

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

KONSTRUKCE A ŘÍZENÍ LABORATORNÍHO MODELU PECE

Bc. Patrik Horký

Diplomová práce
2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Patrik Horký**
Osobní číslo: **I13463**
Studijní program: **N2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Konstrukce a řízení laboratorního modelu pece**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl práce:

Cílem práce je konstrukce a realizace laboratorního modelu pece a vytvoření jeho řídicího systému. Řídicí systém bude zvolen a následně navržen na základě v práci konkretizovaných požadavků na ovládání pece pomocí zadaných teplotních křivek. Dále bude realizován software pro ovládání a diagnostiku modelu pece (v libovolném programovacím jazyku resp. vývojovém prostředí).

Teoretická část:

Rešerše zadaného tématu, popis technického řešení konstrukce modelu pece, popis základních metod pro řízení teploty v peci na základě zadaných teplotních křivek. Implementační část: Postup návrhu vlastní konstrukce modelu laboratorní pece. Vývoj software pro ovládání a diagnostiku činnosti pece ve zvoleném vývojovém prostředí.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

BALÁTĚ, J. 2004. Automatické řízení. 2 vyd. Praha: BEN - technická literatura. 663 s. ISBN 80-7300-148-9.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. 2005. Modern Control Systems. 10 vyd. New Jersey: Prentice Hall. 881 s. ISBN 0-13-127765-0.

HLAVA, J. 2000. Prostředky automatického řízení II: analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy. Praha: ČVUT. 160 s. ISBN 80-01-02221-8.

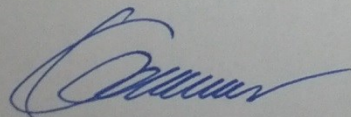
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Libor Kupka, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **29. října 2014**

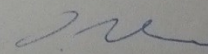
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2015**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. listopadu 2014

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 9. 4. 2015

Podpis

Poděkování

Děkuji mému bratrovi Martinovi za pomoc při stavbě prototypu a za poskytnutí dílenského vybavení. Dále pak rodině a přítelkyni za projevenou podporu při studiu. Dále také vedoucímu práce Ing. Liboru Kupkovi, Ph.D. za účelné rady.

V Pardubicích dne 9. 4. 2015

Podpis

ANOTACE

Práce se zabývá konstrukcí prototypu elektrické pece. Součástí práce je výběr vhodných prostředků automatického řízení a jejich uvedení do provozu. Cílem je regulace teploty uvnitř reálně postaveného zařízení, pomocí PID regulátoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrická, odporová pec, PID regulace, experimentální metody návrhu PID

TITLE

CONSTRUCTION AND CONTROL OF LABORATORY FURNACE PROTOTYPE

ANNOTATION

The thesis deals with construction of electrical furnace. Part of works deals with proper hardware picking and building of solution. The goal is temperature control inside the furnace using PID regulator.

KEYWORDS

Electrical, resistance furnace, PID regulation, Experimental methods of PID synthesis

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam značek	9
Seznam ilustrací	10
Seznam tabulek	12
ÚVOD	13
1 KAPITOLA – TEORETICKÁ ČÁST	14
1.1 SDÍLENÍ TEPLA	14
1.2 ELEKTROTEPELNÁ ODPOROVÁ ZAŘÍZENÍ	16
1.2.1 Přímý odporový ohřev	16
1.2.2 Nepřímý odporový ohřev	21
1.3 MATERIÁLY PRO ELEKTROTEPELNOU TECHNIKU	30
1.3.1 Materiály pro konstrukci pecí	30
1.3.2 Materiály pro topné spirály	35
1.3.3 Žárovzdornost materiálů	38
1.4 ODPOROVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	39
1.4.1 Měřicí řetězec	39
1.4.2 Odporové teploměry	41
2 KAPITOLA – PRAKTICKÁ ČÁST	44
2.1 NÁVRH	44
2.1.1 Výpočet tepelných ztrát	46
2.1.2 Celkový potřebný příkon	48
2.2 KONSTRUKCE	49
2.3 ŘÍZENÍ	60
2.3.1 Syntéza regulátoru	61
3 KAPITOLA – REGULAČNÍ POCHODY NA REÁLNÉM ZAŘÍZENÍ	66
3.1 POSTUP SYNTÉZY REGULÁTORU	66
4 ZHODNOCENÍ REGULACE TEPLoty	74
5 ZÁVĚR	75
LITERATURA	76
Seznam příloh	78

Seznam zkratk

HW	hardware
MNČ	metoda nejmenších čtverců
PID	proporcionálně, derivačně integrační
SW	software

Seznam značek

c	měrná tepelná kapacita, $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C	tepelná kapacita, $J \cdot K^{-1}$
$e(t)$	regulační odchylka
I	elektrický proud, A
m	hmotnost, Kg
P	tepelný výkon, $J \cdot s^{-1}$
q	hustota tepelného toku, $W \cdot m^2$
Q	teplo, J
R	elektrický odpor, Ω
r_0	zesílení regulátoru
t	čas, s
T_D	derivační časová konstanta
T_I	integrační časová konstanta
T_n	doba náběhu, s
T_u	doba průtahu, s
$y(t)$	výstup ze soustavy
λ	součinitel tepelné vodivosti, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
σ	Stefan-Bolzmanova konstanta

Seznam ilustrací

Obr. 1.1 – Princip přímého ohřevu	17
Obr. 1.2 – Závislost příkonu na teplotě	18
Obr. 1.3 – Schéma achesenové	19
Obr. 1.4 – Schéma elektrodových solných lázní	20
Obr. 1.5 – Komerová pec	22
Obr. 1.6 – Vozová pec	23
Obr. 1.7 – Hlubinná pec	24
Obr. 1.8 – Žárovzdorný ventilátor	24
Obr. 1.9 – Schéma zvonové pece	25
Obr. 1.10 – Schéma pásové pece	27
Obr. 1.11 – Válečková pec	28
Obr. 1.12 – Karuselová pec	29
Obr. 1.13 – Šamotové desky	32
Obr. 1.14 – Magnezitová staviva	33
Obr. 1.15 – Rozestavená pec, vyráběná doma kutily	34
Obr. 1.16 – Použití materiálu Cerablanket	34
Obr. 1.17 – Schéma článku ve tvaru písmene U	37
Obr. 1.18 – Schéma měřicího řetězce	39
Obr. 1.19 – Lineární regresní přímka	40
Obr. 1.20 – Přejchodové charakteristiky systému prvního řádu	41
Obr. 1.21 – Závislosti měrného odporu kovů na teplotě	42
Obr. 1.22 – Platinový teploměr Pt100	43
Obr. 2.1 – Schéma průchodu tepla složenou stěnou	46
Obr. 2.2 – 3D nárys pece	49
Obr. 2.3 – 3D bokorys pece	50
Obr. 2.4 – 3D půdorys pece	50
Obr. 2.5 – 3D model pece	51
Obr. 2.6 – Technický list materiálu Isover FireProtect 150	52
Obr. 2.7 – Těleso pro ohřev	53
Obr. 2.8 – Rozměry tělesa	53
Obr. 2.9 – Regulátor KS90-1	54
Obr. 2.10 – Rozměry regulátoru KS90-1	54
Obr. 2.11 – Schéma vstupů/výstupů regulátoru KS90-1	55

Obr. 2.12 – Schéma použitého teploměru MTR 11FS	56
Obr. 2.13 – SSR Carlo Gavazzi RJ1P23V30E	58
Obr. 2.14 – Schéma zapojení SSR s ohmickou zátěží	58
Obr. 2.15 – Blokové schéma řídicího systému	60
Obr. 2.16 – Odečtení periody netlumených kmitů	62
Obr. 2.17 – Relé ve zpětné vazbě	63
Obr. 2.18 – Přechodová charakteristika	64
Obr. 2.19 – Naměřená přechodová charakteristika	68
Obr. 2.20 – Aproximace přenosem prvního řádu s dop. zpožděním	69
Obr. 2.21 – Přechodová charakteristika aproximačního přenosu (4. řád)	69
Obr. 2.22 – Aproximace soustavou drhého řádu	71
Obr. 2.23 – Tečna přechodové charakteristiky aproximačního přenosu	71
Obr. 2.24 – Kmitavý regulační pochod	72
Obr. 2.25 – Optimální regulační pochod	73

Seznam tabulek

Tab. 1.1 – Měrné tepelné kapacity některých látek	15
Tab. 1.2 – Směsi soli pro solné lázně	20
Tab. 2.1 – Základní požadavky na prototyp	45
Tab. 2.2 – Vlastnosti teploměru MTR 11FS.....	57
Tab. 2.3 – Základní vlastnosti SSR Carlo Gavazzi RJ1P23V30E.....	58
Tab. 2.4 – Závislost výstupu na vstupu SSR	59
Tab. 2.5 – Komponenty řídicího systému.....	60
Tab. 2.6 – Nastavené parametrů PID regulátoru metodou Ziegler - Nichols	63
Tab. 2.7 – Nastavení parametrů PID regulátoru pomocí přechodové char.....	64
Tab. 2.8 – Doba průtahu, doba náběhu, zesílení.....	72
Tab. 2.9 – Zesílení, integrační čas. konstanta.....	72
Tab. 2.10 – Funkční sada parametrů.....	73

ÚVOD

V této závěrečné práci je popsáno téma tepelných systémů a problematika elektrického odporového ohřevu. Automatizace je obor, ve kterém se kloubí konstrukce různých zařízení s matematickým aparátem, který stojí za jejich funkčností. Ani v této práci tomu nebude jinak. Tepelné děje jsou lidstvem využívány již od pravěku, kdy člověk poprvé rozšířoval použití ohně jako prostředku. Tyto procesy se dnes objevují v mnoha oblastech lidské činnosti a jejich regulovatelnost je mnohdy zásadní a nezbytnou součástí celku. Konkrétním projektem, který tato diplomová práce zpracovává, je model laboratorní pece s regulací teploty. Tato práce se bude skládat ze dvou částí– teoretické a praktické. V rámci teoretické části budou představeny možnosti konstrukce pecí a používaných materiálů, výpočty sdílení tepla, teorie tepelného ohřevu a zákonitosti měření teploty. V části praktické bude potom sestaven plně funkční model laboratorní pece. Dále bude uveden postup nastavení parametrů reálného PID regulátoru (PMA KS90-1). Součástí bude také seznam a popis použitého HW. Cílem práce je vytvoření uceleného průvodce stavby a zprovoznění tepelného zařízení – tedy pece, určeného k nespécifikované technologii. Hlavní motivací bylo osvojit si celý proces stavby a regulace reálného zařízení pro účely reprodukce zařízení ve větším měřítku v podnikání Umělecký slévač Martin Horký. Další motivací byl také fakt, že začínající inženýr v oboru automatizace by měl být schopen sám navrhnout, sestrojít a naprogramovat reálné pracující zařízení.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 SDÍLENÍ TEPLA

Na úvod je nutné vysvětlit několik základních pojmů, které se často vyskytují v problematice elektrotepelných systémů. Jsou to pojmy jako:

- Energie – schopnost termodynamické soustavy vykonávat práci
- Teplota – veličina, kterou lze vyjádřit změny vnitřní energie soustavy, jde tedy o energii vyměněnou mezi více systémy. Množství tepla potřebného pro ohřátí látky o hmotnosti m při teplotním rozdílu ΔT se dá popsat vztahem

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.2)$$

- Termodynamická teplota – je to stavová proměnná systému, která je mírou celkové vnitřní energie. Je to veličina kvantitativní. Tudíž se dá změřit a vyjádřit číslem
- Termodynamické zákony
 - Nultá věta termodynamiky – je zákonem zachování energie. Dvě neizolované soustavy, které jsou ve vzájemné interakci a rovnováze mají stejnou teplotu
 - 1. věta termodynamiky – definuje změnu vnitřní energie jako součet dodaného tepla a práce vykonané na systému, v diferencní formě podle vztahu

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (1.2)$$

- 2. věta termodynamiky – určuje směr, kterým se tepelná energie předává. Vždy od teplejšího tělesa k chladnějšímu. Udává celkovou změnu entropie systému jako součet změny entropie uvnitř systému a změny entropie přenesené do systému z jeho okolí
 - 3. věta termodynamiky – při teplotě absolutní nula je entropie látky nulová
- Tepelný výkon – Značí se P , $J \cdot s^{-1}$ a je roven tepelnému toku Φ . Jedná se o skalární veličinu vyjadřující teplo za jednotku času
- Hustota tepelného toku – vyjadřuje množství energie, procházející určitým průměrem za jednotku času. Lze vypočítat podle vztahu

$$q = \frac{dP}{dS} \quad (1.3)$$

- Tepelná kapacita – značena C , $J \cdot K^{-1}$. Tato veličina vyjadřuje množství tepla, kterým se těleso ohřeje o teplotu 1 K
- Měrná tepelná kapacita – jedná se tepelnou kapacitu 1 kg hmoty, značeno c , $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (Rada, 1985).

Z fyzikální podstaty různých látek plyne, že teplo potřebné k ohřátí 1 kg látky je u různých materiálů různé. Liší se tedy svou tepelnou kapacitou. Zde je tabulka měrných tepelných kapacit některých běžně se vyskytujících látek.

Tab. 1.1 – Měrné tepelné kapacity některých látek (Rada, 1985)

Látka	c , $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Látka	c , $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Voda	4187	Železo	450
Vzduch	1003	Měď	383
Etanol	2460	Zinek	385
Led	2090	Hliník	896
Suché dřevo	1450	Cín	227
Kyslík	917	Olovo	129
křemík	703	Zlato	129

U elektrotepelných systémů vzniká teplo přímým působením elektrického proudu. Tato přeměna energií, tedy elektrické energie na tepelnou, se děje s určitou účinností η . Celková tepelná energie potom závisí na příkonu elektrického zařízení a na čase.

$$Q = P \cdot t \quad (1.4)$$

Pokud platí vztah (1.2), lze oba vztahy zahrnout do jedné rovnice, znázorňující rovnováhu tepelné a elektrické energie

$$m \cdot c \cdot \Delta T = P \cdot \eta \cdot t \quad (1.5)$$

Z daného vztahu lze například vypočítat, jaký příkon musí zařízení mít, aby ohřálo 10 kg látky o určité měrné kapacitě z teploty 20 °C na teplotu 1200 °C, a to vzhledem k času ohřívání.

Šíření tepla

„Přenos energie (tepla) prostředím je realizován pomocí nosičů energie. Jsou to částice, které se v daném prostředí vyskytují, ale mají vyšší energii než částice v jejich

blízkosti, nebo se do daného prostředí dostanou z okolí. Z toho důvodu jsou druh, rychlost a způsob pohybu částic odlišené a závisí na typu prostředí.“ Tyto částice mohou být tedy částice jako elektrony či atomy atd. nebo také elektromagnetické vlny, přenášející částice pomocí fotonů (Rada, 1985).

„Existují dva konkrétní způsoby přemísťování částic (nosičů energie) a závisí na koncentraci látkových částic v daném prostředí. První způsob se uplatňuje zejména v prostředích s vysokou koncentrací částic (pevné nebo kapalně skupenství). Pak částice, které se pohybují proti gradientu hustoty energie, jsou v neustálém kontaktu s ostatními částicemi prostředí. Tato neustálá interakce mezi těmito částicemi se nazývá difúzí. Jedná se tedy o přirozený přenos tepla z míst s vyšší tepelnou koncentrací do míst s koncentrací nižší. Energie je odevzdávána prostřednictvím neustálých srážek mezi částicemi. Další varianta tohoto způsobu přenosu tepla nastává v proudících kapalinách, kde k přenosu energie pomocí difúze ještě přispívá přenos energie hmotností prostředí. Jedná se tedy o způsob přenosu difúzně-konvekční a závisí silně na rychlosti proudění tekutiny. Druhý a odlišný způsob přenosu energie se uskutečňuje v prostředí s nízkým obsahem částic. Přemísťování nosičů energie probíhá zářením. To může mít například formu světla“ (Rada, 1985).

Na základě těchto poznatků nám rozlišujeme 3 základní způsoby přenosu tepla

- Přenos tepla vedením (kondukce)
- Přenos tepla prouděním (konvekce)
- Přenos tepla sáláním (radiace)

1.2 ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ

1.2.1 Příímý odporový ohřev

U příímého odporového ohřevu vzniká teplo přímo průchodem vodivou, pevnou vsázkou nebo elektrolytem, který tuto vsázkou obklopuje. Uplatňuje se Jouleův zákon. Tedy ve vodiči o odporu R vzniká teplo Q , prochází-li jím za čas t elektrický proud I , A (Rada, 1985).

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \quad (1.6)$$

Výpočty pro návrh zařízení jsou nelehké. Komplikací je nelineární závislost fyzikálních vlastností vsázky a její teploty. Základem pro výpočty je tepelná bilance ve tvaru podle vztahu (1.7). Celkový potřebný výkon závisí na časovém průběhu ohřevu vsázky a zvětšuje se o tepelné ztráty. Platí pro něj vztah

$$Q = Q_u + Q_z, \quad (1.7)$$

kde Q_u je užitečné teplo,

Q_z – tepelné ztráty.

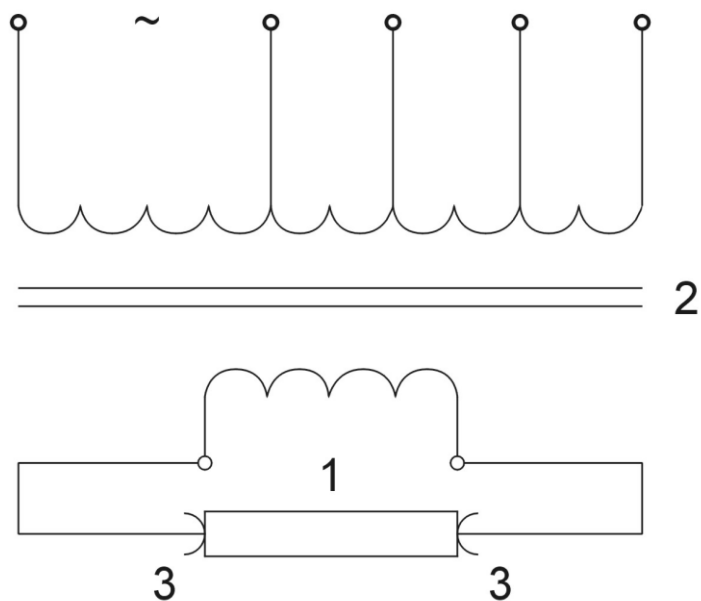
$$P \approx \frac{dQ}{dt} \quad (1.8)$$

Zařízení, která využívají přímý ohřev, lze rozdělit následujícím způsobem:

- zařízení pro ohřev pevné vsázky,
- zařízení pro ohřev tekuté vsázky.

Zařízení s přímým ohřevem

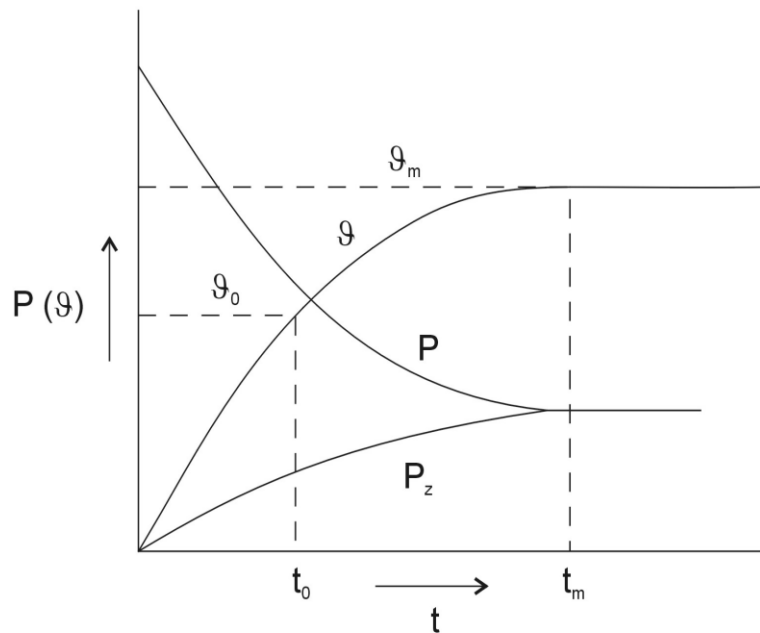
Principiálně platí, že abychom ohřivali tyč rovnoměrně v celé délce, musí být její délka nejméně 10 krát větší než je její průměr. „Do tyče 1 konstantního průřezu je z regulačního transformátoru 2 zaváděn kontakty 3 velký proud. Ohřev je velmi rychlý a účinný“ (Rada, 1985).



Obr. 1.1 – Princip přímého ohřevu (Hradílek, 2011)

„Optimální poměry nastávají, jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení. Tomu se blíží studená měděná tyč. Odpor oceli však stoupá až 7krát při ohřátí z 20 °C na 1200 °C. Aby impedanční přizpůsobení bylo přijatelné, zvyšujeme během ohřevu napětí na tyči souhlasně s růstem odporu přepínáním odboček na vstupním vinutí

transformátoru. Konce tyčí musí být pokud možno čisté, kontakty bývají měděné, chlazené vodou a jsou k ohřívání tyčí přitlačovány pneumaticky nebo hydraulicky“ (Rada, 1985).

