

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Automatické řízení indukční sintrace materiálů při výrobě elektronik

Tomáš Rouček

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek
Obor: Systémy a řízení
Květen 2017

Poděkování

Děkuji panu Ing. Jiřímu Zemánkovi za to, že byl vedoucím této práce a firmě TESLA Electrontubes že mi umožnila práci ve výrobních prostorách.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 23. května 2017

Abstrakt

V této práci se věnuji návrhu celého řídicího systému pro sintrační pec ve firmě TESLA Elecetrontubes, která je využívána k výrobě součástí elektronek. Sintuje se molybdenový drát pokrytý ZirkonCarbidem při extrémních teplotách až do 1700C a při vysokém vakuu až do jednotek mPa. Tyto extrémní podmínky umožňují vytvrzení ZrC na povrchu mřížek do triod a tetrod, což dále v procesu výroby umožní efektivnější nanášení platiny.

V průběhu práce byl nejprve postaven obvod pro zesílení výstupního řídicího napětí a poté sestaven matematický model. Finální řídicí systém je porovnán s manuálním řízením a jsou vypsány hlavní výhody automatického systému.

Klíčová slova: sintrace, řízení, indukční ohřev, vakuum

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek
Katedra řídicí techniky FEL

Abstract

This work is about automatic system control for sintering oven in company TESLA Electrontubes which is used in process of making parts for electron tubes. Sintering is being done on ZirconCarbid covered molybdenum wire in extreme heat up to 1700C and high vacuum up to singular mPa. Extreme conditions like these allow densification of ZrC on the surface of grids which are used in triods and tetrod tubes. Whole process is done so application of platinum onto grids is possible.

In the making of this work I designed an amplification circuit to increase the gain of control voltage along with a mathematical model. The designed control system was compared to results of manually controlled procedures and it's benefits are shown

Keywords: sintering, controll, induction heating, vacuum

Title translation: Automatic Control for Induction Sintering of Materials for Vacuum Tubes

Obsah

1 Úvod	1	Závěr	
		6.3 Eliminace nutnosti osobního dohledu na systém	45
		6.4 Zvýšení průchodnosti výroby . . .	45
		6.5 Snížení zmetkovitosti polotovarů	45
		6.6 Snížení energetické náročnosti . .	45
		6.7 Implementace	45
		Přílohy	
		Kód řídicí metody	
		A Rejstřík	59
		B Literatura	61
		C Zadání práce	63
	Část I		
	Teoretická		
Řídicí Hardware	5		
Sintrace	5		
2 Systémy ohřevu	7		
2.1 Pece	7		
2.2 Matematický model	7		
3 Systém tlaku	9		
3.1 Obecně pumpy	9		
3.2 Matematicky	11		
	Část II		
	Praktická		
TESLA Electrontubes	15		
Motivace a vysvětlení problematiky	15		
Sintrace	16		
Tlak	16		
4 Popis Zařízení	17		
4.1 Generátor	18		
4.2 Pec a pumpy	19		
4.3 Měřicí sestava	19		
4.4 Řídicí počítač	20		
4.5 Hardware	20		
4.6 Software	21		
	Část III		
	Modelační		
5 Generátor a teplo	27		
5.1 Teorie	27		
5.2 Model	27		
5.3 Výpočet hodnot	28		
6 Tlak	31		
6.1 Rychlost pumpování	31		
6.2 Skoková odezva	31		
	Část IV		
	Řízení		
Teorie	37		
Praxe	39		
Porovnání s manuálním řízením	41		
	Část V		

Obrázky

5.1 Hodnoty ustálení teploty pro různé výkony	28
5.2 Poměr vstup výstup pro danou teplotu	29
5.3 Porovnání hodnot výkonu s teplotou reálného a simulovaného systému	29
5.4 Modelový vs reálný systém	30
6.1 Odezvy tlaků na stejný vstup ..	32
6.2 Průběh vlhkosti ovzduší nedaleké meteostanice v jeden den měření ..	33
6.3 Rychlost změny teploty v závislosti na tlaku	33
6.4 Rychlost teploty při udržování stejného tlaku	34
6.5 Řízený systém manuálně 1	46
6.6 Řízený systém manuálně 2	46
6.7 Řízený systém počítačem 1	46
8 Sintrační stanoviště	49
9 Přední panel generátoru	50
10 Difuzní pumpa	50
11 Zvon v cívice při provozu	51
12 Řídící počítač a senzorová krabice	51
13 Peniny a počítač	52
14 Oba peniny	52

Tabulky

3.1 Faktor stlačitelnosti pro vzduch [ENG]	11
4.1 Vstupy a výstupy generátoru ...	18
4.2 COM37	20
6.1 Tabulka znázorňující konstantu nR/V pro různé průběhy	32
6.2 Rychlost procesu pro různé regulátory	40
6.3 Rychlost procesu pro různé regulátory	40



Kapitola 1

Úvod

Cílem bakalářské práce je tvorba řídicího systému generátoru zařízení pro sintrování mřížek výkonových elektronek. Motivací této práce bylo urychlit výrobu a zlepšit kvalitu vyráběných elektronek. Hlavním problémem procesu je dosažení dostatečně vysoké teploty za dostatečně vysokého vakuu. Cílem bylo implementovat zařízení do již fungujícího jednodeskového počítače. Byla nutná úprava elektroniky a programu stávajícího zařízení. Kód je napsán v Pearl a část v jazyce C. Práce popisuje celkový technologický proces a problémy, které je třeba řešit. Dále se věnuje modelaci systému, kde se uvažují podobné počáteční podmínky pro zapnutí systému a řízení které je předvedeno pomocí několika systémů. V poslední části se práce zabývá reálnou implementací systému ve firmě, výsledky a případnou možností rozšíření. Přiložen je manuál pro operátora systému. Ostatní cíle:

- Eliminace nutnosti osobního dohledu na systém
- Zvýšení průchodnosti výroby
- Snížení zmetkovitosti polotovarů
- Snížení energetické náročnosti



Část I

Teoretická

■ Řídící Hardware

Analogové řízení přímo vytváří systémy bez počítače. Tyto systémy bývají velice rychlé, proto jsou používány ve vysokofrekvenčních aplikacích a v místech kde je potřeba kontinuita měření. Bývají náročné na navržení ale nevyžadují výpočetní techniku, která může být citlivá na okolní vjemy. [DIS]

Digitální řízení nabízí pro změnu větší možnosti, co se týče druhů regulátorů. Je zde například možno provádět složitější výpočty nebo stavové automaty velice jednoduše. Je ovšem nutná znalost programovacího jazyka a přístup k počítači. Přístupy systémů k počítači bývají děleny na dvě části - centrální a distribuované. Distribuovaná síť počítačů má výhody v jednoduchosti propojení většího množství zařízení na různých místech, ale zařízení musí být schopna komunikovat po sběrnici, což je činí nákladnějšími. Centralizované systémy pro změnu vyžadují více procesorových jednotek, což umožňuje využití "hloupých" senzorů. Tyto senzory většinou komunikují se sběrným PC pomocí analogových signálů a to buď pomocí proudové smyčky nebo napěťového rozdílu.

Napěťový rozdíl je zaznamenán vůči zemi. Je silně náchylný na rušení a již se tolik nevyužívá. Proudová smyčka je druhá možnost, která využívá proud k posílání informací. Je víceméně odolná proti rušení. Oba systémy mohou být buď analogové, kde daná hodnota napětí/proudu udává hladinu a nebo digitální, kde hladiny představují 1 nebo 0.

■ Sintrace

Sintrace je proces výroby pevných kusů materiálů bez nutnosti jejich roztavení. Využívá se převážně pro materiály s vysokým bodem tání, například wolfram, keramika nebo molybden. Probíhá za vysokých teplot ve specializovaných pecích. Jde o spojování částic materiálového prášku za účelem zhutnění materiálu.[POW]

Využívá se také ke zpevňování materiálů a nanášení povrchů. Tento proces začíná nanesením požadovaného materiálu, například zirkon karbidu (ZrC) na výrobek pomocí elektrolýzy, což má za následek jen lehké přichycení částic. Tento polotovar je následně vystaven extrémním podmínkám sintrace a nanesený povrch se tím vytvrdí. Takto ošetřený povrch více vydrží. [MOL]

Kapitola 2

Systémy ohřevu

2.1 Pece

Druhů pecí pro sintraci je velké množství. Hlavním rozdělením sintračních pecí je systém provedení pece a způsob ohřevu materiálu. Sintrační pece jsou převážně dvou typů: průběhové a vakuové. [POW]

Průběhové pece jsou postaveny pro pásovou výrobu menších kovových součástí pomocí práškové metalurgie. Využívají ohřev buď spalováním plynů nebo odporové elektrické ohříváče. Výhodou těchto pecí je jejich velká kapacita a neustálý běh. Nevýhodou je nutnost postavení linky, jejich nákladnost a nemožnost udržet jakékoli vakuum uvnitř systému.

Vakuové pece jsou postaveny jako nádoba uzavíratelná z jedné strany za účelem udržení vakua. Ohřívány jsou buď pomocí odporových drátů pro nižší teploty a nemagnetické materiály a nebo pomocí elektromagnetické indukce. Tyto pece jsou připojeny na jednu nebo více vakuových pump. Pro výměnu sintrovaného výrobku je nutno pec otevřít, čímž se ztrácí většina vakua a je potřeba pec před použitím znovu vyčerpát.

