

VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA, STŘEDNÍ ŠKOLA,
CENTRUM ODBORNÉ PŘÍPRAVY



ABSOLVENTSKÁ PRÁCE

Návrh energeticky úspornějšího řízení
udržovací pece

Sezimovo Ústí, 2017

Autor: Tomáš Brynych



ZADÁNÍ ABSOLVENTSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Brynych**
Obor studia: 26-41-N/01 Elektrotechnika – mechatronické systémy
Název práce: **Návrh energeticky úspornějšího řízení udržovací pece**
Anglický název práce: **Energy-efficient control design of holding furnace**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu regulačního obvodu pro řízení teploty tekutého hliníku v udržovací peci.
2. Navrhněte v prostředí Matlab/Simulink model udržovací pece.
3. Proveďte analýzu stávajícího regulátoru s výše navrženým modelem v prostředí Matlab/Simulink.
4. Navrhněte energeticky úspornější řízení teploty tekutého hliníku v udržovací peci na základě naměřených historických dat a navrženého modelu.
5. Na základě simulací analyzujte kvalitu regulace zejména ve smyslu úspory elektrické energie. Proveďte finanční analýzu této úspory.
6. Srovnajte nově navržené řešení se stávajícím na základě reálných dat.
7. Absolventskou práci vypracujte problémově ve struktuře odpovídající vědecké práci.

Doporučená literatura:

- [1] ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2011, ISBN 978-80-7300-260-2.
- [2] *Regulátory 2204e a 2208e – Návod k použití*, E-THERM a.s.: manuál, 2000.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Roubal, Ph.D., VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí
Odborný konzultant práce: Štěpán Macek, AEMC s.r.o., Písek
Oponent práce: Michal Král, AEMC s.r.o., Písek

Datum zadání absolventské práce: **1. 9. 2016**

Datum odevzdání absolventské práce: **12. 5. 2017**

Ing. Jiří Roubal, Ph.D.

(vedoucí práce)



Ing. František Kamlach

(ředitel školy)

Prohlášení

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

V Sezimově Ústí dne 5.5.2014

Tomáš Bečvář
podpis

Poděkování

Mé velké poděkování patří především vedoucímu absolventské práce Ing. Jiřímu Roubalovi, Ph.D. za důsledné vedení, trpělivost, veškerou pomoc, cenné rady, čas věnovaný této práci a připomínky při zpracování této práce. Poté Prof. Ing. Vladimíru Havlenovi, CSc., Ing. Janu Jechovi za odbornou pomoc v oblasti modelování dynamických systémů a Štěpánu Mackovi za konzultace v oboru slévárenství. Mé poděkování také patří společnosti AISIN EUROPE MANUFACTURING CZECH s. r. o., která mi dala svolení k provedení testů na jejich zařízení, umožnila mi studium během zaměstnání a spolu-financovala studium na VOŠ. Závěrečné poděkování též patří mé manželce Haně Brynychové za nesčetnou podporu, shovívavost a hlavně trpělivost během tvorby absolventské práce a celého studia.

Anotace

Tato absolventská práce se zabývá analýzou a syntézou řízení systému udržovací pece na tekutý hliník PID regulátorem Eurotherm 2204e. V práci jsou nejprve popsány typické stavy při řízení této pece. Poté je systém analyzován v otevřené regulační smyčce, je nalezen jeho model a následně je diskutováno chování tohoto modelu v uzavřené regulační smyčce. Na základě vytvořených simulací ve vývojovém prostředí MATLAB/Simulink jsou vyhledány možnosti pro řešení návrhů energetických úspor. V tomto směru se práce soustředí konkrétně na efektivitu snižování požadované teploty o víkendovém provozu a dále na nalezenou chybovost měření teploty hliníkové lázně při poklesu její hladiny. Dále je řešena otázka finanční analýzy návrhů řešení ve smyslu úspor.

Klíčová slova: MATLAB/Simulink, model, modelování, odporová tělesa, PID regulátor, regulační smyčka, systém, udržovací pec, úspora elektrické energie, zpětná vazba.

Annotation

This graduation work deals with the analysis and synthesis of the liquid aluminum holding furnace control system provided by Eurotherm 2204e PID controller. At first, the typical states during the furnace control are described. After the system analysis in an open control loop its model is created, and then the model behavior in a closed loop is discussed. Based on the simulations created in the development environment MATLAB/Simulink, solution options for energy savings proposals are found. In this respect, the work is focused specifically on the efficiency of lowering of required temperature during weekend operation, and further on the error rate of aluminum bath temperature measurement in time when aluminium level drops. Next is the question of financial analysis of solution proposals in terms of savings.

Key words: control loop, feedback, holding furnace, MATLAB/Simulink, model, modeling, PID controller, resistive heater, safety electricity, system.

Obsah

Seznam použitých symbolů	ix
Seznam obrázků	xi
1 Úvod	1
2 Udržovací pec na tekutý hliník	3
2.1 Konstrukce udržovací pece	4
2.2 Řízení systému udržovací pece	5
2.2.1 Zapisovač teplot Eurotherm 5000B	7
2.3 Typické provozní podmínky při řízení	7
2.3.1 Nevýrobní víkendový provoz	7
2.3.2 Výrobní provoz	9
2.3.3 Negativní „skokové“ změny teploty hliníku	10
2.3.4 První spuštění pece	11
3 Model udržovací pece a jeho identifikace	13
3.1 Vstupy a výstupy systému udržovací pece	14
3.2 Identifikace systému udržovací pece	14
3.2.1 Identifikace statických vlastností systému udržovací pece	15
3.2.2 Identifikace dynamických vlastností udržovací pece	17
4 Analýza řízení udržovací pece	25
4.1 PID regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e	25
4.2 Analýza regulačního obvodu s modelem pece	28
4.2.1 Identifikace modelu pece v uzavřené regulační smyčce	29

5	Porovnání nevýrobních režimů pece	33
5.1	Simulace víkendového nevýrobního režimu	33
5.2	Analýza úspor chyby termočlátku	38
6	Závěr	39
	Literatura	43
A	Obsah přiloženého DVD	I
B	Použitý software	III
C	Časový plán absolventské práce	V

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
E	energie	kWh
i	elektrický proud akčního zásahu	mA
i_{H1}	výstup tyristorové jednotky pro těleso č. 1	A
i_{H2}	výstup tyristorové jednotky pro těleso č. 2	A
P	příkon	W
$P(s)$	přenos udržovací pece	-
R	elektrický odpor	Ω
t	čas	s
T_{H1}	teplota tělesa č. 1	$^{\circ}\text{C}$
T_{H2}	teplota tělesa č. 2	$^{\circ}\text{C}$
T_{AL}	teplota hliníkové lázně	$^{\circ}\text{C}$
u	akční zásah (výstup regulátoru)	%
w_{AL}	žádaná teplota hliníkové lázně	$^{\circ}\text{C}$

Seznam obrázků

2.1	Udržovací pec na tekutý hliník	3
2.2	Konstrukce udržovací pece na tekutý hliník ¹	4
2.3	Konstrukce topného tělesa	5
2.4	Regulátor 2204e	5
2.5	Blokové schéma regulačního obvodu pro řízení udržovací pece	6
2.6	Přepnutí na víkendový provoz ze 17. – 18. 6. 2016	8
2.7	Víkendový provoz z 18. – 19. 6. 2016	8
2.8	Přepnutí na výrobní provoz z 19. – 20. 6. 2016	9
2.9	Výrobní provoz při $w_{AL} = 660\text{ °C}$ z 11. 5. 2016	9
2.10	Výrobní provoz při $w_{AL} = 690\text{ °C}$ ze 7. – 8. 11. 2016	10
2.11	Negativní skokové změny T_{AL} [°C] ze 6. – 7. 1. 2016	10
2.12	První spuštění pece ze 4. – 6. 3. 2015	11
3.1	Blokové schéma systému udržovací pece	14
3.2	Statické převodní charakteristiky systému udržovací pece	16
3.3	Statická převodní charakteristika u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C]	17
3.4	Měření přechodové odezvy u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C] – 2. pokus	18
3.5	Průběhy teplot v ustálených stavech a statické převodní charakteristiky	19
3.6	Měření přechodové odezvy u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C] – 3. pokus	20
3.7	Měření přechodové odezvy u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C] pro skok $u = 46 \rightarrow 50\%$	21
3.8	Přechodová charakteristika systému a jeho přenosu (3.1)	22
3.9	Simulinkový model systému udržovací pece	23
3.10	Maska simulinkového modelu systému udržovací pece	23
4.1	P regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e	26
4.2	PI regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e – nesprávně	26
4.3	PI regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e	27
4.4	PID regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e	27

4.5	Regulační smyčka: PID regulátor s modelem udržovací pece z obr. 3.10	28
4.6	Odezva uzavřené regulační smyčky – porovnání modelu a systému	28
4.7	Odezva reálné regulační smyčky a nalezených přenosů	29
4.8	Data pro identifikaci odeslaná do specializované firmy	30
4.9	Odezva uzavřené regulační smyčky – porovnání nalezených modelů	31
4.10	Přechodové charakteristiky přenosů udržovací pece	31
5.1	Simulovaný víkendový režim při snížení w_{AL} na $650\text{ }^{\circ}\text{C}$	34
5.2	Simulovaný víkendový standardní režim při $w_{AL} = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$	36
5.3	Závislost spotřebované energie na čase	37
5.4	Závislost spotřebované energie na čase různých délek termočlánků	38

Kapitola 1

Úvod

Jelikož spotřeba energií ve všech odvětvích díky čím dál větším výkonům strojů narůstá, je neustále zapotřebí vyvíjet lepší, výkonnější a kvalitnější regulátory. Jejich kvality poté mohou velice ovlivňovat množství spotřebované energie a tím šetřit nemalé výdaje za elektrickou energii, která se díky narůstající spotřebě energií stává čím dál větším tématem diskuzí o úsporách ve výdajích.

Jedním z energeticky nejnáročnějších oborů lidské činnosti je slévárenství. Energeticky nejnáročnější z toho důvodu, že je zde kladen veliký důraz na vytvoření vysokých teplot pro roztavení pracovního materiálu ať už kovů či plastů. Podle (ROUČKA, J., 2004) je k výrobě 1 tuny hliníku spotřebováno asi 4 tuny bauxitu, cca 20 GJ tepelné energie a asi 14 MWh elektrické energie. Mezi další aspekty z hlediska energetické náročnosti patří i udržení teploty litého materiálu před samotným procesem tlakového lití. Důvodem je vysoká měrná tepelná kapacita a skupenské teplo tání hliníku (OUŘEDNÍČEK, A., 2013). Pokud je již teplo nutné k udržení hliníku v tekutém stavu dodáno za pomoci nemalé spotřeby energie, primárním cílem efektivity těchto aplikací je požadavek maximálního snížení tepelných ztrát a co nejefektivnějšího využití spotřebované energie.

Společnost AEMC, s. r. o., pro kterou je tato práce zpracovávána, se zabývá výrobou hliníkových částí bloků motorů počínaje tavením slitiny hliníku až po následnou montáž a odeslání k výrobcům předních automobilových značek. Hliníkové ingoty se taví v tavicích pecích, ze kterých se materiál dodává v tekutém stavu do výrobních linek vakuového nebo tlakového lití. Součástí každé lící linky je odporová udržovací pec s nepřímým ohřevem pro udržení správné teploty tekutého hliníku jako slévaného materiálu (HRAZDÍLEK, Z.; LÁZNIČKOVÁ, I.; KRÁL, V., 2011, kapitola 3.2). Tento lehký kov musí být neustále udržován na teplotě okolo 660 °C, aby byla dodržena co nejlepší kvalita odlévaného výrobku. Jak autoři ve své publikaci (HRAZDÍLEK, Z.; LÁZNIČKOVÁ, I.; KRÁL, V., 2011)

uvádějí: „Úkolem regulace teploty elektrické pece je trvale a přesně udržovat požadovanou teplotu pracovního prostoru, nebo reagovat na změny podle předem stanoveného programu.“ Přesnost, nastavení a kvalita regulace tedy značně ovlivňuje vlastní spotřebu elektrické energie udržovací pece. Toto je však pouze jeden z aspektů ovlivňujících úsporu násobenou počtem výrobních strojů.

Cílem této absolventské práce je provést energetickou revizi regulace teploty tekutého kovu na reálném systému udržovací pece. Zde udělat potřebná měření a tím získat nutná data a údaje pro vytvoření modelu pece ve vývojovém prostředí MATLAB/Simulink dle (ROUBAL, J. et al., 2011; ROUBAL, J., 2012). Pomocí tohoto modelu a průběhů teplot roztaveného hliníku, získaných ze zapisovací jednotky a posléze komunikačního modulu na reálném systému, nalézt možné způsoby a možnosti úspor elektrické energie. Získaná data poté využít k analýze finanční úspory za elektrickou energii a finanční návratnosti proti investicím do úprav reálného systému.

Struktura této práce, která je napsána v $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ ¹ (SCHENK, C., 2009) je následující. Kapitola 2 popisuje čtenáři řízení systému udržovací pece na tekutý hliník. Dále prezentuje různé provozní režimy tohoto systému společně s průběhy regulované teploty hliníkové lázně. V kapitole 3 je identifikován reálný systém a následně vytvořen model udržovací pece v prostředí Simulink. Následující kapitola 4 se zabývá identifikací samotného PID regulátoru v řídicím systému Eurotherm 2204e. Dále je zde provedena verifikace regulačního obvodu s modelem pece. Ta spočívá v porovnání odezvy reálného systému a jeho nalezeného modelu v uzavřené regulační smyčce. V kapitole 5 je poté provedena analýza úspor a návrh energeticky úspornějšího řešení regulace teploty hliníkové lázně. Přílohy zahrnují obsah příloženého přenosného média, použitý software a časový plán tvorby této práce.

¹ $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ je rozšíření systému \LaTeX , což je kolekce maker pro \TeX . \TeX je ochranná známka American Mathematical Society.

Kapitola 2

Udržovací pec na tekutý hliník

Tato kapitola pojednává o udržovací peci, viz následující obrázek, na tekutý hliník. Jsou zde popsány důvody jejího použití ve slévárenství u licího stroje pro tlakové lití hliníkových odlitků. Dále je zde popsána konstrukce samotné pece a analýza regulačního systému v typických pracovních podmínkách.

Potřeba udržovací pece pro slévárenství není vždy nutností. Záleží na typu slévárenského materiálu, velikosti odlitku a procesu samotného lití. Vzhledem k velikosti licího stroje UBE-is 1250t a možnosti odlévat na něm odlitky o velikosti převodové nebo klikové skříňe automobilů, stoupá velmi rychle spotřeba hliníku a tedy nutnost jeho častějšího doplňování.

V takovém případě se slévárenský materiál nejprve taví v tavicích pecích. Poté se nalije do takzvané transportní pánve, což je jednoduše řečeno „kelímek“ o objemu okolo 900 kg. Následně se v této pánvi čistí pomocí stlačeného dusíku procházejícího za neustálého míchání grafitovým rotorem. Poté se dopraví tekutý hliník v pánvi k udržovací peci pomocí vysokozdvíhacího vozíku a nalévá se do ní při teplotě okolo 700 °C.

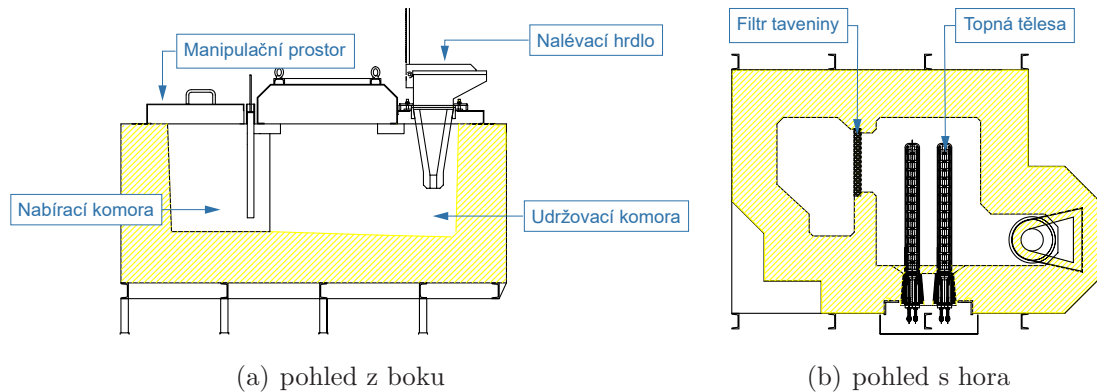
Účel udržovací pece je poté velice jednoduchý – udržet teplotu tekutého hliníku na požadované úrovni do doby, než je hliník vstřikovacím lisem spotřebován. Jako druhý velmi podstatný účel těchto pecí, je udržet teplotu roztaveného hliníku na takové hodnotě, při které nedojde k zatuhnutí lázně, pokud je licí stroj odstaven například z důvodu poruchy nebo plánované odstávky.