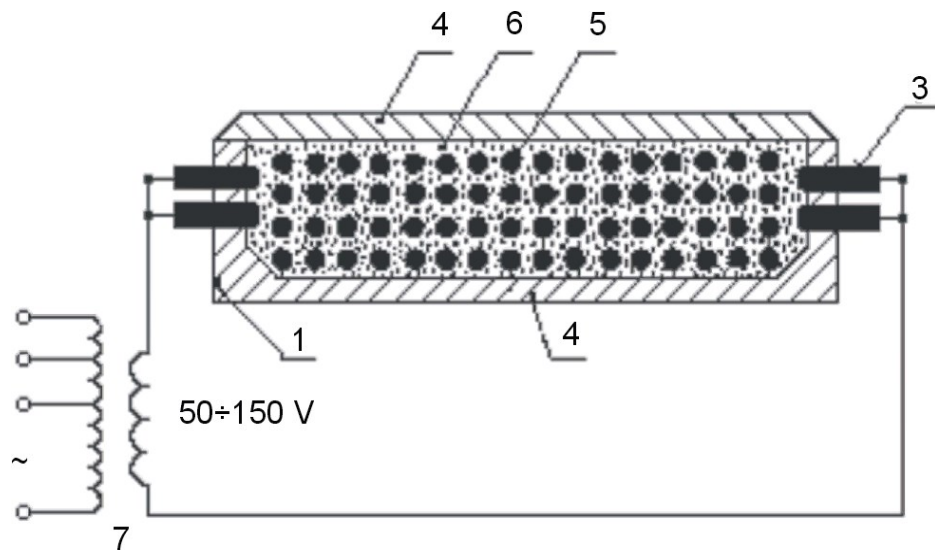


Obr. 1.2 – Závislost příkonu na teplotě (Hradílek, 2011)

Při ohřívání ocelové tyče dochází ke změnám příkonu v závislosti na teplotě, jako je tomu na obr. 1.2.

Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku

Grafit se vyrábí chemickým procesem zvaným grafitizace, který probíhá za teploty 2500 °C. Amorfni uhlík se při grafitizaci mění na grafit. Tento děj probíhá v tzv. Achesenových pecích. Schéma Achesenové pece je na obr. 1.3 (Rada, 1985).



Obr. 1.3 – Schéma achesenové pece (Rada, 1985)

- kde
- 1 – je dno pece,
 - 2 – čelní stěna,
 - 3 – grafitové bloky,
 - 4 – víko pece,
 - 5 – vsázka,
 - 6 – zásypová směs,
 - 7 – napájecí transformátor.

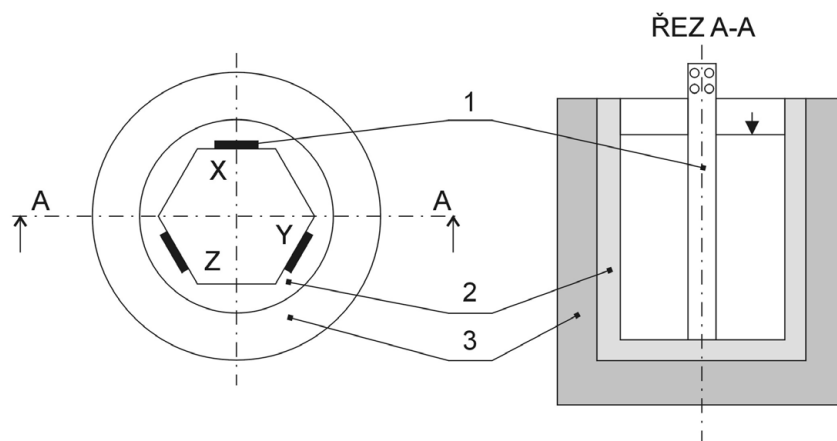
Hmotnost vsázky u těchto pecí je až 50 tun. Při délce pece až 20 m. Příkon transformátorů až do 10 MVA. Ohřev v těchto pecích trvá 2 až 4 dny, chlazení potom až 14 dní.

Elektrodové solné lázně

Pracovní teplota je zde až 1400 °C pro zpracování barevných kovů a slitin. Solné lázně se také používají k ohřevu ocelových součástí ke kalení.

Existují dva typy solných lázní

- Proud prochází jak vsázkou, tak elektrolytem. Znázorněno na obr. 1.4



Obr. 1.4 – Schéma elektrodoých solných lázní (Hradílek, 2011)

kde 1 jsou elektrody,

2 – kelímek,

3 – izolace kelímku,

- Vsázkou neprochází proud, příkon nezávisí na vsázce (Rada, 1985)

Následuje tabulka některých běžně používaných směsí solí pro solné lázně.

Tab. 1.2 – Směsi solí pro solné lázně (Hradílek., 2011)

Složení (%)	Teplota tavení (°C)	Rozsah použití (°C)
28NaCl + 72CaCl ₂	505	540-870
50Na ₂ CO ₃ + 50KCl	560	590-815
50NaCl + 50K ₂ CO ₃	560	590-815
50NaCl + 50K ₂ CO ₃	620	650-815
50CaCl ₂ + 50BaCl ₂	600	650-900
22NaCl + 78BaCl ₂	630	680-900
44NaCl + 56KCl	665	750-870
20KCl + 80BaCl ₂	750	850-1350

U solných lázní je hlavní výhodou rychlý, přesný a rovnoměrný ohřev bez přístupu vzduchu. To je dáno vysokým součinitelem přestupu tepla prouděním mezi vsázkou a elektrolytem (Hradílek, 2011).

1.2.3 Nepřímý odporový ohřev

U zařízení s nepřímým ohřevem odporovým vzniká teplo v topných spirálách, které jsou umístěny přímo v prostoru pece. Takto vzniklé teplo se přenáší do vsázky sáláním odporových, topných článků a vyzdívky, popřípadě vedením nebo prouděním atmosféry. Odporové pece (zařízení s nepřímým odporovým ohřevem) lze rozdělit podle několika kritérií. Podle teploty pece, atmosféry v pecním prostoru, použití nebo pohyblivosti vsázky (Hradílek, 2011).

Rozdělení pecí podle teploty

- Nízkoteplotní do 600 °C
- Středoteplotní od 600 °C do 1100 °C
- Vysokoteplotní nad 1100 °C

Podle atmosféry v prostoru pece

- S normální atmosférou (vzduch)
- S řízenou atmosférou (pro zamezení oxidace, pro nitridaci atd.)
- Vakuové pece

Podle použití

- Pro zpracování kovů
- Pro tavení (kovů, skla)
- Pro chlazení (skla)
- Laboratorní, pece pro domácnosti
- S infračerveným ohřevem

Pece podle pohyblivosti vsázky se dělí na stabilní, kde se vsázka nepohybuje a na pece s procházející vsázkou, kde se vsázka pohybuje (pece průběžné, pece s pohyblivým dnem) (Hradílek, 2011).

Zařízení s nepřímým ohřevem

Odporové pece se stabilní vsázkou

Existuje několik nejběžněji používaných pecí, kde se vsázka nepohybuje. Jsou to pece: komorové, vozové, šachtové, pokloповé, elevátorové, kelímkové tavicí (Hradílek, 2011).

Komorové pece

Tyto pece jsou velmi běžně používané právě díky své univerzálnosti. Je to jeden z nejstarších typů pecí. Odporové dráty jsou umístěny po stěnách i ve víku, někdy i v podlaze.



Obr. 1.5 – Komorová pec (Sklářský průmysl, 2015)

Pro tyto pece jsou typické dlouhé roztápěcí časy a obtížná udržitelnost konstantní teploty v celém pracovním prostoru pece. Staví se až do teploty 1400 °C. Odporové články bývají často z karbidu křemíku nebo materiálů zvaných cermety (Hradílek, 2011).

Vozové pece

Vozové pece jsou svojí konstrukcí podobné pecím komorovým, s tím rozdílem, že podlahu pece tvoří pohyblivý vozík, pohybující se po kolejkách či spárách. Konstrukčně jsou oproti komorovým pecím větší. Vsázka se tedy naloží na pohyblivý vozík vně pece a poté se přemístí po kolejkách do pracovního prostoru, který bývá přehřátý. Pro větší efektivitu práce bývají vozíky dva. Zatím co jeden se nakládá, druhý drží vsázku v peci. Tento typ pecí se ekonomicky vyplatí, pouze pokud se jedná o vsázky velkých rozměrů a s hmotností

přesahující 200 t. Výkon vozových pecí je potom v rozmezí 3000 kW až 5000 kW (Hradílek, 2011).



Obr. 1.6 – Vozová pec (Ethermtz, 2015)

Na obr. 1.6 je ukázka vozové žíhací pece společnosti E-THERM technologická zařízení.

Šachtové (hlubinné) pece

Osa šachtových pecí je svislá a průřez čtvercový. Vsázka se do pecí vkládá jeřábem z vrchu. Má tedy vstup navrchu a ne na boku, jak tomu je u pecí komorových. Šachtové pece jsou také obohaceny o žáruvzdorná svodidla, která chrání vnitřek před poškozením při zavádění vsázky. Pece jsou 10 až 20 metrů dlouhé a jsou velmi často zapaštěné přímo do podlahy. Dlouhé vsázky jsou při tepelném procesu drženy v závěsu. Pro co nejlepší cirkulaci vzduchu a tedy rovnoměrný ohřev se někdy přidávají ventilátory. Ovšem konstrukce ventilátorů pro vysoké teploty je náročná (Hradílek, 2011).



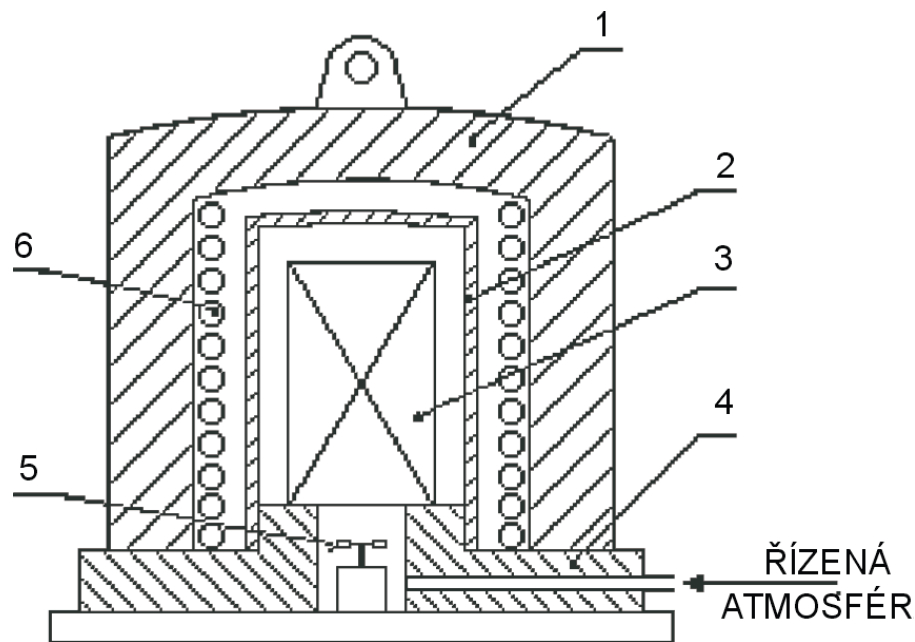
Obr. 1.7 – Hlubinná pec (Realistic, 2015)

Na obr. 1.7 je ukázka hlubinné pece, dále na obr. 1.8 se nachází ventilátor pro vysoké teploty. Ventilátor na obr. 1.8 se používá pouze do teploty 200 °C a jeho cena se pohybuje okolo 30 000 Kč.



Obr. 1.8 – Žárovzdorný ventilátor (Ventilátor – ventilátory, 2015)

Pokloповé (zvonové) pece



Obr. 1.9 – Schéma zvonové pece (Hradílek, 2011)

Schéma zvonové pece se nachází na obr 1.9,

- kde
- 1 – je topný poklop,
 - 2 – mufla,
 - 3 – vsázka,
 - 4 – pracovní plošina,
 - 5 – ventilátor,
 - 6 – topení.

Pokloповá pec se tedy vyznačuje tepelně izolovaným zvonem. Zde je vsázka kryta muflí, která chrání vnitřní prostor před lokálním přehřátím. Dále mufla zabezpečuje ochranu atmosféru. Ventilátor je zde opět pro rovnoměrnost ohřevu. V praxi se jedná o soustavu několika plošin a vsázek. Po skončení děje se zvon zvedne jeřábem a přemístí nad další vsázku. Pokloповé pece se konstruují až do výkonu několika set kilowatů (Hradílek, 2011).

Elevátorové pece

Tento typ pece patří mezi největší co do velikosti. Konstrukčně je koncipovaná tak, že pracovní komora se nachází nad úrovní podlahy a vsázka je do ní vyvezena hydraulickým válcem přímočarým, svislým pohybem směrem vzhůru. V úrovni podlahy jsou kolejnice, po kterých se pohybuje vůz s vsázkou a ve vhodném umístění pod pecí se vsázka vytáhne do

pece. Bývají často součástí složitější linky, kdy tvoří jeden článek celého procesu. Jsou konstruované do teplot od 1000 °C do teplot 1200 °C. Výkonově se navrhují od výkonu 500 kW do 2000 kW (Hradílek, 2011).

Kelímkové, tavicí pece

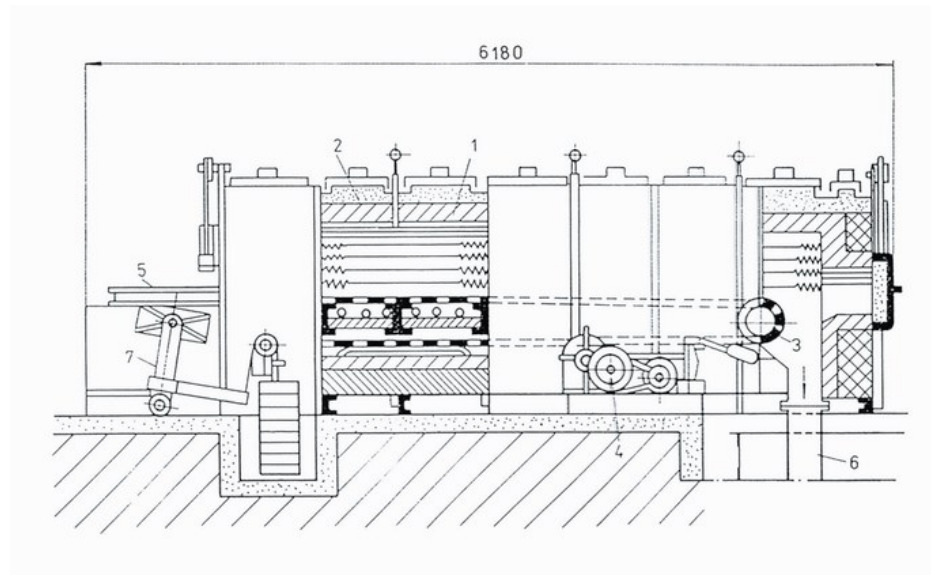
V těchto pecích se taví materiály s nižším bodem tání jako je Sn, Pb, Al, Zn a podobně. *“Kolem kovového nebo keramického kelímku je topné vinutí. Vně topení je tepelná izolace a kostra pece. Obvykle jsou tyto pece sklopné, aby se dal roztavený kov vylít. Tavicí vany jsou různých konstrukcí, mají např. na vnější straně vany topné vinutí s tepelnou izolací, nejsou sklopné (pro pozinkování, pocínování, alitaci atd.). Pro přetavování (egalizaci) hliníku mají topení ve stropě a při odlévání se naklápějí po otočných kladkách.”* (Hradílek, 2011).

Odporové pece průběžné

U odporových pecí průběžných se tedy, jak bylo zmíněno, vsázka pohybuje. Tyto pece jsou tzv. tunelového typu, kdy je celý tunel rozdělen na samostatně regulovatelné teplotní zóny. Protože je ve slévárenství často důležité přesné chlazení, na pec navazují tzv. chladicí tunely. Jsou to pece pásové, válečkové, narážecí, střešací, krokové, protahovací, bubnové či karuselové (Rada, 1985).

Pásové pece

Průběh je zprostředkován za pomoci pásů ze žáruvzdorného materiálu. Pásky jsou často chlazené vodou. Použití tohoto typu pece je na tepelné zpracování menších součástí do teploty 900 °C.



Obr. 1.10 – Schéma pásové pece (Rada, 1985)

- kde
- 1 – je žáruvzdorná vyzdívka,
 - 2 – topné články,
 - 3 – dopravní pás,
 - 4 – napínací zařízení,
 - 5 – podávací stůl,
 - 6 – prostor pro odebírání materiálu,
 - 7 – napínací zařízení.

Válečkové pece

Válečkové pece se konstruuji do teploty 900 °C. Jako transportní mechanismus zde slouží válečky z žáruvzdorných materiálů. Součástí těchto pecí je záložní zdroj energie, neboť válečky se za provozu nesmí zastavit (Rada, 1985).



Obr. 1.11 – Válečková pec (Ethermtz, 2015)

Narážecí pece

Tyto pece jsou navrhovány do 1000 °C. Vsázka se posouvá elektromechanicky a to tak, že pokud se zavede vsázka na vstupu, všechny současně se posunou o jednu pozici a zároveň na výstupu vypadne kus ohřátý (Rada, 1985).

Střásací pece

Jsou pece určené pro drobné vsázky a do 900 °C. Setrvačností se vsázka střásává a prostupuje dále pecí (Hradílek, 2011).

Krokové pece

„Krokové pece se staví pro ohřev velkých výkovků a odlitků na střední a vysoké teploty. Krokový mechanismus je mimo pracovní prostor pece. Při pohybu vpřed se vsázka pozdvihne a posune. Při pohybu vzad mechanismus klesne a připraví se na další krok vpřed, je poháněn hydraulicky nebo elektromotorem“ (Hradílek, 2011).

Protahovací pece

Jsou vyráběny pro tepelné zpracování drátů (ocel, barevné kovy), ty se pak pecí protahují. Probíhá tak například výroba smaltovaných drátů, kdy se protahování realizuje v několika smyčkách (Rada, 1985).

Bubnové pece

Obsahuje otáčivý buben, který je roztáčen motorem. Buben je velmi drahý, neboť je zde požadavek na určité mechanické vlastnosti a požadavek na žáruvzdornost. Jelikož se buben otáčením často namáhá, má omezenou životnost. Použití bubnových pecí je obvykle kalení či žíhaní malých součástí nebo štěpení slídy (Rada, 1985).

Karuselové pece



Obr. 1.12 – Karuselová pec (Zez Praha, 2015)

Karuselové pece se konstruují pro nejvyšší teploty. Pec je otáčivá a to za pomoci elektromotoru. Doba ohřevu vsázky zde přímo souvisí s dobou otáčení podlahy pece (Rada, 1985).

1.3 MATERIÁLY PRO ELEKTROTEPELNOU TECHNIKU

1.3.1 Materiály pro konstrukci pecí

„Při konstrukci elektrotepelných zařízení se vyskytují problémy, které nejsou obvyklé u jiných strojních a elektrických zařízení. Jde zejména o působení vysokých teplot, někdy i velmi vysokých teplot, kterým musí konstrukční materiály odolávat.“ (Hradílek, 2011).

Tedy materiály odolné, pevné, tuhé a obecně takové, které nepodléhají teplotním deformacím. Dále speciální žáruvzdorné a izolační materiály, které zabraňují přílišným teplotním ztrátám. Důležité je, znát chování všech materiálů, jež jsou součástí zařízení. Konstruktor musí mít vždy na paměti, že celá konstrukce během vystavení vysokým teplotám pracuje a mění svoje vlastnosti. Kromě vysokých teplot se uplatňuje vliv atmosféry. Některé systémy jsou navrženy pro práci v ochranné atmosféře nebo vakuu. Důležitých vlastností je hned několik.

- Mechanická pevnost
- Schopnost snášet vysoké teploty
- Vodivost
- Chemická reaktivita

Při návrhu je také důležité vzít v úvahu ekonomickou stránku projektu (Hradílek, 2011).

Konstrukční materiály lze rozdělit jako

- Kovové
- Nekovové

Kovové materiály pro konstrukci

Do této kategorie patří veškeré kovové materiály používané pro konstrukci pecí. Tedy na podlahy, kelímky, mufle, držáky topných článků, zpevňovací součásti atd. Tyto materiály se používají nejčastěji jako odlitky, vývalky, tyče, dráty a další. Díky vysokému obsahu niklu a chromu tvoří někdy až 50% z celkové ceny pece (Hradílek, 2011).

Na kovové, konstrukční materiály jsou kladeny tyto požadavky

- Odolnost proti žáru
- Mechanická pevnost a tuhost
- Obrobitelnost

- Cena, dosažitelnost

Nejpoužívanější kovové materiály při stavbě pecí jsou oceli chrom – niklové – austenitické. Jsou dostatečně žáruvzdorné, mechanicky pevné a také mají relativně dobrou obrobitelnost (oproti chromovým ocelím). Oproti tomu mají poměrně velký součinitel teplotní roztažnosti, tudíž podléhají tepelným deformacím. Dále nejsou odolné proti páráům s obsahem síry. I tak jsou ideální pro stavbu dopravních mechanismů. Pro části do 800 °C jsou vhodné chrom – niklové oceli s obsahem chromu 18 %, obsahem niklu 8 %. Přidání maximálně 0.8 % titanu zmenšuje mezikrystalickou korozi (Hradílek, 2011).

