



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODEL PECE NA VÝROBU ŽÁRUVZDORNÝCH MATERIÁLŮ

MODEL OF ELECTRIC FURNANCE FOR HEAT-RESISTANT MATERIAL PROCESSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LEŠEK FRANEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN DVOŘÁČEK

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Lešek Franek

ID: 106433

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Model pece na výrobu žáruvzdorných materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V simulinku vytvořte model pece pro výrobu žáruvzdorných materiálů. Model vytvořte tak, aby bylo možné volit hmotnost vypalovaného materiálu. Výsledky vytvořeného modelu porovnejte s výsledky ze skutečného procesu a model implementujte do PLC firmy B@R. Do druhého PLC implementujte průmyslový regulátor typu PID s předurčením pro regulaci tepelných procesů. Vytvořený regulátor ověřte v simulaci, na vytvořeném modelu pece a vybraných fyzikálních modelech.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Ogata. K: Modern control engineering, fourth edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997. ISBN 0-13-314899-8
- [2] Astrom K. J., Wittenmark B: Computer-controlled systems, theory and design. New Jersey: Prentice Hall, 1997. ISBN 0-13-314899-8
- [3] Dorf R. C., Bishop R. H.: Modern control systems, tenth edition. ISBN 0-13-127765-0

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Martin Dvořáček

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Obsahem dokumentu je tvorba modelu pece, jeho výsledné porovnání s reálnou pecí a návrh regulátoru. Je zde popsán 3D návrh v programu SolidWorks, tvorba fyzikálního modelu v Comsol Multiphysics a jeho export do Simulinku. Následně je popsáno schéma Simulinku a funkce programové části a vizualizace v B&R Automation Studiu. Získané výsledky jsou srovnány s naměřenými hodnotami. Dále je popsán návrh regulátoru s možností off-line identifikace.

Klíčová slova

modelování, simulace, pec, SolidWorks, Comsol Multiphysics, Matlab, Simulink, B&R, Automation Studio, PLC, PSD, PID, regulátor, identifikace

Abstract

Content of the document is to create model of kiln, compare result with the real kiln. There is described 3D design in SolidWorks application, creation of a physical model in COMSOL Multiphysics and its export to Simulink. Subsequently is described the Simulink scheme, functions of program parts and visualization in B&R Automation Studio. The obtained results are compared with measured values. There is also described the design of a controller with a off-line identification.

Keywords

modeling, simulation, kiln, SolidWorks, Comsol Multiphysics, Matlab, Simulink, B&R, Automation Studio, PLC, PSD, PID, regulator, identification

Bibliografická citace

FRANEK, L. *Model pece na výrobu žáruvzdorných materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Dvořáček.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Model pece na výrobu žáruvzdorných materiálů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **1. června 2010**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Dvořáčkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Děkuji firmě Refrasil s.r.o., že mi umožnila měření na reálné peci a poskytla cenné údaje a rady pro tvorbu této práce.

V Brně dne: **1. června 2010**

.....

podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD.....	9
2. PEC PRO VÝPAL ŽÁROVZDORNÝCH MATERIÁLŮ.....	10
2.1 Charakteristika pece.....	10
2.2 Typ a jednotlivé části pece.....	10
3. TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI PECE.....	13
4. NÁVRH 3D MODELU PECE – SOLIDWORKS.....	15
4.1 Instalace a spuštění.....	15
4.2 Návrh modelu.....	15
4.3 Optimalizace modelu pro Comsol Multiphysics	16
5. FYZIKÁLNÍ MODEL PECE – COMSOL.....	17
5.1 Instalace a spuštění.....	17
5.2 Počáteční nastavení a import 3D modelu.....	17
5.3 Nejdůležitější fyzikální parametry.....	18
5.4 Nastavení parametrů.....	19
5.4.1 Desky Sibrál SUPER 300.....	19
5.4.2 Rohož Sibrál SUPER 130.....	19
5.4.3 Kanthal A.....	20
5.4.4 Silicium karbid.....	22
5.4.5 Vzduch.....	22
5.5 Postprocessing.....	22
5.6 Export modelu do Matlabu / Simulinku.....	24
5.7 Výsledné průběhy.....	26
6. MODEL PECE PRO VÝUKU – MATLAB / SIMULINK.....	27
6.1 Export do B&R Automation Studia.....	28
6.2 Jednotlivé funkční celky.....	29
7. IMPLEMENTACE DO PLC – B&R AUTOMATION STUDIO.....	32
7.1 Instalace a spuštění.....	32
7.2 Programová část.....	32
7.3 Vizualizace.....	34

8. INSTALACE A ZPROVOZNĚNÍ POWER PANELU	38
9. STAVBA PECE A MĚŘENÍ REÁLNÝCH PRŮBĚHŮ.....	39
9.1 Stavba a měření.....	39
9.2 Použité přístroje a software.....	40
10. SROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH PRŮBĚHŮ.....	41
11. NÁVRH REGULÁTORU.....	44
11.1 Použité typy regulátoru.....	44
11.1.1 PSD.....	44
11.1.2 β – PSD.....	44
11.1.3 Manuální režim.....	45
11.1.4 Filtr žádané hodnoty.....	45
11.1.5 Beznárazové přepínání.....	45
11.2 Blokové Schéma regulace.....	45
11.3 Implementace do Power Panelu B&R.....	46
11.3.1 Vstupní a výstupní analogové moduly.....	46
11.3.2 Vizualizace.....	47
12. IDENTIFIKACE.....	49
12.1 Teoretický rozbor.....	49
12.2 Příklad výpočtu.....	50
12.3 Implementace do Power Panelu.....	51
12.4 Nastavení žádané hodnoty a schéma toku dat.....	51
13. REGULACE.....	53
13.1 Regulace pece.....	53
13.2 Regulace tepelného tunelu.....	56
13.3 Regulace přípravku krabička.....	58
14. ZÁVĚR.....	60
15. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
16. SEZNAM ZKRATEK.....	64
17. PŘÍLOHY.....	65
17.1 Obsah CD, Obrázky.....	65
17.2 Použité proměnné.....	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr 2.1: Jedna z používaných odporových pecí ve firmě Refrasil s.r.o.....	10
Obr 2.2: Topné těleso pece.....	11
Obr 2.3: Struktura pece se sibalovou izolací, fotografie.....	11
Obr 2.4: Struktura pece se sibalovou izolací, 3D model.....	12
Obr 2.5: Struktura pece se šamotovou izolací, 3D model.....	12
Obr 4.1: Prostředí programu SolidWorks.....	15
Obr 4.2: Srovnání zjednodušeného a původního modelu v SolidWorks.....	16
Obr 5.1: Postprocessing – 3D pohled.....	23
Obr 5.2: Postprocessing – řez.....	23
Obr 5.3: Postprocessing – ukázka grafu teploty v programu Comsol.....	24
Obr 5.4: Postprocessing – animace.....	24
Obr 5.5: Prostředí programu Comsol Multiphysics.....	25
Obr 6.1: Schéma modelu v programu Simulink.....	27
Obr 7.1: Diagram toku dat.....	33
Obr 7.2: Vizualizace – výběr pece.....	35
Obr 7.3: Vizualizace – simulace.....	35
Obr 7.4: Vizualizace – nastavení.....	36
Obr 7.5: Prostředí B&R Automation Studia.....	37
Obr 8.1: Schéma zapojení karty X20BR9300 [10].....	38
Obr 9.1: Průběh měření.....	39
Obr 11.1: Zapojení analogových vstupů a výstupů podklady [10].....	46
Obr 11.2: Vizualizace regulace – grafický průběh regulace.....	47
Obr 11.3: Vizualizace regulace – nastavení PSD regulátoru.....	48
Obr 12.1: Vizualizace identifikace soustavy.....	51
Obr 12.2: Vizualizace – nastavení žádané hodnoty.....	52
Obr 12.3: Diagram toku dat v projektu regulátoru.....	52
Obr 13.1: Schéma regulačního obvodu pro regulaci pece, podklady [12].....	53
Obr 17.1: Model pece a regulátor.....	65
Obr 17.2: Blokové schéma regulátoru.....	66

SEZNAM TABULEK

Tab 5.1: Fyzikální parametry desek Sibal SUPER 300.....	19
Tab 5.2: Fyzikální parametry rohože Sibal SUPER 130.....	20
Tab 5.3: Fyzikální parametry kanthalu A.....	22
Tab 5.4: Fyzikální parametry silicium-karbidové formy.....	22
Tab 9.1: Seznam přístrojů pro měření.....	40
Tab 9.2: Použité termočlánky.....	40
Tab 9.3: Použitý software.....	40
Tab 13.1: Parametry regulátoru pece.....	54
Tab 13.2 Parametry regulátorů tepelného tunelu.....	56
Tab 17.1: Globální proměnné v Automation Studiu.....	67
Tab 17.2: Lokální proměnné programu Zpracovani_hodnot.....	68
Tab 17.3: Lokální proměnné programu IOAnalog.....	68
Tab 17.4: Proměnné struktury Spec.....	68

SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.1: Závislost součinitele tepelné vodivosti desky Sibal SUPER na teplotě.....	19
Graf 5.2: Závislost součinitele tepelné vodivosti rohože Sibal SUPER na teplotě.....	20
Graf 5.3: Závislost součinitele tepelné vodivosti kanthalu A na teplotě.....	21
Graf 5.4: Závislost měrné tepelné kapacity kanthalu A na teplotě.....	21
Graf 5.5: Výsledné průběhy z programu Comsol Multiphysics.....	26
Graf 10.1: Srovnání průběhů pro napětí 110V.....	41
Graf 10.2: Srovnání průběhů pro napětí 230V.....	42
Graf 10.3: Srovnání průběhů pro napětí 230V a 2 cihlami uvnitř.....	43
Graf 13.1: Regulace teploty modelu pece - skoková změna žádané hodnoty.....	54
Graf 13.2: Regulace teploty modelu pece - požadovaný průběh.....	55
Graf 13.3: Regulace teploty žárovkou - skok žádané hodnoty.....	56
Graf 13.4: Regulace teploty žárovkou - trapézový průběh.....	57
Graf 13.5: Regulace teploty větrákem - skok žádané hodnoty.....	57
Graf 13.6: Regulace krabičky - skok žádané hodnoty.....	58
Graf 13.7: Regulace krabičky - trapézový průběh žádané hodnoty.....	59

1. ÚVOD

Cílem práce je vytvoření softwarového modelu pece pro výpal žárovzdorných materiálů, který bude umožňovat ověření vlastností pece při použití různých konstrukčních materiálů případně izolací a bude umožňovat změnu parametrů pece. Model vytvořený na základě skutečné laboratorní pece bude dále vhodně upraven pro účely výuky a následně v laboratoři inteligentních regulátorů implementován do PLC. Modely budou ověřeny srovnáním s reálnou pecí. Aby bylo možné zabývat se robustností regulátoru případně změnit vlastnosti modelu, bude mít model možnost volit vyzdívkou a vypalovaný materiál. Tvorba modelu reálné pece bude probíhat v programu Comsol Multiphysics, jež je určen pro modelování systémů s rozprostřenými parametry a to z důvodu aby bylo možné ověřit chování pece i při jiných parametrech než má reálná pec, příkladem může být použití jiné izolace, která při nižších nákladech poskytne srovnatelné vlastnosti. Nejdříve bude nutné vytvořit 3D model pece v některém z 3D CAD programů, tento model bude použit programem Comsol, následně definování fyzikálních parametrů jednotlivých materiálů v programu Comsol Multiphysics a ověření fyzikálního modelu, jehož průběh bude srovnán s reálnou pecí. Pro účely regulace, kdy vystačíme s jednoduchým modelem, bude ověřena možnost automatického exportování modelu z Comsolu do prostředí Simulinku. Zde bude přidána do modelu doplňující funkčnost pro potřeby výuky. Výsledný model bude implementován v Programovatelném automatu firmy B&R včetně přehledné vizualizace, možnosti volby různých nastavení, řízení přístupu, 3 jazykových mutací a technických specifikací jednotlivých modelů. Výsledné průběhy budou opět srovnány se změřenými průběhy na reálné peci. Dále bude vytvořen regulátor optimalizovaný pro použití v tepelných procesech v reálné praxi, který bude implementován do Power Panelu firmy B&R. Regulátor bude obsahovat klasický PSD regulátor i regulátor s upravenou strukturou obecně označovaný jako β -PSD, filtr žádané hodnoty, vše s možností nastavení příslušných konstant. Regulátor bude umožňovat bez nárazové přepínání mezi jednotlivými typy regulátorů a manuálním režimem, bude obsahovat potlačení přebuzení a filtr v derivační složce. Cílem vizualizace je user-friendly rozhraní pro nastavování příslušných konstant techniky.

2. PEC PRO VÝPAL ŽÁROVZDORNÝCH MATERIÁLŮ

2.1 CHARAKTERISTIKA PECE

Jedná se o novou laboratorní pec ve firmě Refrasil s.r.o., která slouží pro výpal vzorků žárovzdorných materiálů, zkoušky tepelných křivek a výpal jednotlivých kusů, které vyžadují individuální přístup. Tato firma disponuje mnoha laboratorními pecemi různých typů.



Obr 2.1: Jedna z používaných odporových pecí ve firmě Refrasil s.r.o.

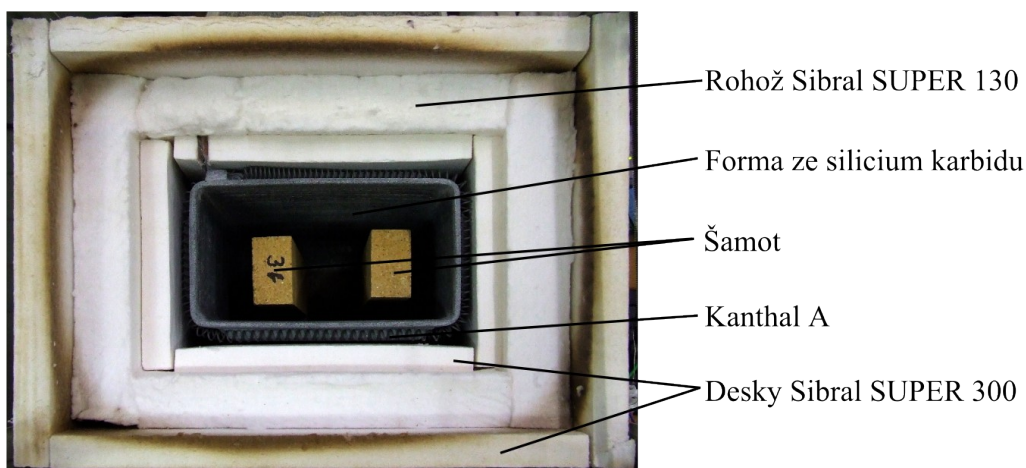
2.2 TYP A JEDNOTLIVÉ ČÁSTI PECE

Jelikož se jedná o odporovou pec, hlavní součástí je hranolová dutá forma ze silicium karbidu, na které je navinut kanthalový drát.

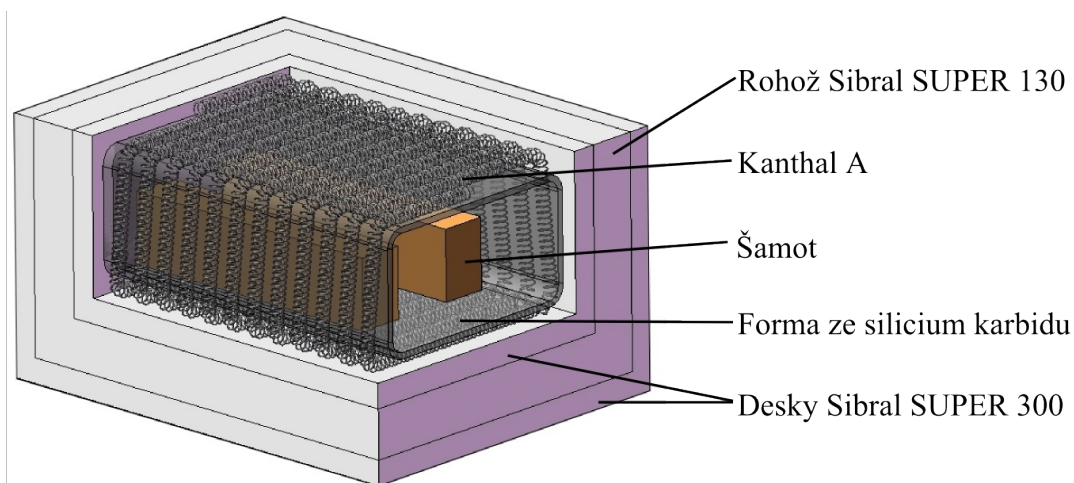


Obr 2.2: Topné těleso pece

Izolace je tvořena materiálem sibal. Vnitřní část tvoří desky z keramických vláken Sibal SUPER 300 tloušťky 20 mm, prostřední část rohož ze žárovzdušných hlinitokřemičitých vláken Sibal SUPER 130 tloušťky 40 mm a vnější část je opět tvořená deskami Sibal SUPER 300 tloušťky 20 mm. Sibal byl použit z důvodů velmi nízké tepelné vodivosti, výdrže do teploty 1430 °C a také díky malé hustotě a tím i nízké tepelné kapacitě. Jako žíhaný materiál byly použity 2 šamotové cihly.

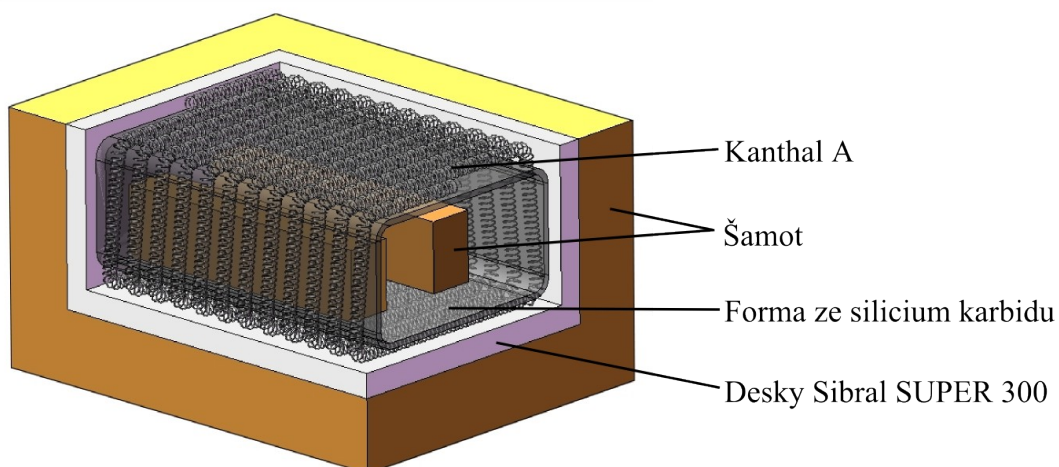


Obr 2.3: Struktura pece se sibalovou izolací, fotografie



Obr 2.4: Struktura pece se sibalovou izolací, 3D model

Pro ověření, zda by šlo použít místo drahého sibalů mnohem levnější šamot, byl vytvořen další model. Čistě šamotová izolace se ukázala jako nepostačující, ale velmi dobrých výsledků bylo dosaženo při použití jedné vrstvy sibalů a zbylé vrstvy byly nahrazeny šamotem.



Obr 2.5: Struktura pece se šamotovou izolací, 3D model

Přehledné tabulky parametrů důležitých pro model jsou uvedeny v kapitole Comsol Multiphysics.

3. TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI PECE

Přivedením elektrického napětí na konce kanthalového drátu se drát začne ohřívat s výkonem rovným

$$P = \frac{U^2}{R(T)} \quad [W] \quad (3.1)$$

kde $U [V]$ je přiložené napětí a $R [\Omega]$ je odpor kanthalového drátu v závislosti na teplotě.

Závislost odporu na teplotě je:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad [\Omega] \quad (3.2)$$

kde R je odpor drátu, $R_0 [\Omega]$ je odpor drátu při počáteční teplotě, $\alpha [K^{-1}]$ je teplotní součinitel elektrického odporu, $\Delta T [K]$ je rozdíl mezi aktuální teplotou drátu a jeho počáteční teplotou, při které bylo stanoveno R_0 .

