

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
Leden 2018

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, 3. ledna 2018

Abstrakt

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

V průběhu sintrace je nutno řídit teplotu výrobku podle tlaku uvnitř vakuové pece. Hlavním problémem je, že při změně teploty výrobku se změní i tlak v peci, což může mít nežádoucí účinky.

V průběhu práce byl nejprve postaven obvod pro zesílení výstupního řídicího napětí. Dále byl sestaven matematický model systému a navržen PID regulátor, který byl implementován do výroby. Následně byl nahrazen druhým regulátorem, vytvořeným pomocí stavové zpětné vazby. Na konci práce je porovnání těchto regulátorů s manuálním řízením a shrnutí, jaké měly oba regulátory efekt na kvalitu a rychlost výroby.

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 the process of making parts for electron tubes. Sintering is being done on a ZirconCarbid covered molybdenum wire in extreme heat up to 1700 °C 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. The whole process is done so application of platinum onto the grids is possible.

During the sintering process, it is necessary to control the temperature in the vacuum furnace so the pressure does not rise above a set value. This is because the changes of the temperature of the system changes the pressure inside the furnace, which could result in undesirable results.

During this work, a circuit was built to amplify the control signal. Next, we built a mathematical model of the system and designed a PID controller, which was then implemented into the production process. Subsequently, it was replaced with the second controller created using the full state feedback. At the end of the work, comparison of the automatic control with the manual control is included with a summary of the effects of their usage on the quality and speed of the production.

Keywords: sintering, control, induction heating, vacuum

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

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Sintrace	1
1.2 Systémy ohřevu	2
1.2.1 Druhy a použití vakuových pump	2
2 Popis reálného procesu	5
2.1 TESLA Electrontubes	5
2.2 Motivace a vysvětlení problematiky	5
2.3 Sintrace	6
2.4 Tlak	6
3 Popis zařízení	9
3.1 Generátor	15
3.2 Pec a pumpy	15
3.3 Měřicí sestava	16
3.4 Řídicí počítač	16
3.5 Hardware	17
3.6 Software	18
4 Modelování	19
4.1 Matematický model teploty	19
4.2 Matematický model pump	20
4.3 Matematický model tlaku	20
4.4 Stavové rovnice systému	22
4.5 Odplyňování systému	25
4.6 Rychlost čerpání	25
4.7 Verifikace	26
4.8 Statické nelinearity teploty	28
5 Řízení	31
5.1 Regulátor	31
5.1.1 PID	32
5.1.2 Stavová zpětná vazba	33
5.2 Výsledná měření	33
6 Závěr a porovnání výsledků	39
6.1 Porovnání dat	39
A Návod pro řízení procesu	41
B Obsah přiloženého CD	43
C Rejstřík	45
D Literatura	47
E Zadání práce	51

Obrázky

3.1 Diagram procesu, červeně je vyznačena přidaná část pro řízení	10
3.2 Sintrační stanoviště	11
3.3 Přední panel generátoru	12
3.4 Difuzní pumpa	12
3.5 Zvon v cívice při provozu	13
3.6 Řídicí počítač a senzorová krabice	13
3.7 Penningy a počítač	14
3.8 Oba Penningy	14
3.9 Vytvořený obvod uvnitř zesilovací krabice	18
4.1 Odezva teploty na extrémní skok tlaku	23
4.2 Odezva teploty na skok tlaku v okolí pracovního bodu	23
4.3 Vypočtená hodnota q v závislosti na tlaku.	26
4.4 Porovnání systému tlaku s nelineárním a lineárním modelem.	27
4.5 Porovnání systému tlaku s nelineárním a lineárním modelem.	27
4.6 Porovnání systému tlaku s nelineárním a lineárním modelem.	28
4.7 Rozdíl po přepočítání pomocí funkce fit	29
4.8 Porovnání reálného systému teploty s nelineárním a lineárním modelem.	30
5.1 Průběh systému řízeného člověkem	34
5.2 PID regulátor, který několikrát přesáhne povolenou hodnotu 6 mPa	35
5.3 Průběh systému, kde Q_{outgass} nebylo zmenšeno	35
5.4 Průběh systému, kde Q_{outgass} bylo zmenšeno uložním ve vakuové komoře	36
5.5 Řízení stavovou zpětnou vazbou při nízkém počátečním tlaku	37
5.6 Řízení stavovou zpětnou vazbou při vysokém počátečním tlaku	37
6.1 Statistika objemu výroby za druhé pololetí 2017	40

Tabulky

3.1 Vstupy a výstupy generátoru	15
3.2 Konektor COM37 z počítače	17
4.1 Faktor stlačitelnosti pro vzduch Z [8]	21
6.1 Porovnání denních průměrů	40

Kapitola 1

Úvod

Zařízení v této práci je indukční vakuová pec, která je napájena z vysoko-frekvenčního generátoru speciálně vyrobeného pro indukční ohřev. V této peci je ohříván výrobek až na teplotu 1600 °C. Pro správný průběh procesu je nutné udržet vakuum uvnitř pece na určené hodnotě, jinak kvalita výrobku značně degraduje. Tlakoměr a teploměr monitorují z vnějšku pece průběh procesu a vše je zaznamenáváno do dedikovaného jednodeskového počítače.

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 vakua.

Cílem bylo implementovat zařízení do již fungujícího jednodeskového počítače. Byla nutná úprava elektroniky a programu stávajícího zařízení. Kód je napsán v jazyce Perl a část v jazyce C. Práce popisuje celkový technologický proces a problémy, které je třeba řešit. Dále se věnuje modelování systému za pracovních podmínek. 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 ručního řízení
- Zvýšení průchodnosti výroby
- Snížení zmetkovitosti polotovarů
- Snížení energetické náročnosti

1.1 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 [16].

Využívá se také ke zpevňování materiálů a nanášení povrchů. Tento proces začíná nanesením požadovaného materiálu, například karbidu zirkoničitého (dále 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 [7].

1.2 Systémy ohřevu

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 [16]:

- Průběžné
- Vakuové

Průběžné 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, 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.

1.2.1 Druhy a použití vakuových pump

Vakuových pump existuje velké množství. Zde je uvedena většina typů, jejich základní principy a operační rozsah vakua [5].

- Rotační olejová pumpa
 - Odsouvání plynu z komory pomocí pístu
 - Pouze lehké vakuum, nebezpečí kontaminace systému olejem
 - 1 kPa — 1 Pa
- Sorpční pumpa
 - Pohlcování plynů chlazenou částí
 - Pouze lehké vakuum, větší rozměry
 - 1 kPa — 1 Pa
- Rootsovo dmychadlo
 - Odsun plynu pomocí proti sobě rotujících lopatek
 - 100 Pa — 100 mPa

- Turbo-molekulární pumpa
 - Odsun plynů pomocí vysokorychlostní turbíny
 - 10 Pa — 10 μPa
- Difuzní pumpa
 - Odsun plynů pomocí vysokorychlostního proudu oleje
 - 10 Pa — 1 μPa
- Getterova pumpa
 - Absorpce plynů do titanu
 - 10 Pa — 1 μPa
- Iontová pumpa
 - Kovový materiál ostřelovaný ionty
 - 10 Pa — 1 μPa
- Kryogenická pumpa
 - Pohlcování plynů a kondenzace na studeném povrchu
 - 10 Pa — 1 μPa

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

Kapitola 2

Popis reálného procesu

2.1 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." [14] 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 [14].

2.2 Motivace a vysvětlení problematiky

Výkonové elektrony, které vyrábí firma TESLA Electrontubes s.r.o., obsahují několik kritických součástí, které je nutné vyrobit 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) [7]. Cílem procesu je dosáhnout požadované teploty výrobku při udržení požadovaného vakua. Tato činnost není jednoduchá, protože při změně teploty se zvyšuje tlak. 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 [17].

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

[4][3]. Například při použití pyrografitu je nutno vyřezat mřížku pomocí laseru z již připraveného polotovaru. Pro elektronky, které běží při nižších teplotách, se používá nikl, který se dobře zpracovává a je levnější.

Sintrace umožňuje vytvořit kompaktní vrstvu ZrC, která je nanese na molybdenovém drátu, a upravit plochu pro následný povlak platinou [17].

Celá soustava sintračního zařízení je ručně ovládána operátorem. V systému je nutno dosáhnout dostatečně vysoké teploty při udržení nízkého tlaku, jinak se materiál nevysintuje. Tyto hodnoty jsou asi 1500 °C a 3 mPa. I v době zahřívání je nutno udržovat tlak nízký, asi 6 mPa, aby nedošlo k oxidaci nebo kontaminaci výrobku nežádoucími plyny. Problém procesu je, že rostoucí teplota způsobí i růst tlaku, jak rozpínáním plynů, tak uvolňováním plynů uvězněných v zahřátých materiálech. 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

Při fázích 1 až 3 je nutný přímý dohled.

2.3 Sintrace

Sintrace mřížek je prováděna za účelem vytvrzení vrstvy ZrC, která je na molybdenový drát nanese 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.

Sintrační ohřevy většinou vyžadují postupné ohřívání za účelem vypaření spojovacího materiálu, nebo požadavku na krystalovou mřížku výsledného výrobku [17]. V našem případě není nutno žádné podobné postupy dodržovat, protože není žádný pojící materiál a tvar krystalů se na tak tenkém povrchu neprojeví.

2.4 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 °C při normálním atmosférickém tlaku, což by zničilo povlak [9]. Druhou součástí je usazování jiných materiálů na ohřivaném 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 [9].

Dalším důvodem je, že nízký tlak pomůže ZrC se lépe zesintrovat a vytvořit celistvou strukturu již při 1600 °C. Bez vakua se ZrC normálně sintruje při teplotě okolo 1850 °C.

Kapitola 3

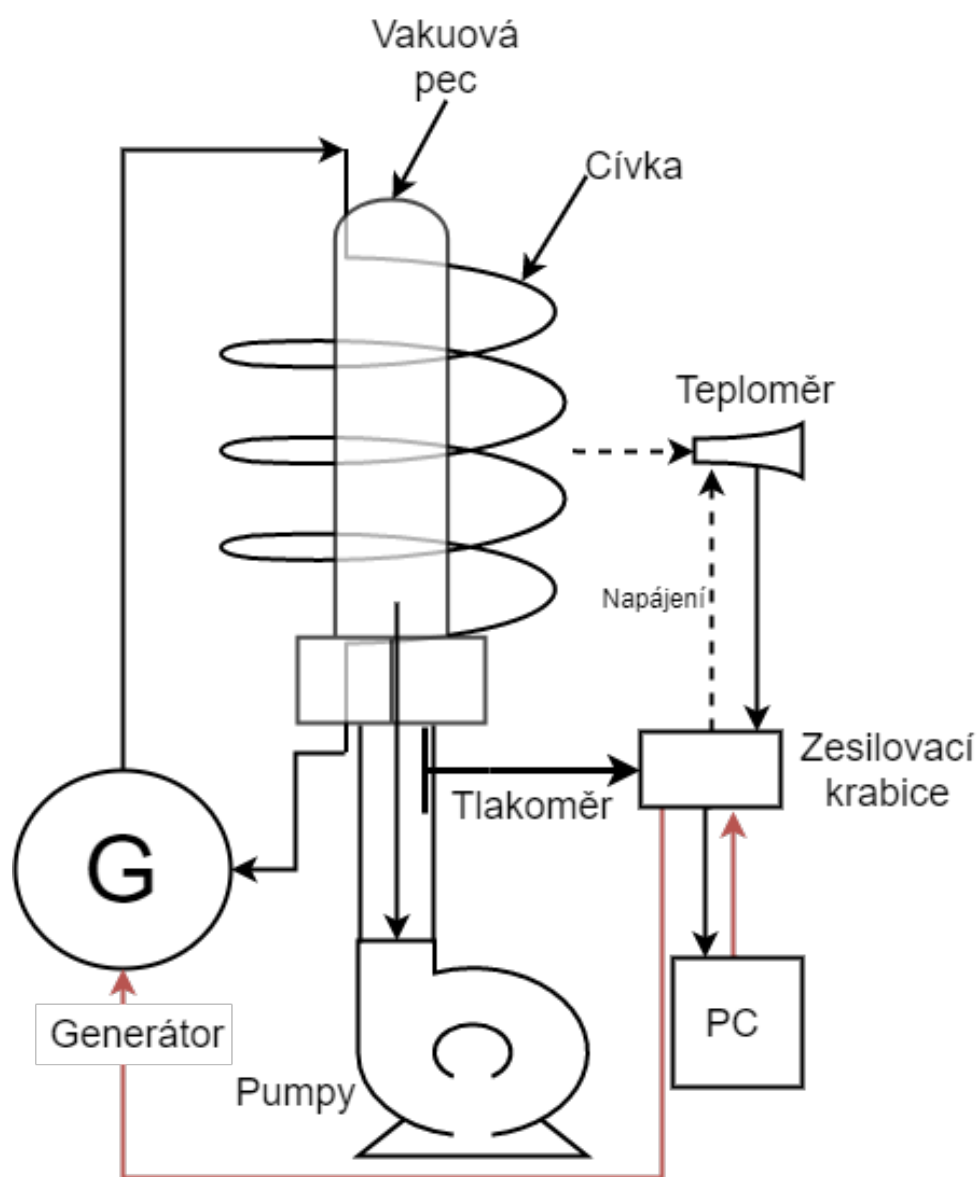
Popis zařízení

Systém se skládá z pěti hlavních částí:

- Generátor
- Pec
- Pumpy
- Měřicí část
- Počítač

Generátor ohřívá systém na požadovanou teplotu. 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.

