ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řízení pece pro vytvrzování optických konektorů

Praha, 2008 Jan Brabec

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 18. 1. 2008 .....

.....
podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu diplomové práce, kterým byl Doc. Ing. Jan Bílek, Csc. Bez jeho pomoci, rad a připomínek by tato práce nemohla vzniknout. Můj vděk patří také společnosti RLC Praha, projektu Cepot a všem, jenž mě v mé práci podporovali.

Abstrakt

Cílem této práce je shrnutí studia problematiky optických konektorů a návrh nové verze programu s využitím stávajícího hardwaru pece pro vytvrzování epoxidového lepidla uvnitř optických konektorů. Zároveň je řešena synchronizace vytápění jednotlivých topných komor, připojení pece k osobnímu počítači, vizualizace a zadávání parametrů pece.

Původní řídicí algoritmy pecí pro vytvrzování epoxidu doposud využívaly jednoduchý princip regulace, založený na dvoupolohovém regulátoru s hysterezí, který způsobuje výrazné špičky v teplotách pece. Zpřesnění řízení a tím i zkrácení potřebného času pro vytvrzování bylo dosaženo zavedením algoritmu PID regulátoru. Pomocí komunikace mezi větším počtem (5–6) řídicích jednotek je možné minimalizovat příkonové špičky a tím omezit přetěžování elektrické sítě. Byla vytvořena grafická vizualizace, která umožňuje pomocí osobního počítače sledovat celý výrobní proces vytvrzování konektorů a zadávat parametry řízení všech topných komor pece.

Po zavedení nového softwaru do výrobního procesu je očekáván možný nárůst výroby na jedné peci v řádu jednotek procent, vlivem zkrácení času vytvrzování a možnosti použití všech komor najednou. Na tématu bylo pracováno v rámci projektu *CEPOT*[1] pro společnost *RLC Praha*[2]. Téma bylo řešeno po tři období, což odpovídá devíti kalendářním měsícům.

[1] CEPOT – Centrum podpory talentů nabízí studentům možnost pracovat na studentských projektech ve spolupráci s externími firmami, www.cepot.cz.

[2] RLC Praha a. s. – Středně velká ryze česká firma působící na trhu komunikačních technologií, www.rlc.cz.

Abstract

The goal of the submitted thesis is to summarize the study of optical connectors and to propose new version of the program using the current optical connectors hardening oven hardware. In addition the thesis is dealing with the solution of heating synchronization of particular heating chambers, interconnection oven and personal computer interface, visualization and entering the oven data.

So far the original oven control algorithms for epoxide hardening benefited from simple principle regulation, based on two - state regulator with hysteresis, which causes perceptible peaks in oven temperature. Thanks to the implementation of the PID algorithm regulator the improvement in controlling precision was reached thereby shortening necessary hardening time. Via communication among more (5–6) control units, it is possible to minimize the power requirement points, thereby limiting electrical network overload. Graphic visualization was created to make immediate industrial process monitoring and controlling possible. Setting all heating chambers control parameters and overseeing the process of connectors hardening is provided by the help of a personal computer.

After the new software implementation a possible growth in production to one oven in number of a percent is expected, owing to shortening the necessary hardening time and the possibility of using all the chambers at the same time. This theme was processed in terms of *CEPOT*[3] project for *RLC Praha*[4] company. The theme was being solved for three time periods, which matches to nine calendar months.

[3] CEPOT – Talents support centre offers chance work on students' projects in cooperation with external companies, www.cepot.cz.

[4] RLC Praha a. s. – Middle – sized all Czech company working with communication technology, www.rlc.cz.

České vysoké učení technické v Praze - Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky *Školní rok:* 2006/2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Jan Brabec

Obor: Technická kybernetika

Název tématu: Řízení pece pro vytvrzování optických konektorů

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou konektorů pro optická vlákna.
2. Navrhněte novou verzi programu pro stávající pec pro vytvrzování optických konektorů.
3. Vyberte, vyzkoušejte a realizujte vhodný typ regulátoru, který zpřesní řízení pece.
4. Navrhněte a realizujte synchronizaci vytápění jednotlivých topných komor za účelem snížení špiček odběru elektrické energie.
5. Zvažte možnost napojení na PC s možností zadávání a změnou parametrů.

Seznam odborné literatury: Dodá vedoucí práce.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Bílek, CSc.

Termín zadání diplomové práce: zimní semestr 2006/2007

Termín odevzdání diplomové práce: leden 2008

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

v zast.
prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V Praze dne 21.02.2007

Obsah

Obsah ... xi
Seznam obrázků ... xv
Seznam tabulek ... xix
1 Úvod ... 1
2 Historie a současnost optických technologií ... 2
3 Technologie vláknové optiky ... 4
3.1 Složení optické soustavy ... 4
3.2 Optické kabely ... 4
3.2.1 Typy optických kabelů ... 4
3.2.2 Optická vlákna ... 6
3.2.3 Ochrana optického vlákna ... 7
3.2.4 Silové prvky ... 7
3.2.5 Venkovní plášť ... 7
3.2.6 Plastová vlákna ... 7
3.3 Zdroje optického záření ... 8
3.3.1 LED dioda ... 8
3.3.2 Laserová dioda ... 9
3.3.3 Připojení optického vlákna ke zdroji optického záření ... 9
3.4 Optické detektory (přijímače) ... 10
3.5 Svařování a spojování optických vláken ... 11
3.5.1 Mechanické spojování optických vláken ... 11
3.5.2 Svařování optických vláken ... 12
3.6 Další využití vláknové techniky ... 12
4 Konektory optických vláken ... 14
4.1 Popis a funkce konektorů ... 14
4.1.1 Rozdělení optických konektorů podle typu broušení čela ferule ... 14
4.1.2 Útlum optických konektorů ... 15
4.1.3 Přehled používaných konektorů ... 18
4.2 Montáž optických konektorů ... 19
4.2.1 Příprava vlákna ... 19
4.2.2 Dvousložková epoxidová lepidla ... 19

4.2.3 Jak správně připevňovat konektory ... 20
4.2.4 Leštění konektorů ... 21
4.2.5 Používání konektorů HotMelt ... 23
5 Rozbor zadání ... 25
5.1 Zařízení, na kterých se práce prováděla ... 25
5.2 Řízení teploty ... 27
5.2.1 Požadavky na řízení ... 27
5.2.2 Původní řešení regulace ... 28
5.3 Synchronizace pecí a připojení PC ... 29
6 Řešení ... 30
6.1 Identifikace modelů pecí ... 30
6.1.1 Identifikace velké pece ... 31
6.1.2 Identifikace malé pece ... 32
6.2 Řízení teploty ... 34
6.2.1 PWM (Pulse-width modulation) ... 34
6.2.2 Výběr vhodného typu regulátoru ... 35
6.2.3 Regulační schéma v programu Simulink ... 35
6.2.4 Výsledky simulací ... 38
6.3 Synchronizace topných komor ... 41
6.3.1 Komunikační jednotka (KJ) ... 41
6.3.2 Způsob komunikace ... 44
6.3.3 Rozhodování a přidělování práv na přechod do aktivního režimu ... 46
6.4 Komunikace s počítačem ... 47
6.4.1 Způsob komunikace mezi KJ a počítačem ... 47
6.4.2 Výběr prostředí pro tvorbu Grafického uživatelského rozhraní (GUI) ... 48
6.4.3 Zkušební verze vizualizace ... 48
6.4.4 Finální verze vizualizace ... 49
6.5 Programování programů pro procesory AVR ... 50
6.5.1 Výběr programovacího prostředí pro procesory AVR ... 50
6.5.2 Zásady pro minimalizaci kódu ... 51
6.5.3 Program řídicí jednotky ... 51
6.5.4 Program komunikační jednotky ... 57
6.6 Malá vytvrzovací pícka HotMelt ... 60
6.6.1 Vyhodnocování a kalibrace čidla ... 60

6.6.2 Změřené hodnoty ... 61
7 Závěr a zhodnocení ... 63
8 Seznam použité literatury a použitého softwaru ... 65
8.1 Kapitola 2 Historie a současnost optických technologií ... 65
8.2 Kapitola 3 Technologie vláknové optiky ... 65
8.3 Kapitola 4 Konektory optických vláken ... 65
8.4 Kapitola 5 Rozbor zadání ... 65
8.5 Kapitola 6 Řešení ... 66
8.5.1 Podkapitola 6.1 Identifikace modelů pecí ... 66
8.5.2 Podkapitola 6.2 Řízení teploty ... 66
8.5.3 Podkapitola 6.3 Synchronizace topných komor ... 66
8.5.4 Podkapitola 6.4 Komunikace s počítačem ... 66
8.5.5 Podkapitola 6.5 Programování programů pro procesory AVR ... 67
8.5.6 Podkapitola 6.6 Malá vytvrzovací pícka HotMelt ... 67
8.5.7 Kapitola 8 Seznam použité literatury a použitého softwaru ... 67
8.6 Seznam použitého softwaru ... 65
Seznam příloh ... 68

Seznam obrázků

Obrázek 1: Pokus Johna Tyndalla 2
Obrázek 2: Složení optické soustavy 4
Obrázek 3: Typy Kabelů: a) simplex, b) duplex, c) heavy duplex, vícevláknové kabely: d) break out, e) distribution, f) loose tube 5
Obrázek 4: Porovnání spektra vyzařovaného světla LED a LD 9
Obrázek 5: Porovnání vyzařovacího úhlu LED a LD 9
Obrázek 6: Připojení vlákna pouhým přiložením ke zdroji a použitím mikročočky 10
Obrázek 7: Vyzařování z plochy (LED) a z hrany (vetšinou LD) 10
Obrázek 8: Mechanická optická spojka 12
Obrázek 9: Svářečka 12
Obrázek 10: Druhy zbroušení kontaktů 15
Obrázek 11: Správně vyleštěné a čisté čelo ferule, znečistěné čelo ferule a čelo ferule poškozené poškrábáním 16
Obrázek 12: Vybrané závislosti útlumu na vadách spojení konektoru 16
Obrázek 13: Druhy epoxidových lepidel 20
Obrázek 14: Kulička lepidla na čele ferule 21
Obrázek 15: Odřezávání zbytku vlákna 21
Obrázek 16: Ruční leštění: 21
Obrázek 17: Velké leštičky konektorů 23
Obrázek 18: Vytvrzovací pícky 24
Obrázek 21: Ovládání jedné topné komory velké pece 26
Obrázek 22: Malá pícka HotMelt 26
Obrázek 23: Režimy chodu pece 27
Obrázek 24: Estimating Process Models 30
Obrázek 25: Odezva na jednotkový skok při identifikaci G_1 31
Obrázek 26: Odezva na vstupní průběh při identifikaci G_2 32
Obrázek 27: Připevnění čidla – izolace o šířce 8 mm 32
Obrázek 28: 1. odezva na průběh při identifikaci přenosu 33
Obrázek 29: 2. odezva na průběh při identifikaci přenosu 34
Obrázek 30: Regulační schéma pro jeden typ regulátoru 36
Obrázek 31: Blok „vytváření reference“ 36

Obrázek 32: Blok dvoupolohového regulátoru 37
Obrázek 33: Blok první verze PID regulátoru 37
Obrázek 34: Blok druhé verze PID regulátoru s aproximovanou D složkou 37
Obrázek 35: Blok přenosů soustavy 38
Obrázek 36: Blok šumu 38
Obrázek 37: Regulace dvoupolohovým regulátorem 39
Obrázek 38: Regulace prvním typem PID regulátoru 39
Obrázek 39: Regulace druhým typem PID regulátoru 39
Obrázek 40: Porovnání teploty vzduchu pro tři typy regulátorů 40
Obrázek 41: Porovnání teploty tepelného zářiče (topení) pro tři typy regulátorů 40
Obrázek 42: Schéma pro porovnání různých typů regulátorů 41
Obrázek 43: Schéma komunikační jednotky 42
Obrázek 44: Motiv plošného spoje KJ 43
Obrázek 45: Osazovací výkres KJ 43
Obrázek 46: Foto plošného spoje KJ – strana spojů 43
Obrázek 47: Foto plošného spoje KJ – strana součástek 43
Obrázek 48: Porovnání vnitřku pece bez a se zapojenou KJ 43
Obrázek 49: Schéma komunikace 44
Obrázek 50: Synchronizace dvou topných komor 47
Obrázek 51: Program pro odzkoušení komunikace KJ a PC. 49
Obrázek 52: Formulář vizualizace a vzhled jednotlivých záložek 50
Obrázek 53: Diagram hlavního cyklu programu řídicí jednotky 52
Obrázek 54: Diagram obsluhy přerušení A/D převodníku 52
Obrázek 55: Diagram obsluhy přerušení přetečení čítače T0 53
Obrázek 56: Diagram obsluhy přerušení přetečení čítače T1 53
Obrázek 57: Diagram obsluhy přerušení porovnávání hodnoty čítače T1 53
Obrázek 58: Diagram procedury PID 53
Obrázek 59: Diagram procedury VYTVRZOVÁNÍ 54
Obrázek 60: Diagram procedury MENU 55
Obrázek 61: Diagram procedury MENU KONFIGURACE 56
Obrázek 62: Obsluha přerušení při čtení sériového portu 57
Obrázek 63: Diagram programu komunikační jednotky 58
Obrázek 64: Diagram procedury KOMUNIKACE S POČÍTAČEM 58
Obrázek 65: Diagram procedury KOMUNIKACE S ŘÍDICÍMI JEDNOTKAMI 59

Obrázek 66: Diagram procedury STAV ŘÍDICÍCH JEDNOTEK 59
Obrázek 67: Kalibrace termistoru 60
Obrázek 68: Změřené průběhy řízení teploty pece (teploty 40 až 150 a 250°C) 61
Obrázek 69: Výsledky funkce pro odhadování stavu..... 62
Obrázek 70: Porovnání změřených a simulovaných výsledků..... 64

Seznam tabulek

Tabulka 3-1: Druhy optických vláken, podle rozložení indexu lomu 6
Tabulka 3-2: Vlnová délka záření podle druhu materiálu LED 8
Tabulka 3-3: Porovnání jednotlivých druhů fotodetektorů 11
Tabulka 4-1: Přehled příčin útlumu při použití optických konektorů 17
Tabulka 4-2: Přehled běžně používaných konektorů 18
Tabulka 6-1: Příkaz posílaný z komunikační jednotky řídicí jednotce 46

1 Úvod

Cílem této práce bylo navrhnout novou verzi programu pro vytvrzovací pece s využitím stávajícího hardwaru. Pece jsou výrobky společnosti RLC Praha a slouží k vytvrzování epoxidového lepidla uvnitř optických konektorů. Pece jsou potřeba pro hromadné osazování optických kabelů konektory, které ve společnosti probíhá. Zároveň byla řešena synchronizace vytápění jednotlivých topných komor pece, připojení pece k osobnímu počítači, vizualizace a zadávání parametrů pece. Po zavedení nového softwaru do výrobního procesu je očekáván možný nárůst výroby na jedné peci v řádu jednotek procent, vlivem zkrácení času vytvrzování a možnosti použití všech komor najednou.

V následující kapitole je stručně shrnuta historie i aktuální situace na poli optické telekomunikace. Ve třetí kapitole jsou podrobně rozebrány a diskutovány typy optických kabelů, zdroje a detektory optického záření a možnosti spojení optických vláken. Ve čtvrté kapitole jsou popsány optické konektory, s důrazem na jejich využití a správnou montáž. V páté kapitole je podrobněji rozebráno zadání práce a v šesté pak jeho řešení, rozdělené podle jednotlivých témat. Závěr práce obsahuje stručné zhodnocení dosažených výsledků. Na konec je zařazen seznam použité literatury, který je členěn dle kapitol diplomové práce, a seznam použitého softwaru. Práce obsahuje dvě přílohy a to obsah přiloženého CD a seznam součástek potřebných ke stavbě komunikační jednotky.

2 Historie a současnost optických technologií

Optická technika se možná pomalým, možná rozvážným, ale určitě jistým, krokem začíná stávat něčím stejně samozřejmým, jako je v dnešní době internet, mobilní telefony, či kabelová televize. Laici nejspíš neprohlédnou, ale už mírně zasvěcený člověk ví, že k rozmachu právě těchto technologií přispívá vývoj optické techniky nemalou měrou. Vždyť právě optické kabely nás spojují pomocí datových linek napříč zeměmi i kontinenty.

Vedení informace pomocí světla není novinka. Opomeneme-li primitivní způsoby, jako jsou indiánské kouřové signály či morseovka, pokus, který předvedl geniální anglický fyzik John Tyndall Královské učené společnosti v roce 1954, pominout nemůžeme (Obrázek 1). Experimentálně demonstroval vedení světla pomocí vodního proudu vytékajícího z nádoby, do které se svítilo, dnes bychom řekli, že předváděl vedení světla dielektrickým sloupcem. Dalším krokem byl v roce 1934 patent Normana Frenche na telefonování skrz skleněné tyče. V roce 1960 Theodore Mainman (Hughes Labs) zkonstruoval první laser, kde jako aktivní prostředí sloužil krystal rubínu. Již o dva roky později byly prováděny první zkoušky s polovodičovým laserem.

Obrázek 1: Pokus Johna Tyndalla

Až do šedesátých let dvacátého století bylo využití skla pro přenos informace pomocí světla nemyslitelné. Útlum tehdejších nejčistších skel používaných v optice měl hodnotu 1000 dB/km. Až zjištění pánů Charlese Kao a Charlese Hockama (Standard Telecommunication Laboratory) z roku 1966, že velké ztráty jsou způsobeny nečistotami, nikoliv sklem samotným, vedlo k výrobě prvního nízkoútlumového skleněného vlákna firmou Corning Glass Works v roce 1970. První optické vlákno mělo skokový index lomu a útlum 20 dB/km. Již o dva roky později měli vlákna útlum jen 4 dB/km a dnešní optická vlákna dosahují útlumu jen 0,2 dB/km.

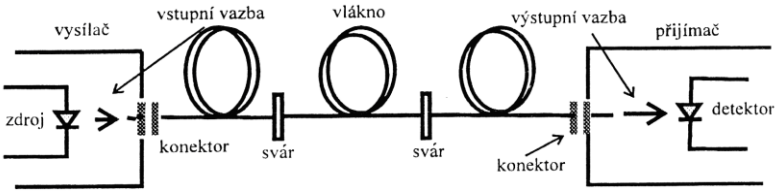
Nejen u optických vláken došlo v poslední době k velkému rozvoji, ale i u souvisejících produktů, jako jsou zdroje, detektory, modulátory, vazební členy, multi a demultiplexery, vláknové zesilovače aj. V současnosti jsou omezujícím prvkem optické techniky paradoxně obslužné elektronické obvody a s tím spojená několikanásobná konverze optického signálu na elektrický a naopak. Teprve, až budou všechny elektronické obvody zpracovávající optický signál nahrazeny obvody optickými, bude plně využit potenciál optických systémů.

Optická vlákna najdeme v telekomunikačních trasách na dlouhé vzdálenosti. Napříč městy, zeměmi i kontinenty spojují optická vlákna lidi, firmy i technologie navzájem pomocí datových linek vysokorychlostního internetu či telefonních hovorů. Příkladem může být TAT (Transatlantic telephone systems), který je optický od roku 1988, kdy byla uvedena v provoz verze TAT-8. Systém TAT-8 měl rychlost 295 Mbit/s a obsahoval opakovače každých 64 km. Systém byl používán až do roku 2002. Zatím poslední verze TAT-14 je používána od roku 2003 má rychlost 640 Gbit/s a délku 15428 km. Rozdílem oproti předchozím verzím je použití optických zesilovačů místo opakovačů. Zesilovače jsou umístěny asi po 40 km. Optická vlákna se dále používají i jako rozvody počítačových sítí po budovách, v průmyslových sítích (Interbus aj.) a jako spojení součástí HIFI audio pomocí digitálního optického rozhraní (k tomuto účelu bývají používána levná plastová vlákna).

Prognózy do budoucna hovoří o audio a video telefonických linkách, digitálních kabelových televizích v HDTV kvalitě a vysokorychlostních datových přenosech a to všechno při rychlostech až okolo 500GB/s na vzdálenosti desetitisíců kilometrů.

3 Technologie vláknové optiky

3.1 Složení optické soustavy



Obrázek 2: Složení optické soustavy

Na obrázku (Obrázek 2) je vidět zjednodušené schéma optické soustavy. Hlavními částmi jsou vysílač, přijímač a přenosové médium – optické vlákno. Vlákno je k vysílači nejčastěji připojeno pomocí konektorů. Mezi sebou se vlákna spojují svařováním, či spojováním spojkami. V dalších podkapitolách jsou popsány jednotlivé součásti optické soustavy. Konektorům je věnována celá třetí kapitola.

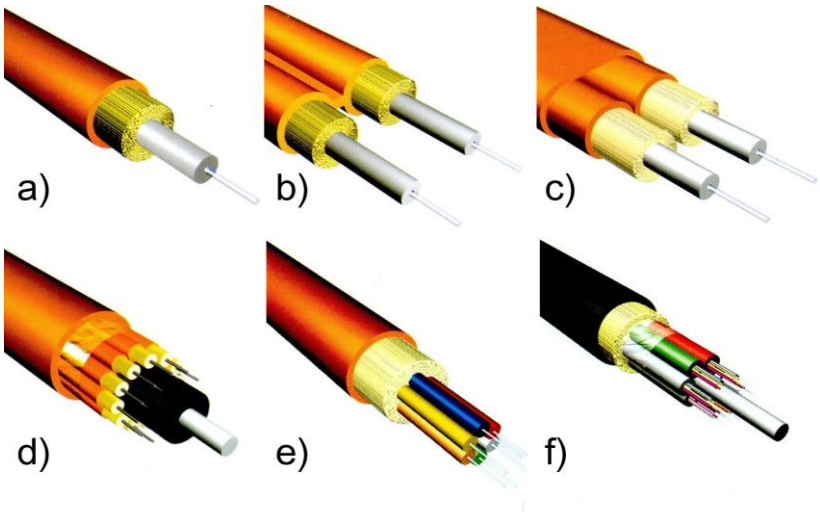
3.2 Optické kabely

Optický kabel standardně tvoří optické vlákno obsahující jádro a plášť, primární a sekundární ochrana, silový tahový prvek a venkovní plášť. Optický kabel je důležitá součást optického systému, proto musí mít určité vlastnosti, které zajišťují požadovanou funčnost. Plášť optického kabelu musí chránit optické vlákno proti vlivům vnějšího prostředí, mechanickému namáhání, oděru a poškrábání, ochrana před zlomení, zajišťuje chemickou odolnost hlavně proti vodě, odolnost proti vysoké teplotě případně ohni a dále proti hlodavcům a hmyzu. Silové tahové prvky např. kevlar (para-aramidové vlákno od firmy DuPont) zabezpečují odolnost kabelu v tahu, potřebnou například při pokládání kabelu nebo ve svislých instalacích.

3.2.1 Typy optických kabelů

Kabely můžeme rozdělit podle několika kritérií. Jedním z nich je počet optických vláken uvnitř kabelu a struktury vnějšího pláště (viz Obrázek 3):

- Simplex – jedno optické vlákno na kabel
- Duplex – dvě vlákna v jednom kabelu (heavy duplex – zesílený plášť)
- Vícevláknové kabely – několik optických vláken v jednom kabelu, většinou jednotky až desítky vláken.



Obrázek 3: Typy Kabelů: a) simplex, b) duplex, c) heavy duplex, vícevláknové kabely: d) break out, e) distribution, f) loose tube

Rozdělení podle struktury uvnitř kabelu:

- Volná sekundární ochrana – *Loose Tube*
    - optická vlákna jsou volně uložena v trubičce
    - trubička bývá někdy vyplněná gelem sloužícím proti vniknutí vlhkosti
    - optická vlákna jsou méně namáhána při ohybu
    - nelze použít při svislých instalacích ve stoupačkách
    - volnou sekundární ochranu lze bez problémů stáhnout v délce asi 1 m
- Těsná sekundární ochrana – *Distribution cable*
    - optická vlákna jsou uložena pevně v materiálu sekundární ochrany
    - vhodné i pro svislé instalace ve stoupačkách
    - těsnou sekundární ochranu můžeme stáhnout v délce cca 1 – 2 cm
- Rozdělovací – *Breakout cable*
    - je to jakési spojení několika kabelů do jednoho
    - používají se pouze na krátké vzdálenosti
    - drahé

Další kritérium pro rozdělení je prostředí, pro které jsou optické kabely použitelné:

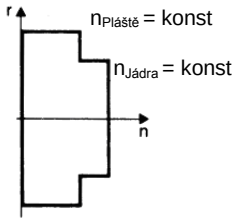
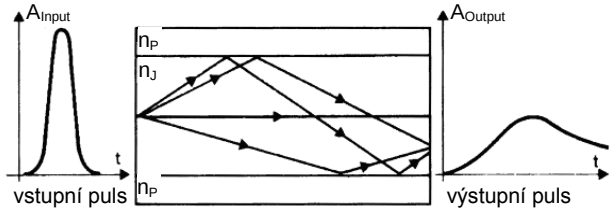
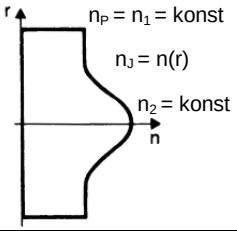
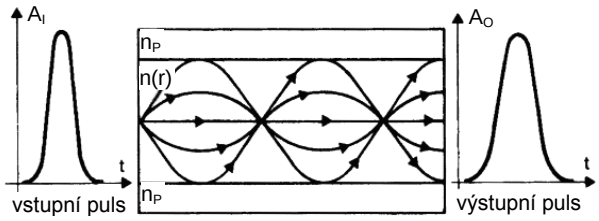
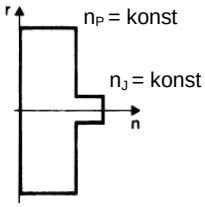
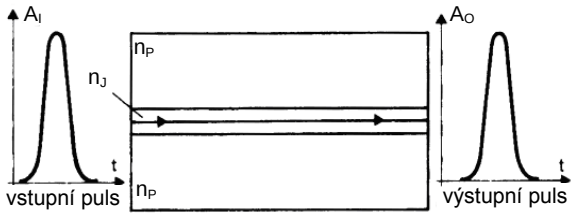
- Venkovní
    - do kabelovodů a chrániček
    - vhodné pro zafukování
    - pro volné uložení
- Vnitřní

Zvláštním typem kabelu jsou pigtaily. Jsou to vlákna jen s primární a sekundární ochranou, dělí se podle sekundární ochrany: volná, polotěsná a těsná.

3.2.2 Optická vlákna

Samostatné optické vlákno se skládá ze dvou částí – jádro optického vlákna nacházející se uprostřed vlákna a plášť, který vlákno obaluje. Obě tyto části se liší hlavně rozdílným indexem lomu. Optický signál se šíří jádrem. U vláken rozlišujeme přenosové a konstrukční vlastnosti. Nejdůležitějšími přenosovými vlastnostmi jsou disperze a útlum, nejdůležitějšími konstrukčními vlastnostmi jsou příčné rozměry vlákna a rozložení indexu lomu. Z hlediska dalších aplikací můžeme vlákna rozdělit do dvou hlavních skupin a to na vlákna jednovidová a mnohovidová. Mnohovidová vlákna mohou mít buď skokové rozložení indexu lomu, nebo gradientní. Vlastnosti jednotlivých typů vláken jsou ukázány v následující tabulce.

