

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Disertační práce

**INOVAČNÍ PRVKY V NÁVRHU ELEKTROTEPELNÝCH
ODPOROVÝCH ZAŘÍZENÍ**

Ing. Jiří Lucák

Školitel: prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

Anotace

Předložená disertační práce se zabývá problematikou elektrických odporových ohřevů, které představují univerzální řešení pro různé aplikace tepelného zpracování v průmyslových provozech. Je obsahově zaměřená především na inovační prvky v návrhu elektrotepelných odporových zařízení. Toto téma je v současné době velmi aktuální, a to s ohledem na vývoj trhu s různými druhy energie.

Práce je rozdělena do tří hlavních částí. První část je teoretickým úvodem do uvedené problematiky, druhá část je svým obsahem nejrozsáhlejší a zabývá se řešením elektrických odporových pecí pomocí matematicko-fyzikálního modelu. Třetí část navazuje na problematiku řízení elektrických odporových pecí a je věnována chování topného systému při moderních způsobech řízení.

Hlavní přínos této práce spočívá v komplexnosti zpracování problematiky chování elektrotepelných zařízení s nepřímým odporovým ohřevem v závislosti na proměnnosti jejich elektrických parametrů. Tento ucelený soubor poznatků napomáhá zefektivnit návrh a konstrukci moderních elektrotepelných odporových zařízení splňujících kritéria na úsporný provoz. Výsledky práce považuji za obecně aplikovatelné v technické praxi.

Klíčová slova

nepřímý odporový ohřev, elektrická odporová pec, muflová pec, tepelný proces, topný článek, vyzdívka, sdílení tepla, matematicko-fyzikální model pece, diferenciální rovnice, numerická analýza

Annotation

The present dissertation thesis is focused on electrical resistance heating which shall be understood as a universal solution to be used in various applications of heat treatment within industrial plants. The content hereof is particularly aimed to present innovative elements in the design of electro-thermal resistance devices. This kind of topic is currently being very discussed regarding the development in the market with different types of energy.

The thesis is divided into three main parts. The first part represents a theoretical introduction into the subject matter hereof, the second part is the widest one and deals with the solution of electrical resistance furnaces using the mathematical-physical model. The third part represents a continuation related to the issue of electrical resistance furnaces and their control. This last part is focused on the behaviour of heating system controlled by modern methods.

The main contribution of the present thesis lies in the comprehensively processed issue related to the behaviour of electro-thermal devices with indirect resistance heating depending on the variability of their electrical parameters. Such a comprehensive set of knowledge helps to streamline the design and construction of modern electro-thermal resistance devices which meet the criteria related to the cost-efficient operation. The results of the present thesis can be considered to be generally applicable in technical practice.

Key Words

indirect resistance heating, electrical resistance furnace, muffle furnace, thermal process, heating element, lining, heat interchange, mathematical-physical furnace model, differential equations, numerical analysis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému školiteli prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za systematické vedení při práci, podporu, konzultace a především za možnost seberealizace při samostatném řešení jednotlivých dílčích cílů mé disertační práce.

V Plzni dne 15.8.2016

.....
podpis

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení disertační práci, zpracovanou během mého doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni dne 15.8.2016

Jiří Lucák

Obsah

i.	Seznam použitých zkratk a symbolů	13
ii.	Seznam obrázků a tabulek	16
iii.	Úvod do problematiky	22
iv.	Motivace práce	23
v.	Hlavní cíle práce	24
vi.	Metodika a struktura práce	25
1.	Současný stav poznání	26
1.1	Sdílení tepla	26
1.1.1	<i>Teoretický úvod</i>	26
1.1.2	<i>Sdílení tepla vedením - kondukcí</i>	26
1.1.3	<i>Sdílení tepla prouděním - konvekcí</i>	32
1.1.4	<i>Sdílení tepla sáláním - radiací</i>	33
	Elektrické vztahy	35
1.2.1	<i>Použití vztahy při vyhodnocování</i>	35
1.2.2	<i>Vztahy a pravidla pro návrh topných článků</i>	36
1.2.3	<i>Časová konstanta</i>	39
1.2	Zatížení topného článku při jeho pracovních režimech	41
1.3.1	<i>Druhy zatížení topného článku</i>	41
1.3	Modelování pomocí matematických a fyzikálních modelů	43
1.4.1	<i>Použití zákonů sdílení tepla při modelování pecí</i>	43
1.4.2	<i>Metody řešení vnějšího sdílení tepla</i>	43
1.4.3	<i>Metody řešení vnitřního sdílení tepla</i>	44
2.	Muflové pece	47
2.1	Současný stav v oblasti muflových pecí	47
2.1.1	<i>Všeobecný popis muflových pecí</i>	47
2.1.2	<i>Tepelná izolace</i>	47
2.1.3	<i>Topný systém</i>	48

2.1.4	<i>Regulace</i>	48
2.1.5	<i>Záznam</i>	48
2.2	Experimenty na modelech I a II.....	49
2.2.1	<i>Popis měřených modelů</i>	49
2.2.2	<i>Technická realizace experimentů na modelech I a II</i>	51
2.2.3	<i>Cíle experimentů</i>	56
2.2.4	<i>Výsledky experimentů</i>	56
2.2.5	<i>Vyhodnocení výsledků z experimentů</i>	66
2.2.6	<i>Využití výsledků z výpočtů a experimentů v praxi</i>	76
2.3	Matematický model tepelných procesů v prázdné elektrické muflové peci.....	78
2.3.1	<i>Popis zařízení</i>	78
2.3.2	<i>Hlavní části pece jsou:</i>	78
2.3.3	<i>Princip matematického modelu elektrické pece</i>	79
2.3.4	<i>Způsob rozdělení pece do soustředěných tepelných kapacit:</i>	80
2.3.5	<i>Sdílení tepla mezi tepelnými kapacitami</i>	81
2.3.6	<i>Označení veličin v matematickém modelu pece</i>	81
2.3.7	<i>Indexace veličin v matematickém modelu pece</i>	82
2.3.8	<i>Znázornění struktury matematického modelu</i>	82
2.3.9	<i>Znázornění tepelných toků a teplot</i>	84
2.3.10	<i>Vstupy a výstupy matematického modelu</i>	86
2.3.11	<i>Soustava stavových diferenciálních rovnic teplot</i>	86
2.3.12	<i>Relace pro tepelné toky</i>	87
2.3.13	<i>Závěr</i>	88
2.4	Experimentální verifikace výsledků modelové simulace ohřívacích cyklů na elektrických muflových pecích.....	89
2.4.1	<i>Úvod</i>	89
2.4.2	<i>Technická realizace experimentů na pecích</i>	89
2.4.3	<i>Simulace ohřevu pomocí matematického modelu</i>	90

2.4.4	<i>Fyzikální parametry materiálů</i>	93
2.4.5	<i>Způsob stanovení hodnot veličin α, ε, φ</i>	96
2.4.6	<i>Číselné hodnoty údajů do modelu pece:</i>	98
2.4.7	<i>Grafické vyjádření výsledků simulací</i>	105
2.4.8	<i>Vyhodnocení experimentů a simulací</i>	117
3.	<i>Topné systémy muflových pecí a jejich řízení</i>	118
3.1	<i>Současný stav poznání</i>	118
3.1.1	<i>Materiály používané na výrobu topných článků v odporových pecích</i>	118
3.1.2	<i>Zapojení topných článků v odporových pecích</i>	119
3.1.3	<i>Současné možnosti řízení výkonu topných článků</i>	123
3.2	<i>Experiment na modelu topného článku</i>	134
3.2.1	<i>Popis měřeného modelu</i>	134
3.2.2	<i>Technická realizace experimentu na modelu</i>	134
3.2.3	<i>Cíle experimentu</i>	139
3.2.4	<i>Experimentální měření – zjištění chování topného článku při jeho pracovních režimech</i>	139
3.2.5	<i>Vyhodnocení výsledků z experimentu</i>	178
3.2.6	<i>Porovnání napěťových a proudových poměrů při fázovém a cyklickém řízení</i> ...	180
3.2.6.1	<i>Fázové řízení</i>	180
3.2.6.2	<i>Cyklické řízení</i>	181
3.3	<i>Matematický model</i>	183
3.3.1	<i>Popis modelu topného článku muflové pece s odkrytou spirálou</i>	183
3.3.2	<i>Označení veličin v matematickém modelu topného článku muflové pece s odkrytou spirálou</i>	183
3.3.3	<i>Indexace veličin v matematickém modelu topného článku muflové pece s odkrytou spirálou</i>	183
3.3.4	<i>Znázornění struktury matematického topného článku muflové pece s odkrytou spirálou</i>	183
3.3.5	<i>Znázornění tepelných toků a teplot</i>	184

3.3.6	<i>Vstupy a výstupy matematického modelu.....</i>	185
3.3.7	<i>Stavová diferenciální rovnice teplot.....</i>	185
3.3.8	<i>Relace pro tepelné toky.....</i>	185
3.4	Experimentální verifikace výsledků modelové simulace ohřívacích cyklů na modelu topného článku.....	185
3.4.1	<i>Úvod.....</i>	185
3.4.2	<i>Technická realizace experimentu - stanovení amplitudy povrchové teploty topného článku v elektrické muflové peci</i>	186
3.4.3	<i>Simulace na matematických modelech.....</i>	186
3.4.4	<i>Simulace na matematickém modelu s odkrytou spirálou</i>	187
3.4.5	<i>Simulace na matematickém modelu se zakrytou spirálou</i>	187
3.4.6	<i>Vliv délky periody na amplitudu teploty spirály.....</i>	189
3.4.7	<i>Závěr.....</i>	190
3.4.8	<i>Vliv hmotnosti na rozkmit teploty povrchu topného článku.....</i>	191
3.4.9	<i>Závěr.....</i>	193
4.	Směr dalšího rozvoje práce.....	194
5.	Přínos	195
6.	Závěr.....	196
7.	Přílohy	197
8.	Výpis použitých pramenů.....	199
9.	Publikace, stáže, vzorky a pedagogická činnost	202
9.1	Publikace.....	202
9.2	Stáže.....	203
9.3	Vzorky.....	203
9.4	Pedagogická činnost	204

i. Seznam použitých zkratk a symbolů

A	- elektrická práce	[Ws]
A_i	- poměrná pohltivost i-tého tělesa	[-]
B_i	- Biotovo číslo	[-]
c_p	- měrná tepelná kapacita	[J/kgK]
C_p	- teplotní faktor	[-]
d	- průměr topného drátu	[mm]
E_o	- hustota celkového zářivého toku	[W/m ²]
E_{oi}	- hustota celkového zářivého toku i-tého tělesa	[W/m ²]
E_{on}	- hustota zářivého toku ve směru normály	[W/m ²]
U	- elektrické napětí	[V]
I	- elektrický proud	[A]
$I_{o\ell}$	- intenzita záření černého tělesa	[W/m ²]
i	- entalpie tělesa	[J/kg]
k_1	- $3,74 \cdot 10^{-6}$	[W/m ²]
k_2	- 0,01438	[mK]
ℓ	- tloušťka stěny	[m]
ℓ_1	- tloušťka stěny 1	[m]
ℓ_2	- tloušťka stěny 2	[m]
ℓ_n	- tloušťka stěny n	[m]
ℓ_v	- délka vlny	[m]
ℓ_{vm}	- max. intenzita vyzařování vlnové délky	[m]
M	- hmotnost tělesa	[kg]
p	- tlak	[Pa]
Q	- přestup tepla	[W]
Q_M	- množství tepla	[J]
Q_o	- tepelný obsah tělesa	[J]
q	- tepelný tok do tělesa	[W]
q_c	- celkový tepelný tok do tělesa	[W]
q_k	- tepelný tok konvekcí ze spalin do povrchu	[W]
q_φ	- zářivý tok ve směru φ	[W]
P	- elektrický výkon	[W]
R	- vnější zrychlení	[m/s ²]

R	- elektrický odpor	[Ω]
R_t	- odpor vodiče při teplotě t	[Ω]
R_L	- odpor na 1m	[Ω]
R_u	- odpor svorníku	[Ω]
R₂₀	- odpor vodiče při teplotě 20°C	[Ω]
S	- plocha	[m^2]
S_p	- průřez vodiče	[mm^2]
S_C	- povrch topného vodiče	[cm^2]
S_n	- průtočná plocha vrstvy n	[m^2]
S_{nn+1}	- geometrický střed vrstvy n	[m^2]
S₁	- průtočná plocha vrstvy 1	[m^2]
S₂	- průtočná plocha vrstvy 2	[m^2]
S₂₃	- geometrický střed vrstvy 2	[m^2]
T	- termodynamická teplota	[K]
t	- teplota	[°C]
t₁	- teplota vnitřního povrchu	[°C]
t₂	- teplota vnějšího povrchu	[°C]
t₂	- teplota mezi vrstvami 1 a 2	[°C]
t₃	- teplota mezi vrstvami 2 a 3	[°C]
t_{p1}	- teplota vnitřního prostředí	[°C]
t_{p2}	- teplota vnějšího prostředí	[°C]
t_{n+1}	-teplota vnějšího povrchu	[°C]
t_{pc}	- teplota pece	[°C]
t_{sp}	- teplota pecní atmosféry	[°C]
w	- rychlost proudění	[m/s]
W	- tepelný tok vnitřního zdroje	[J/m ³ s]
α	- součinitel přestupu tepla	[W/m ² K]
α_c	- celkový součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m ² K]
α_k	- součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² K]
α_s	- součinitel přestupu tepla sáláním	[W/m ² K]
α₁	- vnitřní součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m ² K]
α₂	- vnější součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m ² K]
β	- izobarický součinitel objemové roztažnosti tekutin	[1/K]
λ	- součinitel tepelné vodivosti	[W/mK]

λ_1	- součinitel tepelné vodivosti vrstvy 1	[W/mK]
λ_2	- součinitel tepelné vodivosti vrstvy 2	[W/mK]
λ_n	- součinitel tepelné vodivosti vrstvy n	[W/mK]
ε_0	- emisivita	
σ_{01}	- $5,675 \cdot 10^{-8}$ - konstanta záření černého tělesa ve vakuu	[W/m ² K ⁴]
τ	- čas	[s]
$\tau_{\check{c}k}$	- časová konstanta	[s]
φ	- úhel	
ϱ	- měrný odpor	[$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
ϱ	- hustota měrná	[kg/m ³]
ϑ	- teplota	[K]
$\Delta\vartheta$	- teplotní rozdíl	[K]
ν	- kinematická viskozita	[m/s ²]

ii. Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1.1 Jednovrstvá stěna	28
Obr. 1.1.2 N - vrstvá stěna	30
Obr. 1.2.1 Oteplovací křivka	39
Obr. 1.2.2 Ochlazovací křivka	40
Obr. 1.3.1 Výkon do topného systému v podobě jednotkového skoku. Předpokládaný průběh povrchové teploty topného článku	41
Obr. 1.3.2 Výkon do topného systému při přerušovaném zatížení. Předpokládaný průběh povrchové teploty topného článku	42
Obr. 2.2.1 MODEL I - šamotová muflová pec	49
Obr. 2.2.2 MODEL II – pec z vláknitých materiálů (funkční vzorek)	50
Obr. 2.2.3 Blokové schéma experimentu	54
Obr. 2.2.4 Doplnění záznamového přístroje EURO THERM A 6100 o obvody pro měření proudu a napětí	55
Obr. 2.2.5 Přístroj pro hlídání limitní teploty - regulátor EURO THERM 3508	55
Obr. 2.2.5 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL I - odbočka 155 V	57
Obr. 2.2.6 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL I - odbočka 180 V	58
Obr. 2.2.7 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL I - odbočka 220 V	59
Obr. 2.2.8 Porovnání naměřených teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU I pro napětí odboček 220 V, 180 V a 155 V	60
Obr. 2.2.9 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL II - odbočka 155V	61
Obr. 2.2.10 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL II - odbočka 180 V	62
Obr. 2.2.11 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 – průběh teplotního cyklu - MODEL II – odbočka 200 V	63
Obr. 2.2.12 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 – průběh teplotního cyklu - MODEL II – odbočka 220 V	64
Obr. 2.2.13 Porovnání naměřených teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU II pro napětí odboček 220 V, 200 V, 180 V a 155V	65
Obr. 2.2.14 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU I pro napětí odbočky 155 V	70
Obr. 2.2.15 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU I pro napětí odbočky 180 V	70
Obr. 2.2.16 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU I pro napětí odbočky 220 V	71
Obr. 2.2.17 Porovnání naměřených a vypočítaných teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU I pro napětí odboček 155 V, 180 V a 200 V (s vyznačením odpovídajících časových konstant – tučné body)	72

Obr. 2.2.18	Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 155 V	73
Obr. 2.2.19	Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 180 V	73
Obr. 2.2.20	Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 200 V	74
Obr. 2.2.21	Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 220 V	74
Obr. 2.2.22	Porovnání naměřených a vypočítaných teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU II pro napětí odboček 155 V, 180 V, 200 V a 220 V (s vyznačením odpovídajících časových konstant – tučné body)	75
Obr. 2.2.23	Průběhy křivek závislosti ustálené teploty na velikosti časové konstanty	77
Obr.2.3.1	Řez vzorkem muflové pece	78
Obr.2.3.2	Struktura matematického modelu pece.....	83
Obr.2.3.3	Názorná ukázka tepelných toků a teplot v bočních stěnách, stropu a nístěje modelu.....	84
Obr 2.3.4	Názorná ukázka tepelných toků a teplot v zadní stěně a dveřích modelu.	85
Obr. 2.3.5	Názorná ukázka tepelných toků působících na snímač teploty	85
Obr. 2.4.1	MODEL I – šamotová mufle.....	90
Obr. 2.4.2	MODEL II – mufle z SiC.....	90
Obr. 2.4.3	Těleso s nevydutým povrchem je uvnitř tělesa s vydutým povrchem.	96
Obr. 2.4.4	Uzavřená soustava zakřivených vydutých a nevydutých povrchů.....	96
Obr. 2.4.5	Model I - šamotová pec 155 V – vybrané teploty	106
Obr. 2.4.6	Model I - šamotová pec 180 V – vybrané teploty	107
Obr. 2.4.7	Model I - šamotová pec 220 V – tepelné toky	108
Obr. 2.4.8	Model I - šamotová pec 220 V – vybrané teploty	109
Obr. 2.4.9	Model I - šamotová pec 220 V –teploty	110
Obr. 2.4.10	Model II - sibalová pec 155 V – vybrané teploty	111
Obr. 2.4.11	Model II - sibalová pec 180 V – vybrané teploty	112
Obr. 2.4.12	Model II - sibalová pec 200 V – vybrané teploty	113
Obr. 2.4.13	Model II - sibalová pec 220 V –teploty	114
Obr. 2.4.14	Model II - sibalová pec 220 V –vybrané teploty.....	115
Obr. 2.4.15	Model II - sibalová pec 220 V – tepelné toky.....	116
Obr. 3.1.1	Závislost odporu na teplotě materiálu topných článků.....	119
Obr. 3.1.2	Řazení topných článků do série.....	120
Obr. 3.1.3	Řazení topných článků paralelně.....	120
Obr. 3.1.4	Zapojení topných článků do hvězdy.....	121
Obr. 3.1.5	Zapojení topných článků do trojúhelníku.....	122
Obr. 3.1.6	Způsob regulace ON/OFF	123
Obr. 3.1.7	Typický průběh teploty při regulaci ON/OFF	124

Obr. 3.1.8 Zapojení do hvězdy bez nulového vodiče	125
Obr. 3.1.9 Zapojení do hvězdy s nulovým vodičem	125
Obr. 3.1.10 Zapojení uzavřený trojúhelník.....	126
Obr. 3.1.11 Zapojení otevřený trojúhelník.....	126
Obr. 3.1.12 Zapojení do hvězdy bez nulového vodiče (ekonomická varianta)	127
Obr. 3.1.13 Zapojení uzavřený trojúhelník (ekonomická varianta)	127
Obr. 3.1.14 Průběhy napětí na topném článku při fázovém řízení.	128
Obr. 3.1.15 Průběh napětí na topném článku při spínání v nule – zapnutí a vypnutí.	128
Obr. 3.1.16 Průběh napětí při spínání v nule na zátěži.	129
Obr. 3.1.17 Teoretický příklad variabilního nastavení intervalu skupiny síťových period.....	129
Obr. 3.1.18 Průběh napětí na topném článku v režimu „BURST“	130
Obr. 3.1.19 Sekvenční spouštění spínání tyristorových jednotek.....	130
Obr. 3.1.20 Průběh příkonu do soustavy s tyristorovými jednotkami bez prediktivního řízení	131
Obr. 3.1.21 Průběh příkonu do soustavy s tyristorovými jednotkami (stejná soustava) s prediktivním řízením.....	132
Obr. 3.1.22 Princip řízení – SOFT START.....	132
Obr. 3.1.23 Praktická ukázka náběhu – v režimu SOFT START	133
Obr. 3.2.1 Princip použití skeneru LSP – HD 10 při měření povrchové teploty	136
Obr. 3.2.2 Měřicí a regulační obvod experimentu.....	137
Obr. 3.2.3 Funkční vzorek topného systému muflové pece (simulující podmínky s odkrytou spirálou)	138
Obr. 3.2.4 Experiment – zjišťování povrchové teploty topného článku (simulující podmínky s odkrytou spirálou).....	138
Obr. 3.2.5 Struktura tyristorové jednotky EPAC – při cyklickém řízení.....	140
Obr. 3.2.6 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.....	141
Obr. 3.2.7 Teplotní mapa topného článku – 50 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	142
Obr. 3.2.8 Průběh teploty topného článku – 50 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	143
Obr. 3.2.9 Teplotní mapa topného článku – 50 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	144
Obr. 3.2.10 Průběh teploty topného článku – 50 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	145
Obr. 3.2.11 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.....	146
Obr. 3.2.12 Teplotní mapa topného článku – 150 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	147
Obr. 3.2.13 Průběh teploty topného článku – 100 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	148

Obr. 3.2.14 Teplotní mapa topného článku – 100 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	149
Obr. 3.2.15 Průběh teploty topného článku – 100 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	150
Obr. 3.2.16 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.....	151
Obr. 3.2.17 Teplotní mapa topného článku – 150 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	152
Obr.3.2.18 Průběh teploty topného článku – 150 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	153
Obr. 3.2.19 Teplotní mapa topného článku – 150 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD - 10.	154
Obr. 3.2.20 Průběh teploty topného článku – 150 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	155
Obr. 3.2.21 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.....	156
Obr. 3.2.22 Teplotní mapa topného článku – 200 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	157
Obr. 3.2.23 Průběh teploty topného článku – 200 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	158
Obr. 3.2.24 Teplotní mapa topného článku – 200 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	159
Obr. 3.2.25 Průběh teploty topného článku – 200 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	160
Obr. 3.2.26 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.....	161
Obr. 3.2.27 Teplotní mapa topného článku – 250 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	162
Obr. 3.2.28 Průběh teploty topného článku – 250 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	163
Obr. 3.2.29 Teplotní mapa topného článku – 250 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD - 10.	164
Obr. 3.2.30 Průběh teploty topného článku – 250 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	165
Obr. 3.2.31 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.....	166
Obr. 3.2.32 Teplotní mapa topného článku – 300 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	167
Obr. 3.2.33 Průběh teploty topného článku – 300 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	168
Obr. 3.2.34 Teplotní mapa topného článku – 300 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	169
Obr. 3.2.35 Průběh teploty topného článku – 300 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	170

Obr. 3.2.36	Struktura tyristorové jednotky EPAC – při fázovém řízení.....	172
Obr. 3.2.37	Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.....	173
Obr. 3.2.38	Teplotní mapa topného článku –fázové řízení čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	174
Obr.3.2.39	Průběh teploty topného článku – fázové řízení čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.....	175
Obr. 3.2.40	Teplotní mapa topného článku – fázové řízení čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.....	176
Obr. 3.2.41	Průběh teploty topného článku – fázové řízení čas skenování 21s - záznam z LSP – HD – 10.....	177
Tab. 3.2.2	Hodnoty povrchové teploty topného článku v závislosti na délce regulační periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku.....	178
Obr. 3.2.42	Závislost rozkmitu teploty topného článku na délce periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku.....	178
Obr. 3.2.43	Velikost průměrné hodnoty povrchové teploty topného článku na délce periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku.....	179
Obr. 3.2.42	Princip fázového řízení pomocí antiparalelně zapojených tyristorů (nejpoužívanější zapojení).	180
Obr. 3.2.43	Průběh napětí na topném článku při fázovém řízení pomocí antiparalelně zapojených tyristorů (nejpoužívanější zapojení).	180
Obr. 3.2.44	Průběh napětí na topném článku při cyklickém řízení pomocí antiparalelně zapojených tyristorů (nejpoužívanější zapojení).	181
Obr. 3.3.1	Elektrické schéma matematického modelu topného článku (simulující podmínky s odkrytou spirálou).....	184
Obr. 3.3.2	Ukázka tepelných toků a teplot v modelu reprezentující topný článek (simulující podmínky s odkrytou spirálou).....	184
Obr. 3.4.1	Rozložení výkonu do topného článku při regulační periodě 6s požadavek na žádanou hodnotu 50%.	186
Obr. 3.4.2	Průběh teploty povrchu topného článku získaný simulací.	187
Obr. 3.4.3	Příkon do topného článku.....	187
Obr. 3.4.5	Výsledek simulace na muflové peci.....	188
Obr. 3.4.6	Příkon do topného článku muflové pece.....	188
Obr. 3.4.7	Simulace teplot t1, t3, a t14 při regulační periodě 2s.....	189
Obr. 3.4.8	Simulace teplot t1, t3, a t14 při regulační periodě 6s.....	189
Obr. 3.4.9	Simulace teplot t1, t3 a t14 při regulační periodě 18s.....	190
Obr. 3.4.10	Závislost rozkmitu (amplitudy) teploty t1 povrchu topného článku na délce regulační periody zap/vyp.....	190
Obr. 3.4.11	Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 0,9mm.....	192
Obr. 3.4.12	Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 1,4mm.....	192
Obr. 3.4.13	Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 2,0mm.....	192

Obr. 3.4.14 Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 2,5mm.....	192
Obr. 3.4.15 Příkon do topného článku	193
Obr. 3.4.16 Závislost rozkmitu teploty na průměru topného drátu při cyklickém řízení 3+3s a stejném příkonu do topného článku.....	193
Obr. 7.1 Výpis software pro stanovení časové konstanty modelů I - software Wolfran Mathematica verze 10.....	197
Obr. 7.2 Výpis software pro stanovení časové konstanty modelů II - software Wolfran Mathematica verze 10.....	198
Tab. 2.2.1 Závislost teplotního koeficientu C_t – Kanthal A1.....	66
Tab. 2.2.2 Naměřené hodnoty při experimentech na modelu I	66
Tab. 2.2.3 Vypočítané hodnoty odporu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model I 67	
Tab. 2.2.4 Vypočítané hodnoty výkonu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model I67	
Tab. 2.2.5 Vypočítané hodnoty povrchového zatížení topného článku v závislosti na jeho teplotě – model I	68
Tab. 2.2.6 Naměřené hodnoty při experimentech na modelu II	68
Tab. 2.2.7 Vypočítané hodnoty odporu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model II68	
Tab. 2.2.8 Vypočítané hodnoty výkonu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model II69	
Tab. 2.2.9 Vypočítané hodnoty povrchového zatížení topného článku v závislosti na jeho teplotě – model II	69
Tab. 2.2.10 Hodnoty časových konstant model I a modelu II.....	76
Tab. 3.2.1 Technické parametry použitého přístroje LSP-HD 10	136
Tab. 3.4.1 Parametry topného článku z materiálu Kanthal A - různé průřezy drátu.....	191

iii. Úvod do problematiky

Elektrické odporové ohřevy představují univerzální řešení pro různé aplikace tepelného zpracování v průmyslových provozech.

Elektrický ohřev je proces, při kterém je potřebná tepelná energie k ohřevu získávána přeměnou z elektrické energie. Tento druh ohřevu má celou řadu výhod, jako jsou poměrně vysoká účinnost, nízká investiční náročnost, nízké náklady na údržbu, malé rozměry a tím i nároky na prostor, přesné řízení ohřívacího procesu a šetrnost k okolnímu prostředí. Toto vše hovoří pro jeho široké použití. Nevýhodou omezující jeho masivnější nasazení v nejrůznějších průmyslových aplikacích je však vysoká cena elektrické energie oproti jiným druhům energie. Proto je nutné hledat nová řešení ke snížení energetické náročnosti elektrického ohřevu a jednu z možností vidím například v řešení optimálního způsobu řízení výkonové části pece napájející topné články.

V současné době se problematikou elektrického odporového ohřevu zabývá celá řada renomovaných tuzemských i světových firem. V České republice to jsou REALISTIK, a.s. Karlovy Vary, ELSKLO, s.r.o. Desná, E-THERM TZ, s.r.o. Klatovy, kde jsou tato zařízení navrhována a konstruována ke komerčním účelům. Produkce těchto průmyslových zařízení, pracujících na principu elektrického odporového ohřevu, není z výrobního hlediska sériovou záležitostí, ale jedná se prakticky vždy o kusovou zakázkovou výrobu. Zařízení se navrhuje pro dané aplikační použití na základě požadavků zákazníka na realizaci určitého druhu technologie tepelného zpracování. Jednotlivá zařízení se od sebe navzájem liší především konstrukčním uspořádáním a způsobem řízení.

Hlavní přínos práce vidím ve dvou oblastech návrhu nových pecí a to:

- a) v efektivním návrhu topného systému
- b) v optimálním způsobu řízení topného systému

iv. Motivace práce

Studia a profesní dráhu jsem od počátku směřoval do oblasti elektrotechniky. Po ukončení studia na Západočeské univerzitě v Plzni, Fakultě elektrotechnické jsem v roce 1995 nastoupil jako servisní technik do firmy Škoda Klatovy, s. r. o., která byla v té době jedním z významných tuzemských dodavatelů elektrotepelných zařízení, především pro ocelářský a strojírenský průmysl. V roce 2006, po zániku výše uvedené firmy, jsem přestoupil do firmy E-therm TZ, s. r. o. v Klatovech, kde jsem zaměstnán jako projektant elektrických zařízení. Firma E-therm TZ, s. r. o. patří rovněž k významným tuzemským a světovým dodavatelům elektrotepelných zařízení.

Ocelářský a strojírenský průmysl je rychle se rozvíjející dynamický obor, ve kterém je zapotřebí neustále akceptovat trendy zohledňující nové poznatky z dílčích odvětví při minimalizaci nákladů s ohledem na šetrnost vůči životnímu prostředí a celkovou úspornost zdrojů a materiálních a kapitálových vstupů, aniž by docházelo k degradaci způsobů a prostředků výroby. Pro nové postupy a technologie je nezbytné konstruovat taková zařízení, která dokáží na tento vývoj reagovat.

Poznatky a zkušenosti získané při vývoji těchto elektrotepelných zařízení mě inspirovaly jednak k hlubšímu proniknutí do teoretické oblasti spojené s energetickou efektivitou zařízení s nepřímým odporovým ohřevem a poznatky ve všeobecné podobě využít při inovaci konstrukce návrhu reálných zařízení.

v. Hlavní cíle práce

Cílem práce je hledání možností snižování energetické náročnosti elektrotepelných zařízení s nepřímým ohřevem cestou inovace návrhu zařízení se zaměřením na analýzu zdrojů tepla k realizaci technologie tepelného zpracování kovů a kovových součástí v těchto zařízeních. Dále pak vytvoření a popsání zobecněného přístupu k řešení a optimalizaci elektrotepelných zařízení (založených, nebo využívajících nepřímý odporový ohřev) v návaznosti na použití moderních metod řešení a zároveň ověření výsledků na praktických modelech, které byly k tomuto účelu zkonstruovány.

Jako hlavní cíl mé disertační práce jsem si vytyčil řešit aktuální technické problémy přicházející z praxe a zároveň se podílet na využití nově získaných teoretických poznatků při návrhu elektrotepelných zařízení s nepřímým ohřevem. Výstupem mé práce mají být nástroje použitelné při návrhu, uvádění do provozu a k stanovení podmínek pro provoz zařízení. Toho jsem dosáhl splněním následujících dílčích cílů:

- 1) Stanovit časovou konstantu elektrotepelného zařízení s nepřímým ohřevem
- 2) Sestavit matematicko-fyzikální model elektrotepelného zařízení s nepřímým ohřevem
- 3) Objasnit vzájemné vazby mezi funkcí řídicího systému a teplotou topných článků
- 4) Sestavit matematicko-fyzikální model topného článku
- 5) Stanovit vliv délky periody na rozkmit povrchové teploty topného článku
- 6) Stanovit vliv hmotnosti na rozkmit teploty povrchu topného článku

K ověření výstupů z matematicko-fyzikálních modelů jsem použil různé konstrukce muflových pecí, jelikož jsem se chtěl přesvědčit o věrohodnosti získaných výsledků.

vi. Metodika a struktura práce

Metodika řešení byla zvolena tak, aby postupně pokryla hlavní cíle práce a dosažené přínosy mohly být plně uplatněny v praxi.

Práce je rozdělena do tří hlavních, na sebe navazujících celků.

První část je teoretickým úvodem do uvedené problematiky.

Druhá část je svým obsahem nejrozsáhlejší a zabývá se řešením elektrických odporových pecí. V této části zevrubně popisují chování pece při jejím roztápění. K řešení využívám mnou sestavený matematický model, na kterém ověřuji poznatky získané z experimentů na reálných muflových pecích.

Třetí část navazuje na problematiku řízení elektrických odporových pecí. Věnuji se zde chování topného systému při moderních způsobech řízení, a to při cyklickém a fázovém (úhlovém) řízení.

1. Současný stav poznání

1.1 Sdílení tepla

1.1.1 Teoretický úvod

Teplu se šíří vždy z místa o vyšší teplotě do místa s nižší teplotou. Jsou tři základní způsoby šíření tepla:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekcí)
- sáláním (radiací)

U elektrických pecí se uplatňují všechny tři základní způsoby šíření tepla.

1.1.2 Sdílení tepla vedením - kondukcí

Pro sdílení tepla vedením platí obecně FOURIER - KIRCHHOFFOVA rovnice.

1.1.2.1 FOURIER - KIRCHHOFFOVA rovnice

Obecný tvar rovnice.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad } \vartheta \right) = \text{div} (\lambda \text{ grad } \vartheta) + W \quad (1.1.1)$$

Úpravami této rovnice dostanu

- Pro aplikace s vnitřním zdrojem tepla

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} W \quad (1.1.2)$$

- Pro aplikace bez vnitřního zdroje tepla

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \quad (1.1.3)$$

λ - součinitel tepelné vodivosti [W/mK]

c_p - měrná tepelná kapacita [J/kgK]

ρ - měrná hustota [kg/m³]

W - tepelný tok vnitřního zdroje [J/m³s]

τ - čas [s]

ϑ - teplota [K]

Pro vedení tepla reálnou stěnou v neustáleném stavu platí také obecná FOURIER - KIRCHHOFFOVA rovnice (nestacionární děj) bez vnitřního zdroje tepla. Pro tento případ uvedu řešení rovnice (1.1.3).

Zavedu součinitel teplotní vodivosti:

$$\mathbf{a} = \frac{\lambda}{c_p \varrho} \quad [-] \quad (1.1.4)$$

Zavedu operátor ∇^2 : v kartezkých souřadnicích

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (1.1.5)$$

FOURIER – KIRCHHOFFOVA upravená rovnice má tvar:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \mathbf{a} \nabla^2 \vartheta \quad (1.1.6)$$

Pro zjednodušení řeším jako stacionární problém.

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \mathbf{0} \quad (1.1.7)$$

Rovnice (1.1.4) přejde na tvar:

$$\mathbf{0} = \mathbf{a} \nabla^2 \vartheta \quad (1.1.8)$$

Provedu další zjednodušení - šíření tepla uvažuji jen ve směru osy x. Rovnice (1.1.3) přejde na tvar:

$$\mathbf{0} = \mathbf{a} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (1.1.9)$$

Řešením (1.1.9) dostanu:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} &= C_1 \\ \vartheta &= C_1 x + C_2 \end{aligned} \quad (1.1.10)$$

Při počátečních podmínkách pro C_1 a C_2 platí:

$$\mathbf{x} = \mathbf{0} : \vartheta = \vartheta_1 = C_2 \quad (1.1.11)$$

$$\mathbf{x} = \ell : \vartheta = \vartheta_2 = C_1 \ell + \vartheta_1 \quad C_1 = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\ell} = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (1.1.12)$$

Po dosazení do vztahu (1.1.10) mohu psát:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\ell} x + \vartheta_1 = \vartheta_1 - \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\ell} x \quad (1.1.13)$$

Pro teplo procházející stěnou platí:

$$\mathbf{Q} = (\vartheta_1 - \vartheta_2) \frac{\lambda}{\ell} \mathbf{S} \quad [W] \quad (1.1.14)$$

Poměr $\frac{\ell}{\lambda S}$ představuje tepelný odpor stěny.

Pro výpočet ztrát tepla rovinnou stěnou uvažuji ustálený stav. Při přesnějších výpočtech musím respektovat skutečnost, že teplota povrchu stěny se poněkud liší od teploty okolí. V litera-

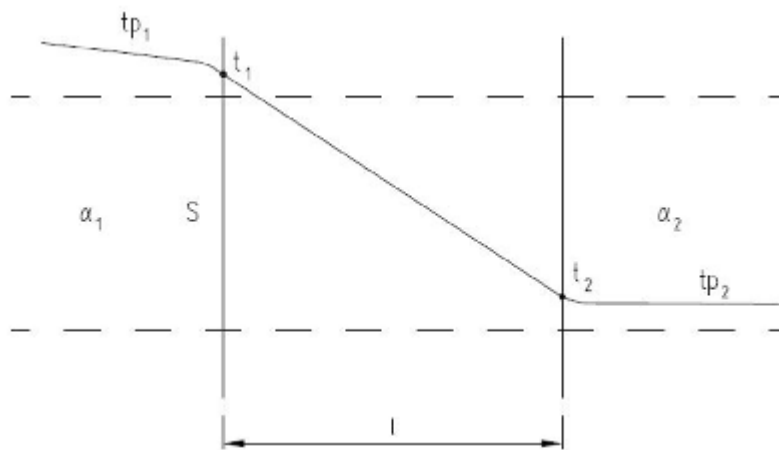
tuže se tato vrstva nazývá laminární subvrstva. Teplo se touto vrstvou šíří pouze vedením, a jelikož plyny jsou špatnými vodiči tepla, vzniká v tenké vrstvě na povrchu teplotní skok (viz obr. 1.1.1).

Celkový prostup tepla stěnou se skládá ze tří částí, při nichž je procházející tepelný tok Q stále stejný. Jsou to:

- přestup tepla na vnitřní stěnu pece
- vedení tepla stěnou z vnitřního na vnější povrch
- přestup tepla z vnějšího povrchu pece do okolí

1.1.2.2 Výpočet ztrát rovnou stěnou (stacionární děj)

1.1.2.2.1 Řešení jednovrstvé stěny



Obr. 1.1.1 Jednovrstvá stěna

t_{p1} – teplota vnitřního prostředí	[°C]
t_{p2} – teplota vnějšího prostředí	[°C]
t_1 – teplota vnitřního povrchu	[°C]
t_2 – teplota vnějšího povrchu	[°C]
α_1 - vnitřní součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m ² K]
α_2 - vnější součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m ² K]
λ – součinitel tepelné vodivosti	[W/m K]
S – průřezná plocha	[m ²]
l – tloušťka	[m]

- přestup tepla na vnitřní stěnu (Newtonův vztah) – pro zjednodušení dále předpokládám α_1 jako celkové.

$$Q = \alpha_1(t_{p1} - t_1)S \quad [W] \quad (1.1.15)$$

$$t_{p1} - t_1 = \frac{Q}{\alpha_1 S} \quad [°C] \quad (1.1.16)$$

b) vedení tepla stěnou, z vnitřní na vnější povrch

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\ell} S \quad [W] \quad (1.1.17)$$

$$t_1 - t_2 = \frac{Q \ell}{\lambda S} \quad [^\circ C] \quad (1.1.18)$$

c) přestup tepla z vnějšího povrchu stěny do okolí

$$Q = \alpha_2 (t_2 - t_{p2}) S \quad [W] \quad (1.1.19)$$

$$t_2 - t_{p2} = \frac{Q}{\alpha_2 S} \quad [^\circ C] \quad (1.1.20)$$

výsledný vztah pro prostup tepla – součet rovnic (1.1.15), (1.1.17) a (1.1.19)

$$Q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\ell}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right) \frac{1}{S}} \quad [W] \quad (1.1.21)$$

Výpočet teplot t_1 a t_2 na rozhraní:

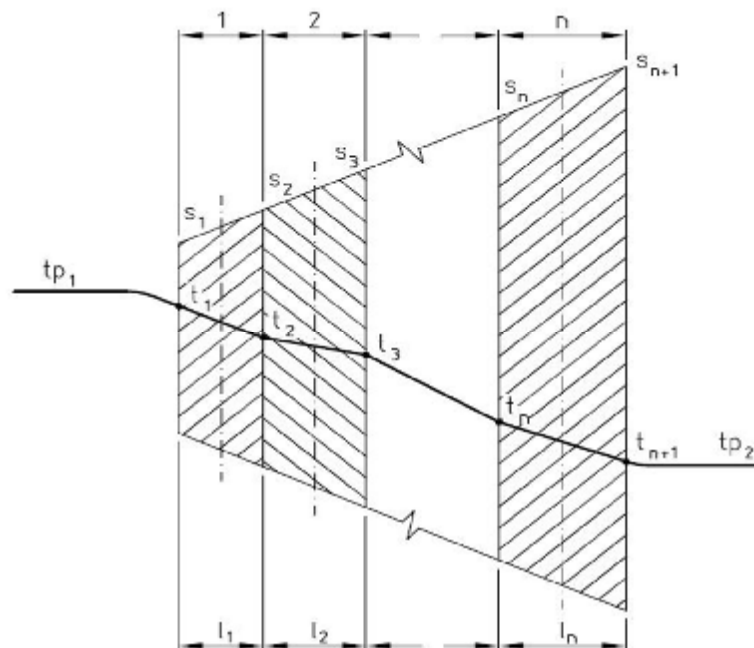
Pro výpočet t_1 použijí vztah (1.1.16) po úpravě dostanu:

$$t_1 = t_{p1} - \frac{Q}{\alpha_1 S} \quad [^\circ C] \quad (1.1.22)$$

Pro výpočet t_2 použijí vztah (1.1.20) po úpravě dostanu:

$$t_2 = t_{p2} + \frac{Q}{\alpha_2 S} \quad [^\circ C] \quad (1.1.23)$$

U skutečných pecí je vyzdívka složená z více vrstev. Jednotlivé vrstvy jsou z různých materiálů, různé tepelné vodivosti. V rozích pece, kde se stýkají zpravidla dvě kolmé stěny, nastávají nepravidelnosti, jejich vliv přibližně respektujeme geometrickým středem vrstvy.

1.1.2.2 Řešení n – vrstvé stěny:

 Obr. 1.1.2 N - vrstvá stěna

t_{p1} – teplota vnitřního prostředí	[°C]
t_{p2} – teplota vnějšího prostředí	[°C]
t_1 – teplota vnitřního povrchu	[°C]
t_2 – teplota mezi vrstvami 1 a 2	[°C]
t_3 – teplota mezi vrstvami 2 a 3	[°C]
t_{n+1} – teplota vnějšího povrchu	[°C]
α_1 – vnitřní součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m ² K]
λ_1 – součinitel tepelné vodivosti vrstvy 1	[W/mK]
λ_2 – součinitel tepelné vodivosti vrstvy 2	[W/mK]
λ_n – součinitel tepelné vodivosti vrstvy n	[W/mK]
α_2 – vnější součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m ² K]
S_1 – průtočná plocha vrstvy 1	[m ²]
S_2 – průtočná plocha vrstvy 2	[m ²]
S_n – průtočná plocha vrstvy n	[m ²]
S_{12} – geometrický střed vrstvy 1	[m ²]
S_{23} – geometrický střed vrstvy 2	[m ²]
S_{nn+1} – geometrický střed vrstvy n	[m ²]
l_1 – tloušťka stěny 1	[m]
l_2 – tloušťka stěny 2	[m]
l_n – tloušťka stěny n	[m]

Geometrický střed – nemají-li oba povrchy, tj. S_1 a S_2 stejnou plochu, potom při výpočtu dosadíme za S geometrický střed S_{12} z obou ploch:

vrstva 1:

$$S_{12} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad [m^2] \quad (1.1.24)$$

vrstva 2:

$$S_{23} = \sqrt{S_2 \cdot S_3} \quad [m^2] \quad (1.1.25)$$

vrstva n:

$$S_{nn+1} = \sqrt{S_n \cdot S_{n+1}} \quad [m^2] \quad (1.1.26)$$

Prostup jednotlivými vrstvami

a) přestup tepla na vnitřní stěnu (Newtonův vztah)

$$Q = \alpha_1 (t_{p1} - t_1) S_1 \quad [W] \quad (1.1.27)$$

$$t_{p1} - t_1 = \frac{Q}{\alpha_1 S_1} \quad [^\circ C] \quad (1.1.28)$$

b) vedení tepla stěnou

vrstva 1

$$Q = \lambda_1 \frac{t_1 - t_2}{\ell_1} S_{12} \quad [W] \quad (1.1.29)$$

$$t_1 - t_2 = \frac{Q \ell_1}{\lambda_1 S_{12}} \quad [^\circ C] \quad (1.1.30)$$

vrstva 2

$$Q = \lambda_2 \frac{t_2 - t_3}{\ell_2} S_{23} \quad [W] \quad (1.1.31)$$

$$t_2 - t_3 = \frac{Q \ell_2}{\lambda_2 S_{23}} \quad [^\circ C] \quad (1.1.32)$$

vrstva n

$$Q = \lambda_n \frac{t_n - t_{n+1}}{\ell_n} S_{nn+1} \quad [W] \quad (1.1.33)$$

$$t_n - t_{n+1} = \frac{Q \ell_n}{\lambda_n S_{nn+1}} \quad [^\circ C] \quad (1.1.34)$$

c) přestup tepla z vnějšího povrchu stěny do okolí

$$Q = \alpha_2 (t_{n+1} - t_{p2}) S_{n+1} \quad [W] \quad (1.1.35)$$

$$t_{n+1} - t_{p2} = \frac{Q}{\alpha_2 S_{n+1}} \quad [^\circ C] \quad (1.1.36)$$

výsledný vztah pro prostup tepla – dosazením a spojením rovnic (1.1.27), (1.1.29), (1.1.31), (1.1.33) a (1.1.35) dostanu vztah

$$Q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{\alpha_1 S_1} + \frac{\ell_1}{\lambda_1 S_{12}} + \frac{\ell_2}{\lambda_2 S_{23}} + \dots + \frac{\ell_n}{\lambda_n S_{nn+1}} + \frac{1}{\alpha_2 S_{n+1}}} \quad [W] \quad (1.1.37)$$

Výpočet teplot na rozhraních jednotlivých vrstev:

Pro výpočet t_1 použiji vztah (1.1.28) po úpravě dostanu:

$$t_1 = t_{p1} - \frac{Q}{\alpha_1 S_1} \quad [^\circ C] \quad (1.1.38)$$

Pro výpočet t_2 použiji vztah (1.1.30) po úpravě dostanu:

$$t_2 = t_1 - \frac{Q\ell_1}{\lambda_1 S_{12}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.1.39)$$

Pro výpočet t_3 použijí vztah (1.1.32) po úpravě dostanu:

$$t_3 = t_2 - \frac{Q\ell_2}{\lambda_2 S_{23}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.1.40)$$

Pro výpočet t_{n+1} použijí vztah (1.1.34) po úpravě dostanu:

$$t_{n+1} = t_n - \frac{Q\ell_n}{\lambda_n S_{nn+1}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.1.41)$$

Pro výpočet t_{p2} použijí vztah (1.1.36) po úpravě dostanu:

$$t_{p2} = t_{n+1} - \frac{Q}{\alpha_2 S_{n+1}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.1.42)$$

1.1.3 Sdílení tepla prouděním - konvekcí

1.1.3.1 Rovnice kontinuity

Vyjadřuje zachování hmoty při proudění tekutin

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_h * \vec{w}) = 0 \quad (1.1.43)$$

ρ_h - hustota

[kg/m³]

\vec{w} - vektor rychlosti proudění

[m/s]

1.1.3.2 Zákon zachování energie při neizotermickém proudění vazké stlačitelné tekutiny

$$\frac{Dw}{d\tau} = \vec{R} (1 + \beta \Delta\vartheta) - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{w} - \frac{1}{3} \nu \text{grad } \text{div} \vec{w} \quad (1.1.44)$$

β – izobarický součinitel objemové roztažnosti tekutin

[1/K]

ν - kinematická viskozita

[m/s²]

$\Delta\vartheta$ – teplotní rozdíl

[K]

p – tlak

[Pa]

\vec{R} – vektor vnějšího zrychlení

[m/s²]

1.1.3.3 Newtonův vztah

Vyjadřuje sdílení tepla mezi stěnou a tekutinou

$$Q_M = \alpha \Delta\vartheta_s S \tau \quad (1.1.45)$$

Q_M - množství tepla

[J]

α - součinitel přestupu tepla

[W/m²K]

S – plocha

[m²]

$\Delta\vartheta_s$ – teplotní rozdíl v mezní vrstvě tekutiny [K]

τ – čas [s]

Fyzikální problematika děje je zde zahrnuta do součinitele přestupu tepla α .

1.1.4 Sdílení tepla sáláním - radiací

1.1.4.1 Zákon zachování energie při sálání

$$E_d = E_A + E_R + E_D \quad (1.1.46)$$

Podle tohoto zákona celková zářivá energie E_d dopadající na těleso se rovná součtu energie tělesem pohlcené E_A , odražené E_R a propuštěné E_D .

1.1.4.2 Planckův vyzařovací zákon

Zákon vyjadřuje intenzitu záření dokonale černého tělesa v závislosti na délce vlny a absolutní teplotě.

$$I_{0l} = \frac{k_1 \ell_v^{-5}}{e^{\frac{k_2}{\ell T}} - 1} \quad [W/m^2] \quad (1.1.47)$$

I_{0l} - intenzita záření černého tělesa [W/m²]

ℓ_v - délka vlny [m]

T - termodynamická teplota [K]

k_1 - $3,74 \cdot 10^{-6}$ [W/m²]

k_2 - 0,01438 [mK]

1.1.4.3 Wienův posunovací zákon

Zákon vyjadřuje závislost vlnové délky na absolutní teplotě zářiče.

$$\ell_{vm} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \quad [mK] \quad (1.1.48)$$

ℓ_m - max. intenzita vyzařování vlnové délky [m]

1.1.4.4 Stefan – Boltzmanův zákon

Zákon vyjadřuje závislost celkového zářivého toku černého tělesa na teplotě.

$$E_o = \sigma_o T^4 \quad (1.1.49)$$

E_o - hustota celkového zářivého toku [W/m²]

T - termodynamická teplota [K]

σ_o - $5,675 \cdot 10^{-8}$ konstanta záření černého tělesa ve vakuu [W/m²K⁴]

1.1.4.5 Kirchhoffův zákon

Podle tohoto zákona je poměr sálavého toku a poměr pohltivosti u všech těles stejný při stejné absolutní teplotě.

$$\frac{E_{oi}}{A_i} = \sigma_o T^4 \quad (1.1.50)$$

E_{oi} - hustota celkového zářivého toku i-tého tělesa [W/m^2]

A_i - poměrná pohltivost i-tého tělesa [-]

1.1.4.6 Lambertův kosinový zákon

Podle tohoto zákona je množství energie, které vyzáří difuzní plošný zářič ve směru svírajícím s normálou plochy úhel φ úměrná $\cos \varphi$.

$$dq_\varphi = E_{on} * dS * \cos \varphi \quad (1.1.51)$$

E_{on} - hustota zářivého toku ve směru normály [W/m^2]

q_φ - zářivý tok ve směru φ

S - plocha [m^2]

φ - úhel

1.1.4.7 Lambertův směrový zákon

Podle tohoto zákona je množství energie, vyzářené difuzním plošným zářičem ve směru normály π krát menší, než úhrnná energie vyzářená do polosféry.

$$Q_n = \frac{\varepsilon_o \sigma_o}{\pi} T^4 S \quad (1.1.52)$$

ε_o - emisivita

1.1.4.8 Určení sdílení tepla při respektování konvekce a radiace

S použitím α_s a α_k

Pro konvekci α_k určíme z tabulek v závislosti na teplotě

Pro α_s lze konstatovat

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_o \sigma_o [(T_1)^4 - (T_2)^4]}{(T_1 - T_2)} \quad (1.1.53)$$

Dále lze konstatovat

$$P = \alpha_c (T_1 - T_2) S \quad (1.1.54)$$

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s \quad (1.1.55)$$

α_c - celkový součinitel přestupu tepla [$W/m^2 K$]

α_k - součinitel přestupu tepla konvekcí [$W/m^2 K$]

α_s - součinitel přestupu tepla radiací [$W/m^2 K$]

Použité prameny: [2], [9], [15], [16], [18], [25], [26], [32], [33], [34],

Elektrické vztahy

1.2.1 Použité vztahy při vyhodnocování

1.2.1.1 Stanovení elektrického odporu

Odpor je přímo úměrný délce vodiče a nepřímo úměrný jeho průřezu. Má-li odporový vodič délku ℓ [m], průřez S_p [mm²] a měrný odpor ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$] vypočtu jeho odpor R [Ω] podle vztahu:

$$R = \rho \frac{\ell}{S_p} \quad [\Omega] \quad (1.2.1)$$

Odpor vodiče R a tedy i měrný odpor ρ se mění se změnou teploty vodiče. Odporů všech kovových materiálů vzrůstají se zvyšováním teploty a tento vzrůst teploty odporu je vyjádřen teplotním součinitelem α . Pak pro odpor při zvýšení teploty se vypočte podle vztahu:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_R (t - 20)] \quad [\Omega] \quad (1.2.2)$$

t - zvýšená teplota vodiče [°C]

R_t - odpor vodiče při teplotě t [Ω]

R_{20} - odpor vodiče při teplotě 20°C [Ω]

α_R - teplotní součinitel [1/K]

Teplotní součinitel α_R není pro všechny teploty stejný, nýbrž při vyšších teplotách se zmenšuje. Odporový materiál pro výrobu topných článků má vykazovat co největší měrný odpor ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$] a malý teplotní součinitel α_R . Pokud se mění málo měrný odpor, ale materiál je teplotně dilatující, projeví se dilatace v odporu.

1.2.1.2 Elektrická práce

Její hodnota je dána pro konstantní napětí a proud vztahem:

$$A = U I \tau \quad [Ws] \quad (1.2.3)$$

Jednotkou práce je wattsekunda - Ws , která představuje práci proudu 1 A při napětí 1 V po dobu 1 s. Pro výpočet tepla vzniklého elektrickou prací platí Jouleův zákon, který je vyjádřen rovnicí: **Sem zadejte rovnici.**

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} U I d\tau \quad [J] \quad (1.2.4)$$

1.2.1.3 Výkon

Elektrický výkon je násobkem napětí a proudu.

$$P = U I \quad [W] \quad (1.2.5)$$

Dosadím-li do této rovnice známé hodnoty z Ohmova zákona,

$$U = R I \quad [V] \quad (1.2.6)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (1.2.7)$$

dostávám rovnice potřebné pro výpočet výkonu.

$$P = R I^2 \quad [W] \quad (1.2.8)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad [W] \quad (1.2.9)$$

1.2.1.4 1. Kirchhoffův zákon

Součet napětí ve smyčce je roven nule.

$$\sum_{i=1}^n U_i = 0 \quad [V] \quad (1.2.10)$$

1.2.1.5 2. Kirchhoffův zákon

Součet proudů v uzlu je roven nule.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad [A] \quad (1.2.11)$$

1.2.2 Vztahy a pravidla pro návrh topných článků

1.2.2.1 Základní vzorce a definice pro návrh topného článku

Následující rovnice a definice jsou použity při výpočtu topného článku

1) Odpor vodiče při 20°C R_{20}

$$R_{20} = \rho \frac{\ell}{S_c} \quad [\Omega] \quad (1.2.12)$$

2) Teplotní faktor C_t

Teplotní faktor C_t se často používá místo teplotního koeficientu α . C_t je definován jako poměr mezi měrným odporem nebo odporem při požadované teplotě t [°C] a měrným odporem nebo odporem při 20 °C. Měrný odpor nebo změna odporu s teplotou není lineární pro většinu odporových slitin používaných při výrobě topných elementů.

3) Odpor při pracovní teplotě R_t

$$R_t = C_t R_{20} \quad [\Omega] \quad (1.2.13)$$

Úpravou (1.2.13) dostávám

$$C_t = \frac{R_t}{R_{20}} \quad [-] \quad (1.2.14)$$

Dále platí

$$C_t = 1 + (t - 20) \alpha \quad [-] \quad (1.2.15)$$

t - teplota - topného vodiče

[°C]

4) Výpočet odporu při pracovní teplotě R_t

$$R_t = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (1.2.16)$$

5) Výpočet povrchového zatížení p

$$p = \frac{P}{S_C} \quad [W/cm^2] \quad (1.2.17)$$

S_C - povrch topného vodiče

$[cm^2]$

6) Výpočet poměru $\frac{S_C}{R_{20}}$

$$\frac{S_C}{R_{20}} = \frac{I^2 C_t}{p} \quad [cm^2/\Omega] \quad (1.2.18)$$

Poměr $\frac{S_C}{R_{20}}$ se používá pro stanovení rozměrů drátu nebo pásku, je uveden v tabulkách pro jednotlivé odporové slitiny.

1.2.2.2 Návrh průměru drátu

Návrh průměru drátu topného článku provedu dvěma způsoby:

a) Teoretická metoda

Vztah pro výpočet průměru drátu:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \frac{qP}{pR_{20}}} \quad [mm] \quad (1.2.19)$$

Rovnici (1.2.19) lze upravit na tvary

$$d = \frac{1}{2,91} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{U}\right)^2 \frac{qC_t}{p}} \quad [mm] \quad (1.2.20)$$

$$d = \frac{1}{2,91} \sqrt[3]{I^2 \frac{qC_t}{p}} \quad [mm] \quad (1.2.21)$$

Vztahy (1.2.20) a (1.2.21) se výpočty v praxi zefektivní.

b) Rychlá metoda

Pro rychlou metodu použiji vztah:

$$R_S = \frac{I^2 C_t}{p} \quad (1.2.22)$$

Pomocí hodnoty R_S $[cm^2/\Omega]$ při 20 °C vyberu vhodný průměr drátu tak, že vyhledám podobnou číselnou hodnotu v příslušné materiálové tabulce pro mnou zvolenou slitinu.

1.2.2.3 Výpočet délky drátu topného článku

Znám typ drátu a jeho průměr, dalším krokem je výpočet jeho délky. Pro výpočet délky je potřebné vypočítat odpor zvolené slitiny při jeho pracovní teplotě. K tomu použiji vztah:

$$\mathbf{R}_t = \frac{U^2}{P} \quad [\Omega] \quad (1.2.23)$$

Dále vypočítám odpor při 20°C podle:

$$\mathbf{R}_{20} = \frac{R_t}{C_t} \quad [\Omega] \quad (1.2.24)$$

V tabulkách pro jednotlivé slitiny a průřezy drátu jsou uvedeny hodnoty \mathbf{R}_L [Ω/m]. Vyberu příslušnou hodnotu a dosadím do vztahu:

$$\ell = \frac{R_{20}}{R_L} \quad [m] \quad (1.2.25)$$

1.2.2.4 Výpočet pracovní teploty topného článku

Použiji vztah:

$$t_e = \sqrt[4]{\frac{P}{\varepsilon \delta \cdot 5,675 \cdot 10^{-12}} + (t_u + 273)^4} - 273 \quad [^\circ C] \quad (1.2.26)$$

Pro spirálu určím součinitel tvaru pomocí vztahu:

$$\delta = 0,5 \left[1 + \frac{s}{2d} - \sqrt{\left(\frac{s-d}{d}\right)^2 + 1} \right] \quad [-] \quad (1.2.27)$$

Pro materiály KANTHAL použiji materiálovou konstantu:

$$\varepsilon - \text{pro KANTHAL je } 0,70$$

1.2.2.5 Výpočet připojovacího svorníku

a) Výpočet minimálního průměru svorníku

$$\mathbf{d}_u = 0,4 \sqrt[3]{I^2} \quad [mm] \quad (1.2.28)$$

b) Výpočet odporu připojovacích svorníků

$$\mathbf{R}_u = \mathbf{R}_L \mathbf{L}_u \quad [\Omega] \quad (1.2.29)$$

c) Výpočet odporu topného článku při 20 °C

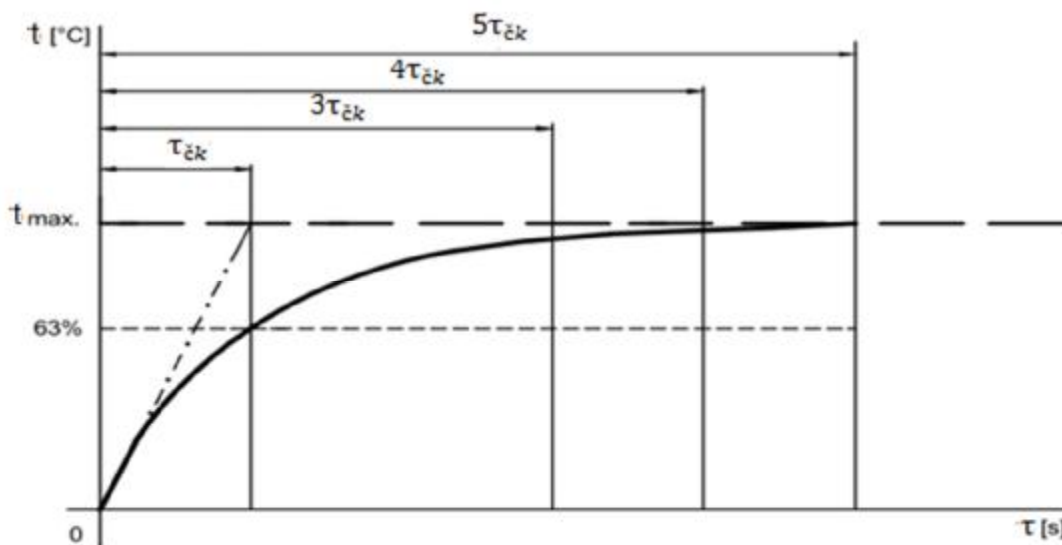
$$\mathbf{R}_{20} = \frac{R_t}{C_t} - 2\mathbf{R}_u \quad [\Omega] \quad (1.2.30)$$

1.2.3 Časová konstanta

Časová konstanta $\tau_{\check{c}k}$ je fyzikální veličina charakterizující rychlost, s jakou vzniká nebo zaniká přechodový děj.

Pro tuto konstantu je možno vyjít z předpokladu, že platí pro $5\tau_{\check{c}k} = 99,3\%$ ustálené maximální fyzikální veličiny. Tato hodnota je považována za hodnotu představující dobu, za kterou děj dosáhl ustálené hodnoty, to znamená ukončení přechodového děje. Dalšími důležitými mezníky přechodového děje jsou $4\tau_{\check{c}k} = 98\%$ a $3\tau_{\check{c}k} = 95\%$.

1.2.3.1 Oteplovací křivka



Obr. 1.2.1 Oteplovací křivka

Pro oteplovací křivku platí následující vztah (pro konstantní α a látkové vlastnosti)

$$\Delta t_i(\tau) = \Delta t_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\tau_i}{\tau_{\check{c}k}}} \right) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.2.31)$$

Řešení této rovnice pro časovou konstantu oteplovací křivky jsem nenalezl v analytice. Pro stanovení $\tau_{\check{c}k}$ při vyhodnocování experimentů jsem použil numerické metody.

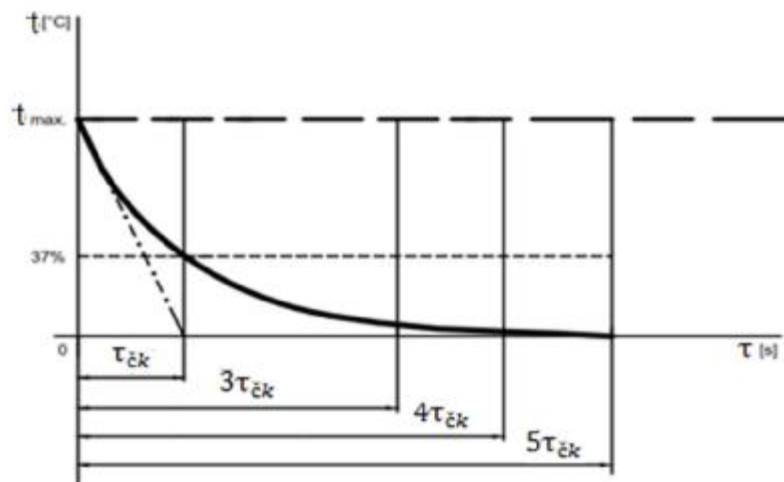
Řešení rovnice (1.2.31) pro oteplovací křivku za předpokladu $\tau_{\check{c}k} = \tau_i$. Po dosazení dostanu:

$$\Delta t_i(\tau) = \Delta t_{\max} (1 - e^{-1}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.2.32)$$

$$\Delta t_i(\tau) = 0,632 \Delta t_{\max} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.2.33)$$

Konečný vztah se používá v technické praxi.

