

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Řízení elektrotepelných procesů v elektrických
odporových pecích**

vedoucí práce:	prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.	2015
konzultant:	Ing. Jiří Lucák	
autor:	Bc. Jaroslav Formánek	

Abstrakt

Práce popisuje základy elektrotepelných procesů v elektrických odporových pecích. Dále popisuje vybrané elektrické pece jak z oblasti pecí se stabilní vsázkou, tak i z oblasti pecí průběžných, které slouží k realizaci technologických procesů. Dále se práce zabývá základním modelem řízení elektrotepelných procesů: termočlánek – regulátor – akční člen – zátěž a návrhem nejvhodnějšího způsobu řízení pece. Poslední bod se týká stručného závěru pro praxi.

Klíčová slova

Elektrotepelné procesy, odporová pec, řízení elektrotepelných procesů, odporový ohřev, tepelné ztráty.

Abstract

The Diploma thesis dealas with basis of electrical-heat process in electrical rezistance furnaces. There are described selected electrical furnaces from furnaces field with stable batch and also from field of continuous furnaces, which serve to realization of technological processes. The Thesis is occupied with basis model of steering electrical-thermal proces: thermocouple – regulator - actuating device - strain. At the end of the thesis is calculated the most appropriate method of steering furnaces. The last part is concerned brief conclusion for practise.

Key words

Electrical-heat process, rezistance furnace, steering of electrical-heat processes, rezistance heating, heat losses.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Plzni dne 7.5.2015

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. a konzultantovi diplomové práce Ing. Jiřímu Lucákovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
ÚVOD	12
1 ELEKTROTEPELNÉ PROCESY V EL. ODPOROVÝCH PECÍCH	13
1.1 PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV	14
1.1.1 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů podobně.....	15
1.1.2 Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku.....	18
1.1.3 Přímý odporový ohřev skla	19
1.1.4 Termická elektrolyza	20
1.1.5 Elektrodové solné lázně	21
1.1.6 Elektrodový ohřev vody.....	23
1.2 NEPŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV[2].....	25
2 VHODNÉ TYPY PECÍ K REALIZACI TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ	26
2.1 ODPOROVÉ PECE SE STABILNÍ VSÁZKOU	26
2.1.1 Komerové pece.....	26
2.1.2 Vozové (vozikové) pece	26
2.1.3 Šachtové (hlubinné) pece	27
2.1.4 Poklokové (zvonové) pece.....	27
2.1.5 Elevátorové pece.....	28
2.1.6 Kelímkové pece tavicí a tavicí vany	28
2.2 ODPOROVÉ PECE PRŮBĚŽNÉ.....	29
2.2.1 Pásové pece.....	29
2.2.2 Chladící pec	30
2.2.3 Krokové pece.....	32
2.2.4 Protahovací pece	32
2.2.5 Bubnové pece	32
2.2.6 Karuselové (rotační) pece.....	33
3 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ UVEDENÝCH ELEKTROTEPELNÝCH PROCESŮ	34
3.1 DĚLENÍ DLE ŘÍZENÍ	34
3.1.1 Jednozónové pece.....	34
3.1.2 Vícezónové pece.....	34
3.1.2.1 PLC	34
3.2 TERMOČLÁNKY	35
3.3 TYPY REGULACE	39
3.3.1 ON-OFF regulace	39
3.3.2 Fázové řízení.....	40
3.3.3 Spínání v nule.....	41
3.4 PROSTŘEDKY K OVLÁDÁNÍ TOPNÝCH ČLÁNKŮ (AKČNÍ ČLENY).....	41
3.4.1 Stykače	42
3.4.2 Polovodičové přístroje	42
3.4.2.1 Diody [9].....	45
3.4.2.2 Tyristory.....	46
3.4.2.3 IGBT tranzistory	48
3.5 ZAPOJENÍ TOPNÝCH ČLÁNKŮ	49
3.5.1 Zapojení topných článků do série[9]	49
3.5.2 Paralelní zapojení topných článků[9].....	50
3.5.3 Zapojení topných článků do hvězdy[9]	52
3.5.4 Zapojení topných článků do trojúhelníka[9].....	53

4	NÁVRH ELEKTRICKY A EKONOMICKY NEJVHODNĚJŠÍHO ZPŮSOBU ŘÍZENÍ PROCESŮ	55
4.1	VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT.....	55
4.1.1	<i>Tepelné ztráty vztahené na 1m² [9] [14] [13] [15]</i>	56
4.1.2	<i>Tepelné ztráty modelu [9] [14] [13] [15]</i>	57
4.2	VÝPOČET TOPNÉHO ČLÁNKU	61
4.3	NAVRŽENÍ TRANSFORMÁTORU [16].....	62
4.4	VÝPOČET DOBY ROZTOPENÍ PECE[13].....	64
4.5	NAVRŽENÍ ŘÍDÍCÍHO OBVODU	66
5	ZÁVĚR PRO PRAXI	66
6	ZÁVĚR	67
	POUŽITÁ LITERATURA.....	68
	PŘÍLOHY.....	69

Seznam použitých zkratk a symbolů

A_{S1}	-	střední plocha bočních stěn dna a stropu	$[m^2]$
A_{S2}	-	střední plocha přední a zadní stěny	$[m^2]$
A	-	průměr daného elementu	$[m]$
A_1, A_2, A_3, A_4	-	plochy stěn vyzdívky	$[m^2]$
a_1, a_2, a_3, a_4	-	délky stěn	$[m]$
b_1, b_2, b_3, b_4	-	délky stěn	$[m]$
c	-	měrná tepelná kapacita	$[J/kg * K]$
G	-	váha pecní vyzdívky	$[kg]$
I_0	-	klidový závěrný proud diody	$[A]$
I_1, I_2	-	proud topných článků	$[A]$
I_D	-	blokovací proud diody	$[A]$
I_{ef}	-	efektivní hodnota proudu	$[A]$
I_f	-	fázový proud	$[A]$
I_{FM}	-	jmenovitý proud diody	$[A]$
i_G	-	intenzita proudového impulsu	$[A]$
I_H	-	vratný proud tyristoru	$[A]$
I_{MAX}	-	maximální sekundární proud	$[A]$
I_S	-	sružený proud	$[A]$
I_T	-	proud tyristoru	$[A]$
I_Z	-	ztrátový proud	$[A]$
L_e	-	délka topného elementu	$[m]$
l	-	délka	$[m]$
l_1	-	tloušťka stěny, kterou prochází teplo	$[m]$
P_{Δ}	-	příkon všech fází trojúhelníku	$[W]$
P'_{Δ}	-	příkon jedné fáze trojúhelníku	$[W]$
P_y	-	příkon všech fází hvězdy	$[W]$
P'_y	-	příkon jedné fáze hvězdy	$[W]$
p	-	povrchové zatížení elementu	$[W/m^2]$
P_1, P_2	-	výkony topných článků	$[W]$
P_C	-	celkový výkon topných článků	$[W]$
Q	-	množství tepla	$[J]$

q	-	prostup tepla stěnou vztažený na 1m^2	$[\text{W}/\text{m}^2]$
Q_{AK}	-	akumulované teplo	$[\text{kJ}]$
Q_u	-	užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky	$[\text{W}]$
Q_z	-	tepelné ztráty	$[\text{W}]$
R	-	odpor	$[\Omega]$
R_1, R_2	-	odpory topných článků	$[\Omega]$
R_C	-	celkový odpor	$[\Omega]$
R_D	-	dynamický odpor	$[\Omega]$
R_L	-	odpor daného elementu0	$[\Omega]$
R_{SMIN}	-	minimální odpor sítě	$[\Omega]$
S	-	průřez	$[\text{m}^2]$
t	-	teplota	$[\text{°C}]$
t_{OFF}	-	doba obnovy blokovací schopnosti tyristoru	$[\text{s}]$
t_p	-	čas pro roztopení pece	$[\text{s}]$
t_π	-	čas otevření diody	$[\text{s}]$
U	-	napětí	$[\text{V}]$
U_1, U_2	-	napětí topných článků	$[\text{V}]$
U_D	-	blokovací napětí diody	$[\text{V}]$
U_f	-	fázové napětí	$[\text{V}]$
U_{FN}	-	úbytek napětí na diodě	$[\text{V}]$
U_{KR}	-	maximální napěťový krok	$[\text{V}]$
U_{MIN}	-	minimální požadované napětí	$[\text{V}]$
U_{RRM}	-	špičkové závěrné opakovatelné napětí	$[\text{V}]$
U_{RSM}	-	špičkové závěrné neopakovatelné napětí	$[\text{V}]$
U_S	-	sdržené napětí	$[\text{V}]$
U_T	-	úbytek napětí na tyristoru	$[\text{V}]$
U_{TO}	-	prahové napětí	$[\text{V}]$
V	-	objem pecní vyzdívky	$[\text{m}^3]$
V_1, V_2	-	objem bočních stěn	$[\text{m}^3]$
V_3	-	objem stropu	$[\text{m}^3]$
V_4	-	objem dna	$[\text{m}^3]$
V_5	-	objem přední stěny	$[\text{m}^3]$
V_6	-	objem zadní stěny	$[\text{m}^3]$

α	-	teplotní činitel odporu	[K ⁻¹]
π	-	matematická konstanta	[-]
ω	-	úhlová rychlost	[rad*S ⁻¹]
λ	-	měrná tepelná vodivost	[W/m*K]
ρ	-	rezistivita	[Ω*m]
ϑ_0	-	teplota okolí	[°C]
ϑ_1	-	teplota na vnitřní stěně pece	[°C]
ϑ_{2ZV}	-	odhadnutá hodnota teploty na vnější straně stěny	[°C]
α_1	-	součinitel přestupu tepla stěny	[W/m ² *K]
μ_0	-	permeabilita vákua	[H*m ⁻¹]
μ_r	-	relativní permeabilita	[-]

Úvod

Odporové pece, ač si to většina lidí neuvědomuje, jsou nedílnou součástí běžného života každého z nás. Napsala bych: Mají uplatnění v širokém spektru oborů a pro velké množství technologických procesů se s nimi setkáváme ve výrobním procesu při tavení, kalení, žíhání, a dokonce i v postupném ochlazování.

Řízení odporových pecí je jedna z nejdůležitějších částí elektrotepelných procesů elektrických odporových pecí, využívají poznatků mnoha technických a vědních oborů.

Cílem této práce je, se seznámit se základy elektrotepelných procesů, které souvisí s elektrickými odporovými pecemi. Druhá část obsahuje přehled o vhodných typech pecí k realizaci elektrotepelných procesů, které jsou rozděleny do dvou základních velkých skupin na odporové pece se stabilní vsázkou na odporové pece průběžné. V další části této práce jsou popsány různé druhy řízení těchto elektrotepelných procesů, od starších způsobů jako je přepínání hvězda trojúhelník, až po moderní řízení pomocí tyristorů spínáním v nule, nebo fázovým řízením. V poslední části této práce je proveden návrh a výpočet nejefektivnějšího způsobu řízení elektrických odporových pecí s porovnáním různých variant. Například výpočet tepelných ztrát pecní vyzdívky z dvou různých druhů materiálu, při třech různých teplotách.

1 Elektrotepelné procesy v el. odporových pecích

Elektrická energie se mění v tepelnou v elektrotepelných zařízeních odporových podle Joulova zákona: Prochází-li elektrický proud vodičem, vzniká ve vodiči teplo. Teplo se předává do okolí za současného růstu teploty samotného vodiče. Množství tepla je úměrné druhé mocnině proudu a elektrickému odporu vodiče. [1]

$$Q = R \cdot I_{ef}^2 \cdot t = P \cdot t \quad [\text{J}] \quad (1)$$

Odpor vodiče o délce l (m) a průřezu s (mm^2) je

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad [\Omega] \quad (2)$$

Kde ρ je rezistivita materiálu. Ta je závislá na teplotě u většiny materiálů. Při oteplení o Δt je

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad [\Omega] \quad (3)$$

kde α je teplotní činitel odporu, tento činitel je pro většinu kovů kladný, silně závislý na teplotě a pro keramické materiály záporný.[2]

Odporová zařízení se rozdělují podle vzniku a působení tepla do dvou základních skupin a to na zařízení s přímým a zařízení s nepřímým odporovým ohřevem. [1]

1.1 Přímý odporový ohřev

Teplo vzniká v zařízeních pro přímý odporový ohřev přímým průchodem proudu elektricky vodivou kapalinou (elektrolytem obklopujícím vsázku), nebo elektricky vodivou pevnou vsázkou.[1]

Teoretické základy přímého odporového ohřevu, které jsou popsány Joulovým zákonem jsou jednoduché, ale projektování těchto zařízení a jejich výpočty nejsou snadné. Závislosti fyzikálních vlastností vsázky či elektrolytu na teplotě jsou spojeny s obtížemi. Veličiny jako například rezistivita, měrná tepelná kapacita a také součinitel tepelné vodivosti bezprostředně ovlivňují tepelnou bilanci ohřevu, kterou lze vyjádřit vztahem: [1]

$$Q = Q_U + Q_Z \quad [J] \quad (4)$$

Kde Q je teplo vzniklé průchodem proudu
 Q_U užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky
 Q_Z tepelné ztráty

Uvedená tepelná bilance je základem k určení potřebného výkonu

$$P \sim \frac{dQ}{dt} \quad [W] \quad (5)$$

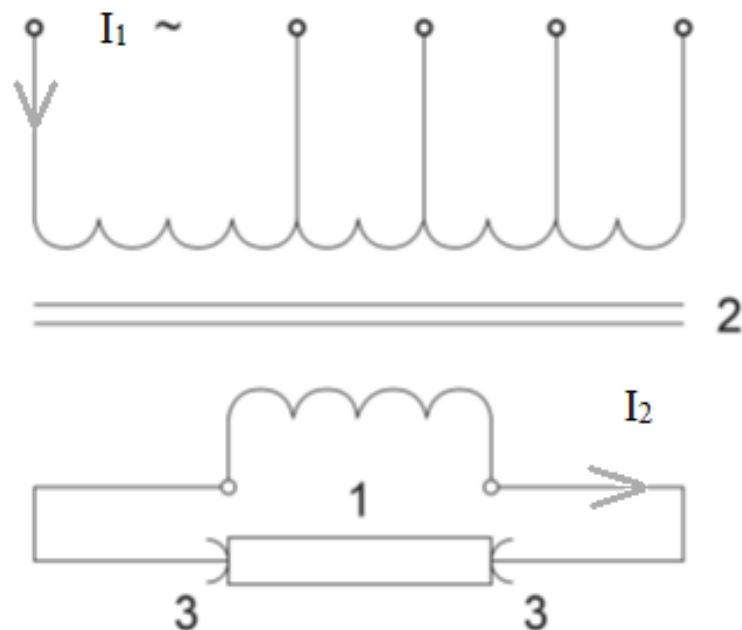
Tento výkon je závislý na časovém průběhu ohřevu vsázky. P_c je celkově odebíraný výkon elektrotepelného zařízení. Tento výkon se zvětšuje o tepelné ztráty způsobené vsázecím zařízením. Dále se zvětšuje o výkon potřebný pro pohony mechanismů a také o ztráty příslušného transformátoru. [1]

Můžeme rozdělit zařízení pro přímý odporový ohřev podle vzniku tepla na dva základní typy. Zařízení pro ohřev pevné vsázky kovové, uhlíkové, nebo grafitové jsou prvním typem. V prvním typu je kovová vsázka ve tvaru tyčí, drátů, pásů apod.[1]

Druhým typem je zařízení pro ohřev tekuté vsázky. Jde například o ohřev vody v elektrodových kotlích, kde tekutou vsázkou je voda, nebo o elektrický přihřev a tavení skla kde vsázkou je roztavené sklo. Také může jít o výrobu hliníku termickou elektrolýzou, kde v tekuté vsázce současně probíhá elektrolýza. Další možností je ohřev pevné kovové vsázky v tekuté vsázce například solné lázně pro tepelné zpracování drobné vsázky nebo tzv. katodový ohřev kovové vsázky ve vodním roztoku soli. [1]

1.1.1 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů podobně

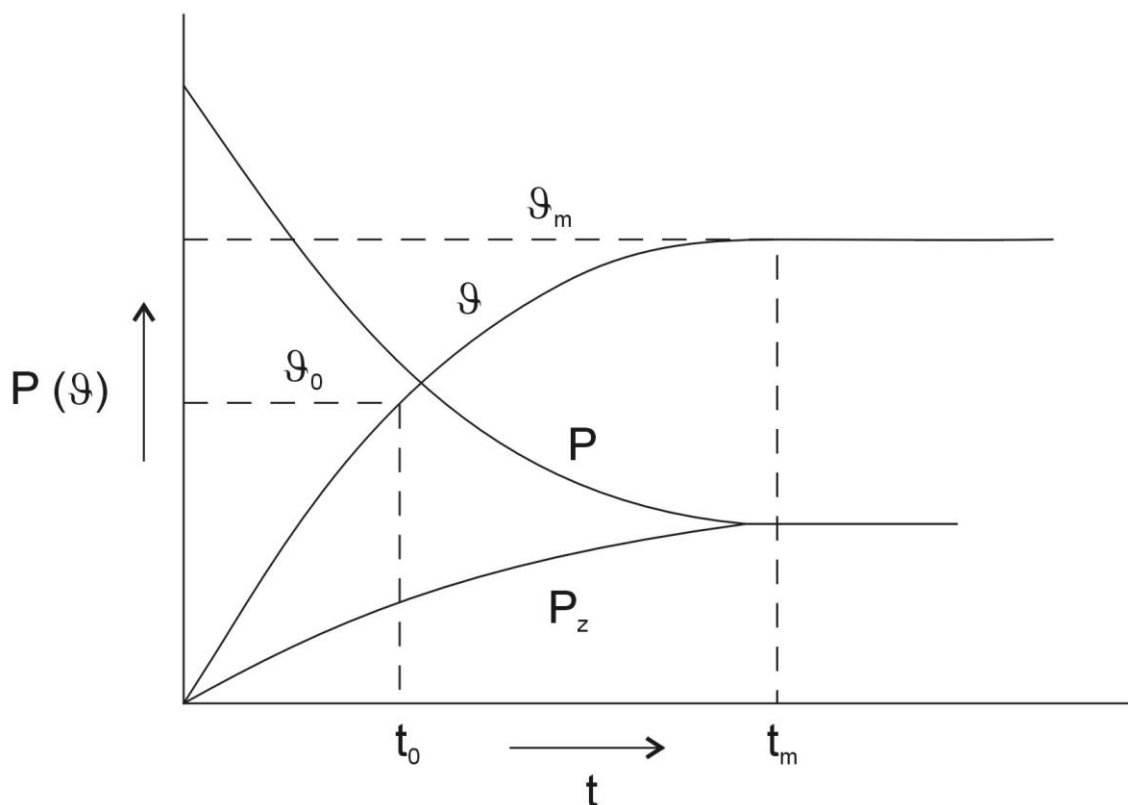
Na Obr. 1 je schematicky znázorněn princip odporového ohřevu. Aby byl ohřev dostatečně rovnoměrný po celé délce, musí být délka ohřívané tyče nejméně 10krát větší než její průměr. Z regulačního transformátoru 2 je do tyče 1 konstantního průřezu zaváděn kontakty 3 velký proud I_2 . Tento ohřev je velmi rychlý a účinný.[2]



Obr. 1: Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů a pásů [2]

Jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení, nastávají optimální poměry. Tomuto stavu se blíží studená měděná tyč. Při ohřátí z 20 °C na 1000 °C však stoupá odpor mědi až 7krát. Na vstupním vinutí transformátoru zvyšujeme během ohřevu napětí na tyči souhlasně s růstem odporu přepínáním odboček, aby bylo přijatelné impedanční přizpůsobení. Pokud možno tak, že konce tyčí musí být čisté, kontakty bývají chlazené vodou, měděné a jsou přitlačovány pneumaticky nebo hydraulicky k ohřívané tyči.[2]

Efektivně se aplikuje ohřev přímým průchodem proudu při výkonech do 100 kW. Symetrizační zařízení je nutno použít u jednofázového zařízení nad 500 kW. Na Obr. 2 můžeme vidět průběhy příkonu, teploty a ztrát při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče bez přepínání napětí. Podle růstu odporu tyče s teplotou příkon klesá a tepelné ztráty rostou. Rovná-li se příkon ztrátám, tak dosáhne teplota své mezní hodnoty. Teplota ohřevu musí být menší než mezní teplota.[2]



