ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CONTROL ENGINEERING

MĚŘENÍ A REGULACE TEPLOT PRO INDUKČNÍ OHŘEV

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE BC. ROSTISLAV CENDELÍN
AUTHOR

PRAHA 2009

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINGEERING
DEPARTMENT OF CONTROL ENGINEERING

MĚŘENÍ A REGULACE TEPLOT PRO INDUKČNÍ OHŘEV

TEMPERATURE MEASUREMENT AND CONTROL FOR INDUCTION HEATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Rostislav Cendelín
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Jindřich Fuka
SUPERVISOR

PRAHA 2009

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Rostislav Cendelín**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **Měření a regulace teplot pro indukční ohřev**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem indukčního ohřevu, možnostmi měření teplot a s funkcí zdroje indukčního ohřevu TM 50/10.
2. Navrhněte zařízení pro měření, záznam, vizualizaci a regulaci teplot ve spolupráci se zdrojem TM 50/10.
3. Uveďte do provozu navržené zařízení a odzkoušejte prakticky navržené metody měření a regulace teplot.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Jindřich Fuka

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

r. z. M. Damborská
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 9. 2007

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací systému měření a řízení teplot pro indukční ohřev. V první části jsou představeny možnosti měření teplot se zaměřením na senzory vhodné pro indukční ohřev. Druhá část popisuje samotnou realizaci, použité HW komponenty a implementovaný software. V rámci projektu vznikl měřicí kufr s programovatelným automatem, který zajišťuje výměnu dat mezi počítačem a procesem indukčního ohřevu přes MPI rozhraní. Pro přenosný počítač s PCMCIA slotem byla vyvinuta aplikace pro vizualizaci měřených dat a ovládání systému. Na závěr jsou uvedeny výsledky reálných testů celého zařízení.

Klíčová slova

Indukční ohřev, zpětnovazební řízení, bezkontaktní měření teplot, vizualizace.

Abstract

The diploma thesis deals with realization of the system for temperature measuring and feedback control of Induction Heating. The first part goes through methods of temperature measuring and focuses on sensors suitable for Induction Heating. The middle part of the paper describes engineered equipment which is software as well as hardware. Within the project a portable measuring case of PLC has been developed, which controls power of supply for Induction Heating and also offers data exchange between a PC station and the process. A user interface has been implemented on the PC station to visualize data acquired from the process. The end of the thesis evaluates results come up from real testing of the developed system.

Keywords

Induction heating, feedback control, contactless temperature measuring, visualization.

Citace

Cendelín, R.: *Měření a regulace teplot pro indukční ohřev.* Praha, 2009, diplomová práce, FEL ČVUT v Praze.

Měření a regulace teplot pro indukční ohřev

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze, dne ……. …….

podpis

Poděkování

Děkuji mému externímu konzultantovi ing. Zdeňku Bláhovi z firmy Blumenbecker nejen za jeho odborné rady a vždy přínosné náměty, ale především za jeho obětavý přístup a ochotu. Další díky směřuje ing. Janu Jágrovi za jeho čas při testování vyvinutého zařízení v reálných podmínkách pomocí jeho zdroje pro indukční ohřev. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce za korekci a dohled nad správností formální stránky diplomové práce. Na závěr děkuji rodičům za jejich podporu během celé doby mého studia.

© Rostislav Cendelín, 2009.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

Obsah 1
1 Úvod 3
2 Indukční ohřev 5
2.1 Princip indukčního ohřevu 5
2.2 Typy zdrojů IH 7
2.3 Výhody a aplikace IH 9
2.4 Matematický popis 11
2.5 Induktor 12
3 Měření teplot pro indukční ohřev 14
3.1 Kontaktní měření 15
3.1.1 Termoelektrické senzory 16
3.1.2 Odporové snímače teploty 19
3.1.3 Termistory 20
3.2 Bezkontaktní měření teplot 22
3.2.1 Teorie pyrometrů 22
3.2.2 Úhrnné pyrometry 24
3.2.3 Emisivita 25
3.2.4 Poměrové pyrometry 26
4 Hardware 28
4.1 Měřicí kufr 29
4.2 Zdroj indukčního ohřevu 30
4.3 Senzory teplot 32
5 Software 34
5.1 Komunikace PG/PC 34
5.2 Uživatelské rozhraní 36
5.2.1 OPC klient 36
5.2.2 Vizualizace 37
5.2.3 Práce s daty 39
5.2.4 Shrnutí vlastností 40
5.3 Řídicí program PLC 41
5.3.1 Sběr dat, normalizace vstupů 42
5.3.2 Regulátor 43
5.3.3 Filtrace dat 45
6 Výsledky testování 46

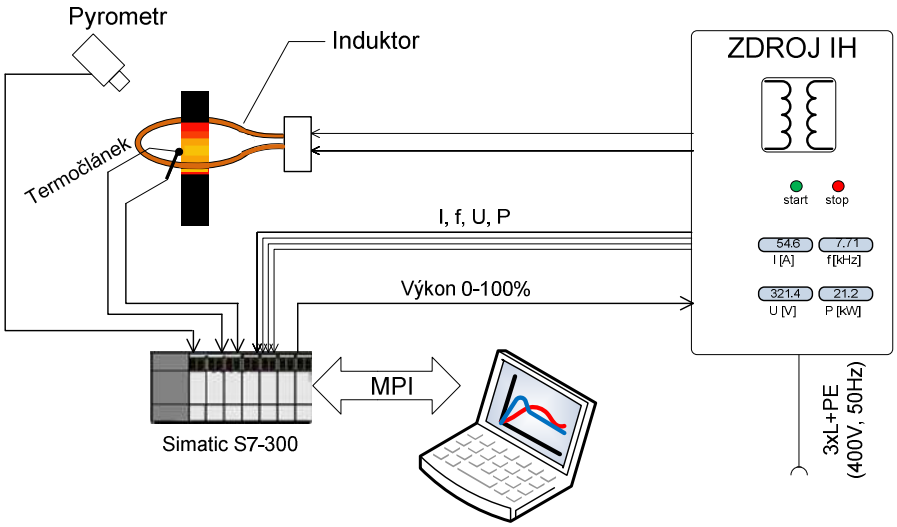
6.1 Měření teplot 47
6.2 Regulace 50
6.3 Vyhodnocení experimentálních testů 51
7 Závěr 53
Literatura 55
Seznam obrázků 56
A. Přehled termočlánků 58
B. Obsah přiloženého CD 60

1 Úvod

Indukční ohřev je tradiční technologie ohřevu kovových materiálu. S výhodou je používán v různých průmyslových odvětvích například při kalení, tváření, popouštění, vysoušení, lisování za tepla, předehřevech a mnoha dalších aplikací, kde se dokáže využít výhod velkých výkonů, nízké energetické náročnosti a relativně snadného řízení. Tyto přednosti dělají z indukčního ohřevu technologii populární nejen v oblasti průmyslu. Většina aplikací je integrována do výrobního procesu a vyžaduje automatizované řízení.