V diagramu 3.1 popisujícím systém je červeně vyznačena přidaná část pro řízení systému.



Obrázek 3.1: Diagram procesu, červeně je vyznačena přidaná část pro řízení



Obrázek 3.2: Sítlační stanoviště

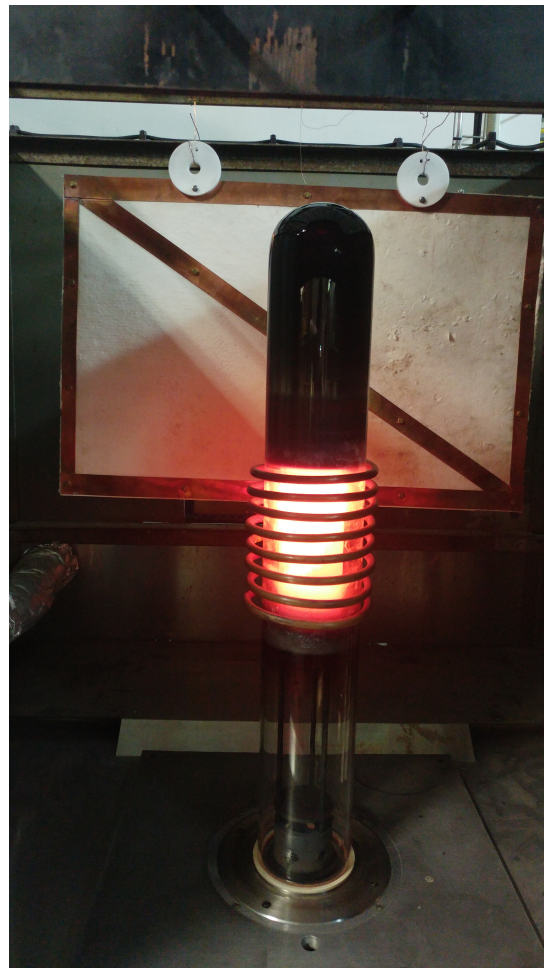
3. Popis zařízení



Obrázek 3.3: Přední panel generátoru



Obrázek 3.4: Difuzní pumpa

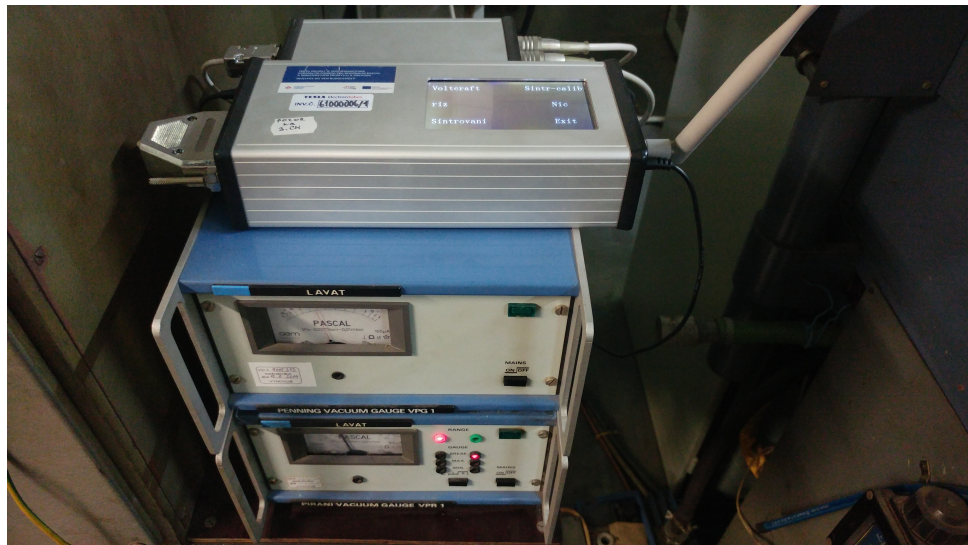


Obrázek 3.5: Zvon v cívce při provozu



Obrázek 3.6: Řídicí počítač a senzorová krabice

3. Popis zařízení



Obrázek 3.7: Penningy a počítač



Obrázek 3.8: Oba Penningy

3.1 Generátor

Jedná se o polovodičový generátor pro indukční ohřev HFR15 od firmy Rajmont s maximálním výkonem 15kW. Generátor má několik analogových vstupů pro ovládání a případně signalizaci [19]:

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	Řídicí analogový signál
DIN	2	Referenční zem
DIN	G,5	Stínění
DIN	3	Ovládání ohřev zap/vyp
DIN	4	Referenční napětí

Tabulka 3.1: Vstupy a výstupy generátoru

Ostatní porty jsou buď přivedeny na zem a nebo na 24V. Ovládání vypnutí/zapnutí ohřevu je využito k ukončení procesu pomocí počítače. Indikace zapnutého generátoru není využita, předpokládá se, že měřicí zařízení je zapnuto až po samotném generátoru. Generátor se za normálního provozu nevypíná. Všechny tyto signály jsou binární hodnoty 0-24V. Konektor DIN je používán čistě pro řízení výkonu generátoru. Využívá se hodnoty **0—10 V, 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 případ chyby v ovládacím systému a umožňuje převzít kontrolu nad zahřívacím procesem.

3.2 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. Difuzní pumpa je také výrazně pomalejší nežli rotační. Při vypnutí pump se systém sám částečně napustí, ovšem nedosáhne atmosférického tlaku. Z tohoto důvodu je systém opatřen napouštěcím tlačítkem pro vrácení systému na atmosférický tlak, aby šlo jednoduše sundat křemíkový zvon.

Jeden uzavíratelný spoj je mezi difuzní pumpou a křemíkovým zvonem umožňující udržení vakua uvnitř difuzní pumpy i při sundání křemíkového zvonu. Druhý přepojovatelný spoj je mezi rotační pumpou, difuzní pumpou a křemíkovým zvonem. Tento spoj umožňuje napuštění křemíkového zvonu na atmosférický tlak a zároveň udržení vakua uvnitř difuzní pumpy. Toto umožňuje rychlejší dosažení požadovaného vakua při vyndávání poslední vsázky a při nandávání nové.

3.3 Měřicí sestava

Pro měření teploty je využíván pyrometr. Výstupem teploměru je rozdíl napětí oproti zemi. Teploměr od firmy Keller MSR má minimální teplotu 500 °C, kterou indikuje i při nižších teplotách. Nepřesnost měření je pro nás zanedbatelná ($\pm 0,3\%$ nebo 4 °C) [13].

Pro měření tlaku jsou využity dva přístroje založené na principu Penningova manometru (tlakoměru). První je pouze orientační se stupnicí od 1 kPa do jednotek Pa. Pomocí něj je schopen operátor říci, kdy lze zapnout difuzní pumpu. Druhý je v rozpětí 0,5 Pa až 5 μ Pa a je kalibrován každý rok pro přesnost $\pm 2\%$. Sensory pro oba manometry jsou umístěny pod křemíkovým zvonem [20].

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

3.4 Řídící počítač

Řídící počítač je alix3d2 od firmy PC Engines Gmbh, na kterém je operační systém Linux. K počítači je připojen dotykový displej 6 × 10 cm 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 [21]. Celou sestavu je možno připojit k interní síti jak pomocí konektoru RJ-45 (Ethernet), tak pomocí Wi-Fi připojení, pro které je možno připojit anténu na výstupní anténní konektor. Dále je možno využít pro komunikaci RS232 z boku počítač. Posledním konektorem je CAN37, kam jsou vyvedeny ostatní spoje jak od Alixu, tak od LabJacku podle následující tabulky.

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 3.2: Konektor COM37 z počítače

Piny 20 a 21 se používají pro řízení výkonu generátoru a pro jeho spouštění. 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 rychlosti procesu to není nutné. Knihovny pro ovládání karty LabJack jsou napsány v jazyce C.

3.5 Hardware

Vstup pro ovládání výkonu generátoru je analogový 0—10V, kde je tento rozsah rozpočítán na 0—100% výkonu generátoru. Byly zváženy dvě možnosti řízení - návrh hardware čistě pro přímé řízení systému bez pomoci počítače a řízení počítačem. První varianta obnášela návrh řídicího obvodu bez počítače, který by rovnou četl výstupní napětí senzorů a převáděl je přímo na řídicí napětí pro generátor. Tato možnost byla nakonec zavrhnuta ze dvou důvodů: vyšší finanční náročnost a již fungující počítač s možností ovládat kartu LabJack, která má zabudovaný analogový výstup v rozsahu 0 — 5V.

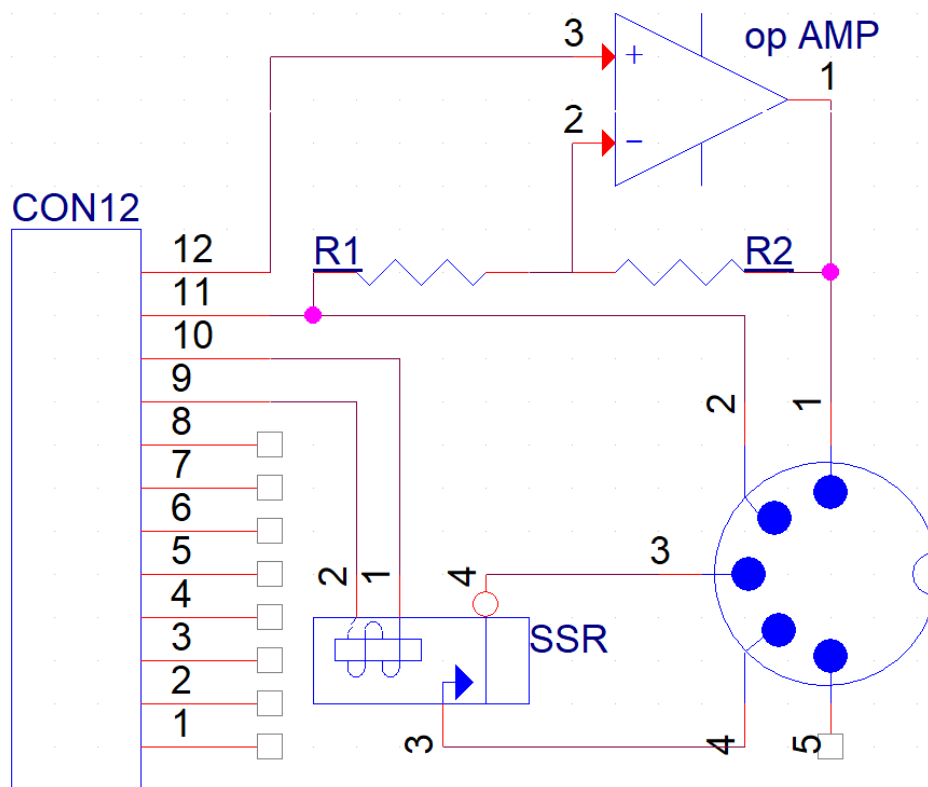
Výstupy 0 — 5V z LabJacku byly vedeny z portu DAC1 a DAC2 s referenční zemí GND [21].