Obrázek 2.1: Udržovací pec na tekutý hliník

2.1 Konstrukce udržovací pece

Udržovací pec na tekutý hliník je systém, který slouží k udržování 2750 kg tekutého hliníku na požadované teplotě. Tato teplota se odvíjí od daného výrobku, který se vyrábí na následném licím stroji, a je udržována pomocí regulátoru Eurotherm 2204e, o kterém bude zmínka níže. Následující obrázek znázorňuje konstrukci udržovací pece.

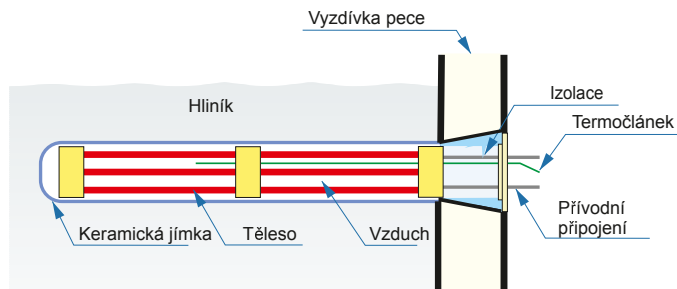


Obrázek 2.2: Konstrukce udržovací pece na tekutý hliník²

Samotná udržovací pec je rozdělena na dvě komory. Do první tzv. „udržovací“ se skrze keramické nalévací hrdlo nalévá tekutý hliník o teplotě okolo 700 °C rozvážený z tavicí pece v tak zvaných „transportních pánvích“. Ze druhé „nabírací“ se pomocí nalévacího zařízení odebírá tekutý kov pro samotný proces lití. Tyto dvě komory jsou rozděleny filtrem, obvykle na bázi Al_2O_3 , který je vsazen mezi dva kovové profily tvaru U tak, aby v rámci pravidelného čištění pece bylo možné tento filtr vytáhnout a následně vložit nový bez nutnosti odstávky pece. Pec je také vybavena víkem o ploše 0,5 m² na utěsnění manipulačního prostoru pro nabírací zařízení pro co možná největší zaizolování proti únikům tepla v případě odstavení licího stroje.

Teplota hliníku je v udržovací peci udržována pomocí dvou odporových 16 kW těles vsunutých do keramických jímek na bázi karbidu křemíku (SiC), která jsou ponořena pod hladinou tekutého kovu. Tento způsob bezkontaktního uložení odporových těles v jínce obklopené tekutým kovem je zvolen pro vyšší odolnost těles proti nánosům nečistot při doplňování kovu. Společně s využitím větší kontaktní plochy předávající tepelnou energii z topných článků na materiál udržované tekuté lázně. Konstrukci samotných těles znázorňuje následující obrázek.

²Obrázky byly převzaty z konstrukčních plánů udržovací pece a následně byly upraveny.



Obrázek 2.3: Konstrukce topného tělesa

Topná tělesa přeměňují elektrickou energii na energii tepelnou a tak ohřívají vzduch, kterým jsou obklopena v keramických jímkách. Ty se zahřívají a přenášejí tuto energii na lázeň tekutého hliníku, který jímky obklopuje takřka po celé ploše, viz obr. 2.3. Jejich teplota je měřena na každém tělese zvlášť za pomoci standardních termočlánků v 1. třídě přesnosti s označením NiCr-Ni (někdy také označované jako termočlánek typu K) s jedním měřícím okruhem v rozsahu -40 až 1200 °C.

Teploty topných těles jsou řízeny pomocí regulátorů od společnosti Eurotherm, které řídí výkon těles v rozsahu proudů od 10 do 40 A. Tento rozsah je zvolen z důvodu schopnosti detekovat chybové stavy těles. Tyto stavy jsou detekovány dvěma panelovými ampérmetry, kde každý má dva alarmy. První chybový stav je hlášen, jakmile má těleso menší odběr než 10 A po stanovený čas – odpovídá přerušení odporového drátu, kdy těleso netopí. Druhý chybový stav je hlášen, jakmile má těleso větší odběr než 40 A po stanovený čas – odpovídá zkratu v tělese.

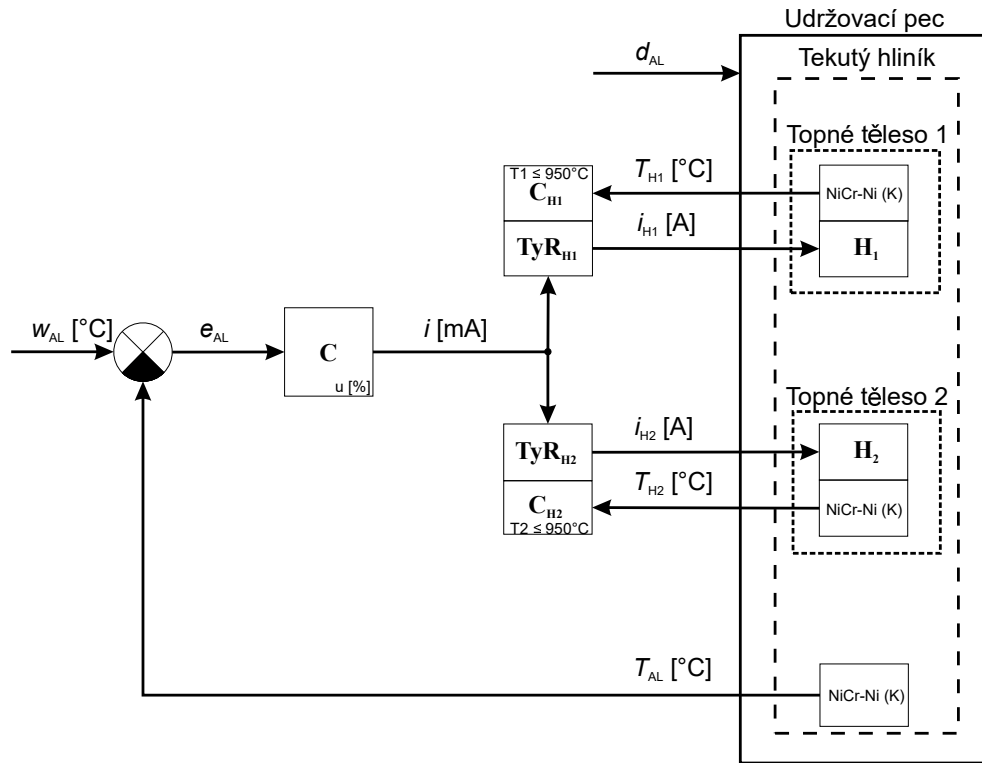
2.2 Řízení systému udržovací pece

Celý systém je řízen PID regulátorem 2204e od výrobce Eurotherm. Tento regulátor je vyroben pro velké množství aplikací a použití, nabízí nesčetně možností v oblasti regulace od dvoubodové pro nahřívání těles až po PID regulaci elektrických pohonů. Jeho vlastnosti lze rozsáhle modifikovat od typu regulátoru, komunikace s ostatními prvky pomocí Modbus protokolu až po definování typů výstupních signálů a prvků.



Obrázek 2.4: Regulátor 2204e

Dále bude popsáno blokové schéma regulačního obvodu, který řídí udržovací pec na tekutý hliník. Výše zmíněný PID, regulátor označený písmenem C, řídí prostřednictvím analogového výstupu i [mA] (akční veličina) tyristorové spínací jednotky 7100A TyR_{H1} a TyR_{H2} použité pro každé těleso zvlášť. Výstupem těchto spínacích jednotek jsou silové proudy i_{H1} , i_{H2} [A], které ohřívají odporová tělesa H_1 a H_2 .



Obrázek 2.5: Blokové schéma regulačního obvodu pro řízení udržovací pece

Teploty těles T_{H1} , T_{H2} [°C] odměřované NiCr-Ni (K) termočlánky jsou monitorovány dvěma dvupolohovými regulátory C_{H1} a C_{H2} , jenž plní pouze funkci bezpečnostního prvku, který hlídá nahřátí těles H_1 a H_2 na maximální teplotu $950^\circ C$. V případě jejího překročení vypínají za pomoci releového výstupu cívku stykače přívodního napájení tyristorové jednotky přehřátého tělesa. Tím je zamezeno nahřátí těles nad dovolenou bezpečnostní mez.

Regulovanou veličinou je teplota hliníkové taveniny T_{AL} [°C], která je měřena dalším termočlánkem NiCr-Ni (K), viz obr. 2.5, umístěným v keramické jímce se základem z SiC. Tato teplota je spolu s její žádanou hodnotou w_{AL} [°C] přivedena do PID regulátoru C, model 2204e od výrobce Eurothem. Veličina d_{AL} symbolizuje poruchové veličiny (okolní teplota, odběr tekutého hliníku atd.).

2.2.1 Zapisovač teplot Eurotherm 5000B

K řídicímu systému je připojen zapisovač Eurotherm 5000B, který slouží k soustavnému monitorování teplot T_{H1} , T_{H2} , T_{AL} [$^{\circ}\text{C}$] pro potřeby zákazníka. Data, která jsou uvedena dále v této kapitole, byla získána až 1 rok zpětně za pomoci této jednotky. Pomocí kříženého síťového kabelu a softwaru Review od stejnojmenné firmy byla data exportována do prostředí MS Excel. Pro načtení dat do programu MATLAB byla vytvořena funkce `DataXLsexport.m`, která umožňuje načtení dat z MS Excel a jejich následné vykreslení včetně popisu os atd.

Tato data byla poté krok po kroku analyzována. Byly v nich vyhledány průběhy, které jsou typické pro provoz pece (ochlazování pece, víkendové snížení žádané teploty hliníkové lázně atd.). Také zde byla získána data potřebná k identifikaci systému.

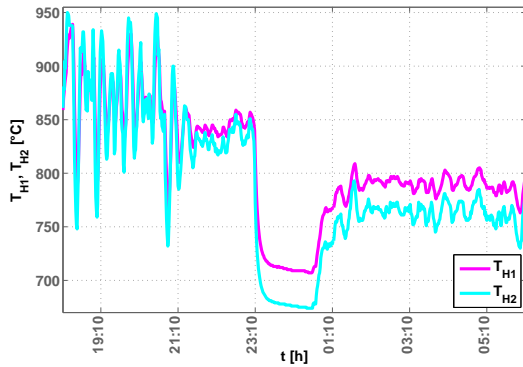
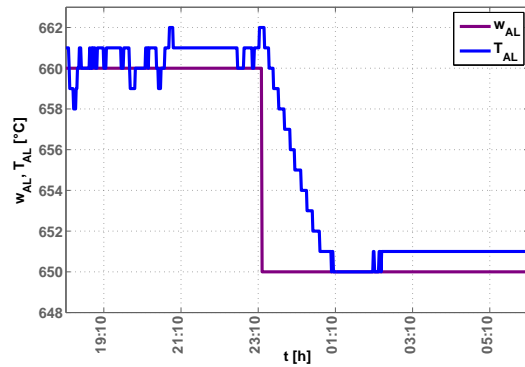
2.3 Typické provozní podmínky při řízení

V této podkapitole budou popsány typické provozní podmínky při řízení pece a současně abnormality nalezené při analýze záznamů teplot T_{H1} , T_{H2} , T_{AL} [$^{\circ}\text{C}$] z paměti zapisovače Eurotherm 5000B. Mezi tyto provozní podmínky patří zejména manuální úprava požadované teploty w_{AL} [$^{\circ}\text{C}$] pro ochlazení pece na nevýrobní víkendový provoz, ustálení teploty T_{AL} [$^{\circ}\text{C}$] a následný návrat zpět do výrobního provozu. Dalším typickým stavem je regulace při plném provozu pece během výrobního cyklu licí linky. K tomuto stavu se váže níže uvedená nalezená abnormalita. Posledním typickým provozním stavem je první spuštění udržovací pece.

2.3.1 Nevýrobní víkendový provoz

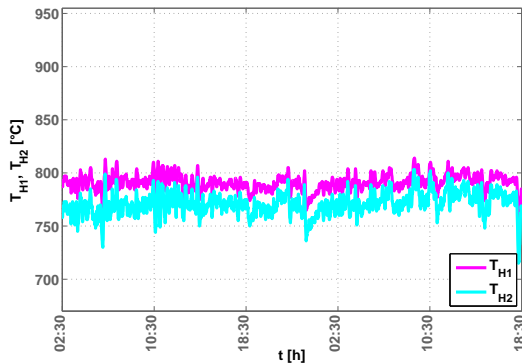
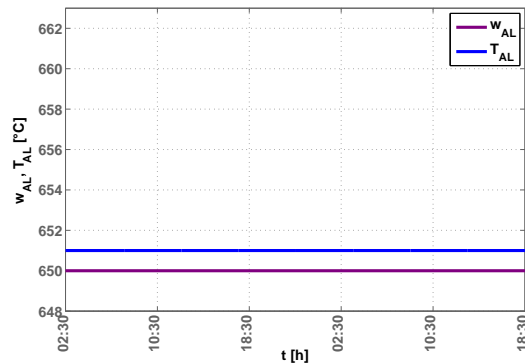
Protože se o víkendu na licím stroji většinou nevyrábí, snižuje se, z důvodu snížení spotřeby elektrické energie, na konci poslední týdenní směny požadovaná teplota regulované veličiny w_{AL} na 650°C . Tato veličina se poté na konci víkendu s dostatečnou časovou rezervou pro nahřátí vrací zpět na $w_{AL} = 660 \div 690^{\circ}\text{C}$ podle typu výrobku na první týdenní směně.

Následující obrázek znázorňuje regulační děj při ukončení výroby na konci pracovního týdne na teplotě $T_{AL} = 660^{\circ}\text{C}$ a následné přepnutí na víkendový provoz, kdy je žádaná hodnota nastavena na $w_{AL} = 650^{\circ}\text{C}$. Průběhy vykresluje skript `weekend_before.m`.

(a) průběhy teplot těles T_{H1} , T_{H2} [°C](b) průběh teploty lázně T_{AL} [°C]

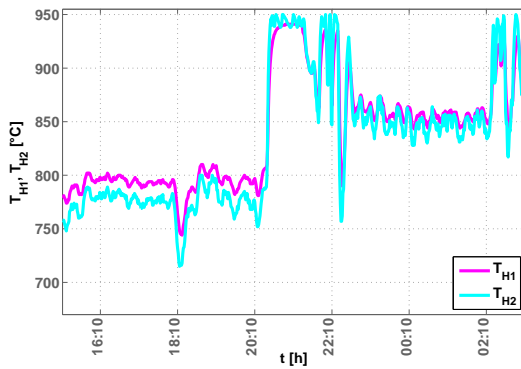
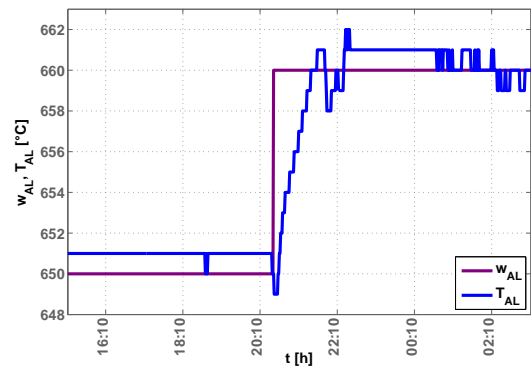
Obrázek 2.6: Přepnutí na víkendový provoz ze 17. – 18. 6. 2016

Druhý regulační děj, vykreslený pomocí skriptu `weekend_static_temp.m`, znázorňuje na obr. 2.7(b) průběh ustálené teploty T_{AL} [°C] během víkendového nevýrobního provozu udržovací pece a na obr. 2.7(a) chování teplot těles T_{H1} , T_{H2} [°C] potřebné pro udržení žádané teploty lázně. Během víkendového provozu jsou na udržovací peci uzavřena všechna víka. Čím těsněji je provedeno uzavření těchto krytů, tím více je snížena ztráta akumulovaného tepla v peci.

(a) průběhy teplot těles T_{H1} , T_{H2} [°C](b) průběh teploty lázně T_{AL} [°C]

Obrázek 2.7: Víkendový provoz z 18. – 19. 6. 2016

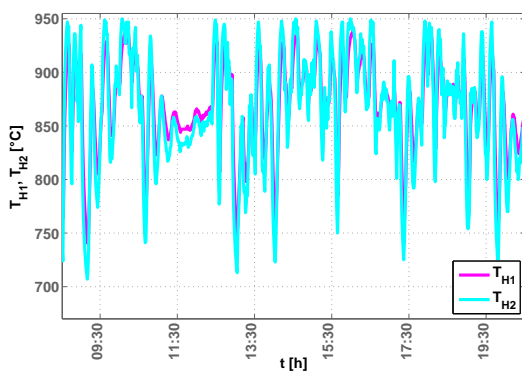
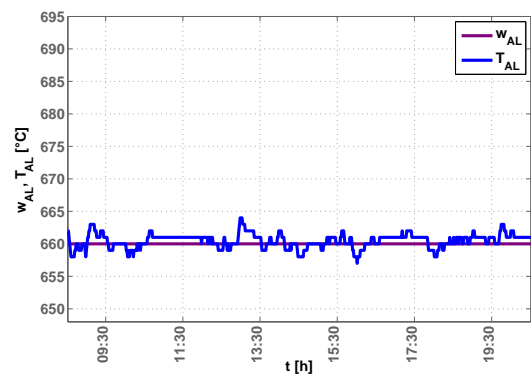
Třetí závěrečný krok víkendového nevýrobního provozu vykresluje, pomocí vytvořeného skriptu `weekend_after.m`, vývoj teplot T_{H1} , T_{H2} , T_{AL} [°C] při přechodu z víkendového do výrobního provozu. Jedná se o odezvu na změnu žádané hodnoty regulované veličiny na hodnotu $w_{AL} = 660$ °C.

