

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti kontaktního měření teplot otáčející se vsázky při jejím
indukčním kalení

Autor práce: **Bc. Tomáš Cihla**
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Rot PhD.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš CIHLA**
Osobní číslo: **E20N0025P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Možnosti kontaktního měření teplot otáčející se vsázky při jejím indukčním kalení**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Zhodnoňte současné možnosti při měření teplot v oblasti indukčních ohřevů. Podrobněji se zaměřte zejména na vhodné způsoby měření pohybujících se vsázek.
2. Uveďte potřebnou teorii nutnou pro numerické modelování elektromagnetických polí při aplikaci indukčních ohřevů.
3. Uveďte potřebnou teorii nutnou pro numerické modelování teplotních polí při aplikaci indukčních ohřevů.
4. Navrhněte vhodný kontaktní způsob měření teplot při kalení válcových vsázek.
5. Proveďte experiment, při kterém bude kontaktně měřena teplota na několika pozicích pohybující se vsázky při jejím indukčním kalení.
6. Vytvořte vhodně zjednodušený numerický model indukčního ohřevu, dle vlastního uvážení, který bude vhodným způsobem ilustrovat provedený experiment.
7. Uveďte závěry pro praxi.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Rudnev, Valery, Totten George E. AMS Handbook, Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment Hardcover. ASM International, 2014. ISBN 978-1627080125.
2. Rudnev, Valery. Handbook of induction heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing) 2nd. CRC Press, 2017. ISBN 978-1466553958.
3. Lupi, Sergio; Forzan, Michele; Aliferov, Aleksandr. Introduction and Direct Resistance Heating. New York : Springer. ISBN 978-3-319-03478-2.
4. Langer E., Teorie indukčního a dielektrického tepla , Praha : Academia 1979
5. Linda J.; Mühlbacher J., Návody ke cvičení z elektrického tepla II , Plzeň : ZČU 1993
6. Rada J., Elektrotepelná technika , Praha : SNTL 1985

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. David Rot, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Zaměření mé diplomové práce je do oboru elektrotepelných procesů, a to do oblasti kontaktního měření teplot během indukčního kalení rotující vsázky. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části rozebírám možnosti měření teploty v průmyslu, ať už kontaktní měřením, tak i bezkontaktním, nastiňuji modelování elektromagnetického pole a teplotního pole a v závěru teorie shrnuji modelování sdružených úloh.

V praktické části je vysvětlen samotný experiment, jsou zde popsány použité součástky a využití vsázky. Dále je zde z experimentu zobrazeno několik dat, ať už z počátečních experimentů, kdy se zařízení teprve připravovalo, tak i ze samostatného závěrečného měření. Rozebírám zde chyby, kterým bylo nutné při konstrukci a uvádění zařízení do provozu čelit a v závěru praktické části vysvětluji i jejich jednotlivá řešení.

Na závěr práce je možné vidět matematický model vytvořený v programu ANSYS a srovnání získaných dat z experimentu s modelovými hodnotami získaných z programu ANSYS.

Klíčová slova

indukční ohřev, kalení, vsázka, termočlánek, termokamera, Maxwellovy rovnice, ANSYS, rotace,

Abstract

The focus of my diploma thesis is in the field of electrothermal processes, namely in the field of contact temperature measurement during induction hardening of a rotating charge. The work is divided into theoretical and practical part. In the theoretical part I discuss the possibilities of temperature measurement in industry, both contact measurement and contactless, I outline the modeling of the electromagnetic field and temperature field, and at the end of the theory summarizes the modeling of associated problems.

The practical part describes the experiment itself, describes the components used and the batches used. Several data from the experiment are shown here, both from the initial experiments, when the device was just being prepared, and from a separate final measurement. Here I analyze the errors that had to be faced during the construction and commissioning of the equipment and at the end of the practical part I explain their individual solutions.

At the end of the work it is possible to see the mathematical model created in the ANSYS program and a comparison of the data obtained from the experiment with the model values obtained from the ANSYS program.

Key Words

induction heating, hardening, charge, thermocouple, thermal imager, Maxwell's equations, ANSYS, rotation

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu práce doc. Davidu Rotovi, PhD. za vedení práce, odborné rady a připomínky k mé práci. Dále bych rád poděkoval panu prof. Jiřímu Koženému, CSc za jeho odborné připomínky, při řešení problémů a zároveň za pomoc s kontrolou mé práce. Zvláštní poděkování patří Ing. Jakubovi Jiřincovi, PhD a Ing. Michalovi Knedlíkovi, za jejich pomoc při realizaci měření.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Kalení	- 2 -
1.1 Způsoby ochlazení.....	- 2 -
1.2 Druhy kalení.....	- 2 -
1.3 Vliv ochlazování na tvrdost vsázky	- 2 -
2 Měření teploty	- 4 -
2.1 Kontaktní měření teploty.....	- 4 -
2.1.1 Termistory.....	- 4 -
2.1.2 Termočlánky	- 5 -
2.2 Bezkontaktní měření	- 6 -
2.2.1 Měření pomocí infračerveného systému.....	- 6 -
2.2.2 Pyrometr.....	- 7 -
2.2.3 Termokamera	- 7 -
2.2.4 Chyby v měření.....	- 7 -
2.3 Měření teploty na povrchu a vně tělesa.....	- 8 -
2.3.1 Měření teploty uvnitř tělesa	- 8 -
2.3.2 Měření povrchové teploty	- 8 -
3 Elektromagnetické pole	- 9 -
3.1 Indukční ohřev.....	- 9 -
3.1.1 Hloubka vniku.....	- 9 -
3.2 Maxwellovy rovnice v integrálním a diferenciálním tvaru.....	- 10 -
3.2.1 Integrální tvar a diferenciální tvar.....	- 10 -
3.2.2 Rovnice pro proudovou hustotu.....	- 12 -
3.2.3 Vzájemná provázanost Maxwellových rovnic.....	- 12 -
3.3 Modelování elektromagnetických polí.....	- 12 -
3.3.1 Odvození vlnových rovnic pro šíření elektromagnetického vlnění	- 12 -
3.4 Odvození rovnice elektrodynamického potenciálu	- 14 -
3.5 Podmínky na rozhraní	- 15 -

3.5.1	Elektrostatické pole.....	- 15 -
3.5.2	Proudové pole	- 15 -
3.5.3	Magnetická pole.....	- 16 -
3.6	Okrajové podmínky.....	- 17 -
3.6.1	Neumannova okrajová podmínka	- 17 -
3.6.2	Dirichletova okrajová podmínka	- 17 -
4	Teplotní pole.....	- 18 -
4.1	Přenos tepla	- 18 -
4.1.1	Kondukce	- 18 -
4.1.2	Konvekce	- 19 -
4.1.3	Radiace.....	- 19 -
4.2	Odvození Fourier-Kirchhoffovy rovnice	- 20 -
4.3	Podmínky na rozhraní	- 22 -
4.4	Okrajové podmínky.....	- 22 -
4.4.1	Dirichletova podmínka	- 22 -
4.4.2	Neumanova podmínka	- 22 -
5	Popis experimentu	- 24 -
6	Zařízení.....	- 27 -
6.1	Rezonanční obvod.....	- 27 -
6.1.1	Vysokofrekvenční transformátor	- 27 -
6.1.2	Kapacitní baterie – rezonanční frekvence.....	- 27 -
6.1.3	Induktor.....	- 27 -
6.2	Průtok chladiva a kalicího média	- 27 -
6.3	Frekvenční měnič	- 28 -
7	Měření.....	- 30 -
7.1	Pohyb vsázky při kalení	- 32 -
7.2	Umístění termočlánků	- 33 -
7.3	Kalení nástrojové oceli typu NO za pomoci vody	- 34 -
7.4	Hodnoty získané z osciloskopu	- 35 -
7.5	Informativní hodnoty získané z analyzátoru	- 38 -
7.6	Kalení nástrojové oceli typu NO za užití polymeru.....	- 39 -

7.7	Hodnoty získané z osciloskopu a z analyzátorů.....	- 41 -
7.8	Porovnání kalení při využití vody s polymerem	- 43 -
7.9	Kalení oceli typu EN C35 za pomoci vody.....	- 44 -
7.10	Hodnoty získané z osciloskopu	- 46 -
7.11	Kalení oceli typu EN C35 pomocí polymeru	- 49 -
7.12	Hodnoty získané z osciloskopu	- 51 -
7.13	Porovnání kalení při využití vody a polymeru	- 54 -
8	Měření s rotací vsázky	- 56 -
8.1	Otočný kontakt	- 57 -
8.2	Měření s rotací vsázky.....	- 58 -
9	Matematický model	- 62 -
10	Závěr a zhodnocení práce	- 65 -
	Literatura.....	- 66 -
	Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
T	Teplota	(°C)
PTC	Positive temperature coefficient	
NTC	Negative temperature coefficient	
PLC	Programovatelná logický automat	
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise	
NiCr	Slitina chrom-nikl	
NiAl	Slitina aluminium-nikl	
Cu	Měď	
CuNi	Slitina měď-nikl	
Fe	Železo	
NiCrSi	Slitina nikl-chrom-silicid	
NiSiMg	Slitina nikl-silidum-magnesium	
NiCr	Slitina nikl-chrom	
PtRh13	Trideka-rhodium-platina	
Pt	Platina	
PtRh6	Hexa – rhodium-platina	
W	Wolfram	
WRh	Slitina rhodium-wolfram	
WRh5	Penta-rhodium-wolfram	
WRh26	Hexakosa-rhodium-wolfram	
T	Termodinamická teplota	(K)
ρ	Reflexivita	(-)
τ	Transmisivita	(-)
ε	Emisivita	(-)
a	Hloubka vniku	(m)
f	Frekvence	(Hz)
μ_0	Permeabilita vakua	(kg*m/A ² *s ²)
μ_r	Relativní permeabilita	(kg*m/A ² *s ²)
e	Eulerovo číslo	(-)
H	Intenzita magnetického pole	(A/m)
I	Proud	(A)
μ_0	Permeabilita vakua	(kg*m/A ² *s ²)
J	Proudová hustota	(A/m)
D	Elektrická indukce	(C/m ²)
E	Intenzita elektrického pole	(V/m)
t	Čas	(s)
Φ	Magnetický tok	(Wb)
B	Magnetické indukce	(T)
S	Plocha	(m ²)
Q	Elektrický náboj	(C)
ε_0	Permitivita vakua	(F/m)
ε_r	Relativní permitivita	(F/m)
γ	Konduktivita	(S/m)
v	Rychlost šíření	(m/s)
A	Elektrodynamická potenciál	(-)
q	Fourierový zákon	(W/m ²)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	(W/m*K)

Δt	Rozdíl teplot	($^{\circ}\text{C}$)
P	Výkon	(W)
α	Součinitel přestupu tepla	(W/ m^2K)
I	Intenzita záření	(W/ m^2)
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta	(W/ m^2K^4)
λ_{max}	Vlnová délka	(m)
P_{12}	Tepelný výkon přenesení sáláním	(W)
c_p	Měrná tepelná kapacita	(J/kg K)
V	Objem	(m^3)
a	Rychlost změny teplotního pole	(m^2/s)
U_{ef}	Efektivní hodnota napětí	(V)
L	Indukčnosti	(H)
R	Odpor	(Ω)
M	Vzájemná indukčnost	(H)
$3D$	Třídídimenzionální systém	
$IGBT$	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem	
PC	Osobní počítač	
VF	Vysokofrekvenční	
On	Zapnout	
Off	Vypnout	
TC	Termočlánek	
EN	Evropská norma	
U_i	Napětí na induktoru	(V)
U_m	Napětí na měniči	(V)
I_i	Proud v induktoru	(A)
I_m	Proud v měniči	(A)

Úvod

Kalení ocelí je jednou z nejvýznamnějších povrchových úprav v historii lidstva. Princip zůstává tisíce let stejný, ovšem díky novodobým technologiím, ať už mikroskopům, díky kterým lze pozorovat strukturální vlastnosti kaleného předmětu, nebo různým technologiím, které kalicí proces zefektivňují, se celý proces posouvá na jinou úroveň a je zde nutné řešit nové překážky.

V předkládané diplomové práci se zabývám a přibližuji zde měření teploty při indukčním kalením. Hlavním cílem práce bylo dokázat vliv termočlánků a jejich pozice na průběh a výsledek kalicího procesu. Práce se kromě praktické části, ve které je možné sledovat data z měření, zabývá i procesem kalení, teorií měření teplot, teorií elektromagnetického a teplotního pole. V závěru práce je možné sledovat vytvořený matematický model v programu ANSYS.

Výsledkem práce je zjištění, jakým způsobem ovlivňují termočlánky umístěné na povrchu a uvnitř vsázky celkový proces. Pro proces bylo využito pět povrchových a dva podpovrchové termočlánky. Dalším problémem, kterým se práce zabývá je vliv rotace vsázky a rozdíl oproti ohřevu bez rotace.

Zařízení využitě pro měření a zkoumání problémů, bylo vytvořeno v laboratoři elektrického tepla a na tomto zařízení byly prováděny veškeré experimenty.

1 Kalení

Jedná se o zlepšovací proces pro úpravu ocelí. Tepelnou úpravou ocele dochází k vylepšení mechanických vlastností. Ocel se při tomto procesu ohřeje na kalící teplotu, tato teplota závisí na typu oceli (přibližně 720-900 °C). Po ohřátí na požadovanou teplotu dojde k okamžitému zchlazení. Tento proces trvá velmi krátkou dobu a po ochlazení dochází ke změně krystalové mřížky a zvýšení tvrdosti zakalené části. [1,2]

1.1 Způsoby ochlazení

- Voda – jedná se o intenzivní ochlazovací prostředí, které je vhodné pro oceli s malou prokalitelností. [1]
- Olej – olej má mírnější ochlazovací účinky než voda. [1]
- Vzduch – využívá se spíše u prostředí vhodné pro hluboce prokalitelné oceli, příznivé z hlediska vzniku a rozložení vnitřního pnutí. [1]
- Roztavené solné lázně [1]

1.2 Druhy kalení

- Objemové – jedná se o proces, při kterém je vsázka ohřátá v celém svém objemu a dojde k celkovému zakalení vsázky. To má za následek vyšší tvrdost ovšem na úkor nižší houževnatosti. Objemové kalení se provádí nejčastěji v peci.
- Povrchové – jedná se o proces, při kterém je vsázka ohřívána buďto na povrchu anebo mírně pod povrchem. Záleží na použité technologii. Nejčastěji se pro povrchové kalení využívá laser, případně indukce.

1.3 Vliv ochlazování na tvrdost vsázky

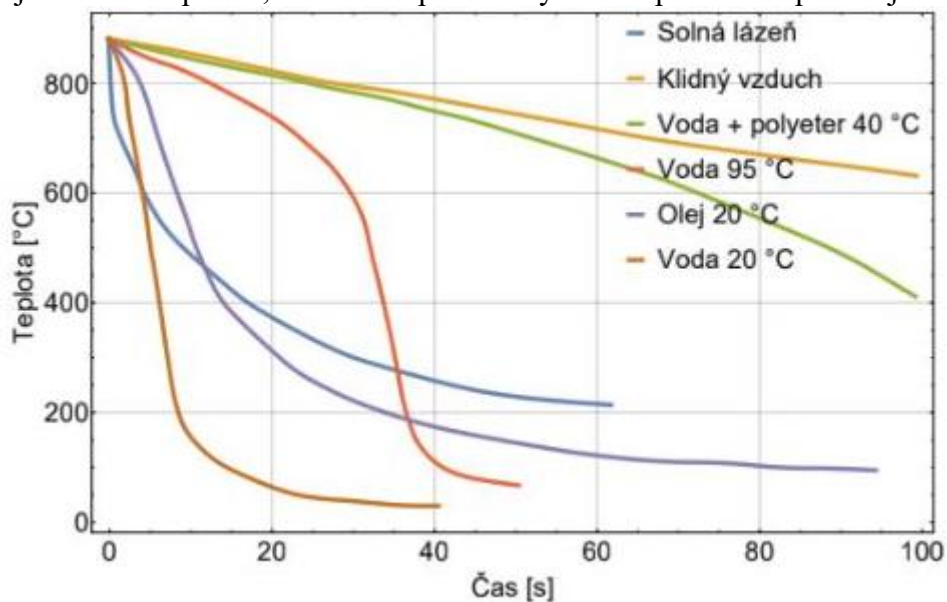
Během kalícího procesu je možné brát v úvahu mnoho proměnných. Mezi ně mohou například patřit: složení atmosféry, teplota okolí, velikost induktoru, vzdálenost induktoru od vsázky, teplota a typ chladiva pro ochlazování vsázky. [2]

Největší vliv na konečnou tvrdost a prokalení vsázky má teplota a typ chladiva. Jak je uvedeno v kapitole 1.1, tak pro ochlazování vsázky je možné využívat velké množství chladiv s různými vlastnostmi a chladícími schopnostmi. Na obrázku 1.1 je možné sledovat ochlazovací schopnost různých kalících medií, je zde vidět například rozdíl mezi vodou při teplotě 20 °C a vodou při teplotě 95 °C. Z tohoto obrázku je patrné, že teplota a typ chladiva

mají značný vliv na celkový proces kalení. Pro náš experiment je použita jako kalící médium voda. [3]

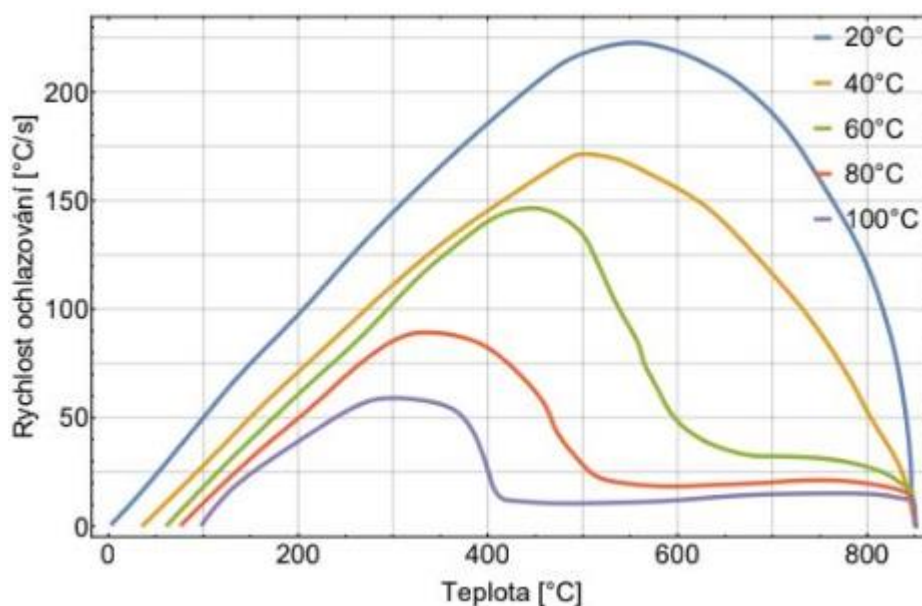
Vodu můžeme označit jako levné kalící médium a zároveň médium s nejvyšší intenzitou ochlazování. Během chlazení dochází ke vzniku parního polštáře, který snižuje účinnost ochlazování a je nutné vodu obohatit vhodnou volbou přísad, které vzniku předcházejí.

Dále je z obrázku patrné, že různá teplota vody může způsobovat pomalejší kalení a tím



Obrázek 1.1 Ochlazovací schopnosti kalících médií [2]

zhoršit účinnost procesu. Vliv teploty vody na chlazení vsázky je možné sledovat na obrázku 1.2, kde lze vyčíst, jak velký vliv má teplota vody na kalící proces a na ochlazení vsázky.[3]



Obrázek 1.2 Ochlazovací účinnost vody bez příměsí v závislosti na její teplotě [2]

2 Měření teploty

Měření teploty bylo a vždy bude v průmyslu jednou ze základních měřených veličin. Pro samotné měření je možné využít několik způsobů, ať už kontaktních, tak bezkontaktních. Mezi kontaktní způsoby můžeme zařadit technologie založené na přímém kontaktu měřícího zařízení s měřeným prostředím. Mezi tyto způsoby se řadí termistory, termočlánky, v nižších teplotách pak teploměry založené na změně objemu kapaliny, případně na změně tlaku. (tj. teploty do 200–300 °C) anebo kovové odporové teploměry. Bezkontaktní teploměry pracují na základě Stefan-Boltzmannova zákona, který pojednává o tom, že každé těleso teplejší než 0°K (tedy -273,15 °C) vyzařuje elektromagnetické záření v důsledku tepelné excitace (vybuzení) atomů. Na tomto principu tedy pracují zařízení vnímající infračervené záření, které vyzařuje měřený povrch. Mezi tyto způsoby můžeme zařadit pyrometry a termokamery. [2,4]

Z důvodu velkého množství technologií a všech kladů a záporů každé technologie je měření teploty opravdu důležitým tématem pro každý průmysl, kde se provádí ohřev anebo je důležité udržovat požadované teploty.

V průmyslu si celkový princip měření můžeme představit jako dva spojené celky, první slouží k měření teploty, tudíž převodu teploty na elektrický signál a druhý ke zpracování tohoto signálu. Do prvního celku lze zařadit senzory, které teplotu převádějí na určitý signál. Tyto senzory pracují na různých principech v závislosti na měřeném materiálu případně látce. Do druhého celku lze zařadit určitý elektrický obvod sloužící pro zesílení, vyhodnocení a zpracování signálu od čidla. V případě více nezávislých senzorů je vytvořeno hlavní sběrací zařízení, které následně ukládá informace do řídicího systému (v průmyslu nejčastěji počítač na bázi PLC).

2.1 Kontaktní měření teploty

Jak již bylo zmíněno jedná se o způsob měření, při kterém je měřící zařízení a měřená oblast spolu vzájemně určitým způsobem spojena.

2.1.1 Termistory

Jedná se o zařízení pracující na změně elektrického odporu. Vyrábějí se práškovou metalurgií z oxidů kovů, jako je například mangan, kobalt, nikl apod. Termistory lze rozdělit na PTC a NTC. PTC je termistor, u kterého dochází při zvýšení teploty k zvětšení odporu, oproti NTC termistoru, který se zvýšením teploty sníží svůj odpor.

2.1.2 Termočlánky

Jedná se o nejrozšířenější zařízení pro měření teploty. Funguje na principu termoelektrického jevu. Samotná konstrukce termočlánku spočívá ve vodivém spojení dvou různých materiálů na dvou místech o různé teplotě. Různou teplotou na obou koncích vzniká tzv. termoelektrické napětí a jeho velikost je dána rozdílu teplot. Chladnější konec se nazývá referenční, udržuje se zde konstantní teplota, v praxi je teplota studeného konce kompenzována a druhý konec je umístěn v místě, ve kterém měříme teplotu.

Rozeznáváme různé typy termočlánků, které jsou označeny písmeny a velikostí teploty, ve které je lze provozovat.

Tabulka 1 Typy termoelektrických článků podle IEC 584.1 (ČSN EN 60584-1)

KÓD	SLOŽENÍ	DLOUHODOBÝ PROVOZ	KRÁTKODOBÝ PROVOZ
K	NiCr (+) NiAl (-)	0 +1100	-180 +1350
T	Cu (+) CuNi(-)	-185 +300	-250 +400
J	Fe (+) CuNi(-)	+20 +700	-180 +750
N	NiCrSi(+) NiSiMg(-)	0 +1100	-270 +1300
E	NiCr(+) CuNi(-)	0 +800	-40 +900
R	PtRh ₁₃ (+) Pt(-)	0 +1600	-50 +1700
S	PtRh ₁₀ (+) Pt(-)	0 +1550	-50 +1750
B	PtRh ₃₀ (+) PtRh ₆ (-)	+100 +1000	+100 +1820
G	W(+) WRh(-)	+20 +2320	0 +2600
C	WRh ₅ (+) WRh ₂₆ (-)	+50 +1820	+20 +2300

Jako u každého zařízení i u termočlánků může nastat rušení, a tudíž vznikat nepřesnost v měření. Jelikož je termoelektrické napětí pouze v řádech jednotek, případně desítek milivoltů, je důležité potlačit veškeré rušivé vlivy (elektrické, magnetické., elektromagnetické. pole, vliv parazitních zemních kapacitních vazeb a proudových parazitních smyček).

Magnetické pole jsme schopni potlačit zkroucením vodičů, pole elektrostatické a elektromagnetické za pomoci odstínění. Při použití stínění je nutné dodržet nulový proud v stínění, dále musí být připojeno na referenční uzel, kterým může být zem nebo kostra přístroje.

2.2 Bezkontaktní měření

2.2.1 Měření pomocí infračerveného systému

Jak je známo ze zákonů termodynamiky, tak každé těleso teplejší než 0 K (-273,15 °C) emituje ze svého povrchu do svého okolí elektromagnetické záření, které je úměrné vnitřní teplotě. Toto záření je poté možné měřit za pomoci čočky, která usměrňuje a zaostřuje paprsek do detekčního prvku, který poté generuje elektrický signál úměrný záření.

Při bezkontaktním měření využíváme tak zvané infračerveném záření. Infračervené záření, oproti viditelnému, má kratší vlnové délky a vyšší kmitočet, tudíž ho nejsme za normálních okolností schopni vidět. Spektrum infračerveného záření má určité vlnové délky začínající na 0,78 μm a končící na 1000 μm a frekvenci začínající na 300 GHz a končící na 400 THz. [4] Každá literatura uvádí různé velikosti vlnových délek, proto můžeme narazit i na různě velké rozsahy, ale tyto rozsahy jsou si velmi blízké. U frekvenčních rozsahů je to obdobně.

Pro bezkontaktní měření je nedefinováno absolutně černé těleso, které je bráno jako ideální objekt, který je schopný pohltit veškeré přichodící záření a zároveň je brán jako ideální zdroj, který je schopný vyzařít maximální množství energie do svého okolí. Ovšem absolutně černé těleso je pouze teoretický předpoklad, v reálných měřeních se uvažuje s tělesy, které do svého okolí vyzařují méně energie nežli absolutně černé těleso, a proto se definuje emisivita. Jedná se o poměr mezi intenzitou vyzařování reálného objektu ku absolutně černému tělesu. Tento poměr nabývá hodnot mezi 0 (objekt se 100 % odrazitelností příklad: dokonalé zrcadlo) a 1 (absolutně černé těleso). [4]

U reálných těles se kromě emisivity, projevuje reflexivita a transmisivita. Reflexivita je opak emisivity, poměr dopadané intenzity záření k odražené intenzitě záření a transmisivita je poměr intenzity záření, které do prostředí vstupuje k intenzitě záření, které z prostředí vystupuje. Transmisivita se ve většině případů měření zanedbává.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (2.1)$$

v rovnici emisivita ε reflexivita ρ a transmisivita τ .

Emisivita je nejdůležitějším prvkem pro bezkontaktní měření teploty. Ovšem samotné určení není jednoduché. Závisí zde na druhu materiálů, povrchové úpravě a kvalitě povrchu, vlnové délce a na úhlu pod kterým je měření prováděno. U kovu dochází k problémům s relativně nízkou emisivitou, která je velmi závislá na typu a kvalitě povrchu a na velikosti vlnové délky (se zvyšující se vlnovou délkou, klesá emisivita).

2.2.2 Pyrometr

Pyrometr je přístroj sloužící k bezkontaktnímu měření teploty pomocí elektromagnetického záření, které těleso vyzařuje. Měřicí schopnost se pohybuje od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Samotná přesnost měření pyrometrem je závislá na správném nastavení emisivity, tudíž je zde velmi důležité kalibrování. Proto bývá u pyrometru kalibrovací zařízení, obvykle zařízení s materiálem o známé emisivitě a s regulátorem teploty. [5]

Rozeznáváme množství pyrometrů, jako jsou pyrometry úhranné, monochromatické, pásmové, poměrné, s automatickou korekcí emisivity atd.

2.2.3 Termokamera

Termovizní systémy můžeme dělit na dva základní:

- Systémy pracující s optickomechanickým rozkladem obrazu – využívá rozklad obrazu za pomoci snímání jednotlivých bodů objektu optickou osou. Tyto systémy se používali dříve. [5]
- Systémy pracující s maticovým detektorem – využívá maticové mikrobolometrické a kvantové detektory (chlazené a nechlazené). Oproti optickomechanickým, umožňuje zobrazení teplotního profilu v libovolném místě obrazu, vyhodnocení střední a maximální teploty, libovolné určení místa a teploty aj. [5]

V termovizní technice se používají dvě pásma vlnových délek a to krátkovlnné ($2\text{ }\mu\text{m}$ – $5\text{ }\mu\text{m}$) a dlouhovlnné ($7\text{ }\mu\text{m}$ až $13\text{ }\mu\text{m}$). [4] Opět se jedná o informaci vyňatou z technické literatury, proto je možné, že se tyto hodnoty mohou v závislosti na literatuře měnit.

