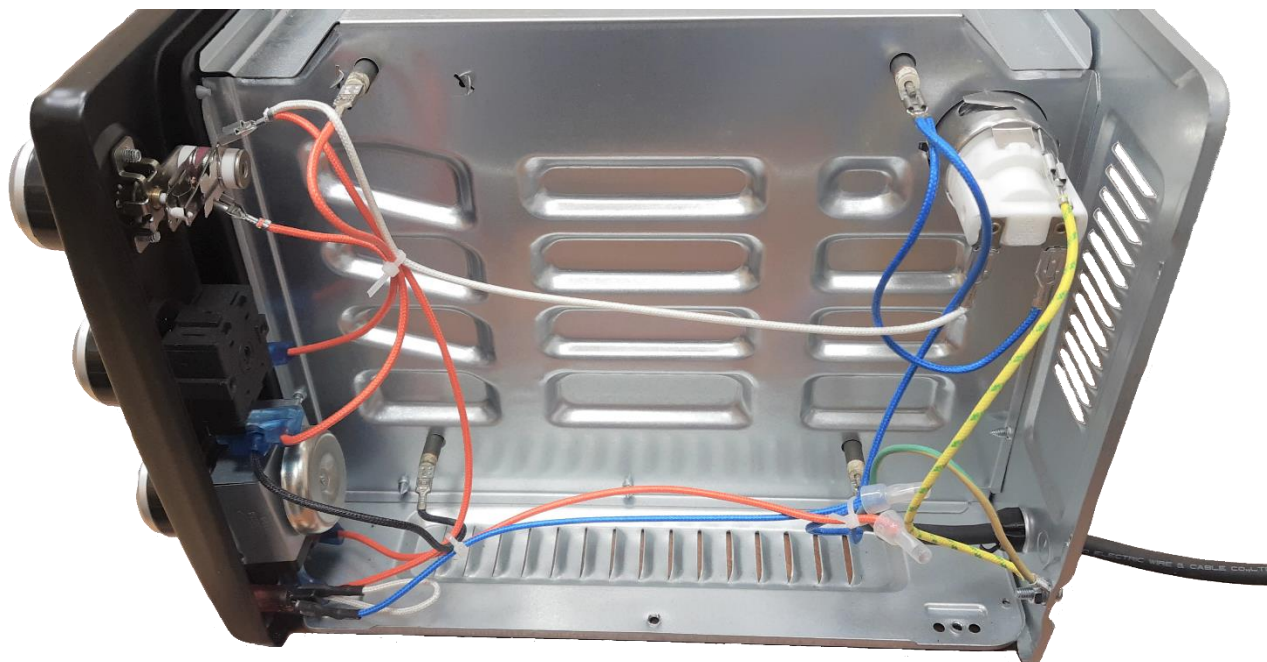
Zkratka Pt označuje materiál čidla, tedy platinu. Platina je vhodný materiál díky lineárnímu průběhu odporové charakteristiky. Číslo v názvu znamená hodnotu odporu při teplotě 0°C, v tomto případě je to tedy 1000 Ohmů. Existuje více variant, například Pt100, Pt250 nebo Pt500. Jednotlivá čidla se liší přesností a rozsahem měřené teploty. Sama o sobě mají čidla velmi malé rozměry, řádově jednotky milimetrů, ale na základě jejich využití mohou být uložena ve speciálních pouzdrech. [18]

Polovodičové relé RGC1A60D15KKE

SSR relé (solid state relay) neobsahuje na rozdíl od elektromagnetického relé nebo stykače žádné pohyblivé součástky. Ty se při častém přepínání z jedné polohy do druhé mohou mechanicky opotřebit a přestat fungovat, přepínání je navíc doprovázeno hlasitým cvaknutím kontaktů. Oproti tomu polovodičové relé má delší životnost a pro regulaci teploty je vhodnější díky schopnosti rychlejšího přepínání.

Sencor SEO 1710BK

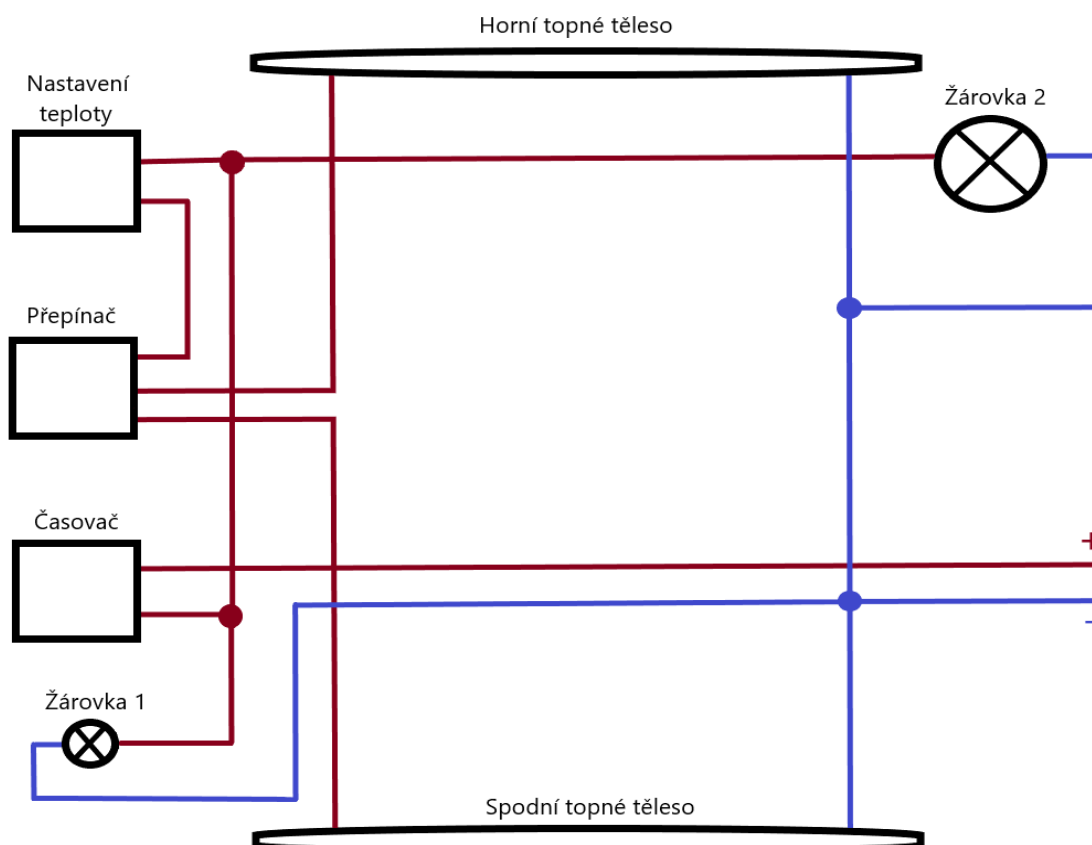
Jedná se o malou elektrickou troubu s vnitřním objemem 17 litrů a příkonem 1380W. Výrobce udává možnost plynulé regulace teploty v rozmezí 90 až 230°C, přepínání mezi čtyřmi programy a nastavení časovače. [19] Na obrázku 18 je zobrazeno vnitřní zapojení trouby. Samotnému zapojení se podrobněji věnuje následující část.



Obrázek 18: Vnitřní zapojení trouby

4.1.2 Původní zapojení trouby

Na obrázku 19 je zjednodušené schéma zapojení. Pro větší názornost jsou jednotlivé prvky rozmístěny stejně jako v reálném provedení (lze porovnat s obrázkem 18). Stejně tak je dodrženo i barevné rozlišení vodičů (tedy kromě bílého, jehož barvu jsem ze zjevného důvodu musel změnit).