2.2 Matematický model

Změna tepla (energie) materiálu je určena vztahem

$$\Delta Q = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.1)$$

[THER]

kde Q_{in} je energie vydaná generátorem a Q_{out} je energie vyzářená do okolí. Ztráta tepla může probíhat pomocí 3 principů: vedením, prouděním a sáláním. Energii vysálanou do okolí můžeme vyjádřit pomocí Stefan-Boltzmanovy [BLTZ] rovnice:

$$P_w = \varepsilon \sigma A(T^4 - T_o^4) = Q_{out} \quad (2.2)$$

kde $P_w(W)$ je množství vyzářeného tepla, $A(m^2)$ je velikost povrchu ze kterého se vyzařuje, $T(^{\circ}K)$ je teplota tělesa, $T_o(^{\circ}K)$ je teplota okolí, ε je emisivita tělesa a $\sigma = 5.670310^{-8}(W/m^2K^4)$ je Boltzmanova konstanta. [BLTZ]

Dále uvažujeme, že když $\Delta Q = 0$ tak přestává probíhat změna tepla, což značí ustálení teploty na určité hodnotě.

$$\frac{Q_{in}}{\varepsilon\sigma A} = T^4 - T_o^4 \quad (2.3)$$

Což můžeme upravit na

$$\sqrt[4]{\frac{Q_{in}}{\varepsilon\sigma A} + T_o^4} = T \quad (2.4)$$

Tato rovnice nám udává teplotu, na které se ustálí systém, který se vyznačuje tím, že jeho ztráta tepla vedením a prouděním je zanedbatelná. Například vakuově uzavřené těleso.

Po zderivování dostáváme

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\frac{\partial Q_{in}}{\partial t}}{4\varepsilon\sigma A \left(\frac{Q_{in}}{\varepsilon\sigma A} + T_o^4\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (2.5)$$

Z rovnice je vidět, že změna maximální teploty systému je přímo úměrná změně dodaného tepla a přímo úměrná celkovému dodanému teplu.

Kapitola 3

Systém tlaku

3.1 Obecně pumpy

Vakuových pump existuje velké množství. Uvedu zde většinu typů, jejich základní princip, a operační rozsah vakua. [VST]

- Rotační olejová pumpa
 - 1kPa - 1 Pa
 - Odsouvání plynu z komory pomocí pístu
 - Pouze lehké vakuum, nebezpečí kontaminace systému olejem
- Sorpční pumpa
 - 1kPa - 1 Pa
 - Pohlcování plynů chlazenou částí
 - Pouze lehké vakuum. Větší rozměry.
- Rootsovo dmychadlo
 - Odsun plynu pomocí proti sobě rotujících lopatek
 - 100 Pa - 100mPa
- Turbo-molekulární pumpa
 - Odsun plynů pomocí vysokorychlostní turbíny.
 - 10 Pa-10 microPa
- Difuzní pumpa
 - Odsun plynů pomocí vysokorychlostního proudu oleje
 - – 10 Pa-1 microPa
- Getterova pumpa

- Absorbce plynů do titanu
 - 10 Pa-1 microPa
- Iontová pumpa
 - Kovový materiál ostřelovaný ionty
 - – 10 Pa-1 microPa
- Kryogenická pumpa
 - Pohlcování plynů a kondenzace na studeném povrchu
 - – 10 Pa-1 microPa

Rychlosti pumpování všech pump jsou proměnné a silně závislé na dané technologii pumpy.

Pro rychlost pumpování vakua využijeme pump-down rovnici:

$$t = \frac{V}{q} \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right) \quad (3.1)$$

[VAC]

kde $t(s)$ je čas, $V(m^3)$ je obsah, $q(m^3/s)$ je rychlost čerpání pumpy, p_0 je počáteční tlak a p_1 je konečný tlak. Po upravení rovnice (6) dostáváme:

$$q = \frac{V}{t} \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right)$$

Pomocí této rovnice jsme schopni změřit rychlost čerpání q pro určité hodnoty tlaku p_0 p_1 a poté jsme schopni použít upravenou verzi rovnice (6) k získání rychlosti poklesu tlaku.

$$p_1 = p_0 e^{-\frac{qt}{V}} \quad (3.2)$$

z této rovnice vidíme, že p_1 je funkcí času a počátečního tlaku a jsme tedy schopni spočítat tlak který bude v systému po zvoleném čase. Druhá možnost měření rychlosti pumpování je využití rovnice:

$$q_{pv} = qp_0 \quad (3.3)$$

[VAC]

kde $q_{pv}(Pa m^3/s)$ je rychlost vyčerpání jednoho pascalu na objem za čas a p_{min} je minimální tlak na který je pumpa schopna se dostat. Dále využijeme rovnice popisující derivaci látkového množství.

$$\frac{\partial n}{\partial t} RT = qp_0 = q_{pv} \quad (3.4)$$

[VST] kde $T(K)$ je absolutní teplota, $R(J/kg * K)$ je plynová konstanta pro vzduch a $n(mol)$ je látkové množství. Rovnici můžeme přepsat jako

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{q_{pv}}{RT} \quad (3.5)$$

Teplota ($^{\circ}\text{K}$)	100kPa	500kPa
100	0.980	0.887
200	0.998	0.989
500	1.000	1.001
600	1.000	1.002
800	1.000	1.002
1000	1.000	1.002

Tabulka 3.1: Faktor stlačitelnosti pro vzduch [ENG]

3.2 Matematicky

Poměr tlaku a teploty plynu popisuje rovnice ideálního plynu.

$$PV = ZnRT \quad (3.6)$$

[ENG] kde $P(\text{Pa})$ je absolutní tlak, $V(\text{m}^3)$ je objem, $T(^{\circ}\text{K})$ je absolutní teplota, $R = 286.9 (\text{J}/\text{kg} * \text{K})$ je plynová konstanta pro vzduch a $n(\text{mol})$ je látkové množství. Z je faktor stlačitelnosti daného plynu, což je hodnota pro daný plyn při určitém tlaku a teplotě.

Tato hodnota ukazuje, jak moc se daný plyn chová stejně jako ideální. Pokud by se hodnota lišila od 1 více než o pár procent, je nutno využít Van der Waallsovy rovnice. Tato hodnota je závislá na teplotě a tlaku plynu který měříme a nejvíce konverguje k 1 v případě vysoké teploty a nízkého tlaku.

V těchto případech je možno psát

$$PV = nRT \quad (3.7)$$

což je rovnice ideálního plynu Dále můžeme rovnici (3.7) upravit na:

$$P = \frac{R}{V}nT \quad (3.8)$$

Odkud dostáváme přímý vztah tlaku s ostatním vstupy. Zderivujeme rovnici (3.7) podle času a dostáváme

$$\frac{\partial P}{\partial t}V + \frac{\partial V}{\partial t}P = nR\frac{\partial T}{\partial t} + TR\frac{\partial n}{\partial t} \quad (3.9)$$

Za předpokladu že je objem konstantní můžeme napsat:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{nR}{V}\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{TR}{V}\frac{\partial n}{\partial t} = nK_2\frac{\partial T}{\partial t} + TK_2\frac{\partial n}{\partial t} \quad (3.10)$$

$\frac{R}{V}$ je konstantní a proto můžeme toto vyjádřit konstantu $\frac{R}{V} = K_2$

Tato rovnice ukazuje změnu tlaku závislou na změně teploty a změně molárního množství.

Pokud dosadíme rovnici (3.5), můžeme psát

$$\frac{\partial P}{\partial t} = nK_2\frac{\partial T}{\partial t} + TK_2\frac{q_{pv}}{RT} \quad (3.11)$$

díky rovnici (3.7) můžeme napsat:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{P}{T} K_1^{-1} \quad (3.12)$$

Nejrychlejší možné přidávání teploty bez zvednutí tlaku nastane, pokud $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$, což po dosazení do rovnice (3.11) spolu s rovnicí (3.12) můžeme napsat:

$$\frac{PV}{RT} K_2 \frac{\partial T}{\partial t} = T K_2 \frac{q_{pv}}{RT} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = T \frac{q_{pv}}{V p_0} \quad (3.14)$$

Což nám ukazuje maximální změnu teploty za čas vztahenou k rychlosti pumpování. Využijeme-li k tomuto rovnici (2.5), dostáváme

$$T \frac{q_{pv}}{V p_0} = \frac{\frac{\partial Q_{in}}{\partial t}}{4 \varepsilon \sigma A \left(\frac{Q_{in}}{\varepsilon \sigma A} + T_0^4 \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (3.15)$$



Část II

Praktická

■ TESLA Electrontubes

"Společnost TESLA Electrontubes s.r.o. je ryze česká společnost s dlouholetou tradicí výroby a výzkumu aktivních vakuových prvků, zejména elektronek pro použití jak v průmyslu, tak ve vysílací technice. Historie vakuové výroby sahá do roku 1922 a původně byla i známá pod názvem TESLA Vršovice. Nabídka v současnosti obsahuje následující produktové skupiny: spínače, vysílací a průmyslové elektrony, tyratrony, klystrony, jiskřiště, kondenzátory, vakuové průchodky. Kromě udržování výroby původních, stále používaných typů, se společnost zabývá výzkumem a vývojem nových produktů. Například vývoj řady triod o výkonech od 9kW do 17kW pro využití ve VF generátorech při sváření PVC materiálů a procesech sušení. Dále společnost vyrábí a dodává vysílací zařízení pro šíření radiového signálu." [TESLA] Firma se orientuje výhradně na výrobu průmyslových elektronek na bázi keramika - kov, určených pro generátory CO2 laserů a elektrony pro VF generátory určené pro textilní, potravinářský, dřevařský průmysl a indukční kalení. [TESLA]

■ Motivace a vysvětlení problematiky

Výkonové elektrony, které vyrábí firma TESLA Electrontubes s.r.o. obsahují několik kritických součástí, které je nutné vyrobít před sestavením celého výrobku. Polotovary jsou používány ve výkonových triodách a tetradách. Jedná se o katodu, anodu a mřížky. Proces, který budeme řídit, probíhá při výrobě mřížek. Jedná se o sintraci povrchu molybdenového drátu mřížky ZrC (zirkon-karbid). [MOL] Hlavním problémem je nezbytnost soustavného dohledu nad zařízením z důvodu dosahování vysokého vakua při všech teplotách systému. V případě nedodržení dostatečného vakua dochází k oxidaci povrchu i materiálu dílů. [POK]

Vhodným materiálem pro mřížky je molybden, který má nízkou teplotní roztažnost, dobrou vodivost a vysoký bod tání. Dále se používá pyrografit a pro katody zásadně wolfram. Tyto dva materiály ovšem velice ztěžují výrobu. [MATT][PYR] Například pro pyrografit se musí vyřezávat mřížka pomocí laseru do již připraveného polotovaru. Pro držáky v oblastech nižších teplot systému se využívá nikl který se dobře zpracovává a je levnější.