(a) průběhy teplot těles T_{H1} , T_{H2} [°C](b) průběh teploty lázně T_{AL} [°C]

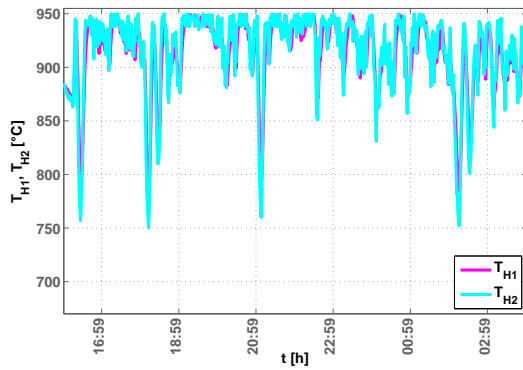
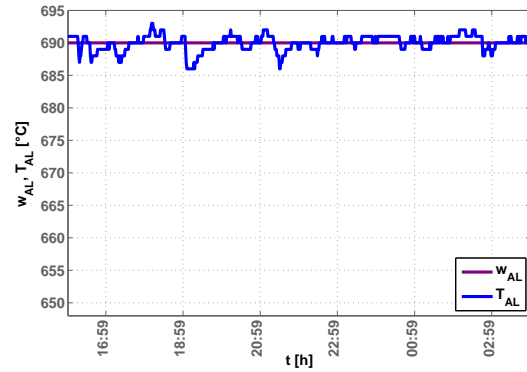
Obrázek 2.8: Přepnutí na výrobní provoz z 19. – 20. 6. 2016

2.3.2 Výrobní provoz

Výrobní provoz a regulační děj udržovací pece na tekutý hliník může být ovlivňován velkým množstvím vnějších vlivů. Mezi jedny z největších patří neustále otevřené víko prostoru pro odebírání lícího materiálu dávkovacím zařízením, což způsobuje velký únik tepla odkrytou hladinou tekutého kovu. Dalším vlivem je neustálý odběr a tudíž i doplňování roztaveného kovu. Na obr. 2.9 je vykreslen, pomocí skriptu `production_660.m`, vývoj teplot T_{H1} , T_{H2} , T_{AL} [°C] během výroby při požadované teplotě $w_{AL} = 660$ °C pro první typ výrobku. Při porovnání obr. 2.9(a) s obr. 2.7(a) je vidět značný rozdíl ve vývoji teplot T_{H1} , T_{H2} [°C]. Tento razantní rozdíl je způsoben výše zmiňovanými vlivy.

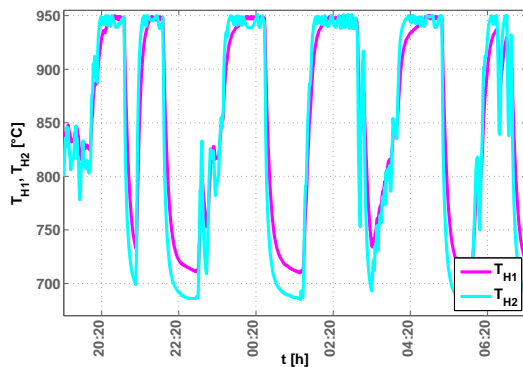
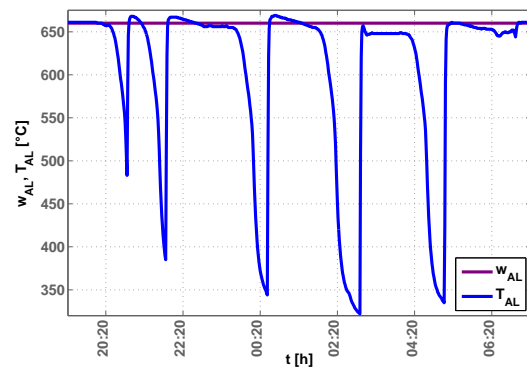
(a) průběhy teplot těles T_{H1} , T_{H2} [°C](b) průběh teploty lázně T_{AL} [°C]Obrázek 2.9: Výrobní provoz při $w_{AL} = 660$ °C z 11. 5. 2016

Na následujícím obrázku je vykreslen skriptem `production_690.m` vývoj teplot během výroby při požadované teplotě $w_{AL} = 690\text{ °C}$. Z provnání obr. 2.10(a) a obr. 2.9(a) je vidět zvýšení výkonového zatížení odporových těles – pro dosažení požadované teploty tekutého kovu, se teploty těles pohybují u své horní hranice.

(a) průběhy teplot těles T_{H1}, T_{H2} [°C](b) průběh teploty lázně T_{AL} [°C]Obrázek 2.10: Výrobní provoz při $w_{AL} = 690\text{ °C}$ ze 7. – 8. 11. 2016

2.3.3 Negativní „skokové“ změny teploty hliníku

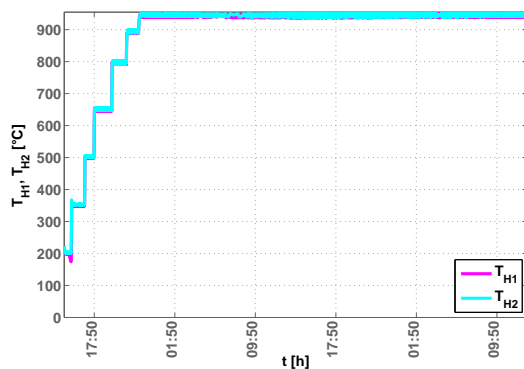
V této kapitole je popsána nalezená abnormalita regulace udržovací pece, která je znázorněna na následujícím obrázku, jenž vykresluje skript `Negative_steps_change.m`. Ta byla způsobována klesnutím hladiny lázně pod nejnižší bod termočlánku NiCr-Ni (K) měřícího teplotu lázně T_{AL} [°C].

(a) průběhy teplot těles T_{H1}, T_{H2} [°C](b) průběh teploty lázně T_{AL} [°C]Obrázek 2.11: Negativní skokové změny T_{AL} [°C] ze 6. – 7. 1. 2016

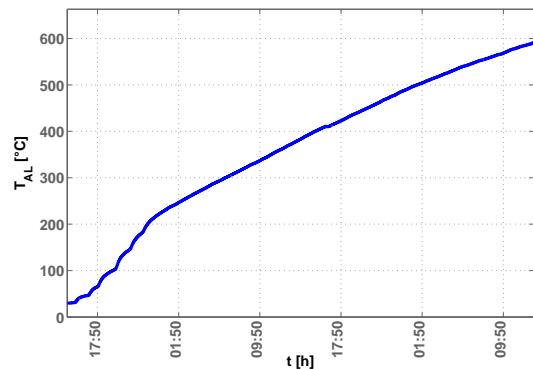
Náhlé „skokové“ změny teplot na obr. 2.11 jsou ovlivněny modifikací jímky termočlánku, kdy původní grafitová jímka nebyla schopna rychle reagovat na změny teploty při ztrátě kontaktu s lázní vlivem akumulace tepla. Tento jev se začal projevovat po výměně jímky za keramickou z materiálů se základem z SiC, kdy k těmto poklesům dochází v případě, že při výrobě dojde k vybrání tekutého kovu uvnitř pece na takovou úroveň, že jímka termočlánku není v přímém kontaktu s hladinou hliníku. Na obr. 2.11 je vidět, že tyto „skokové“ změny teploty negativně ovlivňuje chování regulátoru, i když teplota hliníkové lázně má požadovanou hodnotu $660\text{ }^{\circ}\text{C}$, což bylo v minulosti mnohokrát kontrolováno dodatečným měřením. Toto chybné měření výrazně prodražuje provoz udržovací pece. Opatření, jenž vedla k odstranění této abnormality, budou popsána v kapitole 5.2.

2.3.4 První spuštění pece

V této podkapitole bude popsáno prvotní spuštění pece, které je velmi zásadní. Z důvodu eliminace teplotního šoku, který může vést až k destruktivnímu popraskání vyzdívky vlivem tepelné rozpínavosti materiálů. Proto je nutné před samotným nalitím tekutého kovu, docílit v peci přibližně stejné teploty, jako má tekutý kov. Ten lze teprve poté nalévat do nahřáté pece. Průběhy teplot při tomto procesu jsou na následujícím obrázku, který je generován skriptem `startup.m`.



(a) průběhy teplot těles T_{H1} , T_{H2} [$^{\circ}\text{C}$]



(b) průběh teploty lázně T_{AL} [$^{\circ}\text{C}$]

Obrázek 2.12: První spuštění pece ze 4. – 6. 3. 2015

Na obr. 2.12 je průběh teplot při nahřívání pece před prvním naplněním tekutým hliníkem. Tento postup musí být proveden pokaždé při spouštění pece. Důvodem je proces vysychání nové nebo opravené vyzdívky. Pec se musí vždy nejprve nahřát na teplotu blízké

teplotě hliníku dle určitého průběhu nahřívání. To se děje za pomoci regulační smyčky z obr. 2.5, která v tomto případě ohřívá pouze vzduch uvnitř pece.

Podle stanoveného postupu se na regulátoru C mění postupně požadovaná hodnota regulované veličiny w_{AL} [$^{\circ}\text{C}$], který se postará o nahřátí pece na požadovanou teplotu. Tato teplota se udržuje uvnitř pece po stanovenou dobu a poté se opět změní na vyšší. Jakmile je dosažena teplota vzduchu v peci shodná s teplotou hliníkové lázně po určité době, může být do udržovací pece poprvé nalit tekutý hliník.

Kapitola 3

Model udržovací pece a jeho identifikace

Dříve než bude možné provádět simulační experimenty s uzavřenou regulační smyčkou řídící teplotu hliníkové lázně v udržovací peci, je nutné vytvořit v této kapitole počítačový model samotné udržovací pece. Tento model bude sestaven podle postupu z (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola: Motivace pro řízení, strana 9) v programovém prostředí MATLAB/Simulink (THE MATHWORKS, 1994).

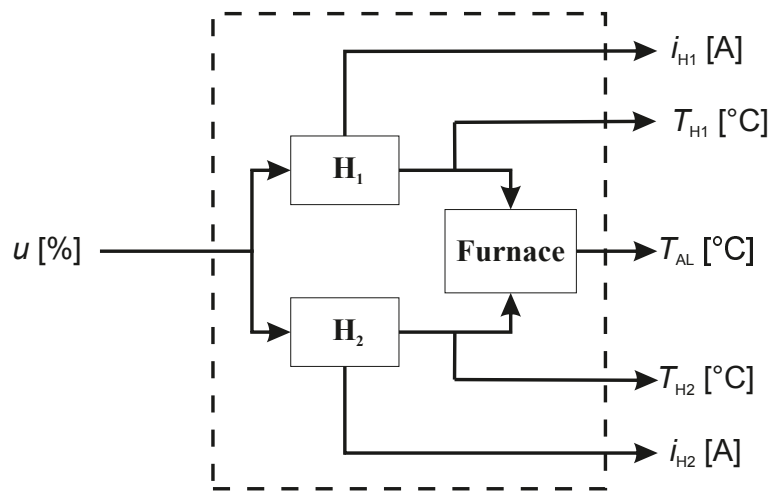
Podle (ROUBAL, J. et al., 2011, strana 9) budou nejprve definovány vstupy a výstupy systému udržovací pece. Poté by měl být dle (ROUBAL, J. et al., 2011, strana 9) vytvořen matematicko-fyzikálního model (krok 2) a následně nalezeny jeho konstanty (krok 3). Protože krok 2 vyžaduje alespoň vysokoškolské znalosti, budou kroky 2 a 3 nahrazeny přímou identifikací přenosové funkce z naměřené přechodové charakteristiky systému pomocí Strejcovy metody (FENCLOVÁ, M.; PECH, Z.; SUKOVÁ, M., 1993; ROUBAL, J. et al., 2011, příklad 12.3).

Ještě před samotnou tvorbou zmiňované přenosové funkce budou zjištěny statické vlastnosti systému, to je závislosti jednotlivých veličin v ustálených stavech. Nejprve bude popsán postup měření elektrických veličin kalibrovanými měřícími přístroji. Poté budou zaznamenána naměřená data, která budou následně vykreslena do grafů. Na základě těchto statických charakteristik, bude zvolen vhodný pracovní bod (ustálený stav), v jehož okolí bude nakonec změřena přechodová charakteristika mezi vstupem systému udržovací pece (akčním zásahem regulátoru) a teplotou hliníkové lázně (regulovanou veličinou). Z této naměřené přechodové charakteristiky bude zjištěn přenos pece pomocí Strejcovy metody. Následně je vytvořen onen počítačový model systému udržovací pece.

3.1 Vstupy a výstupy systému udržovací pece

Podle bodu 1 z (ROUBAL, J., 2012, strana 10) byly nejprve určeny vstupy a výstupy systému udržovací pece, který je schématicky znázorněn na obr. 3.1. Z tohoto obrázku je patrné, že řízený systém má jen jeden vstup u [%], respektive i [mA], kterým jsou řízeny tyristorové spínací jednotky TyR_{H1} a TyR_{H2} .

Výstupů má systém pět. Jsou to silové proudy i_{H1}, i_{H2} [A] z tyristorových spínacích jednotek, které dodávají energii do odporových topných těles každé o výkonu 16 kW. Dalšími výstupy systému jsou teploty T_{H1}, T_{H2} [°C] nahřátí odporových těles, které jsou zasunuty v keramických pouzdrech. Posledním výstupem systému je teplota T_{AL} [°C] hliníkové taveniny (tekutého hliníku).



Obrázek 3.1: Blokové schéma systému udržovací pece

3.2 Identifikace systému udržovací pece

Podle bodu 2 z (ROUBAL, J., 2012, strana 10) měl být nyní vytvořen matematicko-fyzikální model regulovaného systému udržovací pece. Vzhledem k tomu, že vytvořit matematicko-fyzikálního model nějakého systému vyžaduje vysokoškolské znalosti, byl tento krok nahrazen metodou identifikace takzvané černé skříňky (black box). To znamená, že byla hledána přenosová funkce systému přímo z naměřených přechodových charakteristik, to je z odezev na jednotkový skok, (FENCLOVÁ, M.; PECH, Z.; SUKOVÁ, M., 1993; ROUBAL, J. et al., 2011, příklad 12.3).

Před tím než bylo přistoupeno k měření těchto přechodových charakteristik, byly změněny statické převodní charakteristiky mezi jednotlivými signály. Protože některá data nejsou do zapisovače EUROTHERM 5000B ukládána, bylo nutné, pro vykreslení statických převodních charakteristik, získat data i dodatečným měřením elektrických veličin. Pro jejich zjištění byly použity měřicí přístroje: analogový multimetr HIOKY 3030-10, digitální multimetr BENNING MM2 a klešťový multimetr VOLTCRAFT VC-531.

Pro měření vstupního signálu i [mA] byl rozpojen obvod mezi výstupem PID regulátoru a vstupy tyristorových spínacích jednotek TyR_{H12} , viz obr. 2.5, a mezi ně zapojeny do série dva kalibrované přístroje: analogový ampérmetr HIOKY 3030-10 a digitální ampérmetr BENNING MM2. Hodnoty signálu i [mA] byly postupně odečítány na analogovém měřicím přístroji HIOKY 3030-10, který byl použit z důvodu přesnějšího odečítání hodnot a jako pojistka pro případ, že by docházelo k rychlým poklesům stejnosměrného proudu i [mA] vlivem přechodového odporu. Tyto hodnoty byly ještě potvrzovány výsledky naměřenými digitálním multimetrem BENNING MM2. Poté byl nasazen postupně na výstupy obou tyristorových spínacích jednotek klešťový multimetr VOLTCRAFT VC-531 pro odečtení hodnot signálů i_{H1} , i_{H2} [A].