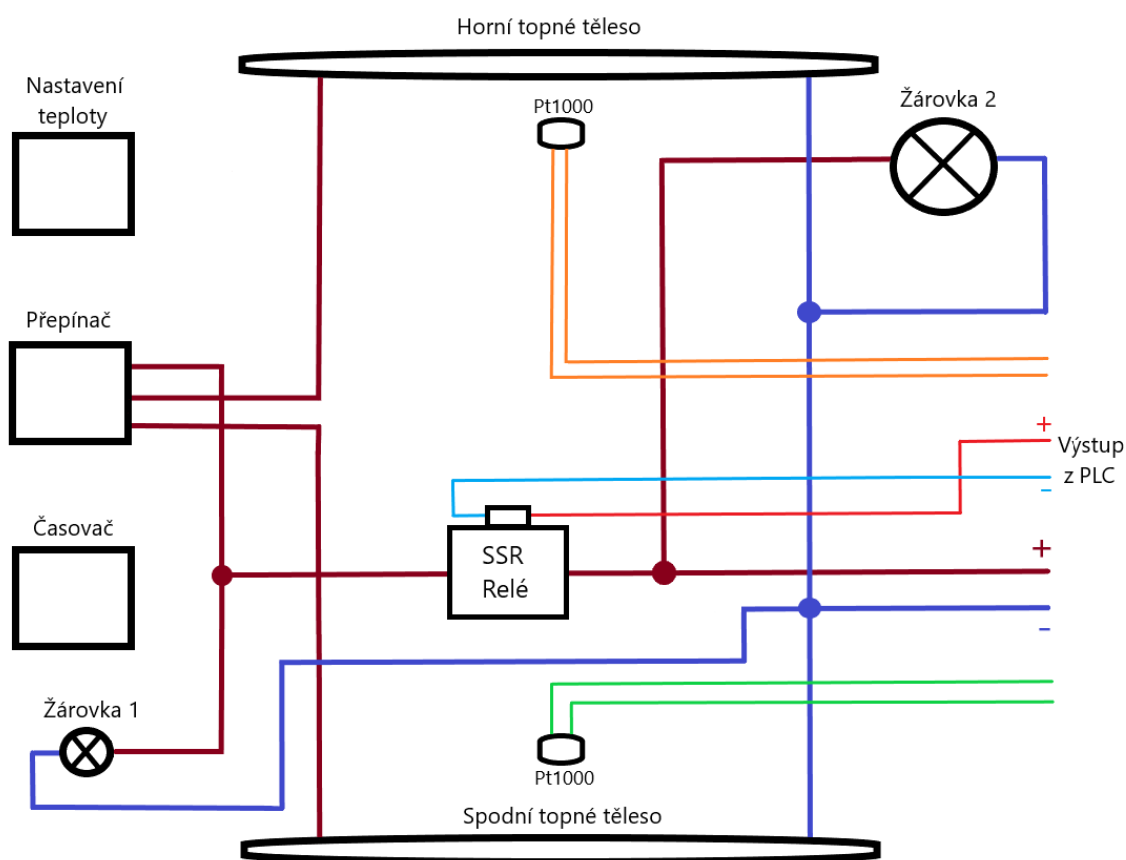
Obrázek 19: Schéma původního zapojení

Přívodní vodič je napojen rovnou k časovači, který tím pádem plní i funkci vypínače. Časovačem neprochází proud, dokud se nenastaví čas, jeho otočením se spojí kontakt a proud prochází. Následně se vodič dělí na tři, jeden vede do malého červeného světýlka, které signalizuje, že je spotřebič v provozu. Druhý vodič je přiveden do žárovky, která rozsvítí vnitřní prostor trouby – obě žárovky se rozsvítí i zhasnou ve stejný moment. Třetí vodič vede do mechanického bimetalového termostatu, pomocí kterého se nastavuje teplota. Zahřívání trouby vede k tomu, že se bimetal (dva kovové pásky s různou teplotní roztažností) začne ohýbat, až se po dosažení nastavené teploty ohne natolik, že se přeruší kontakt. Teplota se tak začíná snižovat a pásky se postupně narovnávají, až se opět spojí, čímž umožní průchod proudu a teplota opět začne narůstat. Tím je umožněna velmi jednoduchá dvoustavová regulace. Trouba ovšem nijak neměří aktuální teplotu.

Od termostatu je vodič přiveden na přepínač. Přepínač má celkem čtyři polohy, nastavuje se jím spodní, horní nebo kombinovaný ohřev, čtvrtá poloha je "vypnuto". Z přepínače vychází dva vodiče, jeden spojený s horním tělesem, druhý se spodním. Přepínačem se usměřňuje proud do jednoho či druhého vodiče, nebo do obou zároveň, ve čtvrté poloze neprochází proud vůbec. Vodiče vystupující z druhé strany topných těles společně s vodiči z osvětlení jsou spojeny s nulovým vodičem.

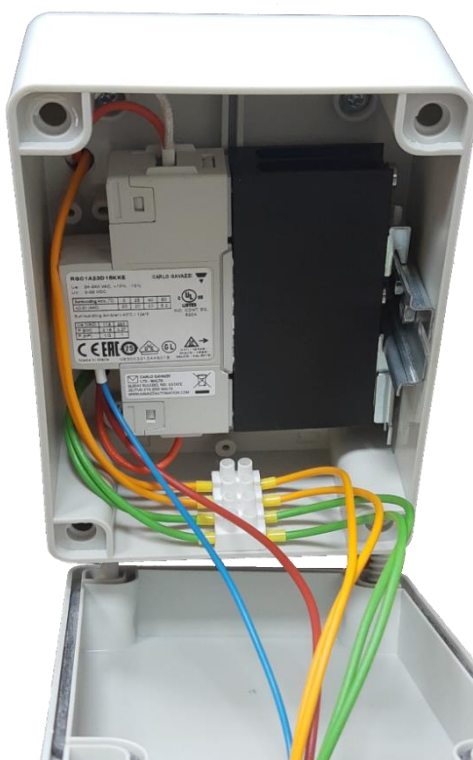
4.1.3 Nové zapojení trouby

Z obrázku 20 je zřejmé, že oproti původnímu schématu zde přibylo polovodičové relé a snímače teploty Pt1000, naopak některé původní prvky už nemají žádné využití. To platí pro časovač a termostat. Časovač už nemá smysl zapojovat, pro regulaci je nepotřebný a funkce termostatu je nahrazena PLC, tudíž tyto dva prvky zůstaly nevyužité.



Obrázek 20: Schéma nového zapojení

Funkce světel byla oproti původnímu provedení lehce pozměněna, žárovkou osvětlující vnitřek trouby (žárovka 2) prochází proud okamžitě po zapojení do zásuvky. To slouží jako znamení, že je trouba připojena k napájení. Menší červené světlo (žárovka 1) nyní svítí jen v momentě, kdy trouba hřeje. Při regulaci indikuje, kdy přesně je relé sepnuté a kdy ne. Přívodní vodič se ještě před vstupem do relé rozdvojuje, jeden vede do relé, druhý je napojen do žárovky 2. Relé je ovládáno vodičem vedeným z výstupu PLC a na základě hodnoty výstupu spíná. Vodič vystupující z relé se opět rozdvojuje, proud prochází žárovkou 1 a zároveň vstupuje do přepínače. Systém přepínání mezi topnými tělesy zůstává zachovaný. Z přepínače tedy vedou vodiče do horního a spodního topného tělesa, tato část je již stejná jako v původním zapojení.



Obrázek 21: Zapojení SSR relé

Prostor s kabely (obr. 18) a vnitřek trouby je oddělen jen tenkou kovovou zástěnou a při zahřátí trouby je i v tomto prostoru vysoká teplota, z toho důvodu byla z vnějšku na bok trouby namontována plastová instalační krabice (obrázek 21). V ní je umístěno relé a prochází tudy i vodiče od teplotních čidel Pt1000 (dvojice zelených a oranžových kabelů na obrázku 21). Teplotní čidla jsou uložena v keramickém obalu, připevněná ve zmíněném plechu oddělujícím vnitřní část

trouby od prostoru pro kabely. Jsou umístěna v horní a spodní části trouby, ale zároveň v dostatečné vzdálenosti od topných těles, aby nebylo měření zkreslené.

4.1.4 Propojení s PLC

PLC LOGO! je upevněné na DIN liště společně s jističem a spínaným zdrojem Mean Well DR-15-24, do kterého vstupuje 230V a na výstupu je 24V, čímž je napájeno PLC. Samotné PLC je rozšířeno o přídavný RTD modul se dvěma analogovými vstupy, ten je také napájen 24V. Na vstupy přídavného modulu jsou přivedeny vodiče dvou teplotních čidel Pt1000. V levé spodní části PLC jsou zapojeny vodiče na výstup Q1, které propojují PLC a relé. Na obrázku 22 je zobrazeno celkové zapojení včetně ethernetového kabelu zajišťující komunikaci mezi PLC a počítačem.



Obrázek 22: Zapojení PLC

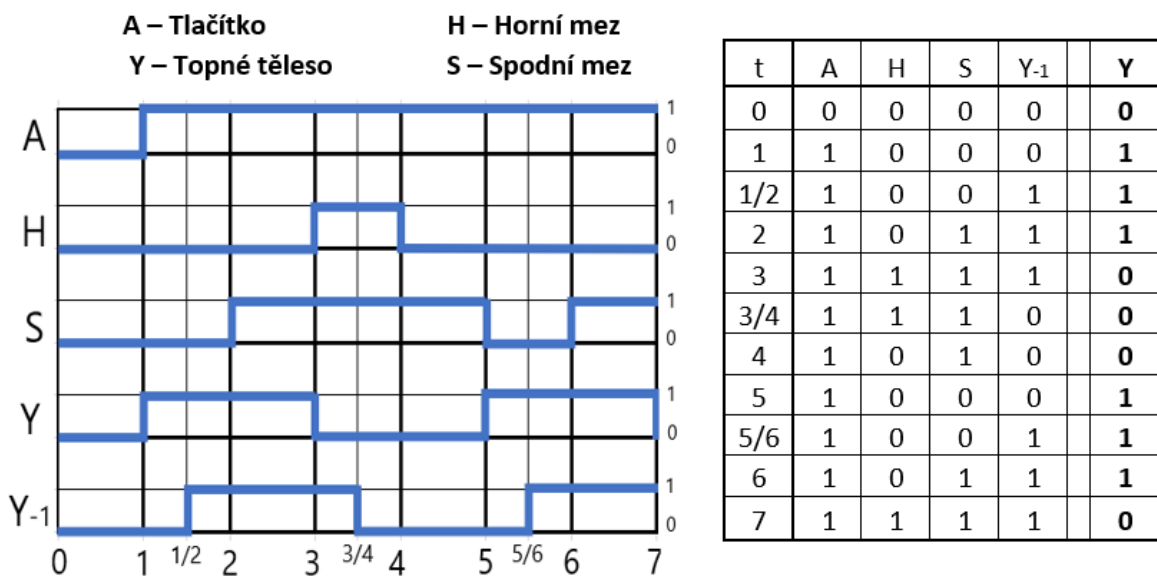
Celkově je trouba s PLC propojena šesti vodiči, dva z výstupu PLC do relé a čtyři k Pt1000. Všechny jsou upevněny do jednoho svazku a do trouby vstupují přes instalační krabičku.