1.2.3.2 Ochlazovací křivka



Obr. 1.2.2 Ochlazovací křivka

Pro ochlazovací křivku platí následující vztah

$$\Delta t_i(\tau) = \Delta t_{\max} e^{-\frac{\tau_i}{\tau_{\check{c}k}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.2.34)$$

Postupnou úpravou (1.2.34) dostanu rovnici pro časovou konstantu ochlazovací křivky

$$\frac{\Delta t_i(\tau)}{\Delta t_{\max}} = e^{-\frac{\tau_i}{\tau_{\check{c}k}}} \quad (1.2.35)$$

$$e^{-\frac{\tau_i}{\tau_{\check{c}k}}} = \frac{\Delta t_i(\tau)}{\Delta t_{\max}} \quad (1.2.36)$$

$$\frac{\tau_i}{\tau_{\check{c}k}} = -\ln \frac{\Delta t_i(\tau)}{\Delta t_{\max}} \quad (1.2.37)$$

Z tohoto vztahu získám výslednou rovnici pro časovou konstantu ochlazovací křivky

$$\tau_{\check{c}k} = \frac{\tau_i}{-\ln \frac{\Delta t_i(\tau)}{\Delta t_{\max}}} \quad [\text{s}] \quad (1.2.38)$$

Řešení rovnice (1.2.34) po ochlazovací křivku za předpokladu $\tau_{\check{c}k} = \tau_i$. Po dosazení dostanu:

$$\Delta t_i(\tau) = \Delta t_{\max} e^{-1} \quad [\text{s}] \quad (1.2.39)$$

$$\Delta t_i(\tau) = \mathbf{0,368} \Delta t_{\max} \quad [\text{s}] \quad (1.2.40)$$

Konečný vztah se rovněž hojně používá v technické praxi

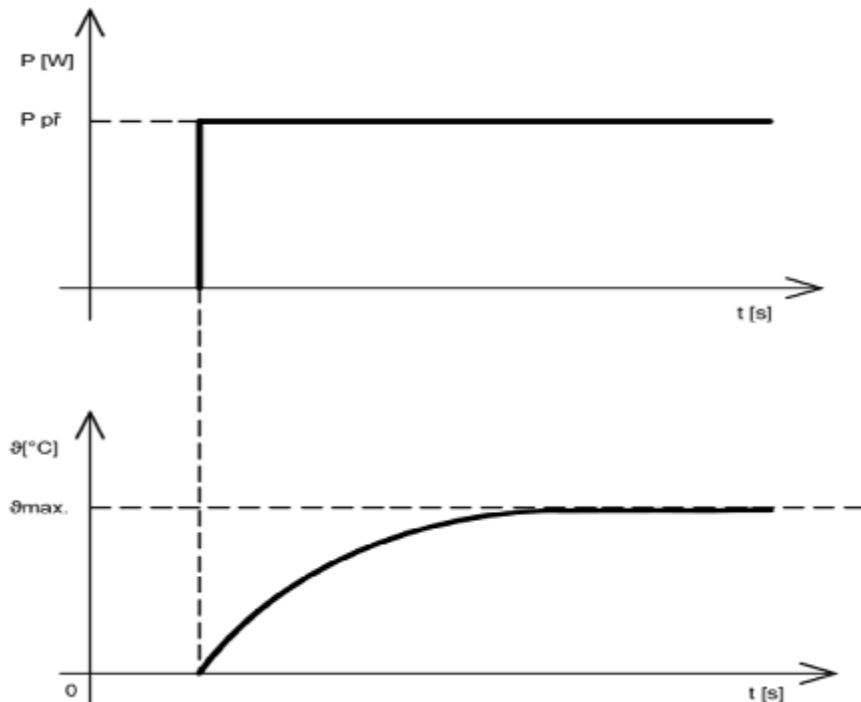
Použité prameny: [1], [3], [4], [5], [6], [7], [9], [10], [15], [16], [21], [25], [26], [40], [43],

1.2 Zatížení topného článku při jeho pracovních režimech

1.3.1 Druhy zatížení topného článku

Podle velikosti dodávané energie rozlišujeme různé druhy zatížení topného článku, a to:

1.3.1.1 Trvalé zatížení (Jednotkový skok)



Obr. 1.3.1 Výkon do topného systému v podobě jednotkového skoku. Předpokládaný průběh povrchové teploty topného článku

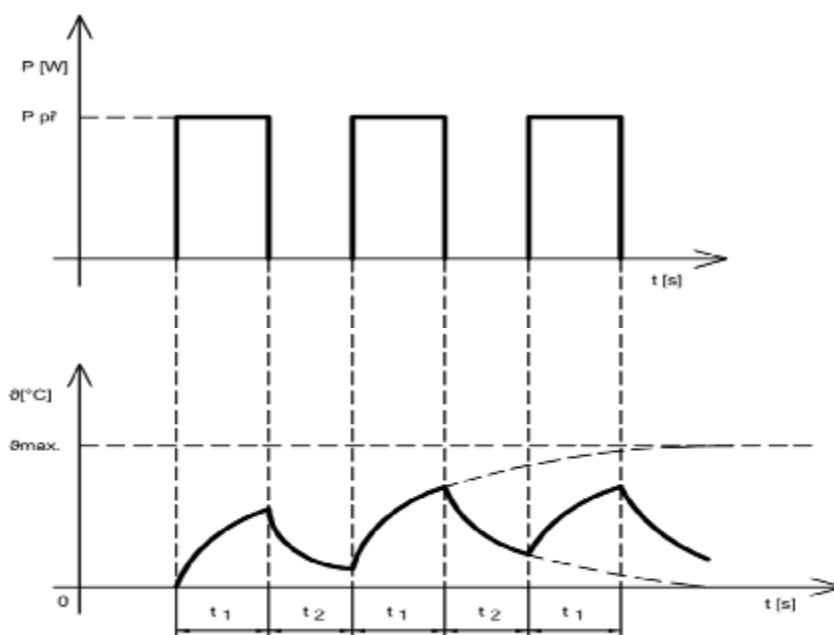
Jak již bylo konstatováno v předešlé kapitole 1.2, za ustálenou hodnotu t_{\max} považují čas $5\tau_{\check{k}} = 99,3\% \cdot t_{\max}$.

Podmínka, kterou je nutno dodržet pro t_{\max} topného článku

$$t_{\max} \leq t_{\text{dov}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.3.1)$$

Tato podmínka zaručuje, že nedojde k jeho destrukci.

1.3.1.2 Přerušované zatížení (Spínání v nule)



Obr.1.3.2 Výkon do topného systému při přerušovaném zatížení. Předpokládaný průběh povrchové teploty topného článku

Spínací a vypínací časy jsou natolik krátké, že v čase spínání se článek neoteplí na hodnotu ustáleného oteplení článku a v čase vypnutí se nestihne ochladit. První teplotní křivka respektuje ohřev z teploty okolí, v dalších cyklech už se topný článek ohřívá a ochlazuje stejně.

Použité prameny: [2], [8], [9], [10], [12], [15], [16], [18], [20], [23], [24], [25], [26], [28], [29], [30], [31], [34], [40], [41], [42],

1.3 Modelování pomocí matematických a fyzikálních modelů

1.4.1 Použití zákonů sdílení tepla při modelování pecí

Vzhledem ke složitosti tepelných dějů v pecích není účelné ani zvládnutelné je detailně matematicky popsat. Z tohoto důvodu se vždy zavádí řada zjednodušujících předpokladů, které umožňují získat přijatelně přesné výsledky při zvládnutelné složitosti matematického popisu. Volba rozlišovací úrovně při matematickém popisu úzce souvisí s účelem, jemuž má sloužit. Pokud je cílem řešit sdílení tepla v některém prvku či uzlu pece, pak je nutné volit podstatně podrobnější úroveň, než v případě, kdy nás zajímá tepelný pohyb pece jako celku.

K praktickému řešení úloh sdílení tepla je vypracována celá řada metod s různými stupni podrobnosti, či zjednodušení.

V technické praxi bývá přenos tepla sáláním a prouděním označován jako vnější sdílení. Vedení tepla v tělesech jako vnitřní sdílení.

1.4.2 Metody řešení vnějšího sdílení tepla

1.4.2.1 Sdílení tepla sáláním (radiace)

Sálání je převažující formou vnějšího sdílení tepla v pecích. Přesné teoretické řešení je obtížně zvládnutelné i v jednoduchých případech. Nejpřesnější metodou pro složitější případy je v současné době Hottelova zonální metoda. Při této metodě se pecní prostor rozdělí do vhodného počtu povrchových a prostorových izotermických zón tak, aby byla dostatečně respektována nehomogenita teplotních polí v peci. Pro každou dvojici takto vymezených zón se pak řeší výměna tepla sáláním včetně mnohonásobného odrazu od stěn. Výsledkem řešení je celková výměna tepla sáláním v peci. Tato metoda je značně matematicky náročná a při větším počtu zón se může stát nezvládnutelnou. Významnou roli při tom hraje i problém určení velkého množství vstupních dat. Z toho důvodu řada autorů usiluje o vhodné zjednodušení této metody, které by dávalo přijatelně přesné výsledky.

1.4.2.2 Sdílení tepla prouděním (konvekce)

Ve většině prací se problém proudění spalin uvnitř pecního prostoru buď úplně vynechává, nebo se velmi silně idealizuje.

Konvekční složka vnějšího sdílení tepla z plynného prostředí do povrchů v peci se projevuje hlavně při nízkých teplotách.

Pro určení konvekčního přestupu tepla se používá Newtonův vztah (1.1.45), obvykle ve tvaru

$$q_k = \alpha_k S (t_{pa} - t) \quad (1.4.1)$$

q_k - tepelný tok konvekcí ze spalin do povrchu [W]

α_k	- součinitel přestupu tepla konvekcí	$[W/m^2K]$
S	- plocha povrchu	$[m^2]$
t_{sp}	- teplota pecní atmosféry	$[^\circ C]$
t	- teplota povrchu	$[^\circ C]$

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_k je značně závislý na způsobu obtékání povrchů těles a pro jednoduché případy jej lze vypočítat z kritériálních rovnic. Pro složitě tvary povrchů se v praxi obvykle odhaduje na základě porovnání s hodnotami idealizovaných tvarů.

S rostoucí teplotou v peci klesá podíl konvekce na celkovém přestupu tepla do povrchů těles. Někteří autoři proto v oblasti vysokých teplot nahrazují konvekční složku vnějšího sdílení desetiprocentním zvýšením sálavých tepelných toků.

Celkový součinitel přestupu tepla

V některých případech, kdy jde o maximální zjednodušení matematické formulace vnějšího sdílení tepla, bývá lineární Newtonův vztah (1.1.45) používán i pro vyjádření sálavé složky sdílení tepla. Vnější sdílení tepla je pak popsáno jednoduchým vztahem

$$q = \alpha_c S (t_{pc} - t) \quad (1.4.2)$$

q	- celkový tepelný tok do tělesa	$[W]$
S	- povrch tělesa	$[m^2]$
t_{pc}	- teplota pece	$[^\circ C]$
t	- teplota povrchu tělesa	$[^\circ C]$
α_c	- celkový součinitel přestupu tepla prouděním	$[W/m^2K]$

Pro celkový součinitel přestupu tepla platí

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_s \quad (1.4.3)$$

α_k	- součinitel přestupu tepla konvekcí	$[W/m^2K]$
α_s	- součinitel přestupu tepla sáláním	$[W/m^2K]$

1.4.3 Metody řešení vnitřního sdílení tepla

1.4.3.1 Tenká a tlustá tělesa

Při řešení úlohy vedení v tělesech se v technické praxi obvykle rozlišují dva zásadně rozdílné případy, charakterizované pojmy tenká a tlustá tělesa. U tenkých těles se gradient teplot v

tělese považuje za zanedbatelně malý. Naproti tomu u těles označovaných jako tlustá se teplotní spády uvnitř těles respektují.

Kritériem pro určení, zda má být těleso považováno za tenké, nebo tlusté je jednak požadovaná přesnost řešení úlohy, jednak poměr mezi odporem vnějšího a vnitřního sdílení, který je označován jako Biotovo číslo B_i .

Potom

$$B_i = \frac{R_i}{R_e} = \alpha_c \frac{\ell}{\lambda} \quad (1.4.4)$$

$R_e = 1/\alpha_c$	odpor vnějšího sdílení	$[m^2K/W]$
α_c	celkový součinitel přestupu tepla	$[W/m^2K]$
$R_e = \ell/\lambda$	odpor vnitřního sdílení	$[m^2K/W]$
ℓ	charakteristická tloušťka tělesa	$[m]$
λ	tepelná vodivost tělesa	$[W/mK]$

Celkový teplotní spád se dělí na vnitřní a vnější v poměru rovném přibližně Biotovu číslu. Pokud je $B_i < 0,25$, považuje se těleso za tenké. Pokud je $B_i > 0,5$, pak se těleso považuje za tlusté. V případě, že $0,25 < B_i < 0,5$, považuje se těleso při přesnějších výpočtech za tlusté, jinak za tenké. Ocelovou vsázku pecí lze v některých případech považovat za tenké těleso, zatímco vyzdívkou pecí je nutno vždy považovat za tlustá tělesa.

1.4.3.2 Tenká tělesa

V případech tenkých těles se zavádí zjednodušující předpoklad nekonečně velké tepelné vodivosti, takže teplota v celém tělese se uvažuje stejná. Problém vedení tepla odpadá a řešení se omezuje na respektování zákona zachování energie v tělese, který lze vyjádřit jako

$$\mathbf{q} = \frac{dQ}{d\tau} = \mathbf{M} \frac{di}{d\tau} = \mathbf{M}c_p \frac{dt}{d\tau} \quad (1.4.5)$$

q	- tepelný tok do tělesa	$[W]$
Q	- tepelný obsah tělesa	$[J]$
τ	- čas	$[s]$
i	- entalpie tělesa	$[J/kg]$
t	- teplota tělesa	$[^\circ C]$
c_p	- měrné teplo tělesa při teplotě t	$[J/kgK]$
M	- hmotnost tělesa	$[kg]$

1.4.3.3 Tlustá tělesa

Pro řešení vedení tepla v tlustých tělesech existuje celá řada metod. V podstatě lze rozdělit na metody analytické a metody pro numerické řešení.

Analytické metody řeší Fourierovu rovnici (1.1.3) pomocí matematické analýzy. Jsou však použitelné jen pro nejjednodušší tvary těles, např. desky, válce, koule, pro nejjednodušší případy okrajových podmínek a za předpokladu konstantnosti materiálových vlastností. Aplikace této metody na děje v pecích vyžaduje značné zjednodušení skutečnosti. Obvykle se omezuje na případ jednorozměrného vedení tepla.

Mnohem rozšířenější jsou metody pro numerické řešení na počítačích. Buď se numericky řeší Fourierova parciální diferenciální rovnice (1.1.3) v jedno-, dvou- nebo třírozměrné podobě, anebo se tato rovnice vhodným způsobem nahradí soustavou obyčejných diferenciálních rovnic.

Pro numerické řešení Fourierovy rovnice se používají různé varianty diferenčních a síťových metod. Tyto metody poskytují detailní informace o rozložení teplotních polí v tělesech, jsou však náročné na formulaci okrajových podmínek, objem vstupních dat a na výpočtový čas. Používají se proto hlavně při modelování teplotních polí v konstrukčních uzlech.

Pro účely simulačních výpočtů se Fourierova rovnice obvykle diskretizuje tak, že se ponechává spojitá proměnná času a polohové proměnné se soustředují do konečného počtu diskretních bodů. Tato metoda bývá označována jako CTDS (continuous time – discrete space) a vede na stavovou formulaci modelu. Nahrazení se provádí buď diskrétní aproximací derivací podle polohových proměnných pomocí Lagrangeova interpolačního polynomu, nebo nahrazením kontinua řadou vhodně zvolených částí se soustřednými parametry (kompartmenty).

Při modelování sdílení tepla ve vyzdívkách pecí je možno použít oba způsoby diskretizace, neboť vyzdívky mají obvykle jednoduché geometrické tvary a lze snadno přijmout předpoklad jednorozměrného vedení tepla. Při modelování sdílení tepla ve vsázce bývá vhodnější kompartmentový přístup, protože tvary vsázky jsou často velmi složité.

Metoda kompartmentů má při praktických aplikacích velkou přednost v tom, že matematické prvky modelu mají současně i fyzikální význam, což dává modelu názornost a současně i možnost snazší kontrolovatelnosti simulace v jejím průběhu.

2. Muflové pece

2.1 *Současný stav v oblasti muflových pecí*

2.1.1 *Všeobecný popis muflových pecí*

Měřeným objektem je muflová pec určená pro tepelné zpracování materiálů při výzkumu a vývoji, v laboratořích, v průmyslových poloprovozech i ve výrobě v nejrůznějších oborech při teplotách do 1200°C. Následující příklady ukazují možnosti využití tohoto druhu pecí v různých odvětvích:

- zdravotnictví - stomatologické laboratoře
- zemědělské a potravinářské laboratoře - spalovací procesy
- technická keramika - kalcinace surovin a přežahy vzorků
- umělecká keramika - přežahy a ostré výpaly miniatur
- kovolitectví a šperkařství - tavení kovů
- strojírenství - tepelné zušlechťování menších součástí (žhánání, vypalování, tvrzení, popouštění atd.)
- metalurgie - testování materiálových vzorků, tavení některých kovů ve speciálních odlévacích kelímcích
- chemické laboratoře - vysoušení chemikálií a tepelné procesy

Pece nejsou určeny pro procesy, při kterých se používají hořlavé nebo výbušné látky, případně látky, z nichž se výbušné látky mohou uvolňovat. Výjimku tvoří pouze laboratorní postupy, kdy se spalují vzorky organických látek za účelem stanovení obsahu popela. Mohou-li v průběhu tepelného procesu vznikat plynné zplodiny, je potřebné umístit pec na pracoviště, kde je zajištěn jejich intenzivní odtah.

Pracovní prostor pece je tvořen muflí ze žáruvzdorného materiálu, obvykle z SiC, která zabraňuje přímému styku atmosféry pece s topným systémem pece. Osvědčená koncepce muflové pece se čtyřmi vytápěnými stěnami a rozvodem tepelné energie muflí zaručuje homogenní rozložení tepelného pole v celém pracovním prostoru. Muflová pec je konstruována jako zařízení přenosné.

2.1.2 *Tepelná izolace*

Tepelná izolace komory pece je provedena dle účelu, pro jaký tepelný proces je energetický agregát zkonstruován:

- 1) Ohřívací procesy - při tomto druhu ohřevu musíme přivést do pece velké množství tepla a udržet v ní poměrně vysokou pracovní teplotu i při vložení nové studené vsázky. Proto ohřívací pece mají mohutnou, silnou, dobře izolovanou vyzdívku, schopnou akumulovat

velké množství tepla, čímž mají velkou tepelnou setrvačnost. To znamená, že pec je málo teplotně citlivá ke změnám, které nastávají při jejím provozu, jako vložení studené a vyjmutí teplé vsázky. Vytopení takové pece na pracovní teplotu nebo zchlazování pece při odstávce trvá dlouhou dobu, během níž masivní zdivo pece přijme nebo vydává své akumulované teplo.

- 2) Procesy pro tepelné zpracování - musí mít co nejmenší tepelnou setrvačnost, aby byla schopna uskutečnit programovou křivku, tj. požadované rychlosti ohřevu a ochlazování. Proto musí mít lehkou, obvykle vláknitou vyzdívku s co nejmenší akumulací tepla. Topný systém pece na tepelné zpracování musí mít široký rozsah regulovatelnosti pro dosažení požadovaného průběhu teplot. Pracovní teploty pecí pro tepelné zpracování jsou nižší než u pecí ohřívacích, což vede k lehčím konstrukčním provedením pecí.

2.1.3 Topný systém

Topný systém je tvořen topnou spirálou vyrobenou z feritických nebo austenitických odporových materiálů. Takto vyrobený topný článek je navinut na muflí pece. Příklady uspořádání topného systému jsem názorně uvedl v kap. 2.4 na obr. 2.4.1 a obr. 2.4.2.

2.1.4 Regulace

Pro regulaci je použit termoelektrický snímač teploty s rychlou odezvou, jehož signál je zpracováván v regulátoru pracujícím s přenosem PID. Regulátor lze využít pro řízení teploty v pecním prostoru dvěma způsoby:

- 1) Regulace na konstantní hodnotu s definovaným nárůstem regulované veličiny. Nastavujeme požadovanou teplotu v muflí pece. Příkon topení je regulován elektronickým spínáním.
- 2) Programová regulace - program může obsáhnout n kroků. V každém kroku lze nastavit libovolnou pracovní teplotu a čas výdrže na požadované teplotě. Tímto způsobem lze nastavovat ohřívací i ochlazovací křivky.

2.1.5 Záznam

Archivace provozních hodnot:

- 1) Analogovými a digitálními záznamovými přístroji
- 2) Archivace dat pomocí nadřazeného systému – regulátor je vybavený datovou sběrnicí, pomocí které se veškerá data přenášejí do nadřazeného systému. Výstup ze systému je graficky nebo tabulkově z naměřených hodnot.

2.2 Experimenty na modelech I a II

2.2.1 Popis měřených modelů

2.2.1.1 MODEL I

Výrobce:

Elektrim – Polsko, rok výroby zařízení: 1963

Parametry zařízení jsou čerpány z technické dokumentace výrobce zařízení.



Obr. 2.2.1 MODEL I - šamotová muflová pec

Technický popis

Muflová pec je konstruovaná pro ohřívací procesy.

Ocelová konstrukce pece je zhotovena z 2,5mm plechu. Uvnitř tělesa pece se nachází šamotová mufle s navinutým topným článkem. V peci je mufle překryta keramickou hmotou. Topný článek je vyroben z odporového drátu KANTHAL A1.

Tepelná izolace je tvořena z tvárníc z lehčeného šamotu. Těleso pece je natřeno ochrannou barvou.

Technické parametry

Typ pece	PPEM-2/156
Jmenovitý výkon	3,6 kW
Jmenovité napětí	1x220 V
Jmenovitá teplota	1100°C
Odpor topného článku při 20°C	13,2 Ω
Materiál topného článku	Kanthal A1
Průměr drátu	2,0 mm
Měrné povrchové zatížení	2,0 W/cm ²

Rozměry pracovního prostoru:

- šířka	180 mm
- výška	120 mm
- délka	400 mm

Vnější rozměry pece:

- šířka	520 mm
- výška	722 mm
- délka	830 mm

Hmotnost	150 kg
----------	--------

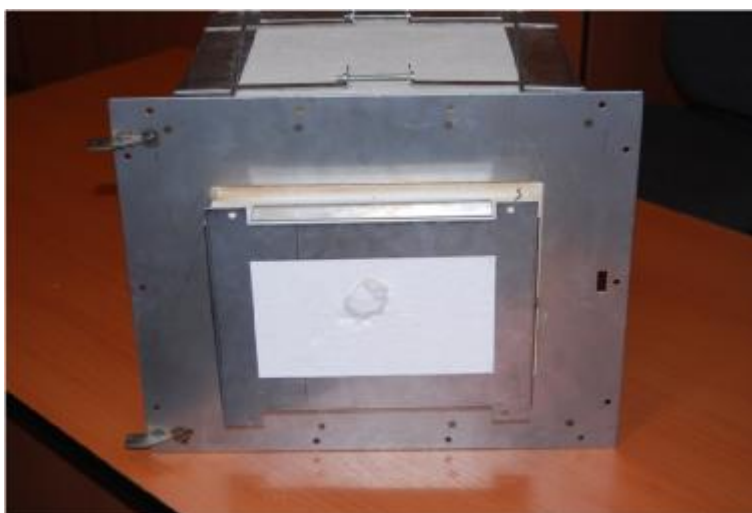
2.2.1.2 MODEL II

Technický popis

Muflová pec je navržena a zkonstruována pro účely experimentálního měření ohřívacích procesů s využitím současných moderních poznatků v tomto oboru viz obr. 2.2.2.

Uvnitř tělesa pece se nachází mufle z SiC materiálu s navinutým topným článkem z odporového drátu KANTHAL A1.

Tepelná izolace pece je z vláknitých materiálů s vysokou tepelně izolační schopností a malou akumulací energie.



Obr. 2.2.2 MODEL II – pec z vláknitých materiálů (funkční vzorek)

Technické parametry

Jmenovitý výkon	2,2 kW
Jmenovité napětí	1x230 V

Jmenovitá teplota	1100°C
Odpor topného článku při 20°C	24,6 Ω
Materiál topného článku	Kanthal A1
Průměr drátu	1,4 mm
Měrné povrchové zatížení	1,925 W/cm ²

Rozměry pracovního prostoru:

- šířka	170 mm
- výška	95 mm
- délka	320 mm

Vnější rozměry pece:

- šířka	400 mm
- výška	600 mm
- délka	530 mm

Hmotnost	27 kg
----------	-------

2.2.2 Technická realizace experimentů na modelech I a II

2.2.2.1 Způsob řízení pece při experimentu

Pece byly připojeny na zdroj proměnného napětí tvořený odbočkovým transformátorem s přepínatelnými odbočkami, 220 V, 180 V a 155 V. Příkon do topného systému byl realizován jednotkovým skokem s konstantní hodnotou napájecího napětí po celou dobu experimentu, viz obr. 1.3.1 kap.1.

Odpor topného článku je teplotně závislý, mírně roste s teplotou materiálu, což znamená, že se zvyšující se teplotou jeho výkon klesá.

Maximální dovolenou teplotu v pecích stanovili výrobci na 1100°C. Aby nebyla tato hodnota při experimentech překročena, použil jsem elektronický regulátor s dvupolohovou regulací (ON/OFF), který udržoval teplotu v peci na této hodnotě. Ustálený stav, při mnou použité hodnotě konstantního výkonu, by dosáhl vyšší hodnoty než je max. povolená teplota udaná výrobcem. Pomocí tohoto regulátoru nemohla být max. hodnota překročena.

Po skončení experimentu byla pec vypnuta a začalo samovolné chladnutí z teploty 1100°C.

Při experimentech byly zaznamenávány následující hodnoty:

- teplota v peci
- teplota vnějšího povrchu pece
- elektrické napětí na svorkách topného článku
- elektrický proud protékající topným článkem

2.2.2.2 Princip měření modelu I a modelu II

Pro měření potřebných charakteristik zařízení s nepřímým ohřevem, v mém případě dvou modelů muflových pecí s rozdílnou konstrukcí viz kap. 2, odst. 2.2.1, jsem vytvořil měřicí obvod, viz obr. 2.2.3, kterým dokážu potřebné hodnoty naměřit. V následujících odstavcích popíši jeho funkci při měření.

Pro hlídání limitní teploty v pecním prostoru jsem použil termoelektrický snímač teploty BT1 (typu K) s rychlou odezvou. Signál tohoto snímače je zpracováván v elektronickém digitálním dvupolohovém regulátoru A1 pracujícím s přenosem PID. Tento typ regulátoru umožňuje regulaci teploty na konstantní hodnotu. Nastavuji na něm limitní teplotu v prostoru muflle pece. V obou případech jsem použil jako limitní hodnotu 1100°C, a to z důvodu teplotního omezení pracovní teploty topného článku, kterou uvažuji cca o 50 °C vyšší než je max. teplota v pracovním prostoru. Maximální teplota v pecním prostoru se stanovuje na základě dvou důležitých kritérií:

- 1) teploty, při které může dojít k destrukci materiálu topného článku, tedy k jeho přerušení (zničení)
- 2) teploty, při které dochází k degradaci izolačních vlastností použitých vyzdívkových materiálů

Při dosažení nastavené limitní teploty v pecním prostoru pece dojde k přerušení energie do topných článků elektromechanickým spínačem KM1.

Do pecního prostoru jsem umístil termoelektrický snímač teploty BT2 (typu K) s rychlou odezvou. Tímto snímačem zaznamenávám průběh teploty v pecním prostoru v závislosti na čase v průběhu teplotního cyklu.

Třetí termoelektrický snímač teploty BT3 (typu K) s rychlou odezvou jsem umístil na plášť pece u modelu I a na povrch tepelných izolací u modelu II. Tímto snímačem zaznamenávám průběh teploty na jejich povrchu také v závislosti na čase v průběhu měření.

Termoelektrické napětí z druhého a třetího snímače teploty BT2 a BT3 je zavedeno na záznamové zařízení A10, na kanály 1 a 2. V tomto záznamovém zařízení ukládám veškerá data o teplotních cyklech na obou zkoumaných modelech.

Osazení dalších kanálů přístroje A10 je následující:

Kanál 3 - signál 4 -20mA prezentující napětí na topném článku.

Efektivní hodnota napětí na svorkách topného článku je přivedena na vstupní svorky převodníku PR2. Uvedený převodník převádí hodnotu 0 – 250 V na unifikovaný signál v rozsahu 4 - 20mA. Tento signál musí být také připojen přes odporový bočník na vstupní svorky záznamového přístroje (viz předchozí odstavce). Velikost odporu je 500 Ω. Velikost úbytku, který měříme na vstupu přístroje, je 2 – 10 V, ten je dále ocejchován jako 0 – 250 V a archivován v přístroji A10.

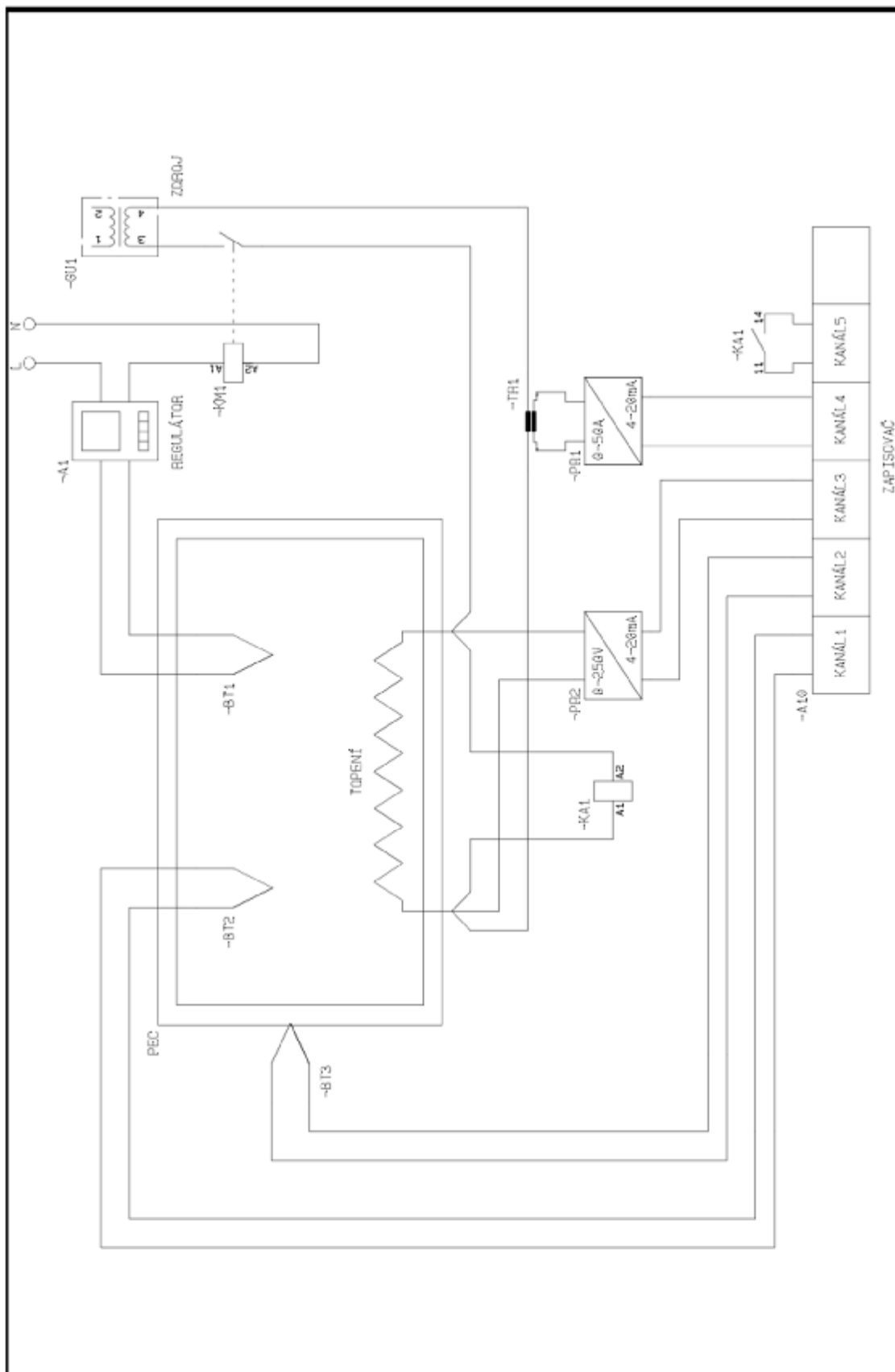
Kanál 4 - signál 4 - 20mA prezentující proud protékající topným článkem.

K měření jsem použil 50A průvlekový měřicí proudový transformátor s převodem na 5A. Výstupní signál z tohoto trafo je přiveden na vstupní svorky převodníku PR1, který převádí hodnotu 0 – 5A na unifikovaný signál v rozsahu 4 -20mA. Tento signál je dále připojen přes odporový bočník na vstupní svorky záznamového přístroje. Funkce odporového bočníku je taková, že digitální zapisovač nemá proudový vstup, ale jen napěťový. Pomocí tohoto odporu měřím úbytek napětí na tomto odporu, který je způsobený průchodem unifikovaného proudu 4 - 20mA. Velikost odporu je 500 Ω. Velikost úbytku, který měříme na vstupu přístroje je 2 -10 V, ten je dále ocejchován jako 0 – 50A a archivován v přístroji A10.

Veličiny na kanálech 3 až 4 jsou archivovány v závislosti na čase, abych mohl tyto hodnoty použít pro další vyhodnocení v průběhu teplotního cyklu. Důvodem zaznamenávání těchto veličin je důsledek teplotní závislosti odporu topného článku během pracovního cyklu pece, při kterém dochází ke změně proudu, který prochází topným článkem, a velikosti napětí na jeho svorkách podle teploty topného drátu.

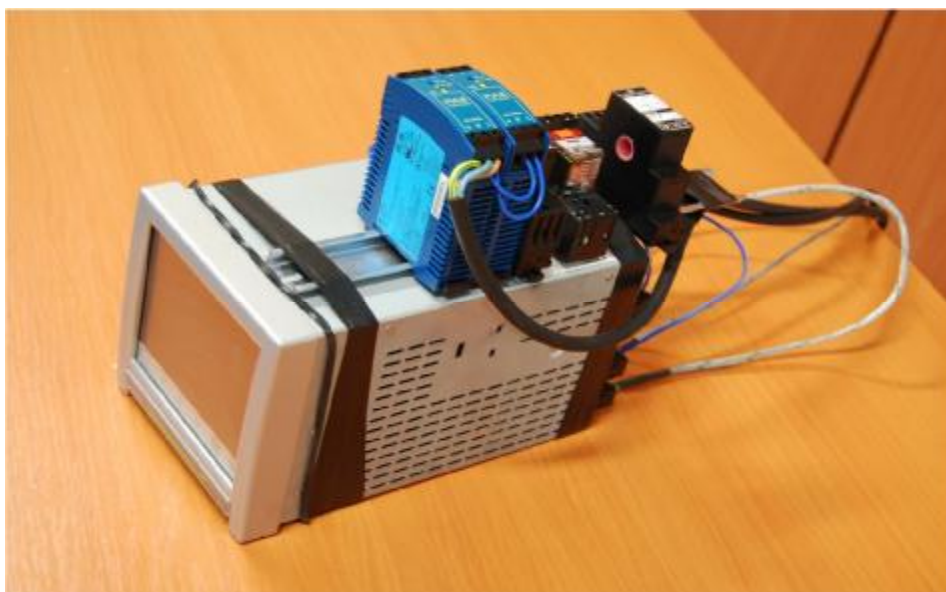
Kanál 5 - kontakt označující v záznamovém zařízení začátek a konec měřícího cyklu.

Kontakt je použit z relé KA1, jehož cívka je připojena na výstupní svorky napájecího transformátoru. Při uvedení modelu I a modelu II pod napětí dojde k sepnutí relé, a tím se ve výpisu provede časová značka signalizující začátek měření. Po odpojení modelů od sítě se značka z výpisu odstraní. Tím je označen konec natápění pece a nastává chlazení, které je také zaznamenáváno v registračním přístroji a vyhodnocováno.



Obr. 2.2.3 Blokové schéma experimentu

2.2.2.3 Fotodokumentace přístrojů použitých při experimentech na modelech I. a II.



Obr. 2.2.4 Doplnění záznamového přístroje EUROTHERM A 6100 o obvody pro měření proudu a napětí



Obr. 2.2.5 Příklad přístroje pro hlídání limitní teploty - regulátor EUROTHERM 3508

2.2.3 Cíle experimentů

Cílem měření je seznámit se se základními vlastnostmi výše popsaných pecí, a to pece používané k ohřevu (Model I - šamotová vyzdívka) a pece používané k tepelnému zpracování (Model II - sibalová vyzdívka). Experiment umožňuje vzájemně porovnat dvě základní konstrukce využívající odlišné způsoby provozu. Hlavními úkoly měření jsou:

- 1) Zjistit průběh teploty v prostoru pece jako odezvu na jednotkový skok výkonu přivedeného do topného článku.
- 2) Zjistit průběh teploty na povrchu pece během teplotního cyklu v peci.
- 3) Zjistit průběh napětí na topném článku při tomto způsobu řízení pece.
- 4) Zjistit průběh proudu procházející topným článkem při tomto způsobu řízení pece.
- 5) Zjistit průběh teploty v prostoru pece při vypnutí pece a chladnutí z natopeného stavu pece do teploty okolí.
- 6) Zjistit průběh teploty na povrchu pece při vypnutí pece a chladnutí z natopeného stavu pece do teploty okolí.
- 7) Naměřit charakteristiky pro různé hodnoty napájecího napětí viz body 1 až 6 a zjistit jim odpovídající průběhy.

Na základě naměřených charakteristik provést následnou analýzu obou modelů pecí a způsobů řízení. Výsledky z měření a vyhodnocení dále využít:

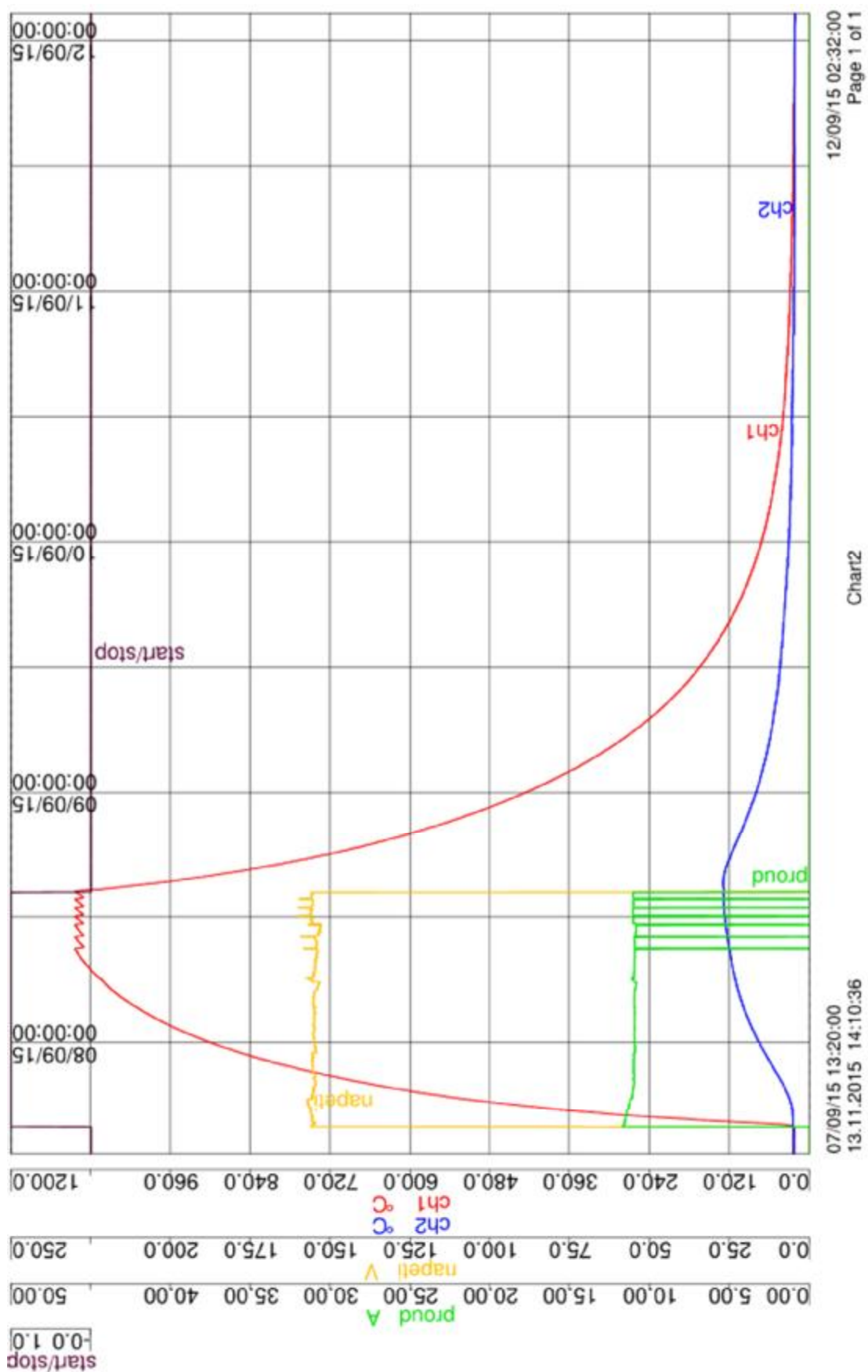
- 1) Pro stanovení časových konstant
- 2) Pro zpřesnění výsledků při simulacích na matematickém modelu.

2.2.4 Výsledky experimentů

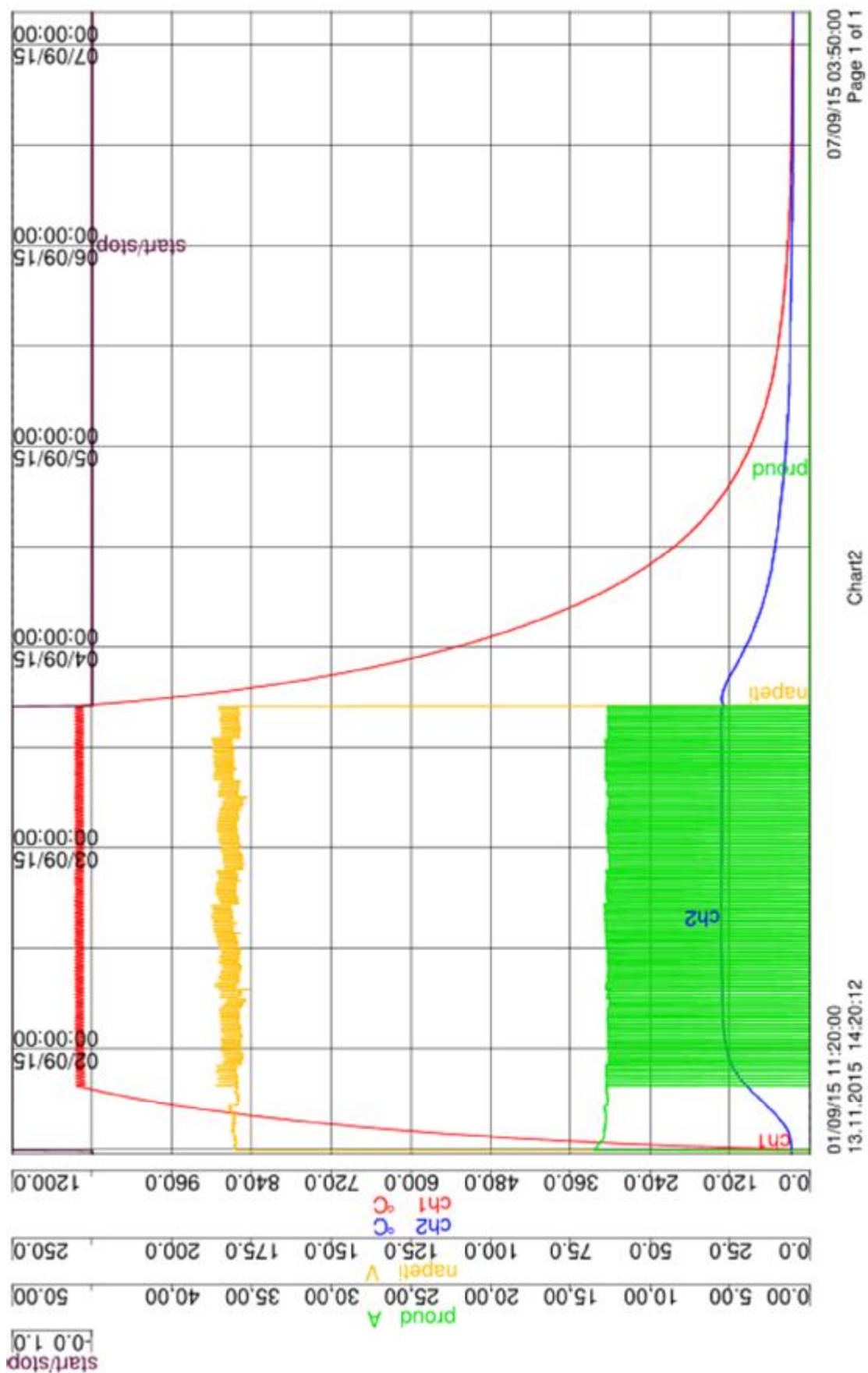
2.2.4.1 Výsledky z experimentů za účelem stanovení časových konstant modelu I a II.

Popis měřicích kanálů pro vyhodnocení záznamů z registračního přístroje

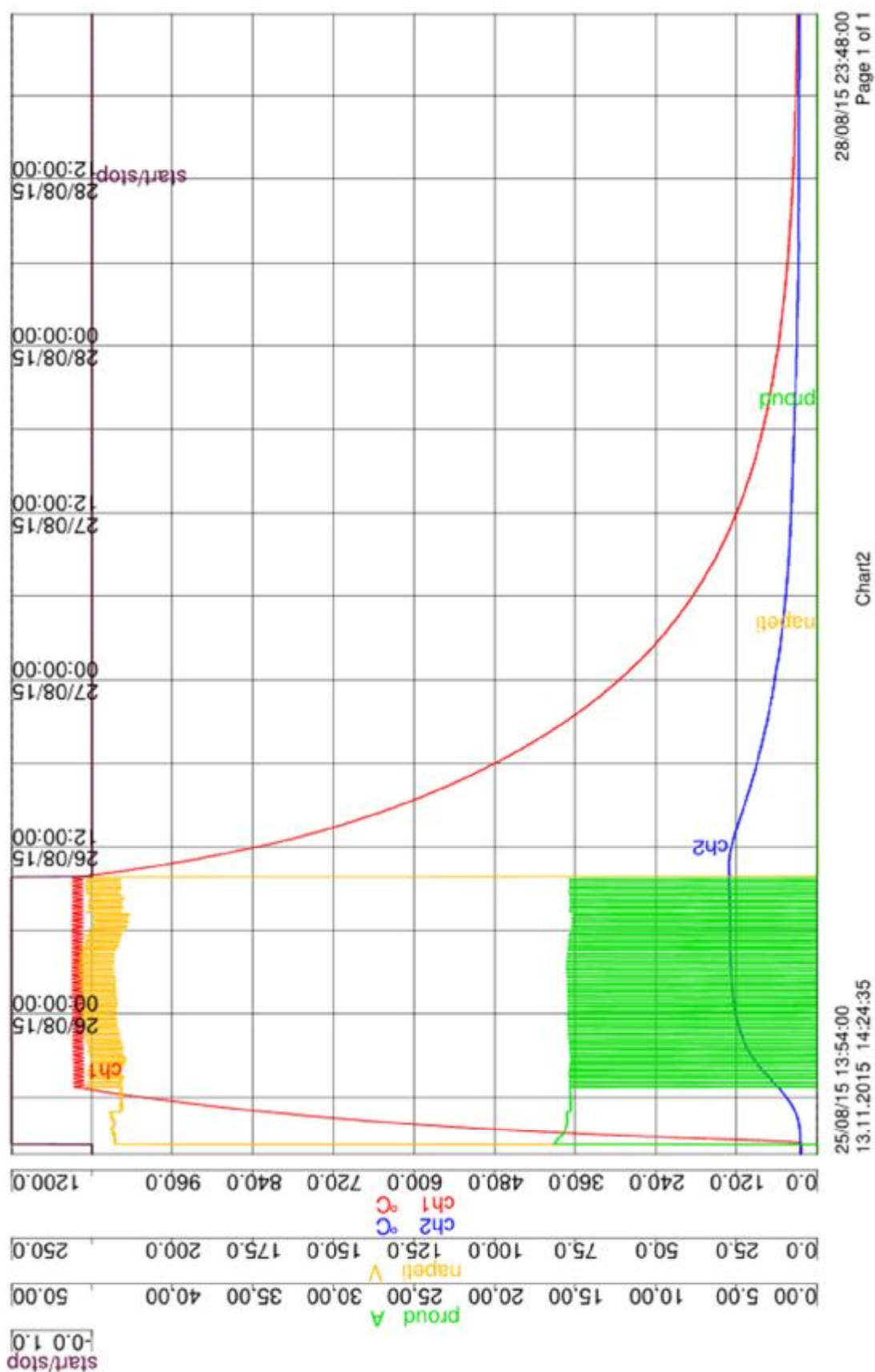
- | | | |
|---------------------------|-----------------------|---|
| - Kanál 1 - červená | - rozsah - 0 - 1200°C | - průběh teploty v pracovním prostoru během teplotního cyklu |
| - Kanál 2 - světle modrá | - rozsah - 0 - 1200°C | - průběh teploty na povrchu izolace pecní retorty během teplotního cyklu |
| - Kanál 3 - žlutá | - rozsah - 0 - 250 V | - průběh napětí na topném článku v nahřívací části teplotního cyklu |
| - Kanál 4 - světle zelená | - rozsah - 0 - 50 A | - průběh proudu protékající topným článkem v nahřívací části teplotního cyklu |
| - Kanál 5 - tmavě zelená | - rozsah - 0 - 1 | - signál vymezující oblast připojení topného článku k elektrické energii během teplotního cyklu |



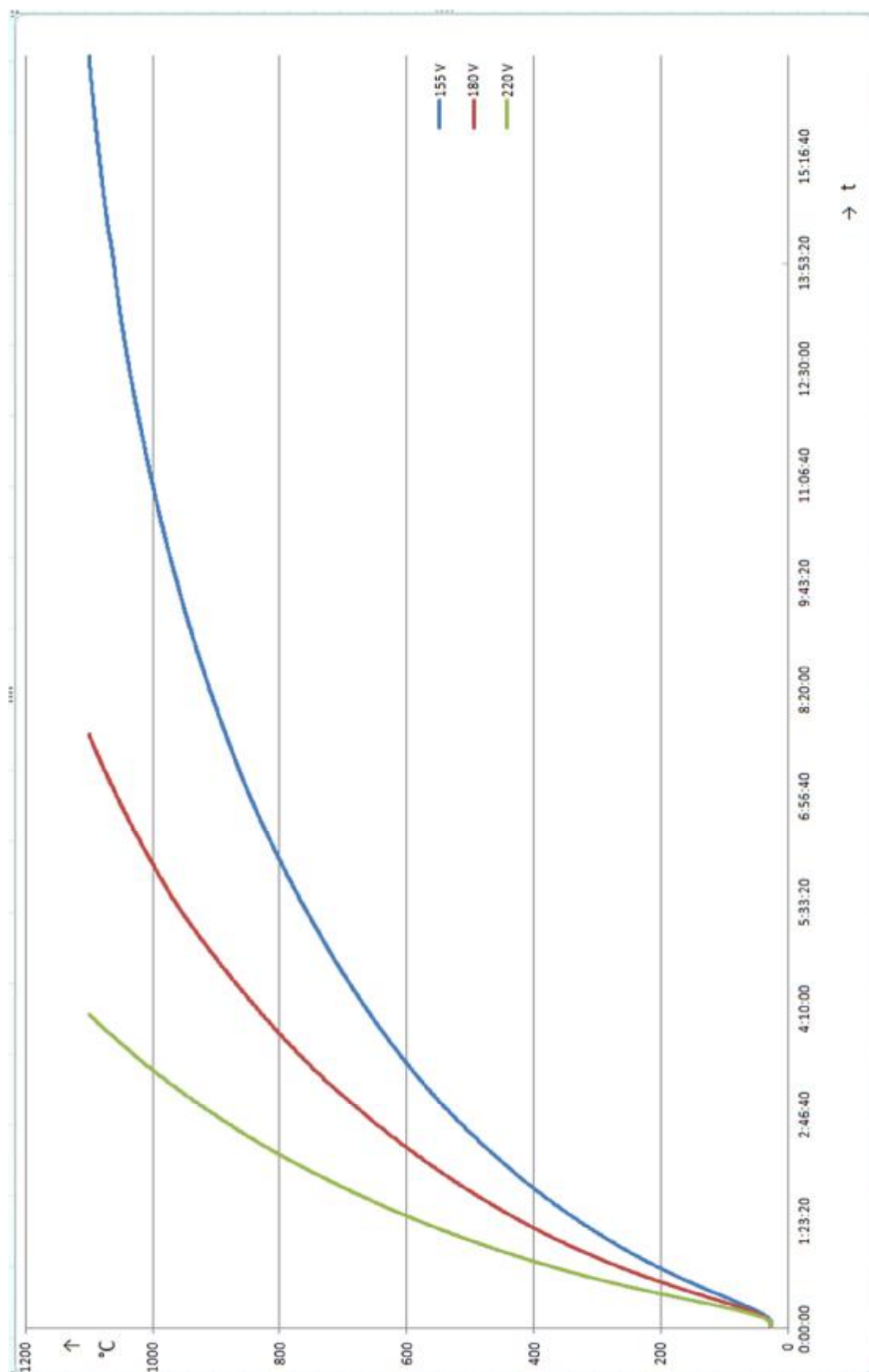
Obr. 2.2.5 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL I - odbočka 155 V



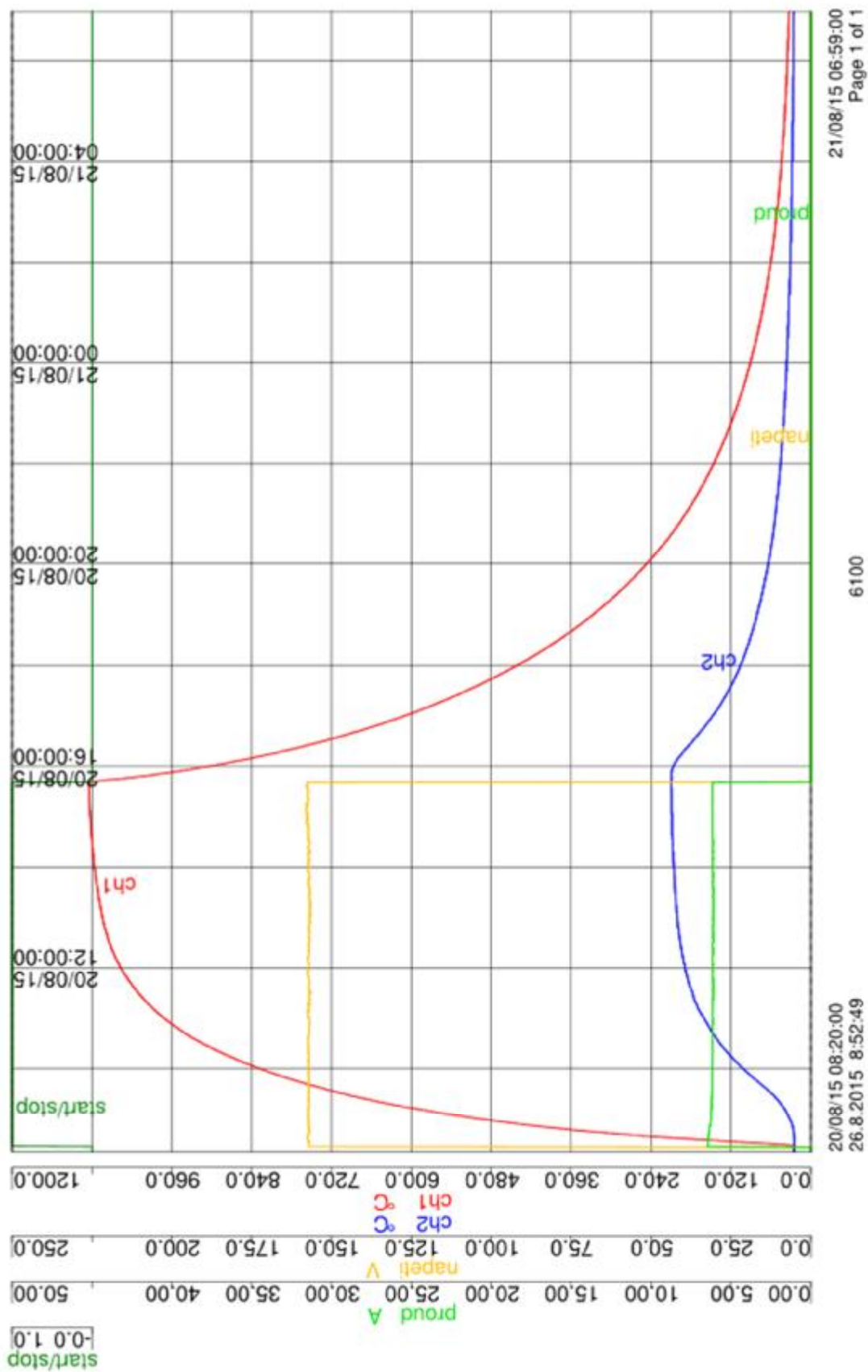
Obr. 2.2.6 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL I - odbočka 180 V



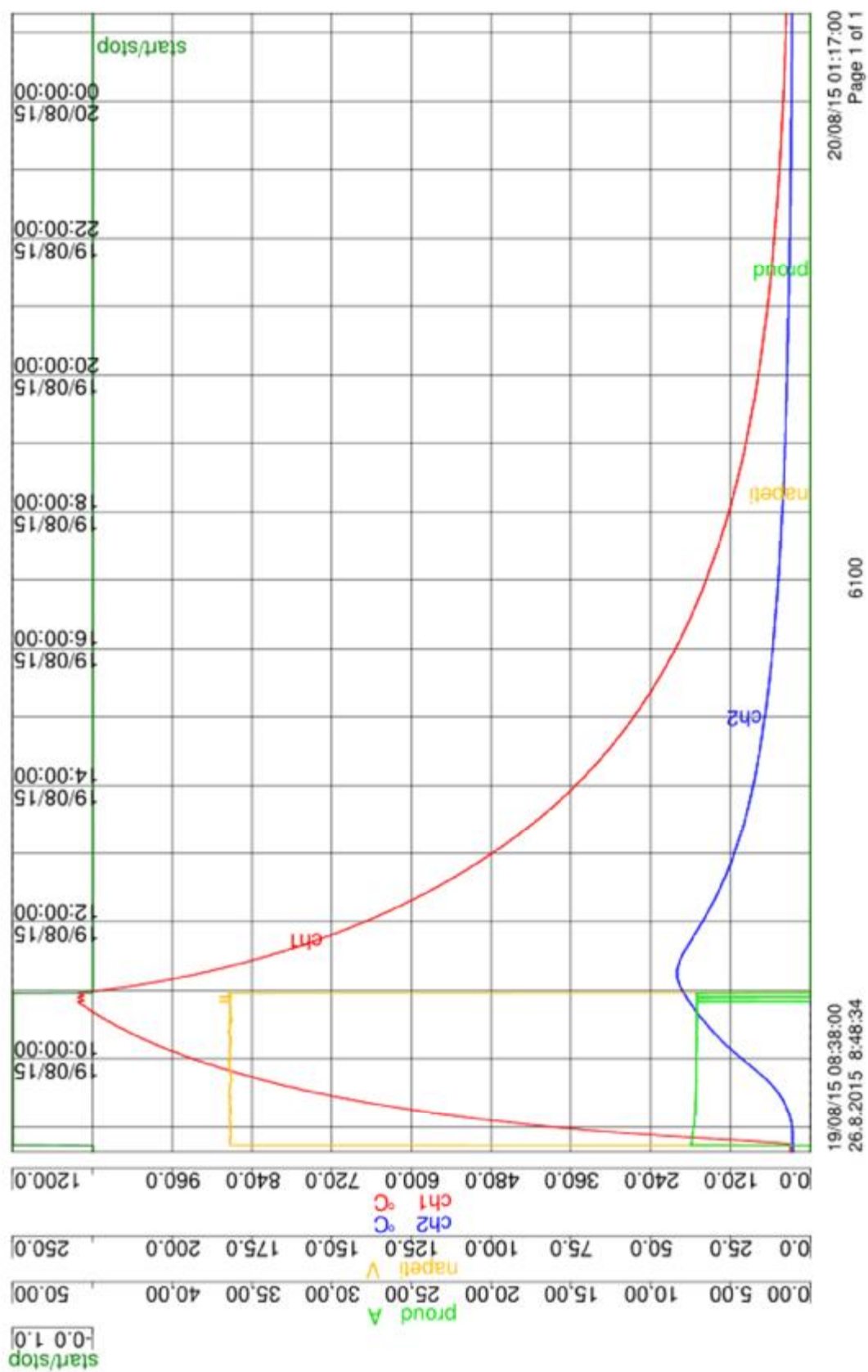
Obr. 2.2.7 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL I - odbočka 220 V



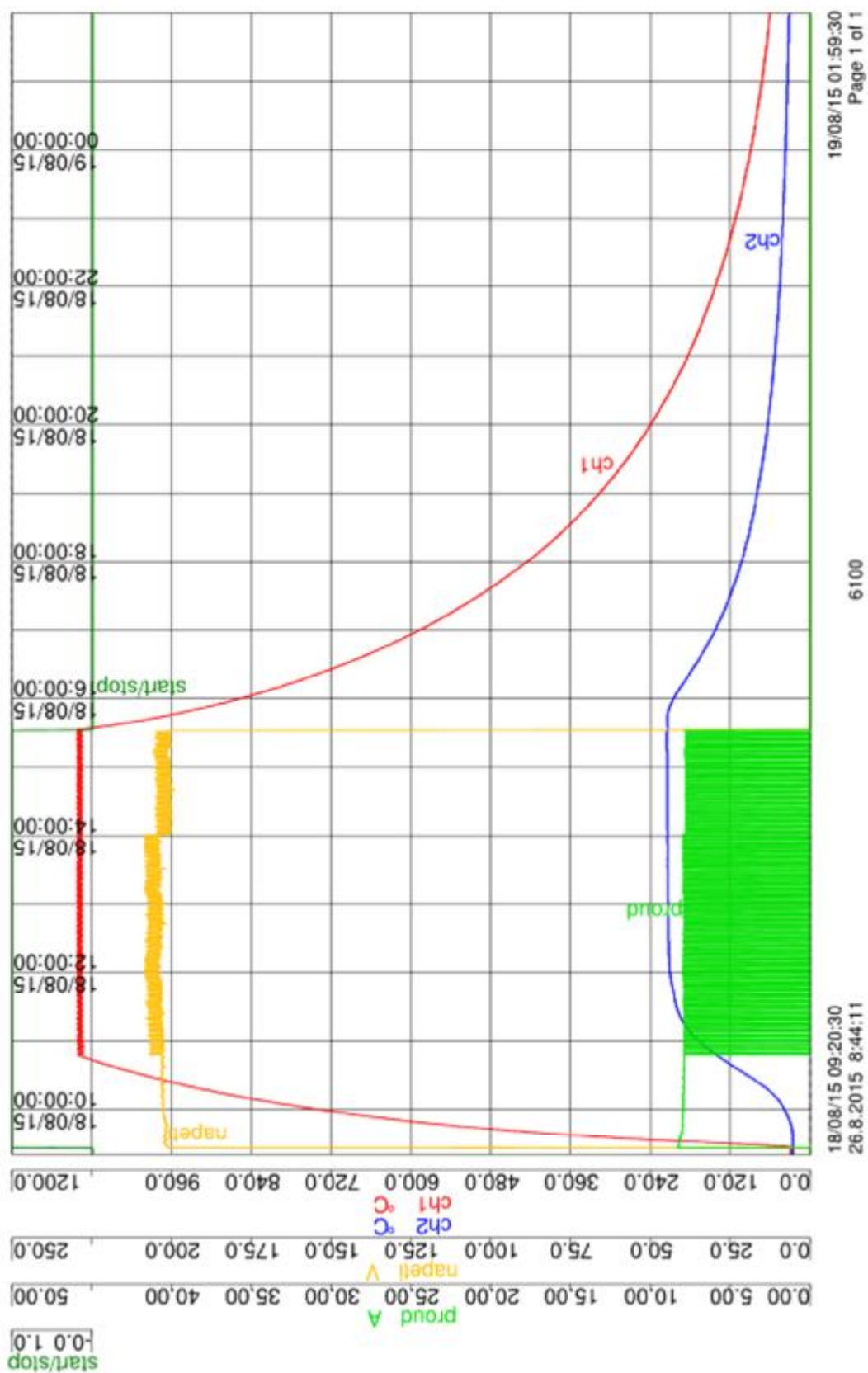
Obr. 2.2.8 Porovnání naměřených teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU I pro napětí odboček 220 V, 180 V a 155 V



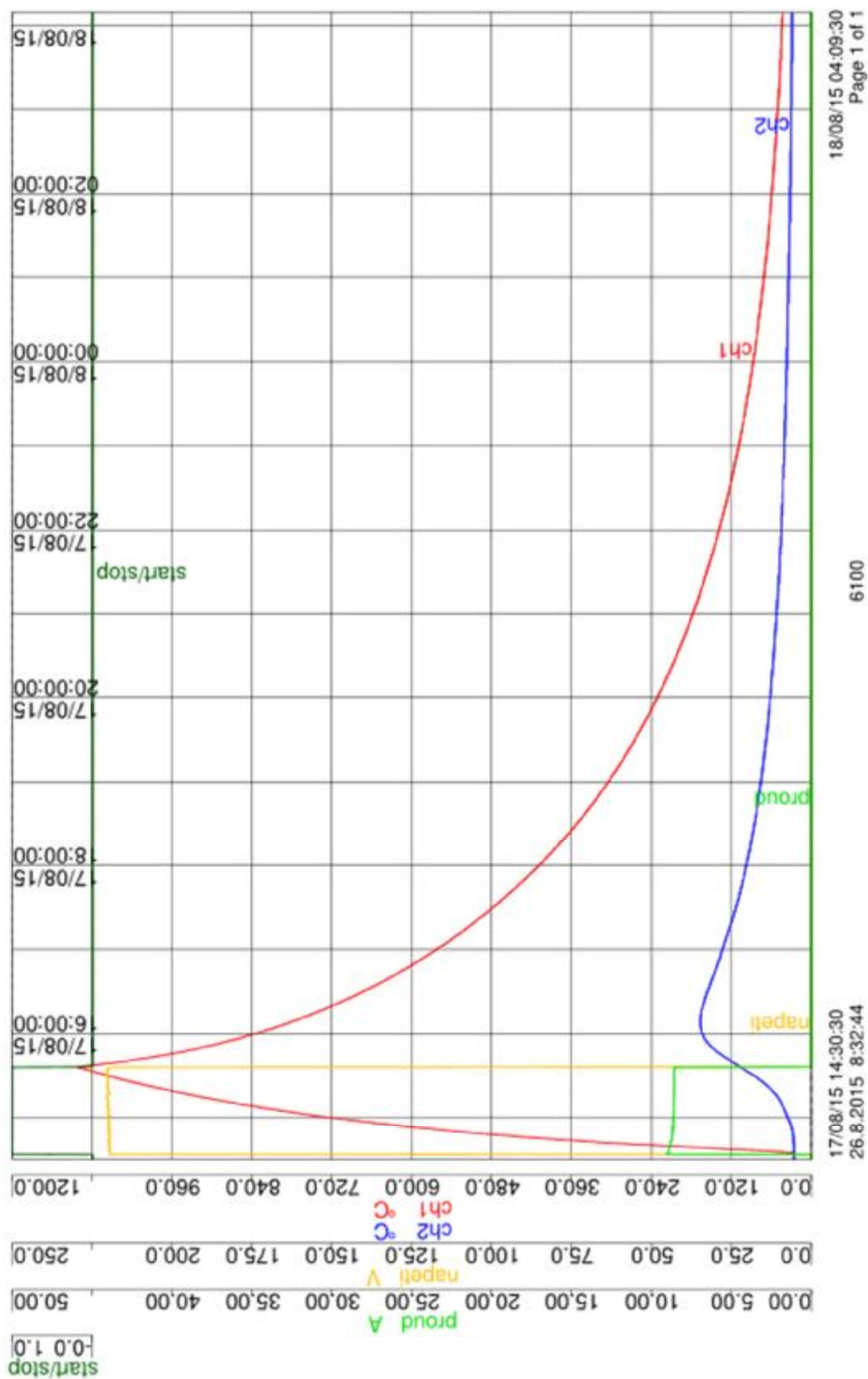
Obr. 2.2.9 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL II - odbočka 155V



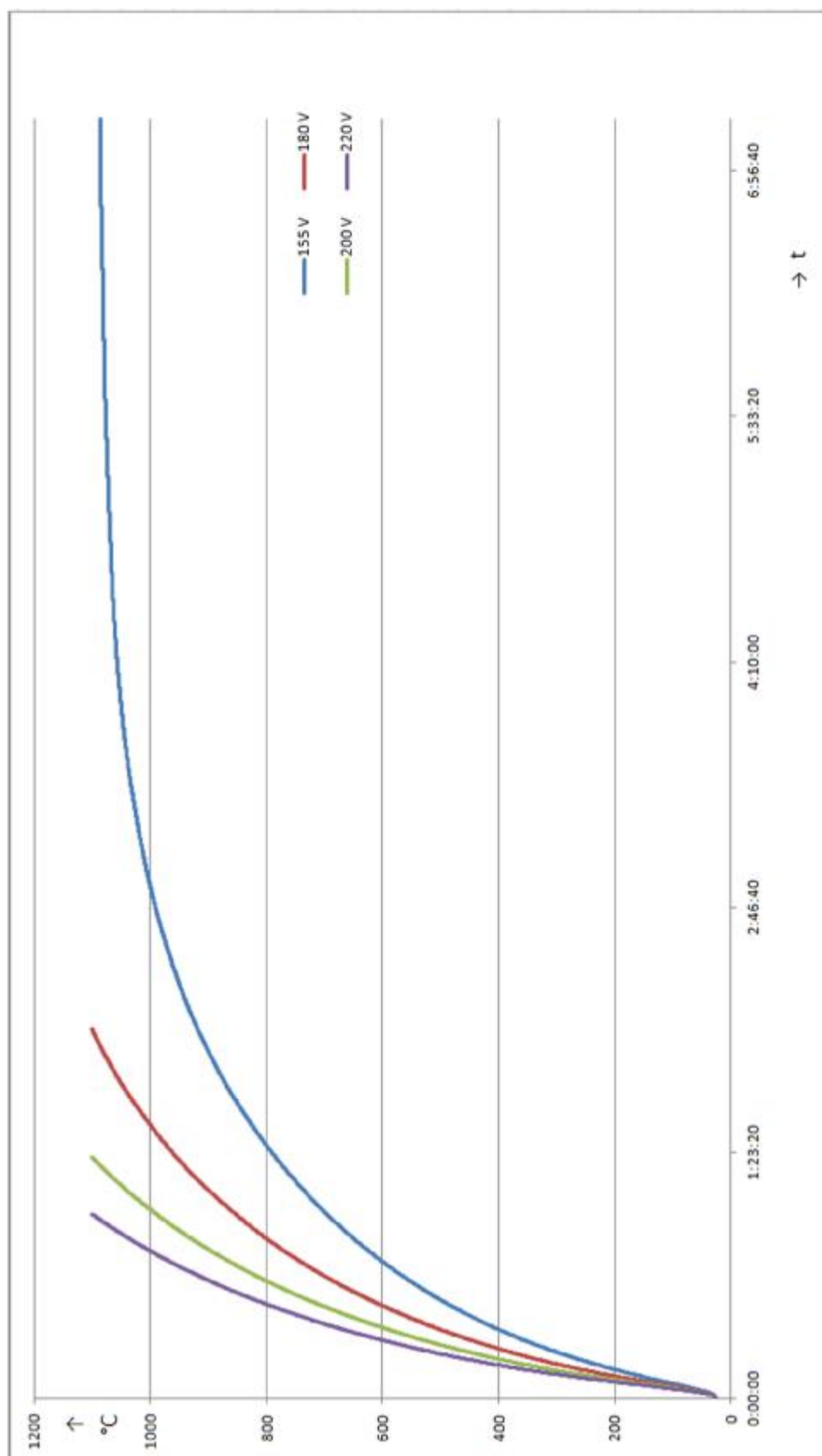
Obr. 2.2.10 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 - průběh teplotního cyklu - MODEL II - odbočka 180 V



Obr. 2.2.11 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 – průběh teplotního cyklu - MODEL II – odbočka 200 V



Obr. 2.2.12 Záznam zapisovače EURO THERM A 6100 – průběh teplotního cyklu - MODEL II – odbočka 220 V



Obr. 2.2.13 Porovnání naměřených teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU II pro napětí odboček 220 V, 200 V, 180 V a 155V

2.2.5 Vyhodnocení výsledků z experimentů

2.2.5.1 Ověření chování topného článku při experimentech na modelech I a II

2.2.5.1.1 Vyhodnocení experimentu z naměřených hodnot na modelu I

K vyhodnocení naměřených hodnot používám následující vztahy:

1) Odporu při pracovní teplotě R_T

$$R_T = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (2.2.1)$$

Dále platí pro odpor při pracovní teplotě R_T

$$R_T = C_t R_{20} \quad [\Omega] \quad (2.2.2)$$

2) Úpravou (2.2.2) dostávám vztah pro teplotní faktor C_t

$$C_t = \frac{R_T}{R_{20}} \quad [-] \quad (2.2.3)$$

V tabulce 2.2.1 uvádím teplotní závislost koeficientu C_t použité odporové slitiny Kanthal A1.