Tabulka 3-1: Druhy optických vláken, podle rozložení indexu lomu

Profil indexu lomu	Dráha módů a tvar vstupního a výstupního pulsu	Vlastnosti vlákna
Skoková změna 	**Mnohovidová vlákna** 	**Vlákno SI (step index)** • do vzdálenosti 500 m • útlum 10 dB / km • šířka pásma 300 Mhz x km • průměr jádra 50,100 a 200 µm • průměr vlákna 125, 140 a 230 µm
Gradientní změna 	**Mnohovidová vlákna** 	**Vlákno GI (graded index)** • do vzdálenosti 3 km • útlum 10 dB / km • šířka pásma 1GHz x km • průměr jádra 50, 62,5 a 85 µm • průměr vlákna vždy 125 µm
Skoková změna 	**Jendovidová vlákna** 	**Vlákno SM (single mode)** • pro dlouhé vzdálenosti • útlum 0,2 dB / km • průměr jádra od 6 do 12 µm • průměr vlákna vždy 125 µm

3.2.3 Ochrana optického vlákna

Optické vlákno je chráněno primární a sekundární ochranou. Těsně přimknutá primární ochrana má průměr 125 μm a vyrobí se z UV tvrzeného akrylátu. Máme dva typy sekundární ochrany:

- Těsná sekundární ochrana, která je pevně spojena s primární. Vyrobena je většinou z nylonu nebo PVC (polyvinylchlorid) a má průměr 900 μm.
- Volná sekundární ochrana, což je volná trubička, kde jsou vlákna uložena. Trubička se nesmí při ohybu zlomit, musí mít hladký povrch a být odolná proti otěru. Vyrábí se většinou z nylonu, nebo z PBT (polybutylentereftalát). Trubička bývá vyplněna gelem, který zmenšuje tření vlákna o trubičku a zabraňuje pronikání vody.

3.2.4 Silové prvky

Tahové prvky zajišťují pevnost optického kabelu v tahu. Hlavní roli hrají při montáži konektoru, ale jsou důležité také pro pokládání vláken, pro svislou instalaci ve stupačkách a pro samonosné kabely. Výztužný prvek se v kabelu nalézá buď ve středu kabelu, u povrchu kabelu, nebo mezi jednotlivými vlákny. Výztužné prvky umístěné při okraji vlákna bývají většinou stočené do spirály, zajišťují vetší odolnost proti tlaku a zmenšují ohebnost kabelu, čímž chrání vlákno proti zlomení. Vyrábí se nejčastěji z GRP (sklem vyztužený plast) nebo z kevlaru. Už méně často z oceli nebo ze skleněné příze.

3.2.5 Venkovní plášť

Plášť optického kabelu je rozdílný pro vnitřní a venkovní použití. Při použití v budovách nebývá vyžadována tak velká mechanická odolnost, jako u venkovních kabelů, kde naopak není vyžadována odolnost materiálu vůči požáru. Pro vnitřní instalace většinou používáme PVC nebo LSZH (low smoke zero halogen). Pro vnější instalace se dále může používat PE (polyethylen). U vnějších kabelů, které nejsou pokládány do trubek, musí být plášť odolný proti hlodavcům a hmyzu.

3.2.6 Plastová vlákna

Kromě klasických telekomunikačních optických vláken konstruovaných na bázi křemene, na která se jako hlavní požadavek klade velmi malý útlum a malá disperze, existují i vlákna plastová, kde nejdůležitějším parametrem je cena a snadná manipulace. Používají v méně náročných aplikacích, v některých lokálních datových sítích nebo v audio technice.

Jsou vyráběna z nízkoztrátových plastických materiálů, jejichž základem bývá polymetylmetakrylát (PMMA). Typický průměr jádra plastového vlákna je 1 – 2 mm, přesto jsou i při tomto rozměru vlákna velmi ohebná. Typická numerická apertura NA je 0,5, což odpovídá úhlu akceptance cca 30°, díky čemuž se vlákna velice snadno navazují na zdroj optického záření. Typické ztráty jsou ale velmi vysoké – 20 dB/km na vlnové délce 0,68 μm. Plastová vlákna se používají v rozsahu vlnových délek 0,6 – 0,8 μm.

3.3 Zdroje optického záření

Každý vysílač pro optickou komunikaci obsahuje zdroj optického záření, požadované vlnové délky (v oblasti malého útlumu a disperze optických vláken), postačujícího výkonu a s přijatelnou spektrální charakteristikou. Nejpoužívanějšími zdroji v optické komunikační technice jsou LED diody (light emitting diode) a laserové diody– LD. Jejich malá energetická náročnost je předurčuje pro použití s mikroelektronickými obvody a jejich malé rozměry umožňují efektivní vazbu na optická vlákna velmi malých průřezů.

3.3.1 LED dioda

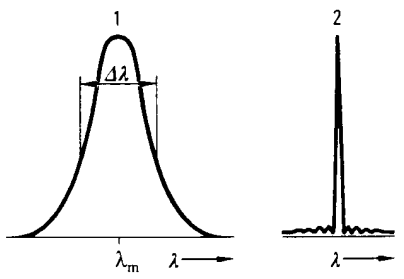
LED dioda je použitelná pro přenos na krátké vzdálenosti. Je značně levnější než LD (cena jedné diody se pohybuje někde v rozmezí 5 až 300 dolarů oproti 100 až 10 000 dolarům za LD), vystačí si s jednoduchými řídicími obvody a je relativně dostatečně rychlá (200 Mhz). Bohužel je limitována hodnota vyzářeného výkonu (10 až 100 μW), také má velkou vyzařovací plochu (50 μm) a široké spektrum (30 až 100 nm). Lze použít pouze pro mnohovidová vlákna.

Druh použitého materiálu PN přechodu určuje vlnovou délku vyzařovaného světla viz Tabulka 3-2.

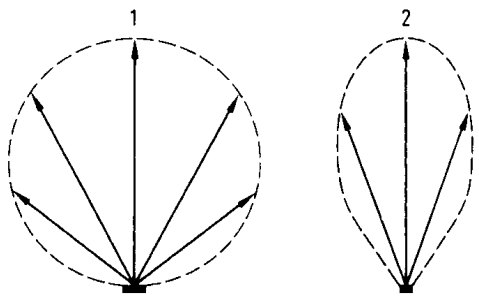
Tabulka 3-2: Vlnová délka záření podle druhu materiálu LED

Materiál	**Vlnová délka v μm**
GaAs	0,9
AlGaAs	0,8 – 0,9
InGaAs	1,0 – 1,3
InGaAsP	0,9 – 1,7

Podle způsobu vyzařování a navázání optického energie zdroje do vlákna rozlišujeme dva typy diod, diody vyzařující z plochy a diody vyzařující z hrany. Závislost výkonu vyzařovaného světla na proudu protékajícího diodou, je téměř lineární.



Obrázek 4: Porovnání spektra vyzařovaného světla LED a LD



Obrázek 5: Porovnání vyzařovacího úhlu LED a LD

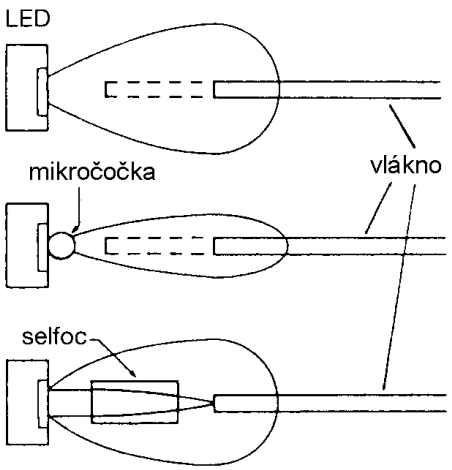
3.3.2 Laserová dioda

Laserová dioda je jediným řešením nejen při použití jednovidových vláken, ale také při přenosech optického signálu na dlouhé vzdálenosti, či při velmi rychlých přenosech. Oproti LED má značně větší výkon (asi 5 mW), mnohem užší spektrum vyzařovaného světla (méně než 1nm), menší vyzařovací plochu (asi 1x5 μm) a mnohem větší modulační frekvenci (kolem 10GHz). Nevýhodou je vysoká cena a mnohem složitější ovládací elektronika.

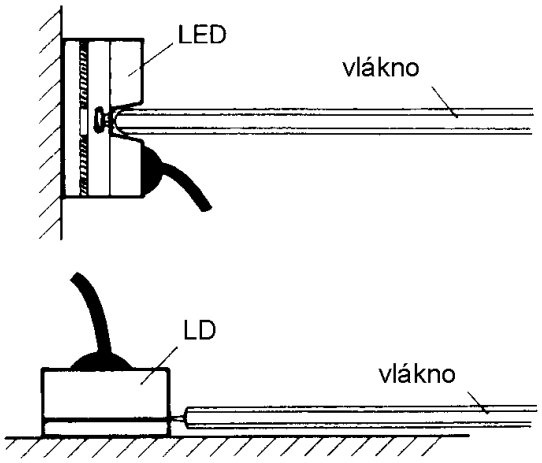
Na rozdíl od LED vyzařuje LD vždy pouze z hrany. Závislost výkonu vyzařovaného světla na vstupním proudu je po překročení prahového proudu zcela lineární.

3.3.3 Připojení optického vlákna ke zdroji optického záření

Dnes nejpoužívanějším způsobem je pouhé umístění vlákna ve velice malé vzdálenosti od zdroje. Takto se do vlákna dostane asi 5 až 10 % výkonu světla ze zdroje. Dalším způsobem je umístění mikročočky přímo na zdroji světla nebo použitím čočky typu Selfoc (válcová čočka s gradientním indexem lomu), čímž se zúží vyzařovaný svazek světla. Navázaný výkon do vlákna se tím zvýší až na 30 %. Posledním a nejúčinnějším způsobem je použití tzv. pigtailů (prasečích ocásků), kdy je přímo na zdroj záření připevněna malá část optického vlákna. Tímto postupem jsme schopni přenést do vlákna asi 50 % optického výkonu.



Obrázek 6: Připojení vlákna pouhým přiložením ke zdroji a použitím mikročočky



Obrázek 7: Vyzařování z plochy (LED) a z hrany (vetšinou LD)

3.4 Optické detektory (přijímače)

Přijímač patří ke klíčovým součástem optického systému jeho úkolem je detekovat optický signál, který může být přenosem velmi zkreslen a utlumen a získat z něj přenášenou informaci.

Konverze optického signálu na elektrický je úkolem fotodetektoru. Nejběžnějším fotodetektorem používaným v optické komunikační technice je PIN fotodioda a lavinová fotodioda APD (avalanche photodiode). Funkce těchto diod spočívá ve fotoelektrickém efektu, kdy jsou volné nosiče nábojů v polovodičích generovány absorpcí fotonů dopadajících na detekční plochu.

Nejdůležitějšími parametry detektorů jsou citlivost (poměr proudu a dopadajícího optického výkonu), doba náběhu, definovaná jakous potřebný k nárůstu proudu detektoru z 10 % na 90 % maximální hodnoty při buzení ideálním skokem optického výkonu. Z doby náběhu lze odvodit šířku pásma. Dalším parametrem je temný proud. Je to proud protékající diodou bez přítomnosti dopadajícího záření. Jeho velikost bývá jednotky až stovky nA a je značně závislý na teplotě. Signál detekovaný fotodiodou musí být dost silný, aby vybuzený proud spolehlivě „překryl“ temný proud.

Tabulka 3-3: Porovnání jednotlivých druhů fotodetektorů

Materiál	**Typ**	**Vlnová délka [nm]**	**Citlivost [A/W]**	**Doba náběhu [ns]**	**Temný proud [nA]**
Si	PIN	300 – 1100	0,5	0,5	1
Ge	PIN	500 – 1800	0,7	0,1	200
InGaAs	PIN	1000 – 1700	0,7	0,3	10
Si	APD	400 – 1000	80	0,6	15
Ge	APD	1000 – 1600	35	1,0	700

Optická vlákna se k detektorům připojují stejnými způsoby, jako se připojují ke zdrojům záření, více v kapitole 3.3.3.

3.5 Svařování a spojování optických vláken

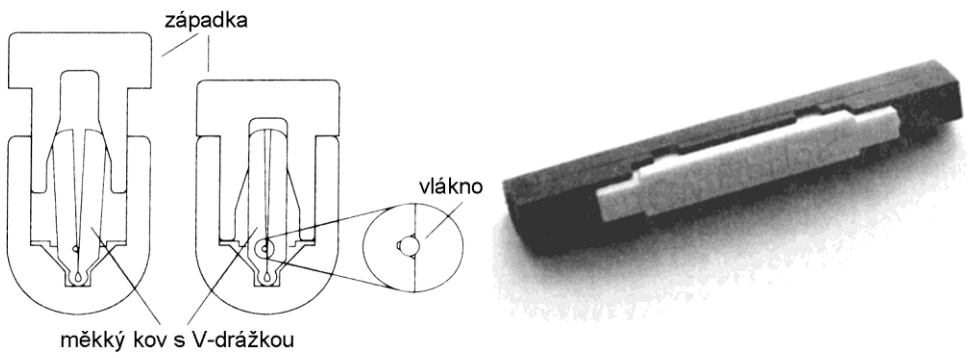
Jelikož montáž konektorů na optický kabel je značně časově náročná, většinou se při instalaci používá tzv. pigtailů, což je předem připravené vlákno v těsné sekundární ochraně zakončené na jedné straně optickým konektorem. Volný konec optického pigtailu se připojuje buď svařováním, nebo pomocí mechanických spojek.

Pro spojování vláken je vždy třeba perfektně kolmý a čistý řez vlákna. Pro řezání vláken se používají speciální nástroje zvané „zalamovaly," které pevným ostřím vlákno nepatrně naříznou a potom vlákno roztrhnou, čímž vznikne čistý a kolmý řez vlákna.

3.5.1 Mechanické spojování optických vláken

V mechanické spojce jsou obě vlákna vedena buďto V-drážkou, nebo jsou aretována pomocí tříbodového upevnění. Dosáhne se tak, přesného spojení a konce vláken jsou navzájem pečlivě vycentrovány. Pohromadě jsou držena pouze přítlačnou silou. Příklad takové mechanické spojky viz Obrázek 8.

Tyto spojky jsou jednoduché, rychlé na instalaci a nenáročné na potřebné vybavení. Útlum takovéhoto spojení bývá menší než 0,2 dB.



Obrázek 8: Mechanická optická spojka

3.5.2 Svařování optických vláken

Druhým způsobem spojování vláken je sváření. Provádí se nejčastěji elektrickým obloukem, ale lze použít i laser, či sváření plynem. Oproti mechanickému spojování je tento způsob velice drahý na pořizovací náklady. Útlum spojů se pohybuje pouze kolem 0,01 dB.

V dnešní době je k dispozici mnoho automatizovaných svářecích přístrojů. Pro mobilní použití musí mít dobrý svářecí přístroj správnou váhu (asi 4 kg), velikost a musí umožňovat bateriové napájení pro mobilní použití. Tyto přístroje mají systémy pro centrování vláken, které jsou obzvlášť u jednovidových vláken nutností.

Obrázek 9: Svářečka

3.6 Další využití vláknové techniky

Krom komunikace lze vláknovou techniku vidět i jako senzory různých veličin. Optické vláknové senzory se dělí do tří základních skupin: První skupinou jsou amplitudové senzory, u kterých je vyslané optické záření ovlivňováno měřenou veličinou a následně měřeno. Příkladem mohou být senzory vzdálenosti, skokové a spojité, hladinoměry, senzory detekce chemických látek a také senzory mechanického tlaku.

Druhou skupinu tvoří senzory s fázovou modulací, které jsou založeny na fázovém rozdílu signálu v měřicí a referenční větvi interferometru. Nejznámějším příkladem je optický gyroskop, který je pro svou jednoduchost, přesnost a odolnost hojně využíván v letecké technice. Třetí skupinou jsou polarizační senzory, kde působením měřené veličiny dochází k natáčení polarizační roviny optické vlny navázané do vlákna. Příkladem může být senzor měření proudu.

4 Konektory optických vláken

4.1 Popis a funkce konektorů

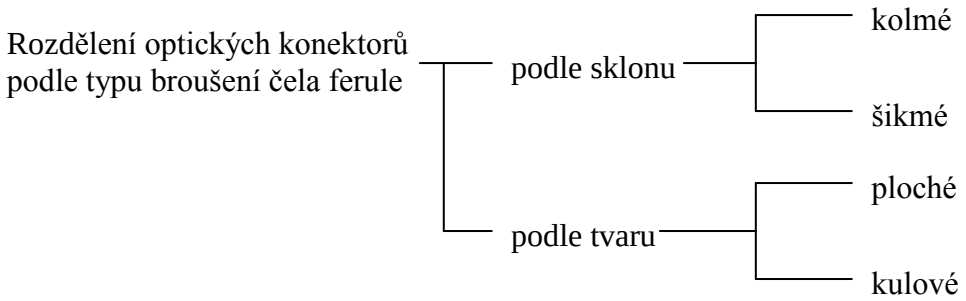
Optické konektory slouží jako ukončení optických kabelů (patchcordů) nebo optických pigtailů, zajišťují rozdělitelné spojení mezi dvěmi optickými vlákny. Konektor by měl být precizní, stabilní a levný zároveň. Po změření útlumu musí být jeho hodnota nízká (cca 0,4 dB, podle typu konektoru) a dotykové plochy konektoru musí mít minimální zpětné odrazy. Tyto vlastnosti musí být zachovány i po několikanásobném zapojení a rozpojení.

Před asi 10 lety nebyl nikdo schopný realizovat otvor o průměru 126 μm (± 0,5 μm), která má výstřednost pouhých 0,5 μm, uvnitř ferule o průměru 2,5 mm (+ 0 / - 0,001 mm). Tento váleček nazýváme ferule. Přesný otvor je dnes vytvářen již při výrobě ferule pomocí speciálního drátku, který se vkládá do formy spolu se zirkoniovým práškem. Po vypečení ferule se drátek vytáhne a zůstane po něm přesný otvor.

Konektor se skládá minimálně ze tří částí: ferule, tělo konektoru a aretační části (aretační matice). Při zapojení konektoru se musí dvě ferule přesně spojit dohromady. Vše je zajištěno keramickou trubičkou o vnitřním průměru 2,492 mm (+ 0,004 / - 0 mm), která se po zasunutí ferule roztáhne na rozměr 2,500 mm. Tento systém zaručuje perfektně soustředné, pevné a jednoduše rozdělitelné spojení.

Používané materiály pro výrobu optických konektorů jsou: keramika, slinutý karbid, lehké slitiny a všechny možné druhy plastických hmot, většinou používaných pro výrobu vnějšího obalu konektoru.

4.1.1 Rozdělení optických konektorů podle typu broušení čela ferule

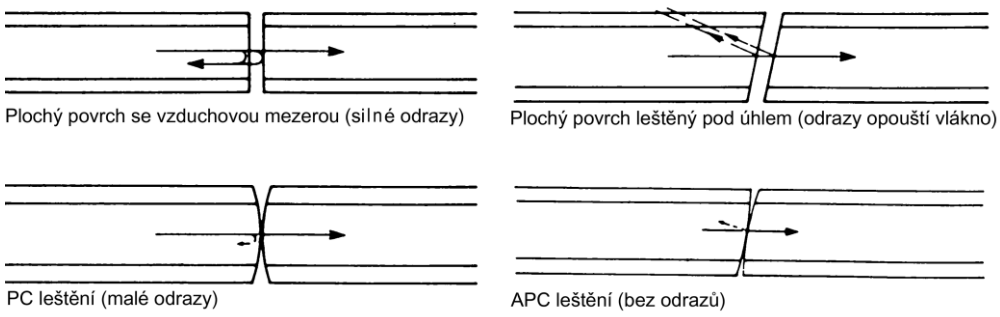


Použitím kulovitého leštění (o průměru kulové plochy 10 – 25 mm) a odpružených ferulí, se vytvoří fyzický kontakt (PC – physical contact). Vytlačením vzduchu vznikne

kontakt sklo na sklo, který vede k nízkým odrazům na styčných plochách a nízkému vloženému útlumu.

Broušením předních ploch pod úhlem je docíleno, že odražené módy nejsou navázány do optického vlákna a končí ve vnějším plášti vlákna. Tím je dosaženo téměř nulových odrazových ztrát. Nejnovějším způsobem je tzv. APC (angled PC), jde o kulovité broušení pod úhlem. Kombinuje výhody kulovitého broušení (malý vložený útlum) a výhody broušení pod úhlem (nulové odrazy). Nevýhodou tohoto způsobu je nutnost strojového leštění a náročnost v zachování stejných geometrických vlastností leštěné plochy ferule.

Konektor s plochým broušením má při kontaktu s druhým konektorem vzduchovou mezeru přesně definované šířky. Tyto konektory se příliš nepoužívají, jelikož mají velké odrazy.



Obrázek 10: Druhy zbroušení kontaktů

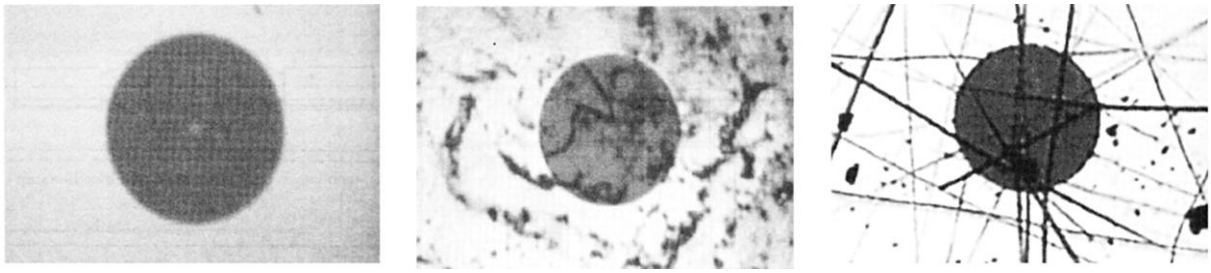
4.1.2 Útlum optických konektorů

Tato kapitola obsahuje přibližný přehled nejčastějších chyb optických konektorů. Sečtením všech maximálních hodnot může vyjít útlum spojení v řádu až jednotek dB. Dokonale vyleštěný PC konektor má velice nízký vložený útlum i zpětný odraz. Každý optický konektor potřebuje perfektní vycentrování, jelikož střed vlákna se v tomto případě může vychylovat pouze o 50 μm. Částečky prachu mezi čelními plochami konektorů mohou zvýšit vložený útlum konektorů, proto je nutné chránit konektory protiprachovými čepičkami a vždy udržovat konektory čisté. I po 1000 spojovacích cyklech se útlum nezvýší více než o 0,1 dB.

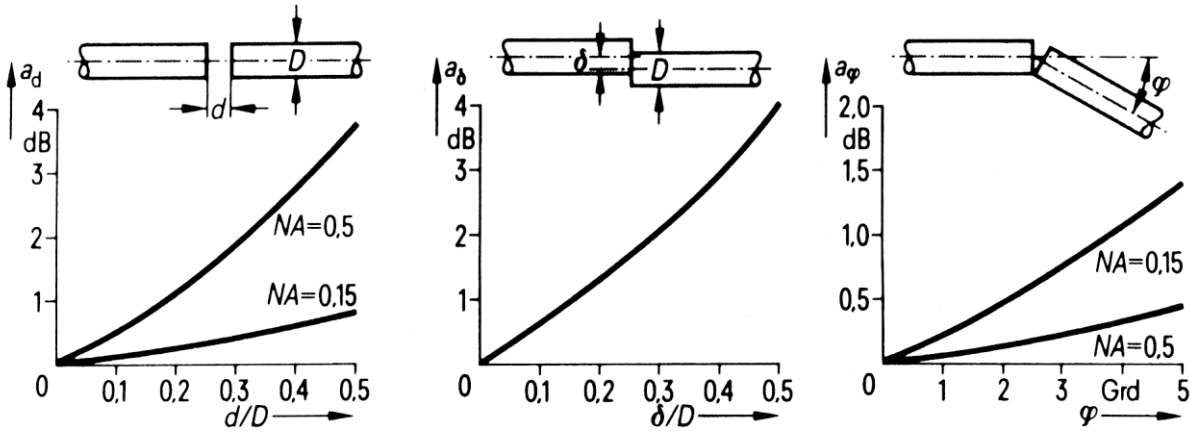
Často opomíjenou nebo špatně uskutečňovanou činností je čistění konektoru. Vyšší rychlosti datových přenosů, větší vzdálenosti a malý výkon přenášeného signálu jsou 3 důvody proč má důkladné čistění takový význam. Na rozdíl od kontaktů elektrických se

kontakty optické čistí mnohem hůře, jelikož každý čistící pohyb může pečlivě vyleštěný povrch konektoru zničit.

Čistění se provádí pomocí bezprašných ubrousků namočených v isopropanolu. Při čistění se nevěnuje pozornost jen čelní straně konektoru, která je nejdůležitější z hlediska útlumu, ale i boční straně ferule, jelikož by se díky ní mohly zanést do spojení konektorů nečistoty a prach.



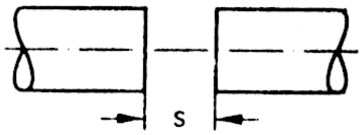
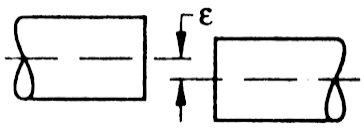
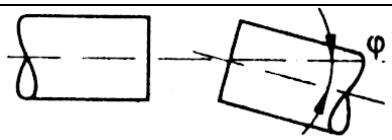
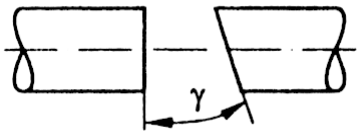
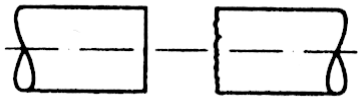
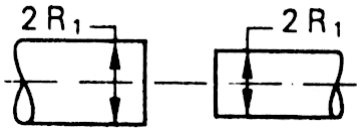
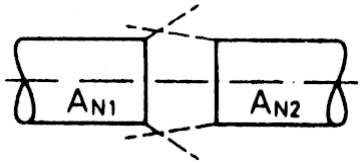
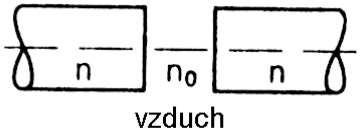
Obrázek 11: Správně vyleštěné a čisté čelo ferule, znečistěné čelo ferule a čelo ferule poškozené poškrábáním



Obrázek 12: Vybrané závislosti útlumu na vadách spojení konektoru

Přehled příčin útlumu ukazuje Tabulka 4-1 a závislost několika vybraných útlumů na vadách spojení konektorů Obrázek 12.