Sintrace umožňuje vytvořit kompaktní vrstvu ZrC která je nanášena na molybdenovém drátu a upravit plochu pro následný povrch platinou. [POK]

Celá soustava sintračního zařízení je ručně ovládána operátorem. Celý proces včetně sintrace trvá 2,5-3,5 hodiny. Doba procesu se skládá ze 4 fází:

1. Čerpání - 30 min
2. Ohřev - 60-120 min
3. Udržení finální teploty - 15 min
4. Chladnutí 90 min

Přímý dohled je nutný mezi fázemi a při fázích 1-3.

■ Sintrace

Sintrace mřížek je prováděna za účelem vytvrzení vrstvy ZrC, která je na molybdenový drát nanášena elektrolyticky. Po elektrolýze je vrstva nestabilní a není odolná proti mechanickému otěru. Z tohoto důvodu na ní nelze nanášet další nutné vrstvy platiny. Proces sintrace způsobí vytvrzení částic karbidu za pomoci vysoké teploty a vakua.

U sintrace je nejvhodnější vysokofrekvenční ohřev pro nejrychlejší dosažení požadované teploty.

I přestože různé typy sintrace používají speciální postupy zahřívání, v našem případě nehraje tento faktor roli. Je to z důvodu, že většina poznatků k sintraci se týká práškové sintrace, kde je například zahřívání ve dvou větších krocích nutné z důvodů jiného spojovacího materiálu, který musí odhořet. [POK]

■ Tlak

Nízký tlak v systému je nutné udržovat ze dvou důvodů. Hlavním z nich je oxidace materiálů uvnitř sintrační pece. ZrC oxiduje již při 600° při normálním atmosférickém tlaku, což by zničilo pokryv. [ZrC] Druhou součástí je usazování jiných materiálů na ohříváném polotovaru. Tyto materiály se uvolňují z jiných částí systému při vysokých teplotách a mohou se napařit na výrobek.

Mezní hranicí pro reakci ZrC při vysokých teplotách je 5 mPa z důvodu reakce na povrchu pokryvu s částicemi. [ZrC]

Dalším důvodem je, že nízký tlak pomůže ZrC se lépe zesintrovat a vytvořit celistvou strukturu. Bez vakua se ZrC normálně sintruje na teplotu kolem 1850°C.

Kapitola 4

Popis Zařízení

Systém se skládá ze 4 hlavních částí:

- Generátor
- Pec a pumpy
- Měřicí část
- Počítač

Generátor ohřívá systém na požadované teploty. Pumpy vytváří nutné vakuum uvnitř pece a měřicí část umožňuje operátorovi systém řídit a předává data do počítače. Počítač data zaznamenává a odesílá pomocí příkazů SQL na centrální úložiště pro archivaci a případnou kontrolu. Data jsou přístupná pomocí webového rozhraní. Základní postup při manuálním řízení procesů sintrace [PROC]:

1. V rukavicích umístit mřížku na pomocný trn a přikrýt pyrografitovým kalichem.
2. Umístit vsázku do prostředku cívky a opatrně nasunout křemíkový zvon.
3. Ujistit se, že zvon dobře sedí na těsnění.
4. Zapnout přítok vody.
5. Zapnout generátor zezadu otočným vypínačem. Rozsvítí se displej.
6. Zapnout obě zařízení Penning tlačítkem “Mains” .
7. Zapnout rotační vakuovou pumpu otočným tlačítkem a měřicí aparaturu přepínačem.
8. Zkontrolovat zda vakuové ventily jsou v poloze “čerpání”.
9. Na spodním Penningu sledovat tlak a až bude pod 10 Pa zapnout difuzní pumpu.
10. Na měřicím počítači zkontrolovat připojení k síti. Kliknout na “Network” a dále na “Ping”. Pokud počítač není k síti připojen kliknout v menu “Network” na možnost Wi-Fi nebo Lan podle připojení.

Konektor	Port	Vlastnost
CAN19	3	ovládání ohřev zap/vyp
CAN19	5	indikace zap generátor
CAN19	12	Indikace zap ohřev
CAN19	14,10,7	referenční zem
DIN	1	Řídící analogový signál
DIN	2	Referenční zem
DIN	G	Stínění
DIN	3	ovládání ohřev zap/vyp

Tabulka 4.1: Vstupy a výstupy generátoru

11. Na měřícím počítači zvolit tlačítko “Měření”
12. Pomocí klávesnice zadat výrobní číslo elektronky a potvrdit.
13. Obsluha sleduje horní Penning a pokud je na jeho ručičkovém displeji zobrazen tlak alespoň pod 2mPa přidá pomocí otočného knoflíku na předním panelu generátoru výkon o cca 5%. Proces probíhá cca 1,5 hodiny, zvýšení výkonu je provedeno 10-15x.
14. Po dosažení teploty 1600°C je nutno 20 minut počkat a udržet tuto teplotu.
15. Vypnout generátor červeným tlačítkem na předním panelu. Pumpy a voda MUSÍ zůstat v provozu.
16. Pro ukončení měření kliknout na displej počítače a měření se zastaví.
17. Po ukončení měření vypnout počítač a měřící aparaturu.
18. Po vychladnutí přepnout vakuové ventily do polohy “Zavřeno”.
19. Napustit systém napouštěcím vypínačem.
20. Sundat křemíkový zvon a vyndat v rukavicích vsázku.

4.1 Generátor

Jedná se o polovodičový generátor pro indukční ohřev HFR15 od firmy Rajmont s maximálním výkonem 15kW. Generátor má několik analogových vstupů pro ovládání případně signalizaci [GEN]:

Ostatní porty jsou buď přivedeny na zem a nebo mají +24VDC. Ovládání vypnutí/zapnutí ohřevu je využito k ukončení procesu pomocí počítače. Indikace zapnutého generátoru není využita, předpokládá se, že měřící zařízení se zapne až po samotném generátoru. Generátor se za normálního provozu nevypíná. Všechny tyto signály jsou binární hodnoty 0-24V. Druhý konektor DIN Je používán čistě pro řízení výkonu generátoru. Využívá se hodnoty 0-10V která odpovídá 0-100% výkonu generátoru s jediným omezením, že

minimální výkon generátoru při zapnutém ohřevu je 14%. Přepnutí z manuálního ovládání na externí (pomocí počítače) probíhá pomocí fyzického přepínače na čelním panelu generátoru. Tento přepínač funguje také jako bezpečnostní pojistka pro chybu v ovládacím systému a povoluje převzít kontrolu nad zahřívacím procesem.

4.2 Pec a pumpy

Hlavní součástí celé pece je vodou chlazená indukční cívka do které je vložen speciální křemíkový zvon. Uvnitř zvonu je takzvaná vsázka, která se skládá ze dvou částí - pyrografitového kalichu a sintrované mřížky, která je vložena do kalichu. Při běžícím procesu se pyrografitový kalich indukčně zahřívá a sálá teplo na sintrovanou mřížku.

Vakuum je uvnitř křemíkového zvonu udržováno pomocí dvou druhů vakuových pump. První pumpa je rotační, která je schopna dosáhnout jemného vakua (řádově jednotky Pa). Druhá je olejová difuzní pumpa, která je schopna dosáhnout vakua až jednotky mPa za použití vody na chlazení. Pokud se ale použije tekutý dusík, je schopna dosáhnout hodnot až o 2 řády nižší.

Difuzní pumpa nefunguje, pokud je v systému již moc vysoký tlak, tudíž je nutné při startu systému nejprve zapnout rotační pumpu a teprve při dostatečně nízkém tlaku zapnout difuzní. Také difuzní pumpa je výrazně pomalejší nežli rotační. Systém je opatřen napouštěcím tlačítkem pro vrácení systému na atmosférický tlak, aby šlo jednoduše sundat křemíkový zvon.

Jeden uzavíratelný spoj je mezi difuzní pumpou a křemíkovým zvonom umožňující udržení vakua uvnitř difuzní pumpy i při sundání křemíkového zvonu. Druhý přepojovatelný spoj je mezi rotační pumpou difuzní pumpou a křemíkovým zvonom. Tento spoj umožňuje vrácení vakua v křemíkovém zvonu do atmosférického a následně vrácení alespoň částečně silného vakua do zvonu pomocí rotační pumpy. Toto umožňuje rychlejší dosažení požadovaného vakua při vyndávání poslední vsázky a při nandávání nové.

4.3 Měřicí sestava

Pro měření teploty je využíván laserový teploměr. Výstupem teploměru je rozdíl napětí. Teploměr od firmy Keller MSR má minimální teplotu 500°C, na které zůstane, pokud je teplota nižší. Nepřesnost měření je pro nás zanedbatelná (-+0.3% nebo 4°C). [KEL]:

Pro měření tlaku jsou využity dva přístroje založené na principu Penningova manometru (tlakoměru). První je pouze orientační se stupnicí od 1kPa do jednotek Pa. Pomocí něj je schopen operátor říci, kdy lze zapnout difuzní pumpu. Druhý je v rozpětí 0,5Pa-5microPa a je kalibrován každý rok pro přesnost +-2%. Senzory pro oba penningy jsou umístěny pod křemíkovým zvonom, ale nad uzávěrem pro difuzní pumpu. [PEN]

Oba měřicí aparáty jsou připojeny do zesilovací krabice, která zároveň obsahuje napájecí obvod pro teploměr.

Pin	Funkce
1-10	Analogový vstup
11-14	USB1
15-18	USB2
20-21	Analogový výstup
22	GND
23-27	Digitální vstup/výstup
28-30	GND
31-37	Nezapojeno

Tabulka 4.2: COM37

4.4 Řídící počítač

Řídící počítač neboli “kostka” vzhledem k tomu jak vypadá v obalu je alix3d2 od firmy PC Engines GmbH, na kterém je operační systém Linux. K alixu je připojen dotykový displej 6x10cm pomocí I2C sběrnice, který umožňuje jak kontrolu, tak ovládání systému. Dále je uvnitř připojena k počítači měřicí deska LabJack U3, která umožňuje připojení více zařízení pro měření. [Alix] Celou sestavu je možno připojit k interní síti jak pomocí konektoru RJ-45 (Ethernet) nebo Wi-Fi pro kterou je možno připojit anténu na výstupní anténní konektor. Dále je možno využít pro komunikaci RS232 z boku kostky. Posledním I/O které na tomto kompletu je konektor CAN37, kam jsou vyvedeny ostatní spoje jak od Alixu tak od LabJacku.