3.2.1 Identifikace statických vlastností systému udržovací pece

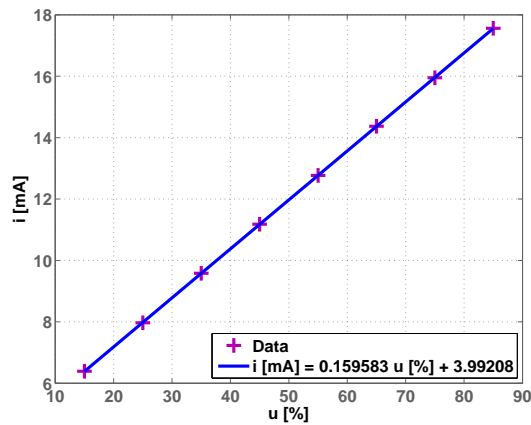
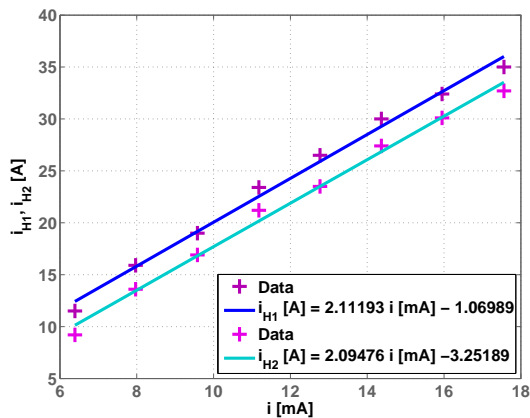
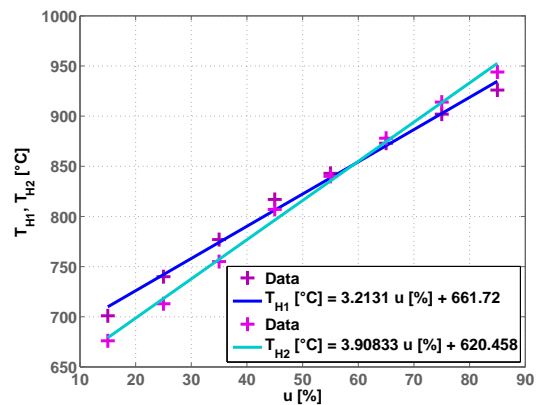
Při zjišťování statických vlastností systému udržovací pece byl PID regulátor v regulačním obvodu na obr. 2.5 přepnut z automatického do manuálního režimu. Poté na něm byla postupně nastavována velikost akčního zásahu u [%]. Po odeznění všech přechodových dějů (ustálení všech signálů, což bylo považováno po 25 minutách) byly odečítány proudy procházející topnými tělesy i_{H1} , i_{H2} [A] a teploty těles T_{H1} , T_{H2} [°C]. Teploty byly odečítány na zobrazovacích jednotkách kalibrovaných dvoupolohových regulátorech pro jednotlivá topná tělesa.

Proud procházející skrz tyristorové spínací jednotky byl, díky jejich zapojení, na požadované velikosti takřka okamžitě. Takřka řečeno z důvodu, že jistý sekundový náběh při změně proudu i [mA] byl vidět na analogovém ampérmetru HIOKI 3030-10, ale z hlediska doby reakce tepelných dějů může být toto zanedbáno. Tento děj je vlastností regulátoru, jenž se nazývá beznárazové spínání, které je šetrnější pro spínání velkých proudů jak pro elektrozařízení, tak pro elektrickou rozvodnou soustavu.

Naměřená data pro statické převodní charakteristiky jsou uvedena v následující tabulce. Tato data byla zpracována v programovém prostředí MATLAB/Simulink – pomocí skriptu `stat_char.m` byly vykresleny následující statické převodní charakteristiky.

Tabulka 3.1: Statické převodní charakteristiky systému udržovací pece

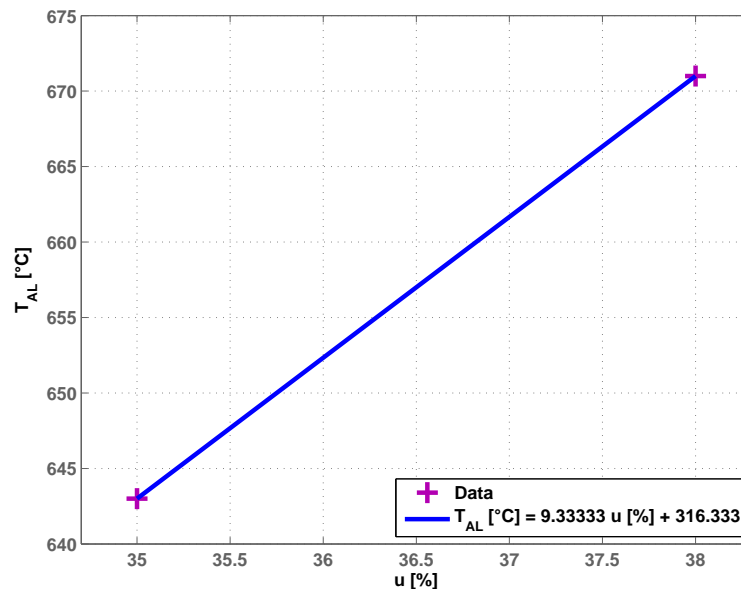
u [%]	i [mA]	i_{H1} [A]	i_{H2} [A]	T_{H1} [°C]	T_{H2} [°C]
15	6,39	11,5	9,2	701	676
25	7,97	15,9	13,6	740	713
35	9,58	19,8	17,4	781	759
45	11,18	23,4	21,2	817	807
55	12,77	26,5	23,5	843	840
65	14,37	30,0	27,4	873	878
75	15,95	32,4	30,1	902	914
85	17,56	35,0	32,7	926	944

(a) u [%] \rightarrow i [mA](b) i [mA] \rightarrow i_{H1}, i_{H2} [A](c) u [%] \rightarrow T_{H1}, T_{H2} [°C]

Obrázek 3.2: Statické převodní charakteristiky systému udržovací pece

Z výše uvedených naměřených převodních charakteristik i [mA] $\rightarrow i_{H1}, i_{H2}$ [A] je vidět, že proud i_{H1} [A] je větší než proud i_{H2} [A], což může být způsobeno například stářím těles. Myšleno rozdílnou dobou od montáže na tuto pec. Dle záznamů bylo totiž zjištěno, že těleso č. 1 bylo měněno dne 16. 3. 2014 a těleso č. 2 dne 23. 11. 2014. Tento rozdíl v době provozu může mít negativní vliv ve zvyšování vlastního odporu topné spirály tepelným namáháním a tím i vyšší spotřebě proudu procházejícího skrz těleso. Dalším důvodem rozdílnosti proudů může být výstupní napětí spínacích tyristorových jednotek TyR_{H1} a TyR_{H2} způsobené jejich vnitřní elektronikou.

Protože doba ustálení teploty hliníkové lázně je výrazně delší než bylo odhadováno, muselo být měření statické převodní charakteristiky u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C] odloženo až na dobu plánované letní odstávky výroby na přelomu července a srpna 2016. Důvodem bylo to, že za žádnou cenu nesměla být ohrožena výroba a stoprocentní kvalita odlitků. Při tomto měření bylo urychlováno chladnutí hliníkové lázně otevíráním poklopu pece. Výsledná statická převodní charakteristika u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C], která je zobrazena na následujícím obrázku, byla vytvořena v programovém prostředí MATLAB/Simulink pomocí skriptu `stat_char_u_Tal.m`.



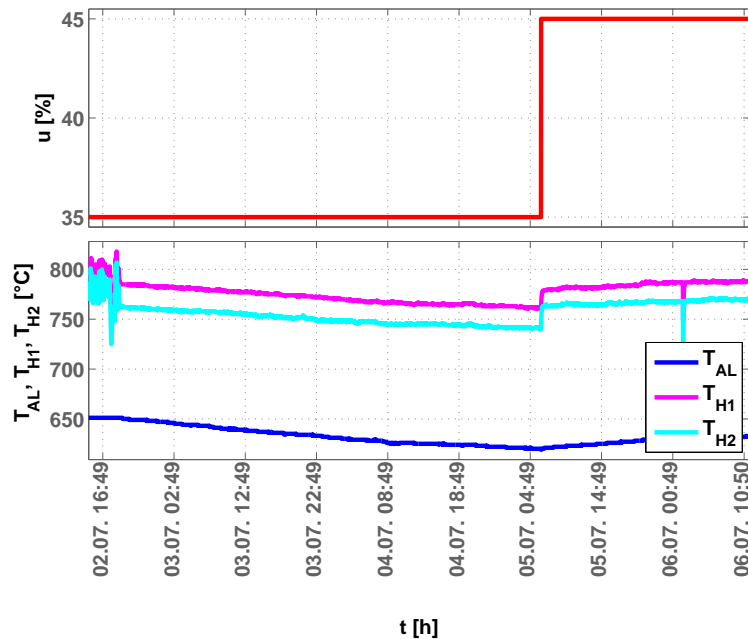
Obrázek 3.3: Statická převodní charakteristika u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C]

3.2.2 Identifikace dynamických vlastností udržovací pece

Měření přechodové odezvy u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C] bylo velice obtížné vzhledem k velké setrvačnosti regulované tepelné soustavy, která udržuje 2700 kg tekutého hliníku na teplotě

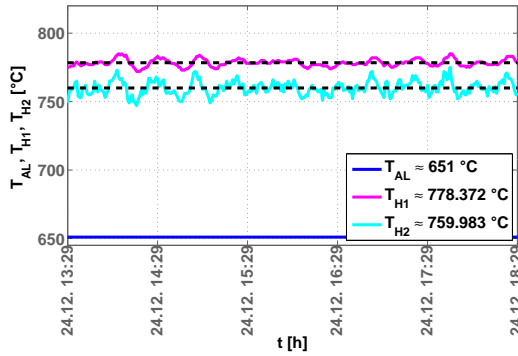
660 °C. Před prvním pokusem změřit tuto přechodovou charakteristiku byla provedena vizuální kontrola a monitoring akčního zásahu PID regulátoru u [%]. Ten se pohyboval v rozmezí od 32 % do 37 % po dobu 15 minut. Poté byl PID regulátor přepnut do manuálního režimu a akční zásah byl nastaven na konstantní hodnotu 35 %. Bohužel ani po 5 hodinách nedošlo k ustálení teploty hliníkové lázně a z důvodu provozu schopnosti ve výrobě muselo být měření ukončeno.

Jelikož podezření na neustálení teploty hliníkové lázně tkvělo v nedostatku času s ohledem na množství a velikost lázně, bylo druhé měření provedeno se stejným postupem, ale již s delší časovou rezervou. Bohužel ani po 50 hodinách nedošlo k ustálení teploty hliníkové lázně při konstantním akčním zásahu regulátoru, jak dokumentuje následující obrázek, který byl vykreslen pomocí skriptu `StepResponse2.m`.

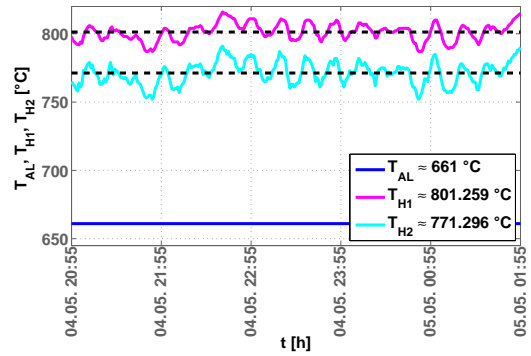


Obrázek 3.4: Měření přechodové odezvy u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C] – 2. pokus

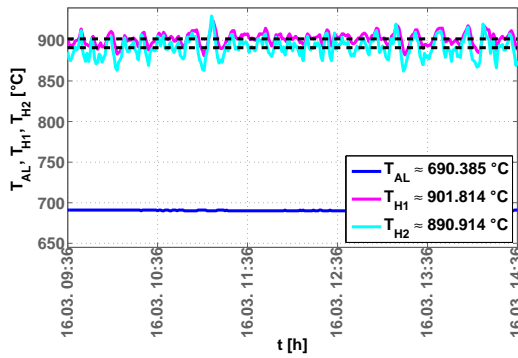
Na základě výše uvedených poznatků bylo tedy přistoupeno k sofistikovanější přípravě před samotným měřením přechodové charakteristiky u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C]. Nejprve byla provedena opětovná analýza historických dat ze zapisovače EURO THERM 5000B. Pomocí skriptu `stat_char_TH12_Tal.m` byly vygenerovány následující tři obrázky, které zobrazují průběhy teplot v „ustálených stavech“. Protože v reálných regulačních dějích nelze najít ideálně ustálené průběhy signálů, byly ve výše uvedeném skriptu dopočítány střední hodnoty teplot obou těles.



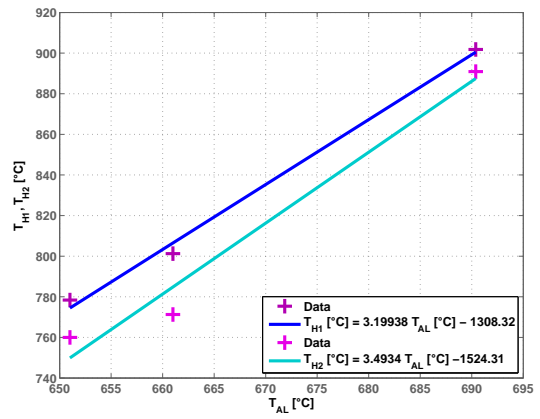
(a) průběhy teplot ze dne 24.12.2015



(b) průběhy teplot ze dne 04.05.2016



(c) průběhy teplot ze dne 16.03.2016



(d) statické převodní charakteristiky

Obrázek 3.5: Průběhy teplot v ustálených stavech a statické převodní charakteristiky $T_{AL} [^{\circ}C] \rightarrow T_{H1}, T_{H2} [^{\circ}C]$

Z průběhů teplot na obr. 3.5(a) až obr. 3.5(c), respektive z vypočítaných středních hodnot teplot těles a hliníkové lázně byly sestaveny přibližné statické převodní charakteristiky $T_{AL} [^{\circ}C] \rightarrow T_{H1}, T_{H2} [^{\circ}C]$, které jsou znázorněny na obr. 3.5(d). Pomocí těchto charakteristik byly pro teplotu tekutého hliníku $T_{AL} = 652^{\circ}C$ a pro každé těleso zvlášť vypočítány hodnoty akčního zásahu u [%].

Nejprve byly z charakteristik z obr. 3.5(d) vypočítány teploty odporových těles

$$T_{H1}(652^{\circ}C) = (3,19938 \cdot 652 - 1308,32) ^{\circ}C = 777,6802^{\circ}C,$$

$$T_{H2}(652^{\circ}C) = (3,4934 \cdot 652 - 1524,31) ^{\circ}C = 753,3834^{\circ}C.$$

Z těchto teplot byly pomocí charakteristik na obr. 3.2(c) dopočteny hodnoty u [%] odpovídající jednotlivým tělesům. Pro těleso H_1 je

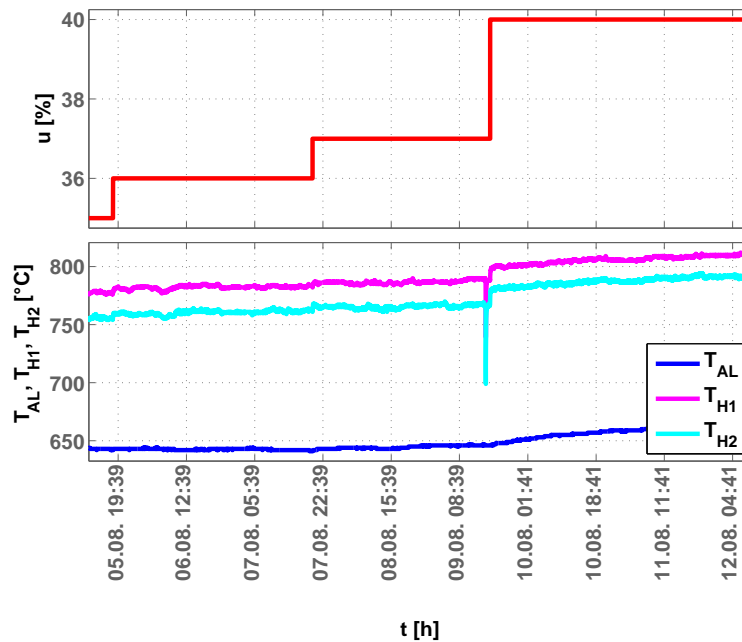
$$u(652^{\circ}C) = [(777,6802 - 661,72)/3,2131] \% = 36,08 \%$$

a pro těleso H_2 je

$$u(652\text{ }^\circ\text{C}) = \lfloor (753,3834 - 620,458) / 3,90833 \rfloor \% = 34,01\ \%.$$

Zprůměrováním těchto dvou výsledků byla získána hodnota $u = 35,045\ \%$.