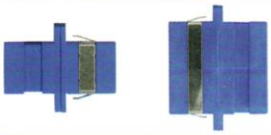
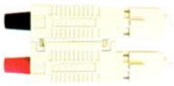
Tabulka 4-1: Přehled příčin útlumu při použití optických konektorů

Vzdálenost mezi povrchy vláken: 	Může být požadována pro dosažení stálého útlumu, při několikanásobných spojovacích cyklech. Musí být udržovaná přesná mezera (asi 10 μm). Mezery je dosaženo přesně definovanou délkou ferule.
Výstřednost vláken: 	Je způsobena neprecizním vedením ferulí při připojení, výstředným nebo nadměrně velkým otvorem uvnitř ferule, nebo skutečností, že jádro není uložené přesně ve středu vnějšího pláště.
Vychýlený úhel vláken: 	Důvody vzniku jsou stejné jako u výstřednosti vláken.
Broušení pod špatným úhlem: 	V případě šikmě broušených konektorů jsou eliminovány odrazy. Je nutné precizní vedení konektoru, aby nemohlo dojít k pootočení. Nelze kombinovat konektory zešikmené a kolmé, jelikož vzniká veliký útlum.
Poruchy povrchu: 	Způsobeno špatným leštěním konektoru nebo přílišným opotřebováním čelních ploch konektoru (prašné prostředí, časté zapojování a rozpojování).
Rozdílné průměry vláken: 	Častá chyba měření, kdy jsou spojována dvě rozdílná vlákna. Tímto způsobený bude útlum znatelný, vždy jen v jednom směru.
Numerická apertura: 	Jestliže záření přechází z vlákna s vyšší aperturou do vlákna s nižší aperturou, nebude do druhého vlákna dobře navázán optický výkon a dojde ke zvýšení útlumu. Při opačném pořadí vláken se tento jev neprojeví.
Fresnelovy ztráty: 	Při přechodu sklo-vzduch-sklo dochází dvakrát k útlumu 0,3 dB. Tento jev lze redukovat použitím lepidla se stejným indexem lomu, nebo broušením konektoru PC.

4.1.3 Přehled používaných konektorů

Nyní se používají konektory o dvou různých průměrech ferulí. Klasický průměr 2,5 mm využívají všechny dříve navržené konektory (FC, SC, ...). Miniaturizované konektory (např. LC) mají feruli o průměru 1,25 mm. Všechny konektory mají pružně uloženou feruli a ochranu proti otáčení ferule.

Tabulka 4-2: Přehled běžně používaných konektorů

E2000				SINGL MODE MULTI MODE ÚHLOVÝ (APC) SIMPLEX
	Vysoce kvalitní konektor s integrovanou protiprachovou krytkou. Převážně v provedení SM/APC pro sítě WAN a dálkové trasy.			
SC				SINGL MODE MULTI MODE ÚHLOVÝ (APC) SIMPLEX DUPLEX
	Velice rozšířený konektor pro použití v LAN sítích, náhrada za starší konektor ST. Často v provedení Duplex. Pro sítě WAN v provedení APC.			
FC				SINGL MODE MULTI MODE ÚHLOVÝ (APC) SIMPLEX
	Kvalitní konektor pro sítě WAN. Šroubovací provedení, často se vyskytuje v měřících zařízeních.			
ST				SINGL MODE MULTI MODE SIMPLEX
	Typický konektor pro sítě LAN s bajonetovým uchycením. Donedávna byl nejpoužívanějším konektorem pro jednoduchost a příznivou cenu. Stále se používá v průmyslových systémech, často pod označením BFOC 2.5.			
LC				SINGL MODE MULTI MODE ÚHLOVÝ (APC) SIMPLEX DUPLEX
	Miniaturní, velice kvalitní konektor pro aplikace LAN, WAN a Fibre Channel s ferrulí 1,25 mm. Používá se také v systémech FTTD a v aktivních prvcích s miniaturními optickými transceivery. Běžně se dodává pouze v provedení duplex kabelu.			
MTRJ				SINGL MODE MULTI MODE DUPLEX
	Kompaktní duplexní konektor s plastovou obdélníkovou ferrulí, převážně pro aplikace LAN a FTTD. Pro pigtaily se používá provedení Male s vodícími trny, na propojovacích kabelech je vždy použita verze Female.			

Single Mode (SM) - Dálkové trasy (WAN), metropolitní sítě (MAN), vysokorychlostní přenosové systémy.
Multi Mode (MM) - Lokální sítě (LAN), Optika až na stůl (FTTD), Fibre Channel (FC).
Úhlové leštění 8° (APC) - Podstatně lepší útlum zpětného odrazu, oba spojované konektory musí být v provedení APC.
Simplex - v propojovacím kabelu je jediné vlákno. Konektor je zakončen samostatně na vlákně.
Duplex - provedení pro pár vláken. V některých případech se používá spona, která spojuje oba konektory dohromady.
Ferrule - kolík optického konektoru, ve kterém je upevněno vlákno a na konci zabroušeno. Umožňuje vystředění vlákna při spojení s druhým konektorem nebo s aktivním prvkem pomocí optické spojky - couplingu.

4.2 Montáž optických konektorů

Montáž konektoru je proces skládající se z několika operací, které budou popsány v následujících podkapitolách.

4.2.1 Příprava vlákna

Nejdříve se musí navléci gumová bužírka (boot) a krimpovací kroužek, oboje v rozměru odpovídajícím kabelu a vlastnostem konektoru. Asi 4 cm od konce kabelu se speciálními kleštěmi odřízne vrchní plášť kabelu. Musí se dávat pozor, aby se nepoškodila kevlarová vlákna, která budou později využita. Podle hloubky konektoru se opatrně v dané délce odstraní 900 μm silná sekundární ochrana. Primární ochranu odstraníme pomocí speciálních kleští ve stejné délce jako sekundární ochranu. Kevlar ustřihneme v dané délce podle typu konektoru. Holé vlákno se důkladně očistí pomocí bezprašného ubrosku namočeného isopropylalkoholu. Nyní je vlákno připraveno ke konektorování.

4.2.2 Dvousložková epoxidová lepidla

Volba lepidla není jednoduchá, na trhu je jich mnoho, ale jen některá jsou vyhovující pro montáž konektorů. Často záleží na preferencích pracovníka, který konektory osazuje.

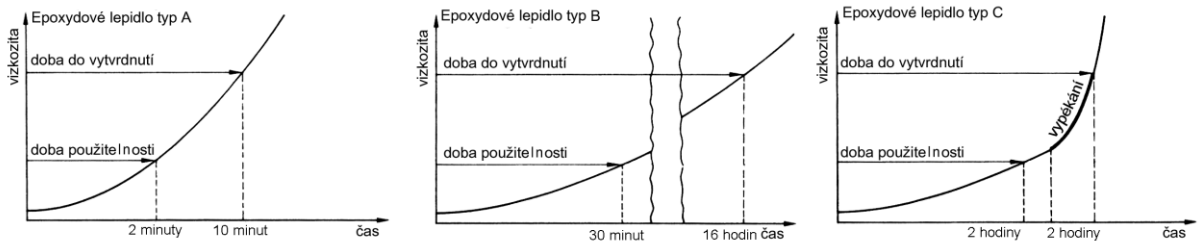
Nejdůležitější vlastnosti epoxidových lepidel:

- Dobrá, dlouhodobá a stabilní přilnavost ke sklu, keramice i kovu
- Správná viskozita po zamíchání (ani ne moc tekuté, ani ne moc tuhé)
- Relativně stálé vlastnosti viskozity při skladování
- Stálé chemické a mechanické vlastnosti (bez scvrkávání, tvorby vzduchových bublin a roztékání)
- Ve výsledném stavu mírně pružná, ale dostatečně tvrdá při leštění

Dvousložková epoxidová lepidla se skládají ze základního materiálu (epoxidové pryskyřice) a tvrdidla, které se musí do základního materiálu přimíchat v přesném poměru. Po smíchání obou složek při pokojové teplotě začíná doba použitelnosti, v průběhu které dochází k postupné zvyšování viskozity, až do bodu, kdy se již s lepidlem nedá pracovat. Po té většina epoxidových lepidel tuhne až do stavu, kdy je lze brousit. Tuhnutí můžeme výrazně zkrátit vytvrzením lepidla teplem. Pokud by se konektor leštil příliš brzy, docházelo by k roztírání lepidla a konektor by se stal velmi těžko vyleštitelný. V horším případě, by mohlo dojít až k uvolnění vlákna a tím ke znehodnocení konektoru.

Ve společnosti RLC se používají tři typy epoxidových lepidel:

- Typ A – rychleschnoucí dvousložkové lepidlo
  - vhodné při montáži malého počtu konektorů
  - dvě tuby s injekční jehlou
  - ke ztuhnutí dojde až po spojení obou složek
  - tuhne cca 2 minuty, tvrdne cca 10 minut
- Typ B – „černé“ dvousložkové lepidlo
  - baleno v plastovém sáčku, kde jsou obě složky oddělené sponou
  - vytažením spony se obě složky, které jsou v sáčku v přesně definovaném poměru, promíchají třením o hranu stolu.
  - v injekční stříkačce tuhne asi po 20 – 30 minutách
  - lepidlo samo vytvrdne za 16 – 20 hodin
  - při vytvrzování v peci za 1 hodinu
- Typ C – „bílé“ dvousložkové lepidlo
  - vysoce kvalitní výrobu určené pro hromadnou výrobu
  - baleno ve dvou tubách
  - míchá se špachtlí v popsaném poměru, použitelné cca 2 hodiny
  - lepidlo samo nevytvrdne – musí se vytvrzovat v peci po dobu asi dvou hodin

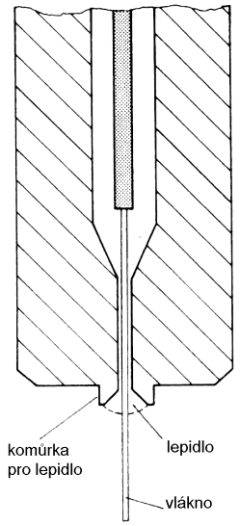


Obrázek 13: Druhy epoxidových lepidel

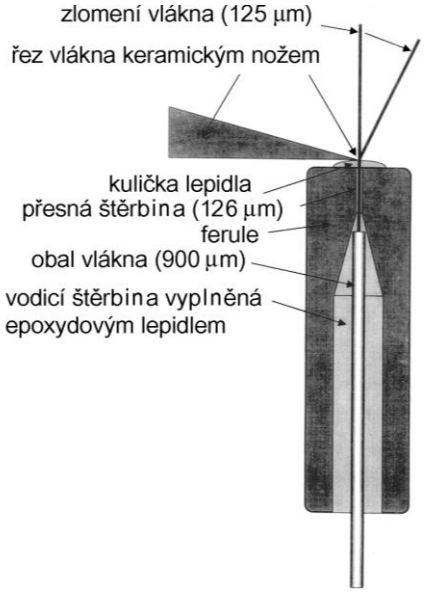
4.2.3 Jak správně připevňovat konektory

Podle typu konektoru se nanáší lepidlo do různých míst konektoru nebo jen na vlákno konektoru. Po zasunutí vlákna vznikne kapička lepidla na čele ferule, která poskytne ochranu při leštění. Při plnění lepidla se musí dávat pozor, aby nevniklo do pohyblivých částí konektoru a aby nevteklo do kabelu. Dále je nutné zasunout krimpovací kroužek a pečlivě

zakrimpovat, kroužek se nesmí protáčet. Po zatuhnutí lepidla se vlákno diamantovým nožem ořízne těsně nad kapičkou lepidla. Konektor je připravený k leštění.



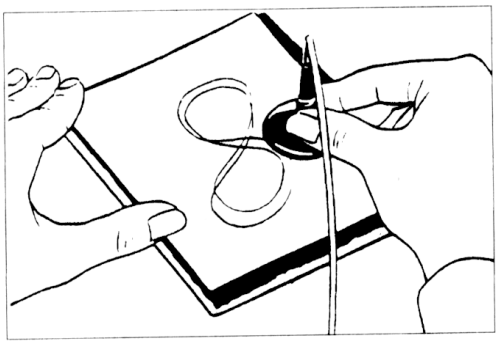
Obrázek 14: Kulička lepidla na čele ferule



Obrázek 15: Odřezávání zbytku vlákna

4.2.4 Leštění konektorů

Broušení se začíná ručně s brusným papírem s hrubostí 30 µm nebo 12 µm do tvaru osmičky. Konektor se udržuje svisle kolmo k papíru a brousí se do stavu, kdy je kulička lepidla na čele ferule téměř odbroušená. Poté čelo opláchneme ve vodě, abychom odstranili zbytky lepidla po broušení. Pod brusný papír se vkládá buď keramická, skleněná nebo gumová podložka podle typu konektoru a broušení.



Obrázek 16: Ruční leštění:

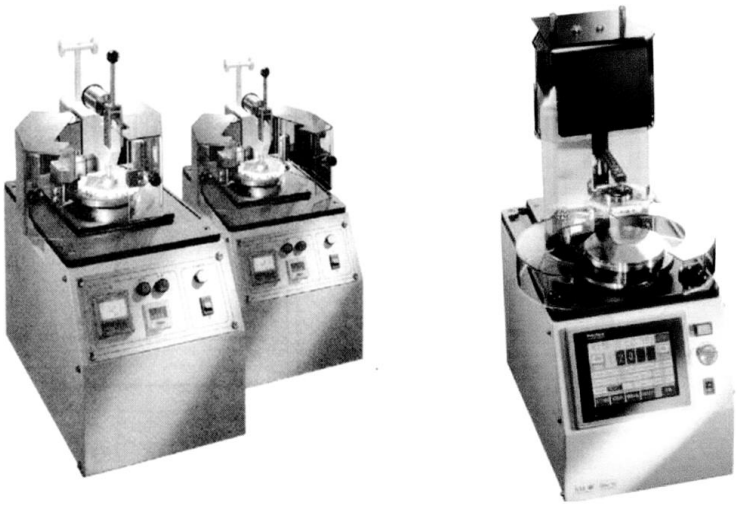
Ruční leštění (pouze mnohovidová vlákna) – Pod leštící film se vkládá podložka podle typu konektoru, v případě plochých konektorů je podložka tuhá (skleněná), v případě

PC konektorů je pružná (pryž, měkká plastická hmota). Pro kolmé uložení konektoru je použito leštící kolečko. Nejprve se leští pod malým tlakem ve tvaru osmičky na filmu s hrubostí 9 μm, dokud není lepidlo z čela konektoru zcela odstraněno. Dále leštíme pod větším tlakem na filmu s hrubostí 1 μm. Finální lesk můžeme ještě zlepšit krátkým doleštěním na filmu s hrubostí 0,3 μm. Proces leštění kontinuálně kontrolujeme mikroskopem. U konektoru s PC leštěním nesmí leštění probíhat příliš dlouho, jelikož by se vlákno mohlo brousit rychleji než materiál ferule a ve vlákně by tak vznikl otvor, který by absorboval brusná zrna.

Malé leštičky – Mají uplatnění hlavně v laboratořích, nebo při osazování konektorů v terénu. Proces je totožný s ručním leštěním, jen je méně náročný na zápěstí leštícího a leštění probíhá rychleji. Po nabytí jistého cviku pracovník získá zkušenosti, jak dlouho a s jakým tlakem na těchto leštičkách pracovat.

Velké leštičky – Slouží k leštění velkého počtu konektorů a zároveň k dosažení vysoké kvality pro různé typy konektorů. Příprava konektorů zůstává stále stejná. Parametry nastavení leštičky, jako je tlak, či hrubost leštění jsou definovány výrobcem konektoru nebo výrobcem leštičky. Díky tomu je přesně definována i stále stejná výstupní kvalita konektorů. K leštění se používají leštící kotouče o průměru 10 cm. Kotouče s oxidem hlinitým jsou levné, ale vystačí pouze pro jedno leštění 6 až 18 konektorů. Kotouče s diamantem sice vydrží až 20x více, ale jsou také mnohem dražší. Finální leštění se většinou provádí na kotoučích o hrubosti 1 μm pro mnohovidová vlákna a 0,3 μm pro jednovidová vlákna. V těchto leštičkách se konektory leští i jako APC, se sklonem většinou 8°.

Leštění je většinou velice individuální věc. Různé firmy mají pro leštění konektorů různorodé postupy



Obrázek 17: Velké leštičky konektorů

4.2.5 Používání konektorů HotMelt

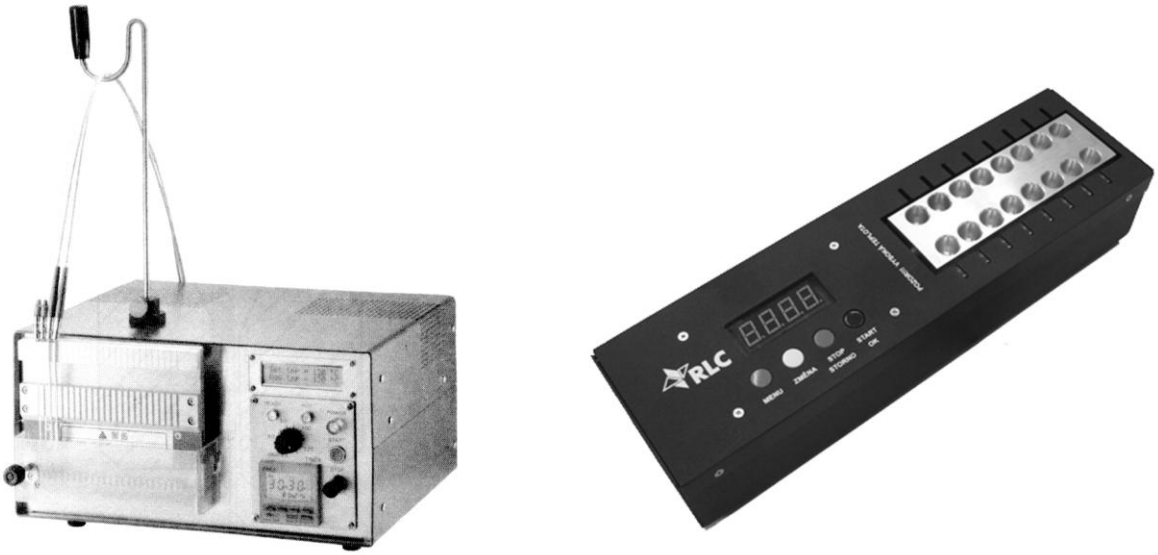
Konektory HotMelt firmy 3M se montují speciálním postupem. Tyto konektory, jsou již z výroby naplněny lepidlem, které je za pokojové teploty ztvrdlé. Příprava vlákna je shodná s předchozími způsoby. Konektor se musí ohřát (asi 10 minut při teplotě 250°C), po té se může vsunout vlákno i s kevlarem dovnitř konektoru. Po vychladnutí (asi 3 až 4 minuty) je možné konektor leštit. Konektor se leští na přesně definovaných brusných papírech s hrubostí nejprve 5 μm a poté 1 μm.

Výhody těchto konektorů:

+ jednoduchá a rychlá montáž
+ nemusí se přidávat žádné lepidlo
+ dvojkrokové leštění

Nevýhody těchto konektorů:

– práce s rozžhaveným konektorem
– kevlar je přichycen ke konektoru pouze lepidlem
– při 60°C lepidlo opět změkne
– teplotní namáhání vlákna – vkládáno je do konektoru o teplotě přibližně 200°C
– vyšší cena



Obrázek 18: Vytvrzovací pícky

5 Rozbor zadání

První bod zadání (Seznamte se s problematikou konektorů pro optická vlákna) je řešen v předešlých kapitolách. Další body vznikly z podnětu firmy RLC Praha a.s., která potřebovala zmodernizovat pec pro vytvrzování konektorů. Společnost RLC je středně velkou akciovou společností zabývající se optickými telekomunikacemi a to jak výrobou a distribucí komponent, tak i zhotovování projektů. Zadání bylo zprvu částečně řešeno jako téma projektu Cepot, kde bylo třikrát úspěšně obhájeno (ve třech tříměsíčních obdobích).

Práci na pecích lze rozdělit do tří částí:

1. Výběr, zkoušení a realizace vhodného typu regulátoru na zpřesnění regulace teploty pece.
2. Návrh a realizace synchronizace vytápění jednotlivých topných komor za účelem snížení špiček odběru elektrické energie.

+ Zvážení možnosti a případná realizace napojení pece k osobnímu počítači, s možností sledování průběhu procesu, zadávání parametrů a ovládání pece.

5.1 Zařízení, na kterých se práce prováděla

Význam pecí pro vytvrzování optických konektorů je již popsán v kapitole o montáži optických konektorů (viz kapitola 4.2). Obzvláště ve velké průmyslové výrobě, jsou vytvrzovací pece nevyhnutelné. Pece používané ve firmě RLC jsou jejich vlastní výroby. Ve firmě jsou tyto velké pece dvě, jedna pěti-komorová a jedna šesti-komorová. Jsou určeny pro hromadné vytvrzování optických konektorů. Jelikož na pecích probíhala stále výroba, musely se zkoušky prováděné na pecích co nejvíce časově minimalizovat, aby nebyla výroba příliš zdržována.

Podmínkou zadání bylo, neměnit dobře pracující hardware. Pec se dohromady skládá z 6 nebo 5 topných komor, kde na každou komoru připadá jedna řídicí jednotka, jedno topení, jeden čelní ovládací panel a síťový vypínač. Tímto složením se stává z každé komory autonomní systém, nezávislý na ostatních komorách. Pec je ovládána pomocí 4 tlačítek a numerického LED displeje. Topení je zajišťováno topným tělesem o výkonu cca 0,5 kW, které je vloženo do hliníkového zářiče. Hlavním obvodem řídicí jednotky je mikroprocesor Atmel AVR ATmega8535, který se stará jak o komunikaci s obsluhou (tlačítka, displej, sériový port), tak pomocí polovodičového relé zapíná a vypíná vytápění. Každá deska řídicí jednotky obsahuje svůj vlastní napájecí zdroj, jednotlivé komory tak mohou pracovat

nezávisle a je snížena možnost vzniku hromadných poruch. Každá deska dále obsahuje dvojici optočlenů napojených na vstup a výstup sériového portu mikroprocesoru, pomocí kterých je možné zrealizovat komunikaci mezi řídicími jednotkami.

Obrázek 19: Ovládání jedné topné komory velké pece

Obrázek 20: Malá pícka HotMelt

Ve firmě RLC se dále vyrábějí malé pícky HotMelt, které se prodávají zákazníkům, aby si v menším měřítku mohli konektory osazovat sami. Pícka má kapacitu 16 konektorů.

Tato pícka je zapojením téměř totožná s jednou komorou velké pece. Rozdíly jsou pouze ve zvukové signalizaci ukončení procesu vytvrzování, kterou jsou malé pícky vybaveny a v chybějící komunikační části. Rozdíl je dále v použitém teplotním čidle. Ve velkých pecích je použito integrované polovodičové čidlo SMT-160-30 a v malých píckách se používá termistor KTY84. Tyto pícky slouží i k práci se speciálními konektory typu Hotmelt.

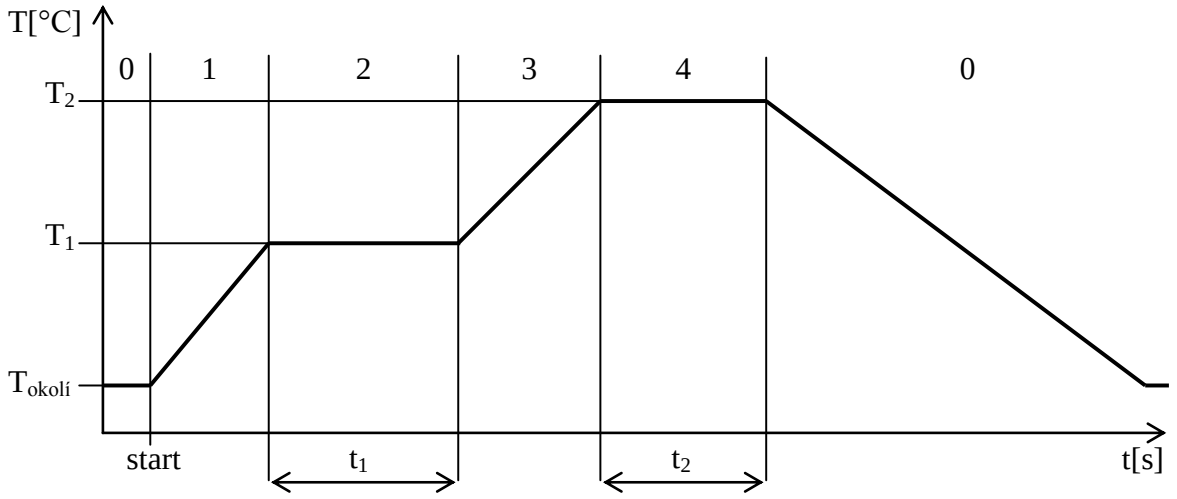
5.2 Řízení teploty

5.2.1 Požadavky na řízení

Jelikož při vytvrzování epoxidových lepidel docházelo k velkým pnutím vláken uvnitř konektorů, byl zaveden postup dvoufázového topení. První fáze je předehřívání, kde se konektor ponechá po dobu asi deseti minut a poté teprve dochází k vyhřátí na konečnou teplotu. Z důvodu objemu výroby je nutné vypékání co nejvíce zkrátit, ale zachovat dostatečné kvality výstupních konektorů. Výsledná teplota musí být dosažena v co nejkratším čase a s dostatečnou přesností (zvoleno ± 2°C). Jelikož pec reaguje velice pomalu, jsou veškeré překmity nežádoucí. U malých pecí dvoufázové vytápění neprobíhá.

Jednotlivé režimy chodu pece (viz Obrázek 21):

Režim 0	- regulátor je nečinný
Režim 1 (aktivní)	- vyhřívání na teplotu T_1
Režim 2	- udržování teploty T_1
Režim 3 (aktivní)	- vyhřívání na teplotu T_2
Režim 4	- udržování teploty T_2



Obrázek 21: Režimy chodu pece

V menu lze dále zvolit režim stálého předehřívání (ACTV), kdy dochází hned po zapnutí přístroje (bez stlačení tlačítka START) k vytápění na hodnotu T_1 a udržování teploty T_1 probíhá i po skončení vytvrzování.

5.2.2 Původní řešení regulace

Před začátkem návrhu nového softwaru bylo nutné přečíst a porozumět původnímu, který byl napsán v programovacím jazyce C. Program obsahoval rutiny na obsluhu tlačítek a displeje, které byly použitelné i pro nové řešení.

Řízení teploty bylo realizováno softwarovým dvoupolohovým regulátorem s nastavitelnou hysterezí. Teplota byla měřena přímo na zdroji tepla a ne v místě kde se nacházejí konektory. To způsobuje nepřesnost, protože regulátor řídí jinou teplotu než teplotu prostředí, ve kterém se konektory nacházejí. Další nepřesnost vznikla nedostatečným počtem vzorků pro výpočet teploty.