Využívají se porty 20 a 21 pro řízení výkonu generátoru a pro spouštění generátoru. K počítači se lze vzdáleně připojit pomocí SSH, odkud lze spustit měření a je to zároveň nejjednodušší způsob, jak nahrávat data. Celý program je napsán v jazyce Perl a ukládá všechna data na server pomocí SQL. Měření probíhá v jednom cyklu, ve kterém počítač sbírá data a průměruje je každou sekundu. Data lze sbírat rychleji, ale vzhledem k délce procesu to není nutné. Knihovny pro ovládání LabJacku jsou napsány v jazyce C.

4.5 Hardware

Vstup pro ovládání výkonu generátoru je analog 0-10V, kde každý 1V koresponduje 10% výkonu. Původně byly dvě možnosti řízení - návrh hardware čistě pro přímé řízení systému bez pomoci počítače nebo řízení počítačem. Od první varianty bylo velmi rychle upuštěno z důvodu vyšší finanční náročnosti a protože LabJack karta již v sobě má zabudovaný výstup 0-5V analog.

Výstup 0-5V z LabJacku byl nатаžen z portu DAC1 s referenční zemí GND. [Alix]

Byl vytvořen jednoduchý zesilovač pomocí operačního zesilovače MA741CN a dvou proměnných odporů. Proměnné odpory byly původně využity jen proto, aby bylo možno lehce upravovat hodnotu zesílení pro kompenzaci nemožnosti LabJacku vydat přesně 5V (max je přibližně 4.96V). Oba odpory

mají ve finálním návrhu podobnou hodnotu. Typ operačního zesilovače byl použit z důvodu větší dostupnosti dané součástky na skladě firmy.

Při tvorbě zesilovače se objevil problém znemožňující implementovat ho přímo do kostky (do obalu k počítači), protože napájení do této části má jen 10V. Vzhledem ke ztrátě napětí na operačním zesilovači nebylo možno toto napájení použít a tak byl celý nakonec posunut do připojené krabice, ve které je i napájení pro teploměr a které má hodnotu 14V. Vzhledem k téměř nulovému odběru operačního zesilovače nebylo nutné shánět jiné napájení. Finální řídicí napětí je připojeno pomocí stíněného kabelu a konektoru DIN5 do generátoru.

4.6 Software

Zbytek softwaru je napsán v Perl, kde bylo již hotovo celé měření, do kterého byly vloženy další části pro řízení. Pro finální funkce bylo nutné optimalizovat některé části kódu, aby mohlo měření probíhat konzistentní rychlostí. Malé úpravy původního kódu byly nutné. Například pokud počítač ztratil připojení uprostřed procesu měření tak čekal na jeho opětovné připojení, než začal pracovat dál. Tato funkce byla pro řízení naprosto nepřijatelná a byla upravena tak, že počítač řídí proces dál, ale hodnoty se nezapisují na server.

SSH připojení umožňuje nepřímou kontrolu systému. Pro získání plné kontroly je nutno nejprve přes konzoli vypnout proces řízení a pak následně volat funkce z knihovny pro Labjack.



Část III

Modelační

Celý systém je rozdělen do dvou menších částí. Je zde teplotní a tlakový systém. Každá část má vlastní kapitolu, ve které je rozebírána podrobněji jeho modelace.

Kapitola 5

Generátor a teplo

5.1 Teorie

Vstupem do tepelného systému je výkon generátoru, který jsme schopni přímo ovládat. Výstupem je teplota systému, kterou přímo měříme. Teplotní systém se chová jako ukázkový systém prvního řádu bez nuly. Systémy prvního řádu se identifikují pomocí skokové odezvy, která vykreslí křivku a od které se pak odvíjí následující výpočty [SYS]:

$$G(s) = \frac{k}{1 + Ts}$$

kde G je přenos systému, T je čas ve kterém dosáhne hodnota skoku 0.63 násobku $y(\infty)$, což je hodnota výstupu v nekonečnu a k je zesílení podle vzorce:

$$k = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)}$$

kde $u(\infty)$ je hodnota vstupu .

5.2 Model

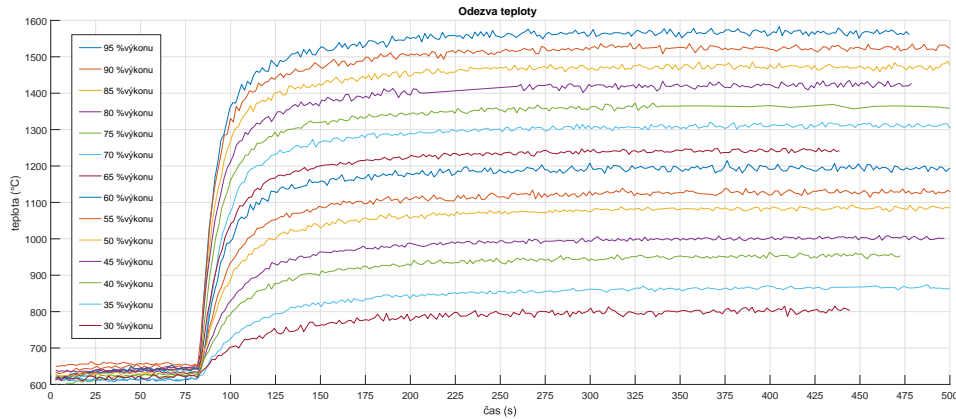
Hodnoty pro $u(\infty) - u(0) = 4V$ (60% maximálního výkonu) byly $y(\infty) - y(0) = 576$, $T = 19.86$, kde nám vychází přenos po jemném zaokrouhlení na:

$$G(s) \simeq \frac{144}{1 + 20s}$$

Tato hodnota odpovídá zadání s vysokou přesností ale pouze v okolí 60% celkového výkonu. Z tohoto důvodu bylo nutné zjistit nelinearitu systému.

Z měřených hodnot se ukázalo že nelinearitu způsobuje nepřesné čtení naší řídicí hodnoty generátorem, které způsobuje zhoršení poměru $\frac{y(\infty)}{u(\infty)}$. Teto zlomek tvoří polovinu paraboly, proto je tato nerovnost opravena přidáním části která upravuje vstupní hodnotu do naší přenosové funkce. Tato oprava jde vyjádřit rovnicí

$$y(t) = u(t) - K * u(t)^2$$



Obrázek 5.1: Hodnoty ustálení teploty pro různé výkony

Hodnota K byla určena pomocí soustavy rovnic:

$$y_{min} = u_{min} - K * u_{min}$$

$$y_{max} = u_{max} - K * u_{max}$$

Kde y_{min} a u_{min} jsou zaznamenané hodnoty při minimálním vstupu a y_{max} , u_{max} jsou hodnoty zaznamenané při maximálním vstupu. Dostali jsme hodnotu:

$$y(t) = u(t) - 0.048 * u(t)^2$$

Vzhledem ke snížení hodnoty vstupu tímto korekčním přenosem bylo potřeba zvýšit zesílení přenosu tepelného systému, který byl nakonec ustálen na

$$G(s) = \frac{185}{20s + 1}$$

5.3 Výpočet hodnot

Pro zjištění maximální dosažitelné teploty při určitém výkonu využijeme vzorec (4), kde celou část $\varepsilon\sigma A$ můžeme považovat za konstantu.

$$\varepsilon\sigma A \simeq 0.8 * 5.6703 * 10^{-8} * 0.05 = 2.26812 * 10^{-9}$$

Dále vstupní výkon Q_{in} můžeme vyjádřit jako výstupní výkon generátoru P_{gen} . Tento výstupní výkon je udáván ve watttech. Řídicí systém je schopen pouze regulovat výkon procentuálně, proto je nutno přepočítat tato procenta na reálný výkon pomocí rovnice:

$$\%P_{gen} * \frac{15000}{100} = P_{gen}$$

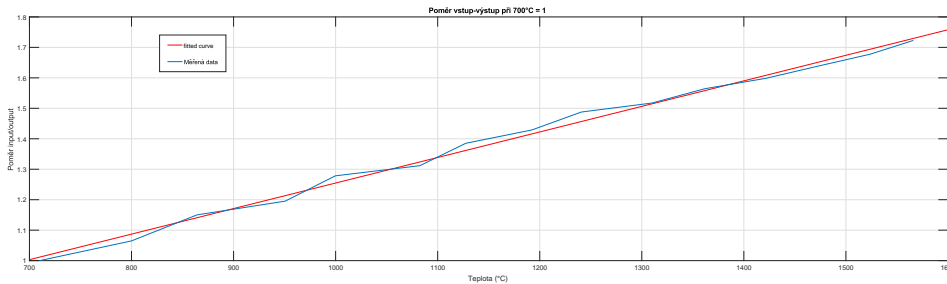
$$\frac{P_{gen}}{\varepsilon\sigma A} = T^4 - T_o^4$$

Teplota našeho systému se řádově pohybuje mezi 600-1600 °C, zatímco teplota okolí je proti tomuto zanedbatelně malá (20-30 °C). Tento rozdíl je ještě zvětšen mocninou, což nám povoluje T_o zanedbat a dostáváme rovnice[FUN]:

$$\sqrt[4]{\frac{P_{gen}}{\varepsilon\sigma A}} = T_{max}$$

$$T_{max}^4 * \varepsilon\sigma A = P_{gen}$$

Tato rovnice nám umožňuje vypočítat teplotu nebo výkon podle potřeby toho druhého. Bohužel je podobná správnému řešení jen při nízkých hodnotách a následně se odchyluje daleko od reálné hodnoty. Pomocí matlabu jsem byl schopen vytvořit křivku nelinearity a pomocí funkce fit jsem získal rovnici popisující poměr vstupu a výstupu pro danou teplotu.