Termokamera pracuje na stejném principu jako pyrometr. Teplotu je možné měřit bodově tak, jako je to u pyrometru anebo plošně, zobrazení plochy. Využívá principu transformace tepelného záření na viditelný obraz. Zobrazuje ovšem v tzv. falešných barvách, tzn. neodpovídá skutečnosti. Díky použití elektronicky chlazených detektorů došlo ke zlepšení citlivosti, a tudíž k možnosti zpracovávat signály z oblasti spektra $10\text{ }\mu\text{m}$ a vyšší. [5]

2.2.4 Chyby v měření

Špatná volba emisivity je nejčastější chybou při bezkontaktním měření, proto je důležité přesně znát a určit její velikost. To se může provádět několika způsoby. Jedním z hlavních způsobů je změření teploty pomocí kontaktního měření a poté využít tyto teploty k sestavení emisivity. Další možností je vyhledat si správnou emisivitu pomocí tabulek, anebo za pomoci spektrometru. Dalším možnou chybou je chyba způsobena nedodržením velikosti

měřené plochy podle výrobcem určených hodnot, tato chyba nastává u měření pyrometry. [5]

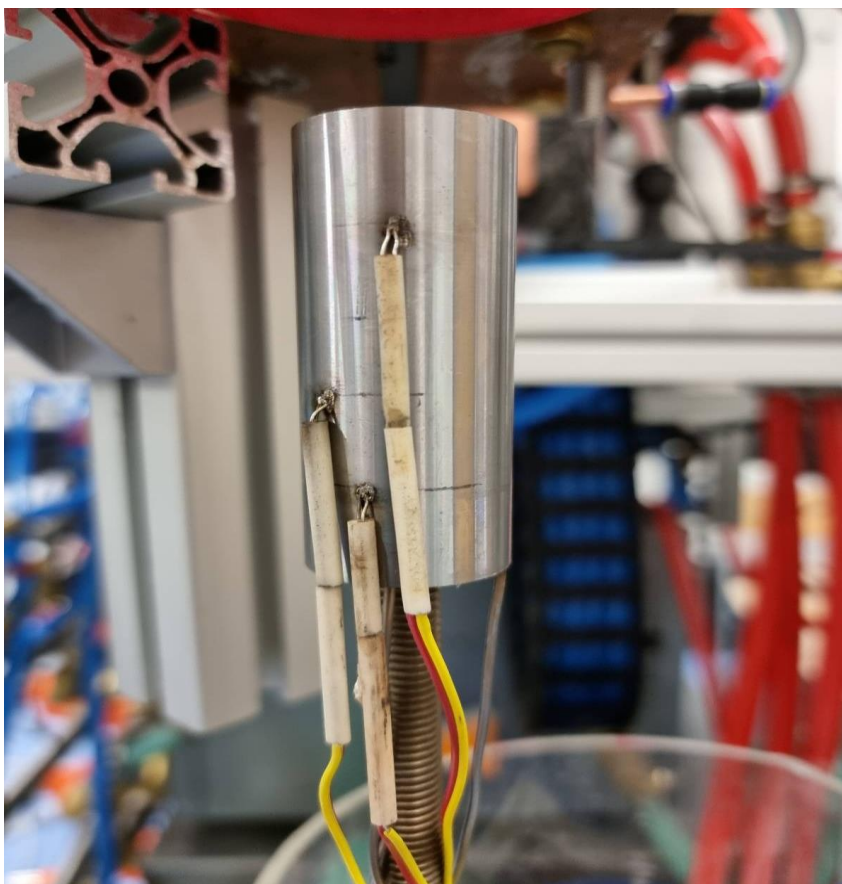
2.3 Měření teploty na povrchu a vně tělesa

2.3.1 Měření teploty uvnitř tělesa

Vždy je nutně do tělesa vyvrtat otvor, do kterého je vloženo měřící zařízení, přičemž toto řešení může způsobit poškození mechanické pevnosti konstrukce. Výhodou využití termoelektrických článků je snížení úniku tepelných toků do okolního prostoru, jelikož z otvoru vychází pouze dva vodiče. Pro měření tuhých těles jsou vhodné plášťové termoelektrické články s izolovaným spojem. [5]

2.3.2 Měření povrchové teploty

Toto měření se provádí buďto kontaktně nebo bezkontaktně. V případě kontaktního měření je snímač v kontaktu s ohřívanou plochou.



2.1 Měření teploty na povrchu a vně vsázky za pomoci termočlánku

3 Elektromagnetické pole

3.1 Indukční ohřev

Je založen na přenosu elektromagnetického vlnění z induktoru do vsázky. Celý tento proces se dá popsat jako vzduchový transformátor, u něhož induktor představuje primární stranu a vsázka stranu sekundární. Induktor při průchodu proudem generuje elektromagnetické vlnění, které do vsázky naindukuje vířivé proudy a tyto proudy zahřívají vsázku. [2]

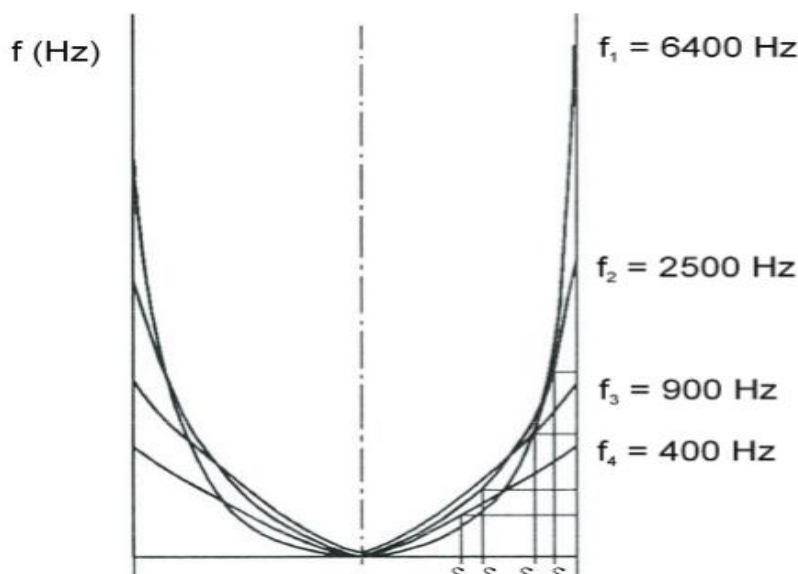
3.1.1 Hloubka vniku

Hloubka vniku elektromagnetického vlnění do vsázky je největší předností indukčního ohřevu. Správnou volbou frekvence můžeme zvolit hloubku, ve které dojde k ohřevu. Pokud se do vsázky naindukují vířivé proudy, největší proudová hustota bude na povrchu a směrem ke středu vsázky se bude exponenciálně zmenšovat. Hloubka vniku je vzdálenost, ve které proudová hustota klesne na hodnotu $\frac{1}{e}$ (přibližně na hodnotu 0,368) hustoty na povrchu. [2,10]

Hloubka vniku je definována rovnicí:

$$a = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (\text{m, mm}) \quad (3.1)$$

, kde a je hloubka vniku, ρ je rezistivita, f frekvence, μ_0 permeabilita vakua, μ_r relativní permeabilita.



3.1 Závislost hloubky vniku na frekvenci [16]

V hloubce vniku se vyvine přibližně 87% tepla, které vznikne průchodem proudem. [2,10]

3.2 Maxwellovy rovnice v integrálním a diferenciálním tvaru

V samotném základu známe 4 základní Maxwellovy rovnice. První je takzvaný *Amperův zákon*, druhá *Faradayův indukční zákon*, třetí *Gaussův zákon elektrostatiky* a poslední je *zákon spojitosti indukčního toku*. Tyto čtyři rovnice popisují chování elektromagnetického pole. [6]

Samotný diferenciální tvar platí pouze v regulárních bodech, to jsou body, kde nedochází ke skokové změně parametrů. Mezi regulární body nepatří například body ploch oddělující jedno prostředí od druhého, a kde dochází ke nespojitě změně parametrů ε , μ , γ , protože se stavové vektory \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{D} a \mathbf{J} mění nespojitě, a tudíž tam MR v diferenciálním tvaru neplatí.[6]

3.2.1 Integrální tvar a diferenciální tvar

3.2.1.1 I. Maxwellova rovnice

Maxwellovy rovnice jsou základem elektromagnetických polí. Můžeme je formulovat buďto v integrálním tvaru, který popisuje elektromagnetické pole v prostorové oblasti anebo v diferenciálním tvaru, který elektromagnetické pole popisuje v určitém bodu této oblasti.[6]

Amperův zákon

Integrální tvar

$$\int_c \mathbf{H} \, dl = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (3.2)$$

Cirkulace vektoru \mathbf{H} po libovolně orientované uzavřené křivce c je rovna součtu celkového proudu I a posuvného Maxwellova proudu $\frac{d\psi}{dt}$. Oba tyto proudy jsou spřažené ke křivce c . [6]

Diferenciální tvar

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.3)$$

Rotace vektoru intenzity magnetického pole \mathbf{H} je rovna hustotě vodivého proudu \mathbf{J} a hustotě posuvného Maxwellova proudu $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$. [6]

3.2.1.2 II. Maxwellova rovnice

Faradayův indukční zákon

Integrální tvar

$$\int_c \mathbf{E} \, dl = - \frac{d\phi}{dt} \quad (3.4)$$

Cirkulace vektoru \mathbf{E} po libovolné orientované uzavřené křivce c je rovna záporně vzaté derivaci magnetického indukčního toku spřaženého s křivkou c . [6]

Diferenciální tvar

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

Rotace vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} je rovna záporné časové derivaci vektoru magnetické indukce \mathbf{B} . [6]

3.2.1.3 III. Maxwellova rovnice

Gaussův zákon elektrostatiky

Integrální tvar

$$\int_S \mathbf{D} \, dS = Q \quad (3.6)$$

Elektrický indukční tok libovolnou vně orientovanou uzavřenou plochou S je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti ohraničené plochou S . [6]

Diferenciální tvar

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3.7)$$

Divergence vektoru elektrické indukce \mathbf{D} je rovna objemové hustotě volného náboje q . [6]

3.2.1.4 IV. Maxwellova rovnice

Zákon spojitosti indukčního toku

Integrální tvar

$$\int_S \mathbf{B} \, dS = 0 \quad (3.8)$$

Magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou S je roven nule. Tedy tok, který do uzavřené plochy S vstupuje je roven toku, který z ní vystupuje. [6]

Diferenciální tvar

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.9)$$

Divergence vektoru magnetické indukce je rovna nule. [6]

3.2.2 Rovnice pro proudovou hustotu

Integrální tvar

$$\int_S \mathbf{J} \, dS = -\frac{dQ}{dt} \quad (3.10)$$

Uzavřenou plochou S proteče ven tolik náboje, kolik ho ubude uvnitř objemu. [6]

Diferenciální tvar

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\delta \rho}{\delta t} \quad (3.11)$$

3.2.3 Vzájemná provázanost Maxwellových rovnic

Pokud se podíváme na jednotlivé Maxwellovy rovnice, zjistíme, že jsou mezi sebou provázány materiálovými konstantami ε , μ , γ . Tyto materiálové konstanty nám určují vlastnosti látky, popřípadě prostředí.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (3.14)$$

3.3 Modelování elektromagnetických polí

3.3.1 Odvození vlnových rovnic pro šíření elektromagnetického vlnění

Všechny rovnice a odvození v této kapitole byly provedeny pomocí odborné literatury *Elektrotepelná technika J. Rada a KOL. [18]*

Pro odvození vlnových rovnic budeme vycházet z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru (3.3), (3.5), (3.7) a (3.9). Nejprve provedeme rotaci rovnice (3.3) pro odvození magnetické složky elektromagnetického vlnění.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial (\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad (3.15)$$

Poté můžeme dosadit z rovnice (3.5) za $\operatorname{rot} \mathbf{E}$.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3.17)$$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

Z vektorového počtu můžeme určit:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} \quad (3.19)$$

Implementováním tohoto pravidla do rovnice (3.18) dostaneme:

$$\text{grad}(\text{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\lambda \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.20)$$

Dále víme že:

$$\text{div} \mathbf{H} = \mathbf{0} \quad (3.21)$$

Proto platí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.22)$$

K odvození elektrické složky využijeme rovnici (3.5) a provedeme ve stejném smyslu i odvození:

$$\text{rot}(\text{rot} \mathbf{E}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.23)$$

$$\text{grad}(\text{div} \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.24)$$

Ze třetí Maxwellovy rovnice (3.7) můžeme určit že:

$$\text{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (3.25)$$

Po dosazení:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \text{grad}\left(\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}\right) \quad (3.26)$$

Rovnice (3.22) a (3.26) jsou obecné rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění. Reálně existují prostředí nevodivá, kde zanedbáváme γ anebo prostředí vodivá, kde zanedbáváme ε_r dále pro další rovnice nebudeme uvažovat ani ρ .

Rovnice pro nevodivá prostředí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.27)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.28)$$

Rovnice pro vodivá prostředí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.29)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.30)$$

Z rovnic (3.27) a (3.28) můžeme odvodit rychlost šíření

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (3.31)$$

3.4 Odvození rovnice elektrodynamického potenciálu

Všechny rovnice v této kapitole byly odvozeny za pomoci knihovny programu ANSYS.

V reálných případech se modely stávají z vícero oblastí s různými materiálovými vlastnostmi, to vede k tomu, že se oblast hranice nemůže považovat za regulární bod a neplatí zde tedy diferenciální rovnice. Proto zde platí:

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{\mu_1} \cdot \text{rot} \mathbf{A}_1 - \frac{1}{\mu_2} \text{rot} \mathbf{A}_2 = K_N \quad (3.33)$$

Odvození potenciálu budeme provádět za pomoci druhé Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru 3.5.

$$\text{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.34)$$

Z této rovnice vychází to, že pole je nezářidlové proto můžeme tuto rovnici upravit tak že si nadefinujeme skalární elektrický potenciál:

$$\text{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (3.35)$$

$$\mathbf{E} = -\text{grad} \varphi \quad (3.36)$$

Při takto zapsaném skalárním potenciálu je nutného ho jednoznačně normovat. Proto využijeme magnetický vektorový potenciál \mathbf{A} , který popíšeme následovně:

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \quad (3.37)$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\text{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.38)$$

Po převedení a matematické úpravě dostaneme:

$$\text{rot} \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.39)$$

Jelikož se jedná o nezářidlové pole a závorka bude mít nulovou rotaci zavedeme opět skalární potenciál, jako v rovnici 3.36 to nám rovnici upraví:

$$\mathbf{E} = -\text{grad} \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.40)$$

Využitím materiálových rovnic 3.12, 3.13, 3.14 a následnou úpravou a dosazením do první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru 3.3 získáme:

$$\text{rot} \mathbf{H} = -\gamma \cdot \left(\text{grad} \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) - \varepsilon \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\text{grad} \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (3.41)$$

$$\text{rot} \mathbf{H} + \gamma \cdot \left(\text{grad} \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \varepsilon \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\text{grad} \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.42)$$

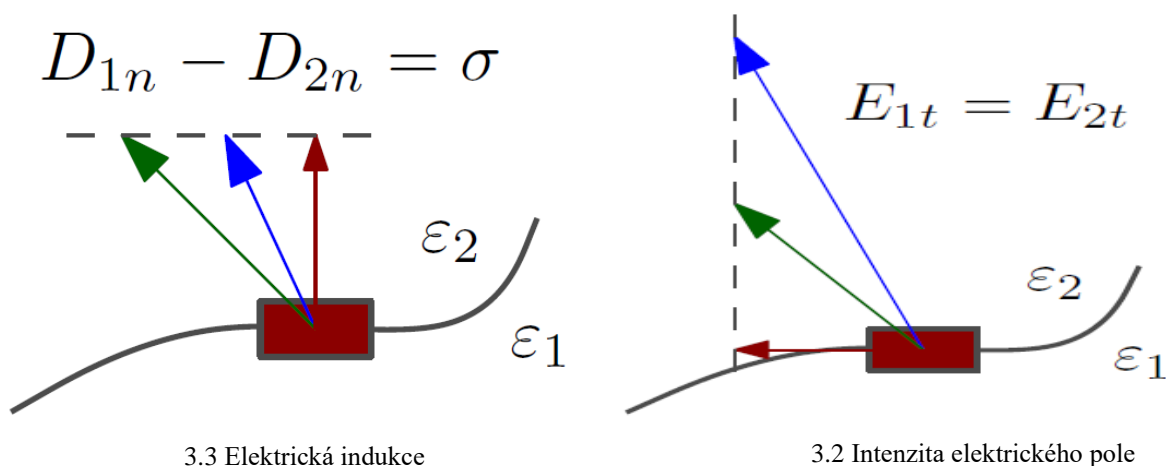
$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + 0 = 0 \quad (3.43)$$

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_V \quad (3.44)$$

3.5 Podmínky na rozhraní

3.5.1 Elektrostatické pole

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru platí jen v regulárních bodech prostředí. Regulárními body nejsou například body, které oddělují jedno prostředí od druhého, a kde dochází ke skokové změně permitivity ϵ . Stavové vektory elektrické intenzity \mathbf{E} a indukce \mathbf{D} se mění spojitě.



- Podmínka pro intenzitu elektrického pole \mathbf{E}

$$\mathbf{E}_{1t} - \mathbf{E}_{2t} = 0 \quad (3.45)$$

- Podmínka pro elektrickou indukci \mathbf{D}

$$\mathbf{D}_{1n} - \mathbf{D}_{2n} = \sigma \quad (3.46)$$

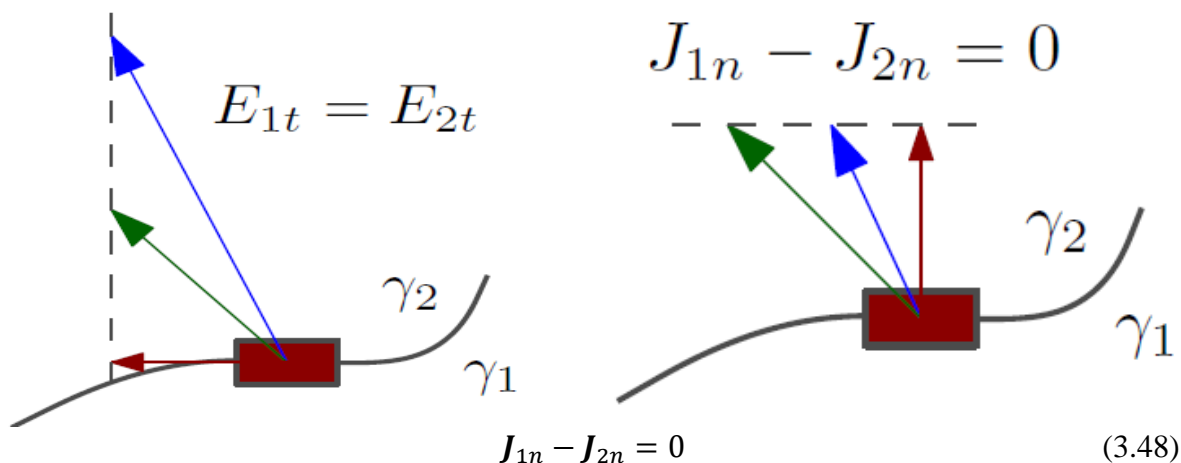
3.5.2 Proudové pole

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru platí opět jen v regulárních bodech prostředí. Stavové vektory elektrické intenzity \mathbf{E} a proudové hustoty \mathbf{J} se mění nespojitě.

- Podmínka pro intenzitu magnetického pole \mathbf{E}

$$\mathbf{E}_{1t} - \mathbf{E}_{2t} = 0 \quad (3.47)$$

- Podmínka pro magnetickou indukci \mathbf{J}



3.5.3 Magnetická pole

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru platí opět jen v regulárních bodech prostředí. Stavové vektory magnetické indukce \mathbf{B} a magnetické intenzity \mathbf{H} se mění nespojitě.

- Podmínka pro intenzitu magnetického pole \mathbf{H}

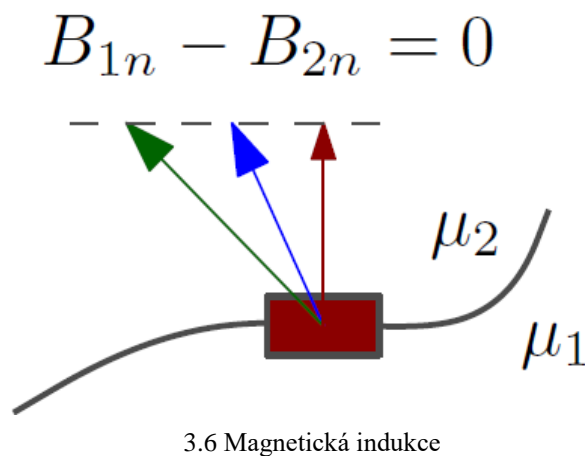
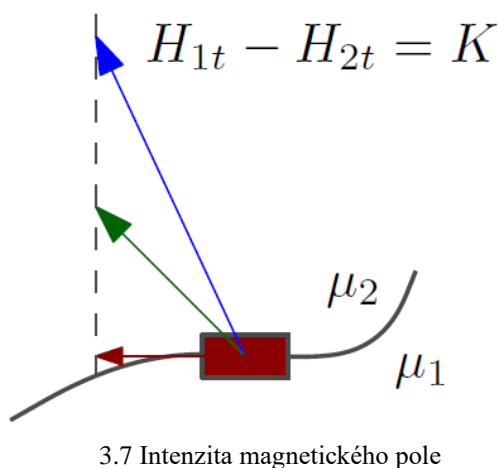
$$\mathbf{H}_{1t} - \mathbf{H}_{2t} = \mathbf{K} \quad (3.49)$$

- Podmínka pro magnetickou indukci \mathbf{B}

3.5 Intenzita elektrického pole

3.4 Proudová hustota

$$\mathbf{B}_{1n} - \mathbf{B}_{2n} = 0 \quad (3.50)$$



3.6 Okrajové podmínky

3.6.1 Neumannova okrajová podmínka

Neumannova okrajová podmínka pro magnetický vektorový potenciál se obvykle zapisuje [3]

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}}(\Gamma, t) = f(\Gamma, t) \quad (3.51)$$

Kde Γ označuje hranici v každém bodě. Tato rovnice se využije při známosti vektorového potenciálu na hranici Γ .

3.6.2 Dirichletova okrajová podmínka

Dirichletova okrajová podmínka vyžaduje znalost vektorového potenciálu na hranici/okraji modelu. Tato podmínka určuje i velikost derivace vektorového potenciálu v kterémkoli směru hranice a tím i normálovou složku rotace \mathbf{A} , ta odpovídá normálové složce magnetické indukce. [3]

$$A(\Gamma, t) = A_{\Gamma}(\Gamma, t) \quad (3.52)$$

4 Teplotní pole

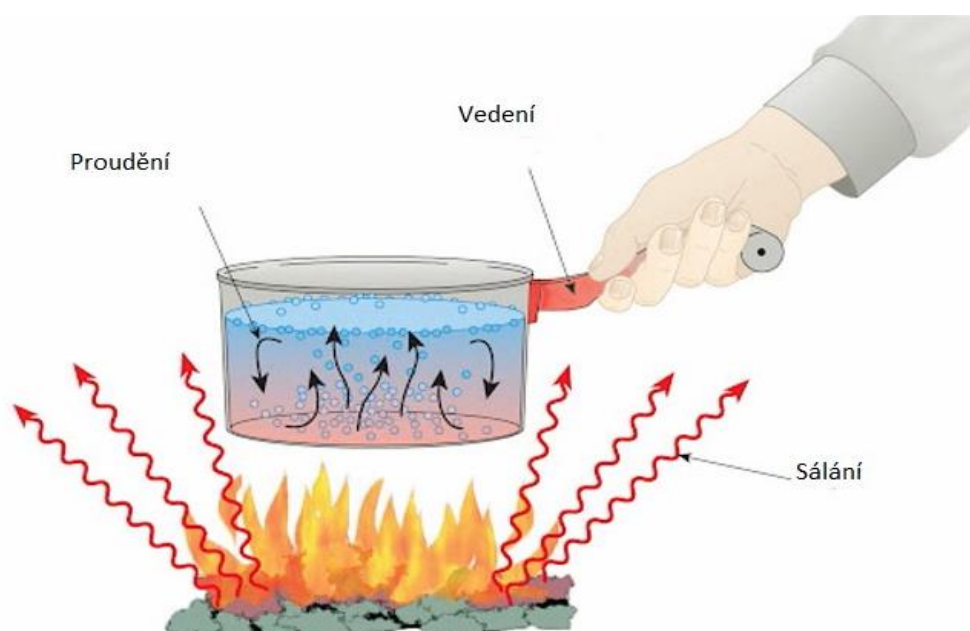
V začátku této kapitoly bych se rád zmínil o rozdílu mezi teplem a teplotou. Jelikož se jedná o velmi úzce související veličiny, které mohou působit zmatečně. Základní rozdíl mezi teplem a teplotou je v tom, že teplo se zaměřuje na tepelnou energii, zatímco teplota na molekulární kinetickou energii. [7]

Teplo tedy měří, jak se energie pohybuje nebo proudí mezi molekulami v systému a měří se v Joulech. To znamená, že nikdy není vlastností objektu nebo systému a je kvalifikováno jako procesní proměnná. [7]

Teplota popisuje průměrnou kinetickou energii molekul v materiálu nebo v systému a základními jednotkami jsou stupně. [7]

4.1 Přenos tepla

Přenos tepla je realizován třemi základními formami. To je přenos za pomoci Vedení (Kondukce), Proudění (Konvence) a Sáláním (Radiace).



4.1 Obrázek Způsoby přenosu tepla [6]

4.1.1 Kondukce

Vedení tepla se projevuje u pevných látek, to znamená, že se teplota předává v tělese anebo přímým dotykem tělesa s jiným tělesem. Kondukce je definována Fourierovým zákonem:

$$q = -\lambda \cdot \Delta t \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4.1)$$

kde q je hustota tepelného toku, λ součinitel tepelného vodivosti a Δt gradient teploty.

4.1.2 Konvekce

Konvekci se přenáší teplo u plynů a kapalin a může být buďto přirozená nebo nucená. U přirozené konvekce dochází k proudění látky rozdílem teplot, pro nucenou konvekci je zapotřebí čerpadla případně ventilátoru. Konvekce je velmi často spojená s kondukcí, a proto ji lze definovat rovnicí pro přenos tepla:

$$P = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

kde α označuje součinitel přestupu tepla, S plochu, přes kterou teplo přestupuje a Δt rozdíl času. Součinitel přestupu tepla reprezentuje tepelný tok přestupující z kapaliny do stěny. [9]

4.1.3 Radiace

Poslední možností, jak může dojít k přenosu tepla, je za pomoci sálání (radiací). Rozdíl oproti kondukcí a konvekci je v tom, že sálání není přímo spjaté s hmotou. Jelikož každé těleso s teplotou vyšší než 0 K vyzařuje ze svého povrchu energii v podobě elektromagnetického záření.[9]

Šíření tepla sáláním je ovšem samo o sobě složitější, projevuje se zde velké množství fyzikálních zákonů. Mezi ně patří Snellův zákon, Lambertův zákon, Stefan-Boltzmannův zákon, Planckův zákon, Wienův zákon a Kirchhoffův zákon. [10]

Zákon odrazu, známý jako Snellův zákon, popisuje šíření vlnění při přechodu z jednoho prostředí do druhého. [11]

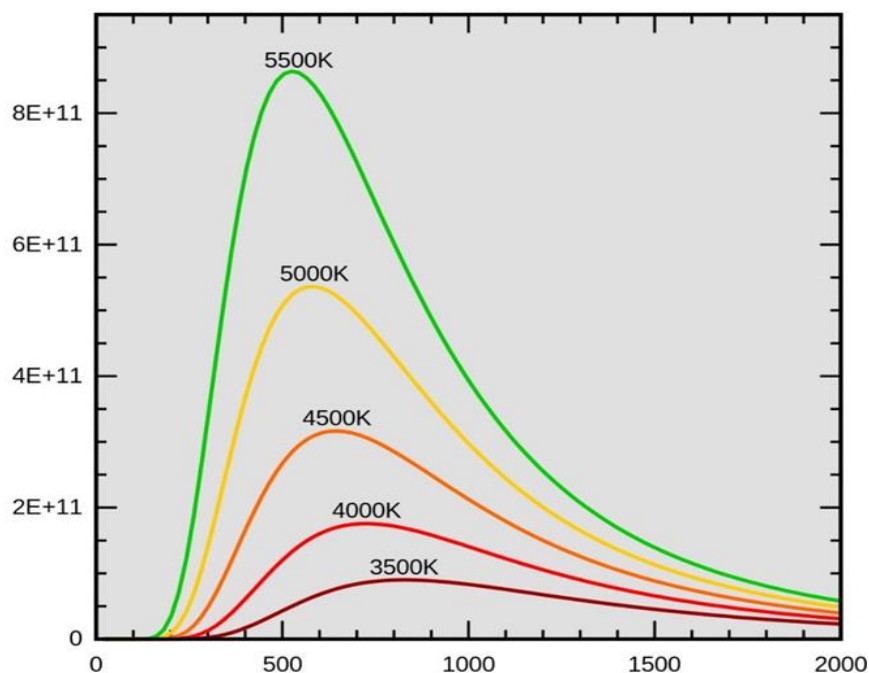
Lambertův zákon popisuje uplatňování pouze kolmé složky záření na dopadající plochu. [11]

Stefan-Boltzmannův zákon popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa. Ten je nedefinován tak, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa. [11,13]

$$I = \sigma \cdot T^4 \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4.3)$$

, kde I je celková intenzita záření, σ Stefanova-Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota. [13]

Planckův vyzařovací zákon popisuje závislost intenzity záření absolutně černého tělesa na jeho povrchové teplotě. [11,12]



4.2 Znáornění vyzařování absolutně černého tělesa jako funkce vlnové délky při různých absolutních teplotách [15]

Wienův posunovací zákon, popisuje, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařování na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje. V podstatě, čím teplejší je těleso, tím více vyzařuje na kratší vlnových délkách [11,13]

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (4.4)$$

, kde λ_{max} je vlnová délka a číslo 2898 je Wienova konstanta.

Kirchhoffův zákon popisuje, že poměr zářivé a absorpční schopnosti tělesa závisí výlučně na absolutní teplotě tělesa. Skrývá se pod ním odvození pohltivosti ze dvou ploch, absolutně černé plochy a plochy, která je šedá s neznámou pohltivostí. Z tohoto můžeme vyvodit emisivitu jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě absolutně černého tělesa. [11,12]

Potom tepelný výkon radiací při sálání z jednoho tělesa do druhého lze popsat rovnicí:

$$P_{12} = \epsilon_1 S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (4.5)$$

kde ϵ_1 je emisivita prvního tělesa, S_1 plocha prvního tělesa.

4.2 Odvození Fourier-Kirchhoffovy rovnice

Je velké množství možností odvození této rovnice. Pro svou práci jsem zvolil odvození z literatury *Sdílení tepla* od pana doc. Ing. Miroslava Sazimy, CSc. [20] kombinované s *Habilitační prací* pana doc. Ing. Davida Rota PhD [3] a *diplomové práce* pana Ing. Milana Dúška. [19]

Pro popis nestacionárního vedení tepla využíváme druhý Fourierův zákon a tím Fourier-Kirchhoffovu rovnici. Touto rovnicí zjistíme, jak se teplo šíří v daném čase. Rovnice vychází z předpokladu, že máme izobarický děj, u kterého změna entalpie tělesa je dána algebraickým součtem tepla dQ_λ která za dobu dt přivede teplo dQ_V vlivem tepelné vodivosti tělesa.

$$dI = dQ_\lambda + dQ_V \quad (4.6)$$

Přírůstek entalpie pro izobarický děj.

$$dI = m \cdot c_p \cdot dT = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot dT \quad (4.7)$$

Změna teploty s časem určí diferenciál teploty:

$$dt = \frac{\partial t}{\partial T} \cdot dT \quad (4.8)$$

Trojrozměrný kvádr se stranami dx , dy , dz , má objem dV . Teplo, které přivedeme za jednotku času dt se označí dQ_x , dQ_y , dQ_z . Teplo, které se odvede z kvádrů bude ve tvaru dQ_{x+dx} , dQ_{y+dy} , dQ_{z+dz} .