Ovládání pece pomocí tlačítek bylo velice nepohodlné, jelikož program vykazoval velikou necitlivost na stisk tlačítek, většinou se muselo 1 – 2 sekundy počkat se stisknutým tlačítkem, dokud se požadovaná operace neprovedla. Zpoždění bylo způsobeno špatným odečítáním hodnot z A/D převodníku, které se místo přerušení odehrávalo v hlavním cyklu programu.

5.3 Synchronizace pecí a připojení PC

Pec je připojena na elektrickou síť o napětí 230V. Příkon jedné komory činí cca 500 W. Zapnutí všech komor vyvolá proud cca 13 A, který nadměrně zatěžuje elektrickou síť závodu a navíc většinou spolu s dalšími zařízeními připojenými k síti způsobuje odpojení napájení jističi.

Při normálním provozu, kdy už je žádané teploty dosaženo a teplota je pouze udržována na stejné hodnotě, probíhá vytápění (při použití dvoupolohového regulátoru) pouze z 30 procent času vytvrzování. Kdyby se jednotlivé komory mohly synchronizovat a při vytápění se střídaly, mohly by běžet všechny najednou, aniž by docházelo k výpadku proudu.

Aby se řídicí procesy mohly synchronizovat, je nutná komunikace mezi řídicími jednotkami. Z tohoto důvodu byla již při jejich návrhu každá řídicí jednotka vybavena sériovým rozhraním s optočleny. Díky sériovému rozhraní se nabízí možnost připojit celé zařízení k osobnímu počítači, sledovat jeho chod a zadávat parametry, které se jinak musí složitě zadávat pomocí 4 tlačítek. Původně však nebyla obsluha sériového rozhraní do původního programu řídicí jednotky zakomponována, takže sériové rozhraní nebylo využíváno a tedy nebyla možná ani synchronizace ani komunikace s PC.

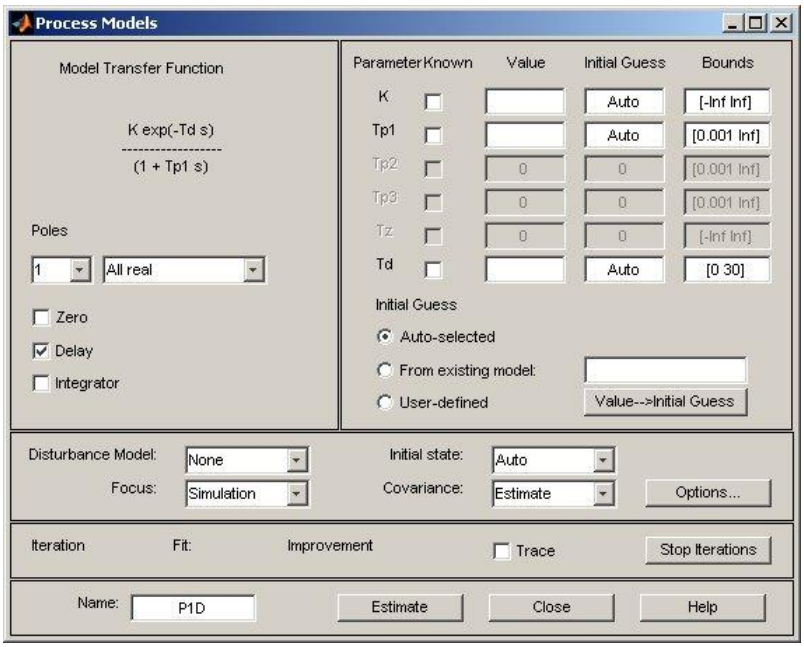
6 Řešení

Řešení bylo pro přehlednost rozděleno do několika podkapitol, podle jednotlivých samostatně řešených částí. U každé části budou nejprve vysvětleny možná řešení a následně řešení vybraná v konkrétním případě.

6.1 Identifikace modelů pecí

Pokud chceme pracovat s nějakým skutečným systémem a realizovat jeho řízení, je třeba ho nejprve identifikovat jako systém a to buď jako systém stavový, vyjádřený přenosem, nebo nějaký ze statistických modelů (ARX, ARMAX, …) [8]. Pro identifikaci systému se používá několik možných způsobů založených na stejném principu: Podle známého vstupu a výstupu (známý časový průběh, frekvenční závislost, při stavovém popisu i jednotlivých stavů) můžeme relativně přesně identifikovat systém. Pro vybuzení výstupní veličiny se většinou používá skok vstupní veličiny, či sled harmonických signálů o různých kmitočtech. Jednou z přesnějších možností je použít několikanásobný skok na různé hodnoty.

Pro identifikaci přenosů jednoduchých systému z naměřených dat lze využít jednoduchého nástroje „Estimating Process Models“ z Matlab Identification toolbox, který je v Matlabu obsažen od verze Matlab R2006b. Tímto nástrojem si jednoduše můžeme zvolit řád přenosu, počet a polohu pólů, nul a velikost dopravního zpoždění. Bližší informace nalezneme v [11], náhled viz Obrázek 22.



Obrázek 22: Estimating Process Models

6.1.1 Identifikace velké pece

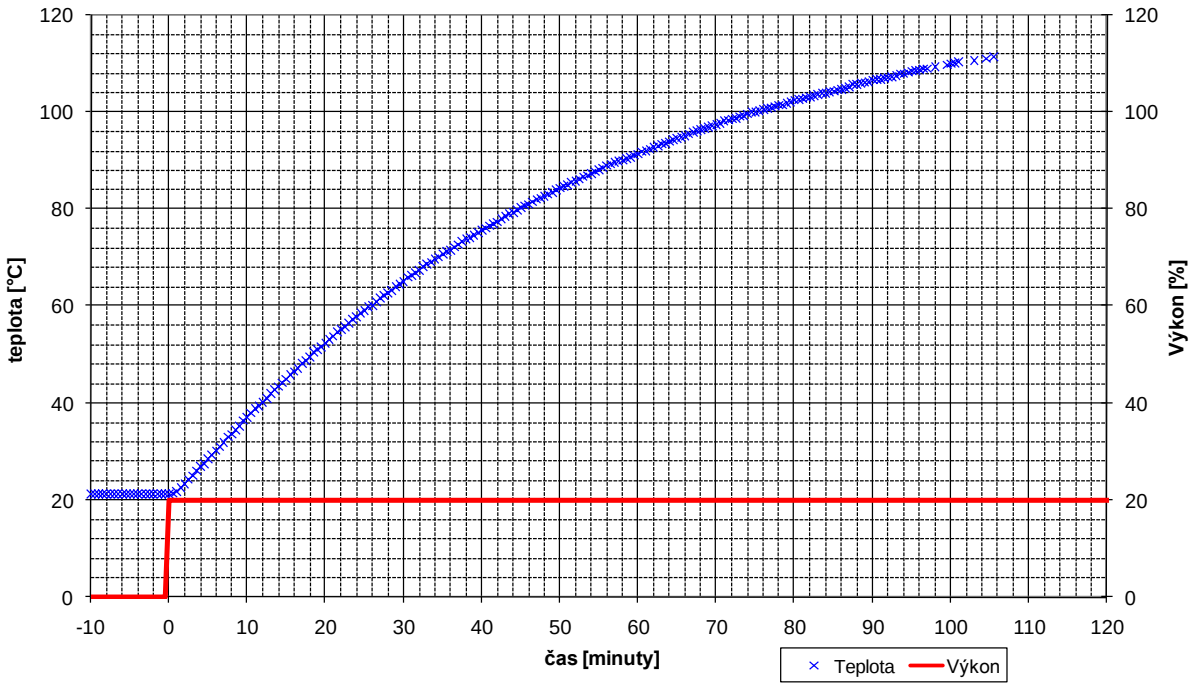
Identifikace velké pece byla provedena několikrát. Poprvé model soustavy nevyhovoval, jelikož u pece nebyla zavřená dvířka, čímž vzniklo odlišné prostředí od prostředí při vytvrzování konektorů. Další dva modely se lišily místem měření teploty, první přenos je vztah elektrického výkonu (rozsah 0 až 256) vůči teplotě tepelného zářiče, kde byla teplota měřená původně.

$$G_1 = \frac{K}{(1+T_{P1}s)(1+T_{P2}s)} = \frac{5{,}236}{(1+52{,}709s)(1+1{,}3043s)}$$

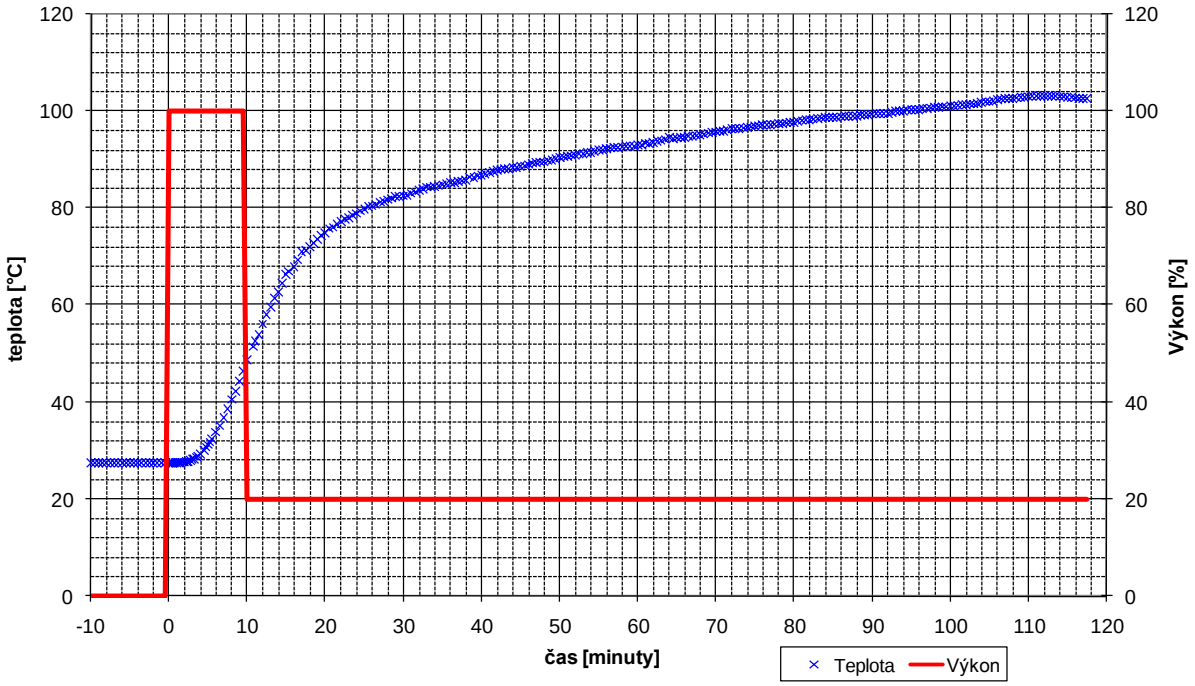
Druhý přenos je vztah elektrického výkonu vůči teplotě měřené v novém umístění čidla 8 mm od zářiče (Obrázek 25), což bylo nově zvolené místo pro přesnější měření teploty v místě, kde se vytvrzují konektory.

$$G_2 = \frac{K}{(1+T_{P1}s)(1+T_{P2}s)} e^{-T_D s} = \frac{4{,}3174}{(1+79{,}744s)(1+1{,}8235s)} e^{-1{,}8235s}$$

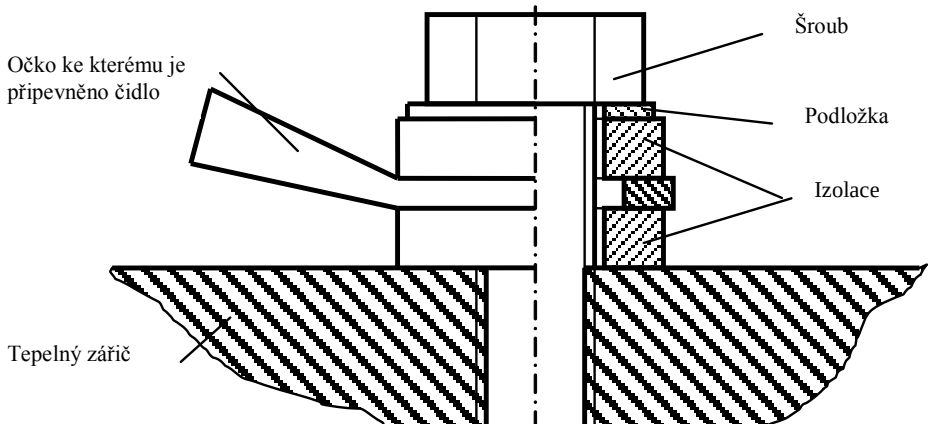
První přenos byl identifikován, jako odezva na jednotkový skok z výkonu o hodnotě 0 % na 20 %. Při identifikaci druhého přenosu, byl na vstup nejprve přiveden krátký skok 100 % výkonu a poté byl výkon udržován na hodnotě 20 %. Všechny časové konstanty přenosů jsou v minutách. Teplota byla měřena s periodou vzorkování 30 sekund.



Obrázek 23: Odezva na jednotkový skok při identifikaci G_1



Obrázek 24: Odezva na vstupní průběh při identifikaci G_2



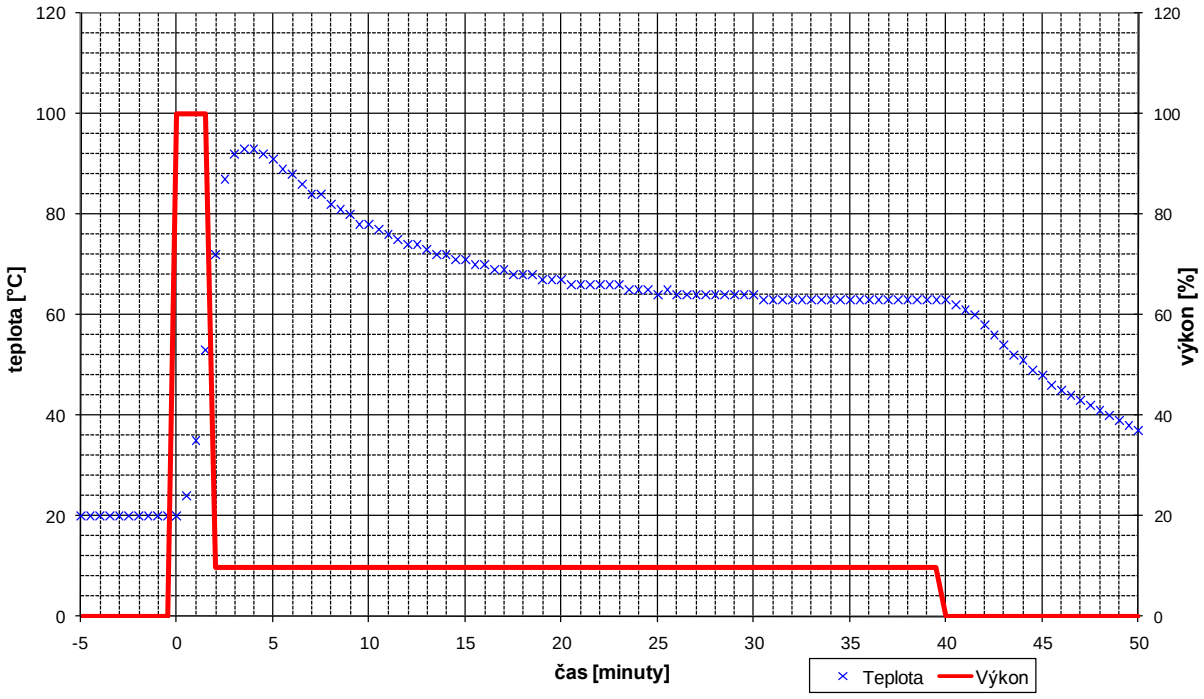
Obrázek 25: Připevnění čidla – izolace o šířce 8 mm

6.1.2 Identifikace malé pece

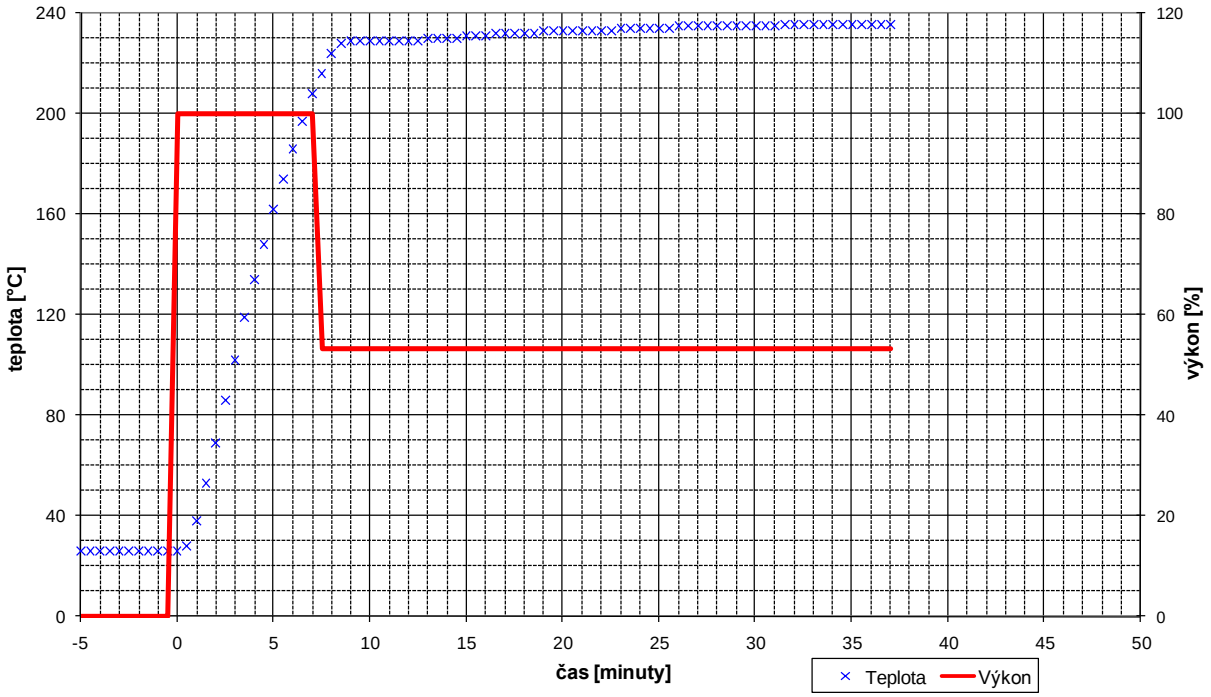
Přenos malé pece byl identifikován pomocí shodného typu vstupního průběhu jako druhý přenos velké pece. Pro potřeby identifikace byla do softwaru malé pece zakomponována rutina usnadňující identifikaci. Při spuštění této rutiny se musí zadat délku pulzu o hodnotě výkonu 100 %, hodnotu následujícího výkonu a periodu vzorkování. Vstupní signál je tím generován automaticky a při čase odečítání hodnoty pec upozorní pípnutím a na displeji ukáže na 2 sekundy aktuální čas měření.

Přenos malé pece je zatížen nelinearitou způsobenou proměnným proudem vzduchu ochlazujícím blok topení. Proud vzduchu je z konstrukce pece závislý na napětí zdroje, které kolísá s počtem sepnutých segmentů na displeji a zapnutím LED signalizujícím vytápění. Pro běžnou funkci není toto kolísání nijak závažnou chybou. Systém byl identifikován ve dvou pracovních bodech nalézajících se na protilehlých krajních oblastech intervalu vytvrzovacích teplot a to při ustálené hodnotě zhruba 60 a 240°C. Hodnoty identifikovaných přenosů byly zprůměrovány do výsledného přenosu. Všechny časové konstanty přenosu jsou v minutách.

$$G = \frac{1{,}487}{s^2 + 3{,}329s + 0{,}3346}$$



Obrázek 26: 1. odezva na průběh při identifikaci přenosu



Obrázek 27: 2. odezva na průběh při identifikaci přenosu

6.2 Řízení teploty

Pro řízení teploty lze použít mnoho regulátorů (od jednoduchých stavových regulátorů, přes PID regulátory, až po složité regulátory splňující různá kvadratická nebo robustní kritéria). Pro výběr je třeba zvážit vhodnost použití pro daný regulační proces a také např. výpočetní náročnost. Následující kapitoly se zabývají pouze velkou pecí, malé peci je věnovaná kapitola 6.6.

6.2.1 PWM (Pulse-width modulation)

Regulace těchto pecí probíhá nespojitě jak z amplitudového hlediska tak z hlediska časového. Vše je dáno spínáním výkonu topného tělesa polovodičovým relé, které spíná s maximální frekvencí 100 Hz. Elektronika v elektronickém relé hlídá průchod střídavého proudu nulou a spíná a odpíná zátěž právě v tento čas. Skutečné spojité řízení není z finančních důvodů možné a je i zbytečné. Amplitudová spojitost řízení je vytvářena převedením dvou úrovní (zapnuto – vypnuto) na 256 úrovní pomocí PWM. Perioda řízení je určena maximální periodou 16–ti bitového čítače procesoru AVR, kterým se PWM vytváří.

$$T_{\max} = \frac{1024 \cdot 2^{16}}{f_{OSC}} = \frac{1024 \cdot 2^{16}}{4096000} = 16{,}384\, s$$

Procesory AVR obsahují hardwarovou podporu pro tvorbu PWM, která se zde nedala použít, protože výstupní pin 16–ti bitového čítače byl na desce plošného spoje již obsazen jako výstup pro displej.

6.2.2 Výběr vhodného typu regulátoru

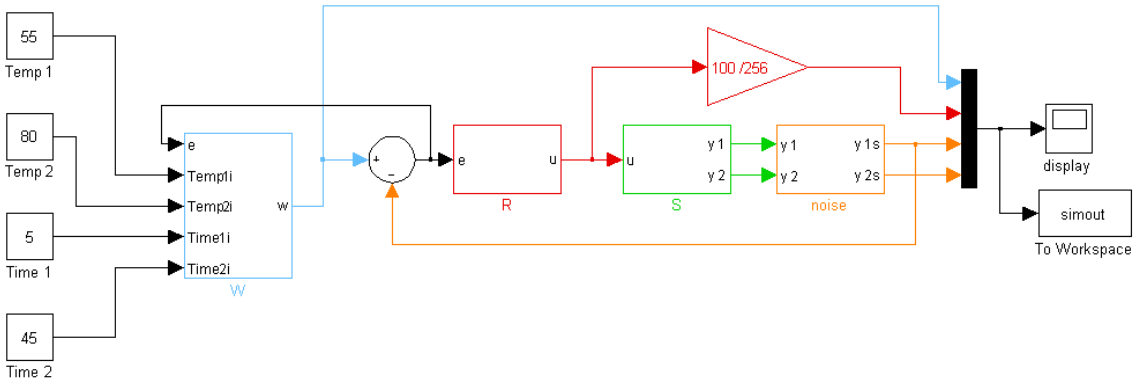
První navrženou možností bylo použít již implementovaný dvoupolohový regulátor a doplnit ho o PID regulátor. Konstanty regulátoru by se spočítaly pomocí metody ekvivalentního přenosu (viz [13]). Po bližším prozkoumání této metody bylo zjištěno, že je pro náš případ nepoužitelná, jelikož předpokládá symetrický výstup (např. ± 1). Náš výstup je možný pouze (1, 0 – zapnuto, vypnuto), čímž se definitivně odstoupilo od použití dvoupolohového regulátoru a dále se předpokládalo využití PWM.

Při využití PWM se uplatní velká nelinearita zapříčiněná omezením výstupu od 0 do 100 % výkonu. Náběh na požadovanou teplotu je požadovaný co nejrychlejší, z čehož vyplývá, že značnou část času se regulátor bude pohybovat právě na mezi 100 % výkonu. Návrh regulátoru nějakou sofistikovanější metodou (algebraické metody syntézy, optimální regulátory) není v takovém případě možný. Jediný vyhovující regulátor (z těchto pokročilých) je prediktivní regulátor s omezeními, který dokáže omezení výstupu uvažovat. Regulátor je bohužel příliš složitý (numerická metoda – kvadratické programování) k tomu, aby se dal naprogramovat do mikrokontroléru.

Nakonec byl vybrán PID regulátor, jehož konstanty byly navrženy empirickou metodou ručního seřizování [13]. Provádění této metody na reálném systému by zabralo neúměrně dlouhý čas, avšak nastavování konstant na modelu v programu Simulink trvalo jen několik minut. K regulátoru byla dále přidána rutina, která odhaduje stav pece a podle něj před začátkem řízení přednastaví hodnotu integrační složky.

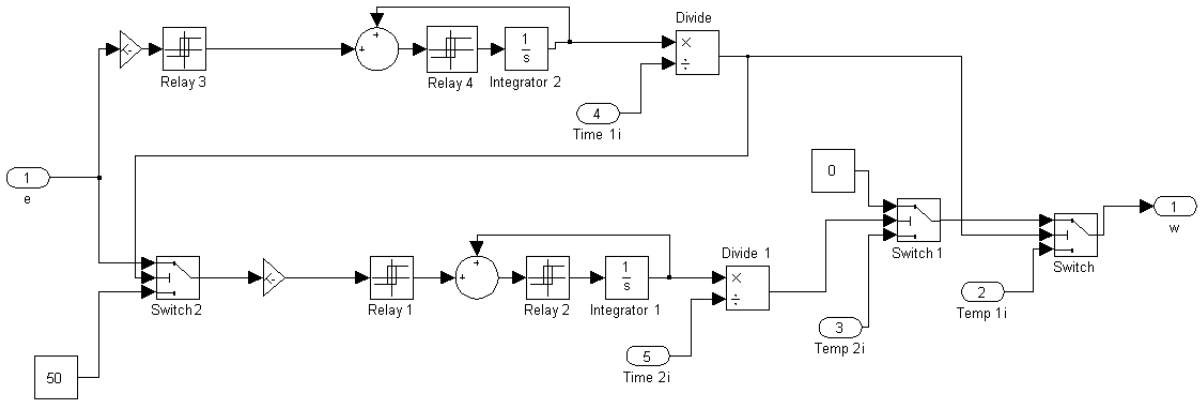
6.2.3 Regulační schéma v programu Simulink

Regulační schéma bylo rozděleno do několika bloků: Konstanty (teploty a časy – černé), vytváření reference (světle modré), regulátor (červený), přenosy soustavy (zelené), šum (oranžový) a vizualizace (černá).



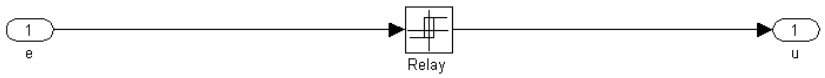
Obrázek 28: Regulační schéma pro jeden typ regulátoru

Blok „vytváření reference“ (Obrázek 29) slouží pro generování hodnoty žádané teploty. Na začátku je reference nastavena na hodnotu předehřívací teploty (Temp 1), po dosažení této hodnoty dochází k udržování teploty po čas předehřívání (Time 1). Po předehřívání je nastavena vytvrzovací teplota (Temp 2). Po dosažení této hodnoty dochází k udržování teploty po čas vytvrzování (Time 2). Po dokončení vytvrzovacího procesu dochází k přerušení vytápění.