Obr. 2: Průběhy příkonu, teploty a ztrát [2]

Reaktance přívodů ke kontaktům u vysokých proudů se výrazně uplatňuje, a proto je účinnost $\cos\varphi$ u přímého odporového ohřevu nízký. Při ohřevu dochází ke kolísání napětí v síti zapínáním a vypínáním transformátoru. Je nutností použít symetrizační zařízení u jednofázového zařízení nad 500 kW.[2]

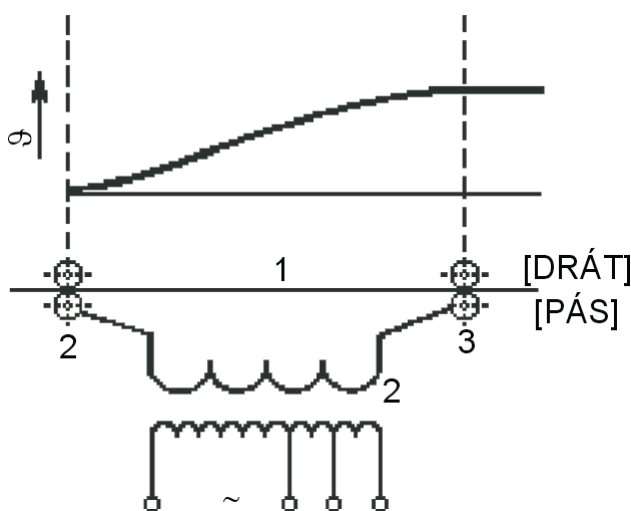
Uplatňuje se značně povrchový jev při přímém ohřevu ocelových feromagnetických tyčí střídavým proudem. Přibližně v hloubce vniku vzniká největší teplo (86,4 %) a lze ji určit podle vztahu:[2]

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}} \quad [2] \quad (6)$$

kde ρ je rezistivita tyče, ω je úhlová rychlost, μ_0 je permeabilita vakua a μ_r je relativní permeabilita.[2]

Pro běžnou konstrukční magnetickou ocel je hloubka vniku při frekvenci 50 Hz do teploty 768 °C (Curierův bod – ztráta feromagnetismu) řádově v jednotkách mm. ρ je asi 7krát větší a hloubka vniku je asi 70 mm nad teplotu 768 °C. [2]

Na Obr. 3 je znázorněno schematicky zařízení pro průběžný ohřev drátu nebo pásu. Do proudového obvodu výstupní strany transformátoru 2 je připojen kladkami, nebo grafitovými bloky 3 drát nebo pás 1.[2]

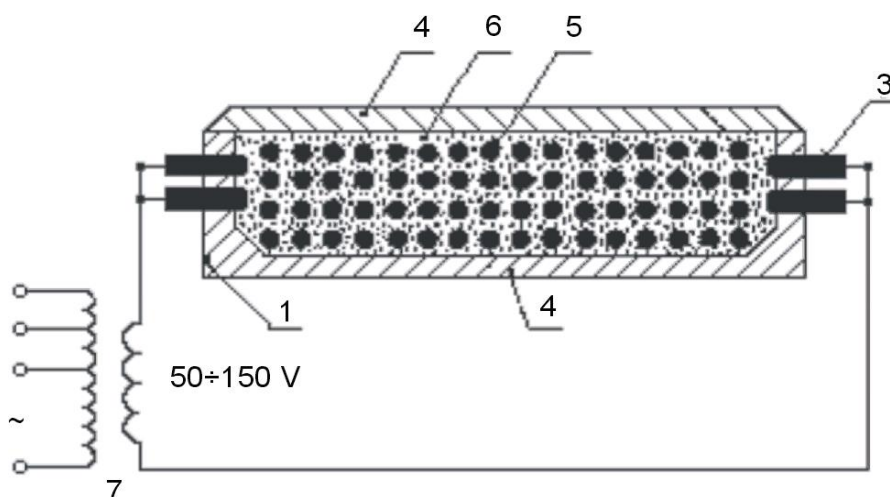


Obr. 3: Zařízení pro průběžný ohřev [2]

Změnou protahovací rychlosti drátu, změnou napětí mezi kladkami nebo změnou jejich vzájemné vzdálenosti lze docílit patřičné teploty ohřevu. Tento ohřev se používá např. pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro ohýbání, kalení drátů do předpjatého betonu, nebo pro měkké žíhání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm apod.[2]

1.1.2 Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku

Na Obr. 4 je znázorněna Achesonova pec, v které se vyrábějí grafit a karbid křemíku (karborundum). Chemickým procesem, probíhajícím při teplotě kolem 2500 °C, jenž se nazývá grafitizace, při němž se amorfní uhlík strukturálně mění v grafit s vynikajícími fyzikálními, chemickými i mechanickými vlastnostmi, se vyrábí uhlík. [2]



Obr. 4: Grafitační pec Achesonova [2]

Na Obr. 4 je znázorněno čísla 1 dno pece, 2 čelní stěna, 3 jsou grafitové bloky, 4 víko pece, 5 vsázka, 6 zásypová směs a 7 napájecí transformátor. [2]

Pece mohou pojmout vsázku o hmotnosti 50 t i více a mají délku až 20 m. Příkon transformátorů dosahuje až do 10 MVA. Napájecí napětí může být regulováno v rozsahu 50 - 150 V. Tyto pece zatěžují napájecí síť nerovnoměrně a mají malý $\cos\phi$ cca kolem 0,5. U pecí s velkými výkony se z těchto důvodů používá symetrizační zařízení. Při napájení stejnosměrným proudem je regulace výkonu snazší a odpadá kompenzace i symetrizace. [2]

Podle velikosti pece a druhu výrobků se spotřeba elektrické energie na výrobu 1kg grafitu pohybuje od 4 kWh do 6 kWh, a přibližně 8 kWh na výrobu 1kg karbidu křemíku. Ohřev pece trvá 2 až 4 dny, vychladnutí pece trvá 10 až 14 dnů, až poté se vsázka z pece vyjme. [2]

1.1.3 Přímý odporový ohřev skla

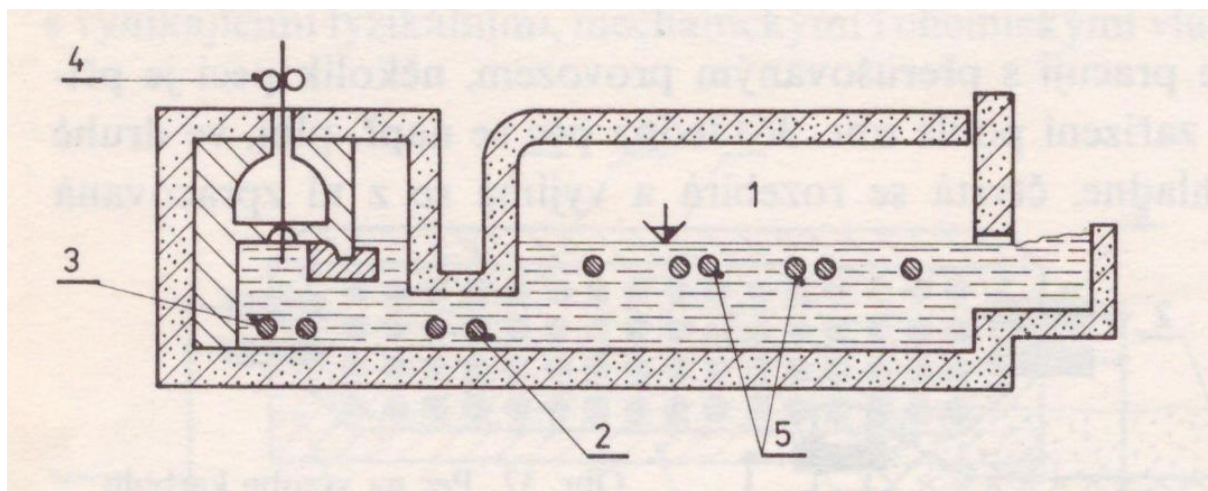
Při teplotě 200 °C a více se u skla zvyšuje jeho elektrická vodivost a stává se elektricky vodivým, za studena je sklo dobrým izolantem. [1]

Elektrodové pece na tavení skla, které jsou ve sklárnách, pracují s přímým průchodem proudu. Přímý ohřev má oproti ohřevu plynem některé výhody, jako například že tavenina v důsledku jejího víření elektrodynamickými silami zůstává čistá a je homogenní materiálově i teplotně. Další výhodou je, že nedochází ke ztrátám přísad úletem do komína, přísadami jsou oxidy olova u olovnatého skla. Elektrody jsou z molybdenu nebo z grafitu, nebo se používají i elektrody z čistého železa. [1]

Na Obr. 5 je příklad elektrodové sklářské vany. Tato vana je na tavení a výrobu tabulového skla. Sklo se taví v prostoru 1, kde jsou elektrody 5, do pracovního prostoru s elektrodami 2 a 3 je přiváděno roztavené sklo. Sklo ohřáté na požadovanou teplotu pomocí elektrod se může táhnout ve tvaru pásu směrem vzhůru na zařízení 4. Tyto elektrody by měly být připojeny na zdroj trojfázového proudu 50 Hz, z důvodu rovnoměrného zatížení sítě, proto jsou vhodně uspořádány a propojeny. [1]

Příkon je regulován fázovými nebo impulsními tyristorovými regulátory, dříve byl regulován autotransfornátory nebo natáčivými transformátory. Podobnou metodou se vyrábí například trubice pro zářivky. [1]

Častým příkladem je kombinace plynového ohřevu sklářských pecí s elektrodovým přihřevem. Plynovým ohřevem se dodává základní teplo, elektrodovým přihřevem pak teplo technologicky náročné na regulaci a čistotu. [1]



Obr. 5 : elektrodová sklářská vana [1]

- 1 - Prostor pro tavení skla
- 2,3 - elektrody v pracovním prostoru
- 4 - tažné zařízení
- 5 - elektrody v tavicím prostoru

1.1.4 Termická elektrolýza

Za současně probíhající elektrolýzy nebo rafinace se zahřívá elektrolit přímým průchodem stejnosměrného proudu. Elektrolytická výroba hliníku je nejrozšířenější termickou elektrolýzou, ta se také používá k výrobě sodíku a hořčíku. [2]

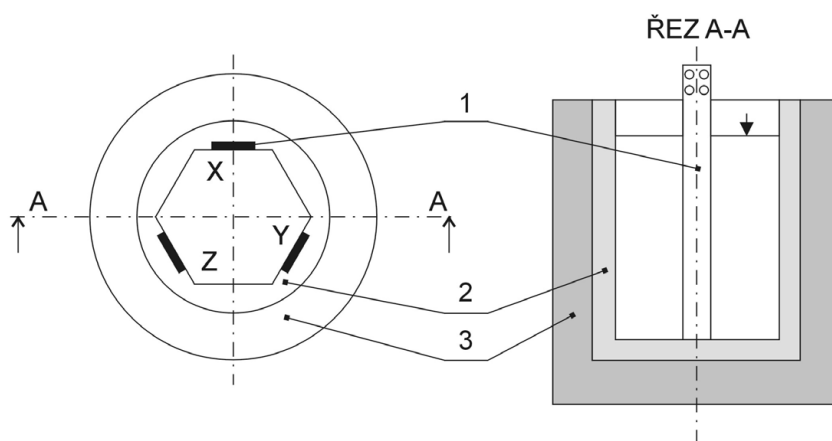
Hliník má tavicí teplotu asi 650 °C a vyrábí se z bauxitu (Al_2O_3). Technicky mnohem výhodnější získání hliníku je rozpustit bauxit v roztaveném kryolitu, což je fluorid hlinito-sodný, pomocí elektrolýzy při teplotě 950 °C. [2]

Na výrobu 1 kg se spotřebuje 16 kWh až 22 kWh elektrické energie, záleží na velikosti a technickém stavu zařízení. [2]

1.1.5 Elektrodové solné lázně

K ohřevu ocelových součástí ke kalení, např. kuliček, válečků nebo kroužků do ložisek se používají převážně solné lázně. Používají se také při teplotách až 1 400 °C pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin. Můžeme je rozdělit na dva základní typy: [2]

U prvního typu, který je na Obr. 6, závisí příkon na vsázce. Proud procházející elektrolytem prochází také i vsázkou ponořenou v elektrolytu. [2]

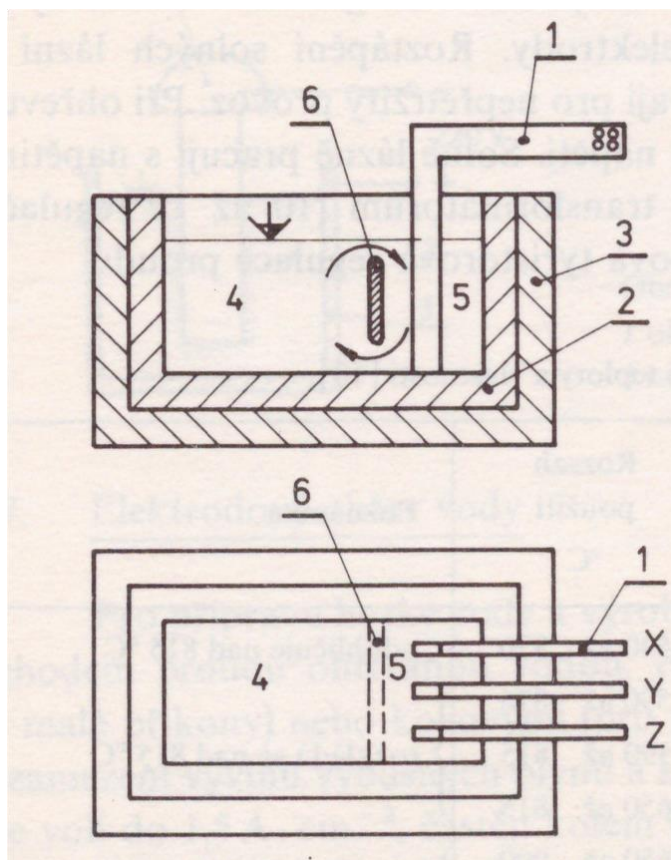


Obr. 6: Solná lázeň 1.typu [2]

- 1 – elektrody
- 2- keramický kelímek
- 3- tepelná izolace kelímku

Znázornění principu prvního typu solné lázně je na Obr. 6. Elektrody 1 (X, Y, Z) jsou v šestihránném keramickém kelímku 2. Tyto elektrody jsou připojené k trojfázovému regulačnímu transformátoru. Tepelná izolace 3 je na vnější straně kelímku. Drobné součásti vsázky (např. kuličky a kroužky kuličkových ložisek), které jsou v koši ze žárupevné oceli, se vkládají do roztavené soli, která je uvnitř kelímku. [2]

U druhého typu, který je na Obr. 7, již příkon na vsázce nezávisí. Proud vsázkou neprochází a vsázka se vkládá do soli v místě, kde není elektrické pole[1]



Obr. 7: Solná lázeň 2. Typu [1]

- 1 - elektrody
- 2 - keramická vana
- 3 - tepelná izolace vany
- 4 - prostor pro vsázku
- 5 - prostor s elektrodami
- 6 - oddělovací přepážka

Znázornění druhého typu solné lázně je na Obr. 7. Tři elektrody (X, Y, Z) 1 jsou umístěny v keramické vaně 2 s tepelnou izolací 3. Přepážka 6 odděluje prostor pro vsázku 4 od prostoru elektrod 5. Šipkami je naznačeno elektrodynamické a tepelné proudění, díky němu je v celém prostoru dobrá rovnoměrná teplota. Proud neprochází vsázkou umístěnou v prostoru 4.[1]

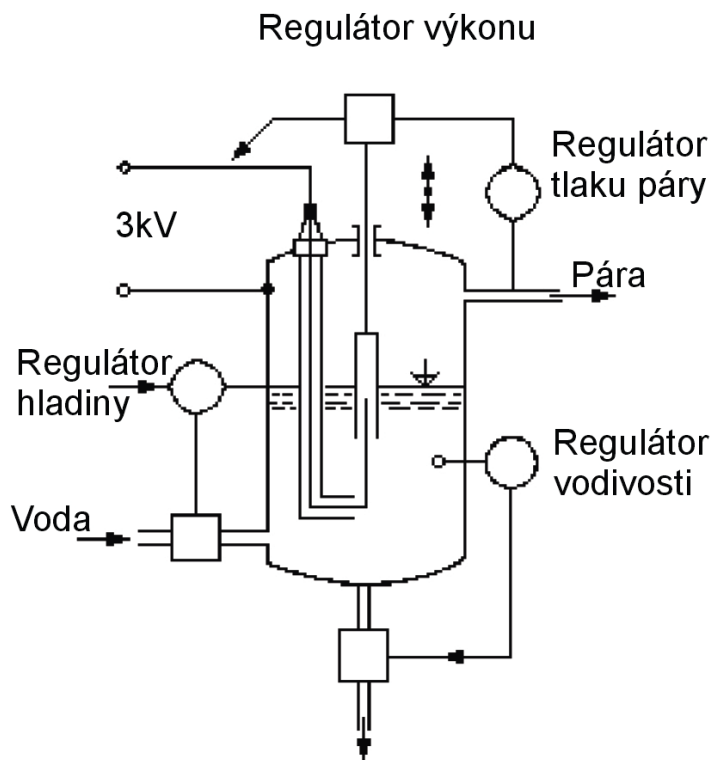
Aby se zabránilo nadměrnému místnímu přehřátí, mají elektrody velké stykové plochy. Roztavenou solí prochází elektrický proud a tím vzniká teplo. Nejdříve je důležité pomocí odporového topného článku natavit tenkou vrstvu soli, která se po natavení odpojí. Tento postup se používá, protože jsou tyto soli v tuhém stavu nevodivé. Natavenou vrstvou poté prochází proud a vzniká další ohřev. Pro ohřev se používá k napájení transformátor s možností regulace sekundárního napětí v rozsahu 4 až 24 V, protože při ohřevu soli klesá její odpor. Nejlépe vyhovující směs soli se volí podle pracovní teploty solné lázně.[2]

Vsázka se ohřívá bez přístupu vzduchu rychle a přesně, což je hlavní výhodou solných lázní. Vysokou hodnotou součinitele přestupu tepla prouděním mezi elektrolytem a tuhou vsázkou je dána rychlost ohřevu. Solné lázně musí dbát na odtah a čištění zplodin, které se uvolňují z roztavených solí, je to součástí přísných bezpečnostních předpisů, které musí solné lázně splňovat.[2]

1.1.6 Elektrodotový ohřev vody

Teplo, které vzniká přímým průchodem proudu ohřívanou vodou, se využívá pro přípravu horké vody a výrobu páry. Elektrody jsou buď grafitové, které jsou pro malé příkony, nebo jsou kovové pro velké příkony. Těmito elektrodami se se přivádí střídavý proud pro zamezení vývinu výbušných plynů a koroze. Hustota proudu povrchem elektrody se pohybuje většinou kolem $0,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ a volí se do maximální hodnoty $1,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Na složení vody a hlavně na teplotě vody závisí její elektrická vodivost. [2]

Máme různé druhy konstrukcí elektrodotových kotlů, které se dělí podle napětí. Vyrábějí se pro napětí 230 V a 400V, pro vysoká napětí až do 30 kV. Staví se průtokové kotle na ohřev vody v široké škále výkonu od výkonu několika kilowattů až do několika megawattů. Často se voda ohřívá nočním proudem Jako akumulární médium pro vytápění i technologie se používá voda ohřívá nočním proudem. Používá se například v papírenském, textilním nebo potravinářském průmyslu. Na Obr. 8 jsou zobrazené elektrodotové kotle na výrobu páry, které se používají na vaření. Tato pára se rozvádí do varných kotlů a vrací se zpět jako kondenzát. Kotle, které mají provozní napětí 30 kV, se staví s výkonem až 60 MW a přetlaku až 4 MPa. Zmiňované kotle jsou používány k průmyslové výrobě horké vody. [2]



Obr. 8: Jednofázový elektrodový kotel [2]

Výkon elektrodového zařízení regulujeme několika způsoby. Například úpravou vodivosti vody, plochou elektrod to znamená zakrýváním izolačními návleky (porcelánové nebo křemenné trubky), jejich zkracováním nebo prodlužováním. Dalšími způsoby jsou: přibližování a oddalování elektrod, rozdělení elektrod na skupiny, které se různě spínají a přepojují, dále mechanickým zanořováním a vynořováním elektrod z vody, změnou výšky hladiny vody v kotli pomocí čerpadla při pevných elektrodách zavěšených shora, nebo změnou počtu trysek u tzv. tryskových elektrodových vysokonapěťových kotlů. [2]

1.2 Nepřímý odporový ohřev[2]

Zařízením, kde vzniká teplo v topných člancích, které jsou umístěny přímo v pecním prostoru, se říká zařízení s nepřímým odporovým ohřevem. Díky sálání topných článků a vyzdívky se následně přenáší teplo do vsázky. Dalším způsobem přenosu tepla je proudění atmosféry v pecním prostoru, popřípadě i vedením. Odporové pece, tak se nazývají elektrická odporová zařízení s nepřímým ohřevem. Odporové pece lze dělit podle některých hledisek.