Závislost teplotního koeficientu				
T_{20-400}	T_{500}	$T_{600-700}$	$T_{800-900}$	$T_{1000-1400}$
$C_t = 1,00$	$C_t = 1,01$	$C_t = 1,02$	$C_t = 1,03$	$C_t = 1,04$

Tab. 2.2.1 Závislost teplotního koeficientu C_t – Kanthal A1

Při výpočtu odporu pro teplotu 20 °C podle vztahů 2.2.1 a 2.2.2 vycházím z předpokladu, že proud procházející zátěží je odečten hned po zapnutí pece (po ustálení měřené hodnoty), dříve než teplota článku přesáhne teplotu 400 °C. Za tohoto předpokladu konstatuji, že hodnota teplotního koeficientu je rovna $C_t = 1,00$ viz tabulka 2.2.1.

Pro výpočet výkonu pro teplotu 20 °C vycházím ze vztahu

3) Výpočet výkonu při teplotě 20°C P_{20}

$$P_{20i} = \frac{U_{zi}^2}{R_{20i}} \quad [W] \quad (2.2.4)$$

Hodnoty pro jednotlivé odbočky 220V, 180V a 155V jsou uvedeny v tabulce 2.2.2.

napětí odbočky	naměřené hodnoty		vypočítané hodnoty	
	napětí na zátěži	proud zátěží	odpor zátěže	výkon zátěže
U_0	U_{zi}	I_{zi}	R_{20i}	P_{20i}
220 V	217,4 V	16,31 A	13,32 Ω	3545,79 W
180 V	179,4 V	13,4 A	13,38 Ω	2403,96 W
155 V	155,7 V	11,68 A	13,33 Ω	1818,58 W

Tab. 2.2.2 Naměřené hodnoty při experimentech na modelu I

Připojením stejného topného článku na napětí jednotlivých odboček 220V, 180V a 155V by měl mít stejnou hodnotu odporu. V důsledku chyby měření vyšly však různé hodnoty R_{20i} , viz tabulka 2.2.2. Proto musím vypočítat:

4) Průměrnou hodnotu odporu R_{20}

$$R_{20} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{20i}}{n} \quad [\Omega] \quad (2.2.5)$$

Pro R_{20} určím velikost odporů topného článku pro různé hodnoty teplotního koeficientu C_t podle vztahu (2.2.2). Z následujícího vývoje hodnot odporů v tabulce 2.2.3 je patrná závislost na pracovní teplotě pece.

Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.2.3.

vypočítané hodnoty [Ω]				
R_{20-400}	R_{500}	$R_{600-700}$	$R_{800-900}$	$R_{1000-1400}$
$C_t = 1,00$	$C_t = 1,01$	$C_t = 1,02$	$C_t = 1,03$	$C_t = 1,04$
13,34 Ω	13,47 Ω	13,61 Ω	13,74 Ω	13,87 Ω

Tab. 2.2.3 Vypočítané hodnoty odporu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model I

V důsledku teplotní závislosti odporu topného článku během pracovního cyklu pece, dochází také ke změně výkonu podle teploty v pracovním prostoru. V kapitole 3 odstavec 3.1.1 obr.3.1.1 uvádím graf teplotních závislostí odporu materiálů nejčastěji používaných na výrobu topných článků. Tyto teplotní závislosti jednotlivých materiálů je nutno zohlednit zejména při roztápění pecí a při regulaci výkonu topného článku.

5) Výpočet výkonu při pracovní teplotě P_T

$$P_{Ti} = \frac{U_{Zi}^2}{R_T} \quad [W] \quad (2.2.6)$$

Hodnoty pro jednotlivé odbočky 220 V, 180 V a 155 V jsou uvedeny v tabulce 2.2.4.

napětí odbočky U_0	napětí na zátěži U_{Zi}	vypočítané hodnoty [W]				
		P_{20-400}	P_{500}	$P_{600-700}$	$P_{800-900}$	$P_{1000-1400}$
220 V	217,4 V	3542,94W	3508,74 W	3472,65 W	3439,79 W	3407,55 W
180 V	179,4 V	2412,62 W	2389,34 W	2364,76 W	2342,38 W	2320,43 W
155 V	155,7 V	1817,28 W	1799,74W	1781,23 W	1764,37W	1747,84 W

Tab. 2.2.4 Vypočítané hodnoty výkonu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model I

Na základě teplotní závislosti výkonu topného článku během pracovního cyklu pece dochází také k teplotní závislosti měrného povrchového zatížení odporového drátu. K stanovení měrného povrchového zatížení topného článku použijí následující vztahy:

6) Výpočet povrchového zatížení p

$$p_i = \frac{P_T}{S_C} \quad [W/cm^2] \quad (2.2.7)$$

7) Výpočet délky drátu ℓ

$$\ell = \frac{R_{20}}{R_L} \quad [m] \quad (2.2.8)$$

8) Výpočet povrchu topného vodiče S_C

$$S_C = \pi d \ell \quad [cm^2] \quad (2.2.9)$$

Hodnoty pro jednotlivé odbočky 220 V, 180 V a 155 V jsou uvedeny v tabulce 2.2.5.

napětí odbočky U_0	napětí na zátěži U_{Zi}	vypočítané hodnoty [W/cm ²]				
		p_{20-400}	p_{500}	$p_{600-700}$	$p_{800-900}$	$p_{1000-1400}$
220 V	217,4 V	1,954 W/cm ²	1,935 W/cm ²	1,915 W/cm ²	1,897 W/cm ²	1,879 W/cm ²
180 V	179,4 V	1,331 W/cm ²	1,318 W/cm ²	1,304 W/cm ²	1,292 W/cm ²	1,280 W/cm ²
155 V	155,7 V	1,002 W/cm ²	0,993 W/cm ²	0,982 W/cm ²	0,973 W/cm ²	0,964 W/cm ²

Tab. 2.2.5 Vypočítané hodnoty povrchového zatížení topného článku v závislosti na jeho teplotě – model I

2.2.5.1.2 Vyhodnocení experimentu z naměřených hodnot na modelu II

Na modelu II bylo provedeno stejné vyhodnocení jako u modelu I.

napětí odbočky U_0	naměřené hodnoty		vypočítané hodnoty	
	napětí na zátěži U_Z	proud zátěži I_Z	odpor zátěže R_{20}	výkon zátěže P_{20}
220 V	219,7 V	9,06 A	24,25 Ω	1990,48 W
200 V	201,7 V	8,33 A	24,30 Ω	1680,16 W
180 V	181,6 V	7,46 A	24,34 Ω	1354,74 W
155 V	157,3 V	6,49 A	24,24 Ω	1020,88 W

Tab. 2.2.6 Naměřené hodnoty při experimentech na modelu II

vypočítané hodnoty [Ω]				
R_{20-400}	R_{500}	$R_{600-700}$	$R_{800-900}$	$R_{1000-1400}$
$C_t = 1,00$	$C_t = 1,01$	$C_t = 1,02$	$C_t = 1,03$	$C_t = 1,04$
24,26 Ω	24,50 Ω	24,75 Ω	24,99 Ω	25,23 Ω

Tab. 2.2.7 Vypočítané hodnoty odporu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model II

napětí odbočky U_0	napětí na zátěži U_{Zi}	vypočítané hodnoty [W]				
		P_{20-400}	P_{500}	$P_{600-700}$	$P_{800-900}$	$P_{1000-1400}$
220 V	219,7 V	1989,62 W	1970,13 W	1950,23 W	1931,50 W	1913,12 W
200 V	201,7 V	1676,95 W	1660,53 W	1643,75 W	1627,96 W	1612,48 W
180 V	181,6 V	1359,38 W	1346,06 W	1332,47 W	1319,67 W	1307,12 W
155 V	157,3 V	1019,92 W	1009,93 W	999,73 W	990,13 W	980,71 W

Tab. 2.2.8 Vypočítané hodnoty výkonu topného článku v závislosti na jeho teplotě – model II

napětí odbočky U_0	napětí na zátěži U_{Zi}	vypočítané hodnoty [W/cm ²]				
		p_{20-400}	p_{500}	$p_{600-700}$	$p_{800-900}$	$p_{1000-1400}$
220 V	219,7 V	1,756 W/cm ²	1,739 W/cm ²	1,721 W/cm ²	1,705 W/cm ²	1,689 W/cm ²
200 V	201,7 V	1,480 W/cm ²	1,466 W/cm ²	1,451 W/cm ²	1,437 W/cm ²	1,423 W/cm ²
180 V	181,6 V	1,200 W/cm ²	1,188 W/cm ²	1,176 W/cm ²	1,165 W/cm ²	1,154 W/cm ²
155 V	157,3 V	0,900 W/cm ²	0,891 W/cm ²	0,882 W/cm ²	0,874 W/cm ²	0,866 W/cm ²

Tab. 2.2.9 Vypočítané hodnoty povrchového zatížení topného článku v závislosti na jeho teplotě – model II

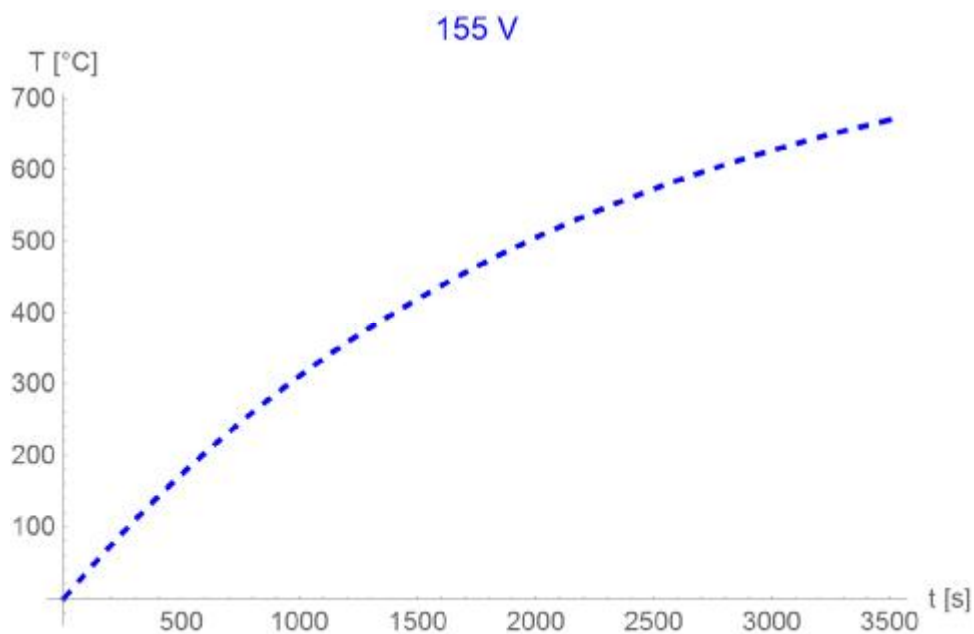
Hodnoty z výpočtů provedených na modelu I a II charakterizují chování topného článku při tomto způsobu náhřevu pece. Hodnoty dále využívám v matematicko-fyzikálním modelu pro zpřesnění výsledků.

2.2.5.2 Stanovení časové konstanty modelů

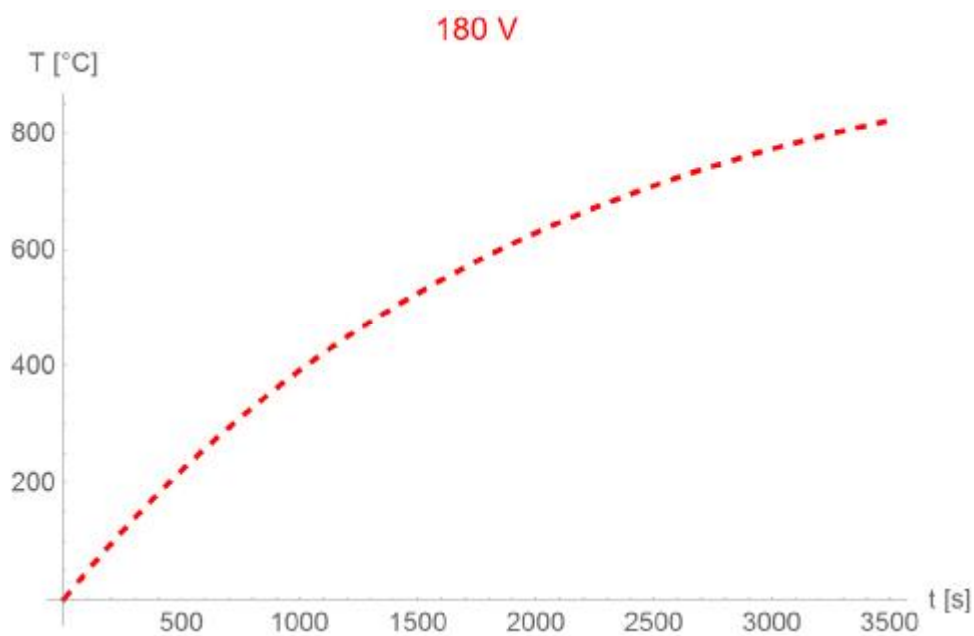
K stanovení časové konstanty modelů I a II jsem použil software Wolfran Mathematica verze 10. V tom to programu jsem řešil rovnici 1.2.31 z kapitoly 1, pomocí nelineární regresní analýzy. Výsledky řešení uvádím v odstavcích 2.2.5.2.1 a 2.2.5.2.2.

2.2.5.2.1 Stanovení časové konstanty modelu I

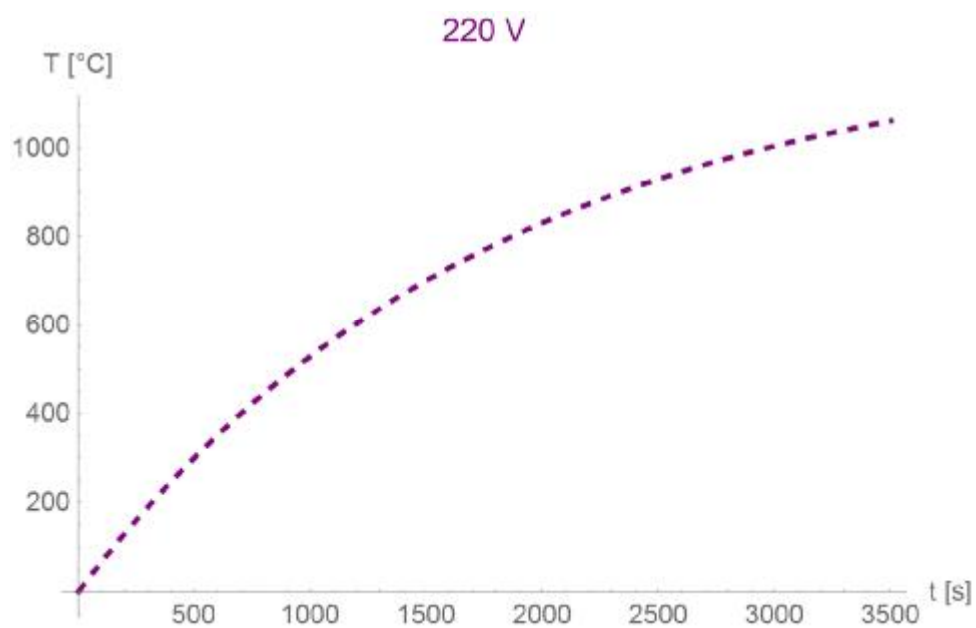
Výsledky řešení:



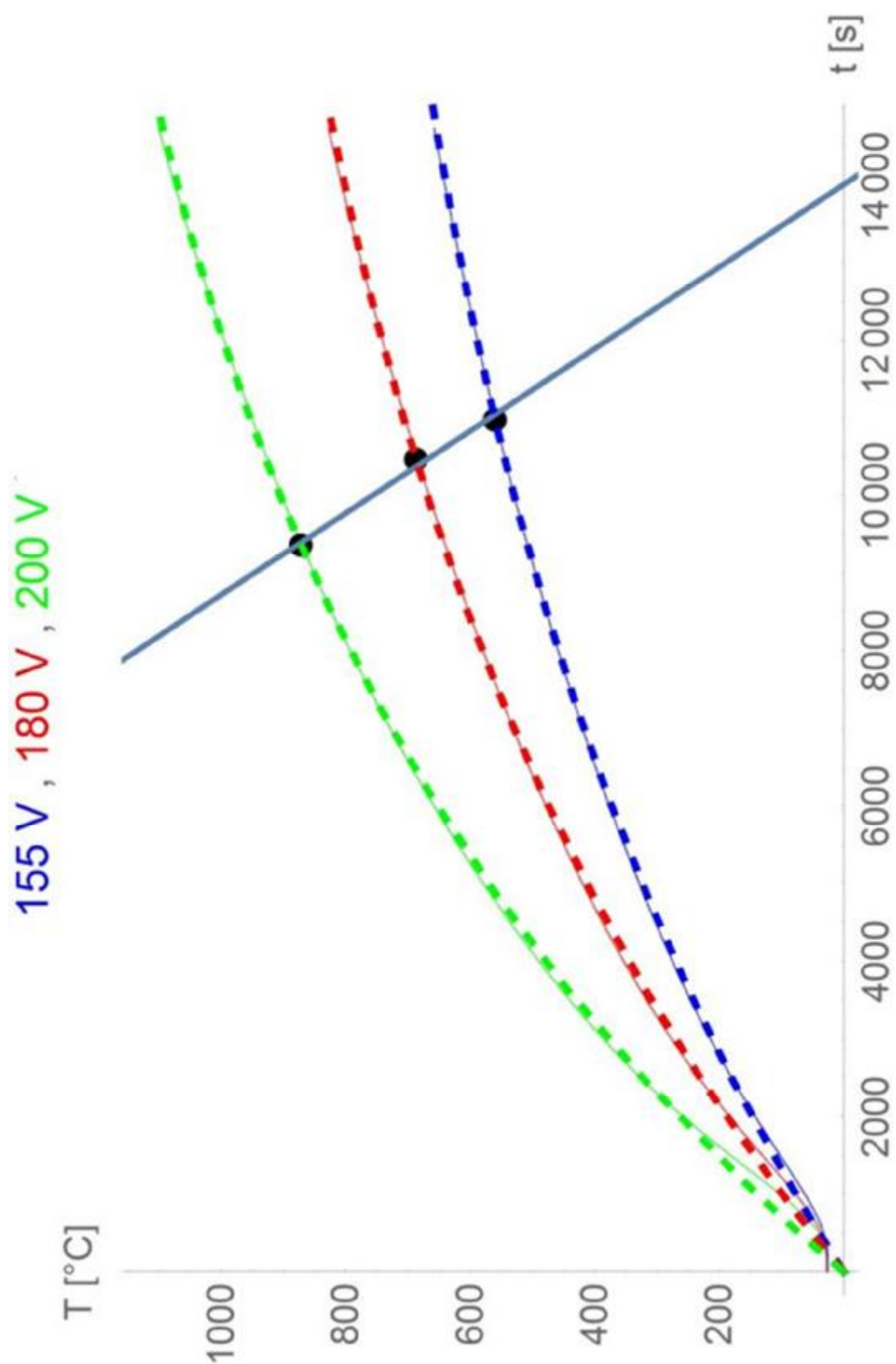
Obr. 2.2.14 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU I pro napětí odbočky 155 V



Obr. 2.2.15 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU I pro napětí odbočky 180 V



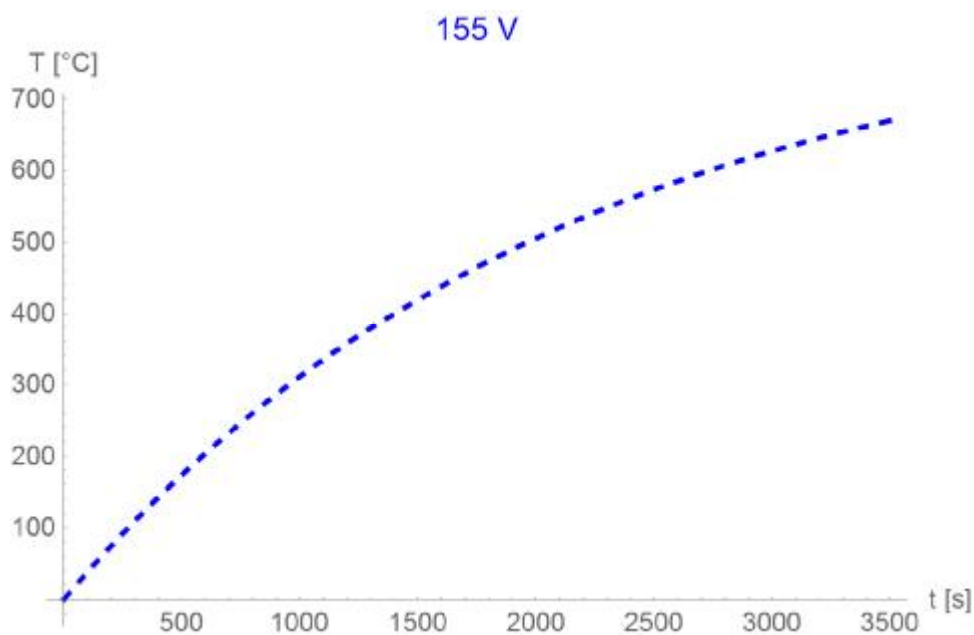
Obr. 2.2.16 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU I pro napětí odbočky 220 V



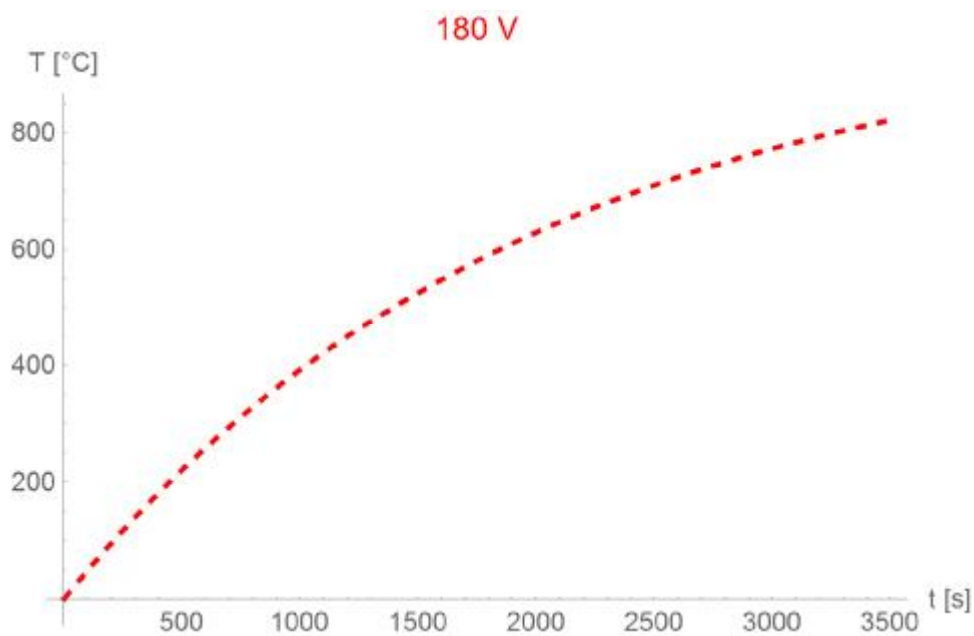
Obr. 2.2.17 Porovnání naměřených a vypočítaných teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU I pro napětí odboček 155 V, 180 V a 200 V (s vyznačením odpovídajících časových konstant – tučné body)

2.2.5.2.2 Stanovení časové konstanty modelu II

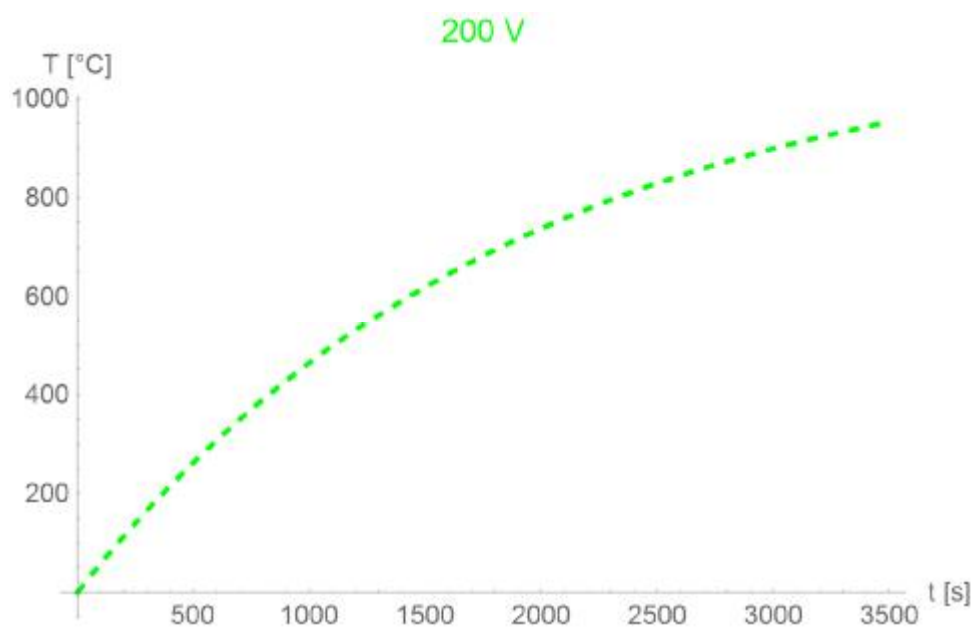
Výsledky řešení:



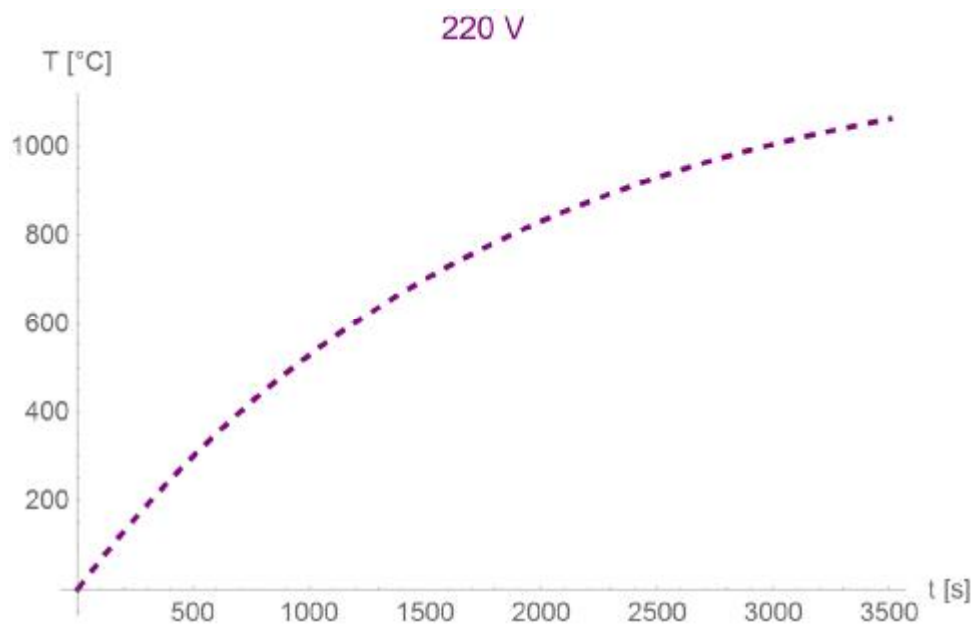
Obr. 2.2.18 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 155 V



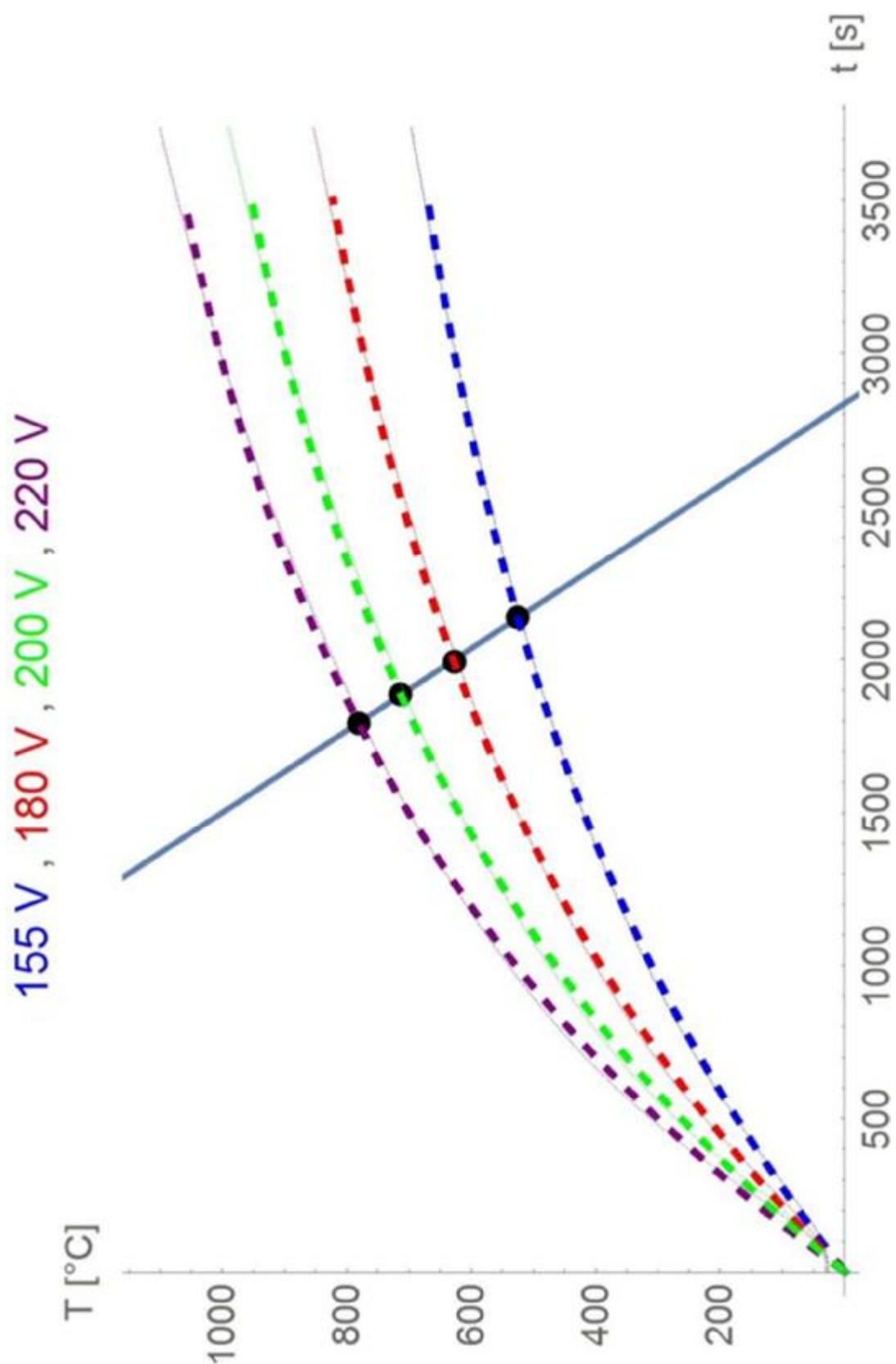
Obr. 2.2.19 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 180 V



Obr. 2.2.20 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 200 V



Obr. 2.2.21 Vypočítaný teplotní průběh pecního prostoru MODELU II pro napětí odbočky 220 V



Obr. 2.2.22 Porovnání naměřených a vypočítaných teplotních průběhů v pecním prostoru na MODELU II pro napětí odboček 155 V, 180 V, 200 V a 220 V (s vyznačením odpovídajících časových konstant – tučné body)

2.2.6 Využití výsledků z výpočtů a experimentů v praxi

Z porovnání záznamů z reálných měření a numerických výpočtů v software Wolfran Mathematica verze 10. vyplývá velmi dobrá shoda mezi experimenty a simulacemi. Výsledné grafy uvádím na obrázcích pro model I na obr. 2.2.17 a pro model II na obr. 2.2.22.

	155 V	180 V	200 V	220 V
Model I	10973 s	10462 s	9355 s	
Model II	2136 s	1 991 s	1886 s	1792 s

Tab. 2.2.10 Hodnoty časových konstant model I a modelu II

$\tau_{\check{c}k}$ - časová konstanta [s]

Jak je vidět z obr. 2.2.17 a 2.2.22, pokud dosadím časové konstanty do jednotlivých exponencií, vycházejí dosazené body přibližně ve tvaru přímky. Pokud neuvažuji sálání, $\tau_{\check{c}k}$ tohoto děje je konstanta, protože $\tau_{\check{c}k}$ je úměrná:

$$\tau_{\check{c}k} = \frac{m c_p}{\alpha_c S} \quad [s] \quad (2.2.10)$$

V reálném případě je v koeficient α_c zahrnuto také sálání, tím se α_c se vzrůstajícím výkonem zvětšuje a to způsobí snížení hodnoty $\tau_{\check{c}k}$. Jak již bylo ukázáno z měření, výsledkem je přímka, která popisuje danou pec. Z tohoto důvodu lze při provozu pece použít tuto přímku k nastavení pece na daný čas náběhu. Jak je vidět pro standartní hodnoty teplot a napětí používaných v peci tento způsob funguje, ale z teoretického hlediska by to přímka být neměla v rozsahu 0 až +nekonečné napětí. V tomto teoretickém rozmezí by výsledkem nebyla přímka, ale jiná křivka.

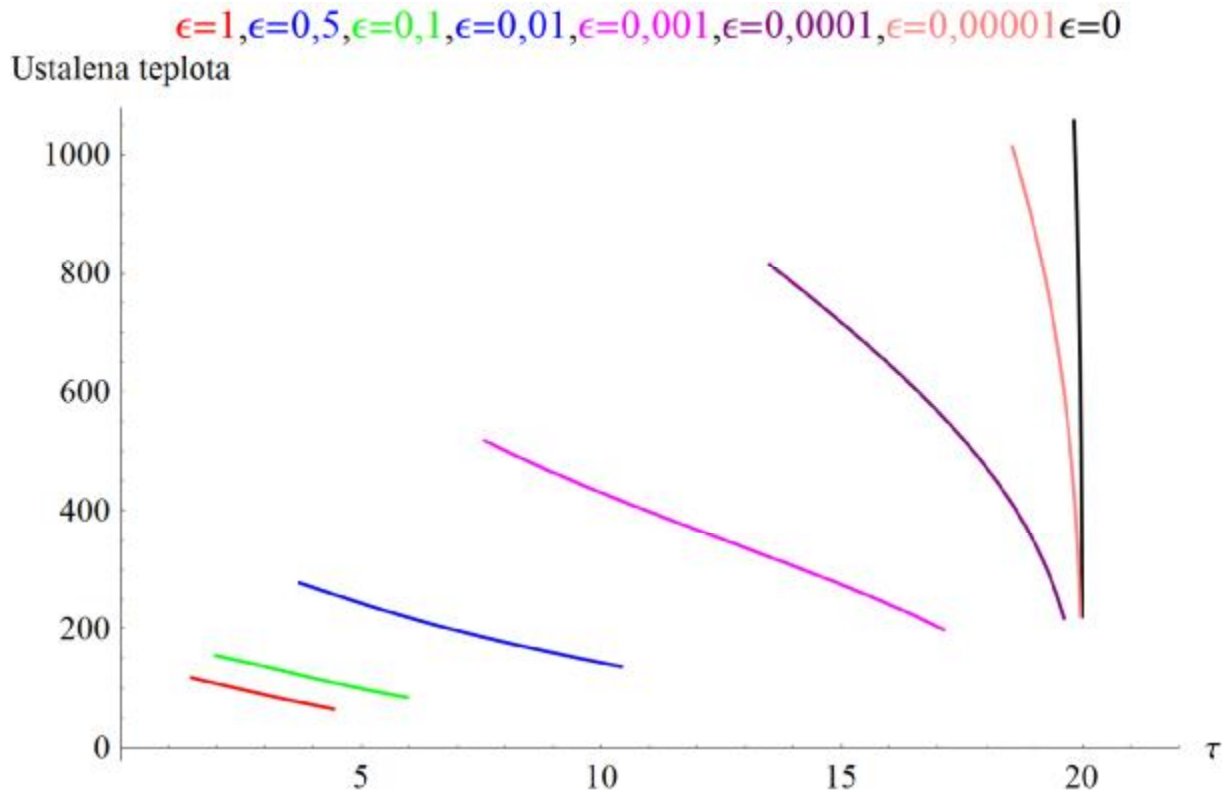
Pojďme se nyní podívat, jaká bude závislost ustálené hodnoty teploty na $\tau_{\check{c}k}$. Vycházím z rovnice:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = -S \cdot \left(\alpha_c \cdot (\vartheta - \vartheta(0)) + \epsilon \cdot \sigma \cdot ((\vartheta + 273)^4 - (\vartheta(0) + 273)^4) \right) + P \quad (2.2.11)$$

P - výkon do zařízení [W]

Rovnice popisuje základní teplotní děj probíhající uvnitř pece z hlediska výkonové bilance. Pokud tuto rovnici řeším (počáteční podmínka je $\vartheta(0)$) pomocí numerických metod vychází

následující závislost ustálené teploty na velikosti $\tau_{\check{c}k}$. Modelováno bylo pro 7 různých hodnot emisivity.



Obr. 2.2.23 Průběhy křivek závislosti ustálené teploty na velikosti časové konstanty

Jak je vidět na obr. 2.2.23 pro emisivitu v rozmezí 0,1 až 1 (typické hodnoty emisivity v reálném světě) je výsledkem klesající přímka. Pro emisivitu rovnou nule (neuvažujeme sálání) je $\tau_{\check{c}k}$ nezávislá na ustálené teplotě. Z toho vyplývá, že mnou naměřené hodnoty odpovídají teorii a lze tuto metodu použít, pokud je sálání dominantní, což u muflonových pecí je vždycky.

Použité prameny: [2], [9], [11], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [25], [26], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40].

2.3 Matematický model tepelných procesů v prázdné elektrické muflové peci

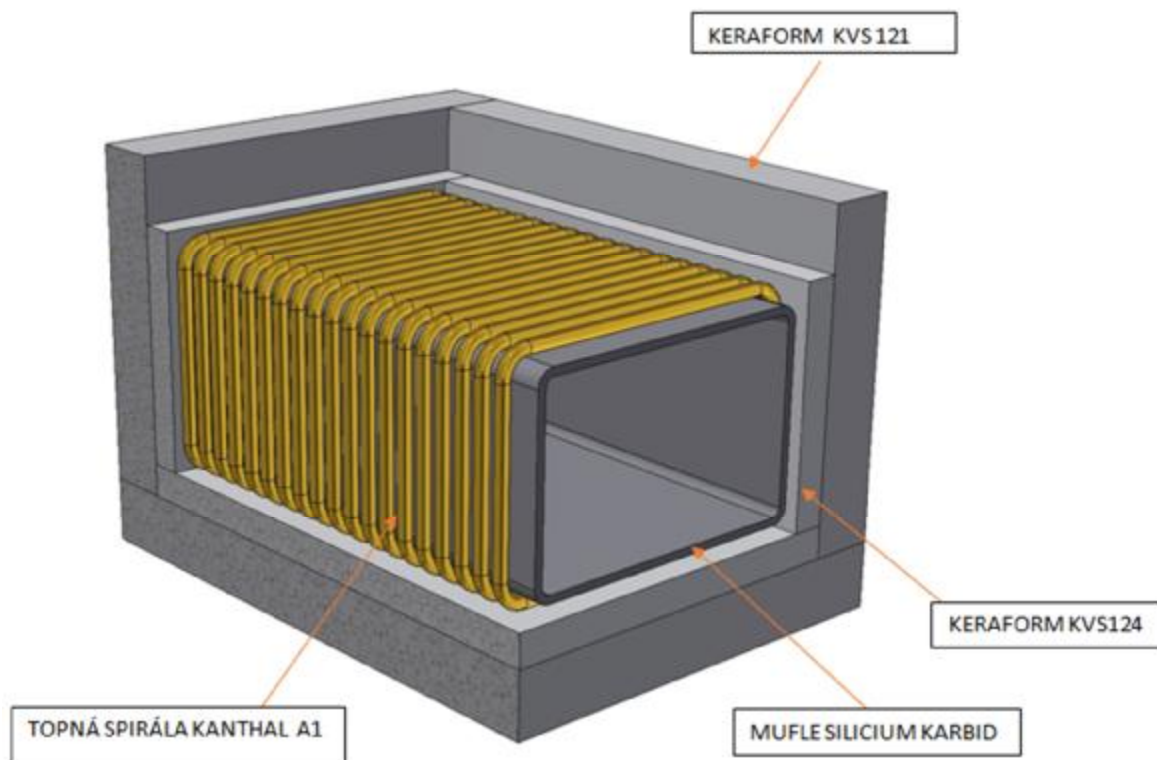
2.3.1 Popis zařízení

Elektrická muflová pec je tepelné zařízení sloužící k ohřevu nebo tepelnému zpracování určité vsázky. Pec pracuje periodickým způsobem, tj. po vložení vsázky se pec uzavře, proběhne požadovaný tepelný proces a vsázka se vyjme.

Pec má z vnějšku tvar kvádru. Uvnitř pece je pracovní prostor rovněž ve tvaru kvádru, zaplněný vzduchem, po vyhoření kyslíku pak převážně dusíkem nebo plyny unikajícími ze vsázky.

Zdrojem tepla v elektrické peci je elektřina. K přeměně elektrické na tepelnou energii dochází v topné spirále zhotovené z odporového drátu. Topná spirála je navinutá kolem mufle.

Informace o teplotách v peci se získávají pomocí čidel teploty.



Obr.2.3.1 Řez vzorkem muflové pece

2.3.2 Hlavní části pece jsou:

- Vyzdívka, resp. boční stěny, strop, nástěj, zadní stěna a přední dveře
- Keramická mufle
- Topné těleso (topná spirála)
- Čidlo teploty

ad a): Vyzdívku tvoří tepelná izolace, sloužící k maximalizaci tepelného odporu pro tepelný tok z pece do jejího okolí. Izolace bývá zhotovena z tepelně izolačních (většinou keramických) materiálů. V našem případě budu pracovat se dvěma variantami materiálu:

- Vlákenné keramické desky typu Sibal
- Šamotová výduska, resp. pěnošamot

ad b): Pracovní prostor pece je vymezen keramickou muflí, do níž se vkládá zpracovávaný materiál – vsázka. Mufle je tenkostěnné pouzdro zhotovené z vhodného keramického materiálu. V našem případě budu pracovat se dvěma variantami materiálu:

- Karbid křemíku (SiC)
- Hutný šamot SII

ad c): Topné těleso je provedeno jako spirála z odporového drátu (Kanthal). Topná spirála je umístěna v bočních stěnách, stropu a nistěji mezi muflí a izolační vyzdívkou. To znamená, že teplo přiváděné topnou spirálou je vedeno jednak do mufle a z ní do vnitřku pece, jednak do izolační vyzdívky a z ní do okolí pece. Zadní stěnou a dveřmi prostupuje teplo z vnitřku pece do jejího okolí.

ad d): Teploty v peci se obvykle zjišťují pomocí termoelektrických snímačů, zasunutých stěnou pece do pracovního prostoru pece. Tyto snímače bývají provedeny buď jako tyčové termočlánky, kdy jsou umístěny ve dvojici sousedních kovových a keramických ochranných trubek, nebo jako plášťové termočlánky, jejichž průměr může být menší než jeden milimetr.

Údaj teploty zjištěný tímto termočlánkem je v provozní praxi teplota pece. Je dobré si uvědomit, že tato teplota je teplotou nepatrné kapky sváru obou drátků termočlánku a její velikost je výsledkem sdílení tepla z nehomogenního teplotního pole, které ji v peci obklopuje.

2.3.3 Princip matematického modelu elektrické pece

Pec je tepelná soustava se spojitě rozloženými parametry. Matematický popis chování jejich teplot a tepelných toků v čase lze provést soustavou parciálních diferenciálních rovnic sdílení tepla.

Pro naše účely mohu provést zjednodušení a nahradit spojitě kontinuum omezeným počtem soustředěných kompartmentů. Takovýto systém pak lze popsat soustavou obyčejných diferenciálních rovnic 1. řádu, kde nezávislou proměnnou X je čas, závislou proměnnou Y je vektor teplot.

Prakticky to provedu tak, že pec rozdělím na přiměřený počet vhodně velkých částí a vlastnosti každé této části soustředím do jedné tepelné kapacity, obklopené několika tepelnými

odpory. Stav každé tepelné kapacity je popsán její teplotou. Mezi jednotlivými kapacitami tečou tepelné toky přes tepelné odpory.

Velikost tepelné kapacity je určena její hmotností a jejím měrným teplem.

Velikost tepelného odporu je určena:

- při sdílení tepla v pevném tělese tloušťkou vrstvy materiálu, jeho tepelnou vodivostí a plochou sdílení,
- při sdílení tepla mezi povrchem pevného tělesa a jeho okolím plochou sdílení, součinitelem konvekčního přestupu tepla a relacemi pro sdílení tepla sáláním.

Velikosti tepelných toků mezi kapacitami resultují z rozdílů teplot mezi kapacitami a tepelných odporů mezi nimi.

Vstupní veličinou, kterou lze chování celého systému ovlivňovat resp. řídit, je elektrický příkon do topné spirály, vyjádřený jako tok tepelné energie.

Některé z fyzikálních veličin, které se v modelu vyskytují, lze v celém pracovním rozsahu považovat za konstanty (hmotnosti, plochy sdílení, tloušťky vrstev). Hodnoty jiných fyzikálních parametrů se v pracovním rozsahu pece mohou měnit, většinou v závislosti na teplotách (součinitele tepelné vodivosti, měrná tepla, součinitele přestupu tepla, hmotnost plynu v peci).

Tuto proměnlivost bude model respektovat.

Z hlediska zvládnutelnosti matematického modelu je účelné provést dělení tak, aby počet soustředěných kapacit (kompartmentů) nepřesáhl několik desítek.

2.3.4 Způsob rozdělení pece do soustředěných tepelných kapacit:

Topnou spirálu budu považovat za jednu tepelnou kapacitu, mající hmotnost a měrné teplo.

Tepelně izolační vyzdívku boků, stropu a nístěje pece budu považovat za souměrné, jejich vlastnosti sloučím a rozdělím do čtyř vrstev, z nichž každá bude jednou soustředěnou kapacitou o hmotnosti rovné hmotnosti vrstvy. Teplota soustředěné kapacity pak charakterizuje tepelný stav vrstvy a odpovídá zhruba teplotě uprostřed vrstvy.

Zadní stěnu a dveře budu považovat za vzájemně symetrické, jejich vlastnosti sloučím a následně rozdělím do pěti vrstev, z nichž každá bude jednou soustředěnou kapacitou.

Mufli rozdělím na dvě vrstvy, z nichž každá bude jednou soustředěnou kapacitou.

Plynný obsah pece budu považovat za jednu tepelnou kapacitu, kde její hmotnost i měrné teplo závisí na teplotě.

Měřící konec plášťového termočlátku, který je čidlem teploty, budu považovat rovněž za jednu tepelnou kapacitu.

Přestup tepla z pevných těles do vnitřního i vnějšího okolí závisí na povrchových teplotách těles. Z tohoto důvodu zvolím rozdělení vrstev vyzdívky a mufle tak, aby vrstvy v hloubce stěny byly tlustší a vrstva na povrchu byla tak tenká, že její teplotu lze považovat za povrchovou. Při takovémto rozdělení pece dostanu 14 soustředěných tepelných kapacit.

2.3.5 Sdílení tepla mezi tepelnými kapacitami

V důsledku rozdílných teplot dochází mezi jednotlivými tepelnými kapacitami ke sdílení tepla. Uvnitř pevných těles vedením (vnitřní sdílení), mezi povrchy těles a jejich okolím konvekcí a sáláním (vnější sdílení).

Vnitřní sdílení, tj. tepelné toky mezi sousedními tepelnými kapacitami vrstev těles se řeší jako ustálené jednorozměrné vedení tepla rovinnou stěnou, která se skládá z polovičních tloušťek obou sousedních vrstev.

Tepelný tok vnějšího sdílení je součtem konvekčního tepelného toku mezi povrchem a jeho plynným okolím a výsledného sálavého tepelného toku mezi povrchem a ostatními povrchy jej obklopujícími. Plynné prostředí v peci i v jejím okolí považují za průteplivé (diatermní), neboť se jedná o vesměs dvouatomové plyny. Proto nemá na přenos tepla sáláním vliv.

Tenký plášťový termočlánek mohu považovat za tepelně tenké těleso, mající v celém objemu stejnou teplotu. Teplo teče do termočláneku konvekcí z plynu v peci a sáláním ze dvou povrchových zón – vnitřního povrchu mufler a vnitřního povrchu dveří a zad pece.

2.3.6 Označení veličin v matematickém modelu pece

Název veličiny	Označení	Rozměr	Poznámka
Čas	τ	(s)	
Hmotnosti tepelných kapacit	M_i	(kg)	
Hmotnost plynu v peci	M_{13}	(kg)	$M_{13} = M_{13}(t_{13})$
Tloušťky vrstev	l_i	(m)	
Tepelné vodivosti	λ_i	(W/mK)	$\lambda_i = \lambda_i(\tau_i)$
Měrná tepla	c_i	(J/kgK)	$c_i = c_i(\tau_i)$
Teploty jednotlivých kapacit	t_i	°C	
Tepelný tok z i-té do j-té kapacity	$q_{i,j}$	(W)	
Výkon do topné spirály	q_{el}	(W)	
Tepelný tok z i-té kapacity do okolí	$q_{i,ok}$	(W)	
Plochy přestupu tepla z i-té do j-té kapacity	$S_{i,j}$	(m ²)	
Součinitel přestupu tepla konvekcí na i-tém povrchu	α_{ki}	(W/m ² K)	$\alpha_{ki} = \alpha_{ki}(\tau_i)$
Poměrná emisivita mezi i-tým a j-tým povrchem	$\varepsilon_{i,j}$	(-)	$\varepsilon_{i,j} = \varepsilon_{i,j}(\tau_i, \tau_j)$
Úhlový součinitel ozáření z i-tého na j-tý povrch	$\varphi_{i,j}$	(-)	

2.3.7 *Indexace veličin v matematickém modelu pece*

Index	Příslušnost k:	index	Příslušnost k:
1	Topná spirála (+ její obal u šamotové pece)	ok	Okolí pece
	Mufle:	el	Elektrický zdroj energie
2	Vrstva mufle při topné spirále	s	sálavý
3	Vrstva mufle při vnitřním povrchu pece	k	konvekční
	Boční stěny + strop + nístěj:		
4	První vrstva izolace - při topné spirále		
5	Druhá vrstva izolace směrem ven		
6	Třetí vrstva izolace směrem ven		
7	Čtvrtá vrstva izolace – povrchová		
	Dveře + zadní stěna:		
8	První vrstva izolace při vnitřním povrchu pece		
9	Druhá vrstva izolace směrem ven		
10	Třetí vrstva izolace směrem ven		
11	Čtvrtá vrstva izolace směrem ven		
12	Pátá vrstva izolace – povrchová		
13	Plyn v peci		
14	konec plášťového termočlánku (konvekce)		
15	Konec plášťového termočlánku (sálání)		
16	Okolí pece (konvekce)		
17	Okolí pece (sálání)		

2.3.8 *Znázornění struktury matematického modelu*

Pro grafické znázornění struktury matematického modelu pece lze použít nástrojů obvyklých v elektrotechnice pro znázorňování zapojení elektrických obvodů.

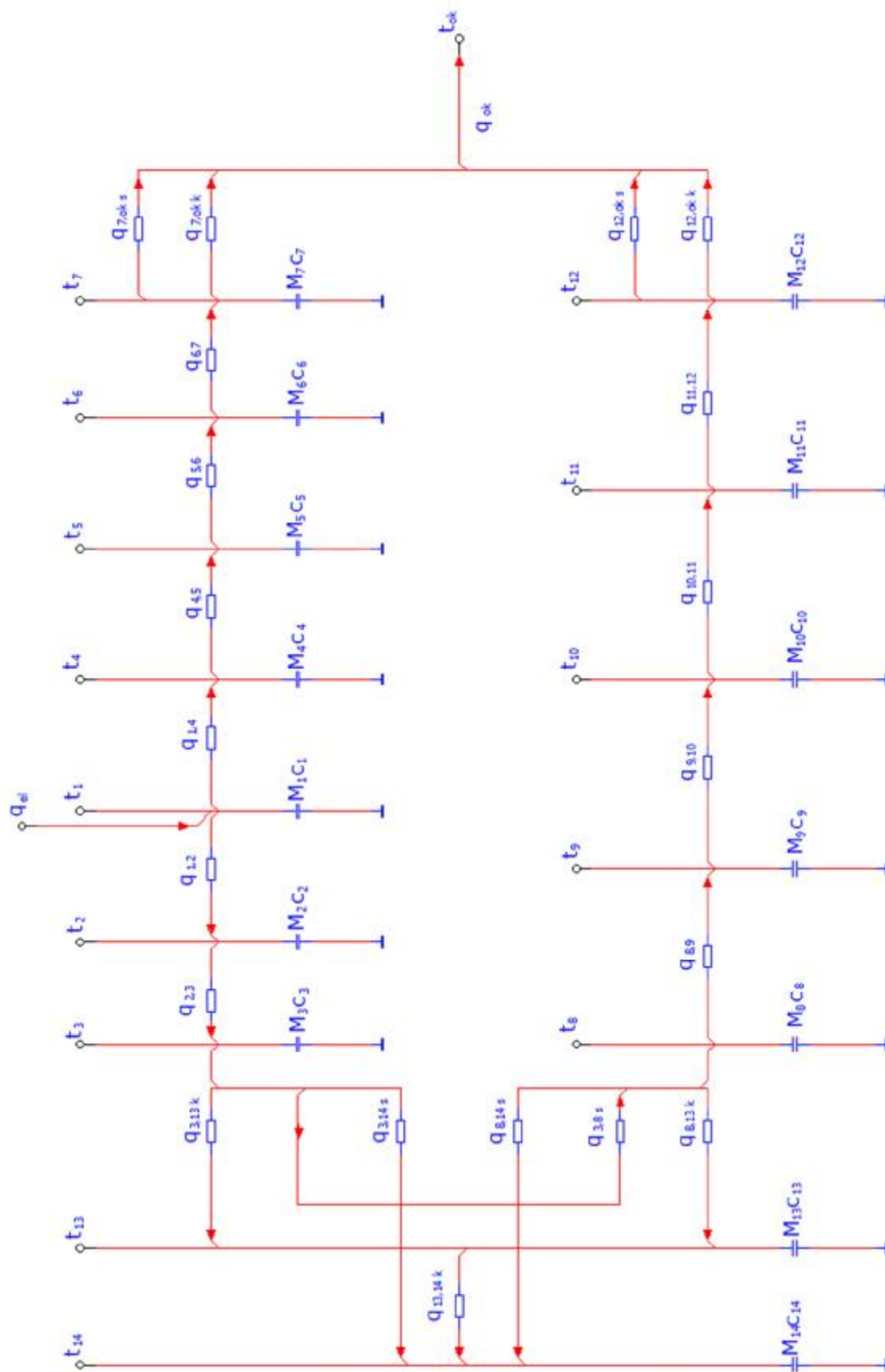
Analogie: Elektrická kapacita - tepelná kapacita

Elektrický odpor - tepelný odpor

Elektrický proud - tepelný tok

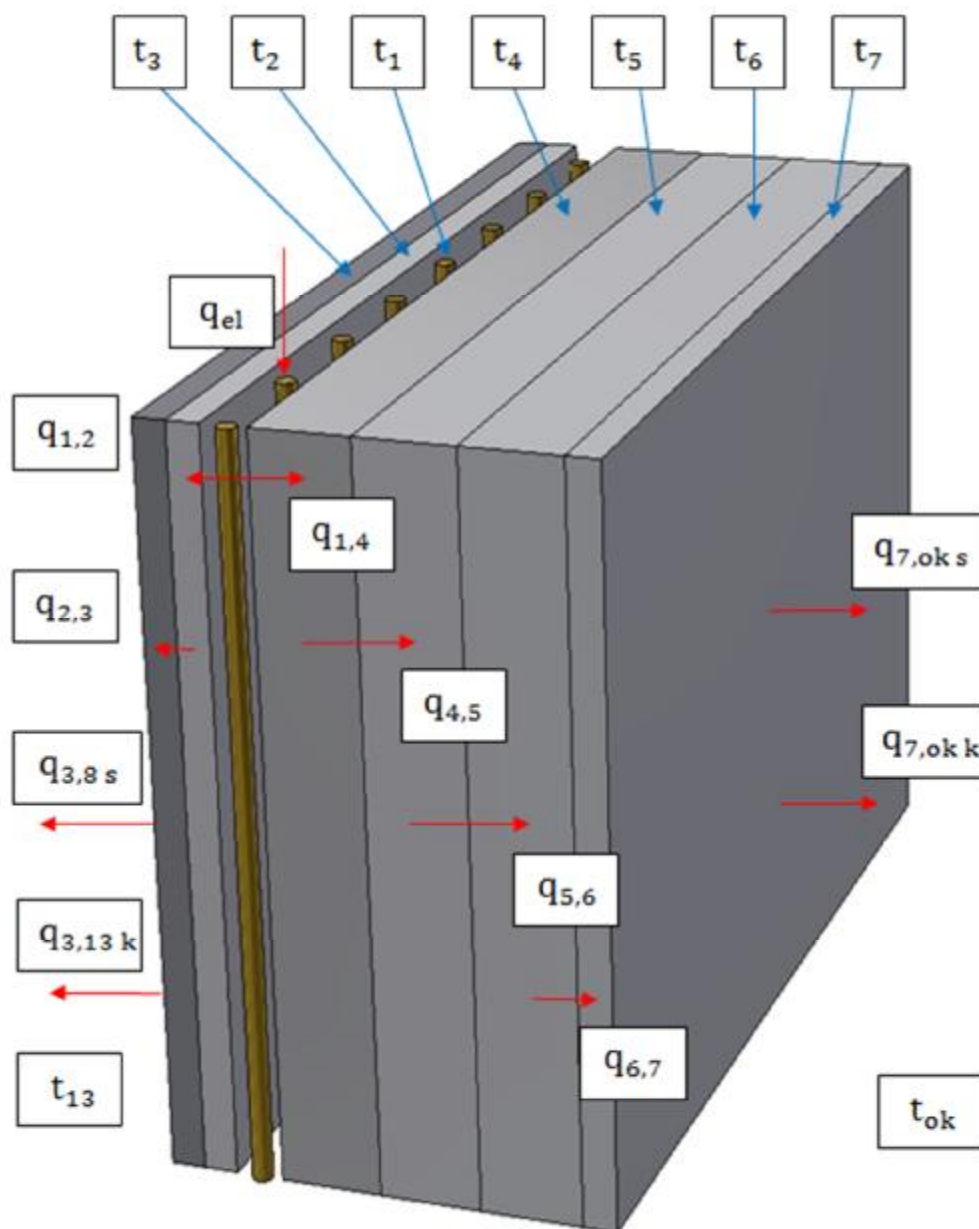
Elektrické napětí - teplota

S použitím této analogie získám následující schéma struktury výše popsaného matematického modelu muflové pece.

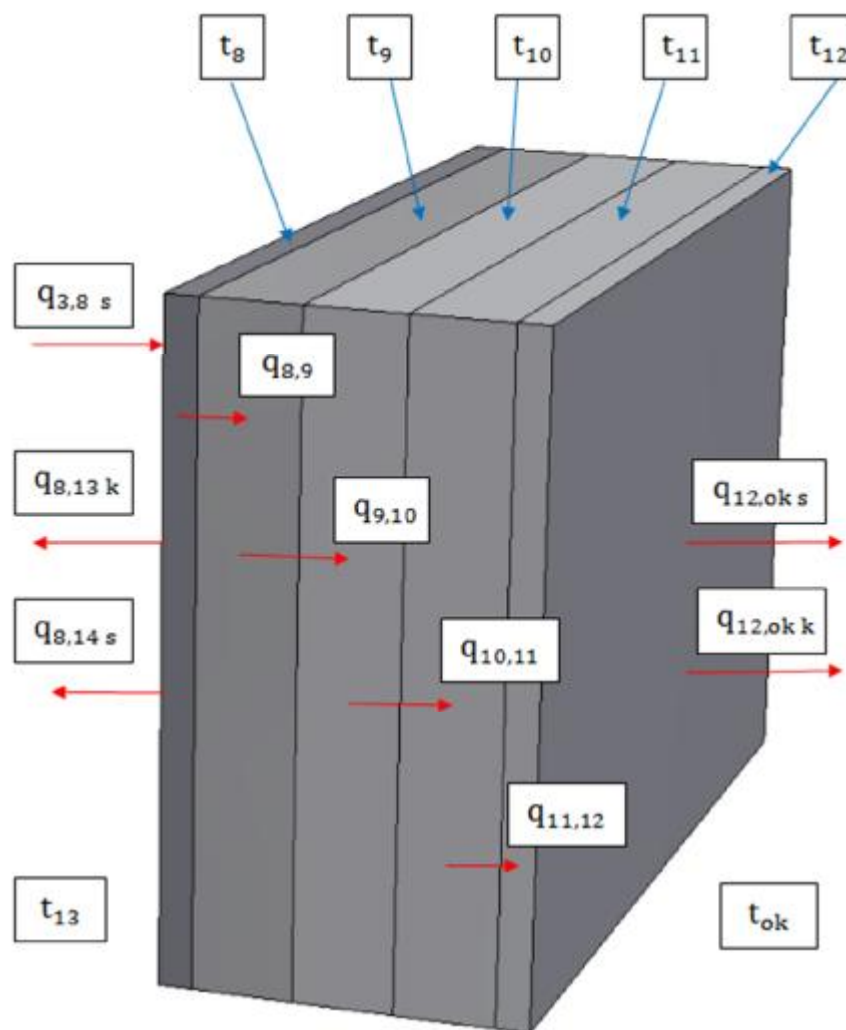


Obr.2.3.2 Struktura matematického modelu pece

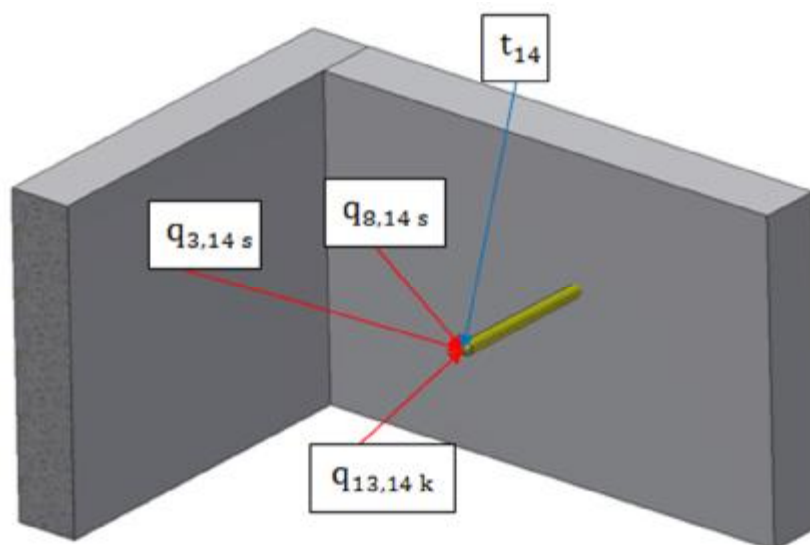
2.3.9 *Znázornění tepelných toků a teplot*



Obr.2.3.3 Názorná ukázka tepelných toků a teplot v bočních stěnách, stropu a nistěje modelu.



Obr 2.3.4 Názorná ukázka tepelných toků a teplot v zadní stěně a dveřích modelu.



Obr. 2.3.5 Názorná ukázka tepelných toků působících na snímač teploty

2.3.10 Vstupy a výstupy matematického modelu

Vstup, tj. nezávislá veličina, je elektrický příkon do topné spirály

$$q_{el} = q_{el}(\tau) \quad (2.3.1)$$

Výstupem modelu může být kterákoliv z proměnných, které se v modelu vyskytují.

Mezi zajímavé výstupy patří: t_{13} - teplota plynu v peci

t_{14} - teplota termočlánku

t_7, t_{12} - teploty vnějšího povrchu pece

q_{ok} - celkový tepelný tok do okolí pece

V ustáleném stavu musí platit $q_{el} = q_{ok}$

2.3.11 Soustava stavových diferenciálních rovnic teplot

Obecně: Změna obsahu tepelné kapacity je dána rozdílem vstupujícího tepla do tepelné kapacity a tepla vystupujícího z tepelné kapacity.