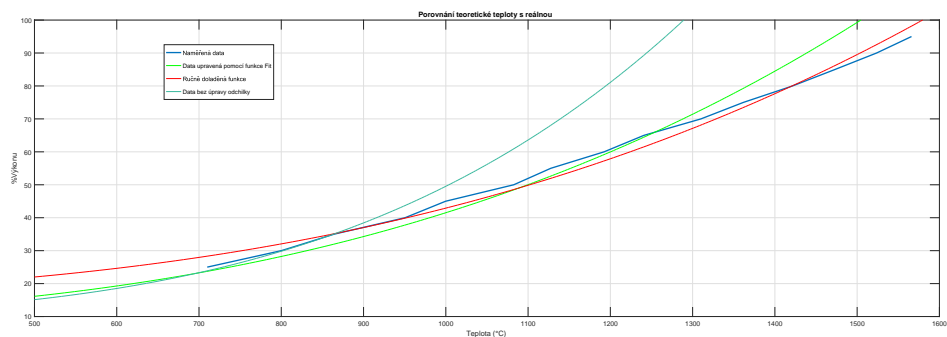


Obrázek 5.2: Poměr vstup výstup pro danou teplotu

Rovnice křivky podle matlabu byla

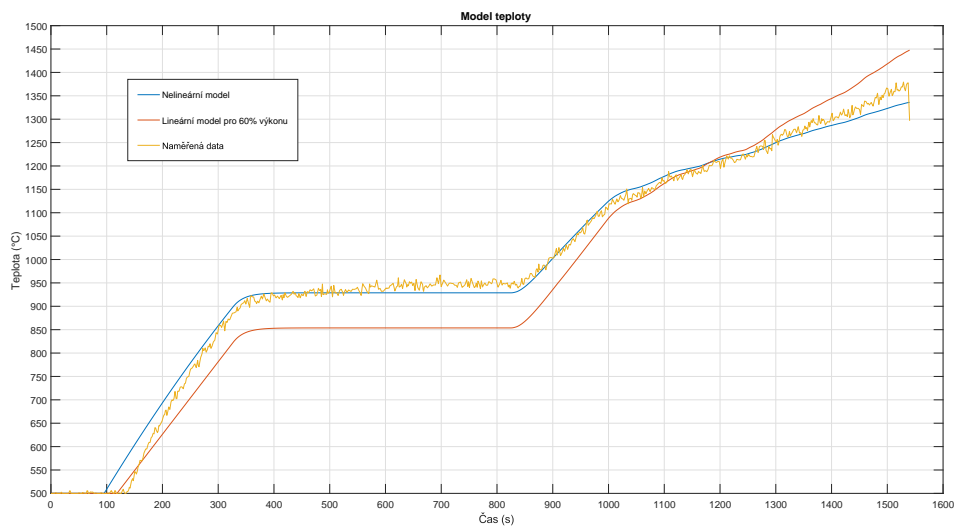
$$F(x) = 8.4 * 10^{-4}x + 0.42$$

Tuto hodnotu jsem dále ručně upravil, aby finální výpočty odpovídaly na celém průběhu konzistentněji.



Obrázek 5.3: Porovnání hodnot výkonu s teplotou reálného a simulovaného systému

Pro srovnání a ukázkou přesnosti přikládám graf jednoho měření, kde je pěkně vidět, jak dobře se tato identifikace povedla.



Obrázek 5.4: Modelový vs reálný systém

Kapitola 6

Tlak

6.1 Rychlost pumpování

Pro výpočty tlaku bylo nejprve nutno změřit q . Bohužel q v závislosti na tlaku je silně nelineární a nejbližší polynom, kterým se ho podařilo aproximovat je 5. řádu. Pokud ovšem využijeme vzorce (19) a vykreslíme q vůči tlaku dostáváme průběh aproximovaný polynomem 2. řádu, s čímž je mnohem příjemnější počítat. Pomocí aproximace dostáváme rovnici pro q_{pv} (cm^3/s).

$$q_{pv}(P) = (0.02305P^2 - 0.3783P + 0.3048) * V$$

Vzhledem k tomu, že dále používáme q_{pv} pouze v poměru $\frac{q_{pv}}{V}$, využil jsem jednoduché možnosti vykrácení V abychom nemuseli měřit další konstantu navíc.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = T \frac{q_{pv}}{V p_0} = T \frac{(0.02305p_0^2 - 0.3783p_0 + 0.3048)}{p_0}$$

Díky grafu q je vidět, že nejlepší poměr rychlosti čerpání ku tlaku je okolo 2-3mPa. Z tohoto důvodu jsem určil tuto hodnotu jako cílovou pro tlak. Ze vzorce vidíme jakou můžeme mít maximální změnu teploty při daném tlaku.

6.2 Skoková odezva

I přestože rychlost pumpování byla relativně konstantní při všech podmínkách, skoková změna tlaku byla silně odlišná i při podobných počátečních podmínkách. Teoretický skok by měl být vypočitatelný pomocí rovnice za předpokladu, že tepelný skok je mnohem vyšší než změna molárního množství, což v našem případě platí.

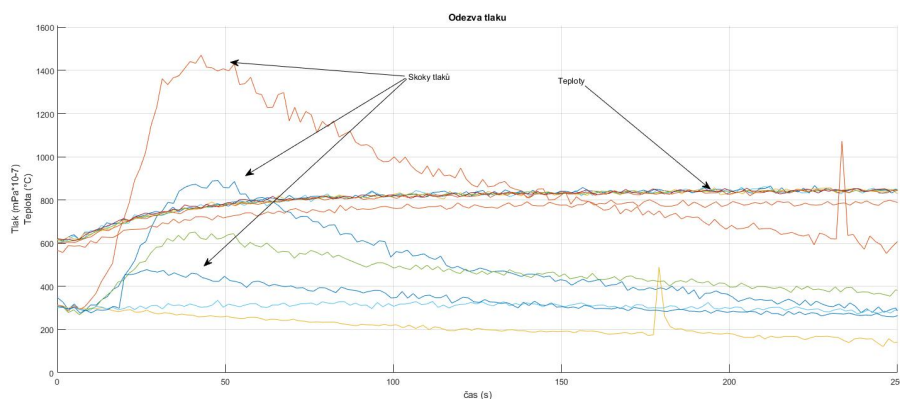
$$\Delta P = \frac{nR}{V} \Delta T$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{nR}{V}$$

Z grafu jsme schopni vyčíst hodnoty

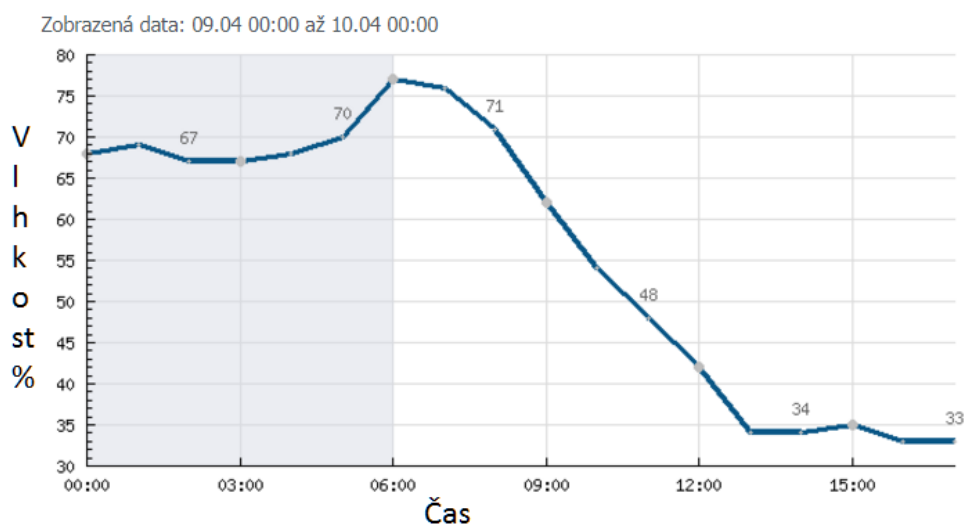
ΔT	ΔP	T_{start}	$P_{start} (mPa)$	T_{max}	$P_{max} (mPa)$	$\frac{nR}{V}$
154	11,79	666	2.92	820	14.71	0.077
156	4,95	667	2.94	823	8.89	0.032
155	3,47	605	2.89	760	6.36	0.023
154	3,29	664	2.94	818	6.23	0.021
194	1,77	640	2.92	834	4.69	0,009

Tabulka 6.1: Tabulka znázorňující konstantu nR/V pro různé průběhy



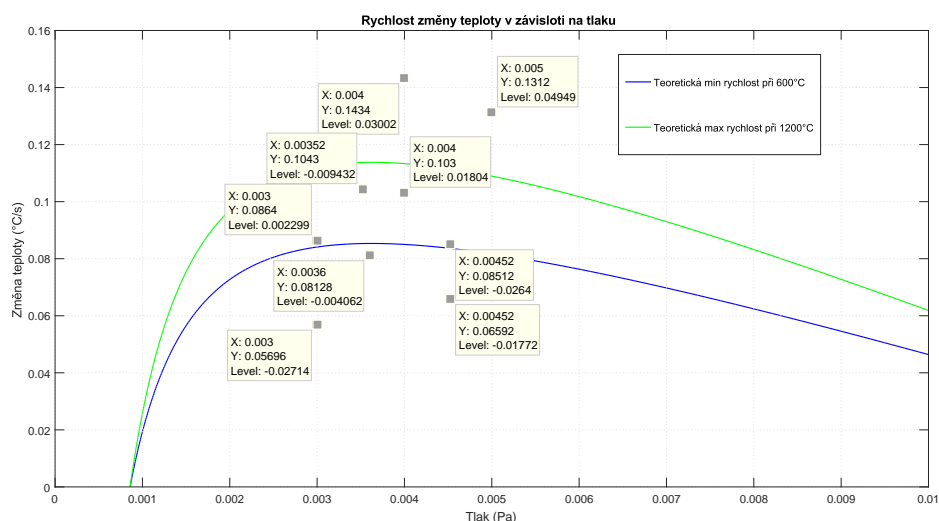
Obrázek 6.1: Odezvy tlaků na stejný vstup

Tato rovnice ovšem nesedí oproti naměřeným hodnotám. V je v našich rovnicích rozhodně konstantní, ale n a R mohou mít odlišnou hodnotu z několika důvodů. [BLTZ] Hlavním z nich je vlhkost vzduchu která přímo ovlivňuje hodnoty n a R . Vlhkost a silná prašnost má za následek změny v hustotě vzduchu, které se projeví velice silně při našich extrémních podmínkách. Při zpětném hledání jsem našel data z nedaleké meteorologické stanice, která měří vlhkost ovzduší v průběhu dne. Vzhledem k tomu že všechna data v minulém grafu byla naměřena v jeden den mezi 9:00 až 16:00 je tato teorie pravděpodobná.