Nekovové materiály pro konstrukci

Při konstrukci pecí se vedle běžně používaných kovových materiálů používají také materiály nekovové. I na ty jsou kladeny určité požadavky. Musí mít, stejně jako kovové materiály dobré mechanické vlastnosti. Dále dobré izolační vlastnosti (tepelné i elektrické). Odolnost proti teplotním změnám či chemickou odolnost. Vlastnosti jako tepelná vodivost, tepelná kapacita či hustota ovlivňují přímo izolační schopnosti nebo velikost akumulovaného tepla. Tyto materiály se používají především jako tepelná izolace, která se nanáší v několika vrstvách. Cílem je zkombinovat dobré vlastnosti. Izolace musí být jak vhodná mechanicky, tak izolačními schopnostmi (Hradílek, 2011).

Keramické, žáruvzdorné materiály musí splňovat tyto požadavky

- Žáruvzdornost
- Mechanická pevnost
- Odolnost proti změnám teplot
- Odolnost proti chemickým vlivům
- Malou tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu
- Zanedbatelnou elektrickou vodivost
- Nízkou cenu

Základní složkou nekovových materiálů jsou oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid hořečnatý. Křemičité materiály, obsahující nejméně 95 % oxidu křemičitého, se nazývají dinas. Jsou používány na nejvíce namáhané části vyzdívek díky svým mechanickým vlastnostem (Hradílek, 2011).

Dále se používají tyto materiály:

- Suracit
- Šamot

- Magnezitová staviva
- Chromitová staviva
- Dolomitová staviva
- Silimanit
- Mullitové materiály
- Uhlíková staviva
- Hlinito – grafitová staviva
- Vlákňité keramické materiály

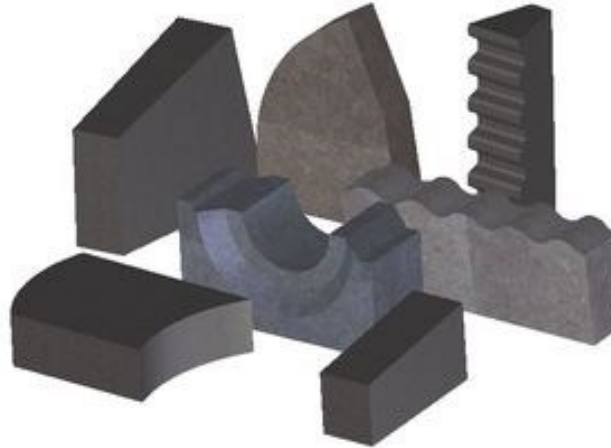
Jako suracit se označuje křemičitý písek s příměsí kyseliny borité. Suracit se používá jako dusací materiál při výrobě kelímků indukčních pecí. Tzv. šamoty (hlinito – křemičité materiály) tvoří největší skupinu nekovových materiálů. Obsahují Al_2O_3 (až 45 %) a SiO_2 . S obsahem Al_2O_3 stoupá také jakost šamotových výrobků. V případě elektrických odporových pecí nad 900 °C musí šamotové vyzdívky obsahovat více Al_2O_3 než SiO_2 . Zároveň nesmí obsahovat oxidy železa. Přidáním masku se také zvyšují elektroizolační vlastnosti (Hradílek, 2011).



Obr. 1.13 – Šamotové desky (Kominex, 2015)

Vyzdívka z šamotových materiálů je díky kombinaci žáruvzdornosti a mechanických vlastností reálně použitelná do teplot nepřesahujících 1400 °C. S přibývajícím obsahem Al_2O_3 roste i snesitelná teplota. V případě 100 % zastoupení se jedná již o tzv. korundové

materiály, které lze použít až do 2000 °C. Ovšem tyto materiály nebo šamoty s vyšším než 70 % zastoupením hliníkových sloučenin jsou pak méně odolné vůči kyselým struskám. U magnezitových staviv je minimální obsah MgO 80 %. Jsou použitelné do teploty 2000 °C (Hradílek, 2011).



Obr. 1.14 – Magnezitová staviva (Slovmag, 2015)

Mezi magnezitovými a chromitovými materiály existuje přechod v podobě chrom – magnezitových a magnezit – chromových staviv. Do obsahu chromu 30 % jsou označovány jako magnezit – chromové. S obsahem 30 – 70 % chromu jako chrom – magnezitové materiály. Oproti čistě magnezitovým materiálům mají vyšší odolnost proti kolísání teplot. Jsou kvalitní, nákladné a použitelné do teploty 1900 °C. Chromitová staviva obsahují jako hlavní složku sloučeninu $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$. Používají se jako oddělovače materiálů chemicky kyselé a zásadité vrstvy zdiva. Mají také dobrou odolnost vůči teplotním změnám.

Materiál Silimanit se používá nejčastěji pro vyzdívky sklářských pecí. Obsahuje přesné množství Al_2O_3 (62,8 %) a SiO_2 (37,2 %). Při žhání silimanitu při teplotě vyšší než 1550 °C vznikají tzv. mullitové materiály.

Ty obsahují 72 % Al_2O_3 a 28 % SiO_2 . Používají se do 1850 °C. Nejčastěji pro pyrometrické trubky nebo jako vyzdívka indukčních kanálových pecí pro tavení niklu, mědi, hliníku a mosazi (Hradílek, 2011).



Obr. 1.15 – Rozestavěná pec, vyráběna doma kutily (Submarineboat, 2015)

Stále větší popularitě se těší tzv. vláknité materiály. Keramická vlákna se vyrábějí tavením základu (např. v obloukových pecích). Roztavený základ se dostává jemnými tryskami do proudu horkého vzduchu nebo vodní páry a dále se zpracovává do finální podoby. Výhodou vláknitých materiálů je zkrácení doby roztápění pece. Jsou lehčí, mají menší rozměry. Tím se snižuje množství akumulovaného tepla ve vyzdívce. Tyto materiály jsou málo odolné na mechanické poškození. Obchodní názvy jsou: Kaowool, Rockwool, Fiberfrax, Cerablanket, Silikate a další (Hradílek, 2011).



Obr. 1.16 – Použití materiálu Cerablanket (Submarineboat, 2015)

1.3.2 Materiály pro topné spirály

Topné spirály nebo také odporové články jsou konstrukčním prvkem, kterým se za průchodu proudu ohřívá vnitřní prostor pece. Tyto články lze stejně jako pec samotnou konstruovat z mnoha materiálů. Články by měly být umístěny tak, aby mířily co nejlépe do prostoru a pokud možno nesálaly na sebe. Za hlavní požadavky na materiály se považují

- Odolnost proti žáru při pracovní teplotě
- Mechanická pevnost za tepla
- Odolnost proti chemickému vlivu ochranné atmosféry
- Velký odpor
- Stálost odporu při teplotních změnách
- Malou tepelnou roztažnost
- Dobrou poddajnost při tvarování spirály

Materiály pro odporové články se dělí na:

- Kovové materiály
- Nekovové materiály

Kovové materiály pro topné spirály

Jako kovové materiály pro konstrukci odporových drátů se využívají slitiny Ni, Cr, Fe, Al nemagnetické a dále magnetické, čisté kovy, oceli a speciální slitiny (Rada, 1985).

Austenitické slitiny

Tyto slitiny patří mezi nemagnetické. Pro topné spirály se používají zejména tzv. slitiny podvojně (Ni + Cr) a potrojně (Ni + Cr + Fe). Austenitické slitiny jsou materiály nejvyšší jakosti a žáruvzdornost zde tvoří vrstva oxidu chromitého. Mezi další vlastnosti austenitických slitin patří jejich dobrá snášenlivost častého zapínání a vypínání proudu. Dále splňují požadavek na dobrou mechanickou opracovatelnost. Další velkou výhodou z hlediska topení je jejich vysoký odpor a životnost (Rada, 1985).

Je zde jistý vztah mezi pracovní teplotou a obsahem železa. Tedy zvýšením obsahu železa dosáhneme snížení pracovní teploty, ovšem výhodou je v tomto případě snížení ceny materiálu (Rada, 1985).

Feritické slitiny

Tyto slitiny jsou magnetické a oproti austenitickým neobsahují nikl, ale hliník. Dále mají oproti předešlé skupině větší rezistivitu. Mezi feritické slitiny patří například materiály s těmito obchodními názvy: Kanthal, Alsichrom Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal atd. Velikou výhodou těchto slitin je jejich malá změna odporu s teplotou. Rezistivita stoupne totiž v průměru pouze o 6 % při ohřevu z 20 °C na 1300 °C. Typické použití pro feritické slitiny je pro teploty nad 1000 °C. Důvodem je, že se právě při této teplotě se tvoří ochranná vrstva Al_2O_3 . Pod touto teplotou (1000 °C) hrozí porušení vrstvy (například chemickou cestou). Časté vypínání a zapínání feritickým materiálům velmi neprospívá, neboť jim hrubne zrna a křehnou. Topné spirály se pak velmi lámou za studena a je třeba pec neustále opravovat (Rada, 1985).

Čisté kovy

„Čisté kovy jsou drahé, těžkotavitelné, např. platina, wolfram a molybden. Používají se pro topné články laboratorních nebo jiných speciálních pecí, kde se požaduje značně vysoká teplota. Platina neoxiduje, ale intenzívně se nauhličuje, nemůže se použít v redukční atmosféře. Protože se její odpor mění značně s teplotou, způsobí zapnutí za studeného stavu velký proudový náraz. Wolfram je velmi křehký. Topné články jsou obvykle ve tvaru trubky, jejíž vnitřní prostor je přímo pracovním prostorem. Přívody proudu se chladí vodou. Wolframové topné články pracují ve vakuu nebo v ochranné atmosféře až do 2600 °C. Molybden se používá pro teploty 1400 °C až 2000 °C. Vyžaduje ochrannou atmosféru (např. páry lihu nebo vodík), ve vakuu se při teplotě 1650 °C rozprašuje“ (Rada, 1985).

Ocel a speciální slitiny

Ocel se používá v ochranné atmosféře do teploty 900 °C a ve standardní do teploty 400 °C. Rezistivita se značně mění s teplotou, což způsobuje značný proudový ráz při zapnutí zastudena. Oproti tomu existují speciální slitiny, jejichž odpor se s teplotou téměř nemění. Konstantan (56 % Cu + 44 % Ni) a Nikelin (65 % Cu + 34% Ni + 1 % Fe). Uplatňují se v některých domácích spotřebičích nebo v zařízeních pro menší teploty.

Nekovové materiály pro topné spirály

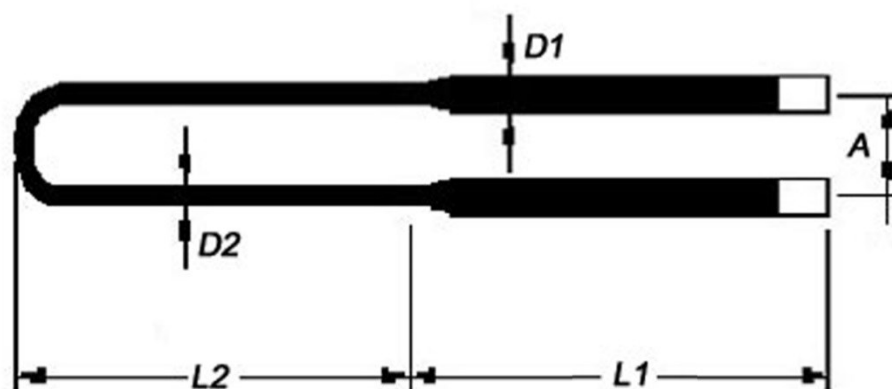
Hlavní výhodou nekovových materiálů je, že pracují ve vyšších teplotách než kovové. To je také hlavním důvodem jejich použití.

Karbid křemíku

“Karbid křemíku je nejčastěji používaný nekovový materiál pro topné články s obchodními názvy Silit, Globar, Crusilir, Cesiwid aj. Rezistivita je značně vyšší než u kovových materiálů ($0,6-3,0 \text{ m}\cdot\Omega\cdot\text{m}$), což umožňuje topné články zhotovovat např. ve tvaru tyčí se zesílenými konci. Průměry tyčí jsou 1,2 až 5 cm, délky od 8 do 200 cm. Použitelnost topných SiC článků je až do teploty $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní součinitel odporu je asi do $800 \text{ }^\circ\text{C}$ záporný, nad $800 \text{ }^\circ\text{C}$ kladný. Doba životnosti topných článků je od 3000 do 10000 pracovních hodin“ (Hradílek, 2011).

Cermetované články

Vyrábí se práškovou metalurgií na bázi keramiky a kovu. Základ tvoří směs MoSiO_2 a SiO_2 . Články se do konečné podoby lisují pod vysokým tlakem. Nejčastějším tvarem je tvar písmene U, dále pak trubky nebo tyče. Na trhu jsou nejznámější výrobky pod názvem Kanthal Super, jejichž pracovní teplota je až $1800 \text{ }^\circ\text{C}$. Nevýhodou je značná změna odporu s teplotou (Rada, 1985).



Obr. 1.17 – Schéma článku ve tvaru písmene U (Mtixtl, 2015)

Uhlíkové topné články

„Topné články se vyrábějí ve tvaru tyčí, trubek aj. Pracovní teploty jsou až do 2000 °C ve vakuu nebo řízené atmosféře, zabraňující oxidaci. Při normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C. Rezistivita uhlíku s rostoucí teplotou klesá, např. při teplotě 1400 °C asi na 67 % z plné hodnoty při 0 °C. U grafitu ze 100 % při 0 °C s rostoucí teplotou rezistivita nejprve klesá, při teplotě kolem 400 °C je asi 77 % a potom opět roste. Při 1400 °C je rezistivita asi 96 % původní hodnoty“ (Hradílek, 2011).

1.3.3 Žárovzdornost materiálů

Žárovzdornost materiálu (ČSN 72 6014 nahrazena roku 2005 ČSN EN ISO 10081-1) je schopnost materiálu odolávat vysokým teplotám. Určuje se na vzorku o určitém tvaru tzv. Segerova jehlanu, kde se měří teplota, při níž se jehlan deformuje až k základně. Za žárovzdorný se materiál považuje, pokud tato deformace nastane v rozmezí teplot 1580 °C a 1770 °C (Hradílek, 2011).

“Žárovzdornost tvoří vrstva oxidu určitého kovu, vytvořená na povrchu součásti, chráníci tak součást proti oxidaci. Chování oxidů není vždy stejné. Některé kovy tvoří lehkotavitelné oxidy; při ohřevu se odpařují a oxidace povrchu s časem rychle pokračuje. Totéž nastane u materiálů, jejichž oxidy mají vyšší bod tání a při vysoké teplotě popraskají a opadají. Žádoucí jsou proto takové oxidy, které ulpí na povrchu a vytvoří trvalou, souvislou, ochrannou vrstvu” (Hradílek, 2011).

Za přídavky oceli, které tvoří žádanou souvislou vrstvu, se považují

- Chrom
- Nikl
- Hliník
- Křemík

„Oceli s hliníkem a křemíkem jsou křehké a obtížně se mechanicky opracovávají. Naproti tomu nikl zlepšuje obrobiteľnosť oceli i její mechanické vlastnosti při vysokých teplotách. Podobně je tomu i u ocelí legovaných chromem, které za vysokých teplot ztrácejí pružnost a dochází k trvalé deformaci již při značně menším namáhání, než odpovídá mezi pružnosti při nízké teplotě.“ Pro ocel se udává charakteristická vlastnost – mez tečení $\sigma_{(\vartheta)}$, (MPa, °C) v závislosti na teplotě. Tato vlastnost se dá vysvětlit takto: 1000/1 při dané teplotě ϑ udává

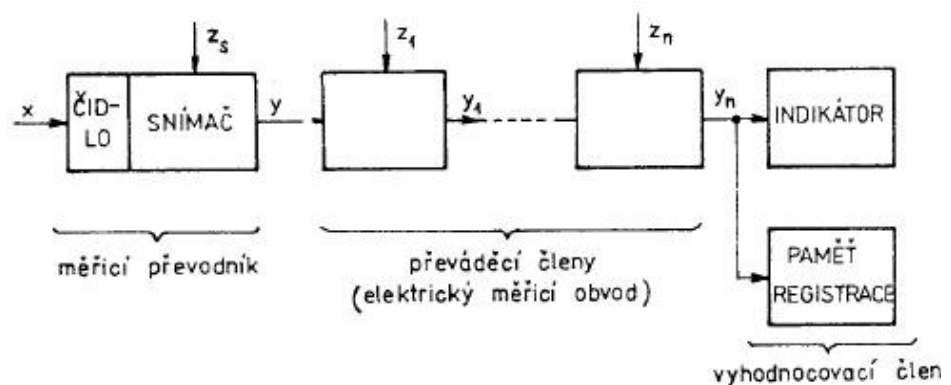
napětí, při kterém velikost trvalého prodloužení dosáhne za 1000 hodin hodnoty 1 % (Hradílek, 2011).

1.4 ODPOROVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

1.4.1 Měřicí řetězec

V automatizaci se uplatňuje, jako jedna z nejdůležitějších disciplín, měření elektrických a neelektrických veličin. V následující kapitole bude proto popsána problematika měření teploty, pomocí odporových platinových teploměrů, jakožto stěžejní veličiny vystupující v problematice elektrotepelných systémů.

Základem měření neelektrických veličin, tedy i teploty, je měřicí řetězec skládající se z 3 hlavních částí. Z měřicího převodníku, elektrického měřicího obvodu a vyhodnocovacích členů, jak je znázorněno na obr. 1.18.



Obr. 1.18 – Schéma měřicího řetězce (Fribert, 2012)

Vstupní veličina čidla x je neelektrická a výstupní veličina snímače y je již veličina elektrická, $z_s - z_n$ znázorňují poruchy příslušného členu. Teoreticky tedy nelze dosáhnout měření bez chyb (Fribert, 2012).

Nejdůležitějším a často také nejnákladnějším článkem měřicího řetězce je snímač. Chyby vznikající ve snímači nelze eliminovat nebo jen velmi obtížně. Jednou z popisných vlastností měřicího řetězce je tzv. statická charakteristika, tedy vztah vstupu a výstupu v ustáleném stavu. Tento vztah lze obecně popsat jako

$$y = f(x), \quad (1.9)$$

kde y je ustálený výstup (například napětí)

x – měřená veličina.

K nejjednodušším patří vztah, který je ve většině případů i vyžadován a to lineární vztah se zesílením:

$$y = K \cdot x, \quad (1.10)$$

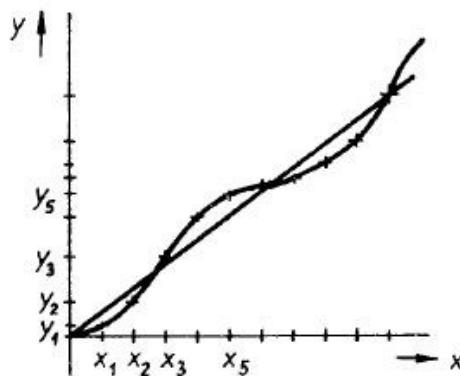
kde K je zesílení měřicího členu.

Pro zesílení systému K platí následující vztah

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.11)$$

Ačkoliv je lineární vztah nejvhodnější, mnohdy tomu tak není. Mluví se potom o chybě linearit (členu nebo řetězce). Jedná se o rozdíl, nebo také odchylku skutečné charakteristiky od ideální přímkové se směrnici rovnou zesílení. V případě, kdy vztah elektrické veličiny výstupní a neelektrické veličiny vstupní není lineární, aproximuje se tato závislost vhodným regresním modelem (ideálně onou přímkou se zesílením) a minimalizací účelové funkce (sumy kvadrátů odchylek) se vypočítají regresní parametry (tedy zesílení). Této metodě se říká metoda nejmenších čtverců. Pro výpočet parametru K platí

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1.12)$$



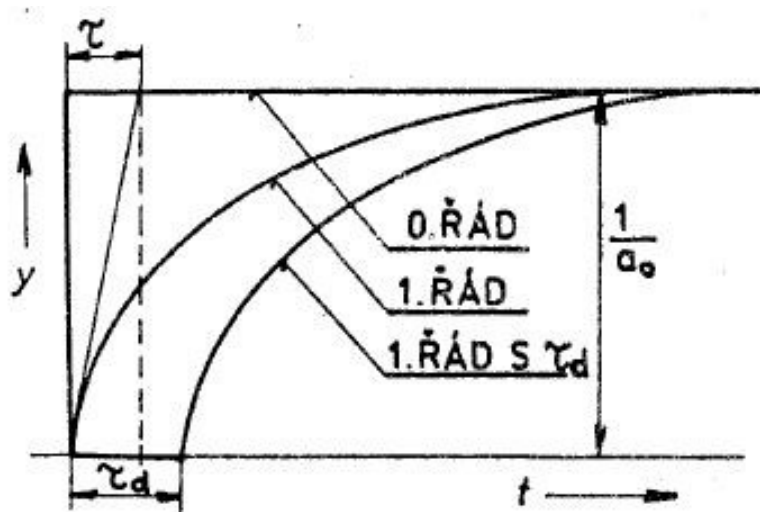
Obr. 1.19 – Lineární regresní přímka
(Fribert, 2012)

Nelineární vztah je na obr. 1.19 původní naměřená charakteristika měřicího řetězce nebo členu a přímka je výsledkem MNČ, v ideálním případě se jedná o nejvhodnější statistický model. Tedy nejvěrnější přiblížení reálného chování. Další možností pro vstupně –

výstupní popis měřicího řetězce (i jakéhokoliv jiného systému) jsou dynamické charakteristiky, které popisují chování řetězce v časové oblasti (ne pouze ustálený stav). Vztah mezi výstupní veličinou y a vstupní veličinou x lze popsat lineární diferenciální rovnicí řádu n . Ta má následující tvar

$$a_n \cdot y^{(n)}(t) + a_{n-1} \cdot y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 \cdot y^{(1)}(t) = x(t) \quad (1.13)$$

Pro reakci systému na jednotkový skok zavádíme zvláštní pojem. Jedná se o přechodovou funkci resp. charakteristiku. Na obr. 1.20 jsou příklady některých typických přechodových charakteristik základních systémů (Fribert, 2012).