Topná spirála

$$M_1 c_1 \frac{dt_1}{d\tau} = q_{el} - q_{1,2} - q_{1,4} \quad (2.3.2)$$

Mufle

$$M_2 c_2 \frac{dt_2}{d\tau} = q_{1,2} - q_{2,3} \quad (2.3.3)$$

$$M_3 c_3 \frac{dt_3}{d\tau} = q_{2,3} - q_{3,8s} - q_{3,13k} - q_{3,14s} \quad (2.3.4)$$

Vyzdívka bočních stěn + stropu + nístěje

$$M_4 c_4 \frac{dt_4}{d\tau} = q_{1,4} - q_{4,5} \quad (2.3.5)$$

$$M_5 c_5 \frac{dt_5}{d\tau} = q_{4,5} - q_{5,6} \quad (2.3.6)$$

$$M_6 c_6 \frac{dt_6}{d\tau} = q_{5,6} - q_{6,7} \quad (2.3.7)$$

$$M_7 c_7 \frac{dt_7}{d\tau} = q_{6,7} - q_{7,okk} - q_{7,oks} \quad (2.3.8)$$

Vyzdívka dveří + zadní stěny

$$M_8 c_8 \frac{dt_8}{d\tau} = q_{3,8s} - q_{8,9} - q_{8,13k} - q_{8,14s} \quad (2.3.9)$$

$$M_9 c_9 \frac{dt_9}{d\tau} = q_{8,9} - q_{9,10} \quad (2.3.10)$$

$$M_{10} c_{10} \frac{dt_{10}}{d\tau} = q_{9,10} - q_{10,11} \quad (2.3.11)$$

$$M_{11} c_{11} \frac{dt_{11}}{d\tau} = q_{10,11} - q_{11,12} \quad (2.3.12)$$

$$M_{12} c_{12} \frac{dt_{12}}{d\tau} = q_{11,12} - q_{12,okk} - q_{12,oks} \quad (2.3.13)$$

Plyn v peci

$$M_{13}c_{13} \frac{dt_{13}}{d\tau} = q_{3,13k} + q_{8,13k} - q_{13,14k} \quad (2.3.14)$$

Snímač teploty

$$M_{14}c_{14} \frac{dt_{14}}{d\tau} = q_{13,14k} + q_{3,14s} + q_{8,14s} \quad (2.3.15)$$

Celkem 14 obyčejných diferenciálních rovnic 1.řádu.

Celkem 22 relací pro stanovení tepelných toků.

2.3.12 Relace pro tepelné toky

$$q_{el} = q_{el}(\tau) \quad (2.3.16)$$

$$q_{1,2} = S_{1,2}(t_1 - t_2)/(\ell_2/2\lambda_2) \quad (2.3.17)$$

$$q_{2,3} = S_{2,3}(t_2 - t_3)/(\ell_2/2\lambda_2 + \ell_3/2\lambda_3) \quad (2.3.18)$$

$$q_{3,13k} = S_{3,13}(t_3 - t_{13})\alpha_{k3} \quad (2.3.19)$$

$$q_{3,8s} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{3,8} ((t_3 + 273)^4 - (t_8 + 273)^4) S_{3,8} \varphi_{3,8} \quad (2.3.20)$$

$$q_{3,14s} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{3,14} ((t_3 + 273)^4 - (t_{14} + 273)^4) S_{3,14} \varphi_{3,14} \quad (2.3.21)$$

$$q_{1,4} = S_{1,4}(t_1 - t_4)/(\ell_4/2\lambda_4) \quad (2.3.22)$$

$$q_{4,5} = S_{4,5}(t_4 - t_5)/(\ell_4/2\lambda_4 + \ell_5/2\lambda_5) \quad (2.3.23)$$

$$q_{5,6} = S_{5,6}(t_5 - t_6)/(\ell_5/2\lambda_5 + \ell_6/2\lambda_6) \quad (2.3.24)$$

$$q_{6,7} = S_{6,7}(t_6 - t_7)/(\ell_6/2\lambda_6 + \ell_7/2\lambda_7) \quad (2.3.25)$$

$$q_{7,okk} = S_{7,ok}(t_7 - t_{ok})\alpha_{k7} \quad (2.3.26)$$

$$q_{7,oks} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{7,ok} ((t_7 + 273)^4 - (t_{ok} + 273)^4) S_{7,ok} \varphi_{7,ok} \quad (2.3.27)$$

$$q_{8,9} = S_{8,9}(t_8 - t_9)/(\ell_8/\lambda_8 + \ell_9/2\lambda_9) \quad (2.3.28)$$

$$q_{8,13k} = S_{8,13}(t_8 - t_{13})\alpha_{k8} \quad (2.3.29)$$

$$q_{8,14s} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{8,14} ((t_8 + 273)^4 - (t_{14} + 273)^4) S_{8,14} \varphi_{8,14} \quad (2.3.30)$$

$$q_{9,10} = S_{9,10}(t_9 - t_{10})/(\ell_9/2\lambda_9 + \ell_{10}/2\lambda_{10}) \quad (2.3.31)$$

$$q_{10,11} = S_{10,11} (t_{10} - t_{11}) / (\ell_{10} / 2\lambda_{10} + \ell_{11} / 2\lambda_{11}) \quad (2.3.32)$$

$$q_{11,12} = S_{11,12} (t_{11} - t_{12}) / (\ell_{11} / 2\lambda_{11} + \ell_{12} / 2\lambda_{12}) \quad (2.3.33)$$

$$q_{12,okk} = S_{12,ok} (t_{12} - t_{ok}) \alpha_{k12} \quad (2.3.34)$$

$$q_{12,oks} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{12,ok} ((t_{12} + 273)^4 - (t_{ok} + 273)^4) S_{12,ok} \varphi_{12,ok} \quad (2.3.35)$$

$$q_{13,14k} = S_{13,14} (t_{13} - t_{14}) \alpha_{k14} \quad (2.3.36)$$

$$q_{ok} = q_{7,okk} + q_{7,oks} + q_{12,okk} + q_{12,oks} \quad (2.3.37)$$

2.3.13 Závěr

Shora popsaný matematický model je vhodný pro numerické simulační výpočty tepelných procesů, probíhajících při ohřevu a chlazení elektrických muflových pecí. Umožňuje získat podrobné informace o časovém průběhu teplot a zejména tepelných toků, které zjistit měřením na skutečné peci je obtížné, ne-li nemožné.

Výsledky simulací se shora popsaným modelem prokázaly velmi dobrou shodu s měřenými výsledky provedených na skutečných pecích.

Použité prameny: [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [21], [25], [26], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [43].

2.4 Experimentální verifikace výsledků modelové simulace ohřívacích cyklů na elektrických muflových pecích

2.4.1 Úvod

V předchozí kapitole jsem popsal matematický model obecné elektrické muflové pece. Zde se již zabývám konkrétním řešením reálných modelů. První je muflová ohřívací pec se šamotovou muflí a tepelnou izolací z lehčeného šamotu (MODEL I). Druhou variantou je pec s muflí z karbidu křemíku SiC a tepelnou izolací z vláknitých keramických desek typu Sibrál (MODEL II). Dále zde uvádím výsledky simulací stejných ohřívacích cyklů provedených matematickým modelem a porovnávám je s průběhy naměřených hodnot na reálných pecích.

V závěru provedu vyhodnocení experimentů a simulací.

Parametry zařízení jsou čerpány z technických popisů modelů, viz kap. 2.2.

2.4.2 Technická realizace experimentů na pecích

Pece byly připojeny na zdroj proměnného napětí tvořený odbočkovým transformátorem s přepínatelnými odbočkami 220 V, 180 V a 155 V. Příkon do topného systému byl realizován jednotkovým skokem s konstantní hodnotou napájecího napětí po celou dobu experimentu, viz obr.1.3.1.

Odpor topného článku je teplotně závislý, mírně roste s teplotou materiálu, což znamená, že se zvyšující se teplotou jeho výkon klesá.

Maximální dovolenou teplotu v pecích stanovili výrobci na 1100°C. Aby nebyla tato hodnota při experimentech překročena, použil jsem regulátor s dvoupolohovou regulací (ON/OFF), který udržoval teplotu v peci na této hodnotě. Ustálený stav, při mnou použité hodnotě konstantního výkonu, by dosáhl vyšší hodnoty než je max. povolená teplota udaná výrobcem. Pomocí tohoto regulátoru nemohla být max. hodnota překročena.

Po skončení experimentu byla pec vypnuta a začalo samovolné chladnutí z teploty 1100°C.

Při experimentech byla zaznamenána:

- teplota v peci,
- teplota vnějšího povrchu pece,
- elektrické napětí na svorkách topného článku,
- elektrický proud protékající topným článkem.

Na následujících obrázcích jsou uvedeny záznamy z měření na modelu I a modelu II.

2.4.3 Simulace ohřevu pomocí matematického modelu

Vzhledem k odlišnému uložení topného článku v obou modelech byly provedeny úpravy v soustavě stavových diferenciálních rovnic a v relacích pro tepelné toky.

2.4.3.1 Soustava stavových diferenciálních rovnic teplot pro model I a model II

- a) U modelu I – pec ze šamotových materiálů je topná spirála zalitá v mazanině obalující mufli. V tomto případě zahrnují hmotnost spirály i hmotnost mazaniny do M_1 a přenos z ní do mufle i do okolní izolace uvažují vedením.



Obr. 2.4.1 MODEL I – šamotová mufle

- b) U modelu II - pec sibral + SiC, kde topná spirála volně leží v prostoru mezi muflí a sibralovými deskami uvažují přenos tepla sáláním ze spirály na mufli q_{12} , ze spirály na sibral q_{14} a z mufle na sibral q_{24} . Konvekce je zanedbána.



Obr. 2.4.2 MODEL II – mufle z SiC

Pro přehlednost uvádím upravené vztahy pro model I a II.

Topná spirála

$$M_1 c_1 \frac{dt_1}{d\tau} = q_{el} - q_{1,2} - q_{1,4} \quad (2.4.1)$$

Model I - mufle ze šamotu:

$$M_2 c_2 \frac{dt_2}{d\tau} = q_{1,2} - q_{2,3} \quad (2.4.2)$$

Model II - mufle z SiC:

$$M_2 c_2 \frac{dt_2}{d\tau} = q_{1,2} - q_{2,3} - q_{2,4} \quad (2.4.3)$$

$$M_3 c_3 \frac{dt_3}{d\tau} = q_{2,3} - q_{3,8s} - q_{3,13k} - q_{3,14s} \quad (2.4.4)$$

Vyzdívka bočních stěn + stropu + nístěje:

Model I:

$$M_4 c_4 \frac{dt_4}{d\tau} = q_{1,4} - q_{4,5} \quad (2.4.5)$$

Model II:

$$M_4 c_4 \frac{dt_4}{d\tau} = q_{1,4} + q_{2,4} - q_{4,5} \quad (2.4.6)$$

$$M_5 c_5 \frac{dt_5}{d\tau} = q_{4,5} - q_{5,6} \quad (2.4.7)$$

$$M_6 c_6 \frac{dt_6}{d\tau} = q_{5,6} - q_{6,7} \quad (2.4.8)$$

$$M_7 c_7 \frac{dt_7}{d\tau} = q_{6,7} - q_{7,okk} - q_{7,oks} \quad (2.4.9)$$

Vyzdívka dveří + zadní stěny

$$M_8 c_8 \frac{dt_8}{d\tau} = q_{3,8s} - q_{8,9} - q_{8,13k} - q_{8,14s} \quad (2.4.10)$$

$$M_9 c_9 \frac{dt_9}{d\tau} = q_{8,9} - q_{9,10} \quad (2.4.11)$$

$$M_{10} c_{10} \frac{dt_{10}}{d\tau} = q_{9,10} - q_{10,11} \quad (2.4.12)$$

$$M_{11} c_{11} \frac{dt_{11}}{d\tau} = q_{10,11} - q_{11,12} \quad (2.4.13)$$

$$M_{12} c_{12} \frac{dt_{12}}{d\tau} = q_{11,12} - q_{12,okk} - q_{12,oks} \quad (2.4.14)$$

Plyn v peci

$$M_{13} c_{13} \frac{dt_{13}}{d\tau} = q_{3,13k} + q_{8,13k} - q_{13,14k} \quad (2.4.15)$$

Snímač teploty

$$M_{14} c_{14} \frac{dt_{14}}{d\tau} = q_{13,14k} + q_{3,14s} + q_{8,14s} \quad (2.4.16)$$

2.4.3.2 Relace pro tepelné toky

Příkon do pece je ovlivněn změnou měrného odporu topného článku podle teploty t_1 a může být regulován podle teploty termočlánku t_{14} , případně měněn podle času τ .

$$\mathbf{q}_{el} = \mathbf{q}_{el}(\tau, t_1, t_{14}) \quad (2.4.17)$$

Model I – v šamotu tok $q_{2,4}$ není:

$$\mathbf{q}_{1,2} = \mathbf{S}_{1,2}(t_1 - t_2)/(\ell_1/2\lambda_1 + \ell_2/2\lambda_2) \quad (2.4.18)$$

$$\mathbf{q}_{1,4} = \mathbf{S}_{1,4}(t_1 - t_4)/(\ell_1/2\lambda_1 + \ell_4/2\lambda_4) \quad (2.4.19)$$

Model II - ze sibralu a SiC:

$$\mathbf{q}_{1,2} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{1,2} ((t_1 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4) \mathbf{S}_{1,2} \varphi_{1,2} \quad (2.4.20)$$

$$\mathbf{q}_{1,4} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{1,4} ((t_1 + 273)^4 - (t_4 + 273)^4) \mathbf{S}_{1,4} \varphi_{1,4} \quad (2.4.21)$$

$$\mathbf{q}_{2,4} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{2,4} ((t_2 + 273)^4 - (t_4 + 273)^4) \mathbf{S}_{2,4} \varphi_{2,4} \quad (2.4.22)$$

Dále pro obě provedení platí :

$$\mathbf{q}_{2,3} = \mathbf{S}_{2,3}(t_2 - t_3)/(\ell_2/2\lambda_2 + \ell_3/2\lambda_3) \quad (2.4.23)$$

$$\mathbf{q}_{3,13k} = \mathbf{S}_{3,13}(t_3 - t_{13})\alpha_{k3} \quad (2.4.24)$$

$$\mathbf{q}_{3,8s} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{3,8} ((t_3 + 273)^4 - (t_8 + 273)^4) \mathbf{S}_{3,8} \varphi_{3,8} \quad (2.4.25)$$

$$\mathbf{q}_{3,14s} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{3,14} ((t_3 + 273)^4 - (t_{14} + 273)^4) \mathbf{S}_{3,14} \varphi_{3,14} \quad (2.4.26)$$

$$\mathbf{q}_{4,5} = \mathbf{S}_{4,5}(t_4 - t_5)/(\ell_4/2\lambda_4 + \ell_5/2\lambda_5) \quad (2.4.27)$$

$$\mathbf{q}_{5,6} = \mathbf{S}_{5,6}(t_5 - t_6)/(\ell_5/2\lambda_5 + \ell_6/2\lambda_6) \quad (2.4.28)$$

$$\mathbf{q}_{6,7} = \mathbf{S}_{6,7}(t_6 - t_7)/(\ell_6/2\lambda_6 + \ell_7/2\lambda_7) \quad (2.4.29)$$

$$\mathbf{q}_{7,okk} = \mathbf{S}_{7,ok}(t_7 - t_{ok})\alpha_{k7} \quad (2.4.30)$$

$$\mathbf{q}_{7,oks} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{7,ok} ((t_7 + 273)^4 - (t_{ok} + 273)^4) \mathbf{S}_{7,ok} \varphi_{7,ok} \quad (2.4.31)$$

$$\mathbf{q}_{8,9} = \mathbf{S}_{8,9}(t_8 - t_9)/(\ell_8/\lambda_8 + \ell_9/2\lambda_9) \quad (2.4.32)$$

$$\mathbf{q}_{8,13k} = \mathbf{S}_{8,13}(t_8 - t_{13})\alpha_{k8} \quad (2.4.33)$$

$$\mathbf{q}_{8,14s} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{8,14} ((t_8 + 273)^4 - (t_{14} + 273)^4) \mathbf{S}_{8,14} \varphi_{8,14} \quad (2.4.34)$$

$$q_{9,10} = S_{9,10} (t_9 - t_{10}) / (\ell_9 / 2\lambda_9 + \ell_{10} / 2\lambda_{10}) \quad (2.4.35)$$

$$q_{10,11} = S_{10,11} (t_{10} - t_{11}) / (\ell_{10} / 2\lambda_{10} + \ell_{11} / 2\lambda_{11}) \quad (2.4.36)$$

$$q_{11,12} = S_{11,12} (t_{11} - t_{12}) / (\ell_{11} / 2\lambda_{11} + \ell_{12} / 2\lambda_{12}) \quad (2.4.37)$$

$$q_{12,okk} = S_{12,ok} (t_{12} - t_{ok}) \alpha_{k12} \quad (2.4.38)$$

$$q_{12,oks} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{12,ok} ((t_{12} + 273)^4 - (t_{ok} + 273)^4) S_{12,ok} \varphi_{12,ok} \quad (2.4.39)$$

$$q_{13,14k} = S_{13,14} (t_{13} - t_{14}) \alpha_{k14} \quad (2.4.40)$$

$$q_{ok} = q_{7,okk} + q_{7,oks} + q_{12,okk} + q_{12,oks} \quad (2.4.41)$$

Časový průběh tepelného procesu v reálné peci je v matematickém modelu simulován trajektorií pohybu v 15ti rozměrném časoprostoru, jehož souřadnice jsou $(\tau, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14})$.

2.4.4 Fyzikální parametry materiálů

Topná spirála – kanthal A1

Model I – kanthal + šamotová mazanina

Měrná hmotnost ρ (kg/m ³):	1071
Měrné teplo c (J/kgK):	934+0,671t
Tepelná vodivost λ (W/mK):	0,417+8,69* 10 ⁻⁵ t
Průměr topné spirály (m):	14 * 10 ⁻³
Průměr drátu (m)	2 * 10 ⁻³
Délka drátu (m)	30,3

Model II

Hmotnost M (kg):	0,281
Měrné teplo c (J/kgK):	460
emisivita ε (-):	0,7
Průměr topné spirály (m):	0,01
Průměr drátu (m):	14 * 10 ⁻⁴
Délka drátu (m):	25,75

Mufle

Model I – hutný šamot SII

Měrná hmotnost ρ (kg/m ³):	1900
Měrné teplo c (J/kgK):	934+0,671 t
Tepelná vodivost λ (W/mK):	1,12+1,75 * 10 ⁻⁴ t
Emisivita ε (-)	0,85- * 10 ⁻⁴ t

Model II – karbid křemíku SiC

Měrná hmotnost ρ (kg/ m ³):	3100
Měrné teplo c (J/kgK):	642+1,648 t -15 * 10 ⁻⁴ t^2 +5 * 10 ⁻⁷ t^3
Tepelná vodivost λ (W/mK):	60
Emisivita ε (-):	0,93

Vyzdívka

Model I – pěnošamot

Měrná hmotnost ρ (kg/ m ³):	732
Měrné teplo c (J/kgK):	934+0,671 t
Tepelná vodivost λ (W/mK):	0,188+3,91 * 10 ⁻⁵ t
Emisivita ε (-):	0,85 -1 * 10 ⁻⁴ t
Ocelový plášť (mm):	2,5
Emisivita Al nátěru ε (-):	0,5

Model II – desky ze sibralu (Ceraboard)

Měrná hmotnost ρ (kg/ m ³):	310*1,5
Měrné teplo c (J/kgK):	724+1,21 t - 5 * 10 ⁻⁴ t^2
Tepelná vodivost λ (W/mK):	0,078 -1,74 * 10 ⁻⁵ t +1,65 * 10 ⁻⁷ t^2
Emisivita ε (-):	0,56

Plyn v peci - dusík

Měrná hmotnost ρ (kg/ m ³):	1,25* 273/(t_{13} +273)
Měrné teplo c (J/kgK):	1043

Teploměr – plášťový termočlánek NiCr-Ni

Měrná hmotnost ρ (kg/ m ³):	4000
Měrné teplo c (J/kgK):	700
Emisivita ε (-):	0,65+1,22 * 10 ⁻⁴ t

Geometrie modelu I

Vnější rozměry pece

Šířka (m): 0,520 Výška (m): 0,520 Hloubka (m): 0,600

Vnější rozměry mufle

Šířka (m): 0,210 Výška (m): 0,160 Hloubka (m): 0,415

Vnitřní rozměry mufle

Šířka (m): 0,180 Výška (m): 0,130 Hloubka (m): 0,400

Tloušťka izolační vyzdívky bočních stěn, (m): 0,135

Tloušťka izolační vyzdívky stropu a nístěje (m): 0,160

Tloušťka izolační vyzdívky dveří a zadní stěny (m): 0,140

Tloušťka ocelového pláště (m): 0,0025

Plášťový termočlánek

Průměr (m): 0,002

Délka zasunutí do prostoru pece (m): 0,05

Geometrie modelu II

Vnější rozměry pece

Šířka (m): 0,325 Výška (m): 0,245 Hloubka (m): 0,320

Vnější rozměry mufle

Šířka (m): 0,185 Výška (m): 0,105 Hloubka (m): 0,290

Vnitřní rozměry mufle

Šířka (m): 0,175 Výška (m): 0,095 Hloubka (m): 0,280

Tloušťka izolační vyzdívky bočních stěn, stropu a nístěje (m): 0,060

Tloušťka izolační vyzdívky dveří a zadní stěny (m): 0,040

Plášťový termočlánek

Průměr (m): 0,002

Délka zasunutí do prostoru pece (m): 0,05

2.4.5 Způsob stanovení hodnot veličin α , ε , φ

2.4.5.1 Součinitele konvekčního přestupu tepla α_{ki}

Jak uvnitř pece, tak na jejím vnějším povrchu nedochází k vynucenému proudění plynu, takže v obou případech můžeme počítat s přirozenou konvekcí.

Pro stanovení součinitelů konvekčního přestupu se používají kritériální rovnice podobnostní analýzy.

Vzhledem k tomu, že s rostoucí teplotou rapidně klesá podíl konvekce oproti radiaci, nebudu pro konvekci provádět detailní výpočet a použiji hodnoty z podobných případů, ověřené praxí.

Pro přirozenou konvekci na vnějším povrchu pece lze počítat s $\alpha_k = 4$ (W/m²K). Na vnitřním povrchu pece $\alpha_k = 8$ (W/m²K).

2.4.5.2 Poměrná emisivita ε_{ij}

V uzavřené soustavě dvou izotermních ploch s poměrnými emisivitami ε_1 a ε_2 platí:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.4.42)$$

2.4.5.3 Úhlové součinitele ozáření φ_{ij}

Pro uzavřenou soustavu dvou izotermních ploch F_1 a F_2 platí:

$$\varphi_{1,2} = 1 \quad (2.4.43)$$

$$\varphi_{1,2} = \frac{F_1}{F_2} \quad (2.4.44)$$

$$F_{1,2} = F_1 \quad (2.4.45)$$



Obr. 2.4.3 Těleso s nevydutým povrchem je uvnitř tělesa s vydutým povrchem.



Obr. 2.4.4 Uzavřená soustava zakřivených vydutých a nevydutých povrchů.

Tyto vztahy použijeme pro stanovení

$$\varphi_{3,8} = \frac{S_8}{S_3} \quad (2.4.46)$$

$$S_{3,8} = S_8 \quad (2.4.47)$$

Snímač teploty je ze všech stran obklopen sálajícími plochami S_3 a S_8 .

Pro úhlové součinitele $\varphi_{3,14}$ a $\varphi_{8,14}$

$$\varphi_{3,14} + \varphi_{8,14} = 1 \quad (2.4.48)$$

S matematickými modely šamotové i sibalové pece byly provedeny simulace napodobující změřené ohřevy, výdrže a chladnutí skutečných pecí.

2.4.6 Číselné hodnoty údajů do modelu pece:

2.4.6.1 Model I – izolační vyzdívka i mufla ze šamotových materiálů, plášť ocelový

Pol.	Jednotky	Hodnoty
M ₁	(kg)	8,02
M ₂	(kg)	7,16
M ₃	(kg)	1,00
M ₄	(kg)	1,36
M ₅	(kg)	25,75
M ₆	(kg)	53,40
M ₇	(kg)	24,27
M ₈	(kg)	0,43
M ₉	(kg)	4,60
M ₁₀	(kg)	10,77
M ₁₁	(kg)	12,98
M ₁₂	(kg)	10,51
M ₁₃	(kg)	$3,19/(273+t_{13})$
M ₁₄	(kg)	0,000628
C ₁	(J/kgK)	$934+0,671t_1$
C ₂	(J/kgK)	$934+0,671t_2$
C ₃	(J/kgK)	$934+0,671t_3$
C ₄	(J/kgK)	$934+0,671t_4$
C ₅	(J/kgK)	$934+0,671t_5$
C ₆	(J/kgK)	$934+0,671t_6$
C ₇	(J/kgK)	490
C ₈	(J/kgK)	$934+0,671t_8$
C ₉	(J/kgK)	$934+0,671t_9$
C ₁₀	(J/kgK)	$934+0,671t_{10}$
C ₁₁	(J/kgK)	$934+0,671t_{11}$
C ₁₂	(J/kgK)	490

C_{13}	(J/kgK)	1043
C_{14}	(J/kgK)	700
$S_{1,2}$	(m ²)	0,296
$S_{2,3}$	(m ²)	0,254
$S_{3,8}$	(m ²)	0,10
$S_{3,13}$	(m ²)	0,248
$S_{3,14}$	(m ²)	0,000314
$S_{1,4}$	(m ²)	0,360
$S_{4,5}$	(m ²)	0,385
$S_{5,6}$	(m ²)	0,727
$S_{6,7}$	(m ²)	1,226
$S_{7,ok}$	(m ²)	1,248
$S_{8,9}$	(m ²)	0,11
$S_{8,13}$	(m ²)	0,10
$S_{8,14}$	(m ²)	0,000314
$S_{9,10}$	(m ²)	0,204
$S_{10,11}$	(m ²)	0,356
$S_{11,12}$	(m ²)	0,530
$S_{12,ok}$	(m ²)	0,540
$S_{13,14}$	(m ²)	0,000314
l_1	(m)	0,020
l_2	(m)	0,013
l_3	(m)	0,002
l_4	(m)	0,005
l_5	(m)	0,059
l_6	(m)	0,069
l_7	(m)	0,0025
l_8	(m)	0,005
l_9	(m)	0,040
l_{10}	(m)	0,0525

ℓ_{11}	(m)	0,040
ℓ_{12}	(m)	0,0025
λ_1	(W/mK)	$0,417+8,69 \cdot 10^{-5}t_1$
λ_2	(W/mK)	$1,12+1,75 \cdot 10^{-4}t_2$
λ_3	(W/mK)	$1,12+1,75 \cdot 10^{-4}t_3$
λ_4	(W/mK)	$0,188+3,91 \cdot 10^{-5}t_4$
λ_5	(W/mK)	$0,188+3,91 \cdot 10^{-5}t_5$
λ_6	(W/mK)	$0,188+3,91 \cdot 10^{-5}t_6$
λ_7	(W/mK)	65
λ_8	(W/mK)	$0,188+3,91 \cdot 10^{-5}t_8$
λ_9	(W/mK)	$0,188+3,91 \cdot 10^{-5}t_9$
λ_{10}	(W/mK)	$0,188+3,91 \cdot 10^{-5}t_{10}$
λ_{11}	(W/mK)	$0,188+3,91 \cdot 10^{-5}t_{11}$
λ_{12}	(W/mK)	65
α_{k3}	(W/m ² K)	8
α_{k7}	(W/m ² K)	4
α_{k8}	(W/m ² K)	8
α_{k12}	(W/m ² K)	4
α_{k14}	(W/m ² K)	8
ε_3	(-)	$0,85-1 \cdot 10^{-4}t_3$
ε_7	(-)	0,5
ε_8	(-)	$0,85-1 \cdot 10^{-4}t_8$
ε_{12}	(-)	0,5
ε_{14}	(-)	0,65
ε_{17}	(-)	0,8
$\varepsilon_{3,8}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_8 - 1)$
$\varepsilon_{3,14}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_{14} - 1)$
$\varepsilon_{7,ok}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_7 + 1/\varepsilon_{17} - 1)$
$\varepsilon_{8,14}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_8 + 1/\varepsilon_{14} - 1)$
$\varepsilon_{12,ok}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_{12} + 1/\varepsilon_{17} - 1)$

$\varphi_{3,8}$	(-)	0,22
$\varphi_{3,14}$	(-)	0,4
$\varphi_{7,ok}$	(-)	1
$\varphi_{8,14}$	(-)	0,6
$\varphi_{12,ok}$	(-)	1

Příkon do šamotové pece pro různá napájecí napětí:

Napětí (V)	Příkon (W)
220	$3572-0,233*t_1$
180	$2434-0,146*t_1$
155	$1828-0,095*t_1$

2.4.6.2 Model II – izolační vyzdívka pece ze sibralu, muflle z karbidu uhlíku

Pol.	Jednotka	Hodnota
M_1	(kg)	0,281
M_2	(kg)	1,48
M_3	(kg)	0,94
M_4	(kg)	$0,060*1,5$
M_5	(kg)	$0,942*1,5$
M_6	(kg)	$3,881*1,5$
M_7	(kg)	$0,634*1,5$
M_8	(kg)	$0,014*1,5$
M_9	(kg)	$0,209*1,5$
M_{10}	(kg)	$0,419*1,5$
M_{11}	(kg)	$0,400*1,5$
M_{12}	(kg)	$0,156*1,5$
M_{13}	(kg)	$1,59/(273+t_{13})$
M_{14}	(kg)	0,000628
c_1	(J/kgK)	460
c_2	(J/kgK)	$642+1,648t_2 -1,5* 10^{-3}t_2^2+5* 10^{-7}t_2^3$

C ₃	(J/kgK)	$642+1,648t_3 -1,5* 10^{-3}t_3^2+5* 10^{-7}t_3^3$
C ₄	(J/kgK)	$724+1,21t_4-5* 10^{-4}t_4^2$
C ₅	(J/kgK)	$724+1,21t_5-5* 10^{-4}t_5^2$
C ₆	(J/kgK)	$724+1,21t_6-5* 10^{-4}t_6^2$
C ₇	(J/kgK)	$724+1,21t_7-5* 10^{-4}t_7^2$
C ₈	(J/kgK)	$724+1,21t_8-5* 10^{-4}t_8^2$
C ₉	(J/kgK)	$724+1,21t_9-5* 10^{-4}t_9^2$
C ₁₀	(J/kgK)	$724+1,21t_{10}-5* 10^{-4}t_{10}^2$
C ₁₁	(J/kgK)	$724+1,21t_{11}-5* 10^{-4}t_{11}^2$
C ₁₂	(J/kgK)	$724+1,21t_{12}-5* 10^{-4}t_{12}^2$
C ₁₃	(J/kgK)	1043
C ₁₄	(J/kgK)	700
S _{1,2}	(m ²)	0,113/2
S _{2,3}	(m ²)	0,151
S _{3,8}	(m ²)	0,033
S _{3,13}	(m ²)	0,151
S _{3,14}	(m ²)	0,000314
S _{1,4}	(m ²)	0,113/2
S _{2,4}	(m ²)	0,168
S _{4,5}	(m ²)	0,195
S _{5,6}	(m ²)	0,246
S _{6,7}	(m ²)	0,396
S _{7,ok}	(m ²)	0,410
S _{8,9}	(m ²)	0,058
S _{8,13}	(m ²)	0,033
S _{8,14}	(m ²)	0,000314
S _{9,10}	(m ²)	0,077
S _{10,11}	(m ²)	0,116
S _{11,12}	(m ²)	0,142
S _{12,ok}	(m ²)	0,159

$S_{13,14}$	(m ²)	0,000314
l_2	(m)	0,003
l_3	(m)	0,002
l_4	(m)	0,001
l_5	(m)	0,015
l_6	(m)	0,039
l_7	(m)	0,005
l_8	(m)	0,001
l_9	(m)	0,010
l_{10}	(m)	0,014
l_{11}	(m)	0,010
l_{12}	(m)	0,005
λ_2	(W/mK)	60
λ_3	(W/mK)	60
λ_4	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_4 + 1,65 * 10^{-7} t_4^2$
λ_5	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_5 + 1,65 * 10^{-7} t_5^2$
λ_6	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_6 + 1,65 * 10^{-7} t_6^2$
λ_7	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_7 + 1,65 * 10^{-7} t_7^2$
λ_8	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_8 + 1,65 * 10^{-7} t_8^2$
λ_9	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_9 + 1,65 * 10^{-7} t_9^2$
λ_{10}	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_{10} + 1,65 * 10^{-7} t_{10}^2$
λ_{11}	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_{11} + 1,65 * 10^{-7} t_{11}^2$
λ_{12}	(W/mK)	$\lambda = 0,078 - 1,74 * 10^{-5} t_{12} + 1,65 * 10^{-7} t_{12}^2$
α_{k3}	(W/m ² K)	8
α_{k7}	(W/m ² K)	4
α_{k8}	(W/m ² K)	8
α_{k12}	(W/m ² K)	4
α_{k14}	(W/m ² K)	8
ε_1	(-)	0,7
ε_2	(-)	0,93

ε_3	(-)	0,93
ε_4	(-)	0,56
ε_7	(-)	0,56
ε_8	(-)	0,56
ε_{12}	(-)	0,56
ε_{14}	(-)	0,65
ε_{17}	(-)	0,8
$\varepsilon_{1,2}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$
$\varepsilon_{2,4}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_2 + 1/\varepsilon_4 - 1)$
$\varepsilon_{1,4}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_4 - 1)$
$\varepsilon_{3,8}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_8 - 1)$
$\varepsilon_{3,14}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_{14} - 1)$
$\varepsilon_{7,ok}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_7 + 1/\varepsilon_{17} - 1)$
$\varepsilon_{8,14}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_8 + 1/\varepsilon_{14} - 1)$
$\varepsilon_{12,ok}$	(-)	$1/(1/\varepsilon_{12} + 1/\varepsilon_{17} - 1)$
$\varphi_{1,2}$	(-)	1
$\varphi_{1,4}$	(-)	1
$\varphi_{2,4}$	(-)	1
$\varphi_{3,8}$	(-)	0,22
$\varphi_{3,14}$	(-)	0,4
$\varphi_{7,ok}$	(-)	1
$\varphi_{8,14}$	(-)	0,6
$\varphi_{12,ok}$	(-)	1

Poznámka: U hmotností M_4 až M_{12} je *1,5, protože u skutečné pece vážil sibral 10kg, zatímco v modelu byla hmotnost jen 6,7 kg.

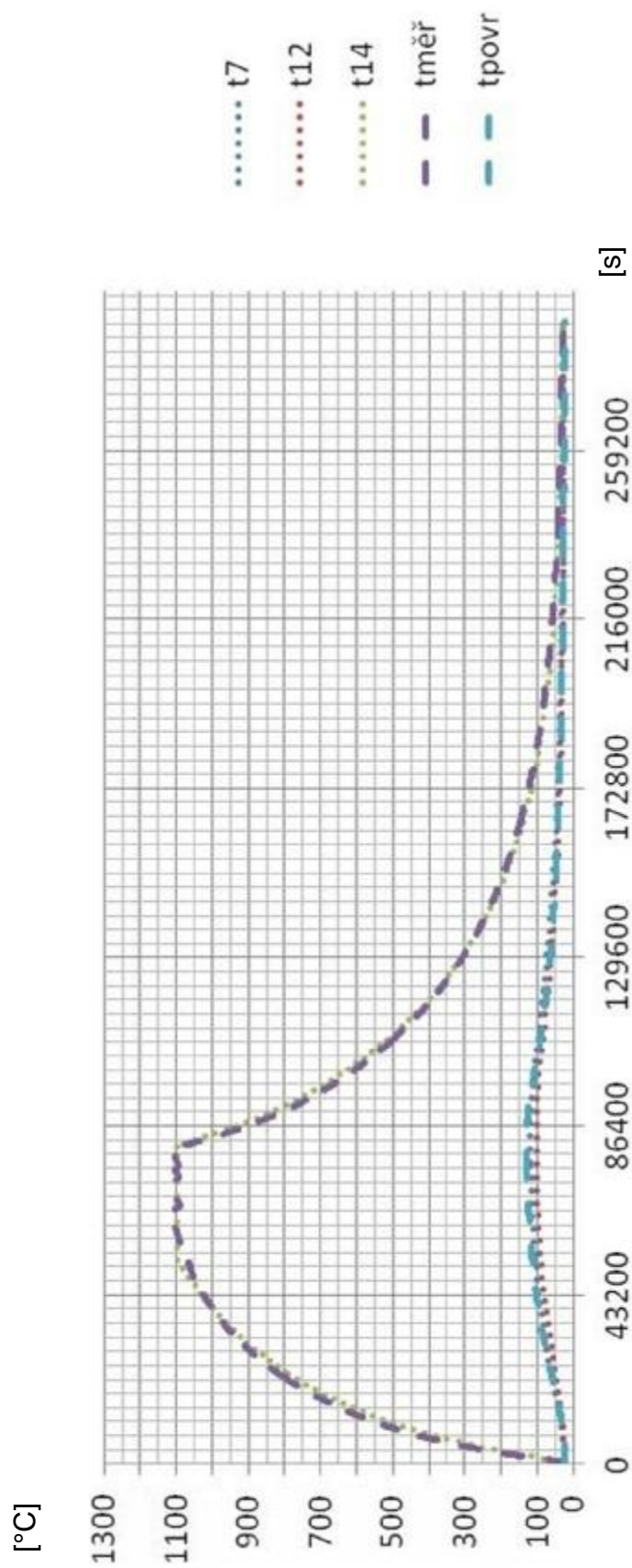
Příkon do sibalové pece pro různá napájecí napětí:

Napětí (V)	Příkon (W)
220	$1,00 \cdot (1989 - 0,063 \cdot t_1)$
200	$0,83 \cdot (1989 - 0,063 \cdot t_1)$
180	$0,67 \cdot (1989 - 0,063 \cdot t_1)$
155	$1023 - 0,062 \cdot t_1$

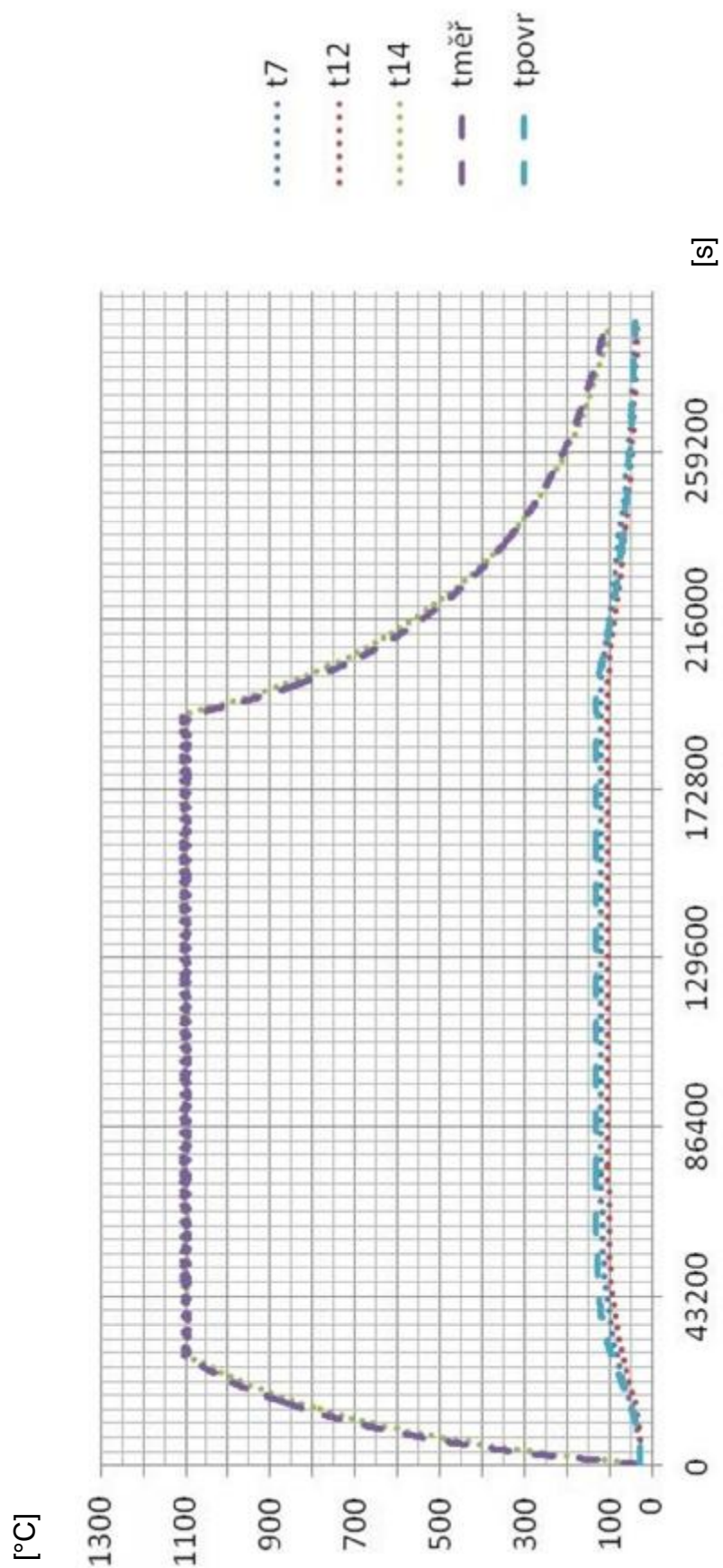
2.4.7 *Grafické vyjádření výsledků simulací*

S modely šamotové i sibalové pece byly provedeny simulace napodobující změřené ohřevy, výdrže a chladnutí skutečných pecí.

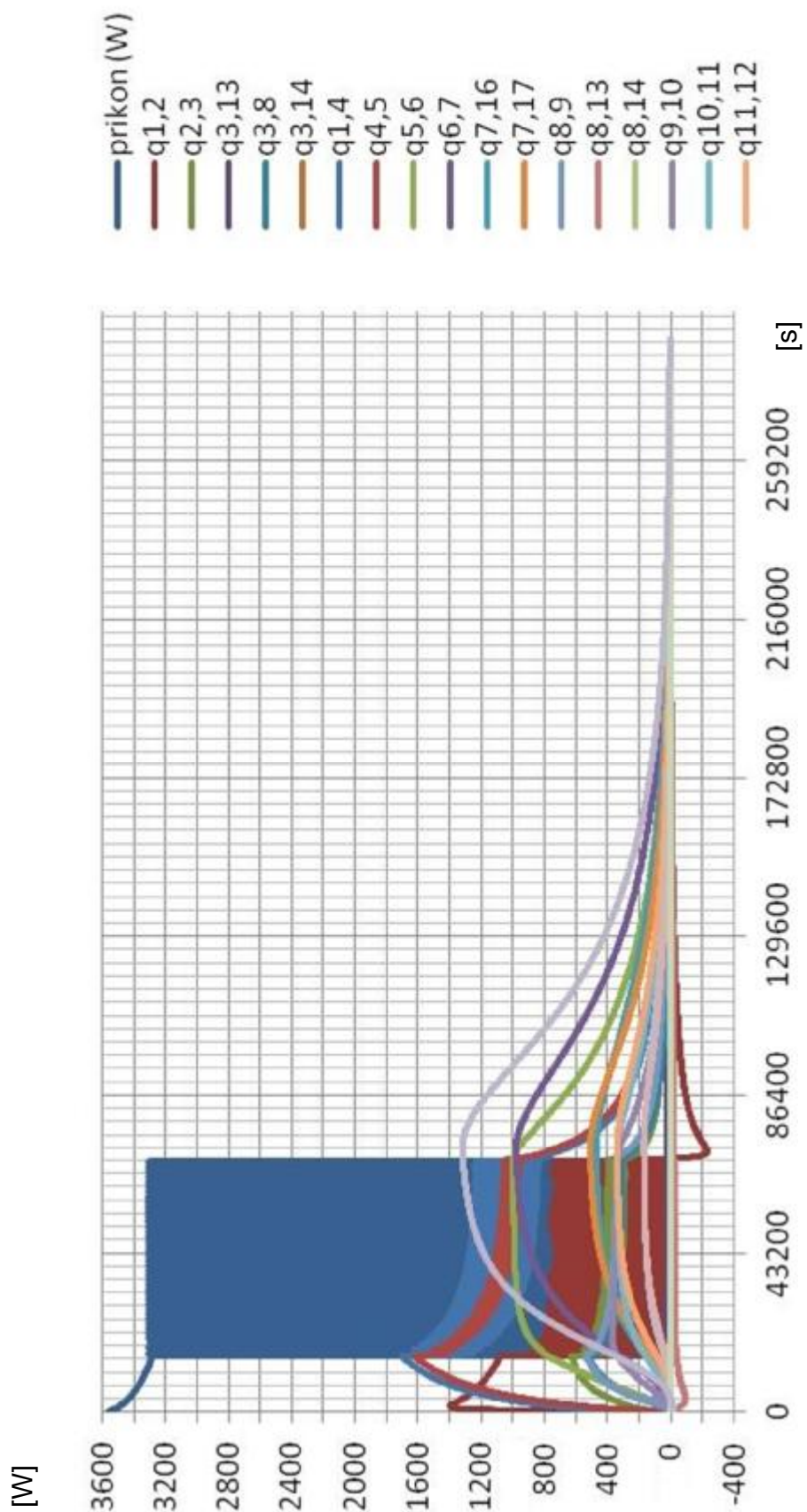
Průběhy teplot změřené na peci jsou čárkovaně, jim odpovídající průběhy vypočtené jsou tečkovaně.



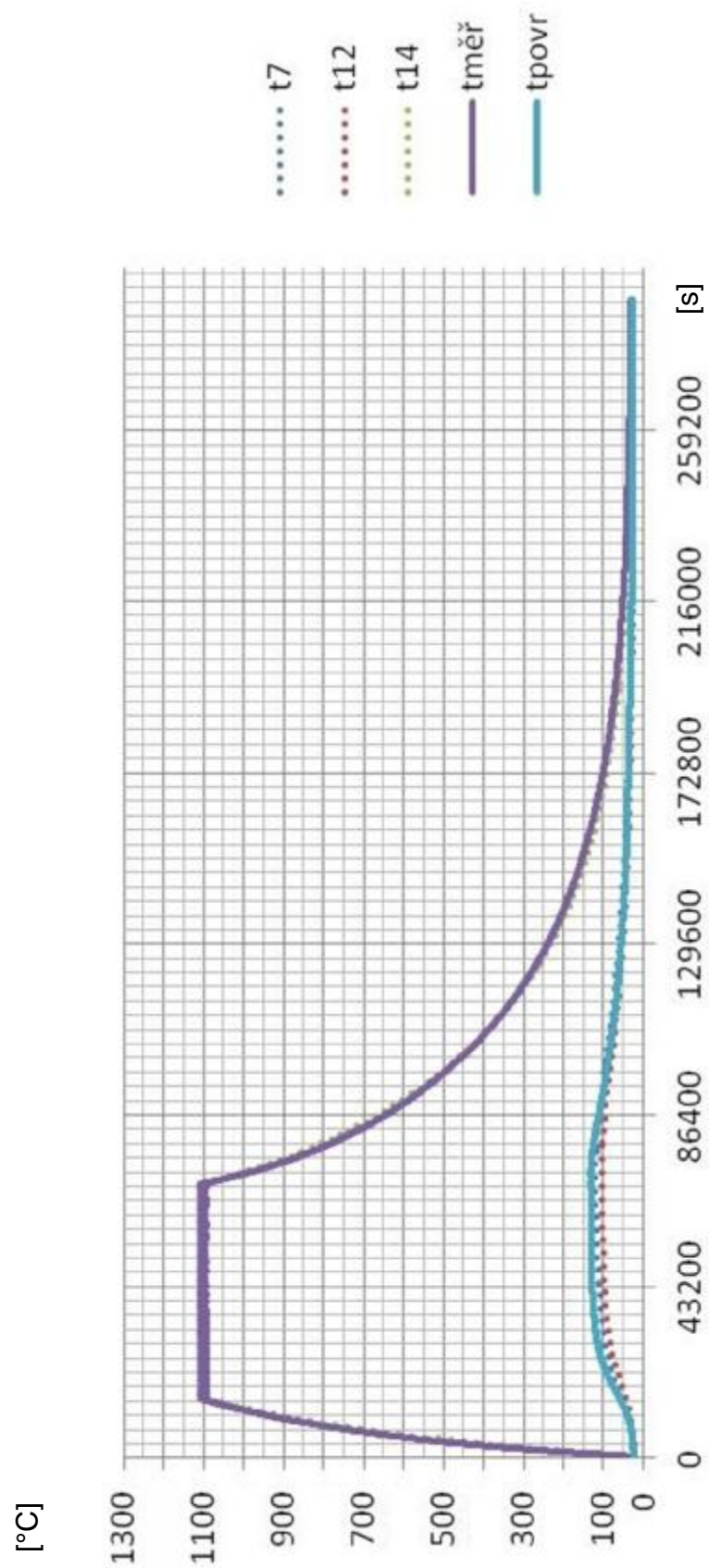
Obr. 2.4.5 Model I - šamotová pec 155 V – vybrané teploty



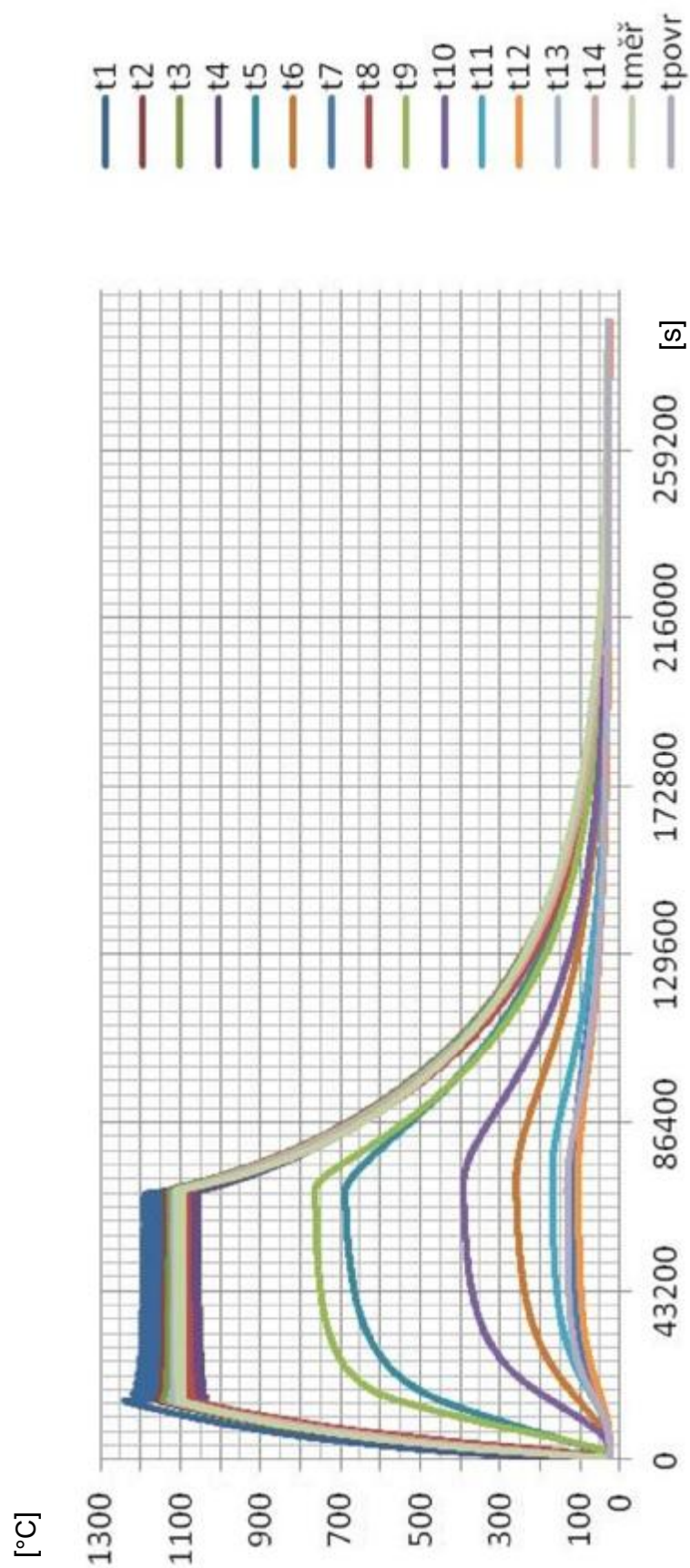
Obr. 2.4.6 Model I - šamotová pec 180 V – vybrané teploty



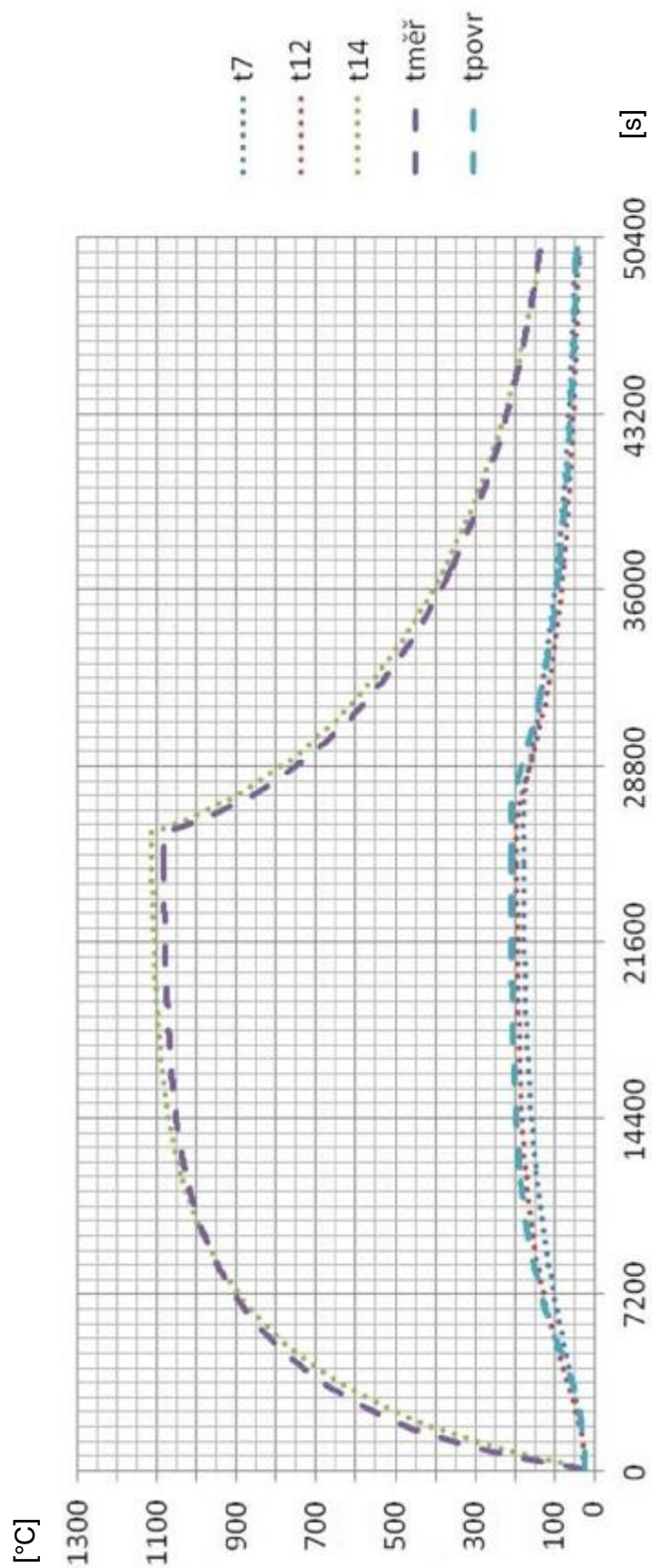
Obr. 2.4.7 Model I - šamotová pec 220 V – tepelné toky



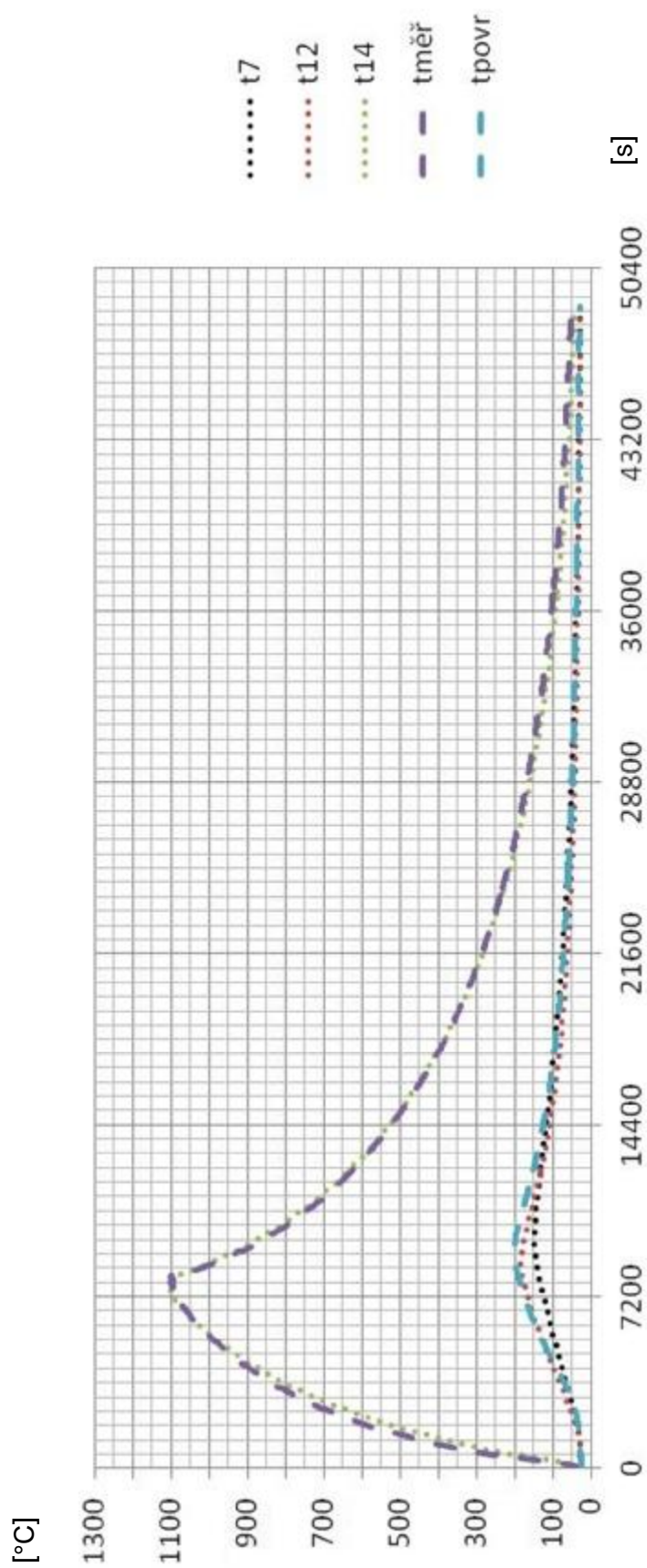
Obr. 2.4.8 Model I - šamotová pec 220 V – vybrané teploty



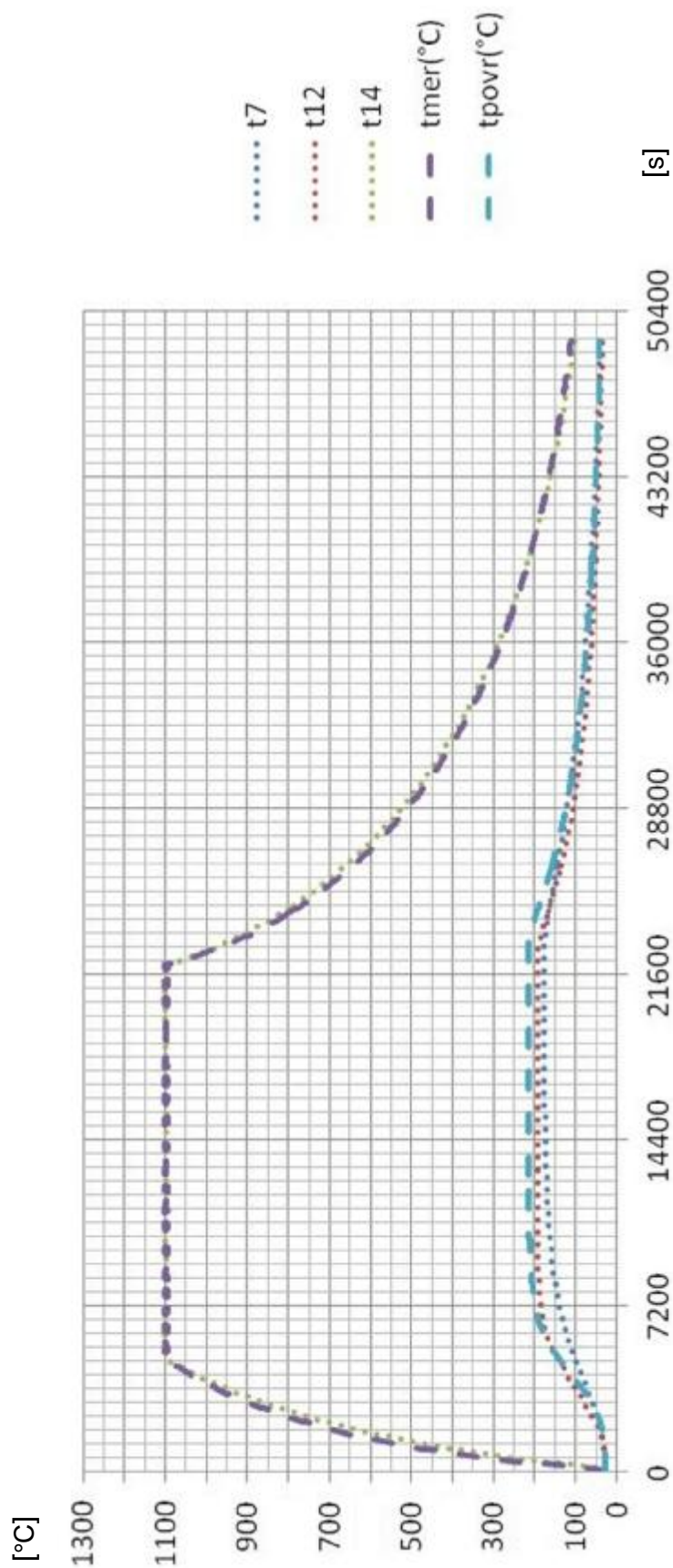
Obr. 2.4.9 Model I - šamotová pec 220 V –teploty



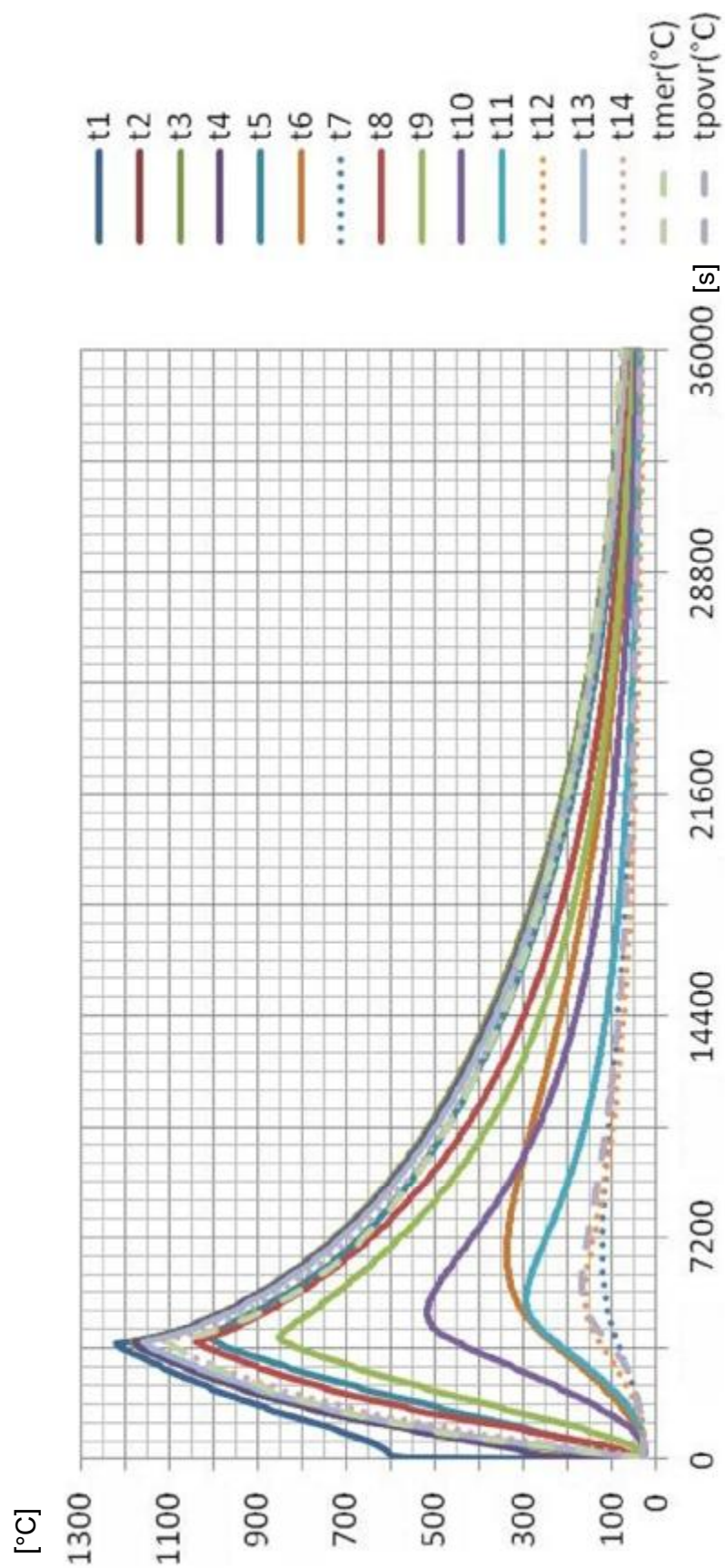
Obr. 2.4.10 Model II - sibalová pec 155 V – vybrané teploty



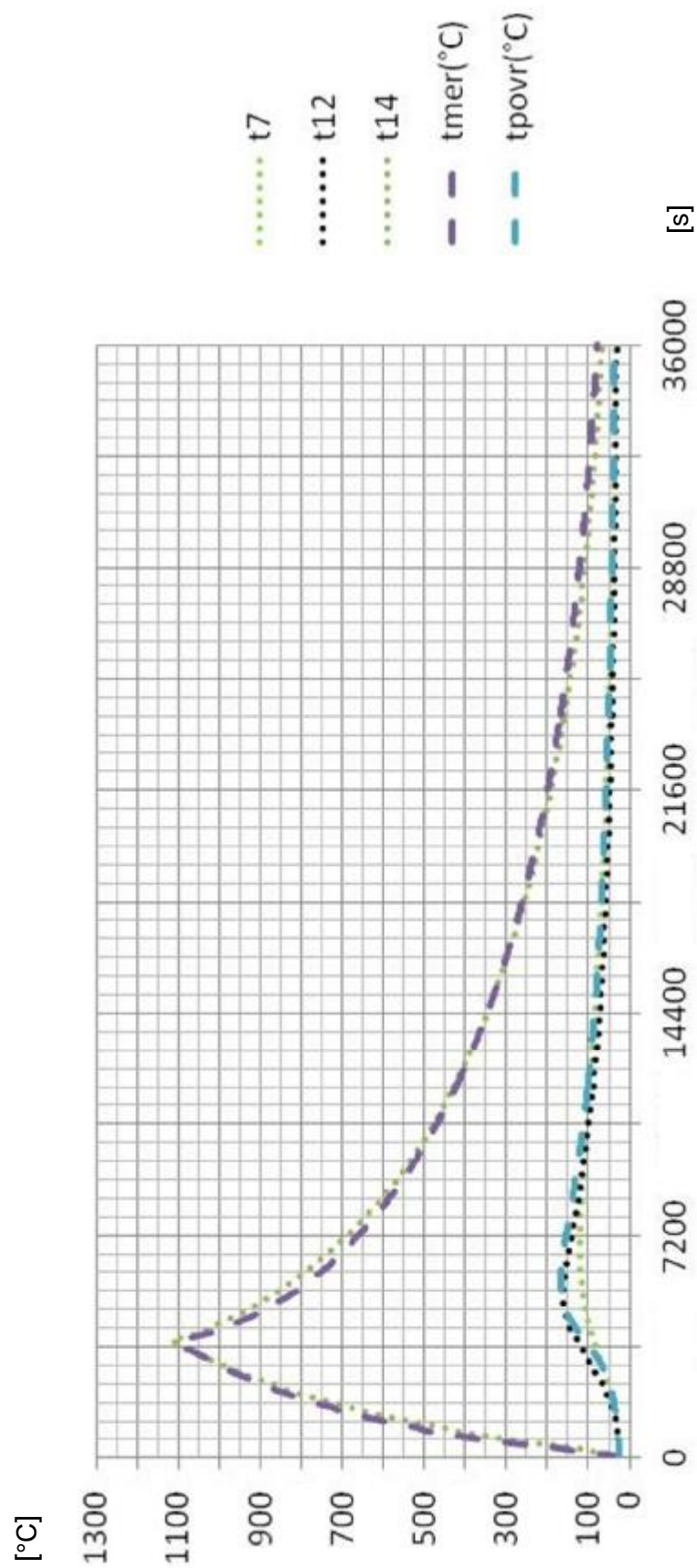
Obr. 2.4.11 Model II - sibalová pec 180 V – vybrané teploty



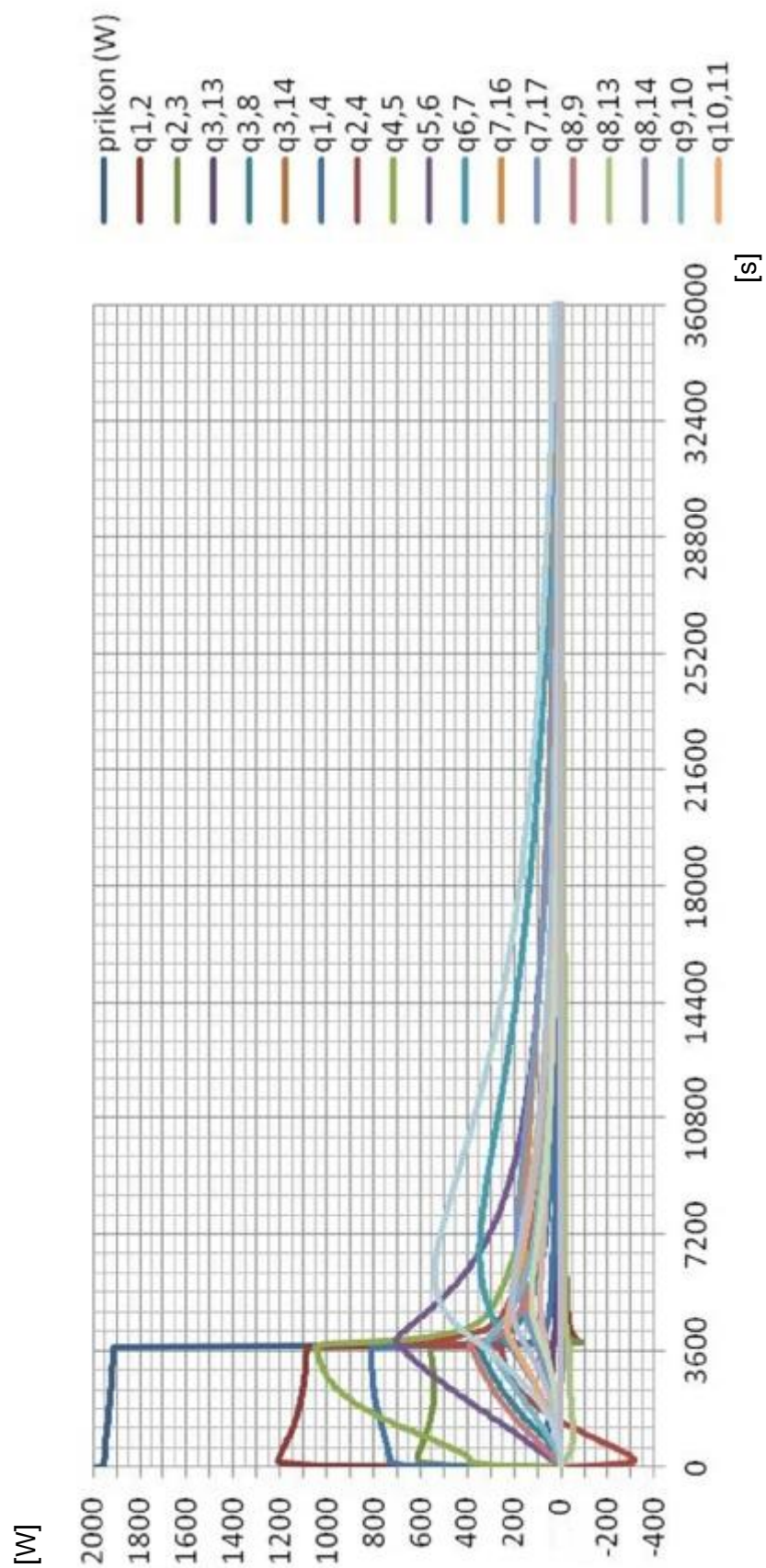
Obr. 2.4.12 Model II - sibalová pec 200 V – vybrané teploty



Obr. 2.4.13 Model II - sibalová pec 220 V –teploty



Obr. 2.4.14 Model II - sibalová pec 220 V –vybrané teploty



Obr. 2.4.15 Model II - sibalová pec 220 V – tepelné toky

2.4.8 *Vyhodnocení experimentů a simulací*

Z porovnání průběhů teplot změřených na reálných pecích s průběhy vypočtenými simulacemi na matematických modelech vyplývá velmi dobrá shoda.