4.2 Dvoustavová regulace

Dvoustavová regulace spočívá v udržování teploty ve stanoveném pásmu. Je zadána horní a spodní mez, jiné parametry se upravovat nedají. V následující části je názorně ukázán způsob řešení úlohy. I když tato úloha není nijak složitá, jde o předvedení principu řešení takového typu zadání.

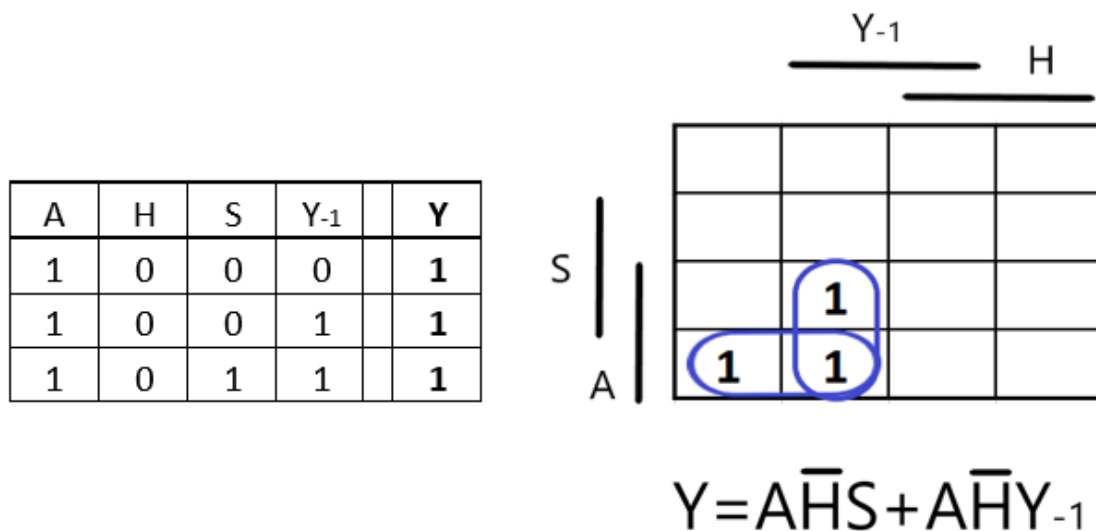
4.2.1 Řešení dvoustavové regulace

Na obrázku 23 je zobrazena první část řešení dvoustavové regulace. Nejprve je potřeba stanovit všechny proměnné. V tomto případě máme horní a spodní mez – H a S. Logická 1 znamená, že teplota překročila tuto hodnotu, 0 nikoli. Y je výstup funkce, Y_{-1} je zpětná vazba. Poslední proměnnou je A, ta značí sepnutí tlačítka (přímo na troubě žádné není, ale lze využít tlačítka na PLC, kterým je možné přiřadit funkci). V tomto případě je tlačítko nastavené jako přepínač – po stisknutí zůstává logická 1, stiskem druhého tlačítka se přepne logická 0. Podle předpokládaného chování regulačního systému lze graficky znázornit posloupnost dějů – jak se postupně mění hodnoty všech proměnných (průběh je znázorněn v levé části obrázku 23). Díky tomu lze snáz vyplnit pravdivostní tabulku. Důležité jsou především mezikroky zpětné vazby Y_{-1} při změně výstupu Y. Graficky zobrazený průběh se následně přepisuje do tabulky vpravo.



Obrázek 23: Postup řešení dvoustavové regulace

V další fázi je již možné vytvořit pravdivostní tabulku, ve které jsou všechny možné kombinace vstupů a k nim se přiřazuje správná hodnota výstupu. Se zpětnou vazbou to nemusí být na první pohled jasné, k jednoznačnému určení výstupů pomáhá zápis z předchozích kroků. K dalšímu postupu potřebujeme znát kombinaci vstupů, při kterých se Y rovná 1. Pravdivostní tabulka by v tomto případě měla mít 16 řádků, na obrázku 24 jsou pro úsporu zapsány pouze ty řádky, kde výstup Y je 1.

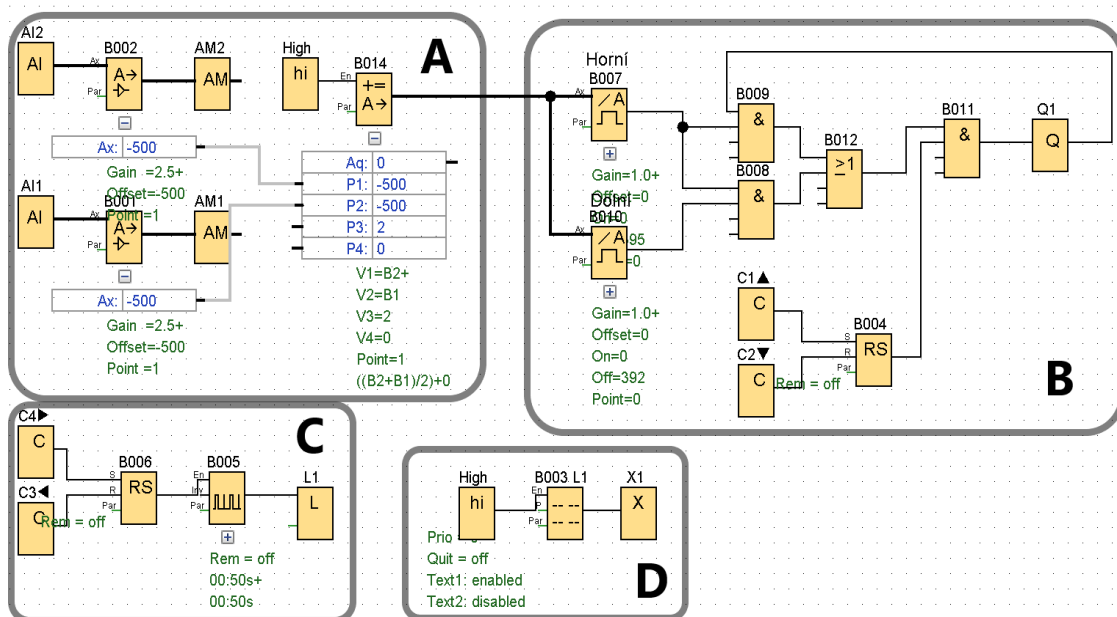


Obrázek 24: Odvození výsledné rovnice

Kombinace vstupů z pravdivostní tabulky (kde $Y=1$) jsou zapsány do Karnaughovy mapy (vpravo na obrázku 24), díky které se funkce zjednoduší. Zjednodušením vzniká finální rovnice, která se nyní může realizovat v příslušném programu.

Realizace v Logo! Softu

Program v Logo! Softu na obrázku 25 jsem pro přehlednost rozdělil do čtyř částí. V části A se načítají hodnoty napětí z analogových vstupů, následně se převádí na teplotu. Blok zesilovače má přednastavenou funkci pro převod napětí na teplotu přímo pro teplotní čidla Pt100/Pt1000. Z již převedených hodnot se následně počítá aritmetický průměr.



Obrázek 25: Program pro dvoustavovou regulaci v Logo! Softu

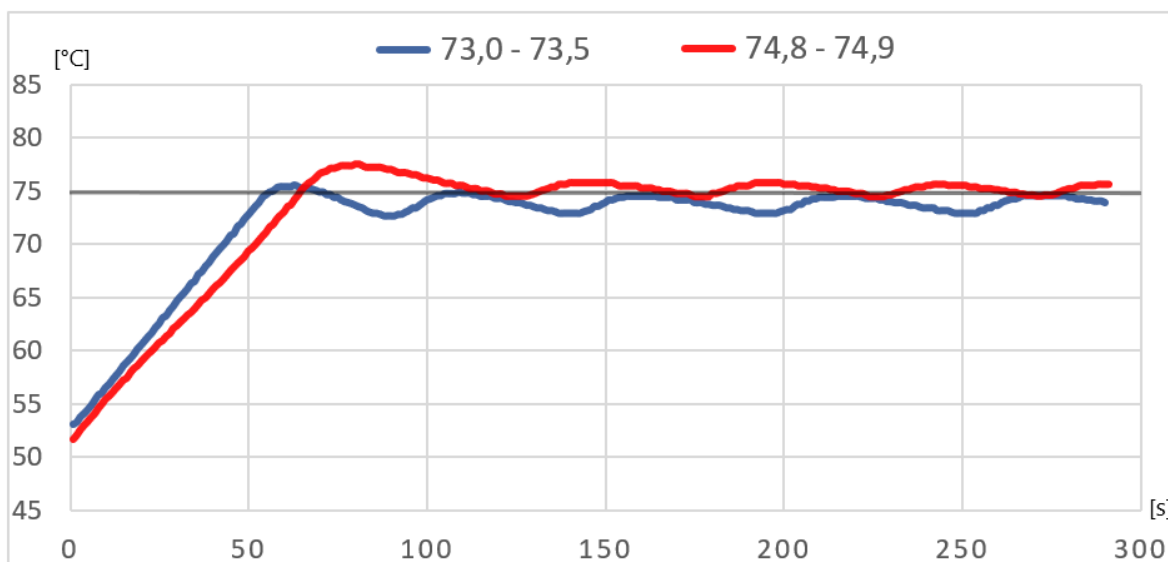
Část B je klasický logický obvod se zpětnou vazbou, realizuje se zde funkce získaná z předchozích kroků (obr. 23 a 24). Nejprve je hodnota teploty přivedena do bloků, které jí porovnávají s nastavenou hodnotou pro horní a spodní mez, podle toho je jejich výstup buď 1 nebo 0. Tyto dva bloky realizují proměnné H a S. Hodnota A je realizována pomocí dvou tlačítek na PLC automatu a RS bloku. Stisknutí horního tlačítka trvale nastavuje 1, dolní tlačítko zase trvale 0. Jak již bylo na začátku řečeno, proměnná A (tlačítko) funguje díky RS bloku jako přepínač. Digitální výstup je zde prezentován blokem Q.