Proto byla pro měření přechodové odezvy zvolena počáteční hodnota akčního zásahu $u = 35\ \%$ stejně jako v předchozím pokusu na obrázku obr. 3.4. Bohužel před měření této přechodové odezvy bylo nutné uskutečnit odstavení elektrické energie 4. 8. 2016 z důvodu plánované preventivní profylaxe hlavní rozvodny. Tím došlo k neovlivnitelnému vychladnutí lázně pece a tím ke značnému zkrácení doby pro měření přechodové odezvy. Z těchto důvodů musela být přechodová charakteristika nakonec změřena pro skok akčního zásahu $37\ \% \rightarrow 40\ \%$, viz následující obrázek generovaný ze skriptu `TimeStepResponse3_0L.m`.

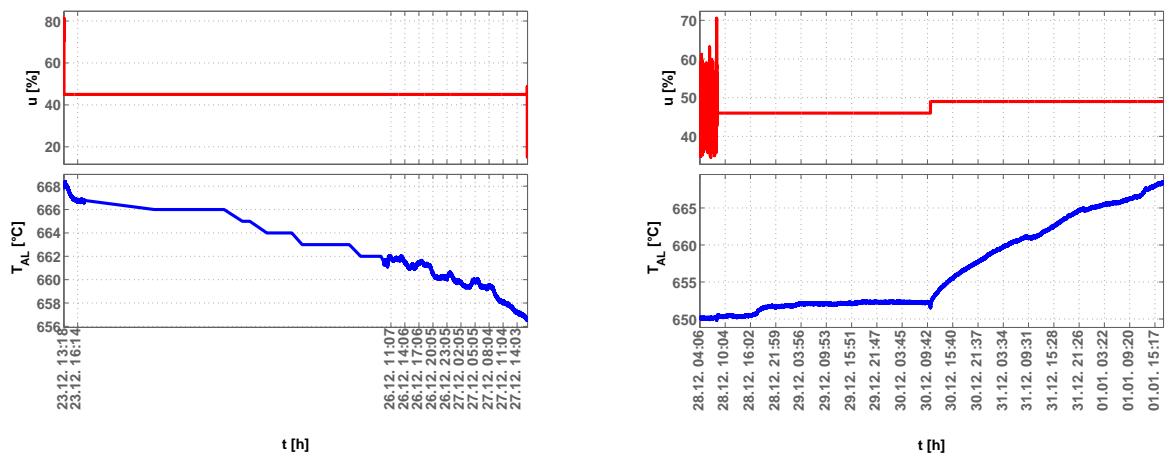


Obrázek 3.6: Měření přechodové odezvy $u\ [\%] \rightarrow T_{AL}\ [^\circ\text{C}]$ – 3. pokus

Z obr. 3.6 je patrné, že pec nereagovala na zvýšení vstupu u na $36\ \%$ ani na opětovné zvýšení na $37\ \%$, což naznačuje, že po výše uvedené odstávce elektrické energie nebyla pec v ustáleném stavu. Proto bylo přistoupeno k naplánování dalšího měření s větší časovou rezervou. Pro tento případ však přicházela v úvahu pouze vánoční odstávka. Ta měla v roce 2016 délku 10 dní, což se již jevílo dostatečné pro ustálení teploty $T_{AL}\ [^\circ\text{C}]$ před i po skoku akční veličiny $u\ [\%]$.

Pro toto měření byly s jednotlivými odděleními předem ověřeny plánované odstávky a servisní či preventivní úkony, jenž by mohly ohrozit měření. Plánované práce byly upra-

veny pro co nejhladší průběh celého měření přechodové odezvy systému. Dále byl pro získání širší škály sledovaných veličin a také pro zpřesnění zapisovaných dat zapůjčen RS232 komunikační modul od společnosti E-therm (www.e-therm.cz). Ten byl instalován přímo do PID regulátoru a sběr jednotlivých veličin do počítače byl proveden s pomocí softwaru iTool od společnosti Eurotherm. Naměřená data z doby vánoční odstavky jsou vykreslena pomocí skriptu `TimeStepResponse8_0L.m` na následujícím obrázku.

(a) ustalování T_{AL} [°C] ve směru ochlazení(b) ustálení teploty T_{AL} [°C] a skok u

Obrázek 3.7: Měření přechodové odezvy u [%] $\rightarrow T_{AL}$ [°C] pro skok akční veličiny $u = 46 \rightarrow 50\%$

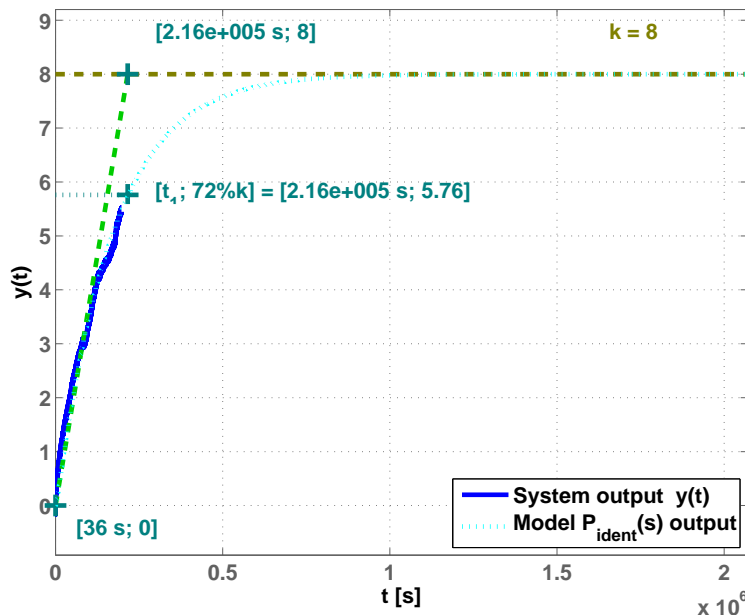
Průběh měření o vánoční odstavce byl bohužel negativně ovlivněn instalací aktualizací operačního systému WINDOWS 10, která následně vypnula záznamový počítač. Tím došlo k výpadku zapisování dat v sekundovém intervalu ve dnech od 23. 12. 2016 do 26. 12. 2016, viz obr. 3.7(a), kdy byla chyba nalezena při fyzické kontrole stavu záznamového PC. Tato chybějící data byla provizorně doplněna z ručních zápisů teploty T_{AL} [°C], která byla prováděna bezpečnostní ostrahou při pravidelných pochůzkách a domluvených kontrolách při těchto testech na udržovací peci.

Při následné kontrole 27. 12. 2016 byla zjištěna stále klesající teplota lázně T_{AL} [°C] se strmým průběhem ochlazování. Proto bylo rozhodnuto o pokusu o ustálení teplot v opačném směru, to je při nahřívání. To se později ukázalo jako přijatelnější postup. Proto byl systém nejprve rychle ochlazen otevřením pece. Následně přepnut do automatického režimu, aby teplota hliníkové lázně dosáhla co nejrychleji hodnoty $T_{AL} = 650$ °C. Poté byl systém přepnut do manuálního režimu a akční zásah zvednut na $u = 46\%$ tak, aby ustálení teploty bylo ve směru nárůstu teploty T_{AL} [°C], viz obr. 3.7(b).

Přestože přechodová odezva systému nemohla být zcela doměřena, viz obr. 3.7(b), byla tato data použita k nalezení přenosu tak zvanou Strejcovou metodou (FENCLOVÁ, M.; PECH, Z.; SUKOVÁ, M., 1993; ROUBAL, J. et al., 2011). Pro tento postup byl použit skript `IdentTF_bySTREJJC`, který je součástí školních toolboxů pro prostředí MATLAB. Pomocí tohoto skriptu byl nalezen přenos

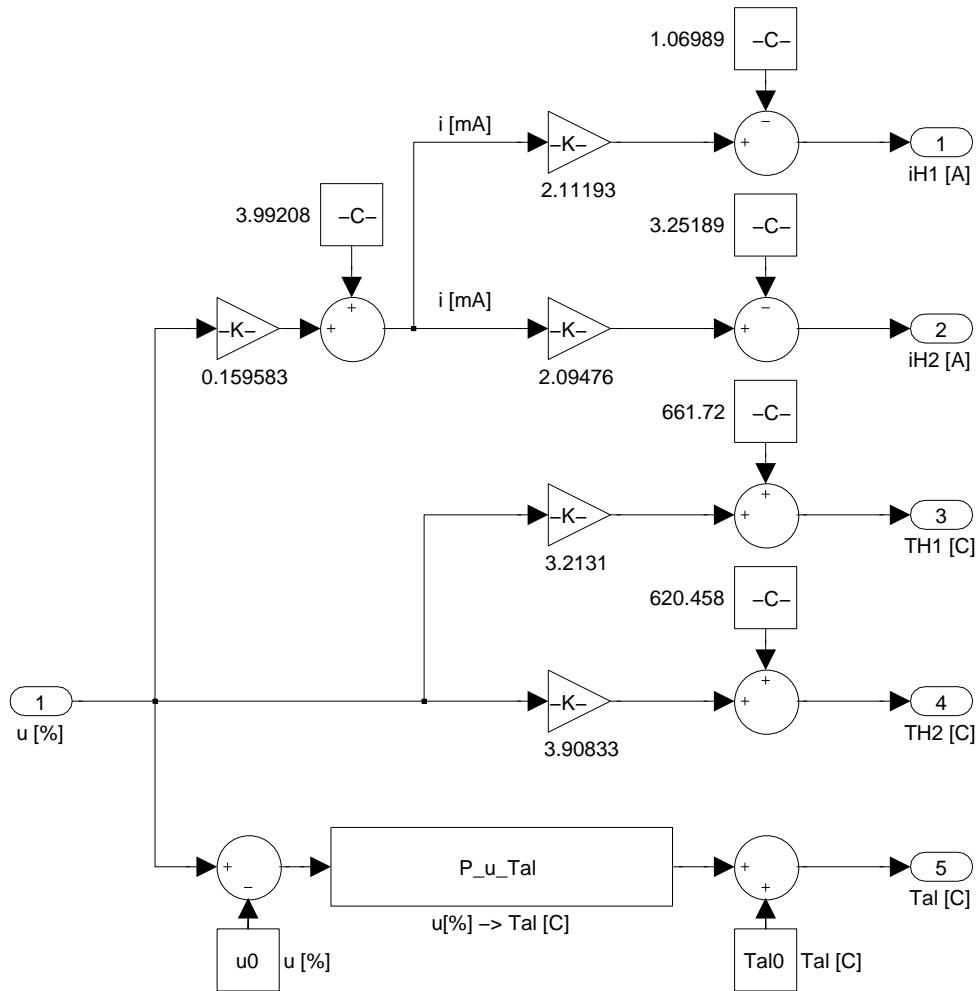
$$P_{u \rightarrow T_{AL}}(s) = \frac{8}{5,468 \cdot 10^8 s^2 + 1,719 \cdot 10^5 s + 1}, \quad (3.1)$$

jehož přechodová odezva byla následně porovnána s naměřenými daty z obr. 3.7(b), viz následující obrázek.



Obrázek 3.8: Přechodová charakteristika systému a jeho přenosu (3.1)

Z nalezené přenosové funkce (3.1) mezi vstupem u [%] a teplotou T_{AL} [°C] a naměřených statických převodních charakteristik z obr. 3.2(a), obr. 3.2(b) a obr. 3.2(c) byl v programovém prostředí MATLAB/Simulink sestaven kompletní model systému udržovací pece, který je na následujícím obrázku. Model byl dále, z důvodu přehlednosti schémat, opatřen tzv. maskou, viz obr. 3.10. K tomuto modelu je nutné uvést, že pouze přenosová funkce (3.1) zahrnuje dynamické vlastnosti systému. Zbylá část simulinkového modelu je vytvořena pouze ze statických charakteristik. Tato aproximace je ale ospravedlnitelná z toho důvodu, že tyto části modelu mají diametrálně rychlejší odezvu než má teplota hliníkové lázně T_{AL} [°C].



Obrázek 3.9: Simulinkový model systému udržovací pece



Obrázek 3.10: Maska simulinkového modelu systému udržovací pece

Nyní byl v programovém prostředí Simulink vytvořen kompletní model systému udržovací pece, viz schéma na obr. 3.9, který byl získán na základě měření v otevřené regulační smyčce. Dále je nutné ověřit správnost nalezeného modelu s odezvou reálného systému v uzavřené regulační smyčce. To je provedeno v následující kapitole.

Kapitola 4

Analýza řízení udržovací pece

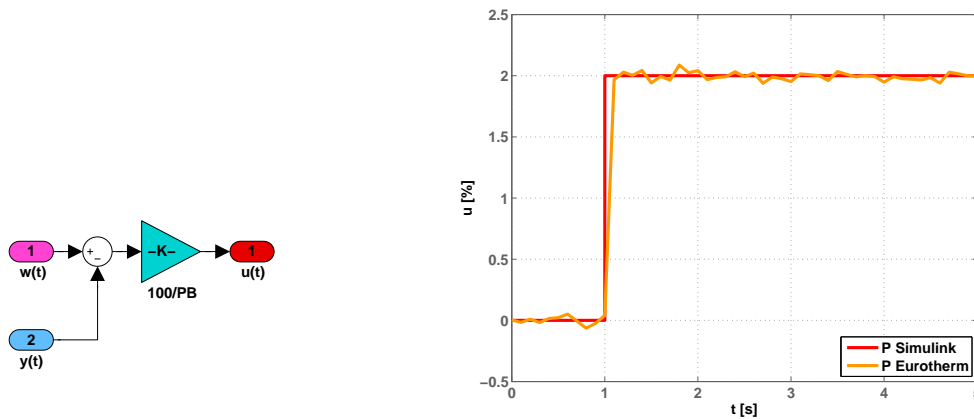
Obsahem této kapitoly je ověření chování nalezeného modelu udržovací pece v uzavřené regulační smyčce. K tomu je nutné znát, jak je v řídicím systému Eurotherm 2204e PID regulátor naprogramován (zapojen). Protože v manuálu k řídicímu systému nebyla nalezena žádná rovnice PID regulátoru, bude nejprve v této kapitole provedena jeho experimentální identifikace. Na jejím základě bude v programovém prostředí Simulink vytvořen bloček `PID Controller (for Eurotherm PLC)`, do kterého budou vloženy stejné konstanty, jako jsou nastaveny v reálném regulátoru.

Pomocí vytvořeného bločku PID regulátoru a nalezeného modelu udržovací pece bude sestavena v prostředí Simulink uzavřená regulační smyčka. Pomocí ní bude ověřena správnost identifikovaného modelu udržovací pece. Ten se bohužel ukáže jako nevyhovující. Proto bude požádána o pomoc specializovaná laboratoř zabývající se identifikací systémů v uzavřené regulační smyčce. V závěru této kapitoly budou porovnány nalezené modely udržovací pece na tekutý hliník.

4.1 PID regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e

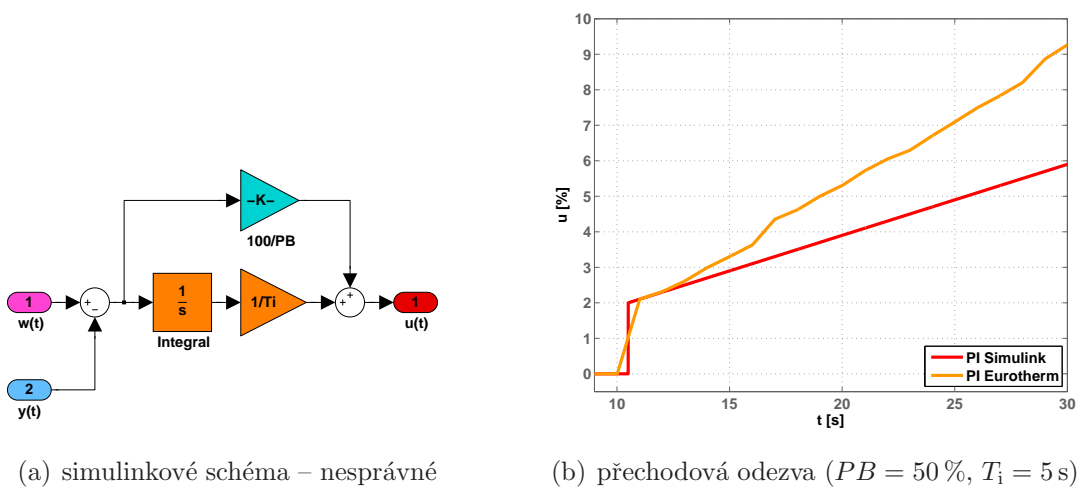
Podle manuálu (EUROTHERM, 2004) lze v řídicím systému Eurotherm 2204e měnit parametry PID regulátoru pomocí tří konstant: pásma proporcionality PB [%], integrační časové konstanty T_i [s] a derivační časové konstanty T_d [s]. Manuál k řídicímu systému bohužel neuvádí ani rovnici ani schéma zapojení PID regulátoru. To je ale pro následující simulace a analýzu regulačního obvodu zásadní.