Jako zdroj indukčního ohřevu byl k dispozici středofrekvenční měnič kmitočtu, který slouží k přeměně využívané energie a je popsaný v kapitole 4.2. Výkon zdroje je možné řídit buď manuálně nebo analogovým napětím 0-10V. Měnič kmitočtu TM50/10, na který je tato práce koncipovaná nemá žádné možnosti měření ani regulace teplot. Cílem této práce je navrhnout a zrealizovat systém, který bude umožňovat měření teplot, vizualizaci a záznam jejich průběhů a k tomu zpětnovazebně řídit výkon zdroje pro indukční ohřev na základě měřené teploty. Měření teplot je potřebné nejen pro řízení samotné, ale také k prokázání průběhu procesu a s tím spojené kvality ohřevu. Teplotní rozsahy ohřívaných materiálů se mohou lišit v závislosti na aplikaci a to až do tisíců stupňů celsia. Existují aplikace náročné na senzory teploty z hlediska rychlosti měření. Zatímco pomalý ohřev může trvat desítky minut až hodiny, u těch nejrychlejších se jedná o změnu teploty stovek stupňů celsia během jednotek vteřin. Z toho vyplívá, že nemůže existovat jedno jediné universální řešení automatizovaného indukčního ohřevu pro všechny aplikace.

Na základě těchto požadavků vzešly tři základní vlastnosti, které musí navrhovaný systém splňovat. Zaprvé, zvolit takové metody měření teplot, které by byly dostačující jak nárokům na teplotní rozsahy, tak i rychlosti měření. Navrhnuté řešení by mělo být dostatečně modulární, aby bylo možné použít libovolný vhodný teplotní senzor pro danou aplikaci.



Obr. 1: Blokové schéma navrhovaného řídicího systému

Zadruhé, zaznamenat v čase jak měřenou teplotu, tak i další veličiny jako je frekvence, výkon, napětí a proud na primární části transformátoru měniče. Všechny tyto průběhy vhodně zaznamenané do grafu přináší technologovi informace ohledně průběhu ohřevu a finálních vlastností ohřívaného materiálu. Získanými daty lze prokázat dodržení požadovaného průběhu ohřevu a tím i příslušné kvality ohřívaného materiálu například dostatečné strmosti ohřevu a chladnutí při kalení ocelí. Zatřetí, implementovat regulaci teploty. Každý proces ohřevu je možné zadat teplotní křivkou v čase. Funkční hodnoty takové křivky reprezentují požadovanou hodnotu teploty v čase. Akční veličinou je výkon, který je v rozsahu 0-100% nastavitelný analogovým napětím 0-10V.

Výše zmíněné tři části jsou realizovány v rámci dvou mobilních zařízení. Tím prvním je běžný přenosný počítač s PCMCIA rozhraním, na kterém je spuštěný uživatelský program pro vizualizaci dat a ovládání regulátoru a zdroje. Druhým zařízením je přenosný technologický kufr obsahující programovatelný automat se senzory teploty zajišťují měřicí a řídicí část distribuovanou od uživatelského programu na PC. Zařízení komunikují prostřednictvím MPI rozhraní.

Celý systém by měl být universální nejen vůči vstupům, jako jsou senzory teploty a další měřené veličiny, ale také vzhledem k frekvenčnímu měniči a tím pádem k použitelnosti na jakémkoliv zdroji indukčního ohřevu regulovaném standardizovaným napěťovým nebo proudovým signálem. Dále by měla být splněna podmínka přehlednosti a intuitivnosti uživatelského rozhraní použitelného i nekvalifikovanými uživateli v oblasti automatizaci procesů.

V prvních dvou kapitolách je popsaný princip indukčního ohřevu a možnosti měření teplot se zaměřením na indukční ohřev. Další kapitoly jsou realizační a popisují celý systém rozdělený do tří částí, jak je naznačeno výše. Poslední kapitoly vyhodnocují navržené zařízení. Jsou zde uvedeny a vysvětleny výsledky reálných testů a vyhodnocení jednotlivých částí, stejně tak jako závěrečné shrnutí celého řídicího a měřicího systému a jeho možnosti použití v praxi. V celém textu se vyskytuje zkratka IH označující indukční ohřev převzatá z anglické termínu Induction Heating.

Tato diplomová práce vznikla na základě spolupráce s firmou Blumenbecker Prag, s.r.o., která poskytla námět a zajistila veškeré nezbytné materiální zázemí a ing. Janem Jágrem, který poskytl zdroj indukčního ohřevu a testovací vzorky.

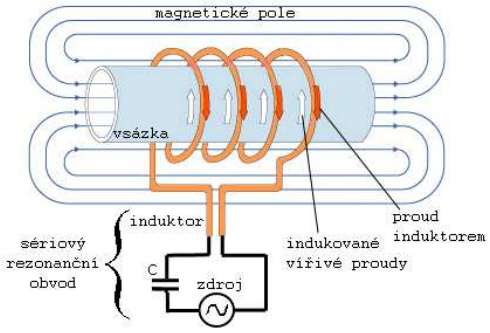
2 Indukční ohřev

Indukční ohřev je bezkontaktní proces ohřevu elektricky vodivých materiálů využívající střídavého elektromagnetického pole. Jelikož není nutný kontakt ohřívaného materiálu se zdrojem energie, nedochází k žádnému typu kontaminace způsobené technologií ohřevu. Vzhledem k tomu, že teplo vzniká ve skutečnosti až v ohřívaném předmětu, jedná se o velice efektivní metodu. Tyto a další důvody popsané v této kapitole dělají z indukčního ohřevu technologii, která je oproti konvenčním metodám ohřevů unikátní a v některých průmyslových aplikacích nenahraditelná.