Obr. 1.20 – Přechodové charakteristiky systému prvního řádu (Fribert, 2012)

Zde se jedná pouze o systém nultého a prvního řádu. Nebo prvního řádu s dopravním zpožděním.

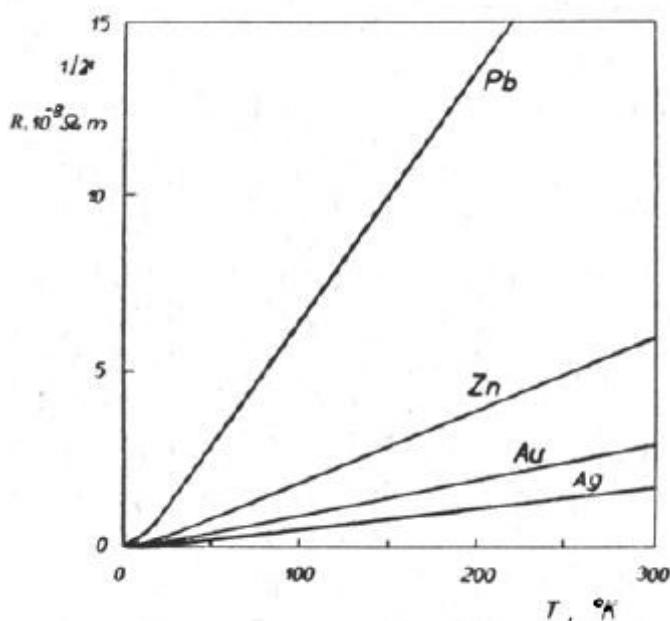
1.4.2 Odporové teploměry

„Pojem teplota souvisí se subjektivním vnímáním pocitu tepla nebo chladu ve styku s fyzikálními tělesy. Všeobecná definice stupnice teploty není snadná. Potřebujeme mít nějaký základní bod, definovat velikost jednoho stupně a stanovit přiřazovací pravidlo jednotlivým teplotním stavům. Starší definice teplotní stupnice byla založena na dvou základních bodech – bodu tání ledu 0° a bodu varu vody 100°C - Celsiova stupnice. Nová termodynamická teplotní stupnice byla v r. 1964 definována na základě základního bodu - trojného bodu vody a jako velikost jednoho stupně byla použit hodnota z Celsiovy stupnice. Trojný bod vody je definován jako stav rovnováhy mezi skupenstvími ledu, vody a syté vodní páry (tedy při $0,01^\circ\text{C}$ a tlaku $611,73\text{ Pa}$). Jeho absolutní teplota byla pevně stanovena na $T = 273,16\text{ K}$.

Základní jednotkou termodynamické teploty je K (Kelvin), což je 273,16-tá část rozsahu mezi 0 K a 273,16 K“ (Fribert, 2012).

Odporové teploměry jsou zařízení, která mění vstupní neelektrickou veličinu na výstupní elektrickou. Řadí se mezi pasivní snímače. Ty jsou charakteristické tím, že působením neelektrické veličiny, mění některou svoji typickou vlastnost (v tomto případě odpor). Tato změna odporu pak změní tok elektrické energie ve vyhodnocovacím členu (Fribert, 2012).

„Kovové vodiče při přiloženém napětí vedou proud pomocí volných elektronů, které se chaoticky pohybují v krystalové mřížce. Při zahřívání mezi nimi dochází k častějším srážkám, což klade větší odpor vedení proudu. Kovové materiály mají měrný odpor v rozmezí $10^6 - 10^7 \Omega \cdot m$. Mají mít co největší teplotní součinitel odporu, stálý v požadovaném rozsahu teplot. Na obr. 1.21 jsou prezentovány závislosti měrného odporu některých kovů na teplotě“ (Fribert, 2012).



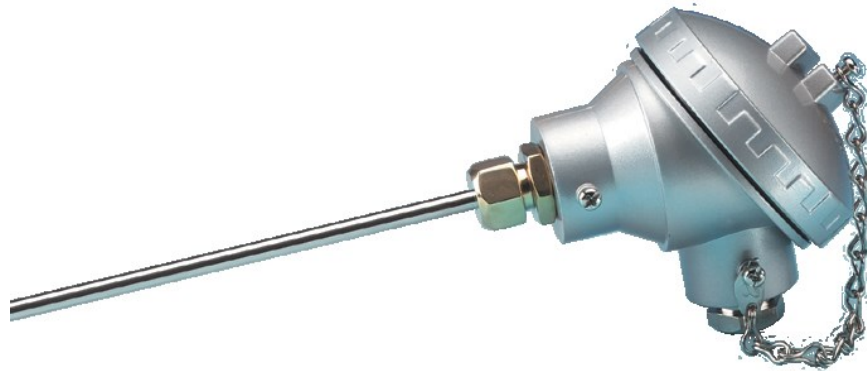
Obr. 1.21 – Závislosti měrného odporu kovů na teplotě (Fribert, 2012)

Nejrozšířenějším materiálem pro kovové odporové teploměry je platina. Používá se ale také Ni, Cu, Mo nebo slitiny Pt – Co, Rh – Fe. Teplotní závislost platinového teploměru se dá popsat vztahem

$$R_{\vartheta} = R_0 \cdot [1 + A \cdot \Delta\vartheta + B \cdot (\Delta\vartheta)^2] \quad (1.14)$$

“Tento vztah platí v rozsahu 0 °C až 850 °C. kde R_{ϑ} je odpor snímače při teplotě ϑ , R_0 odpor snímače při teplotě 0 °C, $A = 3.908 \cdot 10^{-3}$, $B = 5.8 \cdot 10^{-7}$, $\Delta\vartheta$ je rozdíl teploty ϑ a teploty 0 °C.“ (Fribert, 2012).

Velmi často využívanými odporovými teploměry jsou Pt100 a Pt1000. Označení znamená odpor 100 Ω resp. 1000 Ω při teplotě 0 °C.



Obr. 1.22 – Platinový teploměr Pt100 (Tcdirect, 2015)

V praxi se samozřejmě využívají i jiné způsoby měření teploty. V této práci bude ovšem použit pro měření právě platinový teploměr typu Pt100.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části je zkonstruovat fyzický model tepelného zařízení (pece) a vytvořit jeho řídicí systém. Jedná se o pec bez vsázky, regulovaná veličina je vnitřní teplota v peci. Vstupní veličina je příkon topného tělesa. V práci se dále nachází celková metodika, jak takové zařízení sestavit, jaký hardware použít pro jeho funkčnost a pro řízení teploty či metody nastavení regulátoru. Jsou popsány konstrukční materiály, možnosti, které existují při stavbě vlastního zařízení.

Hlavním kritériem bude ekonomická stránka, to znamená, že pec bude, pokud možno, co nejlevnější. To s sebou nese značné nevýhody. Nezkušenost a neprofesionální materiály mají zásadní vliv na vlastnosti výsledného prototypu.

Praktická část se skládá z několika celků: návrh, konstrukce, řízení. V části návrh se nachází nastínění účelu zařízení a základní výpočty, které se provádí. Jako určení kritického příkonu pro technologii a potřebná teplota pro technologii. V části konstrukce je popsána mechanická konstrukce zařízení a jsou uvedeny také informace o alternativních materiálech. V části řízení je popsána realizace řídicího systému, a to jak z hlediska HW, tak z hlediska automatizace a řízení soustavy. Jsou zde popsány metody experimentálního návrhu parametrů PID regulátoru a metody experimentální identifikace.

2.1 NÁVRH

Z hlediska návrhu zařízení je důležité určit, k čemu bude zařízení sloužit a v případě pece záleží velmi na hmotnosti a typu vsázky. Pec, postavená v rámci práce, bude bez vsázky, a bude sloužit k nahřívání vnitřního prostoru za určitý čas, na určitou teplotu.

Dále je nutné specifikovat technologii. Pro slévárenství je typické tavení kovu, žhánání, sušení a další. Technologie pro zařízení byla tedy zvolena jako nahřívání vnitřního prostoru za určitý požadovaný čas. Čas nahřátí t , s byl zvolen jako 1200 s. a teplota t , °C jako 200 °C. V praxi se pece výkonově naddimenzují. Následují ovšem orientační výpočty požadovaného příkonu. Ten závisí na materiálu mufle a teplotních ztrátách do okolí pece či vsázce. Materiál i hmotnost mufle jsou neměnné parametry a teplo vydané v podobě ztát závisí na materiálu (neměnný parametr) a okolní teplotě pece. Zde je tedy vidět, proč je dobré pec výkonově naddimenzovat. Je to tedy z několika důvodů:

- Možná změna hmotnosti či materiálu vsázky
- Kratší požadované časy pro technologii
- Změna umístění pece (do chladnějšího prostředí)

- Nepřesné materiálové parametry
- Nepřesné výpočty

Pro potřebný příkon je potřeba si uvědomit následující. Celkový potřebný příkon dodaný za určitý čas je roven teplu akumulovanému a teplu vydanému do okolí v podobě ztát (za daný čas). Tímto výpočtem získá jakýkoliv projektant představu o potřebném příkonu.

$$Q_{\text{celk}} = Q_{\text{aku}} + Q_{\text{ztr}} \quad (2.1)$$

$$P_{\text{celk}} = \frac{Q_{\text{celk}}}{t} \quad (2.2)$$

Přestože je pec mnohem složitější zařízení, nelineárního charakteru, v praxi se při návrhu postupuje právě tímto způsobem. Pro teplo akumulované (bez vsázky!) Q_{aku} , platí následující vtaħ (2.3).

$$Q_{\text{aku}} = m_{\text{mufle}} \cdot c_{\text{mufle}} \cdot (t_{\text{konc}} - t_{\text{poč}}) \quad (2.3)$$

Do vztahu (2.3) dosadíme. Výsledkem je tedy teplo akumulované ve vnitřní konstrukci.

$$Q_{\text{aku}} = 4 \cdot 450 \cdot (200 - 20) = 324\,000 \text{ J}.$$

Parametry materiálů, které mají nejasný původ, je nutno brát lehce s rezervou, stejně tak hmotnost, kterou získáme vážením, nebo výpočtem. Čistě užitečný příkon lze spočítat podle vztahu (2.4) a je v tomto případě roven 270 W.

$$P_{\text{užit}} = \frac{Q_{\text{aku}}}{t} \quad (2.4)$$

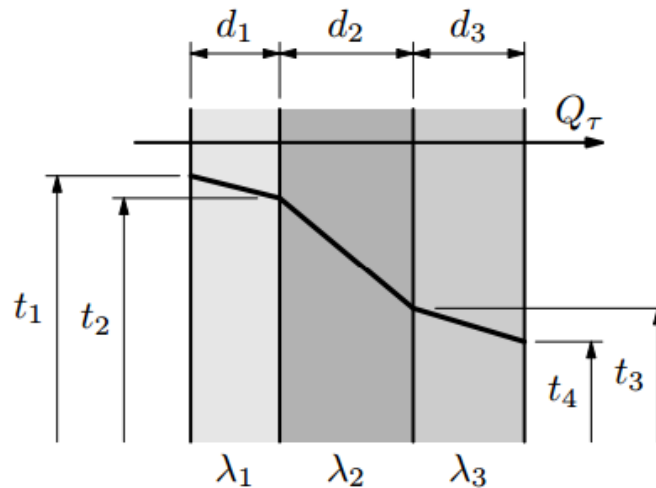
$$P_{\text{u}} = \frac{324\,000}{1200} = 270 \text{ W}.$$

Tab. 2.1 – Základní požadavky na prototyp

Hmotnost vsázky	bez vsázky
Počáteční teplota v peci	20 °C
Požadovaná teplota v peci	200 °C
Doba ohřevu	1200 s

2.1.1 Výpočet tepelných ztrát

Pouze s účinným příkonem počítat nelze. Určité, nezanedbatelné množství tepla se při procesu ztrát izolací. Stejně jako ve vesmíru, kde energie nevzniká ani nezaniká, pouze se přeměňuje, je tomu i v tepelném systému pece.



Obr. 2.1 – Schéma průchodu tepla složenou stěnou (Volf, 2015)

Šíření tepla a tedy i šíření tepelných ztrát je velmi složitý proces, zjednodušeně probíhá třemi způsoby, každý je zastoupený jinou mírou a má váhu při jiných teplotách. Tyto výpočty je možno alespoň orientačně provést, aby měl projektant představu o potřebném příkonu. Jedná se o přestup tepla vedením, prouděním a sáláním. V praxi se tyto výpočty spíše neprovádí. Postupuje se na základě zkušenosti. Opět se zde dá připomenout, že zařízení bývají výkonově naddimenzovaná.

Ztráty tepla vedením

Celkové teplo, které projde konstrukcí o třech různých materiálech vedením, se vypočítá podle (2.5).

$$Q_{\text{ztr_vedením}} = S \cdot \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}}, \quad (2.5)$$

kde d je tloušťka daného materiálu, m,

λ – součinitel tepelné vodivosti, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

S – celková prostupná plocha, m^2 ,

t_1, t_4 – teplota v peci, resp. okolí, K.

Ztráty tedy především závisí na vlastnostech materiálu a rozdílu teplot uvnitř a vně zařízení. Je nutné mít na paměti, že výpočty nejspíš nebudou sedět s naprostou jistotou s reálným zařízením a je nutno je brát s rezervou. Teplo vydané vedením v podobě ztát celou konstrukcí, je rovno podle vztahu (2.5) 165,714 J.

$$Q_{ztr_vedením} = 0,573 \cdot \frac{180}{\frac{0,001}{50} + \frac{0,005}{0,058} + \frac{0,001}{50}} = 165,714 \text{ J.}$$

Je nutné si uvědomit, že daný vztah se dá rozdělit na 6 různých vztahů (v případě kvádrové pece), v případě, že materiály a jejich tloušťky nejsou všude stejné.

Ztráty tepla prouděním

Obdobně platí i vztahy pro vedení tepla prouděním, zde je dobré si povšimnout analogie vztahů (2.5) a (2.6).

$$Q_{ztr_prouděním} = \alpha \cdot S \cdot \Delta t. \quad (2.6)$$

V tomto vztahu vystupuje proměnná α , $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Jedná se o součinitel přestupu tepla. Její velikost je obtížné určit. Závisí totiž na rychlosti proudění vzduchu, tepelné vodivosti, hustotě, tlaku a dokonce na drsnosti stěny pece. Obtížnost zachycení těchto jevů je také jedním z důvodů, proč se při návrhu pecí postupuje na základě zkušeností. Zjednodušeně lze zahrnout tyto dva druhy prostupu tepla, tedy prouděním a vedením do (2.7).

$$Q_{ztr_prouděním+vedením} = K \cdot S \cdot \Delta t. \quad (2.7)$$

Parametr K v sobě tedy nese jak parametr λ (vedením), tak parametr α (prouděním).

Ztráty tepla sáláním

Přestupu tepla sáláním, je dějem nelineárním, proto větší mírou ovlivňuje proces přenosu tepla až při vyšších teplotách, díky čtvrtým mocninám v rozdílu. Pro přestup tepla sáláním platí vztah

$$Q_{ztr_sáláním} = S \cdot \sigma \cdot (t_1^4 - t_2^4), \quad (2.8)$$

kde S je celková přestupová plocha, m^2 ,

σ – Stefan – Bolzmanova konstanta, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$,

t_1, t_2 – teploty prostředí na stranách přestupové plochy, K.

$$Q_{ztr_sáláním} = 0,573 \cdot 5,670 \cdot 10^{-8} \cdot (200^4 - 20^4) = 51,977 \text{ J}$$

Přenos tepla sáláním přes izolaci do okolí pece je roven 51,977 J.

Celkové ztráty

Celkové ztráty jsou rovny součtu ztrát všemi plochami, všemi způsoby šíření. Lze je tedy vypočítat podle vztahu (2.9).

$$Q_{ztr_celkové} = Q_{ztr_prouděním+vedením} + Q_{ztr_sáláním} \quad (2.9)$$

Je nutno uvažovat zde předpoklad, že všechny stěny jsou stejně tlusté, ze stejných materiálů. To v praxi není běžné. Výpočty se dají ovšem velmi snadno upravit. V případě tohoto zařízení budou pomínuty ztráty tepla prouděním, pro nemožnost určení parametru α v době, kdy je zařízení ve fázi projekce. Dosadíme-li do vztahu (2.9), celkové ztrátové teplo bude tedy v tomto případě rovno 1517,690 J.

$$Q_{ztr_celkové} = 1465,714 + 51,977 = 1517,690 \text{ J}.$$

Celkovou tepelnou bilanci prototypu pece lze vyjádřit podle vztahu (2.10).

$$Q_{celkové_pe} = Q_{aku} + Q_{ztr_celkové} \quad (2.10)$$

Dosazením do (2.10) tedy vychází:

$$Q_{celkové_pe} = 324\,000 + 1517,690 = 325\,517,690 \text{ J}.$$

2.1.2 Celkový potřebný příkon

Při uvažování zvoleného času $t = 1200$ s, se celkový, minimální příkon vypočítá ze vztahu (2.11) a je roven 271,260 W.

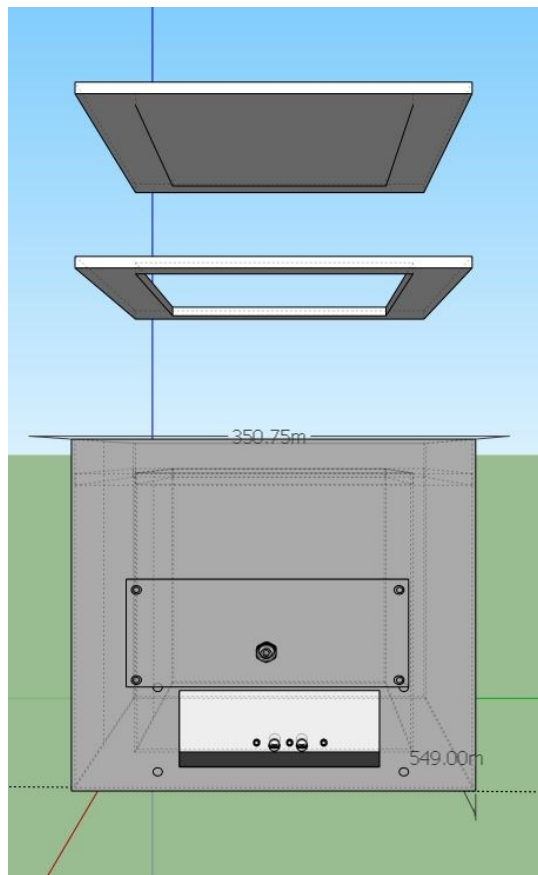
$$P_{\text{minimální_celkový}} = \frac{Q_{\text{celkové_pe}}}{t}, \quad (2.11)$$

$$P_{\text{minimální_celkový}} = \frac{325\,517,690}{1200} = 271,260 \text{ W}.$$

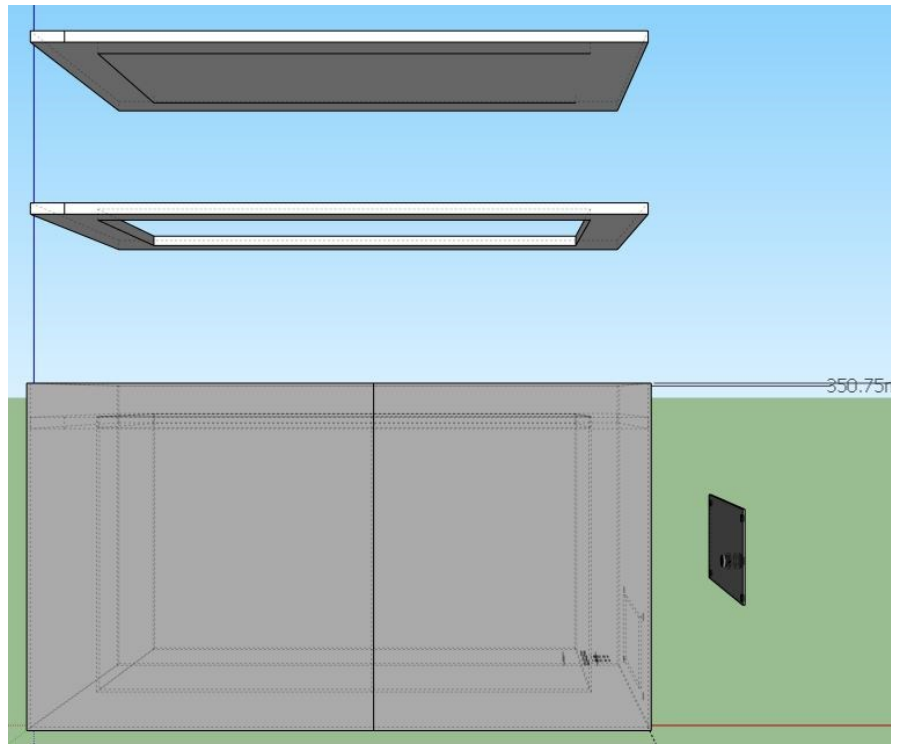
Maximální příkon tělesa je 750 W. Příkon je tedy naddimenzován, jak je obvyklé v praxi. Důvody byly popsány výše.