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 5 V (maximum je přibližně 4,96 V). Typ operačního zesilovače byl použit z důvodu dostupnosti dané součástky na skladě firmy.

Při tvorbě zesilovače se objevil problém znemožňující integrovat ho přímo do obalu k počítači, protože napájení do této části má jen 10 V. Těchto 10 V by bylo dostačujících, ale operační zesilovač má maximální saturační napětí o něco menší než je jeho napájecí, řádově o 0,1 V [24]. 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, které má hodnotu 14 V. 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.

Pro připojení řídicího signálu pro spuštění generátoru byl využito SSR relé KSD203AC2. Toto relé je řízeno z LabJacku a spíná kontakty DIN 3 a DIN 4. Při spojení těchto dvou kontaktů je systém v zapnutém stavu a při rozpojení je vypnutý.



Obrázek 3.9: Vytvořený obvod uvnitř zesilovací krabice

3.6 Software

Celý software je napsán v jazyce Perl, kde bylo již hotové 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. 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 následně volat funkce z knihovny pro LabJack.

Kapitola 4

Modelování

4.1 Matematický model teploty

Při konstantním objemu a tlaku můžeme změnu teploty modelovat jako

$$C\dot{T} = Q, \quad (4.1)$$

kde C je tepelná kapacita tělesa, T je teplota a Q je dodané teplo. Dále změnu energie našeho systému můžeme vyjádřit jako

$$Q = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}, \quad (4.2)$$

kde Q_{in} je energie vydaná generátorem a Q_{out} je energie vyzářená do okolí [15]. Ztráta tepla může probíhat pomocí tří různých principů: vedením, prouděním a sáláním. Ztráta tepla vedením probíhá přes držák výrobku a má rovnici

$$\frac{Q}{t} = \frac{kA(T_h - T_c)}{d}, \quad (4.3)$$

kde $k = 1.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ je měrná tepelná vodivost uhlíku [35], A (m^2) je plocha přenosu, d (m) je vzdálenost přenosu, t (s) je čas a T_h a T_c (K) jsou teploty teplejší a chladnější části. V tomto případě je držák konstruován jako tři dlouhé tenké uhlíkové tyče. Výsledné hodnoty pro výpočet pak jsou $A = 18 \text{ cm}^2$ a $d = 35 \text{ cm}$. Z těchto čísel dostáváme, že i při extrémních vnějších a vnitřních teplotách, které se mohou vyskytnout v našem systému ($1600 \text{ }^\circ\text{C}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$), se touto cestou neztratí ani 1% výkonu generátoru. Z důvodu uzavřené nádoby a vysokého vakua neprobíhá ztráta tepla prouděním. Můžeme proto uvažovat, že systém pouze teplo vyzářuje (sálá) do okolí. energii vysálanou do okolí můžeme vyjádřit pomocí Stefan-Boltzmannovy [11] rovnice

$$\varepsilon\sigma A(T^4 - T_o^4) = Q_{\text{out}}, \quad (4.4)$$

kde A (m^2) je velikost povrchu, ze kterého se vyzářuje, T (K) je teplota tělesa, T_o (K) je teplota okolí, ε je emisivita tělesa a $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ je Boltzmannova konstanta [11]. Vstupní výkon je dodáván do systému pomocí generátoru, jehož výkon přímo regulujeme. Tuto proměnou nazveme P_w (W). Dále tedy můžeme uvažovat z rovnice (4.2), že $Q = P_w - Q_{\text{out}}$. Dosazením do rovnice (4.1) a využitím rovnice (4.4) dostáváme rovnici

$$\dot{T} = \frac{1}{C}(P_w - \varepsilon\sigma A(T^4 - T_o^4)), \quad (4.5)$$

která nám ukazuje závislost změny teploty na momentální teplotě tělesa, okolní teplotě prostředí a dodávaném výkonu.

4.2 Matematický model pump

Rychlost pumpování lze vyjádřit takzvanou pump-down rovnicí

$$t = \frac{V}{q} \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right), \quad (4.6)$$

kde t (s) je čas, V (m³) je objem, q (m³/s) je rychlost čerpání pumpy, p_0 je počáteční tlak a p_1 je konečný tlak [2]. Rovnici je možno upravit do tvaru

$$q = \frac{V}{t} \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right), \quad (4.7)$$

pomocí něhož jsme schopni změřit rychlost čerpání q pro určité hodnoty tlaku p_0 a p_1 . Následně jsme schopni použít upravenou verzi rovnice (4.6) k získání rychlosti poklesu tlaku. Z rovnice

$$p_1 = p_0 e^{-\frac{qt}{V}} \quad (4.8)$$

vidíme, že p_1 je funkcí času a počátečního tlaku a jsme tedy schopni spočítat tlak, který bude v systému po zvoleném čase. Rovnici pro látkové množství [5]

$$\dot{n}RT = qP, \quad (4.9)$$

kde T (K) je absolutní teplota, P (Pa) je momentální tlak, R (J/mol · K) je plynová konstanta pro vzduch a n (mol) je látkové množství, můžeme přepsat jako

$$\dot{n} = \frac{qP}{RT}, \quad (4.10)$$

čímž dostáváme vyjádření derivace látkového množství. Vzhledem k tomu, že q je rychlost, tak je nutno vždy určit správně znaménko. Pokud tlak klesá, bude hodnota záporná.

4.3 Matematický model tlaku

Poměr tlaku a teploty plynu popisuje rovnice ideálního plynu

$$PV = ZnRT, \quad (4.11)$$

[8] kde P (Pa) je absolutní tlak, V (m³) je objem, T (K) je absolutní teplota, $R = 8,314$ (J/(mol · K)) je plynová konstanta pro vzduch a n (mol) je látkové množství. Z je faktor stlačitelnosti daného plynu v závislosti na tlaku a

Teplota (K)	100 kPa(Z)	500 kPa(Z)
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 4.1: Faktor stlačitelnosti pro vzduch Z [8]

teplotě. V našem případě je plyn vzduch, jehož hodnoty Z jsou v přiložené tabulce 4.3.

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, které měříme. Nejvíce konverguje k 1 v případě vysoké teploty a nízkého tlaku, což je přesně náš případ.

V těchto případech je možno psát

$$PV = nRT, \quad (4.12)$$

což je rovnice ideálního plynu. Alternativní verzí k této rovnici je

$$PV = mR_{\text{specific}}T, \quad (4.13)$$

což je rovnice upravená pro specifický plyn. Zde $R_{\text{specific}} = 258 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ je specifická plynová konstanta pro vzduch.

Dále můžeme rovnice (4.12) a (4.13) upravit a zderivovat z čehož dostáváme rovnici

$$\dot{P}V + \dot{V}P = \dot{T}nR + \dot{n}TR, \quad (4.14)$$

popřípadě její alternativu

$$\dot{P}V + \dot{V}P = \dot{T}mR_{\text{specific}} + \dot{m}TR_{\text{specific}}, \quad (4.15)$$

kde se vyskytuje derivace objemu, která je v našem systému nulová. Z rovnic (4.12) a (4.13) osamostatníme nR , respektive mR a dosadíme

$$\dot{P} = \dot{T} \frac{P}{T} + \dot{n} \frac{TR}{V}, \quad (4.16)$$

$$\dot{P} = \dot{T} \frac{P}{T} + \dot{m} \frac{TR_{\text{specific}}}{V}, \quad (4.17)$$

čímž dostáváme dvě možné rovnice pro vyjádření \dot{P} . Díky rovnici (4.10) můžeme (4.16) přepsat

$$\dot{P} = \dot{T} \frac{P}{T} + \frac{qP}{V}, \quad (4.18)$$

čímž se zbavíme derivace n . Z teplotní části můžeme dosadit rovnici (4.5), čímž získáváme

$$\dot{P} = \frac{1}{C}(P_w - \varepsilon\sigma A(T^4 - T_o^4))\frac{P}{T} + \frac{qP}{V}, \quad (4.19)$$

popřípadě

$$\dot{P} = \frac{1}{C}(P_w - \varepsilon\sigma A(T^4 - T_o^4))\frac{P}{T} + \dot{m}\frac{TR_{\text{specific}}}{V}, \quad (4.20)$$

což jsou dvě možné diferenciální rovnice systému, z nichž bude nutno vybrat jednu. V této rovnici C , V , A , ε , σ a R_{specific} jsou konstantní. Dále P a T jsme schopni měřit a P_w jsme schopni přímo ovládat. Poslední dvě \dot{m} a q jsou funkce ovlivněny rychlostí pump, které systém vypouštějí. Funkci q jsme schopni změřit a aproximovat. Dále je možno jí vyjádřit jako funkci tlaku $q(P)$. Díky tomu jsme schopni rovnici (4.19) přepsat jako

$$\dot{P} = \frac{1}{C}(P_w - \varepsilon\sigma A(T^4 - T_o^4))\frac{P}{T} + \frac{Pq(P)}{V}, \quad (4.21)$$

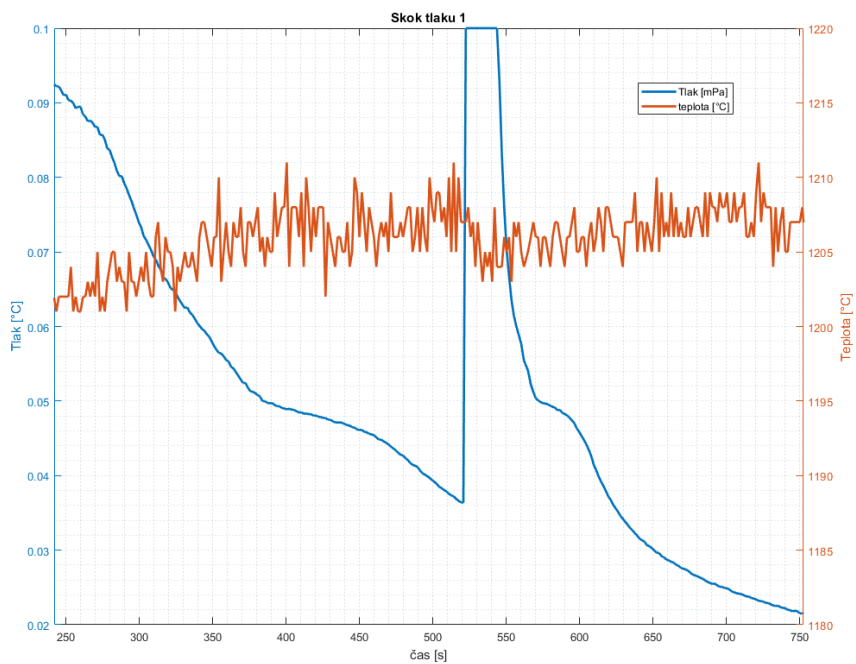
což je i nadále nutno upravit, protože systém není odplyněn. Toto zaplynění, anglicky outgassing, je způsobeno jak uvolňováním plynů z povrchu materiálu vakuové komory, tak i netěsnostmi v systému [25]. Do celé rovnice se dá zakomponovat jako

$$\dot{P} = \frac{1}{C}(P_w - \varepsilon\sigma A(T^4 - T_o^4))\frac{P}{T} + \frac{Q_{\text{outgass}} - Pq(P)}{V}, \quad (4.22)$$