Pro osu x zapíšeme:

$$dQ_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (4.9)$$

$$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (4.10)$$

Hustotu tepelného toku v ose x představují členy q_x a q_{x+dx} . Z důvodu spojitosti můžeme využít Taylorový polynom a při zanedbání vyšších řádů bude rovnice ve směru x ve tvaru:

$$dQ_{\lambda,x} = dQ_x - dQ_{x+dx} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (4.11)$$

Pro osy y a z určíme rovnice analogicky.

$$dQ_\lambda = dQ_{\lambda,x} + dQ_{\lambda,y} + dQ_{\lambda,z} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial q_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \cdot dV \cdot dt \quad (4.12)$$

Množství tepla uvolněného v objemu dV za čas dt .

$$dQ_V = q_V \cdot dV \cdot dt \quad (4.13)$$

Úpravou rovnice 4.8 a jejím dosazením do rovnice 4.7 získáme:

$$dI = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dV \cdot dt \quad (4.14)$$

Dosazením rovnice 4.13 do rovnice 4.6 získáme tvar Fourierovo-Kirchhoffovy rovnice vedení tepla:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V \quad (4.15)$$

Při uvažování konstantních fyzikálních vlastností, můžeme rovnici přepsat do tvaru:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_V}{\rho \cdot c_p} \quad (4.16)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4.17)$$

Rychlost změny teplotního pole materiálu při povrchové změně je označen rovnicí 4.17 a označuje se jako součinitel teplotní vodivosti. Zavedeme-li Laplaceův operátor, získáme nejčastěji uváděný tvar Fourierie-Kirchhoffovy rovnice vedení tepla:

$$\nabla^2 T = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.18)$$

Potom tedy výsledný tvar Fourierovo – Kirchhoffovy rovnice bude:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{q_V}{\rho \cdot c_p} \quad (4.19)$$

4.3 Podmínky na rozhraní

Při uvažování dvou tepelně vodivých dokonalých materiálů s různými chemickými vlastnostmi platí shoda teplot na každé straně rozhraní a rozdíl toků energie od rozhraní k rozhraní rovný plošné hustotě energie vznikající na rozhraní za jednotku času.

$$T_1 = T_2 \quad (4.20)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \vec{n}} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \vec{n}}, \quad (4.21)$$

kde \vec{n} je jednotkový normálový vektor mající směr z prostředí 1 do prostředí 2, rozhraní má konečnou vodivost a nevzniká v něm tepelná energie λ_1 , λ_2 . tepelná vodivost [3]

4.4 Okrajové podmínky

Tyto podmínky jsou totožné s okrajovými podmínkami elektromagnetického pole, a tudíž jsou zde nadefinovaná Dirichletova a Neumanova okrajová podmínka. Rovnice podmínek jsou nadefinovány stejně jako u elektromagnetického pole, ovšem se změnou členů.

4.4.1 Dirichletova podmínka

U této podmínky známe velikost teploty na okraji modelu. [3]

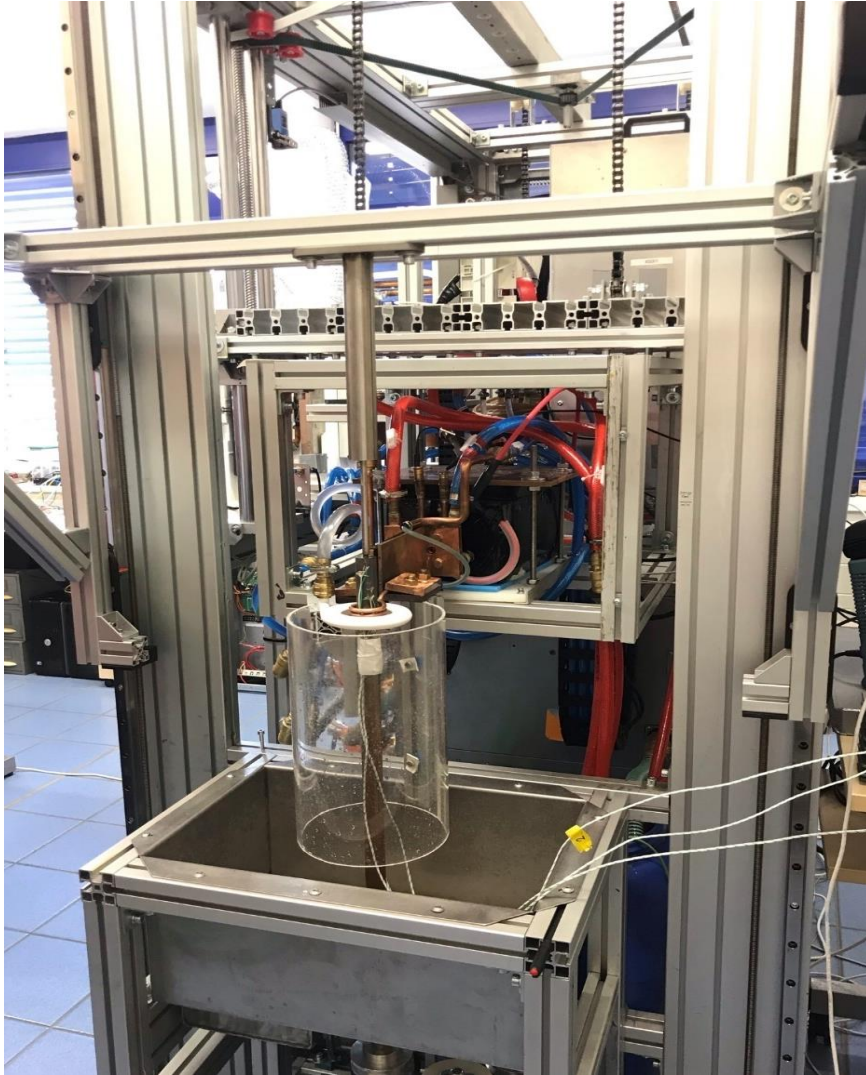
4.4.2 Neumanova podmínka

Neumanova okrajová podmínka se používá v okamžiku kdy známe velikost tepelného toku na hranici. [3]

Praktická část

5 Popis experimentu

V této kapitole popisují samotný experiment, který byl proveden laboratoří Západočeské univerzity v Plzni. Celé měření bylo realizováno na kalícím zařízení, které bylo vyrobeno

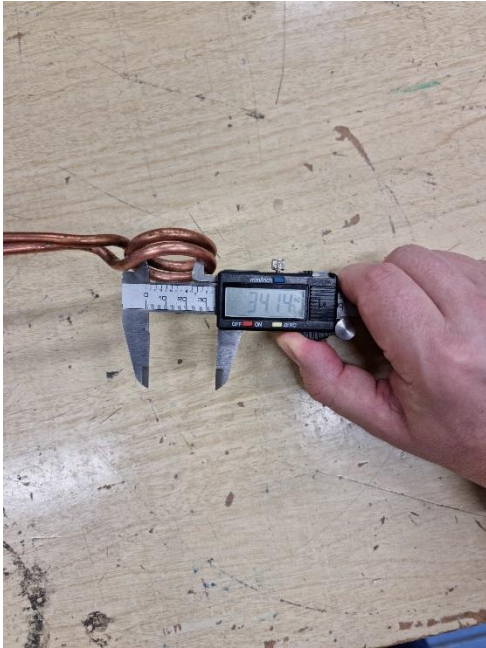


5.1 Pohled na kalící zařízení

v laboratoři Elektrického tepla II Fakulty Elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Zároveň zde byly realizovány veškerá měření a veškeré experimenty.

Zařízení sestává ze dvou závitového měděného induktoru o výšce 13 milimetrů a vnitřním poloměru 16.5 milimetrů. Uvnitř induktoru, který má vnitřní poloměr 3 milimetry, prochází jím chladicí médium, které odvádí teplo z induktoru.

Kolem induktoru je možné vidět chladicí sprchu, která má poloměr 30 milimetrů a proudí jí kalící médium, které v našem případě je voda anebo voda s určitým obsahem polymerů. Z důvodu stříkající vody a z hlediska bezpečnosti, je kolem induktoru a sprchy umístěné ochranné plexisklo, sloužící k zachytávání vody.



5.5 Měření vnitřního průměru induktoru

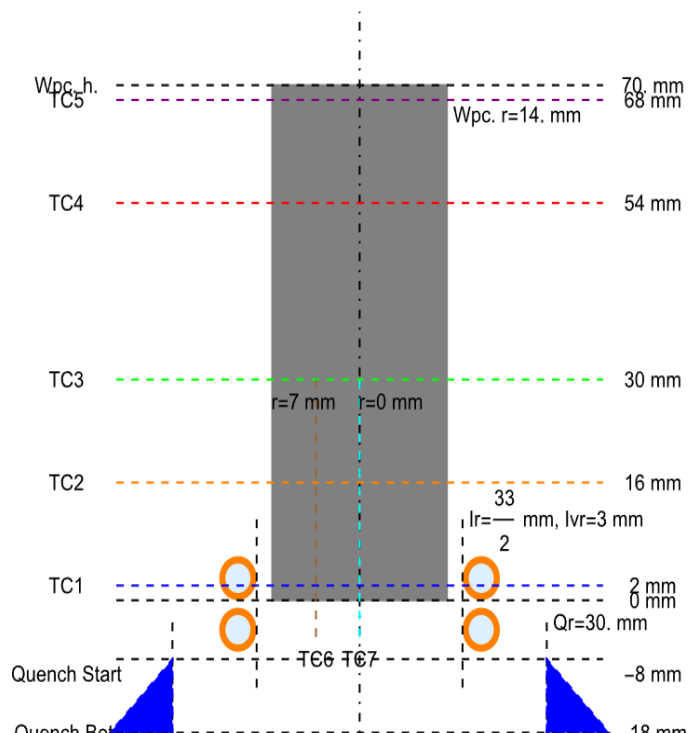


5.4 Měření výšky induktoru.

Pro měření se využily dva typy vsázek, první vsázka z konstrukční oceli typu C35 a druhá vsázka je nástrojová ocel. Vsázka z konstrukční oceli typu C35 má poloměr 14 mm a nástrojová ocel, má poloměr 15 milimetrů a obě vsázky mají výšku okolo 70 milimetrů. Na každou vsázku je umístěné určité množství povrchových a podpovrchových termočlánků, které slouží pro zjišťování okamžité teploty během měření. Na povrchu je umístěno 5



5.3 Měření rozměrů vsázky a umístění termočlánků



5.2 Model vsázky typu C35 s rozměry a s umístěním termočlánků

termočlánků. První je umístěný 2 milimetry, druhý 16 milimetrů, třetí 30 milimetrů, čtvrtý 54 milimetrů a pátý 68 milimetrů od spodního okraje. Dále zde jsou umístěny 2 podpovrchové termočlánky. První umístěný v ose symetrie a druhý umístěný 7 mm od osy symetrie.

V původním návrhu byly umístěny 3 podpovrchové termočlánky, zde ovšem docházelo k rychlému nárůstu teploty v okamžiku začátku měření, což vedlo k ovlivnění sběru dat. Tento jev je možné vidět na obrázku 5.6. Zde je možné sledovat extrémní nárůst teploty v místě umístění termočlánku těsně pod povrchem.



5.6 Vliv umístění termočlánku v vsázce

6 Zařízení

Z důvodu shodnosti zařízení bylo velké množství informací o zařízení převzato z Habilitační práce "Návrh a optimalizace procesů povrchového indukčního kalení pro implementaci do autonomních kalících strojů s využitím aktuálních technologií a trendů" doc. Ing Davida Rota PhD. [3]

6.1 Rezonanční obvod

6.1.1 Vysokofrekvenční transformátor

Zařízení je vybaveno frekvenčním měničem, ke který obsahuje dva vodou chlazené vysokofrekvenční transformátory s převodem 16:1 a 7:1 (kde první číslo označuje primární stranu a druhé číslo stranu sekundární). Transformátor může mít na primární straně maximální dovolené napětí U_{ef} o hodnotě 2,7 kV. [3]

Transformátory se volí podle konkrétní aplikace. Pro indukční kalení s dvouzávitovým induktorem je nejčastěji používán VF transformátor s převodem 16:1. Základní parametry jsou: $L_{p0} = 2,3$ mH, $R_{p0} = 0,59$ Ω při sekundární straně naprázdno, $L_{pk} = 90$ μ H, $R_{pk} = 0,96$ Ω při sekundární straně nakrátko, $L_{s0} = 13,1$ μ H, $R_{s0} = 8,3$ m Ω při primární straně naprázdno, $L_{sk} = 4,4$ μ H, $R_{sk} = 4,4$ m Ω při primární straně nakrátko a vzájemná indukčnost $M = 181,5$ μ H. Tyto hodnoty byly získané při měření s frekvencí 30 kHz. [3]

6.1.2 Kapacitní baterie – rezonanční frekvence

Pro transformátor s převodem 16:1 je obvykle kapacita kondenzátorové baterie volena v rozměni 0,2-0,3 μ H. Tato kapacita je závislá na připojeném induktoru a vsázce, ale odpovídá přibližně rozsahu rezonanční frekvence 20-30 kHz. [3]

6.1.3 Induktor

Sekundární strana transformátoru je osazena induktory. Jejich rozměry jsou voleny s ohledem na rozměry vsázky. Induktor se volí, tak aby bylo docíleno co nejmenší vzduchové mezery mezi induktorem a vsázkou a zároveň tak, aby bylo zamezeno dotyku vsázky a induktoru. Tím docílíme toho, že obvod má vysoký odpor a zároveň minimální indukčnost. Většinou se mezera mezi induktorem a vsázkou volí okolo 1-2 mm. [3]

6.2 Průtok chladiva a kalícího média

Zařízení je vybaveno čtyřmi chladicími okruhy, které se využívají dle aktuálně realizovaných projektů. První okruh je okruh vodního řádu, druhý okruh představuje

rozdělování studené vody, třetí rozdělovač teplé vody a poslední čtvrtý je shodný s okruhem prvním. Rozdíl mezi prvním a čtvrtým je v tom, že čtvrtý má vlastní nádrž s oběhovým čerpadlem. Čtvrtým okruhem může být nahrazen první například při kalení s roztokem polymerů.

Díky vodnímu rozdělovači je chlazení rozděleno do několika okruhů. Vodní rozdělovač zajišťuje samostatné chlazení měniče, primární strany trafo, sekundární strany trafo, induktoru, kondenzátorové baterie a zároveň je zde i samostatný okruh pro kalicí médium. Kalicí sprcha je vyrobena 3D tiskem a je napájena buďto z vodovodního řádu anebo z nádrže s oběhovým čerpadlem.



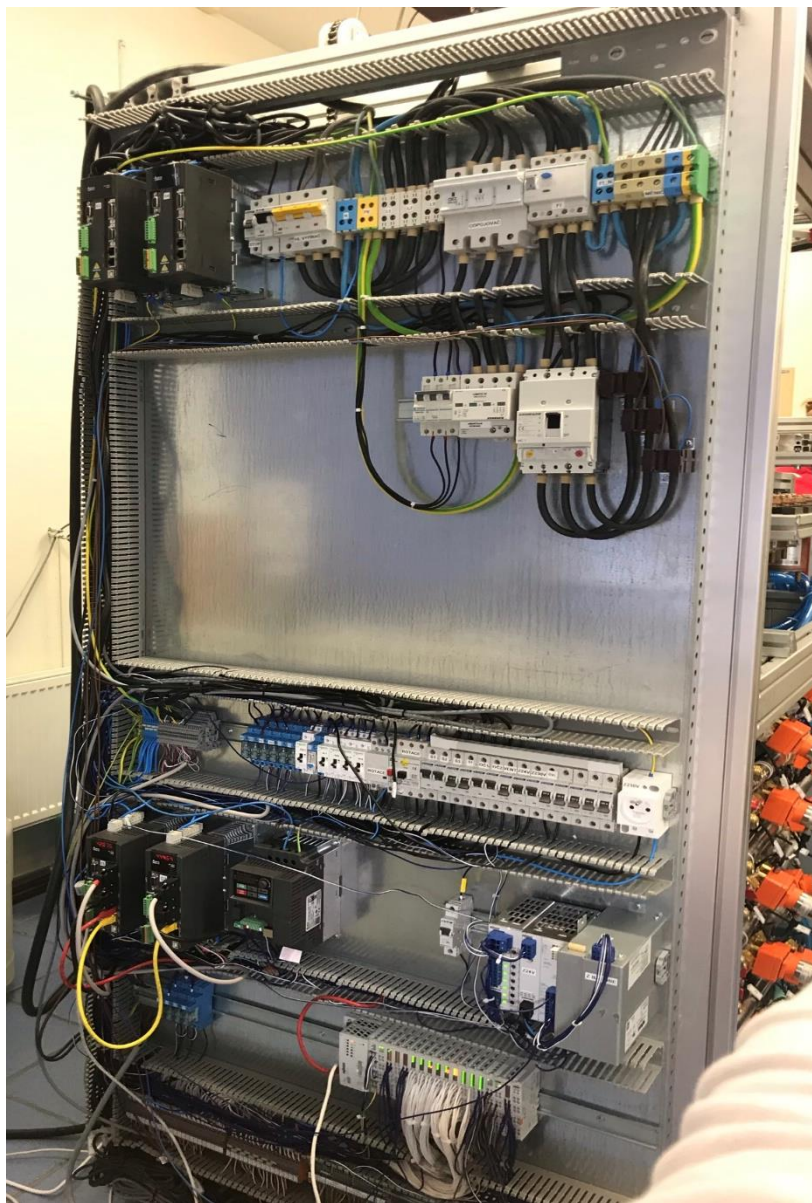
6.1 Vodní rozdělovač

6.3 Frekvenční měnič

Frekvenční měnič s IGBT moduly v plně-můstkovém zapojení, zajišťuje frekvenční transformaci vstupních síťových veličin na požadované výstupní. Mezi základní parametry patří: vstupní napětí 3x400V, max. špičkový trvalý výkon 45 kVA, maximální výstupní proud 225 A, maximální výstupní napětí 560 V, frekvenční rozsah 3-40 kHz. Ovšem celková zvolená frekvence je dána připojenými kondenzátorovými bateriemi k primární straně VF transformátoru a velikosti indukčnosti na primární straně.

Řízení frekvenčního měniče je realizováno pomocí dotykového panelu anebo průmyslového PC.

Na obrázku 6.2 je vidět rozvaděč. V horní části jsou vidět silnoproudé součástky, jako odpojovač, přepět'ové ochrany, hlavní jistič apod. Uprostřed jsou umístěny jistící prvky, relé zařízení umožňující rotaci vsázky. V dolní části rozvaděče jsou umístěny vstupní karty (I/O) a svorky pro připojení čidel.

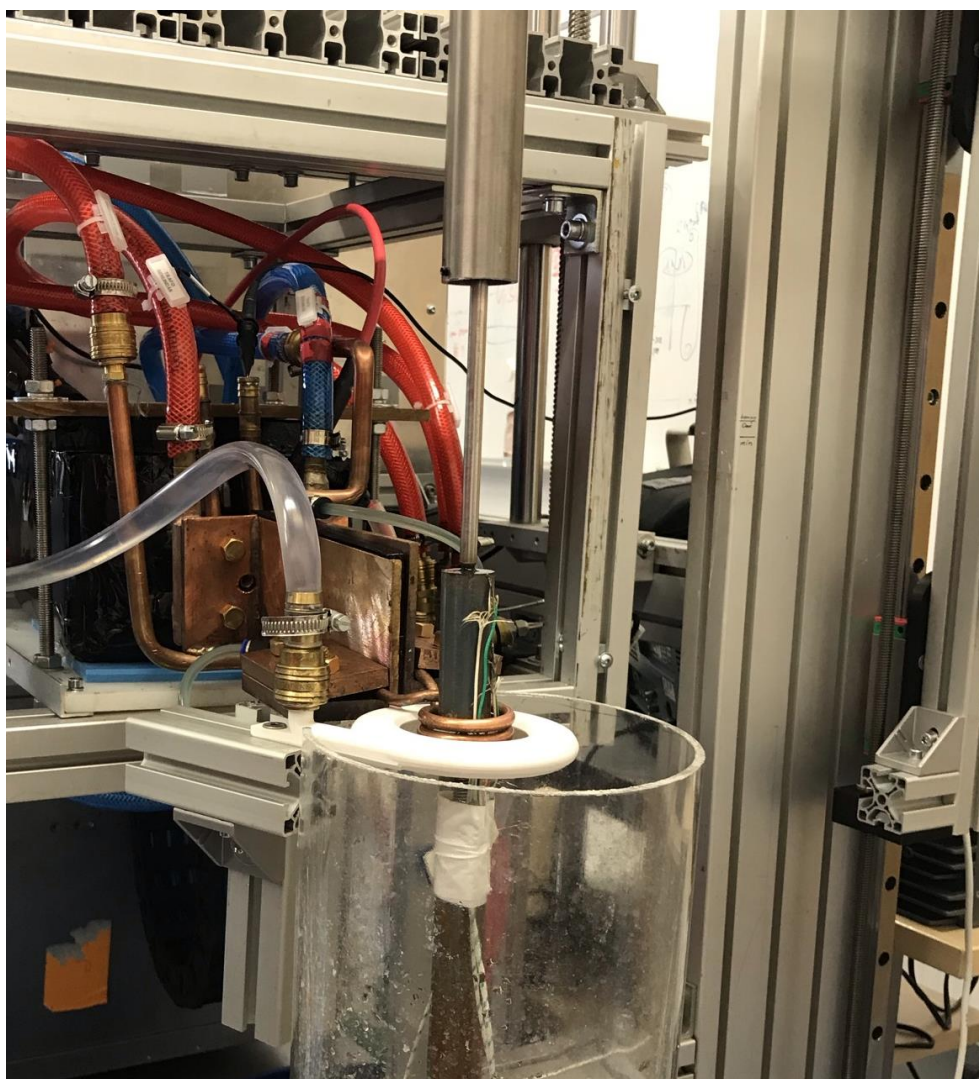


6.2 Zadní strana zařízení, rozvaděč

7 Měření

Veškerá měření byla zaznamenávána pomocí vstupních a výstupních karet (I/O) a následně zpracovávána pomocí PLC.

Veškeré pohyby a veškerá řízení stroje jsou prováděna za pomoci notebooku, ve kterém je vytvořena logika ovládání. Tato logika zajišťuje vertikální pohyb vsázky, její uchycování, a i její případnou rotaci. Na obrázku 8.1 je možné vidět detailněji uchycení vsázky, které je realizováno shora i zdola.



7.1 Pohled na uchycení vsázky

Pro samotné měření byly využity dva typy vsázek. První typ je ocel C35 a druhý typ je ocel nástrojová. Tyto vsázky jsou na obrázku 7.2 a 7.3, kde je vidět stav vsázky před a po

kalicím procesu. V dalších kapitolách bude možné vidět výsledky získané během měření a zpracována do grafů.



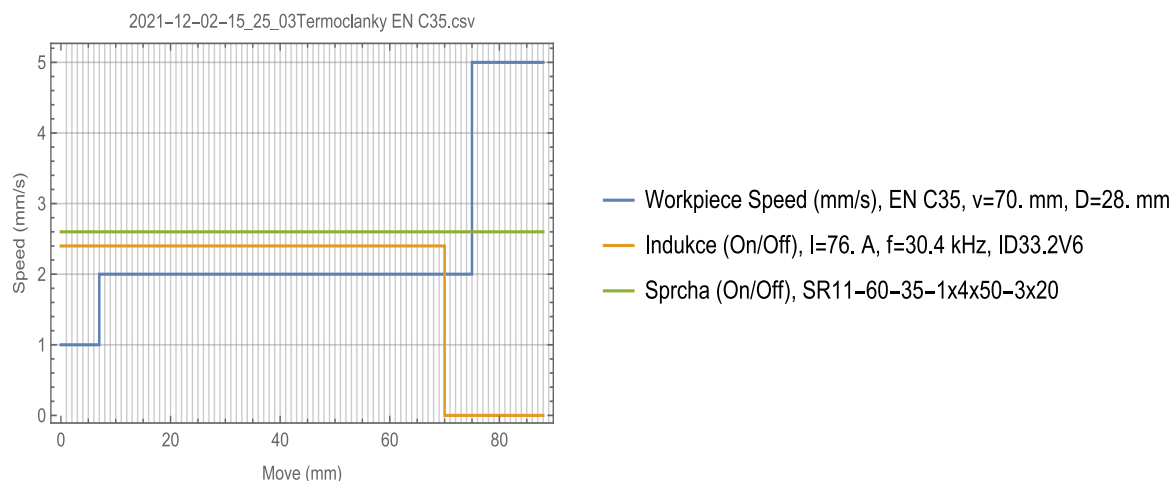
7.3 Vsázka typu ENC35 pře kalení

7.2 Vsázka typu NO po kalení

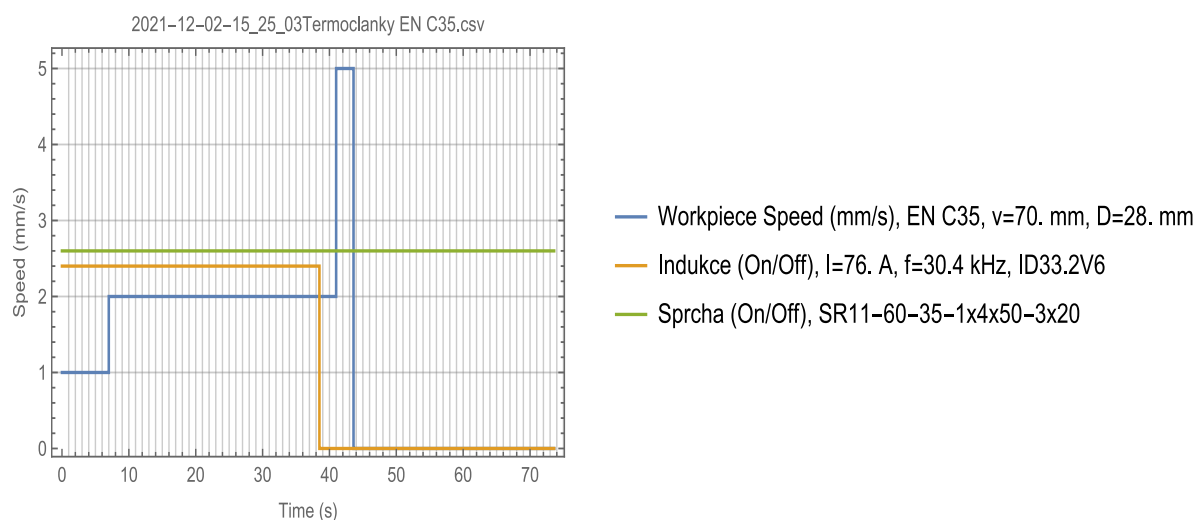
7.1 Pohyb vsázky při kalení

Z následujících dvou obrázků je možné sledovat průběh kalicího procesu v závislosti na poloze vsázky (obrázek 7.4) a v závislosti na čase (obrázek 7.5).

Z obrázku 7.4 je možné sledovat, jak se mění rychlost vsázky v závislosti na poloze a na



7.4 Rychlost pohybu vsázky



7.5 Rychlost pohybu vsázky v závislosti na čase

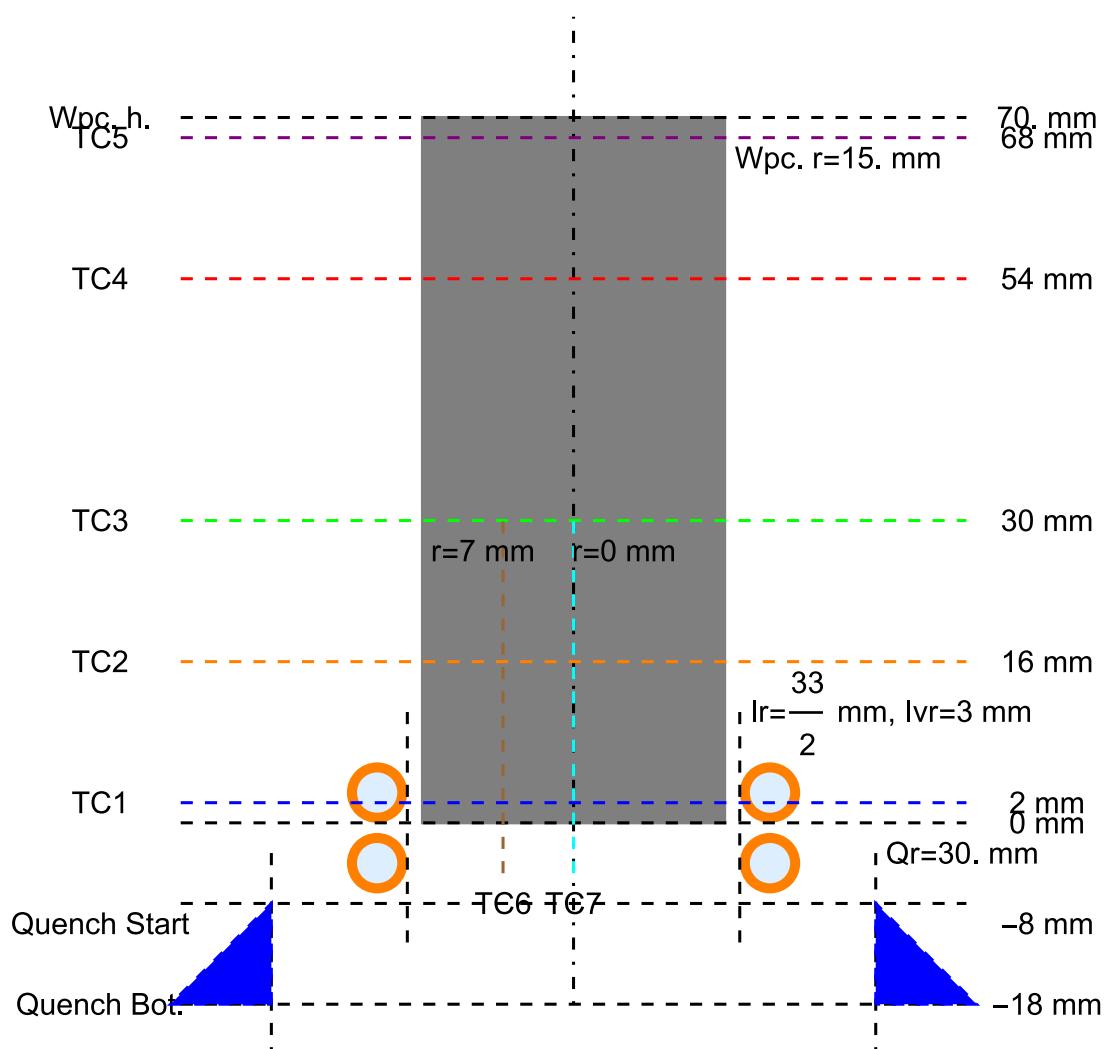
obrázku 7.5 můžeme sledovat změnu rychlosti pohybu v závislosti na čase. Můžeme vidět, že v okamžiku zapnutí pohybu je spuštěné jak sprcha, tak i ohřev. Přibližně v 8 sekundách, tedy po 5-6mm je možné sledovat zvýšení rychlosti z 1 mm/s na 2 mm/s a tato rychlost je udržovaná přibližně po celou dobu indukčního ohřevu. Po vypnutí indukčního ohřevu se rychlost navýšila přibližně na 5 mm/s a tato rychlost se udrží až do 70 mm, tedy až po horní okraj vsázky. Během celého kalicího procesu je zapnutá sprcha.