2.2 KONSTRUKCE

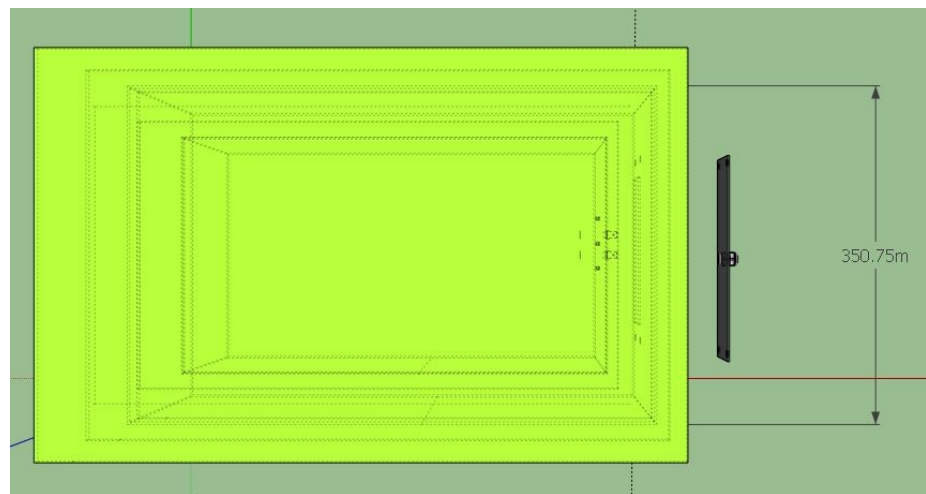
Prototyp je svou konstrukcí podobný komorové peci. Tato zařízení jsou popsána v teoretické části. Víko se bude ovšem nacházet na vrchu zařízení a odporové těleso bude umístěno na dně mufle. Pro lepší představu byly zhotoveny pouze schématické 3D modely pece s průřezem. Umístění odporového tělesa na dno je velice nestandardní, ovšem v práci to bylo řešeno tímto způsobem, díky neexistenci vsázky. Také díky šetření na HW. Pokud je daný příkon rozdělen mezi několik spirál, je potřeba řídit každou zvlášť a k tomu je zapotřebí větší počet HW zařízení.



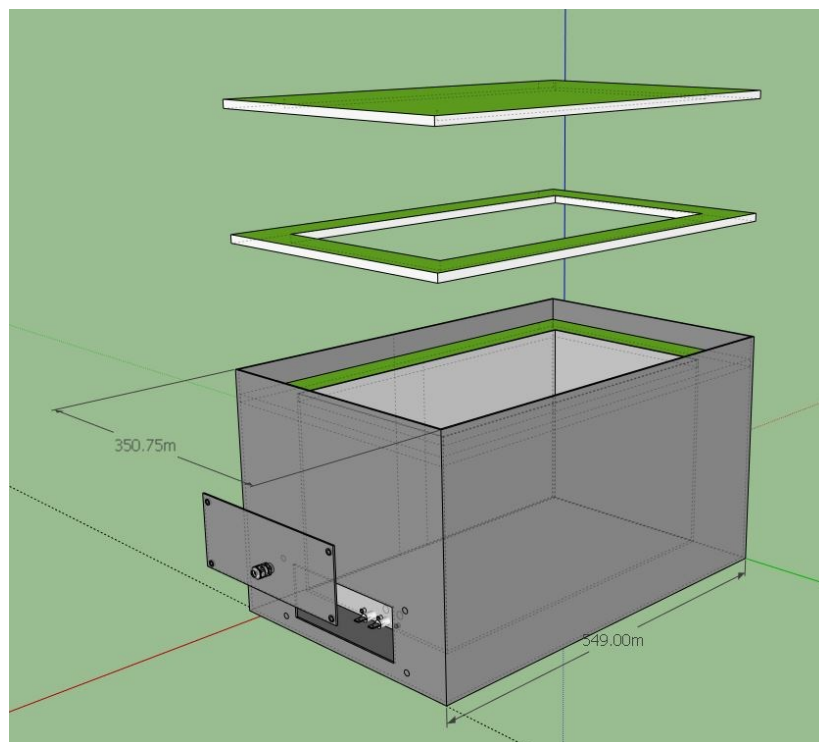
Obr. 2.2 – 3D nárys pece



Obr. 2.3 – 3D bokorys pece



Obr. 2.4 – 3D pūdorys pece



Obr. 2.5 – 3D model pece

Konstrukčních materiálů, které se používají pro stavbu tepelných zařízení, je mnoho, mnoho z nich bylo popsáno v teoretické části. V zásadě při projekci zařízení závisí zejména na teplotě, které je pec dlouhodobě vystavována. Postavený prototyp bude dosahovat teploty maximálně 300 °C. Nejteplejším místem pece je topná spirála, poté vnitřní prostor. Materiál, ze kterého se skládá mufle, musí vydržet 300 °C. Konstrukční materiál byl zvolen jako klasická ocel typu 11 373. Jedná se o obyčejnou konstrukční neušlechtilou ocel. Mnohdy se pece ovšem konstruuji z nerezové slitiny. Jakost 11 373 byla vybrána z důvodu ceny. Daná ocel má dostatečné mechanické vlastnosti. Tento materiál je také vhodný díky své dobré opracovatelnosti. Ocelový plech se dá zpracovat zámečnický nebo za pomoci klempíře.

Izolace

Aby neunikalo do okolí velké množství tepla, používají se izolační materiály různého typu. Opět je nutné vědět, k čemu bude materiál sloužit. Zda má být samonosný, zda má být žáruvzdorný, jakou má mít třídu reakce na oheň a do jakých teplot je určený. Pec, která byla sestrojena, obsahuje jako izolaci minerální vatu Isover FireProtect 150. Jedná se o materiál používaný jako výplň protipožárních dveří. Pro výpočet tepelných ztrát, jsou důležité dvě vlastnosti. Tloušťka izolace a součinitel tepelné vodivosti λ . Výrobce tohoto materiálu udává

tloušťkovou toleranci při výrobě ± 1 mm. Izolace v peci byla zvolena 50 mm, což je v praxi pro takovouto aplikaci až dost.

TECHNICKÉ PARAMETRY

Parametr	Jednotka	Hodnota										Norma		
TEPELNÉ VLASTNOSTI														
Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti λ_0 dle ČSN EN ISO 13787	°C	10	40	50	100	150	200	250	300	400	500	600	650	700
Měřená hodnota souč. tepelné vodivosti podle ČSN EN 12667	$Wm^{-1}K^{-1}$	0,036	0,039	0,041	0,047	0,053	0,060	0,068	0,077	0,098	0,123	0,154	0,172	0,192
Nejvyšší provozní teplota	$Wm^{-1}K^{-1}$	0,034	0,038	0,040	0,045	0,052	0,058	0,066	0,074	0,094	0,118	0,147	0,164	0,183
Měrná tepelná kapacita c_p	°C	700										ČSN EN 14706		
	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	800										-		
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI														
Objemová hmotnost (tloušťka 20 a 25 mm)	$kg.m^{-3}$	165										ČSN EN 1602, ČSN EN 13470		
Objemová hmotnost (tloušťka ≥ 30 mm)	$kg.m^{-3}$	150										ČSN EN 1602, ČSN EN 13470		
Krátkodobá nasákavost W_p	$kg.m^{-2}$	<< 1										ČSN EN 1609		
Faktor difuzního odporu	-	1,0										ČSN EN 12086		
Odpor proti proudění vzduchu Ξ	$kPa.s.m^{-2}$	91										ČSN EN 29053		
PROTIPOŽÁRNÍ VLASTNOSTI														
Reakce na oheň	-	A1										ČSN EN 13501-1		
Bod tání t_f	°C	≥ 1000										DIN 4102 díl 17		
AKUSTICKÉ VLASTNOSTI														
Činitel zvukové pohltivosti α pro kolmý dopad vln (-) dle ČSN EN ISO 354 a ČSN EN ISO 11654	Frekvence	Hz	125	250	500	1000	2000	4000						
	Tloušťka	mm	0,05	0,20	0,55	0,85	0,95	1,00						
		mm	0,20	0,65	0,90	0,90	0,95	0,95						
		mm	0,35	0,85	0,90	0,95	0,95	1,00						
Jednočíselné hodnoty	α_w	0,45	0,70	0,85	0,95	0,95	1,00							
Stanovení jednočíselné veličiny podle ČSN EN ISO 11654	Tloušťka	α_{str}	0,64					NCR						
		mm	0,90					0,65						
		mm	0,95					0,85						
		mm	0,90					0,90						
	mm	0,90					0,86							

11. 11. 2014 Uvedené informace jsou platné v době vydání technického listu. Výrobce si vyhrazuje právo tyto údaje měnit.

Divize Isover
Saint-Gobain Construction Products CZ a.s.
 Počernická 272/96, 108 03 Praha 10
 e-mail: info@isover.cz, www.isover.cz

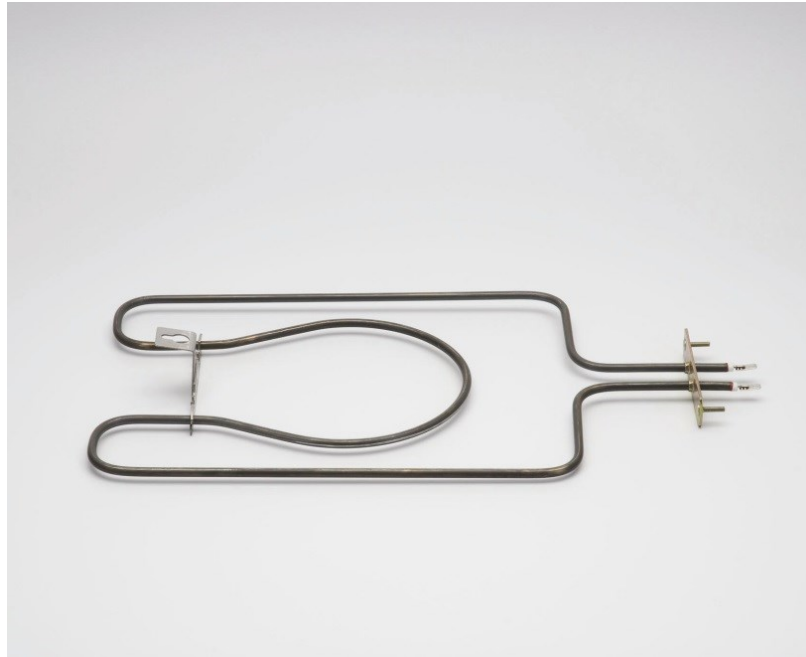
ISOVER
 SAINT-GOBAIN

Nejširší nabídka tepelných, zvukových a protipožárních izolací

Obr. 2.6 – Technický list materiálu Isover FireProtect 150 (Isover, 2014)

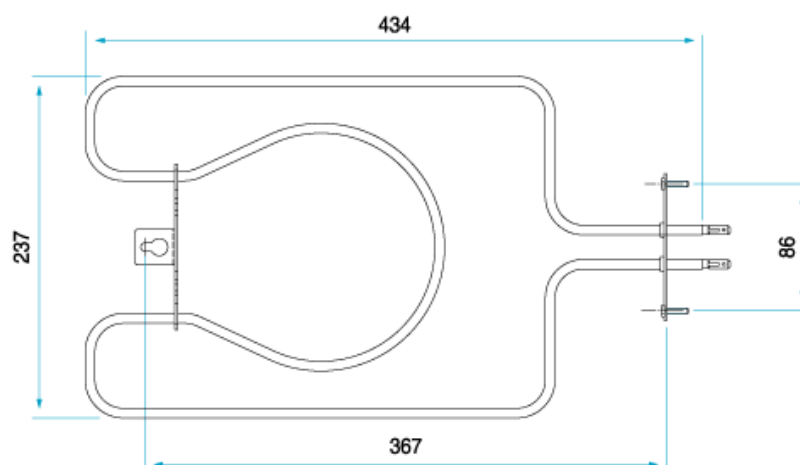
Topné těleso

Topných spirál se v praxi používá mnoho a z různých materiálů. Nejjednodušším řešením a také řešením, které se využívá i v praxi je osazení pece topnými tělesy, které se využívají v horkovzdušných troubách. Konkrétní produkt, kterým je osazen prototyp pece, je těleso typu 6280. Jedná se o náhradní těleso pečící trouby.



Obr. 2.7 – Těleso pro ohřev (Backer Elektro, 2015)

Je to těleso o příkonu 750 W, určeno pro připojení do jednofázového rozvodu. Odebíraný proud při maximálním výkonu tedy činí 3,26 A.



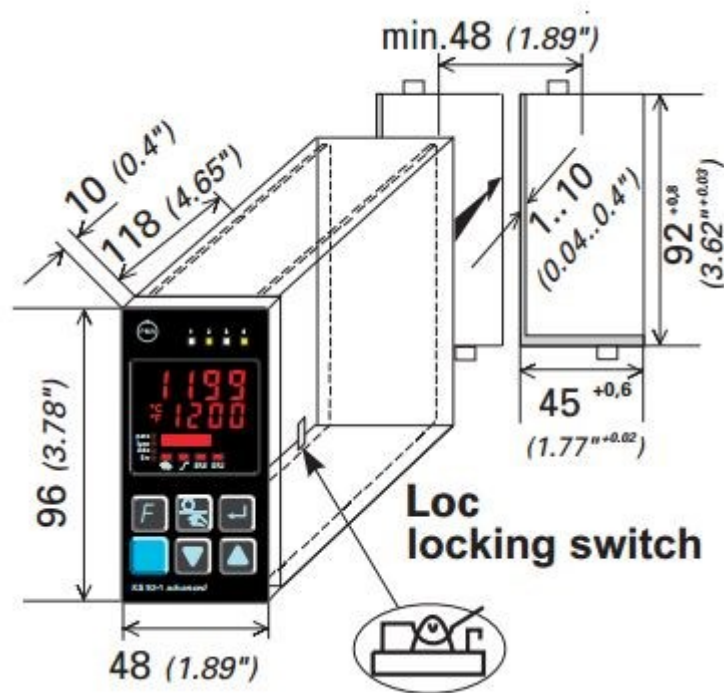
Obr. 2.8 – Rozměry tělesa (Backer Elektro, 2015)

Použitý HW

Součástí pece budou i HW komponenty pro řízení teploty. Teplotu lze řídit mnoha způsoby. V této aplikaci je využito PID regulace, pomocí programovatelného regulátoru společnosti PMA. Jedná se o typ PMA KS90-1.



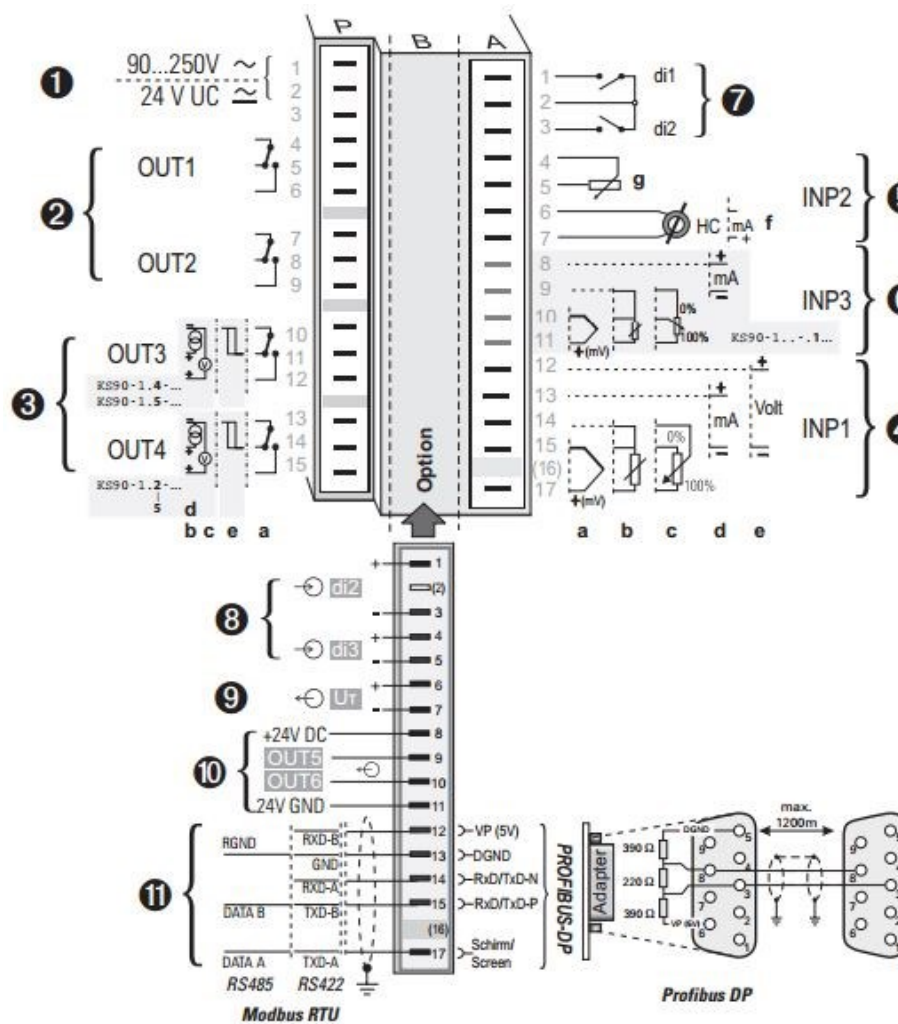
Obr. 2.9 – Regulátor KS90-1 (Regulátor KS90-1 manuál, 2011)



Obr. 2.10 – Rozměry regulátoru KS90-1 (Regulátor KS90-1 manuál, 2011)

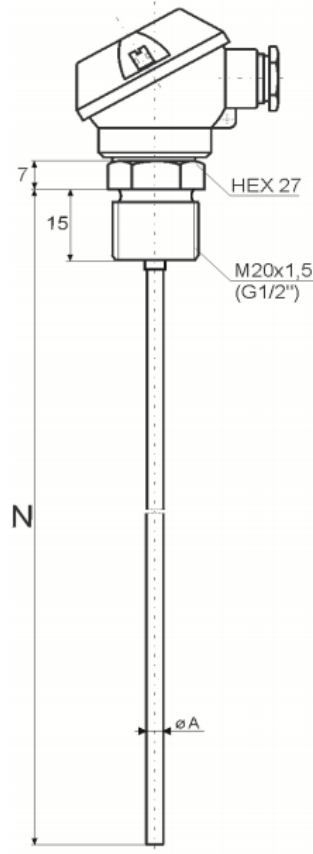
Jedná se o regulátor německé výroby, určený pro řízení tepelných procesů. Regulátor je napájen napětím 24 V. V základní možné konfiguraci obsahuje 3 vstupy a 4 výstupy. Vstup INP1 slouží jako vstup pro termočlánek, odporový teploměr nebo jako napěťový, proudový

vstup. Stejnou funkci, vyjma napěťové funkce má i vstup IPN3. Výstup OUT3/4 slouží např. jako napěťový výstup 0 – 10 V (nebo proudový či reléový).



Obr. 2.11 – Schéma vstupů/výstupů regulátoru KS90-1

Dalším použitým HW je odporový teploměr typu Pt100 (model MTR 11FS). Odporové měření je nejjednodušší a regulátor PMA KS90-1 má vstup přímo pro platinový teploměr typu Pt100. Konkrétně na třívodičové zapojení (u Pt100 se využívají čtyřvodičové a dvouvodičové zapojení, třívodičové je obdobné čtyřvodičovému). Další možností by byl například termočlánek. Ten by bylo dobré použít v případě kontaktního měření vsázky.



Obr. 2.12 – Schéma použitého teploměru MTR 11FS
(Plášťový odporový teploměr s hlavicí F, 2015)

Teploměry se vyrábí s požadovanou délkou stonku, pro aplikaci pece byla zvolena tato délka jako 200 mm. Plášťové teploměry typu MTR 11FS se používají v rozsahu - 200 °C až 600 °C, což je v této aplikaci dostačující. Důležité vlastnosti teploměru MTR 11FS jsou shrnuty v následující tab. 2.2.

Tab. 2.2 – Vlastnosti teploměru MTR 11FS (Plášťový odporový teploměr s hlavicí F, 2015)

Rozsah teplot	- 200 až 600 °C
Průměr pláště	4,5 mm
Délka prodloužení N	200 mm
Max. proudové zatížení	1 mA
Indukčnost senzoru	< 1 μH
Kapacita senzoru	1 až 6 pF
Max. použitelné napětí senzoru	1000 V pro 25 °C
Třída přesnosti	B

Nyní v celém řídicím systému chybí poslední člen. Byla snaha naleznout výkonový člen, který převezme unifikovaný signál z regulátoru a lineárně ho převede na příkon topného tělesa. Nejprve byla snaha vyřešit vše pomocí elektroniky, s využitím výkonových tranzistorů či pomocí časovacího obvodu 555. To se ale ukázalo jako problematické a bylo tedy zvoleno řízení pomocí PWM (z anglického pulse width modulation, neboli pulzně šířková modulace). Amplituda akční veličiny je řízena tzv. střídou, kde tato hodnota je dána poměrem času, kdy v rámci jedné periody, veličina prochází či neprochází (tzv. duty cycle). Akční veličinou je v této aplikaci elektrický proud. Zařízení, které disponuje touto funkcí, se nazývá solid state relé (SSR), jedná se o polovodičové relé (spínač). Relé existují jednofázová, či třífázová. Jmenovité proudy se pohybují od 30 A až do 50 A. Tato relé se vyrábí i s analogovým vstupem, což je ideální pro tuto aplikaci. Existují SSR s proudovým vstupem 0 – 20 mA či napěťovým vstupem 0 – 10 V. Konkrétní zařízení, které se nachází v modelu pece, je SSR typu Carlo Gavazzi RJ1P23V30E. Důležité vlastnosti SSR Carlo Gavazzi RJ1P23V30E jsou shrnuty v tab 2.3.