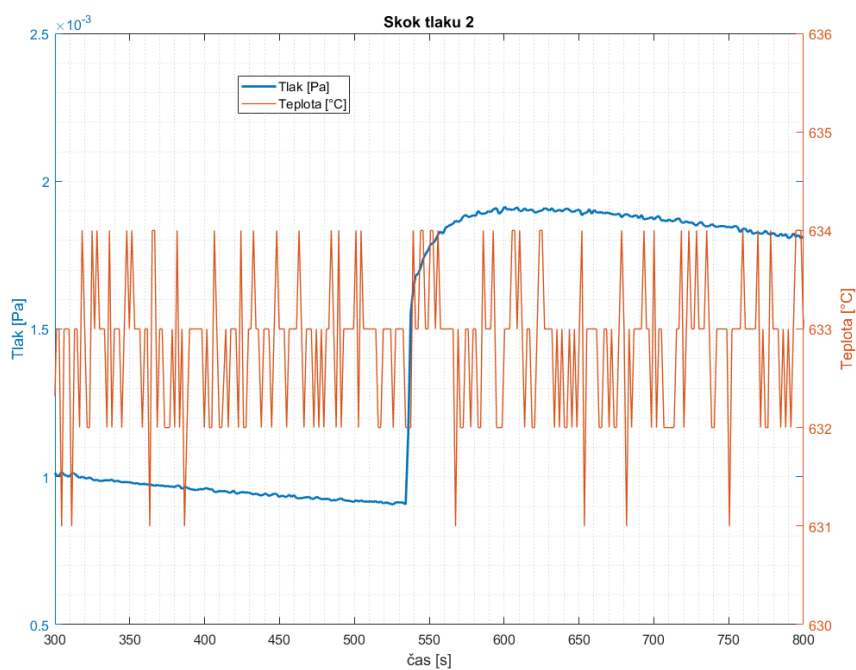
kde Q_{outgass} ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$), které jednotkově také koresponduje s jednotkou Watt (W), je výkon plynu, který se uvolní během procesu do vakuové komory z materiálů uvnitř nebo z netěsností materiálů. Dvě možné finální rovnice jsou (4.20) a (4.22).

4.4 Stavové rovnice systému

Systém je popsán dvěma stavovými rovnicemi (4.22) a (4.5). Jedna je teplotní a druhá tlaková. Teplota je závislá na vstupním výkonu do systému. Tlak je závislý jak na teplotě, tak na její změně, která je závislá na vstupním výkonu. Tlak na systém teploty sice má vliv ale řádově tak malý, že ho můžeme ignorovat. Při skokové změně tlaku o 4 řády větší, než je náš pracovní bod (až do saturace senzoru), se teplota snížila o 5°C (Obr.: 4.1). Tento experiment ukázal, že i při vysokém skoku tlaku se teplota nezvětší. Větší efekt tady mají plyny napuštěné do systému, které jsou studenější, což má za následek celkové ochlazení systému. Další měření ukázalo, že skoková změna tlaku z okolí našeho pracovního bodu 1 mPa na hodnotu 19 mPa, nezpůsobila žádnou zaznamenanatelnou změnu teploty (Obr.:4.2).



Obrázek 4.1: Odezva teploty na extrémní skok tlaku



Obrázek 4.2: Odezva teploty na skok tlaku v okolí pracovního bodu

Rovnicemi (4.5) a (4.22) můžeme tedy popsat systém jako

$$\dot{T} = \frac{P_w(t)}{C} + \frac{KT_0^4}{C} - \frac{K}{C}T(t)^4, \quad (4.23)$$

$$\dot{P} = \frac{KT_0^4 + P_w(t)}{C} \frac{P(t)}{T(t)} - \frac{q(P(t))}{V} P(t) - \frac{K}{C}T(t)^3 P(t) + \frac{Q_{\text{outgas}}}{V}, \quad (4.24)$$

$$y = P(t), \quad (4.25)$$

kde $P_w(t)$ (W) je vstupní výkon, T_0 (K) je teplota okolí, $T(t)$ (K) je teplota systému, $P(t)$ (Pa) je tlak systému, C (J/K) je tepelná kapacita, V (m³) je objem vakuové pumpy, $q(P)$ (m³/s) je rychlost pumpování (4.7), Q_{outgas} (Pa · m³/s) je výkon plynů uvolňovaných do vakuové komory. Konstantní hodnoty z rovnice (4.4) $\varepsilon\sigma A$ jsou vyjádřeny jako $K = 2.26812 \cdot 10^{-9}$ (W/K⁴).

Tyto stavové rovnice jsou nelineární. Můžeme se je pokusit linearizovat v okolí pracovního bodu, kde teplota bude v poloviční hodnotě svých extrémů (700 K až 1900 K), vstupní výkon také a tlak bude 0.003 Pa, Dostáváme tedy pracovní bod: $\mathbf{P} = [T_p, P_p, P_{wp}] = [1300 \text{ K}, 0.003 \text{ Pa}, 7500 \text{ W}]$. Linearizaci provedeme pomocí zderivování každé rovnice podle každé proměnné a pak dosazení pracovního bodu. Matice \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} a \mathbf{D} pro linearizovaný systém můžeme popsat jako

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial T} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial P} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial T} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial P} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -4\frac{K}{C}T_p^3 & 0 \\ -\frac{P_p}{CT_p^2}(P_{wp} + K(3T_p^4 + T_0^4)) & \frac{1}{CT_p}(P_{wp} - K(T_p^4 - T_0^4)) - \frac{1}{V}(q(P_p) + P_p \cdot q'(P_p)) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial u} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial u} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ \frac{P_p}{CT_p} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial y}{\partial T} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} & \left. \frac{\partial y}{\partial P} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial y}{\partial u} \right|_{T_p, P_p, P_{wp}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix},$$

Tyto matice můžeme využít při stavovém popisu systému ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{T} \\ \Delta \dot{P} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} + \mathbf{B} \Delta P_w, \quad (4.26)$$

$$\Delta y = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} + \mathbf{D} \Delta P_w, \quad (4.27)$$

Díky těmto rovnicím jsme schopni vytvořit lineární model systému. Pro porovnání jsem vytvořil i nelineární model systému [25].

4.5 Odplyňování systému

Hodnota Q_{outgass} je závislá na netěsnosti systému a zaplynění jeho částí. Tyto dvě veličiny nemůžeme změřit, ale netěsnost je alespoň částečně konstantní mezi jednotlivými běhy systému. Míra plynů v jednotlivých částech systému je nezměřitelná a pro každý běh systému jiná. Tato vlastnost způsobuje nepředvídatelné změny tlaku v systému. Principiálně jde o molekuly plynu, které jsou zachyceny v prázdných místech materiálu jak v bublinách, tak v prázdném prostoru mezi molekulami [29]. Částice plynu se poté z materiálů uvolňují díky jeho roztažnosti při větších teplotách a nízkých tlacích, kdy je umožněno plynu opustit materiál do vakuové komory.

Q_{outgass} je závislé na množství plynu uloženého ve výrobku a zbytku vakuové soustavy. Toto množství se ale uvolňuje ze všech materiálů při různých teplotách a tlacích [28]. Výhodou je, že je možno ho alespoň částečně eliminovat. Pokud jsou všechny materiály vystaveny vakuu, je větší část těchto plynů odstraněna před procesem sintrace.

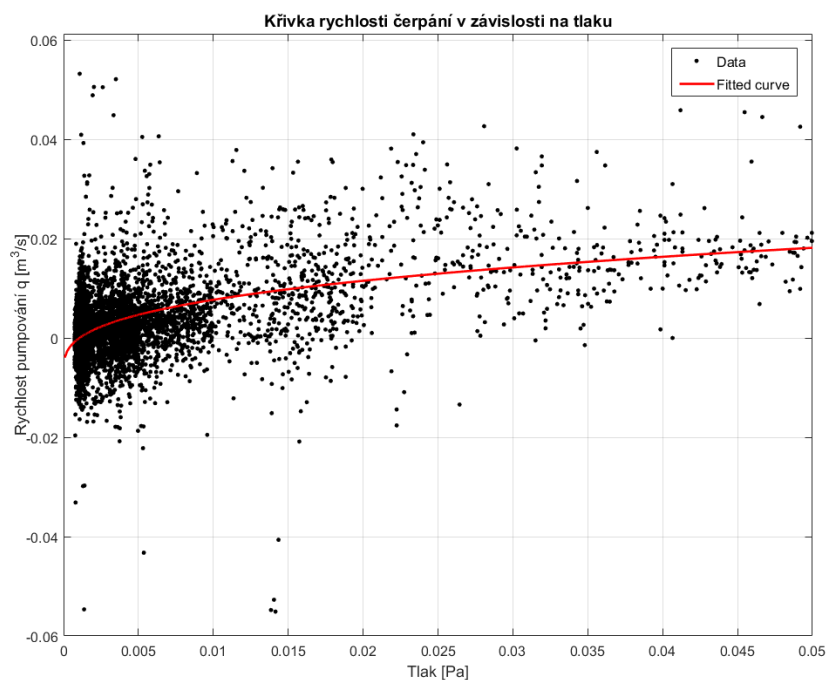
Q_{outgass} způsobuje problémy s překročením maximálního povoleného tlaku a vylučuje do systému plyn. Je tedy nutno vyčerpat větší množství plynů, což zatěžuje více pumpy, což prodlužuje celý proces sintrace. Tato vlastnost byla částečně eliminována zavedením nového pracovního postupu, kdy výrobky již potažené ZrC čekající na sintraci, se umístí do větší vakuové komory, kde se uchovává silnější vakuum než při sintraci. Do těchto komor se vejde velké množství mřížek, což umožňuje používat je jako úložný prostor. Jejich efektem je snížení celkových vnitřních uložených plynů, což má za následek nižší hodnoty Q_{outgass} [28]. Tato změna je pozorovatelná převážně díky tomu, že jsou skoky tlaků při změně teploty menší. Metoda ukládání výrobků ve vakuu před jejich sintrací, jako další krok výroby, byla zavedena na popud této práce. Grafy 5.3 a 5.4 nám ukazují, jaké jsou rozdíly mezi systémy, kde nebyl proveden tento proces a kde ano. Oba jsou získány stejným PID regulátorem.

4.6 Rychlost čerpání

Pro výpočty tlaku bylo nejprve nutno změřit q . Toho bylo dosaženo pomocí využití rovnice 4.7, která nám umožní vypočítat hodnotu q při daném tlaku, čímž dostaneme hodnoty nutné pro další výpočty. Pro popis rovnice jsem zvolil mocninu, protože naprostá většina pump má průběh q mocniný [27]. Hodnota q je závislá na tlaku a je možno ji vyjádřit pomocí funkce, která byla zvolena aproximací

$$q(P) = 0.07953x^{0.4196} - 0.004331. \quad (4.28)$$

Funkce q , jak je vidět na grafu (Obr.:4.3), je vytvořena z velkého množství průběhů, protože většina průběhů má jen několik málo hodnot, při tlacích větších než 15 mPa.