Toto teplo se dále přenáší na sibalovou izolaci a silicium karbidovou formu v místě dotyku s topným drátem pomocí přenosu tepla vedením:

$$q = \frac{\lambda}{s} \Delta T \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.3) [1]$$

kde q je hustota tepelného toku, $\lambda [Wm^{-1}K^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti, $s [m]$ je tloušťka materiálu a $\Delta T [K]$ rozdíl teplot.

Jelikož u vzduchu dochází k proudění částic na velké vzdálenosti, dochází u něj také k přenosu tepla konvekcí (prouděním):

$$q = \alpha \Delta T \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \alpha = f\left(\frac{vd}{\eta}\right) \quad \left[\frac{W}{K m^2} \right] \quad (3.4) [1]$$

kde q je hustota tepelného toku, α je součinitel přestupu tepla konvekcí a je funkcí rychlosti pohybujících se částic, jejich průměru a viskozity prostředí. $\Delta T [K]$ je teplotní rozdíl.

U vyšších teplot zejména nad $1000^\circ C$ dochází k přenosu tepla sáláním (vyzařováním):

$$q = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.5) [1]$$

kde q je hustota tepelného toku, ϵ složený součin poměrné pohltivosti obou těles $<0; 1>$, $\sigma [Wm^{-2}K^{-4}]$ je Stefanova-Boltzmannova konstanta rovna $5,670400 \cdot 10^{-8}$.

T_1 [K] je teplota vyzařujícího tělesa a T_2 [K] je teplota pohlcujícího tělesa., ϕ je úhlový součinitel přenosu tepla (pro rovnoběžné plochy $\phi = 1$)

Tepelný tok lze stanovit z hustoty tepelného toku pomocí vztahu:

$$\Phi = qS \quad [W] \quad (3.6) [1]$$

Kde Φ je tepelný tok, q [Wm^{-2}] je hustota tepelného toku, S [m^2] je plocha uvažované oblasti.

Během dynamického děje je nutné zohlednit také akumulaci tepla v jednotlivých tělesech:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \sum \Phi_i \quad \left[\frac{K}{s} \right] \quad C = mc \quad \left[\frac{J}{K} \right] \quad (3.7) [1]$$

kde dT/dt je tepelný spád, C je tepelná kapacita tělesa, m [kg] je hmotnost tělesa c [$J kg^{-1}K^{-1}$] je měrná tepelná kapacita materiálu tělesa.

Jelikož se jedná o soustavu s rozprostřenými parametry, je analytické řešení dosti obtížné, možné postupy jsou popsány v [2]. Proto byl pro řešení zvolen program Comsol Multiphysics. Přičemž přenos tepla konvekcí nebyl zohledněn z důvodu nemožnosti určit rychlost a směr pohybu vzduchu uvnitř pece. Jelikož se nejednalo o nucenou konvekci, ale přirozenou, nemá toto zjednodušení zásadní vliv na výsledek. Zjednodušení se projevilo, když do prostoru pece byly vloženy cihly, kdy teplota vzduchu mezi nimi byla nižší než na okrajích z důvodu prostupu tepla cihlami. Ve skutečnosti, ale díky cirkulaci vzduchu byla tato teplota uvnitř pece všude stejná. Tato odchylka byla částečně snížena zvýšením tepelné vodivosti vzduchu uvnitř pece. Přenos tepla sáláním nebyl taktéž zohledněn, ale zde nedošlo k výraznému zkreslení výsledků, jelikož se tento přenos začíná uplatňovat při teplotách vyšších než $1000^\circ C$ a to zejména u materiálu kanthal, který byl velmi těsně ohraničen sibalovou izolací a silicium karbidovou formou.

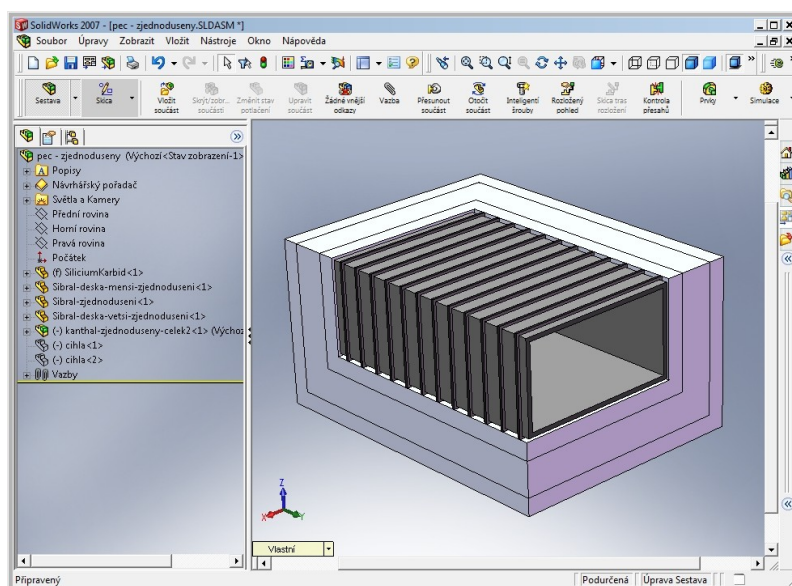
4. NÁVRH 3D MODELU PECE – SOLIDWORKS

4.1 INSTALACE A SPUŠTĚNÍ

Aby bylo možné program SolidWorks spustit na Windows Vista, bylo nutné spustit jej s oprávněními správce v režimu kompatibility s Windows XP, jelikož se ale jednalo o SolidWorks 2007, může být tento problém u novějších verzí odstraněn.

4.2 NÁVRH MODELU

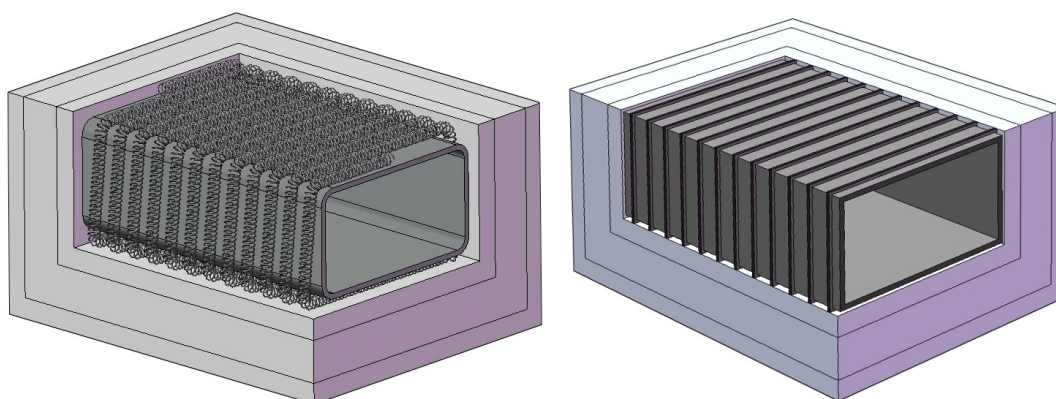
Nejdříve byly navrženy jednotlivé díly pomocí nástrojů skica, vysunutí, skořepina. Následně byla z jednotlivých dílů vytvořena výsledná sestava pomocí vazeb vzdálenosti a sjednocení. Po vytvoření pohledu řezů a obarvení jednotlivých dílů byl výsledek stejný jak na obrázcích Obr 2.4: Struktura pece se sibalovou izolací, 3D model a Obr 2.5: Struktura pece se šamotovou izolací, 3D model. Poměrně obtížný byl návrh topné spirály. Nejdříve byla vymodelována jedna smyčka a následně byl výsledek 12 krát zkopírován. Kolem vodící linky byla vytvořena šroubovice a po vnější hraně šroubovice byla protažena kružnice čímž byl vytvořen 3D model topného drátu jak je vidět na obrázku Obr 4.2: Srovnání zjednodušeného a původního modelu v SolidWorks.



Obr 4.1: Prostředí programu SolidWorks

4.3 OPTIMALIZACE MODELU PRO COMSOL MULTIPHYSICS

Velmi důležitá byla volba formátu modelu pro export. U některých formátů vznikaly mezery mezi jednotlivými díly nebo byly některé díly deformované. Nejlépe se osvědčil formát Parasolid x_t. U tohoto formátu Comsol správně detekoval všechny díly, nevznikly žádné další díly ve spojích a z nevyužitého prostoru byl vytvořen další díl, který byl nakonfigurován jako vzduch. Tento formát tedy splnil vše, co bylo třeba, nicméně Comsol odmítal pro takto složitý model vytvořit síť, která je následně využívána k výpočtům. Postupným zjednodušováním a změnami nastavení pro tvorbu sítě v Comsolu bylo dosaženo úspěšného výsledku. Následně byly odstraněny zaoblená místa a drát s kruhovým průřezem byl nahrazen drátem s čtvercovým průřezem. Tím se síť výrazně zjednodušila a výpočet se tím značně urychlil. Srovnání původního a zjednodušeného modelu je na následujících obrázcích.



Obr 4.2: Srovnání zjednodušeného a původního modelu v SolidWorks

Dalším zjednodušením bylo rozdělení topné spirály do 12 samostatných oblouků. I když toto v reálném životě není možné, Comsol si s tím velmi dobře poradí, stačí nastavit adekvátní příkon pro každý oblouk.

Zjednodušování bylo prováděno vždy tak, aby byl zachován objem upravovaného objektu.

5. FYZIKÁLNÍ MODEL PECE – COMSOL

5.1 INSTALACE A SPUŠTĚNÍ

Instalace programu Comsol Multiphysics proběhla bez problémů, při spuštění jsou na výběr 2 možnosti: spustit Comsol nebo spustit Comsol s Matlabem. Pokud využijeme druhou možnost, vytvoří se spojení mezi těmito programy a je možno je propojit, případně exportovat model z Comsolu do Matlabu. Za velký nedostatek lze považovat fakt, že pokud se toto spojení přeruší, jediné, co Comsol nabídne, je obnova spojení, která, ale v naprosté většině případů není možná nebo vypnutí programu, přičemž Comsol nenabídne možnost uložení dosavadní práce. K výpadkům spojení docházelo při pádu Matlabu nebo při delší nečinnosti.

5.2 POČÁTEČNÍ NASTAVENÍ A IMPORT 3D MODELU

Po spuštění programu se objeví okno, ve kterém je na výběr jestli chceme založit nový model, zvolit model z knihovny, ve které se nacházejí zejména modely k tutoriálům, případně otevřít předem uložený model. Práce s programem Comsol je popsána v [3]

Pokud zvolíme nový model, musíme specifikovat dimenzi modelu, v tomto případě 3D. Následně je nutno vybrat mód simulace. V tomto případě to byl Comsol Multiphysics → Heat Transfer → Conduction → Transient analysis. Jako metoda pro výpočet byla ponechána Lagrangeova kvadratická metoda, která byla doporučena v tutoriálu, který jsem před tím absolvoval [4].

Nyní se již nacházíme v prostředí Comsolu. Nejprve je nutné importovat předem vytvořený 3D model, v mém případě v programu SolidWorks, postup je popsán v kapitole Návrh 3D modelu pece – SolidWorks. To provedeme z menu File → Import → Cad Data From File. Po importu je již vše připraveno pro nastavování parametrů. Ještě byl přidán bod pomocí Draw → Point a byl umístěn doprostřed pece. Na tento bod se bude možné později odkázat a měřit v něm teplotu. Takže bude plnit funkci snímače teploty.

5.3 NEJDŮLEŽITĚJŠÍ FYZIKÁLNÍ PARAMETRY

Zde bude popsáno nastavení jednotlivých parametrů pro různé materiály. Ve zvoleném módu se nastavují především tyto parametry:

- δ_{ts} – koeficient škálování času, při nastavení u všech materiálů například na 1/60 změníme časové měřítko ze sekund na minuty.
- k [W/(mK)] – součinitel tepelné vodivosti, představuje λ ze vzorce (3.3) [1], použit k výpočtu tepelného toku
- ρ [kg/m³] – hustota, slouží k určení hmotnosti a ta zase slouží společně s měrnou tepelnou kapacitou k určení tepelné kapacity ze vzorce (3.7) [1]
- C_p [J/(kgK)] – měrná tepelná kapacita, společně s hustotou slouží k stanovení tepelné kapacity ze vzorce (3.7) [1]
- Q [W/m³] – příkon na jednotku objemu, z něj se určí celkový příkon

Ke stanovení tepelného toku, hmotnosti nebo příkonu na jednotku objemu je nutné znát geometrické vlastnosti jednotlivých těles. To zjistíme pomocí Postprocessing → Geometric Properties. Zde se nachází jak plocha tak objem tělesa. To bylo využito k získání příkonu na jednotku objemu, kdy byl nastaven známý příkon a byl vydělen takto zjištěným objemem drátu.

Jelikož celkový příkon je v tomto případě časově proměnnou veličinou, bude v nastavení parametrů zastoupen písmenem P a pro potřeby simulace přímo v programu Comsol může být P nastaveno jako konstanta pomocí Options → Constants nebo ještě lépe jako funkce pomocí Options → Expressions → Global Expressions. Zde je možné nastavit i nespojitou funkci. Jelikož požadujeme konstantní příkon a od určitého časového okamžiku příkon nulový byla použita funkce:

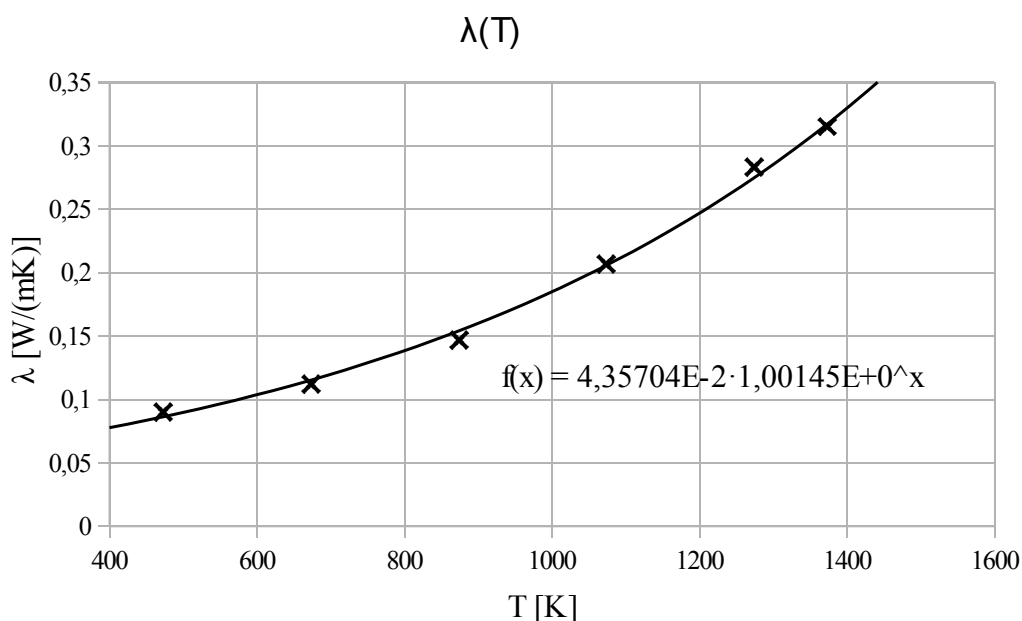
$$P(t < t_1) \quad (5.1)$$

kde P je požadovaný příkon a t_1 čas, ve kterém má dojít k odpojení příkonu.

5.4 NASTAVENÍ PARAMETRŮ

5.4.1 Desky Sibrál SUPER 300

U tohoto materiálu byly všechny potřebné parametry uvedené v katalogovém listu [5], ale součinitel tepelné vodivosti je značně závislý na teplotě. Závislost byla prezentována v podobě tabulky hodnot, a proto bylo nutné aproximovat tuto závislost určitou funkcí.



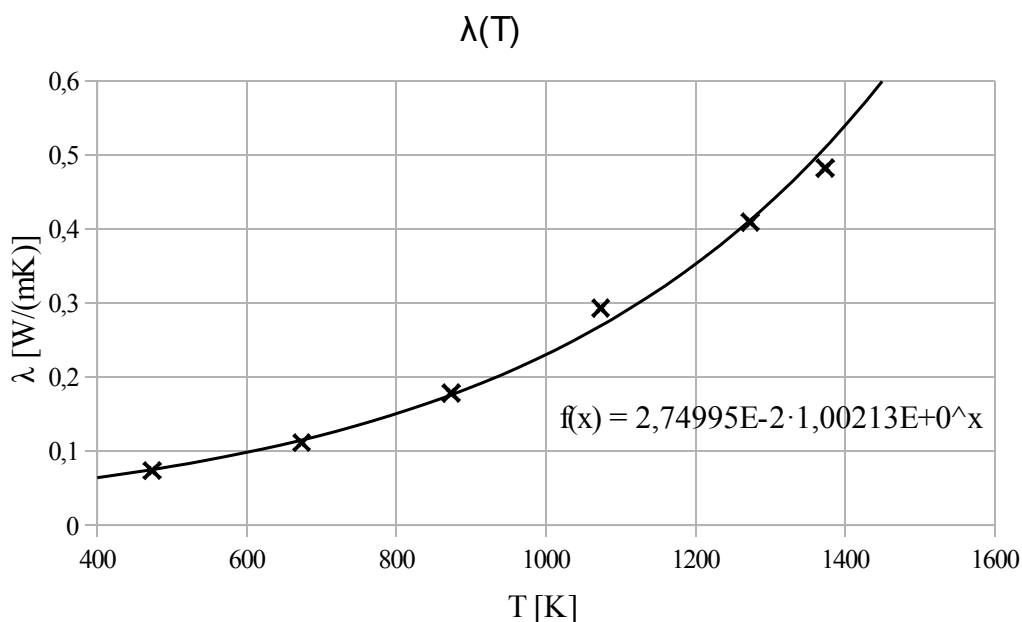
Graf 5.1: Závislost součinitele tepelné vodivosti desky Sibrál SUPER na teplotě

k	$0,0436 \cdot 1,00145^T \text{ W/(mK)}$
ρ	300 kg/m ³
C_p	969 J/(kgK)
Q	0 W/m ³

Tab 5.1: Fyzikální parametry desek Sibrál SUPER 300

5.4.2 Rohož Sibrál SUPER 130

U tohoto materiálu je situace podobná jak v předchozím případě, proto je opět nutno stanovit součinitel tepelné vodivosti.