Metoda IH (Induction Heating) je známá od začátku 20. století a ačkoliv značný rozvoj zaznamenala již během druhé světové války, teprve v posledních desetiletí dochází k velkému rozšíření této technologie. Děje se tak díky vývoji polovodičových prvků, které otevřely nové možnosti realizace frekvenčních měničů, jakožto zdrojů IH. Dnes je možné se setkat s celou řadou výkonů od kilowattových zdrojů určené pro pomalé ohřevy až po megawattové tavné pece pracujících na frekvencích desítek hertz až megahertz. Volba frekvence, výkonů a dalších parametrů IH se odvíjí od konkrétní aplikace (kalení, tavení, popouštění, vysoušení, atd.).

2.1 Princip indukčního ohřevu

Průchodem střídavého elektrického proudu vodičem vzniká odpovídající střídavé elektromagnetické pole. V každém elektricky vodivém materiálu umístěném do střídavého elektromagnetického pole se indukuje napětí. Toto napětí má za následek vznik vířivých proudů, které se ve vodivém materiálu uzavírají, a vzniklý ztrátový výkon je zdrojem tepla. Tím dochází k tomu, že k přeměně elektrické energie v tepelnou dochází až v ohřívaném objektu samotném. Ztráty energie mezi zdrojem IH a ohřívaným materiálem jsou minimální, z čehož vyplývá jedna z výhod IH, kterou je vysoká účinnost ohřevu. Ohřívaný vodivý předmět se nazývá vsázka. Vodič, kterým prochází budící proud se nazývá induktor a podrobněji se o něm pojednává v kap. 2.5. Induktivní charakter zátěže je kompenzován kondenzátory, zabudovanými v měniči, s nimiž zátěž vytváří sériový (v některých zdrojích paralelní) rezonanční obvod tak, jak je znázorněno na obr. 2.



Obr. 2: Schematicky znázorněný princip indukčního ohřevu

Změny parametrů během ohřevu

Ohřevem se samozřejmě mění fyzikální vlastnosti vodičů, a tím i velikosti proudů budicích i vířivých a další parametry. Interní regulátor kompenzuje tyto změny tím, že mění výstupní napětí a proud podle impedance zátěže. Stejně tak frekvence je regulovaná okolo své jmenovité hodnoty tak, aby bylo dosaženo rezonančního kmitočtu. Je tedy zřejmé, že tyto veličiny se při ohřevu budou měnit a ovlivňovat tím vlastnosti a kvalitu procesu. Zřejmě nejvýznamnějším parametrem ovlivňujícím vlastnosti materiálu je právě frekvence a s ní spojená hloubka vniku.

Hloubka vniku (hloubka prohřátí) *a* udává vzdálenost od povrchu ohřívaného objektu, kde dochází k indukování největší části (86,4%) tepla. Závisí na několika faktorech. Hloubka vniku se zmenšuje s klesající rezistivitou, rostoucí permeabilitou a rostoucí frekvencí, podle vztahu (1). Právě volbou frekvence se volí hloubka vniku, která se odvíjí od konkrétní aplikace. Při povrchových úpravách materiálů jako například povrchovém kalení je vysoká frekvence nezbytná. Naopak pro rovnoměrné prohřátí je vhodná nižší frekvence. K rovnoměrnému prohřátí válcové vsázky za nejkratší dobu je ekonomicky výhodné volit takovou frekvenci, která zajistí hloubku vniku 3,5 krát menší než je průměr vsázky [9].

$$\boldsymbol{a} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{2\rho}}{\boldsymbol{\omega\mu_0\mu_r}}} \tag{1}$$

a – hloubka vniku [m]

μ_0 – permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ [H·m^{-1}])

μ_r – poměrná permeabilita vsázky

ρ – měrný odpor [Ω·m]

ω – úhlová frekvence ($\omega = 2\pi f$ [rad])

K nejzásadnější změně vlastností feromagnetických materiálů dochází při překročení teploty tzv. Curieova bodu[1] (CB). Narušením pravidelného uspořádání elementárních dipólů dojde mimo jiné ke změně hloubky vniku, jak pro různé kmitočty znázorňuje tab. 1.

Tab. 1: Teoretické hodnoty hloubky vniku oceli a mědi pro různé kmitočty podle vztahu (1).

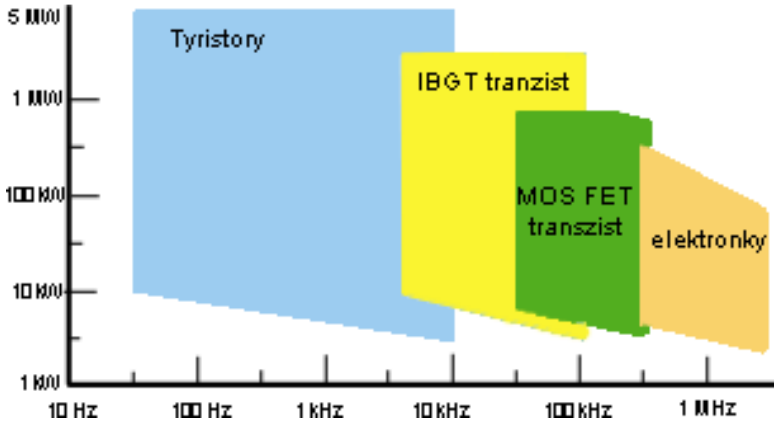
materiál	teplota	rezistivita [μΩ·m]	poměrná permeabilita	Hloubka vniku [mm]					
				50 Hz	500 Hz	5 kHz	50 kHz	500 kHz	5 MHz
ocel (feromag.)	20°C (pod CB)	0,16	50	4,03	1,27	0, 40	0,13	0,04	0,01
	800°C (nad CB)	1,2	1	77,97	24,66	7,80	2,47	0,78	0,25
měď (diamag.)	20°C	0,017	1	10,07	3,18	1,01	0,32	0,10	0,03
	600°C	0,085	1	59,55	18,83	5,96	1,88	0,60	0,19

[1] Curieův bod je teplota, při které u feromagnetických materiálů dochází ke ztrátě jejich feromagnetických vlastností. Při určité teplotě tím dojde ke skokové přeměně feromagnetik na paramagnetika (μ>>1 → μ=1). Teplota Curieova bodu je u různých materiálů různá, např. pro ocel t_C=740°C, kobalt t_C=1115°C, nikl t_C=354°C

Z tab. 1 je vidět, že rozdíl hloubky vniku u feromagnetické oceli mezi teplotou pod CB a nad CB je výraznější, než je rozdíl hloubky vniku u mědi. Je to dáno tím, že při překročení CB dochází u feromagnetik ke skokové změně poměrné permeability, která také ovlivňuje hloubku vniku. Dále je vidět, že například při povrchovém kalení, kdy je potřeba ohřát předmět na teplotu nad CB, dochází během procesu ohřevu k nežádoucí změně hloubky vniku. Teoreticky je to podle tab. 1 téměř 20krát. Proto je možné použít indukčního ohřevu pomocí dvojího kmitočtu. Touto problematikou se zabývá diplomová práce Milana Malíka [10].