Části C a D řeší další funkce, které nejsou nezbytně nutné k fungování regulace. Konkrétně je v C řešen zápis dat. K bloku Data Log je připojen generátor pulzů, s každou náběžnou hranou pulzu jsou zaznamenány a uloženy hodnoty vstupů a výstupů (jaká data se budou ukládat je také možné nastavit). Zápis dat lze opět zapnout/vypnout pomocí tlačítek na PLC. Nastavením délky pulzu lze měnit frekvenci vzorkování dat. Část D je pouze blok zobrazující data na displeji PLC. V tomto případě jsem nastavil zobrazení hodnot obou teplotních čidel a jejich průměr, dále informaci o tom, jestli trouba topí a jestli se zaznamenávají data.

4.2.2 Nastavení parametrů a měření

Jak bylo již dříve zmíněno, u dvoustavové regulace je možné upravovat pouze hodnoty horní a spodní hranice. Při dosažení horní hranice se topení vypíná, při poklesu pod spodní mez se opět zapíná. Naměřil jsem několik průběhů s různě nastavenými hodnotami. První poznatek byl, že nastavení horní hranice nad požadovanou hodnotu (např. horní mez 51°C při regulaci na 50°C) v tomto případě nefunguje vůbec dobře. Topná tělesa i po vypnutí stále uvolňují teplo, což vede k příliš velkému překmitu. Horní i spodní hranice zde tedy musí být nastaveny pod hodnotou požadované teploty.

Regulace na 75°C, horní topné těleso

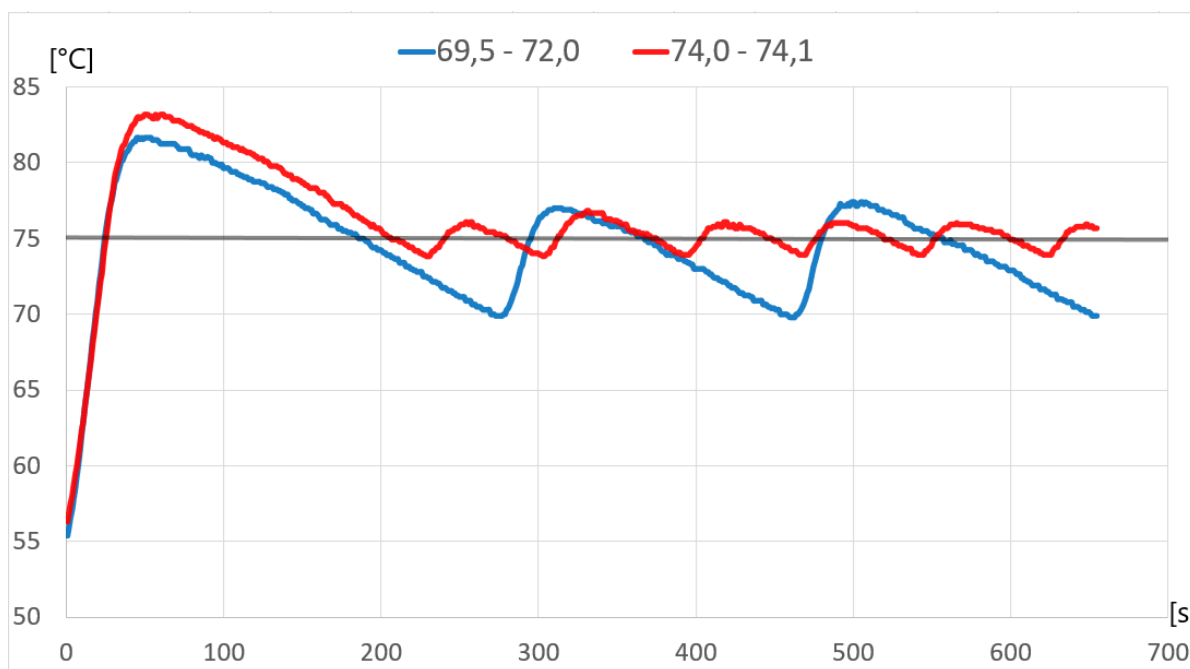


Obrázek 26: Průběh dvoustavové regulace (horní topné těleso)

Na obrázku 26 jsou dva průběhy s různým nastavením parametrů. Cílem je regulovat na teplotu 75 °C, v tomto případě v režimu pouze horního topného tělesa. Aby byl dobře viditelný rozdíl v nastavení parametrů, byly oba průběhy vytvořeny za jiným účelem. Modře značený má nastavenou spodní hranici na 73°C a horní na 73,5°C a snahou byl co nejmenší překmit. Teplota stoupá i po vypnutí topení, proto jsou hranice nastaveny poměrně nízko pod požadovanou teplotou. První překmit je díky tomu velmi malý, pouze asi půl stupně Celsia. Po prvním kmitu teplota klesá poměrně výrazně pod požadovanou teplotu (topení se zapíná při poklesu na 73°C) a následně se k žádané teplotě jen sotva přibližuje. Ustálený průběh osciluje v rozmezí přibližně 0,4 až 2,5°C pod požadovanou teplotou, teploty 75°C po prvním kmitu už nedosáhne.

U druhého, červeně značeného průběhu, bylo naopak snahou udržovat teplotu po ustálení co nejbliž požadované hodnotě, bez ohledu na první překmit. Nastavení spodní a horní hranice bylo 74,8 a 74,9°C, pásmo necitlivosti bylo v tomto případě jen jedna desetina stupně. Z obrázku je vidět, že první překmit je větší než v prvním případě, asi o 2,5°C. Po ustálení se ale teplota pohybuje kolem požadované hodnoty s mnohem menší odchylkou v rozmezí přibližně jednoho stupně Celsia.

Regulace na 75°C, obě topná tělesa



Obrázek 27: Průběh dvoustavové regulace (obě topná tělesa)

Ve druhém příkladu na obrázku 27 je požadovaná hodnota opět 75°C. Průběh regulace je ale odlišný, protože zde byla trouba nastavena na režim obou topných těles (v předchozím případě jen horní). Následkem toho se teplota zvyšuje rychleji a výraznější je i reakce na opětovné zapnutí topení. Po vypnutí topení sálá teplo ze dvou těles místo jednoho, teplota se tedy zvyšuje o něco více než v předchozím případě. První překmit je velmi výrazný, u obou průběhů dosahuje shodně o 9 stupňů víc, než je nastavená horní hranice, při které se topení vypíná. Po vypnutí topení se tedy teplota dále zvyšuje o 9°C. U velikosti kmitů po ustálení již záleží na nastavení horní a spodní meze.

Modrý průběh (parametry – spodní mez 69,5°C a horní mez 72°C) je opět nastaven tak, aby byl menší prvotní překmit. V tomto případě, aby byl překmit zcela odstraněn, musela by horní hranice být nastavena právě 9°C pod

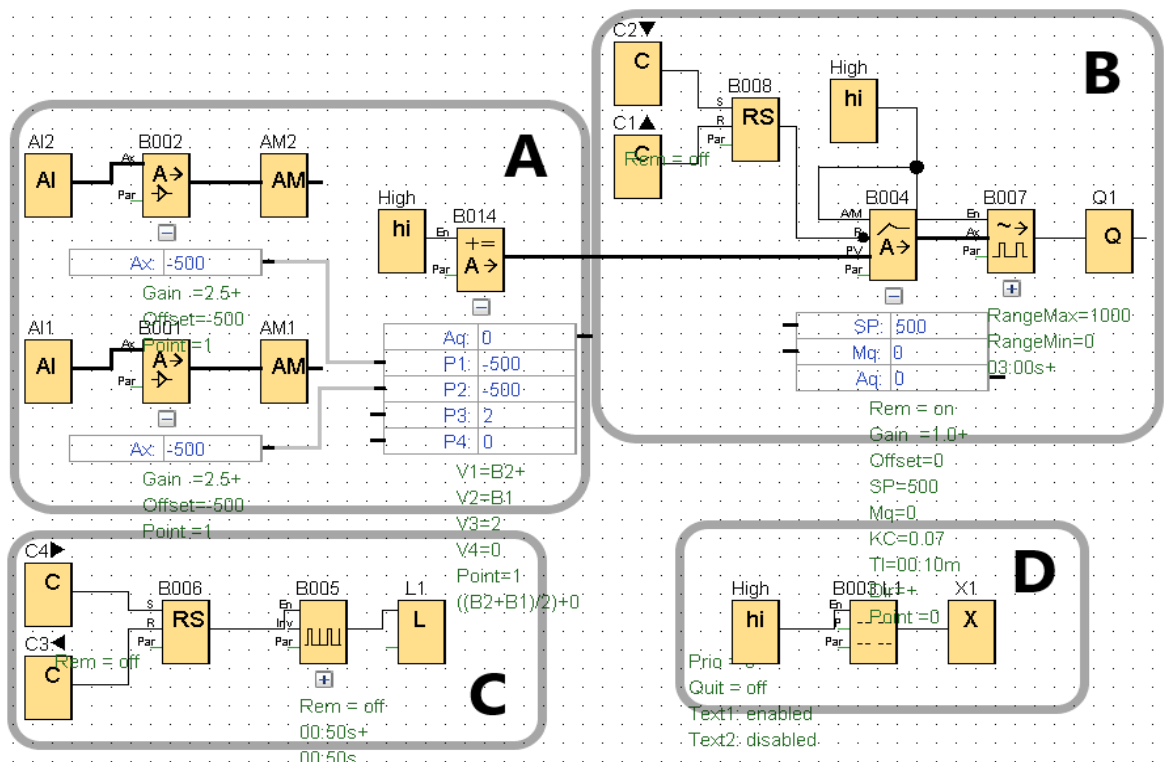
požadovanou hodnotou. To by ale znamenalo, že při každém dalším kmitu (i po ustálení) by teplota musela vždy klesnout o více než 9°C pod požadovanou hodnotu, aby se zapnulo topení. Regulační odchylka by poté byla tak velká, že by taková regulace neměla příliš smysl. Modrý průběh byl tedy nastaven tak, aby byl alespoň o něco menší překmit. Odchylka je ale i tak poměrně velká, po ustálení se teplota pohybuje v rozmezí asi 7°C .