Graf 5.2: Závislost součinitele tepelné vodivosti rohože Sibal SUPER na teplotě

k	$0,0275 \cdot 1,00145^T \text{ W/(mK)}$
ρ	130 kg/m^3
C_p	969 J/(kgK)
Q	0 W/m^3

Tab 5.2: Fyzikální parametry rohože Sibal SUPER 130

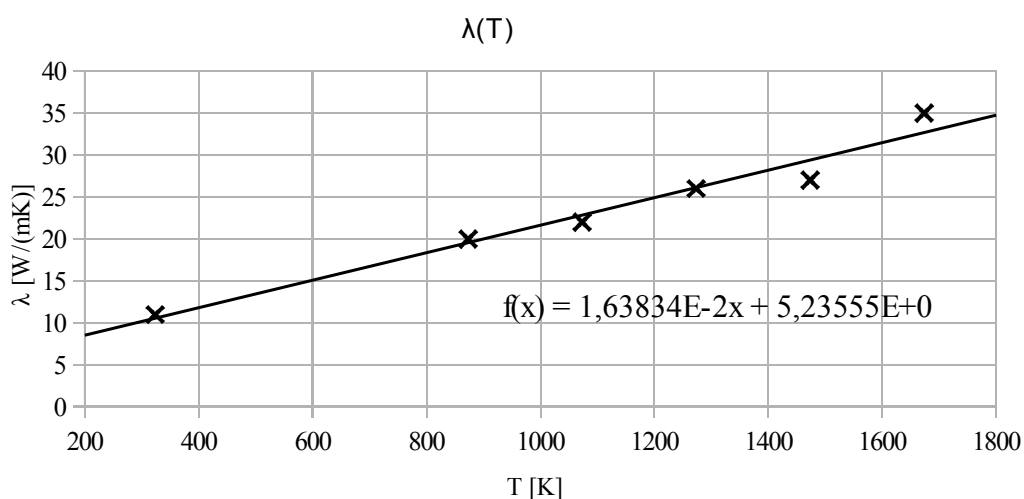
5.4.3 Kanthal A

Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita jsou značně závislé na teplotě. V katalogovém listu [6] byly závislosti definované tabulkou, proto bylo nutné tyto závislosti aproximovat. Příkon kanthalu byl definován jako

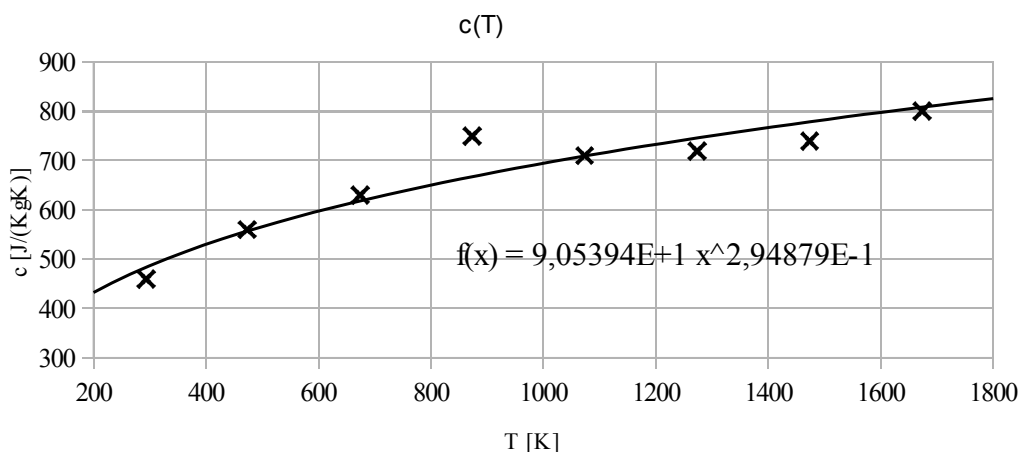
$$P_k = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{R_0(1 + \alpha \Delta T)} = \frac{P}{1 + \alpha \Delta T} \quad [W] \quad (5.2)$$

Kde P_k je příkon kanthalu, U [V] je napětí na kanthalu, R [Ω] je odpor kanthalu, R_0 [Ω] je odpor drátu při počáteční teplotě, α [K⁻¹] je teplotní součinitel elektrického odporu, ΔT [K] je rozdíl mezi aktuální teplotou drátu a jeho počáteční teplotou, při které bylo stanoveno R_0 . P [W] je výkon při počáteční teplotě. Důvod

proč byla použita poněkud neobvyklá závislost výkonu na výkonu při počáteční teplotě a teplotě je, že pokud by bylo použito vstupní napětí, bylo by ve vzorci U^2 , což je nelineární závislost a vzhledem k nemožnosti vyexportovat nelineární model, se toto jevílo jako nejlepší řešení. Výkon kanthalu na jednotku objemu získáme vydělením tohoto vztahu objemem kanthalového drátu. Hodnota je ještě vynásobena 2000 z důvodu exportu linearizovaného modelu. Comsol pravděpodobně při exportu dosadil za P jedna a výsledek linearizoval. Jelikož v praxi je P v řádu stovek bylo při tomto nastavení dosaženo lepších výsledků. Proto je ale třeba výkon před vstupem do tohoto modelu vydělit 2000.



Graf 5.3: Závislost součinitele tepelné vodivosti kanthalu A na teplotě



Graf 5.4: Závislost měrné tepelné kapacity kanthalu A na teplotě

k	$5,24+0,0164T \text{ W/(mK)}$
ρ	$7150-6850 \text{ (knihovna) kg/m}^3$
C_p	$9,05+T^{0,29487} \text{ J/(kgK)}$
Q	$P*15380.82933*2000/(1+0.00006*T) \text{ W/m}^3$

Tab 5.3: Fyzikální parametry kanthalu A

5.4.4 Silicium karbid

Potřebné parametry pro tento materiál neznal ani jeden ze dvou výrobců. Nicméně pro účely bakalářské práce bylo poskytnuto chemické složení formy a z toho byly určeny pomocí tepelně technických tabulek [7] potřebné parametry.

k	10 W/(mK)
ρ	2500 kg/m^3
C_p	1800 J/(kgK)
Q	0 W/m^3

Tab 5.4: Fyzikální parametry silicium-karbidové formy

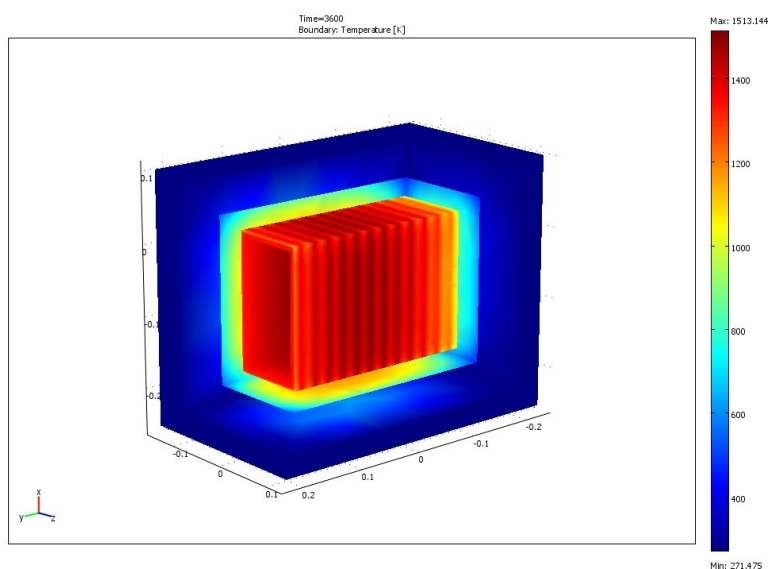
5.4.5 Vzduch

K určení parametrů vzduchu bylo využito vnitřní knihovny programu Comsol Multiphysics. Všechny parametry jsou popsány velmi přesně a závisí na mnoha fyzikálních veličinách

5.5 POSTPROCESSING

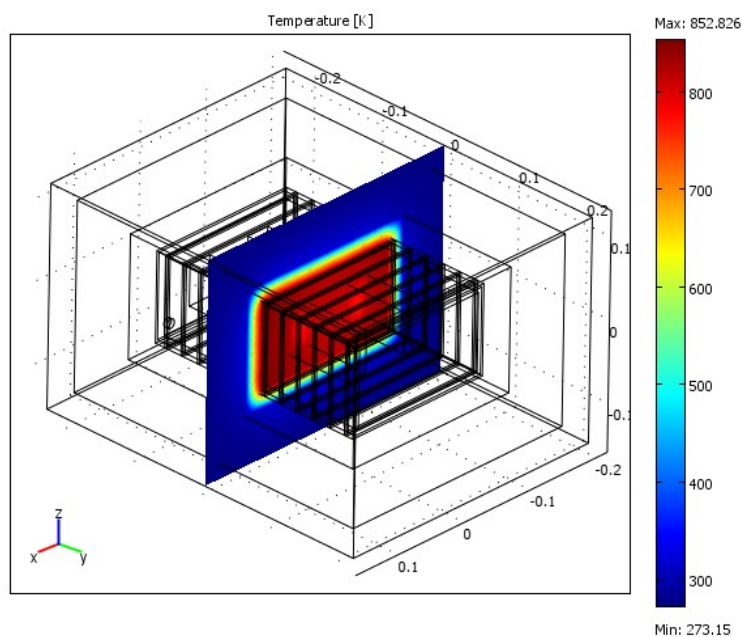
Jedná se o přehledné zobrazení výsledků simulace v programu. Na výběr jsou tyto možnosti:

- Barevné rozlišení teploty – přičemž byly skryty některé hrany, aby byl vidět i vnitřek pece.



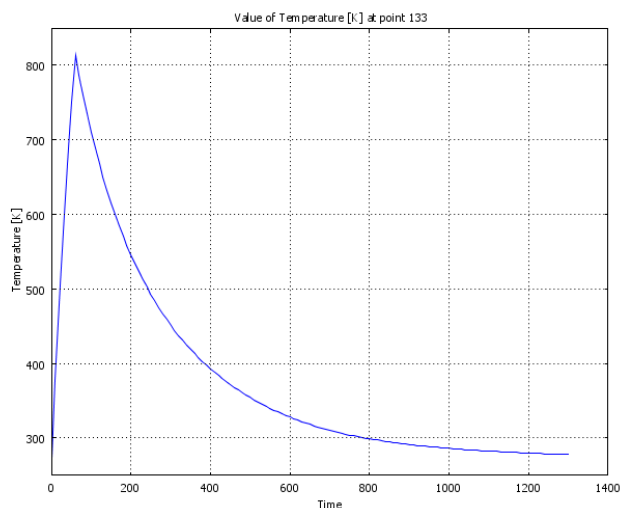
Obr 5.1: Postprocessing – 3D pohled

- Barevné rozlišení teploty – zobrazení v libovolného řezu



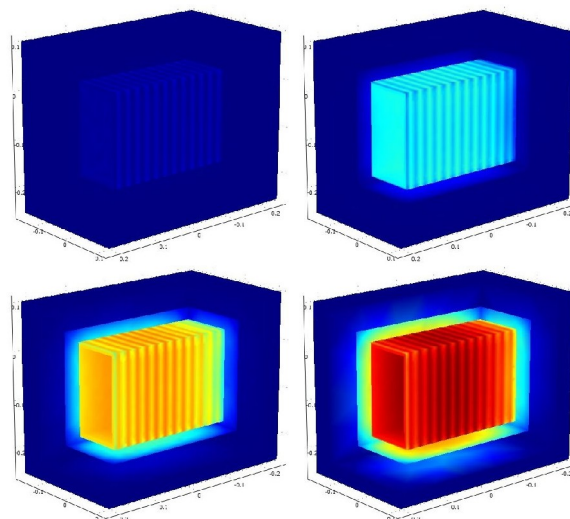
Obr 5.2: Postprocessing – řez

- Graf teploty určitého bodu



**Obr 5.3: Postprocessing – ukázka grafu teploty
v programu Comsol**

- Animace – využívá barevného rozlišení teploty, je využita ve vizualizaci samotného simulátoru.



Obr 5.4: Postprocessing – animace

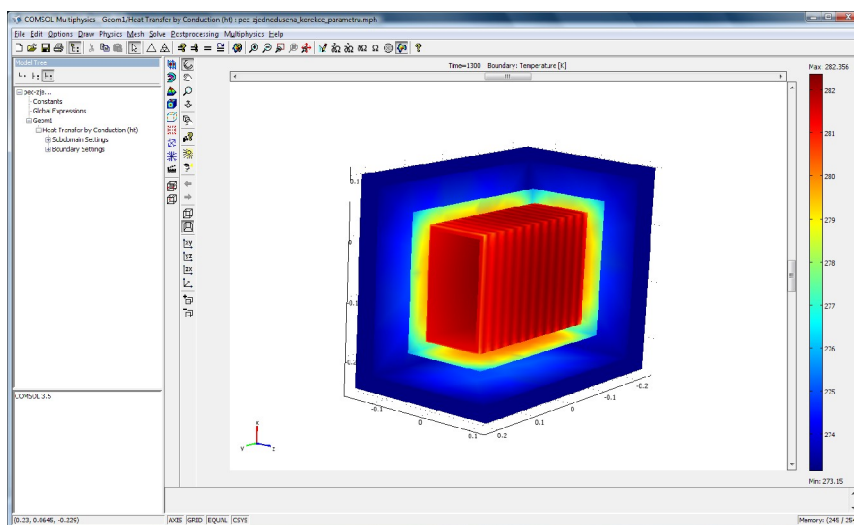
5.6 EXPORT MODELU DO MATLABU / SIMULINKU

Comsol nabízí tyto způsoby exportu modelu do Matlabu potažmo Simulinku:

- General dynamic – dynamický model pro Simulink, lze jej vložit pomocí speciálního bločku. Nelze získat stavový popis. K výpočtu musí být navázáno spojení mezi Matlabem a Comsolem. Výpočet pravděpodobně probíhá

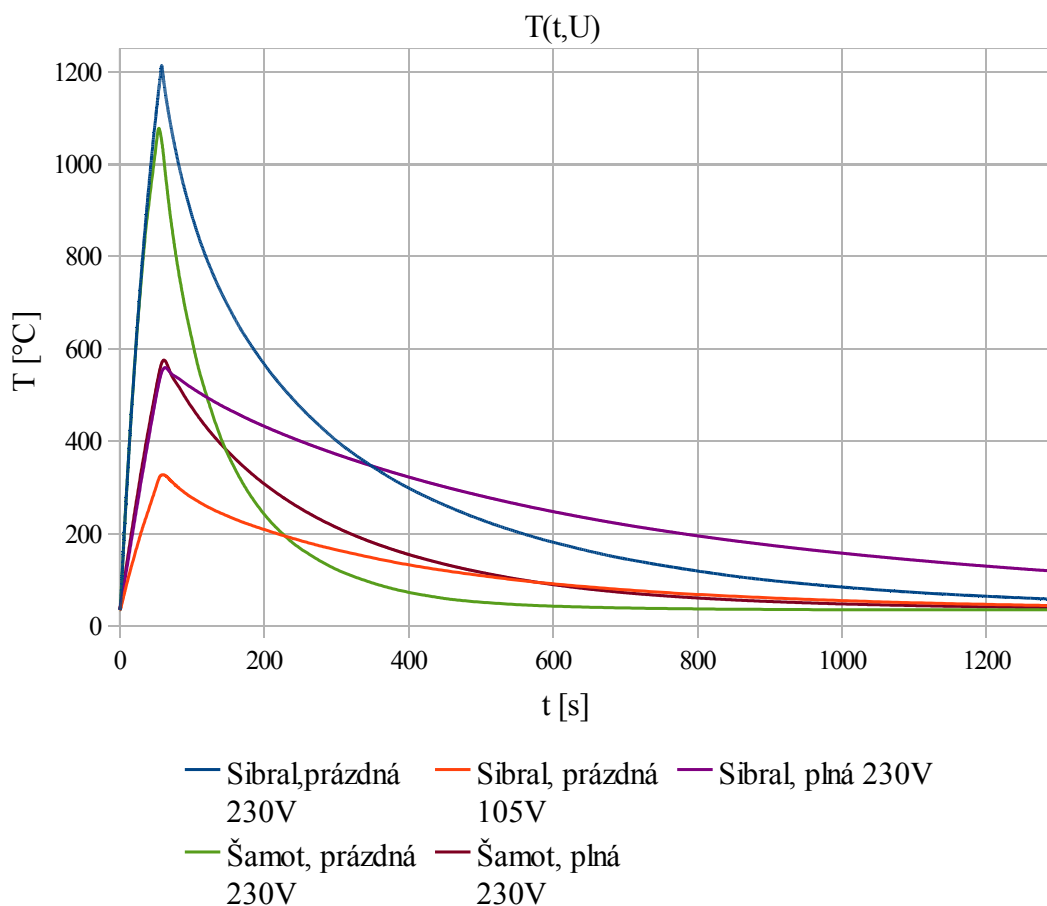
v Comsolu. Tento výpočet trval desítky minut u modelu z tutoriálu, což byl 2D obdélník. Pro tuto pec se doba výpočtu blížila nekonečnu, což je pro modelování tepelných ztrát prakticky nepoužitelné.

- Linearized dynamic – linearizovaný model, který je možno vložit pomocí speciálního bločku přímo do Simulinku. Nabízí další dvě možnosti:
 - bez volby model reduction – Pro model z tutoriálu fungoval velmi dobře, v mém případě skončil export chybou: „Nedostatek paměti“. Ve firmě Humusoft, spol. s r.o. se jim na 64bitové architektuře můj model povedlo vyexportovat, nicméně dle jejich slov trval výpočet v Simulinku opět poměrně dlouho.
 - s volbou model reduction – prakticky totéž, co předchozí nastavení, pouze rozměry matic A, B, C, D jsou omezeny na námi nastavenou hodnotu. Nejdůležitější parametr je zde Number of eigenmodes – rozměr matic A, B, C, D. Pokud nastavíme 100, má matice A rozměr 100x100.
- State space – vygeneruje matice A, B, C, D pro Matlab, jinak je vše stejné, jak u Linearized dynamic, jenom to není bloček v Simulinku, ale jsou to matice v Matlabu. Průběhy jsou stejné jak u možnosti Linearized dynamic. Tato možnost byla zvolena. Parametr Number of eigenmodes byl nastaven na 100.



Obr 5.5: Prostředí programu Comsol Multiphysics

5.7 VÝSLEDNÉ PRŮBĚHY



Graf 5.5: Výsledné průběhy z programu Comsol Multiphysics

V grafu 5.5 jsou průběhy pro konstantní napětí po dobu 1 hodiny. Potom bylo napětí sníženo na 0. Je vidět, že model se šamotovou izolací se při ohřevu příliš neliší od modelu se sibalovou izolací, ale při chladnutí je již rozdíl mnohem více patrný. Také je vidět, že pokud jsou uvnitř pece šamotové cihly, roste teplota mnohem pomaleji, stejně tak chladnutí je mnohem pomalejší díky naakumulovanému teplu.

Obr 6.1: Schéma modelu v programu Simulink

6.1 EXPORT DO B&R AUTOMATION STUDIA

Aby bylo zřejmé, proč jsou ve schématu Simulinku některé bloky, začneme popisem exportu do ANSI C B&R Automation Studia.

Aby byla tato možnost k dispozici, je nutno nainstalovat do Matlabu doplněk dodávaný s Automation Studií. Po jeho instalaci se v Simulinku objeví další skupina bloků.

Základním blokem je B&R CONFIG, který se nachází ve schématu v levém horním rohu a není označen žádnou barvou. Tento bloček umožňuje přepínat mezi klasickou simulací a režimem pro export. Toto je velmi praktické a umožňuje to simulovat chování modelu v Simulinku s výchozími hodnotami jednotlivých proměnných. Po nastavení možnosti export je nutné v nastavení simulace zvolit metodu výpočtu diferenciálních rovnic, délku kroku, cestu k projektu Automation Studia, hardwarovou konfiguraci a název výsledného tasku (programu).

Propojení mezi proměnnými Automation Studia a modelem v Simulinku zajišťují 3 bločky:

- bloček vstupu
- bloček výstupu
- bloček pro parametr

Ve schématu jsou použity všechny 3 typy. Přičemž bloček vstupu by šlo vynechat a místo něj vždy použít bloček constant a jako hodnotu mu nastavit proměnnou pomocí bločku parametr. Takto je řešen přepínač Reset, jelikož se tato proměnná nachází ještě v jednom gainu a tudíž musí být použita jako parametr. U všech bloků se nastavuje:

- název proměnné
- datový typ
- zdali je lokální nebo globální
- výchozí hodnotu

Po nastavení všeho potřebného stačí zmáčknout tlačítko export a za chvíli se objeví zpráva, že je vše hotovo. Při tvorbě schématu je vhodné používat jednoduché

bločky, u složitějších, zejména pokud v nich používáme parametry napojené na Automation Studio, může dojít k chybě při exportu, na což Matlab upozorní.

6.2 JEDNOTLIVÉ FUNKČNÍ CELKY

Nyní budou vysvětleny jednotlivé funkční celky, které jsou na schématu zvýrazněny příslušnou barvou.

- Modrá barva – State space model základního systému. Matice A, B, C jsou načteny z programu Matlab, kde byly vyexportovány programem Comsol Multiphysics. Vstupní proměnná je násobena maticí vstupů B, následně prochází integrátorem a je násobena maticí výstupu C. V kladné zpětné vazbě je k integrátoru připojena matice stavů A. Matice D byla vždy nulová a proto není ve schématu vůbec znázorněna. Všechna násobení jsou násobení maticová.
- Zelená barva – Převod napětí na požadovaný vstup do State space modelu. Požadovaný vstup je výkon při počáteční teplotě v 2kW jednotkách. Důvod, proč byl zvolen takovýto vstup, je popsán v kapitole pojednávající o Comsol Multiphysics. Celý převod ilustruje rovnice

$$P = \frac{U^2}{2000 R_0} \quad [2\text{kW}] \quad (6.1)$$

kde P je vstup do soustavy, U je napětí vstupující do modelu, R_0 je odpor drátu při počáteční teplotě.

U^2 je realizováno pomocí bločku násobení, kdy na oba vstupy bylo přivedeno U, $1/R_0$ odpovídá gain s obsahem 1/23,7, $1/2000$ je taky reprezentováno gainem.

- Žlutá barva – Zrychlení / Zpomalení simulátoru. Zde byla použita teorie modelování na analogových počítačích [2]. Pokud vynásobíme matice A a B určitou hodnotou bude integrace, a tím i celý model právě tolikrát zrychlen. Tato konstanta je navázána na proměnnou TimeScale pomocí bločku parametr. Možnost tohoto zrychlení je velmi praktická, jelikož skutečné průběhy trvají v řádu hodin i dnů.