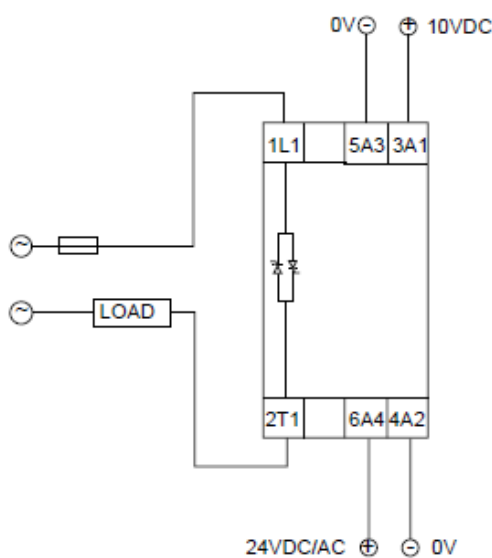


Obr. 2.13 – SSR Carlo Gavazzi RJ1P23V30E
(Carlo Gavazzi RJ1P23V30E, 2015)

Tab. 2.3: Vlastnosti SSR Carlo Gavazzi RJ1P23V30E (Carlo Gavazzi RJ1P23V30E, 2015)

Operační napětí	90 – 256 V
Vstupní signál	0 – 10 V
Jmenovitý proud	30 A
Typ	Jednofázové

Schéma možného zapojení ohmické zátěže na polovodičové relé se nachází na obr. 2.14.



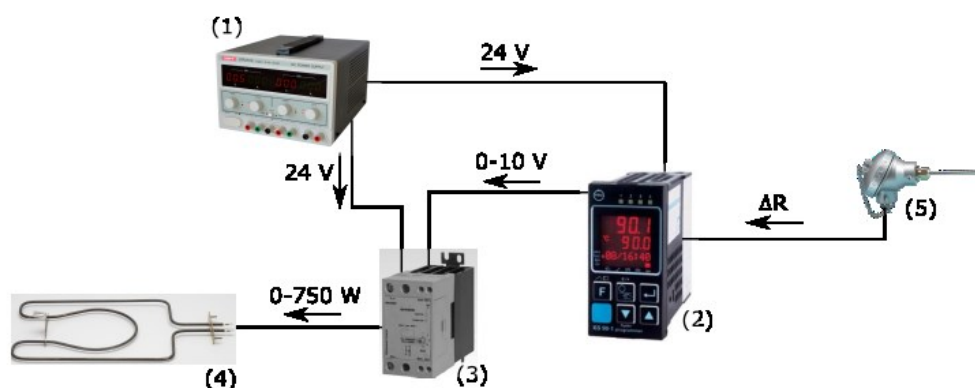
Obr. 2.14 – Schéma zapojení SSR s ohmickou zátěží
(Carlo Gavazzi RJ1P23V30E, 2015)

Jak je vidět, relé je nutno napájet napájecím napětím 24 V. Na vstup 1L1 se přivede fáze a na vstup 2T1 potom ohmická zátěž. Zátěž se tedy zapojí s SSR do série. PWM pracuje lineárně s řídicím napětím. Odpovídající výstup v závislosti na vstupu je v tab 2.4.

Tab. 2.4 – Závislost výstupu na vstupu SSR (Carlo Gavazzi RJ1P23V30E, 2015)

Vstup	Výstup
0 V	0 %
2,5 V	25 %
5 V	50 %
7,5 V	75 %
10 V	99 %

Příkon tělesa tedy bude přímo lineárně regulován, s využitím PWM, na základě výstupu regulátoru PMA KS90-1. Blokové schéma celého zapojení se nachází na obr. 2.15.



Obr. 2.15 – Blokové schéma řídicího systému

- kde
- 1 – zdroj 24 VDC,
 - 2 – regulátor PMA KS90-1,
 - 3 – SSR Carlo Gavazzi RJ1P23V30E,
 - 4 – topné těleso o příkonu 750 W,
 - 5 – platinový teploměr typu Pt100 MTR 11FS.

Celková cena HW komponentů, nacházejících se v řídicím systému pece je shrnuta v tab. 2.5. Není zde zahrnuto napájení regulátoru a SSR.

Tab. 2.5 – Komponenty řídicího systému

Položka	Cena
Regulátor PMA KS90-1	12 958 Kč
SSR Carlo Gavazzi RJ1P23V30E	2 144 Kč
Teploměr MTR 11FS	1 341 Kč
Cena celkem	16 443 Kč

Do celkové ceny nebyl zahrnut elektroinstalační materiál, který se pohybuje řádově do několika set, ne však více než tisíc, korun.

2.3 ŘÍZENÍ

Řízení teploty v peci je realizováno pomocí spojitého PID regulátoru, pomocí měření teploty a zapojení ve zpětné vazbě. Regulátor je elektrický (jiné typy se dnes již téměř nepoužívají). Regulátor PID obsahuje 3 složky, proporcionální, integrační a derivační. Výsledný akční zásah (výstup regulátoru a zároveň vstup do SSR, v případě této aplikace) je dán součtem každé složky. Vstupem do regulátoru je $e(t)$, neboli rozdíl žádané veličiny a informace ze senzoru teploty (výstupní veličiny). Akční zásah je dán součtem proporcionálního zesílení, integrace a derivace (v případě PID regulátoru) regulační odchylky. Regulátor se často využívá v jiných než PID verzích (PI, P, PD). Problémem samotného zesílení (P verze) je neschopnost ustálení na žádané veličině, proto se používá s I nebo D složkou. D složka navíc udává schopnost regulátoru reagovat na rychle se měnící veličinu (Prokop, 2006).

Rovnice PID regulátoru je následující

$$u(t) = r_0 \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (2.12)$$

kde $u(t)$ je akční zásah (výstup regulátoru),

r_0 – zesílení regulátoru,

$e(t)$ – regulační odchylka (rozdíl žádané a výstupní veličiny),

T_I – integrační časová konstanta,

T_D – derivační časová konstanta.

Vztah (2.11) platí pro paralelní strukturu regulátoru, kde jsou jednotlivé prvky řazeny paralelně. Většina výrobců, včetně PMA (se svým KS90-1) implementuje však sériový tvar regulátoru. Pro sériovou strukturu PID regulátoru platí vztah

$$u(t) = r_0 \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \cdot \left(1 + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.13)$$

2.3.1 Syntéza regulátoru

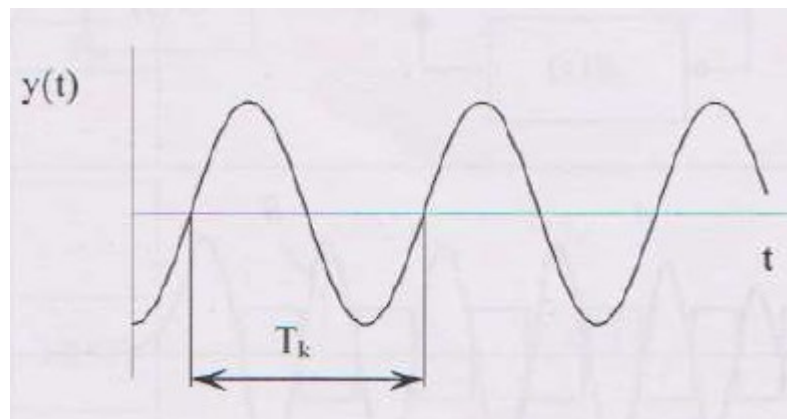
Syntézou regulátoru se myslí problematika nastavení správných parametrů regulátoru. Výsledný regulační obvod nesmí být nestabilní (nesprávným nastavením parametrů PID regulátoru lze jinak stabilní systém destabilizovat, tedy rozkmitat). Dále regulační odchylka by měla konvergovat k nule. Následně bude v textu popsána metodika nastavení parametrů PID regulátoru a výsledek bude aplikován na soustavu tepleného systému (prototyp pece) a realizován na použitém regulátoru (Prokop, 2006).

Metody nastavení PID regulátoru

Existuje mnoho metod nastavení parametrů PID regulátoru. Následně budou některé z nich představeny a zároveň bude vhodná metoda aplikována.

Metoda Ziegler – Nicholsova

Tato metoda, původně čistě experimentální, popsána pány Zieglerem a Nicholsem, spočívá v nalezení kritického zesílení r_{krit} . Postupuje se tak, že se vyřadí I a D složky regulátoru a zvyšuje se postupně proporcionální zesílení r_0 do té doby, než se tím dovede systém na hranici stability (což znamená výskyt netlumených kmitů na výstupu systému). Odečte se perioda netlumených kmitů T_k a nastavení se provede podle následující tabulky (Prokop, 2006).



Obr. 2.16 – Odečtení periody netlumených kmitů (Prokop, 2006)

Tab. 2.6 – Nastavení parametrů PID regulátoru metodou Ziegler – Nichols (Prokop, 2006)

	r_0	T_I	T_D
P	$0,5 \cdot r_{\text{krit}}$		
PI	$0,45 \cdot r_{\text{krit}}$	$0,85 \cdot T_k$	
PD	$0,4 \cdot r_{\text{krit}}$		$0,05 \cdot T_k$
PID	$0,6 \cdot r_{\text{krit}}$	$0,5 \cdot T_k$	$0,12 \cdot T_k$

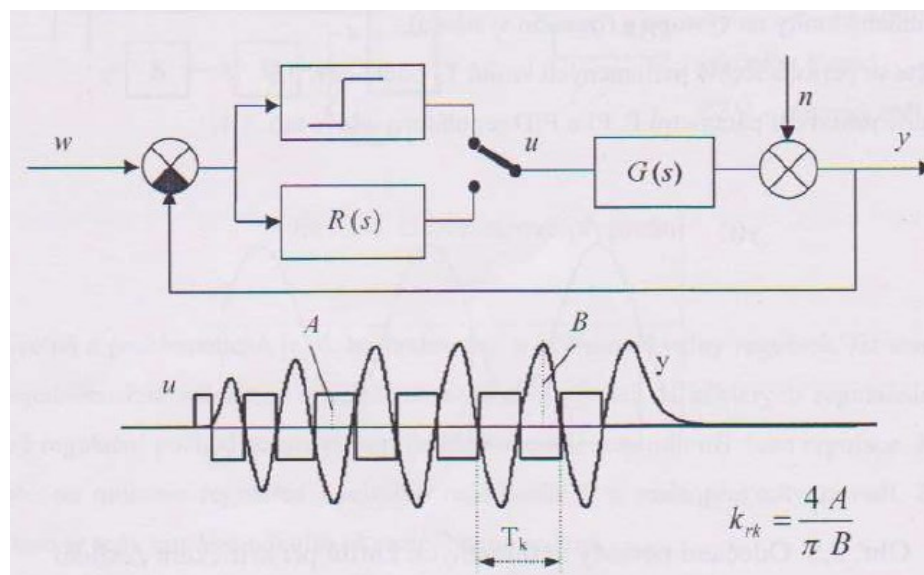
Největší nevýhodou této metody (u které není třeba znát model soustavy) je fakt, že soustavy prvního a druhého řádu nelze proporcionální složkou rozkmitat.

Metoda relé ve zpětné vazbě

Hodnoty kritického zesílení a periody se dají také určit experimentálně pomocí relé ve zpětné vazbě. Finální parametry lze nastavit pomocí tab. 2.6. Důležitý vztah pro výpočet kritického zesílení vypadá takto

$$r_{\text{krit}} = \frac{4 \cdot A}{\pi \cdot B}, \quad (2.14)$$

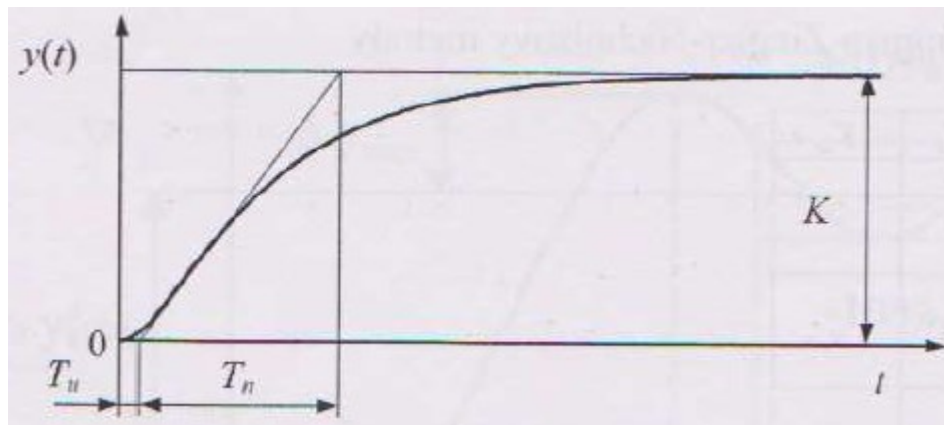
kde A je amplituda výstupní veličiny,
 B – amplituda vstupní veličiny (relé).



Obr. 2.17 – Relé ve zpětné vazbě (Prokop, 2006)

Metoda nastavení z přechodové charakteristiky

V některých případech není možné z technologických důvodů rozkmitat reálnou soustavu. Při metodě nastavení z přechodové charakteristiky se lze obejít bez rozkmitání. Nutné je pouze vytvořit přechodovou charakteristiku (tedy grafickou reprezentaci přechodové funkce), ze které se následně dá odečíst zesílení K , doba průtahu T_u a doba náběhu T_n . Daná tečna, která se nachází na obr. 2.18, se konstruuje v inflexním bodě (tedy v bodě, kde se funkce mění z konkávní na konvexní).



Obr. 2.18 – Přechodová charakteristika (Prokop, 2006)

Parametry PID regulátoru se následně nastaví podle tabulky obdobně jako u metody Ziegler – Nicholsovy. Vztahy pro výpočet jsou vidět v následující tab. 2.7.

Tab. 2.7 – Nastavení parametrů PID regulátoru pomocí přechodové char. (Prokop, 2006)

	r_0	T_I	T_D
P	$\chi \cdot \frac{1}{K}$		
PI	$0,9 \cdot \chi \cdot \frac{1}{K}$	$3,5 \cdot T_u$	
PD	$1,2 \cdot \chi \cdot \frac{1}{K}$		$0,25 \cdot T_u$
PID	$1,25 \cdot \chi \cdot \frac{1}{K}$	$2 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$

Výpočet parametru γ se vypočítá podle vztahu (2.20) jako

$$\chi = \frac{T_n}{T_u} \quad (2.15)$$

Veškeré tyto metody lze využít na matematickém modelu soustavy. To v praxi a případě pece není možné, neboť neznáme všechny parametry. Jak bylo psáno v kapitole 2.1.1, problém je s parametrem α . Je nemožné ho určit. Proto není ani potřeba vytvářet analytický model soustavy. Metod nastavení vhodných parametrů je nespočet. Mezi další patří například Naslinova metoda, Whiteleyovy standardní tvary, Cohen – Coonova metoda, Chien, Hrones, Reswickova metoda, metoda vyváženého nastavení a další (Prokop, 2006).

3 REGULAČNÍ POCHODY NA REÁLNÉM ZAŘÍZENÍ

Experimentem bylo zjištěno, že konstrukce pece je bezpečná a schopná pracovat bez poškození do teploty 150 °C. V praxi bývá součástí elektrotepelných systémů také limitní omezovač teploty, aby se zařízení vysokou teplotou nezničilo. Z ekonomických důvodů tímto bezpečnostním prvkem prototyp není vybaven. Pro zjištění parametrů PID regulátoru byla zvolena experimentální metoda nastavení z přechodové charakteristiky. Jelikož je prototyp nelineárním systémem (nelineární závislost odporu tělesa na teplotě a nelineární vztah pro přestup tepla sáláním), byl zvolen pracovní rozsah pro regulaci do 0 až 50 °C a výkon bude regulován v rozmezí 0 – 750 W. V praxi se u nelineárních systémů využívá metoda gain scheduling. Jedná se o metodu, kde je pro různou část pracovního rozsahu procesu k dispozici jiná sada PID parametrů. V případě soustavy elektrické odporové pece, to tedy znamená, že pro regulaci teploty v rozmezí nízkých teplot se uplatní jiné PID parametry, než pro řízení procesu ve vysokých teplotách. Kolik sad parametrů je pro daný systém potřeba najít záleží na charakteru nelinearity. Experimentem na prototypu získáme přehled o chování soustavy. Zde je nutno vyzdvihnout časovou náročnost experimentů. Přechodová charakteristika byla měřena po dobu 10 h a projevoval se v ní, jak bylo později zjištěno, nelineární charakter soustavy.

3.1 POSTUP SYNTÉZY REGULÁTORU

Pro návrh parametrů PI regulátoru (pro tepelný systém vhodnější než PID varianta) je třeba v první řadě změřit přechodovou charakteristiku. Regulátor PMA KS90-1 má možnost exportu měřených dat do software Microsoft Excel. Bez nutnosti měřících karet či dalšího SW bylo tedy využito této možnosti. Veškerá numerická identifikace, tedy zejména nalezení aproximačního přenosu a sestavení tečny, bylo realizováno pomocí SW Matlab. V přehledné formě jsou tedy kroky pro získání parametrů PI regulátoru následující:

1. Změření vhodných charakteristik
2. Export dat do vhodného SW (Matlab)
3. Proložení naměřených dat aproximačním přenosem
 - a. Simulace budícího signálu (jednotkový skok)
 - b. Použití MNČ (porovnání reálné a simulované odezvy)
 - c. Podle minimálního sumačního kritéria najít parametry přenosu
4. Vytvoření tečny k přechodové charakteristice
5. Spočítat dobu průtahu a dobu náběhu a zesílení soustavy

6. Podle tab. 2.7 spočítat parametry PI regulátoru

Experimentální identifikace

Nyní přichází, jak již bylo avizováno na straně 66, na řadu část, zabývající se experimentální identifikací daného systému. Jedná se o problematiku získání co možná nejpřesnějšího popisu systému za pomoci naměřených experimentálních dat a určitých programových metod. Hledají se tedy vhodné parametry, pro předem zvolenou strukturu obrazového přenosu. Většinou lze odpovídající charakter soustavy vhodně odhadnout na základě zkušenosti nebo zkoušením více různých přenosů (různých řádů, s nebo bez dopravního zpoždění). Při této metodě se programově porovnává odezva reálného systému a odezva aproximačního přenosu na stejný vstupní signál (skutečná soustava na skutečný se porovnává s aproximační na ten samý simulovaný). V případě neshodné odezvy vniká na výstupu rozdíl signálů, popsáný jako

$$e = y - y_{\text{sim}}, \quad (2.16)$$

optimalizace spočívá v tom, že parametry modelu se podle vhodného algoritmu mění tak dlouho, dokud není e minimální. To potom zaručí, že nalezený model je nejvhodnějším, tedy že odchylka mezi reálným výstupem a výstupem ze simulovaného systému je minimální možná. Vstupní signály, které se používají v souvislosti s experimentální identifikací, jsou často skokové změny akční veličiny v blízkosti pracovního bodu. Pracovní bod musí v praxi ležet v lineární části. V případě elektrotepelných systémů je velmi časově náročné, takový experiment provádět. Ustálení prototypu pece na jednotkový skok (tedy přechodová charakteristika) nastalo v době delší než 10 hodin. To by v případě experimentu znamenalo odhadem 40 – 50 hodin nepřetržitého provozu, a to není v prostředí univerzity možné.

Obrazový přenos pro identifikaci bude obecně zvolen ve tvaru

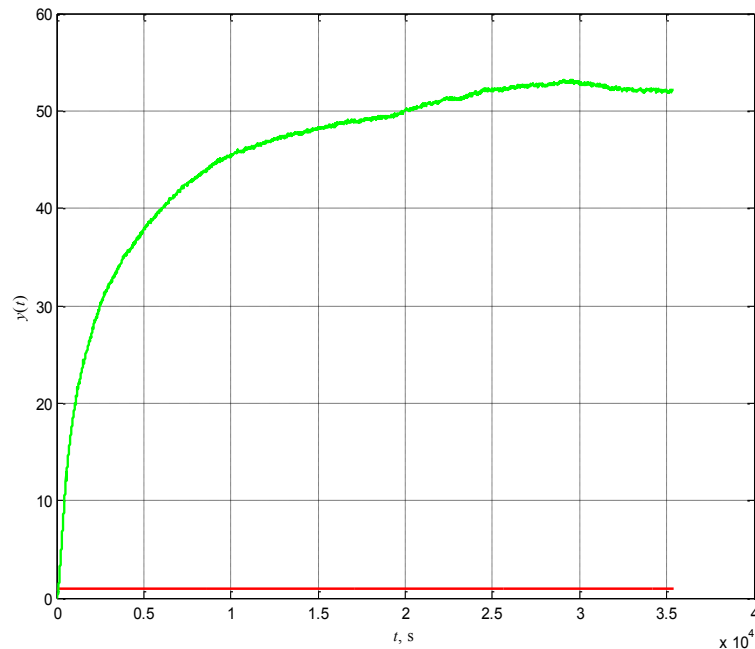
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m + s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n + a^n + \dots + a_1 s + a_0} e^{-sT_d} = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (2.17)$$

kde musí platit podmínka $n > m$. Pokud $T_d = 0$, jedná se o přenos bez dopravního zpoždění. Pro obecnější strukturu přenosu (reálné i komplexně sdružené nuly a póly) lze zvolit například přenos (Kupka, 2015), podle vztahu (2.23). Přenos s časovými konstantami, by omezoval systém pouze na systém s reálnými, nenulovými póly.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^4 + a_3 s^2 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (2.18)$$

Pro identifikaci systému pece byly zvoleny 3 různé tvary obrazového přenosu. A to sice: první řád s dopravním zpožděním, čtvrtý řád, druhý řád s dvěma časovými konstantami.