Dělení dle teploty na pece:

- nízkoteplotní až 600 °C,
- středoteplotní 600 - 1100 °C,
- vysokoteplotní více než 1100 °C.

Dělení podle atmosféry, která je v pecním prostoru na pece:

- s normální atmosférou, což je prostředí se vzduchem,
- s řízenou atmosférou (např. pro nauhličování, nitridaci, pro zamezení oxidace),
- pracující s vakuem, příkladem jsou vakuové pece.

Dělení podle zařazení v provozu na pece:

- pro tavení kovů,
- pro laboratoře,
- pro domácnosti,
- pro tavení skla,
- pro tepelné zpracování kovů,
- pro chlazení skla atd.

Posledním dělení je pro pece rozhodující a záleží na pohybu vsázky:

- se stabilní vsázkou, vsázka se nepohybuje a provoz je přerušovaný,
- se vsázkou, která prochází pecí, což jsou pece průběžné, které mají pohyblivé dno a jejich povoz je nepřerušovaný.

2 Vhodné typy pecí k realizaci technologických procesů

2.1 Odporové pece se stabilní vsázkou

U odporových pecí se stabilní vsázkou se vsázka během ohřevu nepohybuje. Mezi nejpoužívanější pece patří například pece komorové, vozové, šachtové, pokloповé (zvonové), elevátorové a kelímkové tavicí. [2]

2.1.1 Komorové pece

Nejstarší odporové pece jsou takzvané pece komorové. Tyto pece jsou hojně používané, kvůli tomu že jsou velmi univerzální. K vytápění tu slouží topné články, které jsou umístěny nejčastěji na bocích, někdy ve dveřích, v zadní stěně, nebo také v podlaze a ve stropě. Tyto pece se dělají s topnými články z karbidu křemíku (SiC), které jsou do teplot 1400 °C, nebo s topnými články kovovými, které zvládnou teplotu do 1100 °C, nebo i z jiných materiálů (tzv. cermetů). [2]

2.1.2 Vozové (vozíkové) pece

Další pece, které mají stabilní vsázku, jsou pece vozové. Vozové pece jsou větší než pece komorové. U těchto pecí jsou boky se stropem a zadním čelem stabilní. V peci je pojízdný vozík, který se skládá z dna a s předního čela pece. Vozík vyjede z pece, naloží se na něj vsázka a opět zajede zpět do vytopené pece. Jen se vsázkou o hmotností více než 100 t jsou vozové pece ekonomicky výhodné a to s výkonem 3000 kW až 5000 kW[2]



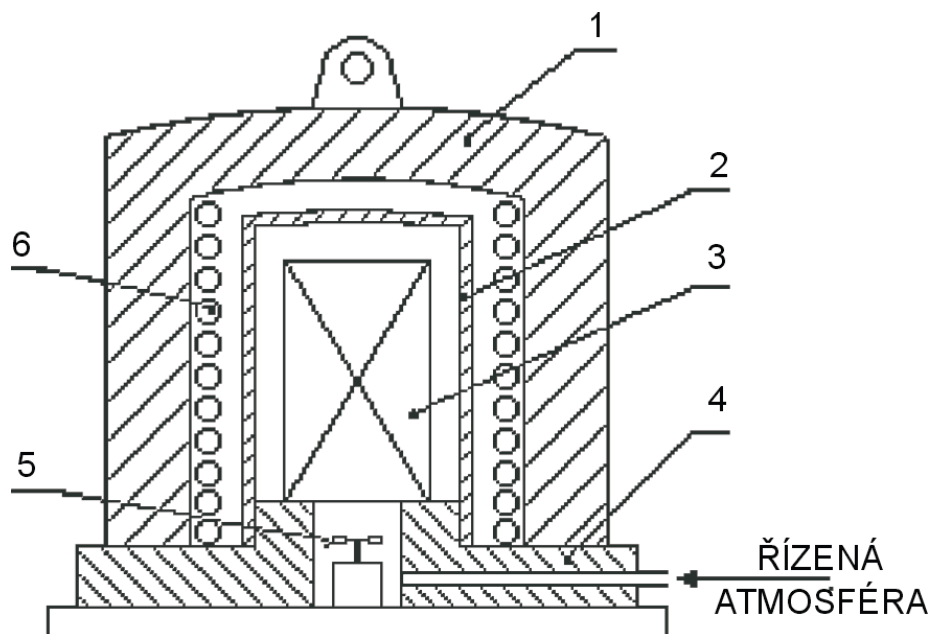
Obr. 9: Vozové žihací peci [9]

2.1.3 Šachtové (hlubinné) peci

Šachtové peci, které se také nazývají hlubinné, jsou hluboké 10 – 20 m. Tyto peci mají průřez kruhový nebo čtvercový a svislou osu. Peci jsou zapuštěné většinou pod podlahu. Do podlah nebo do vík peci se často instalují ventilátory pro oběh atmosféry v peci. Tyto ventilátory slouží pro dosažení větší rychlosti ohřevu a rovnoměrného rozložení teploty. Šachtové peci nemají takové ztráty jako peci komorové nebo vozové, neboť se snadno utěšňují a izolují, ale nejsou tak univerzální. [2]

2.1.4 Pokloповé (zvonové) peci

Na Obr. 10 vidíme pokloповou pec, která se také nazývá zvonová, kvůli topnému poklopu ve tvaru zvonu 1. Tento poklop je dobře tepelně izolovaný. Na vnitřním povrchu tohoto poklopu, který má kruhový nebo čtvercový průřez, je topné vinutí 6. Číslem 4 je označena pracovní plošina, na kterou se nasazuje poklop jeřábem. Před nasazením poklopu se na plošinu umístí vsázka 3. Proti lokálnímu přehřátí a přímému sálání je vsázka krytá žárupevnou muflí 2. Ventilátor označen číslem 5 je umístěn pod vsázkou. Tyto peci se vyrábí do výkonů stovek kilowattů. [2]



Obr. 10: Pokloповá pec [2]

2.1.5 Elevátorové pece

Největší odporové pece, které mají stabilní vsázku, se nazývají elevátorové pece. Vyrábějí se pro teploty do 1000 – 1200 °C. Mají velmi dobrou účinnost. Tyto pece pracují s výkony 500 kW až 2 000 kW. Díky jejich velikosti se do nich dá vložit vsázka velkých rozměrů a velké hmotnosti (desítky tun). Jakmile se ohřeje vůz se vsázkou, pokračuje směrem k peci, tím pádem se může zařadit do výrobní linky a to je velkou výhodou elevátorových pecí. [2]

2.1.6 Kelímkové pece tavicí a tavicí vany

Pro tavení slitin a kovů, které mají nižší bod tání jako například hliník, olovo, zinek nebo cín, se konstruují kelímkové pece a tavicí vany. Součástí pece je kovový nebo keramický kelímek. Kolem kelímku je topné vinutí. Okolo kostry pece je tepelná izolace a uvnitř topení. Aby se dal roztavený kov dobře vylít, jsou tyto pece konstruovány jako sklopné. [2]

Naopak tavicí vany sklopné nejsou, používají se pro pozinkování, pocínování a alitaci. Odlišná konstrukce spočívá v topném vinutí s tepelnou izolací na vnější straně vany. Jiná konstrukce má naklápění po otočných klapkách pro odlévání vsázky a topení ve stropě, tato konstrukce se uplatňuje pro přetavování (egalizaci) hliníku. [2]

2.2 Odporové pece průběžné

Tam, kde je předepsáno tepelné zpracování pro větší počet výrobků se používají odporové pece průběžné. Těchto pecí se staví více odlišných druhů. Uvedené pece jsou dimenzovány na nižší teploty. Podle technologického procesu a stanovených předpisů lze v těchto pecích provádět ohřev, výdrž i ochlazování. Pece mají samostatně napájená a regulovaná teplotní pásma, kterých je větší množství. Podle požadované rychlosti ochlazování je vybavena ochlazovací komora tepelnou izolací nebo vodním chlazením. Tato komora je připojena k peci v případě pomalého ochlazování vsazených částí. [2]

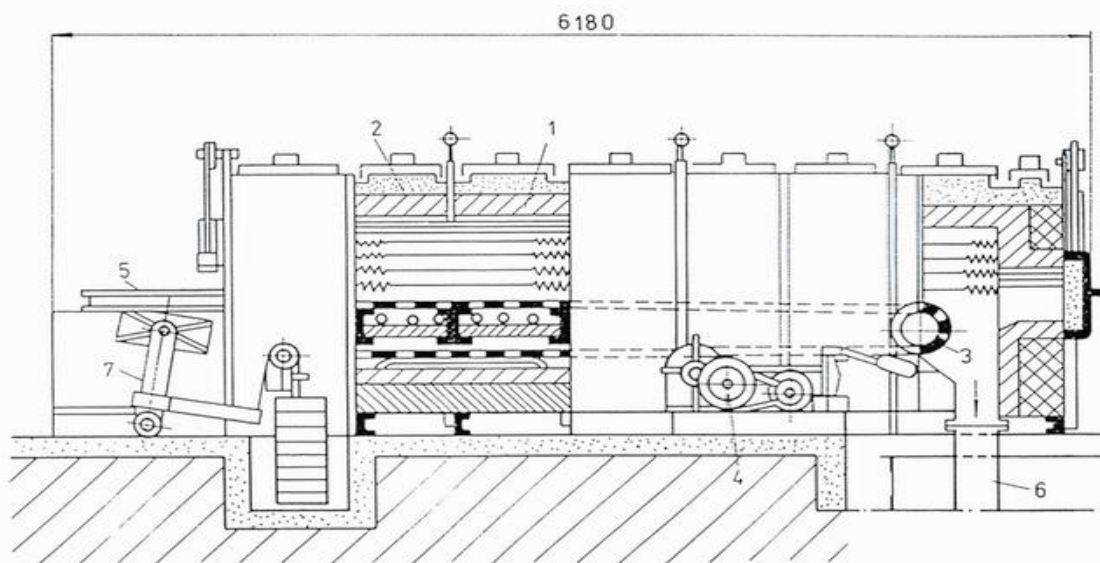
Je možné vytvořit jeden zcela mechanizovaný a automatizovaný celek pomocí několika průběžných pecí. Kalicí a propouštěcí pece se nejčastěji spojují s kalicími lázněmi, čistícími a sušícími zařízeními. [2]

Tyto pece se konstruuje tak aby byly schopné trvalého provozu. Jsou pece pásové, řetězové, karuselové, narážecí, bubnové, střásací, krokové, protahovací a válečkové. Uvedené pece se používají nejčastěji a dělí se podle druhu mechanismu, který slouží k dopravě vsázky. [2]

2.2.1 Pásové pece

Na Obr. 11 je zobrazena pásová pec. U této pece se pomocí speciální automatiky přes podávací stůl 5. Číslem 3 je označen dopravní pás, který prochází pecí. Pás může být různé konstrukce, pro těžší součásti je složen z ražených desek, pro lehké součásti zhotoven z kovového pletiva. Ty jsou poté vzájemně propojeny čepy a spojkami. Pomocí válců 7, 4 je pohon pásu napínán. Z prostoru 6 je odebírán materiál, tento prostor se nachází na konci pece. [2]

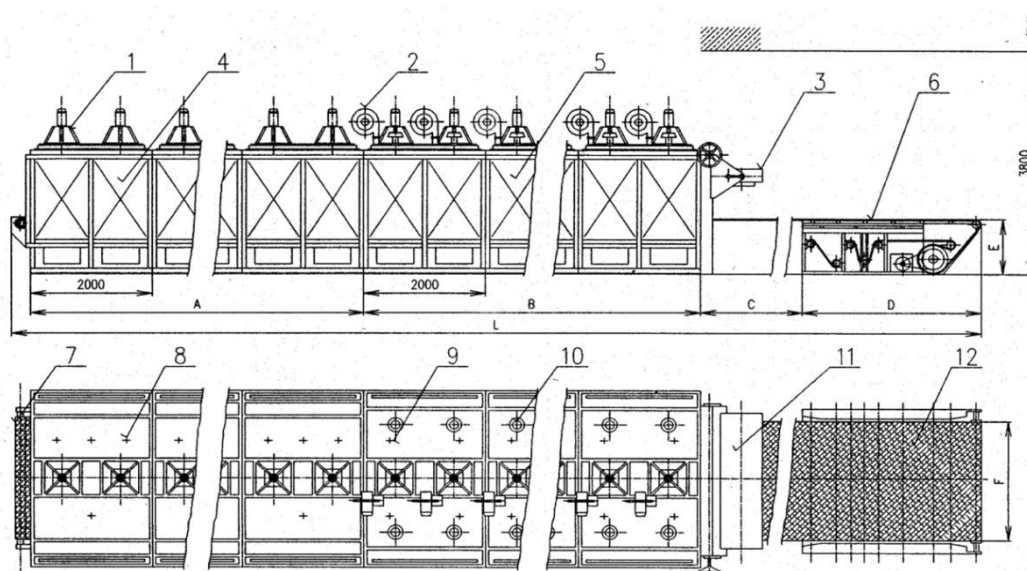
Na stopě a dně pece jsou topné články 2, umístěné pod horní úrovní pásu. Vyzdívka 1, která je žárupevná obklopuje pracovní prostor pece. Těchto pecí se většinou využívá do teplot 900 °C a převážně pro tepelné zpracování menších součástí. [2]



Obr. 11: Pásová pec [2]

2.2.2 Chladicí pec

Pro správnou výrobu lahví se používají chladicí pece, pro řízené ochlazování, procházejí pecí podle předem zvolené teplotní křivky a tímto ochlazováním se zabráňuje jejich popraskání. Tyto pece jsou odporově vytápěné, nejčastěji mají drátěný dopravník, automatickou regulaci teploty a vertikální oběh vzduchu. [3]



LEGENDA:

- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1) Oběhový ventilátor | 7) Vratný válec |
| 2) Přídavný ventilátor UV3 | 8) Termačlánek dvojitý |
| 3) Dochlazovací ventilátory | 9) Termačlánek jednoduchý |
| 4) Topná komora | 10) Odsávací potrubí |
| 5) Chladicí komora | 11) Dochlazovací rampa |
| 6) Tažná jednotka | 12) Dopravní pás |

Obr. 12: Chladicí pec [3]

Tato pec umožňuje upravit délky topného a chladícího tunelu podle požadované technologie, i počet a rozmístění topných článků, díky její stavebnicové konstrukci. U této pece je možno snadno a za provozu vyměnit topné články i ventilátorové jednotky, díky její konstrukci. [3]

Ve stropu topné komory jsou umístěny dvě ventilátorové jednotky, které zaručují nucený a uzavřený oběh vzduchu. Vzduch je nasáván z prostoru nad dopravním pásem. Proud vzduchu proudí od ventilátoru k topným článkům a dále pod dopravní pás, na kterém je zboží. Pracovní prostor tvoří oběhová vložka, která je ze žárupevného materiálu a umožňuje uzavřený oběh vzduchu. [3]

V každé topné komoře jsou dvě topné samostatně regulovatelné skupiny, do těchto skupin jsou zapojené topné články, které jsou zasunuty do boku oběhové vložky nebo do stropu, zde záleží na šířce pásu. [3]

Termoelektrické dvojité snímače teploty, z nichž jeden je připojen na regulátor a druhý na zapisovač teploty, jsou zabudovány do prostoru každé topné skupiny. Pomocí regulátorů na kterých je nastavena teplota se udržuje teplotní křivka potřebná k ochlazení výrobků. [3]

V celé délce pece je tepelně izolována topná část. Vstupní a výstupní stěny jsou vybavené dveřmi pro ekonomické roztápění a provoz pece, provedení se volí dle způsobu zakládání výrobků. [3]

V chladící komoře jsou umístěny celkem čtyři ventilátory, dva přídatné které slouží k přísávání studeného vzduchu, pro možnost regulace rychlosti ochlazení a zbývající dva, které jsou umístěny ve stropu zaručují nucený a uzavřený oběh vzduchu. Je možné doplnit pec dle potřeby dochlazovací rampou, která je osazena ventilátory. Rampa poté slouží k dochlazení výrobků. [3]

K plynulé regulaci rychlosti chodu dopravního pásu v poměru 1 : 6, slouží pohon s převodovkou. Součástí pece je i napínací válec, který slouží k vyrovnávání pásu, následkem prodloužení vlivem teploty. [3]

2.2.3 Krokové pece

Pro ohřev velkých odlitků a výkovků se používají krokové pece. Staví se pro střední a vysoké teploty. Krokový mechanismus pece, který je poháněn hydraulicky nebo elektromotorem, je umístěn mimo pracovní prostor pece. Vsázka se pozdvihne a posune při pohybu dopředu a naopak klesne a připraví na další krok při pohybu dozadu. [2]

2.2.4 Protahovací pece

Kladem těchto pecí je rovnoměrné prohřátí vsázky. Vsázkou mohou být například dráty a pásy z barevných kovů, ale i z oceli. Vsázka se poté pecí protahuje a ohřívá. Vyrábějí se i pece se svislým pohybem drátů. Dráty jsou v několika smyčkách. Pece jsou vhodné pro výrobu smaltovaných drátů, zde jsou nutné velké výkony, které tyto pece splňují. [2]

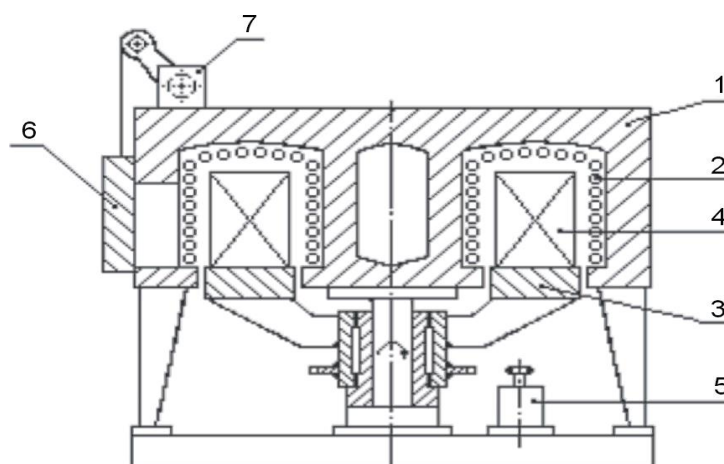
2.2.5 Bubnové pece

Hlavní součástí bubnové pece je buben, který se zhotovuje ze žárupevného materiálu, který je velmi drahý. Tento buben má omezenou životnost z důvodu značného tepelného a mechanického namáhání. Plusem je schopnost dosáhnout rovnoměrné a přesné teploty. [2]

Nejčastěji se bubnové pece používají ke kalení nebo žíhání menších vsázek jako například šroubů, podložek, menších ložiskových kroužků a kuliček. Tyto pece se také dají použít ke štěpení slídy. [2]

2.2.6 Karuselové (rotační) pece

Na Obr. 13, je zobrazen řez karuselovou pecí. Pozitivní u těchto pecí je, že mechanismy jsou zcela mimo prostor, kde je pracovní teplota a díky tomu se mohou konstruovat pro nejvyšší teploty. Číslo 1 je vlastní rotační pecní těleso. Toto těleso má topné články 2. Vsázka 4 se dává na otočnou podlahu pece 3. Elektromotor 5 zajišťuje otáčení. Do otvoru s dveřmi 6 se vloží vsázka, poté se pec točí o jednu otáčku a vsázka se z ní vyjme dveřmi z výstupního otvoru. Zařízení 7 slouží k uzavírání dveří. V závislosti na rychlosti otáčení podlahy se mění doba ohřevu vsázky. [2]



Obr. 13: Karuselová pec [2]

3 Možnosti řízení uvedených elektrotepelných procesů

3.1 Dělení dle řízení

Z hlediska řízení odporových pecí můžeme tyto pece rozdělit do dvou kategorií a to jsou jednozónové pece a vícezónové pece

3.1.1 Jednozónové pece

Základním schématem pro jednozónové pece je zapojení: termočlánek-regulátor-akční člen-topné spirály. Kde termočlánekem se měří teplota v peci, regulátor tuto teplotu vyhodnotí a pomocí akčního členu a spirál se zvýší nebo sníží teplota v peci.