2.2 Typy zdrojů IH

Hlavním prvkem zdroje IH je středofrekvenční měnič. Jak bylo naznačeno výše, každá aplikace IH má různé požadavky na výkon a frekvenci. Existují čtyři základní skupiny frekvenčních měničů využívající odlišných výkonových prvků. Pro jaké rozsahy výkonů a kmitočtu jsou jednotlivé typy použitelné a ekonomicky výhodné, naznačuje obr. 3.



Obr. 3: Rozdělení zdrojů IH podle použitých obvodových komponent měniče

První velkou skupinou jsou měniče s použitím tyristorů jako spínacích prvků. Díky schopnostem tyristorů spínat velké výkony jsou takové zdroje použitelné pro ohřevy mohutných těles, pro tavení a jiné aplikace, kde je zapotřebí velkého výkonu a relativně malých kmitočtů. Měniče kmitočtu s tyristorovými prvky jsou limitované rychlostí a oproti ostatním použitelným spínacím prvkům pomalé. Při středně a vysokých kmitočtech IH se v měničích používají bipolární transistory s izolovaným hradlem, tzv. IGBT. Jde o druh transistorů pro velký rozsah spínaných výkonů a vysokou pulzní frekvenci. Oblast vysokofrekvenčních zdrojů dále doplňují měniče postavené na MOS-FET tranzistorech. Tyto polem řízené unipolární tranzistory předurčují jejich zdrojům aplikace vysokých frekvencí při středních výkonech.

Metody řízení výkonů zdrojů

V naprosté většině případů, kde je využíváno ohřevu pomocí indukčního zdroje, je vyžadována možnost řídit velikost jeho výkonu. Byly vybrány tři nejčastěji vyskytované metody jak výkon měnit, které jsou popsány níže. O dalších způsobech řízení výkonu zdroje IH jako je odbočkami přizpůsobovacího transformátoru nebo změnou fázového posunu H-můstkem pojednává [3].

1. Změnou stejnosměrného napětí meziobvodu

Výkon frekvenčního měniče bůže být ovládán jeho napájecím napětím. Nastavitelné stejnosměrné napětí získané z řízeného usměrňovače využívajícího tyristorů ke změně napájecího napětí odvozeného ze síťového napájení. Impedance zátěže je při změně výkonu téměř konstantní, tudíž přenos výkonu měniče je přibližně úměrný druhé mocnině napájecího napětí. Výhodou je, že změnou řídicího napětí je možné plně řídit výkon zdroje v celém jeho rozsahu 0-100%.

Je nutné podotknout, že skutečný výkon v kilowattech závisí nejen na vstupním řídicím napětí, ale také na impedanci zátěže, která je z induktoru přizpůsobena prostřednictvím středofrekvenčního transformátoru. Z tohoto důvodu, je-li vyžadováno přesného řízení výkonu uplatněného v ohřívané vsázce, je potřeba skutečný výkon zdroje měřit, porovnávat jej s požadovaným výkonem nastaveným řídicím napětím a v rámci regulátoru tuto odchylku minimalizovat. Při ohřívání objektů bez měření teploty a zavedení zpětné vazby je tato kompenzace nezbytná. To z toho důvodu, že ohřívaný materiál podstatně mění svůj odpor s měnící se teplotou.

2. Pulsně šířkovou modulací

Výkon měniče může být ovládán obdélníkovým řídicím signálem, jehož střída určuje výkon zdroje. Proud induktorem teče jen v době, kdy je úroveň řídicího signálu jednotková. Změnou činitele plnění je možné regulovat výkon od 0 do 100%. Značnou nevýhodou této metody je spínání velkých proudů, proto se nepoužívají pro vysokovýkonné indukční zdroje.

3. Změnou provozní frekvence

Výkon poskytovaný měničem do cívky může být ovládán rozlaďováním měniče z jeho vlastního rezonančního kmitočtu laděného obvodu, jehož součástí je i induktor. Jakmile je provozní frekvence měniče vzdálena od rezonanční frekvence laděného obvodu, dojde k úbytku rezonančního zdvihu a proud induktorem klesá. Tudíž i velikost vířivých proudů indukovaných ve vsázce je menší a výkon zdroje je tak redukován.

Tato metoda řízení výkonu je velice jednoduchá, protože frekvenční měniče regulátor frekvence mají již zabudovaný kvůli ladění rezonanční frekvence pro různé induktory a vsázky. Nevýhodou této regulace je, že poskytuje řízení výkonů jen v omezeném rozsahu.

2.3 Výhody a aplikace IH

Jako důkaz výjimečnosti technologie IH jsou níže vybrány aplikace, ve kterých je použití IH výhodou a v některých případech i jediným možným řešením. Aplikace jsou vybrány tak, aby reprezentovaly nějakou z výhod IH:

Ohřev v ochranné atmosféře a ve vakuu. Některé materiály, jako jsou například hořčíkové slitiny, potřebují při tváření v teplotách nad 500°C ochranou atmosféru jinak by mohlo dojít k jejich vznícení. Ohřev ve vakuu se používá například k ochraně před zokujením a oduhličením povrchu oceli při kalení.

Lokální předehřev pro svařování rozměrných dílů. Při vhodně zvolenému induktoru je možné ohřát malou část velkého objektu, aniž by došlo k zbytečnému a často nežádoucímu ohřevu součástí, které nejsou svařovány.

Sériové ohřevy. Díky naprosto přesnému dávkování výkonu vyniká IH svou opakovatelností. Je tedy s výhodou používán při sériových ohřevech, předehřevech, kde je kladen důraz na přesnost dosažených teplot.