Nezbývá tedy než rovnici (zapojení) regulátoru zjistit experimentálně. To bylo provedeno z přechodových charakteristik PID regulátoru (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 14). Nejprve byla identifikována samotná proporcionální složka. Z naměřené přechodové charakteristiky P regulátoru řídicího systému Eurotherm na obr. 4.1(b) bylo navrženo zapojení P složky, viz obr. 4.1(a). Správnost tohoto schématu potvrzuje obr. 4.1(b), který porovnává přechodovou odezvu skutečného regulátoru a jeho modelu z obr. 4.1(a).



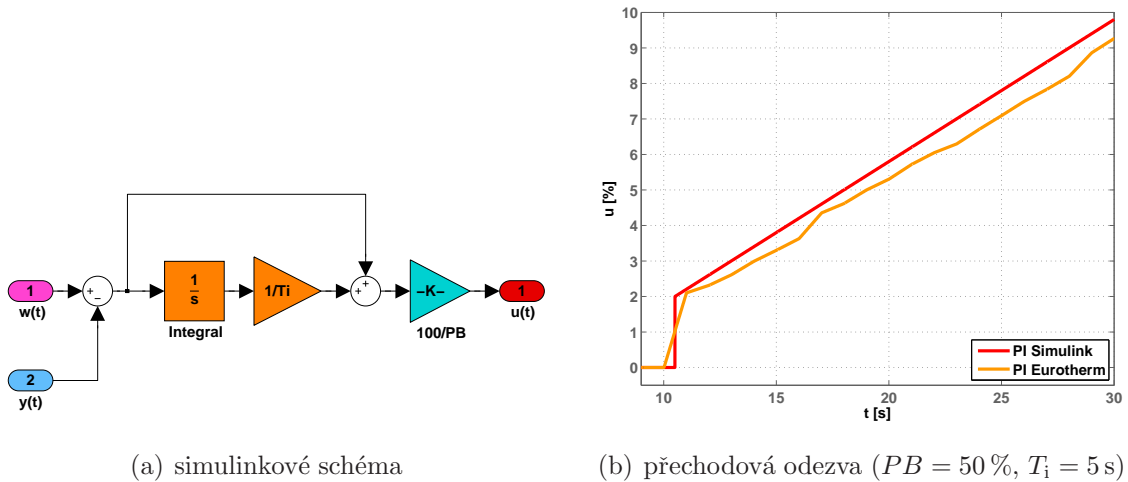
Obrázek 4.1: P regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e

Druhým krokem identifikace regulátoru bylo zjištění, jak je připojena integrační složka. Nejprve byla zvolena paralelní konfigurace, viz obr. 4.2(a). Z porovnání přechodových odezev na obr. 4.2(b) je patrné, že zapojení PI regulátoru na obr. 4.2(a) není správné.



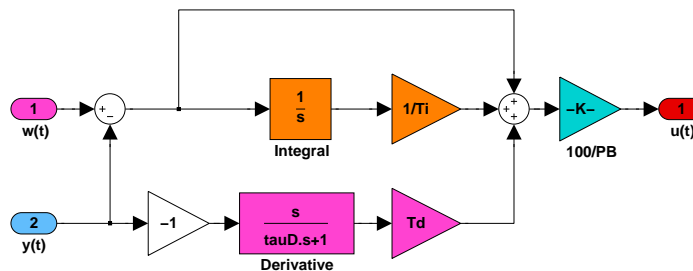
Obrázek 4.2: PI regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e – nesprávně

Druhý pokus identifikace PI regulátoru byl proveden s vytknutou P složkou za součtový člen dle obr. 4.3(a). Přechodové charakteristiky na obr. 4.3(b) potvrzují správnost tohoto zapojení.



Obrázek 4.3: PI regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e

Posledním krokem byla identifikace derivační složky. Pomocí obdobných experimentů bylo nakonec zjištěno kompletní zapojení PID regulátoru v řídicím systému Eurotherm 2204e, viz následující obrázek. V tomto řídicím systému nevstupuje do derivační složky regulační odchylka ale pouze regulovaná veličina. Aby byla zachována záporná zpětná vazba, je na vstupu D složky násobení konstantou -1 .

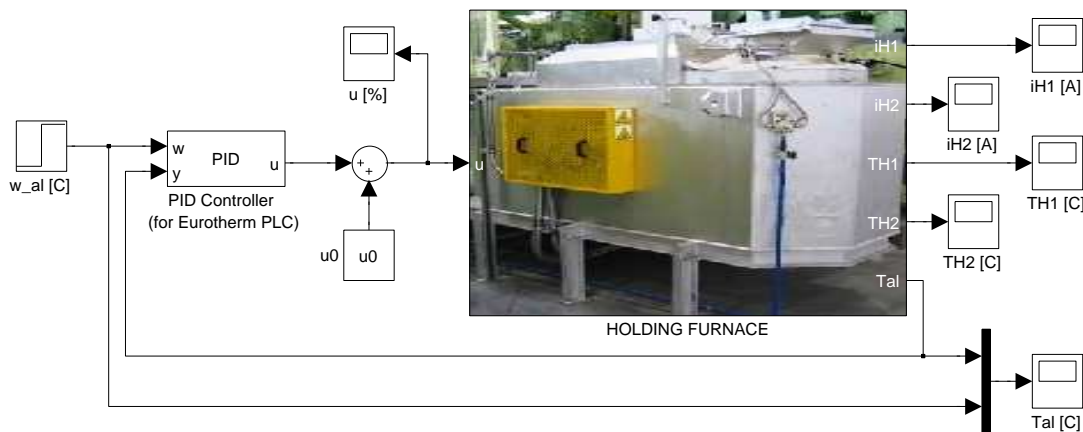


Obrázek 4.4: PID regulátor v řídicím systému Eurotherm 2204e

Při experimentech s PID regulátorem v řídicím systému Eurotherm 2204e bylo také zjištěno, že D složka má časovou konstantu, v obr. 4.4 označenou jako τ_D [s], o které se v manuálu vůbec nepíše.

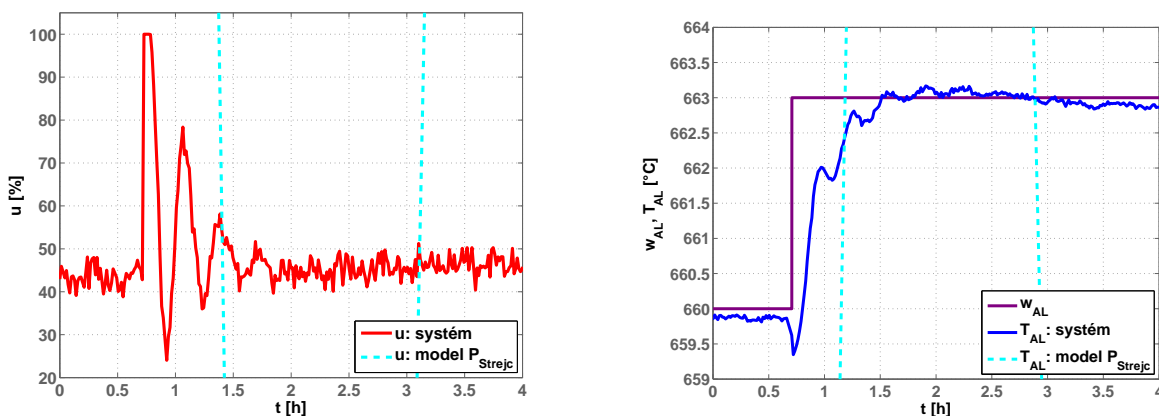
4.2 Analýza regulačního obvodu s modelem pece

V tuto chvíli je znám model udržovací pece, viz obr. 3.10, i konfigurace PID regulátoru, viz obr. 4.4. Z těchto objektů byla v prostředí Simulink vytvořena regulační smyčka, viz následující obrázek, a konstanty PID regulátoru byly nastaveny na stejné hodnoty, jaké jsou v řídicím systému Eurotherm 2204e.



Obrázek 4.5: Regulační smyčka: PID regulátor s modelem udržovací pece z obr. 3.10

Na následujícím obrázku je pomocí skriptu PIDcontrol_Model_print.m porovnána odezva regulační smyčky z obr. 4.5 s odezvou reálné udržovací pece. Z tohoto obrázku je patrné, že se nalezený model (3.1) chová v uzavřené regulační smyčce velice špatně.



(a) akční zásah u [%]

(b) regulovaná veličina T_{AL} [°C]

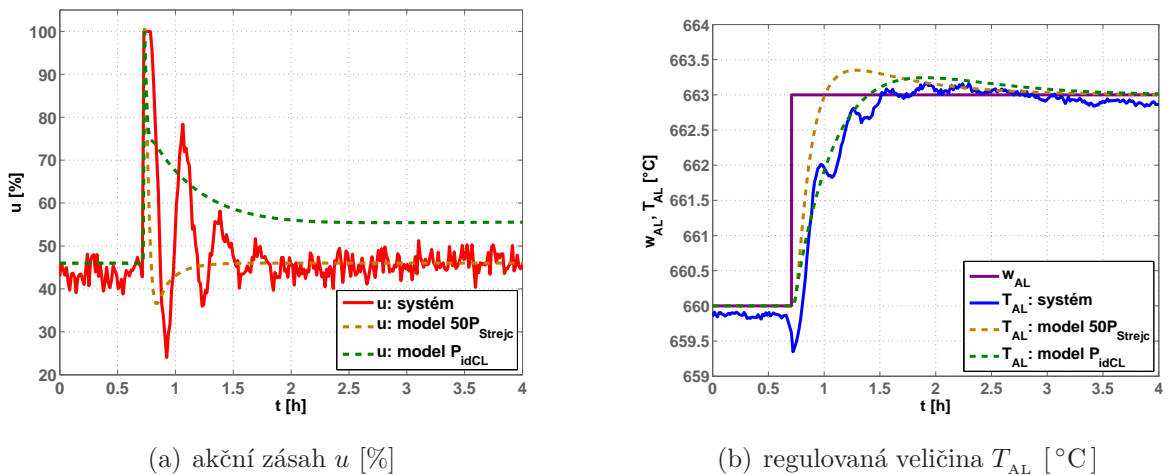
Obrázek 4.6: Odezva uzavřené regulační smyčky – porovnání identifikovaného modelu z obr. 3.10 s reálným systémem

Protože simulace na obr. 4.6 nepotvrdila správnost nalezeného modelu (3.1), byly provedeny experimenty s uzavřenou regulační smyčkou na obr. 4.5. Při těchto experimentech bylo zjištěno, že pokud se zesílení přenosu nalezeného Strejcovou metodou (3.1) zvětší padesátkrát, začne se model v uzavřené regulační smyčce chovat mnohem věrohodněji než tomu bylo na obr. 4.6.

Proto byly provedeny další experimenty v uzavřené regulační smyčce s tímto přenosem. Na základě těchto experimentů a výpočtů přenosu uzavřené regulační smyčky bylo dosaženo přenosu udržovací pece

$$P_{u \rightarrow T_{AL}}(s) = \frac{1,075 \cdot 10^{-6}}{s^2 + 0,01344s + 3,441 \cdot 10^{-6}}, \quad (4.1)$$

který již celkem věrohodně reprezentuje reálnou regulaci v uzavřené smyčce. To potvrzuje odezva uzavřené regulační smyčky, která je na následujícím obrázku generována skriptem `PIDcontrol_Model50_print.m`.

(a) akční zásah u [%](b) regulovaná veličina T_{AL} [°C]

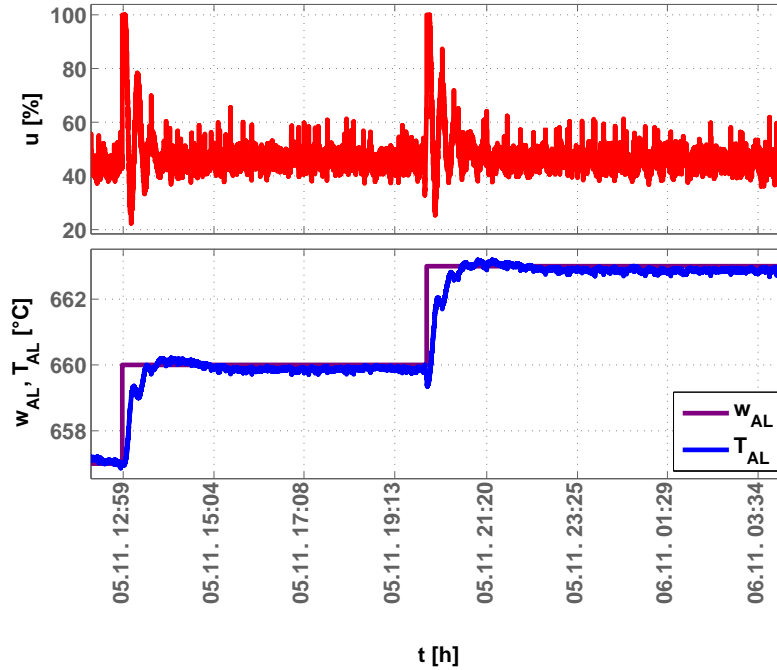
Obrázek 4.7: Odezva reálné regulační smyčky a nalezených přenosů

4.2.1 Identifikace modelu pece v uzavřené regulační smyčce

Jelikož se nepodařilo zjistit důvod, proč se nalezený přenos (3.1) chová v uzavřené regulační smyčce na obr. 4.5 tak špatně a zároveň proč, když je tento přenos vynásoben číslem padesát, se toto chování výrazně zlepšilo, byla požádána o odbornou pomoc v oblasti identifikace systému třetí strana.

Zástupci specializované laboratoře zabývající se identifikací a řízením průmyslových systémů po celém světě byl odeslán dotaz, viz `IdentificationCL_PecNaHlinik.doc`,

stručně popisující výše uvedený problém. Spolu s tímto dotazem byl odeslán záznam okolních teplot a data naměřená v uzavřené regulační smyčce při víkendovém provozu, kdy byl dvakrát proveden experimentální skok požadované teploty hliníkové lázně o 3°C. Tato odeslaná data vykreslená skriptem `TimeStepResponse5_CL.m` znázorňuje následující obrázek.



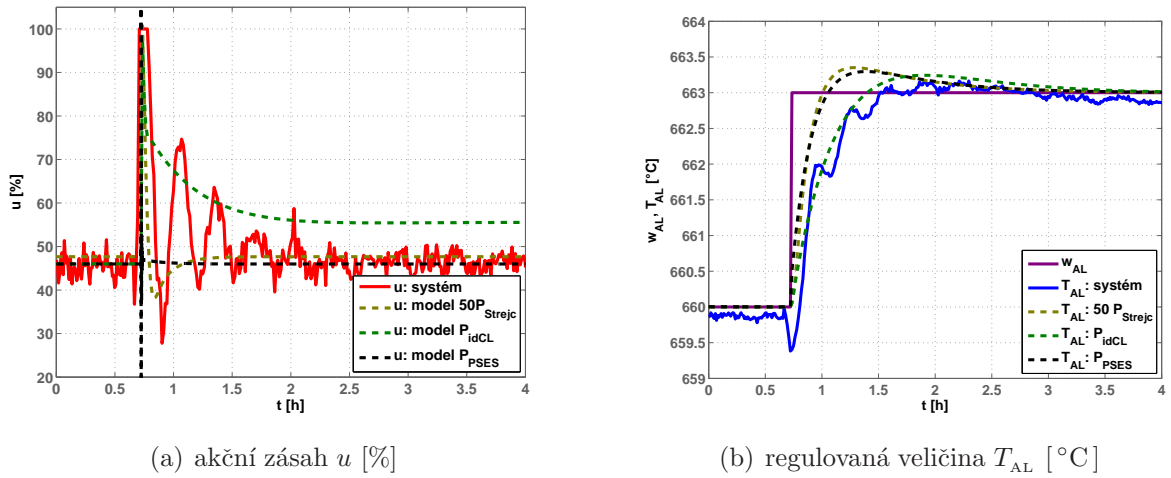
Obrázek 4.8: Data pro identifikaci odeslaná do specializované firmy

Na základě výše uvedených dat, navrhla specializovaná firma přenos udržovací pece mezi veličinou u [%] a veličinou T_{AL} [°C] ve tvaru

$$P_{u \rightarrow T_{AL}}(s) = \frac{0,09461s + 0,004725}{82,15s^3 + 18,13s^2 + s} . \quad (4.2)$$

Přenos byl získán v softwaru Profit Suite Engineering Studio (PSES ID tool ver. R431) metodou specializované laboratoře, která je nad rámec studia na této vyšší odborné škole. Proto zde nebude tato metoda nijak hlouběji popisována.