Rychlost celého kalení je naprosto totožná pro obě vsázky. Na obrázcích 7.4 a 7.5 je možné sledovat rychlost pohybu pro vsázku typu EN C35.

7.2 Umístění termočlánků

Z obrázku 7.6 je možné sledovat umístění termočlánku na vsázce. Je zde možné vidět povrchové termočlánky TC1-TC5, které jsou umístěné po povrchu vsázky, kdy TC1 je ve spodní části vsázky a termočlánek TC5 je na horní části vsázky.

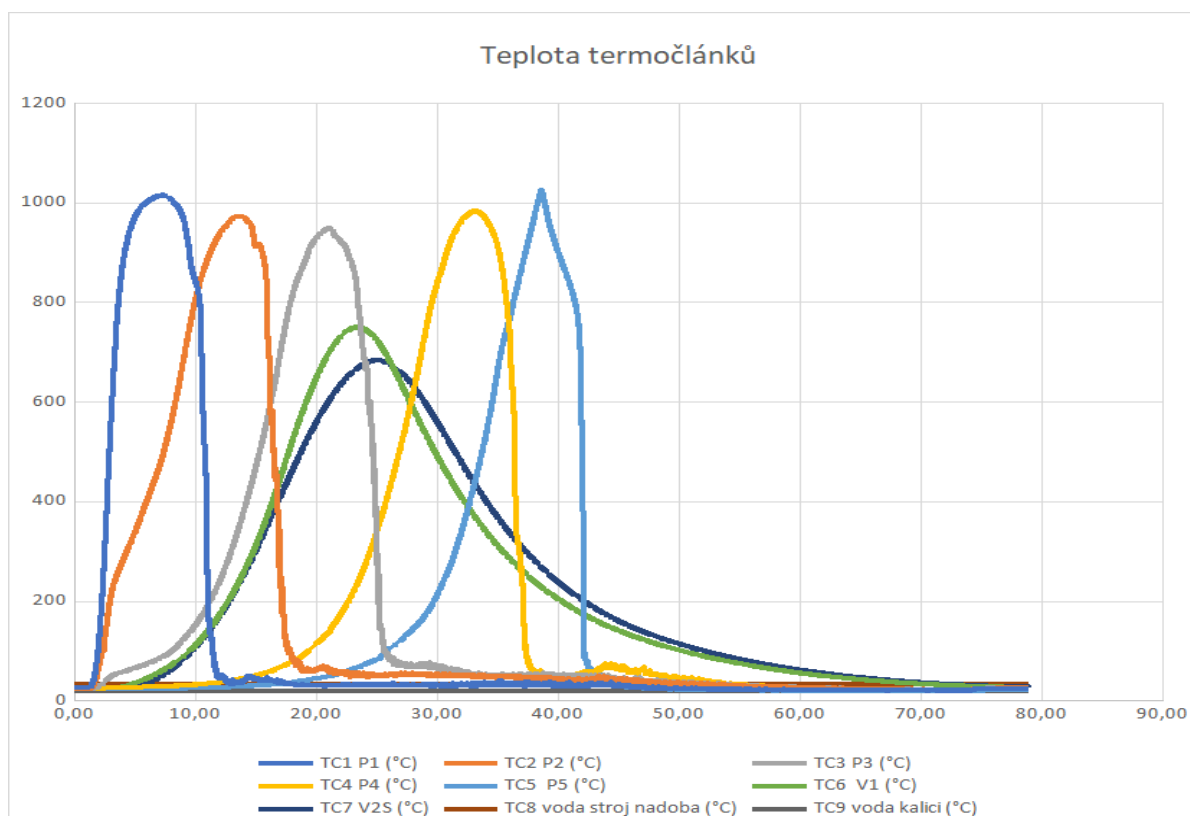
Další termočlánky, které jsou na obrázku vidět jsou TC6 a TC7, tyto dva jsou zavrtány a umístěny uvnitř vsázky. Termočlánek TC6 je umístěný 7 milimetrů pod povrchem vsázky a termočlánek TC7 je umístěný v ose symetrie. V prvotních měřeních, byl umístěný ještě termočlánek TC8 umístěný 1-2 milimetry pod povrchem. Ten však negativně ovlivňoval měření a sběr dat, což je patrné z obrázku 5.6. v kapitole 5.



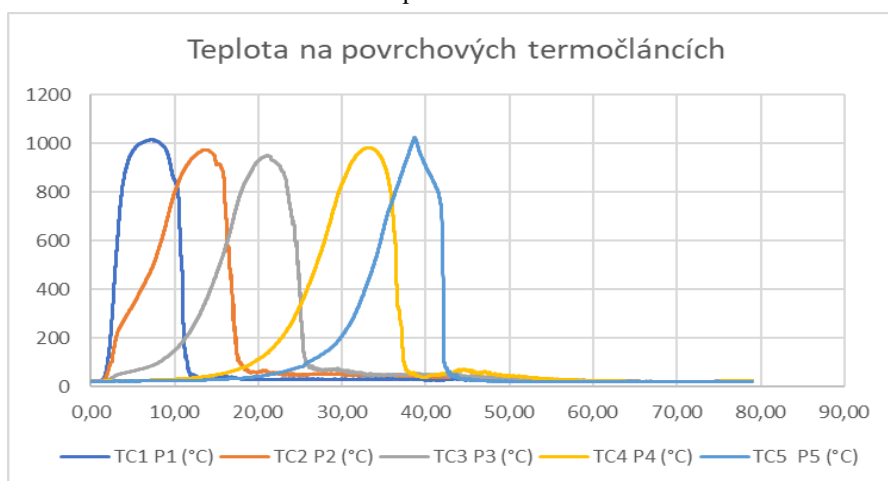
7.6 Rozmístění jednotlivých termočlánků na vsázce

7.3 Kalení nástrojové oceli typu NO za pomoci vody

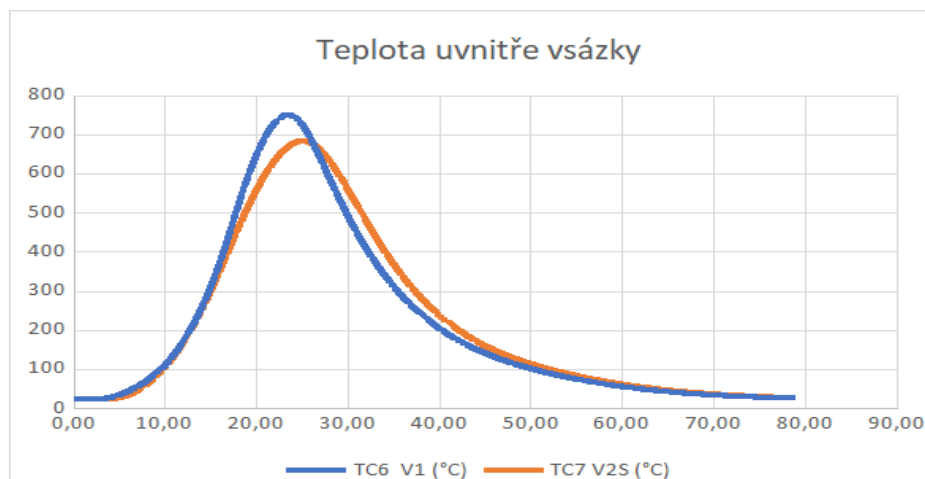
Průběhy teplot při kalení vsázky typu NO je možné sledovat na obrázku 7.7. Detailní průběhy teplot uvnitř vsázky je možné sledovat na obrázku 7.8 a teploty na povrchu vsázky je možné sledovat na obrázku 7.9. Z těchto grafů je možné sledovat, že teplota na povrchu vsázky se pohybuje v průměru okolo 1000 °C, to je možné sledovat na termočláncích (v grafu TC 1-5). Teplota uvnitř vsázky se pohybuje přibližně kolem 700–750 °C, opět je možné sledovat na termočláncích (TC6 V1 a TC7 V2S). V ose symetrie se teplota blíží k 700 °C a 7 mm pod povrchem je teplota okolo 750°C.



7.7 Teplota všech termočlánců



7.8 Teploty na povrchových termočláncích



7.9 Teploty na vnitřních termočláncích

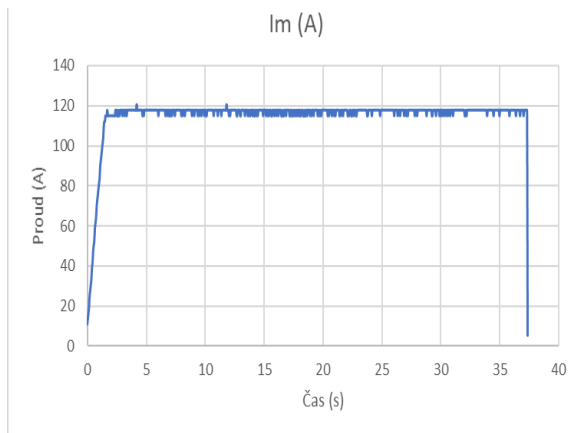
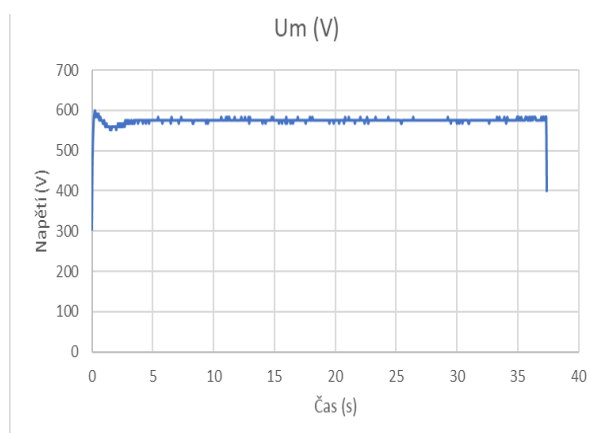
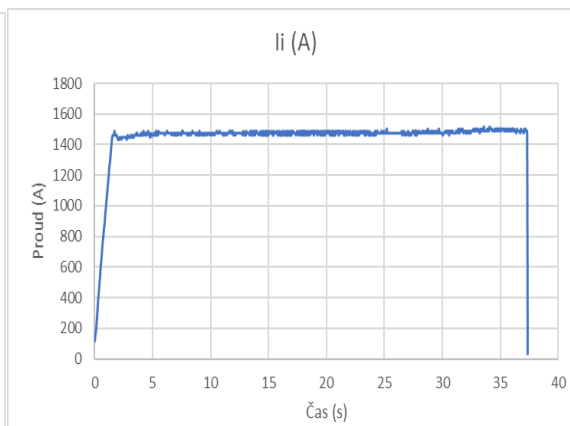
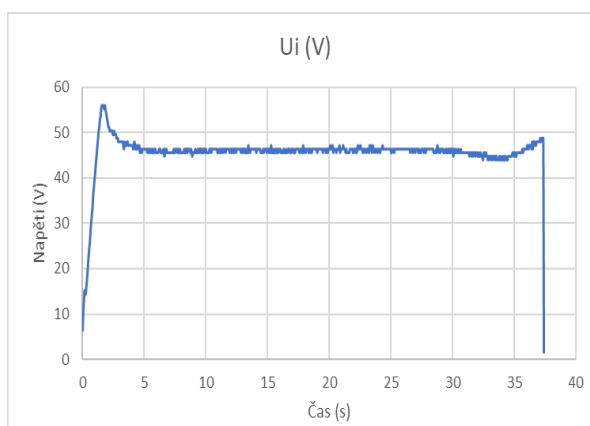
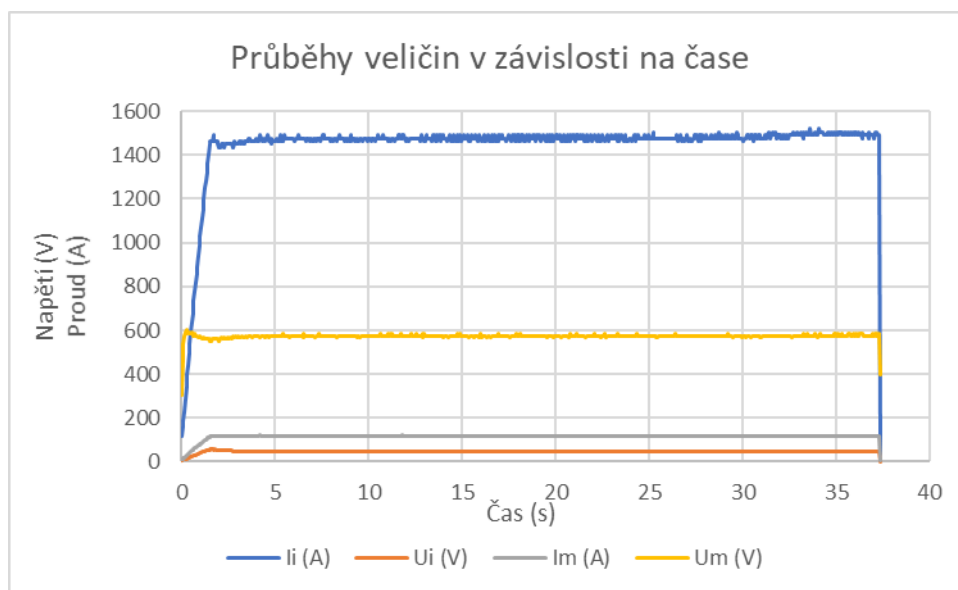
7.4 Hodnoty získané z osciloskopu

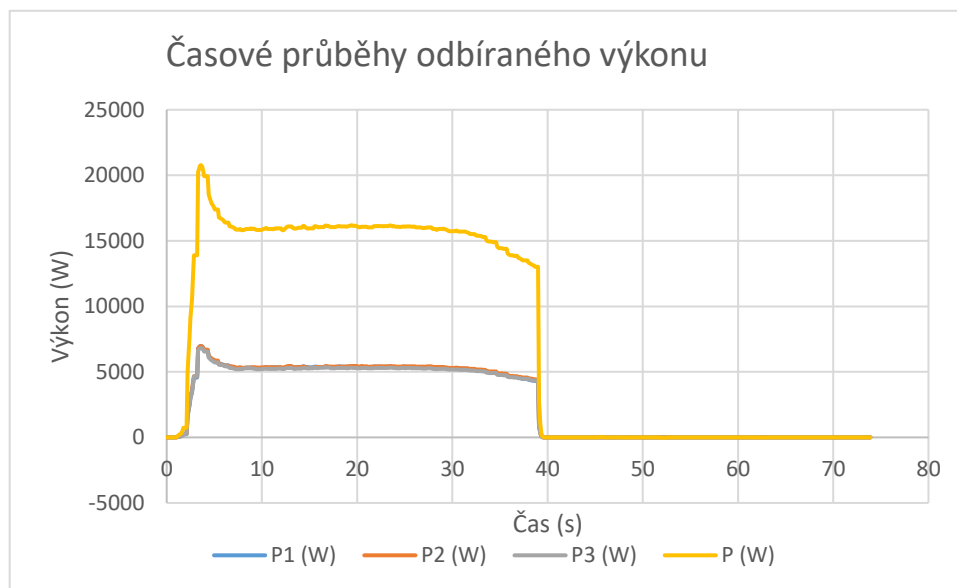
Pro měření napětí a proudu byl do obvodu připojen osciloskop. Naměřené hodnoty je možné sledovat na obrázku 7.10. Zde je možné pozorovat hodnoty indukovaného proudu I_I a indukovaného napětí U_I . Dále je zde možné sledovat hodnoty napětí U_m a proudu I_m . Pro lepší názornost je možné pozorovat detailnější zobrazení těchto průběhů.

Napětí na induktoru U_I je možné sledovat na obrázku 7.11 a proud na induktoru I_I je možné sledovat na obrázku 7.12. Napětí na měniči U_m a proud na měniči I_m je možné pozorovat na obrázcích 7.13 a 7.14.

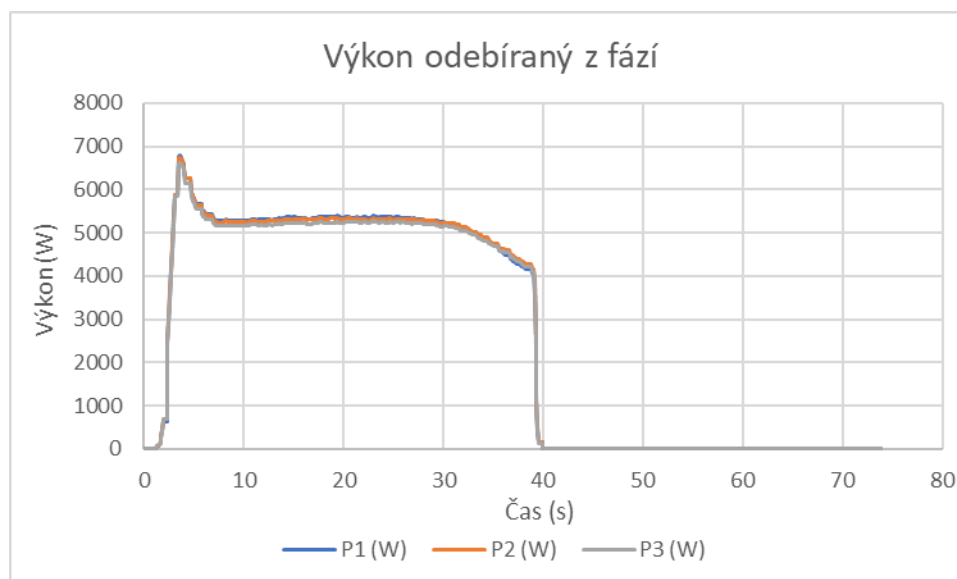
Je patrné, že v průběhu měření jsou všechny hodnoty veličin přibližně konstantní. Patrný je lineární nárůst v oblasti začátku měření.

Na obrázcích 7.15 a 7.16 je možné sledovat výkony. Na obrázku 7.15 je možné sledovat celkový výkon odebíraný ze sítě společně s výkony odebíranými z jednotlivých fází. Pro lepší pozorovatelnost je možné na obrázku 7.16 sledovat jednotlivé výkony odebírané z jednotlivých fází. Největší nárůst odebíraného výkonu je možné sledován na začátku indukčního procesu. Poté je možné sledovat, že obálka výkonu se během procesu udržuje konstantní a ke konci procesu začne klesat.



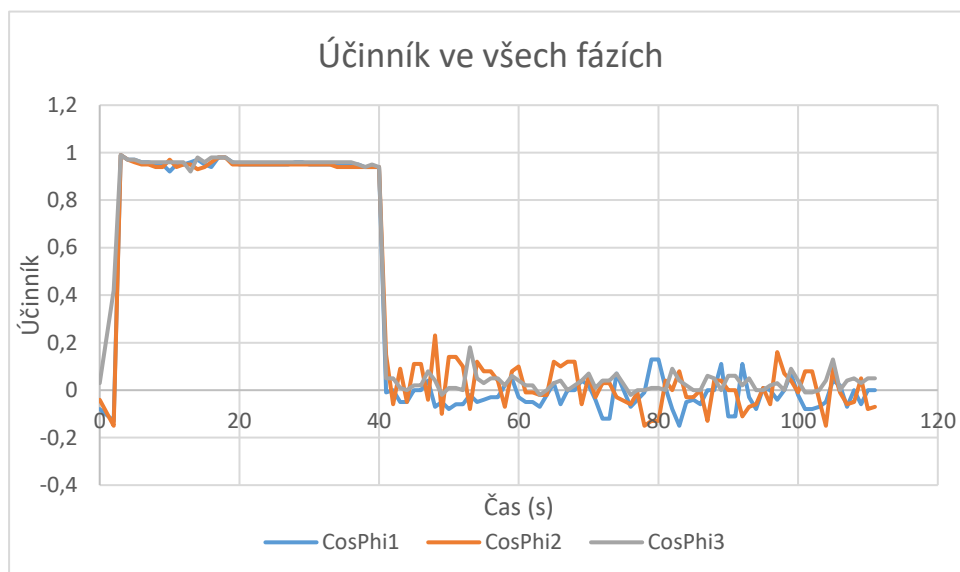


7.16 Výkony

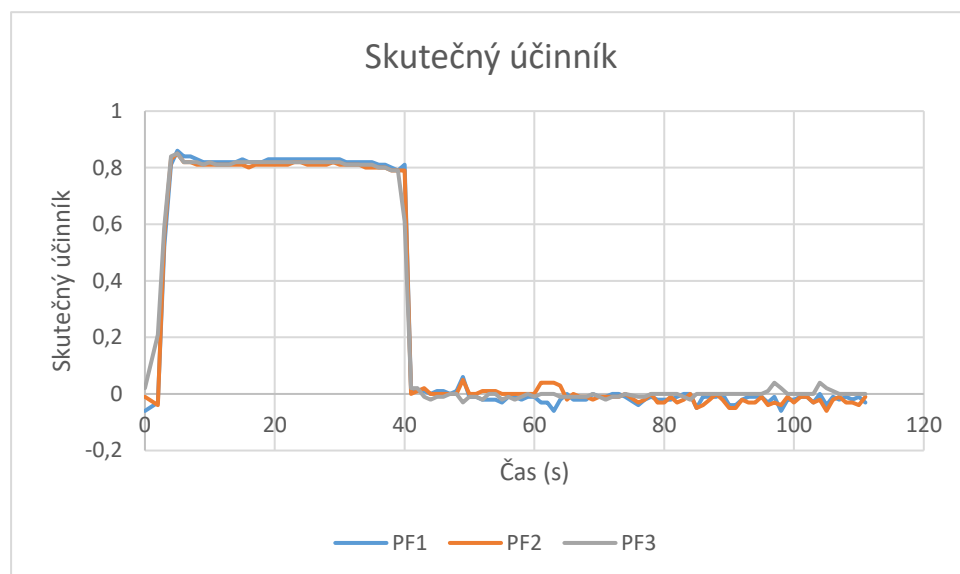


7.15 Výkony v jednotlivých fázích

7.5 Informativní hodnoty získané z analyzátoru



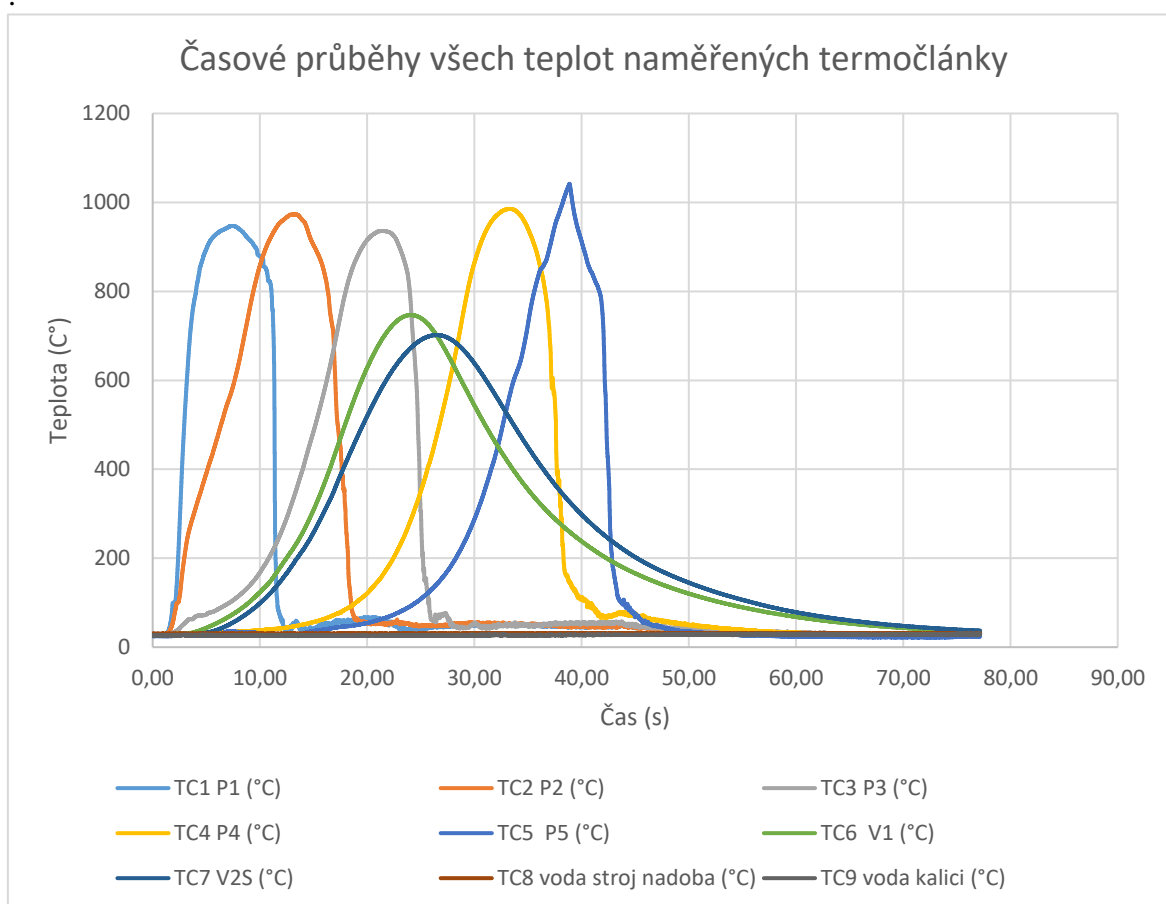
7.17 Účinník v jednotlivých fázích během procesu



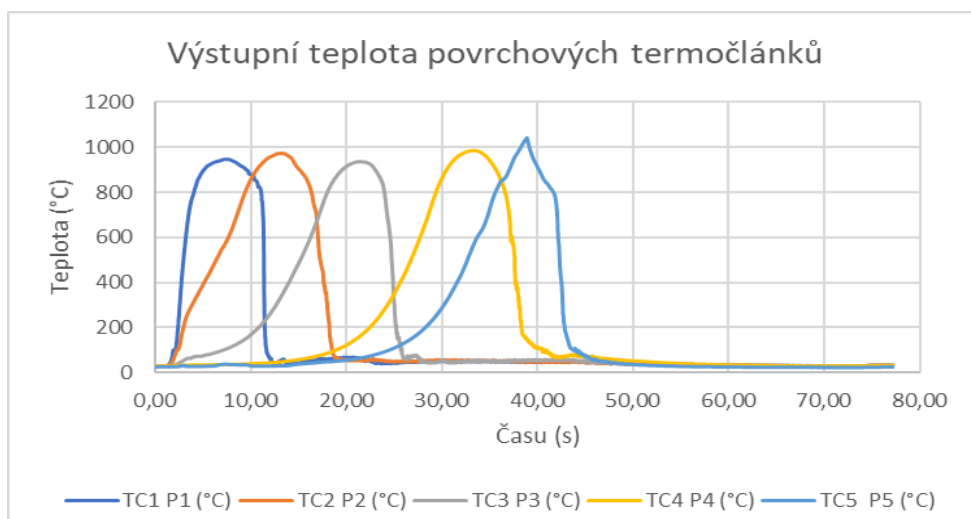
7.18 Skutečný účinník v závislosti na čase

7.6 Kalení nástrojové oceli typu NO za užití polymeru

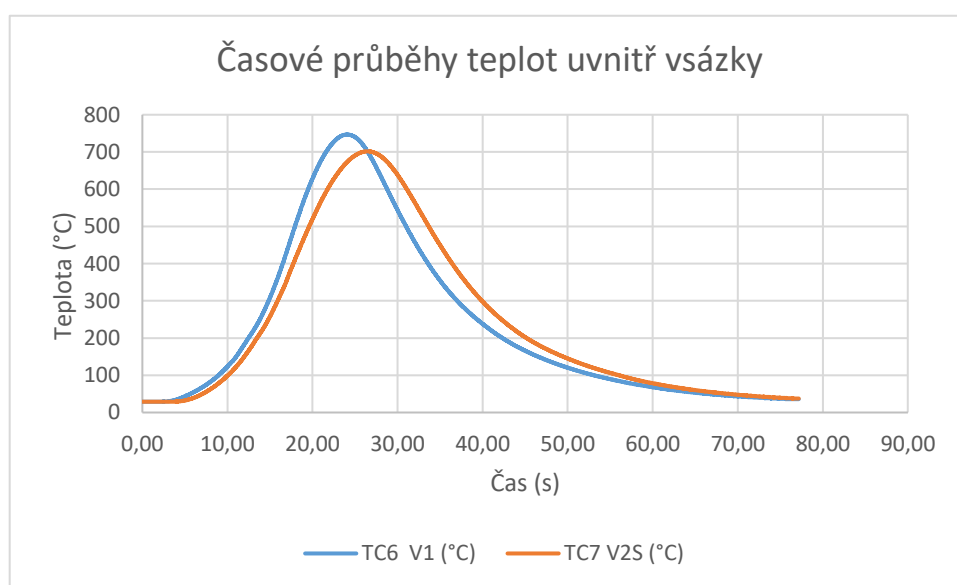
Hodnoty teplot získané při kalení vody s příměsí polymeru je možné sledovat na obrázku 7.19. Teplota na povrchu se pohybuje v průměru kolem 950 °C. To je opět možné sledovat na termočláncích TC (1-5). Teplota uvnitř vsázky se pohybuje opět kolem 700–750 °C. Tedy teplota uvnitř vsázky je přibližně stejná jako teplota při kalení vodou. Hodnoty vnitřní teploty je opět možné sledovat na termočláncích (TC6 V1 a TC7 V2S). Na termočláncích umístěných ve stroji (v nádobě TC8 a v induktoru TC9) je možné sledovat teplotu v nádobě stroje a teplotu kalicího média. Tyto dvě teploty je možné sledovat v detailu na obrázku 7.22. Z tohoto obrázku je možné sledovat, že se teplota uvnitř stroje nijak zásadně nemění a zároveň, že teplota kalicího média se pohybuje kolem 26–31 °C. Pro samotné měření bylo nutné udržet stálou teplotu kalicího média a vyvarovat se velkými výkyvům. Z důvodu účinnosti kalicího procesu, viz. Kapitola 1.3 a obrázek 1.2.