Ohřev pro povrchovou úpravu potrubí. Z důvodu maximalizace odolnosti vůči korozím jsou na vysokotlaká olejová a plynová potrubí nanášeny epoxidové polyetylenové ochranné vrstvy. Aby se zajistila dostatečná přilnavost nanášených vrstev, je vhodné trubky předehřívat. Rozměry ohřívaných rour se pohybují v rozmezí od 160mm až od 1000mm. Při změně rozměrů stačí vyměnit pouze induktor. Použitím indukčního ohřevu je zajištěno stálého, rovnoměrného prohřátí bez oxidace a jiného znečištění způsobené během ohřevu. [4]

Odstraňování barev a nečistot. Důkazem širokého použití IH je na rozdíl od předešlé aplikace nanášení naopak odstraňování vrstev barev, olejů a jiných nežádoucích povrchů.

Průběžný ohřev v sériové výrobě. Pomocí velkých výkonů a schopnosti IH ohřát materiál i o více než 1000°C za čas menší než jednu vteřinu, je indukční ohřev s výhodou používán ve výrobních linkách, kde je požadovaná vysoká produkce.

Existuje celá řada dalších výhod, které se uplatní ve všech aplikacích využívající IH:

Vysoká energetická efektivita. Jelikož vzniká teplo až v ohřívaném předmětu samotném, nedochází ke ztrátám přenosovou cestou. Ztráty vznikají pouze únikem tepla z ohřívaného objektu a ztrátami vzniklými v induktoru, kterým prochází velký proud. Ztráty zdroje jsou díky moderní polovodičové technice také minimální.

Nízké prostorové nároky. Velikost zdroje IH se liší hlavně podle jeho výkonu. Celé zařízení však zpravidla vyžaduje nejmenší rozměry v porovnání se zařízením ostatních metod ohřevu.

Snadná řiditelnost, integrovatelnost – dávkování výkonu je relativně přesné, oproti některým metodám ohřevu má IH v podstatě nulové dopravní zpoždění. Procesy s IH mohou být snadno řízené počítačem a proto jsou dobře integrovatelné do průmyslových aplikací.

Žádné chemické působení – ohřívaný materiál není vystaven žádnému působení látek vzniklých metodou ohřevu ani kontaktu s jiným materiálem, aby docházelo k nežádoucímu ovlivňování vlastností vsázky během ohřevu (na rozdíl od ohřevu plamenem)

Čisté pracovní podmínky – žádné znečištění kouřem nebo jinými agresivními látkami znečišťující okolní prostředí. Jediný hluk mohou generovat některé měniče na jmenovitých frekvencích v oblasti slyšitelnosti ve formě slabého pískání.

Použitelnost indukčního ohřevu je velmi široká a v průmyslu se stále častěji zavádí právě kvůli výhodám výše zmíněným. IH se v praxi používá při pájení, kalení popouštění, žíhání, tavení, svařování, zpracování za tepla, tváření, vysoušení nebo různé předehřevy pro všechny možné účely jako je kování za tepla, válcování, lisování, atd. Jak je vidět, aplikací pro IH je velké množství a každá z nich má různé průběhy teploty. Jakýkoliv ohřev je možné popsat grafem závislosti teploty na čase. Z pohledu řízení výkonu stačí zadat body odpovídající teplotám ve stanovených časech a regulovat výkon tak, aby měřená teplota odpovídala žádaným podle stanovených kritérií (rychlosti, přesnosti, překmitu, atp.). Názorným příkladem může být požadavek ohřevu materiálu při nanášení práškových stavovaných povlaků [5]. V této aplikaci je zapotřebí objekt předehřát na teplotu 180-230°C poté se nastříká vrstva 0,06 – 0,12 mm a bez poklesu předehřívací teploty je dílec ohřát na teplotu 720 – 780°C a nanese se zbytek povlaku při udržování konstantní teploty nad 720°C, aniž by došlo k překročení teploty 780°C. Poté následuje tepelné zhutnění. To probíhá ve vakuu, aby nedošlo k oxidaci základu a to při teplotě do 820°C. Po zhutnění je potřeba zajistit pomalé chladnutí až k teplotě 200°C, dále je možné zdroj IH vypnout a nechat materiál vychladnout samovolně.

Takováto aplikace IH je znázornitelná pomocí požadované teploty v čase jak je vidět na grafu (obr. 4). Pro jednotlivé časy definované teploty určují požadovanou teplotu a cílem regulátoru je řídit výkon zdroje IH, tak aby požadovaných teplot bylo dosaženo.

Obr. 4: Teplotní průběh ohřevu při nanášení práškových stavovaných povlaků

2.4 Matematický popis

Proces indukčního ohřevu lze popsat pomocí dvou nelineárních parciálních diferenciálních rovnic. První z nich (2) popisuje rozložení vzniklého elektromagnetického pole a může se s časem měnit. Druhá (3) popisuje nestacionární pole teplot. Řešení těchto rovnic, rozšiřitelné o další rovnice popisující roztavení či jiné deformaci ohřívaného materiálu, je velmi komplikované.

$$\boldsymbol{rot}\left(\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\mu}}\cdot \boldsymbol{rotA}\right)+\boldsymbol{\gamma}\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial \mathbf{t}}=\boldsymbol{J} \tag{2}$$

A – fázor vektorového potenciálu

J – fázor hustoty budícího proudu

$\gamma\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial \mathrm{t}}$ – hustota indukovaných vířivých proudů ve vsázce

γ – elektrická vodivost

μ – magnetická permeabilita

$$\boldsymbol{w_j}=\frac{\boldsymbol{j}\cdot\boldsymbol{j}}{\boldsymbol{\gamma}}=\boldsymbol{\gamma}\cdot\left(\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial \mathbf{t}}\right)^{\mathbf{2}} \tag{3}$$

w_j – Joulovy ztráty ve vsázce

Zásadním problémem je skutečnost, že koeficienty rovnic se mění s měnící se teplotou a magnetická permeabilita i s velikostí magnetického pole (v případě ohřevu feromagnetického materiálu). Stejně nesnadné je určení koeficientů popisující konvekci tepla neboli množství tepla vysálaného do okolního prostředí. Toto množství se mění s rozdílem teplot ohřívaného materiálu, ale závisí i jak na velikosti objektu, na jeho tvaru a povrchu.