Červený průběh má opět nastavené pásmo hystereze pouze na desetinu stupně ($74,0$ až $74,1^{\circ}\text{C}$). Překmit je větší, asi 8 stupňů nad požadovanou hodnotu, ale následně teplota osciluje kolem žádané hodnoty s odchylkou necelého jednoho stupně na každou stranu, jinak řečeno v rozmezí necelých dvou stupňů. V předchozím příkladu měl červený průběh pásmo necitlivosti také jednu desetinu stupně, ale reakce akční veličiny nebyla tak silná, díky tomu měl průběh menší regulační odchylku.

4.3 PI regulace

PI regulace kombinuje proporcionální a integrační složku. Na rozdíl od dvoustavové je zde mnohem větší prostor k upravování průběhu regulace. Použité PLC LOGO! má přímo v sobě zabudovaný PI regulátor.

4.3.1 Řešení PI regulace



Obrázek 28: Schéma PI regulace v Logo! Softu

K vytvoření programu pro PI regulaci bylo možné použít velkou část programu z dvoustavové regulace. Část A na obrázku 28 je naprosto totožná, opět se jedná o bloky analogových vstupů, jejich převod z napětí na hodnotu teploty a následný výpočet aritmetického průměru. Stejně tak části C a D jsou převzaté z dvoustavové regulace, zajišťují záznam dat na SD kartu a zobrazení vybraných dat na displeji PLC.

Část B je ta část programu, která vykonává regulaci. Opět je zde možnost ovládání tlačítka na PLC, ale oproti dvoustavové regulaci je zapojení mnohem jednodušší. Regulaci zde zajišťují pouze dva funkční bloky a výstup. V Logo!

Softu je blok určený přímo na PI regulaci, po jeho rozkliknutí je možné nastavit konstanty složky proporcionální (KC - controller amplification) a integrační (TI - integration time). Možnosti nastavení bloku jsou zobrazeny na obrázku 29. Tyto parametry je možné nastavovat manuálně nebo je zde i několik přednastavených režimů, z nichž dva jsou přímo na regulaci teploty. Výstupem tohoto bloku je analogová hodnota, kterou je potřeba převést na digitální výstup, protože k výstupu je připojeno relé, které je ovládáno dvoustavově. Hodnota z PI bloku proto vstupuje do bloku, který pomocí PWM (pulzně šířkové modulace) převádí analogovou hodnotu na sled pulzů. U PWM bloku je nastavitelná doba periody.

Output

Set value (SP)

500

Manual output (Mq)

0

Parameter:

Parameter set: User defined

Controller amplification (KC): 0.50

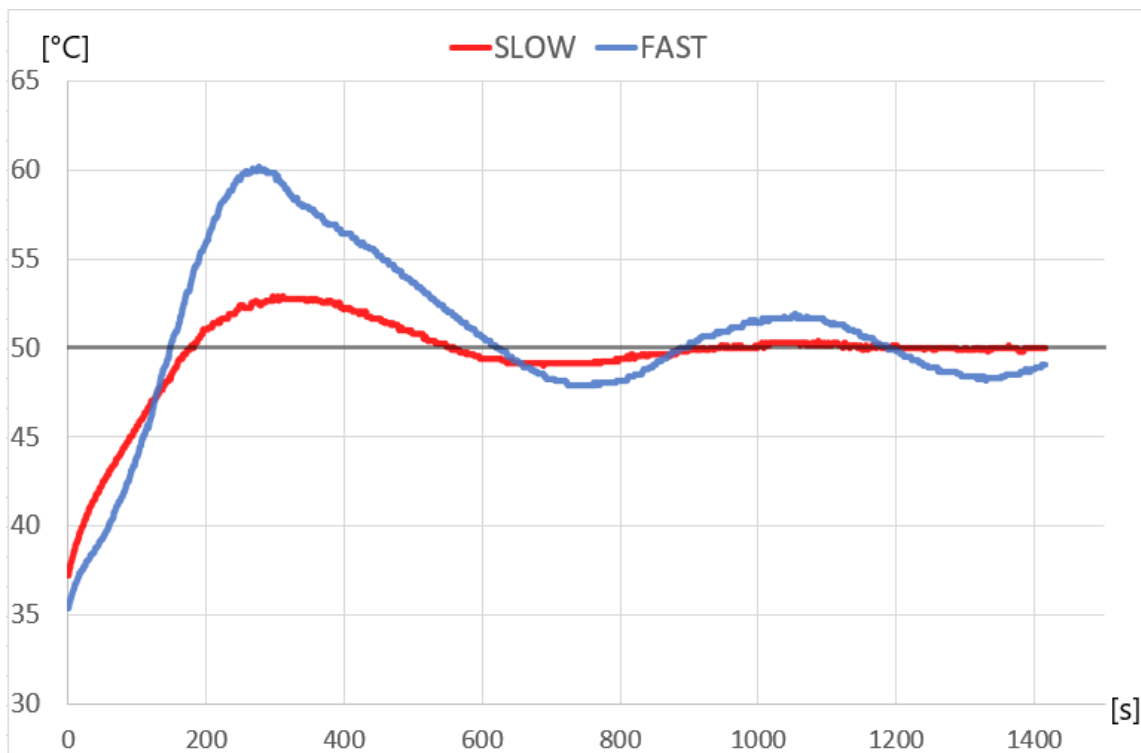
Integration time (TI): 0 : 30 Minutes (m:s)

Direction (Dir): Upwards (+)
 Downwards (-)

Obrázek 29: Nastavení parametrů PI regulace

4.3.2 Nastavení parametrů a měření

Regulace na 50°C, přednastavené režimy



Obrázek 30: Průběh PI regulace při nastavení Temp. fast a slow

Nejprve jsem vyzkoušel přednastavené volby parametrů, které se nabízí v nastavení PI bloku. Režimy jsou pojmenované Temperature fast s parametry $KC=0,5$; $TI=30$ a Temperature slow s parametry $KC=1$; $TI=120$. Výsledky regulace na 50°C jsou zobrazené na obrázku 30.

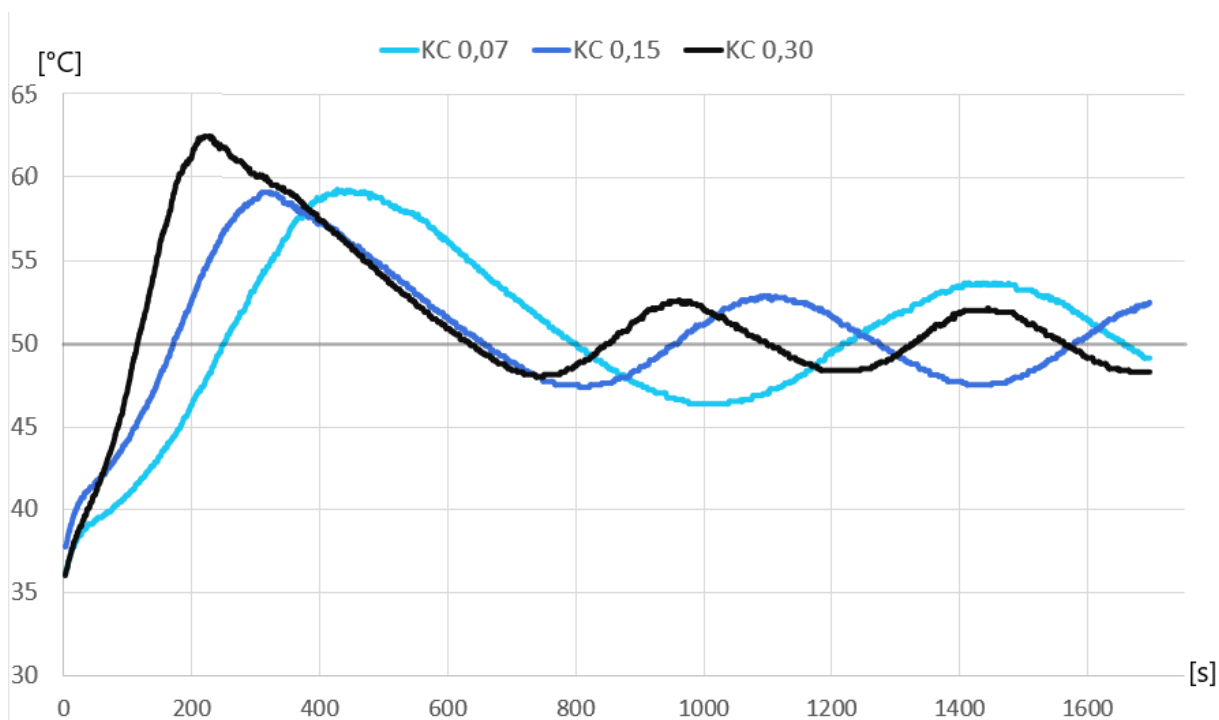
Už na první pohled je vidět významný rozdíl mezi oběma průběhy. Modrý (temp. fast) má obrovský první překmit až o 10 stupňů, teplota následně klesá velmi pomalu. I když byla teplota stále vysoko nad požadovanou hodnotou, regulátor neustále spínal a nenechal tak teplotu klesnout rychleji. Až po více než deseti minutách teplota klesla na žádaných 50°C, načež průběh začal oscilovat v rozmezí asi čtyř stupňů. Nastavení parametrů v tomto případě nebylo vůbec optimální, a to ani v porovnání s výsledky dvoustavové regulace.