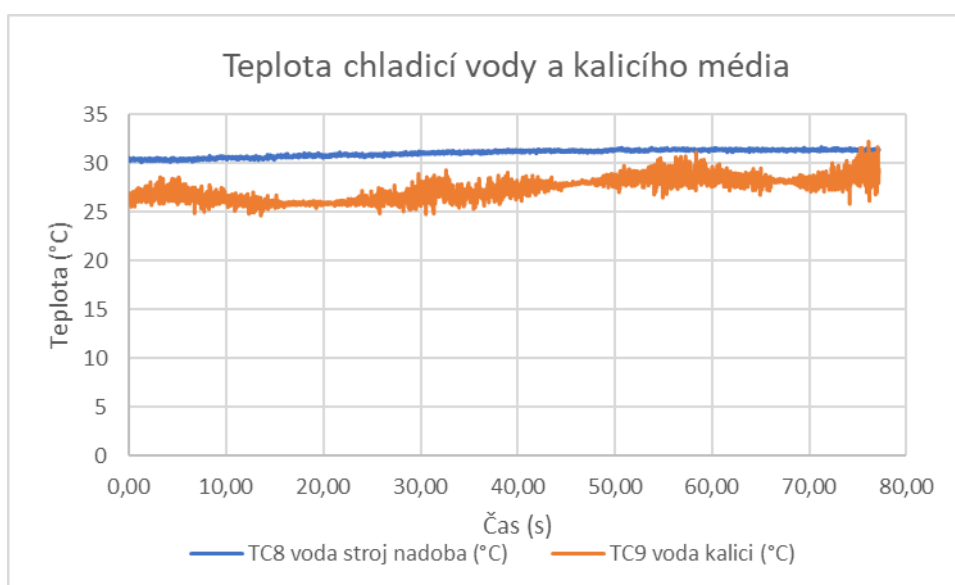
7.19 Teploty získané z termočlánců



7.21 Časové průběhy teplot na povrchu vsázky



7.20 Časové průběhy teplot uvnitř vsázky

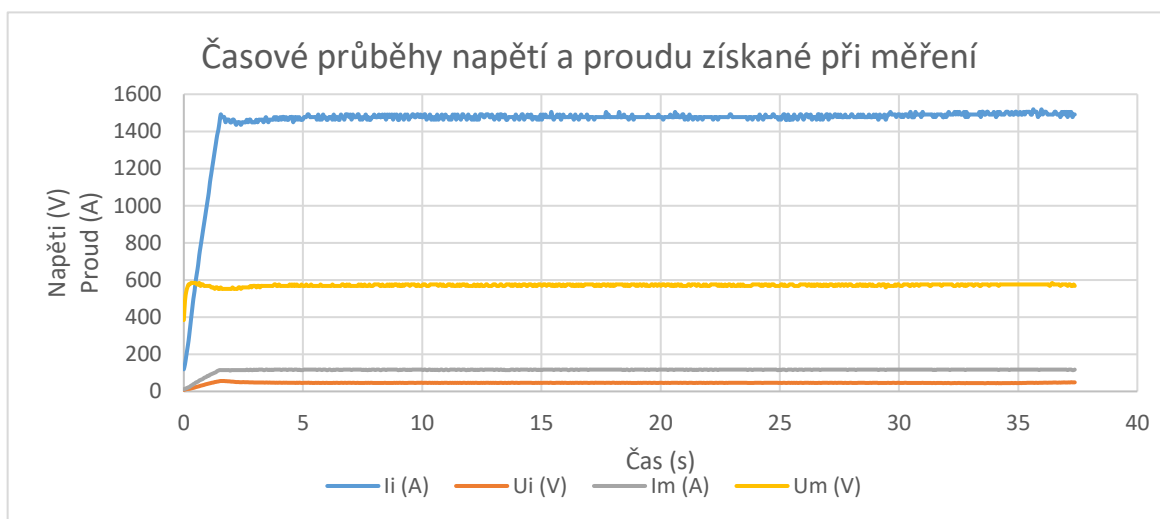


7.22 Časové průběhy teploty uvnitř stroje

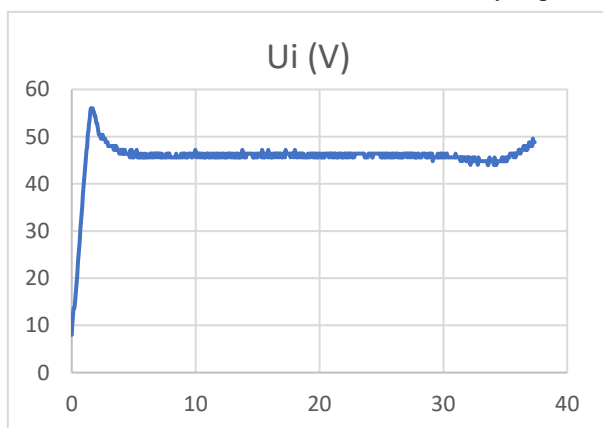
7.7 Hodnoty získané z osciloskopu a z analyzátorů

Během měření byl opět použit osciloskop. Výsledné hodnoty je možné sledovat na obrázku 7.23 a pro lepší zobrazení jsou zde detaily na obrázcích 7.24, 7.25, 7.26, 7.27.

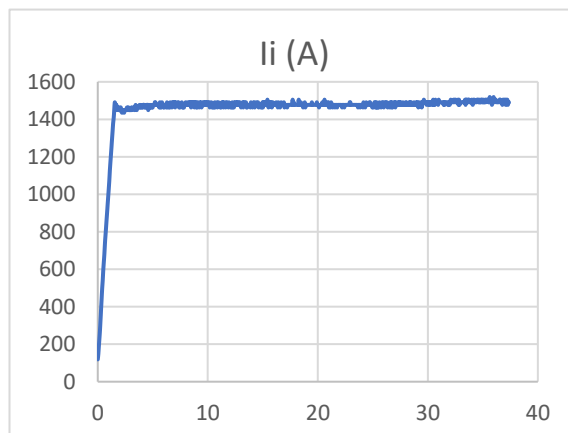
Na následujícím obrázku 7.28 a 7.29 je možné sledovat celkový odebíraný příkon a jednotlivé výkony odebírané z jednotlivých fází. Opět jsou zde vidět stejně průběhy jako v předchozím případě, při kalení pouze vodou. U detailnějších průběhů jsou zde vidět určité



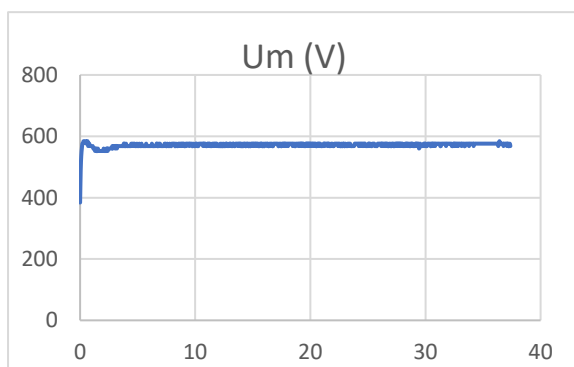
7.23 Průběhy napětí a proudu v závislosti na čase



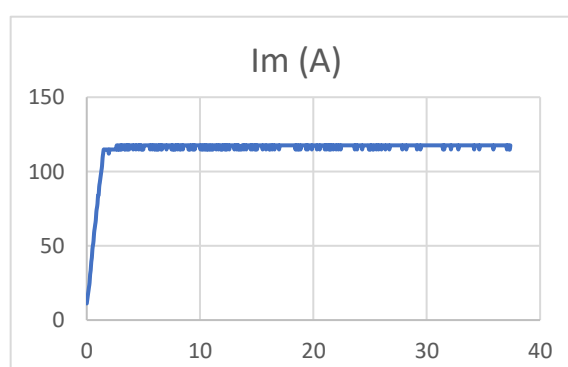
7.24 Napětí v závislosti na čase



7.25 Proud v závislosti na čase

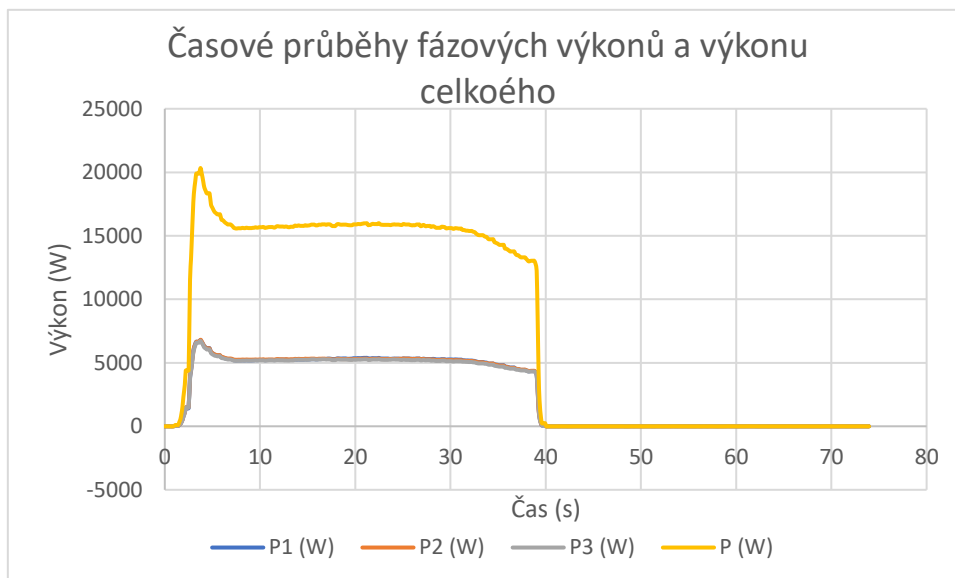


7.26 Napětí v závislosti na čase

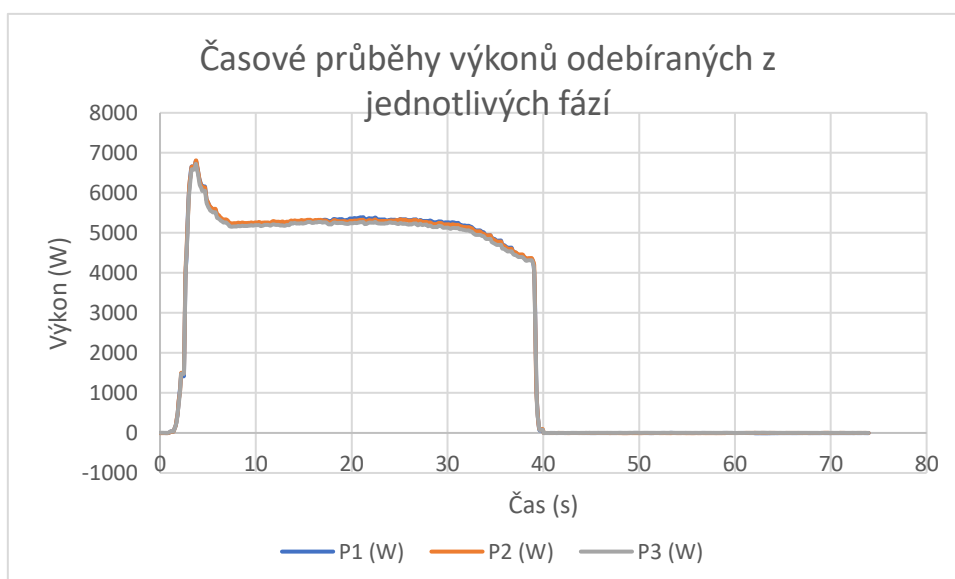


7.27 Proud v závislosti na čase

peaky na začátku měření, tento peak je způsoben tím, že materiál je již nemagnetický. Nejprve dochází k nárůstu odporu a následně k jeho snížení. To způsobí dosáhnutí a přesáhnutí Curieova bodu



7.29 Výkon odebrané ze sítě



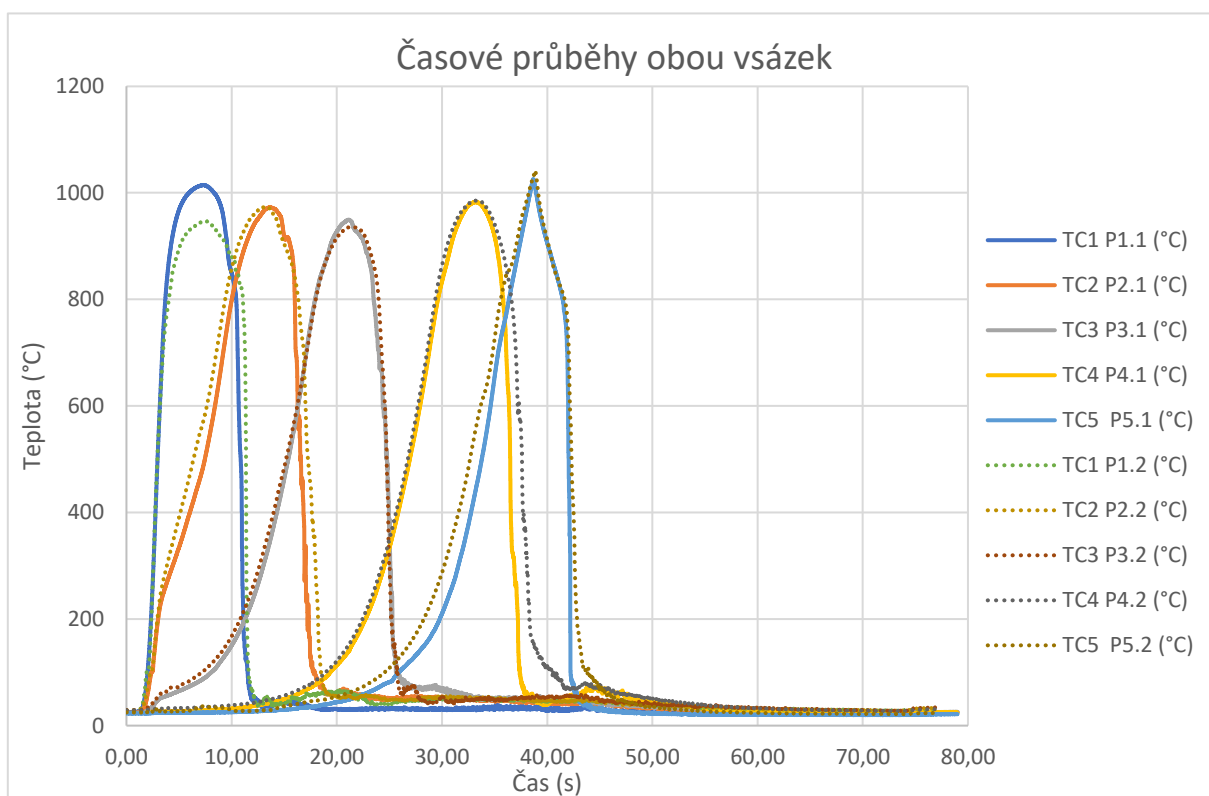
7.28 Výkony odebírané z jednotlivých fází

7.8 Porovnání kalení při využití vody s polymerem

Při porovnání kalení pomocí vody a pomocí vody s polymery je možné sledovat jen drobné rozdílnosti v samotném výsledku procesu. Všechny grafy jsou téměř totožné, mimo malých a nepatrných rozdílů, které na výsledném prokalení vsázky nemají vliv.

Největší rozdíl, který odpovídá i teoretickým předpokladům a je zároveň důvodem využívání polymeru je rychlejší ochlazovací schopnost v oblasti vyšších teplot a pomalejší ochlazovací schopnost v oblasti nižších teplot. Důvodem, proč je tato vlastnost výhodou je omezení a zamezení popraskání vsázky.

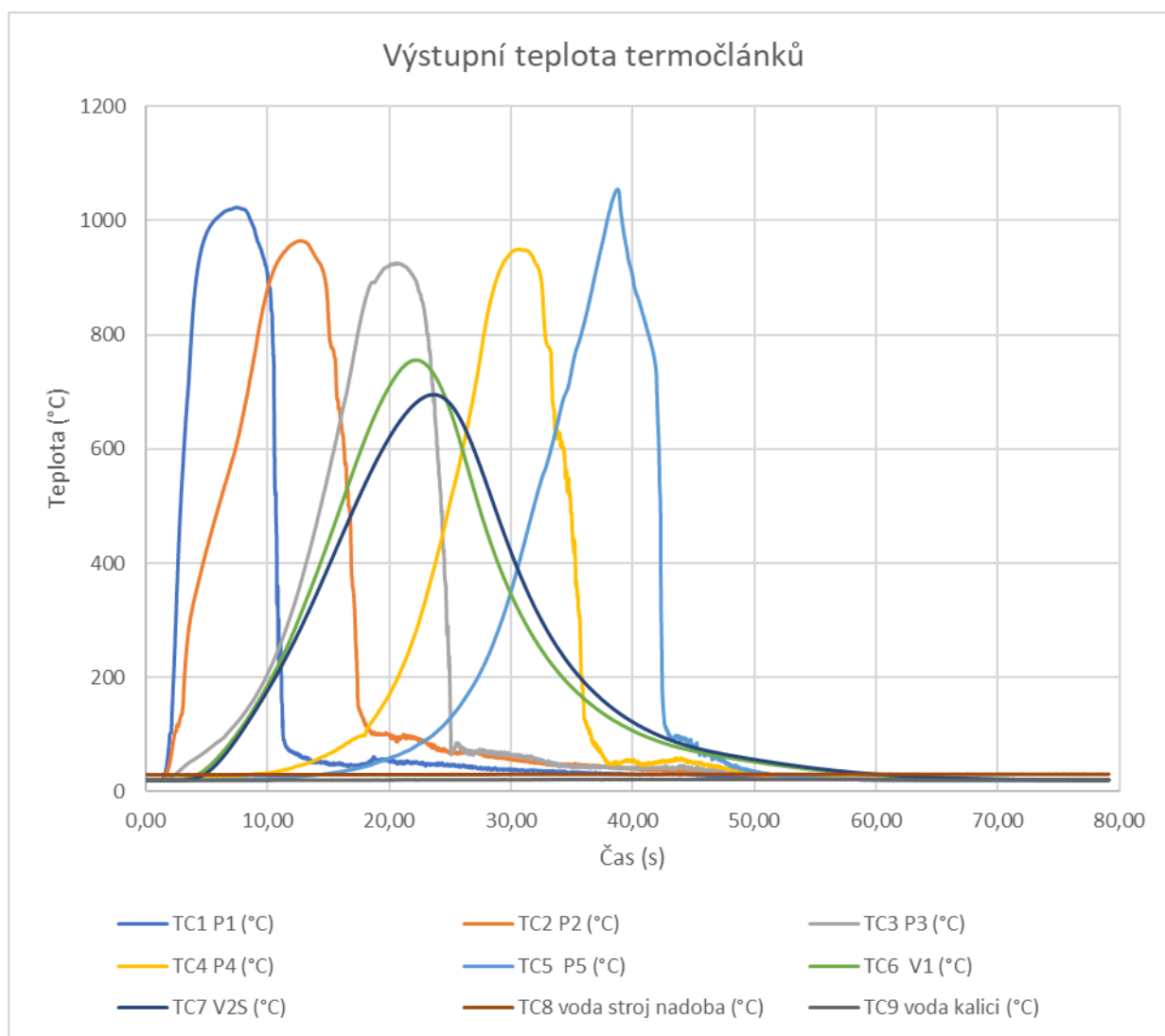
Ochlazovací vlastnost vody a vody s polymery, je možné sledovat na obrázku 1.1, kde je možné vidět že v rychlosti ochlazení jsou si voda a voda s polymery hodně podobné. Pokud se zaměříme na obrázek 7.30, je patrné, že výsledky měření jsou téměř totožná a neprojevuje se zde způsob kalení.



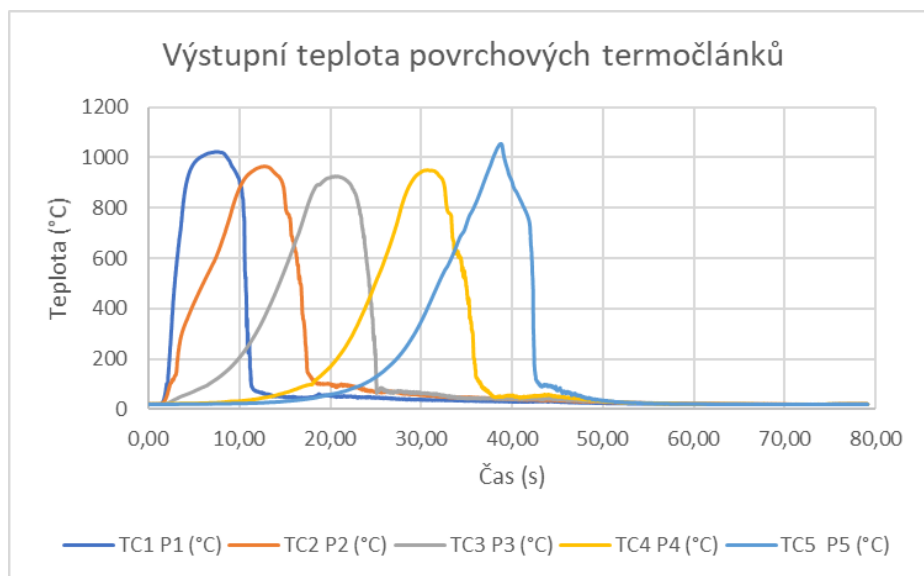
7.30 Porovnání získaných teplot z měření

7.9 Kalení oceli typu EN C35 za pomoci vody

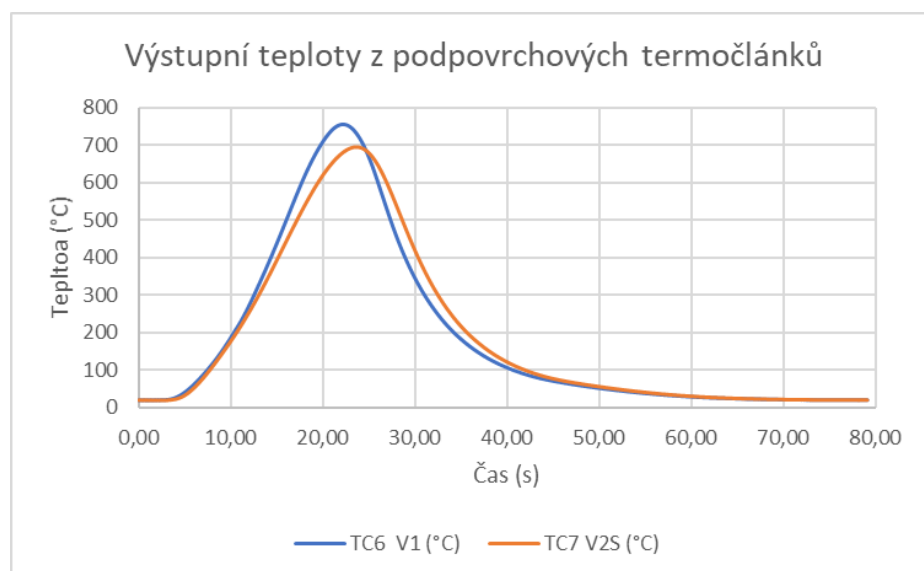
Celkové hodnoty teplot, získané při kalení oceli EN C35 za pomoci vody je možné sledovat na obrázku 7.31. Povrchová teplota, kterou zaznamenaly termočlánky (TC1 – TC5) se pohybuje okolo 800–1200 °C. Nejvyšší teplotu zaznamenal termočlánek TC1 a termočlánek TC5. Detailnější zobrazení teplot je možné sledovat na obrázku 7.32. Teplota měřena uvnitř vsázky termočlánky TC6 a TC7, je možné detailněji sledovat na obrázku 7.33. Zde můžeme vidět že se teplota pohybuje opět mezi 700 – 750 °C. Teplota stroje je nejlépe vidět na samostatném obrázku a to na obrázku 7.34. Zde je vidět, že se teplota v nádobě stroje pohybuje kolem 30 °C a teplota kalicího média se pohybuje přibližně kolem 20 °C. Vnitřní teploty ve stroji měří opět termočlánky TC8 a TC9.



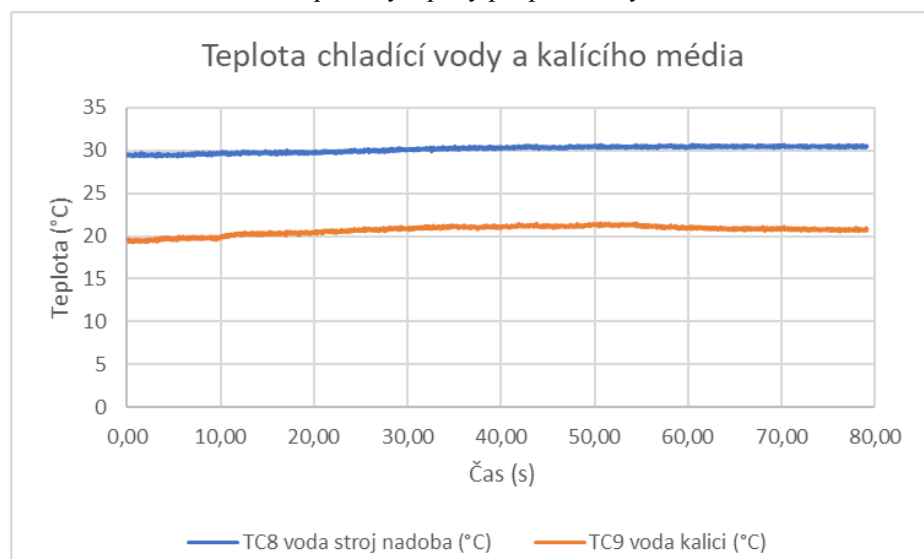
7.31 Časové průběhy všech teplot



7.32 Časové průběhy teploty povrchových termočlánků



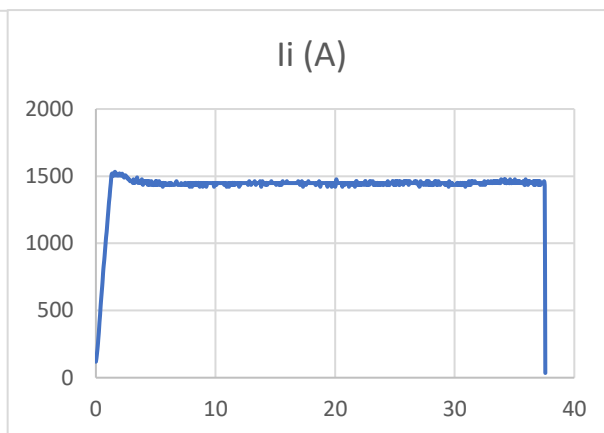
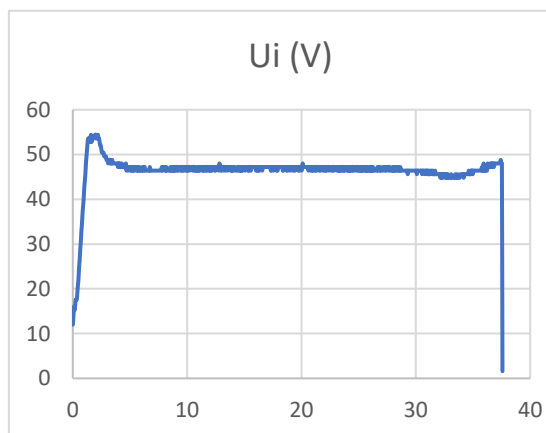
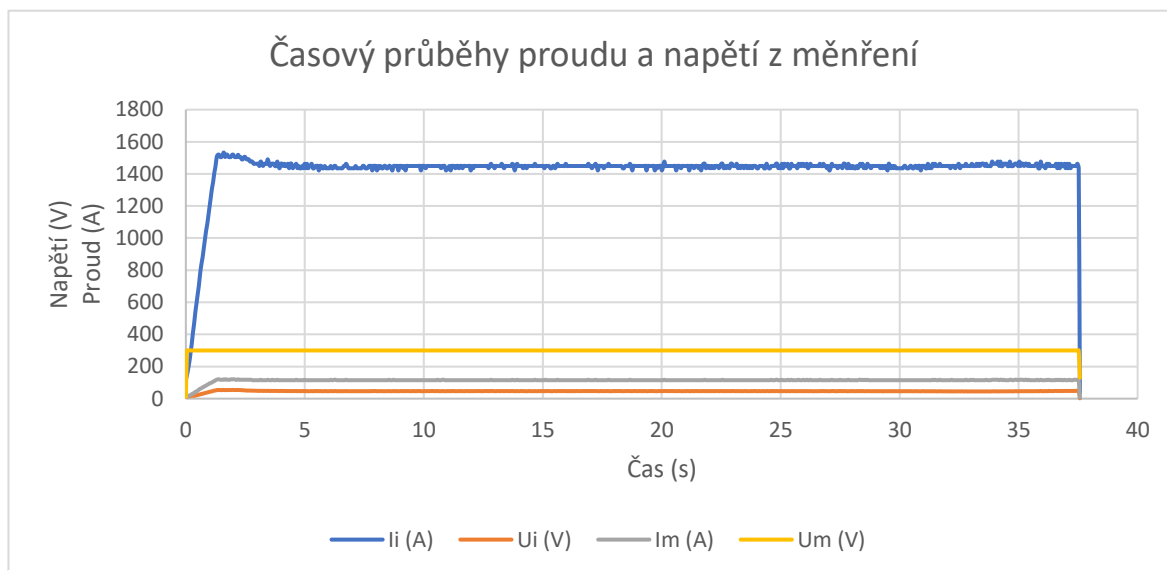
7.33 Časové průběhy teploty podpovrchových termočlánků