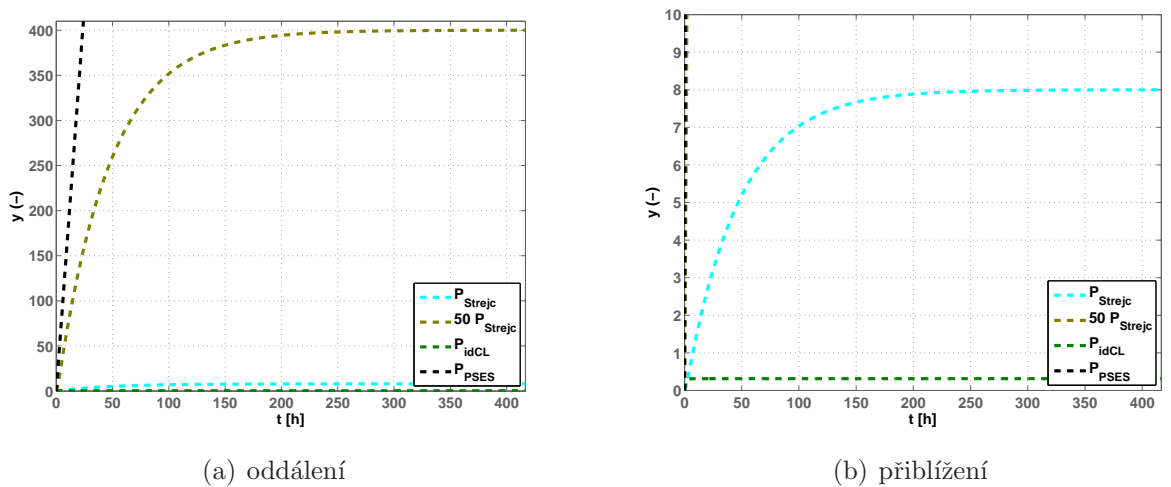
Nalezený přenos (4.2) byl zapracován do modelu udržovací pece na obr. 3.9 a jeho chování bylo ověřeno v regulační smyčce z obr. 4.5. Odezva regulační smyčky s modelem (4.2) je vykreslena pomocí skriptu `PIDcontrol_Models_Compare_print.m` na následujícím obrázku, kde jsou též porovnány všechny doposud nalezené modely (přenosy) udržovací pece.



Obrázek 4.9: Odezva uzavřené regulační smyčky – porovnání nalezených modelů

Z obr. 4.9(b), který znázorňuje průběh regulovaných veličin T_{AL} [°C], je patrné, že se přenos (3.1) násobený číslem 50 chová podobně, jako přenos nalezený specializovanou firmou. Obrázek 4.9(a), který znázorňuje průběh akčních veličin u [%], ale naznačuje, že přenos (3.1) násobený číslem 50 odpovídá více reálným datům než přenos nalezený specializovanou firmou. Nejvíce se ovšem na obr. 4.9 přibližuje reálným datům přenos (4.1).

Z tohoto důvodu byly ještě porovnány přechodové charakteristiky samotných nalezených přenosů. Tyto charakteristiky jsou znázorněny na následujícím obrázku pomocí skriptu `All_TF_Compare.m`.



Obrázek 4.10: Přechodové charakteristiky přenosů udržovací pece

Podle obr. 3.8 odpovídá nejvíce reálným datům, naměřeným v otevřené regulační smyčce, přenos (3.1). Z obr. 4.10 je ale patrné, že přechodové charakteristiky všech zbylých nalezených přenosů jsou od přenosu (3.1) velmi vzdáleny. Toto se bohužel nepodařilo uspokojivě vysvětlit.

Kapitola 5

Porovnání nevýrobních režimů pece

Součástí této kapitoly je provedení simulace uzavřené regulační smyčky s modelem udržovací pece a PID regulátorem řídícím regulovanou veličinu T_{AL} [$^{\circ}\text{C}$]. Vzhledem k tomu, že v předchozí kapitole 4 není s jistotou přesně identifikovaný přenos pece, jsou následující simulace provedeny se dvěma nejpřesnějšími přenosy P_{idCL} (4.1) a P_{PSES} (4.2), viz porovnání v podkapitole 4.2.

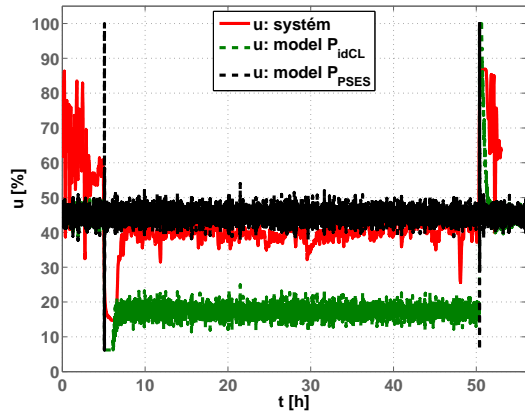
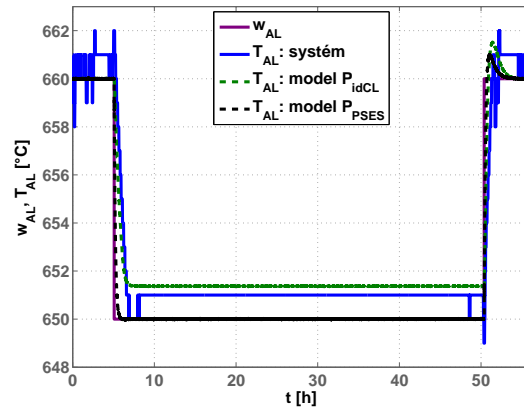
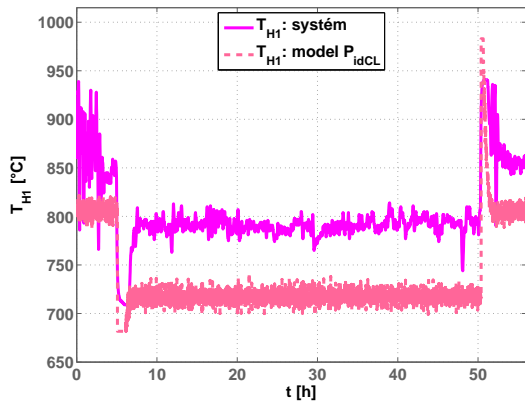
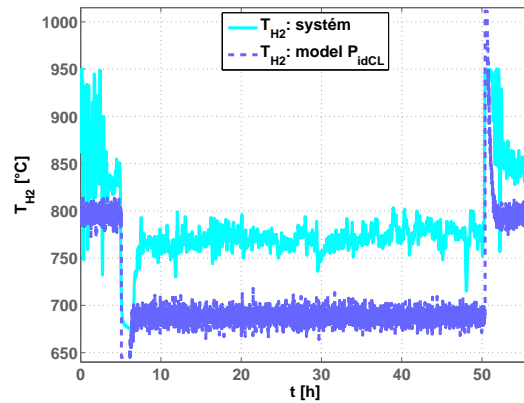
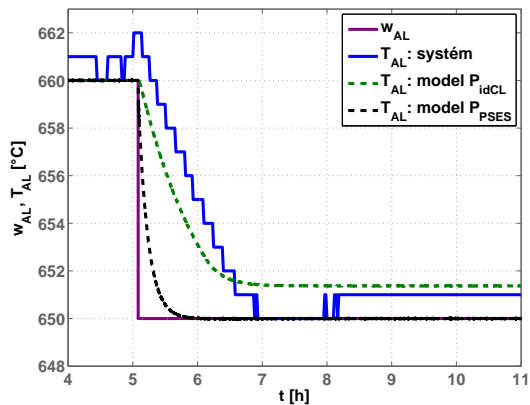
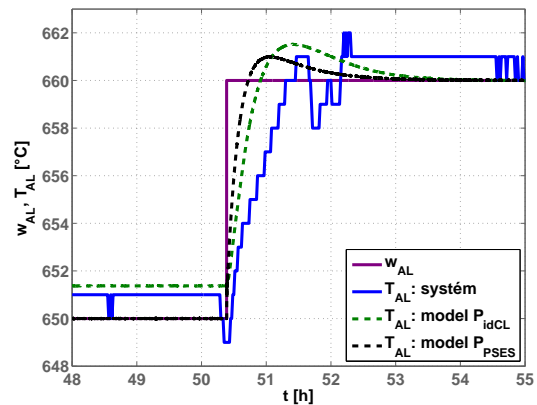
Na vytvořeném modelu je napodoben víkendový provoz udržovací pece ve dvou režimech. V prvním režimu je požadovaná veličina w_{AL} [$^{\circ}\text{C}$] na konci poslední týdenní směny snížena na 650°C a před první výrobní směnou navracena zpět na 660°C . Ve druhém provozním režimu je požadovaná veličina w_{AL} [$^{\circ}\text{C}$] ponechána beze změny, standardně na 660°C tak, jako je to při výrobním provozu během týdne. Z průběhů obou simulací jsou vypočítány spotřeby elektrické energie E [kWh], jejichž výsledky jsou dále porovnávány ve smyslu energetické úspornosti.

Na závěr je v této kapitole řešen problém s negativními skokovými změnami teploty T_{AL} [$^{\circ}\text{C}$], které byly popsány v kapitole 2.3.3. Výsledek řešení je taktéž vyhodnocen ve směru finanční návratnosti tohoto opatření.

5.1 Simulace víkendového nevýrobního režimu

Z názvu této kapitoly je na první pohled zřejmá stěžejní dynamičnost tohoto víkendového nevýrobního režimu pece. Ten je využíván ke snížení energetické náročnosti odporových těles pece, který byl již detailněji popsán v kapitole 2.3.1. Na vytvořené regulační smyčce na obr. 4.5 je nasimulován tento režim se stejným průběhem jako v reálném

nevýrobním provozu, a to vždy s oběma identifikovanými přenosy. Konkrétně je simulace prováděna s přenosy P_{idCL} (4.1) a P_{PSES} (4.2) na základě důvodů popisovaných v kapitole 4.

(a) akční zásah u [%](b) regulovaná veličina T_{AL} [°C](c) teplota T_{H1} [°C](d) teplota T_{H2} [°C](e) detail při snížení w_{AL} [°C](f) detail při zvýšení w_{AL} [°C]

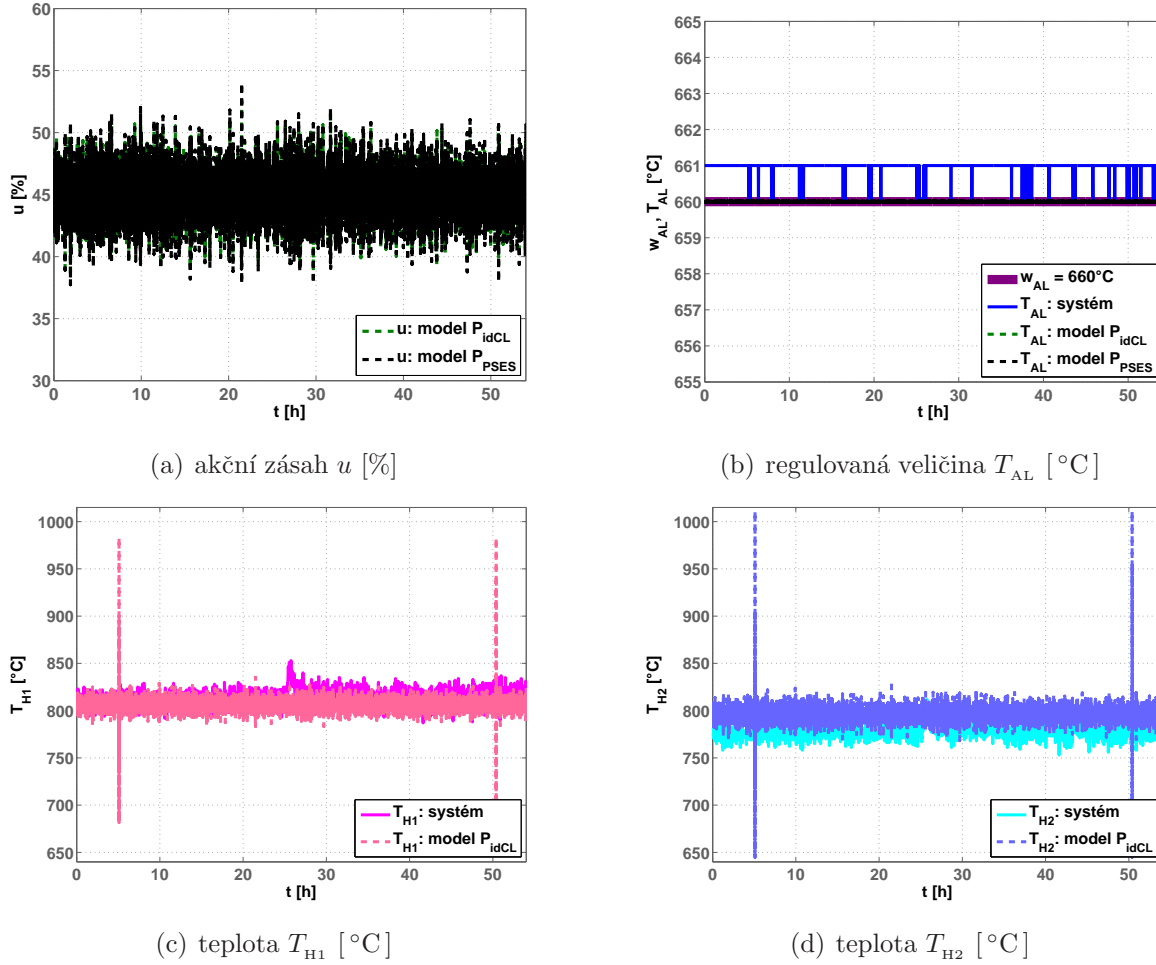
Obrázek 5.1: Simulovaný víkendový režim při snížení w_{AL} na 650 °C

Na obr. 2.9(a) v kapitole 2 lze vidět nekonstantní průběh regulované veličiny T_{AL} [°C] způsobený šumem v obvodu zpětné vazby reálného systému. Zmiňovaný šum byl v programovém prostředí Simulink modelován bločkem `Random Number`, jehož výstup je přičten k výstupu T_{AL} [°C] modelu udržovací pece.

Na obrázku obr. 5.1(b) společně s jeho detaily na obr. 5.1(e) a obr. 5.1(f) lze vidět průběh regulované veličiny T_{AL} [°C] s průběhy nasimulované v modelu. Průběh T_{AL} [°C] modelu s přenosem $P_{PSES}(s)$ nekoresponduje s reakcí na skokovou změnu w_{AL} [°C], oproti průběhu regulované veličiny v modelu s přenosem $P_{idCL}(s)$. To je způsobeno velmi rychlou reakcí akčního zásahu regulátoru, kvůli nesprávně identifikovanému přenosu $P_{PSES}(s)$. Přenos $P_{PSES}(s)$ je proto pro model nevhodný z důvodu nesouladu akčního zásahu s reálným systémem a tím způsobenou velmi rychlou reakcí regulované veličiny $T_{ALP_{PSES}}$ [°C] ve srovnání s reálnou regulovanou veličinou T_{AL} [°C]. Oproti modelu s přenosem $P_{idCL}(s)$, který po snížení požadované veličiny w_{AL} [°C] v časovém intervalu od 7,8 do 10 hodin, viz obr. 5.1(a), utlumí akční zásah $u_{P_{idCL}}$ [%] na dovolené minimum. Tímto snížením akčního zásahu umožní regulované veličině T_{AL} [°C] přenosu $P_{idCL}(s)$ klesnout na požadovanou hodnotu s téměř shodným průběhem jako klesá reálně naměřená T_{AL} [°C] na obr. 5.1(e).

I přes tyto rozdíly se jeví nalezený přenos $P_{idCL}(s)$ při porovnání s reálnými naměřenými daty T_{AL} [°C] jako nejvěrohodnější. Nicméně i přes jeho výše zmiňovanou věrohodnost je výsledný model značně nepřesný, což lze porovnat na obrázcích obr. 5.1(c) a obr. 5.1(d). Na nich je patrný značný rozdíl v teplotách těles T_{H1}, T_{H2} [°C] modelu. Toto je způsobeno velikou nepřesností při měření statických převodních charakteristik u [%] $\rightarrow T_{H1}, T_{H2}$ [°C], což se ukázalo být velkým problémem až při těchto porovnáních. Kvůli zmiňovaným nesrovnalostem jsou výsledné závislosti spotřeby energie na čase porovnávány jen na teoretické úrovni.

Součástí této kapitoly je také namodelován druhý způsob provozu udržovací pece. Ten se od předešlého liší tím, že se požadovaná veličina w_{AL} [°C] ponechává po celou dobu víkendového nevýrobního času na požadované teplotě 660 °C. Průběhy tohoto režimu jsou vykresleny pomocí skriptu `P_sim_print.m`. Chování regulačního obvodu při konstantní hodnotě $w_{AL} = 660$ °C jsou znázorněna na obrázku 5.2. Průběh regulované veličiny T_{AL} [°C], akčního zásahu u [%] a teplot obou těles T_{H1}, T_{H2} [°C] jsou během tohoto provozu konstantní, nebude-li brán v potaz šum v obvodu zpětné vazby regulační smyčky. Tento šum, jak je vidět na obr. 5.2(b), způsobuje onu nepřesnost, kdy se regulovaná veličina T_{AL} [°C] nepřesně zapisuje do zapisovače Eurotherm 5000B s možnou odchylkou o 1 °C. I když teplota lázně je reálně shodná s požadovanou.