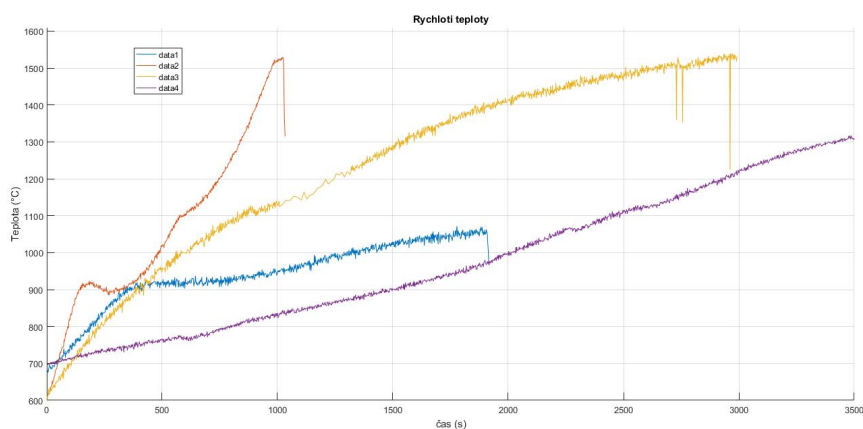


Obrázek 6.2: Průběh vlhkosti ovzduší nedaleké meteostanice v jeden den měření

I přes dobře měřitelnou rychlost čerpání za jakýchkoli podmínek se reálná rychlost dosti lišila od našich výpočtů a kolísala i při průběhu. Zde vidíme graf odhadované rychlosti pomocí našeho vzorce a reálně naměřené body. Také ze vzorce vyplývá, že pro větší teplotu by měla být větší rychlost změny teploty, což ve většině měření neplatí a je to spíše naopak. Všechny body zobrazené na grafu by měly ležet mezi vykreslenými křivkami. Toto může být způsobeno disipací ZrC do systému, která podle všeho probíhá a je zřejmá i díky malému nánosu ZrC na vnitřních stranách křemíkového zvonu po malém množství procesů.



Obrázek 6.3: Rychlost změny teploty v závislosti na tlaku



Obrázek 6.4: Rychlost teploty při udržování stejného tlaku

Z grafu je také vidět, že některé hodnoty jsou i dvojnásobné pro podobné tlaky. Tato chyba může být ze stejného důvodu jako předchozí chyby. Dále může být problém s chladicí vodou pro difuzní pumpu a rozdílné hodnoty odplynění materiálů při každé instalaci. Vzhledem k tomu, že každý materiál je porézní, tak doba, kterou strávil mimo vakuum, může mít za následek větší množství plynů, které se uvolňují při vysokých teplotách a vysokém vakuu. Příkladem může být, že při výměně celého zvonu vakuové pece se zvon nechává několik hodin odplynit, než je nasazen do provozu. Nebo nutnost odplynění mřížek před jejich pokrytí ZrC. [POK] Modelace tlakové části se ukázala být náročná a ukazuje se, že nejspíše závisí na větším množství proměnných, než které měříme a jsme schopni získat.



Část IV

Řízení



Teorie

Řízení systému, kam se v průběhu nepřidávají žádné proměnné, lze udělat pomocí změřených všech nutných proměnných na začátku a dále simulace a výpočtu chtěného průběhu předem. Ideální průběh tlaku se dá nasimulovat na začátku procesu a chtěnou teplotu pro něj dopočítat pomocí rovnic (např. 2.4). Na tuto vypočtenou hodnotu teploty v daný čas řídí systém pomocí varianty PID regulátoru. Takovému regulátoru se říká deterministický. [CTR] Další možností je na začátku procesu vypočítat hodnoty pro nejrychlejší skok systému na zadané hodnoty, na které je následně řízen pomocí PID regulátoru. Toto umožňuje proměnné podmínky v průběhu celého systému na úkor rychlosti a přesnosti. Třetí možností je bang-bang zpětnovazební kontroler, který zvýší výstup pokaždé, když je splněna podmínka. Je to velice jednoduchý kontroler na implementaci. [NICH] Další možnou metodou je celý proces řídit pouze pomocí zpětnovazebního regulátoru, ať již Lead, Lag nebo PID či kombinací. Různé části se dají získat pomocí Zieger-Nicholsovy metody, která popisuje, jak získat jednotlivé komponenty PID regulátoru.

Praxe

Deterministický kontroler, v našem případě bez modelu a schopnosti správně identifikovat průběh, nebyl vůbec použitelný. Stejně tak byl zavrhnut regulátor, který na začátku naskočí na referenční hodnotu a dále se jí bude držet. Tato metoda také nebylo použitelná z důvodu nepředvídatelného chování vakuového systému. Bang-bang regulátor, neboli dvoupolohové řízení, bylo nejjednodušší na implementaci a umožnilo mi zjistit maximální rychlosti systému. Regulátor je implementován jednoduchou podmínkou, která sepne přidávání výkonu podle tlaku. Efektivně tento regulátor neměl špatné výsledky, pouze měl vysoký překmit na začátku měření (až 2mPa). Jinak efektivně osciloval v rozmezí ± 0.25 mPa okolo referenční hodnoty. Snížení maximální rychlosti přičítání při splnění podmínce sice snížilo počáteční překmit, ale také znatelně prodloužilo nárůst tlaku na referenční hodnotu. Regulátor P funguje na jednoduchém principu, kde výkon systému je

$$P = P + error * K_p * t$$

kde error je rozdíl požadovaného a referenčního tlaku a t je časová konstanta, která funguje jako váha pro každý krok z důvodu nejednotných časových cyklů. Přepočítání pomocí t nám umožňuje řídit zařízení v obou částech programu – rychlé části, která sbírá data co nejrychleji dovede a pomalé, která provádí výpočty a filtraci vzhledem k posledním 10 hodnotám z rychlé části. Efektivně rychlá část (cca 100ms/cykly) je 10x rychlejší než pomalá (cca 1 sekunda/cykly). Saturace u tohoto regulátoru je přidána hlavně z důvodu, že když se měření zapne při příliš vysokém tlaku tak error je o několik řádů větší než při normálním provozu. Hodnotu pro K_p jsem určil pomocí maximální rychlosti stoupání (graf s rychlostmi) a průměrných rozdílů tlaku. Z měření se ukazuje, že příliš vysoká hodnota K_p způsobuje překmit, ale zkracuje počáteční nárůst teploty na říditelnou hladinu jen o asi 10% rychleji. Těchto 10% procent je řádově 60-80 sekund což z celé odhadované délky procesu (cca 4000 sekund) tvoří jen 2%, což nestojí za riskování překmitu. Při velmi nízké hodnotě K_p zase rychlost přírůstku není dostatečná a systém se ustálí na nižší hodnotě tlaku. Pokud usoudíme průměrnou deviaci od reference 0,5mPa tak dostáváme pro naše průměrné naměřené hodnoty $K_p = \{ 5.5/0.5, 13/0.5 \} \doteq \{ 11, 26 \}$. Vyzkoušené hodnoty jsou v tabulce. Konstanty K_P , K_D a eventuálně K_i jsem zvolil pomocí Ziegler–Nicholsovy metody za pomoci vybrané hodnoty z regu-

látoru P. Po několika testovacích měřeních a jemném doladění jsou konstanty na hodnotách:

Reg	K_p	K_i	K_d	Overshoot	Oscilace	Odchylka	Undershoot
1	35	0	0	0,3	začátek	0	1,7
2	28	0	3	0,2	začátek	2	1,5
3	31	0	0	0	ne	0	1
4	26	0	0	0	ne	max	
5	28	0	1	0	ne	0,1	0.4
6	29	0.2	1	0,3	ano	0,3	1
7	30	0.2	2	0.3	ne	0.1	1
8	30	0.4	0	0,5	ne	0,3	1,5
9	BB			1.5	ne	0	2
10	BB			1	ne	0	3,3
11	BB			0.9	ne	0	2,1
12	BB			0	ne	max	

Tabulka 6.2: Rychlost procesu pro různé regulátory

Vzhledem k nemožnosti koherentně měřit rychlosti systémů pomocí pár měření, bylo naším cílem najít systém s nejnižší odchylkou, overshootem a undershootem bez oscilací. Tyto parametry nejlépe splňuje regulátor 5. Dobré hodnoty mají i regulátory 3 a 7. Což nám v podstatě dává na výběr z regulátorů P, PD, a PID. Na každý z těchto regulátorů bylo provedeno 5 měření pro dosažení 1600°C, kde se udržel systém alespoň minutu.

Výsledné průměrné časy měření se příliš neliší, ovšem pokud se z průměru vyškrtnou extrémní, vychází nejlépe systém č. 5.

reg	Měření	1	2	3	4	5	Průměr	Bez extrémů
	Sec							
3		4568	3450	8978	6790	7541	6265	6300
5		11586	5376	4218	4756	5687	6324	5276
7		8547	6586	7562	4122	3948	6153	6090

Tabulka 6.3: Rychlost procesu pro různé regulátory

Vybrání jednoho regulátoru by nejlépe šlo po prvním měsíci pevného nasazení systému, když bude dostatek dat pro větší statistickou analýzu. Existuje i možnost jemné úpravy konstant těchto regulátorů, ale tyto úpravy musí proběhnout několika měřeními, aby bylo možné pořádně zaznamenat jejich efekt. Jen těchto 15 měření bez doby vychladnutí, výměny mřížek atd. zabralo 26 hodin. Celkový časový průměr jednoho měření je asi 105 minut.