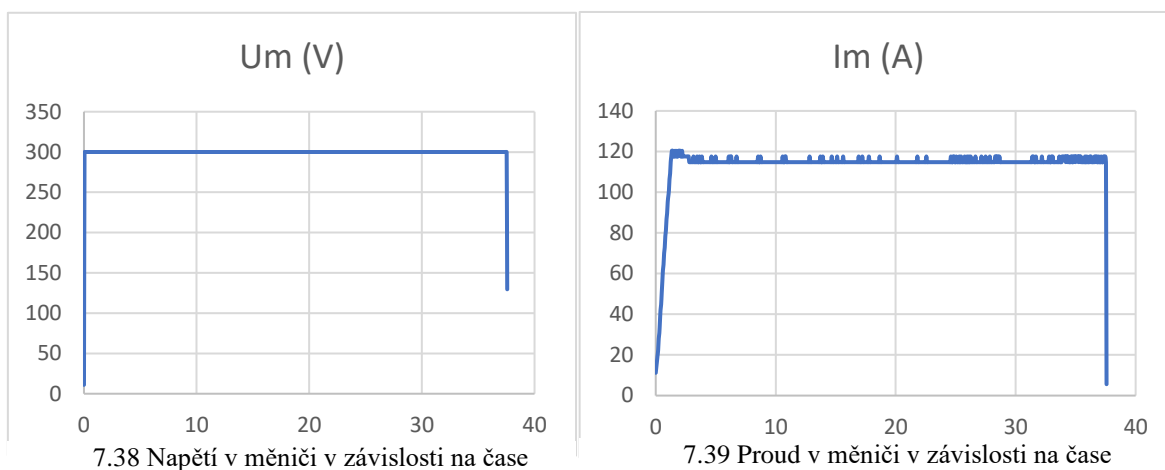
7.34 Časové průběhy teploty uvnitř stroje

7.10 Hodnoty získané z osciloskopu

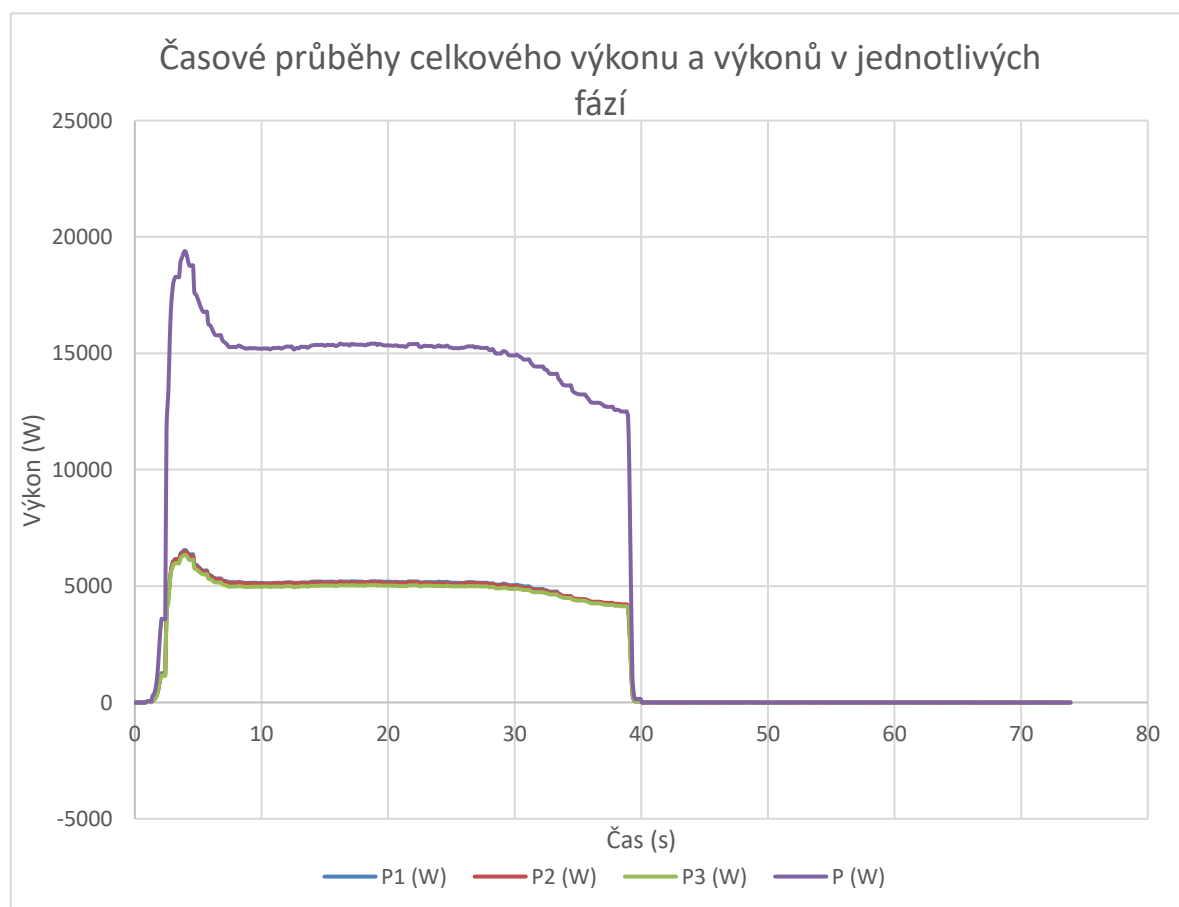
Z obrázku 7.35 lze sledovat průběhy proudu a napětí. Je zde možné sledovat proud a napětí na induktoru a na měniči. Z měření vyplývá že na induktoru máme vysoký proud a nízké napětí a na měniči je to obráceně, je zde vyšší napětí a nižší proud.

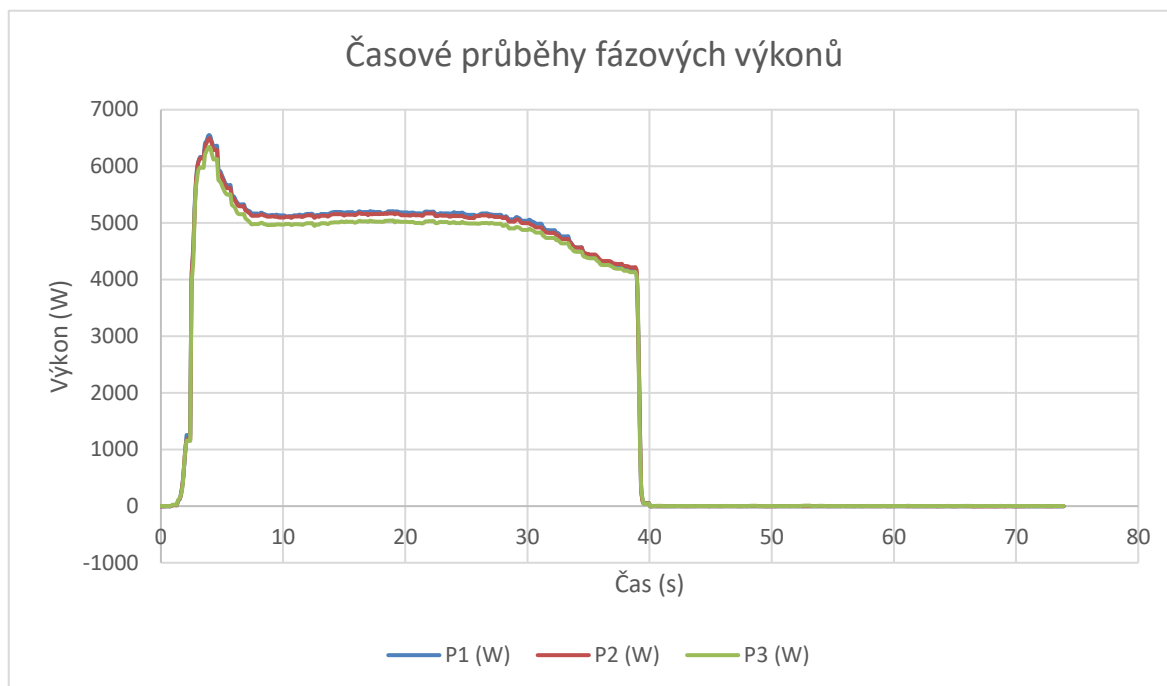


Dále je zde možné sledovat detailnější průběhy všech hodnot na obrázcích 7.36, 7.37, 7.38 a 7.39. Zde je možné sledovat určitý peak na začátku měření, tento peak je způsoben tím, že materiál je nemagnetický. Nejprve dochází k nárůstu odporu a následně k jeho snížení. To způsobí dosáhnutí a přesáhnutí Curieova bodu.



Na obrázku 8.40 je možné sledovat výkony odebírané při kalení. Je zde vidět celkový odebíraný výkon. Pro lepší detail je na obrázku 8.41 možné sledovat průběhy výkonů v jednotlivých fázích. Opět je zde možné sledovat peak na začátku měření. Který znázorňuje přesáhnutí Curieova bodu.





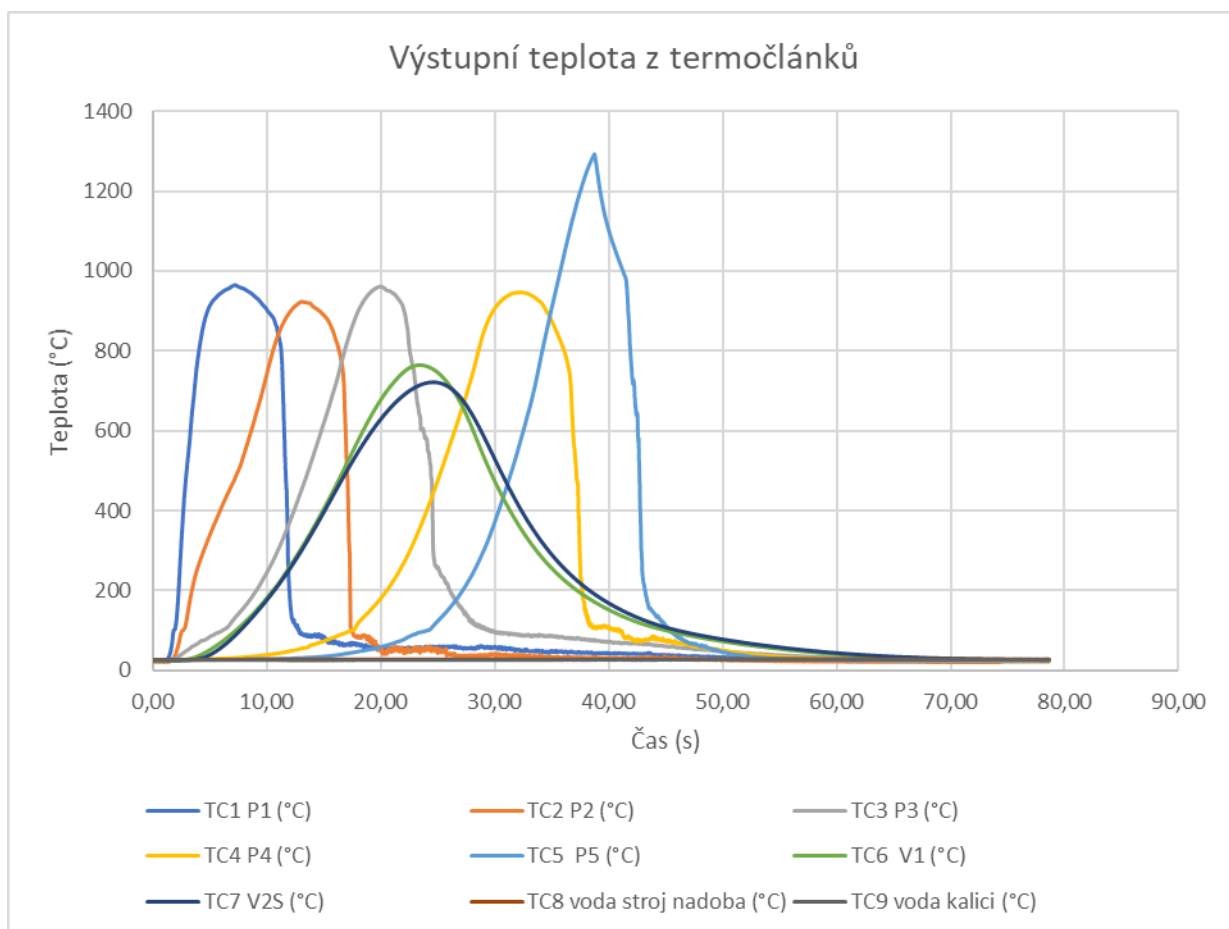
7.41 Výkony v jednotlivých fázích

7.11 Kalení oceli typu EN C35 pomocí polymeru

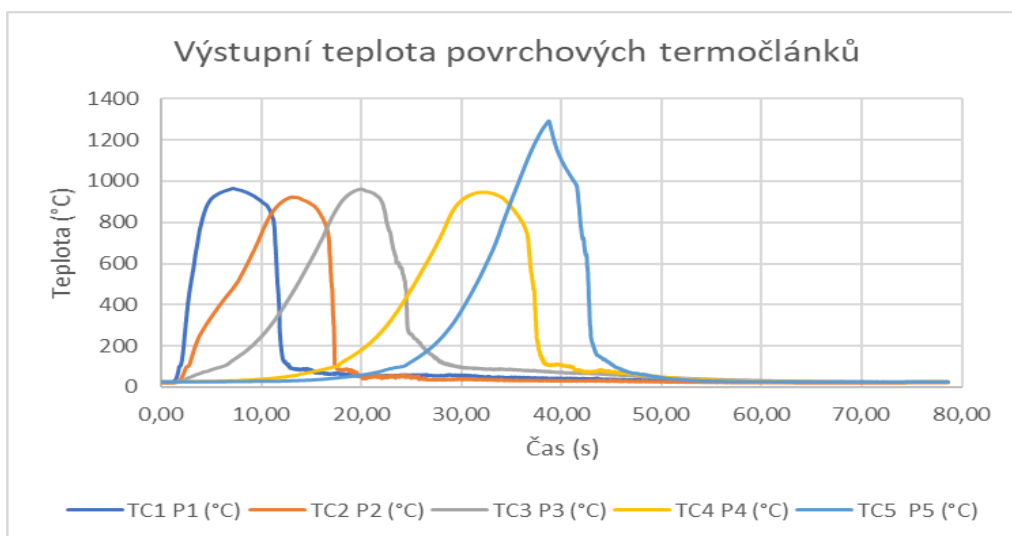
Veškeré výstupy teplot z měření je možné sledovat na obrázku 7.42. Na tomto obrázku jsou vidět výstupy ze všech čidel. Pro lepší pohled jsou zde opět vytaženy detaily k jednotlivým částem. Na obrázku 7.43 je možné sledovat detailně teplotu povrchových termočlánků. Zde je možné pozorovat extrémní nárůst teploty na čidle TC5. Tento nárůst bylo možné sledovat u všech měření, která byla provedena.

Podpovrchové teploty je možné sledovat na obrázku 7.44. Z obrázku je patrné, že podpovrchové teploty jsou v rozmezí 700 °C–750 °C.

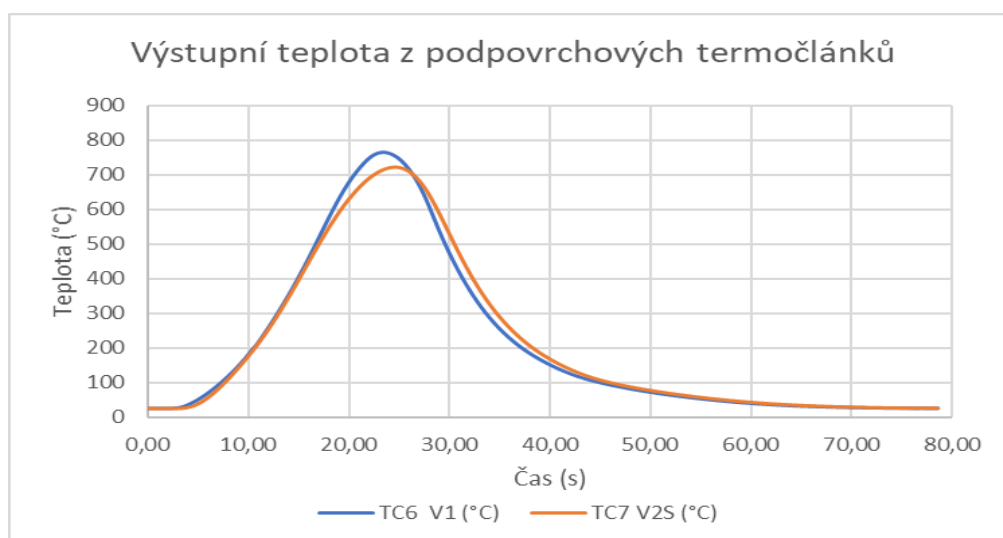
Teploty uvnitř stroje je možné sledovat na obrázku 7.45, teploty v nádobě jsou vidět na termočlánku TC8 a teploty kalicího média je možné sledovat na termočlánku TC9. Tyto teploty se pro vodu ve stroji pohybují okolo 25 °C-27 °C a teplota kalicího média je okolo 27°C-28°C.



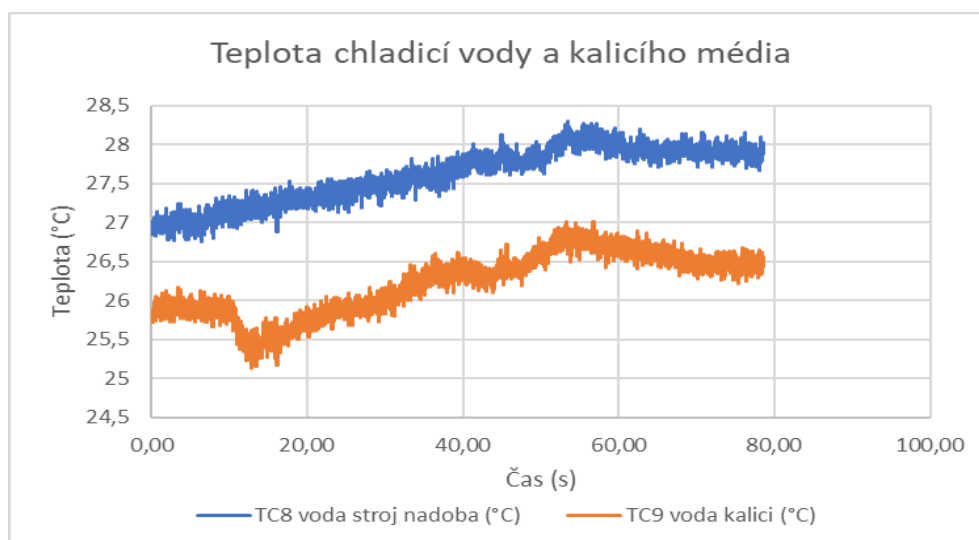
7.42 Časové průběhy všech teplot



7.44 Časové průběhy teploty z povrchových termočlánků



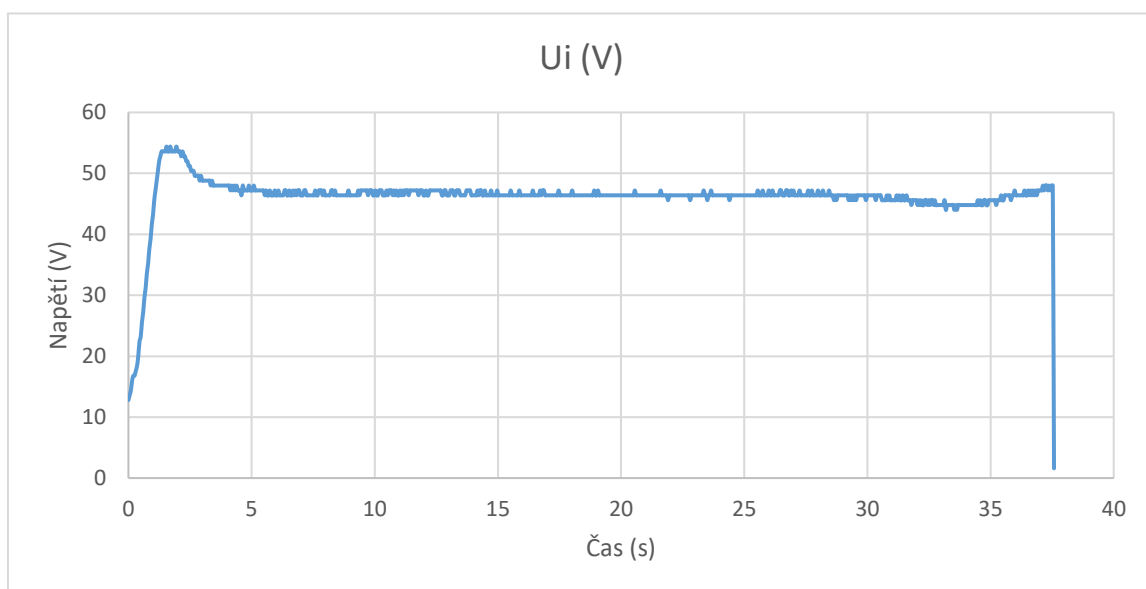
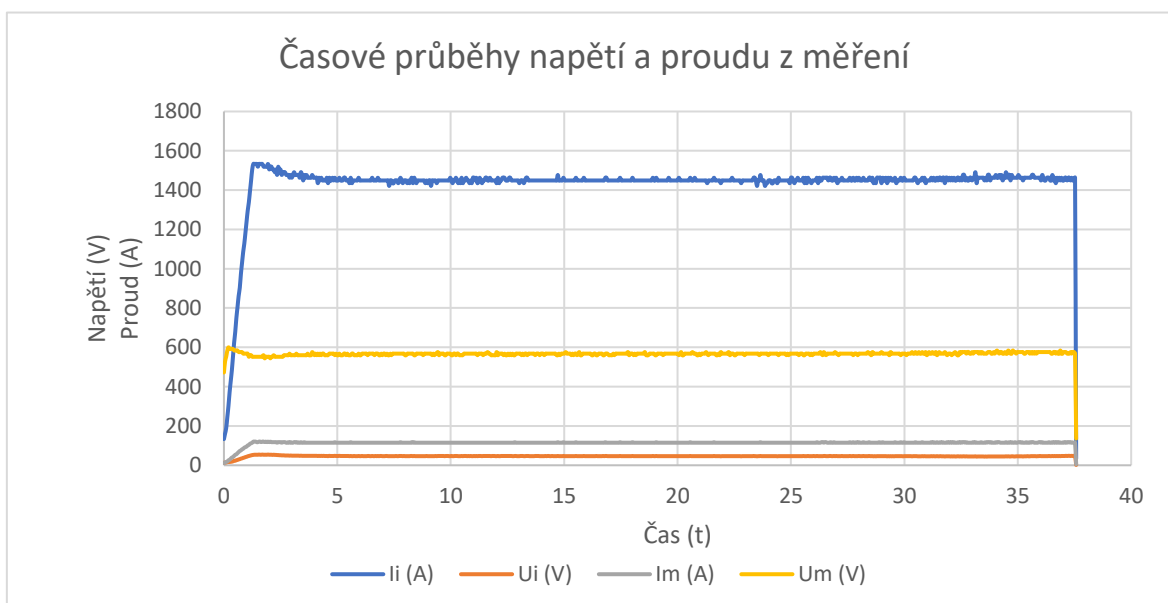
7.45 Časové průběhy teploty z podpovrchových termočlánků

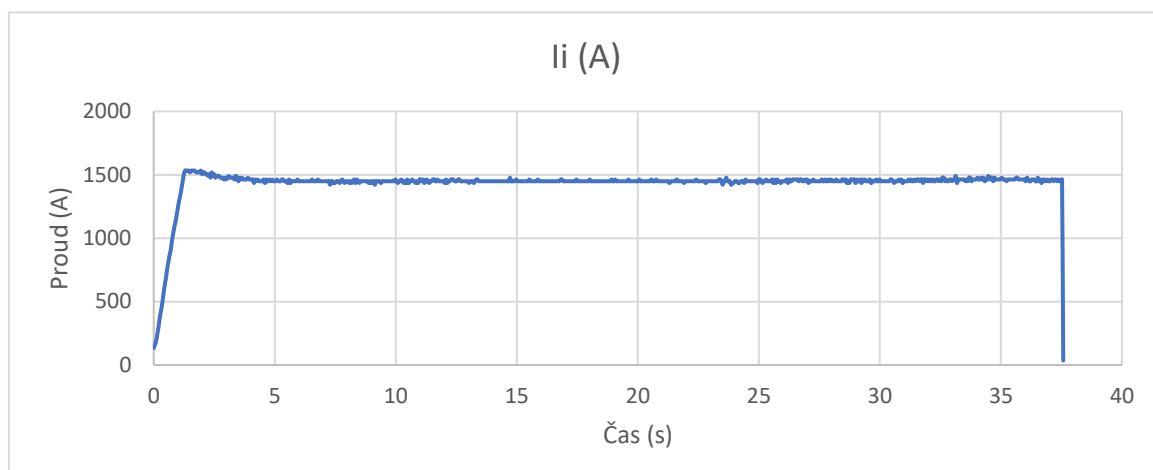


7.43 Časové průběhy teploty ve stroji

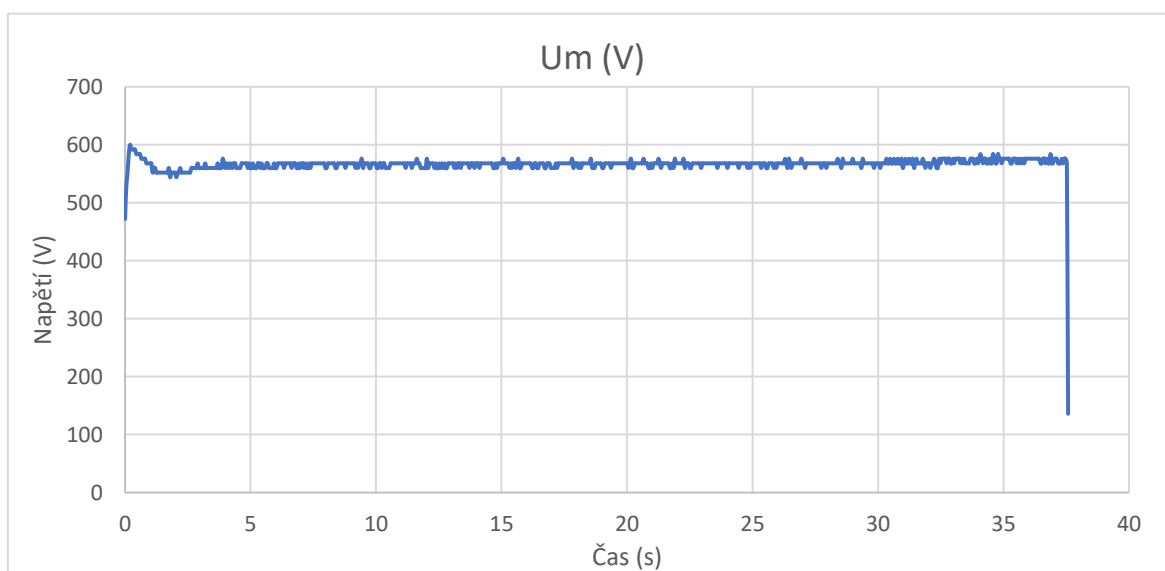
7.12 Hodnoty získané z osciloskopu

Na obrázku 7.46 je možné sledovat veškeré hodnoty získané z osciloskopu. Je zde možné sledovat velikost amplitudy napětí a proudu v induktoru a zároveň velikost napětí a proudu v měniči. Pro lepší zobrazení jsou opět vloženy detailnější zobrazení průběhů, a to na obrázku 7.47, 7.48, 7.49 a 7.50. Opět zde můžeme sledovat přesáhnutí Curieova bodu znázorněného peakem.

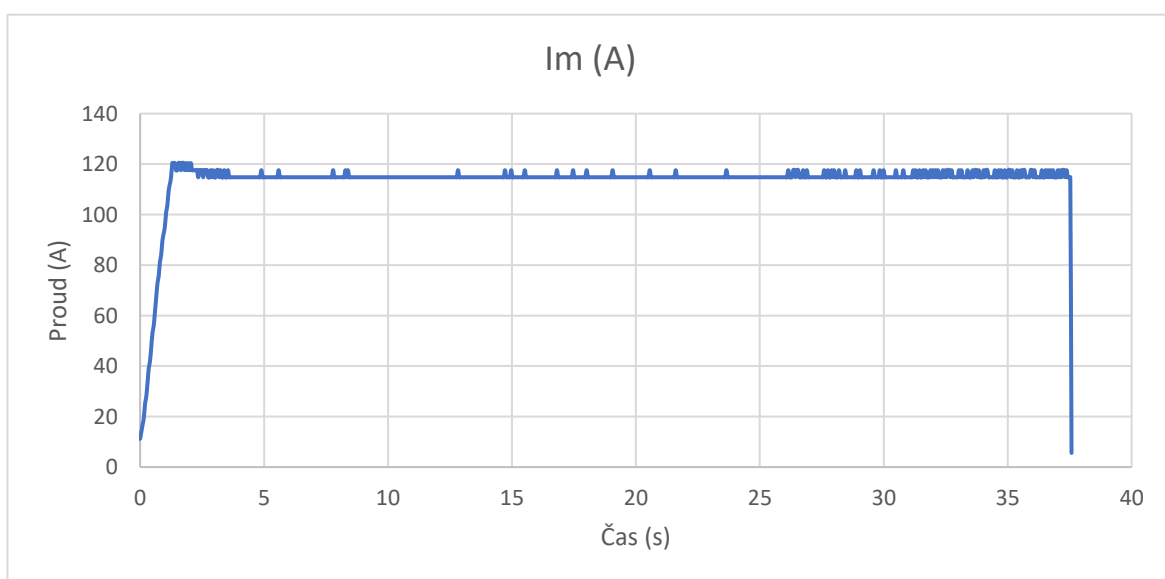




7.48 Proud induktoru v závislosti na čase

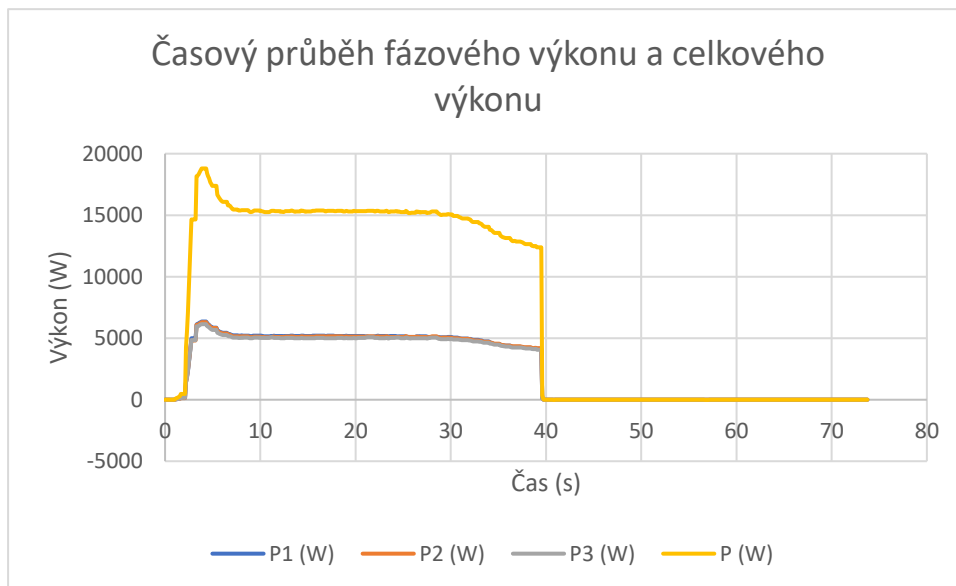


7.49 Napětí na měniči v závislosti na čase

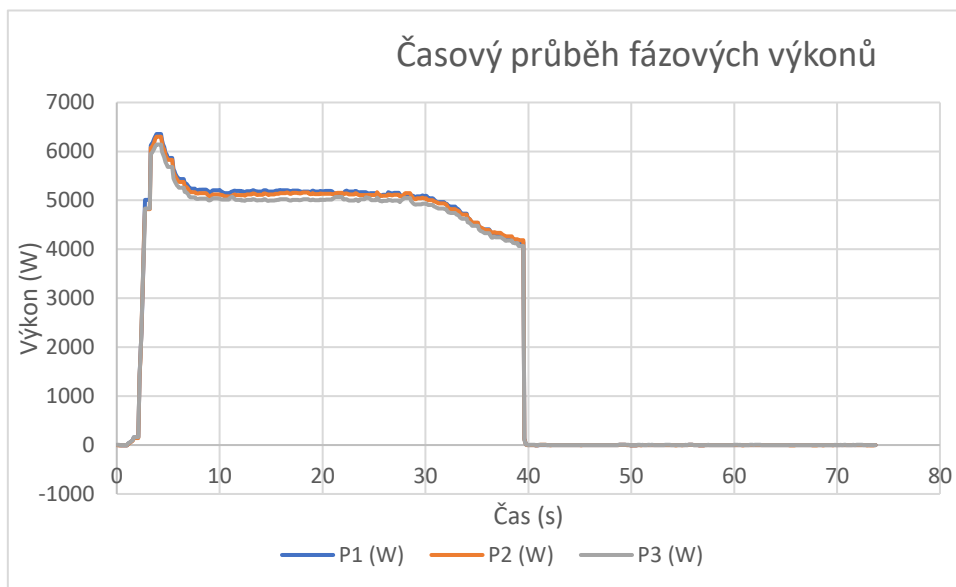


7.50 Proud v měniči v závislosti na čase

Výkony je možné sledovat na obrázku 7.51, pro lepší zobrazení je zde opět vložený detail výkonů v jednotlivých fázích v podobě obrázku 7.52. Na obrázcích je opět patrný peak způsobený přesáhnutím Curieova bodu.