Na obr. 2.19 se nachází změřená přechodová charakteristika, získaná pomocí regulátoru PMA KS90-1. Akční zásah byl zvolen 1 V, což odpovídá příkonu 75 W.



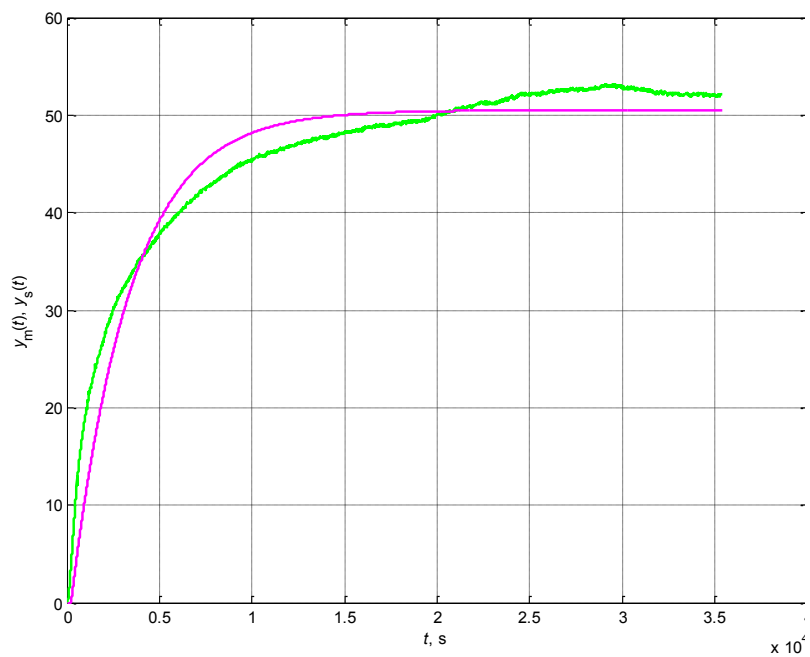
Obr. 2.19 – Naměřená přechodová charakteristika

Aproximace přenosem prvního řádu s dopravním zpožděním.

Při dané struktuře obrazového přenosu vychází (podle minimálního kritéria) jako optimální přenos

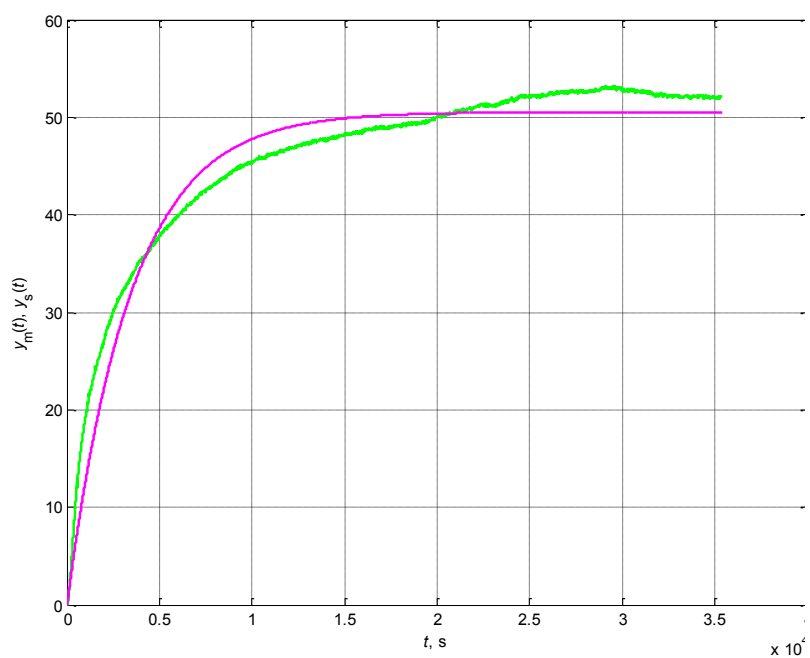
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0,01585}{s + 0,0003139} e^{-s \cdot 229}, \quad (2.19)$$

který pak svým průběhem odpovídá naměřené odezvě, podle obr. 2.20.



Obr. 2.20 – Aproximace přenosem prvního řádu s dop. zpožděním

Aproximace přenosem čtvrtého řádu



Obr. 2.21 – Přejchodová charakteristika aproximačního přenosu (4. řád)

Počáteční odhad aproximačního přenosu 4. řádu byl pro lepší představu volen ve formě přenosu s časovými konstantami. Veškeré přenosy daná data aproximují velmi podobně. Přenos 4. řádu je ve tvaru:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{50.54}{4392s^4 + 2.912e004s^3 + 4.305e004s^2 + 3462s + 1}. \quad (2.20)$$

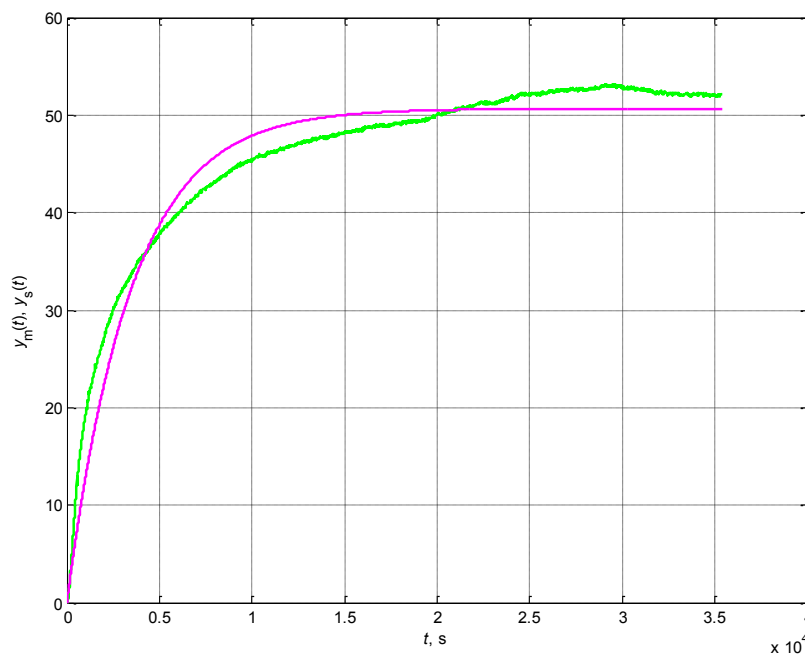
Aproximace přenosem druhého řádu s dvěma časovými konstantami

Tato aproximace taktéž přinesla podobné výsledky, ovšem což je pro pozdější získání parametrů PI regulátoru důležité, nebyla schopna aproximovat reálnou soustavu v oblasti inflexního bodu. To bylo zapříčiněno prováděním experimentu mimo lineární oblast (jedná se o nelineární systém). V konečném důsledku je právě tato oblast nejdůležitější pro získání parametrů PI regulátoru zvolenou metodou z přechodové charakteristiky.

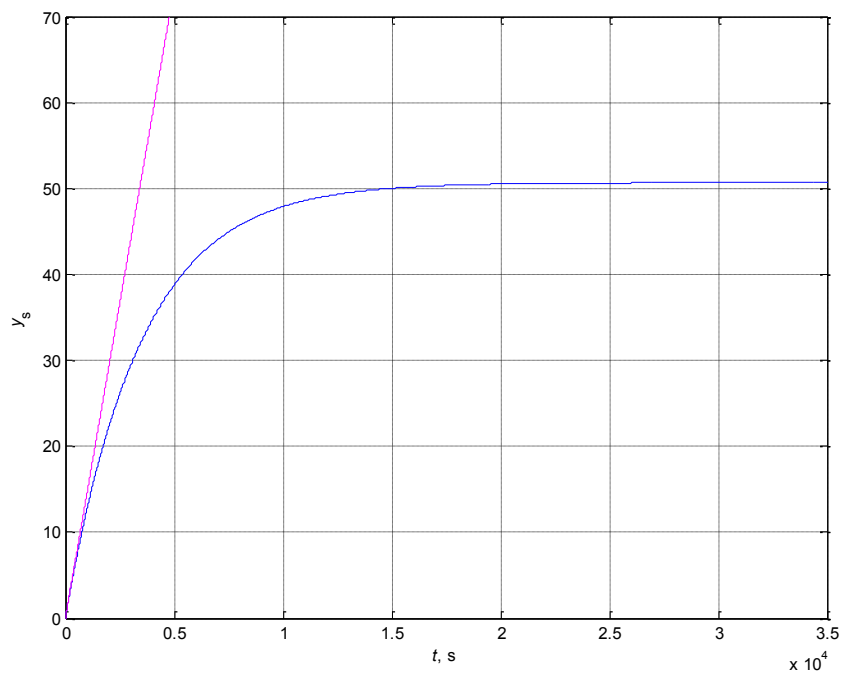
Odpovídající obrazový přenos je potom

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{3.78}{s^2 + 257.6s + 0.0746}. \quad (2.21)$$

Pro nastavení PI regulátoru je potřeba sestrojít tečnu v inflexním bodě. Zde se dá vyjít z jednoduché úvahy. Pro inflexní bod platí, že se nachází v maximu derivace dané funkce. Pro impulsní funkci platí, že je derivací přechodové funkce. Algoritmicky lze tedy snadno najít maximum impulsní funkce a s ní také inflexní bod. Na obr. 2.23 se nachází tečna přechodové charakteristiky (aproximačního přenosu).



Obr. 2.22 – Aproximace soustavou druhého řádu



Obr. 2.23 – Tečna přechodové charakteristiky aproximačního přenosu

Stejně tak lze algoritmicky spočítat dobu průtahu, doba náběhu a zesílení soustavy. Veškeré funkční skripty se nachází v příloze A této práce. V následující tabulce jsou shrnuty tyto 3 parametry.

Tab. 2.8 – Doba průtahu, doba náběhu, zesílení

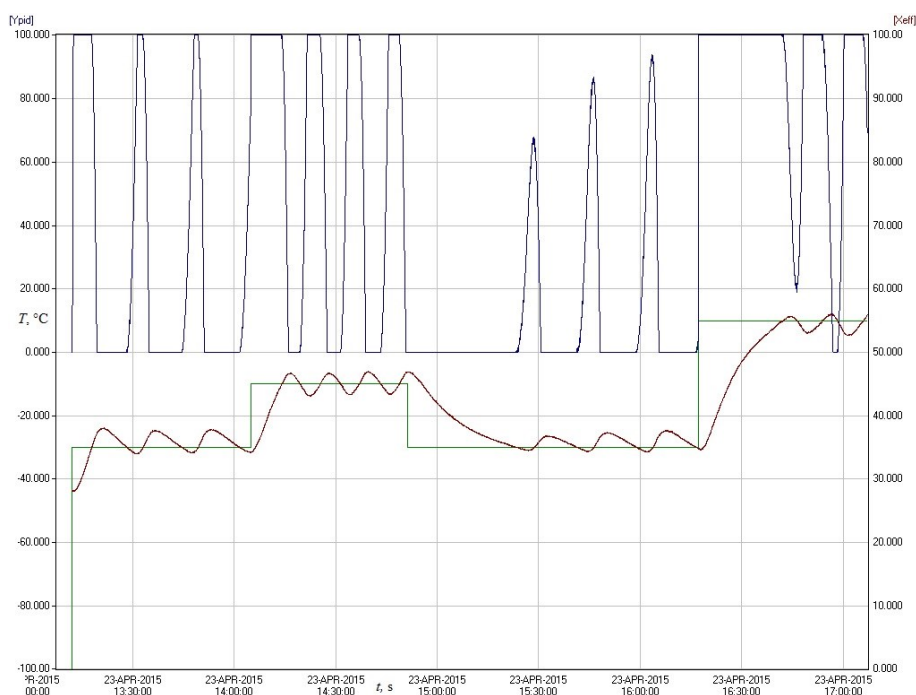
T_u	5
T_n	3465
K	50.5723

Zbývá pouze vypočítat parametry PI regulátoru podle tab. 2.7. Finální parametry PI regulátoru se nachází v tab. 2.9.

Tab. 2.9 – Zesílení, integrační čas. konstanta

r_k	12.3328
T_I	17.5000

Regulační pochod s nalezenými parametry je ovšem kmitavý. Znamená to, že byl nevhodně zvolen některý parametr PI regulátoru. Nevhodně zvolená integrační konstanta, která závisí v případě PI regulátoru na době průtahu, zde zapříčinila kmitavost soustavy, jak je vidět na obr. 2.24.



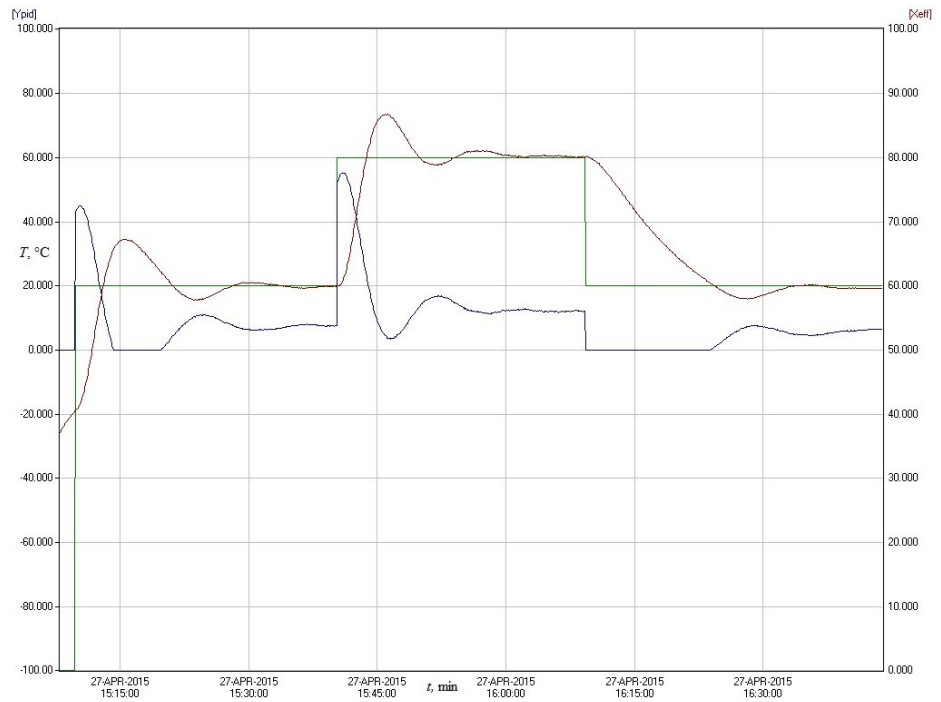
Obr. 2.24 – Kmitavý regulační pochod

Prvotní nastavení PI regulátoru není v pořádku a to z mnoha důvodů. Odpovídající parametry regulátoru se nachází v tab. 2.10.

Tab. 2.10 – Funkční sada parametrů

P_b	45
T_I	350

Zde vystupuje již převrácená hodnota zesílení, tedy P_b je zde jako pásmo proporcionality. Tato sada parametrů byla doladěna na základě experimentu a fyzikální úvahy. Regulační pochod se nachází na obr. 2.22.



Obr. 2.25 – Optimální regulační pochod

4 ZHODNOCENÍ REGULACE TEPLoty

Příčina kmitavého regulačního pochodu je následující. Pokud tedy velikost integrační časové konstanty regulátoru závisí na době průtahu, musí se zákonitě doba průtahu aproximační soustavy lišit od doby průtahu naměřených dat. Tato odchylka potom způsobuje onu nepřesnost a také tedy kmitání soustavy. Numericky nebylo možno nalézt aproximační přenos, který by vystihoval přechodovou charakteristiku kolem inflexního bodu. Je zřejmé, že doba průtahu celého systému v žádném případě netrvá 5 s, odhadem nastává řádově o stovky sekund později. Celé nastavení regulátoru komplikuje fakt, že samotné topné těleso disponuje určitým dopravním zpožděním, že atmosféra v peci není promíchávána a především, že tepelné procesy uvnitř pece jsou velmi složité (sálání vyzdívky zpět na teploměr Pt100 a jiné). Obecně tu lze ovšem vycházet z toho, že integrační časová konstanta regulátoru (která závisí dle experimentální metody především na době průtahu) musí být zvolena jinak, a to řádově stokrát větší. Při odhadnutí skutečné doby průtahu se lze dostat k hodnotě asi 300 s. Prvotní experimentální metodu lze proto doplnit o nastavení metodou „pokus omyl“, kde je nutné si uvědomit příčiny ne příliš kvalitního (kmitavého) regulačního pochodu a dané parametry regulátoru seřídít odhadem a opakovaným experimentem. Další možností by bylo použití statistických nástrojů pro efektivnější práci s naměřenými daty, ale ani tato cesta není zárukou úspěchu. Zjednodušení celého problému jako řízení lineární soustavy se ukázalo jako ne příliš vhodným způsobem, jak k problému přistupovat. Budící vstup do dané soustavy měl být v ideálním případě volen pouze v lineárním pásmu a ne v celém rozsahu, jak tomu bylo v případě přechodové charakteristiky. Regulace teploty by v praxi také záležela na technologii a na požadavcích na kvalitu regulace. Výsledná regulace, které bylo dosaženo na prototypu, by se dala zhodnotit jako dostačující. Kritéria nebyla zohledněna.

5 ZÁVĚR

Cíl diplomové práce, a tedy sestavení reálně pracujícího zařízení a regulace teploty v něm, byl dosažen. Tato diplomová práce poslouží v budoucnu každému, kdo se prakticky bude zajímat o problematiku elektrotepelných zařízení. Práce je dílem, které v sobě obsahuje základy pro projekci, stavbu, elektroinstalace a následné nastavení PI regulátoru. Budoucnost této práce by mohla spočívat v popisu teorie řízení nelineárních systémů nebo minimálně ve využití metody gain scheduling pro regulaci ve větším rozsahu. Práce dále varuje další čtenáře před nepřijemnostmi, které jsou s danou problematikou spojeny a naopak se stane dobrým rádcem pro realizaci, kterékoliv části celku. Realizované fyzické zařízení bude do budoucna konstrukčně upraveno a stane se technologickým zařízením v dílně v rodinném podniku, jako sušící pec na sušení sádro – antukových forem. Prvotní myšlenka, tedy naučit se realizovat elektrotepelné zařízení až do finální podoby, pro účel vybavení dílny, byla taktéž splněna.

Samotná regulace a průběh experimentální identifikace je pouze částečným úspěchem. K celé problematice je přistupováno jako k řízení lineárního systému lineárním regulátorem. Veškerá teorie je potom prakticky aplikována na výsledky ne příliš vhodně zvolených experimentů. Experimenty měly být voleny tak, aby postihovaly pouze lineární rozsah daného systému, kolem vhodně zvoleného pracovního bodu. Toho nemohlo být dosaženo, díky veliké časové náročnosti experimentů. Úkolem technického pracovníka je umět si poradit v každé situaci. Cíl práce byl i přes to splněn a teplota v peci je regulována na žádanou hodnotu, do teploty asi 90 °C pomocí použité elektroniky.