3.1.2 Vícezónové pece

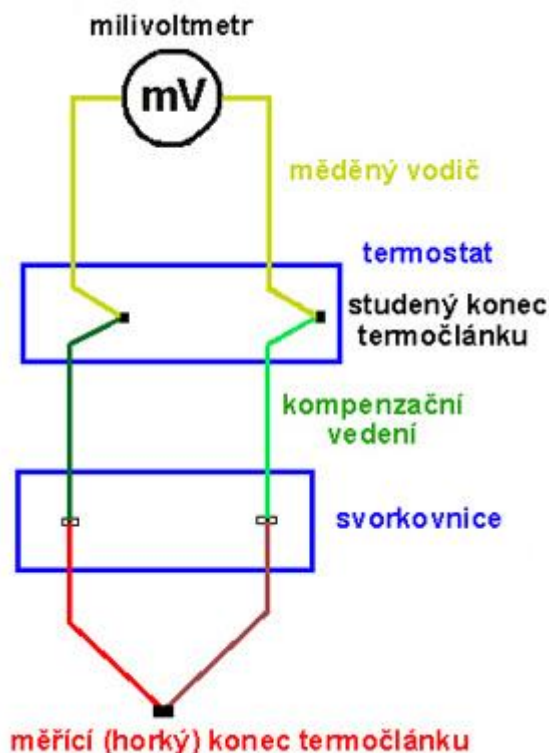
Tyto pece, jak název napovídá, mají dvě a více zón (polí), kde každá zóna má své vlastní řízení, měření teploty i jeho vyhodnocování. Může být varianta, kde řídí teplotu každé zóny jeden PID regulátor, nebo varianta řízení PLC, kde jdou signály z převodníků přímo do analogových karet logických automatů.

3.1.2.1 PLC

Řízení pomocí PLC neboli programovatelného logického automatu je v poslední době čím dál tím více rozšířenější, především díky jeho jednoduchosti, snadné údržbě a v poslední době i příznivější ceně. Řízení se provádí pomocí hlavní procesorové jednotky, ke které se přidávají dle potřeby ostatní karty, vstupní, výstupní, analogové nebo digitální. Pomocí analogových vstupních karet se sbírají data od termočláneků umístěných v peci. Pomocí těchto dat procesor vyhodnotí nejčastěji pomocí PID regulace potřebu přitopení nebo ochlazení v dané zóně pece a přes analogově výstupní kartu například otevře komínek pro ochlazení dané zóny nebo více otevře tyristor pro přitopení.

3.2 Termočlánky

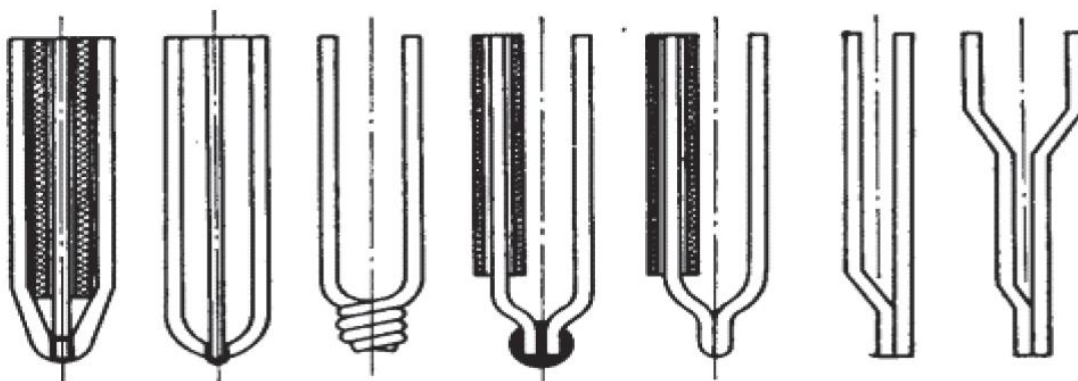
Na Obr. 14 máme znázorněné schématické zapojení termočlánku. Termočlánek má dva konce, jeden aktivní neboli horký (měřicí) a druhý konec studený. Druhý konec je důležité udržovat ve stálé teplotě. Rozdíl napětí mezi horkým a studeným koncem je výsledné termoelektrické napětí. V případě udržování studeného konce na konstantní teplotě bude teplota na měřicím konci úměrná výslednému termoelektrickému napětí. Na studeném konci termočlánku je obvykle udržována teplota termostatem nebo elektronicky na 0 °C, 20 °C, 25 °C případně 50°C. Z důvodu měření teploty na větší vzdálenosti se často používají takzvaná kompenzační vedení, která jsou vedená od místa měření až k termočlánku. Termočlánky jsou vyráběny obvykle z drahých kovů, proto je potřeba nahradit drahé termočlánekové materiály levnějšími. Kompenzační vedení může být dlouhé i desítky metrů, ale po celou tuto délku však nemusí mít konstantní teplotu. Je důležité, aby po celé délce kompenzačního vedení nedošlo k překročení teploty materiálu 100 °C a zároveň termoelektrické chování materiálu tohoto vedení bylo shodné s materiály termočlánku. Po splnění uvedené podmínky nebude výsledné termoelektrické napětí termočlánku ovlivněno kolísáním teploty kompenzačního vedení. [4]



Obr. 14: schématické zapojení termočlánku [4]

Pro správnou funkci je potřeba spojit konce termočlánku. Spojení se provádí pájením, svařováním nebo mechanickým spojením drátů, které mají stejný průměr. Takto se vytváří měřicí spoje, které můžeme vidět na Obr. 15 [5]

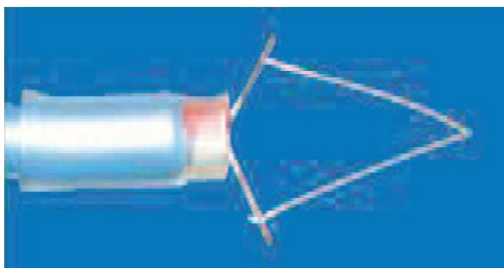
Spoje se mohou dělit na chráněné a nechráněné, nechráněné jsou drátové termočlánky, které jsou nejjednodušší. [5]



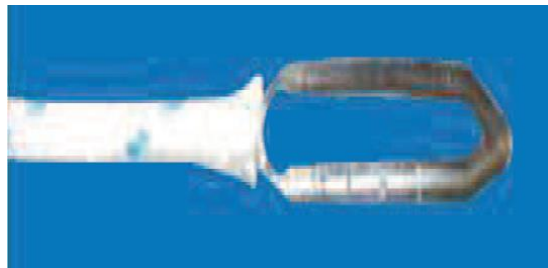
Obr. 15 [5]

Jednou z nejdůležitějších částí termočlánků je jeho koncový spoj. Dráty tohoto spoje musí být velmi pevně spojeny a dokonale očištěny. Pro spoj jsou jistá omezení z důvodu, že je nechráněný, nedoporučuje se používat pro měření teploty u kapalin z důvodu koroze nebo oxidace drátů. [5]

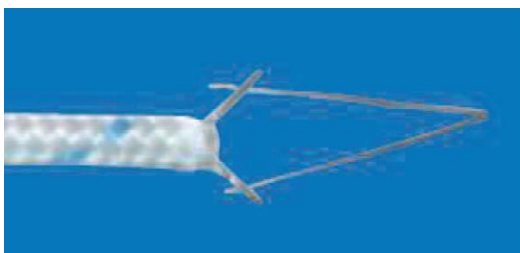
Oblast, ve které se nejčastěji objevují tyto termočlánky, je měření teploty plynu. Tyto termočlánky mají velmi rychlou odezvu a jsou velmi malé. Na Obr. 16 můžeme vidět bodový termočlánek, tento termočlánek je vhodný pro přesné zjištění teploty prvků o malých rozměrech, protože jeho kontaktní hrot má průměr 25 μm . Bodovým termočlánekem se nejčastěji měří teplota proudu vzduchu. Kaptonová lepicí páska nebo stříbrná pasta se používá pro upevnění čidla. Na Obr. 17 je zobrazen plošný termočlánek, ten je vhodný pro měření teploty menších ploch. Průměr hrotu je 40 μm a jeho délka je asi 10 mm. Tyto termočlánky mají dobrou mechanickou stabilitu vyšší odolnost a vynikající časovou konstantu. Stejně jako u předchozích termočlánků se používá kaptonová lepicí fólie pro upevnění a možnost vícenásobného použití. [5]



Obr. 16: Bodový termočlánek [5]



Obr. 17: plošný termočlánek [5]



Obr. 18: Kombinovaný termočlánek [5]



Obr. 19: Víceúčelový termočlánek [5]

Dalším termočlánekem, který je na Obr. 18, je takzvaný kombinovaný termočlánek, ten vzniká zkombinováním bodového a plošného termočláneku. Díky této kombinaci vzniká vysoce citlivý spoj. Měřicí hrot má délku přibližně 7 mm a průměr měřícího hrotu je 25 μ m. Časové konstanta tohoto termočláneku je velmi krátká. [5]

V případě velmi rychlých změn teplot se používá termočlánek na Obr. 19 víceúčelový termočlánek. Měříme jím teploty na menších plochách. [5]

Termočlánek volíme dle následujících kritérií:

- Měřicí rozsah teploty
- Chemická odolnost termočlánu a jeho pláště
- Odolnost proti vibracím a abrazi
- Požadavky instalace (potřeba průměru sondy v závislosti na technických otvorech, nárok na kompatibilitu s existujícím přístrojem)

Typ	měřicí rozsah [°C]	kombinace materiálů	použití
B	0-1700	Pt, 30%Rh - Pt, 6%Rh	pro měření vyšších teplot, nevyžaduje kompenzační vedení
C	0-2300	W, 5%Re - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
D	0-2300	W, 3%Re - W, 25%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
E	200-950	Ni, 10%Cr - Cu, 45% Ni	všeobecné použití, pro měření středních a nižších teplot
G	0-2300	W - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
J*	210-1200	Fe - Cu, 45%Ni	pro měření vyšších teplot v redukční atmosféře
K*	200-1250	Ni, 10%Cr - Ni, 2%Al, 2%Mn, 1%Si	všeobecné použití v oxidační atmosféře
L	0-900	Fe - Cu, 45% Ni	zastaralý typ, nepoužívá se
M	50-1410	Ni - Ni, 18%Mo	
N*	270-1300	Ni, 14%Cr, 1,5%Si - Ni, 4,5%Si, 0,1%Mg	nový typ, náhrady typu K
P	0-1395	Platinel - Platinel	stabilnější , ale dražší než typy K a L
R	50-1750	Pt, 13%Rh - Pt	velmi přesný, pro vyšší teploty
S	50-1750	Pt, 10%Rh - Pt	velmi přesný, pro vyšší teploty
T*	270-400	Cu - Cu, 45%Ni	všeobecné použití pro nižší teploty, odolný vlhkosti
U	0-600	Cu-Cu, 45%Ni	zastaralý typ, podobný typu T, nepoužívá se

Tab. 1: [7]

Al - hliník, Cr - chrom, Cu - měď, Mg - hořčík, Mo - molybden, Ni - nikl, Pt - platina, Re - rhenium, Rh - rhodium, Si - křemík, W - wolfram

V Tab. 1 jsou uvedeny druhy termočlánků seřazených dle jejich označení, v druhém sloupci jsou jejich měřicí teplotní rozsahy, které se mohou lišit dle výrobců. Ve třetím jsou materiály, z kterých jsou termočláňkové dráty vyrobeny. Posledním sloupcem udává možnosti jejich využití.

3.3 Typy Regulace

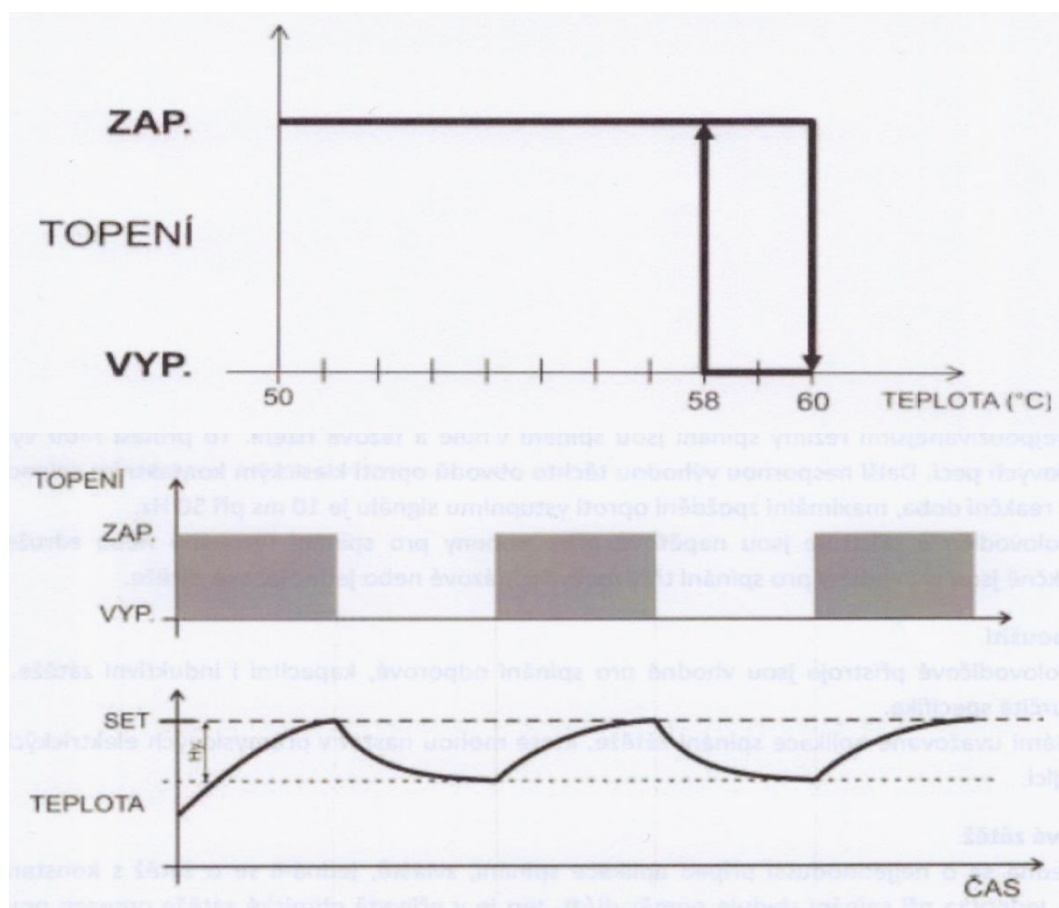
Pomocí přiváděného elektrického výkonu se řídí teplota v peci. Řízení výkonu se provádí přepínáním odboček primárního vinutí u napájecího transformátoru nebo přepínáním hvězda trojúhelník topných článků a to u starších provedení. [8]

Na rozdíl od starších provedení se u nových provedení dodávaný výkon řídí plynule. K plynulému řízení se používá polovodičový měnič, který se také nazývá akční člen. U pecí napájených střídavým proudem se jedná o tyristorový fázově řízený měnič, který má na výstupu řízené napětí v rozsahu 0 až vstupní napětí. U pecí napájených stejnosměrným proudem se jedná o řízený usměrňovač, který má na výstupu řízené napětí v rozsahu 0 až tzv. napětí naprázdno, jehož velikost je závislá na druhu usměrňovače (dle zapojení). [8]

3.3.1 ON-OFF regulace

Na Obr. 20 můžeme vidět ON-OFF regulaci, nebo se jí také říká dvoupolohová regulace, je to jednoduchá regulace, která má stav zapnuto nebo vypnuto. Používá u starších a jednodušších pecí. Dochází k zapnutí nebo vypnutí celého příkonu pece. Nejčastěji se tato regulace využívá na v čase se neměící hodnotu teploty. [9]

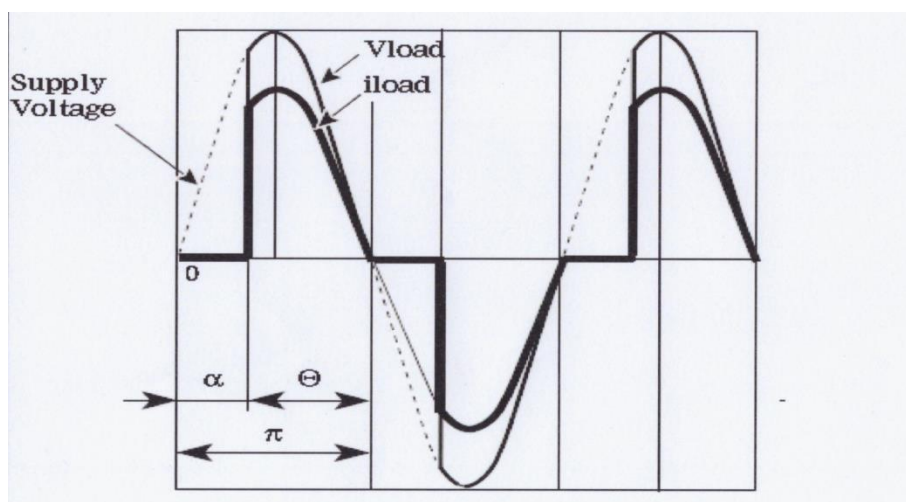
Žádané parametry na tuto regulaci jsou požadovaná hodnota teploty a požadovaná hystereze. [9]



Obr. 20: ON-OFF regulace [9]

3.3.2 Fázové řízení

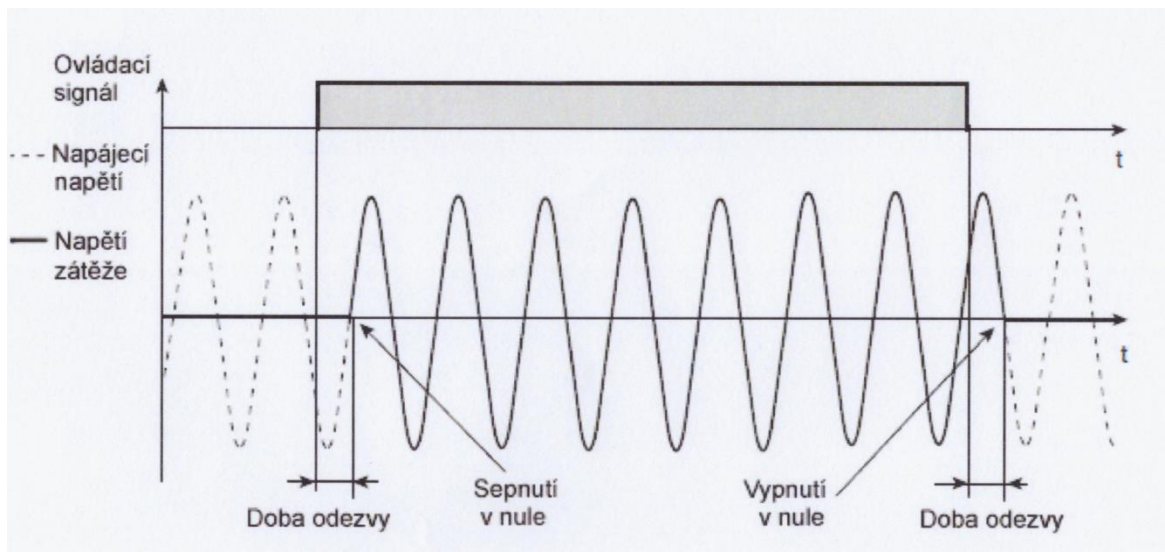
Principem této regulace je, že se určitým způsobem zapínají a vypínají tyristory, které se připojují mezi zdroj a zátěž na určitou dobu každé periody napájecího napětí. Nevýhodou fázového řízení je vznik neharmonických průběhů napětí a proudů, které mají za následek vznik vyšších harmonických.