Obrázek 5.2: Simulovaný víkendový standardní režim při $w_{AL} = 660$ °C

Analýza spotřeby energie víkendových režimů je provedena výpočtem spotřeby elektrické energie E [Wh] pece a porovnání simulovaného víkendového provozu se snížením požadované hodnoty w_{AL} [°C] na 650 °C společně se standardním víkendovým provozem. Pro tyto výpočty je použit běžný vzorec pro výpočet příkonu ve střídavém obvodu s odporovou zátěží P [W]

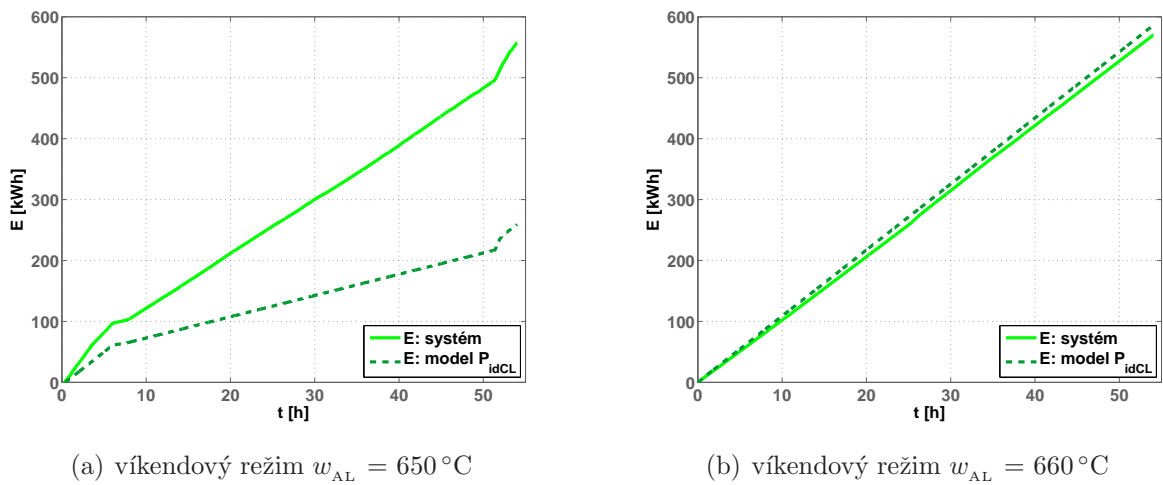
$$P(t) = R_1 \cdot i_{H1}(t)^2 + R_2 \cdot i_{H2}(t)^2, \quad (5.1)$$

kde R_1 a R_2 [Ω] jsou odpory topných těles a i_{H1} , i_{H2} [A] představují proudy procházející odporovými tělesy. Tyto výstupy modelu regulační smyčky `HoldingFurnace_sim.mdl` jsou přepočítány ze statických charakteristik, získaných v kapitole 3.2.1, z důvodu chybějícího záznamu průběhů proudů topných těles a akčního zásahu v zapisovači Eurotherm 5000B. Výstupní hodnoty proudů i_{H1} , i_{H2} [A] modelu jsou pro výpočet násobeny kon-

stantou dle vzorce (5.2) pro převod střední hodnoty AC proudu měřeného klešťovým multimetrem na efektivní hodnotu proudu

$$i_{\text{ef}}(t) = i_s \frac{\pi}{2\sqrt{2}}. \quad (5.2)$$

Následně je integrací vypočtena spotřebovaná energie E [kWh]. Výsledné grafické zobrazení energetické spotřeby vykresluje skript `Consumption.m` pro porovnání energetické spotřeby E [kWh] výše zmiňovaných víkendových nevýrobních režimů.



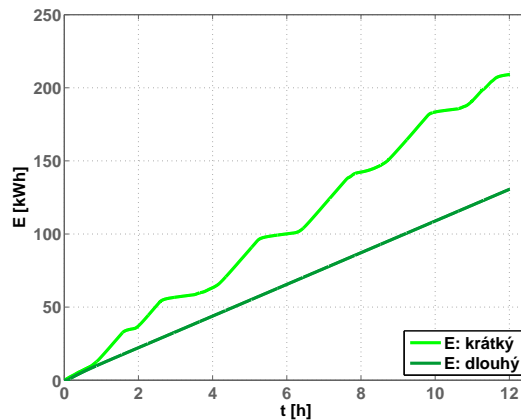
Obrázek 5.3: Závislost spotřebované energie na čase

Na obrázku obr. 5.3 je vykreslen výsledný rozdíl ve spotřebě elektrické energie mezi těmito víkendovými režimy. Mezi provedením víkendového snížení $w_{\text{AL}} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ se spotřebovanou energií E_{idCL} na 259 kWh a standardním víkendovým režimem $w_{\text{AL}} = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ se spotřebou $E_{\text{idCL}} = 570$ kWh simulovaným v modelu. Pro ověření je ke každému výsledku provedeno kontrolní porovnání s daty vypočítanými pomocí statických převodních charakteristik u [%] $\rightarrow T_{\text{H1}}, T_{\text{H2}}$ [$^{\circ}\text{C}$] naměřených v podkapitole 3.2. Značný rozdíl ve spotřebě opět způsobují nesprávně změřené statické převodní charakteristiky. Výsledkem teoretické spotřeby modelu je následná úspora elektrické energie $E_{\text{idCL}} = 256$ kWh.

K získání reálné hodnoty energie spotřebované o standardním víkendovém režimu, byl využit kalibrovaný měřicí přístroj ve vlastnictví společnosti AEMC s.r.o. Skutečná data spotřeby byla změřena pomocí přístroje pro měření spotřeby činné energie FLUKE 1735 Three-Phase Power Logger, která byla následně použita pro reálné srovnání spotřeby pece a modelu. Výsledná reálná spotřeba elektrické energie, je rovna 819 kWh za 54 hodin.

5.2 Analýza úspor chyby termočlánku

Tato kapitola se zabývá energetickou a finanční analýzou úspor vyplývajících z odstranění chybné konstrukce zpětné vazby systému udržovací pece. Tato chybovost měření byla nalezena v získaných historických datech naměřených ze 6. – 7. 1. 2016 a vykreslených na obr. 2.11. Tyto negativní skokové změny popisované v kapitole 2.3.3 jsou odstraněny použitím stejného typu termočlánku s jímkou. Jako návrh protiopatření k této nespolehlivosti měření zpětné vazby zde byla zvolena větší délka termočlánku o 25 cm, aby nikdy nemohlo dojít ke ztátě kontaktu termočlánku a hladiny hliníku. Tím byly zcela tyto negativní skokové změny odstraněny za pořizovací cenu v řádech 100 Kč oproti zbytečné spotřebě elektrické energie. Elektrickou energii systém udržovací pece zbytečně spotřebovával na dosažení požadované teploty w_{AL} [°C] i přesto, že skutečná teplota lázně T_{AL} [°C] na požadované hodnotě reálně byla. Následné porovnání spotřeby energie při původním termočlánku a po jeho výměně je vykresleno pomocí naprogramovaného skriptu `Feedback_Consumption.m` na následujícím obrázku.



Obrázek 5.4: Závislost spotřebované energie na čase při použití různých délek termočlánků pro měření T_{AL}

Na obrázku výše je znázorněn rozdíl ve spotřebě elektrické energie způsobené chybovostí zpětné vazby. Rozdíl spotřeby elektrické energie v tomto případě čítá 80 kWh při 12 hodinách provozu pece oproti termočlánku s modifikovanou délkou.

Kapitola 6

Závěr

Ve vytvořené absolventské práci se podařilo splnit body zadání v tomto rozsahu. Počátečním krokem analýzy regulačního obvodu pro řízení teploty tekutého hliníku v udržovací peci bylo vypracováno seznámení s aplikací systému ve společnosti AEMC, s. r. o. Dále bylo provedeno představení konstrukce udržovací pece, instalovaných odporových topných těles a regulátorů Eurotherm 2204e. Byla popsána jejich stěžejní funkce v regulačním obvodu teploty tekutého hliníku v udržovací peci. Díky provedené analýze elektrických schémat a reálného elektrického zapojení bylo vypracováno blokové schéma regulačního obvodu. Ze zapisovače Eurotherm 5000B byla stažena a analyzována historická data udržovací pece.

V další kapitole byla popsána tvorba modelu udržovací pece tímto způsobem. Nejprve byly definovány vstupy a výstupy systému udržovací pece. Také bylo vytvořeno blokové schéma udržovací pece. Dalším krokem tvorby udržovací pece bylo měření statických vlastností systému s pomocí kalibrovaných digitálních a současně analogových multimetrů. Z těchto dat byly vytvořeny statické převodní charakteristiky mezi jednotlivými veličinami. Navazující identifikace dynamických vlastností udržovací pece se však již neobešla bez problémů. Při prvních pokusech o změření dynamické odezvy bylo největším problémem dosažení počátečního ustáleného stavu regulované veličiny. Problém s ustálením teploty je pravděpodobně způsoben obrovskou setrvačností regulované veličiny systému. Ta je zřejmě způsobena akumulací energie ve formě tepla do tepelně izolační vyzdívky pece.

Tento vliv byl různými pokusy s ochlazováním tekutého kovu urychlován, ale bez zjevných výsledků. Na základě většího počtu pokusů byl vyhodnocen směr vzrůstu teploty formou nahřívání tekutého kovu jako efektivnější. Toto zjištění zásadně ovlivnilo schopnost systému ustálit teplotu hliníku pro počáteční stav měření dynamické odezvy. Ta

byla nakonec na několikátý pokus z části změřena. Poslední měření však nebylo dokončeno z důvodu nedostatku času pro ustálení teploty po skokové změně akčního zásahu. Z tohoto důvodu byla použita metoda identifikace přenosu dle Prof. Ing. Vladimíra Strejce, DrSc tzv. „Strejcovo metodou“.

K ověření nalezeného přenosu byl model ověřen v uzavřené smyčce. K tomu bylo třeba identifikovat PID regulátor, protože v manuálu nebylo nalezeno jeho naprogramování (vnitřní zapojení PID složek). Vytvořený bloček PID regulátoru byl poté implementován v programovém prostředí Simulink k modelu udržovací pece s vytvořením regulační smyčky.

Výsledný modelu s nalezeným přenosem Strejcovo metodou však nebyl shodný s reálným průběhem regulované veličiny. Proto byla kontaktována specializovaná laboratoř zabývající se identifikací a řízením průmyslových systémů s žádostí o pomoc při identifikaci systému. Bohužel přenos nalezený třetí stranou se akčním zásahem nejevil jako vhodný.

Ve vytvořeném modelu byla provedena simulace s cílem zjistit efektivitu spotřeby energie víkendového snižování teploty hliníkové lázně. Toto porovnání nebylo uskutečnitelné, protože v původním zapisovači Eurotherm 5000B nebyl v historických záznamech prováděn záznam akčního zásahu a taktéž ani průběh proudu do topných těles. Tento problém ale nebyl tím stěžejním, který znemožnil správné vytvoření modelu a následné vyhodnocení spotřeby. Hlavním důvodem byla nepřesnost měření statických převodních charakteristik, jenž se ukázala až při výsledném porovnání reálných dat udržovací pece s modelem. Kvůli těmto nepřesnostem nebylo možné následně ani přesně ověřit cíl této absolventské práce.

V této absolventské práci se bohužel nepodařilo zcela splnit zadaný cíl. Ale díky tomu, že zadání bylo dokončeno alespoň v teoretické rovině, může být tato práce použita jako návod k provedení revize energetické efektivity spotřeby regulace velkých tepelných soustav. Po přečtení může být čtenář připraven a obeznámen s možným řešením problémů vzniklých během této tvorby při identifikaci takto velkých tepelných systémů. Díky informacím v této práci čtenář získá reálný pohled na důležitou přesnost a důslednost při měření statických převodních charakteristik během identifikace každé regulované soustavy. Dále byla vytvořena funkce `DataXLSshow`, která zajisté najde využití při vykreslování průběhů v programu MATLAB získaných z většiny průmyslových zapisovačů. Dalším přínosem této tvorby může být kapitola 4, kde je popisována identifikace neznámého PID regulátoru.

Jako budoucí řešení vedoucí k dosažení zadaného cíle v této práci je doporučeno

opětovné ale důslednější přeměření statických převodních charakteristik. Zásadní je zejména vliv akčního zásahu a prokazatelně ustálených teplot odporových těles. Dále pro snazší a přesnější identifikaci přenosu udržovací pece je velice důležité změření celé dynamické odezvy až do ustálení teploty po skoku na vstupu systému. Jako zlepšení vytvořeného modelu udržovací pece navrhuji naprogramování saturace pro dosažení reálné maximální výstupní teploty těles modelu udržovací pece. Nakonec je doporučeno naprogramování tzv. „bezztrátové“ tyristorové regulace výkonu na výstupy proudů těles modelu, pro získání co nejpřesnější spotřeby elektrické energie systému udržovací pece na tekutý hliník.

Literatura

- EUROTHERM (2004), *2208e 2204e Temperature Controllers – Instalation and operation handbook*, 3.1 edn. [cit. 2017-25-04], <http://www.eurotherm.com/>.
- FENCLOVÁ, M.; PECH, Z.; SUKOVÁ, M. (1993), *Teorie automatického řízení — návody ke cvičením*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01039-2.
- HRAZDÍLEK, Z.; LÁZNIČKOVÁ, I.; KRÁL, V. (2011), *Elektrotepelná technika*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-04938-9.
- OUŘEDNÍČEK, A. (2013), Optimalizace tepelného zpracování hliníkových slitin, (Bakalářská práce), UTB-FT ve Zlíně, Zlín.
- ROUBAL, J. (2012), Výukové materiály pro Laboratoř aplikované informatiky na VOŠ, (Bakalářská práce), ČVUT v Praze, MUVS, Praha.
- ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. (2011), *Regulační technika v příkladech*, Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-260-2.
- ROUČKA, J. (2004), *Metalurgie neželezných slitin*, Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-2142-790-7.
- SCHENK, C. (2009), MiKTeX [online]. [cit. 2009-06-16], <http://www.miktex.org/>.
- THE MATHWORKS (1994), The Mathworks [online]. [cit. 2016-09-19], <http://www.mathworks.com/>.

Příloha A

Obsah přiloženého DVD

K této práci je přiloženo DVD s následující adresářovou strukturou.

- Absolventská práce v \LaTeX 2e
- Manuály k zařízení Eurotherm
- Matlab/Simulink: zdrojové kódy pro vykreslení grafů a Simulinkové modely jsou umístěny v příslušných podkapitolách ve složce Absolventská práce v \LaTeX 2e
- Deník tvorby absolventské práce
- Brynych_AP_2016_2017.pdf

Příloha B

Použitý software

Eurotherm iTools 9.67 (Build 9.67.12.30094) [⟨http://www.eurotherm.com/⟩](http://www.eurotherm.com/)

Eurotherm Review 3.7.4 Lite [⟨http://www.eurotherm.com/⟩](http://www.eurotherm.com/)

Inkscape 0.92.1 r15371 [⟨http://www.inkscape.org/en/⟩](http://www.inkscape.org/en/)

ℒ_TE_X 2_ε [⟨http://www.miktex.org/⟩](http://www.miktex.org/)

MATLAB/Simulink R2010b [⟨http://www.mathworks.com⟩](http://www.mathworks.com)

Microsoft Office 2010 [⟨https://www.office.com/⟩](https://www.office.com/)

WinEdt 5.3 [⟨http://www.winedt.com/⟩](http://www.winedt.com/)

Software z výše uvedeného seznamu je buď volně dostupný, vlastníkem licence je toho času společnost AEMC, s. r. o., nebo jeho licenci toho času vlastní Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, Budějovická 421, kde autor téhož času studoval a vytvořil tuto absolventskou práci.

Příloha C

Časový plán absolventské práce

Činnost	Časová náročnost	Termín ukončení	Splněno
Analýza reálného systému regulace teploty hliníku	2 týdny	10.04.2016	24.04.2016
Seznámení se s ovládáním digitálního zapisovače teplot EUROTHERM RB5000	2 týdny	24.04.2016	08.05.2016
Identifikace reálného systému regulace	2 měsíce	01.05.2016	09.03.2017
Tvorba modelu ve vývojovém prostředí	1 měsíc	01.07.2016	04.10.2016
Ověření modelu s reálným systémem	1 měsíc	01.08.2016	16.04.2017
Návrh energetických úspor a provedení simulací	1 měsíc	01.09.2016	18.04.2017
Finanční analýzy návratnosti investic do úspor	3 týdny	01.10.2016	20.04.2017
AP: kapitola Úvod	2 týdny	22.10.2016	30.4.2017
AP: kompletní text	10 týdnů	24.10.2016	05.05.2017