- Fialová barva – Výpočet příkonu pece. Zde je druhá mocnina napětí dělená skutečným odporem drátu, který je vypočítán ze vzorce (3.2). Přičemž počáteční odpor je $23,7\Omega$ a alfa je $0,00006K^{-1}$. Nebyla použita přímo teplota drátu, ale teplota uvnitř pece, nicméně tyto teploty se liší minimálně. Tento výpočet je realizován pouze z důvodu zobrazení ve vizualizaci. Pro výpočet teploty uvnitř pece je skutečný příkon počítán z teploty drátu v modelu z programu Comsol Multiphysics.
- Šedá barva – Úprava výsledné teploty. Nejdříve je k výstupní teplotě připočtena teplota okolí z proměnné TemperatureInit a výsledek je uložen do proměnné T, k této teplotě je ještě připočten šum, který je realizován náhodným číslem s normálním rozložením se středem v nule a rozptylem rovným 1. Tento šum je dále násoben konstantou, která je odmocninou požadovaného rozptylu, čímž je dosaženo požadovaného rozptylu šumu.
- Červená barva – Chybová veličina. Má simulovat poruchu na vstupu soustavy, zejména např. otevření dvířek pece. Chyba je úměrná rozdílu teplot uvnitř pece a teploty okolí a její velikost závisí na proměnné ErrorPower, což je výkon poruchy při rozdílu teploty $1000^{\circ}C$. O toto se starají bločky ErrorPower_product a ErrorPower_gain. Pokud je hodnota proměnné Error nastavena na True (1) je výsledek odečten od příkonu pece. Další část zajišťuje, že pokud je proměnná Error rovna True a proměnná ErrorShutdown také na True, je příkon násoben nulou, a tedy pec je odpojena od napětí. Toto simuluje chování skutečné pece, kdy při otevření dvířek musí dojít k odpojení napětí, jelikož silicium karbidová forma může být při takto vysokých teplotách vodivá.
- Tyrkysová barva – Funkce reset. Tato funkčnost nemá opodstatnění v reálném životě, ale umožňuje na simulátoru uvedení pece do výchozí polohy, kdy jsou stavové proměnné rovny 0. Toto nebylo realizováno pomocí kódu, jelikož jsou stavové proměnné ve vyexportovaném programu nastaveny jako lokální, a proto tento kód nelze umístit mimo samotný program a bylo by jej nutné vložit do programu ručně po každém vyexportování modelu ze Simulinku.

Při nastavení proměnné Reset na False (0) je odpojen příkon (vstup do soustavy) a matice A je nahrazena hodnotou $-6.907755279/\text{TimeReset}$, což zajistí exponenciální pokles výstupu z integrátoru (tedy i výsledné teploty), přičemž proměnná TimeReset udává čas poklesu z 1000°C + teplota okolí na 1°C + teplota okolí. Odvození těchto vztahů:

Diferenciální rovnice integrátoru s počátečním stavem X_0 a gainu R v záporné zpětné vazbě:

$$y(t) = X_0 - R \int y(t) dt \quad (6.2)$$

Laplaceův obraz:

$$Y(p) = \frac{X_0}{p} - \frac{R}{p} Y(p) = \frac{X_0}{p+R} \quad (6.3)$$

Po zpětné Laplaceově transformaci získáváme:

$$y(t) = X_0 e^{-Rt} \quad (6.4)$$

Výsledná teplota bude součet exponenciál pro všechny počáteční stavy násobené jednotlivými prvky matice výstupu C.

$$T = x_0 e^{-Rt} c_0 + x_1 e^{-Rt} c_1 + \dots + x_n e^{-Rt} c_n = e^{-Rt} (x_0 c_0 + x_1 c_1 + \dots + x_n c_n) \quad (6.5)$$

V závorce máme nyní součet počátečních stavů násobených prvky matice C, což je počáteční teplota T_0 výsledný vztah tedy je:

$$T = T_0 e^{-Rt} \quad (6.6)$$

Pokud dosadíme $T=1$, $T_0=1000$ a $R=\ln(1000)/\text{TimeReset}$ získáme čas nutný k poklesu teploty uvnitř pece z 1000°C na 1°C přičemž uvažovaná teplota okolí je 0°C .

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) &= -t \frac{\ln(1000)}{\text{TimeReset}} \ln(e) \\ \ln(1) - \ln(1000) &= -t \frac{\ln(1000)}{\text{TimeReset}} \\ t &= \text{TimeReset} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Schéma bylo stejné pro všechny 4 modely pece, pouze v Matlabu byly změněny matice A, B, C, D a výsledek byl vyexportován do programu s odlišným názvem.

7. IMPLEMENTACE DO PLC – B&R AUTOMATION STUDIO

7.1 INSTALACE A SPUŠTĚNÍ

Spuštění na systému Winsows Vista se nezdařilo ani po zapnutí režimu kompatibility se systémem Windows XP a nastavení programu administrátorských oprávnění.

Po instalaci Windows XP ve Virtual PC od Microsoftu proběhla instalace i spuštění bez problémů, ale mezi Automation Studiem a simulátorem B&R automatu stále vypadávalo spojení, v důsledku čeho nebylo možné projekt do simulátoru nahrát.

Po opětovné instalaci Windows XP ve VMware a opětovné instalaci B&R Automation Studia fungovalo již vše správně.

7.2 PROGRAMOVÁ ČÁST

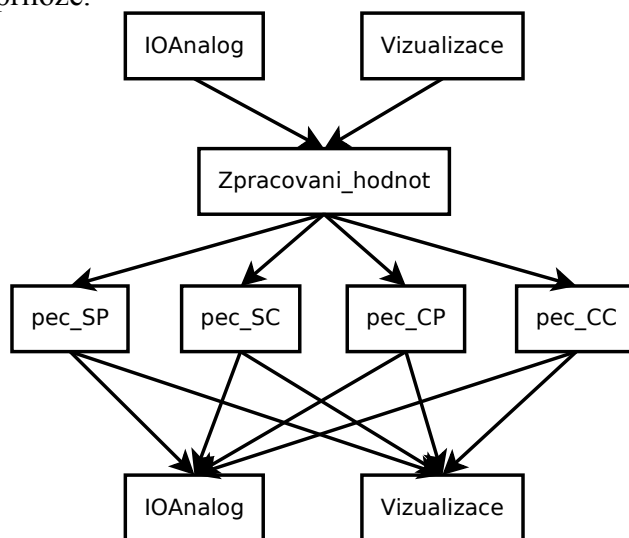
Celý projekt je vytvořen v jazyku ANSI C. Podporu jazyka C lze považovat za velkou výhodu Automation Studia.

Projekt obsahuje 6 programů. 4 programy začínající názvem pec_ tvoří jednotlivé modely pecí, tyto programy pracují s globálními proměnnými a zajišťují výpočet teploty a další funkčnost uvedenou ve schématu Simulinku. Tyto programy jsou pozastavovány nebo spouštěny podle požadavků uživatele. Program je spouštěn s periodou 0,01s, díky čemu se chová prakticky jako spojitý systém i při rozumném zrychlení. Globální proměnné používané těmito programy jsou uvedeny v příloze a jsou také znázorněny ve schématu v kapitole Model pece pro výuku – Matlab / Simulink.

Program Zpracovani_hodnot zajišťuje funkčnost celého simulátoru a přepínání mezi jednotlivými modely. V inicializaci je naplněno pole struktur Spec. Zde je definován název programu zajišťující výpočet, maximální povolené napětí a maximální povolená teplota pro daný model. Dále je vybrán první model jako aktivní. V cyklicky se opakující části je změněn běžící program pro výpočet, pokud uživatel vybral jiný model. Je zde zajištěná funkčnost animace a poškození pece.

Přičemž dochází i ke kontrole uživatelských oprávnění. Na konci jsou kopírovány proměnné z flash paměti do paměti ram. Toto by nemělo být nutné, ale při použití proměnných z paměti flash přímo v programech vyexportovaných ze Simulinku dochází k jejich překřížení v důsledku čehož název jedné proměnné, ukazuje na data zcela jiné proměnné. Toto lze považovat za chybu v B&R Automation Studio, na kterou není uživatel nijak upozorněn. Proměnné z oblasti flash mají inicializační hodnotu RETAIN, proměnné které jsou následně kopírovány z oblasti flash do ram se kopírují z proměnné s koncovkou _perm do proměnné bez této koncovky. Vizualizace je napojena přímo na proměnné z paměti flash. Funkce Zpracovani_hodnotZmena_pece pozastaví výpočet aktuálního modelu a spustí výpočet požadovaného modelu. Navíc nahraje do globálních proměnných informace o aktuální peci z pole Pece. Opět všechny globální i lokální proměnné a struktura SPec jsou uvedeny v příloze. Práce s proměnnými a pamětí flash je popsána v [8]. Tento program se volá s periodou 1s, což zajišťuje dostatečně rychlou odezvu na lidský zásah a zároveň příliš nezatěžuje procesor.

Posledním programem je IOAnalog, který pokud je aktivní spojení s Matlabem, kopíruje proměnné z Matlabu do simulátoru a ze simulátoru do Matlabu. Navíc zajišťuje omezení napětí. Tento program také zpracovává analogové vstupy a výstupy z připojených karet. Tento program se spouští s periodou 0,01s, což je stejná perioda jak u programů zajišťujících výpočet. Všechny proměnné jsou uvedeny v příloze.



Obr 7.1: Diagram toku dat

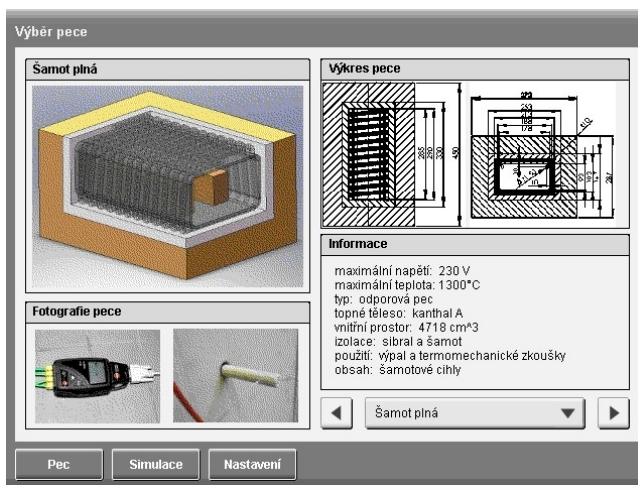
Na diagramu Obr 7.1 je vidět tok dat jednotlivými programy projektu. Vstup z kanálu 1 analogové karty je standardizován v programu IOAnalog. Na základě tohoto vstupu a dat získaných z vizualizace se program Zpracovani_hodnot rozhodne, který program s modelem spustit. Program s příslušným zvoleným modelem provede výpočet a vypočtené údaje jsou zobrazeny ve vizualizaci. Výsledná teplota je destandardizována a odeslána na výstup analogové karty programem IOAnalog.

7.3 VIZUALIZACE

Většina ovládacích prvků je napojena přímo na nějakou proměnnou, podle které mění své chování, případně podle svého stavu mění proměnnou. Toto šetří programátorovi čas, aby nemusel ručně měnit vlastnosti prvků, případně zpracovávat události při jejich změně. Na druhou stranu je to poněkud omezující, protože nelze měnit všechny vlastnosti prvků přímo z kódu, jak je to například ve Visual Studiu od Microsoftu. Dále vizualizace umožňuje nastavení vlastních stylů pro jednotlivé prvky, podporu více jazyků, podporu více fyzikálních jednotek, přičemž k jejich převodu dochází přímo ve vizualizaci, takže v kódu můžeme pracovat stále s jednou jednotkou. Dále je zde řízení přístupu, ale to by mohlo být trochu lépe propracované. Většina možností vizualizace je popsána v [9].

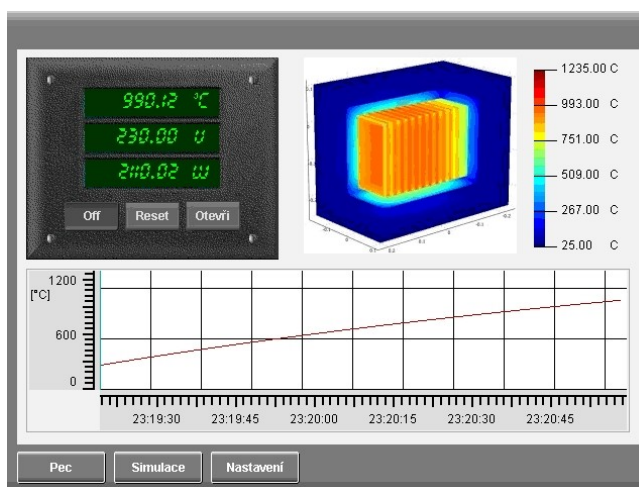
Vizualizace sestává ze 4 stran, přičemž všechny kromě obrazovky poškození jsou tvořeny 2 vrstvami:

- horní – společnou pro všechny modely, zde jsou tlačítka pro přechod na jinou stranu.
- dolní – individuální obsah pro každou stranu



Obr 7.2: Vizualizace – výběr pece

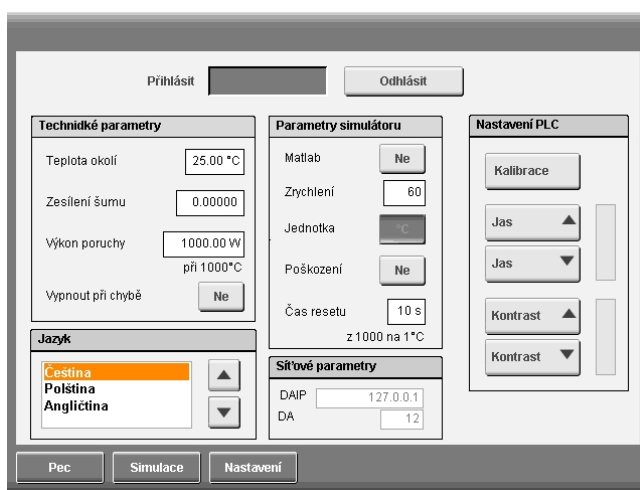
Na první straně si uživatel volí model, který chce simulovat. Přičemž se mu zobrazí 3D výkres modelu, doprovodné fotografie, 2D výkres a výpis jeho vlastností. Na druhé straně je uživatel informován o průběhu samotné simulace, kdy na displejích vidí aktuální teplotu, napětí a příkon pece. Tyto displeje byly vytvořeny v programu Gimp, písmo je volně dostupné, bylo ale nutné jej doplnit o písmeno znázorňující stupně. Dále je zde animace a průběh teploty znázorněné v grafu. Uživatel zde může pec zapnout nebo vypnout, uvést model do výchozího stavu pomocí tlačítka Reset, nebo otevřít dvířka pece, čímž dojde k vyvolání poruchového signálu znázorněného na schématu v Simulinku. Po přiblížení se maximální teplotě,



Obr 7.3: Vizualizace – simulace

je místo animace zobrazena výstraha a po dosažení této teploty se zobrazí strana poškození pece.

Strana nastavení umožňuje měnit určité hodnoty, jako je teplota okolí, zesílení šumu, čas resetu, spojení s Matlabem, zrychlení, výchozí fyzikální jednotka, výkon poruchy, zda-li má dojít k odpojení pece od napětí při poruše. Dále je zde možnost kalibrace displeje, nastavení vstupů a výstupů. Problematice standardizace vstupů a destandardizace výstupů se věnuje podkapitola 11.3.1 Vstupní a výstupní analogové moduly. Dole je zobrazeno hardwarové číslo PLC a jeho IP adresa a možnost volby ze tří jazyků: češtiny, polštiny a angličtiny. Všechny možnosti kromě volby jazyků je možné měnit až po zadání hesla. Veškeré provedené změny na této stránce se zapisují do paměti flash a jsou tak dostupné i po restartu zařízení. IP adresu nelze měnit za běhu ta je nastavená v hardwarové konfiguraci, hardwarové číslo lze změnit přepínači přímo na panelu.



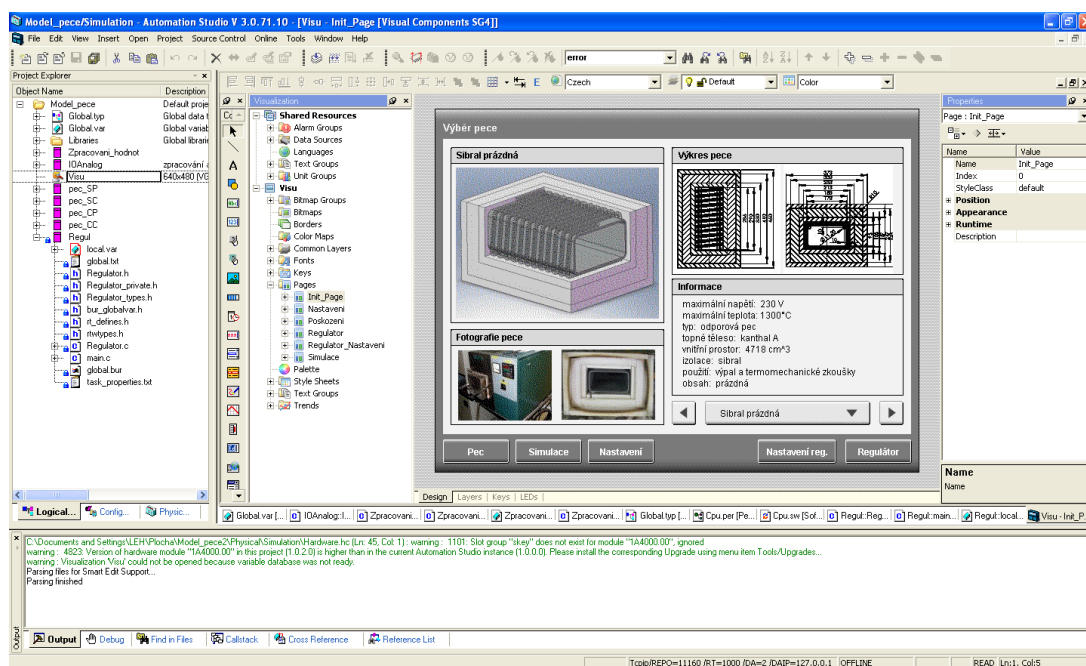
Obr 7.4: Vizualizace – nastavení

Obrazovka poškození pece se zobrazí po dosažení maximální povolené teploty pro určitou pec. Přejít na jinou stránku vyžaduje zadání hesla a obrazovka nezmizí ani po restartu Power Panelu. Což byl jeden z požadavků na simulátor.

V PLC běží VNC server díky čemuž je možné se připojit k PLC ze vzdáleného počítače pomocí VNC klienta. Maximální počet současných připojení je nastaven na 1, ale lze to změnit. Heslo pro přístup umožňující provádění změn na Power Panelu je e. Některé heslo musí být nastaveno. Vizualizace pro VNC je nastavená

stejná jak u samotného PLC, což umožňuje sledovat změny prováděné na vzdáleném počítači přímo na Power Panelu. Nevýhodou je ovšem menší rozlišení, které by mohlo být na počítači větší.

Heslo pro změnu nastavení je 4321 a je nastaveno ve vizualizaci ve skupině textů hesla. Je tam i heslo pro odemčení simulátoru při poškození pece, které je nastaveno na 1234.



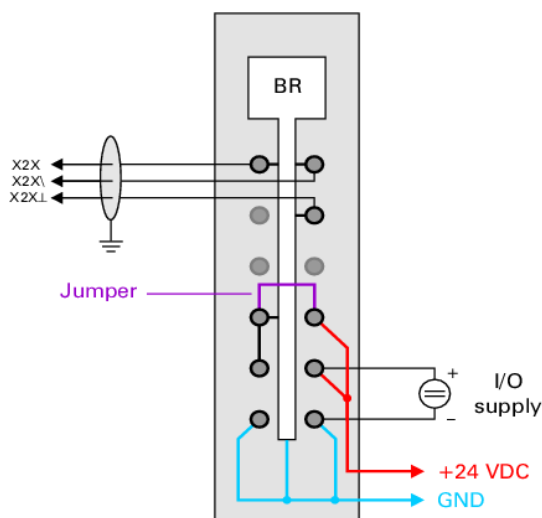
Obr 7.5: Prostředí B&R Automation Studia

8. INSTALACE A ZPROVOZNĚNÍ POWER PANELU

Jedná se o nový Power Panel 4PP420.1043-75 s dotykovým displejem a rozlišením 640x480px. K Power Panelu bylo připojeno 5 karet:

- X20BR9300 – napájení Power Panelu a přídatných karet a distribuce analogových a digitálních vstupů a výstupů
- karta analogových vstupů
- karta analogových výstupů
- karta digitálních vstupů
- karta digitálních výstupů

Karty vstupů a výstupů jsou připojeny přes kontakty umístěné v bočních částech karet. Ke spojení kontaktů dojde při zasunutí karet do sebe. S Power Panelem je propojena pouze první karta, která zajišťuje napájení pro Power Panel a jednotlivé moduly a distribuuje výstupy a vstupy z jednotlivých karet do Power Panelu.