Literatura

- Backer-Elektro [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.backer-elektro.cz/produkty/typ-6280>
- Carlo Gavazzi RJ1P23V30E.[online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/460918.pdf>
- Ethermtz [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.ethermtz.cz/picture/gallery//106-valeckove-pece/details/02-valeckove-pece.jpg>
- Ethermtz [online] 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.ethermtz.cz/picture/gallery//89-vozove-zihaci-pece/details/01-vozove-zihaci-pece.jpg>
- FRIBERT, M. 2012 *Měření technologických veličin*. Výukové texty. Pardubice: Univerzita Pardubice. 133 s.
- HRADÍLEK, Z.; LÁZNIČKOVÁ I.; KRÁL V. 2011. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- Isover [online]. 2014 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/isover-fireprotect-150>
- Kominex [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://www.obchodkominex.cz/samotova-deska-s-ska-400x300x30-mm-6-8-kg-2668_detail
- KUPKA, L. 2015. Numerická optimalizace. Pardubice: Osobní sdělení.
- Mtixtl [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.mtixtl.com/productimages/labsupplies/Heating-EL-340.jpg>
- Plášťový odporový teploměr s hlavicí F.[online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.hth8.cz/download/files/cidla_2014/MTR_datove_listy/2014-02-DTR11FS.pdf
- PROKOP R.; MATUŠŮ R. a PROKOPOVÁ Z. 2006. *Teorie automatického řízení - lineární spojité dynamické systémy*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 102 s. ISBN 80-731-8369-2.
- RADA, J. 1985. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL. 344 s.
- Realistic [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:

http://www.realistic.cz/downloads/g3_realistic_images/kclankum2/217-9.jpg

Regulátor KS90-1 manuál.[online]. 2011 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z:

http://pma-xtra.de/en/pdf/ba_ks90-1_progr_e_9499-040-66111.pdf

Sklářský průmysl [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://sklarsky>

prumysl.gds.cz/vypalovaci-pece-a-susarny/komorova-pec

Slovmag [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:

<http://www.slovmag.sk/sk/produkty.php>

Submarineboat [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:

http://www.submarineboat.com/images/metal_working/Cerablanket%20Insulation.JPG

Submarineboat [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:

http://www.submarineboat.com/images/metal_working/Firebrick_IFB.JPG

Tcdirect [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:

<http://www.tcdirect.co.uk/images/prodimages/large/514500.png>

Ventilator-ventilatory [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.ventilator>

ventilatory.cz/deploy/img/products/6618/6618.jpg

VOLF, I.; JAREŠOVÁ M a OUHRABKA M. 2015. *Přenos tepla: Studijní text*

pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku [online]. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:

<http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>

Zez Praha [online]. 2015 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.zez.cz/Korea.jpg>

Přílohy

A - Skript v SW Matlab, pro numerickou identifikaci

B - Fotogalerie stavby pece

C - Výrobní dokumentace

Příloha k diplomové práci

Konstrukce a řízení laboratorního modelu pece

Bc. Patrik Horký

**SKRIPT V SW MATLAB, PRO NUMERICKOU
IDENTIFIKACI**

V příloze A se nachází skripty, potřebné pro identifikaci systému numericky. Obsahuje kód skriptu main_dp.m a skriptu ident2a.m

main_dp.m

```
%% Optimalizace
clear all, close all, clc
global t ym um
t=load('t.txt'); ym=load('y.txt');
um=ones(length(t),1);
figure
plot(t,um,'r',t,ym,'g','LineWidth',2), grid on
  xlabel('\itt\rm, s','fontname','Times New Roman CE'),
  ylabel('\ity\rm(\itt\rm)','fontname','Times New Roman CE')
b0=500; a1=110; a0=10; x0=[b0 a1 a0];
sys=tf(b0,[1 a1 a0])
ys=lsim(sys,um,t);
OPTIONS=optimset('LargeScale','off','MaxIter',250,'Display','iter');
x=fminsearch('ident2a',x0,OPTIONS);
b0=x(1); a1=x(2); a0=x(3);
sys=tf(b0,[1 a1 a0])
ys=lsim(sys,um,t);
figure, plot(t,ym,'g',t,ys,'m','LineWidth',2), grid on
xlabel('\itt\rm, s'), ylabel('\ity\rm_m(\itt\rm), \ity\rm_s(\itt\rm)')
%% Náběh, průtah, parametry
Z = dcgain(sys);
h = step(sys, t);
g = impulse(sys, t);
[maximumg index] = max(g);
tmaximumg = t(index);
tecna = maximumg * (t - tmaximumg) + h(index);
figure(4);
plot(t, h, t, tecna, 'm');
grid on;
xlabel('\itt\rm, s');
ylabel('\ity\rm_s');
index = find(tecna >= 0);
disp('Doba průtahu:');
Tu = t(index(1))
index = find(tecna >= Z);
disp('Doba náběhu:');
Tn = t(index(1)) - Tu
gama=Tn/Tu;
rk=0.9*gama/Z;
Ti=3.5*Tu;
```

ident2a.m

```
function f=ident2a(x)
global t ym um
%2. rad
b0=x(1); a1=x(2); a0=x(3);
```

```
sys=tf(b0,[1 a1 a0]);  
ys=lsim(sys,um,t);  
e=ym-ys;  
f=e'*e;
```

Příloha k diplomové práci

Konstrukce a řízení laboratorního modelu pece

Bc. Patrik Horký

FOTOGALERIE STAVBY PECE

V příloze B se nachází fotografie pece ve všech fázích jejího vývoje



Obr. 1 – Konstrukce 1 – distanční šrouby (50mm)



Obr. 2 – Konstrukce 2 – dvě mufle



Obr. 3 – Konstrukce 3



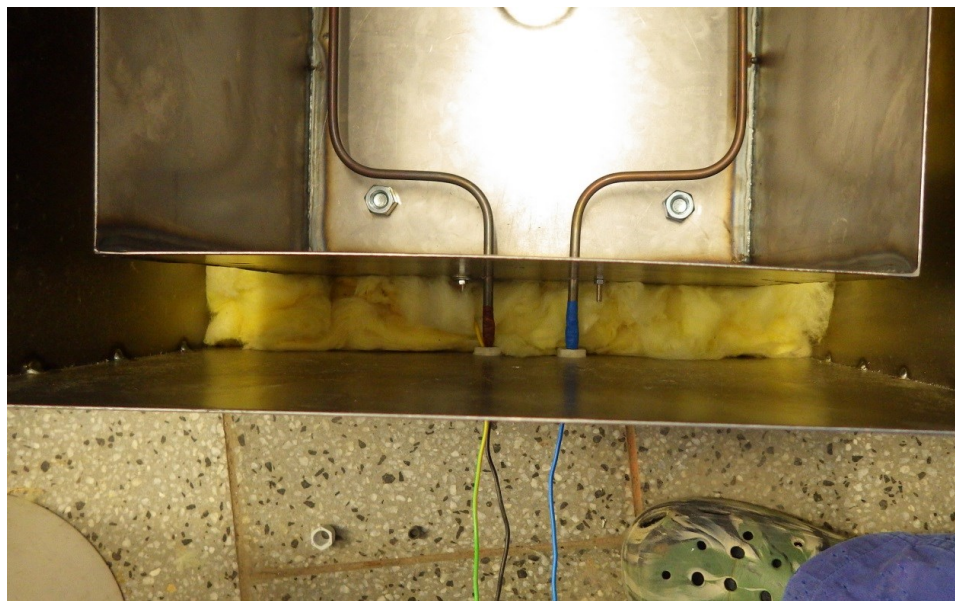
Obr. 4 – Konstrukce 4



Obr. 5 – Konstrukce 5 – uložení vnitřní muflle na distanční šrouby



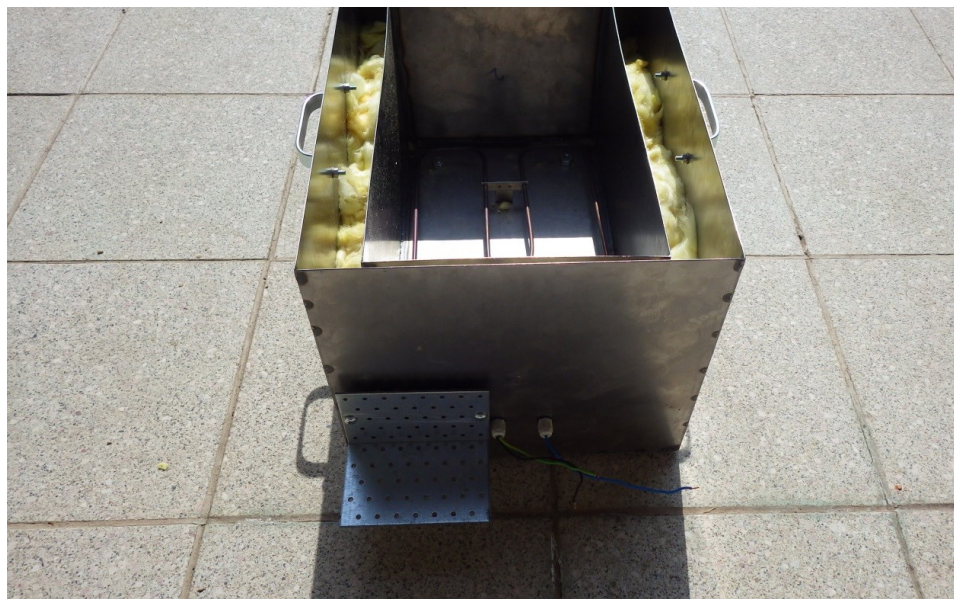
Obr. 6 – Vyplnění dna izolací



Obr. 7 – Těleso, uchycení



Obr. 8 – Montáž tělesa



Obr. 9 – Montáž konzole pro SSR



Obr. 10 – Elektroinstalace 1



Obr. 11 – Elektroinstalace 2, provizorní zapojení



Obr. 12 – Finální stroj, pohled shora

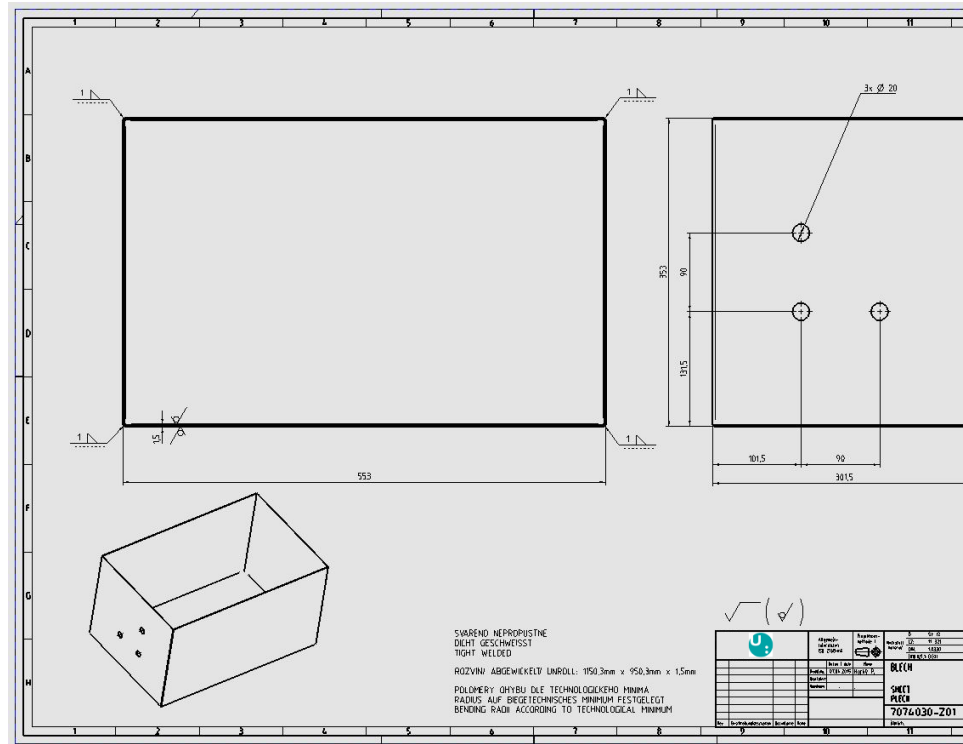
Příloha k diplomové

Konstrukce a řízení laboratorního modelu pece

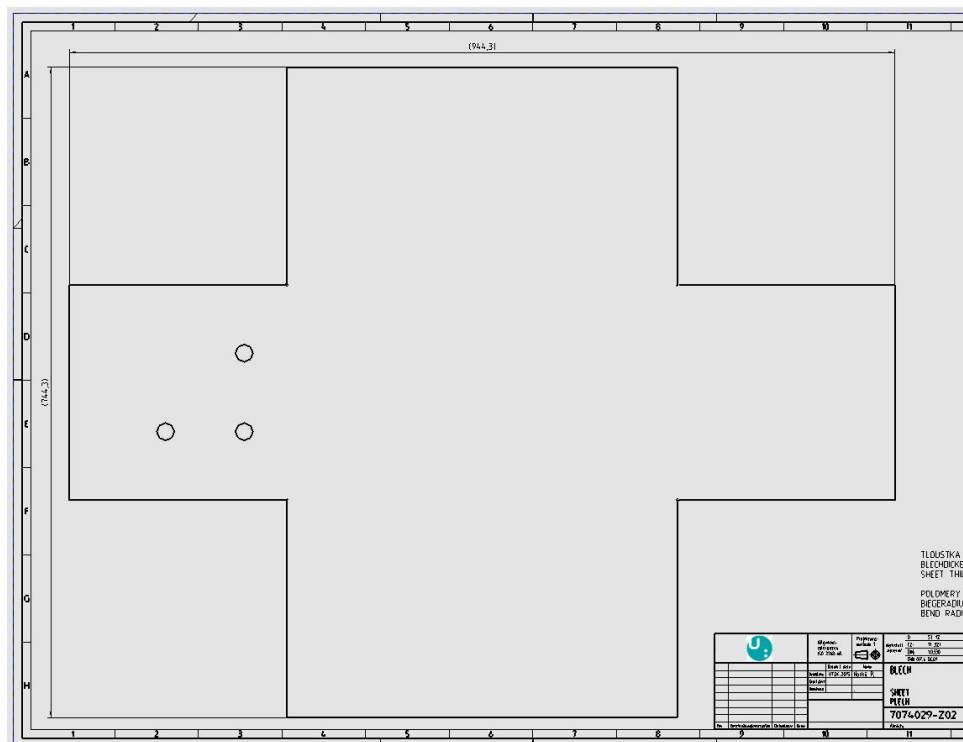
Bc. Patrik Horký

VÝROBNÍ DOKUMENTACE

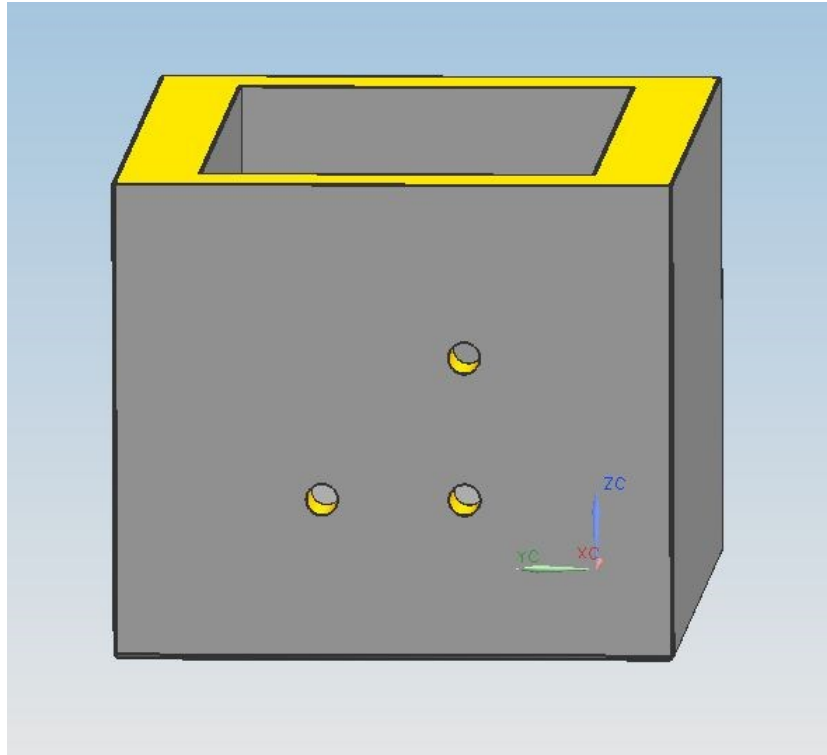
V příloze C se nachází výrobní dokumentace k prototypu pece, byla vytvořena v 3D CAD SW Siemens NX.



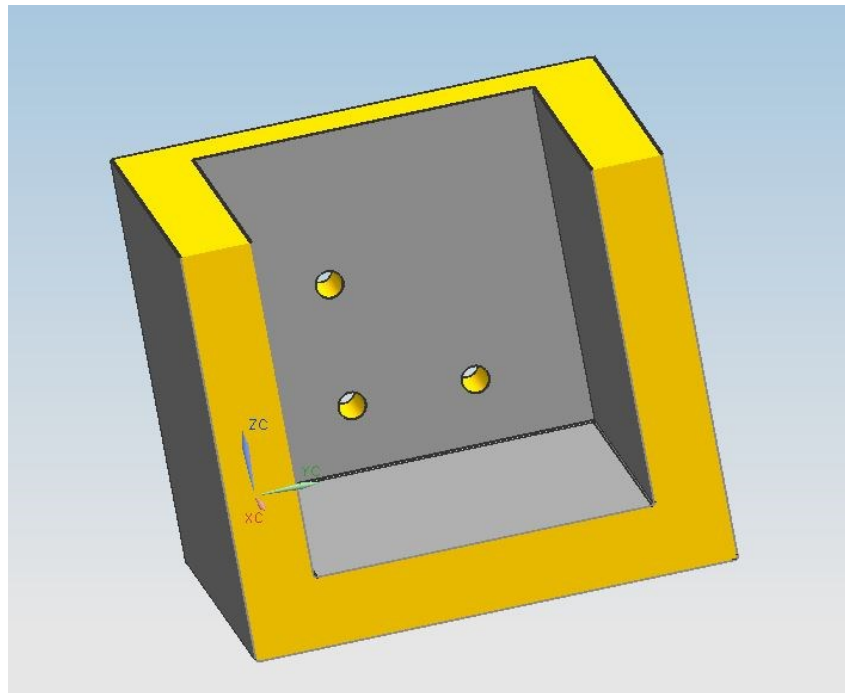
Obr. 1 – Pohled na stranu elektroinstalace



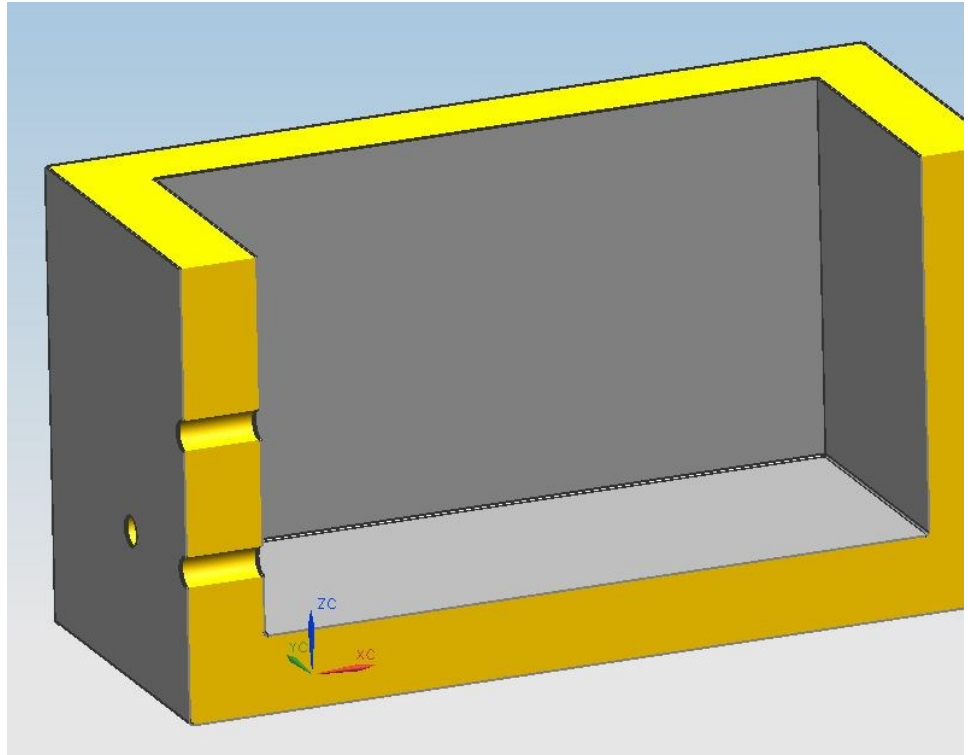
Obr. 2 – Rozložený plášť



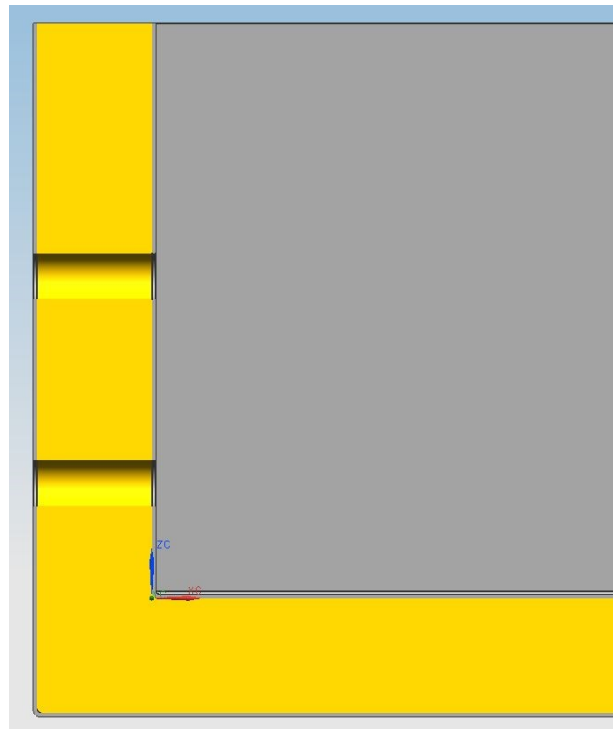
Obr. 5 – 3D pohled 2



Obr. 6 – 3D pohled 3 – průřez 1



Obr. 7 – 3D pohled 4 – průřez 2



Obr. 8 – 3D pohled 5 – průřez 3