Obr. 21: Fázové řízení [9]

3.3.3 Spínání v nule

Kladem této regulace je, že nevzniká rušení a to díky spínání řídicího prvku v okamžiku kdy ještě nevede proud. Z Obr. 22 můžeme vidět princip regulace. Po celou dobu sepnutí ovládacího signálu propouští určitý počet sinusovek a tento signál vždy začíná a končí v nule sinusovky. Této regulace se dá využít pouze u tepelných spotřebičů nebo u spotřebičů s velkou setrvačností. [10]



Obr. 22: Spínání v nule [9]

3.4 Prostředky k ovládání topných článků (akční členy)

Spínací prvky jsou v elektrotepelných zařízeních v jejich regulačních obvodech silovým prvkem. Jsou také popisovány jako akční členy regulované soustavy, nejčastěji v teorii automatického řízení. Průběh regulované veličiny ovlivňuje konkrétní zásah, který je vykonáván tímto členem. [9]

Nejčastějším jevem, který se v elektronice objevuje, je právě spínání elektrických obvodů. Přístroje, konstruované pro spínání prošly širokým technickým vývojem, především v oblasti kontaktního spínání u elektrotechnických přístrojů. Nejpoužívanější přístroje pro spínání jsou stykače a polovodičové spínací součástky jako například výkonové diody, tyristory a tranzistory. [9]

3.4.1 Stykače

Stykačem můžeme spínat elektrické obvody a zátěže s vyšší proudovou zatížitelností. Na elektromechanickém principu pracují stykače. Jsou rozděleny na dvě části, první část jsou kontakty a druhou je elektromagnet. Přitažlivými silami elektromagnetu se spínají kontakty. Magnetické pole vzniká přivedením napětí na svorky cívky, kde se kontakty, které jsou pohyblivé, spojí nebo naopak rozpojí s pevnými kontakty, přitažením kotvy. Proudové spínací kontakty jsou u stykačů hlavními kontakty. Rozpínací a spínací kontakty se nazývají pomocné. Vrácení kontaktů do původní pozice nastává při odmagnetování kotvy a její odpadnutí následkem přerušení ovládacího napětí do cívky elektromagnetu. Nevýhodou stykačů je jejich omezené množství spínání a to z principu mechanického pohybu kotvy s kontakty. [9]

Na každém stykači je uvedena jeho kategorie, která se dělí dle druhu proudu a použití. Použití stykačů v regulačních procesech se odvíjí od jejich nevýhody omezené možnosti spínání. Proto jejich kombinace používáme při regulaci typu ON-OFF, kde není potřeba častého spínání, které je vysvětleno výše. [9]

Jelikož je potřeba v průmyslových provozech neustále zvyšovat požadavky na spínání, kde se časové intervaly pohybují od jednotek do desítek sekund, nám nestačí klasická stykačová kombinace. Proto tyto náročnější úlohy řešíme modernějšími technologiemi, kterým tak rychlé změny nedělají problém. Viz další kapitola Polovodičové přístroje. [9]

Stykačové kombinace mají i své výhody, mezi které patří malé rozměry, galvanické rozpojení obvodu nebo jejich nízkou cenu. Uvedené výhody přesahují nedostatky a nacházejí uplatnění v mnoha aplikacích průmyslu. [9]

3.4.2 Polovodičové přístroje

V současné době se častěji v mnoha oblastech průmyslu začínají používat polovodičové přístroje, jinak také moderní spínací jednotky. Výhodou polovodičových přístrojů je absence mechanických pohyblivých částí, dlouhá životnost, malé rozměry a možnost montáže přímo do rozvaděče zajišťuje vysokou odolnost k pracovnímu prostředí především proti vlhkosti a prachu. Neexistuje zpětné ovlivňování vstupu díky dokonalé izolaci vstupních a výstupních obvodů. Jejich vazební kapacita mezi vstupem a výstupem není více než 10 pF a izolační schopnost je větší než 2,5 – 4 kV. [9]

Tyto jednotky se ovládají nejčastěji pomocí vstupního unifikovaného signálu (0-10 V, 2-10 V, 0-20 mA, 4-20 mA). Další možností jak je ovládat je pomocí komunikačních protokolů, jako jsou například PROFIBUS, ETHERNET a další. Výhoda těchto protokolů je číst okamžité hodnoty, jako například napětí a proud přímo z přístroje. [9]

Jako režim spínání se nejčastěji používá spínání v nule a fázové řízení, který je popsán výše. [9]

Mohou spínat jak fázové tak sdružené napětí, jsou na to napětově přizpůsobeny. Dále mohou spínat jednofázové, dvoufázové, nebo třífázové zátěže, záleží na způsobu konstrukce. [9]

Oblast použití

Zátěže, které jsou vhodné pro spínání polovodičovými přístroji, jsou indukční, kapacitní i odporové. Každá z těchto zátěží má své zvláštnosti. [9]

Dále jsou popsány aplikace spínání zátěže, které mohou nastat v průmyslových elektrických pecích. [9]

Odporová zátěž

Nejjednodušším případem, obzvláště jedná-li se o zátěž s konstantní hodnotou odporu, je odporová zátěž. Impedancí vedení a spínací charakteristikou spínacího prvku na výstupu je omezen poměr di/dt a tento poměr je sledován jednotkou při spínání, v případě ohmické zátěže. Pro omezení di/dt se doporučuje přidat malá sériová indukčnost, při spínání větších proudů. [9]

Transformátorová zátěž

Vybrat správné přístroje pro ovládání transformátoru je velmi důležité. Každou půlperiodu přechází jádro transformátoru po hysterezní křivce od pozitivní saturace k negativní saturaci. Může nastat stav, že při spínání v nule přístroj sepne v kladné půlperiodě, to je již jádro v pozitivní saturaci, nebo také obráceně, což je následkem malé impedance a zároveň nárůstu proudu až desetinásobně. Tento velký proudový náraz se může objevit v první půlperiodě napájecího napětí. [9]

Přechodové děje při spínání

V okamžiku zapnutí jednotlivých zátěží dochází k přechodovému ději připojením zátěže ke zdroji. Následkem toho okamžitě narůstá proud. Stanovení velikosti tohoto proudu a jeho průběhu v závislosti na čase je velmi důležité pro korektní návrh polovodičového přístroje, aby nedošlo k překročení jmenovitých hodnot proudu a následně ke zničení přístroje. [9]

Ochrana proti nadproudům

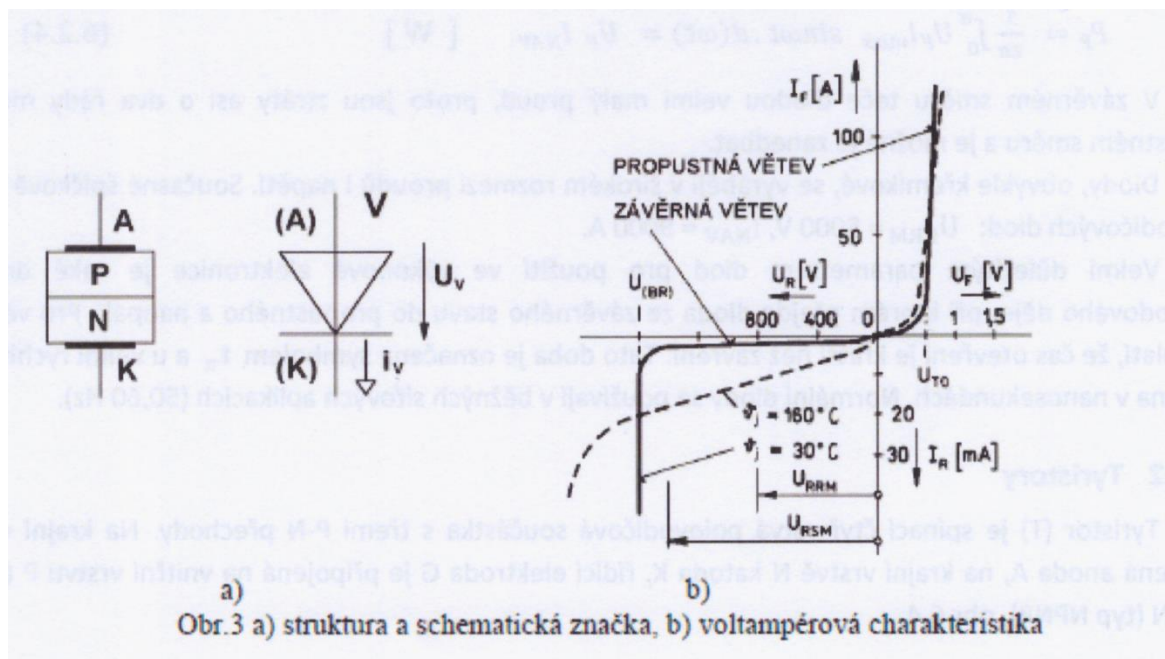
Překročením špičkového proudu a délky jeho trvání, které jsou stanoveny u spínacích přístrojů, se může tento přístroj trvale zničit. U většiny spínacích přístrojů je uvedena hodnota I^2t , podle níž navrhujeme vhodné pojistky. Doporučují se používat rychlé pojistky, vhodné pro trvalý proud s hodnotou $I^{2*}t$ nižší. Nejčastěji jsou výstupy polovodičových přístrojů osazeny tranzistory, triaky a tyristory. Polovodičové přístroje používající na výstupu tyristory jsou v antiparalelním zapojení. Mají řadu výhod, proto se používají pro náročnější aplikace. Jedna z výhod je vyšší odolnost přístroje proti nežádoucímu sepnutí při prudkém nárůstu napětí, což znamená vyšší du/dt . Jsou různé varianty provedení vnitřního zapojení přístroje. Mají velmi široké využití a to díky jejich vybavenosti a volné konfigurovatelnosti. Je možno zakoupit široké množství přístrojů, od základních aplikací po nejsložitější aplikace, které lze volně konfigurovat. Je důležité zvolit kompromis mezi cenou a vlastnostmi zařízení. [9]

Výběr správného prvku

Při výběru je důležité počítat s tím, že u výkonových prvků se jedná o obvod, na jehož funkci má vliv teplota okolí. Závislost zatěžovacího proudu na teplotě má každý přístroj zpracovaný v grafu a dle něj musíme zajistit dostatečné chlazení, nebo upravit jmenovitý proud. Je třeba znát ztrátový výkon jednotlivých komponentů, ty jsou důležité pro výpočet tepelné bilance v rozvaděči, který je zjednodušeným výpočtem uváděn jako 1,1 násobek protékajícího proudu, tedy $P_{ztr} = 1,1 \cdot I_z$. Tepelný odpor můžeme snížit ofukováním přístrojů. Uzavření přístrojů do skříní bez cirkulace vzduchu je nejhorším konstrukčním řešením. Může být způsobena i destrukce přístroje při vystavení velkému tepelnému namáhání, které je způsobeno vyššími proudy a ztrátovými výkony. Nevýhodou proti stykačům je, že obvod není galvanicky oddělen ani v rozepnutém stavu a to má za následek protékání zbytkového proudu zátěží výstupního spínacího prvku. [9]

3.4.2.1 Diody [9]

Dioda je součástka s jedním P-N přechodem, která je polovodičová a nelineární. Voltampérovou charakteristikou jsou dány její vlastnosti, které jsou na Obr. 23.



Obr. 23 [9]

Kladnému napětí na diodě odpovídá propustná větev a ta je dána dvěma veličinami:

- První veličina U_{TO} je prahové napětí v rozmezí 0,7-0,9 V a to je v podstatě difuzní napětí
- Druhá veličina R_D značí odpor samotného polovodičového materiálu, který se nazývá dynamický odpor

$$R_D = \frac{dU_F}{dI_F} \quad (7)$$

Úbytek napětí na diodě je ΔU_{FN} přibližně 1,2 V při I_{FM} jmenovitém proudu diody. Dioda může být po určitou dobu zatížena podstatně vyšším proudem než je jmenovitý. Komutace diody nebo vypnutí se nazývá přechodný děj při přechodu z propustného stavu do závěrného. Proud dosáhne hodnotu klidového závěrného proudu I_0 , již při malém napětí U_R , tento proud se už dále téměř nemění. Závěrný proud začne velmi rychle narůstat při dosažení napětí $U_{(BR)}$. Díky tomu P-N přechod nevratně ztratí svoje závěrné vlastnosti a dioda se zničí, což je následkem růstu ztrátového výkonu diody, který se mění na teplo.

Špičkové závěrné opakovatelné napětí U_{RRM} , nesmí být překročeno, toto napětí se vyskytuje každou půlperiodu. Také špičkové závěrné neopakovatelné napětí U_{RSM} , které závisí na vnějších vlivech, se nesmí překročit. [9]

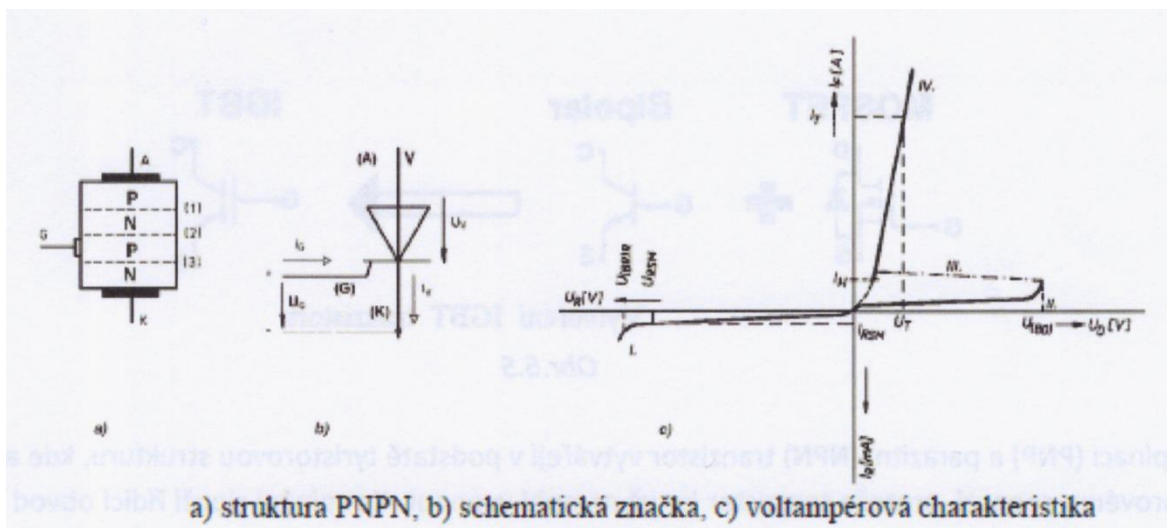
Ztráty jsou asi o dva řády menší než v propustném směru a je možné je zanedbat, protože teče diodou velmi malý proud v závěrném směru. [9]

Diody se vyrábějí v širokém rozmezí proudů i napětí a jsou většinou z křemíku.

Velmi důležitá je také doba trvání přechodového děje, Děj, při kterém přejde dioda ze závěrného stavu do propustného a naopak se nazývá přechodový děj a je velmi důležitým parametrem pro použití ve výkonové elektronice. Čas otevření, který je označen t_r u velmi rychlých diod je udáván v nanosekundách, je kratší než čas zavření, to platí pro většinu typů diod. [9]

3.4.2.2 Tyristory

Značkou T se značí tyristor a je to polovodičová součástka, která má tři P-N přechody, a je čtyřvrstvá. Na Obr. 24 můžeme vidět anodu A, která je na krajní vrstvě P, katoda K je na krajní vrstvě N a na vnitřní vrstvu P u typu PNP, nebo na vstupu N u typu NPNP je připojena elektroda G. [9]



Obr. 24 [9]

Tyristor a dioda mají podobný průběh voltampérové charakteristiky v kvadrantu I, což je závěrný směr. Napětí U_{RRM} , U_{RSM} , $U_{(BR)R}$ mají také podobný význam. Ztráty tyristoru se zvyšují v případě zvyšujícího se proudu v závěrném směru, tento proud se zvyšuje v případě protékajícího proudu řídicí elektrodou v závěrném směru. [9]

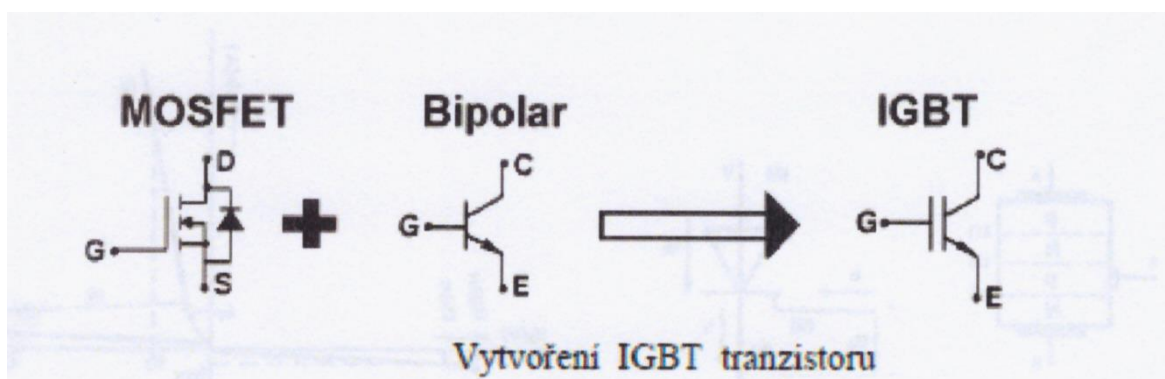
Přechody J1 a J3 jsou polarizované v propustném a přechod J2 v závěrném směru při připojení kladného napětí U_D na anodu, to jsou blokovací vlastnosti zobrazené v druhém kvadrantu. Blokovací proud I_D , který protéká tyristorem je malý. Na průběhu tři dochází k sepnutí tyristoru, to je způsobeno otevřením blokujícího přechodu J2, k tomu dochází při zvyšování blokovacího napětí U_D a překročení napětí $U_{(BO)}$ proud I_D rychle narůstá. Přivedením krátkého, ale intenzivního proudového impulzu i_G z generátoru impulzů na řídicí elektrodu nastává sepnutí tyristorů, při nižším blokovacím napětí, běžným způsobem. Tyristor zůstává sepnutý i po zániku proudu i_G , tento děj je nevratný.