Řešení matematického popisu bývá tak výpočetně složité, že řešení je získáno v nepřijatelně dlouhém čase. Nebo naopak je postup řešení natolik zjednodušen, že výsledky dosahují nepřípustně velkých chyb. Jedno takové zjednodušené řešení se využívá *slabě sdružené formulace*, kde se nejprve vyřeší rovnice rozložení pole s materiálovými vlastnostmi odpovídajícími předpokládaným středním teplotám. Z toho se vyřeší rozložení měrných ztrát ve vsázce, které se předpokládá za konstantní, a poté se řeší rovnice popisující nestacionární teplotní pole. Tato metoda dělá problém relativně snadno řešitelným díky tomu, že se řeší každá z rovnic zvlášť, avšak v některých případech s nepoužitelně nepřesným výsledkem. Příkladem může být aplikace kalení, kdy je vsázka ohřívaná k teplotám v okolí Curieova bodu. Při jeho překročení permeabilita materiálu klesne i z několika stovek k jedné, zatímco rovnice rozložení elektromagnetického pole, potažmo celý výsledek, uvažuje hodnotu permeability konstantní.

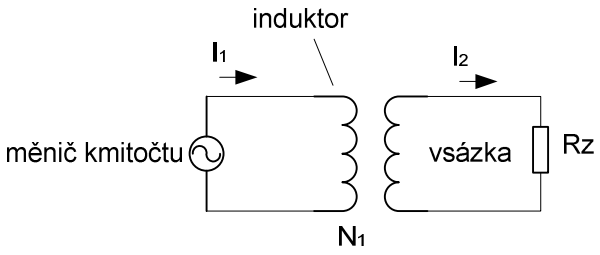
Metoda *kvazi sdružené formulace* je, co se týče vlivu změny parametrů během procesu ohřevu na přesnost řešení, jednoznačně lepší. Výpočet se totiž provádí iterativně, kdy v každém kroku iterace se přepočítá elektromagnetické pole (2) z aktuálních parametrů magnetické permeability μ a elektrické vodivosti γ. Na základě tohoto výsledku se potom počítá teplotní pole ve vsázce (3) až do

té doby, kdy se změní teplota vsázky o ΔT. Poté se zaktualizují parametry μ a γ, které jsou na teplotě závislé, a celý postup se opakuje. Při tomto řešení je nutné vhodně zvolit ΔT, přičemž jeho menší hodnota zajistí častější aktualizaci parametrů a tudíž větší přesnost výpočtu, ale na úkor výpočetní náročnosti.

Řešit matematické modelování není předmětem této diplomové práce. Podrobněji se touto problematikou zabývají publikace [6] a [8].

2.5 Induktor

Nedílnou součástí zdroje indukčního ohřevu je induktor. Jak již bylo dříve zmíněno, jedná se o koncovou část zdroje, kterou prochází relativně velký střídavý proud generovaný měničem kmitočtu, v jehož okolí se vytváří elektromagnetické pole. Představíme-li si indukční zdroj jako transformátor, potom induktor tvoří jeho primární část a vsázka je sekundární část spojená nakrátko. Na základě této představy se při návrhu induktorů využívají některé vlastnosti známé z návrhů transformátorů.



Obr. 5: Elektrický obvod představující analogii mezi principy zdroje indukčního ohřevu a transformátorem. N1-počet závitů induktoru; Rz-odpor vsázky; I_1-budící proud induktorem; I_2-indukovaný proud ve vsázce

Induktor bývá vyroben z tlustého dutého měděného vodiče, kterým protéká chladicí kapalina. Induktory jsou v podstatě masivní cívky, které vytváří potřebné elektromagnetické pole. Používají se induktory různých tvarů podle ohřívaného materiálu tak, aby byla zaručena co nejtěsnější elektromagnetická indukční vazba mezi jím a ohřívaným předmětem. Při ohřívání dlouhých předmětů jako jsou trubky, válce, atp. mohou být závity induktorů vyplněny měděným pláštěm. Ten zlepšuje odvod tepla a pro velké průměry induktorů funguje jako konstrukce. Výhodou je, že induktor není v kontaktu s ohřívaným materiálem, a proto mohou být dimenzovány na nižší teploty, než na které je předmět ohříván.

Návrh induktoru

Účinnost indukčního ohřevu závisí především na vhodném impedančním přizpůsobení induktoru zatěžovací impedanci měniče a na zvoleném tvaru induktoru. Snahou je navrhnout induktor tak, aby byl v co nejtěsnější vazbě s ohřívaným materiálem. U válcových předmětů je situace jednoduchá. Tam se jedná o klasické jedno či vícezávitové kruhové induktory různých průměrů a tloušťek podle

konkrétní aplikace. Složitější návrh je u induktorů pro ohřev plochých předmětů, např. předehřev plechů při svařování nebo ohřev libovolných různorodých tvarů.

Vliv průměru kruhového induktoru na účinnost ohřevu válcových těles lze odhadnout podle přibližného vztahu (4) převzatého z [9].

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1} + \frac{\boldsymbol{D^2}}{\boldsymbol{d^2}}\left(\mathbf{1} + \mathbf{6,25}\frac{\boldsymbol{a^2}}{\boldsymbol{d^2}}\right)\sqrt{\frac{\boldsymbol{\rho_1}}{\boldsymbol{\mu_r \rho_2}}}} \tag{4}$$

D – průměr induktoru [m]

d – průměr vsázky válcového tvaru [m]

a – hloubka vniku [m]

ρ_1 – měrný odpor induktoru [Ω·m]

ρ_2 – měrný odpor vsázky [Ω·m]

μ_r – poměrná permeabilita

Je tedy zřejmé, že pro maximální účinnost ohřevu je potřeba volit průměr induktoru tak, aby dostatečně blízko obklopoval ohřívaný objekt. Čím je však vzdálenost induktoru od vsázky menší, tím větší je zpětný ohřev induktoru při vysokých teplotách vsázky. Volba průměru induktoru je tedy určitým kompromisem mezi účinností ohřevu a odvody tepla z induktoru. Nic na tom, že vhodně zvolený tvar induktoru nezajistí vysokou účinnost zdroje samo osobě. Jak již bylo zmíněno, jedním z parametrů zásadně ovlivňujících účinnost zdroje je impedanční přizpůsobení induktoru. Návrhem induktorů se podrobně zabývá publikace [11].