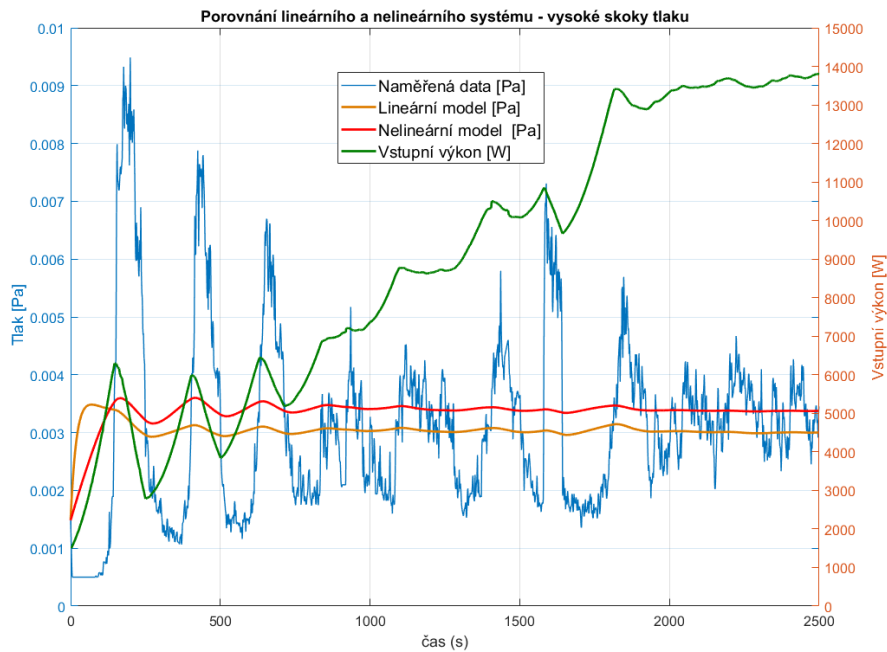


Obrázek 4.3: Vypočtená hodnota q v závislosti na tlaku.

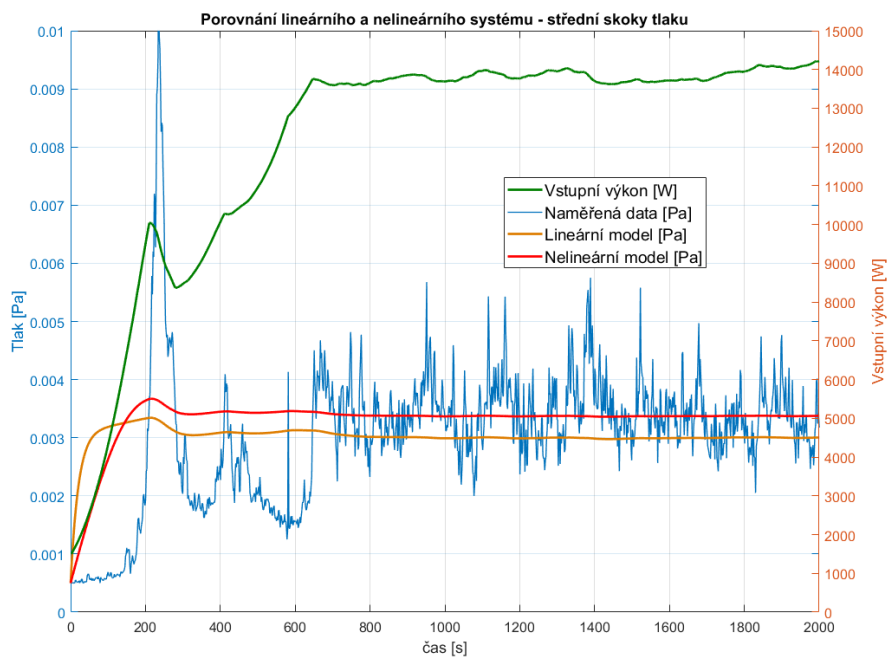
4.7 Verifikace

Z linearizační části dostáváme stavový popis našeho systému, který můžeme porovnat s naměřenými hodnotami a s nelineárním modelem vytvořeným z nelineárních stavových rovnic.

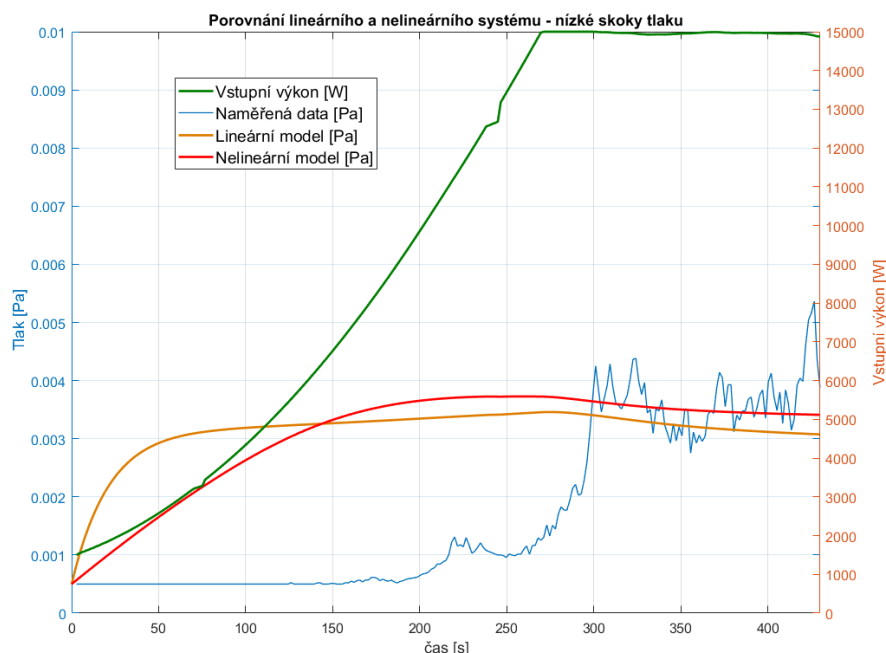
Porovnááme původní naměřené hodnoty, lineární model a nelineární model. Vliv veličiny Q_{outgass} je vidět na naměřených hodnotách oproti modelům, které se chovají klidněji. Jsou zde porovnány tři různé průběhy systému s různým vlivem Q_{outgass} . Průběh, před kterým nedošlo k žádnému odplynění materiálů má největší změny tlaku (Obr.:4.4). V druhém průběhu došlo k částečnému odplynění uložením výrobku do vakuové komory před procesem sintrace (Obr.:4.5). Třetí průběh je opětovná sintrace materiálu, který už byl jednou vysintrován a byly z něj tak odstraněny všechny plyny (Obr.:4.6). Je zde vidět že lineární model nejlépe odpovídá průběhu, kde má Q_{outgass} malý nebo žádný efekt.



Obrázek 4.4: Porovnání systému tlaku s nelineárním a lineárním modelem.



Obrázek 4.5: Porovnání systému tlaku s nelineárním a lineárním modelem.



Obrázek 4.6: Porovnání systému tlaku s nelineárním a lineárním modelem.

4.8 Statické nelinearity teploty

Pro statickou část teplotního systému můžeme uvažovat, že derivace teploty bude nulová. To má za následek, že můžeme rovnici (4.5) přepsat jako

$$0 = P_w - K(T_{max}^4 - T_0^4), \quad (4.29)$$

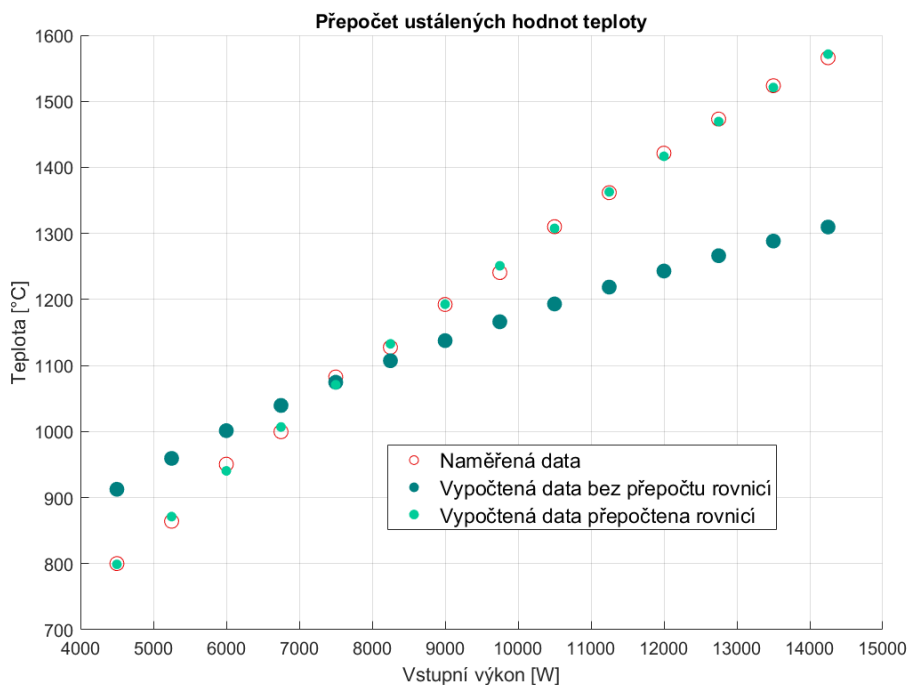
kde T_{max} (K) je ustálená teplota systému, P_w (W) je výkon a T_0 (K) je teplota okolí, která se pohybuje od 300 K do 335 °C. Hodnota T_0^4 je tím pádem zanedbatelná oproti T_{max} , která se pohybuje od 775 K do 1900 K a tudíž jí můžeme považovat za konstantu $T_0 = 300$ K. Dostáváme tedy rovnici

$$\sqrt[4]{\frac{P_w}{K}} - T_0^4 = T_{max}, \quad (4.30)$$

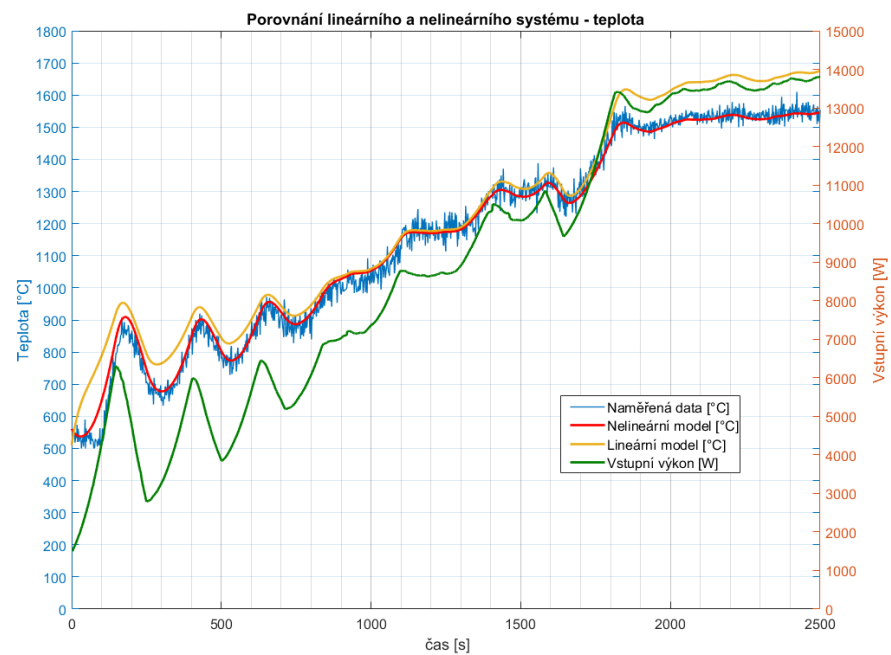
kteřá nám ukazuje hodnotu teploty T_{max} (K) v ustáleném stavu při daném vstupním výkonu. Vypočítané hodnoty se liší od našich naměřených v ustálených hodnotách, proto je nutno zjistit, co by mohlo být za problém. Změna T_0 i o 200 K ovlivní T_{max} v řádu jednotek K, tudíž tato konstanta veliký vliv nemá. Konstanta K posouvá všechny vypočtené hodnoty jako celek. Tento problém je nejspíše způsoben nelinearitou zesilovací části pro řízení a neschopností generátoru přesně odečítat zadané napětí. Výsledky můžeme upravit pomocí kvadratické funkce, kterou získáme pomocí funkce $fit()$ v MATLABu (Obr.:4.7). Pro naše hodnoty křivka odpovídá

$$T_{\text{chyba}}(T) = 0.001136T^2 - 1.2T + 897.5, \quad (4.31)$$

což nám umožní přesněji namodelovat průběh teploty (Obr.:4.8). Na tomto průběhu je vidět, že nelineární rovnice se velice podobá naměřeným hodnotám a linearizovaný model v okolí pracovního bodu také. Vyskytují se malé odchylky a to to převážně z důvodu nepřesného čtení řídicího napětí generátorem a indukce na řídicích kabelech. Malé odchylky v celkové teplotě můžeme pomocí statických nelinearit umístit tak, aby nám systém vycházel přesně.