V kvadrantu 4 jsou zobrazeny propustné vlastnosti. Na tyristoru je úbytek napětí U_T asi 1,3 -1,7 V a teče jím proud I_T , po sepnutí tyristoru pracovní bod skokem přejde na propustnou charakteristiku. Tyristor přejde skokem z propustného do blokovacího režimu a tyristor vypne, to je působením vnějšího obvodu. Dále se snižuje proud až na hodnotu vratného proudu I_H . [9]

Proudem řídicí elektrody nelze dosáhnout vypnutí tyristoru, je to možné jen snížením jeho proudu na nulu a to působením vnějšího obvodu. Doba t_{OFF} je doba po kterou se obnovuje blokovací schopnost tyristoru a po tu dobu musí být na tyristoru napětí v závěrném směru U_R . Napětí v propustném směru U_D se může objevit až po této době. Čas t_{OFF} dosahuje hodnot 10-40 μs . Tyristory se používají nejčastěji jako bezkontaktní spínače proudu pro velké rozsahy: až 5000V a až 3500 A. [9]

3.4.2.3 IGBT tranzistory

Spojením bipolárního tranzistoru PNP a unipolárního NPN tranzistoru MOSFET vznikne IGBT tranzistor. Tento tranzistor má stejnou funkci jako bipolární tranzistor. [9]



Obr. 25: IGBT tranzistor [9]

Díky tomuto spojení vznikne tyristorová struktura, která ale nesmí sepnout, jelikož není možnost jí opětovně vypnout. Na hradlo G tranzistoru se přivede pomocné napětí U_G a tranzistor sepne díky obvodu který má minimální výkon. [9]

IGBT tranzistor má mnoho přínosů, jako například nízké ztráty v sepnutém stavu, díky velkému vstupnímu a výstupnímu odporu. Další výhody jsou například velký rozsah proudů do 400-500A a napětí až do 1700 V, nízký budící výkon, vysoká spínací frekvence a malé spínací ztráty. Nespornou výhodou jsou krátké spínací a vypínací časy 1 – 2 μ s, díky tomu mohou pracovat se spínací frekvencí nad pásmem slyšitelnosti což je 20 kHz. IGBT tranzistory na druhou stranu i své nevýhody a to že pokud není řídicí elektroda chráněna Zenerovou diodou, může nastat její proražení. [9]

3.5 Zapojení topných článků

Dle toho, jaké zvolím zapojení topných článků, ovlivňuji proud protékající těmito články a tím i zároveň jejich výkon. Zapojení článků může být do série, paralelně, do hvězdy, trojúhelníka, nebo některou jejich kombinací.(8)

3.5.1 Zapojení topných článků do série[9]

Na Obr. 26 je schéma zapojení tří topných článků do série. Podmínkou symetrie je, že odpory topných článků jsou stejné. Platí následující vztahy:

(8)

Celkový odpor:

$$R_C = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad [\Omega] \quad (8)$$

Celkový odpor při symetrii

$$R_C = n * R_i \quad [\Omega] \quad (9)$$

Pro napětí U platí:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n == \sum_{i=1}^n U_i \quad [V] \quad (10)$$

Napětí při symetrii:

$$U_i = \frac{U}{n} \quad [V] \quad (11)$$

Pro proud I platí:

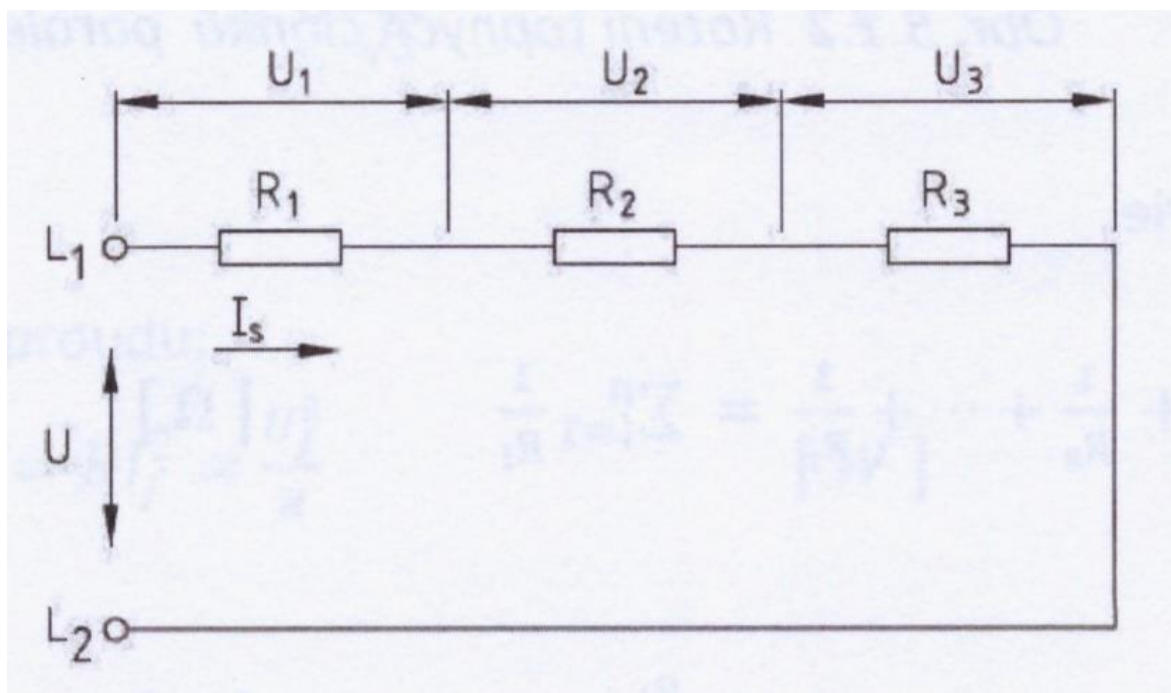
$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad [A] \quad (12)$$

Celkový výkon:

$$\frac{1}{P_C} = \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \dots + \frac{1}{P_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_i} \quad [W] \quad (13)$$

Celkový výkon při symetrii:

$$P_C = \frac{P_i}{n} \quad [W] \quad (14)$$



Obr. 26: Sériové řazení topných článků [9]

3.5.2 Paralelní zapojení topných článků[9]

Na Obr. 27 můžeme vidět tři zapojené topné články paralelně. Opět platí stejná podmínka symetrie jako u zapojení do série a to že jednotlivé odpory topných článků si musí být rovny.

Můžeme napsat následující vztahy:

Pro celkový odpor:

$$\frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad [\Omega] \quad (15)$$

Celkový odpor při symetrii:

$$R_C = \frac{R_i}{n} \quad [\Omega] \quad (16)$$

Pro napětí platí:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad [\text{V}] \quad (17)$$

Pro proud platí:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i \quad [\text{A}] \quad (18)$$

Pro proud při symetrii:

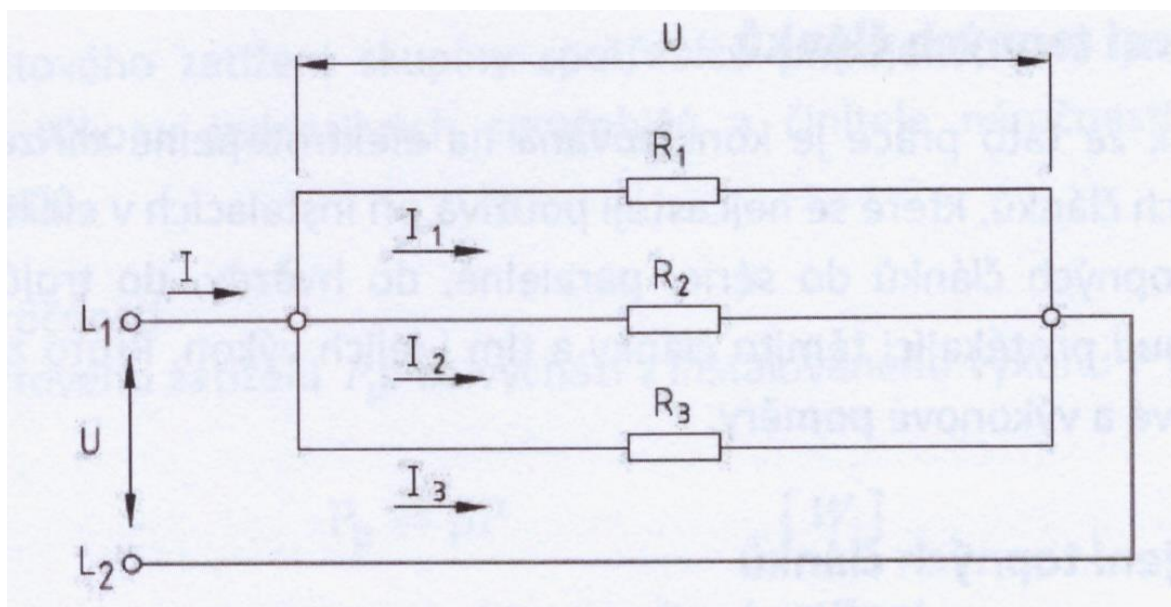
$$I_i = \frac{I}{n} \quad [\text{A}] \quad (19)$$

Pro celkový výkon platí:

$$P_C = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad [\text{W}] \quad (20)$$

Pro celkový výkon při symetrii:

$$P_C = n * P_i \quad [\text{W}] \quad (21)$$



Obr. 27: Paralelní řazení topných článků [9]

3.5.3 Zapojení topných článků do hvězdy[9]

Topné články zapojené do hvězdy můžeme vidět na Obr. 28. Počáteční podmínkou symetrie je také rovnost odporů topných článků.

Můžeme uvést následující vztahy mezi fázovými a sdruženými hodnotami napětí a proudu:

$$I_f = I_S \quad [\text{A}] \quad (22)$$

$$U_f = \frac{U_S}{\sqrt{3}} \quad [\text{V}] \quad (23)$$

Dále můžeme napsat pomocí fázových a sdružených hodnot napětí a proudu příkon pro jednotlivé fáze:

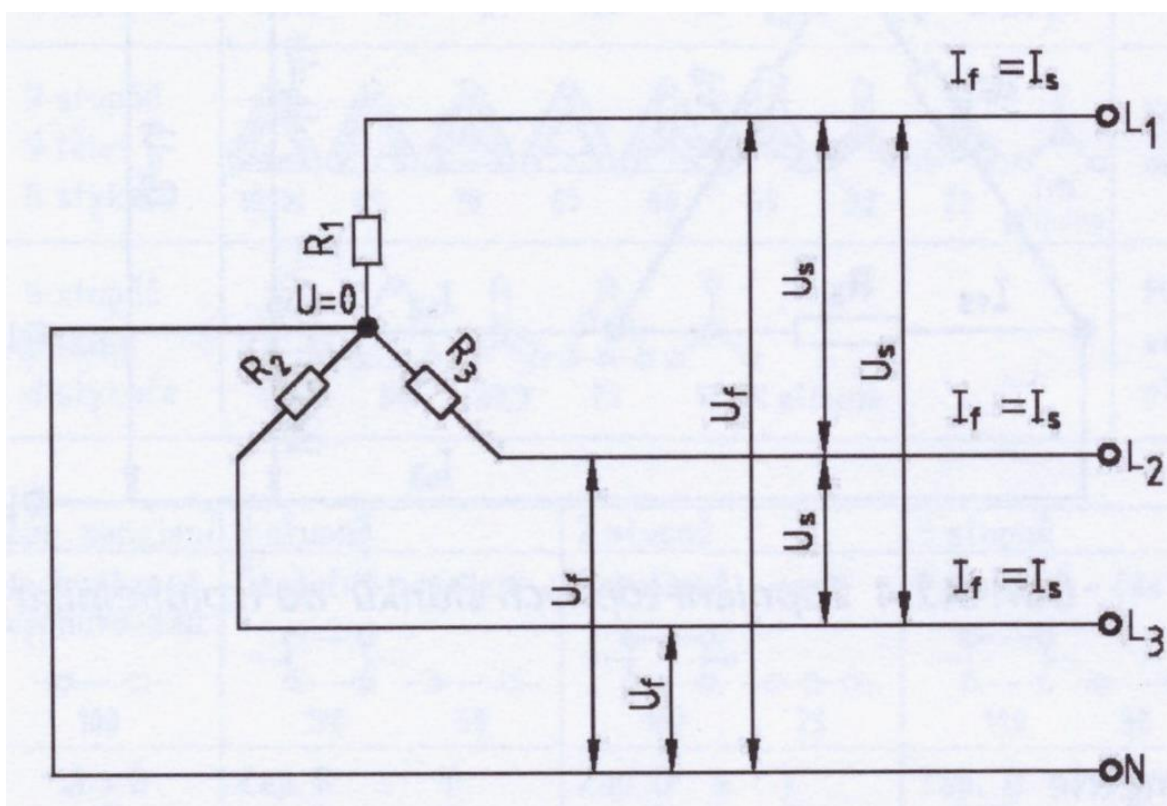
$$P'_y = U_f * I_f = R * I_f^2 = \frac{U_f^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (24)$$

$$P'_y = \frac{U_S * I_S}{\sqrt{3}} = R * I_S^2 = R * \left(\frac{U_S}{\sqrt{3} * R} \right)^2 = \frac{U_S^2}{3 * R} \quad [\text{W}] \quad (25)$$

Pro příkon tří společných fází můžeme pomocí fázových a sdružených hodnot napětí a proudu napsat následující vztahy:

$$P_y = 3 * U_f * I_f = 3 * R * I_f^2 = \frac{3 * U_f^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (26)$$

$$P_y = \sqrt{3} * U_S * I_S = \sqrt{3 * (\sqrt{3} * R * I_S)} = 3 * R * I_S^2 = 3 * R * \left(\frac{U_S}{\sqrt{3} * R} \right)^2 = \frac{U_S^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (27)$$



Obr. 28: Topné články zapojení do hvězdy [9]

3.5.4 Zapojení topných článků do trojúhelníka[9]

Schéma topných článků zapojených do trojúhelníku je na Obr. 29. Jako u všech předchozích zapojení jsou počáteční podmínkou symetrie shodné hodnoty odporu na jednotlivých člancích.

Vztahy mezi fázovými a sdruženými hodnotami napětí a proudu:

$$U_f = U_s \quad [V] \quad (28)$$

$$I_f = \frac{I_s}{\sqrt{3}} \quad [A] \quad (29)$$

Dále můžeme napsat pomocí fázových a sdružených hodnot napětí a proudu příkon pro jednotlivé fáze:

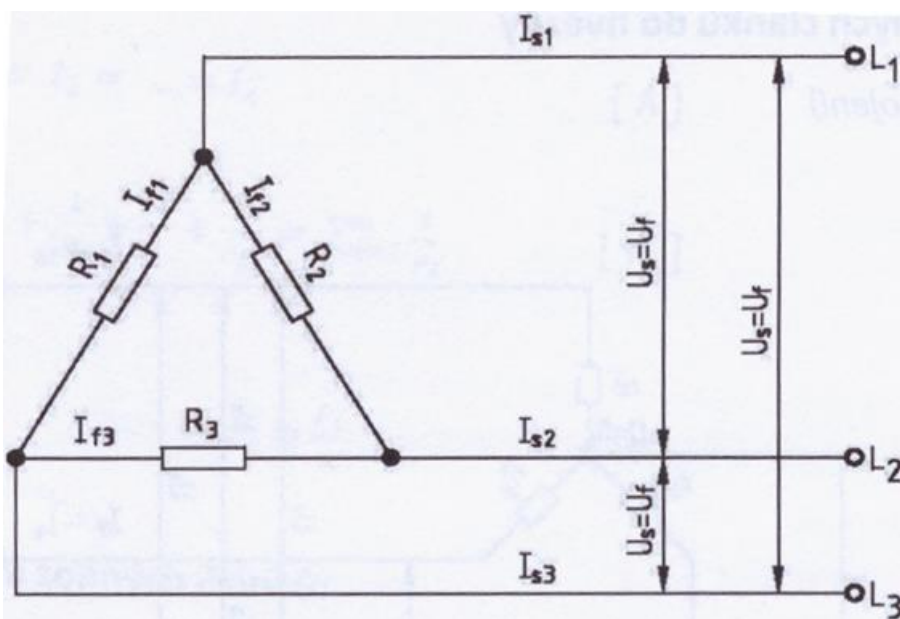
$$P'_\Delta = U_f * I_f = R * I_f^2 = \frac{U_S^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (30)$$

$$P'_\Delta = U_S * \frac{I_S}{\sqrt{3}} = \frac{R * I_S^2}{3} = \frac{U_S^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (31)$$

Pro příkon tří společných fází můžeme pomocí fázových a sdružených hodnot napětí a proudu napsat následující vztahy:

$$P_\Delta = U_f * I_f = 3 * R * I_f^2 = \frac{3 * U_S^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (32)$$

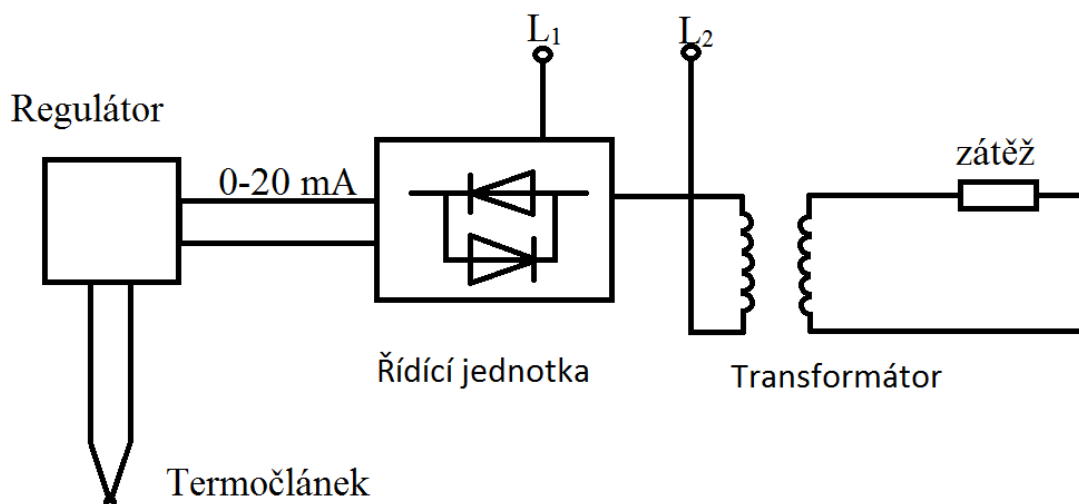
$$P_\Delta = \sqrt{3} * U_S * I_S = 3 * R * I_S^2 = \frac{3 * U_S^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (33)$$



Obr. 29: Topné články zapojené do trojúhelníka [9]

4 Návrh elektricky a ekonomicky nejvhodnějšího způsobu řízení procesů

Na Obr. 30 je zobrazeno náhradní regulační schéma modelu



Obr. 30: Náhradní regulační schéma

Pro tento model pece vypočtu:

- tepelné ztráty vyzdívky
- hodnoty topných článků
- návrh transformátoru
- určí se nejvhodnější způsob řízení silového obvodu

4.1 Výpočet tepelných ztrát

U výpočtů vycházím ze dvou variant materiálu konstrukce, oba dva materiály mají datový list uveden v příloze:

- **Hutná vyzdívka**
Od firmy RATH, značka Parrath 25-10
- **Vláknitá vyzdívka**
Od firmy RATH, značka Alsitra Mat 1400

Budu počítat pro tři varianty teploty na vnitřní straně pece ϑ_1

- 800°C
- 900°C
- 1000°C

4.1.1 Tepelné ztráty vztažené na 1m² [9] [14] [13] [15]

Pro přehlednost zde uvedu jeden případ pro variantu boční stěny pece z lehčených tvarovek a pro teplotu 1000°C, zbytek výsledků uvedu do tabulek.

Nejdříve se vypočte q :

$$q = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_0}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l_1}{\lambda}} = \frac{1000 - 20}{\frac{1}{16,31} + \frac{0,063}{0,4186}} = 4722 \text{ W/m}^2 \quad (34)$$

q [W/m ²]	je prostup tepla stěnou vztažený na 1m ²
ϑ_1 [°C]	je teplota na vnitřní stěně pece
ϑ_0 [°C]	je teplota okolí
l_1 [m]	je tloušťka stěny, kterou prochází teplo
α_1 [W/m ² *K]	je součinitel přestupu tepla stěny
λ [W/m*K]	je měrná tepelná vodivost určená z grafu 2

Kde ϑ_{2ZV} [°C] je zvolená-odhadnutá hodnota teploty na vnější straně stěny vyzdívky pece.

Měrnou tepelnou vodivost λ jsem odečetl z grafu číslo 1, který jsem vytvořil z datového listu daného materiálu.

Dále ze vzorce $q = (\vartheta_1 - \vartheta_2) * \frac{\lambda}{s}$ vytknu a spočtu ϑ_2 což je teplota na vnější straně pece:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 - q * \frac{s}{\lambda} = 1000 - 4722 * \frac{0,063}{0,4186} = 309 \text{ °C} \quad (36)$$

Dále porovnáím hodnotu ϑ_2 se zvolenou ϑ_{2ZV} , jestliže se hodnoty neshodují, zvolím ϑ_{2ZV} blíže teplotě ϑ_2 a provedu výpočet znovu.