Lze tedy usuzovat, že navržený matematický model ohřevu a chlazení v elektrické muflové peci dobře napodobuje tyto procesy, probíhající na skutečných pecích.

Obecně platí, že simulace na počítačových modelech dynamických systémů mají řadu předností oproti experimentům na reálných zařízeních. Je na nich možné zkoušet chování zařízení, která se teprve projektují a reálně dosud neexistují. Rovněž tak je možno nasimulovat stavy nebo procesy, které by na skutečném zařízení byly buď riskantní, nebo příliš nákladné.

Matematické modely s sebou ale nesou i značná rizika, že jejich chování bude výrazně odlišné od reality, zejména pokud byla k jejich sestavení použita nepřípustná zjednodušení, nebo se uplatnily chybné představy jejich tvůrců.

Použité prameny: [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [21], [25], [26], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [43].

3. Topné systémy muflových pecí a jejich řízení

3.1 *Současný stav poznání*

3.1.1 *Materiály používané na výrobu topných článků v odporových pecích*

Existuje široký sortiment materiálů, které můžeme použít pro více či méně náročné aplikace. Mají vlastnosti potřebné pro zvládnutí těchto nejrůznějších aplikací. Materiály pro topné články se vyrábějí ve formě pásků, drátů nebo tyčí. Při výběru materiálů na topné články je nutno brát v úvahu následující skutečnosti:

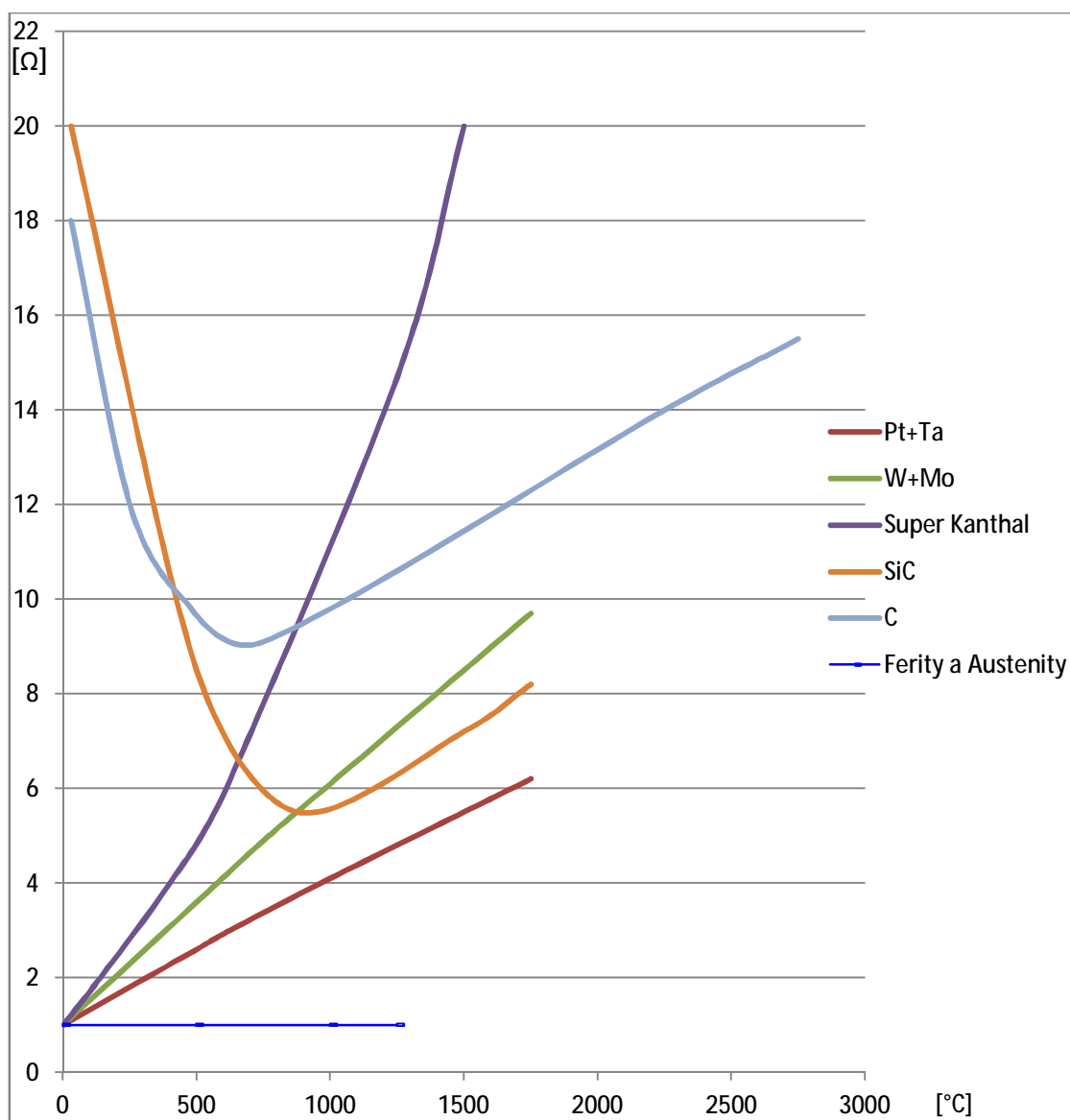
- pracovní teplotu v pracovním prostoru pece
- materiál použitý na pracovní vyzdívku, která může přijít do přímého kontaktu s topným článkem nebo nepříznivě ovlivnit složení atmosféry v pracovním prostoru pece
- složení řízené atmosféry v pracovním prostoru pece (při použití ochranné atmosféry)
- všechny aspekty, které mohou nepříznivě ovlivnit správnou funkci topných článků (druh vsázky, vibrace, stárnutí atd.)
- možnosti řízení výkonů těchto topných článků

Materiál pro topné články má vykazovat co největší měrný odpor, malý teplotní odporový součinitel a odolnost vůči atmosférám, jež se v pecích vyskytují, a hlavně odolnost proti působení vysokých teplot.

Volba topných článků pro ohřev v elektrotepelných odporových zařízeních není jednoduchá záležitost a s tím se objevují další problémy. Jeden z těchto problémů, který je nutno řešit již při samotném návrhu a následně při regulaci, jsou elektrické vlastnosti použitých materiálů pro výrobu topných článků. Pro zajímavost uvádím elektrické vlastnosti materiálu KANTHAL SUPER, patřící do skupiny tzv. cermetů.

Odpor materiálu KANTHAL SUPER se prudce zvyšuje s rostoucí teplotou. To znamená, že pokud budou články připojeny ke konstantnímu napětí, výkon bude vyšší při nízkých teplotách a bude se postupně snižovat s narůstající teplotou. Takto je tedy snížen čas potřebný k dosažení požadované pracovní teploty článku. Dále pak, jak se výkon článku snižuje, snižuje se tak i riziko přehřátí. Odpor materiálu KANTHAL SUPER se nemění se stářím ani při dlouhodobém zatížení při vysokých teplotách. Pouze v první fázi je malé snížení odporu asi o 5%. Díky těmto vlastnostem může být vadný článek jednoduše vyměněn za nový, aniž by byly ovlivněny vlastnosti ostatních zapojených článků.

Na obr. 3.1.1 uvádím závislosti odporů nejpoužívanějších materiálů na pracovní teplotě topného článku.

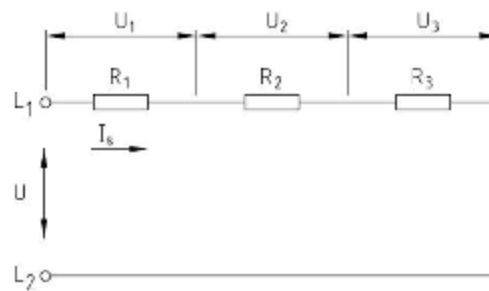


Obr. 3.1.1 Závislost odporu na teplotě materiálu topných článků

3.1.2 Zapojení topných článků v odporových pecích

Další problém, který je nutno řešit, je zapojení topných článků. Volba zapojení topných článků do série, paralelně, do hvězdy, do trojúhelníku nebo jejich různých modifikací ovlivňuje proud protékající těmito články a tím i jejich výkon. Proto zde uvedu základní zapojení a jejich napěťové, proudové a výkonové poměry.

3.1.2.1 Sériové zapojení topných článků



Obr. 3.1.2 Řazení topných článků do série

Pro toto zapojení platí:

Pro odpor:

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad [\Omega] \quad (3.1.1)$$

Pro napětí:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i \quad [V] \quad (3.1.2)$$

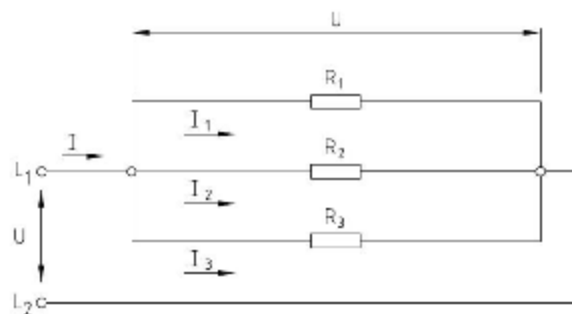
Pro proud:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad [A] \quad (3.1.3)$$

Pro výkon:

$$\frac{1}{P_c} = \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \frac{1}{P_3} + \dots + \frac{1}{P_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_i} \quad [W] \quad (3.1.4)$$

3.1.2.2 Paralelní zapojení topných článků:



Obr. 3.1.3 Řazení topných článků paralelně

Pro toto zapojení platí:

Pro odpor:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad [\Omega] \quad (3.1.5)$$

Pro napětí:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad [V] \quad (3.1.6)$$

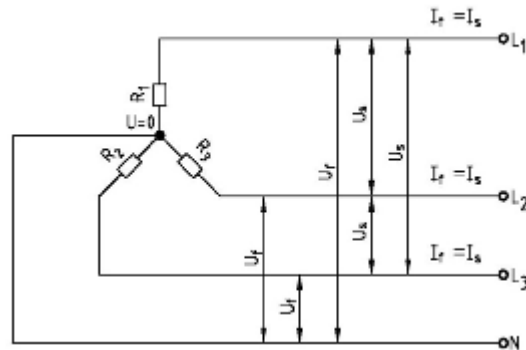
Pro proud:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i \quad [A] \quad (3.1.7)$$

Pro výkon:

$$P_c = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad [W] \quad (3.1.8)$$

3.1.2.3 Zapojení topných článků do hvězdy



Obr. 3.1.4 Zapojení topných článků do hvězdy

Pro toto zapojení platí:

Vztahy mezi fázovými a sdruženými hodnotami napětí a proudu

$$I_f = I_s \quad [A] \quad (3.1.9)$$

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad [V] \quad (3.1.10)$$

Pro jednotlivé fáze platí:

Příkon pro jednotlivé fáze:

Pomocí fázových hodnot napětí a proudu:

$$P'_y = U_f I_f = R I_f^2 = \frac{U_f^2}{R} \quad [W] \quad (3.1.11)$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu:

$$P'_y = \frac{U_s I_s}{\sqrt{3}} = R I_s^2 = R \left(\frac{U_s}{\sqrt{3}R} \right)^2 = \frac{U_s^2}{3R} \quad [W] \quad (3.1.12)$$

Pro 3 fáze společně:

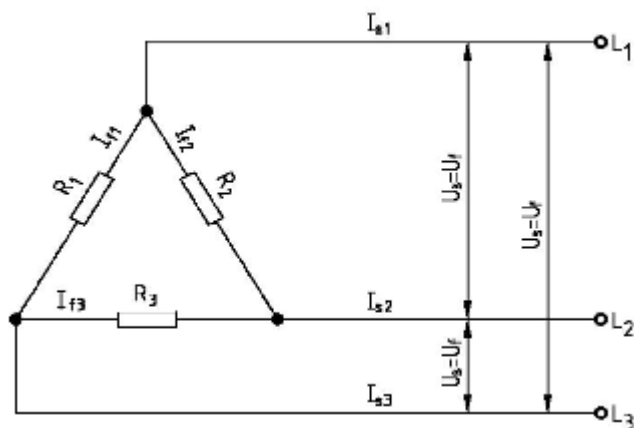
Pomocí fázových hodnot napětí a proudu

$$P_y = 3U_f I_f = 3R I_f^2 = \frac{3U_f^2}{R} \quad [W] \quad (3.1.13)$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu

$$P_y = \sqrt{3} U_s I_s = \sqrt{3} (\sqrt{3} R I_s) I_s = 3R I_s^2 = 3R \left(\frac{U_s}{\sqrt{3}R} \right)^2 = \frac{U_s^2}{R} \quad [W] \quad (3.1.14)$$

3.1.2.4 Zapojení topných článků do trojúhelníku



Obr. 3.1.5 Zapojení topných článků do trojúhelníku

Pro toto zapojení platí:

Vztahy mezi fázovými a sdruženými hodnotami napětí a proudu

$$U_f = U_s \quad [V] \quad (3.1.15)$$

$$I_f = \frac{I_s}{\sqrt{3}} \quad [A] \quad (3.1.16)$$

Pro jednotlivé fáze platí:

Příkon pro jednotlivé fáze:

Pomocí fázových hodnot napětí a proudu:

$$P'_\Delta = U_f I_f = R I_f^2 = \frac{U_s^2}{R} \quad [W] \quad (3.1.17)$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu:

$$P'_\Delta = U_s \frac{I_s}{\sqrt{3}} = \frac{R I_s^2}{3} = \frac{U_s^2}{R} \quad [W] \quad (3.1.18)$$

Pro 3 fáze společně platí:

Pomocí fázových hodnot napětí a proudu:

$$P_\Delta = 3 U_f I_f = 3 R I_f^2 = \frac{3 U_s^2}{R} \quad [W] \quad (3.1.19)$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu:

$$P_\Delta = \sqrt{3} U_s I_s = 3 R I_s^2 = \frac{3 U_s^2}{R} \quad [W] \quad (3.1.20)$$

3.1.3 Současné možnosti řízení výkonu topných článků

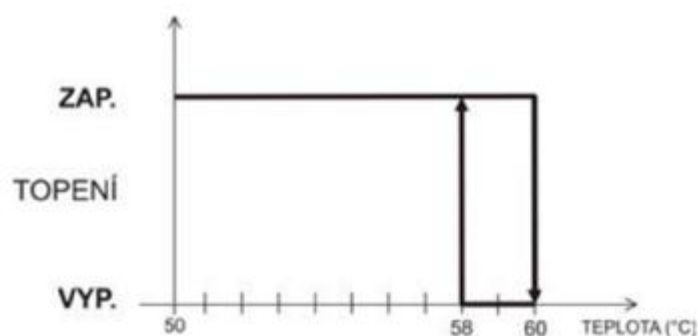
Silovým prvkem v regulačních obvodech elektrotepelných odporových zařízení s nepřímým ohřevem jsou spínací prvky. V teorii automatického řízení jsou označovány jako akční členy regulované soustavy. To znamená, že mluvíme o členu, který vykoná konkrétní zásah ovlivňující průběh regulované veličiny.

Spínání elektrických obvodů je nejčastějším jevem, který se v elektrotechnice vyskytuje. Spínací přístroje, které jsou pro tento účel konstruovány, prošly rozsáhlým technickým vývojem jak v oblasti elektromechanických přístrojů (kontaktní spínání), tak v oblasti elektronických spínacích přístrojů (bezkontaktní spínání). Z kontaktních přístrojů jsou nejpoužívanější stykače a z elektronických přístrojů jsou pro tento účel používány výkonové spínací jednotky (tyristorové jednotky) a SSR relé (Solid State Rele). Základním stavebním kamenem těchto elektronických spínačů a relé jsou výkonové diody, triaky, tyristory a tranzistory. Vlastnosti jednotlivých výkonových prvků se využívají podle požadavku kladených např. na systém řízení uvažovaného technologického procesu.

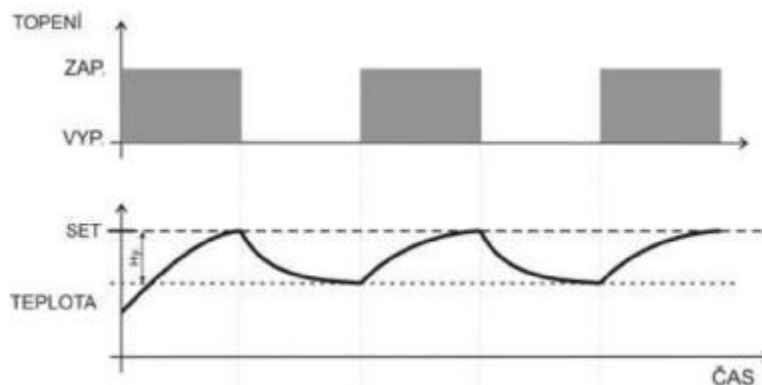
3.1.3.1 Regulace výkonu topných článků pomocí mechanických přístrojů

Omezené možnosti mechanických spínačů se projeví v možnostech použití při různých typech regulací teplotních procesů. Mechanických spínacích kombinací se nejčastěji používá při regulacích typu zapnuto/vypnuto (ON – OFF), které se vyznačují méně častým spínáním. Nejčastějším využitím je regulace na konstantní hodnotu, kdy se žádaná veličina (teplota) s časem nemění.

Základními parametry jsou zadaná hodnota regulované veličiny a její hystereze. Hystereze je vlastně necitlivost na změnu regulované veličiny. Na následujících obrázcích je názorně tento princip regulace vysvětlen.



Obr. 3.1.6 Způsob regulace ON/OFF



Obr. 3.1.7 Typický průběh teploty při regulaci ON/OFF

Rychle řízené procesy není možné zvládnout běžnou stykačovou kombinací. A tak se v praxi řeší tyto úlohy modernějšími technologiemi, kterým nečiní rychlé časové změny problémy. Přes velké množství záporných vlastností mají stykačové systémy mnoho vlastností kladných, díky kterým dochází k jejich využívání i dnes, zejména pro jednoduché procesy tepelného zpracování. Např. jmenujme hlavně nízkou cenu, malé rozměry nebo galvanické rozpojení obvodu po vypnutí.

3.1.3.2 Regulace výkonu topných článků pomocí elektronických přístrojů

Polovodičové přístroje jsou moderní spínací jednotky, které si rychle razí cestu do různých oblastí průmyslu. Obvody s těmito přístroji si získávají stále větší oblibu díky své dlouhé životnosti, malým rozměrům, možnosti montáže přímo do rozvaděče a absencí mechanických pohyblivých částí. Je nutno vyzdvihnout jejich odolnost k pracovnímu prostředí. Vzhledem k tomu, že jsou umístovány v rozvaděčích, jsou odolné proti vlhkosti a prachu. Vstupní obvody jsou dokonale odizolovány od výstupního obvodu, takže neexistuje zpětné ovlivňování vstupu. Jejich izolační schopnost je minimálně 2,5 - 4 kV a vazební kapacita mezi vstupem a výstupem nepřesahuje 10 pF.

Ovládání těchto jednotek je zpravidla pomocí vstupního unifikovaného signálu (0-10V , 2-10V, 0-20mA , 4-20mA). Dnes se stále více objevují přístroje ovládané pomocí komunikačního protokolu, jako jsou PROFIBUS, ETHERNET a další. Využití těchto protokolů s sebou přináší nemalé výhody při použití (např. možnost číst provozní veličiny přímo z přístroje, jako okamžitou hodnotu proudu a napětí atd). Tím je dán široký rozsah snadného přizpůsobení k různým systémům řízení.

Nejpoužívanějšími režimy spínání jsou cyklické spínání a fázové řízení. To přináší řadu výhod zejména při řízení průmyslových pecí. Další nespornou výhodou těchto obvodů, oproti klasickým kontaktním spínacím přístrojům, je kratší reakční doba, maximální zpoždění oproti vstupnímu signálu je 10 ms při 50 Hz.

Polovodičové přístroje jsou napětově přizpůsobeny pro spínání fázového nebo sdruženého napětí. Konstrukčně jsou provedeny pro spínání třífázové, dvojfázové nebo jednofázové zátěže.

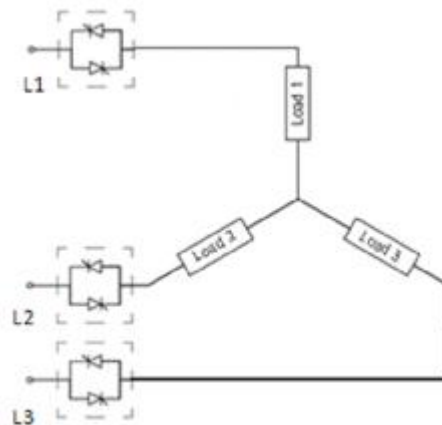
Oblast použití

Polovodičové přístroje jsou vhodné pro spínání odporové, kapacitní i induktivní zátěže. Každá z nich přináší určitá specifika.

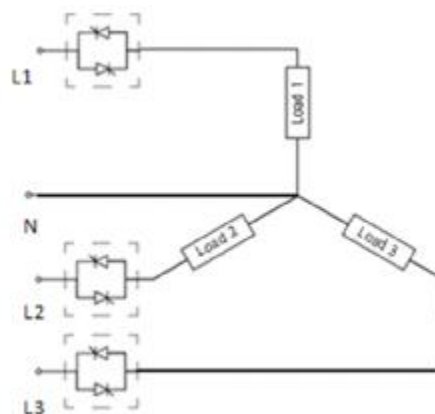
Mnou uvažovaná aplikace spínání zátěže v průmyslové elektrické peci je odporová zátěž. Jedná se o nejjednodušší případ aplikace spínání, zvláště, jedná-li se o zátěž s konstantní hodnotou odporu. Jednotka při spínání sleduje poměr di/dt , ten je v případě ohmické zátěže omezen pouze impedancí vedení a spínací charakteristikou spínacího prvku na výstupu. Při spínání větších proudů se doporučuje přidat malou sériovou indukčnost, čímž se omezí poměr di/dt . Dalším, velmi účinným způsobem omezení proudového nárazu je spínání v oblasti nulového napětí, kde nehrozí překročení zmiňovaného poměru.

3.1.3.2.1 Zapojení tyristorových jednotek v odporových pecích

Zapojení do hvězdy

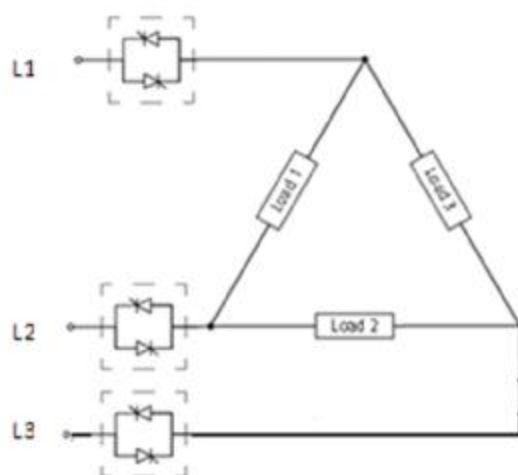


Obr. 3.1.8 Zapojení do hvězdy bez nulového vodiče

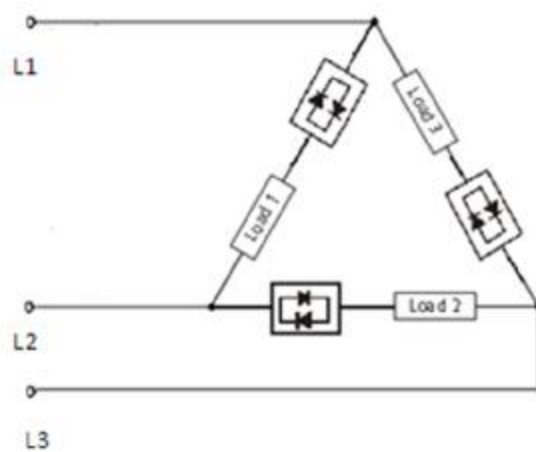


Obr. 3.1.9 Zapojení do hvězdy s nulovým vodičem

Zapojení do trojúhelníku



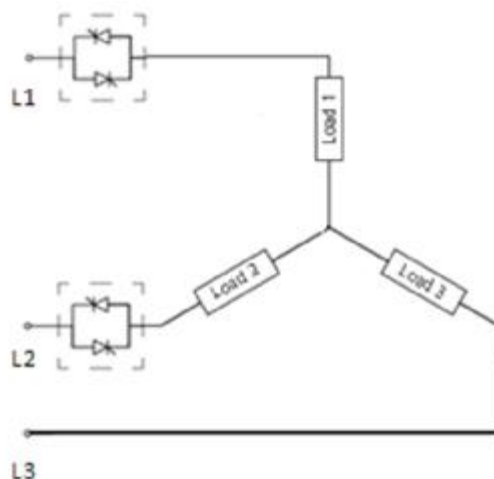
Obr. 3.1.10 Zapojení uzavřený trojúhelník



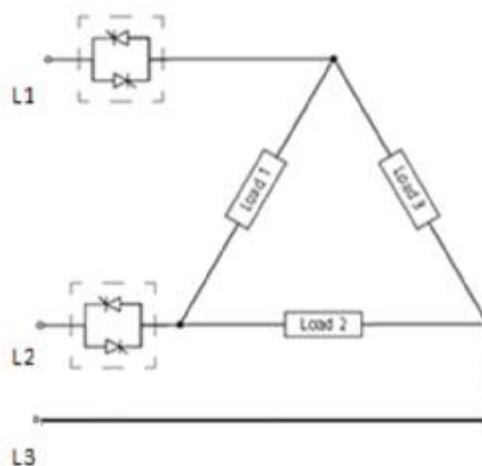
Obr. 3.1.11 Zapojení otevřený trojúhelník

Ekonomicky úsporná zapojení

Ekonomická úspora spočívá ve vynechání jednoho výkonového spínače v jedné fázi. To znamená o 1/3 menší náklady na výkonovou část. K tomu lze použít jen následující zapojení.



Obr. 3.1.12 Zapojení do hvězdy bez nulového vodiče (ekonomická varianta)

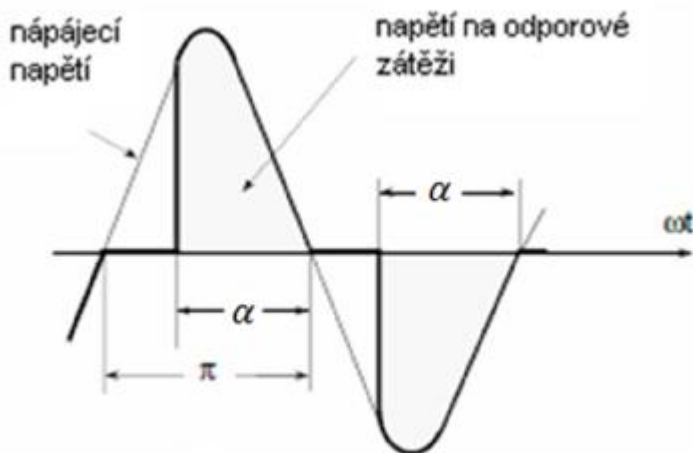


Obr. 3.1.13 Zapojení uzavřený trojúhelník (ekonomická varianta)

3.1.3.2.2 Způsoby řízení elektronických přístrojů

Fázové řízení

Tyristorové jednotky jsou taktéž schopné přijmout požadavek na výstupní výkon pomocí analogového signálu tak, aby podle něj dokázaly nastavit úhel otevření, jak je vidět na následujícím obrázku (obr.3.1 14). Vysoká rychlost spínání dovoluje sepnout v takto definovaný okamžik v obou půlvlnách.



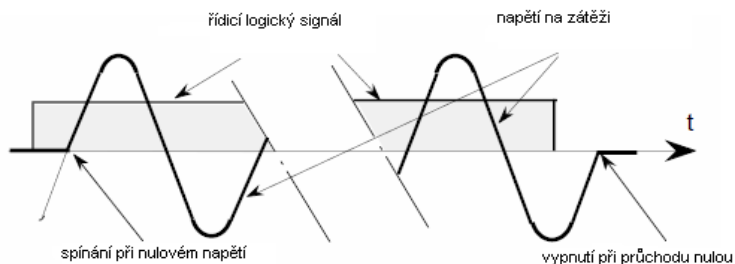
Obr. 3.1.14 Průběhy napětí na topném článku při fázovém řízení.

U čistě odporových zátěží tímto typem spínání vzniká značné elektromagnetické rušení, protože dochází k sepnutí skokovou změnou na určitou velikost napětí a tomu odpovídající velikost proudu. Vzniklé rušení je nutné odfiltrovat. Tento problém vlivem přechodových jevů odpadá u induktivních zátěží, pro něž je tak fázové řízení vhodnější.

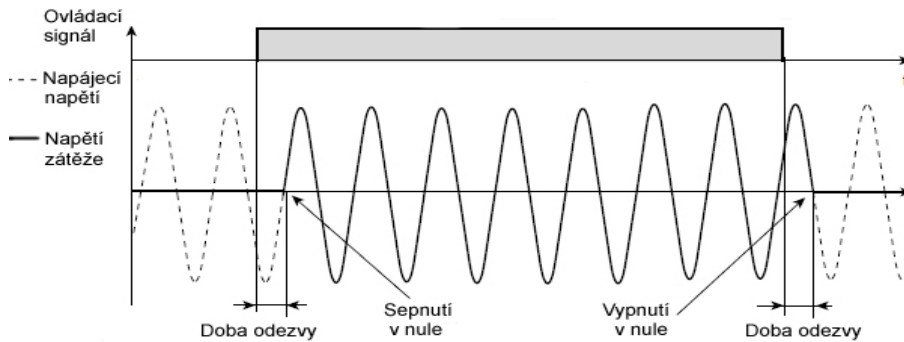
Cyklické ovládání

Spínání v nule

Klasický režim spínání v nule je založen, stejně jako u stykačů, na regulaci typu ON-OFF, kdy časový interval ovládacího signálu určuje dobu sepnutí tyristorové jednotky, a tudíž i dobu, po kterou působí napájecí napětí na zátěži. Oproti stykačům však elektronické systémy tyristorové jednotky zaručí sepnutí při nejbližším průchodu nulovou hodnotou napětí. Jak je zřejmé z následujících obrázků (obr.3.1.15 a obr. 3.1.16) od okamžiku náběžné hrany ovládacího signálu do okamžiku sepnutí a obdobně u sestupné hrany ovládacího signálu do vypnutí může vzniknout krátká prodleva. Tato prodleva nemůže ovlivnit teplotní setrvačnost soustavy (několik milisekund). Největší výhoda sepnutí v okamžiku průchodu napěťové nuly je ta, že zátěž bude při sepnutí protékat minimální proud, což zároveň zajistí i minimální elektromagnetické rušení.



Obr. 3.1.15 Průběh napětí na topném článku při spínání v nule – zapnutí a vypnutí.

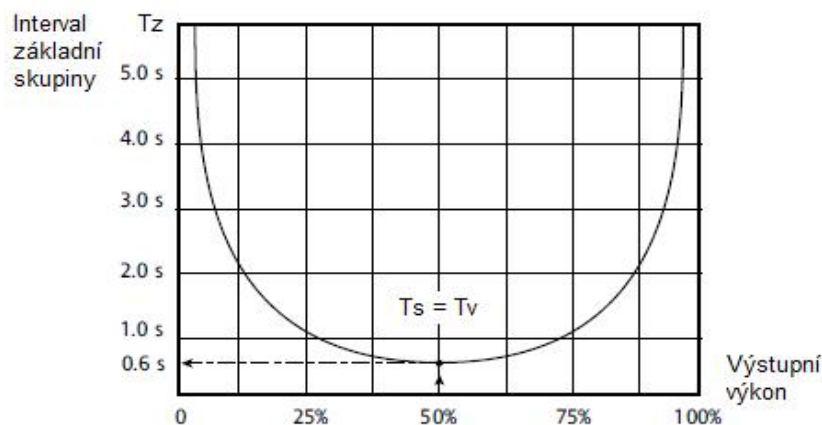


Obr. 3.1.16 Průběh napětí při spínání v nule na zátěži.

Vedle tyristorových jednotek, které pracují s klasickým režimem řízeným logickým signálem, jsou jednotky pracující v „BURST“ režimu, které jsou schopné přijmout požadavek výkonové regulace ve spojitém spektru ovládacího signálu. Typickým signálem bývá proudový rozsah 4 až 20 mA nebo napěťový rozsah 0 až 10 V. V uvedených rozsazích zpracovává jednotka požadavky na výstupní výkon dodávaný do zátěže lineárně, tzn. na dolních mezích je tyristorová jednotka rozpojena, v polovině rozsahu (12 mA resp. 5 V) je tedy výkon 50% a na horní mezi pak je do zátěže dodáván plný výkon. Tyristorová jednotka opět spíná při průchodu nulou, spínání je ale v tomto případě častější, protože bývá řízeno PID regulací a dochází při něm k vytvoření základní skupiny několika period síťového napětí.

Další možnosti nastavení tyristorové jednotky jsou intervaly základní periody, se kterou při regulaci pracuje. Toto dává možnosti následujícího výběru:

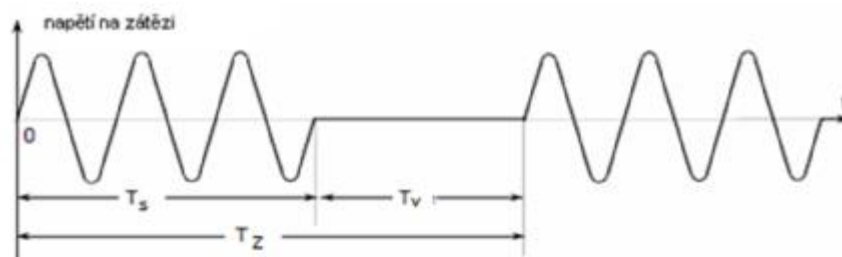
- pevné nastavení určitého počtu period síťového napětí
- variabilní nastavení počtu period síťového napětí (viz. obr. 3.1.17)



Obr. 3.1.17 Teoretický příklad variabilního nastavení intervalu skupiny síťových period.

Splnění požadavku na dodávaný výkon do zátěže je realizováno proporčním rozdělením intervalu základní skupiny T_z na dobu T_s , po kterou je tyristorová jednotka sepnuta, tzn. do zátěže je dodáván plný výkon, a na dobu T_v , po kterou je jednotka vypnuta. Na obr. 3.1.18 je

princiálně naznačen průběh napájení zátěže tyristorovou spínací jednotkou pracující v režimu tzv „BURST“.

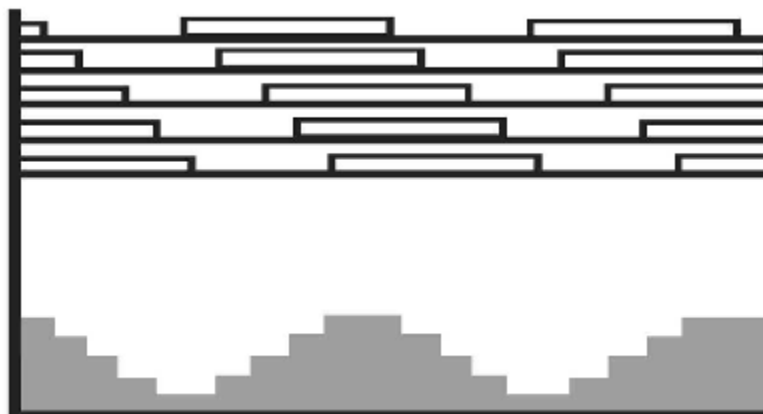


Obr. 3.1.18 Průběh napětí na topném článku v režimu „BURST“.

V současné době se začínají vyvíjet algoritmy, které napomáhají řešit problémy týkající se problémů při spínání mnoha zónových zařízení, které mají při regulaci nepříznivé dopady na energetickou soustavu. Zde uvádím dva způsoby, které se snaží tyto dopady zmírnit.

Sekvenční řízení

Jedna z metod, jak předcházet nárazům do sítě je sekvenční rozmístění okamžiku sepnutí tyristorových jednotek. Tato metoda však má také svoje nevýhody, zejména v situaci, kdy regulace požaduje nižší příkon do topného systému.

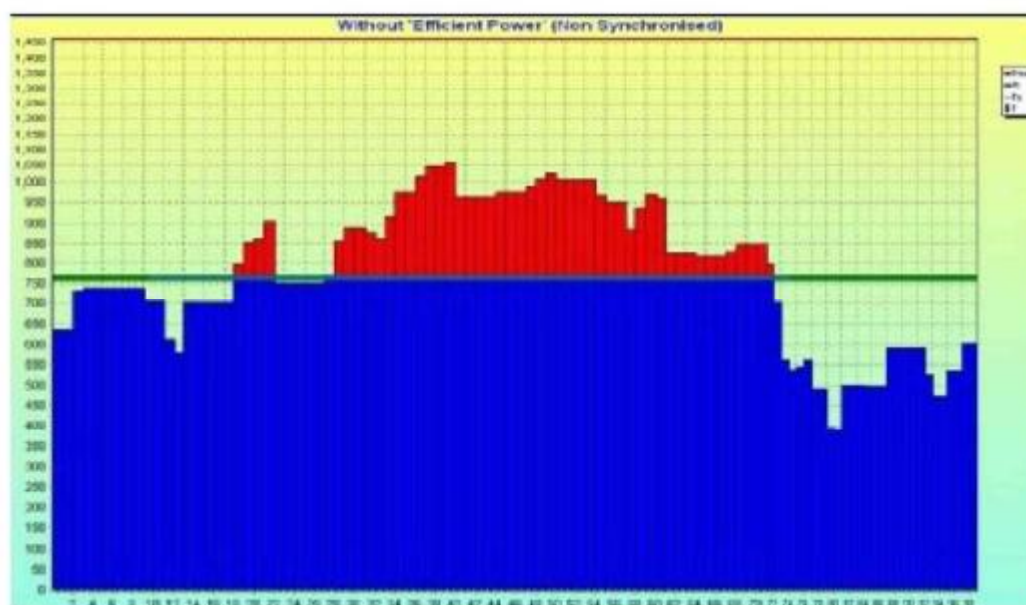


Obr. 3.1.19 Sekvenční spouštění spínání tyristorových jednotek

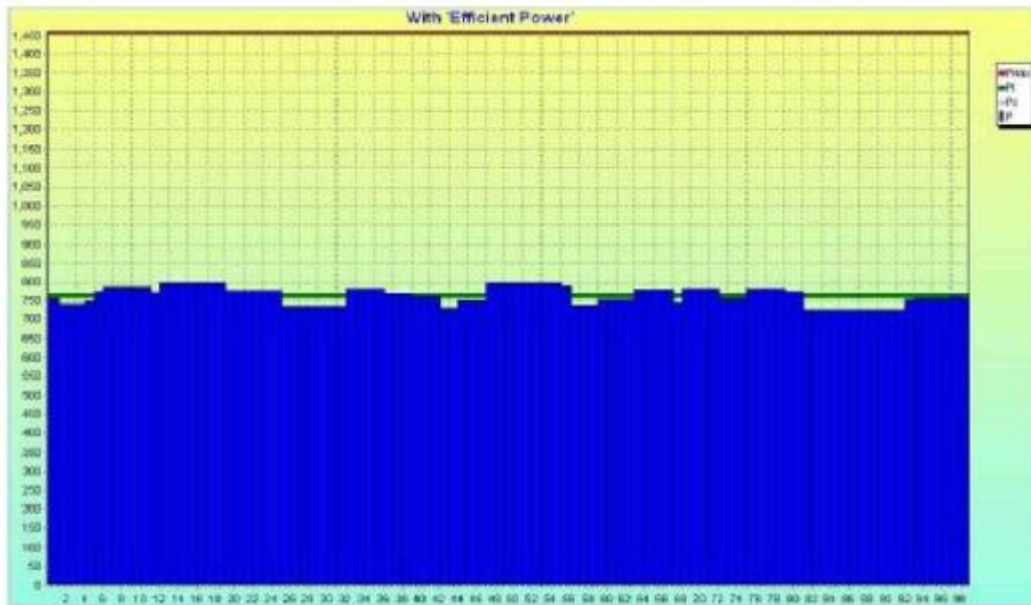
I v tomto případě může dojít k nerovnoměrnému zatěžování sítě, což je patrné z obr. 3.1.19. Vylepšením této metody je stanovení rozdílných časů pracovních cyklů jednotlivých tyristorových jednotek, ale vždy po určité době se i cykly s nestejnou periodou setkají. Je jasné, že pevně stanovený pracovní cyklus neumožňuje tak jemné odstupňování regulace příkonu do topných článků.

Prediktivní řízení

Pro zabránění rázům do sítě byl vyvinut nový algoritmus řízení vícenásobných zátěží. Tento algoritmus pohlíží na mnoha zónový systém řízený tyristorovými jednotkami jako na jeden komplexní systém. V každém okamžiku je znám požadovaný příkon do topné soustavy pece. Algoritmus určí, kdy má která tyristorová jednotka být sepnuta a případně „rozdělí“ čas sepnutí na více dílčích sepnutí. V případě prediktivního řízení příkonu zná systém tyristorových jednotek požadovaný příkon v jednotlivých zátěžích a „skládá“ jednotlivé „balíčky“ příkonu tak, aby co nejvíce „vyhladil“ celkový odběr ze sítě. Je jasné, že čím více zátěží, tím lépe je možno příkon „vyhladit“. Na následujících grafech je porovnání obou metod řízení. Na obr. 3.1.20 červeně vyznačená část jsou ztráty, což je vlastně předností prediktivního řízení, které je dokáže odstranit.

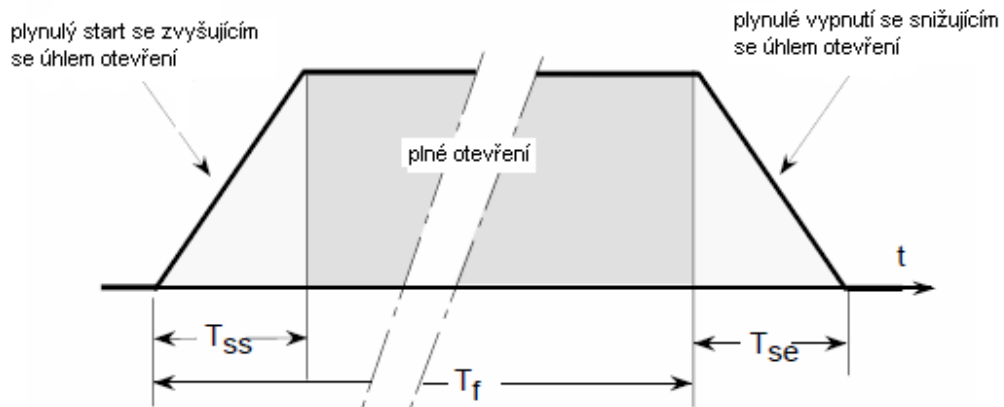


Obr. 3.1.20 Průběh příkonu do soustavy s tyristorovými jednotkami bez prediktivního řízení

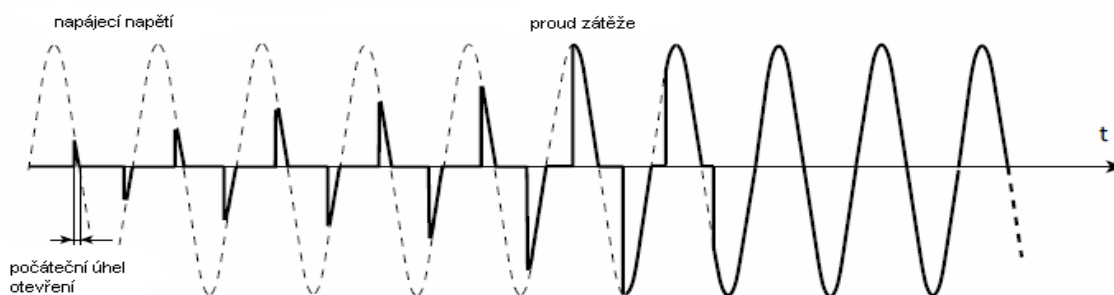


Obr. 3.1.21 Průběh příkonu do soustavy s tyristorovými jednotkami (stejná soustava) s prediktivním řízením.

V současné době se dbá především na dopady zařízení na elektrizační soustavu. K vylepšení dopadu spínání velkých odporových zátěží slouží spojení fázového a cyklického spínání, které omezuje velké proudové nárazy do sítě. Můžeme ho najít pod názvem SOFT START. Princip je vysvětlen na obr.3.1.22 a obr.3.1.23



Obr. 3.1.22 Princip řízení – SOFT START



Obr. 3.1.23 Praktická ukázka náběhu – v režimu SOFT START

Použité prameny: [1], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [12], [15], [16], [18], [20], [21], [23], [24], [25], [26], [28], [29], [30], [31], [34], [40], [41], [42], [43],

3.2 Experiment na modelu topného článku

3.2.1 Popis měřeného modelu

Funkční vzorek uvedený na obr. 3.2.3 umožňuje měřit povrchovou teplotu topného článku při provozu. K měření průběhu teploty článku jsem použil teplotní scanner.

Uvnitř tělesa vzorku jsem použil navinutý topný článek z odporového drátu KANTAL A1.

Tepelná izolace vzorku je z vláknitých materiálů s vysokou tepelně izolační schopností a malou akumulací energie. Funkční vzorek byl vytvořen pro laboratorní použití a ověření numerických modelů.

Technické parametry

Jmenovitý výkon	2,2 kW
Jmenovité napětí	1x230 V
Jmenovitá teplota	1100°C
Odpor topného článku při 20°C	24,6 Ω
Materiál topného článku	Kanthal A1
Průměr drátu	1,4 mm
Měrné povrchové zatížení	1,925 W/cm ²

Rozměry pracovního prostoru:

- šířka	200 mm
- výška	300 mm
- délka	700 mm

Vnější rozměry pece:

- šířka	140 mm
- výška	220 mm
- délka	620 mm

3.2.2 Technická realizace experimentu na modelu

Měření vychází z konkrétního případu zjištění chování funkčního modelu muflové pece. V mé práci se zabývám simulačními modely chování tohoto vzorku za různých situací. Měřením jsem chtěl zjistit chování topného článku při regulaci výkonu (průběh teploty na článku). Napájení topného článku jsem provedl přes tyristorovou jednotku EPACK od anglické firmy EUROTHERM, kterou jsem použil ve dvou regulačních modech, a to spínání v nule a úhlovém řízení. Jedná se o dva principiálně různé způsoby řízení.

3.2.2.1 Způsob řízení modelu při experimentu

Topný článek jsem napájel průběhy napětí, popsané v kapitole 3.1 odstavec 3.1.3.2.2 (fázevé řízení a cyklické řízení).

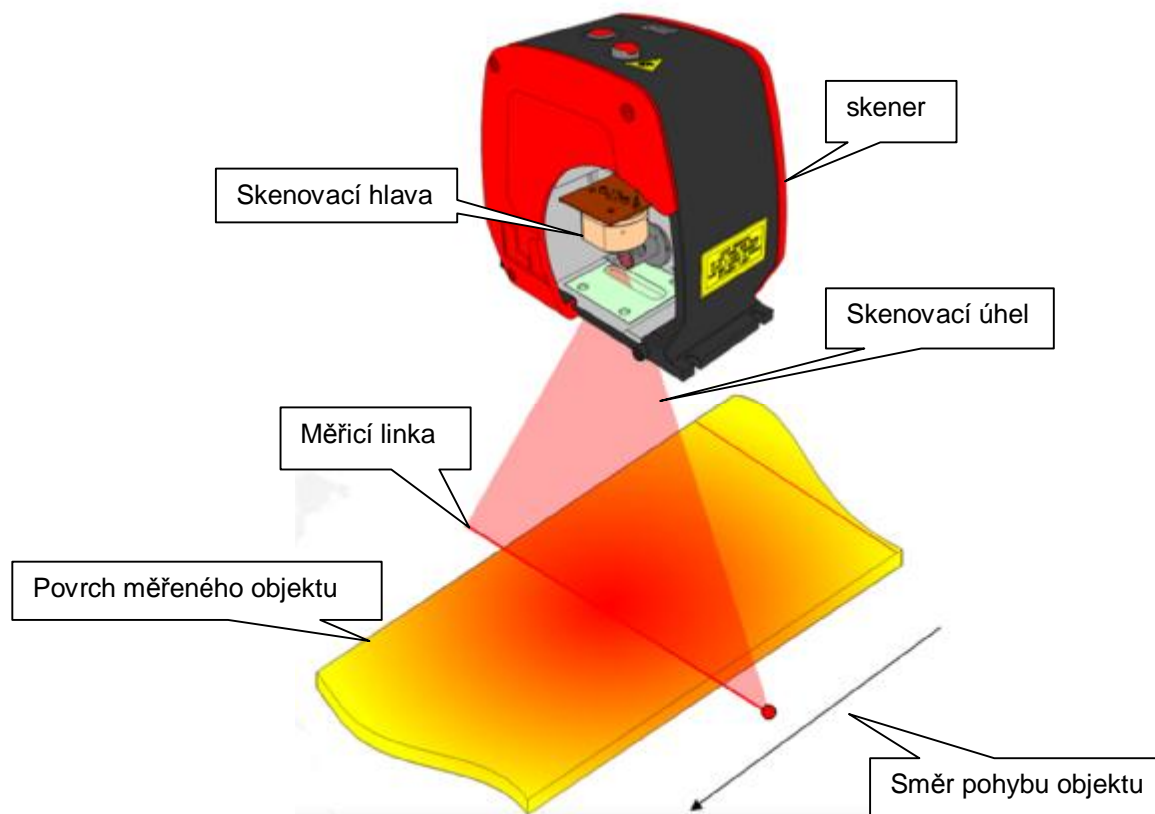
Aby mohlo být provedeno regulérní porovnání teploty topného článku, nastavil jsem při uvedených průbězích 50% zadání žádaného výkonu topného článku. Naměřené průběhy jsem porovnal.

3.2.2.2 Použitá měřicí metoda pro zjištění chování povrchové teploty topného systému muflové pece a výběr měřicího přístroje

K měření povrchové teploty topného článku funkčního vzorku topného systému muflové pece jsem použil metodu bezdotykového měření teploty. K tomuto účelu jsem využil vlastnosti teplovního skeneru řady LANDSCAN od renomované anglické firmy Land. Jedná se o přístroj určený k snímání povrchové teploty objektů v nejrůznějších průmyslových aplikacích. Osazení přístroje vysokorychlostními infračervenými detektory umožňuje měření na krátké vlnové délce při velkých skenovacích rychlostech, které jsem při experimentu využil k získání skutečných průběhů povrchových teplot článku při jeho simulovaných pracovních režimech.

Stručný popis funkce skeneru:

Ve skeneru je použita skenovací hlavička osazená pyrometrem, kterou se snímá povrch měřeného objektu přes rotující zrcadlo. Měřeným objektem je obvykle povrch pohybujícího se tělesa. Měření teploty probíhá napříč měřeným objektem, viz obr. 3.2.1. Systém dokáže snímat až 1000 teplotních bodů na jeden sken s rychlostí skenování 10 až 150 Hz. "Teplotní řezy", naskenované teplotní body (linky), jsou ze skenovacího přístroje posílány přes komunikační port typu Ethernet do PC, kde jsou ve vyhodnocovacím a konfiguračním SW Landscan ukládány a archivovány do souborů ve speciálním formátu vytvořeném firmou Land. Další zpracování naměřených dat může být provedeno v samotném SW Landscan, nebo je možnost připojení I/O modulu, který umožňuje další analogové a digitální zpracování v externích přístrojích jako jsou zobrazovače, zapisovače atd.



Obr. 3.2.1 Princip použití skeneru LSP – HD 10 při měření povrchové teploty

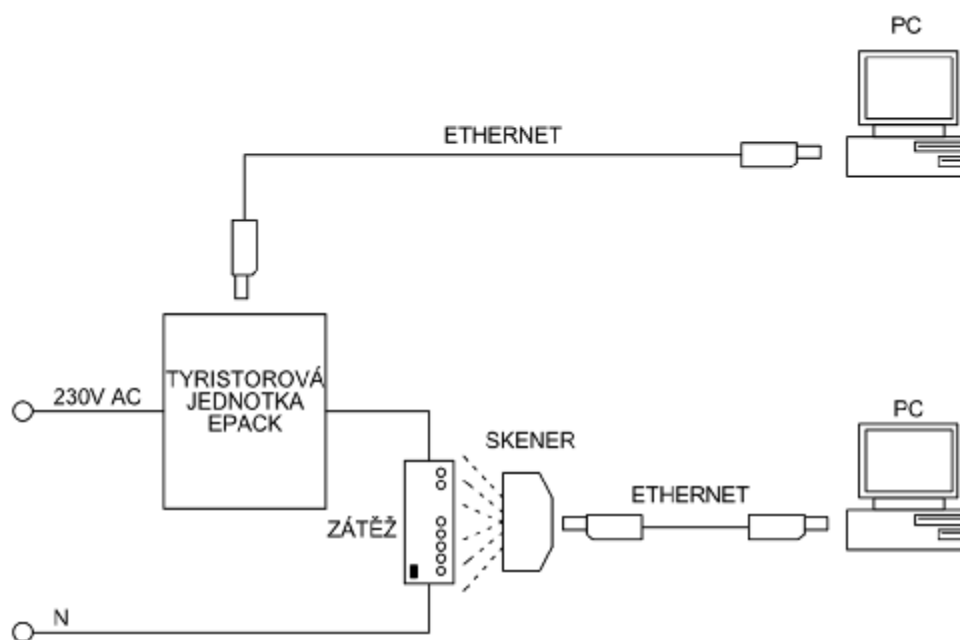
Měřicí rozsah	600 - 1 400°C
Vlnová délka	1 μm
Přesnost měření	$\pm 2^\circ\text{C}$
Operační teplota	5 - 60°C
Opakovatelnost	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
Skenovací úhel	80 ° (softwarově nastavitelné do 40 °)
Skenovací rychlost	10 - 150 Hz (nastavitelné po krocích 10 Hz)
Počet měřících bodů/Sken	1 000 pro všechny rychlosti skenování
Fokusace	500 : 1 s volitelnou optikou možnost snímání objektů o průměru 2 mm
Krytí	IP 65

Tab. 3.2.1 Technické parametry použitého přístroje LSP-HD 10

Výhody LSP-HD 10 skeneru:

Kompaktní průmyslové provedení, skenovací hlava LSP HD je plně kompaktní, má minimální velikost, čímž se snižuje riziko zahřátí sálavým teplem při měření. Integrovaný Class II Laser umožňuje přesné zaměření měřeného bodu. Vzdálené nastavování parametrů pomocí SW LANDSCAN umožní zadat: skenovací rychlost od 10 do 150 Hz, skenovací úhel až 80°, emisní koeficient atd. Dále je možné využít ukládání naměřených hodnot kontinuálně.

Návrh měřicího obvodu



Obr. 3.2.2 Měřicí a regulační obvod experimentu

Pro realizaci experimentu jsem použil skener typu LSP-HD 10, který má potřebné vlastnosti pro zjištění chování topného systému pece při simulaci různých pracovních stavů. Viz tab. 3.2.1. Při řešení této úlohy jsem použil nestandardní aplikaci vybraného přístroje, která spočívá v měření teploty povrchu stacionárního objektu. Tím jsem docílil kontinuálního měření stejného místa na povrchu topného článku po celou dobu experimentu. Toho s výhodou využívám při vyhodnocení měření. Porovnávám chování stejných bodů za různých provozních podmínek. Při výběru měřicího místa jsem se snažil eliminovat jiné zdroje tepla, než je měřený objekt, které by mohly nepříznivým způsobem ovlivnit výsledky samotného měření.

3.2.2.3 Fotodokumentace pořízená při experimentu



Obr. 3.2.3 Funkční vzorek topného systému muflové pece (simulující podmínky s odkrytou spirálou)



Obr. 3.2.4 Experiment – zjišťování povrchové teploty topného článku (simulující podmínky s odkrytou spirálou)

3.2.3 Cíle experimentu

Cílem měření bylo seznámit se s chováním topného článku při různých způsobech řízení, a to cyklickém řízení a fázovém řízení. Experiment umožnil vzájemně porovnat dva základní způsoby řízení. Hlavními úkoly měření bylo:

1) Cyklické řízení

- zjistit průběh povrchové teploty topného článku při různých délkách regulačních period a 50% žádosti na výkon

2) Fázové řízení

- zjistit průběh povrchové teploty topného článku při 50% žádosti na výkon

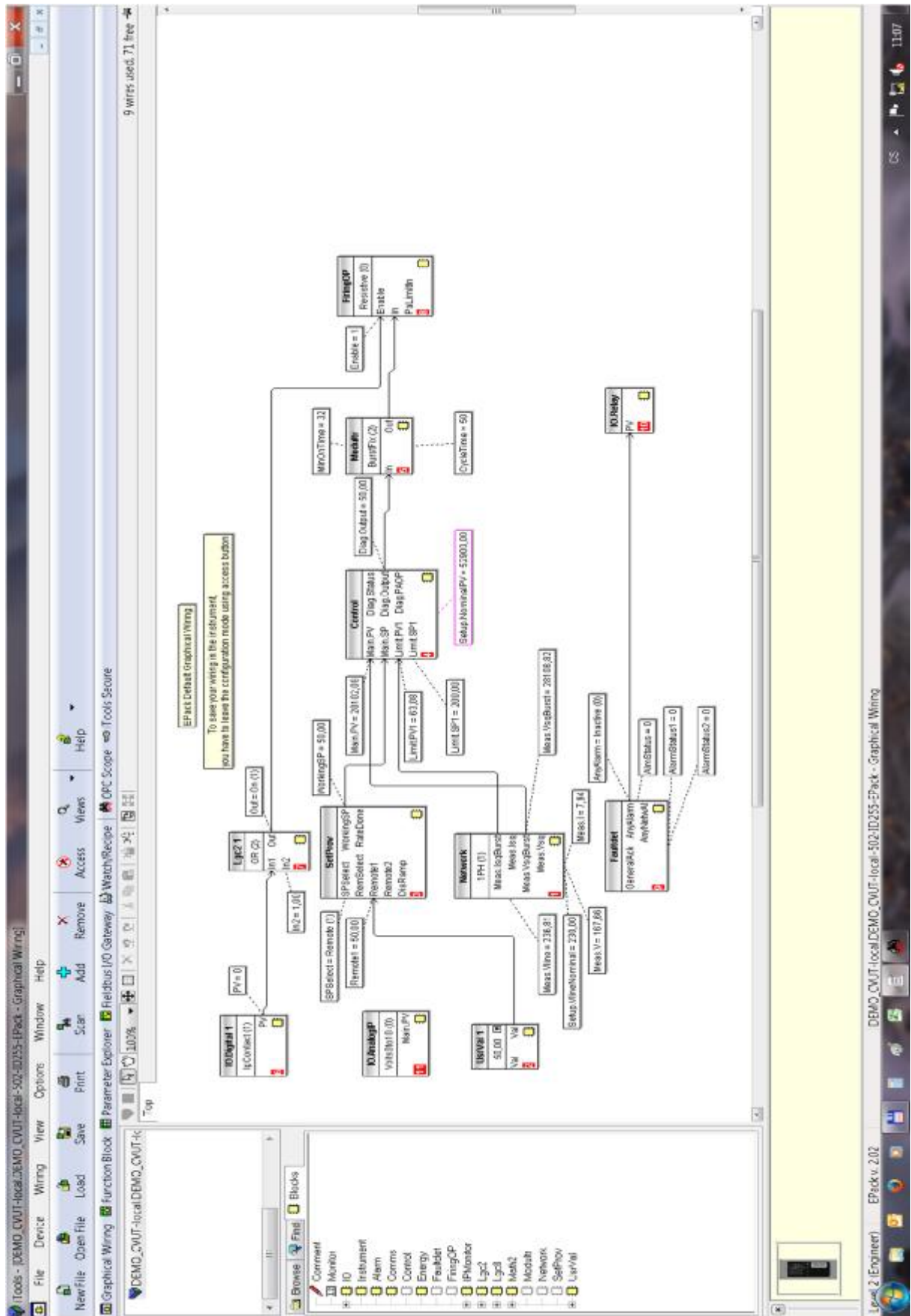
Na základě naměřených charakteristik provést následnou analýzu obou způsobů řízení. Výsledky z měření a vyhodnocení dále využít:

- 1) Pro stanovení podmínek provozu topného článku při jeho provozních stavech při těchto moderních způsobech řízení zejména pro nové algoritmy řízení mnoha zónových pecí.
- 2) Pro zpřesnění výsledků při simulacích na matematicko-fyzikálním modelu topného článku.