Porovnání s manuálním řízením

Základní postup při automatickém řízení procesů sintrace:

1. V rukavicích umístit mřížku na pomocný trn a přikrýt pyrografitovým kalichem.
2. Umístit vsázku do prostřed cívky a opatrně nasunout křemíkový zvon.
3. Ujistit se, že zvon dobře sedí na těsnění.
4. Zapnout přítok vody.
5. Zapnout generátor zezadu otočným vypínačem. Rozsvítí se displej.
6. Zapnout obě zařízení Penning tlačítkem “Mains”.
7. Zapnout rotační vakuovou pumpu otočným tlačítkem a měřící aparaturu přepínačem. .
8. Zkontrolovat zda vakuové ventily jsou v poloze “čerpání”.
9. Na spodním Penningu sledovat tlak a až bude pod 10 Pa zapnout difuzní pumpu.
10. Na měřícím počítači zkontrolovat připojení k síti. Kliknout na “Network” a dále na “Ping”. Pokud počítač není k síti připojen kliknout v menu “Network” na možnost Wi-Fi nebo Lan podle připojení.
11. Na měřícím počítači zvolit tlačítko “Řízení”.
12. Pomocí klávesnice zadat výrobní číslo elektronky a potvrdit.
13. Na čelním panelu generátoru přepnout vypínač do polohy “Auto” a stisknout zelené tlačítko na čelním panelu generátoru. Pro převzetí řízení od počítače přepnout vypínač na předním panelu na “Manual” a dále řídit pomocí otočného knoflíku.
14. 14. Systém se při automatickém řízení i automaticky vypíná. Ujistit se, že byl generátor vypnut. Pokud ne stisknout červené tlačítko na čelním panelu. Pumpy a voda MUSÍ zůstat v provozu.

15. Vypnout počítač a měřící aparaturu.
16. Po vychladnutí přepnout vakuové ventily do polohy “Zavřeno”.
17. Napustit systém napouštěcím vypínačem.
18. Sundat křemíkový zvon a vyndat v rukavicích vsázku.

Původní body 13 a 14 byly vypuštěny z nového postupu a původní body 15, 16 byly změněny.

Bylo nutno kontrolovat systém každých 10 minut po celou dobu ohřevu a sintrace. Dále bylo nutno před ohřevem čekat, než se vytvoří dostatečné vakuum pro ohřev. Nyní je možno zapnout pumpy na začátku celého procesu a současně začít proces řízení. Řízený systém je bezdohledový a schopen pracovat bez obsluhy.



Část V

Závěr

6.3 Eliminace nutnosti osobního dohledu na systém

Systém nemá nutnost osobního dohledu a manuální obsluhy a je možno jej “zapnout a odejít”. Možnost dálkového ovládání je implementována z vnitřní sítě nebo pomocí VPN. Ovšem závisí na SSH připojení k řídicímu počítači, což zatím neumožňuje jednoduché ovládání. Je možno měnit teplotu i přímo vypnout zařízení. Momentálně bych firmě doporučoval rozšířit webové rozhraní pro kontrolu dat měření o možnosti ovládání a přidat kameru, která by systém opticky sledovala.

6.4 Zvýšení průchodnosti výroby

Automatické řízení procesu umožňuje vyrobení většího množství kusů mřížek, již z důvodu zkrácení času čerpání a ohřevu. Největšího efektu zvýšení průchodnosti výrobou bude dosaženo po implementaci dálkového ovládání systému. Například pro automatické zapnutí po pracovní době. Dalším poznatkem je, že operátor nebude muset každých 10 minut hlídat proces, což má za následek uvolnění lidských zdrojů.

6.5 Snížení zmetkovitosti polotovarů

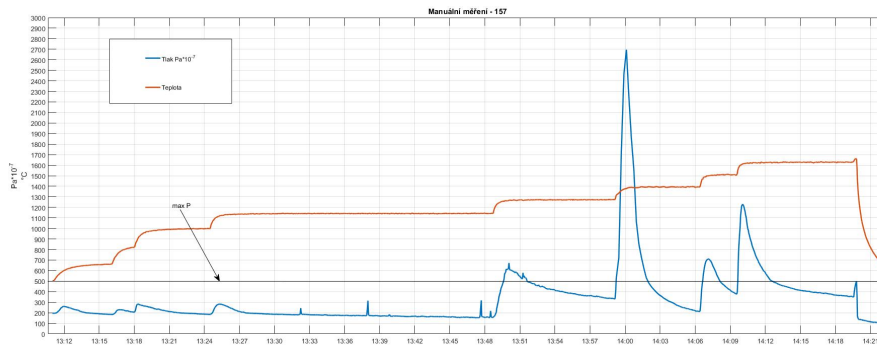
Řízení zaručuje přesnost a nepřekročení maximální povolené hladiny vakua, což operátor mnohdy nedodržel. To umožní snížit zmetkovitost jak polotovarů, tak následně finálních výrobků. Mnohdy se poškození mřížky při sintraci projeví až při výstupní kontrole hotového výrobku což zvyšuje zmetkovitost a celkové náklady na výrobu.

6.6 Snížení energetické náročnosti

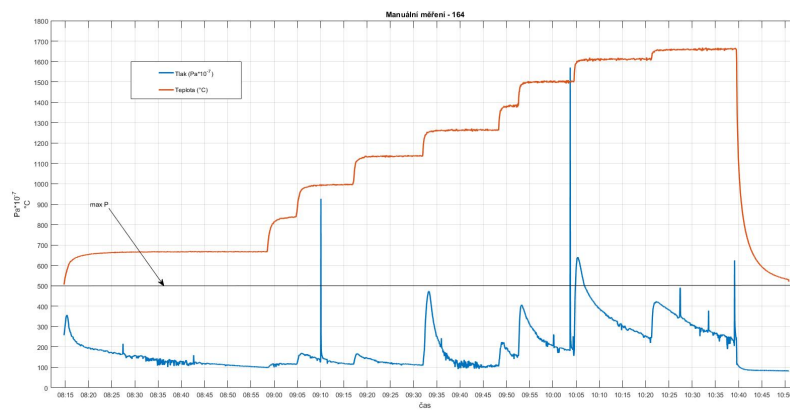
Doba ohřevu automatickým systémem je kratší než manuální řízení, což šetří energii nutnou k vytopení systému. Přesunutím procesů mimo hlavní pracovní dobu můžeme využívat energii získanou z fotovoltaické elektrárny na střeše budovy (50kW).

6.7 Implementace

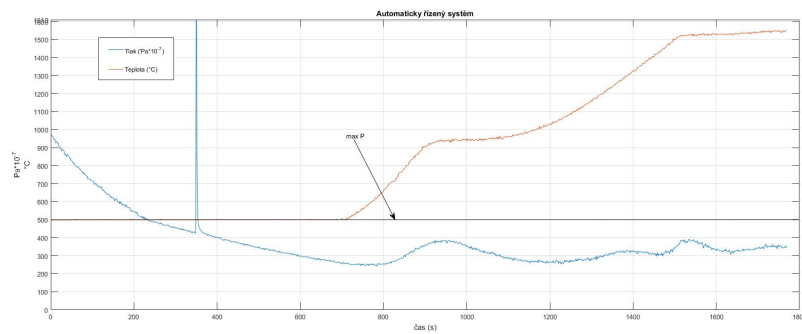
Celkový přechod na automatický systém je plánován na začátek července z důvodu celozávodní dovolené kdy bude možno testovat všechny pece najednou při pevném provozu. Přičemž bude možné doladit všechny proměnné pro jednotlivé pumpy a generátory.