V posledním bodě vypočtu ztrátový výkon p_z :

$$p_z = \alpha_1 * (\vartheta_2 - \vartheta_0) = 16,31 * (309 - 20) = 4713 \text{ W/m}^2 \quad (37)$$

V následujících tabulkách uvádím vypočtené hodnoty:

Prostup stěnou				
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$\vartheta_2 [^\circ\text{C}]$	$p_z [\text{W/m}^2]$	$q [\text{W/m}^2]$	$\alpha [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$
800	254	3500	3509	14,95
900	282	4095	4100	15,63
1000	309	4713	4722	16,31

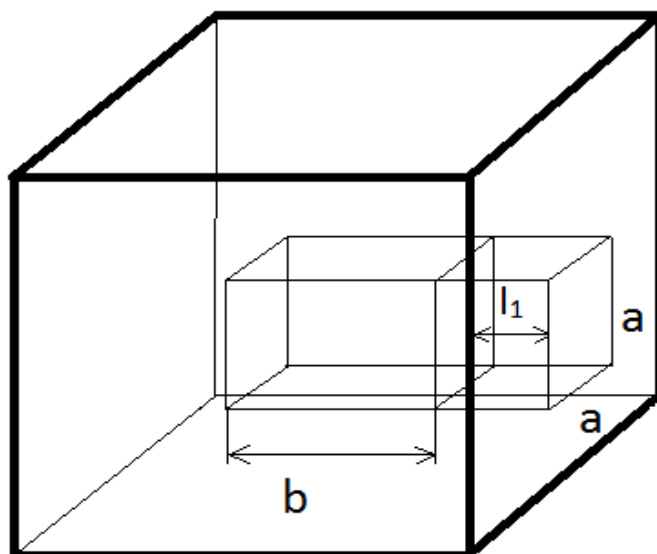
Tab. 2: Hodnoty pro hutnou vyzdívku při tloušťce stěny 6,3 cm

Prostup stěnou				
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$\vartheta_2 [^\circ\text{C}]$	$p_z [\text{W/m}^2]$	$q [\text{W/m}^2]$	$\alpha [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$
800	134	1302	1304	11,42
900	153	1602	1605	12,05
1000	171	1924	1933	12,74

Tab. 3: Hodnoty pro vláknitou vyzdívku při tloušťce stěny 6,3 cm

4.1.2 Tepelné ztráty modelu [9] [14] [13] [15]

Tentokrát již nebudu počítat s hodnotami vztaženými na 1m^2 , ale se skutečnými rozměry dané pece. Počítám opět pro dvě varianty materiálu. Na Obr. 31 je zobrazen vnitřní prostor pece, kde a, b jsou jednotlivé strany a l_1 je tloušťka stěny.



Obr. 31 konstrukce vnitřního prostoru pece

Kde $a = 40 \text{ cm}$

$b = 25 \text{ cm}$

$l_1 = 6,3 \text{ cm}$

Nejdříve si spočtu jednotlivé obsahy stěn A_1, A_2, A_3, A_4 :

$$A_1 = a * b = 0,4 * 0,25 = 0,1 \text{ m}^2 \quad (38)$$

$$A_2 = (a + l_1) * (b + l_1) = 0,463 * 0,313 = 0,145 \text{ m}^2 \quad (39)$$

$$A_3 = a^2 = 0,4^2 = 0,16 \text{ m}^2 \quad (40)$$

$$A_4 = (a + l_1)^2 = 0,463^2 = 0,214 \text{ m}^2 \quad (41)$$

Nyní vypočtu střední plochy obou stěn:

$$A_{S1} = \sqrt{A_1 * A_2} = \sqrt{0,1 * 0,145} = 0,12 \text{ m}^2 \quad (42)$$

$$A_{S1} = \sqrt{A_3 * A_4} = \sqrt{0,16 * 0,214} = 0,185 \text{ m}^2 \quad (43)$$

Kde A_{S1} je střední plocha bočních stěn dna a stropu

A_{S2} je střední plocha přední a zadní stěny

Dále celková střední plocha vyzdívky pece je:

$$A_S = 4 * A_{S1} + 2 * A_{S2} = 4 * 0,12 + 2 * 0,185 = 0,85 \text{ m}^2 \quad (44)$$

Poté celkové ztráty jsou ztráty vypočtené na 1m^2 vynásobené celkovou střední plochou vyzdívky pece:

$$P_z = 4713 * 0,85 = 4006 \text{ W} \quad (45)$$

Ostatní hodnoty uvedu to tabulek:

Celkové ztráty	
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$P_z [W]$
800	2975
900	3480
1000	4006

Tab. 4: Hodnoty Pro hutnou vyzdívku při tloušťce stěny 6,3 cm

Celkové ztráty	
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$P_z [W]$
800	1106
900	1362
1000	1635

Tab. 5: Hodnoty Pro vláknitou vyzdívku při tloušťce stěny 6,3 cm

Jelikož vyšly velmi vysoké teploty na vnější straně vyzdívky, bylo nutno zvolit větší tloušťku stěny vyzdívky a to na 12,5 cm. Pak vyšly hodnoty následující:

Prostup stěnou				
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$\vartheta_2 [^\circ\text{C}]$	$p_z [W/m^2]$	$q [W/m^2]$	$\alpha [W/m^2.K]$
800	156	2033	2037	14,95
900	171	2360	2371	15,63
1000	186	2707	2723	16,31

Tab. 6: Hodnoty pro pro hutnou vyzdívku vztažené na 1m^2 při tloušťce stěny 12,5 cm

Prostup stěnou				
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$\vartheta_2 [^\circ\text{C}]$	$p_z [W/m^2]$	$q [W/m^2]$	$\alpha [W/m^2.K]$
800	80	685	680	11,42
900	89	831	837	12,05
1000	99	1006	1009	12,74

Tab. 7: Hodnoty pro vláknitou vyzdívku vztažené na 1m^2 při tloušťce stěny 12,5 cm

Při tloušťce stěny vyzdívky 12,5 cm vyšla celková střední plocha vyzdívky pece:

$A_S = 1,34 \text{ m}^2$, poté celkové ztráty jsou:

Celkové ztráty	
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$P_Z [W]$
800	2724
900	3162
1000	3627

Tab. 8: Hodnoty pro hutnou vyzdívku při tloušťce stěny 12,5 cm

Celkové ztráty	
$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$P_Z [W]$
800	918
900	1114
1000	1348

Tab. 9: Hodnoty Pro vláknitou vyzdívku při tloušťce stěny 12,5 cm

Pro přehled zde uvedu tabulky s porovnáním hodnot pro obě tloušťky vyzdívky:

$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$p_Z [W/m^2]$		$P_Z [W]$		$\vartheta_2 [^\circ\text{C}]$	
	6,3 cm	12,5 cm	6,3 cm	12,5 cm	6,3 cm	12,5 cm
800	3500	2033	2975	2724	254	156
900	4095	2360	3480	3162	282	171
1000	4713	2707	4006	3627	309	186

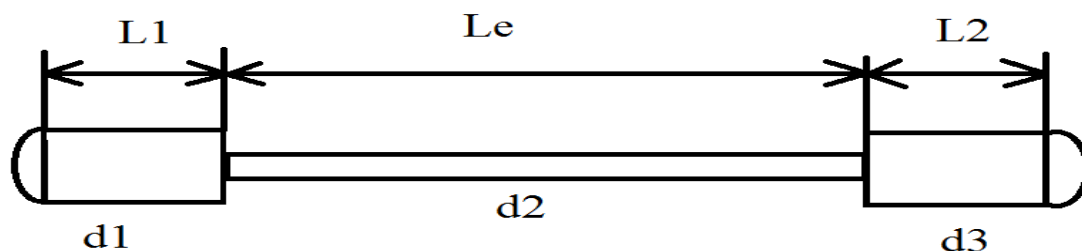
Tab. 10: Hodnoty pro hutnou vyzdívku

$\vartheta_1 [^\circ\text{C}]$	$p_Z [W/m^2]$		$P_Z [W]$		$\vartheta_2 [^\circ\text{C}]$	
	6,3 cm	12,5 cm	6,3 cm	12,5 cm	6,3 cm	12,5 cm
800	1302	685	1106	918	134	80
900	1602	831	1362	1114	153	89
1000	1924	1006	1635	1348	171	99

Tab. 11: Hodnoty pro vláknitou vyzdívku

Při změně tloušťky stěny pecní vyzdívky vyšly teploty na vnější straně pecní o poznání nižší totéž i ztrátový výkon. Z toho vyplývá, že čím větší tloušťka stěny pecní vyzdívky tím jsou nižší tepelné ztráty.

4.2 Výpočet topného článku



Obr. 32 : Topná tyč SiC

$$L1 = 7,5 \text{ cm}$$

$$L2 = 7,655 \text{ cm}$$

$$Le = 25 \text{ cm}$$

$$d1 = 2,84 \text{ cm}$$

$$d2 = 1,86 \text{ cm}$$

$$d3 = 2,82 \text{ cm}$$

$$R1 = 1,12 \Omega \text{ (hodnota měřena při teplotě } 1050 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Jelikož mám k dispozici topné články, které jsou na Obr. 32, tak z nich spočítám následující parametry:

Výpočet napětí na topném článku

Nejdříve spočtu plochu pracovního prostoru daného článku:

$$S = \pi * d2 * Le = 3,14 * 1,86 * 25 = 146,01 \text{ cm}^2 \quad (46)$$

Pro další výpočty budu uvažovat teplotu prostoru 1000°C a teplotu článku 1150°C , pomocí grafu 1 určím povrchové zatížení článku a to je $7,4 \text{ W/cm}^2$. Pro praktický výpočet použiji $6,5 \text{ W/cm}^2$.

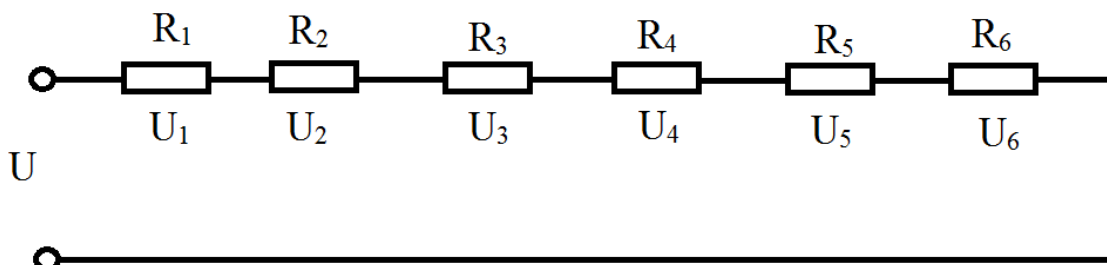
Následně spočtu celkový výkon článku:

$$P_1 = S * p = 146,01 * 6,5 = 946,65 \text{ W} \quad (47)$$

Následně napětí na topném článku:

$$U = \sqrt{(P_1 * R_L)} = \sqrt{(946,65 * 1,12)} = 32,56 \text{ V} \quad (48)$$

Pro zapojení topení pece použijí následující zapojení topných článků:



Obr. 33: Sériové zapojení topných článků

Parametry jednotlivých článků jsou:

$$R_{1-6} = 1,12 \Omega$$

$$P_{1-6} = 946,65 \text{ W}$$

$$U_{1-6} = 32,56 \text{ V}$$

Celkové napětí se rovná:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 = 195,36 \text{ V}$$

Celkový výkon

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 5,6799 \text{ k W}$$

4.3 Navržení transformátoru [16]

Transformátory s plynulou změnou napětí se často používají k napájení v malých laboratorních nebo experimentálních pecí. Pro použití u velkých pecí jsou příliš drahé, tam se spíše používají transformátory s víceúrovňovými odbočkami. Maximální krok napětí odboček u těchto pecí by neměl překročit 7% z napájecího napětí. Níže je proveden výpočet pro námi zvolený topný článek a pro výkon pece 5,6799 kW, který má pokrýt ztráty pecní vyzdívky.

Jmenovité napájecí napětí:

$$U_1 = \sqrt{P * R_L} = \sqrt{5679 * 6,72} = 195,35 \text{ V} \quad (49)$$

Kde P [W] je výkon na který má být pec dimenzována

R_L [Ω] je odpor daného elementu

Potom maximální napěťový krok je:

$$U_{KR} = \frac{U_1 * 7}{100} = \frac{195,35 * 7}{100} = 13,65 \text{ V} \quad (50)$$

Spočtu si minimální odpor sítě:

$$R_{SMIN} = R_L - 15\% = 5,718 \text{ } \Omega \quad (51)$$

Z něj spočtu maximální sekundární proud:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R_{SMIN}}} = \sqrt{\frac{5679}{5,718}} = 31,52 \text{ A} \quad (52)$$

Dále spočtu minimální požadované napětí:

$$U_{MIN} = \sqrt{P * R_{SMIN}} = \sqrt{5679 * 5,718} = 180,201 \text{ V} \quad (53)$$

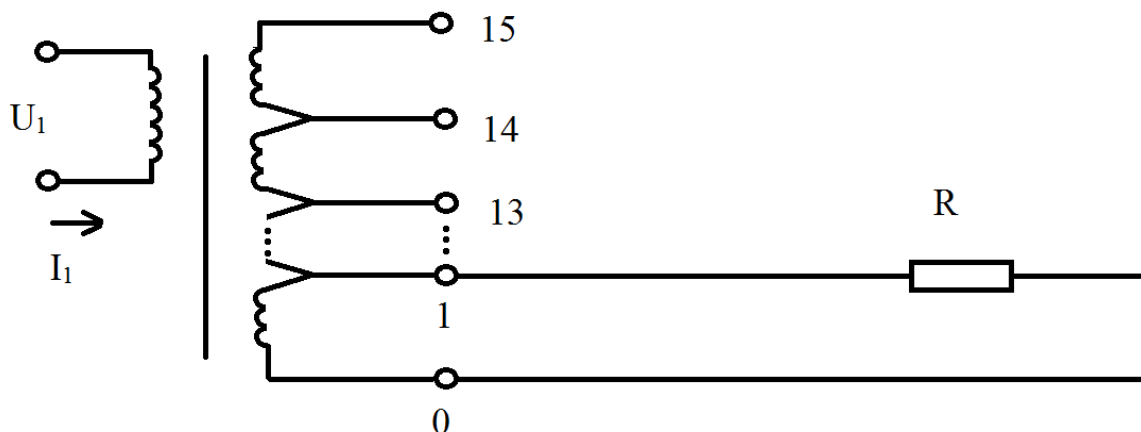
Zvolená specifikace mohla bude následující, kde vycházím z doporučení výrobce:

Primární vinutí: $U_1 = 400 \text{ V}$

$I_1 = 14,2 \text{ A}$

Sekundární vinutí: U_2 přepínatelné od 180,201 po 384,95 V, v 15 krocích po 13,65 V

$I_2 = 31,52 \text{ A}$



Obr. 34: Schéma transformátoru s odbočkami

4.4 Výpočet doby roztopení pece[13]

V prvním bodě si spočtu objem vyzdívky součtem objemů všech stěn:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 = 640 \text{ cm}^3 = 0,064 \text{ m}^3 \quad (54)$$

Kde $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$ [cm^3] a jsou to objemy bočních stěn stropu a dna
 $V_5 = V_6$ [cm^3] a jsou to objemy přední a zadní stěny.

Dalším bodem je výpočet hmotnosti vyzdívky:

$$G = \rho * V = 1000 * 0,064 = 64 \text{ kg} \quad (55)$$

Kde ρ [g/cm^3] je hustota materiálu

Poté si vypočtu akumulované teplo z následujícího vztahu:

$$Q_{AK} = G * c * (\vartheta_1 - \vartheta_2) = 64 * 0,92 * (1000 - 309) = 40686 \text{ kJ} \quad (56)$$

Kde c [$\text{J}/\text{kg} * \text{K}$] je měrná tepelná vodivost

V posledním bodě vypočtu čas pro roztopení pece:

$$t_P = \frac{Q_{AK}}{P_Z} = \frac{40686}{4,006} = 10156 \text{ s} = 169,3 \text{ min} \quad (57)$$

Pro ostatní hodnoty uvedu časy roztopení pece v následujících tabulkách

tvarovky $l_1=6,3$	
$\vartheta_1 [^{\circ}\text{C}]$	$t_p [\text{min}]$
800	180,1
900	174,3
1000	169,3

Tab. 12: Časy roztopení pece pro hutnou vyzdívku při tloušťce stěny 6,3 cm

vlna $l_1=6,3$	
$\vartheta_1 [^{\circ}\text{C}]$	$t_p [\text{min}]$
800	68,8
900	62,7
1000	58

Tab. 13: Časy roztopení pece pro vláknitou vyzdívku při tloušťce stěny 6,3 cm

tvarovky $l_1=12,5$	
$\vartheta_1 [^{\circ}\text{C}]$	$t_p [\text{min}]$
800	620,8
900	605,4
1000	589,3

Tab. 14: Časy roztopení pece pro hutnou vyzdívku při tloušťce stěny 12,5 cm

vlna $l_1=12,5$	
$\vartheta_1 [^{\circ}\text{C}]$	$t_p [\text{min}]$
800	239,9
900	222,7
1000	204,5

Tab. 15: Časy roztopení pece pro vláknitou vyzdívku při tloušťce stěny 12,5 cm

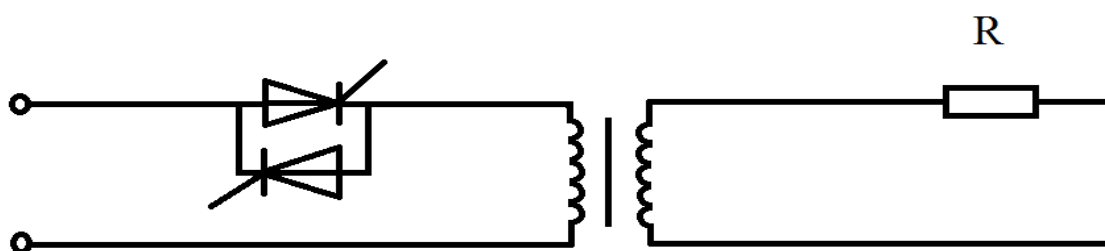
Z výsledků můžeme určit, že pro hutnou vyzdívku je doba roztopení pece výrazně delší, než při použití vláknité vyzdívky o stejné tloušťce stěny.

4.5 Navržení řídicího obvodu

Řízení silového obvodu bude ovlivněno stárnutím topných článků SiC. Protože následkem stárnutí se zvyšuje odpor článků a je potřeba vyšší napětí pro jeho napájení. Z důvodu dosažení maximální životnosti je doporučen provoz článků asi na 70% zatížení.

Silový obvod poté navrhuji efektivně řídit jedním z následujících způsobů:

- 1) Fázovým řízením regulace výkonu. Výkon omezují přepínáním odboček. Přepnutím na nižší odbočku transformátoru a regulací úhlu sepnutí na tyristoru od 0-100% což je 0-180°
- 2) Nebo výkon omezují na tyristoru. Pracují s vyšším napětím a úhel sepnutí omezují na 0 – 80° a se stárnutím topných článků úhel zvětšují.



Obr. 35: Schéma regulace pece

5 Závěr pro praxi

Praktická řešení technologických procesů je silně závislé na volbě druhu technologického procesu. Zejména na způsobu ohřevu tepelného zpracování vsázky a z toho plynoucího požadovaného průběhu teploty. Řízení by mělo zajistit energeticky úsporný průběh procesu. Návrh řídicího systému by měl vycházet z výkonové a teplotní analýzy technologického procesu a zároveň i z finanční analýzy.

6 Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval řízením elektrotepelných procesů v elektrických odporových pecích. Popisuji elektrotepelné procesy v elektrických odporových pecích ať už pro přímý nebo nepřímý odporový ohřev. Uvedl jsem nejběžnější typy pecí k realizaci elektrotepelných procesů, od komorových pecí přes pásové chladicí pece až po speciální karuselové rotační pece. V této práci dále popisuji kompletní procesy řízení elektrotepelných procesů v odporových pecích, počínaje měřením teploty pomocí termočlánků přes řízení veličiny pomocí regulátorů, nebo programovatelných logických automatů, až po popisy různých druhů akčních členů jako jsou stykače nebo tyristory a v poslední řadě uvádím možnosti zapojení topných těles v modelu uvažované pece.