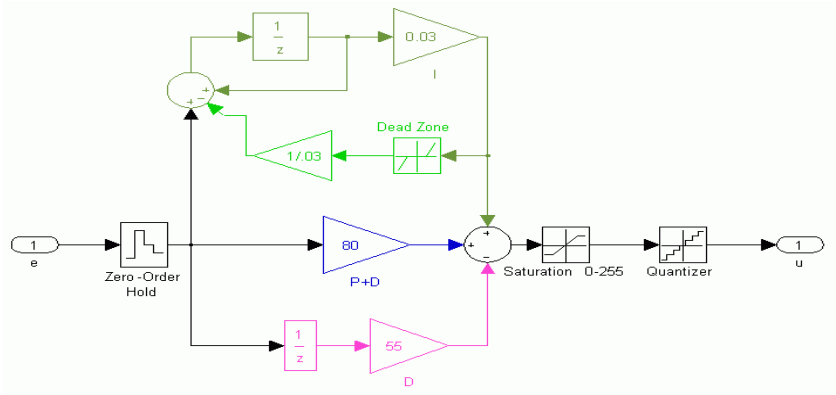


Obrázek 29: Blok „vytváření reference“

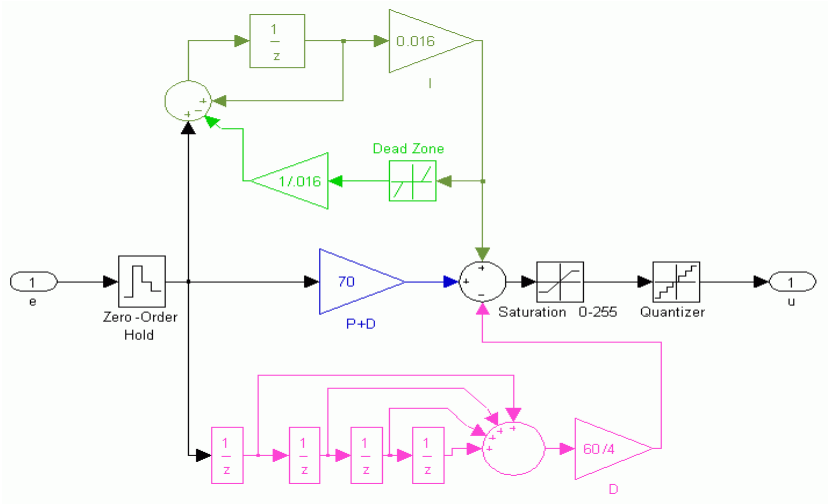
Blok regulátoru se liší podle použitého regulátoru. Namodelovány byly tři, původně použitý dvoupolohový regulátor s hysterezí, první typ PID regulátoru, který ještě řídil teplotu zářiče topení a poslední použitý regulátor PID s aproximovanou D složkou, který je použit při řízení teploty vzduchu. U regulátorů PID obsahuje tento blok kromě konstant P, I a D i zpětnovazební obvod, který chrání regulátor proti efektu „wind-up“ (integrování odchylky do nesmyslných hodnot).



Obrázek 30: Blok dvoupolohového regulátoru

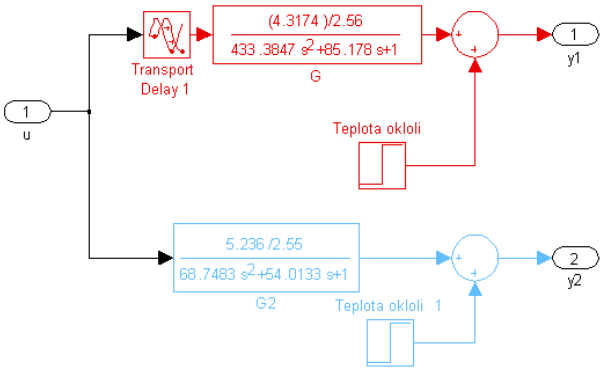


Obrázek 31: Blok první verze PID regulátoru



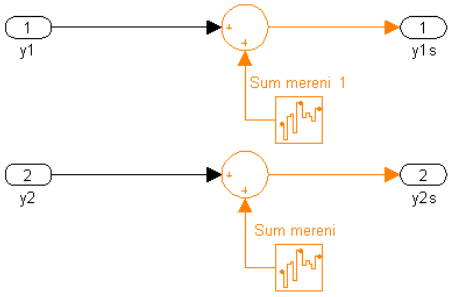
Obrázek 32: Blok druhé verze PID regulátoru s aproximovanou D složkou

Blok přenosů soustavy (Obrázek 33) obsahuje oba identifikované přenosy velké pece, výkon vytápění vůči teplotě na tepelném zářiči a vůči teplotě vzduchu. Dále zde dochází k přičítání teploty okolí.



Obrázek 33: Blok přenosů soustavy

Jelikož v reálném systému nikdy neměříme žádné veličiny bez šumu, byl i do tohoto modelu přidán blok šumu (Obrázek 34).

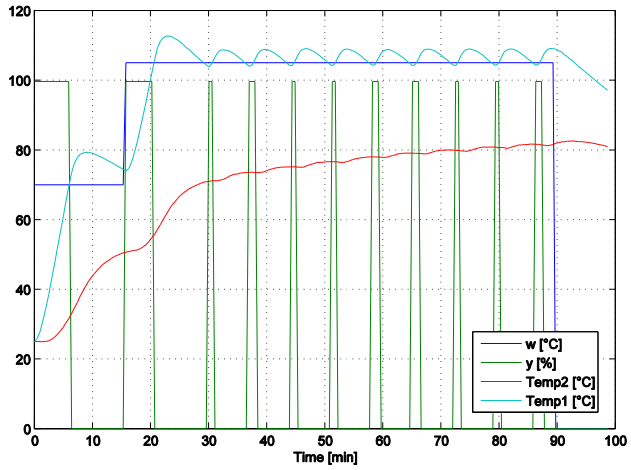


Obrázek 34: Blok šumu

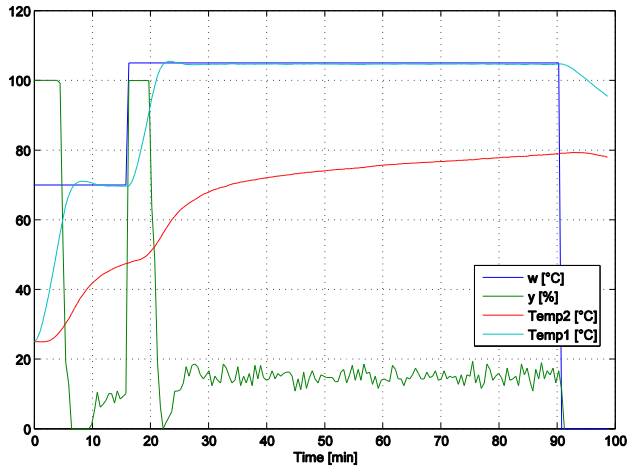
Nakonec se důležité veličiny vykreslí do grafu a uloží jako proměnné do paměti v Matlabu.

6.2.4 Výsledky simulací

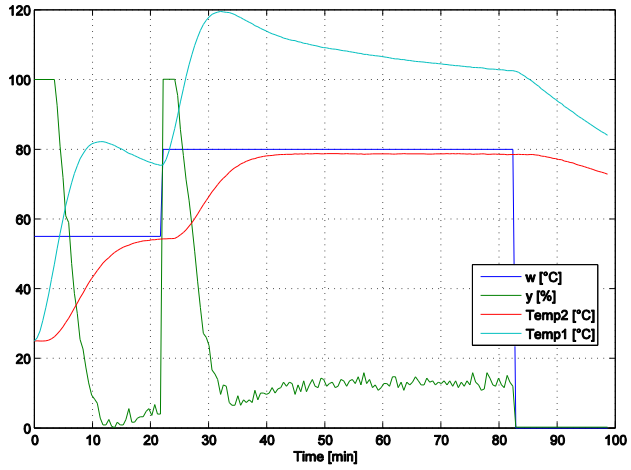
Simulace byly prováděny pro všechny tři regulátory popisované výše. Výsledky těchto simulací viz Obrázek 35, Obrázek 36 a Obrázek 37. Zelenou barvou je znázorněna akční veličina, modrou žádaná hodnota, tyrkysovou teplota na tepelném zářiči a červenou teplota vzduchu. Porovnání jednotlivých druhů regulace viz Obrázek 38 a Obrázek 39 (schéma viz Obrázek 40). Červenou barvou jsou znázorněny průběhy při použití dvoupolohového regulátoru, zelenou PID regulátoru prvního typu a modrou druhého typu. Srovnání změřených a simulovaných hodnot v kapitole 7.



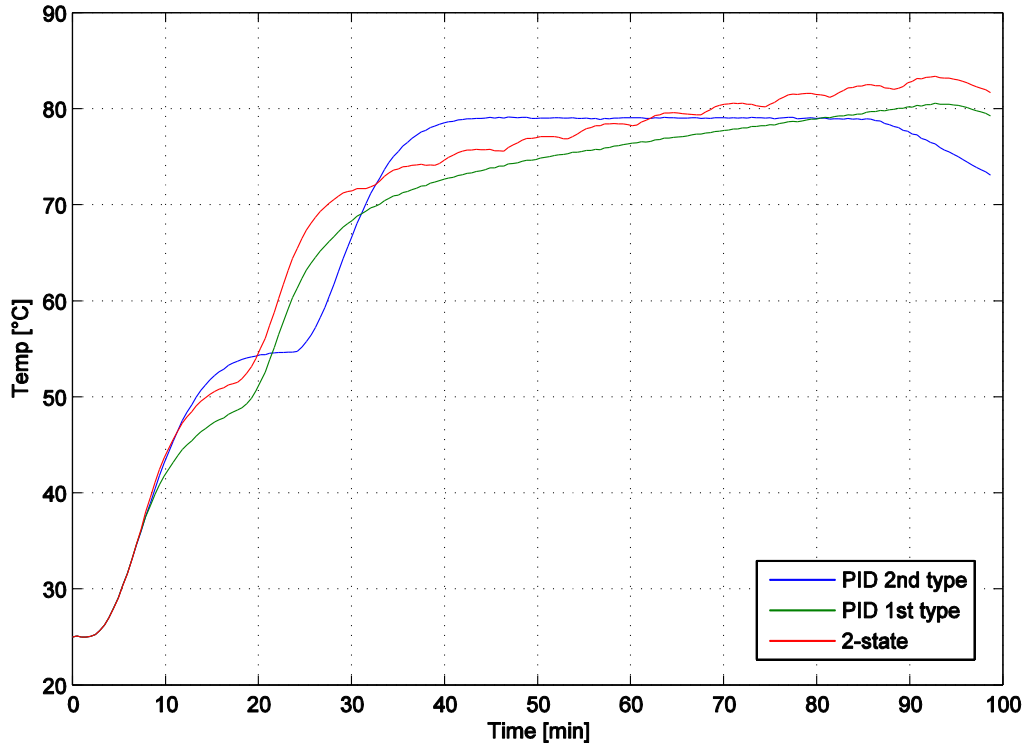
Obrázek 35: Regulace dvoupolohovým regulátorem



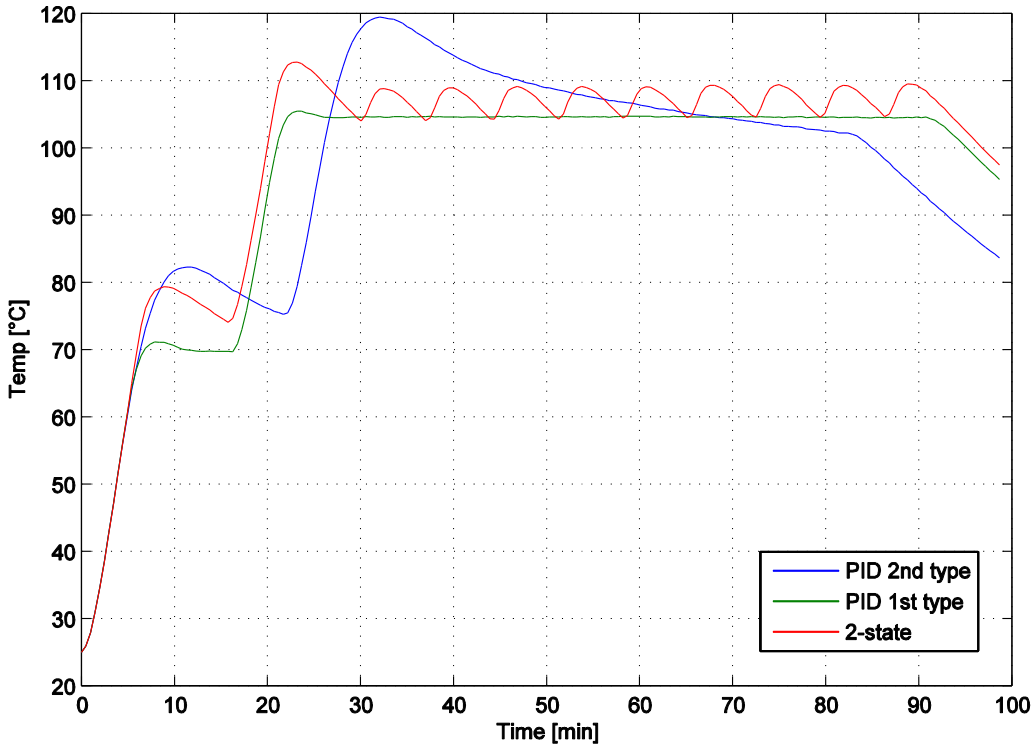
Obrázek 36: Regulace prvním typem PID regulátoru



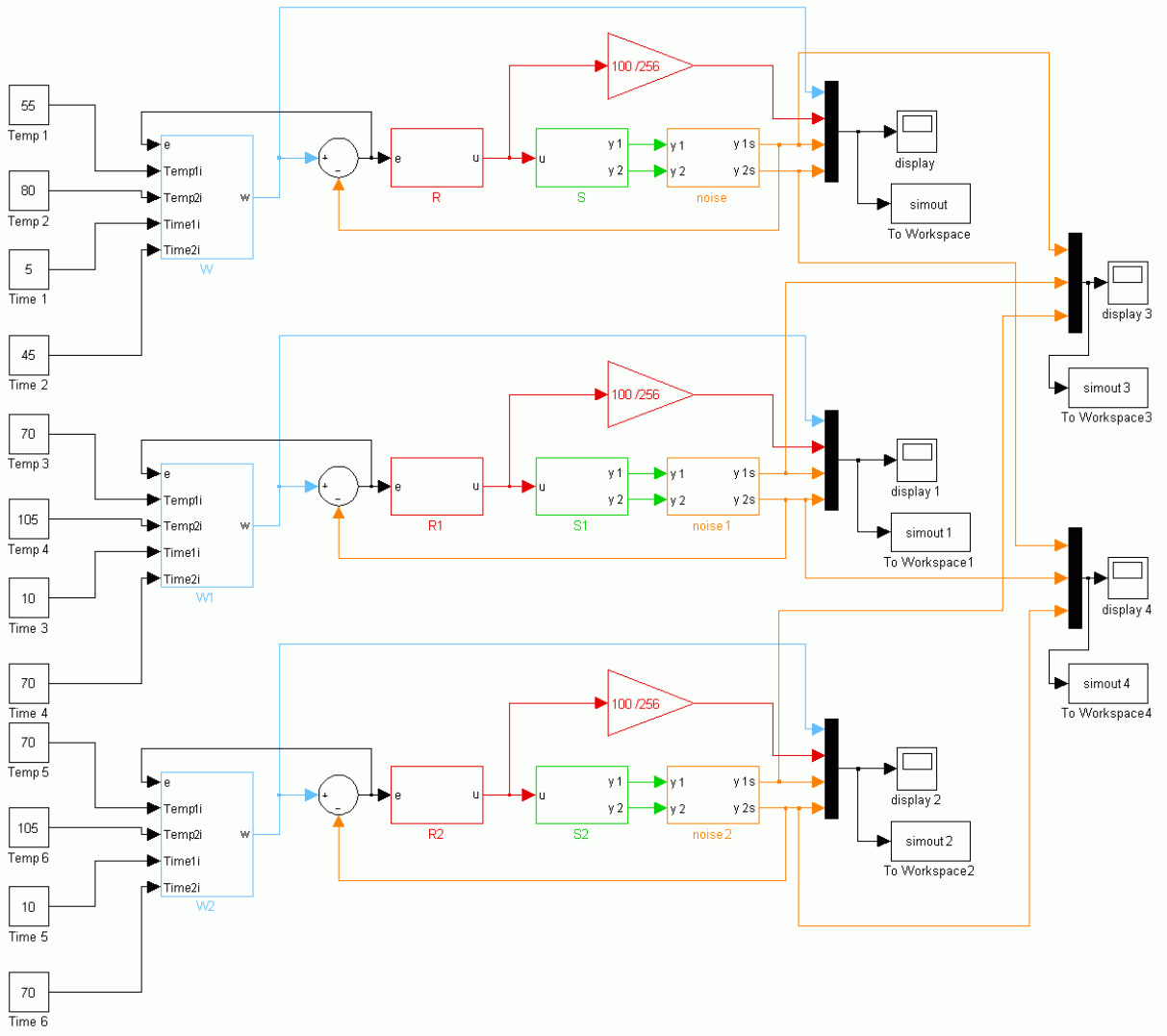
Obrázek 37: Regulace druhým typem PID regulátoru



Obrázek 38: Porovnání teploty vzduchu pro tři typy regulátorů



Obrázek 39: Porovnání teploty tepelného zářiče (topení) pro tři typy regulátorů



Obrázek 40: Schéma pro porovnání různých typů regulátorů

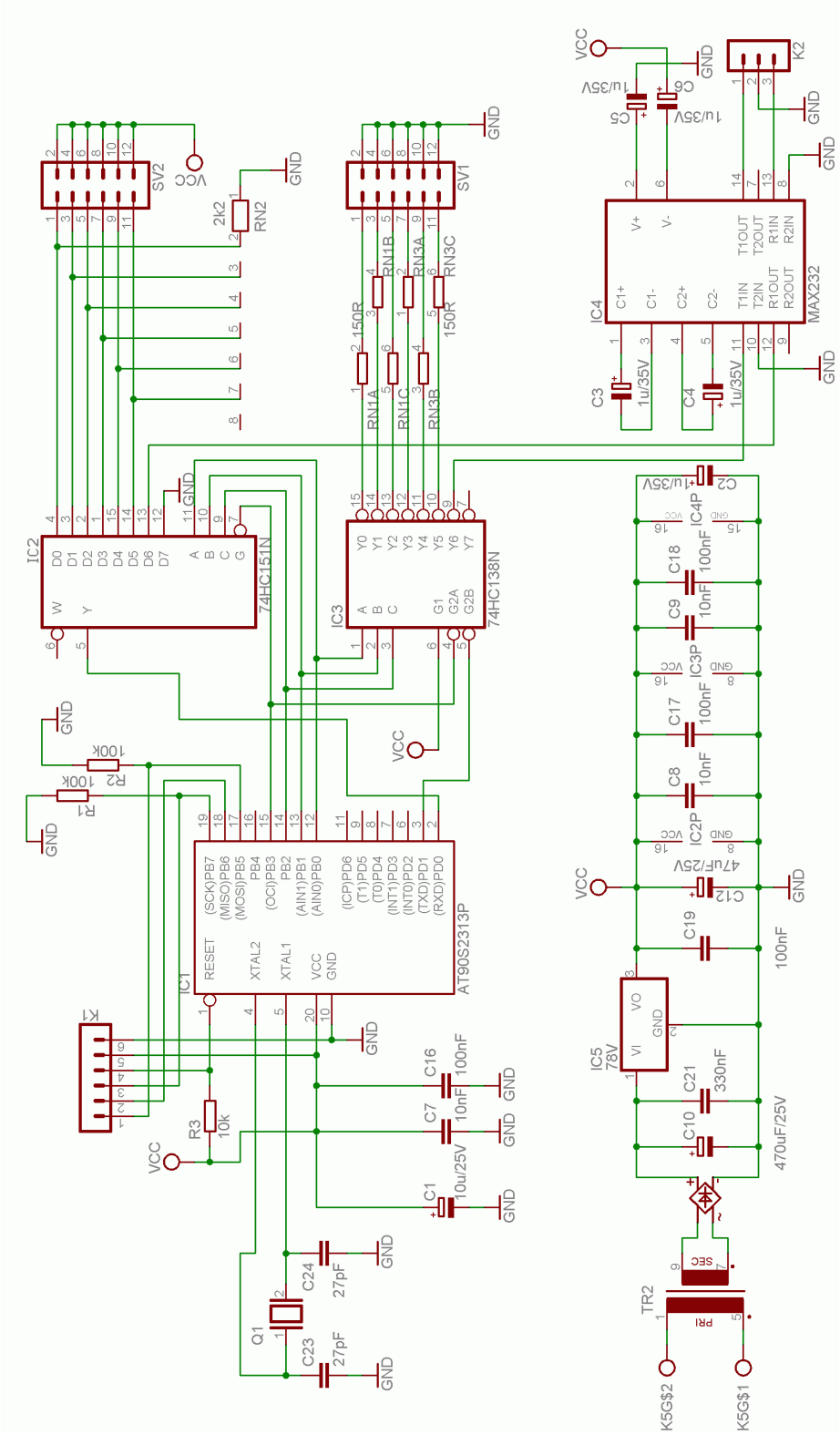
6.3 Synchronizace topných komor

Z důvodů uvedených v kapitole 5.3, bylo nutné realizovat synchronizaci topných pecí. Nejedná se o nic jiného, než o rozvrhování sdílených prostředků (viz např. [15]). Pro účely této práce však nebyly použity složité teorie, sdílení bylo řešeno pouhým čekáním, na dokončení probíhajícího procesu.

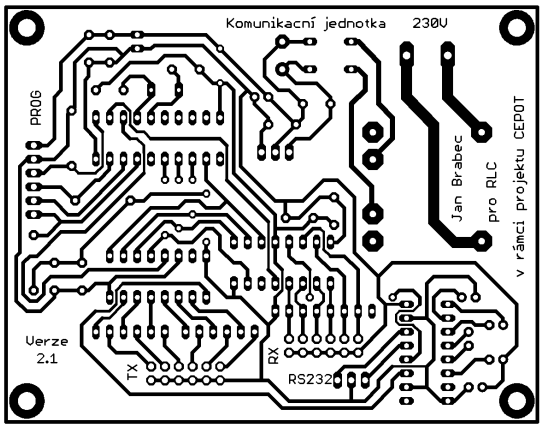
6.3.1 Komunikační jednotka (KJ)

Pro komunikaci mezi jednotlivými řídicími jednotkami byla vytvořena komunikační jednotka, která je nadřazeným prvkem (serverem) v komunikaci. Rozděluje práva pro přechod do aktivních režimů (režimy, kde je zapotřebí velkého výkonu, jelikož ještě není dosaženo žádané hodnoty – Obrázek 21), provádí synchronizaci časovačů vytvářejících PWM a vytváří jakýsi můstek mezi řídicími jednotkami a počítačem.

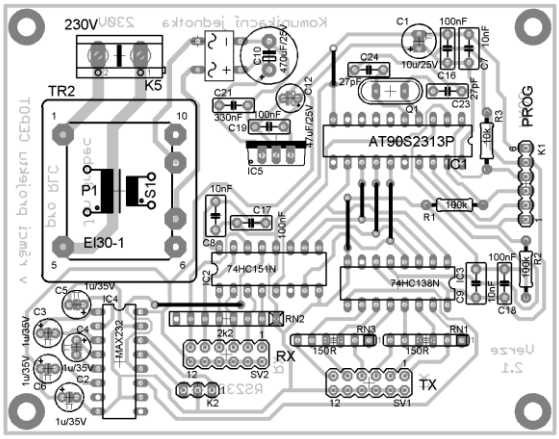
Komunikační jednotka byla vytvářena jako zcela nové zařízení. Fyzicky se skládá ze zdroje, z procesoru, multi- a demulti-plexerů sloužících k přepínání komunikace k jednotlivým řídicím jednotkám a obvodu MAX232 pro možné spojení s počítačem.