7.51 Odebírané výkony

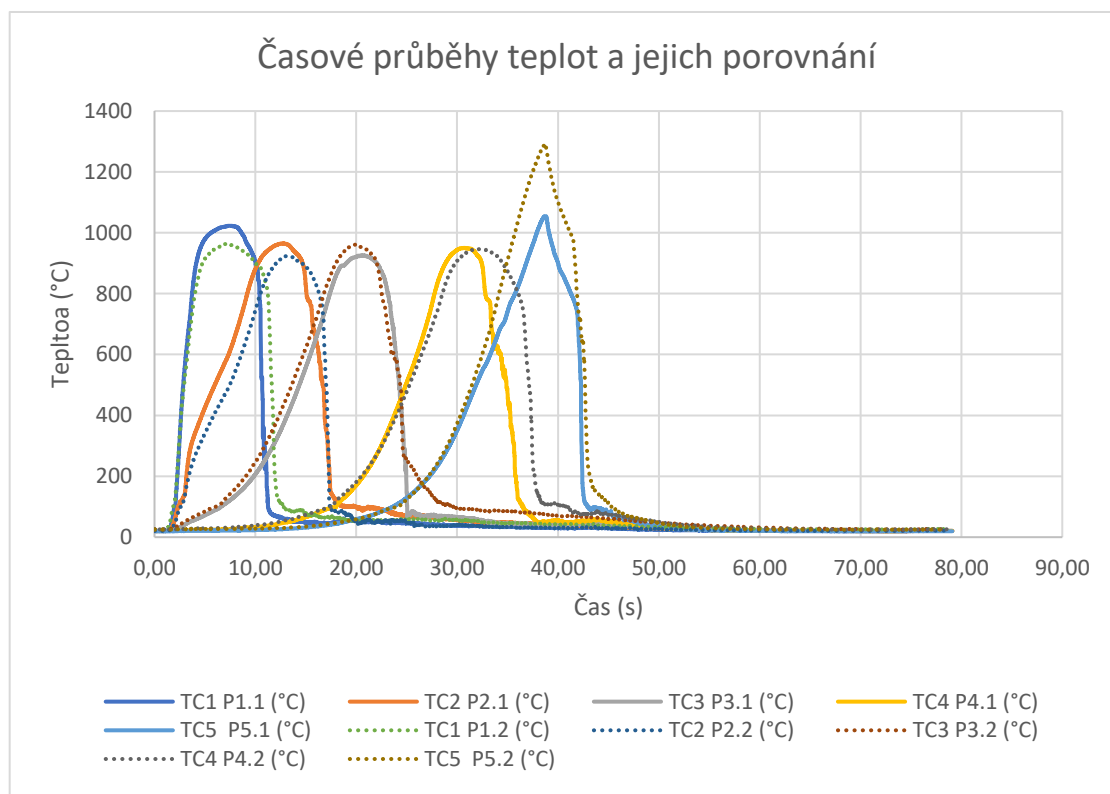


7.52 Odebíraný výkon ze všech fází

7.13 Porovnání kalení při využití vody a polymeru

Při porovnání kalení za pomoci vody a za pomoci vody s polymerem je možné sledovat opět jen drobné rozdílnosti v samotném výsledku procesu. Všechny grafy jsou téměř totožné, krom malých a nepatrných rozdílů, které na výsledné prokalení vsázky nemají vliv. Největší rozdíl je vidět v pátém termočlánku kde rozdíl činí přibližně 300 °C, tento obrovský teplotní skok je způsobený špatným odvodem tepla vedením z dolního konce vsázky. Jedná se o přirozený jev během indukčních ohřevů. Další činitel, který může mít vliv je výška vsázky, která se může lišit a tím i doba kalení a doba celkového procesu.

Ochlazovací vlastnost vody a vody s polymerem, je možné sledovat na obrázku 1.1, kde je možné vidět, že v rychlosti ochlazení jsou si voda a voda s polymerem hodně podobné. Pokud se zaměříme na obrázek 7.53, je patrné, že měření jsou téměř totožná. Opět je tady možné sledovat vliv polymerů ve vodě. Ty snižují ve vyšších teplotách teplotu rychleji než samotná



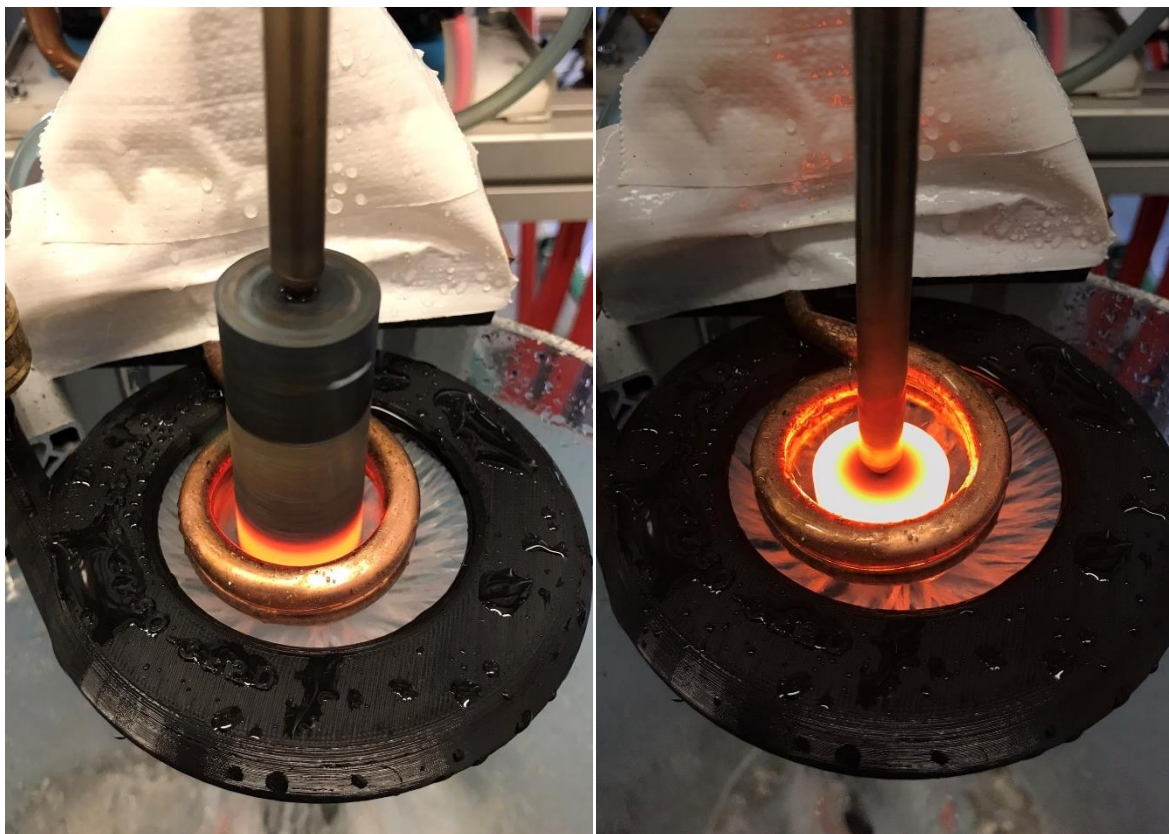
7.53 Výstupní hodnoty z termočlánků

voda a zároveň v nižších teplotách zajišťují pomalejší a postupnější dochlazení. To vede opět k ochraně vsázky před jejím popraskáním v důsledku snížení vnitřního pnutí v kalené vsázce.

Na obrázcích 7.54 a 7.55 je možné vidět průběh měření v závislosti na barvě ohřevu. Je zde přiložen obrázek 7.54, který ukazuje barvu vsázky během ohřevu a obrázek 7.55 který

ukazuje barvu vsázky ke konci měření. Je zde velmi patrný strmý nárůst teploty ke konci měření, čemuž odpovídá měření a zároveň i bělavá barva na obrázku 7.55.

Tento nepřiměřený nárůst teploty je zapříčiněn přirozeným jevem, který vzniká na konci vsázky. Zde dochází k velmi špatnému odvodu tepla vedením a zároveň z důvodu zajištění konstantního ohřevu, je zde zajištěno pomalejší vypnutí indukčního procesu. To zajišťuje delší ohřev. Konec celého procesu je závislý na každé desetiné vteřiny.



7.54 Průběh měření

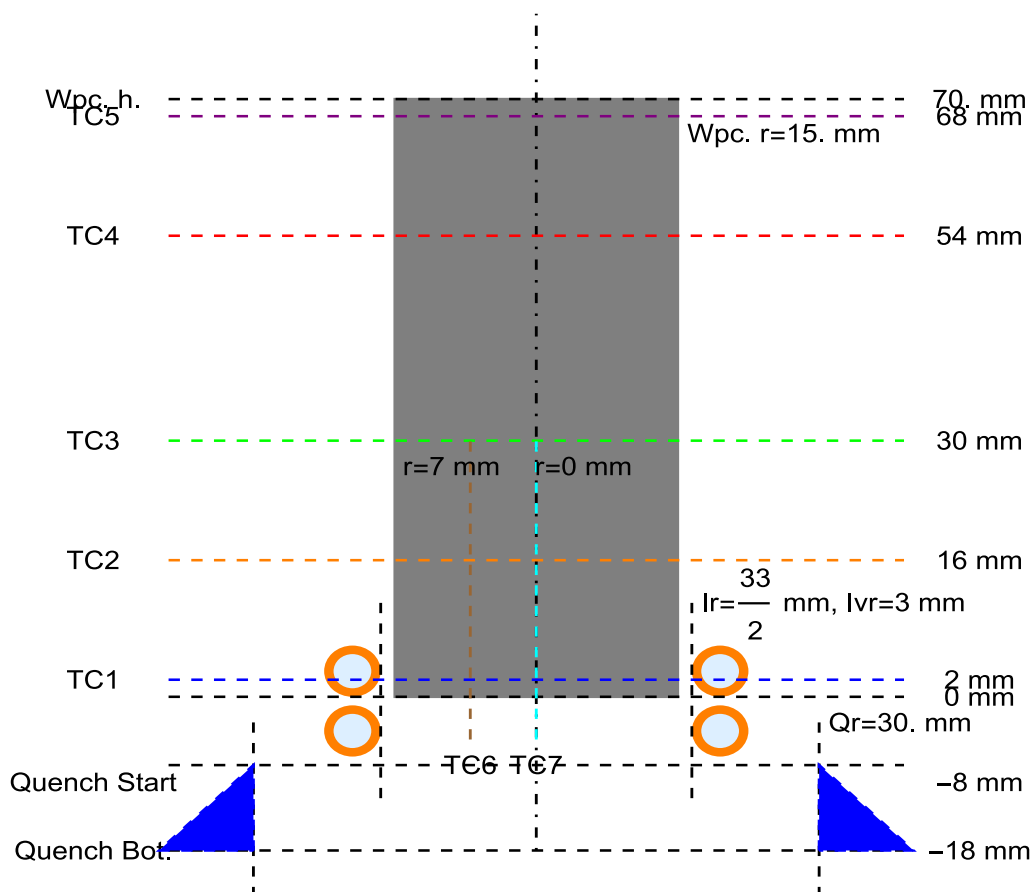
7.55 Konec měření

8 Měření s rotací vsázky

Měření bylo provedeno na jednom druhu vsázky a pouze s jedním termočlánkem. Důvod využití pouze jedné vsázky a jednoho termočlánku byla náročnost měření. Jedním z největších problémů byl uvolňující se termočlánek během rotace. Díky odstředivé síle, která byla během rotace vytvořená se termočlánek odtrhával od vsázky, a proto se z důvodu složitosti měření jsem zvolil pouze jeden termočlánek ve středu vsázky. Tento termočlánek odpovídá umístění termočlánku TC3, možno najít na obrázku 8.1.

Pokud by došlo k odtržení termočlánku během samotného procesu, došlo by k dotyku termočlánku s induktorem a tím k vyzkratování vstupní karty pro termočlánky a zároveň by mohlo dojít k poškození měniče, a tudíž by vznikly velké ekonomické škody. Z tohoto důvodu byl induktor namočený do pryskyřice. Pryskyřice vytvořila nevodivou vrstvu kolem závitu induktoru a tím zajistila ochranu proti případnému utrnutí termočlánku.

Pro přenos teploty z termočlánku na kartu bylo při rotaci využito zařízení, které umožnilo sběr dat při rotaci.



8.1 Rozmístění jednotlivých termočlánků na vsázce

8.1 Otočný kontakt

Na obrázku 8.2 je možné vidět detailněji otočný kontakt, který zajišťuje přenos informací ze vsázky do sběrové karty teplot. Na obrázku je možné dále sledovat problém který byl vytvořen větším množstvím vodičů a nutností v okolí vytvořit místo pro propojení vodičů. K tomuto byly využity Wago svorky, které bylo nutné umístit mimo odtokový kanálek.



8.2 Sběr dat

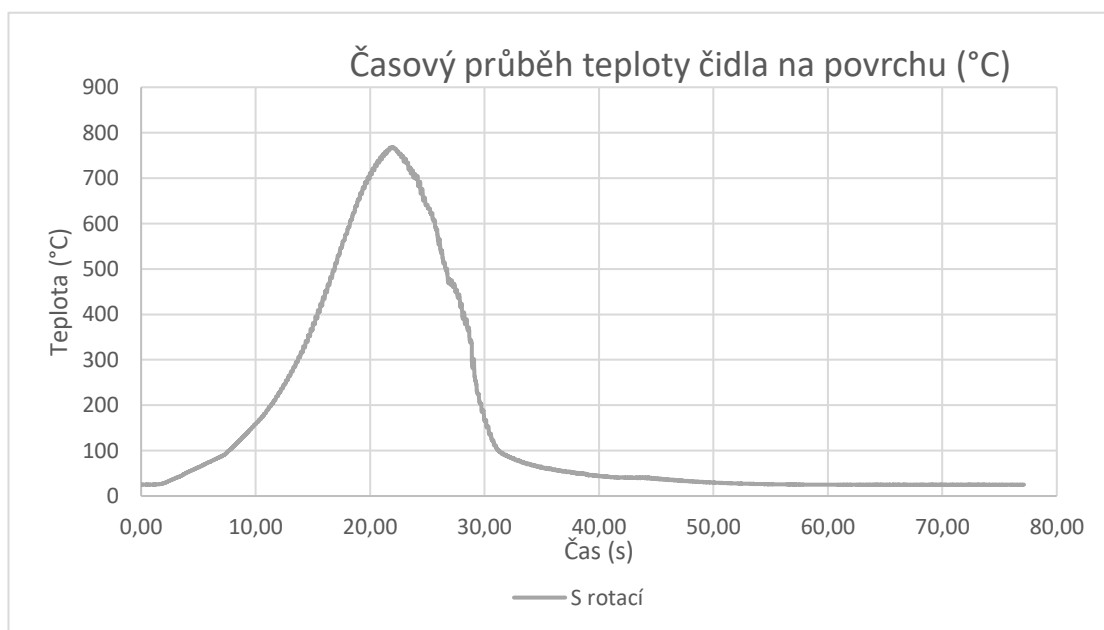
8.2 Měření s rotací vsázky

Při měření teploty z důvodu zjednodušení měření byl využit pouze jeden termočlánek, umístěný přibližně 30 mm od spodu vsázky. Průběh teploty je možné sledovat na obrázku 8.3. Z obrázku je patrný stejný průběh teploty jako bez rotace vsázky. To bude velmi patrné z obrázku 8.5, kde je možné sledovat průběh teploty na vsázce během rotace a bez rotace. Největší rozdíl, který je zde opravdu patrný je pilovitý průběh grafu s rotací v průběhu ohřevu a chlazení. Tento pilovitý průběh je dán nesymetrií induktoru vlivem přivařeného termočlátku. Ovšem krom tohoto pilovitého průběhu je patrné, že jsou měření téměř totožná. Pro lepší představu je na obrázku 8.4 vložen záznam ze všech měření. Je možné sledovat malou odchylku v prvních dvou měření, způsobenou jinou polohou termočlátku. Detail pilovitého průběhu, je možné sledovat na obrázcích 8.6 a 8.7.

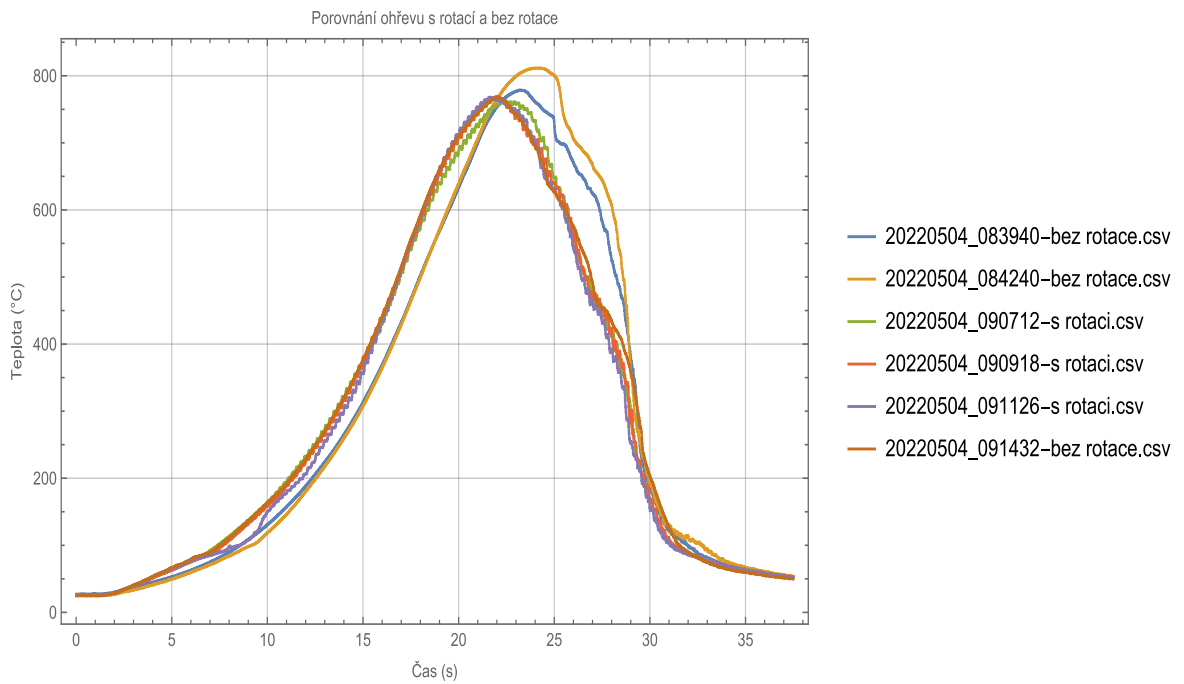
Začátek měření je zobrazen na obrázku 8.8. Na tomto obrázku je možné sledovat počátek procesu, na kterém je vidět, že začátek měření je stejný, jak u rotace, tak i bez rotace.

U obou případů se naměřená teplota v maximu pohybuje kolem 750 °C. Jako další je zde možné sledovat na obrázku 8.5 a 8.6 výkony odebírané z jednotlivých fází během rotace i bez zapnuté rotace.

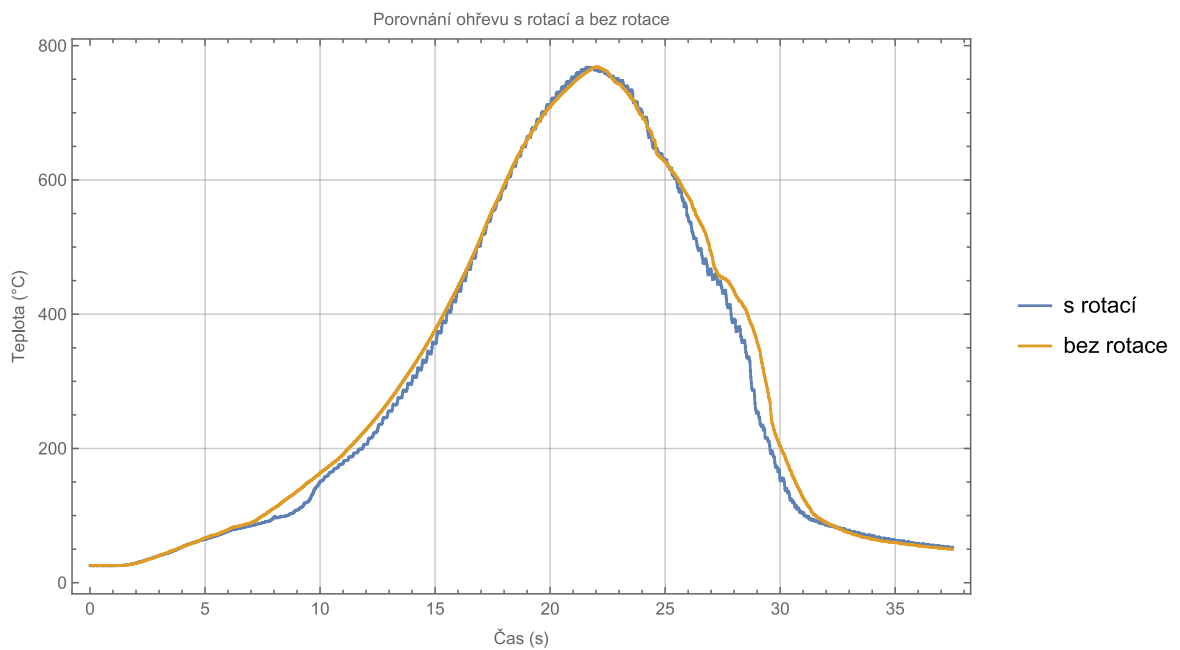
Při pozorování obrázku 8.5 a 8.6 je vidět, že výkony odebírané z jednotlivých fází jsou téměř stejné jak pro odběr s rotací, tak i s odběrem bez rotace. To je možné sledovat na obrázku 8.7, kde je vidět porovnání výkonů v jedné fázi. Je zde opět vidět peak vzniklý překročením Curieovi teploty.



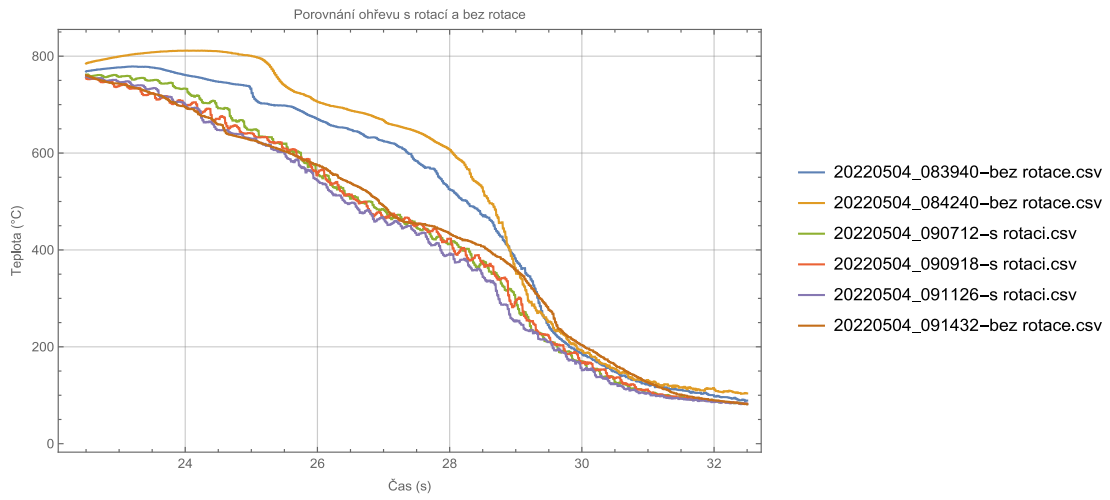
8.3 Teplota na povrchu vsázky



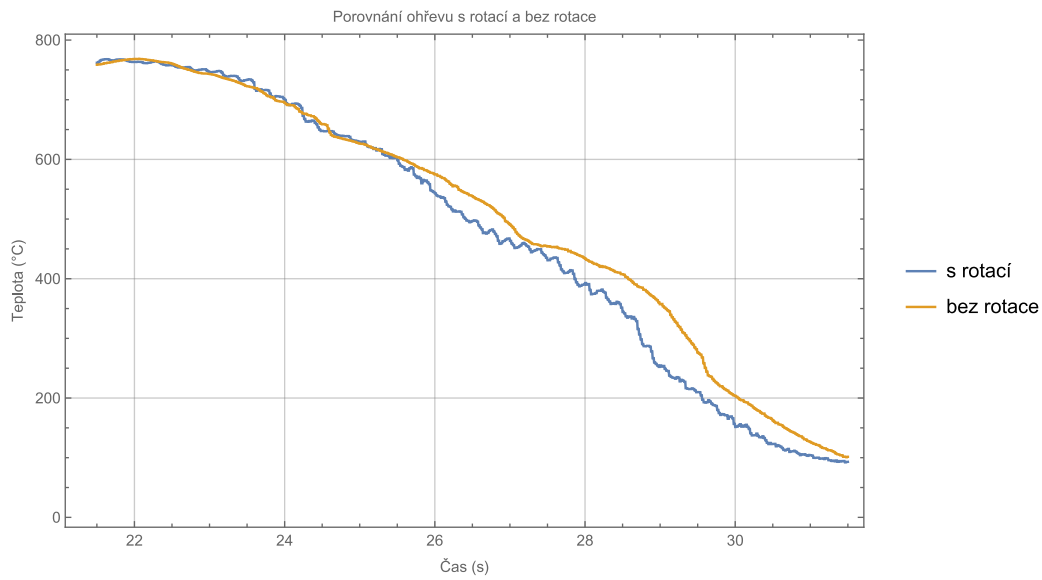
8.5 Data z měření a porovnání rotace bez rotace



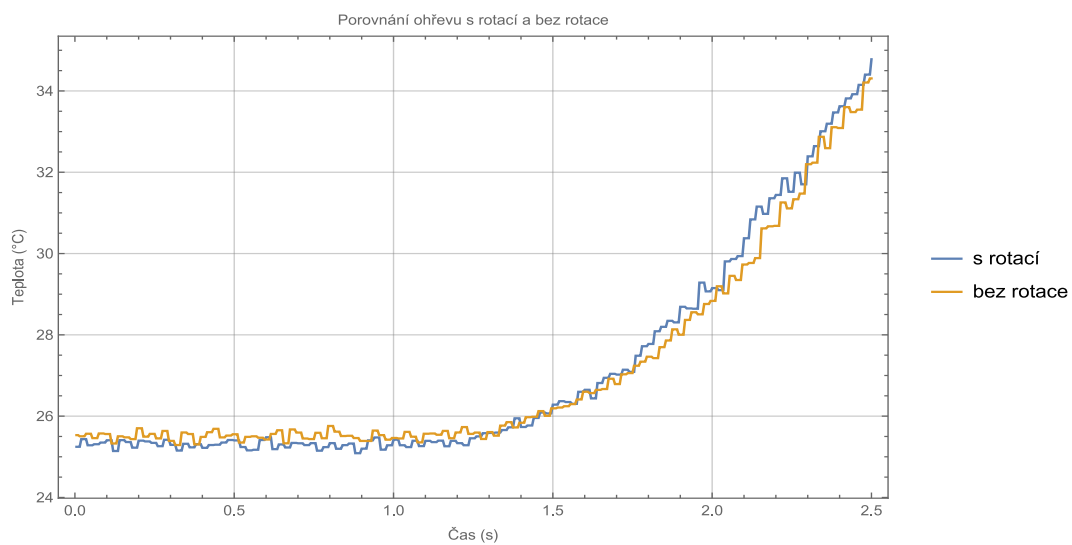
8.4 Detailní průběh teplot s rotací a bez rotace v závislosti na čase