3.2.4 Experimentální měření – zjištění chování topného článku při jeho pracovních režimech

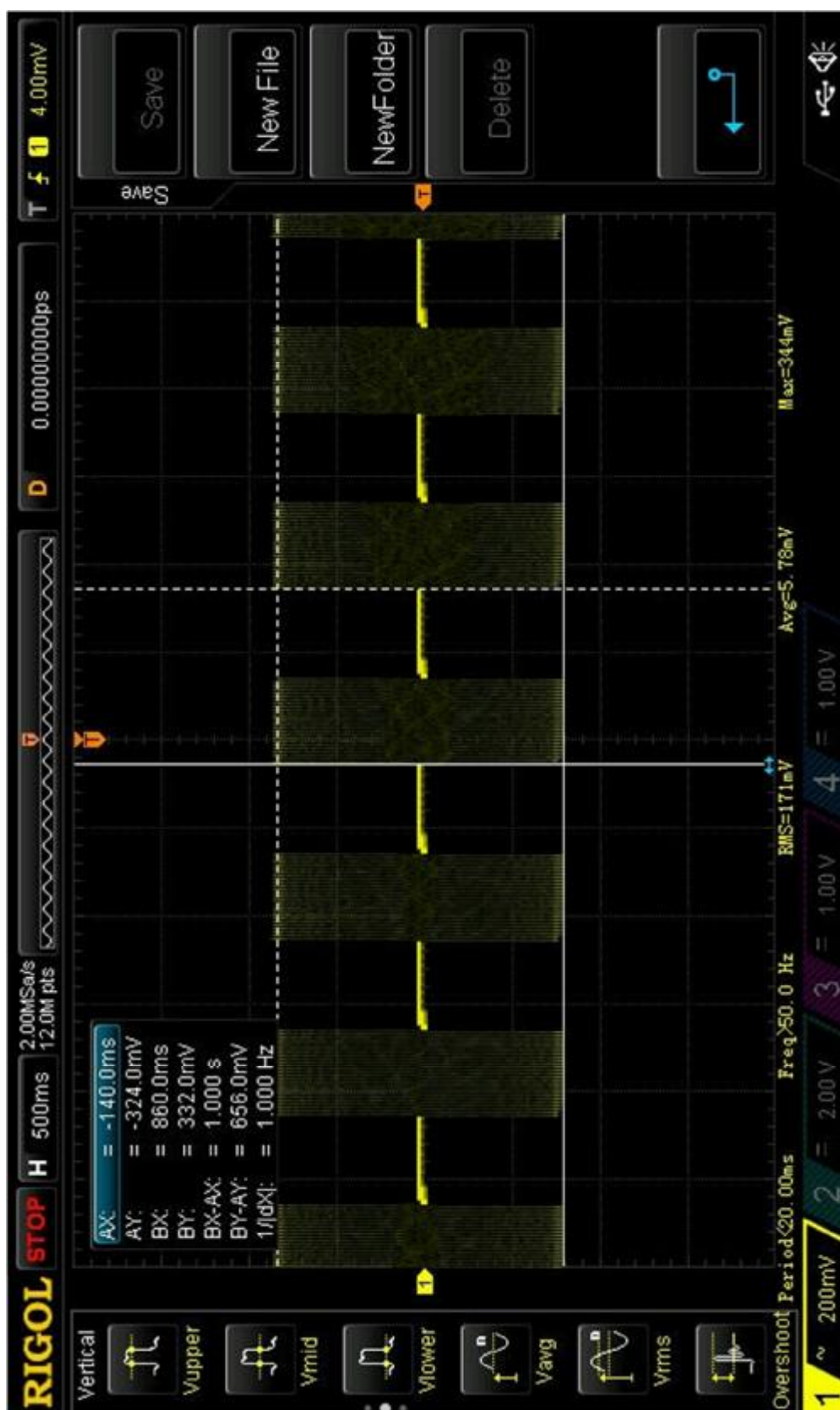
3.2.4.1 Cyklické spínání

Při tomto způsobu řízení jsem použil následující délky regulačních period 50, 100, 150, 200, 250, a 300 period (1perioda – 1sinusovka – 20 ms). Aby mohlo být provedeno korektní porovnání teploty topného článku, nastavil jsem při uvedených průbězích 50 % žádané veličiny.

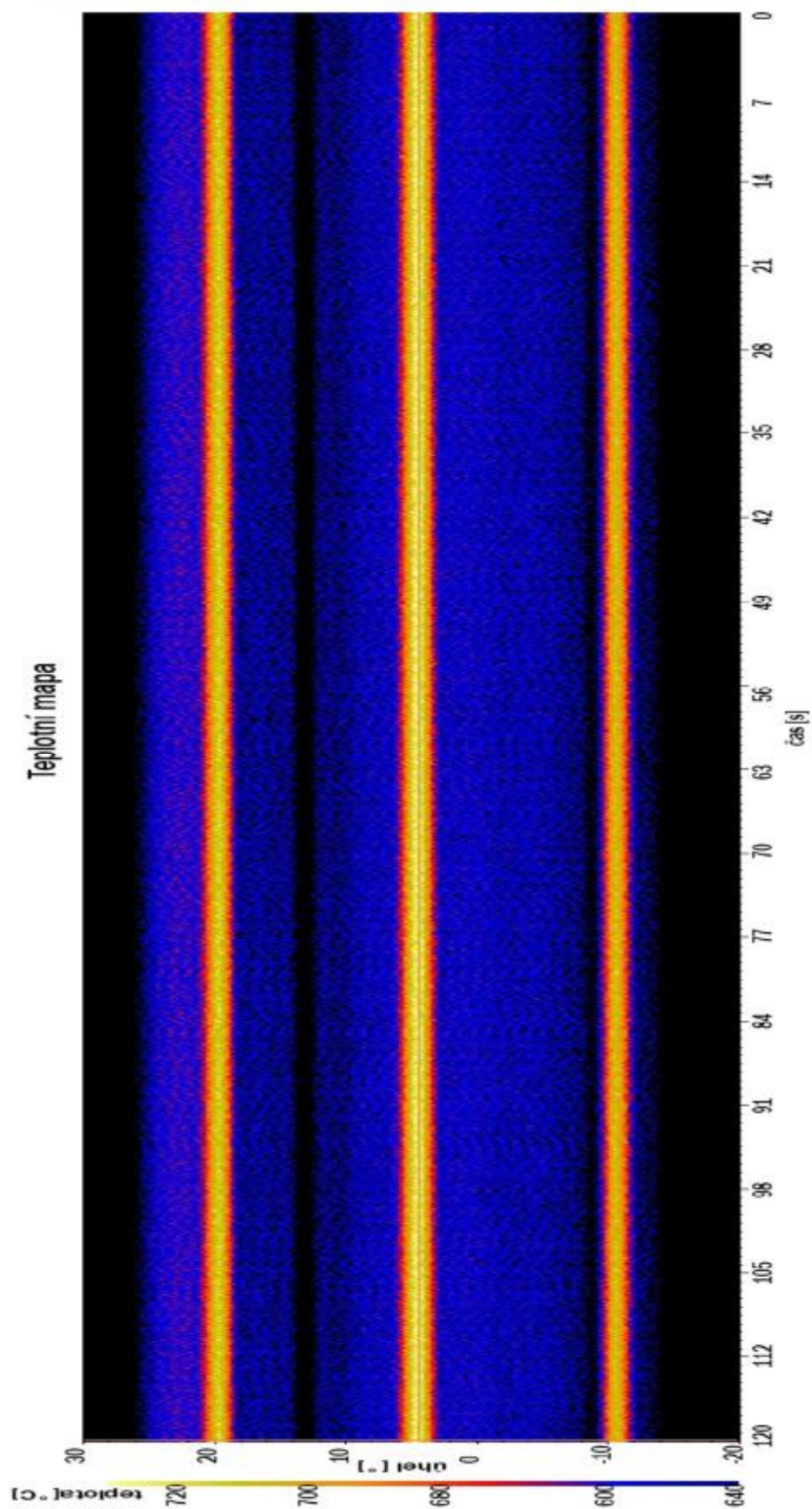


Obr. 3.2.5 Struktura tyristorové jednotky EPAC – při cyklickém řízení.

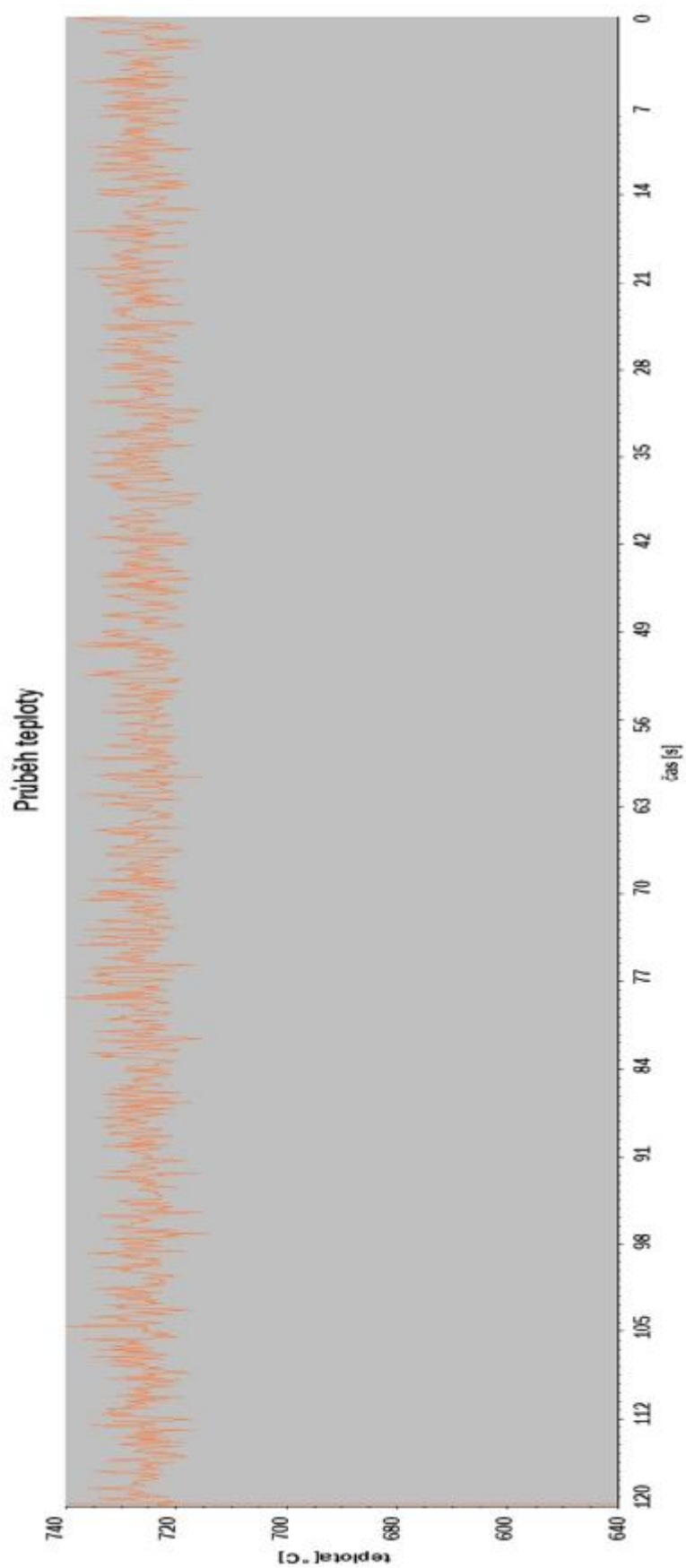
3.2.4.1.1 50 period



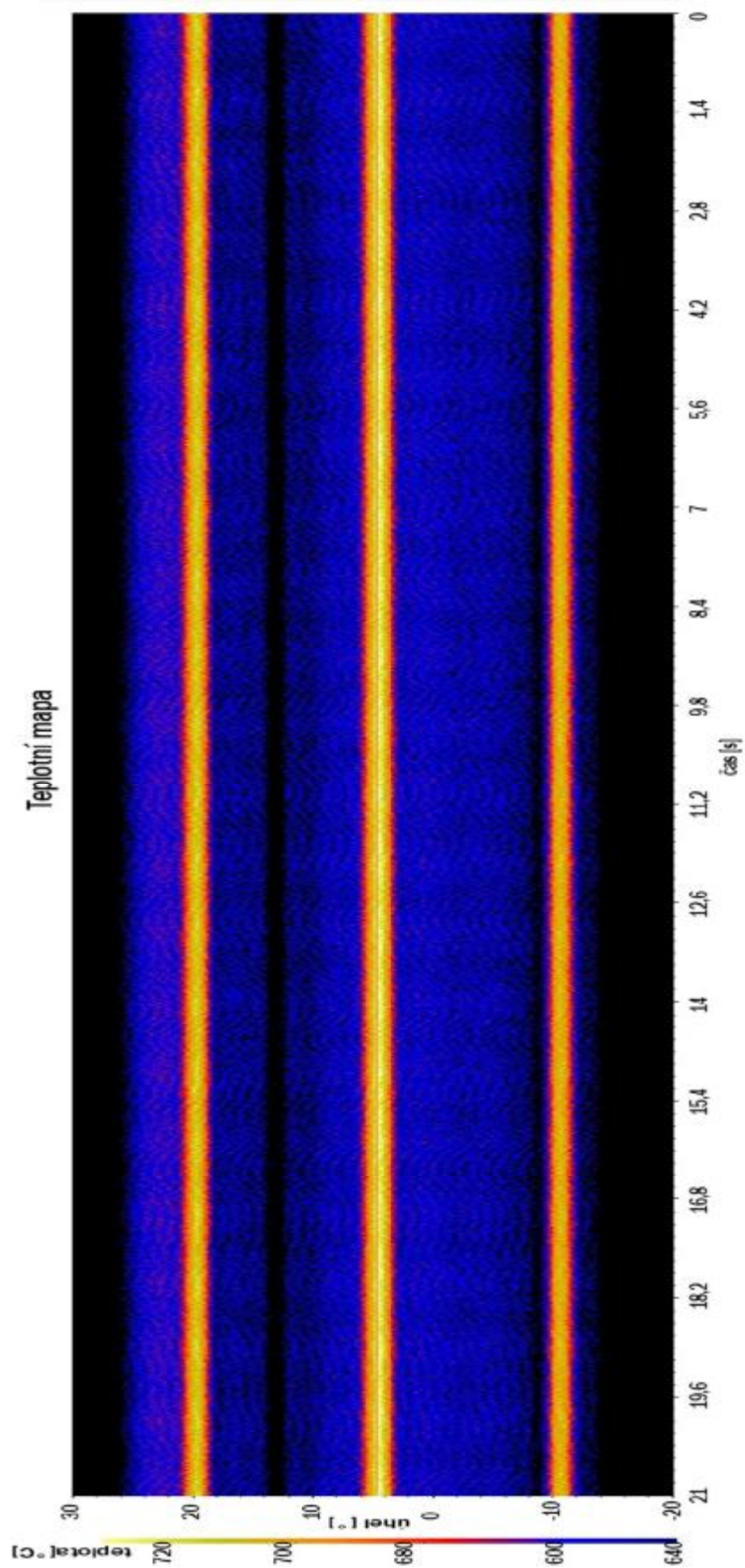
Obr. 3.2.6 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.



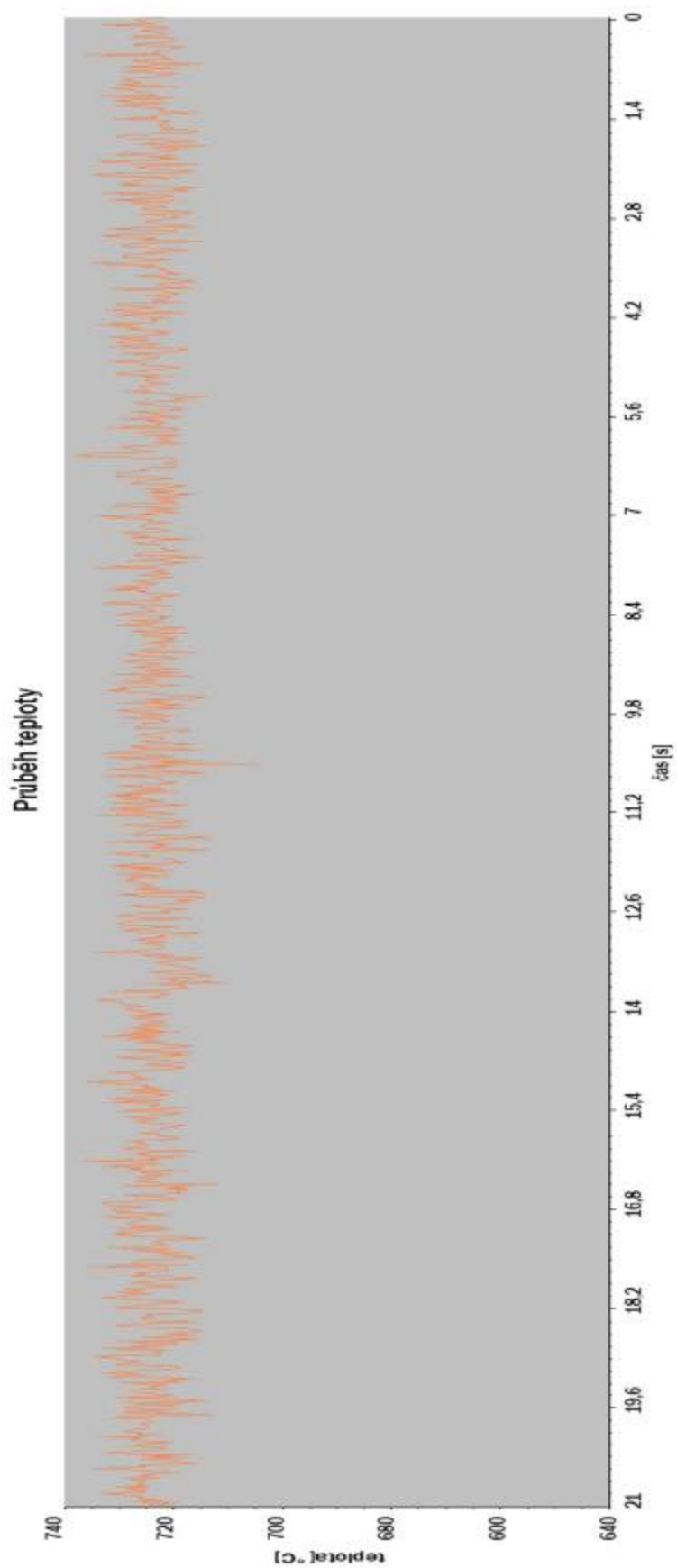
Obr. 3.2.7 Teplotní mapa topného článku – 50 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr. 3.2.8 Průběh teploty topného článku – 50 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.

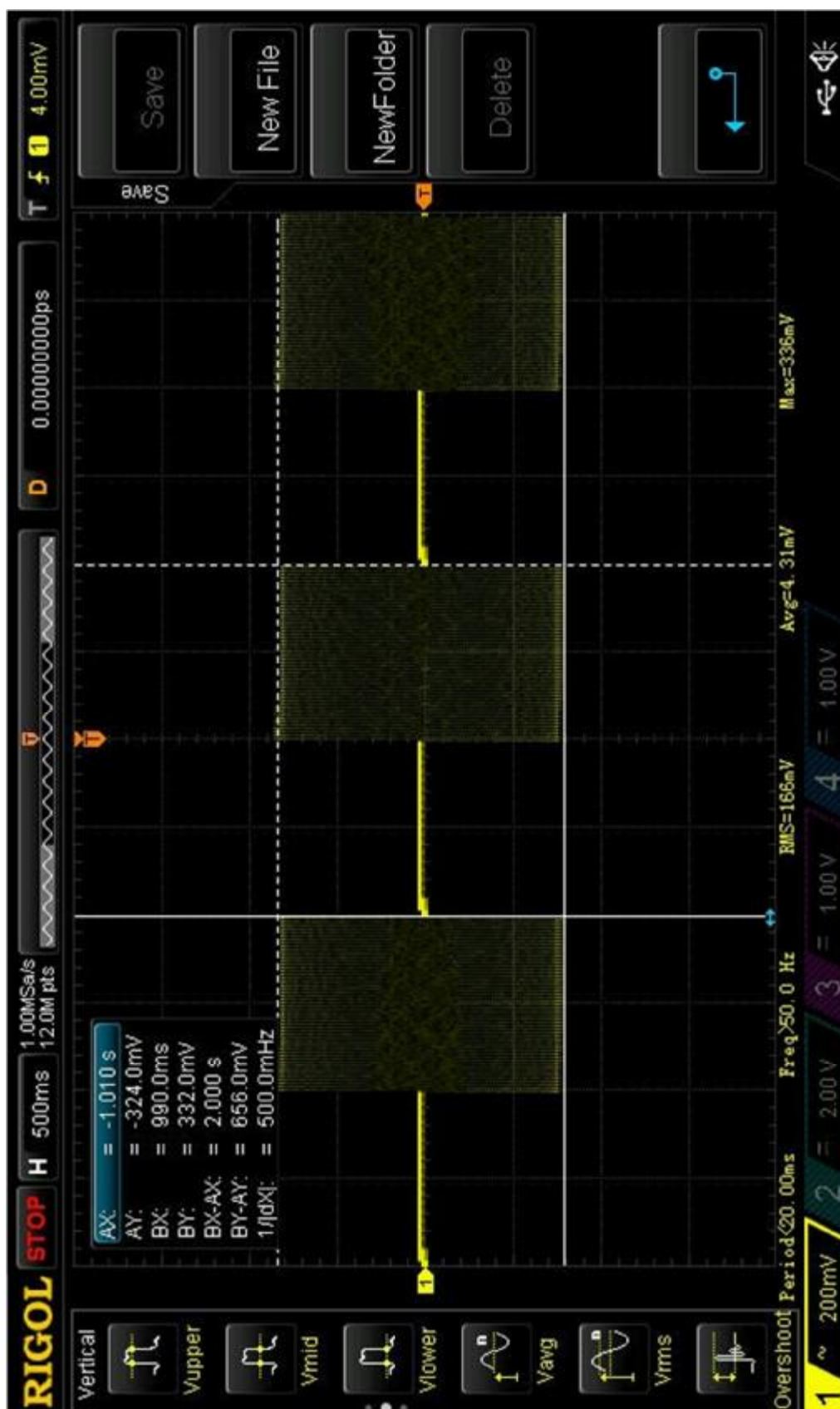


Obr. 3.2.9 Teplotní mapa topného článku – 50 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

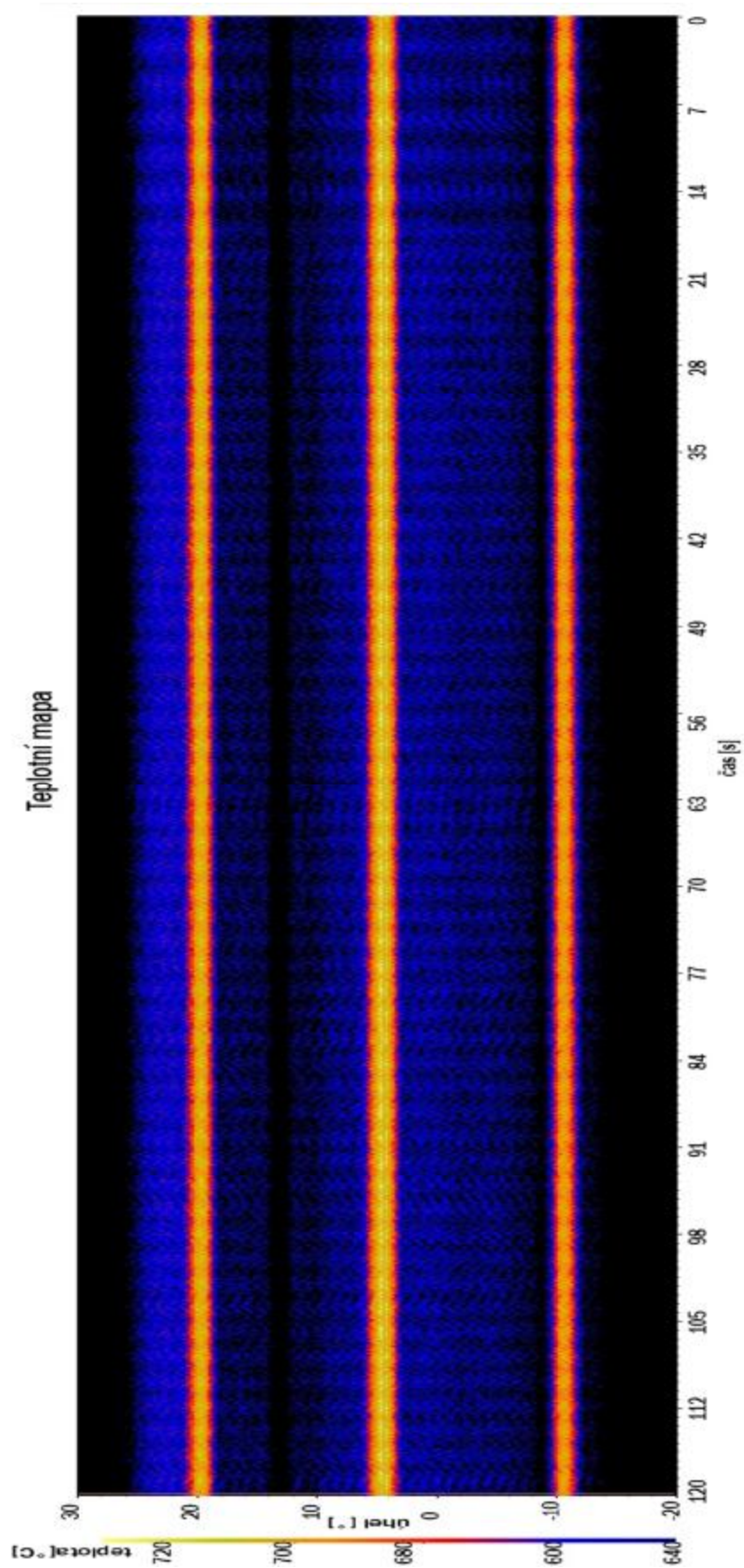


Obr. 3.2.10 Průběh teploty topného článku – 50 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

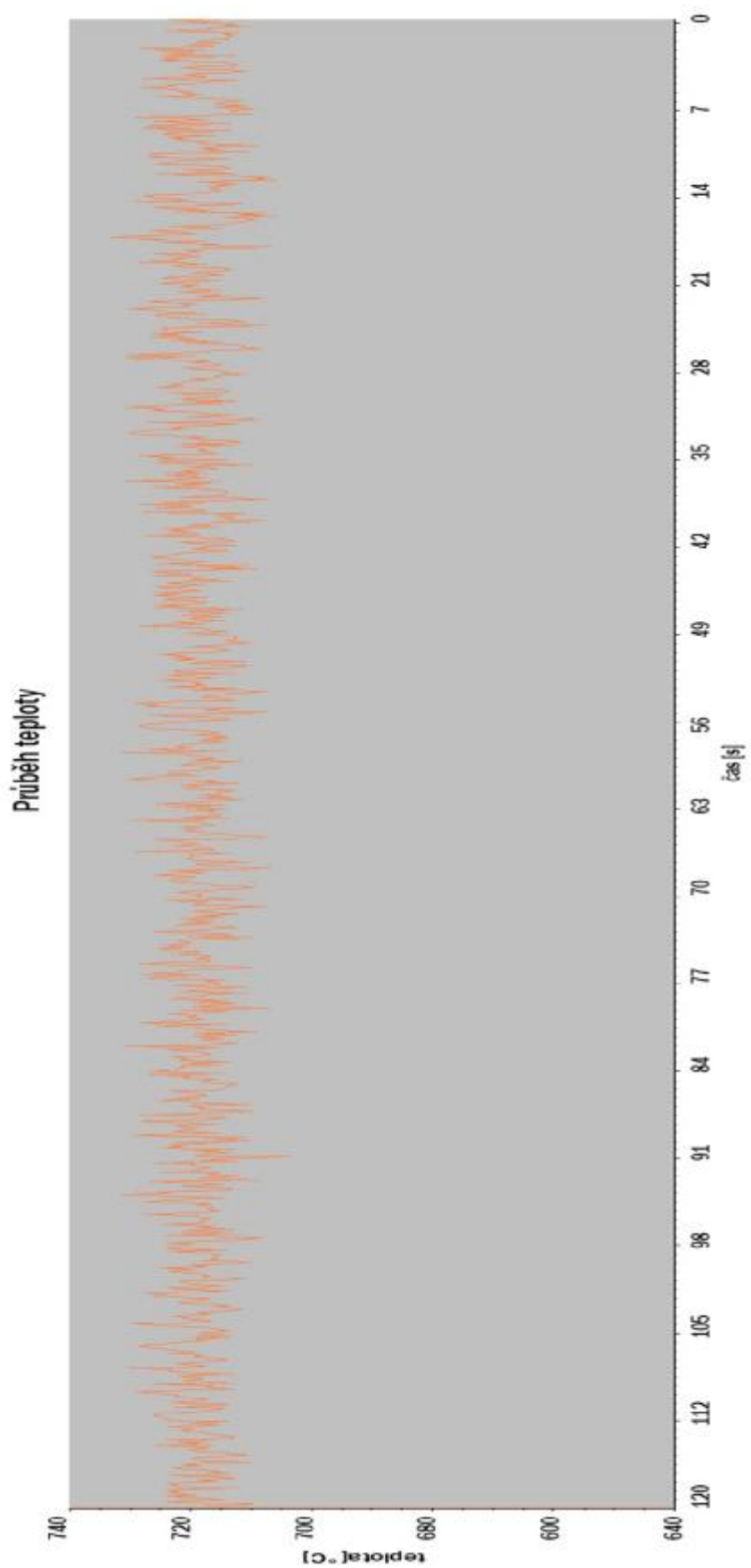
3.2.4.1.2 100 period



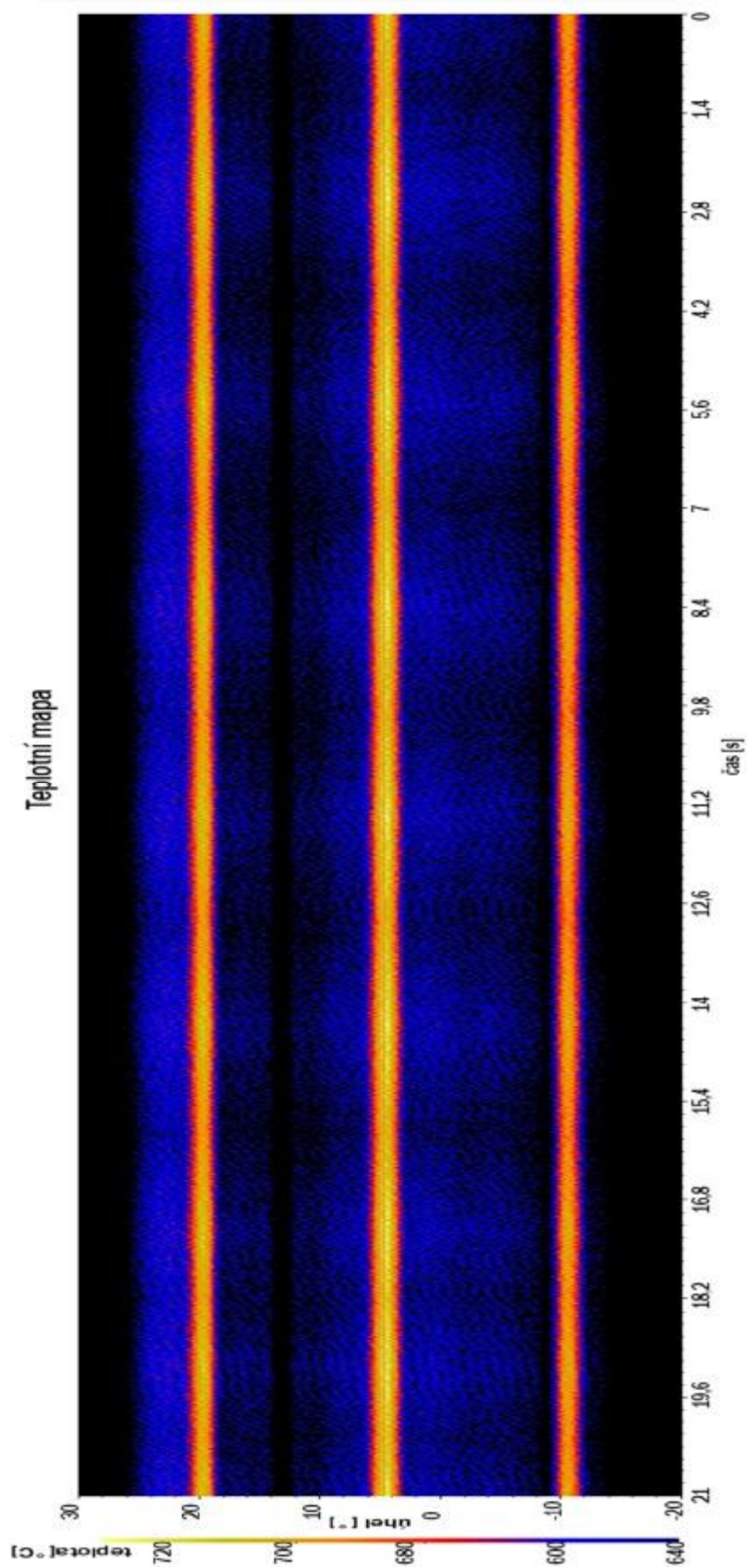
Obr. 3.2.11 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.



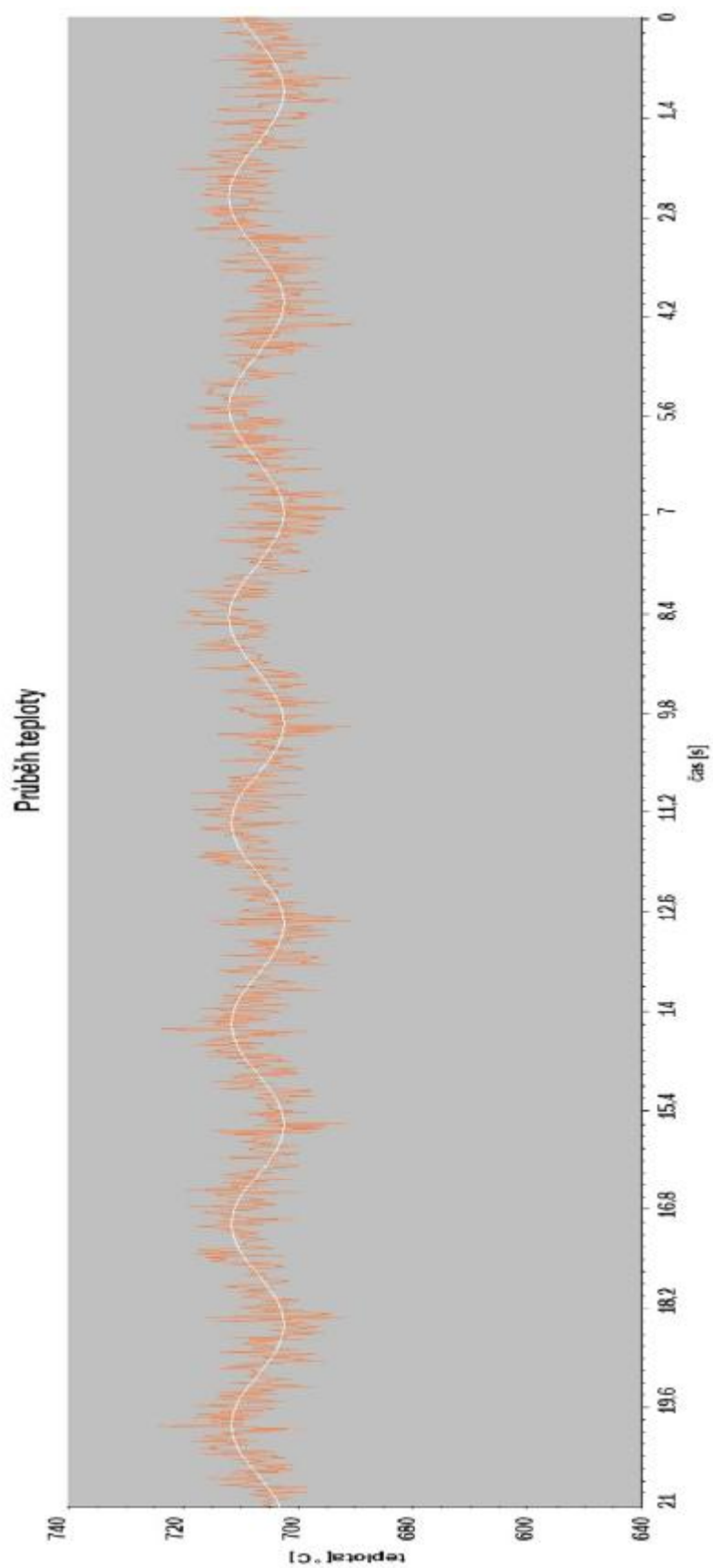
Obr. 3.2.12 Teplotní mapa topného článku – 150 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr. 3.2.13 Průběh teploty topného článku – 100 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.

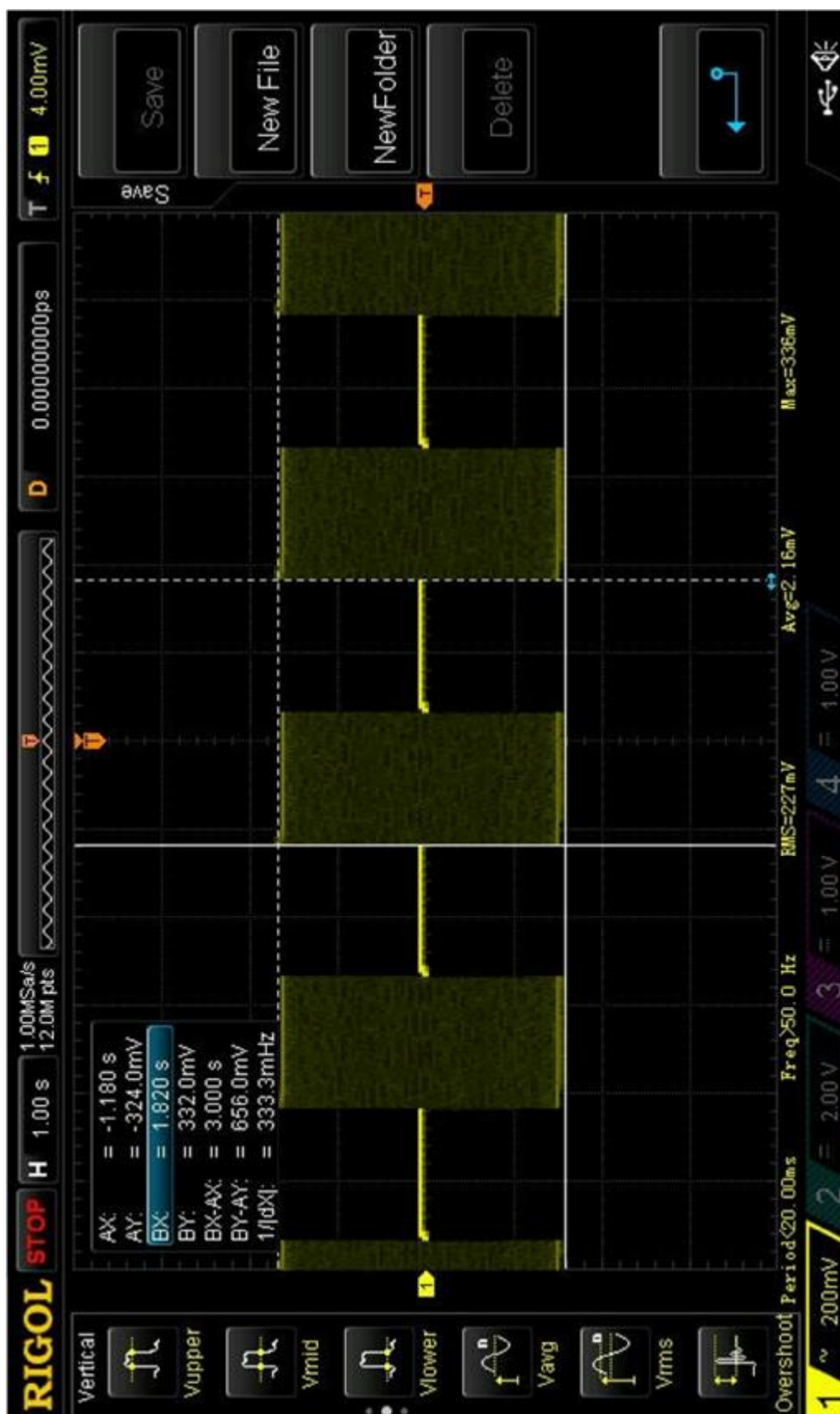


Obr. 3.2.14 Teplotní mapa topného článku – 100 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

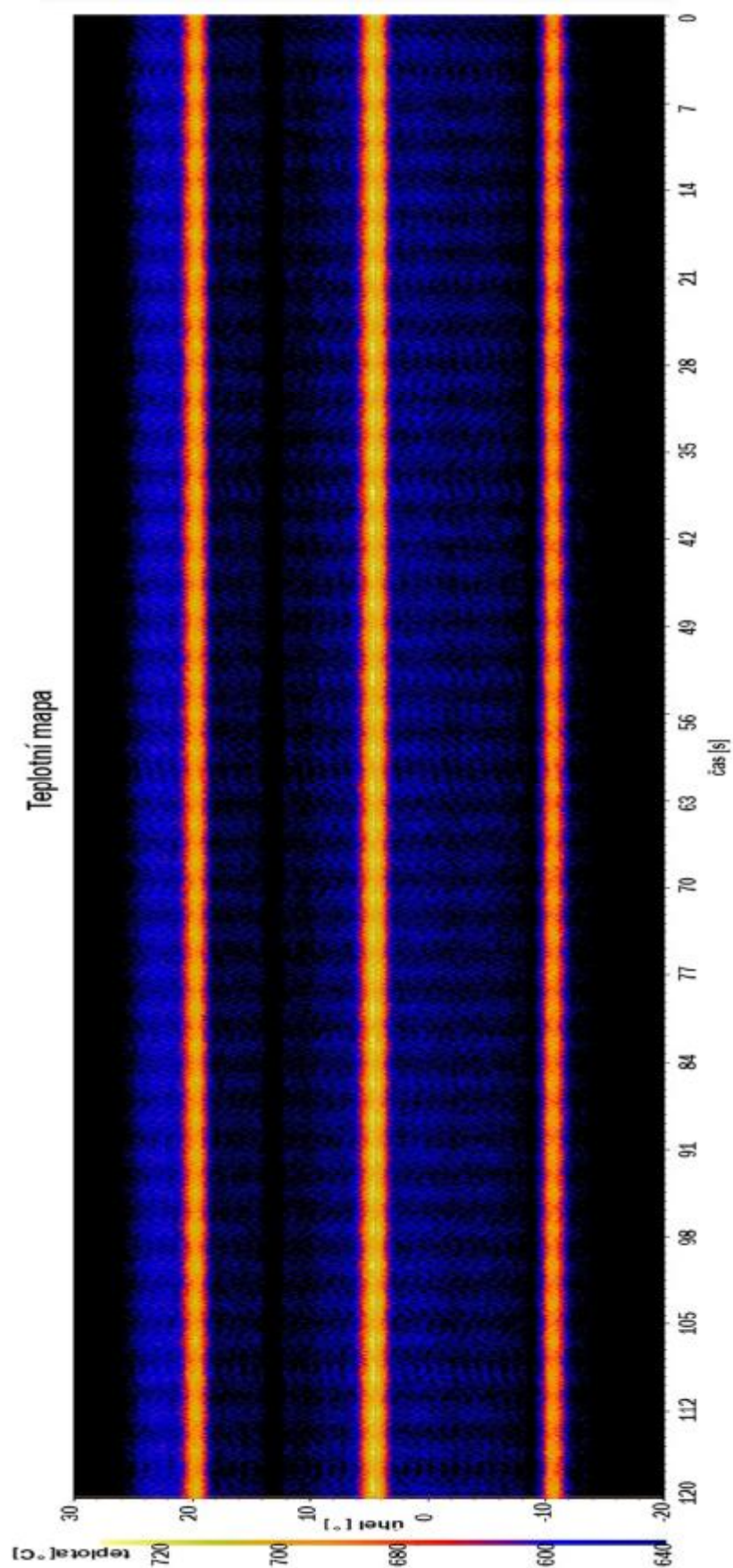


Obr. 3.2.15 Průběh teploty topného článku – 100 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10

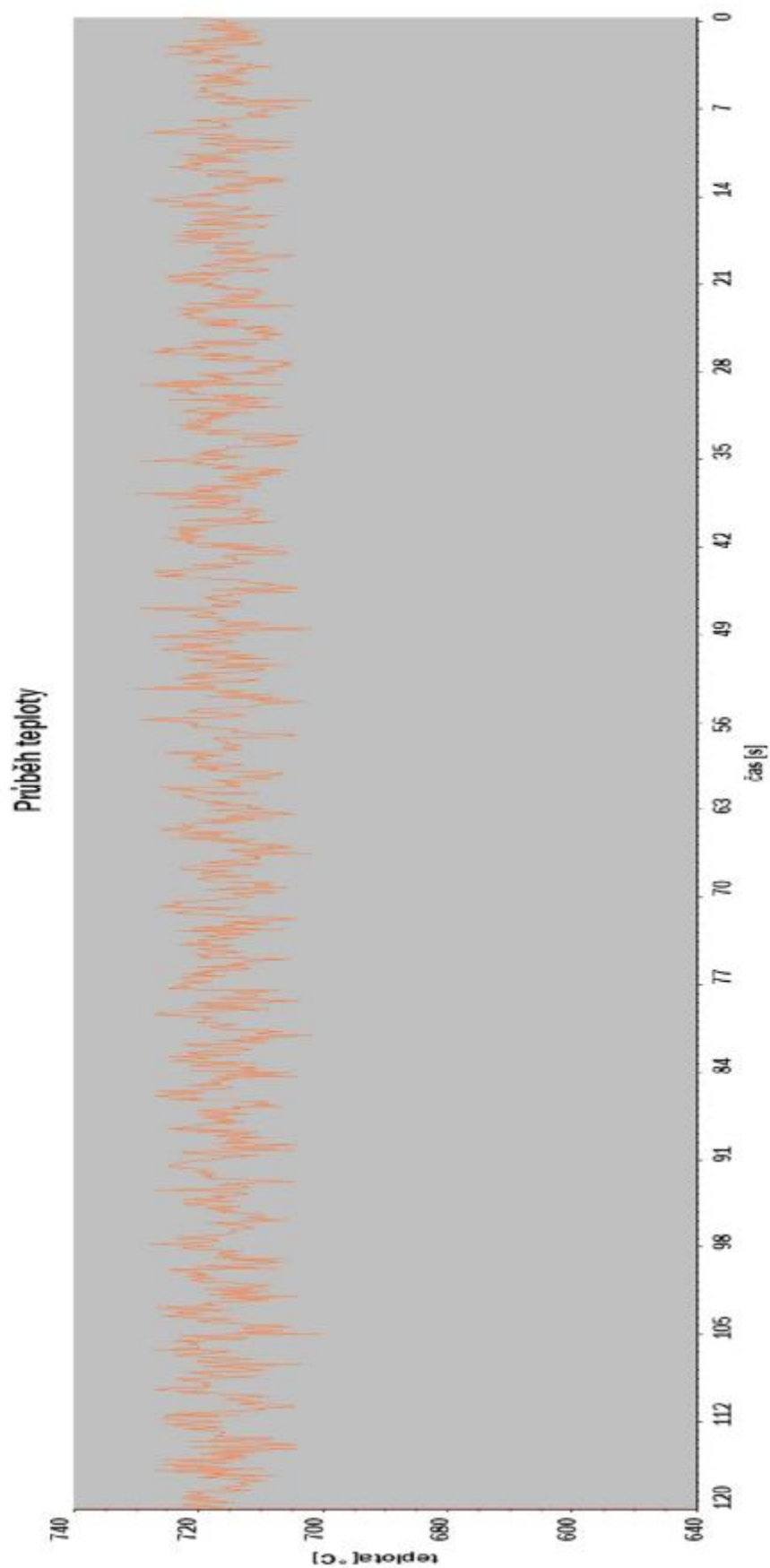
3.2.4.1.3 150 period



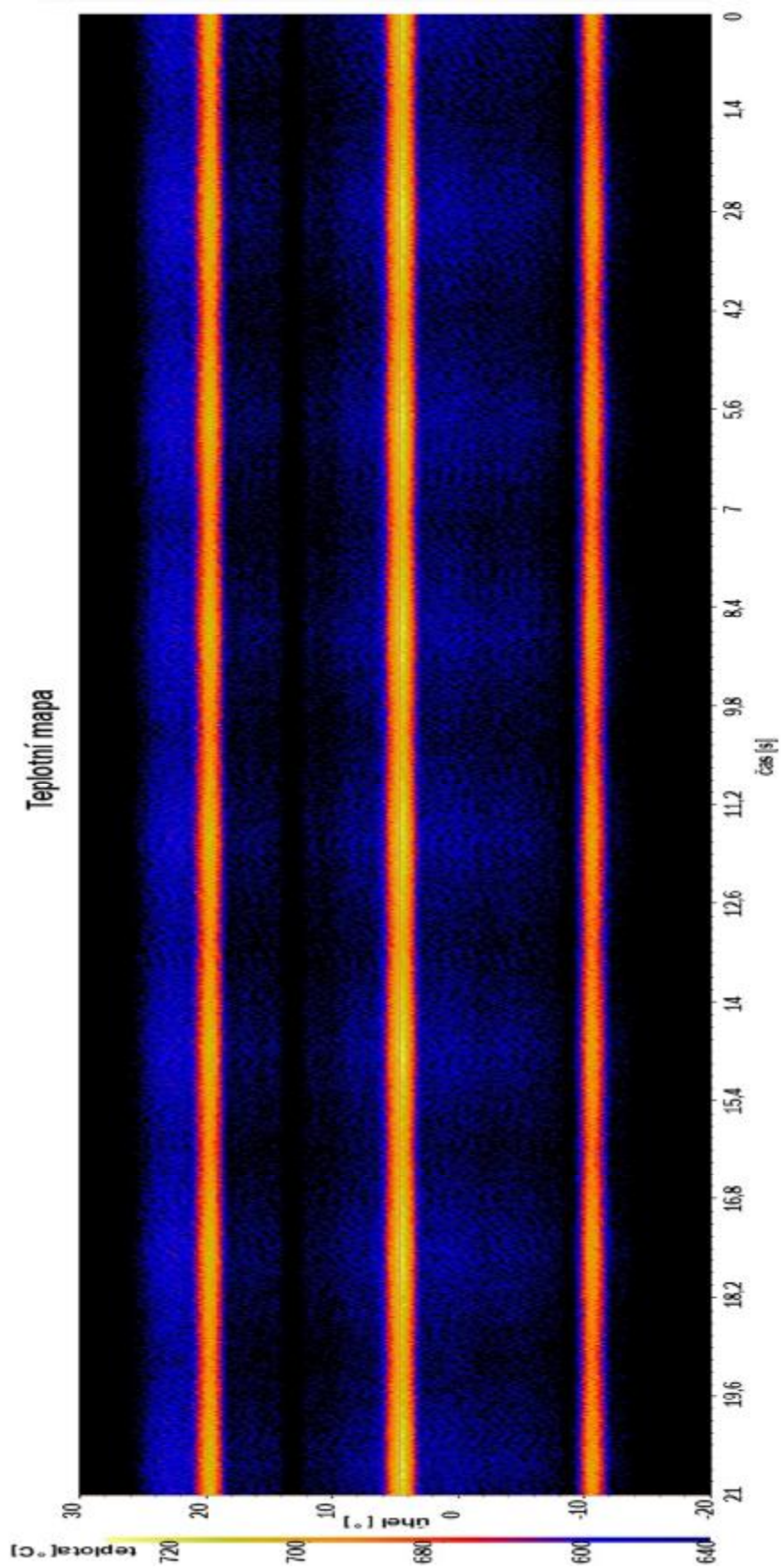
Obr. 3.2.16 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.



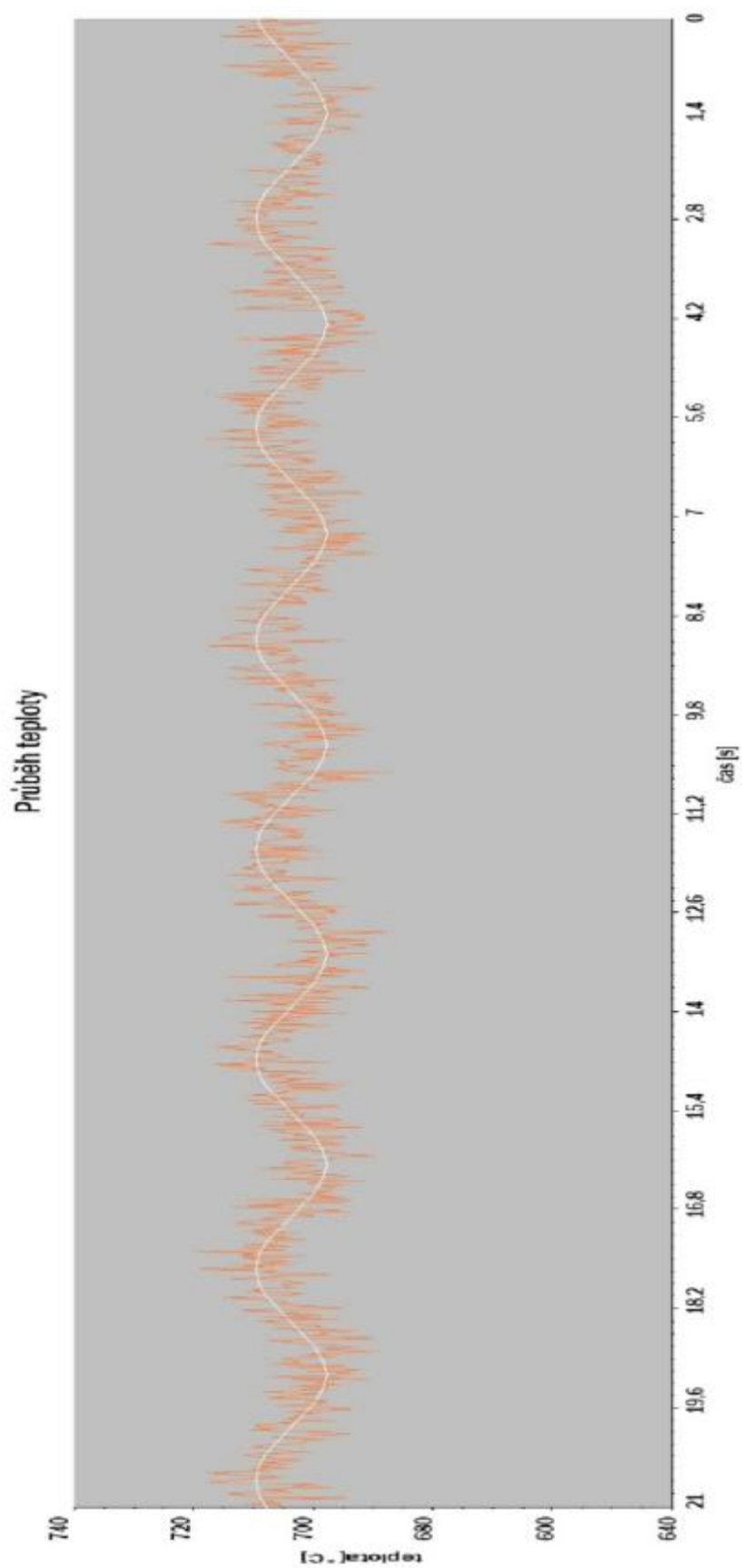
Obr. 3.2.17 Teplotní mapa topného článku – 150 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr.3.2.18 Průběh teploty topného článku – 150 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.

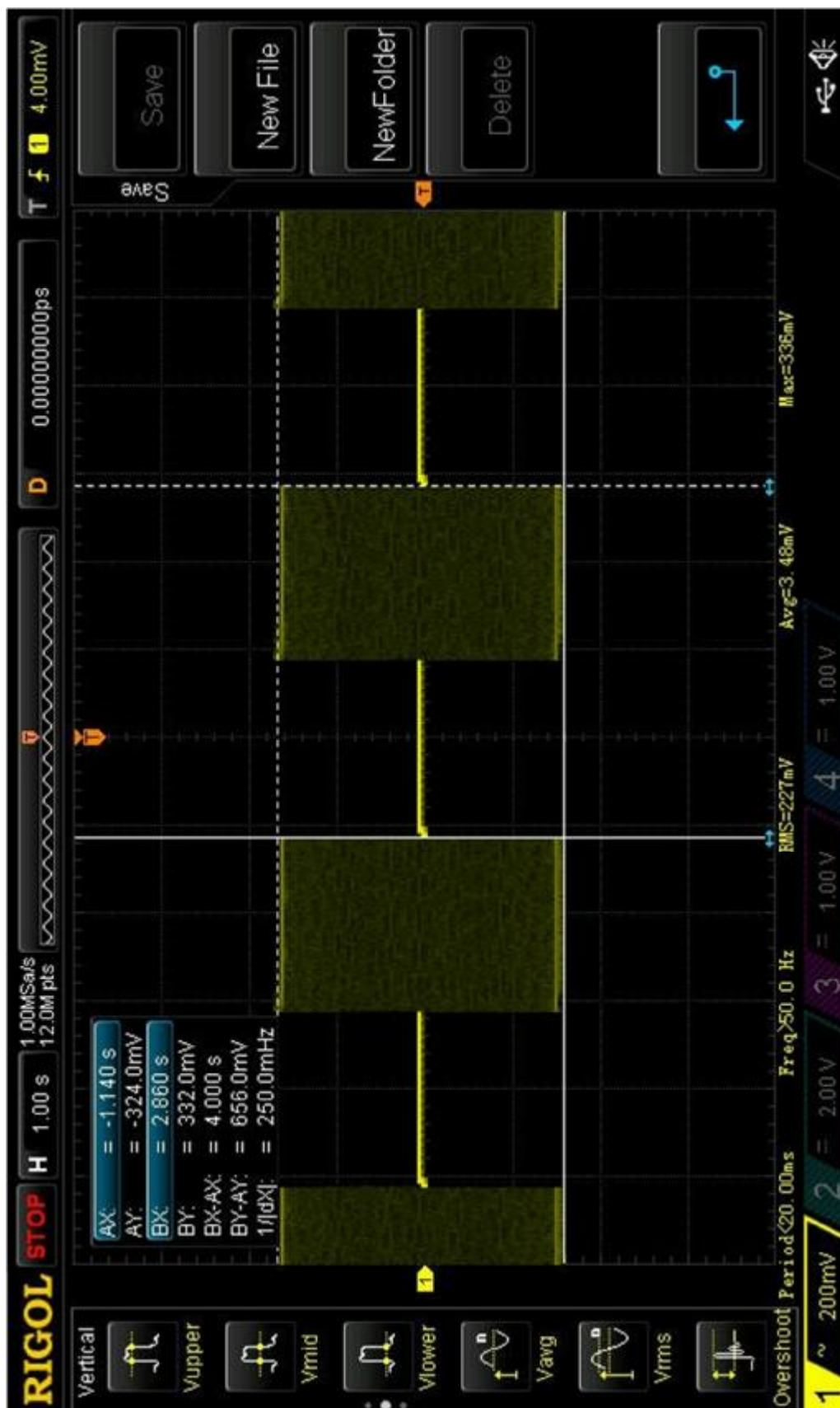


Obr. 3.2.19 Teplotní mapa topného článku – 150 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD - 10.

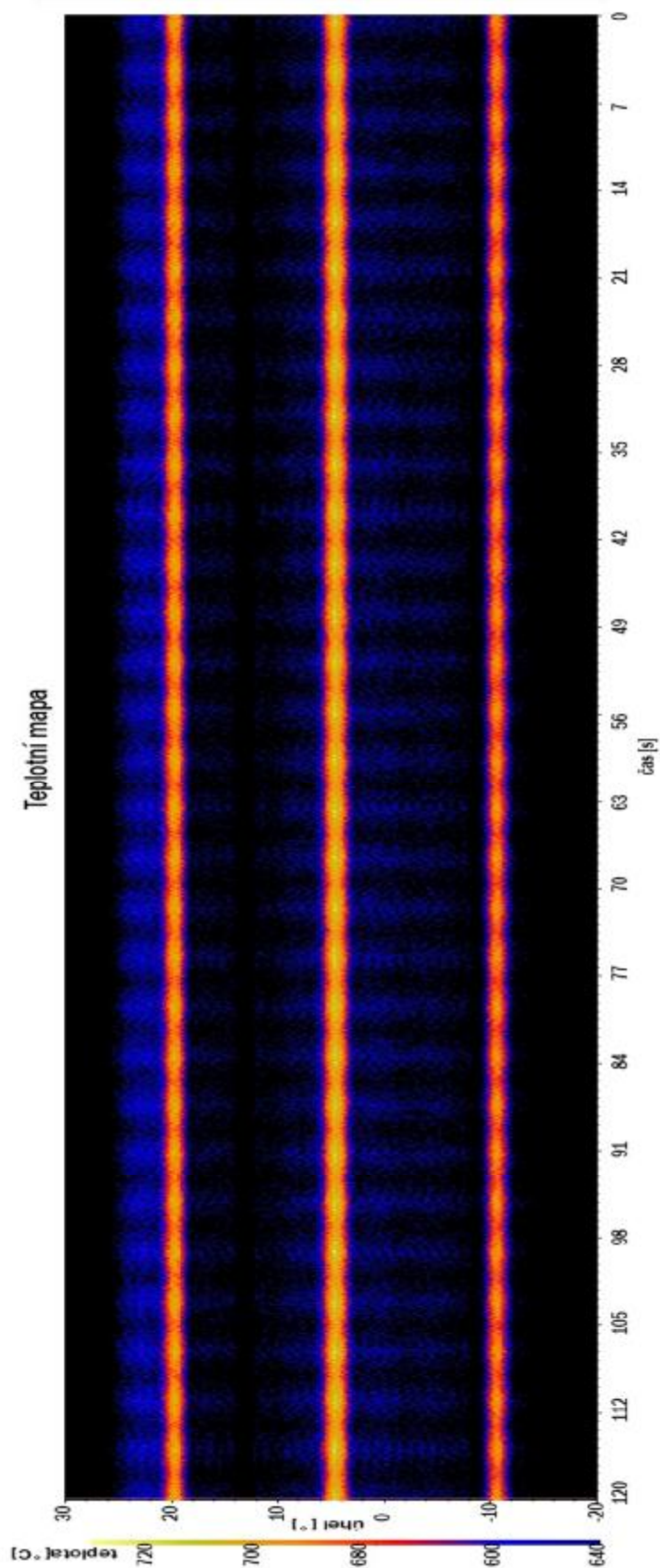


Obr. 3.2.20 Průběh teploty topného článku – 150 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

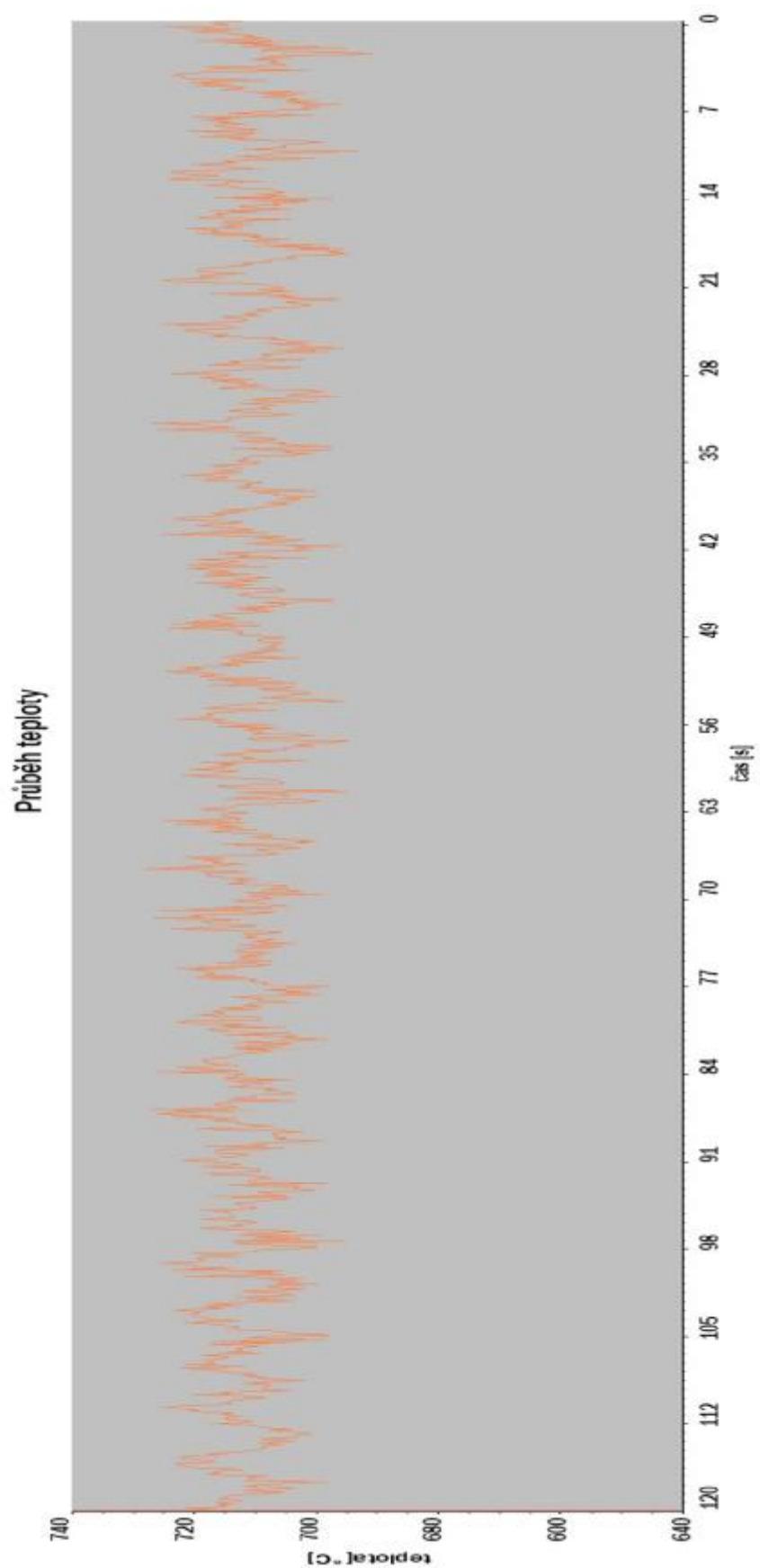
3.2.4.1.4 200.period



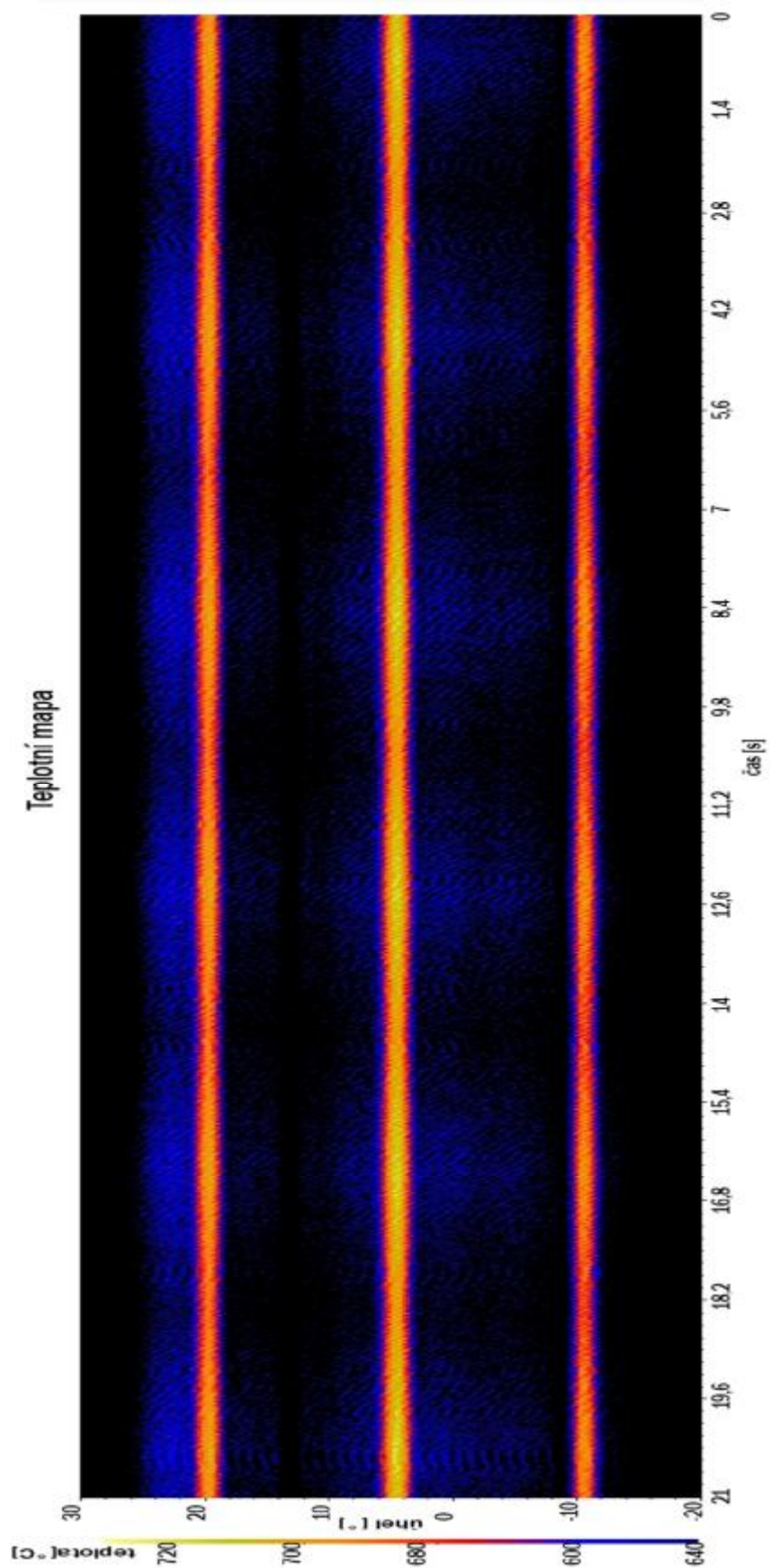
Obr. 3.2.21 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.