3 Měření teplot pro indukční ohřev

Teplota je po veličině času údajně druhou nejčastěji měřenou fyzikální veličinou vůbec. Na rozdíl od ostatních fyzikálních veličin má teplota jistá specifika, která z ní dělají veličinu nesnadno měřitelnou. I přesto, že je dnes nezbytné měřit teplotu v téměř všech průmyslových, chemických, výrobních a jiných oblastech, neexistuje žádná exaktní metoda, pomocí níž by bylo možné měřit teplotu v celém jejím rozsahu. Teplota je totiž na rozdíl od ostatních extenzivních veličin základní soustavy SI veličinou intenzivní. To znamená, že teplotu nelze měřit přímo, resp. přímým srovnáním s nějakým vzorkem nebo etanolem známé velikosti nebo vzájemným porovnáním jako získáme například velikost délky porovnáním měřeného předmětu a délkového měřidla.

Proto se teplota musí měřit nepřímo, jinými slovy převodem na nějakou jinou fyzikální veličinu, která mění svou velikost v závislosti na teplotě. Může se jednat o napětí v případě termočlánku nebo objem v případě rtuťových teploměrů. V současné době je možné se setkat s těmito druhy teploměrů:

- Kapalinové – k měření teploty se využívá tepelné roztažnosti kapalin nejčastěji rtuti a lihu.
- Plynové – teploměr, u kterého se buď při konstantním tlaku měří objem plynu, nebo naopak je zajištěno konstantního objemu a měří se tlak měnící se v závislosti na změně teploty.
- Bimetalové – dva kovy o různém součiniteli teplotní roztažnosti tvoří bimetalový pásek. Změnou teploty se pásek ohýbá a tento pohyb je přenesen na ručičku přístroje. Tyto přístroje jsou přenosné a nevyžadují napájení, avšak nejsou tak přesné jako termočlánky nebo odporové teploměry a nehodí se k pohotovému záznamu teploty.
- Odporové – využívají závislosti elektrického odporu vodiče (odporové kovové senzory) nebo polovodiče (termistory) na změnu teploty
- Termoelektrické – dva kovy nebo slitiny kovů zapojené do série tvoří v místech spojů dvě rozhraní. Je-li teplota těchto spojů různá, vzniká termoelektrické napětí, které odpovídá rozdílu teplot těchto rozhraní.
- Radiační – měří množství tepelné radiace vyzařované měřeným objektem na základě Planckova vyzařovacího zákona.
- Teploměry se změnou stavu – nálepky, laky, tekuté krystaly, teplotní křídy a jiné materiály, které jsou naneseny nebo nalepeny přímo na měřený materiál. Při dosažení určité předem známé teploty dojde k okem pozorovatelné změně. Doba odezvy bývá i několik minut, takže nezaznamenávají přechodné změny teplot. Jejich přesnost je ze všech uvedených senzorů nejmenší. Změna stavu bývá často nevratná (vyjma provedení políček s tekutými krystaly), a proto své uplatnění najdou například při prokazování, že teplota materiálu nebo jeho části během procesu ohřevu nepřekročila nějakou teplotní mez.

Tab. 2: Přehled metod měření teplot jejich principů a orientačních rozsahů.

typ senzoru	princip	Teplotní rozsah [°C]
kapalinový	změna objemu	-200 až 750
plynový	změna tlaku	-5 až 500
bimetalový	různá teplotní roztažnost	-70 až 600
odporové-kovové	změna odporu ve vodiči	-250 až 1000
termistory	změna odporu v polovodiči	-200 až 400
termoelektrické	termoelektrický jev	-200 až 2300
radiační	tepelné záření	-40 až 5000
teploměry se změnou stavu	změna barvy, skupenství	-10 až 1350

Mezi výše uvedenými druhy senzorů teploty jsou tři zástupci, kterých se v průmyslu běžně používá a jsou vhodné i při měření teplot indukčního ohřevu.

- Odporové senzory
- Termoelektrické senzory
- Radiační senzory

Podrobně jsou tyto zástupci, jejich vlastnosti, principy měření, výhody a možnosti uplatnění popsány níže v samostatných podkapitolách. Každá aplikace má svá specifika a požadavky a vždy je nutné uvědomit si, jaké vlastnosti jsou pro daný případ přednější a podle toho zvolit vhodnou metodu měření a příslušný typ senzoru vybraný podle rozsahů, doby odezvy, přesnosti, atp. Často je použito více senzorů, někdy i různých metod. Tím se zkombinují výhody použitých snímačů a měření tak může být přesnější. Vhodně vybraný senzor je nutné zabudovat do technologie tak, aby měřil správně teplotu požadovaného místa a byly minimalizované rušivé vlivy ovlivňující měření.

3.1 Kontaktní měření

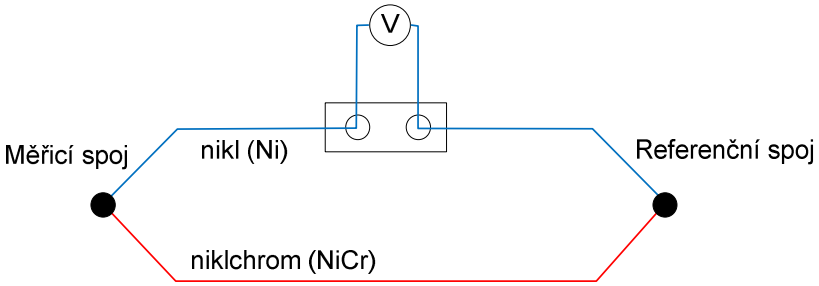
Dříve jediným možný, dnes stále častým měřením teplot v průmyslu jsou kontaktní metody, kdy čidlo je v přímém styku s ohřívaným médiem. Druhy senzorů se dělí podle technologie, které využívají k přeměně teplotní změny na měřitelnou elektrickou veličinu. V zásadě se dělí na kovové nebo polovodičové odporové senzory a termoelektrické články. Jejich největší výhodou je jednak cena, která je zlomkem ceny nejlevnějšího bezkontaktního senzoru, a také přímý styk s měřeným médiem, čímž se eliminují chyby špatně nastavené nebo měnící se emisivity u pyrometrů. Jednou z nevětších jejich nevýhod je téměř nemožné měření pohybujících se objektů například při sériovém tváření v automatizované lince.

Tab. 3: Srovnávací tabulka charakteristických vlastností vybraných kontaktních senzorů.