Teplota při nastavení temperature slow nestoupá tak strmě jako modrý průběh, a i díky tomu dochází k mnohem menšímu překmitu (necelé tři stupně). Poté se průběh postupně ustaluje, až je teplota téměř shodná s požadovanou. Jen občas dojde k výkyvu cca o jednu až dvě desetiny stupně, následně se ale opět

rychle vrací na žádaných 50°C. Ustálení do tohoto stavu však trvalo téměř 20 minut. Na druhou stranu, ani před ustálením není odchylka nijak zásadní, přinejmenším v porovnání s modrým průběhem. Po prvním překmitu, v čase cca od 600 do 800 sekund, se teplota pohybuje okolo 49°C, tedy jeden stupeň pod žádanou teplotou.

Vliv proporcionální složky (parametr KC)

V následujícím měření zůstávají neměnné všechny parametry kromě proporcionální složky (KC). V tomto případě není ani tak podstatná kvalita regulace, jde hlavně o to názorně předvést, jak se změní průběh s měnící se proporcionální konstantou. Ostatní parametry mají stálou hodnotu, integrační složka $TI=10$ a perioda PWM je nastavena na 3 sekundy.



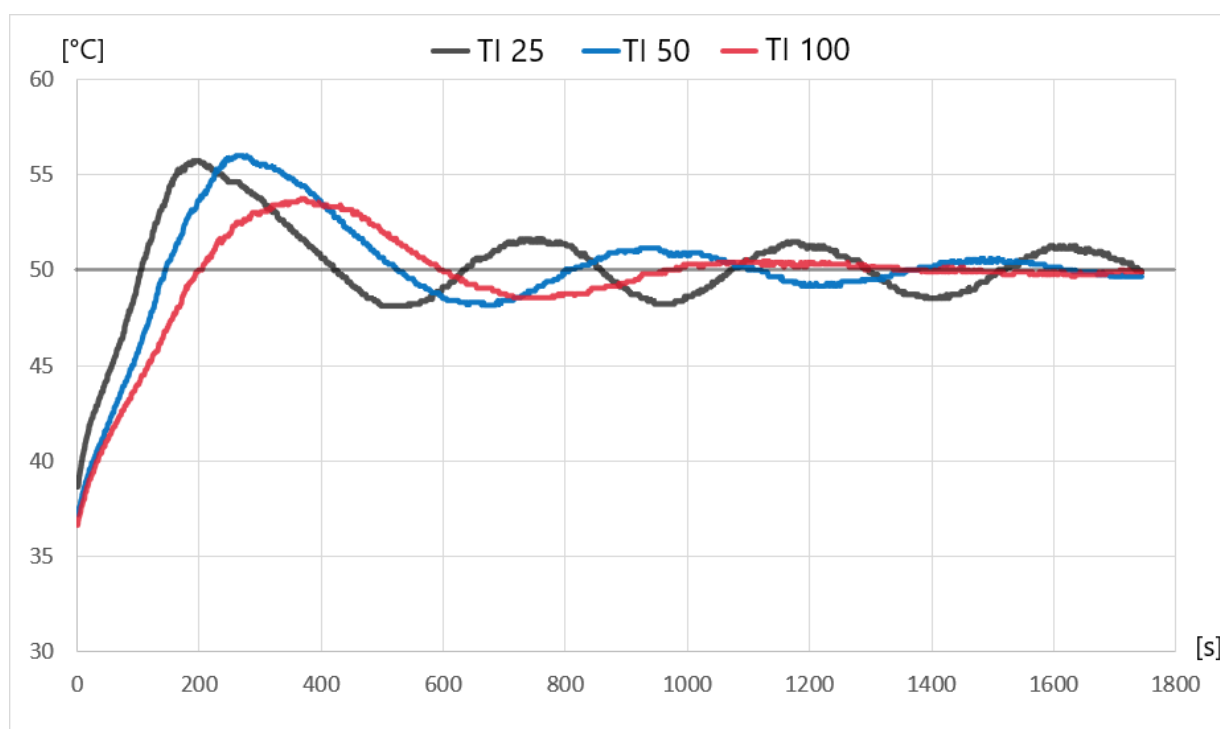
Obrázek 31: Vliv proporcionální složky

V grafu na obrázku 31 jsou tři průběhy teploty, jak bylo zmíněno, každý s jinou hodnotou KC. Sice graf trochu ztrácí na přehlednosti, ale nejdůležitější je úvodní část, kde je dobře vidět, jak působí změna proporcionální složky. Ta má zásadní vliv na počáteční stoupaní teploty, je vidět, že černý průběh s nejvyšším vlivem proporcionální složky má nejstrmější nárůst teploty a zároveň největší překmit. Čím nižší je hodnota parametru KC, tím je růst teploty pozvolnější a dosažení maxima při prvním překmitu trvá tím pádem delší dobu. Tyrkysové

průběh dosáhne maximální hodnoty v čase 450s, modrý v čase 320s a černý už 220 sekund od počátku. Také je vidět, že se černý průběh ustálí nejdříve ze všech, následuje modrý a poté tyrkysový, tedy i v tomto ohledu odpovídá pořadí od nejvyšší hodnoty KC po nejmenší.

Vliv integrační složky (parametr TI)

Opět jsou na obrázku 32 zobrazeny tři průběhy, tentokrát s různými parametry integrační složky. Proporcionální složka je nastavena na 0,75 a perioda PWM je stejně jako v předchozím příkladu 3 sekundy.



Obrázek 32: Vliv integrační složky

Změna integrační složky opět ovlivňuje úvodní růst teploty, ovšem opačně, než tomu bylo u složky proporcionální. Čím vyšší je hodnota TI, tím je růst pomalejší, naopak průběh s nejnižším TI má nejstrmější růst. Mnohem zásadnější roli ale hraje TI složka ve velikosti regulační odchytky. V grafu je jasně vidět, že průběh s větším vlivem TI složky se pohybuje blíž k žádané teplotě. Červený průběh s nejvyšším vlivem integrační složky ke konci měření dosahuje téměř nulové odchytky, křivka se jen místy lehce odchýlí o jednu, maximálně dvě desetiny stupně, ale okamžitě se vrací zase zpět na žádaných 50°C.

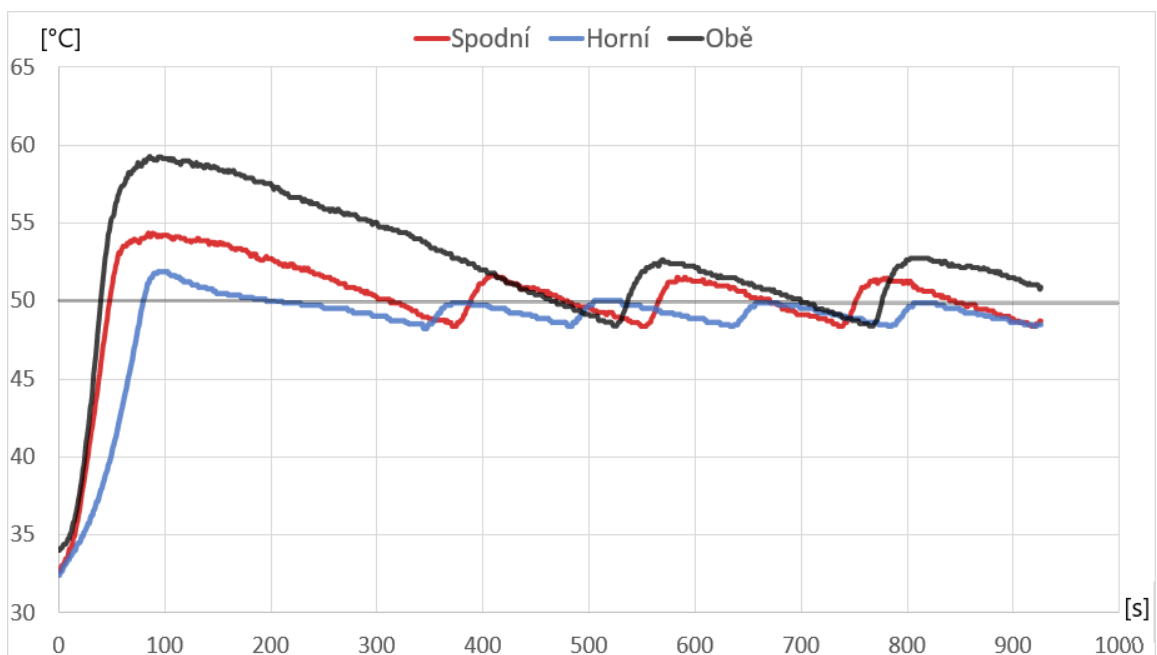
Obecně lze na základě tohoto měření říct, že reakce regulátoru s vyšším vlivem integrační složky je opatrnější a tím i přesnější, zatímco menší TI vede k výraznějším zásahům akční veličiny. To může být výhoda v rychlejší změně teploty a dřívejšímu ustálení, ale za cenu menší přesnosti, což má za příčinu větší regulační odchylku.