Obrázek 4.7: Rozdíl po přepočítání pomocí funkce fit



Obrázek 4.8: Porovnání reálného systému teploty s nelineárním a lineárním modelem.

Kapitola 5

Řízení

Systém je nutno regulovat, aby dosáhl teploty alespoň 1500 °C a přitom nepřesáhl hodnotu tlaku 6 mPa. Regulace je udělána na 3 mPa a to z důvodu možných výkyvů tlaků, které by mohli přesáhnout maximální požadovanou hodnotu. Všechny nutné informace o systému máme a můžeme ho tedy začít analyzovat.

Z lineárního stavového popisu můžeme získat matici pozorovatelnosti a říditelnosti, póly a nuly systému, stabilitu a možnost vytvořit stavovou zpětnou vazbu [31].

Matici pozorovatelnosti \mathbf{O} a matici říditelnosti \mathbf{R} vytvoříme pomocí vzorce

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{BA}], \quad (5.1)$$

a pak porovnáme jejich hodnoty s naší maticí \mathbf{A} . Pokud se tyto hodnoty shodují, náš systém je pozorovatelný a říditelný. Hodnoty matic \mathbf{O} a \mathbf{R} jsou pro náš systém 2, což je stejné jako hodnota naší matice \mathbf{A} . Důsledkem tohoto je náš systém jak pozorovatelný, tak říditelný.

Póly systému získáme také pomocí MATLABu, a to příkazem $\text{eig}(A)$, který nám vrátí vlastní čísla matice \mathbf{A} , což jsou i póly systému. Nuly získáme příkazem $\text{zero}(\text{sys})$, který v našem systému, vytvořeném ze stavového popisu, najde nuly.

V našem systému jsou tedy póly umístěny v -0.0132 a -0.046 a jedna nula v $5.8831 \cdot 10^{-5}$.

Z pólů systému jsme schopni vyčíst, zda je systém stabilní, a to tak, že jsou všechny reálné složky našich pólů v levé polorovině - tedy záporné. V našem případě jsou oba póly záporné, ačkoli blízko počátku.

5.1 Regulátor

PID regulátor je regulátor složený ze 3 různých složek. Proporční, integrační a derivační. Proporční složka sleduje momentální odchylku od systému a přímo podle ní ovlivňuje vstup. Integrační sleduje, jak dlouho je odchylka od reference nenulová a vstup ovlivňuje podle toho. Derivační sleduje momentální rychlost změny a snaží se vstup podle toho usměrnit. Důsledkem tohoto je, že P ovlivňuje přímo rychlost a překmit systému, I eliminuje hodnotu ustálené

odchylky a D zlepšuje stabilitu systému. Problém PID je v derivační složce, která je vysoce citlivá na šum signálu [32]. Největší výhodou PID je, že je pořád relativně jednoduchý na návrh a lze ho navrhnout i při minimálních znalostech vnitřního fungování systému. Pokud ovšem máme model systému, lze ho navrhnout pomocí root locus metody [22].

Druhým druhem regulátoru je stavová zpětná vazba, která je založena na schopnosti měřit nebo vypočítat všechny stavové veličiny systému [33]. Největší výhodou je, že můžeme využít všech znalostí co o systému máme. Tato metoda využívá všech stavových proměnných, takže přidání více senzorů může být prospěšné. Funguje na principu přidání zpětné vazby do systému takovým způsobem, že změním pozici pólů systému dle naší libosti, ale neovlivníme nuly systému. Nevýhodou této metody je, že systém má následně jinou ustálenou odchylku, což má za následek to, že musíme přenásobit vstupní referenci nebo přidat integrační složku, která nám jako v případě PID regulátoru zajistí nulovou ustálenou odchylku. Stavové zpětná vazba nám dává možnost výběru pólů dle našich požadavků na systém, jako například maximální překmit nebo rychlost ustálení a zahrnutí nenulových počátečních stavů.

Další možné regulátory, které zde jen zmíním pro úplnost, jsou Lead, který je aproximací PD regulátoru, Lag, což je aproximace PI regulátoru, a pak fuzzy PID, což je regulátor, který nemá konstantní P, I a D složky při průběhu, ale volí je podle předepsané logické tabulky [34]. Další možností je regulátor, který již předem zná ideální průběh procesu. Takovýto regulátor je možno vytvořit pouze pokud v systému není žádná náhodná veličina, což v našem případě je $Q_{outgass}$. Tento regulátor funguje tak, že se na začátku procesu vypočte optimální průběh všech stavových veličin a poté se pomocí dalšího, například PID, reguluje na tuto hodnotu. V našem případě by to znamenalo, že bychom vypočetli optimální teplotu nebo tlak v každém momentě a následně se na tuto hodnotu snažili regulovat pomocí PID regulátoru. Veliké výkyvy v tlaku způsobené $Q_{outgass}$ nám to ovšem neumožňují z důvodu neschopnosti je předvídat.

■ 5.1.1 PID

Regulátor PID navrhne pomocí metody root-locus, která nám umožní graficky znázornit umístění pólů a nul při zpětnovazebním zapojení regulátoru. Při umístění jednoho pólu do počátku a jedné reálné nuly dostáváme PID regulátor, který je nutno ladit [32]. Využijeme funkce $rltool(sys)$ v MATLABu, která nám umožní jednoduše pozorovat efekty umístěných pólů a nul. Póly je možno posouvat podle dle našich požadavků na překmit, rychlost ustálení, přirozenou frekvenci a útlum systému [22]. Takto vybrané požadavky je možno v $rltool$ zobrazit graficky, abychom vybrali správná umístění. Při návrhu a testování na modelu PID regulátor funguje velice dobře, ale v reálném zapojení má problém s velkými výkyvy tlaku v systému, které není schopen dostatečně rychle kompenzovat (Obr.: 5.2).

5.1.2 Stavová zpětná vazba

Regulace pomocí stavové zpětné vazby byla navržena pomocí posunu pólů do požadovaných míst [33]. Póly zvolíme tak, aby byl systém kriticky tlumen, tudíž $\zeta = 1$, a aby byl peak time 30 sekund. Dostáváme tedy póly $p_1 = -0.0891$ a $p_2 = -0.0068$. Zpětná stavová vazba nám umožňuje umístění pólů změnou celkové matice \mathbf{A} systému podle rovnice

$$\mathbf{A}_{new} = \mathbf{A} - \mathbf{BK} = \mathbf{A} - \mathbf{B}[k_1 \ k_2], \quad (5.2)$$

kde \mathbf{A} a \mathbf{B} jsou původní matice systému a \mathbf{K} je matice koeficientů. Koeficienty matice \mathbf{K} je možno v našem případě spočítat pomocí funkce MATLABu $K = place(\mathbf{A}, \mathbf{B}, [p_1 \ p_2])$, která nám přímo vrátí matici \mathbf{K} .

Nevýhoda tohoto řízení je nenulová ustálená odchylka. Původní zesílení soustavy jde popsat jako

$$P(0) = -CA^{-1}B + D = -4.4624e - 10 \cdot 10^{-10}, \quad (5.3)$$

zpětná vazba nám ale změnila matici \mathbf{A} a tudíž je nutno tuto hodnotu přepočítat

$$T(0) = -C(\mathbf{A} - \mathbf{BK})^{-1}\mathbf{B} + D = -4.4784 \cdot 10^{-10}, \quad (5.4)$$

z čehož vidíme že systém má menší ustálenou odezvu. Tento problém je možno vyřešit pomocí přenásobení vstupní reference hodnotou $T^{-1}(0)$, ale toto řešení není robustní a způsobuje další jiné problémy. Alternativou k tomuto je možnost využití integrálního řízení, které přidá integrátor regulační odchylky. Tento integrátor přidáme jako pól. Tento přenos spočítáme pomocí matice

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & -\mathbf{BK}_I \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

kde tato matice bude maticí \mathbf{A} výsledného systému. Musíme tedy získat koeficient K_I a to můžeme udělat například Ackermannovým vzorcem. Tento vzorec spoléhá na přepočítání matice \mathbf{A} a matice \mathbf{B} na větší podle vzorce

$$\mathbf{A}_{big} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{big} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

a následného umístění pólů. Pól vybereme "hodně vlevo" a to například $p_3 = -100$. Póly umístíme pomocí funkce $place(\mathbf{A}_{big}, \mathbf{B}_{big}, [p_1 \ p_2 \ p_3])$. Funkce vrátí matici se třemi hodnotami, které korespondují s $\begin{bmatrix} \mathbf{K} & K_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3868 & 7274200 & -22318 \end{bmatrix}$, kde K_I je koeficient pro integrátor [33].

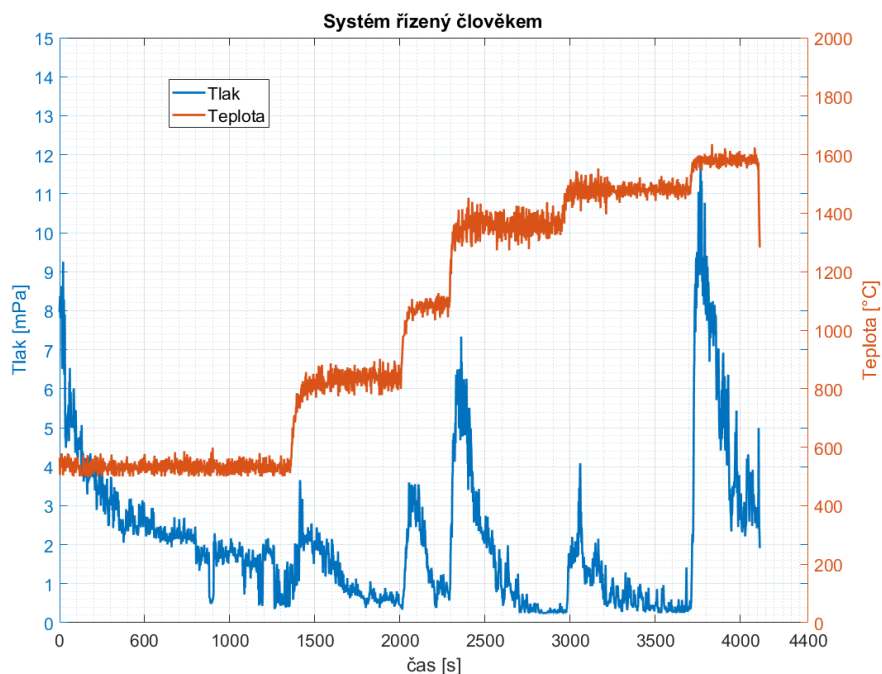
5.2 Výsledná měření

Systém řízený člověkem má průběh takový, že je vždy zvýšena teplota o hodnotu jakou obsluha uzná za vhodnou, a pak čeká, než se zvýšený tlak zase vrátí zpět na nízké hodnoty (Obr.:5.1). Toto má za následek relativně časté

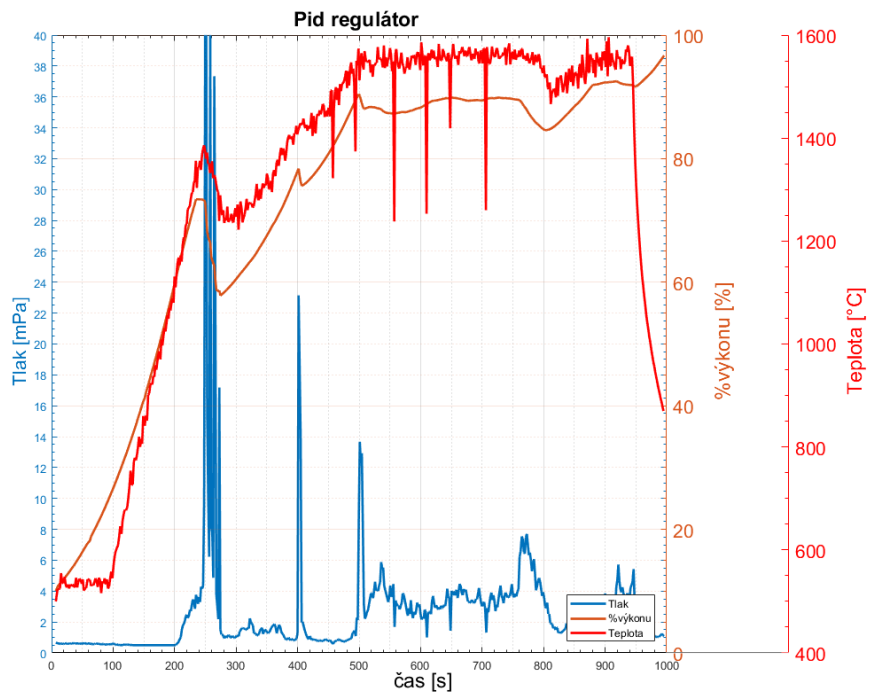
překročení maximální povolené hranice tlaku 6 mPa, a to i na dlouhé doby nebo při vysokých teplotách.