Jako nejdůležitější částí této práce bylo zjištění elektricky nejvhodnějšího způsobu řízení procesů. Uvažoval jsem experimentální pec bez vsázky. Zvolil jsem z variace dvou druhů materiálu konstrukce pece při třech různých teplotách. Prvním materiálem byla hutná vyzdívka typu FL 25-10 a druhým materiálem byla vláknitá vyzdívka typu Alsitra Mat 1400. Počítal jsem s vnitřními teplotami 800, 900 a 1000 °C. Nejdříve jsem počítal s tloušťkou stěny pecní vyzdívky 6,3 cm, ale po zjištění příliš vysoké teploty na vnější straně pecní vyzdívky jsem navrhl silnější stěnu a to 12,5 cm. Po této úpravě již teploty na vnější straně pecní vyzdívky byly přijatelné. Výsledky byly konzultovány a kontrolovány s firmou RATH.

Dále jsem vypočetl tepelné ztráty v těchto variantách, nejdříve pro teoretickou konstrukci vztaženou na 1m^2 , poté na reálnou konstrukci s reálnými rozměry. Tepelné ztráty vyšly největší pro teplotu 1000 °C a to 4 kW pro materiál z hutné vyzdívky a nejmenší pro teplotu 800 °C výkon 918 W pro vláknitou vyzdívku. Výkon, na který by se měla dimenzovat pec, jsem zvolil takový, aby pokryl vypočtené ztráty.

V dalším bodě návrhu jsem počítal napětí a výkon zvoleného topného článku. Zvolil jsem článek SiC popsáný v bodě 4.2. Výpočtem jsem zjistil výkon jednoho článku, který je 946 W a napětí na jednom článku 32,6 V. Při šesti sériově řazených člancích je jejich výkon 5,7 kW, což pokryje ztráty vyzdívkou prázdné pece.

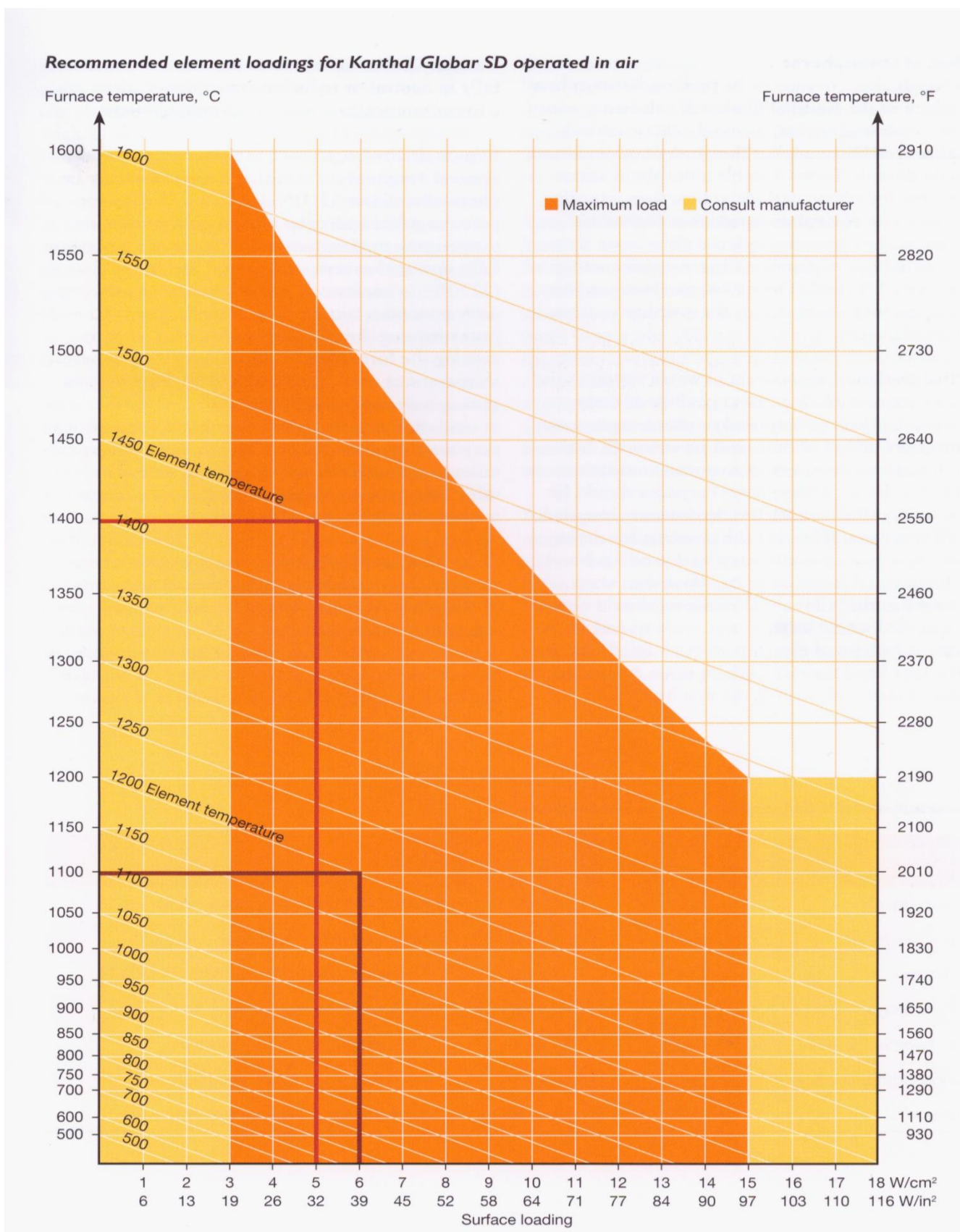
Při volbě transformátoru jsem zvolil variantu s přepínáním odboček, která je v tomto případě nejvhodnější, neboť počítá se stárnutím SiC topných článků.

Navrhl jsem efektivní řídicí obvod a stručně uvedl závěr pro praxi.

Použitá literatura

- [1] Rada, J. a kolektiv: Elektrotepelná technika, SNTL/ALFA, Praha 1985.
- [2] Hradílek, Z.; Lázničková, I.; Král, V.: Elektrotepelná technika, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011.
- [3] <http://www.zez.cz/Abeceda-BETA.htm> (8.4.2015)
- [4] http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_termicka_analyza/teorie.htm (14.4.2015)
- [5] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53351 (16.4.2015)
- [6] <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html> (28.3.2015)
- [7] <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>(16.3.2015)
- [8] http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf (22.3.2015)
- [9] Lucák, J.: Elektrotepelné procesy a jejich řízení, Teze dizertační práce, Plzeň 2014.
- [10] http://manik.korh.cz/files/škola/ss/.../03%20tyristory%20a%20triaky_loub.doc(27.4.2015)
- [11] Slavík, F.: Pecní příručka, SNTL, Praha 1965
- [12] Kuna, L.: Tepelné izolácie a meranie tepelných strát, SNTL, Slovenské vydavateľstvo technickej literatury Bratislava, Praha 1963
- [13] Dolejší, M.; Tomek, V.: Elektrické odporové pece a sušárny, SNTL, Praha 1967
- [14] Lucák, J.: Rekonstrukce odporové žíhací pece, Diplomová práce, Plzeň 1995
- [15] Kožený, J.; Škorpil, J.: Elektrotepelné technologie v technice životního prostředí, Plzeň 1993
- [16] Sandvik Materials Technology: Kantal Global SD Silicon carbide heating elements, Sweden 2011

Přílohy



Graf. 1: Povrchové zatížení topného článku SiC

RATH

DATENBLATT / DATA SHEET

Zugeordnetes SDBL / Corresponding MSDS:
Porath (1300-1600C)

Feuerleichtstein / Insulating fire brick

Porath FL 25-10

Allgemeine Informationen / General information:

- Feuerleichtstein, geschliffen, leicht bearbeitbar
- hohe Temperaturwechselbeständigkeit in dieser Klasse
- Insulating Fire Brick, grinded, good workability
- high thermal shock resistance for this class

Passender Kleber / Suitable adhesive:

- Porrathin 26, Porrathin HT



Rohstoffbasis / Raw material base:	Aluminiumsilikat / Aluminium silicate	
Klassifikationstemperatur / Classification temperature:	1400°C	
ASTM - Gruppe / ASTM - grade (in Anlehnung an / similar to ASTM C 155):	-----	
Chemische Analyse / Chemical analysis (ISO 21587-2):	Al ₂ O ₃	40 %
	SiO ₂	54 %
	Fe ₂ O ₃	2,3 %
Rohdichte / Bulk density (EN 1094-4):	1 g/cm ³	
Kaltdruckfestigkeit / Cold crushing strength (ISO 8895):	8 MPa	
Bleibende Längenänderung / Permanent Linear Change (ASTM C 210, 1/2 Normalstein / 1/2 standard brick):	1370°C / 12 h	-0,9 %
Wärmeleitfähigkeit nach dem Heißdraht-Verfahren / Thermal conductivity according to hot wire method (ISO 8894-1):	600°C	0,42 W/mK
	800°C	0,46 W/mK
	1000°C	0,50 W/mK
	1200°C	0,54 W/mK
Druckfeuerbeständigkeit / Fire resistance under load (DIN 51064):	T ₀ (0,05 MPa)	1430°C
Druckerweichen / Refractoriness under load (ISO 1893):	T _{0,5} (0,05 MPa)	1330°C
Temperaturwechselbeständigkeit / Thermal shock resistance (Werksnorm / in-house standard):	10 Abschreckungen / number of quenching	
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient / Linear thermal expansion coefficient: (EN 993-19)	0,025 MPa	5,0 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹
	20 - 1000°C	
Mittlere spezifische Wärme / Mean specific heat:	20 - 400°C	0,96 kJ/kgK
	20 - 1200°C	1,06 kJ/kgK

Die angegebenen Daten repräsentieren Durchschnittswerte aus der laufenden Produktion. Sie haben Informationscharakter und sind nicht als Garantiewerte anzusehen.
The given data are mean values of our current production. They are for information only and not to be taken as a guarantee.

Erstellt / Compiled: 20.03.2014

Änderung / Revision: 4

Seite/Page 1 von/of 1

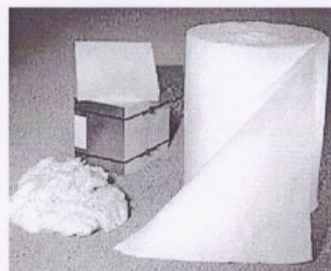
Obr. 36: Katalogový list hutné vyzdívky

RATH **DATENBLATT / DATA SHEET**
 Zugeordnetes SDBL: ALSITRA
 Corresponding MSDS: ALSITRTA
Hochtemperaturwolle / High temperature wool

Alsitra Mat 1400

Das Material kann nach kundenspezifischen Anforderungen in verschiedenen Dichten und Abmessungen geliefert werden.

The material can be delivered with different densities and dimensions.



Anwendungsbeispiele / Examples of application:

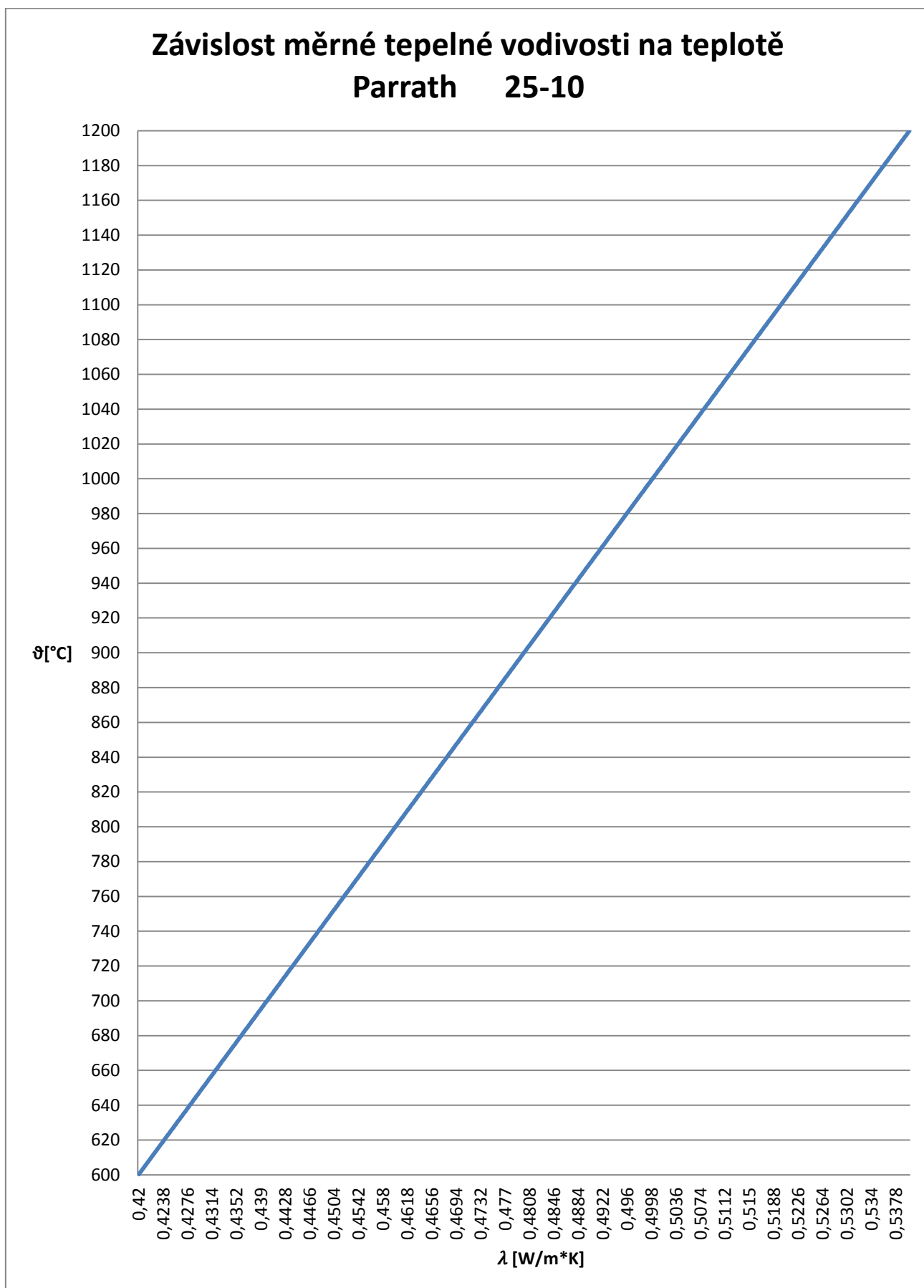
- Ausgangsmaterial zur Herstellung von Modulen für Ofenauskleidungen/basic material for high-temperature modules for furnace linings

Rohstoffbasis / Basic raw material:	Aluminiumsilikat / Aluminium silicate	
Klassifikationstemperatur / Classification Temperature:	1400 °C	
Daueranwendung / Continuous application:	< 1250 °C	
Mittlerer Faserdurchmesser / Average fibre diameter:	1,5 – 3,5 µm	
Faserdichte / Fibre density:	2,6 g/cm ³	
Chemische Analyse geglüht / Chemical analyses fired (EN 955-2; 4):	Al ₂ O ₃	54 %
	SiO ₂	46 %
Längenänderung / Linear change (DIN EN 993/10):	24h/1200°C	-2,0 %
	24h/1300°C	-3,0 %
	24h/1400°C	-4,0 %
Wärmeleitfähigkeit nach dem Heizdrahtverfahren (Mattendichte 128 kg/m ³)/ Thermal conductivity according to hot wire method (matdensity 128 kg/m ³) at (DIN EN 993-14):	400°C	0,11 W/mK
	600°C	0,15 W/mK
	800°C	0,21 W/mK
	1000°C	0,31 W/mK
	1200°C	0,44 W/mK
Dichten/Densities	96 – 160 kg/m ³	
	Dicken/Thickness	
Standardabmessungen/Standard dimensions	6,13, 19, 25, 38, 50 mm	
	21960 x 610 x 6 mm	
	14640 x 610 x 13 mm	
	7320 x 610 x 19 (25) mm	
		3660 x 610 x 38 (50) mm

Die angegebenen Daten repräsentieren Durchschnittswerte aus der laufenden Produktion. Sie haben Informationscharakter und sind nicht als Garantiewerte anzusehen.
 The given data are mean values of our current production. They are for information only and not to be taken as a guarantee.

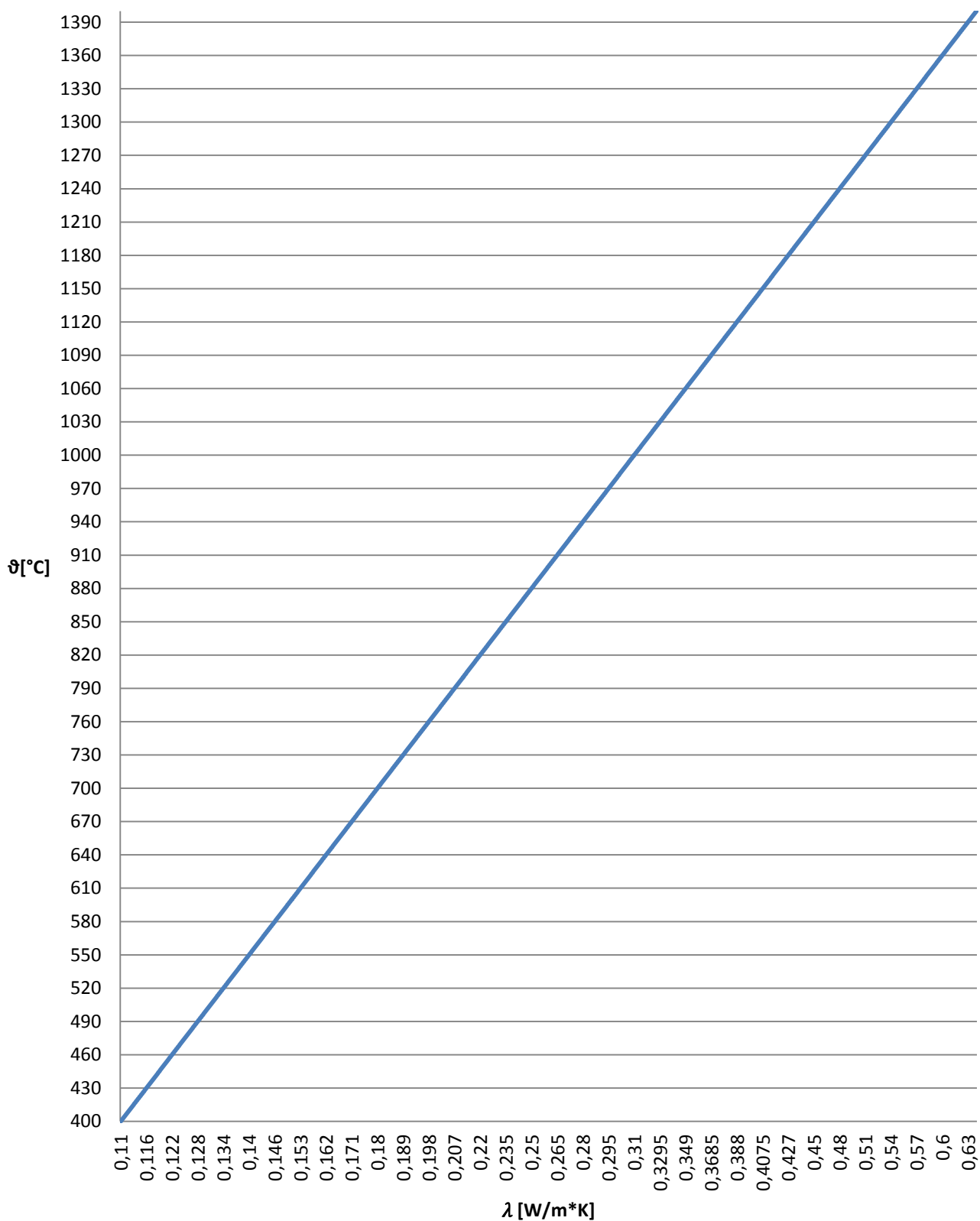
Erstellt / Compiled: VF 21/03/2007	Änderung / Revision: 01	Dokument Nr. / Document No.: AlsitraMat400	Seite/Page 1 von/of 1
------------------------------------	-------------------------	--	-----------------------

Obr. 37: Katalogový list vláknité vyzdívky



Graf. 2: Měrná tepelná vodivost hutné vyzdívky

Závislost měrné tepelné vodivosti na teplotě Alsitra Mat 1400



Graf. 3: Měrná tepelná vodivost vláknité vyzdívky