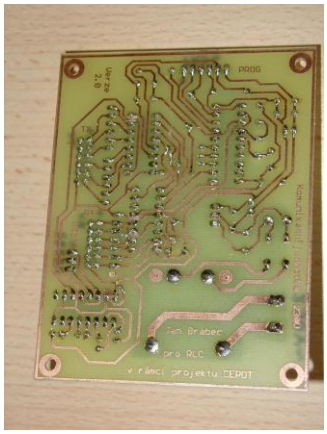
Obrázek 41: Schéma komunikační jednotky



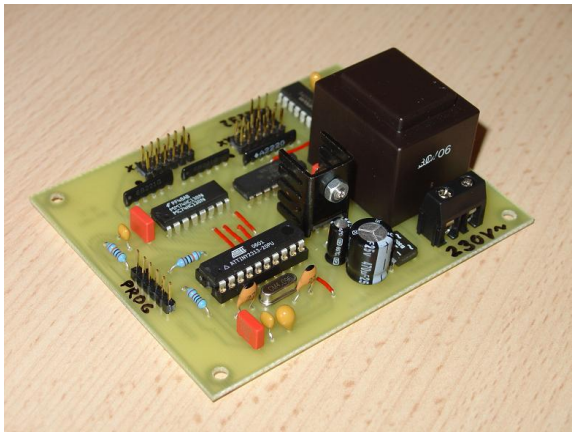
Obrázek 42: Motiv plošného spoje KJ



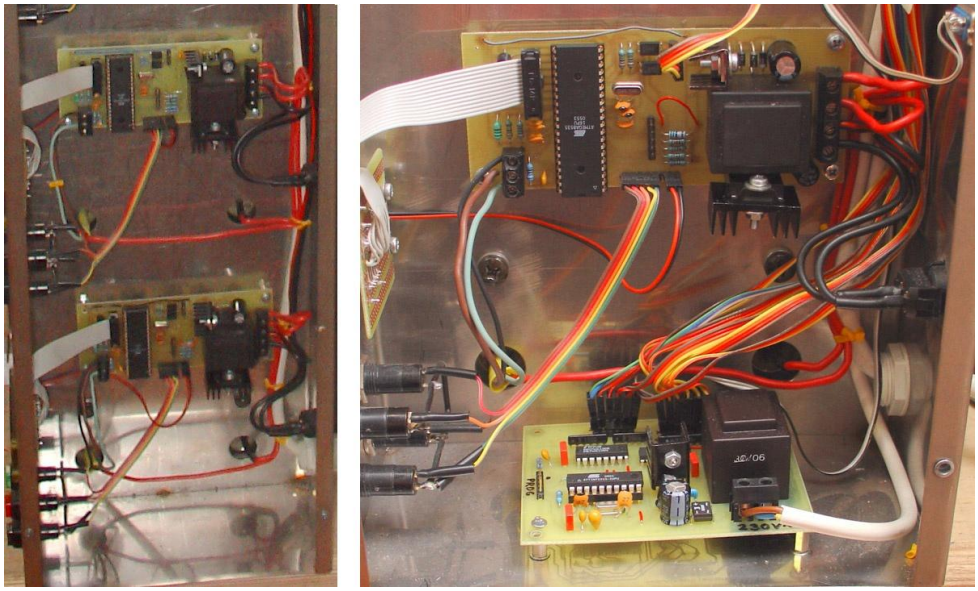
Obrázek 43: Osazovací výkres KJ



Obrázek 44: Foto plošného spoje KJ – strana spojů



Obrázek 45: Foto plošného spoje KJ – strana součástek



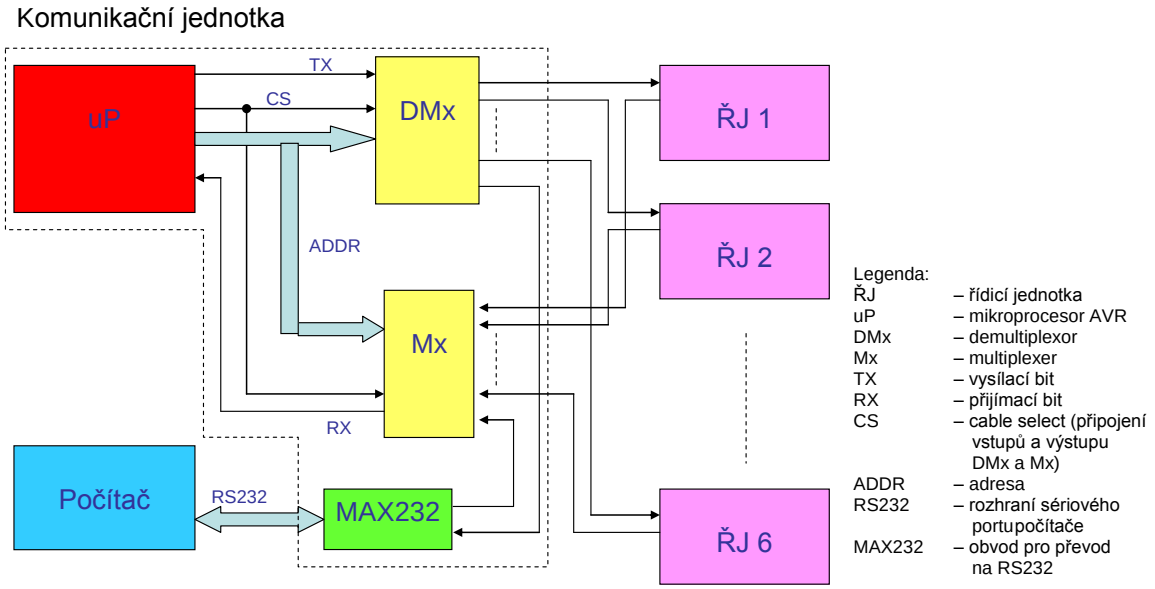
Obrázek 46: Porovnání vnitřku pece bez a se zapojenou KJ

Zde uvedená verze komunikační jednotky je druhou verzí. První verze nebyla zcela funkční, obsahovala chybně zapojené oddělovací optočleny. Ty byly z nové verze odstraněny, ukázalo se, že pro dostatečnou rychlost by bylo třeba jejich buzení tranzistory. Další zpomalení komunikace již nebylo možné. Komunikace je již tak brzděna špatně buzeným optočlenem na straně řídicí jednotky, kde zapojením není možné měnit. S novou verzí komunikační jednotky bylo dosaženo rychlosti 9600 baud mezi komunikační jednotkou a řídicími jednotkami a rychlosti 19200 baud mezi komunikační jednotkou a PC, což jsou rychlosti pro tak pomalý proces, jakým vytvrzování konektorů je, zcela dostačující. Jak bylo v praxi vyzkoušeno, jsou dostatečné i pro náročnější vizualizaci.

6.3.2 Způsob komunikace

Komunikace probíhá po nesdíleném médiu typem klient server, point to point. Tzn., že komunikační jednotka komunikuje vždy jen s jednou řídicí jednotkou. Komunikaci zahajuje server (KJ), který vyšle první byte, kde obsahuje specifikaci příkazu, v případě potřeby ještě přenese data a nakonec pošle kontrolní součet checksum. Řídicí jednotka po úspěšném přijetí všech dat vypočítá checksum a porovná ho s přijatým. Je-li to potřeba, vrátí odpověď komunikační jednotce a též pošle checksum. Výpočet hodnoty checksum probíhá podle následujícího vzorce, kde m je počet bytů ve zprávě a x_i je i-tý byte odesílané zprávy.

$$checksum = 1 + \sum_{i=1}^{m} \frac{x_i}{2}$$



Obrázek 47: Schéma komunikace

Komunikaci zahajuje komunikační jednotka:

- nastaví adresu požadované řídicí jednotky
- sepne CS (cable select), čímž spojí sériové kanály komunikační jednotky a řídicí jednotky vyšle příkaz (viz Tabulka 6-1)
- jeli třeba (příkazy 8) odešle ještě dva byty dat a vše zakončí hodnotou checksum.

Příkaz přijímá cílová řídicí jednotka:

- zkontroluje checksum
- provede příkaz
- je-li vyžadována odpověď (příkazy 0, 6 a 7), odešle dva byty odpověď a checksum

Byla-li odeslána odpověď, příjme komunikační jednotka odpověď i checksum a zkontroluje ji.

Formát zprávy posílané řídicí jednotkou komunikační jednotce jako odpověď na příkaz 00 – přihlášení:

0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	X	X	X	X
E								E	Rs	E	W	Rq	M		

E	Empty	prázdné bity
Rs	Reset	příznak, že řídicí jednotka je resetovaná
W	Way	směr PWM (fázový posuv PWM o 180°)
Rq	Request	žádost o přechod do aktivního módu
M	Mode	číslo módu

Tabulka 6-1: Příkaz posílaný z komunikační jednotky řídicí jednotce

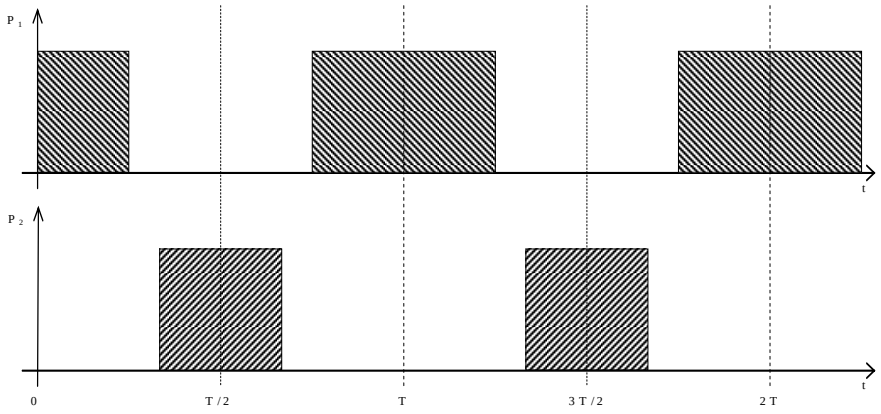
00		Přihlášení
10		Zadání offsetu časovače
2X		Zadání směru PWM
	20	Směr way=0 (žádný fázový posuv)
	21	Směr way=1 (fázový posuv o 180°)
30		Vypsání hodnoty na displej (servisní funkce)
50		Povolení přechodu do aktivního režimu
6X		Čtení provozních parametrů
	60	Teplota
	61	Čas
	62	Odchylka
	63	Akční veličina
	64	Číslo režimu
7X		Čtení parametrů z EEPROM
	70	Teplota 1
	71	Teplota 2
	72	Čas 1
	73	Čas 2
	74	P – konstanta PID regulátoru
	75	I – konstanta PID regulátoru
	76	D – konstanta PID regulátoru
	77	Heslo
	78	Stav režimu stálého předehřívání
8X		Zápis parametrů do EEPROM
	80	Teplota 1
	81	Teplota 2
	82	Čas 1
	83	Čas 2
	84	P – konstanta PID regulátoru
	85	I – konstanta PID regulátoru
	86	D – konstanta PID regulátoru
	87	Heslo
	88	Zapnutí režimu stálého předehřívání
9X		Ovládání pomocí PC
	90	Start
	91	Stop
	92	Displej

6.3.3 Rozhodování a přidělování práv na přechod do aktivního režimu

V komunikační jednotce běží čítač na stejném kmitočtu, jako v řídicích jednotkách. Po zapnutí komunikační jednotky dojde v polovině periody k vyslání zprávy „00“ – přihlášení všem řídicím jednotkám, je-li řídicí jednotka v provozu, odešle zprávu o svém stavu. Komunikační jednotka si udělá přehled stavu jednotlivých komor. Spočítá komory, u kterých je spuštěné vytápění, které jsou v aktivním režimu a rozdělí si je podle směru PWM (směr PWM L/P = fázový posuv o 0°/180°). Vyhodnotí stav komor a případně rozdělí práva na přechod do aktivního režimu podle následujících kritérií:

- Nesmí vytápět více jak 4 komory najednou.
    - 4 komory v aktivním režimu
    - 3 komory v aktivním režimu, dvě s rozdílným směrem PWM v režimu neaktivním
    - 2 komory v aktivním režimu, čtyři v neaktivním režimu, vždy dvě a dvě s rozdílným směrem PWM
    - + další možnosti nepřekračující součet 4 komor vytápějících najednou
- Do aktivního režimu přecházejí dříve pece přecházející do režimu 3 (náběh na vytvrzovací teplotu) než pece přecházející do režimu 1 (náběh na předehřívací teplotu.
- Do aktivního režimu přecházející dříve komory, které vyslaly požadavek dříve.

Synchronizaci dvou ropných komor ukazuje Obrázek 48. První komora vytápí výkonem 50 % a druhá, která má fázově posunuté PWM o 180°, výkonem 33%.



Obrázek 48: Synchronizace dvou topných komor

6.4 Komunikace s počítačem

6.4.1 Způsob komunikace mezi KJ a počítačem

Pro větší komfort obsluhy pece a možnost sledování průběhu vytvrzování byla snaha o spojení velké pece s osobním počítačem. Toto spojení je realizováno přes komunikační jednotku, kde je na adrese sedmé topné komory obvod MAX232, který převádí sériový kanál komunikační jednotky na standardní sériové rozhraní RS-232. Pomocí tohoto rozhraní lze připojit každý osobní počítač (vyzkoušen i převodník RS-232 / USB).

Komunikaci s počítačem zahajuje stejně jako s řídicími jednotkami komunikační jednotka vysláním sekvence dvou bytů 0x00 a 0x02. Počítač odpoví buď číslem topné

komory, se kterou chce komunikovat (číslo je snížené o 1, takže je v rozsahu 0 až 5), nebo číslem 6, což je požadavek pro vyslání informace o zapnutých topných komorách.

Při komunikaci přímo s topnou komorou funguje komunikační jednotka jako opakovač, takže předává zprávy posílané počítačem řídicí jednotce a zpět. Komunikace se řídí stejnými pravidly jako komunikace mezi komunikační jednotkou a řídicími jednotkami.

Při zaslání požadavku o stavu topných komor komunikační jednotka nejprve pošle počet zapnutých komor a následně odešle sekvenci bytů o délce počtu zapnutých komor a vše je zakončeno hodnotou checksum.

Formát zprávy posílané komunikační jednotkou do PC s informacemi o jedné komoře:

0	X	X	X	X	X	X	X
E	Num			W	M		

E	Empty	prázdné bity
Num	Number	číslo topné komory
W	Way	směr chodu PWM
M	Mode	číslo módu

6.4.2 Výběr prostředí pro tvorbu Grafického uživatelského rozhraní (GUI)

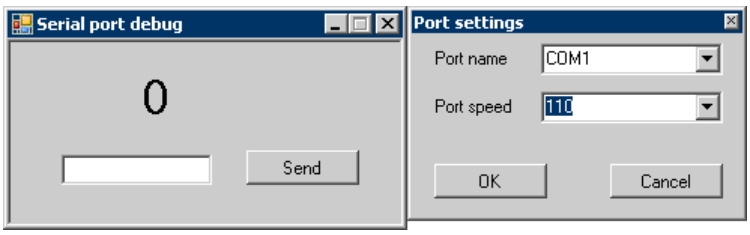
Jelikož bylo u komunikace dosaženo dostatečných rychlostí, bylo možné udělat i náročnější vizualizaci. Lze sledovat nejen všechny parametry vytvrzovacího procesu, zadávat parametry, ale i celou pec ovládat z odděleného počítače.

Na výběr bylo několik programovací jazyků a vývojových prostředí, ve kterých lze GUI programovat. Rozhodovalo se mezi dvěma jazyky a dvěmi prostředími: .NET C# (MS Visual studio 2005) a Java (Sun NetBeans). Oba jazyky jsou velice moderní, v poslední době velice populární a velice jednoduché a rychlé pro vytváření grafických objektů. Výhodou Javy je absolutní platformová nezávislost, nevýhodou nespolehlivá práce se sériovým portem. Nevýhodou .NET je závislost pouze na systémech Windows (pro Linux možný projekt MONO, který je zatím ve vývoji), pro použití portu musí být verze alespoň NET 2.0. Nakonec byl vybrán .NET C# pro lepší podporu práce se sériovým portem.

6.4.3 Zkušební verze vizualizace

Nejprve byla naprogramována jednoduchá aplikace pro odzkoušení komunikace mezi komunikační jednotkou a počítačem. Funkce výsledné verze programu byla: odeslání

vloženého čísla komunikační jednotce, přeposlání komunikační jednotkou k zobrazení všem řídicím jednotkám a poté nazpět k zobrazení počítači.



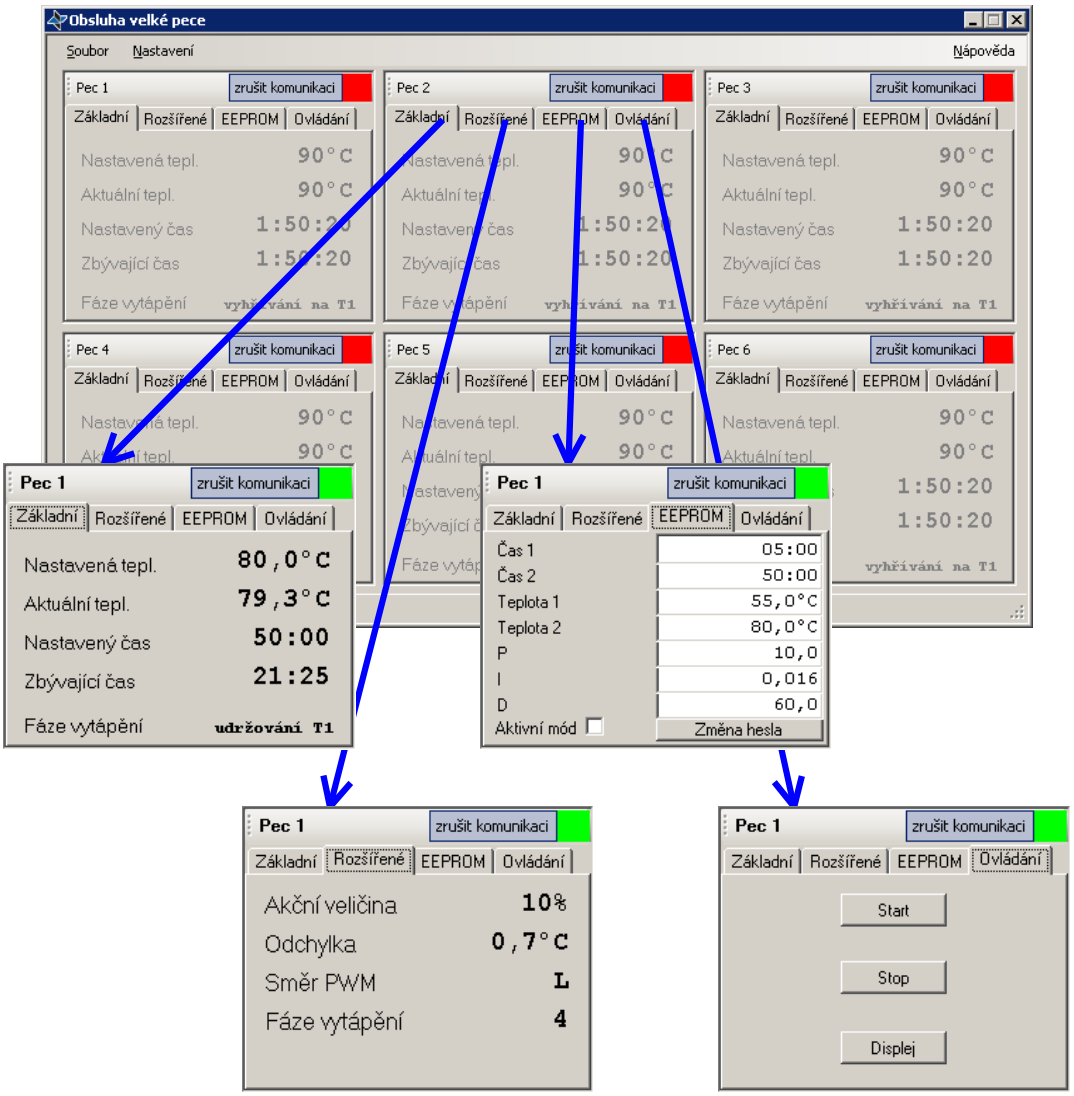
Obrázek 49: Program pro odzkoušení komunikace KJ a PC.

6.4.4 Finální verze vizualizace

Rutiny ze zkušební verze byly použity i ve výsledné vizualizaci. Program byl rozdělen do tří hlavních tříd: **Form1** – třída, ve které běží hlavní vlákno programu, jsou zde definovány vlastnosti formuláře. Vytváří se zde a spouští ostatní třídy a vlákna. **Pec** – třída, která obsahuje parametry a vizualizaci jednotlivé pece. Je vytvořeno celkem 6 instancí této třídy a uložena jsou v poli. **Reading Thread** – třída, v níž běží vlákno obsluhující komunikaci po sériovém portu a všechny fronty zpráv.

Ve vizualizaci má každá topná komora jeden panel. Panel je vypnutý (šedivý, nelze nic obsluhovat), je-li počítač odpojen od komunikační jednotky nebo není-li příslušná topná komora zapnutá anebo byla-li komunikace vypnutá tlačítkem *zrušit komunikaci*. Ikona v pravém horním rohu panelu zobrazuje stav komunikace s příslušnou řídicí jednotkou, červená – jednotka odpojena, oranžová – jednotka připojena, ale zakázána komunikace tlačítkem *zrušit komunikaci*, zelená – jednotka připojena, komunikace probíhá. První záložka obsahuje provozní parametry vztahující se k aktuálnímu stavu vytvrzování, druhá rozšířené parametry vhodné pro vývojáře či technologa, třetí parametrů z paměti EEPROM procesoru s možností parametry měnit (parametry P, I, D a heslo lze měnit až po zadání hesla), čtvrtá tlačítka se stejnou funkcí, jako tlačítka na peci (všechny záložky viz Obrázek 50).

Program se instaluje zkopírováním souboru *PEC_PC.exe* do zvoleného adresáře. Po prvním spuštění si vyžádá výběr sériového portu, ke kterému je připojena komunikační jednotka. Při dalších spuštěních jsou informace o sériovém portu načteny z konfiguračního souboru *pec.cfg*, který je uložen ve stejném adresáři, jako spustitelný soubor programu. Je-li nutné přednastavit sériový port, lze tak učinit v menu programu: *Nastavení* > *Sériový port*.



Obrázek 50: Formulář vizualizace a vzhled jednotlivých záložek

6.5 Programování programů pro procesory AVR

6.5.1 Výběr programovacího prostředí pro procesory AVR

Původní program řídicích jednotek byl napsán v programovacím jazyce C, a proto se v jazyce C pokračovalo. Procesory AVR mají asembler optimalizován pro použití programů zkompilovaných z jazyka C. Programování takového procesoru v asembleru by bylo příliš náročné.

Pro procesory AVR je na trhu několik komerčních kompilátorů a programovacích prostředí, např. CodeVisionAVR, které stojí asi 4 tis. korun. Pro účely této práce bylo jako dostatečné vybráno prostředí AVR Studio 4 společnosti Atmel a kompilátor WinAVR, což je upravený linuxový kompilátor gcc pro procesory AVR určený pro operační systém Windows. Oba tyto produkty jsou zdarma.

Propracovaný kompilátor nabízí několik možností optimalizace výsledného kódu. Nejdůležitější pro práci s mikrokontroléry je optimalizace označovaná jako -0s, která kód nejprve zoptimalizuje podle rychlosti, a pak ze všech možných řešení vybere to, co zabírá nejméně paměti. Při práci s kompilátorem je třeba dávat pozor na používanou verzi kompilátoru, jelikož co přeloží kompilátor jedné verze jako funkční program, může kompilátor verze vyšší přeložit k programátorově nelibosti jako nefunkční.

6.5.2 Zásady pro minimalizaci kódu

Programování mikroprocesorů, se značně liší od moderního objektově orientovaného programování. Největší důraz se místo přehlednosti, klade na velikost zkompilovaného kódu a rychlost běhu programu.

Zásady pro minimalizaci kódu:

- používat 8bitové typy – kompilátor sice umí převést větší typy (16, 32, 64bitové) na kód proveditelný 8bitovým procesorem, ale kód tak značně narůstá
- používat globální proměnné místo předávání parametrů funkcím
- nepoužívat typy s plující desetinou čárkou (float, double) – situace stejná jako v bodě o 8bitových proměnných

6.5.3 Program řídicí jednotky

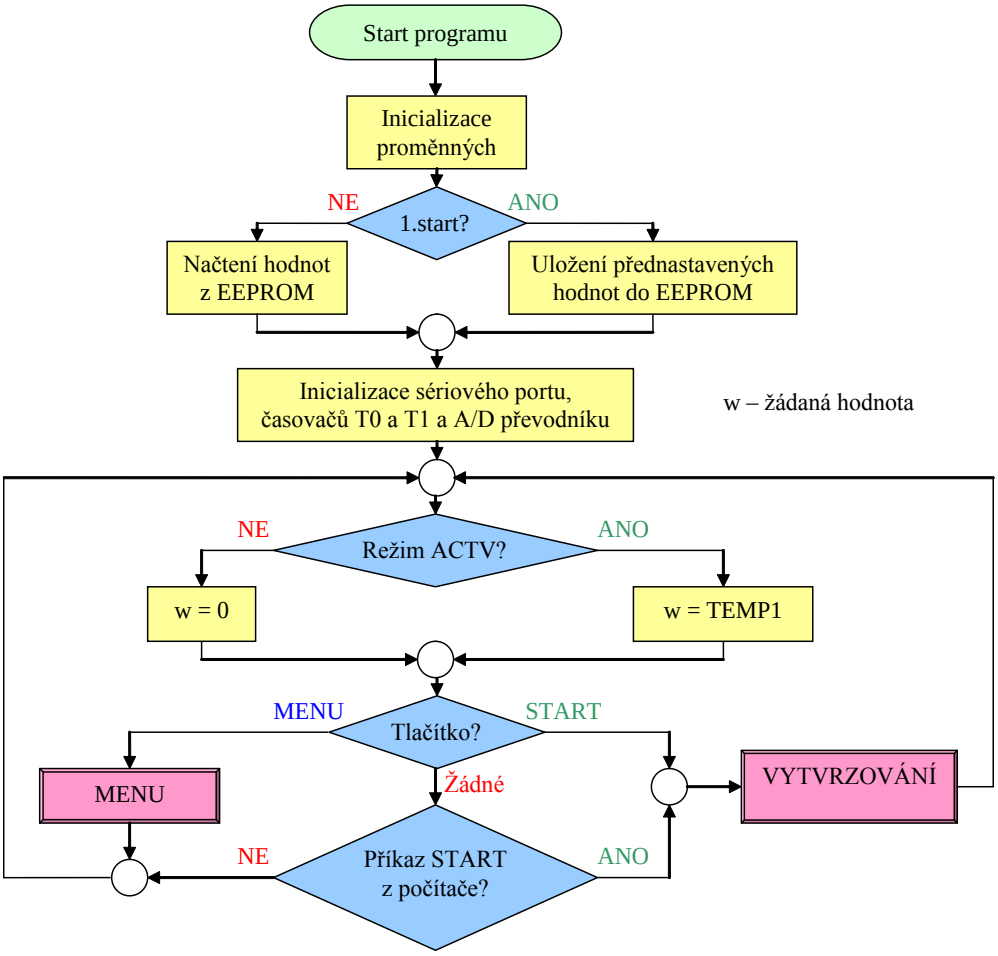
Některé rutiny jsou převzaté z původní verze programu (ovládání displeje, tlačítek, generování času). Program byl pro přehlednost rozdělen do několika souborů:

- **MainFile.c** – hlavní program, obsluha přerušení čítačů a A/D převodníku.
- **ConstVar.c** (ConstVar.h) – proměnné, konstanty a definice typů
- **Display.c** (Display.h) – obsluha displeje, výpisy proměnných na displej
- **KeybEntr.c** (KeybEntr.h) – obsluha klávesnice, vkládání různých hodnot
- **SelContr.c** (SelContr.h) – řídicí sekvence, regulace, menu
- **UARTCLNT.c** (UARTCLNT.h) – obsluha sériového portu a komunikace

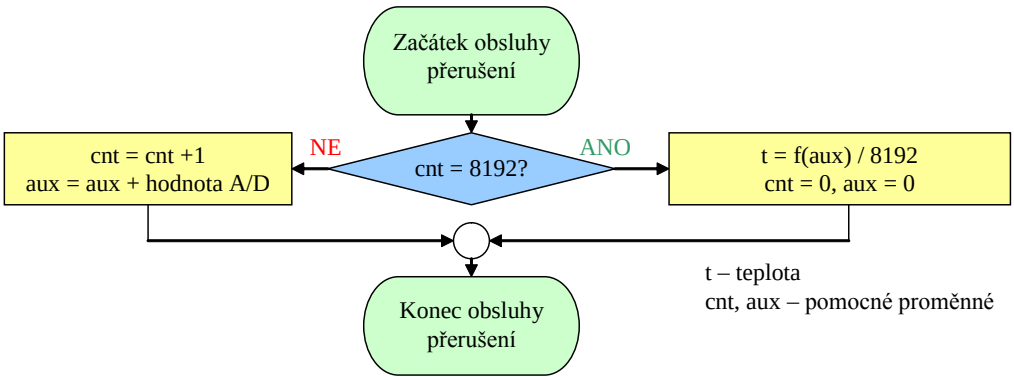
Nadále budou vypisovány pouze hlavní změny oproti původní verzi programu.