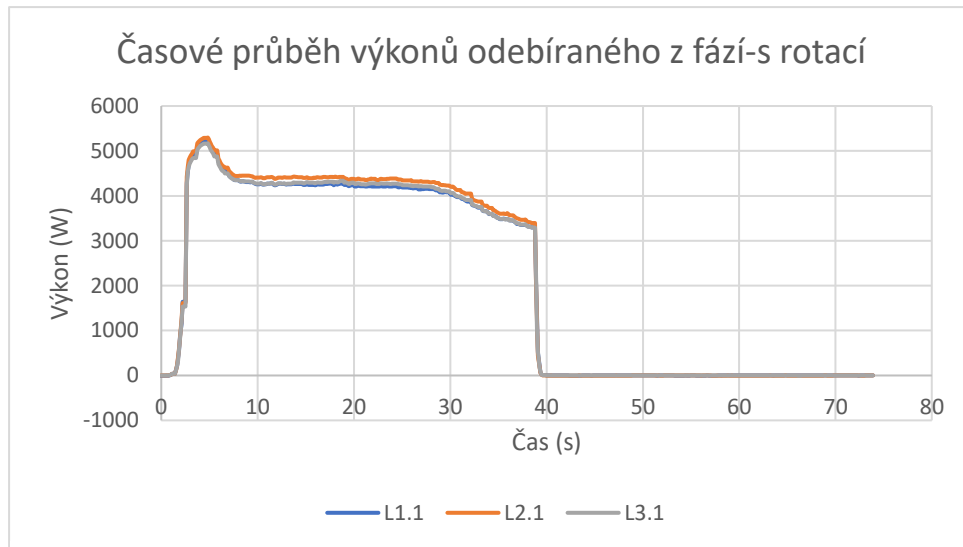
8.6 Detail průběhu ohřevu



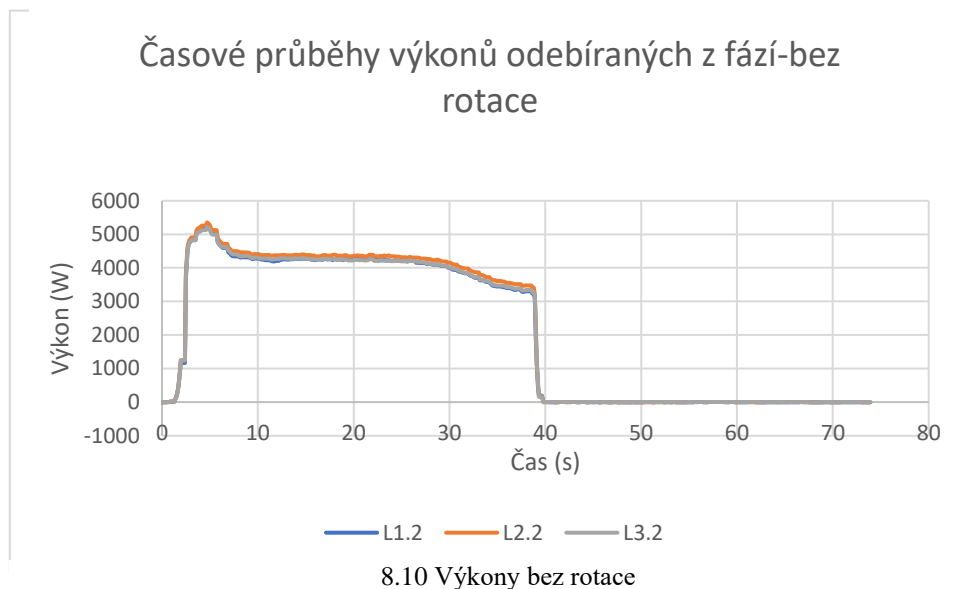
8.7 Detail průběhu ohřevu vybraných hodnot



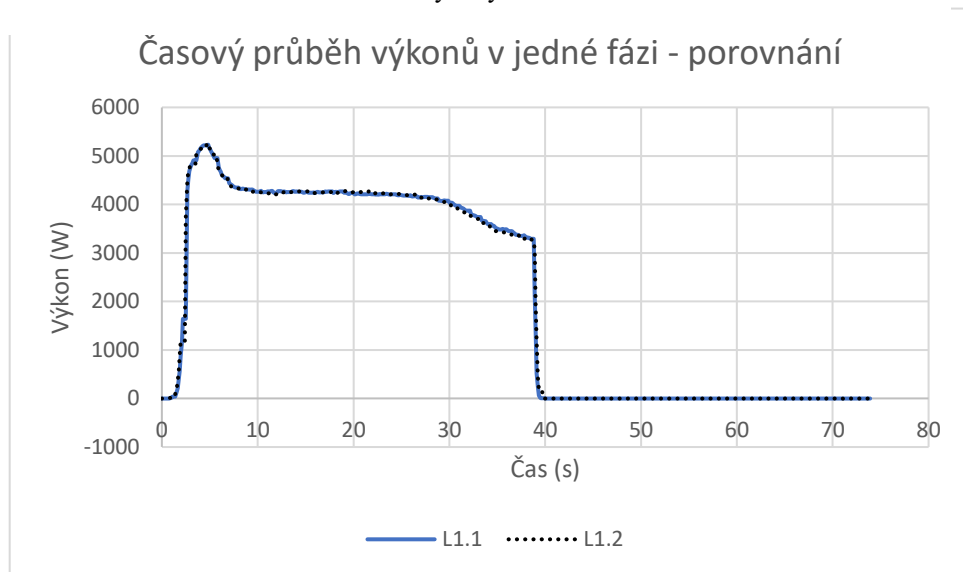
8.8 Počátek měření



8.9 Výkony při rotaci



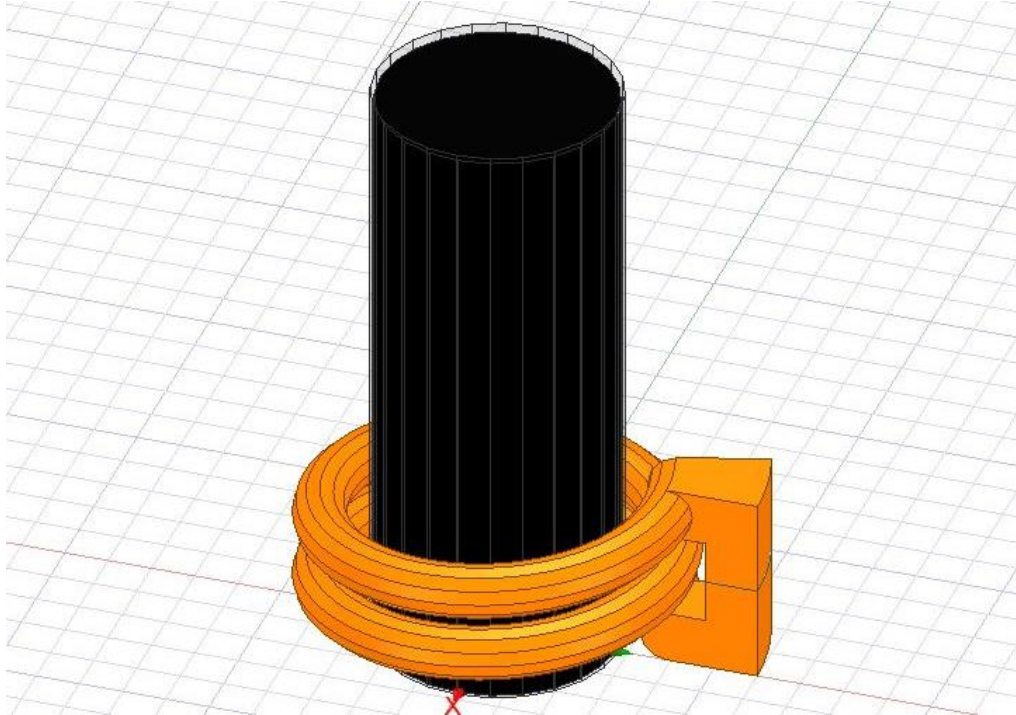
8.10 Výkony bez rotace



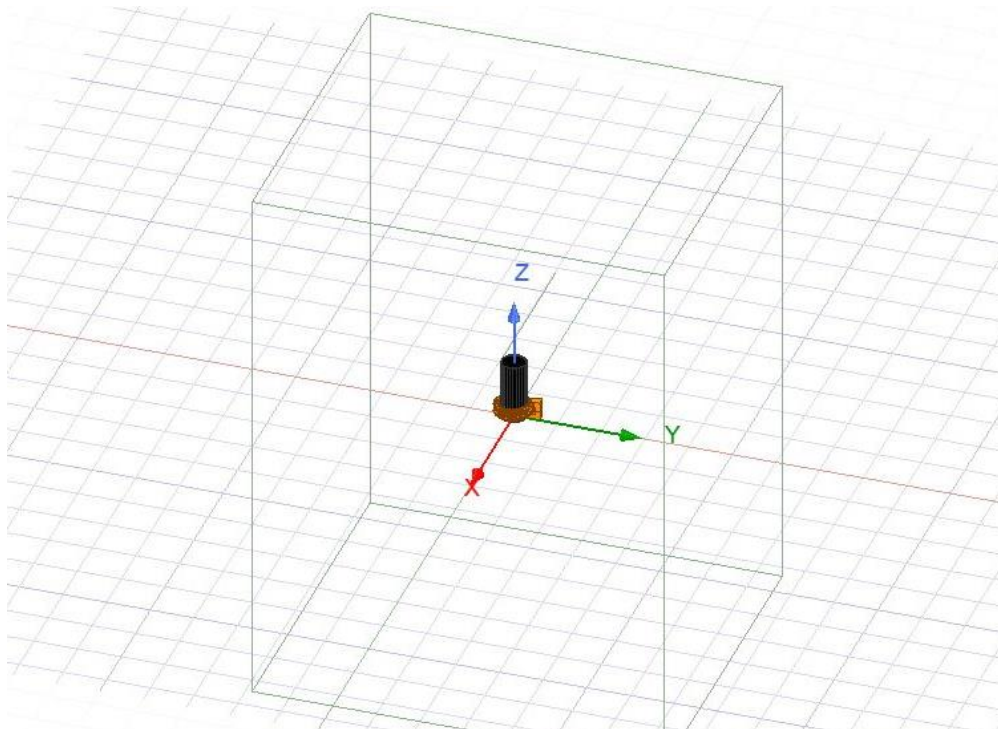
8.11 Porovnání odebíraného výkonu z jedné fáze

9 Matematický model

Matematický model byl vytvořený v programu ANSYS. Podle zjištěných informací a z naměřených hodnot, jsem zhotovil model, na kterém jsem prováděl simulaci reálného měření. Výsledný model je možné vidět na obrázku 9.1. a 9.2. na těchto modelech je vidět vytvořené prostředí a detail vsázky s induktorem.



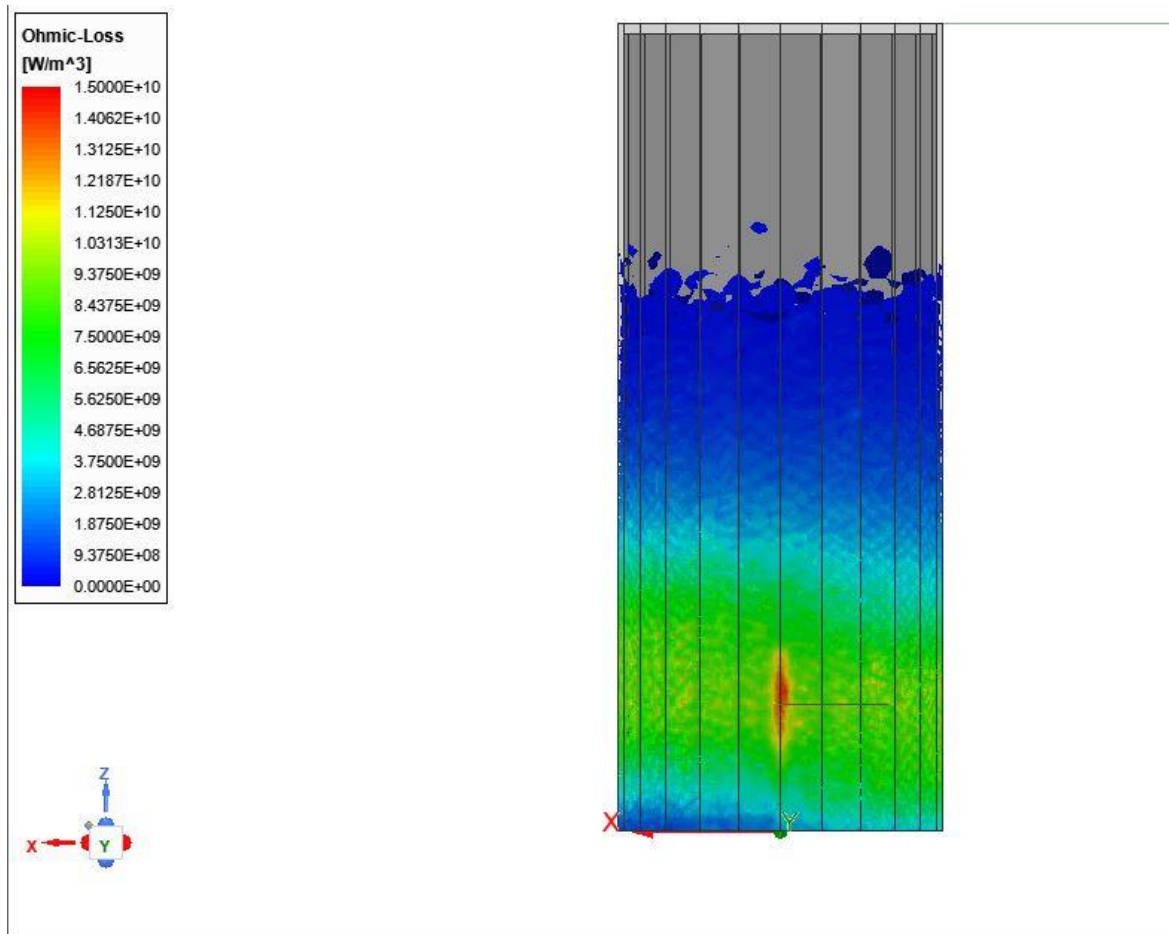
8.1 Vytvořený model v programu ANSYS



9.2 Model s respektováním prostředí

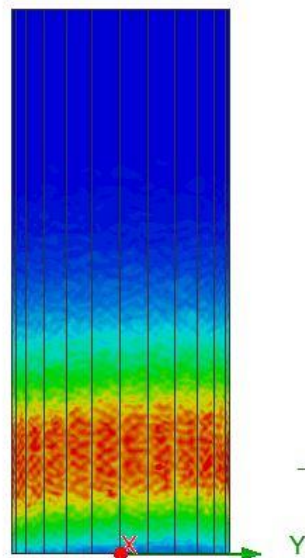
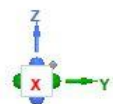
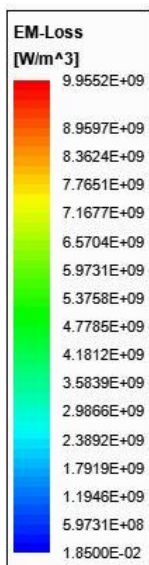
V daném modelu byl simulován ohřev za pomoci stejných hodnot frekvence a proudu jako byly využity i během samotného měření. Ze získaných hodnot jsem vybral zobrazení elektromagnetických ztrát, rozložení ohmických ztrát, proudění kolem vsázky a rozložení teploty.

Na obrázku 9.3 jsou vidět ohmovy ztráty vznikající ve vsázce. Na tomto obrázku je možné sledovat místo které se od svého okolí liší. V místě s rudou barvou je umístěný podpovrchový termočlánek.

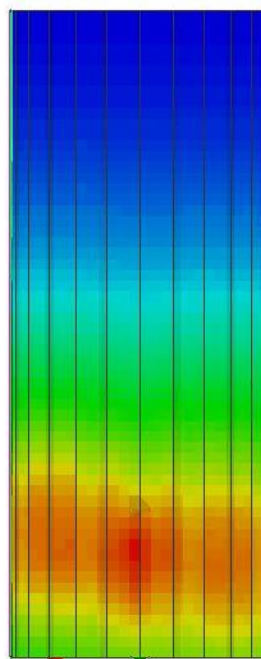
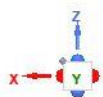
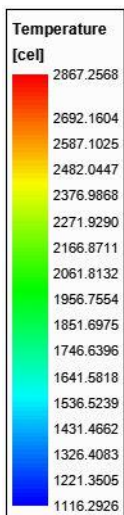


9.3 Rozložení ohmových ztrát ve vsázce

Na obrázku 9.4 je možné sledovat elektromagnetické ztráty ve vsázce a na obrázku 9.5 teplotu. Je možné sledovat i rozdíl v povrchové teplotě oproti reálnému měření, to je způsobené tím, že zde je simulován pouze ohřev, nikoliv chlazení. Důležitým výstupem, je zobrazení vyšších ztrát v místě podpovrchové termočláneků a zároveň i mnohem vyšší teplota, což je patrné i z obrázku 9.5. Po vyhodnocení modelu, můžu s jistotou říci, že termočlánek umístěný těsně pod povrchem vsázky, nám ovlivní celkový proces.



9.4 Rozložení elektromagnetických ztrát



9.5 Rozložení teploty

10 Závěr a zhodnocení práce

Veškeré experimenty probíhaly v jedné z laboratoří Elektrického tepla (EL 113), kde bylo zkonstruováno zařízení pro indukční ohřev. Na tomto zařízení jsou prováděny série experimentů z různých oblastí technologických ohřevů pro projekty optimalizace, návrhy indukčních procesů a zároveň na tomto zařízení probíhala měření realizované v rámci mé diplomové práce.

Začínal jsem pouze s hypotézami vycházejícími z určitých teoretických předpokladů, které se mi tímto měřením povedlo potvrdit. Provedením řady experimentů se potvrdila má hypotéza, že rotace vsázkou při jejím indukčním povrchovém kalení má vliv jak na průběh ohřevu, tak také na proces ochlazování. Vliv rotace vsázkou se tedy projevil, jak u samotného ohřevu, tak i při jejím ochlazování, v důsledku zrovnoměrnění Jouleových ztrát uvnitř vsázky a zrovnoměrněním jejího povrchového ochlazování.

Druhou hypotézou bylo, že způsob rozmístění termočlánků na povrchu a uvnitř vsázky má vliv na její ohřev a ochlazování, tudíž i na celkový proces kalení. Nejprve jsem se zabýval vlivem rozmístění termočlánků na povrchu vsázky. Pro ověření hypotézy byly vyzkoušeny dvě varianty. První variantou bylo rozmístění pěti povrchových termočlánků v linii pod sebou. U této varianty docházelo k problému s vyvedením vodičů termočlánků. Docházelo k jejich hromadění v jednom místě a tím bránili správnému ochlazování vsázky. Druhá varianta, kterou jsem později zvolil k měření celé své práce, má termočlánky umístěné vždy se zvoleným tangenciálním odstupem, možno vidět na obrázku 7.2 a 7.3. Tato varianta neměla zásadní vliv na indukční ohřev, ale přispěla k rovnoměrnějšímu ochlazování vsázky, které bylo méně ovlivňováno pravidelným rozložením termočlánků po obvodě vsázky (nikde nedocházelo k hromadění vodičů).

Dále jsem se věnoval vlivu rozmístění termočlánků uvnitř vsázky. Vsázka byla navrtána zespoda a termočlánky vloženy do vzniklého otvoru. Původní návrh obsahoval tři termočlánky, první byl a je umístěn v ose symetrie, druhý termočlánek 7 milimetrů od osy symetrie a poslední termočlánek byl umístěn těsně pod povrchem vsázky. U termočlánku umístěného těsně pod povrchem vsázky docházelo opakovaně k extrémnímu nárůstu teploty na začátku měření, což potvrdilo že rozmístění termočlánků má velký vliv na proces ohřevu. Tento jev je možné sledovat na obrázku 5.6. a zároveň i v matematickém modelu, který byl vytvořený v programu ANSYS EM a je rozebírán v kapitole 9.

Literatura

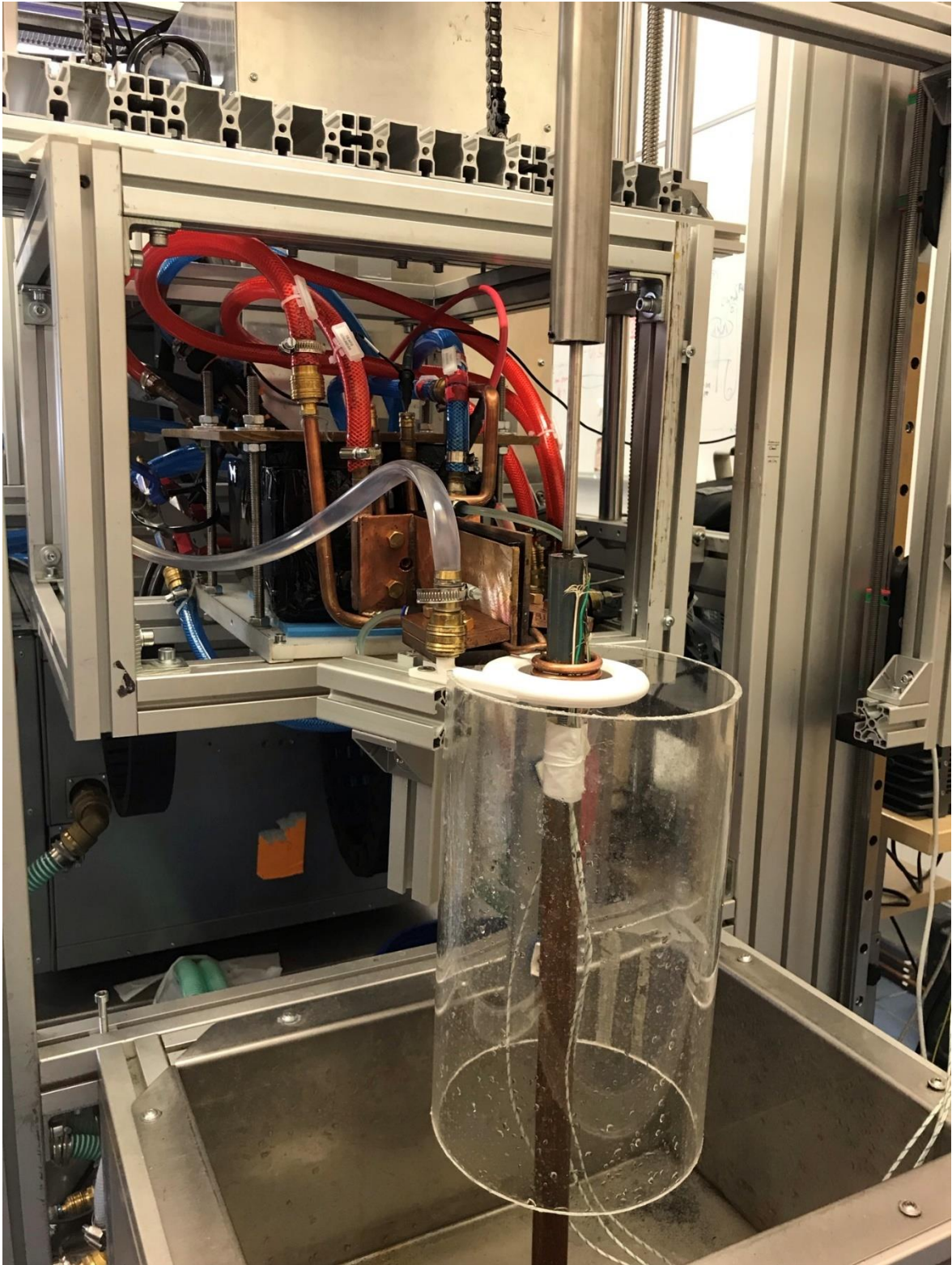
- [1] KAVKOVÁ, Danuše. Tepelné zpracování kovových materiálů KALENÍ. Praha, 2016. Dostupné také z: <https://drive.google.com/drive/folders/1RtyJJFrLsgA29djk8K9xntM16uhi5uZr>
- [2] Rudnev, Valery, Totten George E. AMS Handbook, Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment Hardcover. ASM International, 2014. ISBN 978-1627080125.
- [3] ROT, David. NÁVRH A OPTIMALIZACE PROCESŮ POVRCHOVÉHO INDUKČNÍHO KALENÍ PRO IMPLEMENTACI DO AUTONOMNÍCH KALICÍCH STROJŮ S VYUŽITÍM AKTUÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ A TRENDŮ. Plzeň, 2020. Habilitační práce. Západočeská univerzita.
- [4] Infrared Basics [online]. Berlin · Germany: Optris GmbH Ferdinand-Buisson-Str. 14 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.optris.cz/infracervene-termokamery>
- [5] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [6] MAYER, Daniel. Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [7] AFEWORK, Bethel, Ethan BOECHLER a Jordan HANANIA. Heat vs temperature. Energy Education [online]. 2021 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Heat_vs_temperature
- [8] HEJČÍK, Jiří a Miroslav JÍCHA. PŘENOS TEPLA A LÁTKY IPT. *Fakulta strojního inženýrství - Energetický ústav* [online]. Brno: ENERGETICKÝ ÚSTAV FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/pro-studenty-podpora-vyuky-prenos-tepla-a-latky>
- [9] Langer E., Teorie indukčního a dielektrického tepla, Praha : Academia 1979
- [10] PAVLÍČEK, Jiří. Kalkulátor hloubky vniku. Roboterm Chotěboř [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.roboterm.cz/home/kalkulator-hloubky-vniku>
- [11] ŽÁK, Lukáš. *Možnosti využití indukčního ohřevu pro žhání rotačně symetrických těles*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Lubomír Musálek.
- [12] Záření černého tělesa. WikiSkripta: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-11-28]. Dostupné z:

https://www.wikiskripta.eu/w/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD%C4%8Dern%C3%A9ho_t%C4%Blesa

- [13] Stefanův–Boltzmannův zákon. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stefan%C5%AFv%E2%80%93Boltzmann%C5%AFv_z%C3%A1kon
- [14] Wienův posunovací zákon. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Wien%C5%AFv_posunovac%C3%AD_z%C3%A1kon
- [15] Znázornění vyzařování absolutně černého tělesa jako funkce vlnové délky, při různých absolutních teplotách. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Wien%C5%AFv_posunovac%C3%AD_z%C3%A1kon#/media/Soubor:Wiens_law.svg
- [16] HRADILEK, Zdeněk, Ilona LAZNIČKOVA a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [17] ŠORIN, S. *Sílení tepla*. 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1968. 398 s.
- [18] RADA, J. *Elektrotepelná technika*. 1. Praha: Nakladatelství technické literatury, Praha, 1985.
- [19] DUSEK, Milan. *Indukční ohřev nanovrstev*. Plzeň, 2016. Diplomová. Západočeský univerzita v Plzni.
- [20] SAZIMA, Miroslav. *Tabulky sdílení tepla*. Vyd. 4. Praha: České vysoké učení technické, 1984.

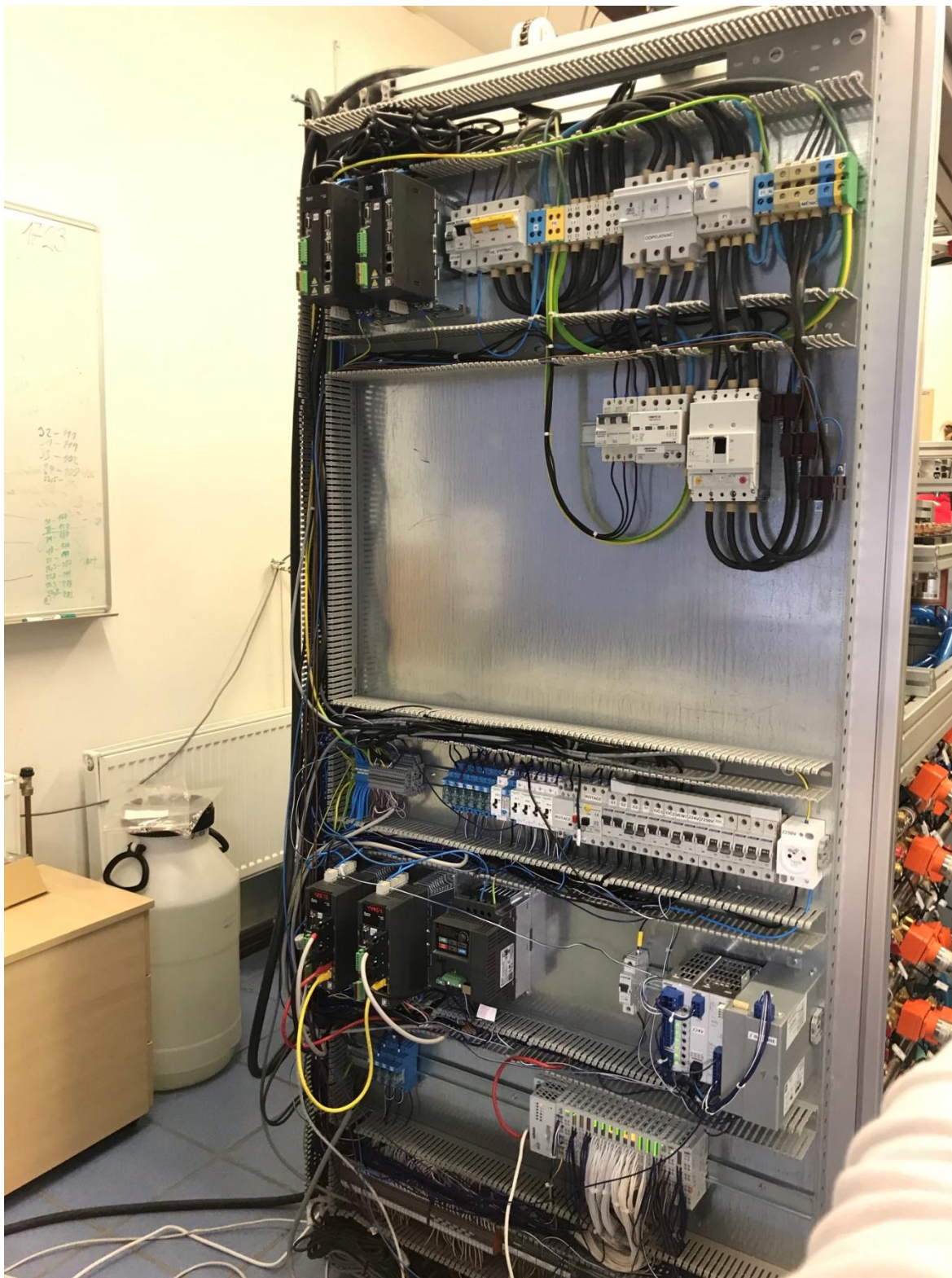
Přílohy

Příloha 1



10.1 Kalící zařízení

Příloha 2



10.2 Rozvaděč zařízení

Příloha3



10.3 Vsázka s termočlánky