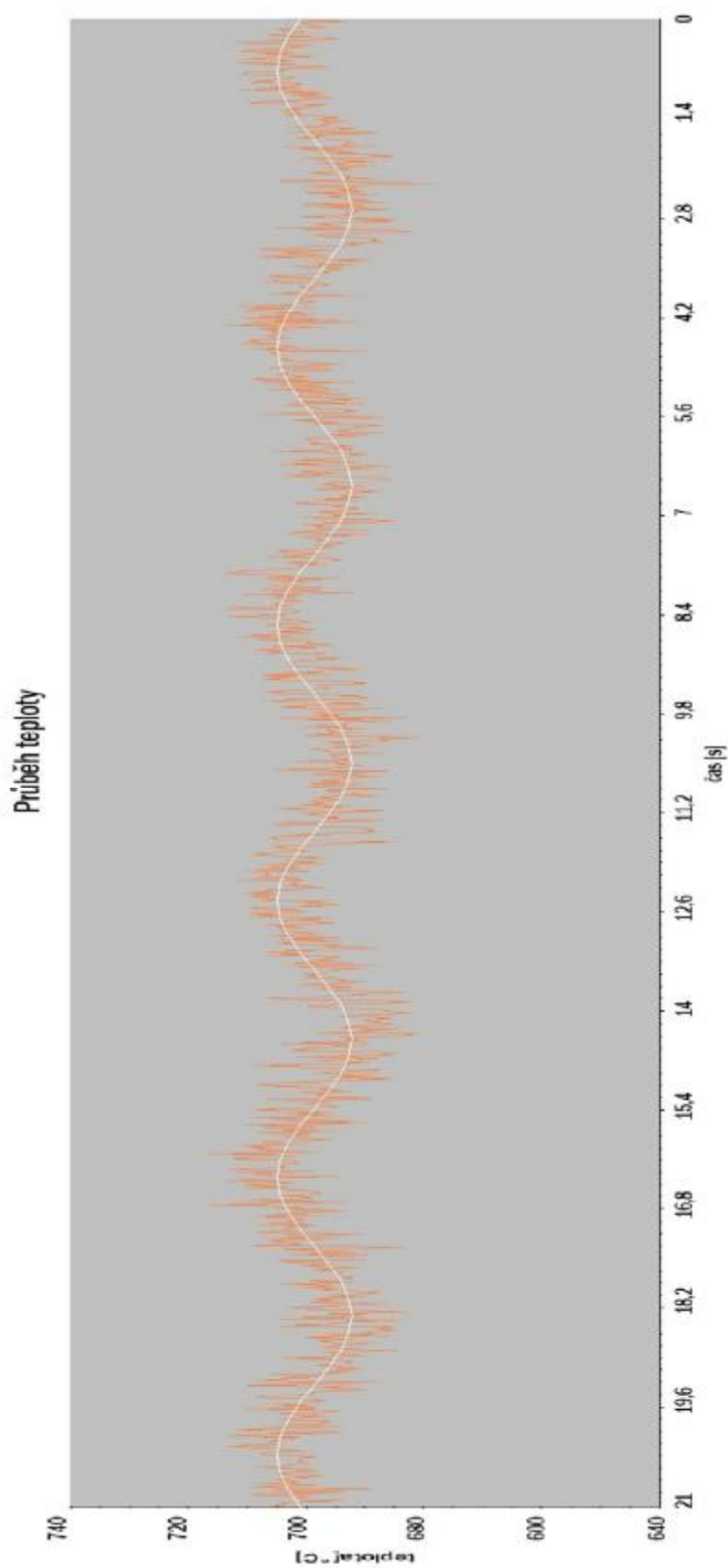
Obr. 3.2.22 Teplotní mapa topného článku – 200 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr. 3.2.23 Průběh teploty topného článku – 200 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.

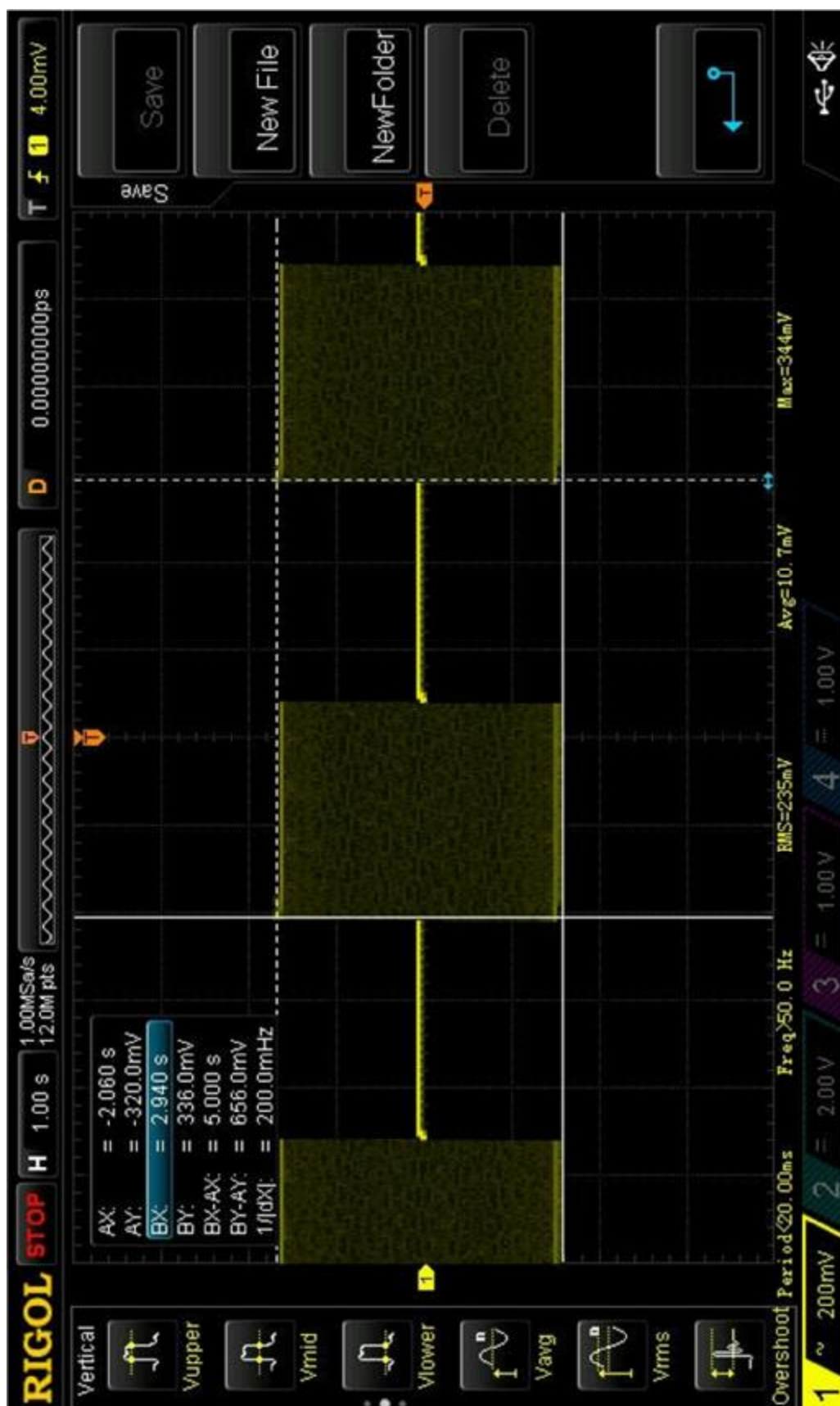


Obr. 3.2.24 Teplotní mapa topného článku – 200 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

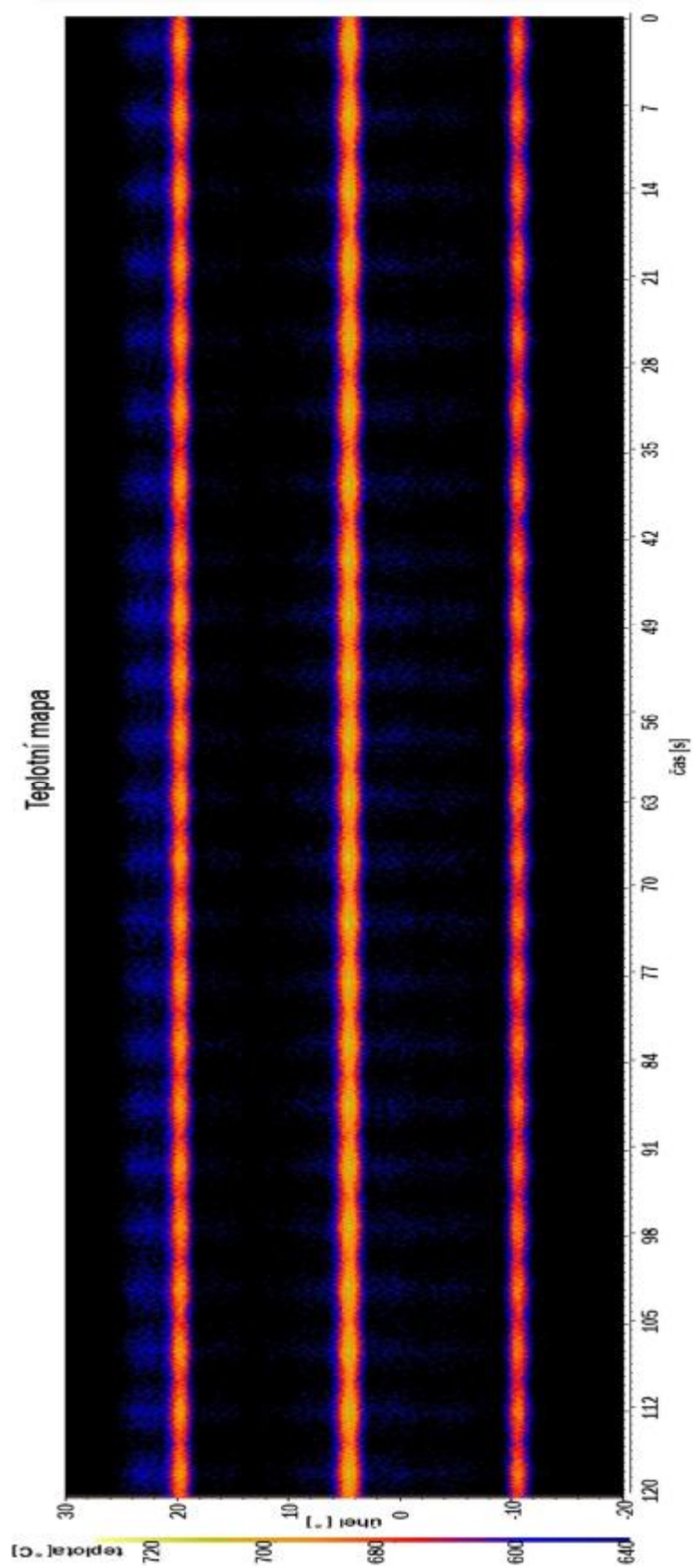


Obr. 3.2.25 Průběh teploty topného článku – 200 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

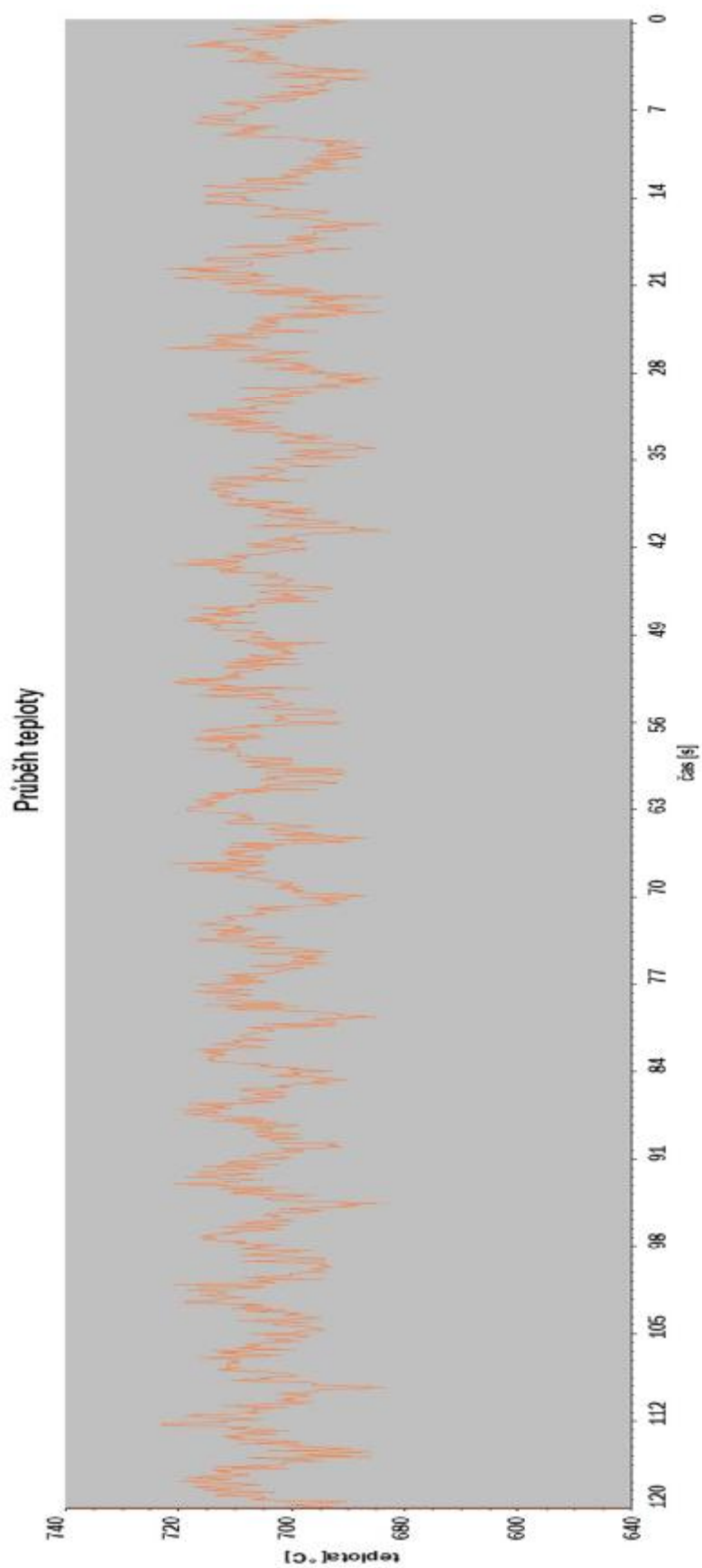
3.2.4.1.5 250 period



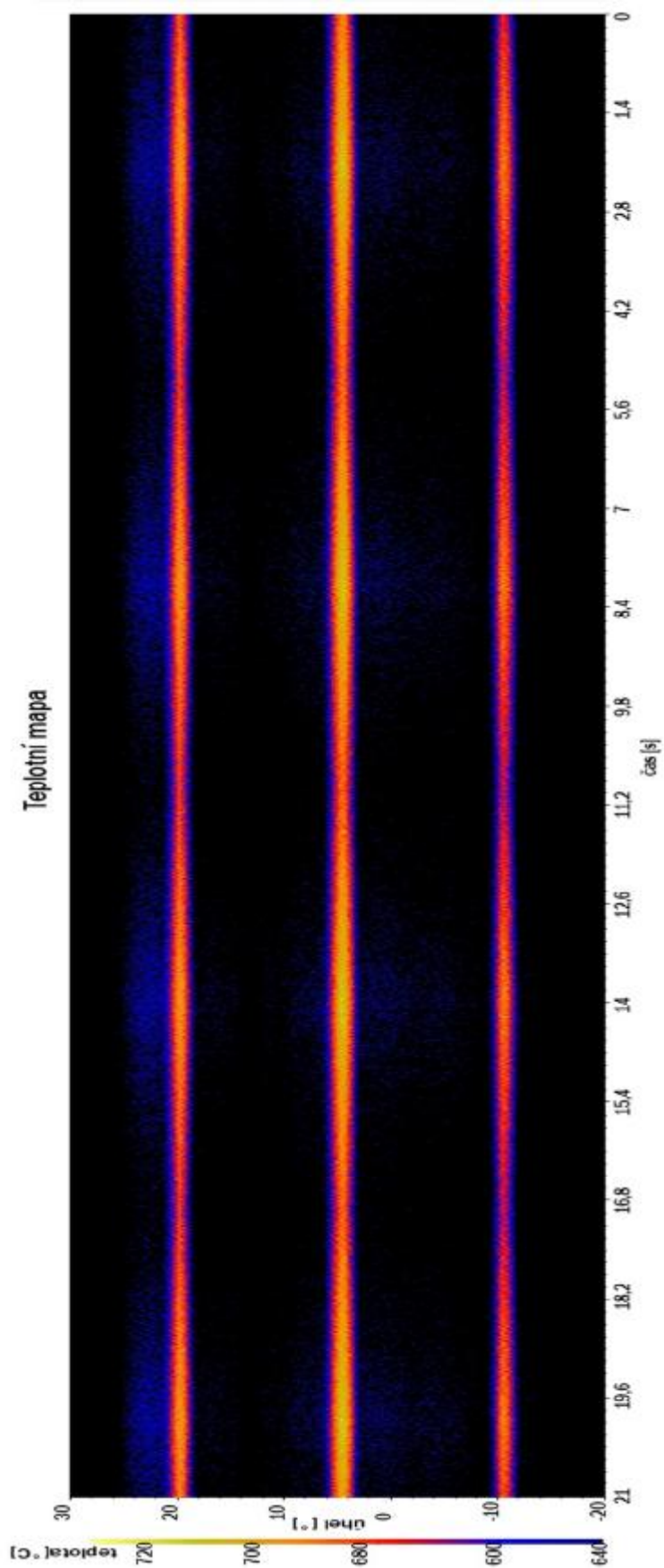
Obr. 3.2.26 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.



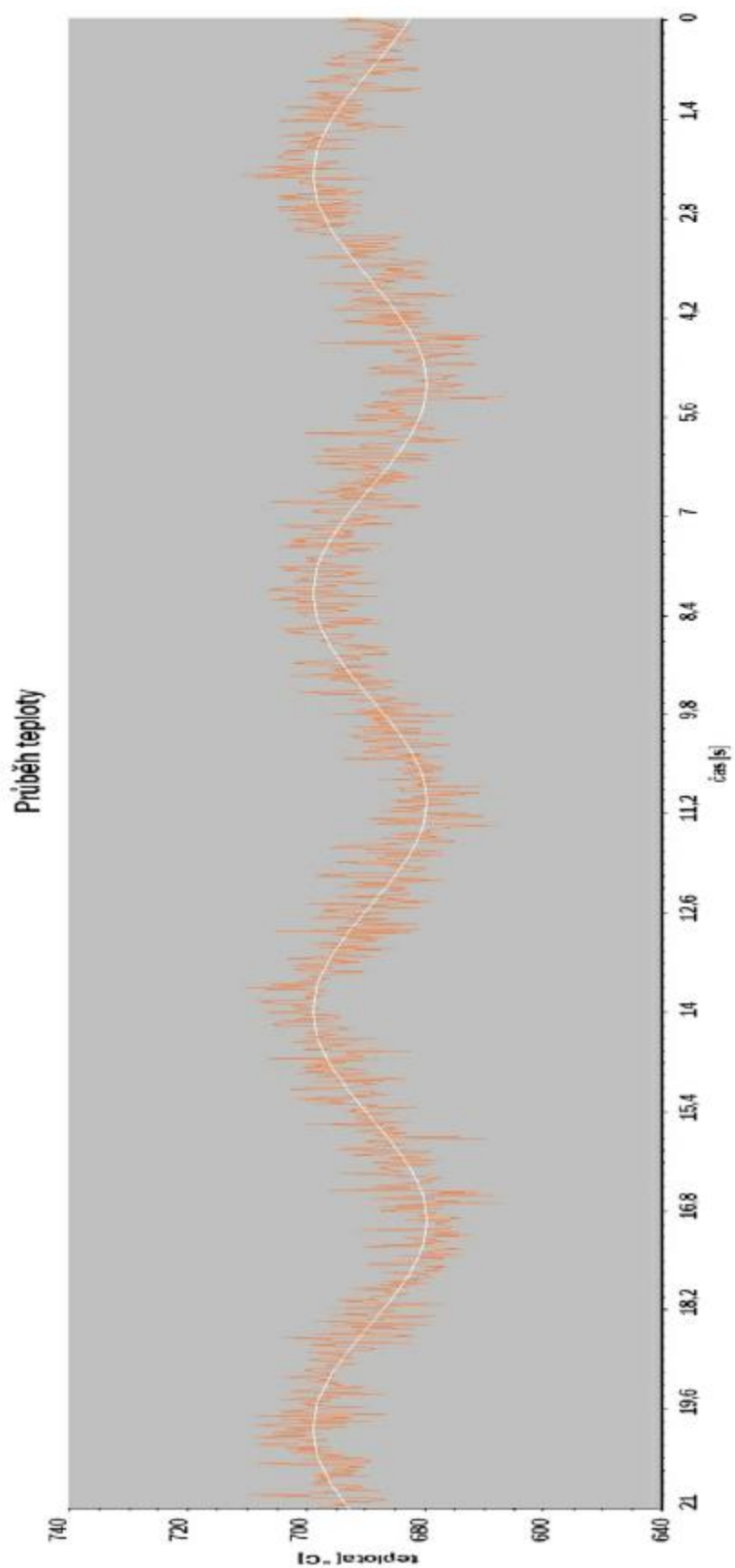
Obr. 3.2.27 Teplotní mapa topného článku – 250 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr. 3.2.28 Průběh teploty topného článku – 250 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.

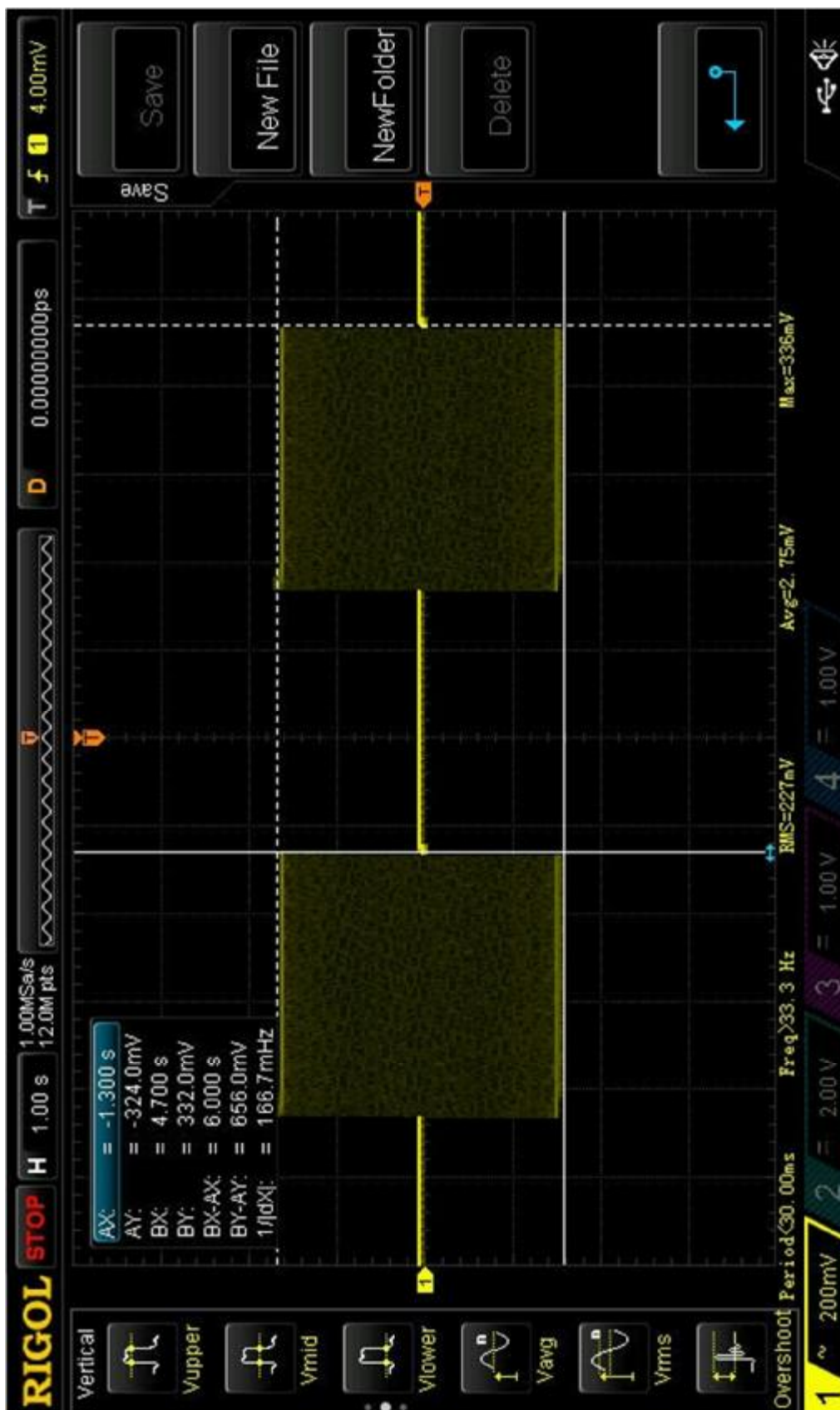


Obr. 3.2.29 Teplotní mapa topného článku – 250 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD - 10.

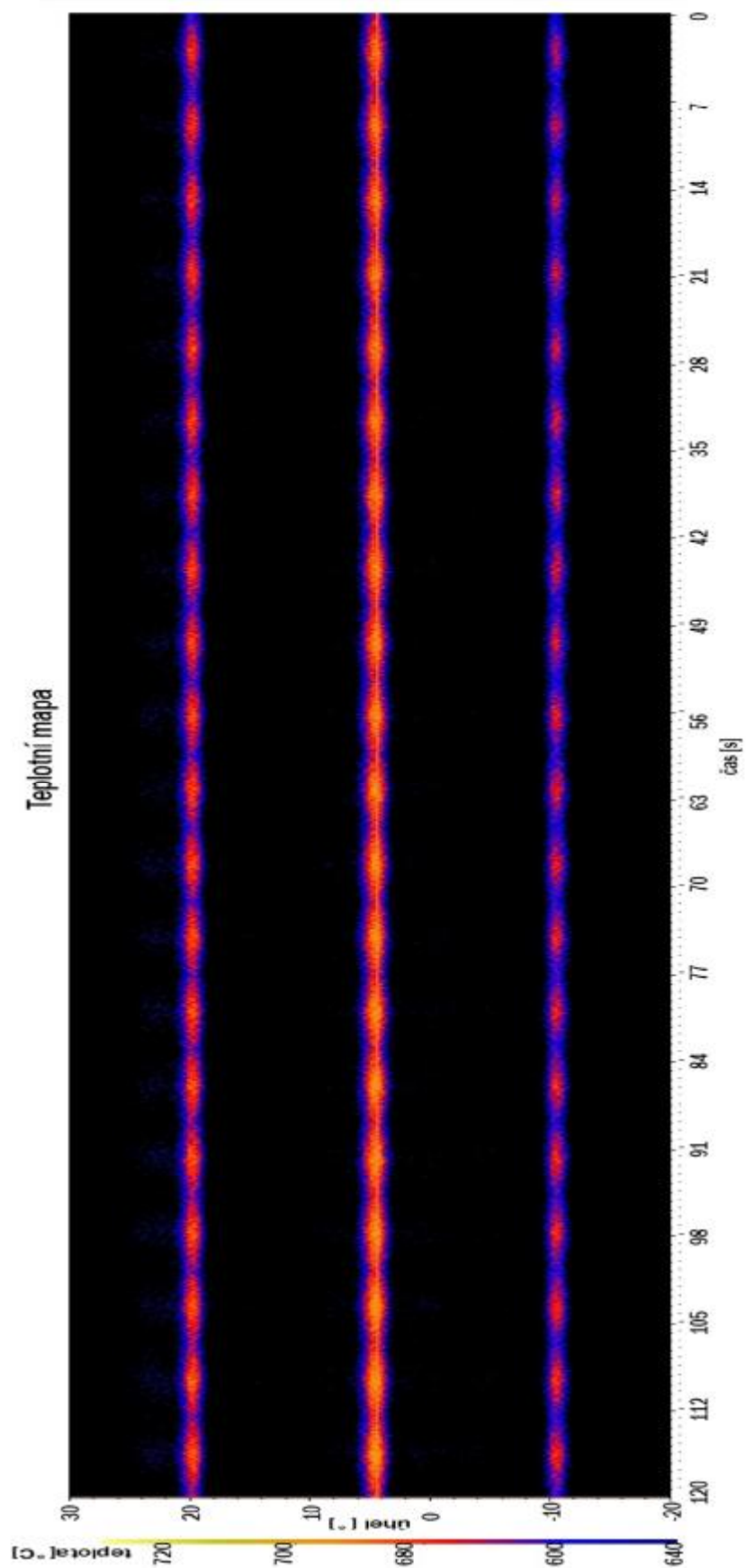


Obr. 3.2.30 Průběh teploty topného článku – 250 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

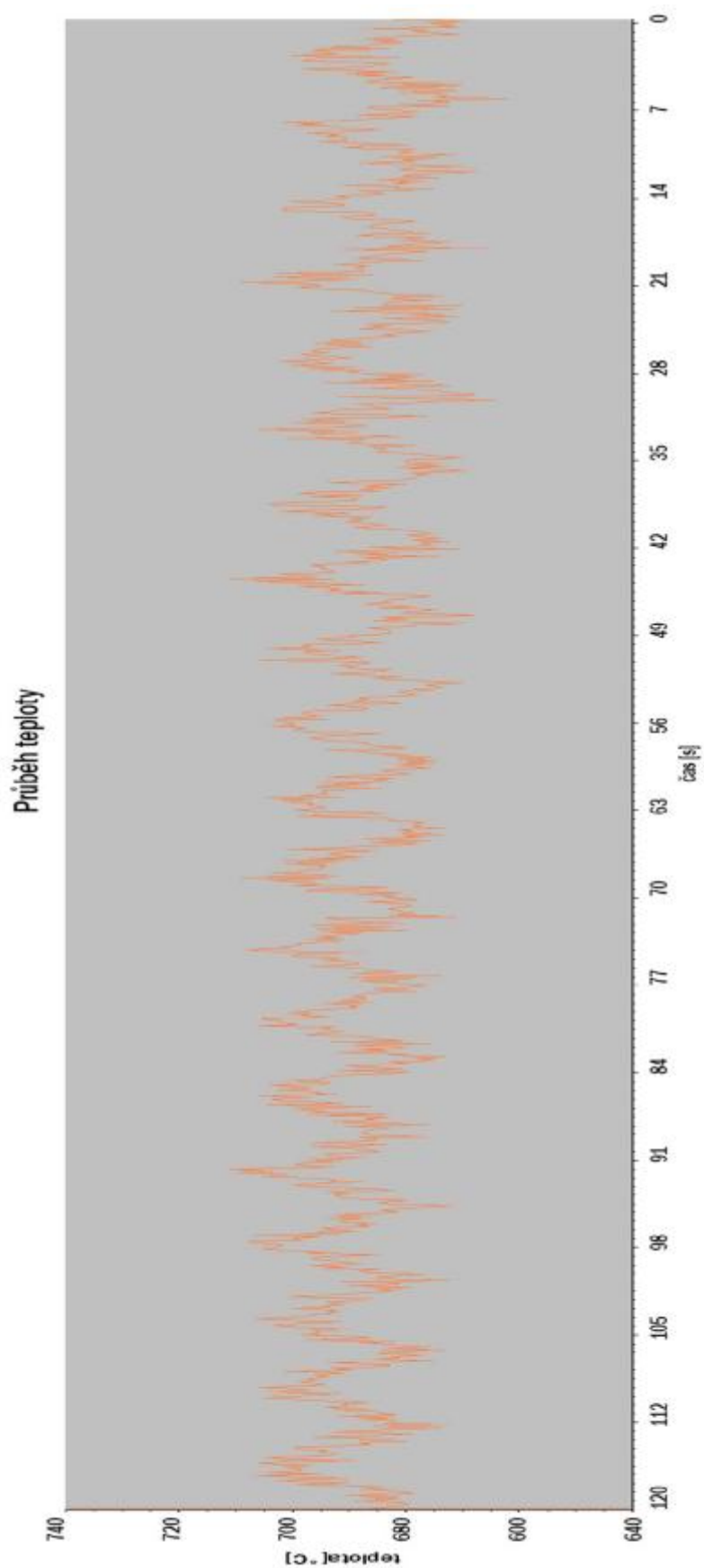
3.2.4.1.6 300 period



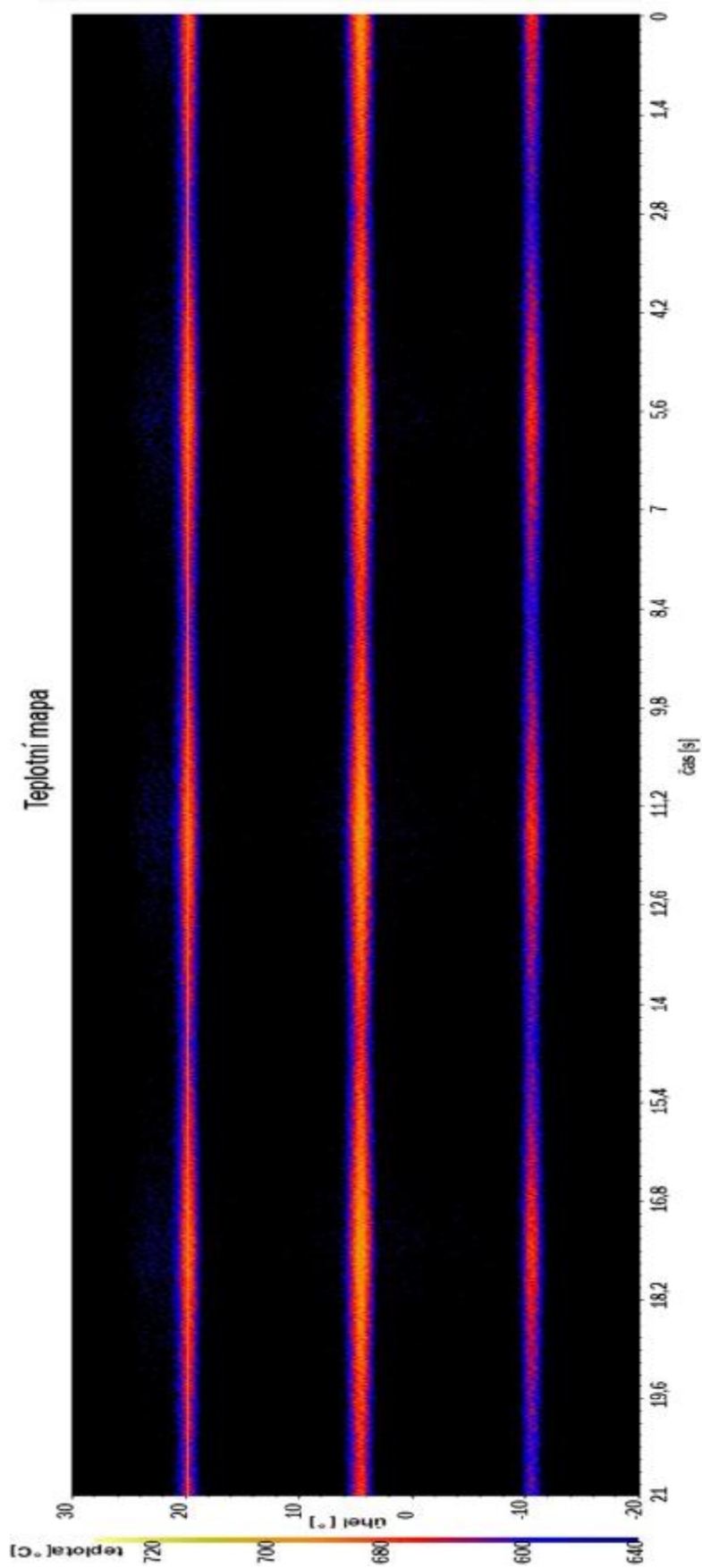
Obr. 3.2.31 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.



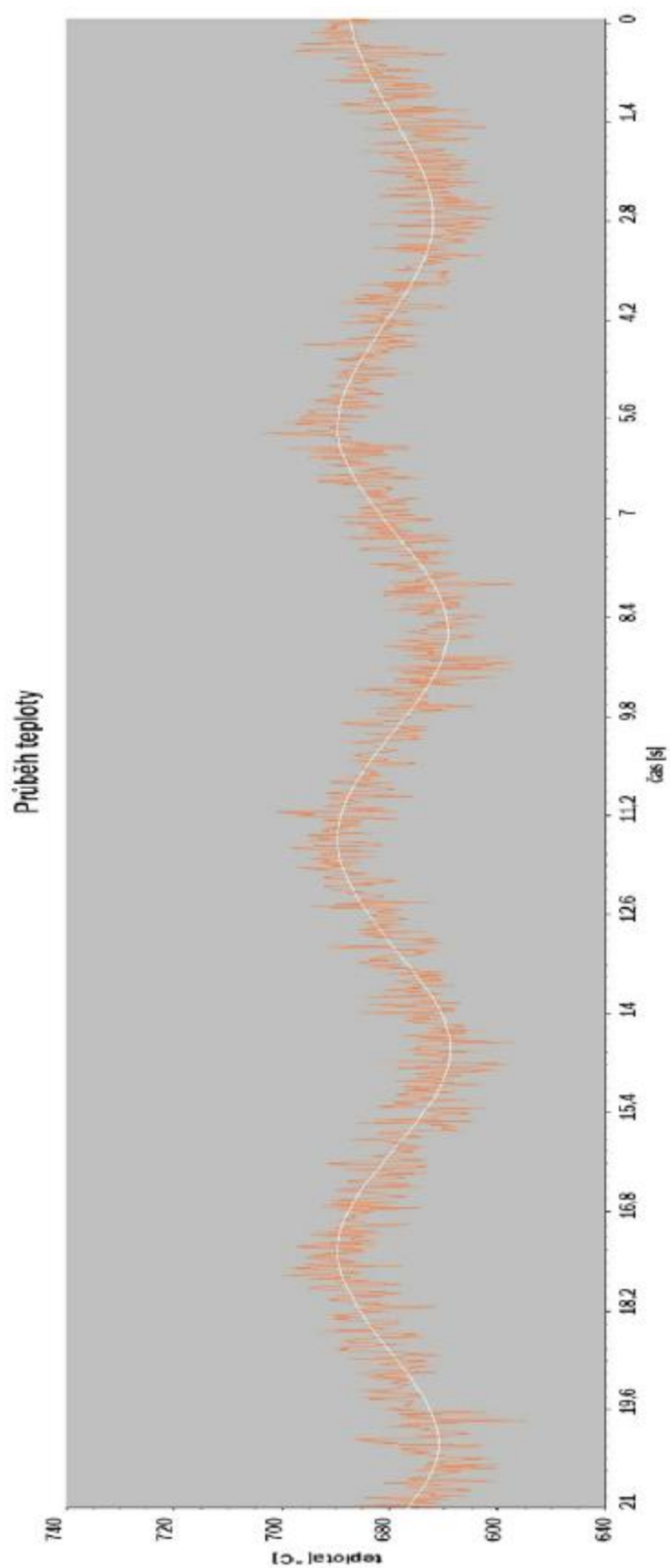
Obr. 3.2.32 Teplotní mapa topného článku – 300 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr. 3.2.33 Průběh teploty topného článku – 300 period čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



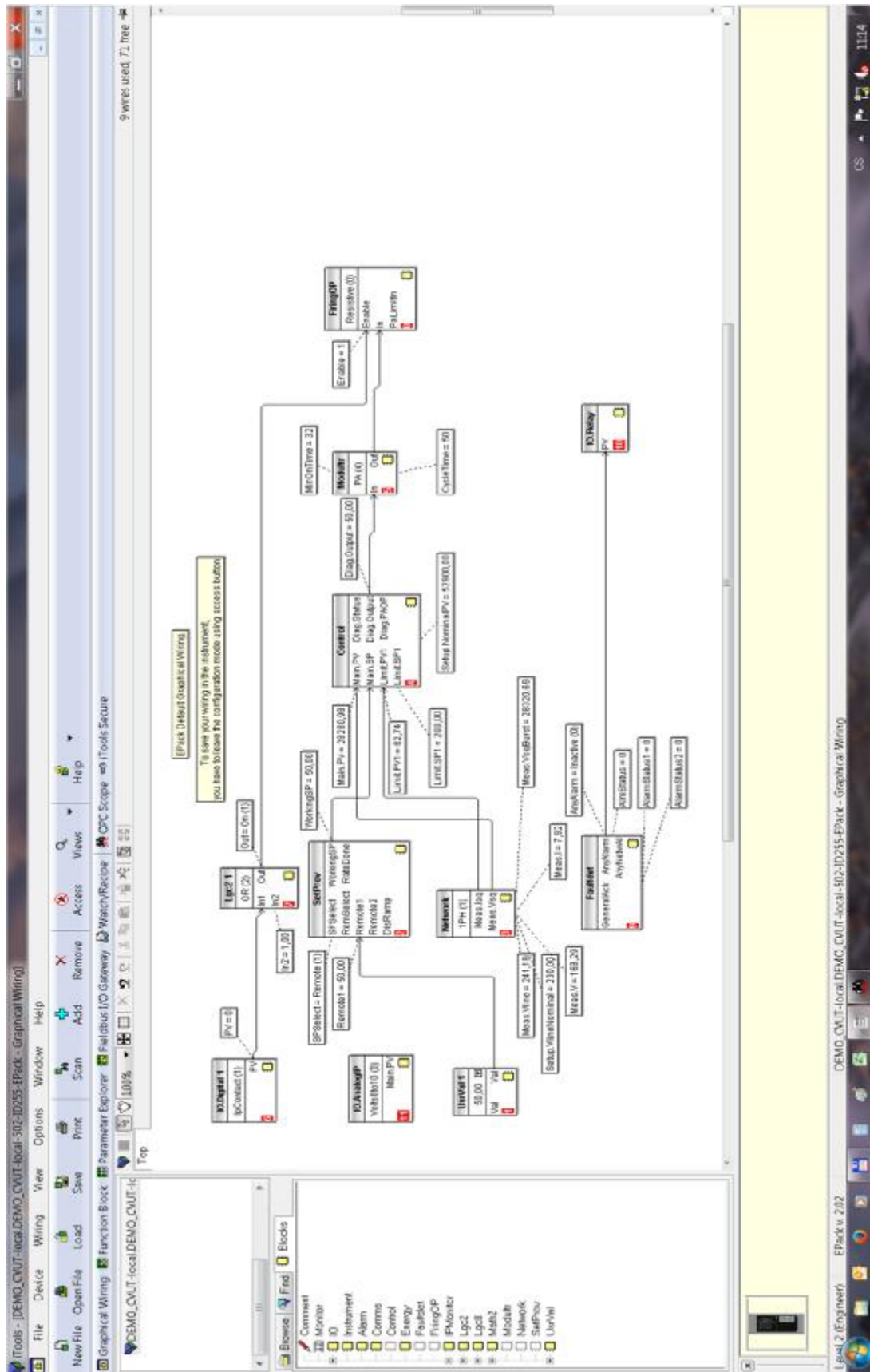
Obr. 3.2.34 Teplotní mapa topného článku – 300 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.



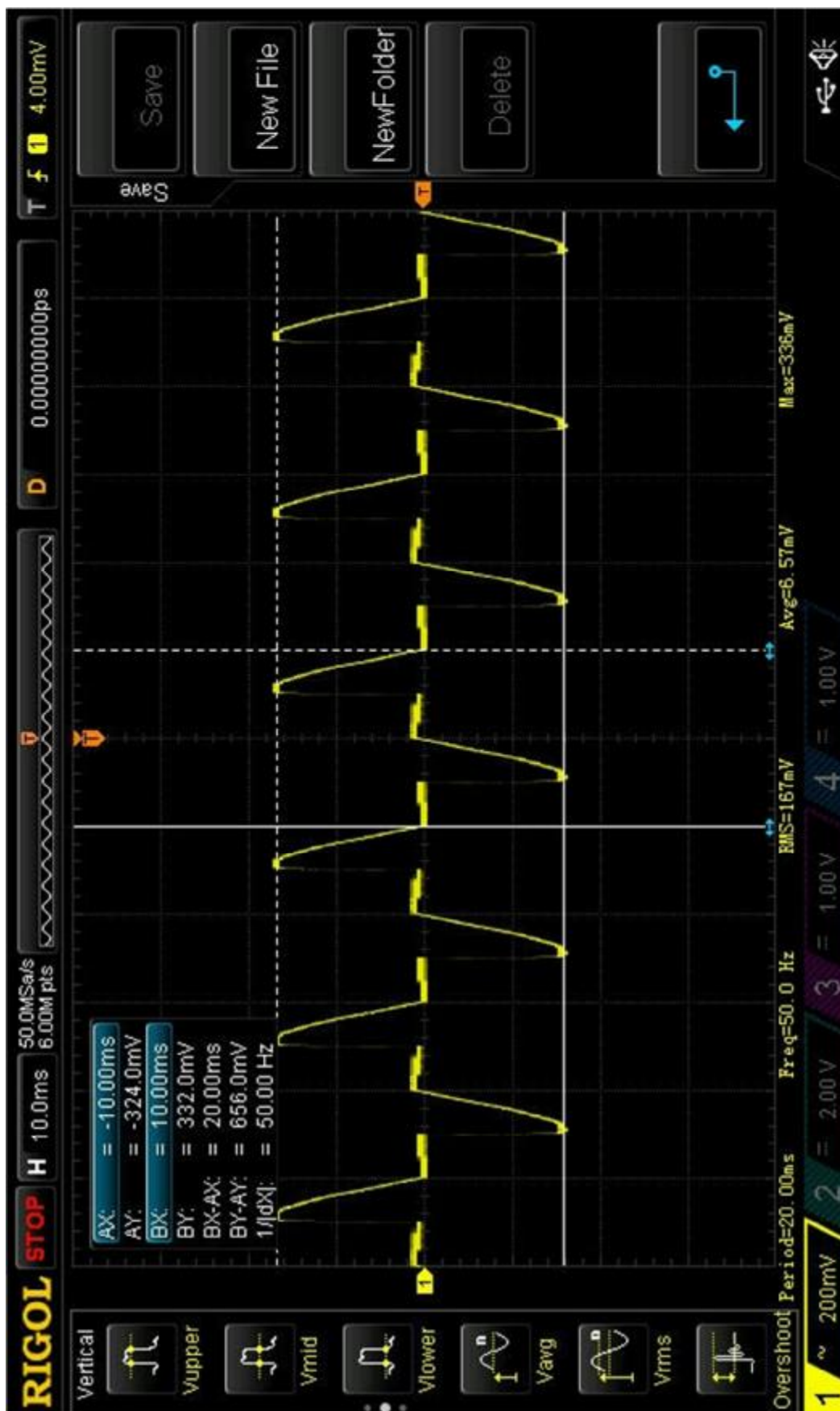
Obr. 3.2.35 Průběh teploty topného článku – 300 period čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.

3.2.4.2 Fázové řízení

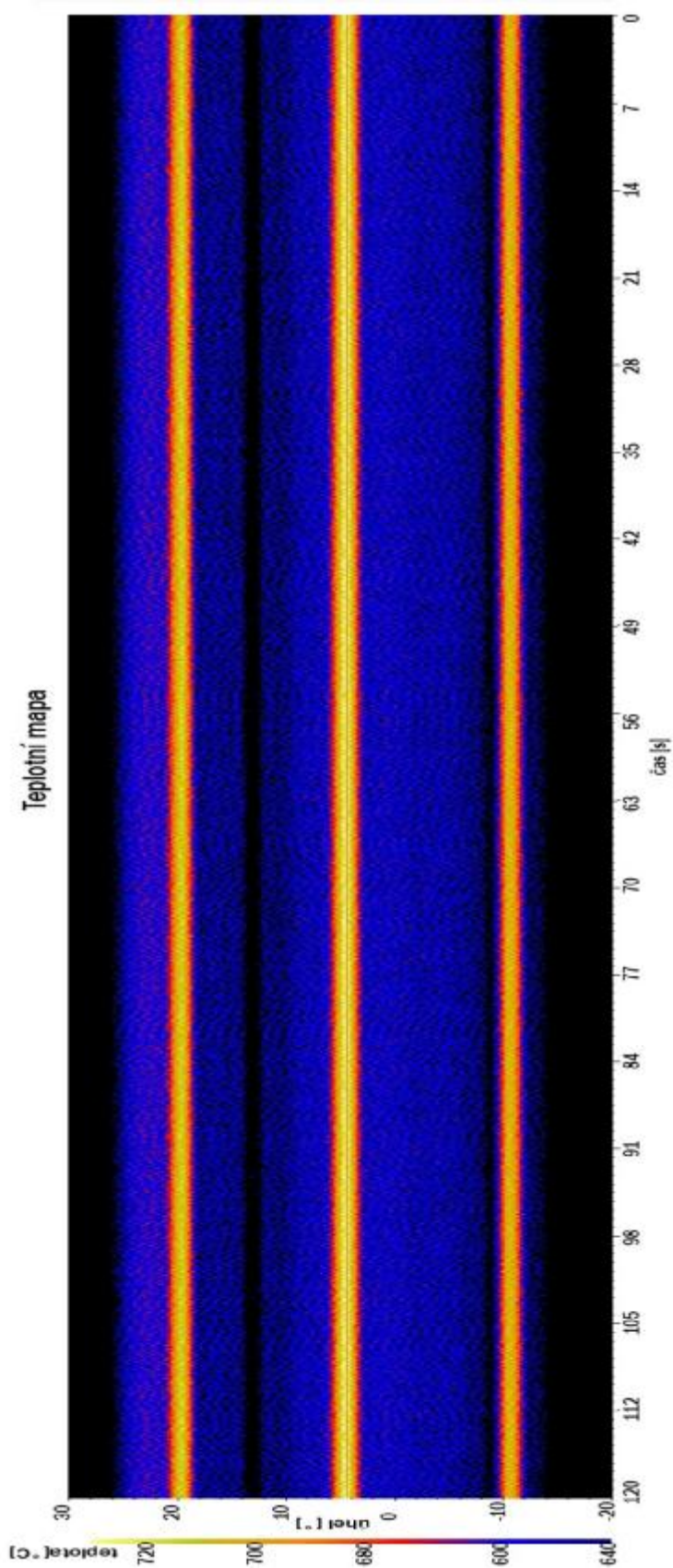
Při tomto způsobu řízení jsem použil následující délky regulačních period 50, 100, 150, 200, 250, a 300 period (1perioda – 1sinusovka – 20 ms). Aby mohlo být provedeno korektní porovnání teploty topného článku, nastavil jsem při uvedených průbězích 50 % žádost na výkon.



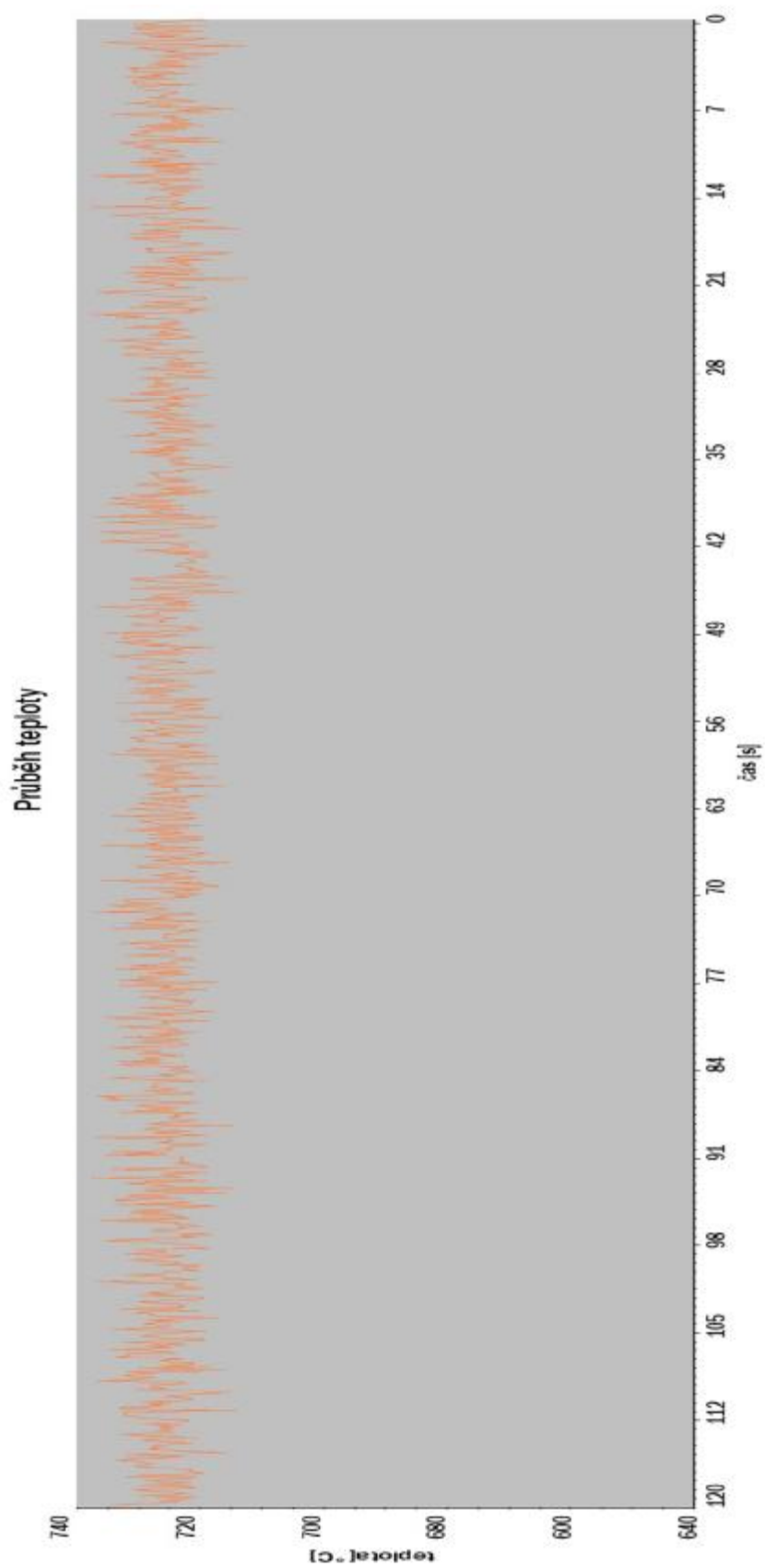
Obr. 3.2.36 Struktura thyristorové jednotky EPAC – při fázovém řízení



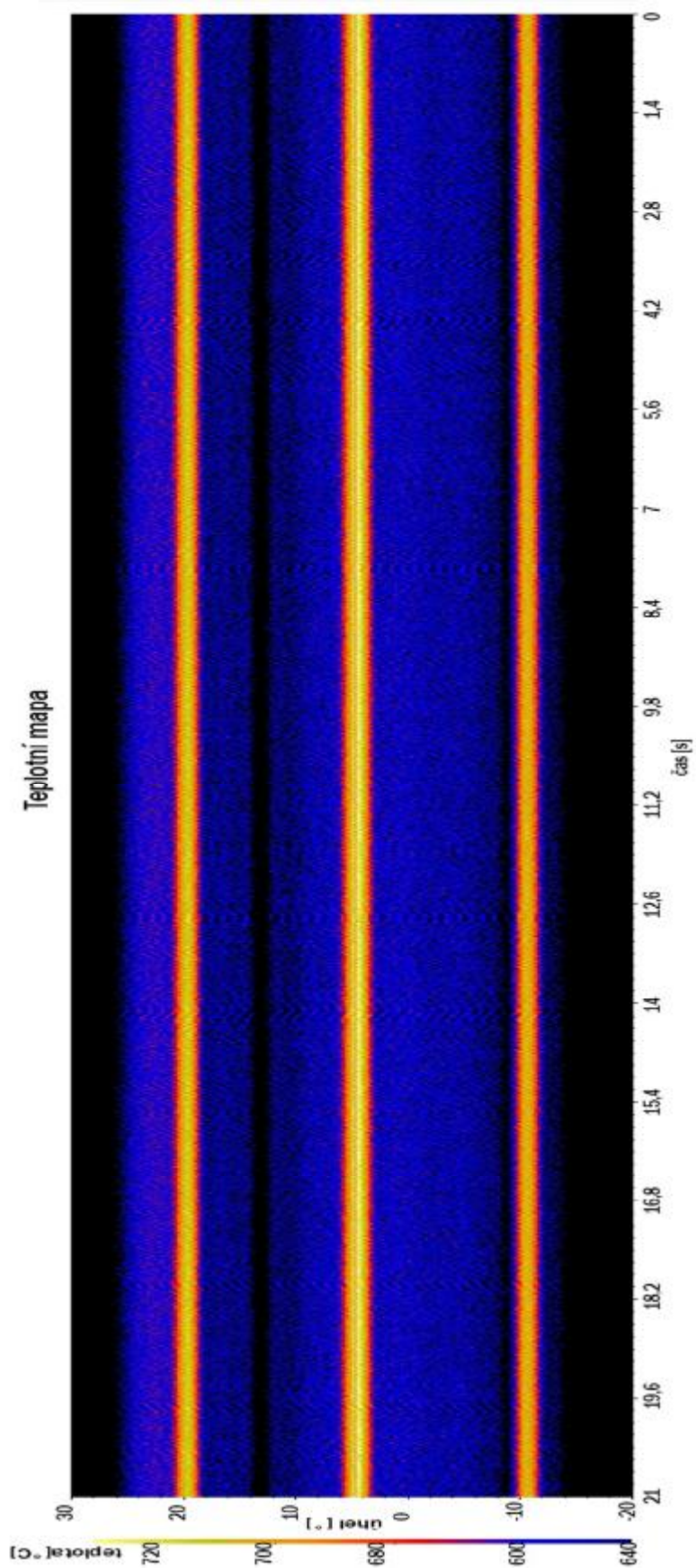
Obr. 3.2.37 Průběh napětí na zátěži při experimentu - zaznamenáno osciloskopem RIGOL DS 2000.



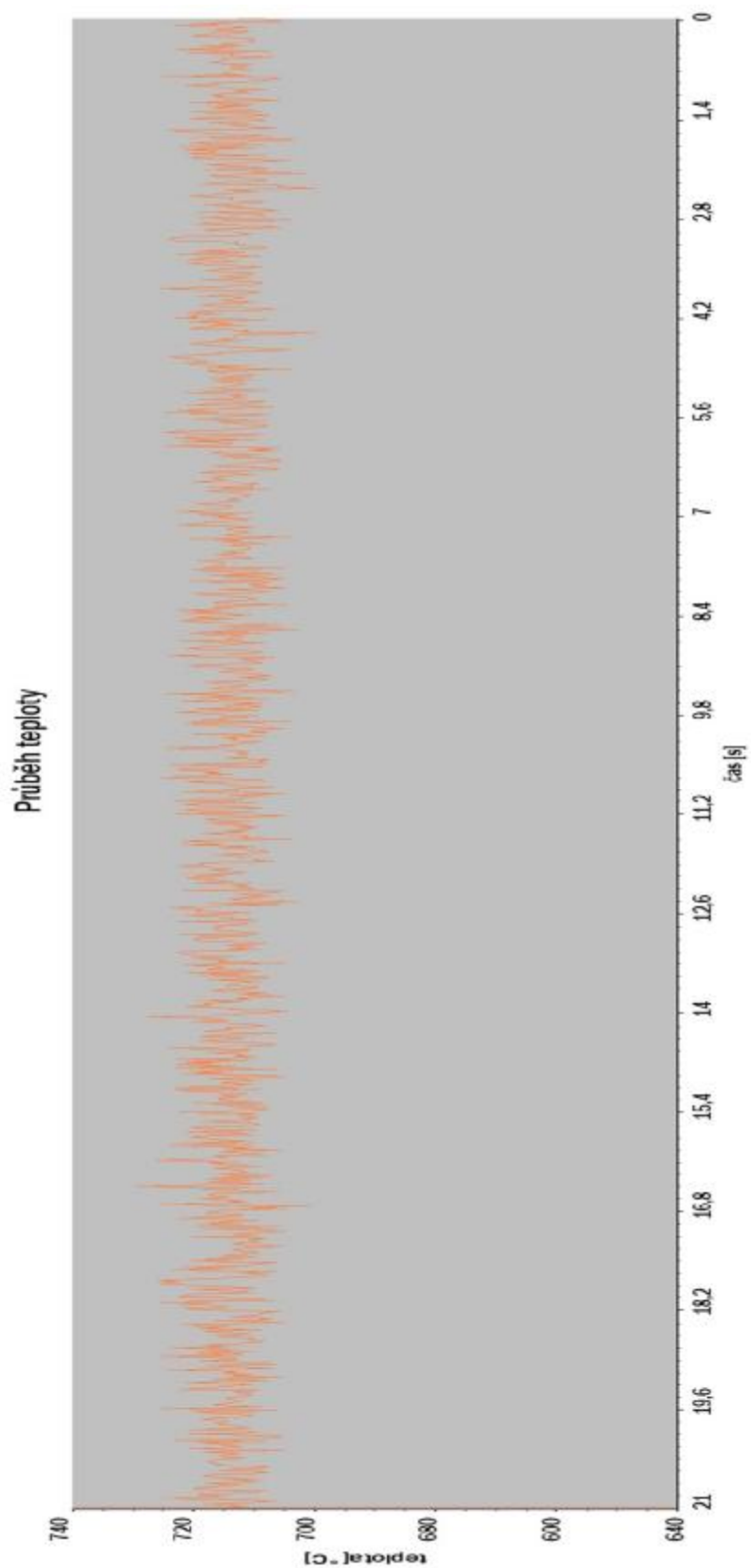
Obr. 3.2.38 Teplotní mapa topného článku -fázové řízení čas skenování 120 s - záznam z LSP - HD - 10.



Obr.3.2.39 Průběh teploty topného článku – fázové řízení čas skenování 120 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr. 3.2.40 Teplotní mapa topného článku – fázové řízení čas skenování 21 s - záznam z LSP – HD – 10.



Obr. 3.2.41 Průběh teploty topného článku – fázové řízení čas skenování 21s - záznam z LSP – HD – 10.

3.2.5 Vyhodnocení výsledků z experimentu

Na základě naměřených charakteristik podle odst.3.2.2.1 jsem provedl analýzu obou způsobů řízení výkonu topného článku. s ohledem na jeho povrchovou teplotu Výsledky z měření jsou uvedeny na obrázcích obr. 3.2.5 až obr. 3.2.41:

Cyklické řízení

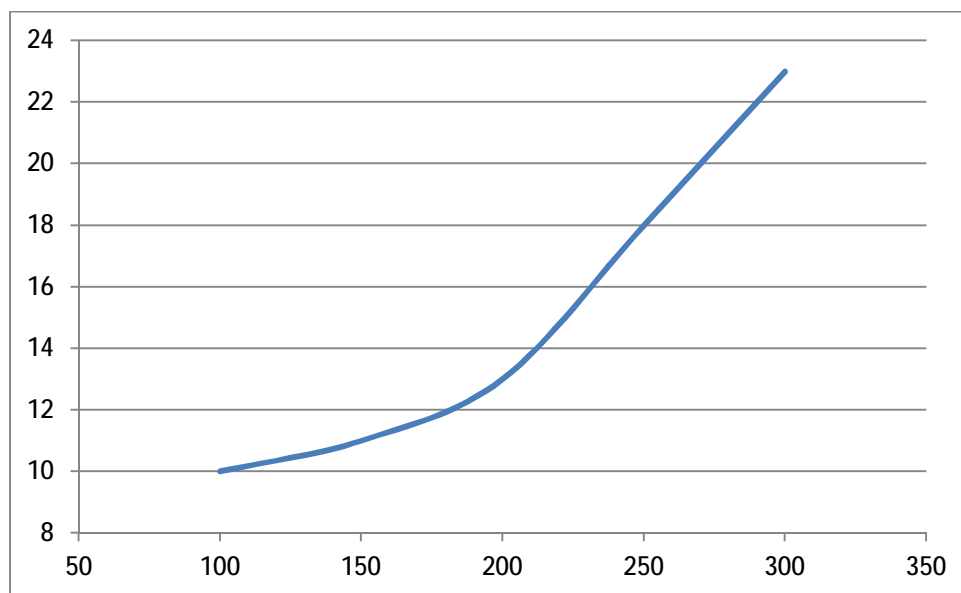
Při tomto způsobu řízení jsem se zaměřil na vyhodnocení a to na:

- 1) Vliv rozkmitu povrchové teploty na délce regulační periody
- 2) Velikost průměrné hodnoty povrchové teploty topného článku

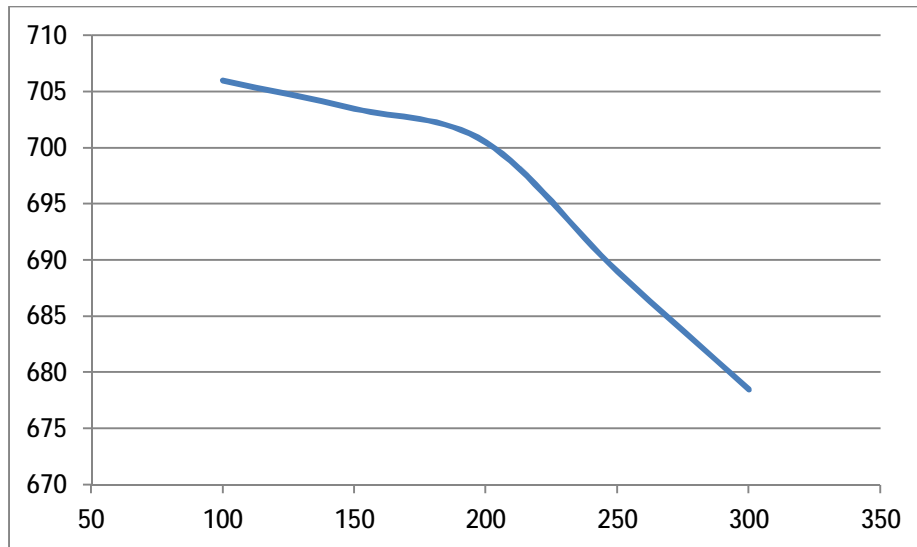
Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.2.2

Počet period	Min povrchová teplota [°C]	Max povrchová teplota [°C]	Rozkmit povrchové teploty [°C]	Průměrná hodnota povrchové teploty [°C]
100	701	711	10	706
150	698	709	11	703,5
200	694	707	13	700.5
250	680	698	18	689
300	667	690	23	678.5

Tab. 3.2.2 Hodnoty povrchové teploty topného článku v závislosti na délce regulační periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku



Obr. 3.2.42 Závislost rozkmitu teploty topného článku na délce periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku



Obr. 3.2.43 Velikost průměrné hodnoty povrchové teploty topného článku na délce periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku

Rozkmit teploty topného článku při cyklickém řízení napájecího napětí lze určit simulací na vytvořeném matematickém modelu.