- přidán 16bitový čítač T1, který generuje PWM
- vytvořeno přerušení A/D převodníku a zvýšen počet vzorků pro výpočet měřené teploty
- zrychlena odezva tlačítek a rozšířeny možnosti zobrazení displeje

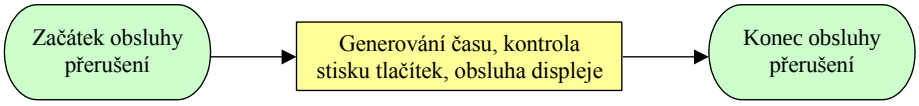
- upraveno menu, přidány položku pro úpravu parametrů regulátoru P, I a D a přidáno heslo pro úpravu těchto parametrů.
- dvoupolohový regulátor vyměněn za regulátor PID
- přidána obsluha sériového portu (viz kapitola 6.3.2)



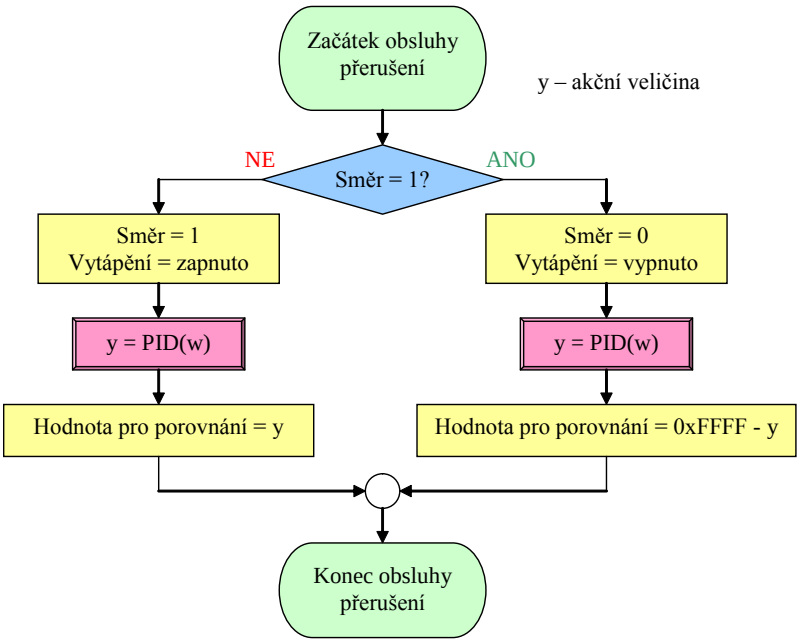
Obrázek 51: Diagram hlavního cyklu programu řídicí jednotky



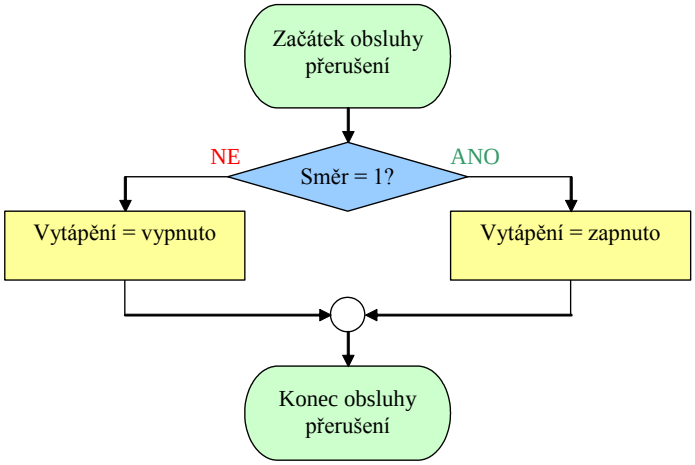
Obrázek 52: Diagram obsluhy přerušení A/D převodníku



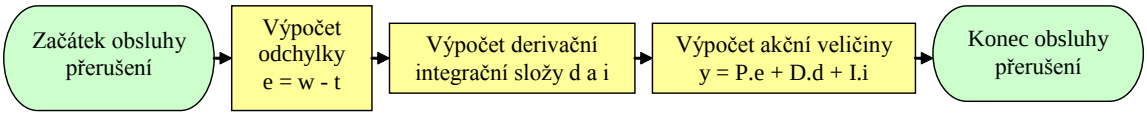
Obrázek 53: Diagram obsluhy přerušení přetečení čítače T0



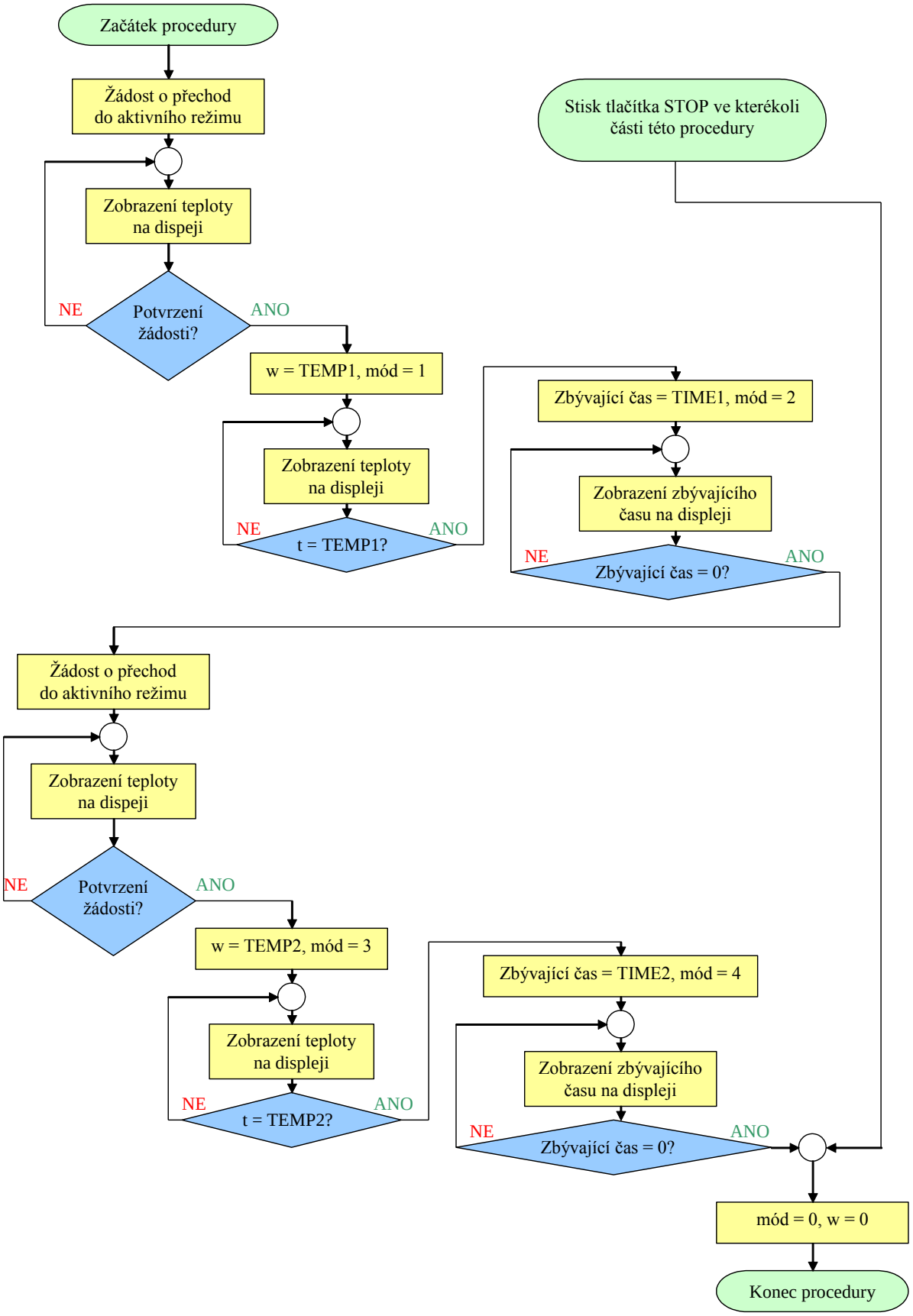
Obrázek 54: Diagram obsluhy přerušení přetečení čítače T1



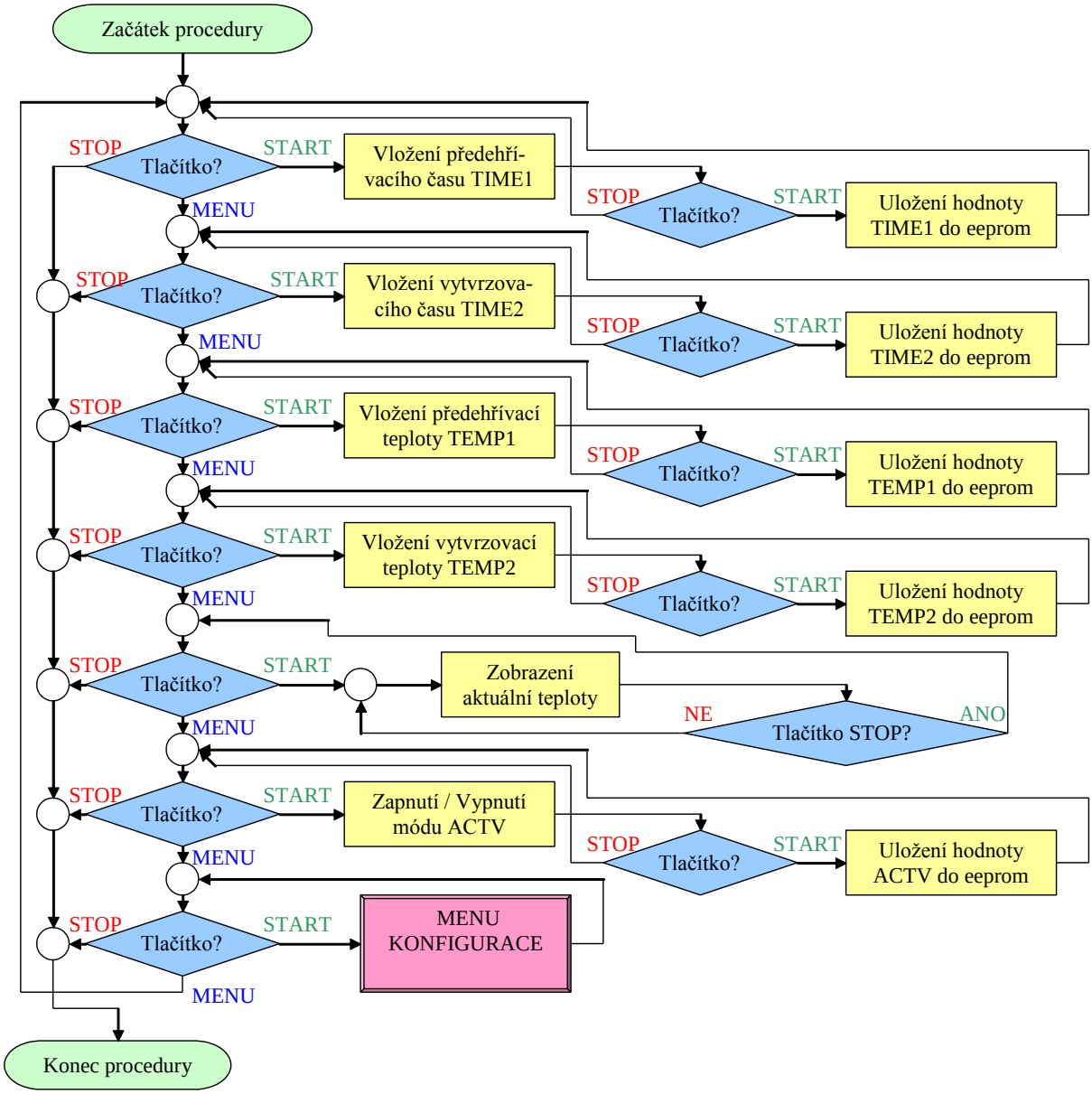
Obrázek 55: Diagram obsluhy přerušení porovnávání hodnoty čítače T1



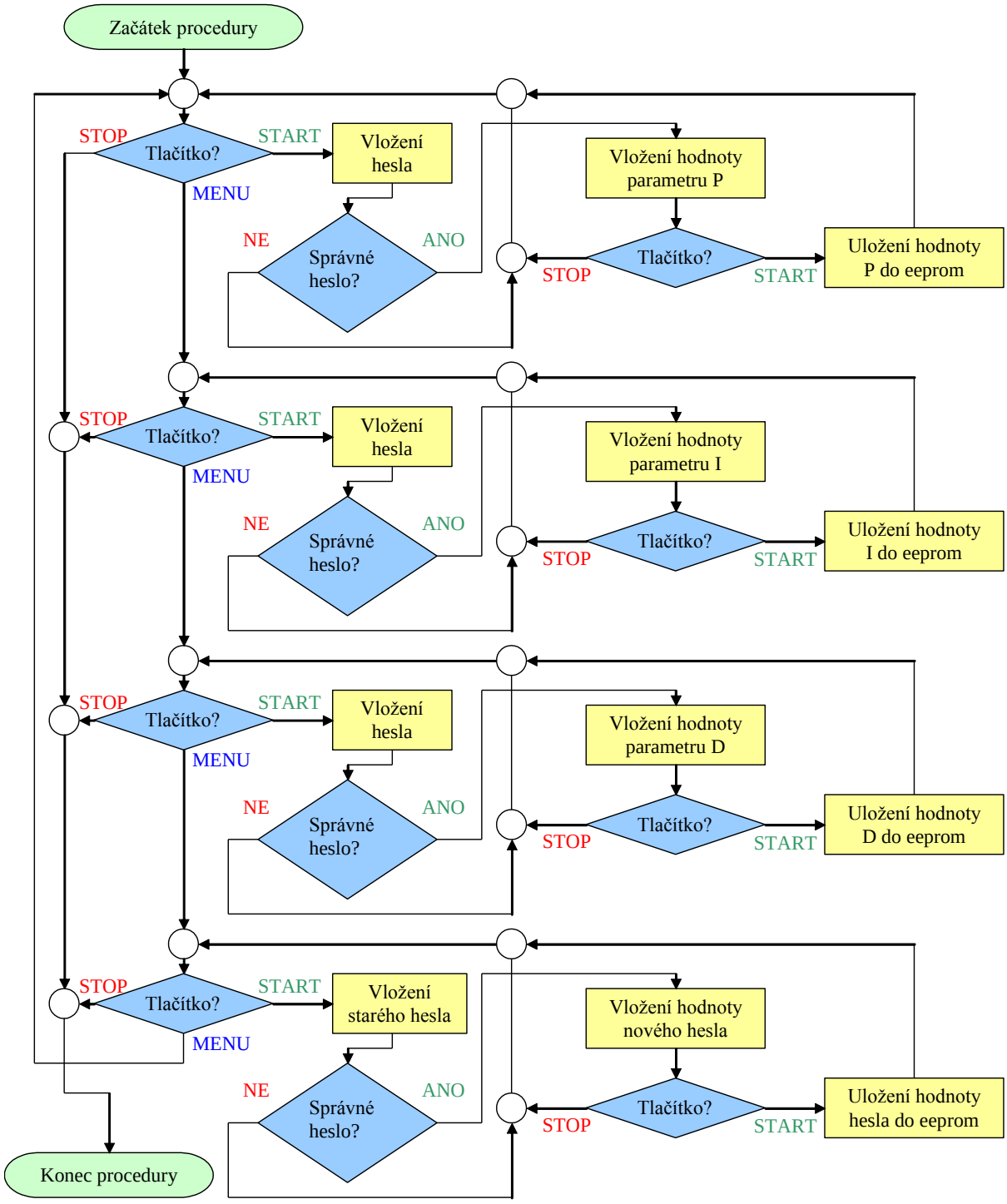
Obrázek 56: Diagram procedury PID



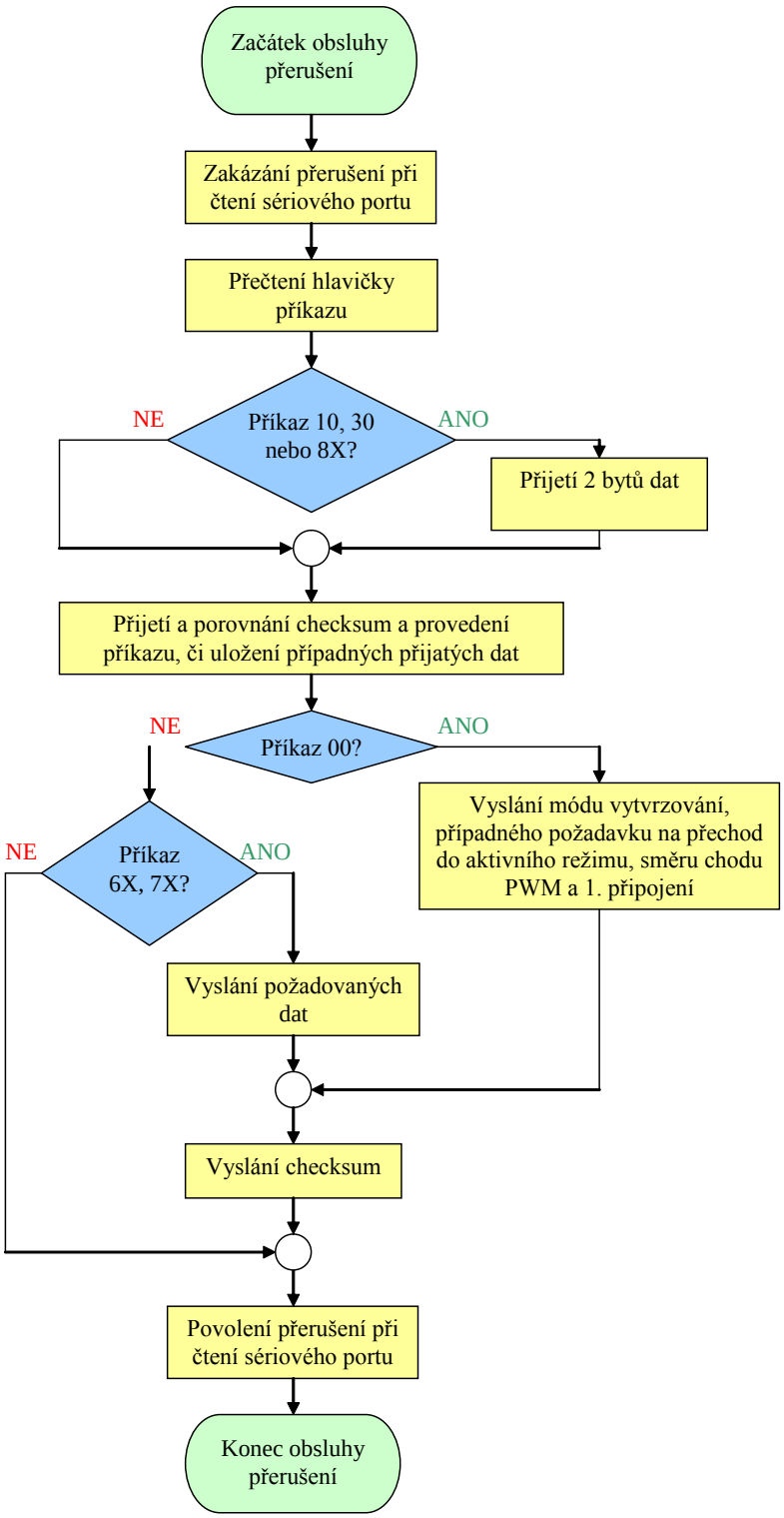
Obrázek 57: Diagram procedury VYTVRZOVÁNÍ



Obrázek 58: Diagram procedury MENU



Obrázek 59: Diagram procedury MENU KONFIGURACE



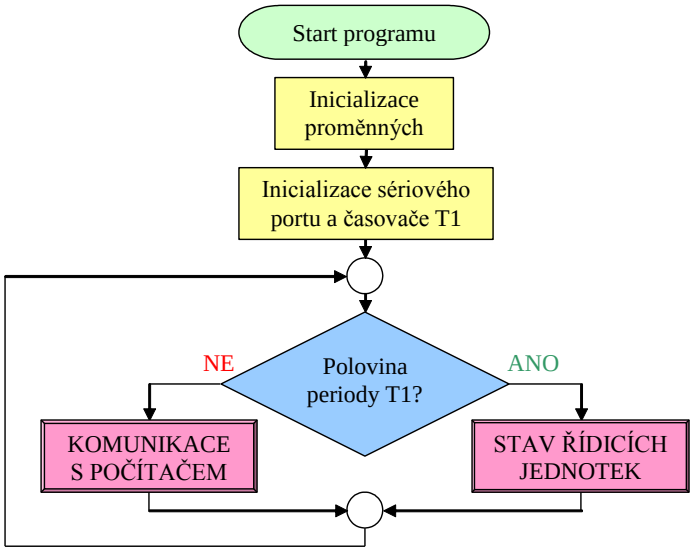
Obrázek 60: Obsluha přerušení při čtení sériového portu

6.5.4 Program komunikační jednotky

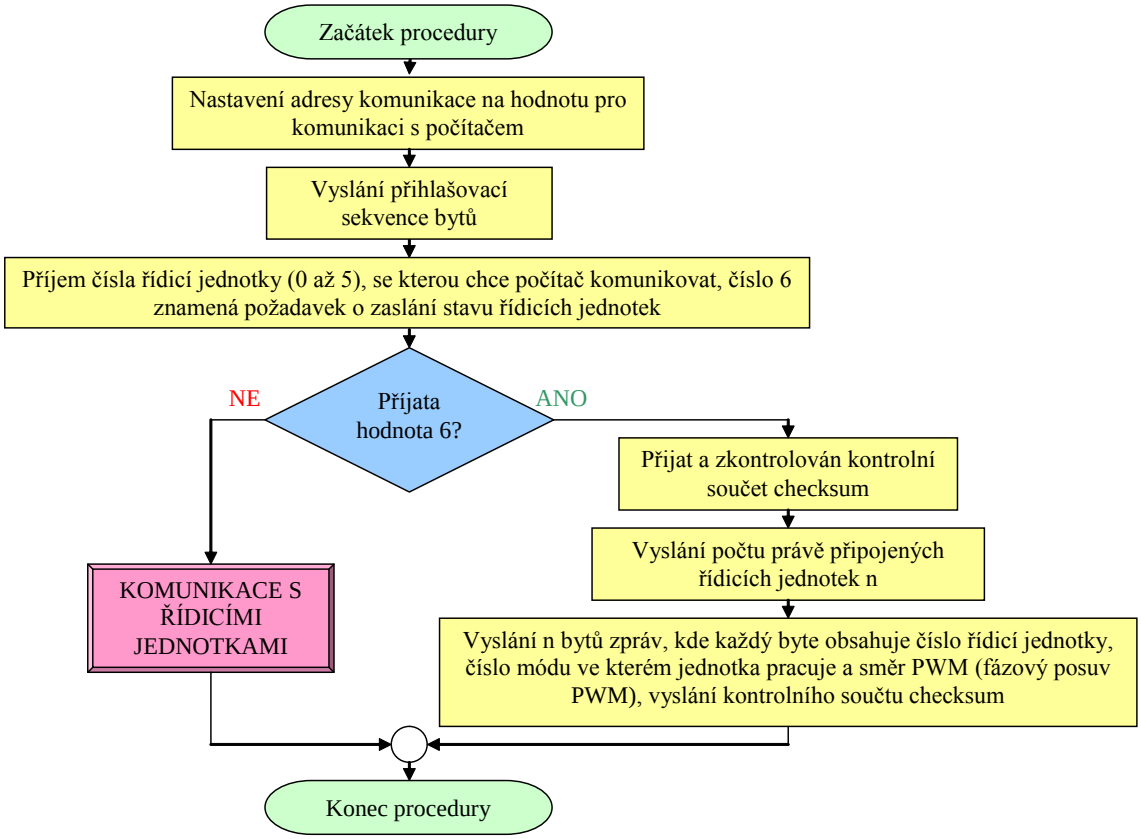
V komunikační jednotce je použit taktéž procesor AVR a to přesně typ ATtinny2313, který má pouze 2 kB paměti pro program. Při programování bylo proto nutné pevně dodržovat zásady pro minimalizaci kódu (viz 6.5.2).

Program byl rozdělen do dvou souborů: **Komunikc.c** – obsahující obsluhu přerušení časovače a rozhodování o přidělování práv pro přechod do aktivních režimů a **UARTSRVR.c** (UARTSRVR.h) – obsahující obsluhu sériového portu a komunikace s počítačem.

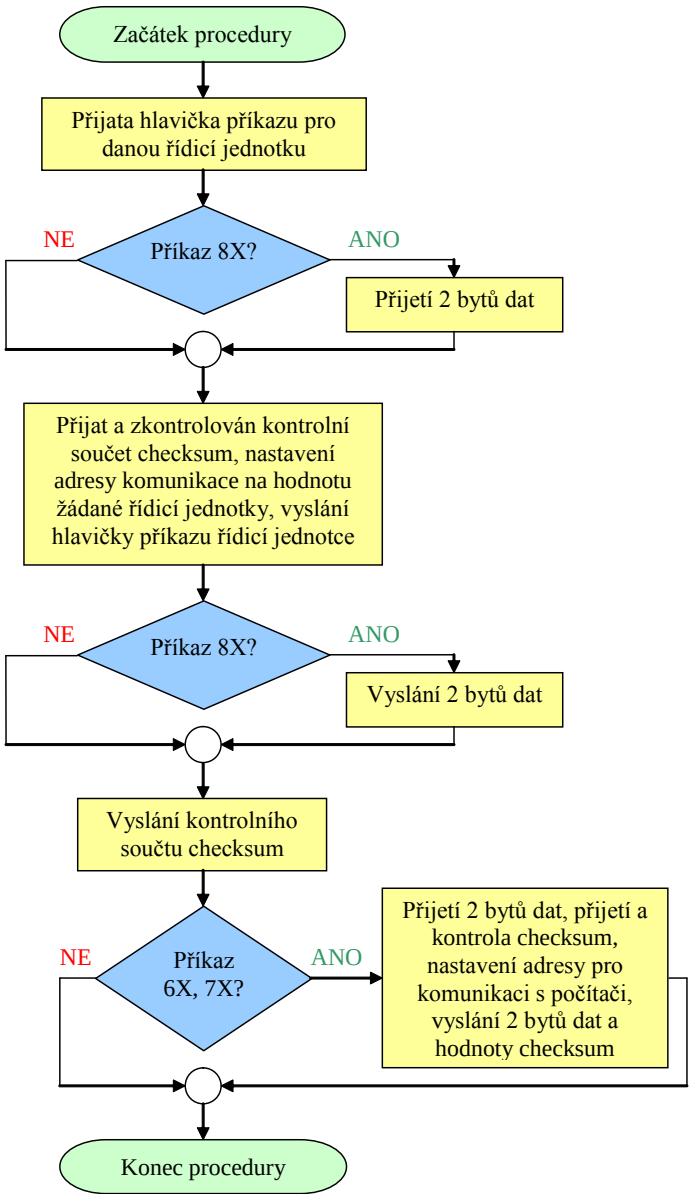
Způsoby komunikace jsou popsány v kapitolách 6.3.2 a 6.4.1.