Obr 8.1: Schéma zapojení karty X20BR9300 [10]

První nahrání projektu z Automation Studia do Power Panelu probíhá nahráním projektu na Compact Flash kartu pomocí čtečky přímo z počítače, jelikož Power Panel nemá ještě přidělenou IP adresu a tudíž se k němu nelze připojit přes síť. Po nahrání konfigurace do Power Panelu je již možné provádět změny přes síť. Technická specifikace Power Panelu se nachází v [11].

9. STAVBA PECE A MĚŘENÍ REÁLNÝCH PRŮBĚHŮ

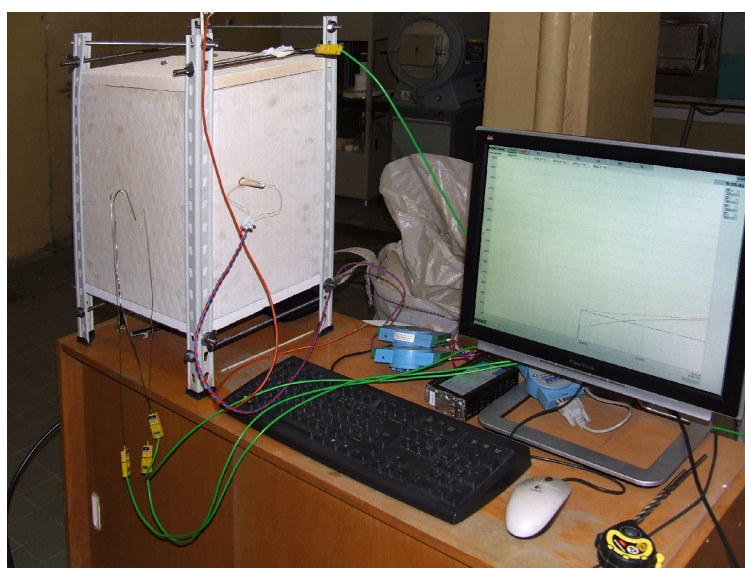
9.1 STAVBA A MĚŘENÍ

Pec byla postaveny podle návrhů vygenerovaných programem SolidWorks. Před samotným měřením byl proveden zkušební výpal aby Sibrál prošel alespoň jedním výpalem. Následně byla provedena 3 měření:

- měření při napětí 110V
- měření při napětí 230V
- měření při napětí 230V přičemž v peci byly 2 cihly

Po ukončení výpalu byly nadále zaznamenávány průběhy teplot chladnutí. Až do dalšího výpalu, který probíhal následující den.

Teplota byla měřena ve vnitřním prostoru pece termočlánkem K, který je přesný pro nižší teploty, ale nevydrží vyšší teploty, proto jej bylo nutné před dosažením teploty 1000°C vyjmout. Z důvodů měření při vyšších teplotách byl dovnitř umístěn termočlánek S, který, jak se ukázalo, měřil dostatečně přesně i u nižších teplot. Teplota na kanthalu byla měřena termočlánkem B v keramickém pouzdře, který začíná měřit až od vyšších teplot. Termočlánek S zde nebyl použit z toho důvodu, že k dispozici byl pouze 1. Navíc byly do izolace zasunuty do hloubky 4 cm, 2 cm a na povrch termočláanky typu K. Teplota z těchto



Obr 9.1: Průběh měření

termočlátku byla zaznamenána, ale nebyla nijak vyhodnocena, nicméně znalost těchto teplot umožňuje budoucí zpřesnění tepelných ztrát v sibalové izolaci a tím i zpřesnění celého modelu. Dále byl klešťovým ampérmetrem měřen protékající proud. Termočláanky byly pomocí modulů ADAM připojeny do PC, kde byl celý průběh graficky zaznamenáván programem ControlWeb a výsledky byly následně vyexportovány ve formátu dbf. Záznamy z termočlátku K byly zaznamenávány pomocí modulu a speciálního softwaru TESTO do PC. Perioda měření byla u obou programů 30s.

9.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A SOFTWARE

Přístroje

Výrobce	Typ	Výrobní číslo	Popis
ADAM	4018M	L9686967S	Modul pro termočlánek
ADAM	4018M	N8200374548	Modul pro termočlánek
ADAM	4520	L9534009	RS232 na RS422/RS485
AXIMA	VC66107	AXSP2P01	Zdroj 24V/1A
TESTO		055401770	Samostatný modul se sběrnici USB
VOLTCRAFT	VC-521	08013850	Klešťový ampérmetr

Tab 9.1: Seznam přístrojů pro měření

Termočláanky

Typ	Složení	Rozsah teplot
S	+(90% Pt 10% Rh) -(100% Pt)	0 – 1600 °C
B	+(70% Pt 30% Rh) -(94% Pt 6% Rh)	200-1700 °C
K	+(NiCr) -(NiAl)	-40-1000°C

Tab 9.2: Použité termočláanky

Software

Název	Termočláanky
Control Web 5	S, B
Testo Comfort – Software Basic	K

Tab 9.3: Použitý software

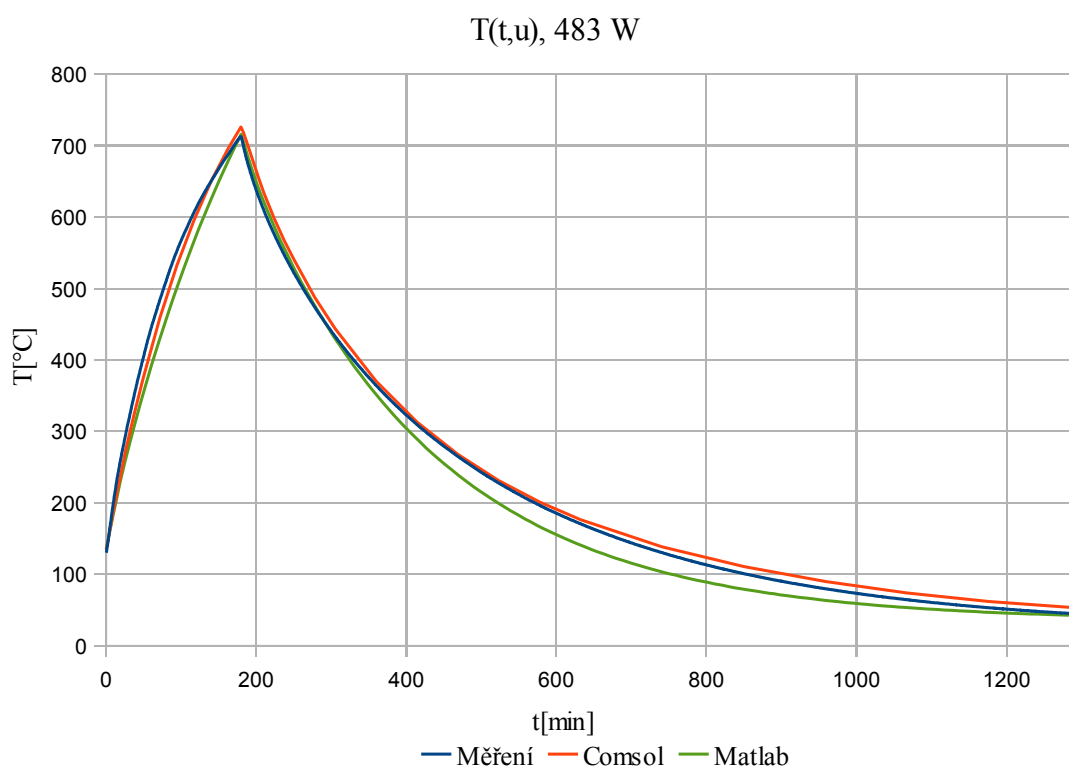
10. SROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH PRŮBĚHŮ

Srovnány jsou tři průběhy pro pec se sibalovou izolací:

- Prázdná pec připojená na napětí 110V
- Prázdná pec připojená na napětí 230V
- Pec se dvěma šamotovými cihlami uvnitř připojená na napětí 230V

Ve srovnání jsou 3 průběhy:

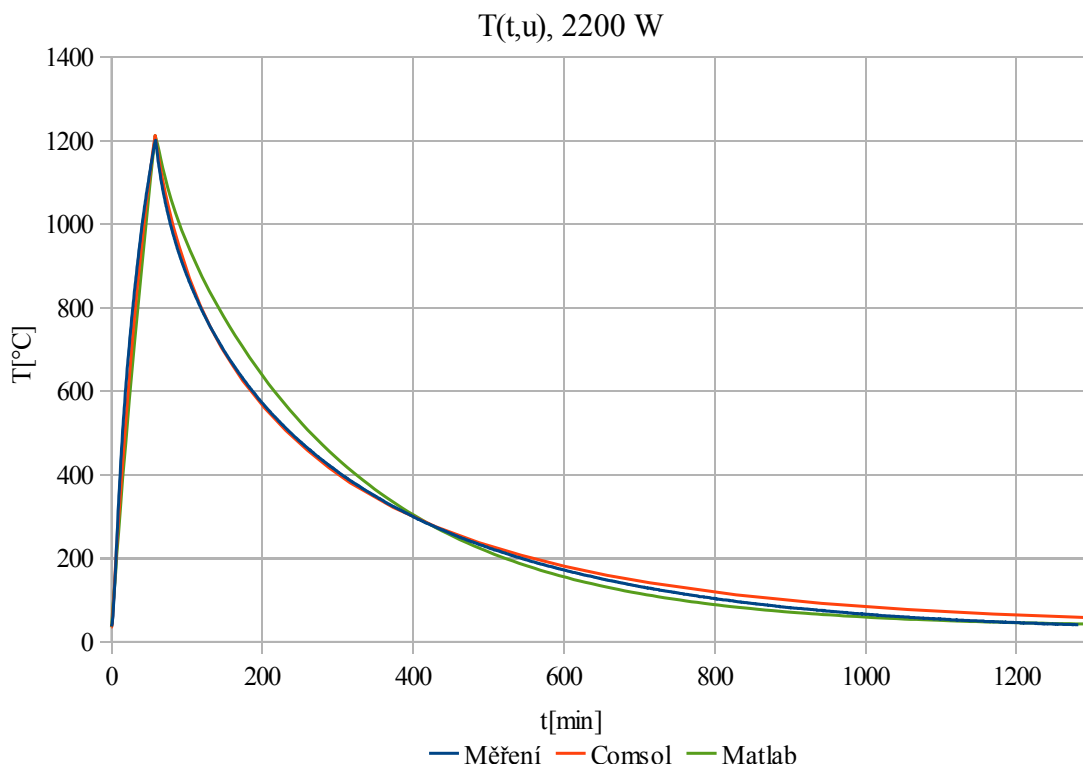
- Měření – skutečné naměřené hodnoty
- Comsol – průběh z programu Comsol Multiphysics
- Matlab – průběh linearizovaného modelu vyexportovaného z aplikace Comsol. Stejný průběh má i výsledný simulátor.



Graf 10.1: Srovnání průběhů pro napětí 110V

Průběh pro 110V byl měřen následující den po prvním zkušebním výpalu, který byl v odpoledních hodinách, a pec nestihla zcela zchladnout na pokojovou teplotu. Tato skutečnost byla zohledněna i v simulaci v programech Comsol

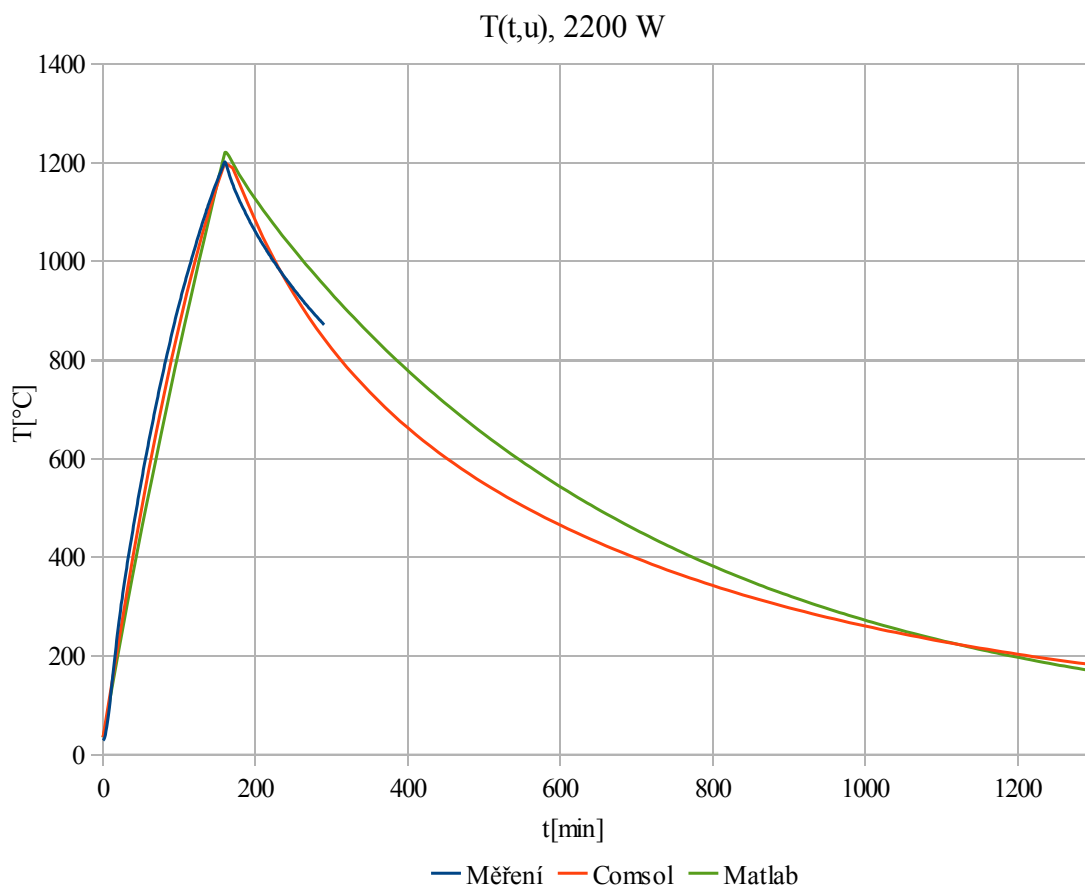
a Simulink. Skutečný průběh a průběh z programu Comsol jsou velmi podobné, linearizovaný model se taky neliší příliš významným způsobem.



Graf 10.2: Srovnání průběhů pro napětí 230V

Průběh pro napětí 230V, skutečný průběh a průběh z aplikace Comsol se opět velmi podobají, linearizovaný model není příliš odlišný od reality.

U průběhu, kdy byly dovnitř pece vloženy 2 šamotové cihly, je již vidět určitý rozdíl. Tento rozdíl je způsoben obtížnou simulací cirkulace vzduchu mezi cihlami. U reálného průběhu není kompletně zaznamenáno chladnutí, jelikož bylo nutné měřicí aparaturu odevzdat.



Graf 10.3: Srovnání průběhů pro napětí 230V a 2 cihlami uvnitř

11. NÁVRH REGULÁTORU

11.1 POUŽITÉ TYPY REGULÁTORU

11.1.1 PSD

Jedná se o diskrétní ekvivalent spojitého PID regulátoru, doplněný o filtraci derivační (diferenční) složky a omezení přebuzení integrační (sumační) složky (anti-windup).

Na regulační obvod působí velké množství rušivých signálu, zejména šum, který způsobuje nárůst amplitudy derivační složky a tím i zvětšení amplitudy kmitání akční veličiny. Proto je nutné použít filtr derivační složky, který vliv šumu na derivační složku značně omezí. Sílu filtru můžeme ovlivnit nastavením parametru N , jehož doporučené hodnoty jsou v rozsahu 3 až 20 podle [12]. U PSD regulátoru byl použit diskrétní ekvivalent tohoto filtru.

Jelikož je velikost akčního zásahu regulačního obvodu vždy omezena, je nutné zavést toto omezení i do integrátoru (sumátoru) regulátoru, který by jinak integroval nad tyto meze a následně by trvalo určitou dobu než by tuto hodnotu navíc odintegroval. Tento jev se označuje jako přebuzení (windup). Jelikož je v případě pece maximální napětí výrazně omezeno na 230 V, byla použita nelinearita typu nasycení přímo v integrátoru (sumátoru).

Více o tomto regulátoru lze nalézt v [13], [14], [15].

11.1.2 β – PSD

Jedná se o kombinaci regulátorů PS-D a S-PD, přičemž pomocí parametru β je možné plynule přecházet mezi těmito strukturami. U regulátoru PS-D vstupuje do derivační (diferenční) složky záporně vzatá výstupní veličina místo regulační odchylky. U regulátoru S-PD vstupuje záporně vzatá výstupní veličina jak do derivační (diferenční) složky tak do proporcionální složky. Tento regulátor se hodí pro omezení překmitu, bez nutnosti prodloužení regulačního děje.

Omezení přebuzení pomocí nasycení přímo v integrátoru zde není možné, jelikož od výstupu integrátoru se ještě odečítá derivační a proporcionální složka. Proto bylo omezení přebuzení realizováno dynamicky, odečtením rozdílu akční

veličiny na modelu akčního členu vynásobeného zesílením K a vyděleného časovou konstantou T_T . Časovou konstantu T_T je nutno experimentálně nastavit podle [12].

11.1.3 Manuální režim

Manuální režim je realizován pomocí dvou tlačítek plus a mínus přivedených na integrátor, na kterém můžeme zvyšovat nebo snižovat akční zásah.

11.1.4 Filtr žádané hodnoty

Jedná se o kombinaci setrvačného členu a derivačního členu se setrvačným členem. Tento filtr je výhodné použít pokud chceme snížit překmit a nechceme měnit strukturu regulátoru nebo i se změněnou strukturou.

11.1.5 Beznárazové přepínání

Je vhodné, aby při změně typu regulátoru nebo přepnutí na ruční režim nebo z ručního režimu na automatický, nedošlo ke skokové změně akčního zásahu. Proto integrátory všech regulátorů i integrátor použitý v ručním režimu musí mít stejnou nebo podobnou hodnotu v každém okamžiku regulace.

11.2 BLOKOVÉ SCHÉMA REGULACE

Na blokovém schématu, které se nachází v příloze Obr 17.2: Blokové schéma regulátoru, je znázorněna struktura PSD, β – PSD a Feed Forward regulátoru. Feed Forward regulátor se chová stejně jako β – PSD, vztah mezi parametrem β a ff je

$\beta = 1 - ff$. Žlutou barvou je znázorněn manuální režim, oranžovou barvou filtr žádané hodnoty a šedou barvou přepínač, který beznárazově přepíná mezi jednotlivými typy regulátoru a manuálním režimem. Červenou barvou jsou označeny požadavky od uživatele, tedy aktuální žádaná hodnota a požadovaný typ regulace. Modrou barvou je označen vstup a výstup regulátoru, tedy aktuální regulovaná veličina a akční zásah. Celé schéma je v diskrétní oblasti, aby jej bylo možné jednoduše naprogramovat v PLC.