4.4 Další faktory ovlivňující regulaci

Předchozí kapitola byla zaměřená na vliv parametrů, které lze nastavit na regulátoru. Kromě toho jsou další vlivy, které mohou více či méně zasáhnout do regulačního procesu.

4.4.1 Zvolený režim topných těles

Při zapojování trouby zůstal zachovaný přepínač určující jeden ze tří režimů topení – pouze spodní, pouze horní nebo obě topná tělesa. Už během měření dvoustavové regulace bylo možné si všimnout rozdílného průběhu při různých režimech topení, zároveň se ale měnily i parametry regulace. Kvůli tomu nebylo úplně jasné, jak moc je měření ovlivněno přepnutím topných těles. Proto jsou na obrázku 33 průběhy s totožným nastavením parametrů a mění se pouze režim topení. Pro toto měření s požadovanou teplotou 50°C byla nastavena dvoustavová regulace v rozmezí 48,5 až 49°C.



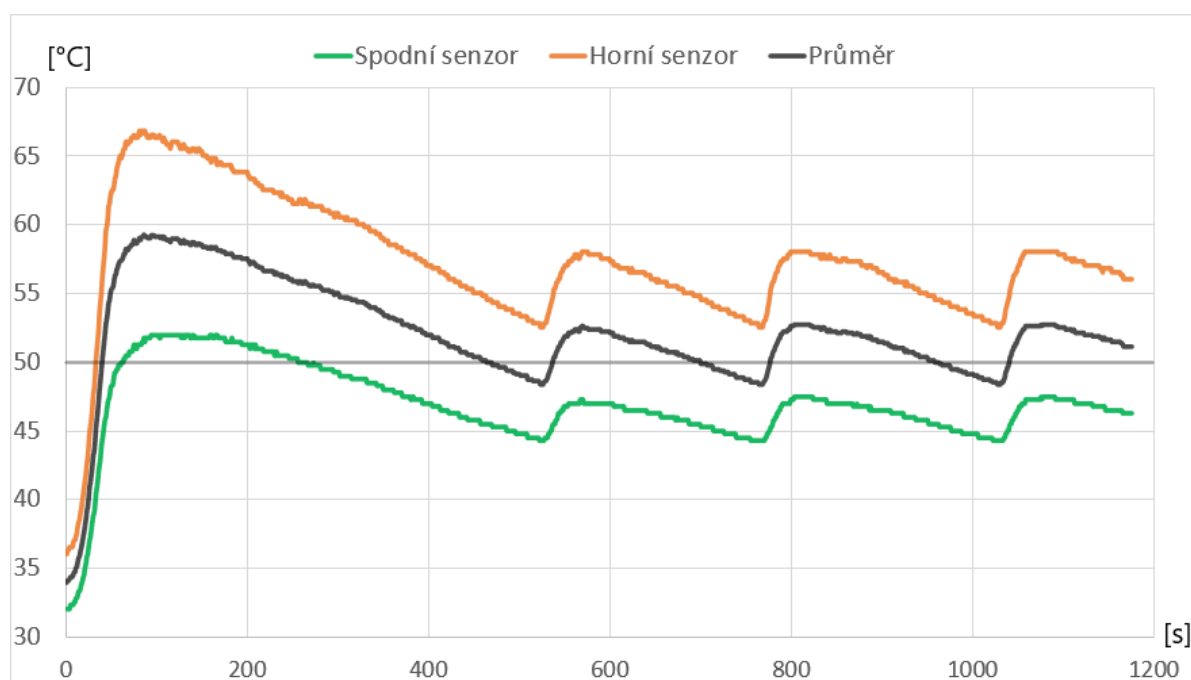
Obrázek 33: Průběhy tří režimů topení

Z grafu je patrné, že zvolený režim má výrazný vliv na průběh regulace. Celkem logicky při režimu obou topných těles je stoupání teploty nejrychlejší a má i nejvýraznější překmit. I po ustálení je regulační odchylka větší než u ostatních režimů. Horní topné těleso při stejných parametrech má přesně opačný problém,

zásah akční veličiny je příliš malý a teplota se po ustálení sotva přibližuje k požadované teplotě. Průběh spodního topného tělesa je mezi nimi, reakce při zapnutí topení je silnější než u horního průběhu, ale zároveň nedochází k tak velkým překmitům jako v režimu obou těles. Rozdíl mezi horním a spodním tělesem může být i v tom, že spodní zahřívá troubu dole, teplo stoupá a zahřívá spodní i horní teplotní čidlo (průběhy na obrázku jsou tvořeny průměrem horního a spodního čidla). Zatímco horní těleso zahřívá hlavně horní část trouby, kde teplo zůstává a spodní čidlo tedy měří mnohem nižší teplotu a tím snižuje průměrnou teplotu. Tímto narážím na další faktor, na který je potřeba si dát pozor a kterým se zabývám v následující části.

4.4.2 Měření teploty

Všechny příklady regulace vždy probíhaly na základě průměrné teploty. Teplota uvnitř trouby je ale značně nerovnoměrná, teplo se kumuluje v horní části a rozdíl mezi spodní a horní částí trouby je značný.



Obrázek 34: Rozdíly v měření teploty

Cílem této práce není ideální regulace teploty, jde hlavně o to ukázat vliv jednotlivých parametrů v regulačním procesu, proto jsem rozdílnou teplotu uvnitř trouby zanedbával. Pokud by ale šlo o co nejkvalitnější regulační proces, rozhodně

by se tato problematika musela řešit. Na obrázku 34 je zobrazen průběh dvoustavové regulace v režimu obou topných těles, černý průběh je zde totožný s černým průběhem z předchozího obrázku 33. Oranžovou a zelenou barvou jsou zde zobrazeny průběhy naměřené pouze horním a pouze spodním senzorem.

U prvního překmitu dosahuje průměrná teplota hodnoty 59°C , v ten okamžik je ale v horní části trouby teplota více než 66°C a v dolní části je naopak pouhých 52°C . Navíc je potřeba zdůraznit, že trouba není nijak zvlášť velká, vnitřní prostor má na výšku asi 20cm. Pokud uvažujeme, že je rozdílné rozložení teploty lineární, pak se na každém centimetru výšky mění teplota o $0,7^{\circ}\text{C}$. To platí při regulaci na 50°C , při vyšší požadované teplotě je rozdíl v teplotách ještě výraznější.

Po ustálení se rozdíl mezi horním a spodním senzorem snižuje, ale stále je značný, konkrétně kolem 10°C . Dále lze z grafu vyčíst, že teplota naměřená spodním senzorem se pohybuje v menším rozsahu, je více statická, zatímco horní teplota je více proměnlivá. Při zapnutí topení razantněji stoupá a po jeho vypnutí i výrazněji klesá. Průměrnou teplotu tedy více ovlivňuje teplota naměřená horním senzorem.

5 Závěr

Teoretická část této práce byla věnována dvěma hlavními tématům, což je regulace a PLC automaty. Na začátku byly uvedeny druhy regulace a stručný popis regulačního obvodu s veličinami. Dále jsou popsány jednotlivé složky spojitého regulátoru a jejich kombinace ve formě sdružených regulátorů. Stručně jsou zmíněny některé často používané metody výpočtu parametrů spojitých regulátorů a také parametry, podle kterých se hodnotí regulační průběh. Nakonec je vysvětlena také podstata dvoupolohové regulace. V druhé polovině teoretické části je popsán základní princip fungování PLC automatů a požadavky na ně. Více prostoru je věnováno programovacím jazykům definovaným normou IEC 61131. U každého z pěti jazyků je vysvětlen způsob zápisu včetně jeho výhod i nevýhod. Teoretická část je zakončena popisem programu Logo! Soft Comfort, který je následně používán v praktické části.

Teoretická část měla za cíl představit základní znalosti k problematice regulace, které slouží i jako základ pro realizaci praktické části.

V praktické části jsou nejprve uvedena a stručně popsána všechna zařízení použitá k realizaci úlohy. Následuje popis původního a nového zapojení elektrické trouby, kde byl kladen důraz především na názornost, proto je tato část doplněna nákresem i reálnými obrázky zapojení.

Následuje dvoustavová regulace, kde je poměrně podrobně popsán postup řešení úlohy s následnou realizací programu v Logo! Softu. Zde je opět názorně popsána funkce programu. Samotné měření má ukázat možnosti a také limity dvoustavové regulace. Ze své podstaty nemůžeme dvoustavovou regulací odstranit regulační odchylku, průběh vždy kmitá v rámci horní a spodní meze okolo požadované veličiny. Měření ale zároveň ukázalo, že je možné odchylku udržovat v nepříliš velkém rozmezí, konkrétně byla naměřena trvalá odchylka 1°C po ustálení. Pokud by se trouba využívala ke svému původnímu účelu, pak je taková odchylka naprosto dostačující. Záleží tedy na konkrétním využití, například v domácích spotřebičích je dvoustavová regulace díky své jednoduchosti vhodná, zároveň s dobře nastavenými parametry může být dosaženo kvalitního výsledku. Také je třeba připomenout, že dvoustavová regulace, zvláště při vyšších teplotách, nedokázala příliš účinně zabránit prvotnímu překmitu.