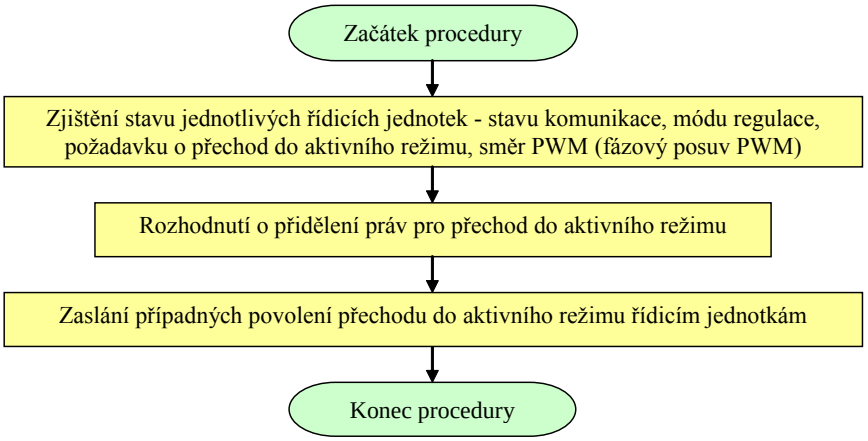
Obrázek 61: Diagram programu komunikační jednotky



Obrázek 62: Diagram procedury KOMUNIKACE S POČÍTAČEM



Obrázek 63: Diagram procedury KOMUNIKACE S ŘÍDICÍMI JEDNOTKAMI



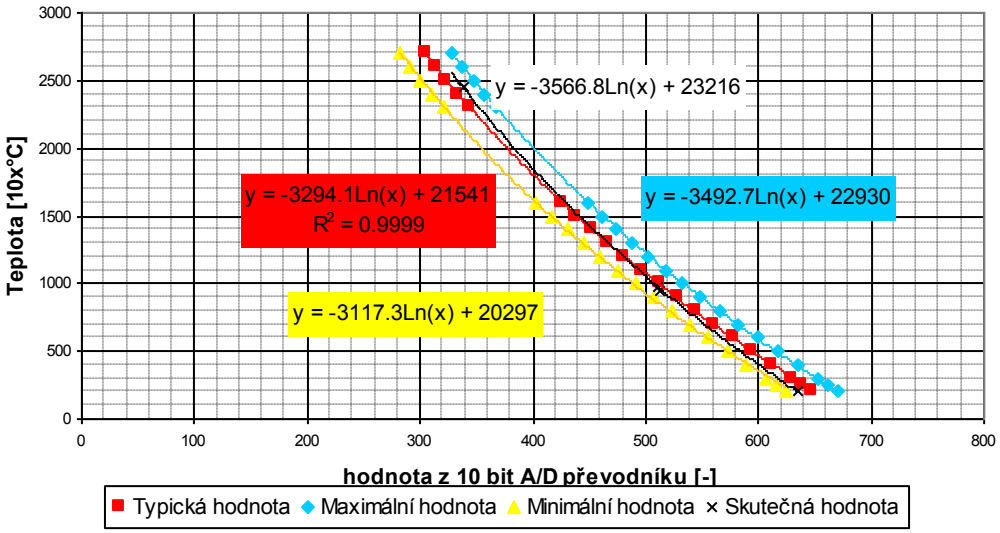
Obrázek 64: Diagram procedury STAV ŘÍDICÍCH JEDNOTEK

6.6 Malá vytvrzovací pícka HotMelt

Jelikož malá pícka HotMelt má téměř stejný hardware jako jedna komora velké pece, nabízelo se řešení inovovat i tuto pec. Program zde použitý vycházel z programu pro řídicí jednotku velké pece (viz 6.5.3). Rozdíl je v chybějící komunikaci (není zde potřeba), rozdílném vytvrzovacím procesu (bez předehřívání, HotMelt režim – 250°C) a hlavně odlišném čidle.

6.6.1 Vyhodnocování a kalibrace čidla

V malé peci je místo číslicového čidla SMT160, které bylo použito ve velké peci, použit termistor KTY84-130, jelikož je třeba měřit teplotu až do hodnoty 250 °C. S tím je spojen problém, jak vhodně měřit teplotu, když závislost odporu termistoru na teplotě je značně nelineární. V původní verzi programu byla nelineární křivka nahrazena soustavou přímek, což pro dvoupolohovou regulaci postačovalo. Pro lineární řízení bylo potřeba, poněkud přesnějších hodnot. Vhodným proložením nelineární křivky vyšla kubická křivka, která by se ovšem dala jen velmi špatně kalibrovat. Proto bylo zaměněno čidlo v napěťovém děliči s odporem, čímž se nejen rozšířil rozsah napětí měřený A/D převodníkem, ale hlavně se změnila závislost měřeného napětí na teplotě z kubické křivky na logaritmickou. V grafu (Obrázek 65) lze vidět toleranci v poloze křivky danou tolerancí odporu a termistoru v napěťovém děliči. Modrá a žlutá křivka ukazují extrémy tolerance.



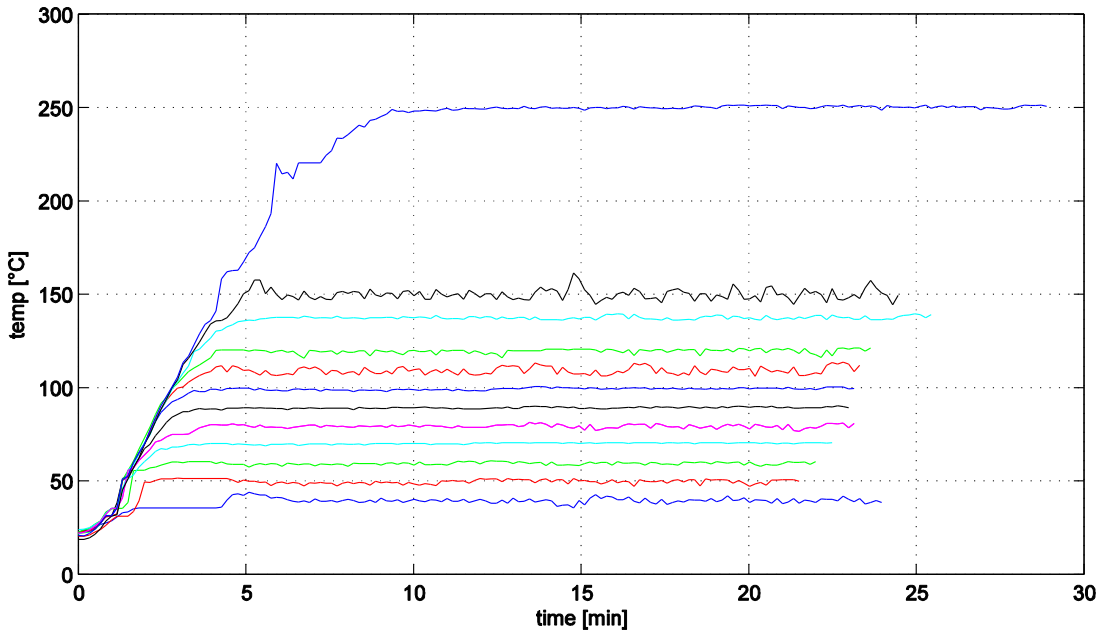
Obrázek 65: Kalibrace termistoru

Logaritmickou křivku můžeme jednoduše kalibrovat pomocí dvou změřených bodů. První bod je změřen v bodě 100°C (uprostřed rozsahu pro epoxidová lepidla) a v bodě 250°C (teplota pro konektory HotMelt). Kalibrace se provádí pomocí rutiny v servisním menu pece. Tato rutina probíhá poloautomaticky, sama dosáhne přibližných teplot pro kalibraci (konstanty logaritmické křivky jsou brány z ideálních hodnot – Obrázek 65) a vyžádá si změření těchto dvou hodnot a zadání dovnitř pícky pomocí tlačítek. Program spočítá nové konstanty logaritmické křivky a poté již ukazuje správnou teplotu.

6.6.2 Změřené hodnoty

Pro měření průběhu řízení teploty byl do programu přidán servisní režim, kde se teplota ukládá každé půl minuty do paměti EEPROM a odkud lze údaje o teplotě převést programátorem a programem DataLoader (umístěn na přiloženém CD) do textového formátu, z něhož není problém data importovat do programu Excel nebo Matlab.

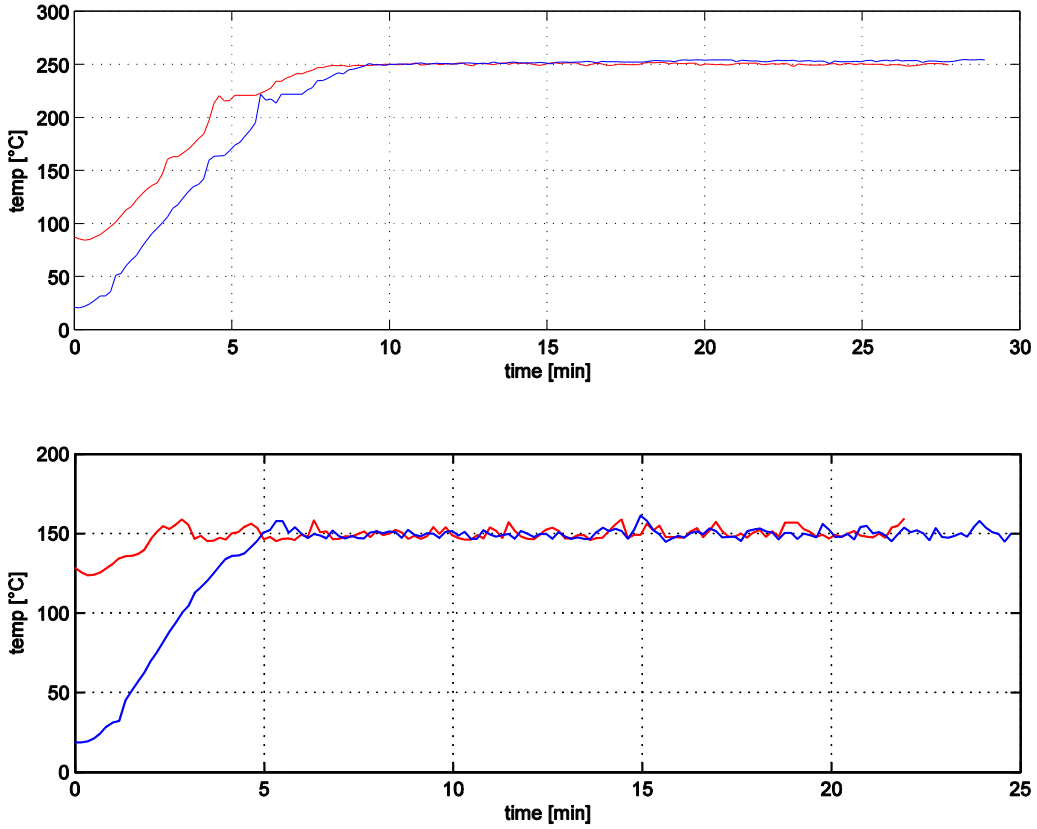
Při bližším pohledu na výsledky řízení teploty malé pece (Obrázek 66) je vidět, že při některých teplotách hodnota měřené teploty znatelně kolísá kolem žádané hodnoty. Důvodem je zřejmě nelinearita v čidle teploty nebo v A/D převodníku mikroprocesoru.



Obrázek 66: Změřené průběhy řízení teploty pece (teploty 40 až 150 a 250°C)

Stejně jako v programu řídicí jednotky velké pece i zde byla implementovaná rutina, která před začátkem vytvrzovacího procesu odhadne stav soustavy (byla-li pec zapnuta ne zcela vychladlá) a přednastaví hodnotu integrační složky. Použití této rutiny ve skutečnosti ukazuje Obrázek 67.

Protože je malá pec prodávaný sériově vyráběný produkt byl k ní vytvořen návod k obsluze a postup pro výrobu, včetně návodu pro kalibraci čidla (přiloženo na CD).



Obrázek 67: Výsledky funkce pro odhadování stavu

7 Závěr a zhodnocení

Skutečné závěry přinese až ověření zařízení v praxí. Nový software je od prosince 2007 testován technologem společnosti RLC Praha, který prakticky ověří možnosti tohoto programu. Prozatím se s úspěchem může konstatovat, že vše, čím se tato práce zabývala (komunikační jednotka, programy KJ a řídicích jednotek, vizualizace, program pro malou pícku), je plně funkční. Na všech zařízeních byly prováděny kontrolní zkoušky a testy. Tyto testy odhalily chyby, které byly postupně odstraněny.

Z nejzávažnějších chyb všech zařízení lze vybrat některé, které znepříjemnily, či zbrzdily práci:

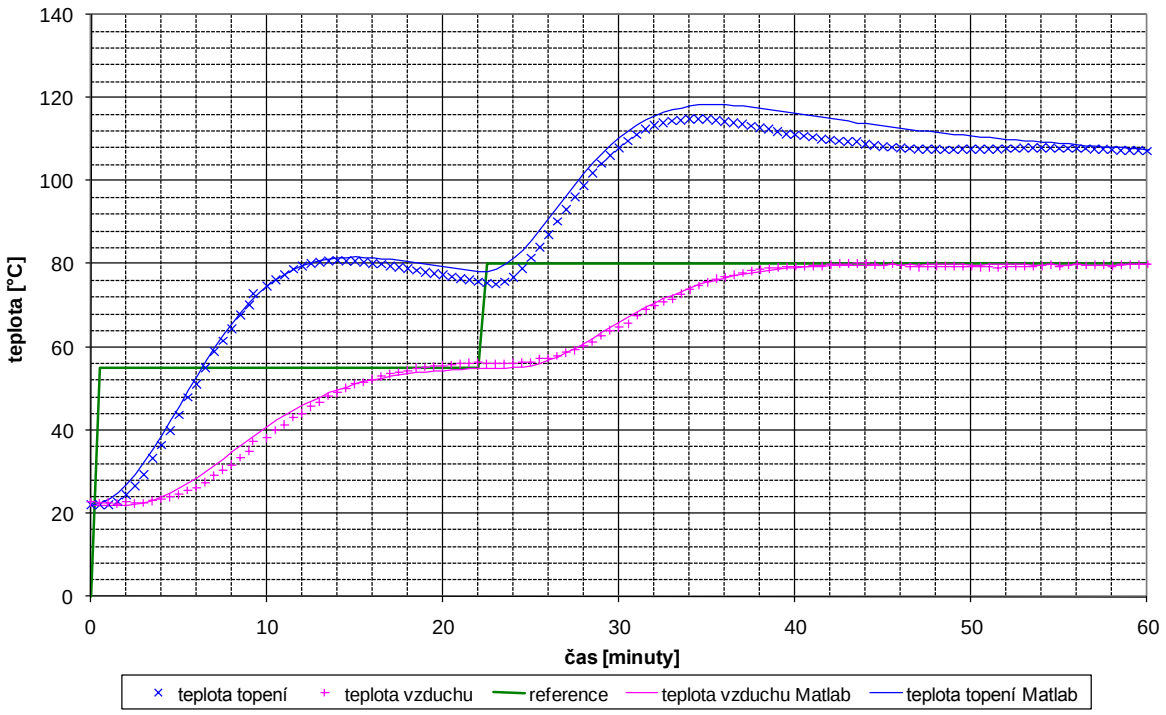
- Chyba v programu PID regulátoru – v programu docházelo k zacyklení v nepravidelných intervalech
- Chybné zapojení optočlenů v první verzi komunikační jednotky
- Nevyprazdňování vstupního bufferu v .NET – chyby v komunikaci mezi KJ a počítačem
- Zaměněná polarita termistoru v malé pícce – čidlo se chová normálně až do teploty 160°C, od této hodnoty výše má stále stejný odpor

Význam práce nespočívá v teoretické náročnosti, ale spíše v koordinaci prací různých oborů (nejen řídicí techniky). Z teorie automatického řízení je v práci zastoupena identifikace soustav, tvorba regulačních schémat a návrh a implementace PID regulátoru. Práce vyžadovala i dva různé způsoby programování: objektové programování při tvorbě vizualizace a programování procesorů AVR s potřebou minimalizace kódu. Práce se dále zabývá komunikací po sériové lince a rozvrhování prostředků.

Vytvořením synchronizace topných komor bylo dosaženo stavu, kdy pece není třeba ve vytápění omezovat, až na případy kdy jsou všechny komory zapnuty ve stejný čas. Většinu času pracují komory v režimech, kdy pouze udržují nastavenou teplotu a jejich výkon nepřesáhne 50 %. Za takových podmínek může pracovat všech šest pecí najednou.

Porovnání výsledných průběhů teploty změřených na peci s průběhy z modelu Simulink ukazuje Obrázek 68, body jsou označeny změřené hodnoty, křivky vyjadřují simulované průběhy z programu Matlab. Výsledky regulace jsou značně závislé na vnějších podmínkách, např. otevřené okno a tím vyvolaný průvan může teplotu značně ovlivnit. Důvodem toho je polootevřená konstrukce pece, kdy dveře komor nemohou doléhat přesně, jelikož by zničily konektory. Změnou umístění čidla se dosáhlo, alespoň částečné zmenšení

závislosti na těchto poruchách. Za normálních podmínek bylo dosaženo přesnosti teploty ± 1,5 °C bez zbytečných překmitů.



Obrázek 68: Porovnání změřených a simulovaných výsledků

Do budoucna je možné vylepšit program vizualizace pece, kde prozatím chybí ukládání měřených hodnot do souboru pro pozdější využití, např. identifikaci soustavy, zhodnocení kvality řízení atd.

8 Seznam použité literatury a použitého softwaru

Seznam použité literatury je vytvořen dle norem ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690–2 (viz [23]).

8.1 Kapitola 2 Historie a současnost optických technologií

[1] HUBMANN, Peter. *Fibre optics in practice: Introduction into the practical side of fibre optics technology.* 2nd rev. edition. Vienna (Austria): ELDI Handels GmbH, 2005. 96 s.

[2] NOVOTNÝ, Karel. *Optická komunikační technika*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 148 s. 80–01–01642–0

[3] *Www.fiber-optics.info* [online]. c2005 [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://www.fiber-optics.info>

8.2 Kapitola 3 Technologie vláknové optiky

Z předchozí kapitoly: [1], [2], [3].

[4] NOVOTNÝ, Karel, MARTAN, Tomáš, ŠÍSTEK, Jan. *Systémy pro optické komunikace*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 120 s. ISBN 80-01-02810-0

[5] *Optické kabely a konektory pro LAN sítě: Seminář*. Praha: Fibre optics centre, 1994. 349 s.

[6] *RLC* [online]. c2005 [cit. 2007–12–01]. Firemní datasheety. Dostupný z WWW: <http://www.rlc.cz>

[7] *Optoelektronika* [online]. [2003] [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta.pdf>

8.3 Kapitola 4 Konektory optických vláken

Z předchozích kapitol: [1], [3], [4], [5], [6]

[8] HAVLENA, Vladimír. *Odhadování a filtrace* [online]. 2001 [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/file.php/5/oaf_slides2.pdf>

8.4 Kapitola 5 Rozbor zadání

Z předchozích kapitol: [6]

[9] *Atmel AVR : datasheets* [online]. c2007 [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/products/AVR>

[10] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel AVR : 3. díl – edice μP a praxe*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 376 s., 1 CD-ROM. ISBN 80–7300–088–1

8.5 Kapitola 6 Řešení

8.5.1 Podkapitola 6.1 Identifikace modelů pecí

[11] *System Identification Toolbox User's Guide: Estimating Process Models* [online]. MathWorks, 1984-2007 [cit. 2007-10-01]. Dostupný z WWW: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/ident/ug/bq5q4xh-1.html>

8.5.2 Podkapitola 6.2 Řízení teploty

[12] HAVLENA, Vladimír, ŠTECHA, Jan. *Moderní teorie řízení*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 297 s. ISBN 80–01–02095–9

[13] JOHN, Jan. *Systémy a řízení*. 2. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 101 s. ISBN 80–01–02745–7

[14] FENCLOVÁ, Miroslava, PECH, Zdislav, SUKOVÁ, Marie. *Teorie automatického řízení: Návody ke cvičením*. 3. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 152 s. ISBN 80–01–01039–2

8.5.3 Podkapitola 6.3 Synchronizace topných komor

Z předchozích kapitol: [9], [10]

[15] LAŽANSKÝ, Jiří. *Plánování a rozvrhování* [online]. [2005] [cit. 2007-12-01]. Dostupný z WWW: <http://labe.felk.cvut.cz/vyuka/X33SDU/3_Planovani.ppt>

[16] *74HC138, 74HC151, MAX232, PC817 : datasheets* [online]. [1990 – 2007] [cit. 2007-10-01]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.com/>

8.5.4 Podkapitola 6.4 Komunikace s počítačem

Z předchozích kapitol: [9], [10], [16]

[17] ELLER, Frank. *C# – Začínáme programovat*: podrobný *průvodce začínajícího uživatele*. Jiří Bráza. Praha: Grada, 2002. 240 s. ISBN 80–247–0324–6.

[18] *MSDN : Microsoft Developer Network* [online]. c2007 [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://msdn.microsoft.com>

8.5.5 Podkapitola 6.5 Programování programů pro procesory AVR

Z předchozích kapitol: [9], [10], [16]

[19] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 4. přeprac. vyd. České Budějovice: KOPP nakladatelství, 2005. 280 s. ISBN 80–7232–220–6

[20] *WinAVR : AVR-GCC for Windows* [online]. c2007 [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://winavr.sourceforge.net>

[21] *AVR Studio 4* [online]. c2007 [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/avrstudio>

8.5.6 Podkapitola 6.6 Malá vytvrzovací pícka HotMelt

Z předchozích kapitol: [6], [9], [10]

[22] *KTY-84: datasheets* [online]. [1990 – 2007] [cit. 2007–10–01]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.com/>

8.5.7 Kapitola 8 Seznam použité literatury a použitého softwaru

[23] FARKAŠOVÁ, Blanka, KRČÁL, Martin. *Projekt Bibliografické citace : dle normy ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2* [online]. c2004–2007] [cit. 2007–12–01]. Dostupný z WWW: <http://www.citace.com/>

8.6 Seznam použitého softwaru

- Microsoft Office 2003 a Microsoft Office 2007 (především Excel a Word)
- Matlab 6.5 a Matlab R2007a (modely v Simulink a grafy)
- AVR Studio 4 (programování procesorů AVR)
- WinAVR (C kompilátor pro procesory AVR)
- ASIX UP (program pro obsluhu programátoru Asix Presto)
- .NET Visual Studio 2005 (programovaní vizualizace)
- Eagle 4.16r1 (tvorba schémat a motivů plošných spojů)

Seznam příloh

a) Obsah přiloženého CD
b) Soupiska součástek pro komunikační jednotku

Obsah přiloženého CD

```
CD-ROM
 ├Bin                        Zkompilované spustitelné soubory
 │ ├DataLader                Program pro konverzi dat z EEPROM do textu
 │ ├Komunikacni_jednotka     Program pro komunikační jednotku
 │ ├Picka_Hotmelt            Program pro malou pícku Hotmelt
 │ ├Ridici_jednotka          Program pro řídicí jednotku
 │ └Vizualizace              Vizualizace pro osobní počítač
 ├doc                        Dokumentace v pdf
 │ ├Datasheets               Katalogové listy vybraných součástek
 │ ├Picka_Hotmelt            Manuály pro pícku HotMelt
 │ └Text_DP                  Text této diplomové práce
 └Src                        Zdrojové soubory
   ├DataLader                Zdrojové soubory programu DataLoader
   │ └.NET                   Zdrojové soubory v .NET Visual Studiu
   ├doc_src                  Zdrojové soubory dokumentace
   │ ├Picka Hotmelt          Zdrojové soubory manuálů pro pícku HotMelt
   │ └text_DP                Zdrojové soubory DP (Word, Excel, obrázky)
   ├Komunikacni_jednotka     Zdrojové soubory pro Komunikační jednotku
   │ ├AVRStudio4             Program v C
   │ └Eagle                  Schéma a motiv plošného spoje v programu Eagle
   ├Picka Hotmelt            Zdrojové soubory pro pícku HotMelt
   │ ├AVRStudio4             Program v C
   │ ├Eagle                  Schéma a motiv plošného spoje v programu Eagle
   │ └Matlab                 Simulace v programu Simulink Matlab
   ├Ridici_jednotka          Zdrojové soubory pro řídicí jednotku
   │ ├AVRStudio4             Program v C
   │ ├Eagle                  Schéma a motiv plošného spoje v programu Eagle
   │ ├Matlab                 Simulace v programu Simulink Matlab
   └Vizualizace              Zdrojové soubory Programu vizualizace
     └.NET                   Zdrojové soubory v .NET Visual Studiu
```

Soupiska součástek pro komunikační jednotku

	Kategorie	Reference	Skladové č.	Počet	Název	Cena za kus	celkem
1	Odpor	R1,R2	110-121	2	100k	1,00 Kč	2,00 Kč
2		R3	110-097	1	10k	1,00 Kč	1,00 Kč
3		RN1-RN2	111-249	2	RR3X220RB	3,00 Kč	6,00 Kč
4		RN3	111-291	1	RR6x2k2	3,00 Kč	3,00 Kč
5	Kondenzátor	C1	122-028	1	CT10M/25V	5,00 Kč	5,00 Kč
6		C2-C6	122-008	5	CT 1M/35V	3,00 Kč	15,00 Kč
7		C8,C10,C12	121-574	3	FKS210N/400V	4,50 Kč	13,50 Kč
8		C1	123-157	1	E470M/25V	2,50 Kč	2,50 Kč
9		C4	123-094	1	E47M/25V	1,00 Kč	1,00 Kč
10		C3,C9,C11,C13	120-060	4	CK 100N/63V	1,00 Kč	4,00 Kč
11		C2	120-174	1	CK 330N/50V	4,50 Kč	4,50 Kč
12		C5,C6	120-019	2	CK 27P/500V	1,00 Kč	2,00 Kč
13	Procesor	IC1	423-202	1	ATTINY2313-20PU	43,00 Kč	43,00 Kč
14	IO	IC2	425-037	1	74HC151	6,00 Kč	6,00 Kč
15		IC3	426-028	1	74HC138	5,50 Kč	5,50 Kč
16		IC4	433-100	1	MAX232CPE	20,00 Kč	20,00 Kč
17	Krystal	Q1	131-091	1	QM 4.096MHZ	9,90 Kč	9,90 Kč
18	Diodový můstek	D1	227-055	1	B560C1000	12,00 Kč	12,00 Kč
19	Stablizátor	IC5	330-149	1	7805-STM	7,50 Kč	7,50 Kč
20	Tramsformátor	TR1	610-833	1	TRHEI305-1X6	75,00 Kč	75,00 Kč
21	Konektory	K1,K2	832-017	1	S1G20	4,00 Kč	4,00 Kč
22		K3,K4	832-025	1	S2G26	5,00 Kč	5,00 Kč
23		K5	821-129	1	ARK705V 2P	3,00 Kč	3,00 Kč
24	Patice		824-006	1	DIL20PZ	9,90 Kč	9,90 Kč
25	Chladič		620-021	1	DO1A	3,00 Kč	3,00 Kč
			Celkem	37			263,30 Kč

Poznámky: Skladové číslo platí pro obchody GM.
Lámací lišty vystačí přibližně na dva výrobky
Ceny jsou s DPH a jsou spíše orientační ze dne 9. 3. 2007 a jsou s DPH