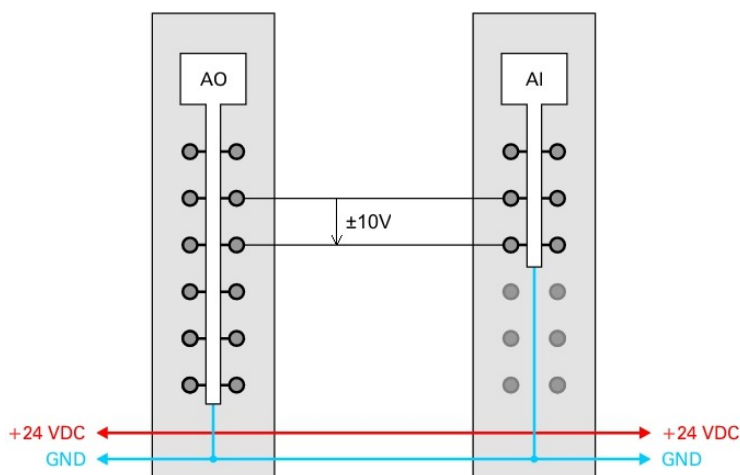
11.3 IMPLEMENTACE DO POWER PANELU B&R

Schéma z předchozí stránky bylo naprogramováno v jazyce ANSI C do POWER PANELU firmy B&R a byla vytvořena přehledná vizualizace, ve které se nacházejí schémata jednotlivých částí, přičemž parametry je možné nastavit přímo v jednotlivých schématech nebo v záložce parametry.

11.3.1 Vstupní a výstupní analogové moduly

Jako vstupní modul byla použita karta X20AI2622 s rozsahem napětí $\pm 10V$. Na výstupu byla použita karta X20AO4632 s rozsahem napětí $\pm 10V$. Stejné karty byly použity i u PLC, na němž je simulován provoz pece.

Při regulaci modelu pece byly propojeny karty regulátoru a simulátoru mezi sebou podle následujícího schématu:



**Obr 11.1: Zapojení analogových vstupů a výstupů
podklady [10]**

Jelikož karty používají k převodu hodnotu INT je nutno provést standardizaci vstupu.

$$y = \frac{\frac{x}{3276,8} - k_1}{k_2 - k_1} (MAX - MIN) + MIN \quad (11.1)$$

kde y je standardizovaná hodnota, k_1 minimální napětí, k_2 maximální napětí, MAX maximální standardizovaná hodnota odpovídající maximálnímu napětí, MIN minimální standardizovaná hodnota odpovídající minimálnímu napětí, 3276,8 je hodnota, kterou vrací karta při napětí 1V.

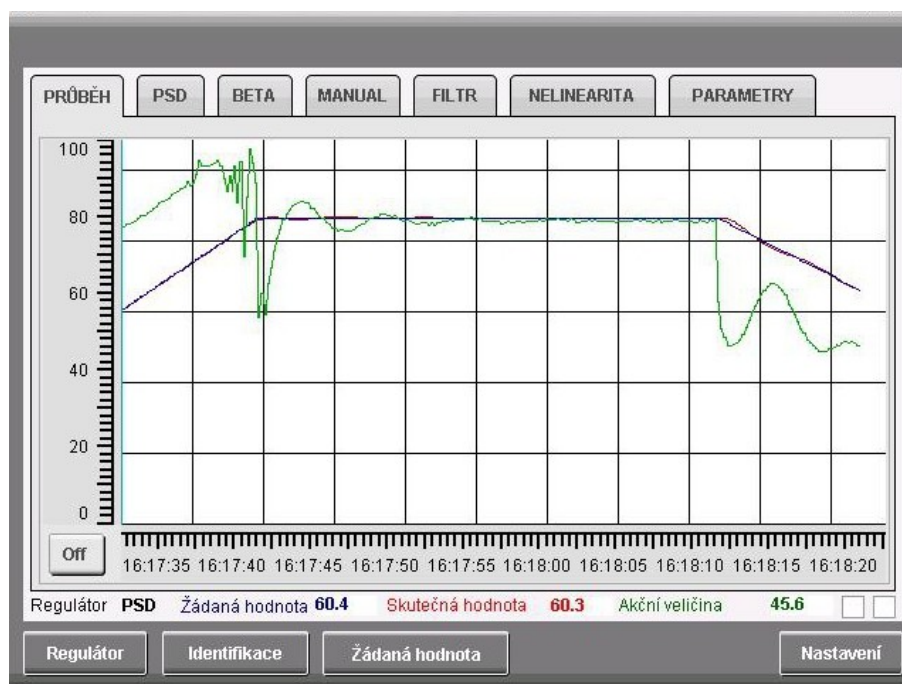
Při zápisu hodnoty na výstup karty je nutné provést destandardizaci.

$$y = \left(\frac{x - MIN}{MAX - MIN} (k_2 - k_1) + k_1 \right) 3276,8 \quad (11.2)$$

kde y je destandardizovaná hodnota, k_1 minimální napětí, k_2 maximální napětí, MAX maximální standardizovaná hodnota odpovídající maximálnímu napětí, MIN minimální standardizovaná hodnota odpovídající minimálnímu napětí, 3276,8 je hodnota, kterou je nutno zapsat na kartu, aby na ní bylo napětí 1V.

11.3.2 Vizualizace

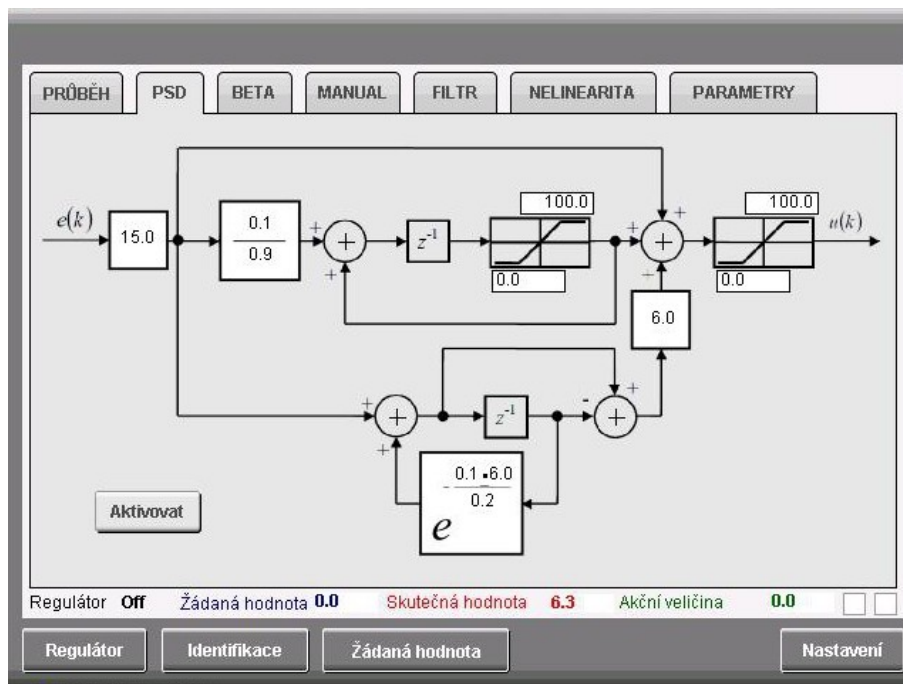
Hlavní část tvoří regulátor, jež má v horní části obrazovky několik záložek. Z nichž každá slouží k nastavení příslušné části regulace. Na první záložce je graficky zobrazen průběh žádané hodnoty, akční veličiny, a regulované veličiny. Aktuální hodnota těchto veličin se zobrazuje na každé záložce ve stavovém řádku, ve kterém se taky nachází informace o aktivním regulátoru a ikonky znázorňující aktivitu filtru žádané hodnoty a inverzní nelinearity.



Obr 11.2: Vizualizace regulace – grafický průběh regulace

Na jednotlivých záložkách se vždy nachází schéma příslušné části regulačního obvodu, což velmi usnadňuje nastavení příslušných konstant, přímo

ve schématu lze měnit jednotlivé parametry a lze celou část aktivovat nebo deaktivovat.



Obr 11.3: Vizualizace regulace – nastavení PSD regulátoru

Veškeré parametry je možné nastavit na jednom místě v záložce PARAMETRY.

Dále je možno nastavit veškeré parametry související se standardizací vstupu a destandardizací výstupu, což umožňuje regulovat i jiné modely bez nutnosti změny kódu. Regulátor je možné propojit s Matlabem, který je stále více využíván i v technické praxi a nastavovat žádanou hodnotu přímo z Matlabu a v Matlabu pozorovat akční zásah a regulovanou veličinu, což je praktické zejména při nastavování regulátoru. Taktéž je možno z Matlabu měnit veškeré parametry regulátoru. Regulátor stejně jako simulátor pece podporuje tři jazyky češtinu, angličtinu a polštinu. Navíc je možné zjistit IP a hardwarovou adresu příslušného Power Panelu.

12. IDENTIFIKACE

Regulátor umožňuje identifikovat soustavu metodou nejmenších čtverců. Na vstup soustavy je přiložen skok zadané velikosti a na základě odezvy se PLC dynamicky snaží identifikovat soustavu, jejíž rovnice je zobrazena na obrazovce. Uživatel si může nastavit řád výsledného modelu v rozmezí jedna až deset.

12.1 TEORETICKÝ ROZBOR

Princip metody nejmenších čtverců spočívá ve snaze o minimalizaci kvadrátu odchylky mezi soustavou a modelem. Přičemž platí:

$$y = \Phi \theta + \epsilon \quad (12.1) [12]$$

kde Φ je matice obsahující posloupnost vstupních hodnot do soustavy a jejich výstupu v předchozích krocích nutnou pro výpočet výstupu modelu v jednotlivých krocích, θ je matice stavů tedy matice, kterou hledáme a ϵ je vektor odchylek mezi výstupem soustavy a modelem v jednotlivých krocích. Vektor odchylek je tedy roven:

$$\epsilon = y - \Phi \theta \quad (12.2) [12]$$

Aby bylo možné minimalizovat odchylku je nutné vycházet z její absolutní hodnoty nebo kvadrátu, aby její hodnota byla vždy kladná. Jelikož je jednodušší derivovat mocninnou funkci než absolutní hodnotu, je použita druhá mocnina odchylky. Součet druhých mocnin všech prvků vektoru ϵ je skalární součin tohoto vektoru a jeho transpozice.

$$J(\theta) = \epsilon^2 = \epsilon^T \epsilon = (y - \Phi \theta)^T (y - \Phi \theta) \quad (12.3) [12]$$

kde $J(\theta)$ je účelová funkce.

Hledáme minimum účelové funkce tedy potřebujeme znát její derivaci. Pomocí pravidel pro transpozici součinu a derivaci součinu matic a vektorů můžeme vztah dále upravit a zderivovat.

$$J(\theta) = y^T y - y^T \Phi \theta - \Phi^T \theta y + \Phi^T \theta^T \Phi \theta$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = 0 - \Phi^T y - \Phi^T y + 2 \Phi^T \Phi \theta = -2 \Phi^T y + 2 \Phi^T \Phi \theta \quad (12.4) [12]$$

Pokud položíme tuto derivaci rovnu 0 a vyjádříme θ získáme matici stavů modelu při minimální sumě kvadratických odchylek od reálné soustavy.

$$\begin{aligned} -2\Phi^T y + 2\Phi^T \Phi \theta &= 0 \\ \theta &= (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y \end{aligned} \quad (12.5) [12]$$

12.2 PŘÍKLAD VÝPOČTU

Příklad výpočtu pro soustavu prvního řádu s malým dopravním zpožděním nepřesahujícím periodu vzorkování. Rovnice této soustavy v rovině Z je:

$$\frac{az + b}{z^2 + cz} = \frac{az^{-1} + bz^{-2}}{1 + cz^{-1}} = \frac{Y}{U} \quad (12.6)$$

kde a, b, c jsou parametry modelu, Y je výstup, U je vstup.

Po zpětném převodu z rovině Z získáme diferenční rovnici:

$$y(k) = a \cdot u(k-1) + b \cdot u(k-2) - c \cdot y(k-1) \quad (12.7)$$

kde k je krok

Pokud označíme n počet kroků, ze kterých bude vypočítán model, budou mít jednotlivé matice následující tvar:

Matice θ bude mít tvar:

$$\theta = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (12.8)$$

Matice Φ bude mít tvar:

$$\Phi = \begin{pmatrix} u(k-n) & u(k-(n+1)) & y(k-n) \\ u(k-2) & u(k-3) & y(k-2) \\ u(k-1) & u(k-2) & y(k-1) \end{pmatrix} \quad (12.9)$$

Matice y bude mít tvar:

$$y = \begin{pmatrix} y(k-(n-1)) \\ y(k-1) \\ y(k) \end{pmatrix} \quad (12.10)$$

Po dosazení do rovnice 12.5 získáme koeficienty a, b, c a dosazením do rovnice 12.6 získáme rovnici modelu v rovině Z, která se velmi dobře hodí pro návrh regulátoru.

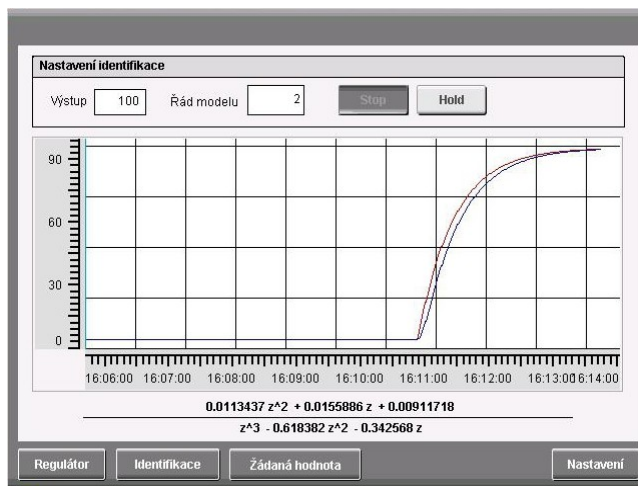
12.3 IMPLEMENTACE DO POWER PANELU

Algoritmus popsany výše bylo nutné převést do jazyka C tak, aby bylo možné zvolit řád systému. Algoritmus na výpočet inverzní matice byl vyexportován z Matlabu. Jelikož nebylo možné exportovat tento algoritmus pro libovolný řád matice, bylo jej nutné vyexportovat pro každý řád modelu zvlášť, proto je maximální řád modelu, který lze identifikovat 10. Matice Φ se chová jako fronta, kdy v každém kroku jsou všechny záznamy posunuty o jednu pozici dopředu a nakonec je přidán nový záznam. V každém kroku je vypočítán nový model dle rovnice 12.5, tento model je vypsán ve tvaru rovnice 12.6 na obrazovku. Následně je vypočítán výsledný průběh modelu při stejných vstupech, jako měla skutečná soustava dle vztahu:

$$\hat{y} = \Phi \theta \quad (12.11)$$

kde \hat{y} je matice výstupu z modelu.

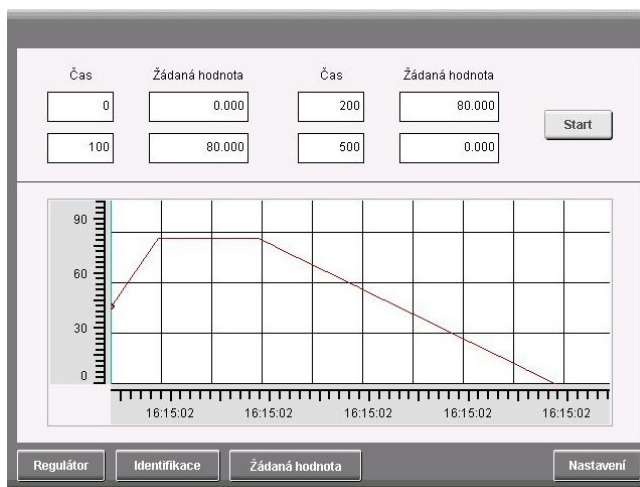
Časové průběhy modelu a soustavy jsou srovnány v grafu. Uživatel může kdykoliv pozastavit zobrazování výsledné rovnice, aby si ji mohl opsat nebo pokud je již s identifikací spokojen, může ji zastavit.



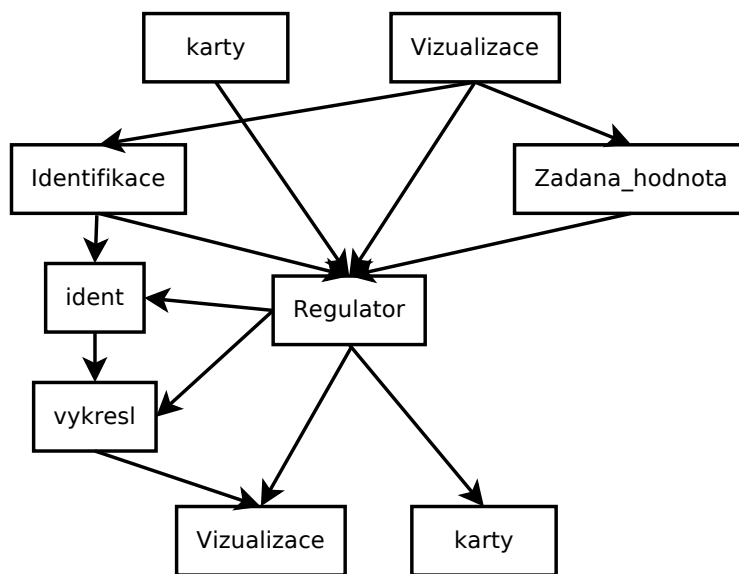
Obr 12.1: Vizualizace identifikace soustavy

12.4 NASTAVENÍ ŽÁDANÉ HODNOTY A SCHÉMA TOKU DAT

Regulátor umožňuje nastavit trapézový průběh teploty typický pro tepelné průběhy. Při nastavování se dynamicky vykresluje výsledný průběh v grafu. Regulátor začne regulovat na požadovaný průběh po stisknutí tlačítka Start.



Obr 12.2: Vizualizace – nastavení žádané hodnoty



Obr 12.3: Diagram toku dat v projektu regulátoru

Na diagramu Obr 12.3 je vidět tok dat projektem. Hlavní tok představuje vstup z analogové karty, výpočet regulátoru podle nastavení ve vizualizaci a zápis na analogovou kartu. Z vizualizace lze aktivovat identifikaci což způsobí, že regulátor umístí na výstup konstantní hodnotu nastavenou ve vizualizaci. V programu ident je vypočítávaná identifikovaná soustava a program vykresl se stará o vykreslení reálného průběhu a průběhu vypočteného modelu, které je možné srovnat ve vizualizaci. Program Zadana_hodnota zpracovává průběh žádané hodnoty zadaný ve vizualizaci a předává aktuální žádanou hodnotu programu Regulator.

13. REGULACE

13.1 REGULACE PECE

Jedná se o model pece vytvořený v první části této práce. Vstupem do modelu je napětí, výstupem je teplota uvnitř pece. Před samotnou identifikací soustavy je nutné si uvědomit, že se jedná o nelineární soustavu. Hlavní nelinearitu způsobuje závislost změny teploty na napětí. Zjednodušeně lze teplotu v peci popsat rovnicí:

$$\Delta T = \frac{Q}{C} \quad [K] \quad (13.1)$$

kde ΔT je změna teploty, $Q[J]$ je energie způsobující změnu, $C[W/K]$ je tepelná kapacita pece nebo její části.

Velikost změny teploty je vyjádřena rovnicí:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{P}{C} \quad \left[\frac{K}{s}\right] \quad (13.2)$$

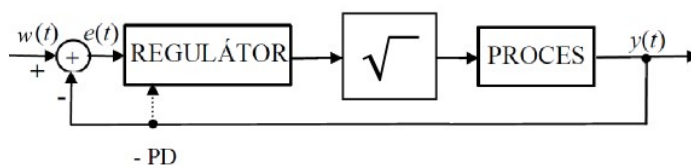
kde $t[s]$ je čas, $P[W]$ je výkon způsobující změnu teploty.

Pokud tento výkon vyjádříme pomocí napětí získáme závislost teploty na napětí.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{U^2}{RC} \quad \left[\frac{K}{s}\right] \quad (13.3)$$

kde $U[V]$ je napětí způsobující změnu teploty, $R[\Omega]$ je odpor kanthalového drátu, který je taky závislý na teplotě, ale tato nelinearita již není tak výrazná, takže nebude při regulaci zohledněna.

Z rovnice 13.3 je patrné, že velikost změny teploty závisí na kvadrátu napětí. Tuto nelinearitu bude nejjednodušší odstranit použitím inverzní nelinearity. Inverzní nelinearitou ke kvadrátu je druhá odmocnina, regulační obvod pro regulaci pece bude vypadat jak na schématu níže.