- 1) Rozkmit teploty topného článku při střídavém zapínání a vypínání příkonu stoupá s délkou regulační periody.
- 2) Z uvedeného grafu obr. 3.2.42 - závislost rozkmitu teploty topného článku na délce periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku je zřejmé, že v oblasti krátkých period je rozkmit povrchové teploty malý, zatím co s rostoucí délkou periody asymptoticky stoupá.
- 3) Z tohoto pohledu by měla být délka periody při cyklickém řízení příkonu do topného článku co nejkratší. To nelze vždy splnit. Zejména u mnoha zónových pecí, pro které se neustále vyvíjí nové řídicí algoritmy, které pracují s delšími časy regulačních period. Po úplnost uvádím např. sekvenční řízení nebo prediktivní řízení.
- 4) Velikost průměrné hodnoty teploty povrchu topného článku s délkou regulační periody též klesá, viz. obr. 3.2.43.

Úhlové řízení

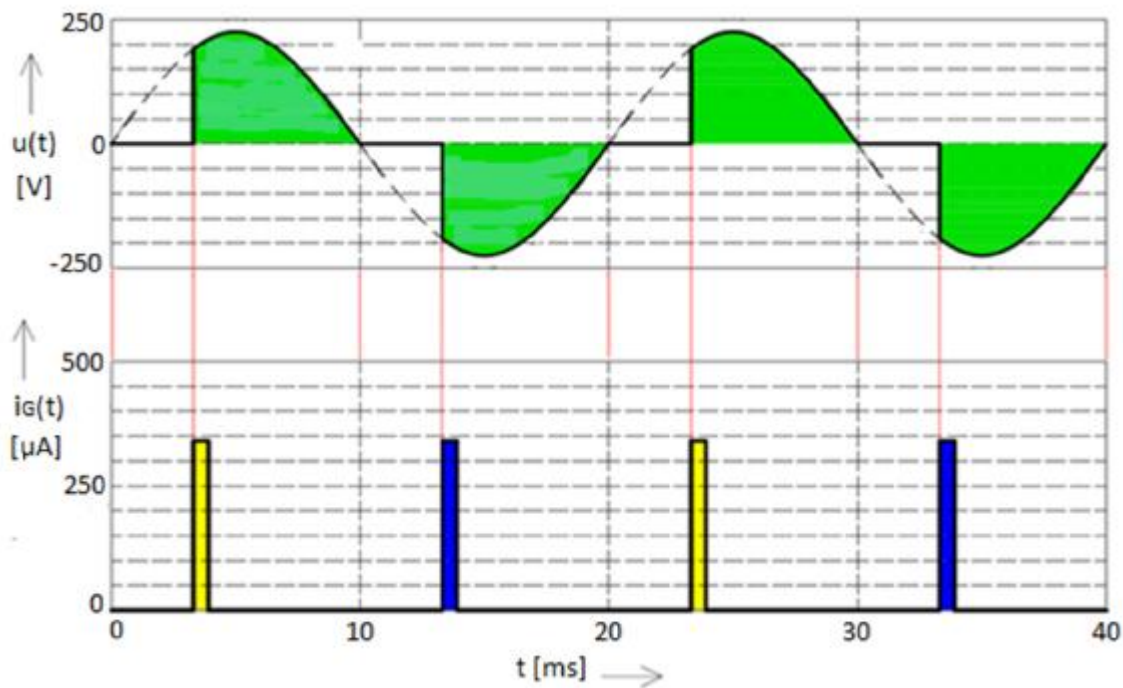
Při tomto způsobu řízení nedochází k tak velkému rozkmitu teplot jako u cyklického řízení.

Porovnáním obou způsobů řízení lze konstatovat, že u průměrných povrchových teplot topného článku je rozdíl $\Delta t = 15^\circ\text{C}$. Co se týče průběhů okamžité teploty není podstatného rozdílu mezi cyklickým řízením - 50 period a fázovým řízením. To však nelze říci při porovnání zpětného působení obou způsobů řízení na napájecí soustavu.

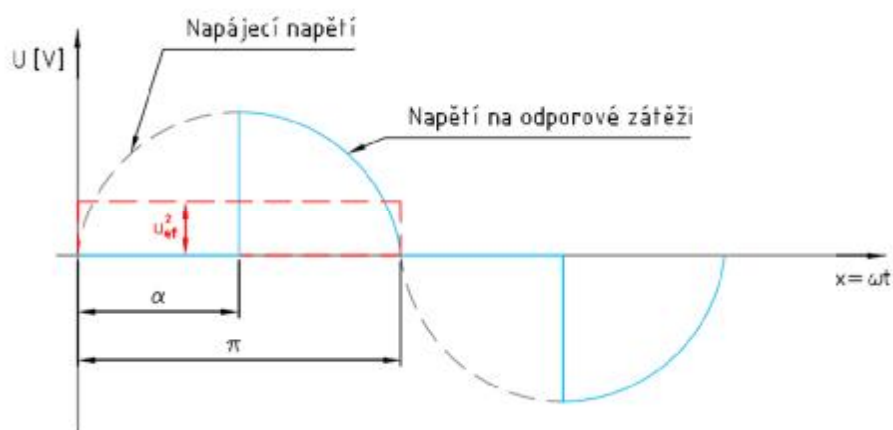
3.2.6 Porovnání napěťových a proudových poměrů při fázovém a cyklickém řízení

Popis funkce popisují v kap. 3., odst. 3.1.3.2. V následujícím odstavci se již zabývám stanovením napěťových a proudových poměrů při řízení výkonu topného článku.

3.2.6.1 Fázové řízení



Obr. 3.2.42 Princip fázového řízení pomocí antiparalelně zapojených tyristorů (nejpoužívanější zapojení).



Obr. 3.2.43 Průběh napětí na topném článku při fázovém řízení pomocí antiparalelně zapojených tyristorů (nejpoužívanější zapojení).

Napájecí napětí je dáno vztahem:

$$u = U_m \sin x \quad (3.2.1)$$

v němž :

$$x = \omega t$$

$U_m = \sqrt{2} U$ je amplituda napětí, jehož efektivní hodnota je U

$$U_{ef}^2 \pi = \int_{\alpha}^{\pi} u^2 dx \quad (3.2.2)$$

Po dosazení za u podle (3.2.1) vychází pro U_{ef} :

$$U_{ef}^2 = \frac{2U^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 x dx = \frac{2U^2}{\pi} \left[\frac{x}{2} - \frac{1}{4} \sin 2x \right]_{\alpha}^{\pi} = U^2 \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)$$

$$U_{ef} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (3.2.3)$$

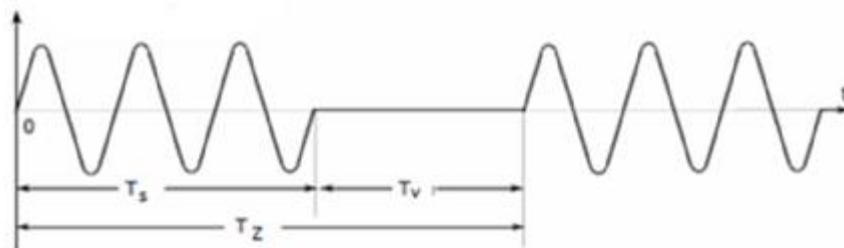
Efektivní hodnota proudu pak je

$$I_{ef} = \frac{U}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (3.2.4)$$

Výkon na zátěži je:

$$P = R I_{ef}^2 = \frac{U^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right) \quad (3.2.5)$$

3.2.6.2 Cyklické řízení



Obr. 3.2.44 Průběh napětí na topném článku při cyklickém řízení pomocí antiparalelně zapojených tyristorů (nejpoužívanější zapojení).

Efektivní hodnotu napětí určíme ze vztahu :

$$U_{ef}^2 T_s = U_{efs}^2 T_z \quad (3.2.6)$$

Možno upravit

$$U_{\text{efs}}^2 = \frac{T_s}{T_z} U_{\text{ef}}^2 \quad (3.2.7)$$

Možno upravit

$$U_{\text{efs}} = \sqrt{\frac{T_s}{T_z} U_{\text{ef}}^2} \quad (3.2.8)$$

Pro efektivní hodnotu napětí platí:

$$U_{\text{efs}} = U_{\text{ef}} \sqrt{\frac{T_s}{T_z}} \quad (3.2.9)$$

Efektivní hodnota proudu pak je

$$I_{\text{efs}} = \frac{U_{\text{ef}}}{R} \sqrt{\frac{T_s}{T_z}} \quad (3.2.10)$$

Výkon na zátěži je:

$$P = R I_{\text{ef}}^2 = \frac{U_{\text{ef}}^2 \frac{T_s}{T_z}}{R} \quad (3.2.11)$$

Použité prameny: [2], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [24], [25], [26], [28], [29], [30], [31], [41], [42], [43],

3.3 *Matematický model*

3.3.1 *Popis modelu topného článku muflové pece s odkrytou spirálou*

Pro simulaci kolísání teploty odkrytého topného článku při střídavém zapínání a vypínání el. napájení použiji velmi jednoduchý model.

Topnou spirálu budu považovat za jednu tepelnou kapacitu, mající hmotnost M_a [kg], měrné teplo c_a [J/kgK] a teplotu t_a [°C]

Topná spirála z vnější strany sálá do odkrytého okolí, z vnitřní strany sálá na keramickou mufli. Tepelný tok ze spirály do okolí je q_{ab} [W]., tepelný tok ze spirály do mufle je q_{ac} [W]. Tepelný tok do spirály je roven elektrickému příkonu q_{el} [W]

Vzhledem k tomu, že při simulacích na tomto modelu budu sledovat jen krátké časové úseky v délce desítek sekund, zanedbám dynamiku teploty mufle a budu teplotu okolí t_b [°C] i teplotu mufle t_c [°C] považovat za konstantní.

Matematický model odkrytého topného článku pak sestává z jedné obyčejné diferenciální rovnice 1. řádu pro teplotu spirály, dvou relací pro sdílení tepla sáláním a algoritmu pro střídavé zapínání a vypínání el. příkonu do spirály.

3.3.2 *Označení veličin v matematickém modelu topného článku muflové pece s odkrytou spirálou*

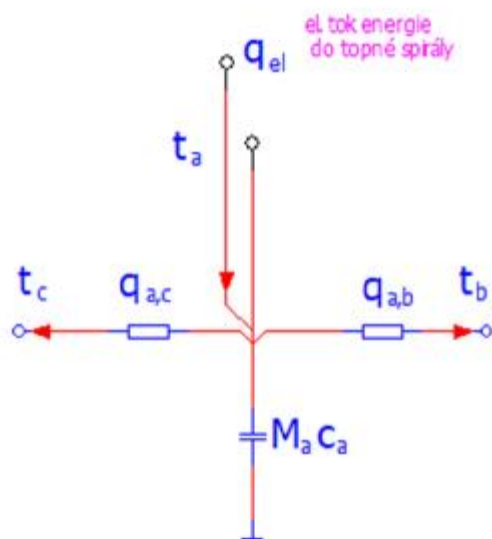
Viz 2.3.6

3.3.3 *Indexace veličin v matematickém modelu topného článku muflové pece s odkrytou spirálou*

index	Příslušnost k:
a	Topná spirála
b	Okolí
c	Stěna
el	Elektrický zdroj energie

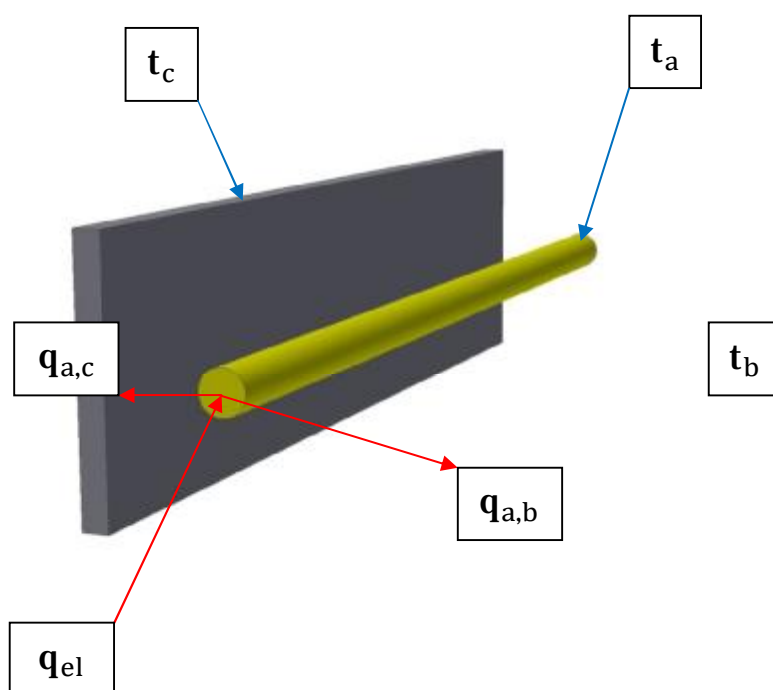
3.3.4 *Znázornění struktury matematického topného článku muflové pece s odkrytou spirálou*

S použitím analogie z kapitoly 2.3.8 bylo vytvořeno pro tento případ schéma struktury matematického modelu topného článku muflové pece.



Obr. 3.3.1 Elektrické schéma matematického modelu topného článku (simulující podmínky s odkrytou spirálou).

3.3.5 Znázornění tepelných toků a teplot



Obr. 3.3.2 Ukázka tepelných toků a teplot v modelu reprezentující topný článek (simulující podmínky s odkrytou spirálou).

3.3.6 Vstupy a výstupy matematického modelu

Vstup, tj. nezávislá veličina, je elektrický příkon do topné spirály $q_{el} = q_{el}(\tau)$

Výstupem modelu je t_a - teplota spirály

V ustáleném stavu musí být $q_{ab} = q_{el}$

3.3.7 Stavová diferenciální rovnice teplot

Topná spirála

$$M_a c_a \frac{dt_a}{d\tau} = q_{el} - q_{a,b} - q_{a,c} \quad (3.3.1)$$

3.3.8 Relace pro tepelné toky

$$q_{el} = q_{el}(\tau) \quad (3.3.2)$$

$$q_{a,b} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{a,b} ((t_a + 273)^4 - (t_b + 273)^4) S_{a,b} \varphi_{a,b} \quad (3.3.3)$$

$$q_{a,c} = 5,675 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{a,c} ((t_a + 273)^4 - (t_c + 273)^4) S_{a,c} \varphi_{a,c} \quad (3.3.4)$$

Použité prameny: [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [21], [25], [26], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [43].

3.4 Experimentální verifikace výsledků modelové simulace ohřívacích cyklů na modelu topného článku

3.4.1 Úvod

V první části jsem se zaměřil na experiment na funkčním modelu topného systému s odkrytou spirálou.

Při konstrukci tohoto modelu vycházím z konstrukce funkčního vzorku muflové pece, který byl pro účely ověřování výsledků vyroben.

Řízení příkonu do elektrické muflové pece uvažuji jako cyklické ovládání s pevně stanovenou délkou regulační periody.

V následující části jsem se soustředil na sestavení matematického modelu sdílení tepla topného článku muflové pece s odkrytou vyzdívkou do okolí. Kolísání povrchu teploty článku při cyklickém ovládání příkonu je možné zjistit z výsledků simulací na tomto matematickém modelu.

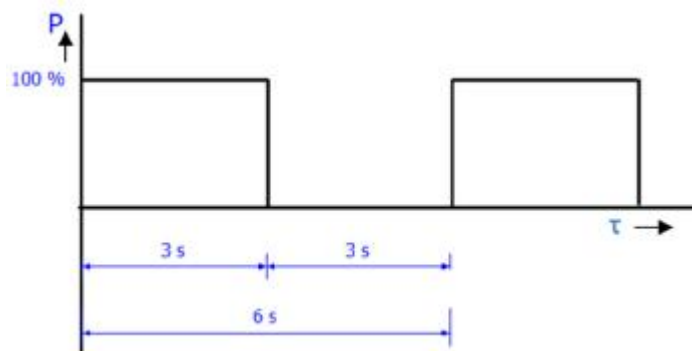
K ověření výsledků a použitelnosti této metody jsem provedl porovnání simulací s experimentálním měřením na reálném modelu – odkryté topné spirály.

3.4.2 Technická realizace experimentu - stanovení amplitudy povrchové teploty topného článku v elektrické muflové peci

V prvním kroku jsem chtěl experimentálně zjistit kolísání teploty povrchu topného článku v reálné muflové peci. To je v praxi technicky nemožné. Proto jsem pro tento účel zhotovil funkční model topného systému muflové pece, na kterém jsem experiment realizoval. Jak je vidět na obr. 3.2.3 na čelním panelu modelu jsem obnažil topný článek. V tomto místě bylo měření realizováno pomocí teplotního scanneru. V odkrytém místě se změní podmínky sdílení tepla z topného článku. V odkrytém místě pak nedochází k přestupu tepla z topného článku do izolační vyzdívky, nýbrž žhavá spirála sálá do studeného okolí pece a zejména v intervalu vypnutí napájecího napětí rychle chladne. Teplota povrchu topného článku je během měření jiná, než v reálné situaci, kdy je článek zakryt izolační vyzdívkou.

Měření bylo provedeno za předem stanovených podmínek.

Topný článek modelu byl napájen tyristorovou jednotkou EPAC od firmy Eurotherm. Tato jednotka byla nakonfigurována do režimu cyklického ovládání s regulační periodou 6s při požadavku na 50% výkon. To znamená střídavé zapínání a vypínání napájecího napětí topného článku v regulačním cyklu 3s zapnuto a 3s vypnuto. Na obr. 3.4.1 názorně uvádím příkon do topného článku při daném způsobu regulace.



Obr. 3.4.1 Rozložení výkonu do topného článku při regulační periodě 6s požadavek na žádanou hodnotu 50%.

Skutečný průběh napětí na topném článku při experimentu - zaznamenaný osciloskopem RIGOL DS 2000 je na obr. 3.2.31.

K měření teploty povrchu topného článku byla použita metoda měření teploty pomocí teplotního scanneru LSD 10 od firmy LAND. Dle mého názoru je to jediný možný způsob záznamu průběhu této teploty při pracovním režimu topného článku. Záznam z měření při experimentu uvádím na obr. 3.2.32 až 3.2.35.

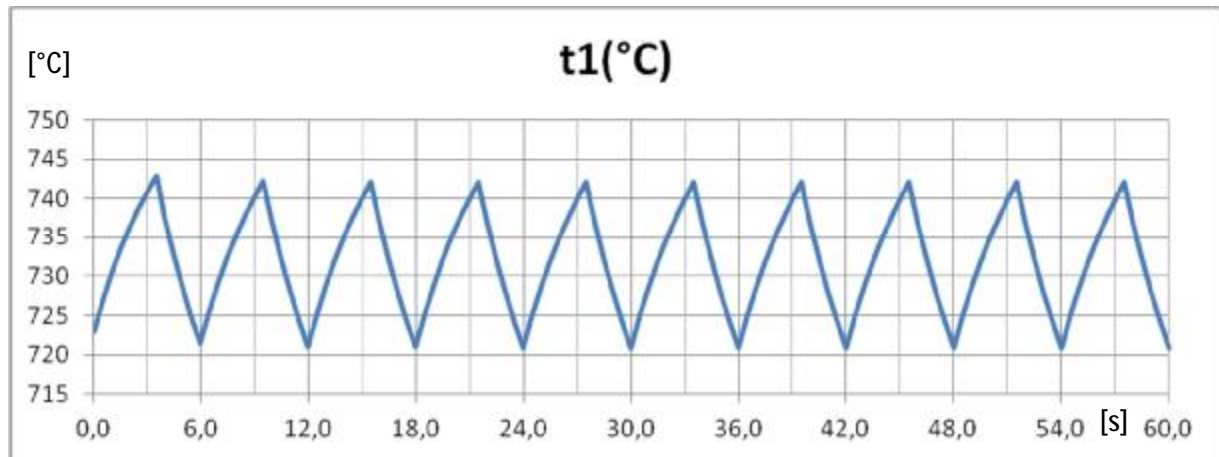
3.4.3 Simulace na matematických modelech

Použitím matematicko-fyzikální analýzy byly sestaveny dva matematické modely. První se spirálou odkrytou do okolí (simulující podmínky při měření na modelu popsany v kap. 3.3) a

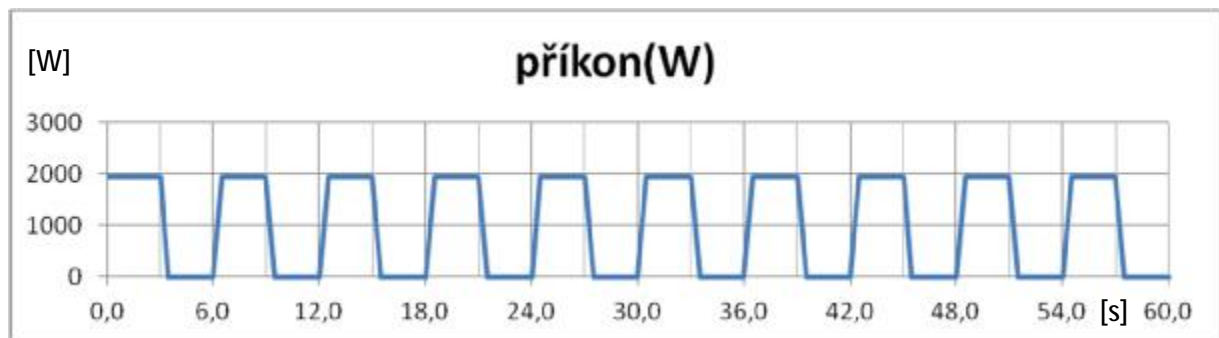
druhý se spirálou zakrytou izolační vyzdívkou (simulující podmínky v reálné muflové peci popsaný v kap. 2.3).

3.4.4 Simulace na matematickém modelu s odkrytou spirálou

Na modelu dle kap. 3.3 jsem nasimuloval průběh teploty odkrytého místa spirály při cyklickém zapínání a vypínání napájecího napětí se stejnou regulační periodou jako při experimentu. Průběh povrchu teploty topné spirály získaný touto simulací je uveden na obr. 3.4.2.



Obr. 3.4.2 Průběh teploty povrchu topného článku získaný simulací.



Obr. 3.4.3 Příkon do topného článku

Z porovnání záznamu z reálného měření scannerem na obr. 3.2.35 s grafem vytvořeným z numerické simulace na obr. 3.4.2 vyplývá velmi dobrá shoda mezi experimentem a simulací.

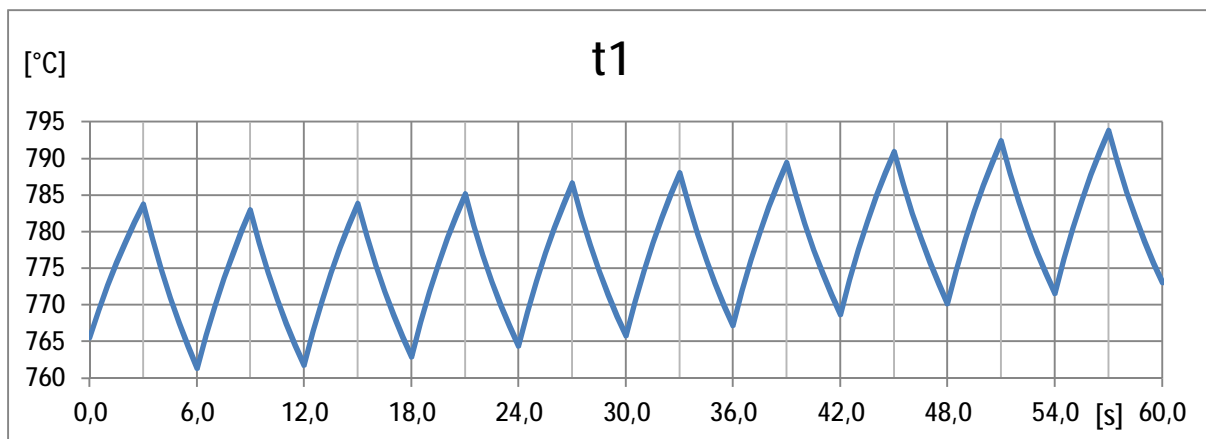
Rozkmit teplot povrchu topného článku při experimentu na modelu je $\Delta t_{opt} = 23^\circ\text{C}$.

Rozkmit teploty při simulačním výpočtu s odkrytou spirálou činil $\Delta t_{sim1} = 21^\circ\text{C}$.

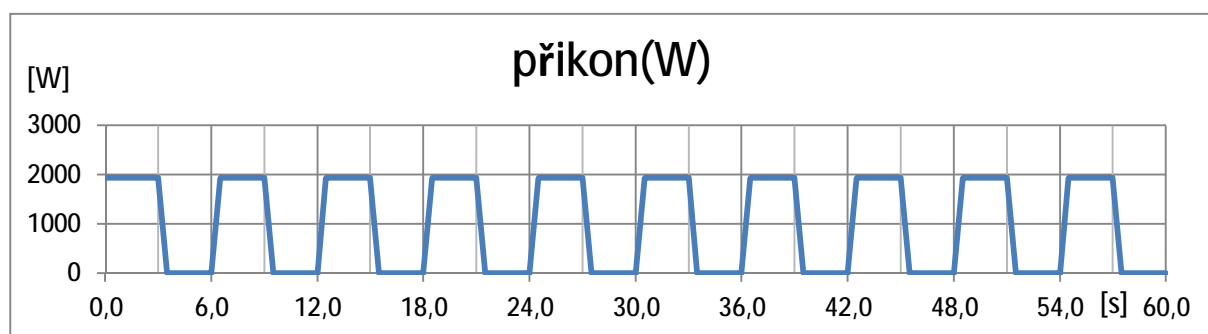
Na základě této shody usuzuji, že matematický model odpovídá situaci na reálné muflové peci.

3.4.5 Simulace na matematickém modelu se zakrytou spirálou

Pro tento experiment jsem použil matematický model uvedený v kap. 2.3. Výsledek simulace je znázorněn na obr. 3.4.5.



Obr. 3.4.5 Výsledek simulace na muflové peci



Obr. 3.4.6 Přikon do topného článku muflové pece

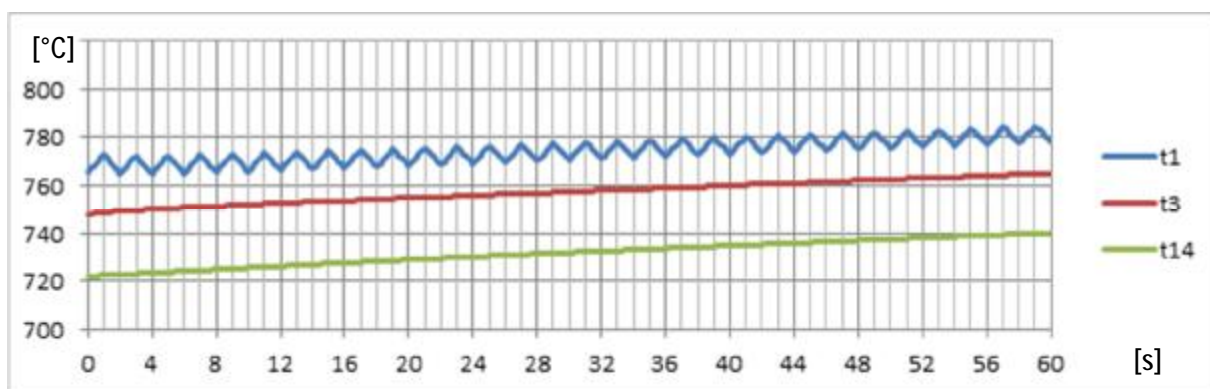
Při simulaci na muflové peci byl zjištěn rozkmít teploty povrchu topného článku $\Delta t_{sim2} = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$. Z předchozích výsledků lze usuzovat, že i údaje získané při simulaci na druhém modelu jsou blízké reálné skutečnosti, kdy je topný článek zakryt z vnější strany pece izolační vyzdívkou a nemůže sálat do studeného okolí.

3.4.6 *Vliv délky periody na amplitudu teploty spirály*

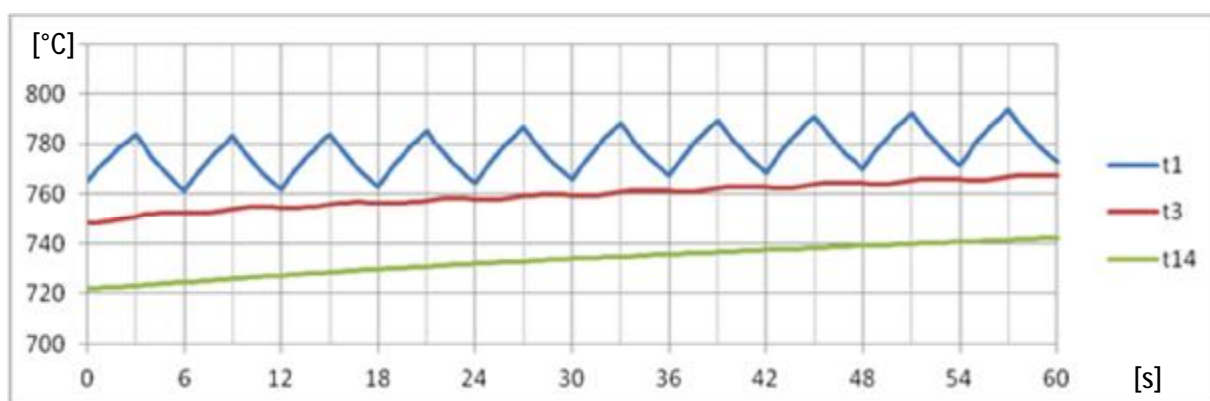
Abych zjistil, jaký vliv má délka regulační periody při cyklickém řízení na velikost rozkmitu teploty povrchu topného článku, provedl jsem na matematickém modelu muflové pece několik simulací s různými délkami řídicí periody. Zvolil jsem délku regulační periody 2s, 6s a 18s. Průběhy teploty t_1 povrchu topného článku jsou znázorněny na obr. 3.4.7, obr. 3.4.8 a obr. 3.4.9. Do těchto grafů jsou kromě teploty povrchu topného článku t_1 zaneseny ze simulací i průběhy teplot vnitřního povrchu mufle t_3 a teplota vnitřního prostoru pece t_{14} , měřené plášťovým termočlánkem, umístěným v prostoru pecní atmosféry.

Podle očekávání je rozkmit teplot ovlivněn délkou regulační periody. Při periodě v trvání 18s se kmitání výrazně projevuje také na kolísání teploty na termočlánku a t_{14} .

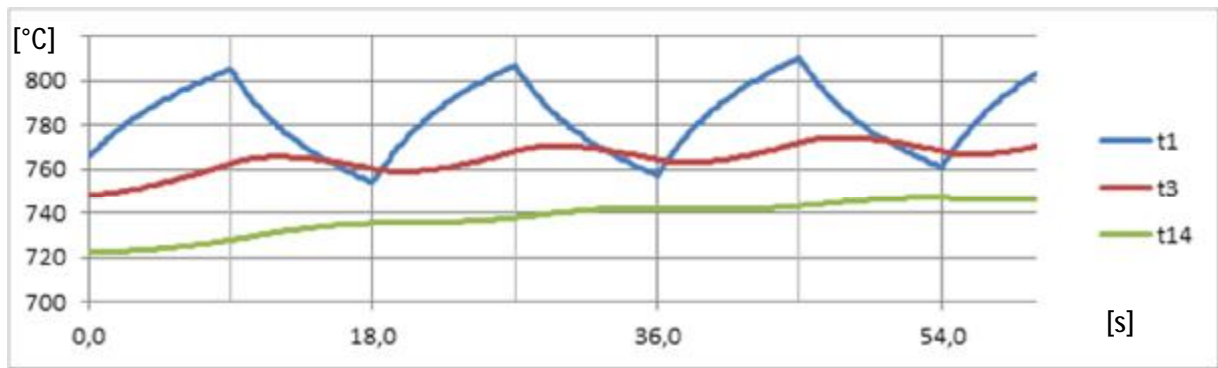
Závislost velikosti rozkmitu teploty povrchu topného článku na délce regulační periody zap/vyp je znázorněna v grafu na obr. 3.4.10.



Obr. 3.4.7 Simulace teplot t_1 , t_3 , a t_{14} při regulační periodě 2s

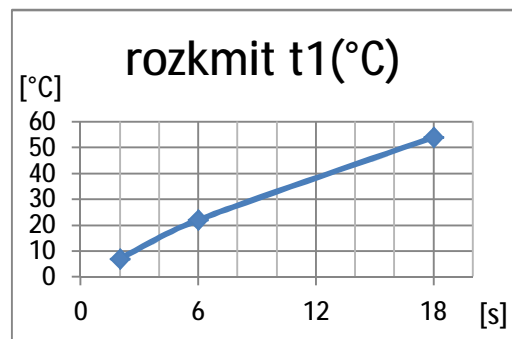


Obr. 3.4.8 Simulace teplot t_1 , t_3 , a t_{14} při regulační periodě 6s



Obr. 3.4.9 Simulace teplot t_1 , t_3 a t_{14} při regulační periodě 18s

perioda (s)	rozkmit t_1 (°C)
2	7
6	22
18	53



Obr. 3.4.10 Závislost rozkmitu (amplitudy) teploty t_1 povrchu topného článku na délce regulační periody zap/vyp

3.4.7 Závěr

- 1) Při řízení příkonu do elektrické pece střídavým zapínáním a vypínáním el. příkonu může docházet k nezanedbatelnému kolísání teploty povrchu topného článku.
- 2) Teplota povrchu topného článku zjištěná teplotním scannerem na odkryté části spirály je značně ovlivněna sáláním tohoto místa do studeného okolí pece.
- 3) Kolísání teploty povrchu topného článku při střídavém zapínání a vypínání napájecího napětí lze určit simulací na matematickém modelu.
- 4) Délka regulační periody zap/vyp při ovládání příkonu do topného systému pece by měla být co nejkratší, řádově v jednotkách sekund, kdy délka regulační periody neovlivňuje teplotu pecní atmosféry.

3.4.8 *Vliv hmotnosti na rozkmit teploty povrchu topného článku*

Zde se zabývám úvahou, jakým způsobem se projeví hmotnost topného článku na povrchové teplotě při cyklickém řízení. Aby mohlo být provedeno korektní porovnání povrchové teploty topného článku, vycházím z následujících předpokladů:

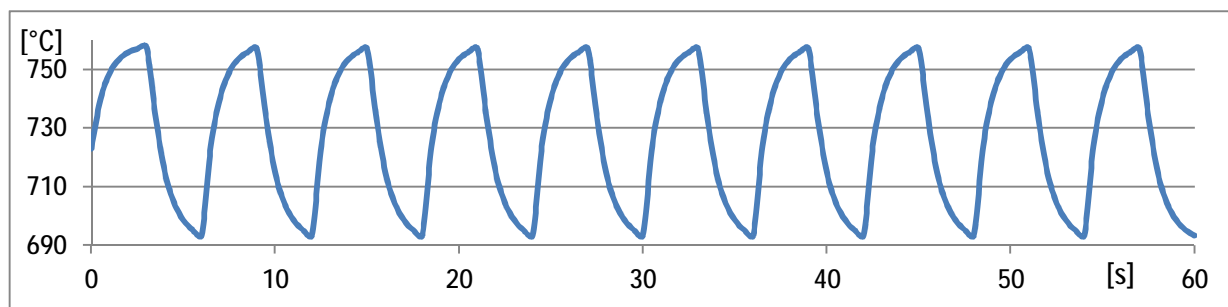
- 1) Pro simulaci na matematickém modelu popsaném v odst. 3.3.1 vycházím z reálného topného článku, a to z článku pece Model II.
- 2) Pro simulace použiji konstantní hodnotu odporu topných článků, a to $R = 24,6\Omega$.
- 3) Hodnota napájecího napětí je $U = 220V$ (tím mají spirály vždy stejný výkon).
- 4) K regulaci výkonu použiji cyklické řízení s periodou 6s při požadavku na 50% výkon. To znamená střídavé zapínání a vypínání napájecího napětí topného článku v regulačním cyklu 3s zapnuto a 3s vypnuto. Na obr. 3.4.1 názorně uvádím příkon do topného článku při daném způsobu regulace.
- 5) Hmotnost topného článku v závislosti na průměru topného drátu je v tab. 3.4.5.1.

průměr drátu [mm]	odpor na metr drátu [Ω/m]	délka drátu [m]	hmotnost na metr drátu [g/m]	hmotnost drátu [g]
0,9	2,18	11,284	4,55	51,344
1,4	0,903	27,243	11	299,668
2	0,442	55,656	22,5	1 252,26
2,5	0,283	86,926	35,1	3 051,10

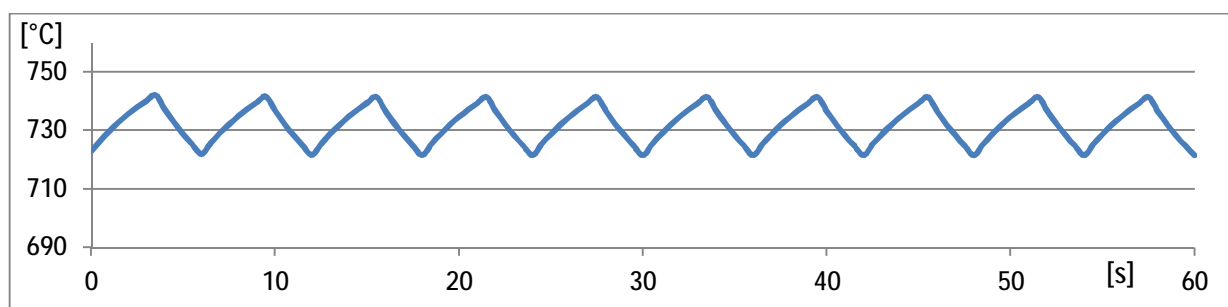
Tab. 3.4.1 Parametry topného článku z materiálu Kanthal A - různé průřezy drátu

Abych zjistil, jakým způsobem se projeví hmotnost topného článku při cyklickém řízení na velikosti rozkmitu jeho povrchové teploty, provedl jsem na matematickém modelu muflové pece několik simulací s různými hmotnostmi článku. Zvolil jsem průměr drátu 0,9mm, 1,4mm, 2mm a 2,5mm. Průběhy teploty t_1 povrchu topného článku z těchto simulací jsou uvedeny na obr. 3.4.11, obr. 3.4.12, obr. 3.4.13 a obr. 3.4.14.

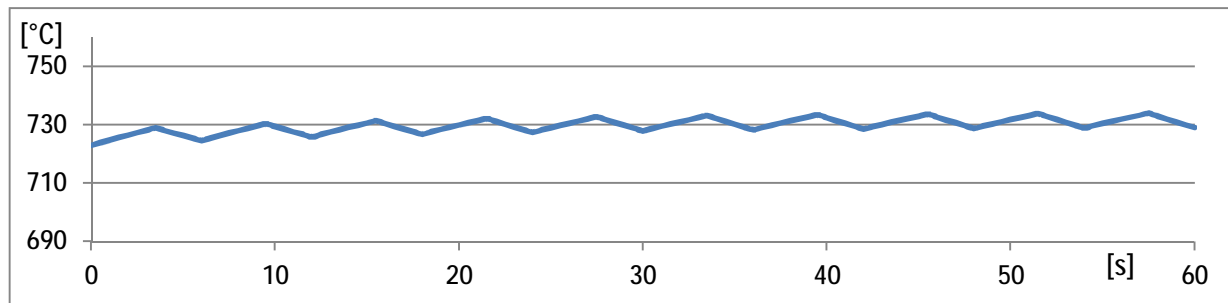
Závislost velikosti rozkmitu teploty povrchu topného článku na jeho hmotnosti při cyklickém řízení je znázorněna v grafu na obr. 3.4.16.



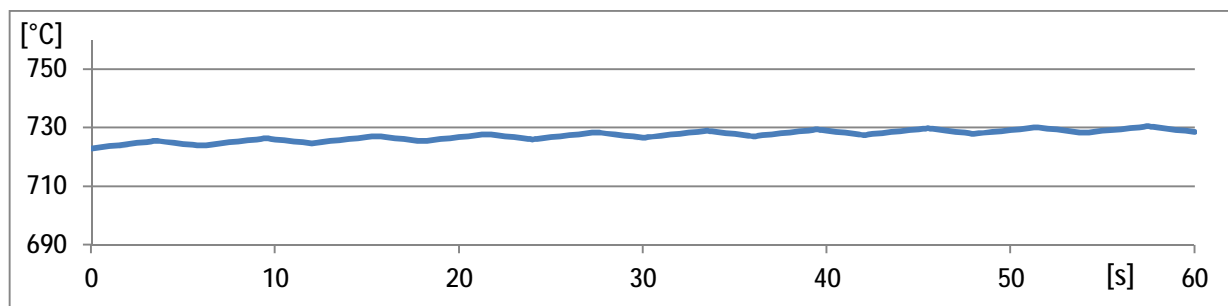
Obr. 3.4.11 Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 0,9mm



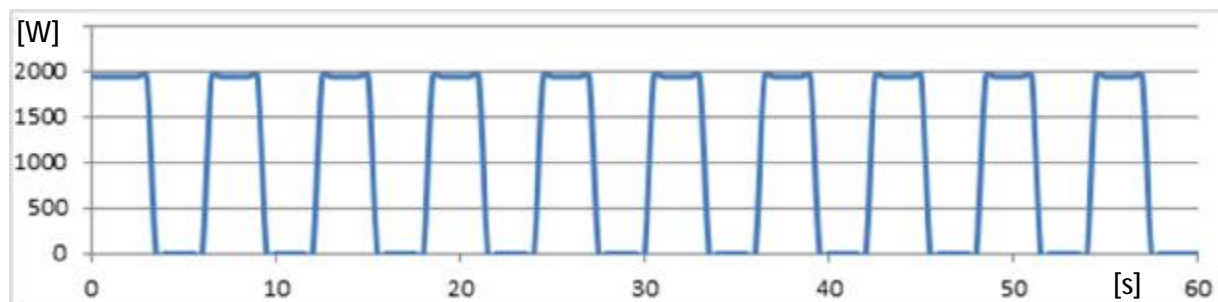
Obr. 3.4.12 Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 1,4mm



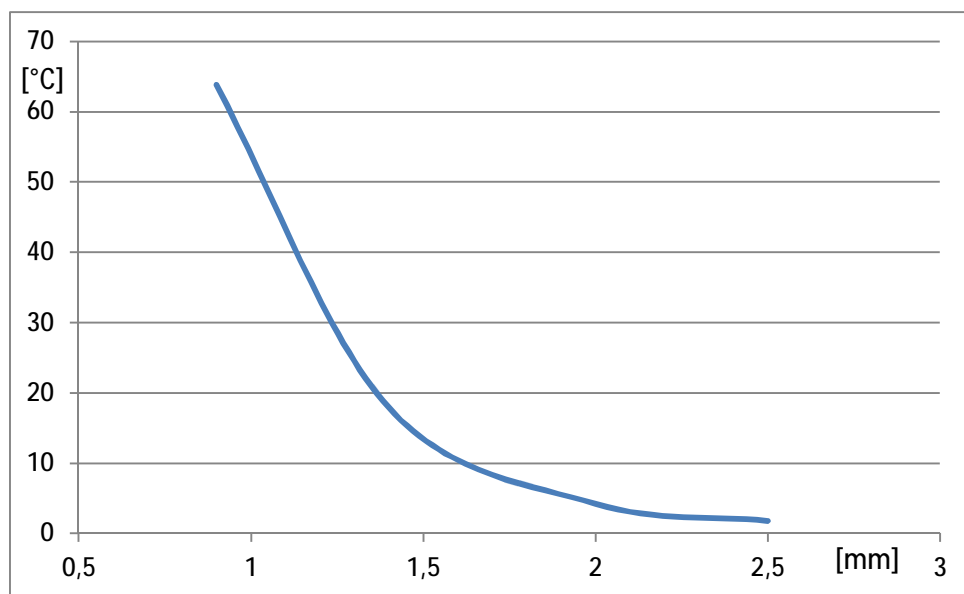
Obr. 3.4.13 Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 2,0mm



Obr. 3.4.14 Rozkmit povrchové teploty topného článku - průměr drátu 2,5mm



Obr. 3.4.15 Příkon do topného článku



Obr. 3.4.16 Závislost rozkmitu teploty na průměru topného drátu při cyklickém řízení 3+3s a stejném příkonu do topného článku

3.4.9 Závěr

Kolísání teploty povrchu topného článku při cyklickém řízení napájecího napětí lze určit simulací na vytvořeném matematickém modelu.

- 1) Rozkmit teploty topného článku při střídavém zapínání a vypínání příkonu klesá s hmotností topného článku.
- 2) Z uvedeného grafu obr. 3.4.16 - závislost rozkmitu teploty na průměru topného drátu je zřejmé, že v oblasti malých průměrů je strmost poklesu vysoká, zatímco s rostoucím průměrem drátu tato strmost asymptoticky klesá k nule.
- 3) Z tohoto hlediska by měla být hmotnost topného článku, resp. průměr jeho drátu někde uprostřed, co nejbližší hodnotě vypočtené dle metodiky výrobců topných materiálů.

4. Směr dalšího rozvoje práce

V druhé části práce se zabývám modelováním sdílení tepla ve vyzdívkách elektrických odporových pecí pomocí obyčejných diferenciálních rovnic 1. řádu. Ve zvoleném způsobu řešení problému se zaměřuji výlučně na využití matematicko-fyzikálního modelu chování různých konstrukčních uspořádání. Při tomto způsobu řešení je možno použít různé způsoby diskretizace, neboť vyzdívky mají obvykle jednoduché geometrické tvary a lze snadno přijmout předpoklad jednorozměrného vedení tepla. Při vývoji modelu a jeho testování vůči měření jsem ale použil několik zjednodušení. I přes tyto skutečnosti jsem získal obstojnou přesnost (výsledky jsou ověřeny experimenty na modelech). Zde se tak otevírá prostor pro použití nových přístupů založených na pokročilých numerických metodách.

Třetí částí navazuji na problematiku způsobu řízení topných systémů odporových pecí. Zejména jsem se zaměřil na chování povrchové teploty topného článku, a to na :

- 1) Vliv způsobu regulace (fázové nebo cyklické řízení) na rozkmit teploty povrchu topného článku.
- 2) Vliv délky periody na amplitudu povrchové teploty spirály.
- 3) Vliv hmotnosti na rozkmit teploty povrchu topného článku.

K dalšímu prohloubení poznatků vedoucích k zefektivnění činnosti elektrotepelných odporových zařízení doporučuji další zkoumání vlivů působících na rozkmit povrchové teploty článku, a to na:

- 1) Vliv uložení topného článku na rozkmit teploty povrchu.
- 2) Vliv konstrukce pece (pece pro ohřev a pece pro tepelné zpracování) na rozkmit teploty povrchu topného článku.
- 3) Vliv konstrukce topného článku (spirály nebo meandry) na rozkmit teploty povrchu topného článku.

Další pokračování také vidím v hledání nových metod měření a vyhodnocování povrchové teploty topného článku.

5. Přínos

Hlavní přínos této práce vidím v komplexnosti zpracování problematiky chování elektrotepelných zařízení s nepřímým odporovým ohřevem v závislosti na proměnnosti jejich elektrických parametrů. Tento ucelený soubor poznatků napomáhá zefektivnit návrh a konstrukci moderních elektrotepelných odporových zařízení splňujících kritéria na úsporný provoz.

Práce přispívá také ke komplexnímu objasnění vzájemné vazby mezi způsoby řízení topných systémů a teplotou topných článků. Hodnotné je vytvoření analýzy získaných výsledků z řešení sestavených matematických modelů a výsledků z provedených měření na fyzikálních modelech zařízení. Vybrané úlohy jsem volil tak, aby pokryly co největší rozsah zařízení i použitých metod řešení. Za inovační prvek také považuji bližší objasnění chování časové konstanty pece v závislosti na příkonu zařízení. V práci podávám také přehled metod a poznatků potřebných k řešení.

Výsledky této práce považuji za obecně aplikovatelné v technické praxi.

Matematický model muflové pece v tomto případě se může stát účelným nástrojem pro efektivní návrh konstrukce těchto zařízení. Z pohledu technologických potřeb umožní přizpůsobit konstrukci požadavkům, a to zejména na minimalizaci energetické náročnosti jejího provozu.

6. Závěr

Předložená disertační práce se zabývá problematikou elektrických odporových ohřevů, které představují univerzální řešení pro různé aplikace tepelného zpracování v průmyslových provozech. Je obsahově zaměřená především na inovační prvky v návrhu elektrotepelných odporových zařízení. Toto téma je v současné době velmi aktuální, a to s ohledem na vývoj trhu s různými druhy energie.

Práce přináší zejména následující výsledky a způsoby řešení:

1. Byla provedena experimentální měření časových průběhů teplot na dvou modelech elektrických muflových pecích. První z nich má tepelnou izolaci z klasických šamotových materiálů, druhá z lehkého vláknitého keramického izolačního materiálu.
2. Byla vysvětlena závislost ustálené hodnoty teploty pece na její časové konstantě.
3. Byl sestaven původní matematický model dynamiky teplot elektrických muflových pecí.
4. Pro oba typy tepelných izolací na něm byly provedeny simulace průběhů ohřevu a chladnutí pece, stejných jako při experimentech na skutečných pecích. Porovnání výsledků simulací s výsledky měření prokázalo velmi dobrý soulad chování modelu a reálného zařízení.
5. Bylo zhotoveno původní experimentální zařízení a metoda pro měření časových průběhů teploty elektrického topného článku při jeho cyklickém zapínání a vypínání. Na tomto zařízení byla provedena řada měření dynamiky průběhu teploty topného článku. Pro realizaci experimentu jsem použil skener typu LSP-HD 10.
6. Byl sestaven původní matematický model dynamiky teploty elektrického topného článku.
7. Na matematickém modelu byly provedeny simulace stejných cyklů jako na experimentálním zařízení a řada dalších simulací, zkoumajících vliv délky časového intervalu zap/vyp a vliv hmotnosti topného článku, na velikost rozkmitu teploty článku
8. Matematický model muflové pece v tomto případě se může stát účelným nástrojem pro efektivní návrh konstrukce těchto zařízení. Z pohledu technologických potřeb umožní přizpůsobit konstrukci požadavkům, a to zejména na minimalizaci energetické náročnosti jejího provozu.
9. Výsledky těchto simulací potvrdily soulad chování experimentálního zařízení s jeho matematickým modelem a přinesly kvantitativní hodnoty závislostí rozkmitu teploty topného článku na délce topného impulzu a na hmotnosti topného článku.
10. Práce přináší rozbor způsobů regulace topného příkonu elektrických pecí, vyhodnocení jejich předností a nedostatků, včetně doporučení k jejich použití.

7. Přílohy

```

In[588]> SetDirectory[NotebookDirectory[]];
        data = Import["ModelI.xlsx"];

In[591]> dataUpr = Table[data[[1, i]], {i, 2, 2949}];

In[592]> dataUpr2 =
        dataUpr /. {cas_, T1_, T2_, T3_} -> {AbsoluteTime[cas] + 86400, T1, T2, T3};

In[594]> data155 = dataUpr2 /. {cas_, T1_, T2_, T3_} -> {cas, T1};
        data180 = dataUpr2 /. {cas_, T1_, T2_, T3_} -> {cas, T2};
        data220 = dataUpr2 /. {cas_, T1_, T2_, T3_} -> {cas, T3};

In[711]> data155Proklad = A * (1 - E-t/τ) /. FindFit[data155, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
        data180Proklad = A * (1 - E-t/τ) /. FindFit[data180, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
        data220Proklad = A * (1 - E-t/τ) /. FindFit[data220, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
        τ155 = τ /. FindFit[data155, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
        τ180 = τ /. FindFit[data180, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
        τ220 = τ /. FindFit[data220, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];

In[705]> pl155prok = Plot[data155Proklad, {t, 0, 60000}, PlotStyle -> {Blue, Thick, Dashed},
        AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> Style["155 V", Blue]];
        pl155 = ListPlot[data155, PlotStyle -> {Blue, PointSize[0.0005]},
        AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}];
        pl180prok = Plot[data180Proklad, {t, 0, 60000}, PlotStyle -> {Red, Thick, Dashed},
        AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> Style["180 V", Red]];
        pl180 = ListPlot[data180, PlotStyle -> {Red, PointSize[0.0005]},
        AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}];
        pl220prok = Plot[data220Proklad, {t, 0, 60000}, PlotStyle -> {Green, Thick, Dashed},
        AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> Style["200 V", Green]];
        pl220 = ListPlot[data220, PlotStyle -> {Green, PointSize[0.0005]},
        AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel ->
        {Style["155 V ", Blue], Style["180 V ", Red], Style["200 V ", Green]};

In[704]> bodyr = {{τ155, data155Proklad /. t -> τ155},
        {τ180, data180Proklad /. t -> τ180}, {τ220, data220Proklad /. t -> τ220}};

In[703]> plBody = ListPlot[bodyr, PlotStyle -> {Black, PointSize[0.02]};

In[599]> prokladBody = Fit[bodyr, {1, t}, t];
        plotProkladBody = Plot[prokladBody, {t, 0, 20000}];
        komplet = Show[pl220, pl180, pl155,
        plBody, plotProkladBody, pl155prok, pl180prok, pl220prok];

In[702]> pl220prok;

In[595]> Export["155MD1.png", pl155prok, ImageResolution -> 300];
        Export["180MD1.png", pl180prok, ImageResolution -> 300];

        Export["220MD1.png", pl220prok, ImageResolution -> 300];
        Export["kompletMD1.png", komplet, ImageResolution -> 500];
    
```

Obr. 7.1 Vypis software pro stanovení časové konstanty modelů I - software Wolfram Mathematica verze 10


```

In[659]> SetDirectory[NotebookDirectory[]]; (*zvolení složky pro import a export*)
data = Import["Model II.xlsx"];

In[736]> pocetRadku = 751;

In[659]> dataUpr = Table[data[[1, i]], {i, 2, pocetRadku}];

In[659]> dataUpr2 = dataUpr /.
  {cas_, T1_, T2_, T3_, T4_} -> {AbsoluteTime[cas] + 86390, T1, T2, T3, T4};

In[662]> data155 = dataUpr2 /. {cas_, T1_, T2_, T3_, T4_} -> {cas, T1};
data180 = dataUpr2 /. {cas_, T1_, T2_, T3_, T4_} -> {cas, T2};
data200 = dataUpr2 /. {cas_, T1_, T2_, T3_, T4_} -> {cas, T3};
data220 = dataUpr2 /. {cas_, T1_, T2_, T3_, T4_} -> {cas, T4};

In[720]> data155Proklad = A * (1 - E-t/τ) /. FindFit[data155, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
data180Proklad = A * (1 - E-t/τ) /. FindFit[data180, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
data200Proklad = A * (1 - E-t/τ) /. FindFit[data200, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
data220Proklad = A * (1 - E-t/τ) /. FindFit[data220, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];

τ155 = τ /. FindFit[data155, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
τ180 = τ /. FindFit[data180, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
τ200 = τ /. FindFit[data200, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];
τ220 = τ /. FindFit[data220, A * (1 - E-t/τ), {A, τ}, t];

In[720]> pl155prok = Plot[data155Proklad, {t, 0, 3500}, PlotStyle -> {Blue, Thick, Dashed},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> Style["155 V", Blue]];
pl155 = ListPlot[data155, PlotStyle -> {Blue, PointSize[0.0005]},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}];
pl180prok = Plot[data180Proklad, {t, 0, 3500}, PlotStyle -> {Red, Thick, Dashed},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> Style["180 V", Red]];
pl180 = ListPlot[data180, PlotStyle -> {Red, PointSize[0.0005]},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}];
pl200prok = Plot[data200Proklad, {t, 0, 3500}, PlotStyle -> {Green, Thick, Dashed},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> Style["200 V", Green]];
pl200 = ListPlot[data200, PlotStyle -> {Green, PointSize[0.0005]},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}];
pl220prok = Plot[data220Proklad, {t, 0, 3500}, PlotStyle -> {Purple, Thick, Dashed},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> Style["220 V", Purple]];
pl220 = ListPlot[data220, PlotStyle -> {Purple, PointSize[0.0005]},
  AxesLabel -> {"t [s]", "T [°C]"}, PlotLabel -> {Style["155 V ", Blue],
  Style["180 V ", Red], Style["200 V ", Green], Style["220 V ", Purple]}}];

In[682]> bodyt = {{τ155, data155Proklad /. t -> τ155}, {τ180, data180Proklad /. t -> τ180},
  {τ200, data200Proklad /. t -> τ200}, {τ220, data220Proklad /. t -> τ220}};

In[681]> plBody = ListPlot[bodyt, PlotStyle -> {Black, PointSize[0.02]}};

In[717]> prokladBody = Fit[bodyt, {1, t}, t];
plotProkladBody = Plot[prokladBody, {t, 0, 20000}];
grafkomplet = Show[pl220, pl180, pl155, plotProkladBody,
  plBody, pl155prok, pl180prok, pl220prok, pl200, pl200prok];

In[682]> Export["155.png", pl155prok, ImageResolution -> 300];
Export["180.png", pl180prok, ImageResolution -> 300];
Export["200.png", pl200prok, ImageResolution -> 300];
Export["220.png", pl220prok, ImageResolution -> 300];
Export["komplet.png", grafkomplet, ImageResolution -> 500];

```

Obr. 7.2 Výpis software pro stanovení časové konstanty modelů II - software Wolfran Mathematica verze 10

8. Výpis použitých pramenů

- [1] Konstruktions – Handbuch, KANTHAL, r. 1966
- [2] Franz Beneke, Bernard Nacke, Herbert Pfeifer, Handbook of Thermoprocessing Technologies - Vydavatel: Vulkan - Verlag GmbH, r. 2012
- [3] Kanthal Global SD Silikon karbide heating elements S-KA011-B-ENG 10–B-2,06.2011 Printed in Sweden
- [4] Kanthal Super Electric heating elements S-KA058-B-ENG 10–B-2,0620112–A-1-3,01.2011 Printed in Sweden
- [5] Kanthal Super Electric heating elements HANDBOOK 2-A-1-3 ISBN 91 86720 08-2 5000 04 94 Printed in Sweden
- [6] Resistance Heating Alloys for Appliances and Heaters 1-A-1-3 ISBN 91 86720 04 X Printed in Sweden
- [7] Resistance Heating Alloys for Industrial Furnaces 1- A -5 -3 ISBN 91 86720 06 6 Printed in Sweden
- [8] Introduction to thermography principles. Orland Park, Ill.: American Technical Publishers/Snell Group, 2009, 68 p. ISBN 9780826915351.
- [9] FRANZ BENEKE (ED.) Handbook of thermoprocessing technologies. 2., completely rev. ed. Essen: Vulkan-Verl, 2012. ISBN 9783802729669.
- [10] TKOTZ, Klaus. Příručka pro elektrotechnika. 2., dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-86706-13-3.
- [11] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin, 1. díl. ISBN 80-7300-145-4.
- [12] KREJČIŘÍK, Alexandr. Solid state relé. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 199 s. ISBN 80-7300-081-4.
- [13] LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 153 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-180-2.
- [14] NEVŘIVA, Pavel. Analýza signálů a soustav. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2000, 671 s. ISBN 80-7300-004-0.
- [15] NOVÁK, Pavel. Elektrické teplo. 1. vyd. Eguilibria s.r.o, 2010, ISBN 978-80-89284-48-1

- [16] NOVÁK, Pavel. Elektrické teplo. 2. vyd. Eguilibria s.r.o, 2015, ISBN 978-80-553-2183-7
- [17] ÅSTRÖM, Karl J a Björn WITTENMARK. Computer-controlled systems: theory and design. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1997, xiv, 557 p. ISBN 0133148998.
- [18] AXEL VON STARCK, Alfred Mühlbauer. Handbook of thermoprocessing technologies: fundamentals, processes, components, safety. Essen: Vulkan-Verlag, 2005. ISBN 3802729331
- [19] J. H. Brunklaus, Stavba průmyslových pecí - Vytiskl TISK, knižní výroba, n.p. Brno
- [20] M. Dolejší, VI. Tomek, Elektrické pece sušárny SNTL – Vydavatel: Nakladatelství technické literatury
- [21] KANTHAL HANDBOOK Heating Alloys for Electric Household Appliances
KANTHAL AB, ISBN 91-86720-06-6
- [22] www.jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- [23] M. HODINKA, Š. FECKO, F. NĚMEČEK, Přenos a rozvod elektrické energie – Vydavatel: SNTL Praha 1
- [24] Doc. Ing. Eva Konečná, CSc., Doc. Ing. Aleš Richter, CSc., VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ PRVKY – Vydavatel: Technická univerzita v Liberci, srpen 2000
- [25] M. RÉDR, M. GOTTWALD, A. ŘÍMAN, R. REJČ, Tepelné výpočty a optimalizace vyzdívek průmyslových pecí, Vydavatel: SNTL Praha, r. 1985
- [26] J. Rada a kol., Elektrotepelná technika – Vydavatel: SNTL/ALFA Praha, r. 1985
- [27] O. Tůmová, V. Čtvrtníček, J. Girg, J. Švarný, ELEKTRICKÉ MĚŘENÍ – MĚŘÍCÍ METODY – Vydavatel: ZČU Plzeň
- [28] Heating and Insulation Systems 8- A -1 -3 10 95 5000 Printed in Sweden
- [29] Vondrášek František, Výkonová Elektronika – Svazek I. – Vydavatel: ZČU Plzeň
- [30] Vondrášek František, Výkonová Elektronika – Svazek II. – Vydavatel: ZČU Plzeň
- [31] Vondrášek František, Výkonová Elektronika – Svazek III. – Vydavatel: ZČU Plzeň
- [32] Sazima M. (1971): Sdílení tepla, Praha, skriptum ČVUT
- [33] Sazima M. (1972): Tabulky sdílení tepla, Praha, skriptum ČVUT

- [34] Kremer R., Obroučka K. (1974): Ohřev kovů, Praha, SNTL
- [35] Rjažněvič K. (1984): Termodynamické tabulky, Bratislava, Alfa

- [36] Fialka P. (1988): Simulační modely průmyslových palivových pecí, disertační práce, FSI ČVUT

- [37] Zítek P. (1990): Simulace dynamických systémů, Praha, SNTL

- [38] Pospelov V.V. (2001): Kutta-Merson method, Encyclopaedia of Mathematics, Springer, internet

- [39] Rézné K.A. (2003): Strahlungseigenschaften der Oberflächen von Faserbauteilen, TUB Freiberg

- [40] Kanthal – fyzikální a mechanické vlastnosti , www.kntl.cz

- [41] Balátě Jaroslav: Automatické řízení, BEN Technická literatura Praha 2004, 2. přepracované vydání, ISBN 80-7300-148-9

- [42] Roubal Jiří, Hušek Petr a kol.: Regulační technika v příkladech, Praha 2011, ISBN 978-80-7300-260-2

- [43] KANTHAL HANDBUCH Heizleiterlegierungen für Industrieöfen
KANTHAL AB, ISBN 91-86720-06-6

9. Publikace, stáže, vzorky a pedagogická činnost

9.1 Publikace

- 1) Jiří Lucák - Trendy vývoje prostředků pro řízení elektrotepelných procesů s nepřímým ohřevem se zaměřením na odporové pece, publikováno v časopise ELEKTRO, ročník 26, číslo 2, únor 2016 ISSN 1210 -0889 vydavatel FCC Public s.r.o
- 2) Jiří Lucák - Koncept moderního návrhu elektrotepelných zařízení se zaměřením na výkonovou část elektrických odporových pecí, publikováno v časopise Electroscope 2016, č. 2 ISSN 1802 - 4564 vydavatel Západočeská univerzita v Plzni
- 3) Jiří Lucák - A Mathematical Model of Thermal Processes in the Empty Electric Muffle Furnace, publikováno v časopise Transactions on Electrical Engineering – uveřejněno v č. 1/2016
ISSN 1805 – 3386 International scientific journal for electrical engineering
- 4) Jiří Lucák - Experimental Verification of Model Simulation Results of Heating Cycles within the Electric Muffle, uvedeno v časopise Transactions on Electrical Engineering – uveřejněno v č. 2/2016 ISSN 1805 – 3386 International scientific journal for electrical engineering

Příspěvky na konference

- 1) LUCÁK J., ŠNAJDR J., VOSTRACKÝ Z., KOŽENÝ J. Dynamic rating of supply cables of a stabilizing furnace. In Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 507-510. ISBN: 978-1-4799-3806-3
- 2) J. Lucák, S. Jiřinec, J. Kožený: The behaviour of rating coil durring regulativ. Datum konání 16.5.–18.5.2016, EEP-Praha
- 3) J. Lucák, S. Jiřinec, J. Kožený: Method for determining the amplitude of the furnace temperature of the heating element in an electric muffle furnace. Datum konání 31.5.–2.6.2016, Energetika 2016 Tatranské Matliare Slovensko
- 4) Jiří Lucák: Moderní způsoby řízení tepelných procesů v odporových pecích Datum konání 23.6.2016, ELTHERM 2016 Plzeň, FEL- ZČU

Články ze stáží

- 1) HABALOVÁ J., LUCÁK J., PODRABSKÝ H., České průmyslové pece dobývají svět, uvedeno v časopise -Industry Forum – uveřejněno v č. 3 /2015 ISSN 1803 – 8581
- 2) HABALOVÁ J., LUCÁK J., Technologický partner pro každý krok výroby, Vyšlo v časopise Industry Forum – uveřejněno v č. 3 /2015 ISSN 1803 – 8581

Připravované články

- 1) Metoda stanovení amplitudy povrchové teploty topného článku v elektrické muflové peci.
- 2) Porovnání úhlového a fázového řízení s ohledem na chování povrchové teploty topného článku.

9.2 Stáže

[1]	1.9.2010 – 24.9.2010	Ringmill S. p. A.	Italská republika
[2]	16.11.2010 – 3.12.2010	Ringmill S. p. A.	Italská republika
[3]	22.5.2011 – 22.6.2011	Fomas S. p. A.	Italská republika
[4]	8.7.2011 – 7.8.2011	Forge Monchieri S. p. A.	Italská republika
[5]	28.11.2011 – 15.12.2011	Fomas S. p. A.	Italská republika
[6]	6.8.2012 – 30.8.2012	Fomas S. p. A.	Italská republika
[7]	1.10.2012 – 2.11.2012	Schmiedewerke Gröditz GmbH	Spolková republika Německo
[8]	12.11.2012 – 30.11.2012	Schmiedewerke Gröditz GmbH	Spolková republika Německo
[9]	3.1.2014 – 19.1.2014	Fomas S. p. A.	Italská republika
[10]	14.2.2014 – 8.3.2014	OMZ St. Peterburg	Ruská federace
[11]	23.2.2015 – 13.3.2015	Biuro Polskiego Klastra Aluminium	Polská republika
[12]	16.3.2015 – 3.4.2015	Biuro Polskiego Klastra Aluminium	Polská republika
[13]	7.4.2015 – 11.4.2015	Biuro Polskiego Klastra Aluminium	Polská republika
[14]	24.8.2015 – 18.9.2015	Fomas S. p. A.	Italská republika
[15]	5.10.2015 – 9.10.2015	Biuro Polskiego Klastra Aluminium	Polská republika
[16]	25.6.2016 – 15.7.2016	Fomas S. p. A.	Italská republika

9.3 Vzorky

- 1) Laboratorní muflová pec (MODEL II) evč. 22 150 – FV – 001 - 2016
- 2) Přípravek na měření povrchové teploty topného článku (simulující podmínky s odkrytou spirálou) evč. 22 150 – FV – 002 - 2016

9.4 Pedagogická činnost

- 1) Přednáška na téma: Elektrotepelné zařízení s odporovým nepřímým ohřevem – konstrukce, řízení a technologické procesy. Pro studenty FEL – KEE 2015
- 2) Přednáška na téma: Elektrotepelné procesy v zařízeních s nepřímým odporovým ohřevem. Pro studenty FST – KMM 2015
- 3) Diplomová práce: Optimalizace řízení elektrotepelných procesů. .
(D. Mašek – 2011)
- 4) Diplomová práce: Řízení elektrotepelných procesů v elektrických odporových pecích (J. Formánek – 2015)