Obrázek 6.5: Řízený systém manuálně 1



Obrázek 6.6: Řízený systém manuálně 2



Obrázek 6.7: Řízený systém počítačem 1



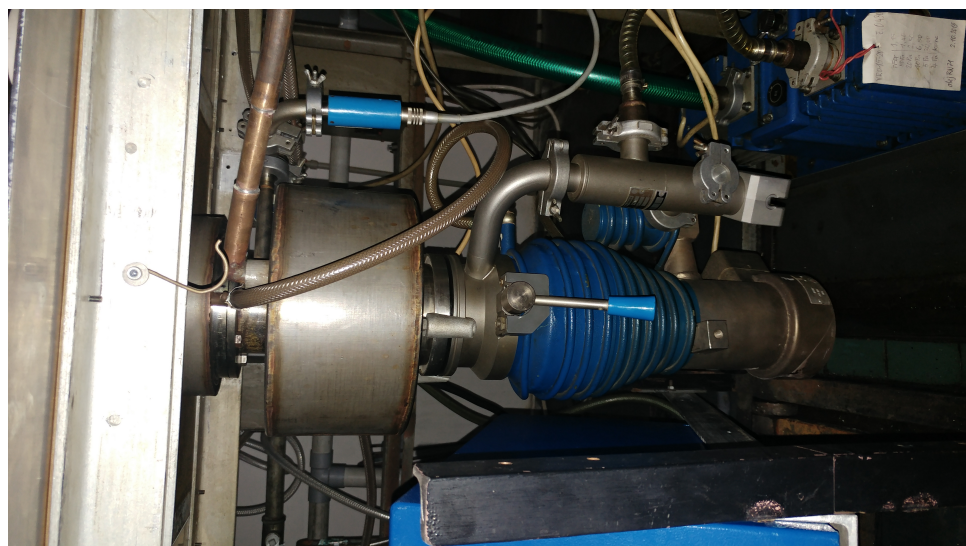
Přílohy



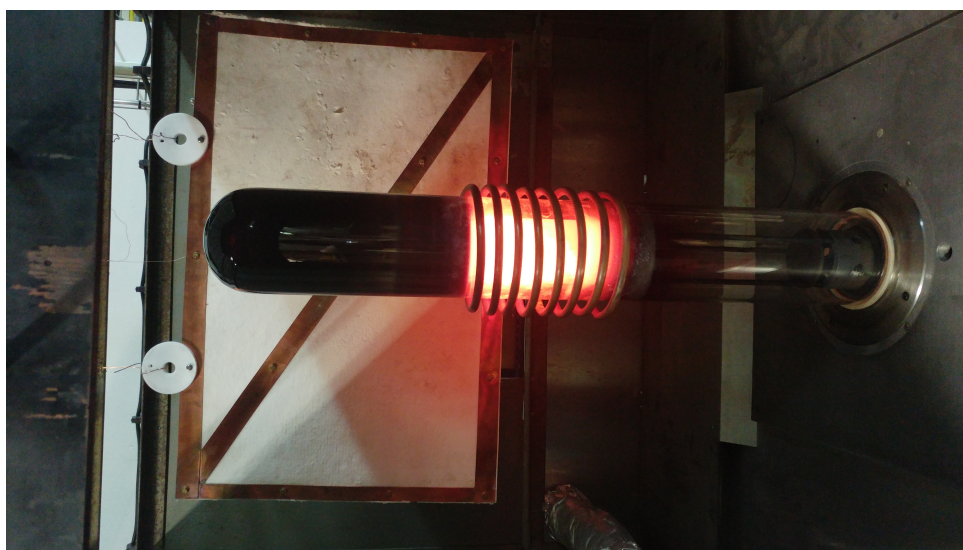
Obrázek 8: Simulační stanoviště



Obrázek 9: Přední panel generátoru



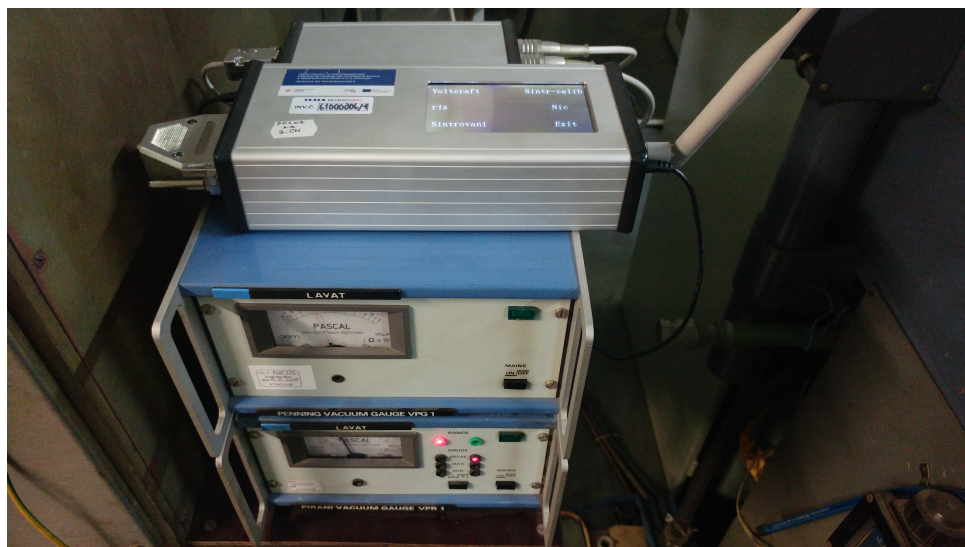
Obrázek 10: Difuzní pumpa



Obrázek 11: Zvon v cívce při provozu



Obrázek 12: Řídící počítač a sensorová krabice



Obrázek 13: Peningy a počítač



Obrázek 14: Oba peningy



Kód řídicí metody


```

sub Keller_sintr_riz

{
    my $timer = time();

    my $max_vacuum_real = 3.5;
    my $max_vacuum_exp = -3;
    my $begin_power = 10;
    my $voltage = 0;
    my $kp = 35;
    my $ki = 1;
    my $kd= 0.2;
    my $err = 0;
    my $errP = 0;
    my $int = 0;
    my $timeNow;
    my $timeDiff;
    my $timerend = 0;
my $c = 1;
my $id_caltab= '1';
my $pocet = 10;
my $kell_konst = SQL_Get_Keller_Const($briketa);
    DisplayClrScr();
    DisplayClrScr();
    while (!DisplayIsTouch())
        {
            $x = 0;
            $a = 0;
            $b = 0;
            while ($x < $pocet)
                {
                    DisplayString(20,90,"-");
                    open ( A, "/app/labjack/u3test1□|");
                    my $tmp = <A>;
                    $tmp =~s/^\w*s\w*s=\s//;
                    $a = $a + $tmp;

                    $tmp = <A>;
                    $tmp =~s/^\w*s\w*s=\s//;
                    $b = $b + $tmp;
                    close(A);
                    $x++;
                    DisplayString(20,90,"+");
                }
            DisplayString(20,90,"+++");
        }
}

```

```

$a = $a/$pocet;
$b = $b/$pocet;
$g = sprintf("%6.3f",($a-$vcorr));;
$a = GetKellerT($a);
$temp = $a;
$b = ($b-$vcorr)* 10;
($mu,$fu) = expexp(GetPenningP(1,$b));
$b = sprintf("%6.3f",$b);
DisplayString(20,30, "Mereni");
DisplayString(20,30, "Mereni".$c."");
DisplayString(20,90, "***".$begin_power."");
DisplayString(20,120, "Penning[Pa]");
DisplayString(20,120, "Penning[Pa]".$mu."e".$fu);
DisplayString(20,160, "Keller[C]");
DisplayString(20,160, "Keller[C]".$a);
$c++;
$timeDiff=$timeNow;
$timeNow = time()-$timer;
$timeDiff= $timeNow - $timeDiff;
SQL_WriteData_sintr($mer_id,$a,$mu,$fu,$briketa);
print $c."\t".$a."\t", $mu."e".$fu."\t".$briketa."\t";

if ($timerend=0){
    $timer = $timeNow;
}
if ($a<1600){
    $timerend = $timeNow;
}
if ($timenow-$timerend > (60*10) ){
    $timerend = $timeNow;
    open ( B, "/app/labjack/u3DAC00|");
    last;
}

$err = $max_vacuum_real*(10*$max_vacuum_exp)-$mu*(10*
my $der = $kd*($err - $errP);
my $prop = ($kp*$err);
if($err*$int < 0){
    $int = 0;
}
$int = $int+$err;
$begin_power=$begin_power+$timeDiff*($prop+$der+$int);
$errP=$err;
    if ($begin_power < 10){
        $begin_power=10;
    }

```

```
};  
    }  
    if($begin_power > 100){  
        $begin_power = 100;  
    }  
    $voltage = $begin_power/20;  
    open ( B, "/app/labjack/u3DAC□□$voltage□| " );
```


Příloha A

Rejstřík

A

Analogové řízení, 5
Alix, 20

E

Elektronka, 15

I

Ideální plyn, 11
Indukční ohřev, 18

K

Keller, 19

L

Labjack, 20

N

Návod, 17
Nelinearita, 29 , 32

O

Oxidace, 16

P

Proudová smyčka, 5
Pec, 7
Pumpy, 9
Pyrografit, 15
Penning, 19

S

SSH, 20

T

TESLA, 15
Trioda, 15

U

universal, 7

V

Vlhkost, 32

Z

Zirkon Karbid, 15

Příloha B

Literatura

- [CTR] Digital Control Systems Volume 1: Fundamentals, Deterministic Control. Second, Revised Edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989. ISBN 978-364-2864-179.
- [VAC] LEWIN, Gerhard. *Fundamentals of vacuum science and technology*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1965.
- [PYR] BALÍK, Karel a Peter SHNEIDER. *Pyrolytický grafit - nový materiál ve vakuové technice*. Praha: Tesla Vršovice, 1977.
- [MAT] KOHL, Walter H. *Materials technology for electron tubes*. New York: Book Division, Reinhold Pub., 1951.
- [MATT] KOHL, Walter H. *Materials and techniques for electron tubes*. New York: Reinhold Pub., 1960.
- [VST] *Vacuum Science and Technology [online]*. University of California, Santa Barbara, 2003 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.chemengr.ucsb.edu/~ceweb/courses/che142242/pdfs/lecture_14_chex42.pdf. University of California.
- [FUN] NOLAN, Peter J. *Fundamentals of college physics*. 2nd ed. Dubuque, Iowa: Wm. C. Brown Publishers, c1995, Kapitola 17. ISBN 06-972-3138-0.
- [MOL] *Extractive metallurgy of molybdenum*. Boca Raton: CRC Press, c1992, s. 298-300. ISBN 0849347580.
- [ENG] *Ideal Gas Law. The Engineering Toolbox [online]*. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/ideal-gas-law-d_157.html
- [ZrC] POLLOCK, B. D. THE VAPORIZATION BEHAVIOR AND THERMODYNAMIC STABILITY OF ZIRCONIUM CARBIDE AT HIGH TEMPERATURE 1. *The Journal of Physical Chemistry*. 1961, 65(5). DOI: 10.1021/j100823a007. ISSN

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Rouček Tomáš**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Automatické řízení indukční sintrance materiálů při výrobě elektronek**

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte automatické řízení pro stanoviště indukčního ohřevu materiálů při výrobě elektronek. Účelem řízení je zkrátit procesní čas a zlepšit kvalitu finálního výrobku. Při procesu je nutné dosáhnout stanovené teploty při nepřesažení maximálního povoleného tlaku. Systém je momentálně ovládán ručně operátorem, který se stará o několik stanovišť najednou.

1. Připravte hardware pro automatické řízení generátoru pro indukční ohřev (rozšířením stávajícího měřicího systému o ovládání generátoru, nebo realizací samostatného řídicího systému).
2. Provedte sérii experimentů (záznam průběhů teploty a tlaku za různých podmínek), ze kterých bude možné sestavit matematický model systému.
3. Sestavte matematický model systému, který bude schopný simulovat vývoj důležitých veličin za daných provozních podmínek.
4. Navrhněte a otestujte řídicí systém, který bude schopný automaticky řídit celý proces a dodržet při tom stanovené podmínky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Franklin, Gene F., et al. Feedback control of dynamic systems. Vol. 3. Reading, MA: Addison-Wesley, 1994.
[2] Brown, Forbes T. Engineering system dynamics: a unified graph-centered approach. CRC press, 2006.

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 21. 2. 2017