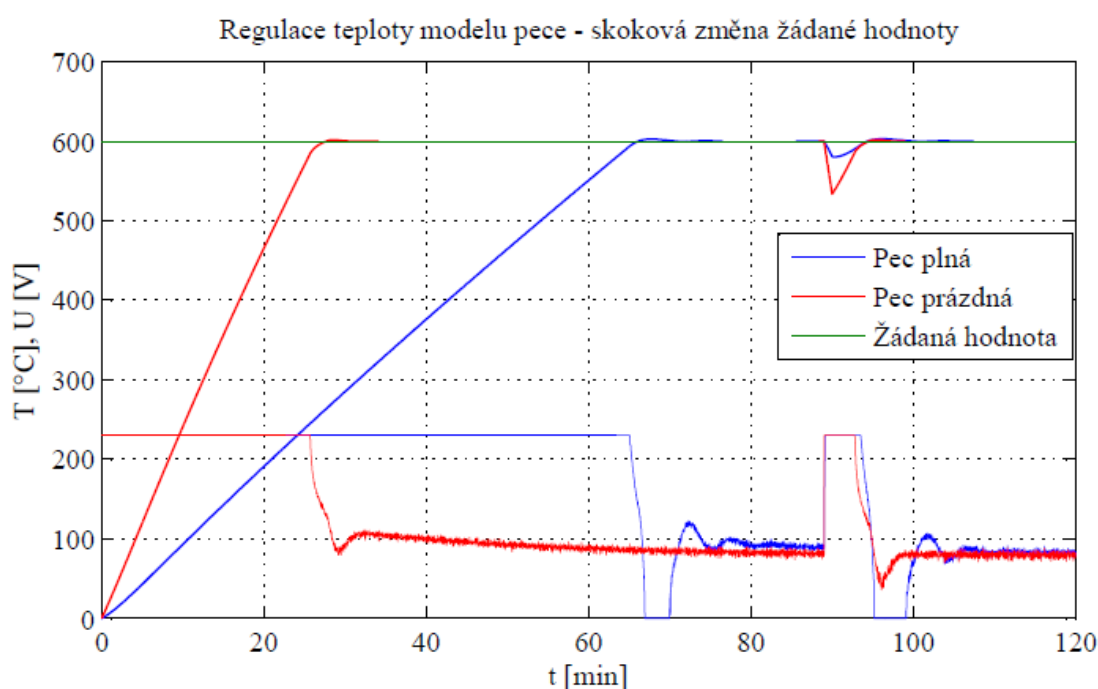
Obr 13.1: Schéma regulačního obvodu pro regulaci pece, podklady [12]

Odmocnina akčního zásahu byla implementována do regulátoru a je ji možno aktivovat ve vizualizaci.

Po aktivaci inverzní nelinearity je možné spustit statickou identifikaci, kterou regulátor umožňuje. Vzorkovací perioda byla zvolena 1s, což umožní dostatečně rychlou reakci na chybu. Kritické zesílení je rovno $K_{krit}=2,935 \cdot 10^5$, perioda vlastních kmitů $T_{krit}=1s$. Pomocí metody Zieglera-Nicholse [13], [14], [15] byly nastaveny parametry regulátoru a doladěny. Z důvodu šumu a výrazného omezení akčního zásahu muselo být sníženo zesílení. Zvýšena byla derivační konstanta a šum byl omezen filtrem v derivační složce. Překmit byl omezen zvýšením integrační konstanty. Regulátor bylo nutné navrhnout s ohledem na nutnost regulace plné i prázdné pece. Konstanty regulátoru tedy jsou:

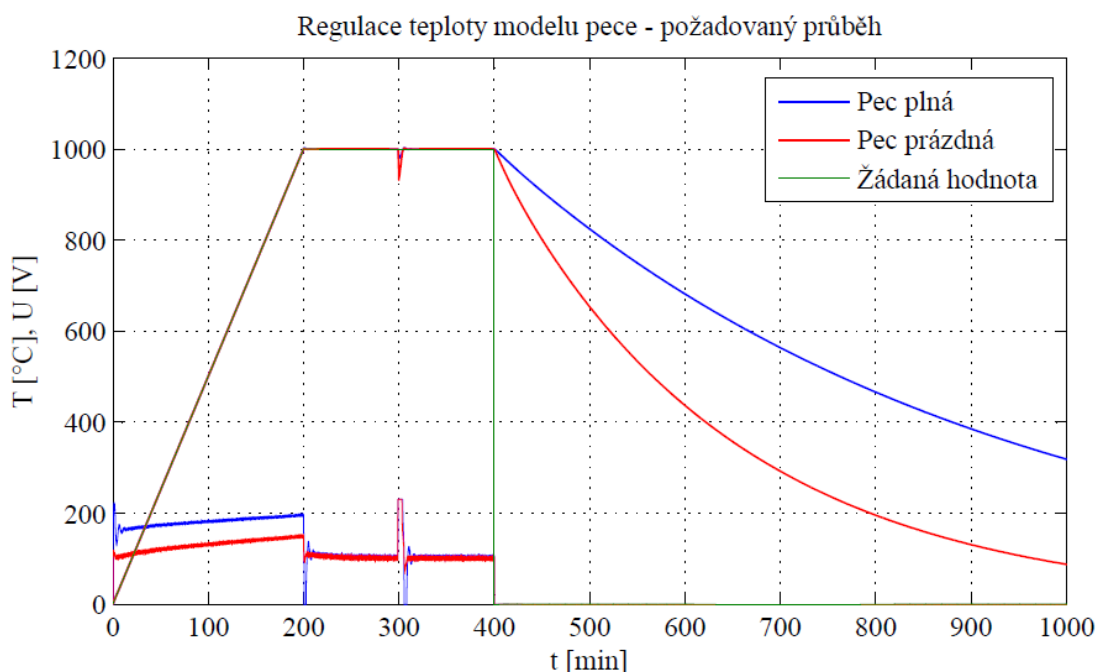
K	7043
T_i	20
T_d	38
N	3
T_s	1

Tab 13.1: Parametry regulátoru pece



Graf 13.1: Regulace teploty modelu pece - skoková změna žádané hodnoty

Graf 13.1 znázorňuje průběhy teplot a napětí pro prázdnou a plnou pec. Požadována je teplota 600°C. Je vidět, že prázdná pec dosáhne této teploty mnohem dříve. U obou pecí nepřesáhne překmit 2°C, což je zcela vyhovující vzhledem k technologickým požadavkům. V čase 80 min je simulováno otevření dvířek pece po dobu 1 min. Vzhledem k omezenému výkonu pece nelze poruchu ihned vyregulovat, ale po uzavření dvířek dojde během 4 min. k návratu na původní hodnotu.



Graf 13.2: Regulace teploty modelu pece - požadovaný průběh

Běžný průběh výpalu v simulované peci je nárůst teploty se strmostí 5°C/min, následně výpal na 1000°C a vypnutí pece a samovolné chladnutí. Tento průběh je znázorněn v grafu 13.2. Opět je tento průběh zaznamenán jak pro prázdnou tak i plnou pec. Překmit opět nepřesáhl 2°C, což je zcela vyhovující vzhledem k technologickým požadavkům. V čase 300 min je simulováno otevření dvířek. Ustálená odchylka u rampového průběhu je rovna:

$$e = \frac{\Delta T}{\Delta t K_o} = \frac{5}{60 \cdot 7043 \cdot 0,0993} ^\circ\text{C} = 1,2 \cdot 10^{-4} ^\circ\text{C} \quad (13.4)$$

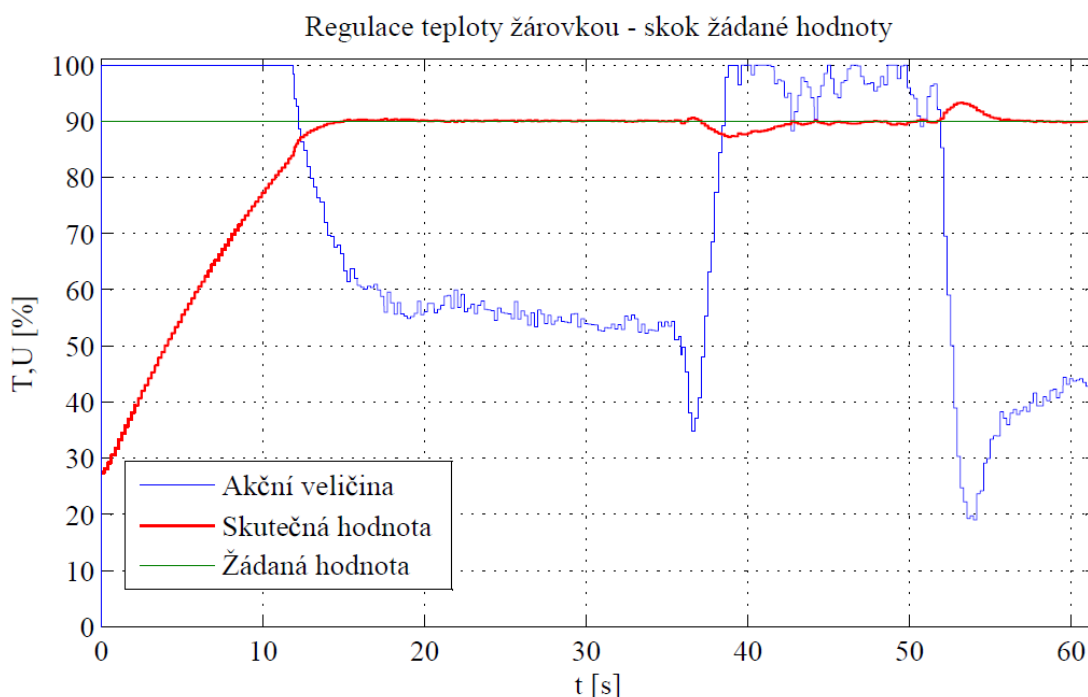
kde $\Delta T [^\circ\text{C}]$ je změna teploty za čas $\Delta t [\text{s}]$ a $K_o [1/\text{s}]$ je zesílení otevřeného obvodu $K_r \cdot K_{sl}$. Výpočet je pro prázdnou pec. Vzhledem k velkému zesílení regulátoru dochází jen k minimální odchylce při rampovém průběhu a použití druhého integrátoru by bylo zbytečné.

13.2 REGULACE TEPELNÉHO TUNELU

Tato regulace byla rozdělena na 2 části, regulace topení, kdy byla teplota uvnitř tunelu regulována pomocí žárovky, a chlazení, kdy byla teplota regulována otáčkami větráku. V případě regulace pomocí větráku je skutečná i žádaná teplota vynásobena -1, jelikož při zvyšování akčního zásahu dochází ke snižování teploty. Tato úprava se aktivuje volbou Chlazení ve vizualizaci v parametrech regulátoru. V obou případech byla soustava identifikována pomocí regulátoru a byly nastaveny příslušné parametry metodou Zieglera-Nicholse a následně doladěny. V případě regulace žárovkou byl z důvodu příliš velkého šumu použit PS regulátor. U větráku byl z důvodu značné setrvačnosti rotace, která způsobovala velký překmit použit β -PSD regulátor.

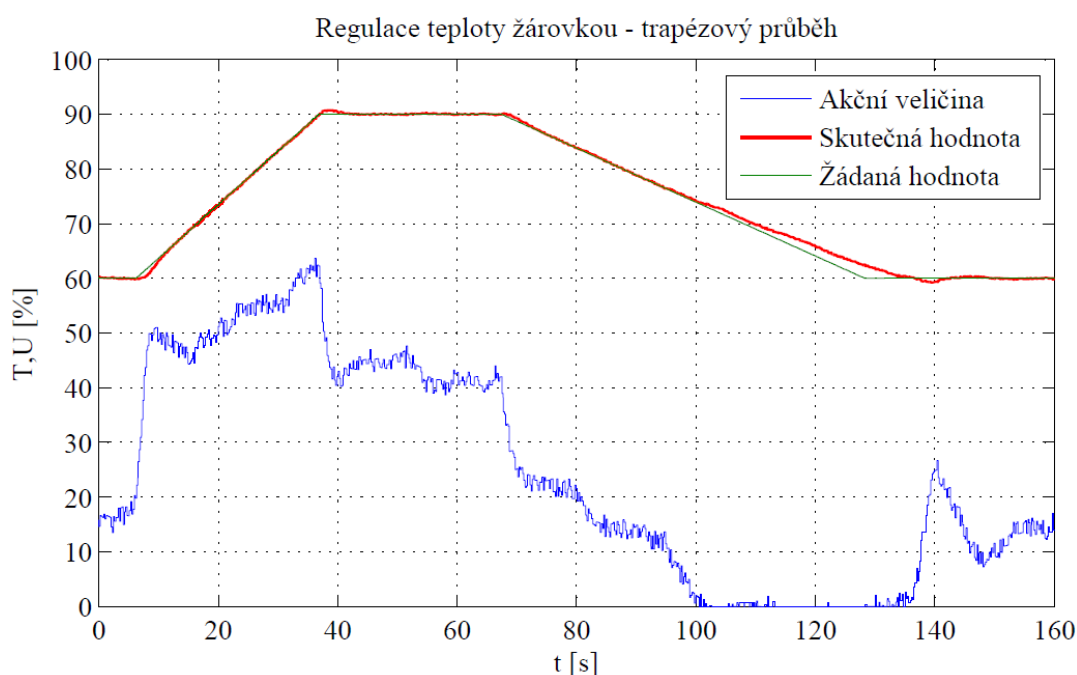
	T_s	K	T_i	T_d	N	β	T_t	U_{vst} [V]	$U_{výst}$ [V]
Žárovka (PS)	0,2	15	2	-	-	-	-	<6, 10>	<0,10>
Větrák (β-PSD)	0,1	8	3	4	3	0,2	3	<-1, 3>	<0,10>

Tab 13.2 Parametry regulátorů tepelného tunelu

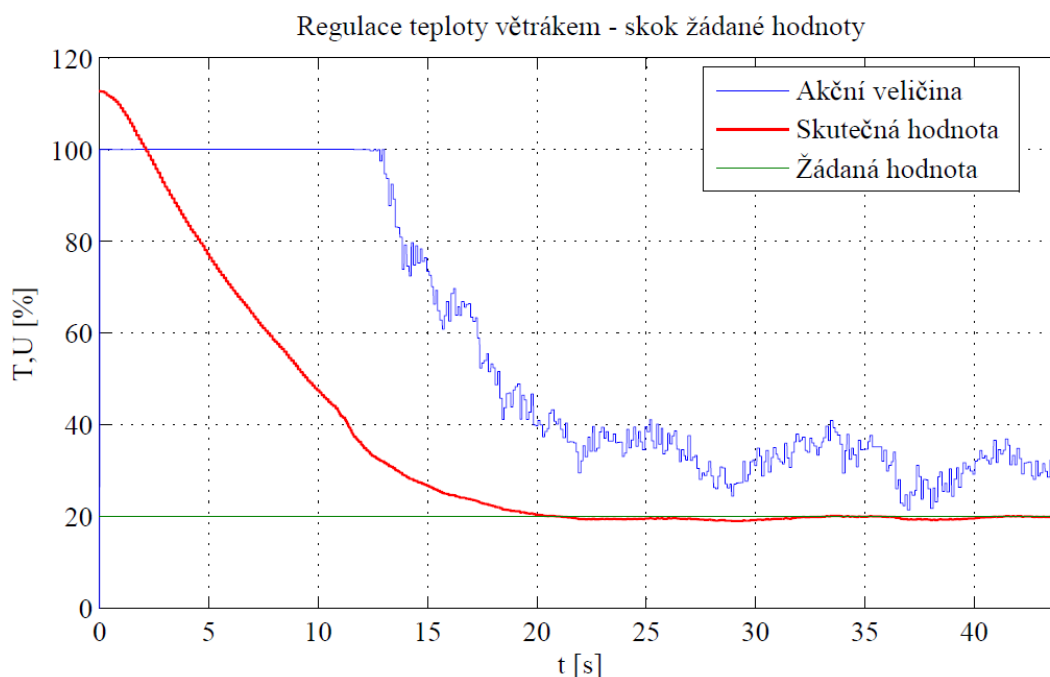


Graf 13.3: Regulace teploty žárovkou - skok žádané hodnoty

V grafu 13.3 je vidět průběh regulace na skokovou změnu žádané hodnoty. Jako u většiny tepelných procesů byl omezen překmit, který v tomto případě nepřesahuje 0,5 %. V druhé polovině grafu je vidět vyregulování poruchy (větráku)



Graf 13.4: Regulace teploty žárovkou - trapézový průběh



Graf 13.5: Regulace teploty větrákem - skok žádané hodnoty

V grafu 13.4 je vidět regulaci na trapézový průběh žádané hodnoty. Překmit se opět pohyboval kolem 0,5 %.

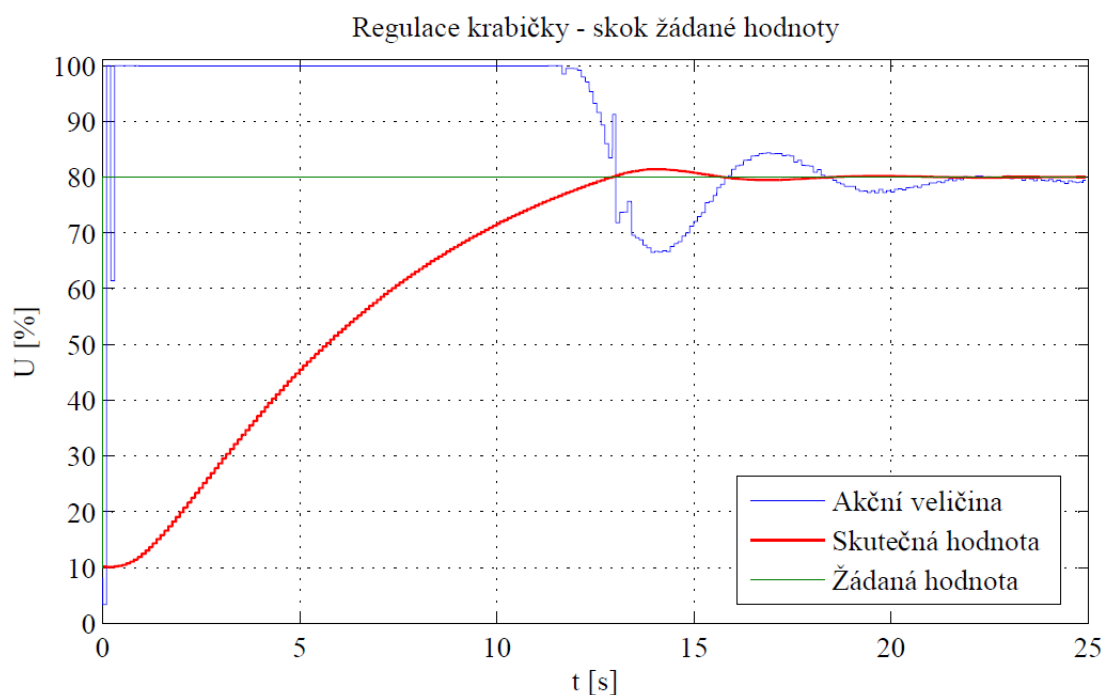
Na grafu 13.5 je vidět průběh regulace teploty větrákem, kdy byla požadována teplota nižší než aktuální teplota. Překmit je zde o něco vyšší, kolem 2 % a je do značné míry způsoben šumem.

13.3 REGULACE PŘÍPRAVKU KRABIČKA

Postup byl stejný jak v předchozích případech, identifiace pomocí regulátoru, výpočet konstant metodou Zieglera-Nicholse a ruční doladění. Z důvodu potlačení překmitu byl použit β -PSD regulátor.