PID regulátor nebyl schopen zaručit zlepšení celkového množství procesů, kde nebyla maximální hranice tlaku překročena, ale alespoň byl schopen částečně reagovat na moc vysoký tlak. Regulace pomocí PID měla většinou problém pouze ze začátku procesu, kdy docházelo k většině překročení maximálního povoleného tlaku. Systém se po delší době ustálil a již nebyly přesahy tak časté ani veliké jako u lidské obsluhy. Problémem PID je neschopnost reagovat dostatečně rychle na prudké skoky tlaku. Pokud ale PID nastavíme aby reagovalo rychleji, tedy zvětšením P, počáteční doba ustálení se ještě zvýší a systém akorát více kmitá. Tato vlastnost je dobře vidět na grafu (Obr.:5.2). Další dva grafy (Obr.:5.3) a (Obr.:5.4) ukazují i jak vypadal průběh před a po zavedení procesu odplyňování výrobku před sintrací.

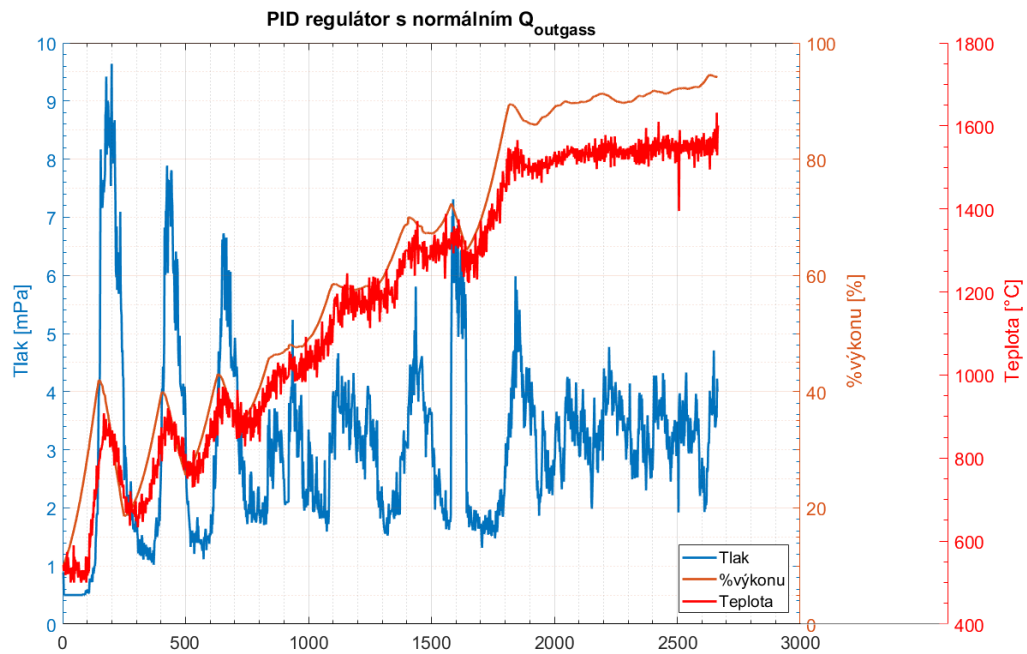
Regulace pomocí stavové zpětné vazby jsou přesnější díky větším a rychlejším akčním zásahům do systému (Obr.:5.5). To umožnilo regulaci i v případě, kdy systém nebyl předem vypuštěn (Obr.:5.6), jako bylo nutno dělat u PID regulátoru. Tato vlastnost byla dosažena malou úpravou algoritmu, a to tak, že hodnota na integrátoru je resetována až do doby než klesne tlak poblíž pracovního bodu. Toto omezení je podobné jako anti-windup u PID regulátoru.



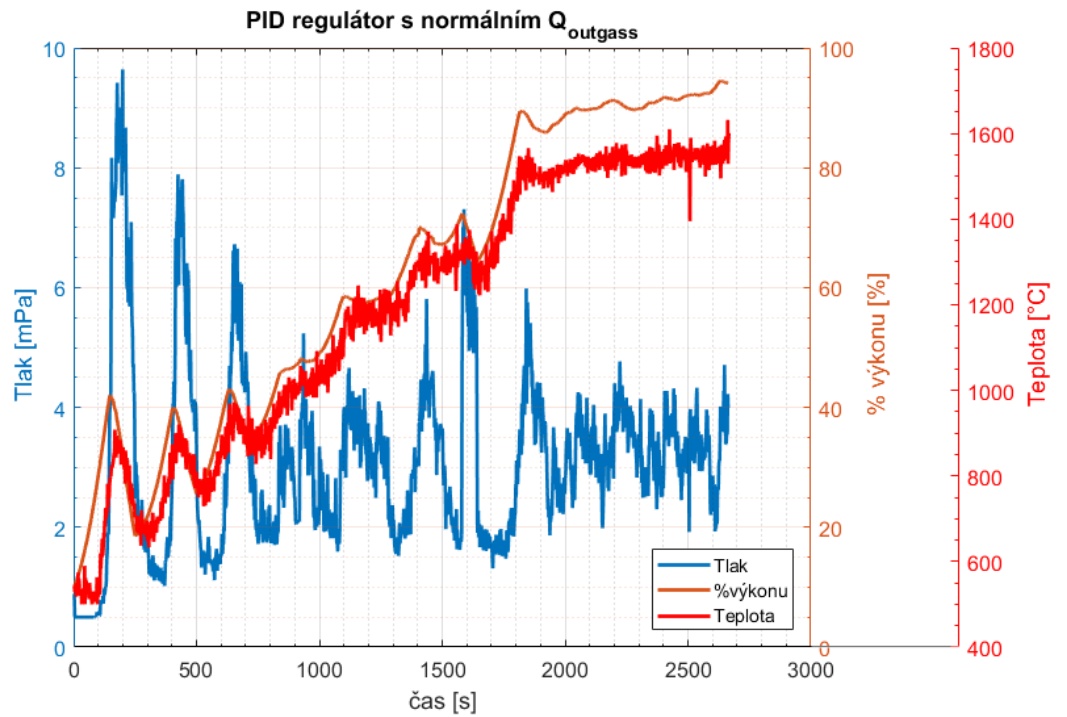
Obrázek 5.1: Průběh systému řízeného člověkem



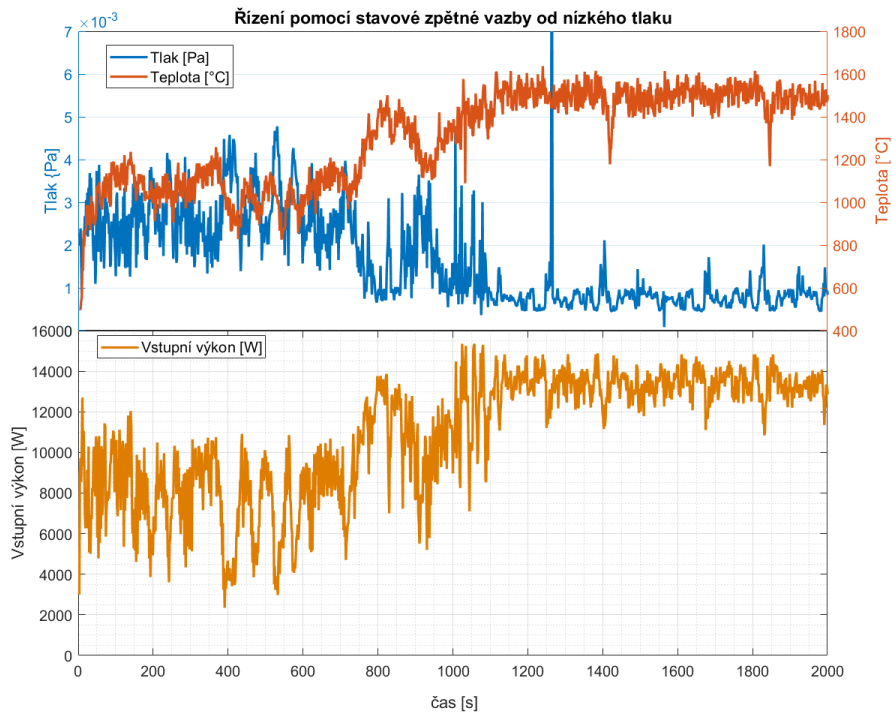
Obrázek 5.2: PID regulátor, který několikrát přesáhne povolenou hodnotu 6 mPa



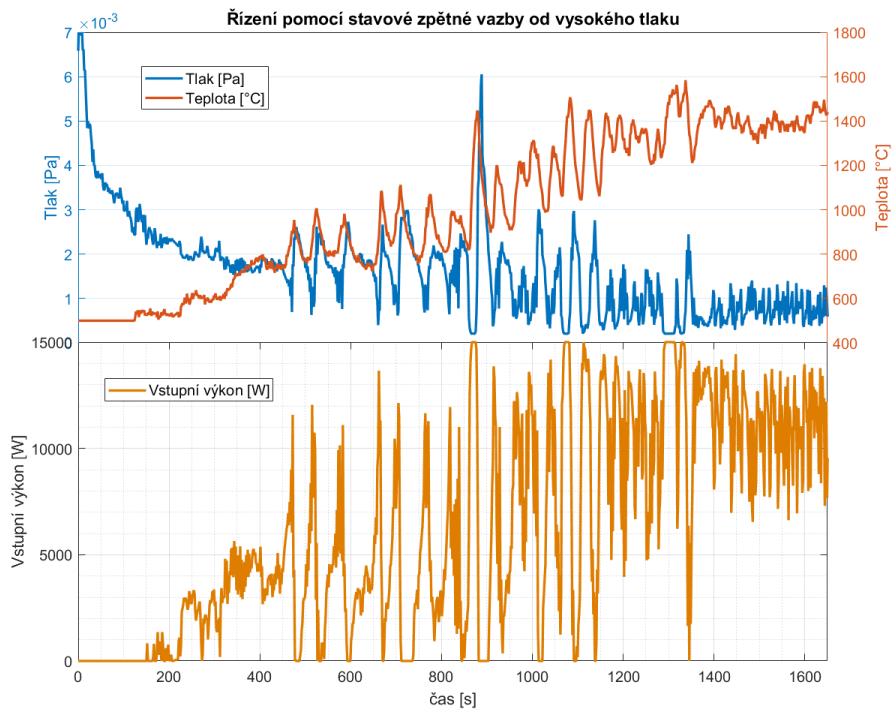
Obrázek 5.3: Průběh systému, kde $Q_{outgass}$ nebylo zmenšeno



Obrázek 5.4: Průběh systému, kde $Q_{outgass}$ bylo zmenšeno uložením ve vakuové komoře



Obrázek 5.5: Řízení stavovou zpětnou vazbou při nízkém počátečním tlaku



Obrázek 5.6: Řízení stavovou zpětnou vazbou při vysokém počátečním tlaku

Kapitola 6

Závěr a porovnání výsledků

Systém s PID regulátorem byl ve firmě implementován v polovině roku 2017 v průběhu celozávodní dovolené. Tato metoda neměla veliký efekt na vylepšení rychlosti průběhu nebo jeho správnost, ale umožnila automatické řízení. Toto umožnilo běh systému i v dobách nepřítomnosti kvalifikovaných pracovníků pro řízení systému, například na nočních směnách a dobách mezi směnami, nebo jejich pracovní neschopnosti. Celý proces se zjednodušil tak, že jej podle jednoduchého manuálu dokáže ovládat většina zaměstnanců. Celý postup procesu je v přílohách (viz A).