V další části věnované PI regulaci je v úvodu opět názorně zobrazen a popsán program v Logo! Softu a následuje měření. Jako první jsem využil přednastavené režimy, které nabízel přímo Logo! Soft. První z režimů se příliš neosvědčil, ale druhý měl až překvapivě dobré výsledky. Prvotní překmit se sice projevil, ale po ustálení se podařilo téměř úplně odstranit regulační odchylku (jen občas se vyskytla desetina stupně). Hlavním cílem v této části bylo ukázat vliv proporcionální a integrační složky a následně porovnat, zda údaje z měření souhlasí s informacemi v teoretické části. Postupnými změnami proporcionální složky bylo zjištěno, že vyšší vliv složky způsobuje větší odezvu regulátoru a tím zrychluje průběh. V porovnání tří průběhů měl nejstrmější stoupání teploty právě ten s největší proporcionální složkou. Měření vlivu integrační složky probíhalo stejným způsobem a mimo jiné potvrdilo, že PI regulátor je schopný zcela odstranit regulační odchylku. S větší integrační složkou se průběh dokázal více přiblížit k požadované teplotě a průběh s nejvyšší vlivem I složky udržoval po ustálení nulovou odchylku.

Poslední kapitola praktické části byla zaměřená na další faktory, které mohou ovlivňovat průběh regulace. Sem patří výběr režimu topení, jehož vliv je také prezentován grafem se třemi odlišnými průběhy. Ukázalo se, že změna režimu zásadně mění průběh regulace a rozhodně tento faktor nelze ignorovat. Další je způsob měření teploty uvnitř trouby. Teplota je zde rozložena velmi nerovnoměrně, protože se teplo kumuluje v horní části. Pro vyzkoušení regulace lze vycházet z průměrné teploty a nerovnoměrné rozložení teploty zanedbat, při reálné snaze o co nejpřesnější regulaci to ale rozhodně není zanedbatelný faktor.

Celkově bylo cílem praktické části v první řadě realizovat úlohu, což se podařilo. Navíc je možné takto realizovanou úlohu dále využít i při výuce. Jak bylo zmíněno, je zde navíc mnoho faktorů a parametrů, kterými lze měření různým způsobem ovlivnit a dá se tak vymyslet celá řada odlišných zadání. Co se týče naměřených výsledků, šlo především o to ověřit informace uvedené v teoretické části, ověřit vliv jednotlivých parametrů spojitého regulátoru a v neposlední řadě vyzkoušet si chování regulátoru v praxi.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] J. Semerád, “Automatizační systémy.”
https://www.pslib.cz/jaroslav.semerad/board/Technicke%20lyceum/L4_2012_13/maturitni_okruhy/mat.okruh_22/1.pdf (accessed Mar. 19, 2023).
- [2] I. Švarc, “Základy automatizace,” 2002.
http://matlab.fei.tuke.sk/zar/subory/literatura/ZakladyAutomatizace_SVARC.pdf (accessed Mar. 10, 2023).
- [3] “Regulační obvod.” https://vyuka.hradebni.cz/file.php/133/regulacni_obvod.pdf (accessed Mar. 10, 2023).
- [4] “Syntéza regulačních obvodů.” <http://books.fs.vsb.cz/SyntezaReg/> (accessed Mar. 12, 2023).
- [5] “PI regulátor.” <http://books.fs.vsb.cz/SyntezaReg/text02d3.htm> (accessed Mar. 12, 2023).
- [6] “PD regulátor.” <http://books.fs.vsb.cz/SyntezaReg/text02c3.htm> (accessed Mar. 12, 2023).
- [7] “PID regulátor.” <http://books.fs.vsb.cz/SyntezaReg/text02e3.htm> (accessed Mar. 12, 2023).
- [8] “Kvalita regulace.”
http://hosting.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/3_MRkvalitaregulace_tpyregulatoru.pdf (accessed Mar. 14, 2023).
- [9] “Dvoupolohová regulace.” <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F3/F3k36-dvrg.htm> (accessed Mar. 14, 2023).
- [10] “PLC - Programovatelný logický automat.” <http://www.plc-automatizace.cz/knihovna/plc.htm> (accessed Mar. 15, 2023).
- [11] “Sestava PLC.” <http://www.plc-automatizace.cz/knihovna/plc/plc-hw-sestava.htm> (accessed Mar. 15, 2023).
- [12] “Cyklus PLC.” <http://www.plc-automatizace.cz/knihovna/plc/plc-cyklus.htm> (accessed Mar. 15, 2023).
- [13] “Požadavky na PLC.” <http://www.plc-automatizace.cz/knihovna/plc/plc-pozadavky.htm> (accessed Mar. 15, 2023).
- [14] “Programování PLC podle normy IEC 61 131-3 v prostředí Mosaic,” Mar. 2009.
[https://web.rcmt.cvut.cz/users/cerny/PLC_sup/TXV00321_\(v11\)_Programovani_PL_C_TECOMAT_podle_IEC_61131-3.pdf](https://web.rcmt.cvut.cz/users/cerny/PLC_sup/TXV00321_(v11)_Programovani_PL_C_TECOMAT_podle_IEC_61131-3.pdf) (accessed Mar. 16, 2023).
- [15] A. Vojáček, “Programovací režimy pro PLC dle IEC 61131-3,” Mar. 03, 2011.
<https://automatizace.hw.cz/programovaci-rezimy-pro-plc-dle-iec-611313-codesys> (accessed Mar. 16, 2023).
- [16] “6ED1052-1CC08-0BA0 - Industry Support Siemens.”
<https://support.industry.siemens.com/cs/pd/1088936?pdtdi=td&dl=en&lc=en-CZ> (accessed Mar. 19, 2023).
- [17] “6ED1055-1MD00-0BA2.”
<https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/6ED1055-1MD00-0BA2> (accessed Mar. 29, 2023).
- [18] “Snímače teploty Pt100 - princip, zapojení, třídy přesnosti | PROFESS.”
https://www.profess.cz/cs/pci/odporove_snimace_teploty (accessed Mar. 20, 2023).
- [19] “Elektrická trouba | SEO 1710BK | Sencor.” <https://www.sencor.cz/elektricka-trouba/seo-1710bk#product-download> (accessed Mar. 20, 2023).

- [20] “Základy teorie ON/OFF a PID regulace.” <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/> (accessed Mar. 14, 2023).

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Schéma regulačního obvodu [4]..... | 5 |
| Obrázek 2: Členy regulačního obvodu [4]..... | 5 |
| Obrázek 3: Přejímová charakteristika PI regulace [5]..... | 7 |
| Obrázek 4: Přejímová charakteristika PD regulace [6] | 7 |
| Obrázek 5: Přejímová charakteristika PID regulace [7]..... | 7 |
| Obrázek 6: zleva - stabilní obvod, hranice stability a nestabilní obvod [2]..... | 10 |
| Obrázek 7: Typický průběh dvoupohové regulace [20] | 11 |
| Obrázek 8: Princip PLC [12] | 13 |
| Obrázek 9: Příklad zápisu v IL [15]..... | 16 |
| Obrázek 10: Příklad zápisu v LD [15] | 17 |
| Obrázek 11: Příklad zápisu v FBD [15]..... | 19 |
| Obrázek 12: Příklad zápisu v SFC [15] | 20 |
| Obrázek 13: Příklad zápisu v ST [15]..... | 21 |
| Obrázek 14: Prostředí Logo! soft Comfort | 22 |
| Obrázek 15: Příklad nastavení funkčního bloku | 24 |
| Obrázek 16: PLC LOGO! [16] | 25 |
| Obrázek 17: Rozšiřující RTD modul [17] | 25 |
| Obrázek 18: Vnitřní zapojení trouby | 27 |
| Obrázek 19: Schéma původního zapojení | 28 |
| Obrázek 20: Schéma nového zapojení..... | 29 |
| Obrázek 21: Zapojení SSR relé | 30 |
| Obrázek 22: Zapojení PLC | 31 |
| Obrázek 23: Postup řešení dvoustavové regulace..... | 32 |
| Obrázek 24: Odvození výsledné rovnice | 33 |
| Obrázek 25: Program pro dvoustavovou regulaci v Logo! Softu | 34 |
| Obrázek 26: Průběh dvoustavové regulace (horní topné těleso) | 35 |
| Obrázek 27: Průběh dvoustavové regulace (obě topná tělesa) | 36 |
| Obrázek 28: Schéma PI regulace v Logo! Softu..... | 38 |
| Obrázek 29: Nastavení parametrů PI regulace | 39 |
| Obrázek 30: Průběh PI regulace při nastavení Temp. fast a slow | 40 |
| Obrázek 31: Vliv proporcionální složky..... | 41 |
| Obrázek 32: Vliv integrační složky | 42 |
| Obrázek 33: Průběhy tří režimů topení..... | 44 |
| Obrázek 34: Rozdíly v měření teploty | 45 |

Seznam tabulek

| | |
|---|---|
| Tabulka 1: Ziegler-Nicholsova metoda kritických parametrů [2] | 8 |
| Tabulka 2: Ziegler-Nicholsova metoda přechodové charakteristiky [4] | 9 |