	T_s	K	T_i	T_d	N	β	T_t	U_{vst} [V]	$U_{výst}$ [V]
Žárovka (PS)	0,1	17	1,1	0,2	6	0,2	3	<-10, 10>	<-10,10>

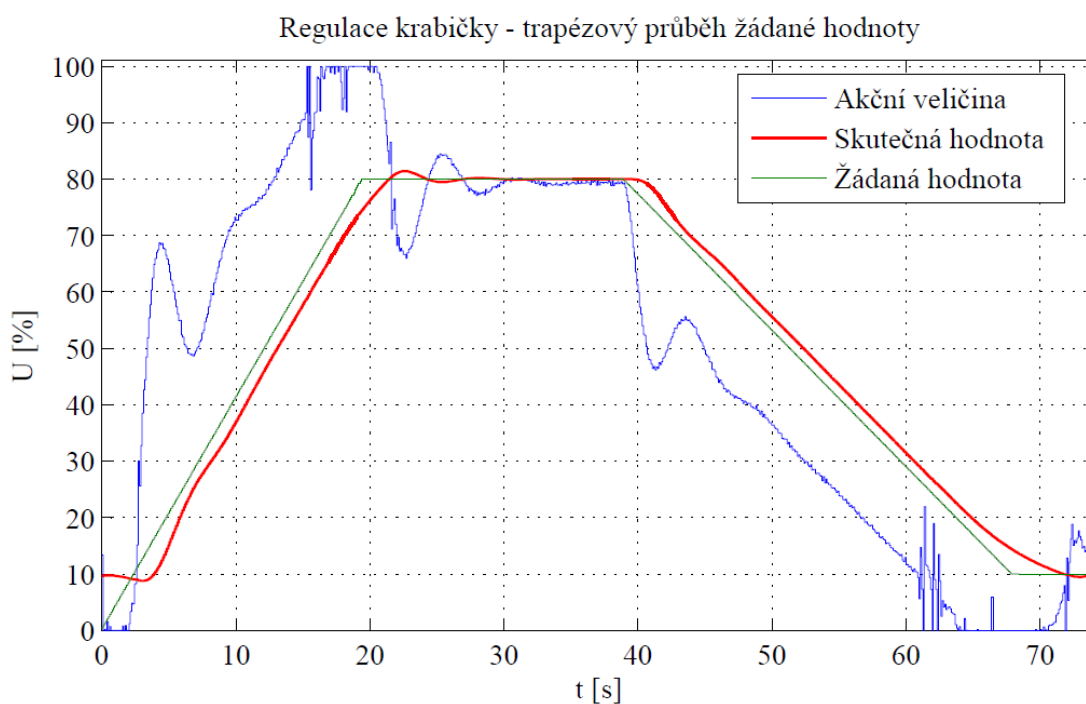
Tabulka 1: Parametry regulátoru krabičky



Graf 13.6: Regulace krabičky - skok žádané hodnoty

V grafu 13.6 je vidět průběh regulace na skokovou změnu žádané hodnoty. Jelikož se nejedná o regulaci tepelného procesu, byl upřednostněn rychlejší průběh za cenu většího překmitu kolem 2 %.

V grafu 13.7 je vidět průběh regulace na trapézový průběh žádané hodnoty. V případě rampového průběhu dochází k ustálené regulační odchylce, tuto odchylku by bylo možné odstranit přidáním dalšího integrátoru do regulátoru. Nicméně i tak je požadovaný průběh velmi dobře kopírován pouze s určitým zpožděním. Pokud by toto zpoždění z technologického hlediska nepředstavovalo zásadní problém, regulátor může být použit, jelikož strmost hran je zachována a regulační odchylka konstantní části je nulová.



Graf 13.7: Regulace krabičky - trapézový průběh žádané hodnoty

14. ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvoření softwarového modelu reálné pece, jež se nachází ve firmě Refrasil s.r.o., který by umožňoval optimalizaci materiálů, ze kterých se pec skládá a, navržení regulátoru pro regulaci tepelných procesů.

Popis samotné pece a fyzikální podstaty tepelných procesů probíhajících uvnitř pece včetně diferenciálních rovnic je popsán v kapitole 2 a 3.

V programu SolidWorks byl vytvořen 3D model použitý k vytvoření fyzikálního modelu. Schémata z tohoto programu byla využita ke stavbě pece.

Jelikož se jedná o soustavu s rozprostřenými parametry, k tvorbě fyzikálního modelu byl použit program Comsol Multiphysics. Díky tomu byl vytvořen velmi kvalitní model, jež umožňuje změnu parametrů jednotlivých součástí pece včetně hmotnosti materiálů, což umožňuje optimalizovat součásti pece jak z ekonomického tak i technického hlediska, což bylo vyzkoušeno srovnáním dvou typů izolace s výrazně odlišnou cenou. Bylo nutné nastavit parametry jednotlivých materiálů, mezi tyto parametry patřila tepelná vodivost, tepelná kapacita, hustota a další. Některé parametry byly zjištěny přímo z katalogového listu, některé byly udány tabulkou hodnot a bylo nutné je vhodně aproximovat a některé bylo nutno odhadnout z informací poskytnutých výrobcem. Průběhy získané simulací vytvořeného modelu byly srovnány s průběhy při měření na reálné peci. Vypočtený průběh velmi dobře odpovídá reálnému průběhu, jak je vidět na grafu 10.2.

Následně byl linearizovaný model vyexportován do programu Simulink, kde byl rozšířen o dodatečné funkce pro potřeby výuky, jako možnost působení chybové veličiny, přidání šumu na výstup, zrychlení nebo zpomalení modelu, reset. Všechny tyto funkce jsou popsány v kapitole 6.

Implementace simulátoru do B&R Power Panelu a vizualizace, včetně mnoha nastavení, která lze modifikovat je popsána v kapitole 7.

Stavba samotné pece a měření reálných průběhů je popsáno v kapitole 9. Tyto průběhy jsou srovnány s vypočtenými průběhy v kapitole 10. Na jejich základě lze konstatovat, že se podařilo vytvořit funkční simulátor reálné pece, přičemž výsledné průběhy poměrně dobře odpovídají naměřeným průběhům viz graf 10.1.

V simulátoru se nacházejí 4 modely pro prázdnou pec, pro pec naplněnou a totéž ještě pro pec s jinou izolací. Je tedy nejen možné vyzkoušet, jak se regulátor bude chovat pokud do pece vložíme vypalovaný materiál, ale také jestli je dostatečně robustní, aby si poradil s pecí s jiným druhem izolace. Simulátor umožňuje změnu mnoha nastavení a je v něm implementována podpora komunikace s programem Matlab. Díky autorizaci a simulaci trvalého poškození při přetopení, se velmi dobře hodí pro výuku v laboratoři. V samotném simulátoru, jež je vybaven dotykovou obrazovkou, se nachází schémata, fotografie a popisy jednotlivých modelů, což opět přispívá k lepšímu pochopení modelů studenty, a umožňuje jejich samostatnou práci s modelem.

Dalším cílem bylo navrhnout a implementovat do Power Panelu firmy B&R regulátor s předurčením pro regulaci tepelných procesů. Vytvořený regulátor je vybaven 2 typy regulátorů, klasickým PSD a β -PSD regulátor. Oba regulátory obsahují filtr derivační složky a omezení přebuzení. Regulátory je možné mezi sebou a mezi manuálním režimem bez nárazově přepínat. Před regulátor je možné zařadit filtr žádané hodnoty a za regulátor je možné zařadit inverzní nelinearitu typu odmocnina, jež kompenzuje nelineární závislost mezi napětím a teplotou uvnitř pece, použití nelinearity je popsáno v podkapitole 13.1. Detailně je návrh popsán v kapitole 11.

Regulátor byl navíc doplněn o možnost off-line identifikace soustavy, přičemž na obrazovce se průběžně vykresluje rovnice vypočteného modelu, a srovnání odezvy reálného průběhu s průběhem vypočteného modelu. Toto se velmi hodí při prvotním nastavování konstant regulace nebo pokud dojde ke změně parametrů soustavy a je nutno tyto konstanty upravit. Proces identifikace je popsán v kapitole 12.

Vytvořený regulátor včetně identifikace byl následně, kromě simulovaných přenosových funkcí, ověřen na několika fyzikálních modelech. Regulace byla vyzkoušena nejenom na skokovou změnu žádané hodnoty a působení chyby, ale také na trapézový průběh žádané veličiny. Postup nastavování regulátoru, konstanty a výsledné průběhy regulačních dějů jsou v kapitole 13.

Výsledný regulační algoritmus by bylo možné použít v průmyslové praxi, nejenom pro regulaci tepelných procesů. Regulátor navíc umožňuje identifikaci připojené soustavy, což usnadňuje jeho nastavení i méně zkušenými uživateli. V regulátoru se nacházejí a na dotykové obrazovce zobrazují přehledná schémata implementovaných regulačních algoritmů všech prvků, které se takto intuitivně dají nastavovat, proto je nastavování příslušných konstant pro obsluhu přehlednější.

Regulátor umožňuje nastavení rozsahu napětí a hodnot pro vstup a výstup, což umožňuje regulaci různých procesů bez nutnosti změny kódu.

15. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PŘÍHODA, M.; RÉDR, M. *Sdílení tepla a proudění*. Ostrava: VŠB - TU, 2003. ISBN 978-80-248-1748-4.
- [2] ŠOLC, F.; VÁCLAVEK, P. *Modelování a simulace*. Brno: VUT, 2009.
- [3] *COMSOL Multiphysics 3: Školení programu COMSOL Multiphysics*. HUMUSOFT s.r.o., 2006.
- [4] *Comsol Multiphysics: Controlling Temperature*. COMSOL AB, 2008.
- [5] *Sibral datasheet*. URL: <http://www.tesneni-polanka.cz/zim_sibral.htm> [cit.2009-8-12].
- [6] *Kanthal datasheet*. URL: <<http://www.kanthal.com/>> [cit.2009-8-13].
- [7] Bálek S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB - TU, 1999.
- [8] *TM250 - Memory Management and Data Storage*. B&R, 2007.
- [9] *TM610 - The Basics of ASiV*. B&R, 2005.
- [10] *B&R Automation Software Help* [CD-ROM], V 3.0.71.10 [cit. 2009-11-17].
- [11] *Power Panel 4PP420.1043-75 datasheet*. URL: <http://www.br-automation.com/downloads_br_productcatalogue/BRP44400000000000000095318/4PP420.1043-75-ENG.pdf> [cit.2009-11-17].
- [12] PIVOŇKA, P. *Číslicová řídicí technika*. Brno: VUT, 2003.
- [13] Ogata K. *Modern control engineering*, fourth edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997, ISBN 0-13-314899-8.
- [14] Astrom K. J.; Wittenmark B. *Computer-controlled systems, theory and design*. New Jersey: Prentice Hall, 1997. ISBN 0-13-314899-8.
- [15] Dorf R. C.; Bishop R. H. *Modern control systems*, tenth edition. ISBN 0-13-127765-0.

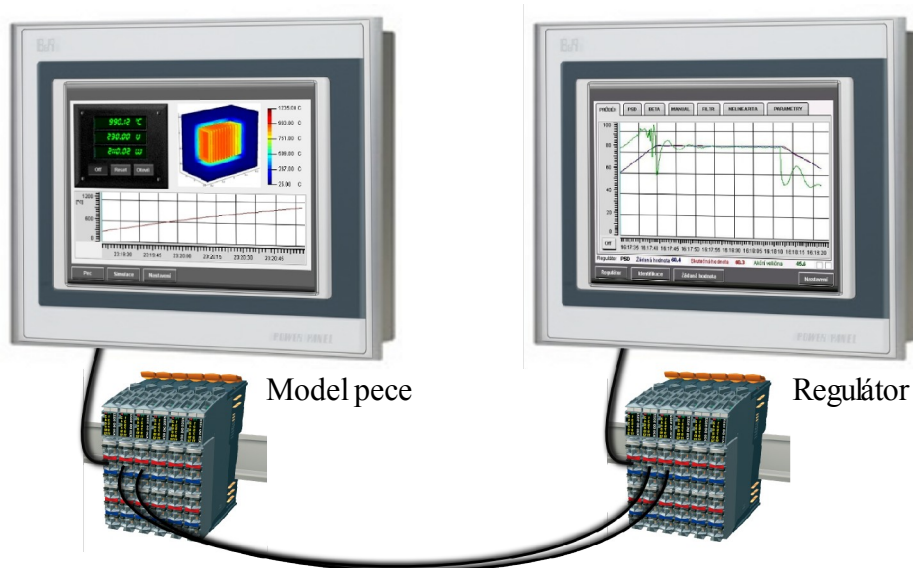
16. SEZNAM ZKRATEK

Zkratka / Symbol	Jednota	Popis
PID		proporcionálně-integračně-derivační
PSD		proporcionálně-sumačně-diferenční
PS		proporcionálně-sumační
K_{krit}		kritické zesílení
T_{krit}	s	kritická perioda
T_s	s	perioda vzorkování
K		proporcionální zesílení
T_i	s	integrační časová konstanta
T_d	s	derivační časová konstanta
N		parametr filtrace derivační složky
T_t	s	časová konstanta pro dynamický anti-windup
U_{vst}	V	vstupní napětí
$U_{výst}$	V	výstupní napětí
$w(t)$		žádaná hodnota
$y(t)$		výstupní veličina
$e(t)$		regulační odchylka

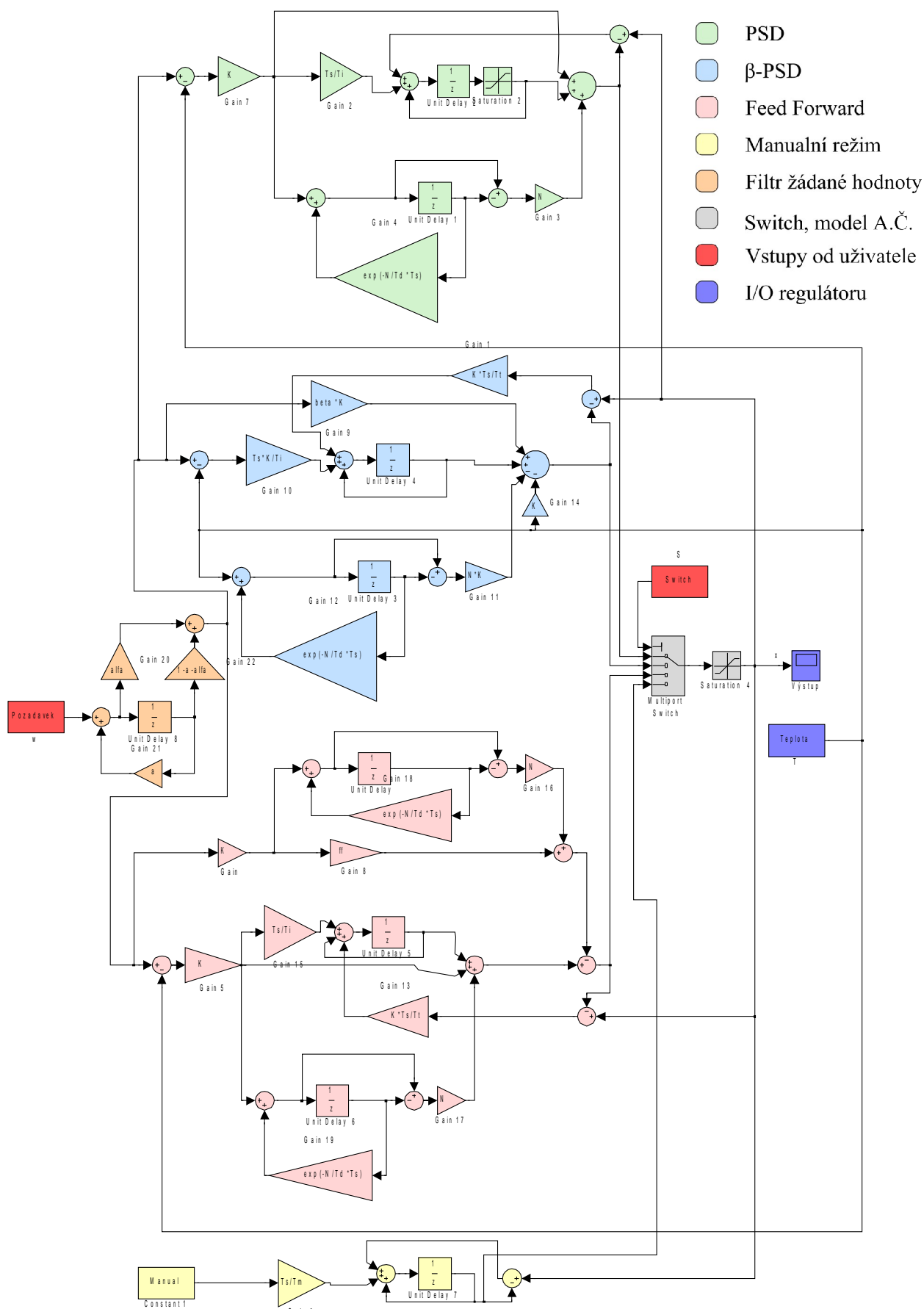
17. PŘÍLOHY

17.1 OBSAH CD, OBRÁZKY

- Model pece
 - Solidworks – 3D modely jednotlivých součástí a celé sestavy
 - Comsol – fyzikální modely jednotlivých modelů
 - Simulink – schéma jednotlivých modelů, je nutno importovat příslušný mat soubor, ve kterém jsou koeficienty matic A, B, C
 - Automation Studio – projekt pro B&R Power Panel
 - Měření – naměřené hodnoty na reálné peci
- Regulátor
 - Simulink – schéma regulátoru, skript pro identifikaci a vykreslování grafů
 - Automation Studio – projekt pro B&R Power Panel
- Obrázky
- Texty



Obr 17.1: Model pece a regulátor



Obr 17.2: Blokové schéma regulátoru

17.2 POUŽITÉ PROMĚNNÉ

č.	proměnná	typ	hodnota	popis
1	Damage	BOOL	RETAIN	povolení poškození
2	Damaged	BOOL	FALSE	true pokud je pec poškozena
3	Error	BOOL	FALSE	true pokud je pec otevřená
4	ErrorPower	LREAL	0	výkon chyby při 1000°C
5	ErrorPower_perm	LREAL	RETAIN	výkon chyby při 1000°C
6	ErrorShutdown	BOOL	TRUE	true pokud se pec odpojí při chybě
7	ErrorShutdown_perm	BOOL	RETAIN	true pokud se pec odpojí při chybě
8	KilnsCount	USINT	0	počet pecí v simulátoru
9	Language	USINT	RETAIN	index jazyka
10	Matlab	BOOL	RETAIN	true pokud je propojení s Matlabem
11	Max T	LREAL	2300	maximální teplota aktuálního modelu
12	Max u	LREAL	230	maximální napětí aktuálního modelu
13	Noise	LREAL	0	zesílení šumu
14	Noise_perm	LREAL	RETAIN	zesílení šumu
15	On	BOOL	FALSE	true pokud je pec zapnuta
16	P	LREAL	0	aktuální příkon
17	Pec	USINT	0	index zvolené pece
18	Pece	ARRAY	[21 (0)]	pole struktur SPec
19	Picture	USINT	0	index obrázku v animaci
20	Pristup	USINT	0	řízení oprávnění
21	Reset	BOOL	TRUE	false pokud nulujeme teplotu v peci
22	T	LREAL	0	aktuální teplota v peci
23	TemperatureInit	LREAL	35	teplota okolí
24	TemperatureInit_perm	LREAL	RETAIN	teplota okolí
25	TimeReset	LREAL	1	čas resetu z 1000°C na 1°C
26	TimeReset_perm	LREAL	RETAIN	čas resetu z 1000°C na 1°C
27	TimeScale	LREAL	60	zrychlení / spomalení simulace
28	TimeScale_perm	LREAL	RETAIN	zrychlení / spomalení simulace
29	TNoise	LREAL	0	výstup teploty v peci včetně šumu
30	U	LREAL	230	aktuální napětí na peci
31	uIn	LREAL	0	požadované napětí
32	Unit	USINT	1	index jednotky pro teplotu (K, °C)

Tab 17.1: Globální proměnné v Automation Studiu

č.	proměnná	typ	hodnota	popis
33	page	USINT	0	index požadované stránky ve vizualizaci
34	i	USINT	1	pomocná proměnná pro cyklus
35	status_id	UINT	0	identifikátor objektu
36	st_ident	UDINT	0	identifikátor procesu
37	status_st	UINT	0	číslo chyby
38	pec	USINT	0	pec zvolená v minulém kroku
39	current_page	USINT	0	index stránky ve vizualizaci
40	scale1	LREAL	0	proměnné pro zobrazení měřítka teplot v animaci
41	scale2	LREAL	0	
42	scale3	LREAL	0	
43	scale4	LREAL	0	
44	scale5	LREAL	0	

Tab 17.2: Lokální proměnné programu Zpracovani_hodnot

č.	proměnná	typ	hodnota	popis
45	matlab_T	REAL	0	výstupní teplota pro Matlab
46	matlab_u	REAL	0	vstupní napětí z Matlabu

Tab 17.3: Lokální proměnné programu IOAnalog

proměnná	typ
nazev_programu	STRING [10]
max_u	LREAL
max_T	LREAL

Tab 17.4: Proměnné struktury Spec