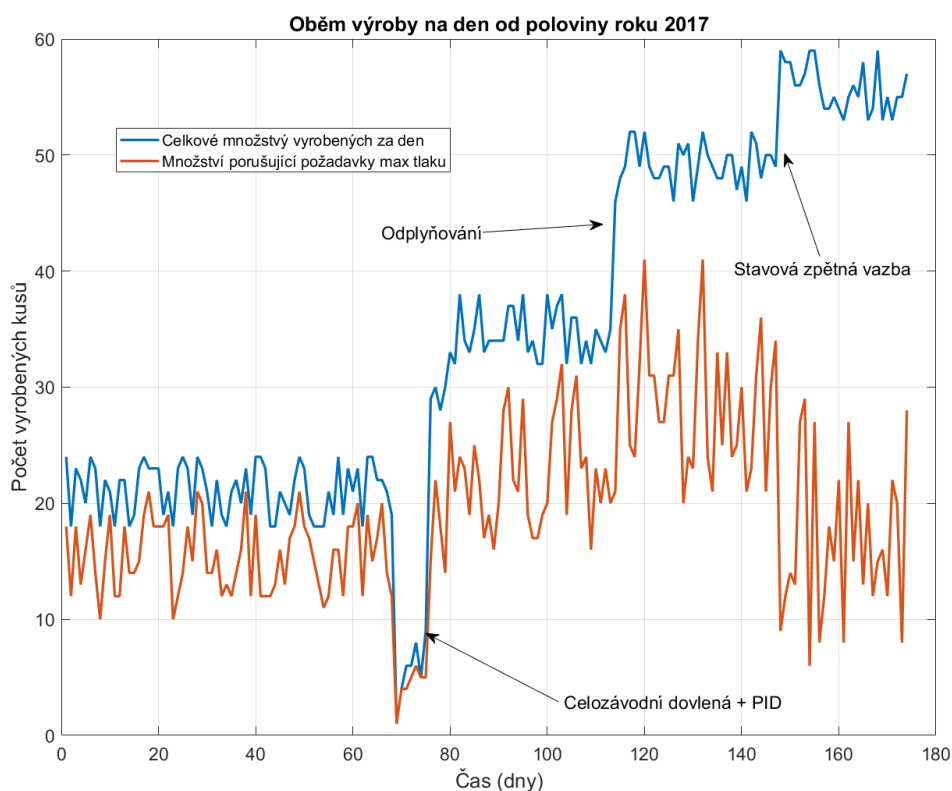
Dalším pokrokem v procesu bylo zavedení odplynění materiálů před sintrací. Z důvodu záporných vlivů plynů usazených v materiálech na proces sintrace se hledala metoda, jak tyto plyny potlačit. Na popud této práce byla zavedena metoda pro odplynování. Princip spočívá v umístění čerstvě vyrobených polotovarů pro sintraci do vakuových komor, které jsou většího rozměru a jsou schopny dosáhnout většího vakua, než pece na sintraci. Polotovary jsou tedy skladovány uvnitř vakuových komor po dobu jednoho týdne. Firma má volných vakuových komor 5, přičemž většina z nich je původně z výrobních linek již zrušených, nebo používaných na výrobu takřka nevyráběných produktů. Tato metoda byla zavedena v průběhu října 2017.

Díky přidání tohoto simultánního procesu se snížilo množství plynů v materiálech (Obr.:5.3, 5.4). Méně plynu v materiálech má za následek to, že ho pumpy při sintraci nemusí tolik vyčerpat ze systému, což efektivně zrychlilo proces a snížilo celkový průměrný čas kdy byl tlak v nepovolených hodnotách.

Poslední fází v prosinci 2017 byla implementace stavové zpětné vazby (SZV) jako regulátoru, která měla za následek zvýšení počtu průběhů, které vůbec nepřesáhly maximální povolený tlak, snížení chybovosti ještě o něco více a urychlení sintrace výrobků, které v sobě nemají skoro žádné plyny.

6.1 Porovnání dat

Správnost průběhu našeho systému můžeme měřit dvěma měřítky. Jedním z nich je kolik procent procesů dodrží podmínky nepřekročení tlaku (CH_1). Druhým je kolik průměrně procent času z celkového běhu systému překročilo tuto hodnotu (CH_2). Dále můžeme sledovat, jak dlouho průměrný proces



Obrázek 6.1: Statistika objemu výroby za druhé pololetí 2017

běží (t) a kolik výrobků je jedno průměrné stanoviště schopno udělat za den (A).

změna	t [min]	CH_1 [%]	CH_2 [%]	A [ks]
žádná	103	26.5	28.4	20
přidání PID	98	35.1	47.6	34
zavedení odplynění	70	41.3	11.9	49
změna na SZV	64	70.1	4.2	56

Tabulka 6.1: Porovnání denních průměrů

Z tabulky a grafu (Obr.:6.1) je vidět, že celková propustnost vzrostla o téměř trojnásobek. Celkově se procesy drží dobře i s nízkým tlakem, kde většina chyb je způsobena buď chybou měření, nebo malým přesahem povoleného tlaku na pár sekund. CH_1 , neboli procento průběhů bez přesahu povoleného maximálního vakua, se nám nepodařilo snížit, a to převážně z důvodu vysokých špiček tlaku, které se tu a tam vyskytnou. Jedna taková špička je vidět na obrázku (Obr.:5.5), kde je maximální povolená hodnota přesažena na 2 sekundy.

Příloha A

Návod pro řízení procesu

Základní postup pro řízení procesu sintrace [18]:

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 chladicí 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.
11. Na měřicím počítači zvolit tlačítko "Řízení"
12. Pomocí klávesnice zadat výrobní číslo elektronky a potvrdit.
13. Přepnout vypínač na přední straně generátoru do polohy "Auto".
14. Počkat do konce procesu, který bude ohlášen nápisem na display počítače nápisem "Hotovo".
15. Pokud je nutno převzít ovládání v průběhu sintrace nebo po ukončení procesu, přepnout vypínač na přední straně generátoru do polohy "Manual"

16. Po ukončení procesu vypnout počítač a měřící aparaturu.
17. Pumpy a voda musí zůstat v provozu!
18. Po vychladnutí přepnout vakuové ventily do polohy "Zavřeno".
19. Napustit systém napouštěcím vypínačem.
20. Sundat křemíkový zvon a vyndat v rukavicích vsázku.

Příloha B

Obsah přiloženého CD

1. Samotná práce v PDF
2. Manuál k zařízení Penning
3. Manuál a datasheet k zařízení LabJack
4. Manuál a datasheet k počítači Alix
5. Kód řídicího programu - Kód
6. Kód knihoven pro LabJack - Kód
7. Fotografie systému - Obrázky
8. Kódy MATLABu pro tvorbu grafů a fitů - Kód
9. Data pro fitování q - Data - Qfit
10. Data pro fitování statické nelinearity T - Data - Tfit
11. Ostatní data ze kterých byly vykreslovány grafy - Data - Ostatní
12. Data s výsledky výroby za druhou polovinu roku 2017 - Data
13. README.txt, krátké vysvětlení souborů v různých složkách - Kód a Data

Příloha C

Rejstřík

A

Analogové řízení, 18
Alix, 17

E

Elektronka, 5

I

Ideální plyn, 21
Indukční ohřev, 18

K

Keller, 17

L

Labjack, 17

N

Návod, 17
Nelinearita, 28 , 37

O

Oxidace, 6

P

Pec, 15
Pumpy, 15
Pyrografit, 6
Penning, 16

R

Rychlost čerpání, 25

S

Sintrace, 6
SSH, 18
Stavové rovnice, 22

T

TESLA, 5
Trioda, 5

V

Verifikace, 26

Z

Zirkon Karbid, 6

Příloha D

Literatura

- [1] ISERMANN Rolf, *Digital Control Systems Volume 1: Fundamentals, Deterministic Control*, Second, Revised Edition, 1989, Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-86419-3
- [2] LEWIN Gerhard, *Fundamentals of vacuum science and technology*, 1965, New York, McGraw-Hill Book Co.
- [3] BALÍK Karel a SHNEIDER Peter, *Pyrolytický grafit - nový materiál ve vakuové technice*, 1977, Praha, Tesla Vršovice
- [4] KOHL Walter H., *Materials and techniques for electron tubes*, 1960, New York: Reinhold Pub.
- [5] SANTA Barbara, *Vacuum Science and Technology [online]*, 2003, University of California, [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.chemengr.ucsb.edu/~ceweb/courses/che142242/pdfs/lecture_14_chex42.pdf
- [6] NOLAN Peter J., *Fundamentals of college physics. 2nd ed. Dubuque*, 1995, Iowa: Wm. C. Brown Publishers, Kapitola 17, ISBN 06-972-3138-0
- [7] BOCA Raton, *Extractive metallurgy of molybdenum*, 1992, CRC Press, s. 298-300, ISBN 0849347580
- [8] *Ideal Gas Law. The Engineering Toolbox [online]*, [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/ideal-gas-law-d_157.html
- [9] POLLOCK B. D., *The vaporization behavior and thermodynamic stability of zirconium carbide at high temperature 1*, 1961, The Journal of Physical Chemistry, DOI: 10.1021/j100823a007, ISSN 0022-3654. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/j100823a007>
- [11] *Stefan-Boltzmann Law. HyperPhysics [online]*, 2016, Georgia State University, [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/stefan.html>

- [26] JYH-CHENG Jeng Dr., *Linearization of Nonlinear Models [online]*, [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <http://www.cc.ntut.edu.tw/~jcjeng/Linearization.pdf>
- [27] *Basic Pumping Concepts [online]*, [cit. 2017-01-04], Dostupné z: https://www.lesker.com/newweb/technical_info/vacuumtech/pumps_00_basicconcept.cfm
- [28] MOSHEY E. A., *A compilation of outgassing data on vacuum materials*, 1982, Princeton University - Plasma physics Laboratory. Dostupné z: http://ncsx.pppl.gov/NCSX_Engineering/Materials/VacuumMaterials/Outgassing_Data.pdf
- [29] JOGL Christian, *Standard Outgassing [online]*, 2015, [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.aac-research.at/en/outgassing/>
- [31] CHIN Harrison Dr., *Feedback Control System Design [online]*, 2009, Design of Electromechanical Robotic Systems, [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-017j-design-of-electromechanical-robotic-systems-fall-2009/lecture-notes/MIT2_017JF09_control.pdf
- [32] PARCHIZADEH Hassan a HAYNES Barry Dr., *Modern Control Systems: PID Controller [online]*, University of Portsmouth, [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: http://mosaic.cnfolio.com/ParchizadehB307Files/files.xml?action=download&file=PID_Tutorials_2011_12.pdf
- [33] ŠEBEK Michael, *Stavové metody, Automatické řízení 2017*, 2017, Praha
- [34] *Steam Engineering Tutorials: Basic Control Theory [online]*, Spirax Sarco Limited, [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/basic-control-theory/basic-control-theory.aspx>
- [35] *Thermal Conductivity of common Materials and Gases. The Engineering Toolbox [online]*, [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html

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