	Termočlánek	Odporový kovový	Termistor
výhody	• Největší teplotní rozsah • Levný • Mechanicky odolný • Přímá navařitelnost, napájitelnost	• Opakovatelnost • Přesnost • Větší linearita • Dobrá zaměnitelnost • Větší citlivost než termočlánek	• Vysoká citlivost,přesnost • Rychlá doba odezvy • Možnost velmi malého měřicího hrotu
nevýhody	• Nutná teplotní stabilizace referenčního spoje • Menší citlivost • Menší stabilita	• Relativně vyšší cena • Samoohřev měřicím proudem • Potřeba stabilizovaného napájecího zdroje • Menší změna odporu než termistor při stejném proudu	• Značná nelinearita • Malé teplotní rozsahy • Ohřev měřicím proudem • Časová nestálost

3.1.1 Termoelektrické senzory

Dva vodiče z vhodných materiálů spojených do série vytváří tzv. referenční (někdy neodborně nazývaný studený) konec a měřicí (teplý) konec. Při rozdílu teploty těchto konců na nich vzniká různý potenciál. Projevuje se tzv. Seebeckův jev a vzniká termoelektrické napětí úměrné velikosti rozdílů teplot na referenčním a měřicím konci termočlánku.

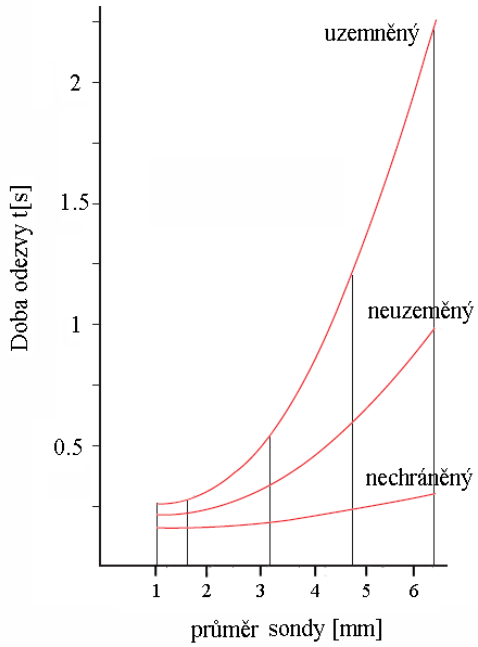


Obr. 6: Principielní zapojení termočlánku typu K

Nutno zdůraznit, že hodnota termoelektrického napětí odpovídá rozdílů teplot, nikoliv absolutní teplotě měřeného objektu. Teplota srovnávacího spoje má tudíž významný vliv na napětí měřené na termočlánku. Jsou tři způsoby jak tento vliv podchytit. Při prvním způsobu je tato teplota udržována na stálé (známé) výši, např. v termostatu, případně ve směsi ledové tříště a destilované vody, což je velmi přesný, ale nepříliš praktický způsob. Dalším způsobem je použití kompenzačního zapojení, kdy napětí kompenzuje elektrický obvod, který je navržen tak, aby korigoval odchylku napětí způsobenou změnou teploty srovnávacího spoje. Lze použít kompenzačního můstku nebo zapojení s PN přechodem. Posledním způsobem, užívaným například u měřicích ústředen je číslicová korekce.

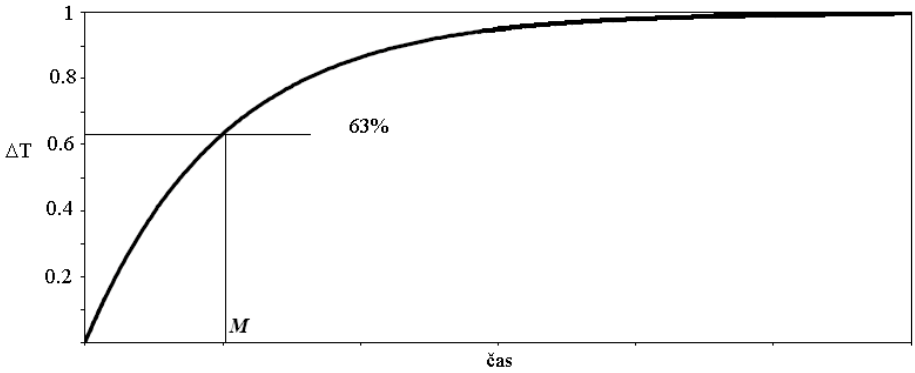
Srovnávací spoje jsou vyvedeny na tzv. izotermickou svorkovnici, jejíž teplota je měřena odporovým nebo PN snímačem a korekci pak stanoví měřicí systém výpočtem.

Citlivost termočlánků lze zvýšit sériovým zapojením. Kolik termočlánků je v sérii, tolikrát větší napětí se získá. Takový termočlánek se nazývá sériový nebo násobný. Termočlánky se vyrábí v různých kombinacích kovů a kalibracích. Jednotlivé typy se liší v rozsahu měřených teplot, přesnosti, rychlosti odezvy, pracovních podmínek atp. Termočlánky se dále liší podle provedení měřicího spoje na uzemněný, neuzemněný a nechráněný. Pro rychlé ohřevy, u kterých může být spoj vystrčen vně koncového pláště a vystaven tak okolnímu prostředí (suché, nekorozivní, beztlaké aplikace), je vhodné použít nechráněného provedení kvůli nejkratší době odezvy. Porovnání jednotlivých provedení společně s vlivem velikosti termočlánkové sondy na dobu odezvy je znázorněn v grafu na obr. 7.



Obr. 7: Vliv průměru pláště termočlánkové sondy a její provedení na dobu odezvy vodě.

Doba odezvy nebo také časová konstanta termočlánků je definována jako doba, za kterou dosáhne výstup termočlánku hodnoty odpovídající 63% velikosti změny teploty měřeného objektu (obr. 8). Za dosažení 100% hodnoty se považuje čas pěti časových konstant. Doba odezvy není u termočlánků primární parametr. Doba odezvy až příliš záleží na měřeném materiálu, jeho tepelné kapacitě a taky na připevnění. Je-li doba odezvy v katalogu uvedena, pohybuje se v řádu desítek až spodních stovek milisekund. Pro velmi rychlé procesy existují senzory s dobou odezvy v řádu jednotek milisekund. Jejich rychlost je však vykoupena sníženým rozsahem teplot a mechanické odolnosti (např. termočlánek typu K: do 650°C, M=2-5ms, tloušťka termočlánkové fólie 0,013mm, katalogová cena 850,- kč).



Obr. 8: Reakce čidla na jednotkový skok teploty. M - časová konstanta čidla.

$$\boldsymbol{\Delta T(t) = (1 - e^{-t \cdot M})} \tag{5}$$

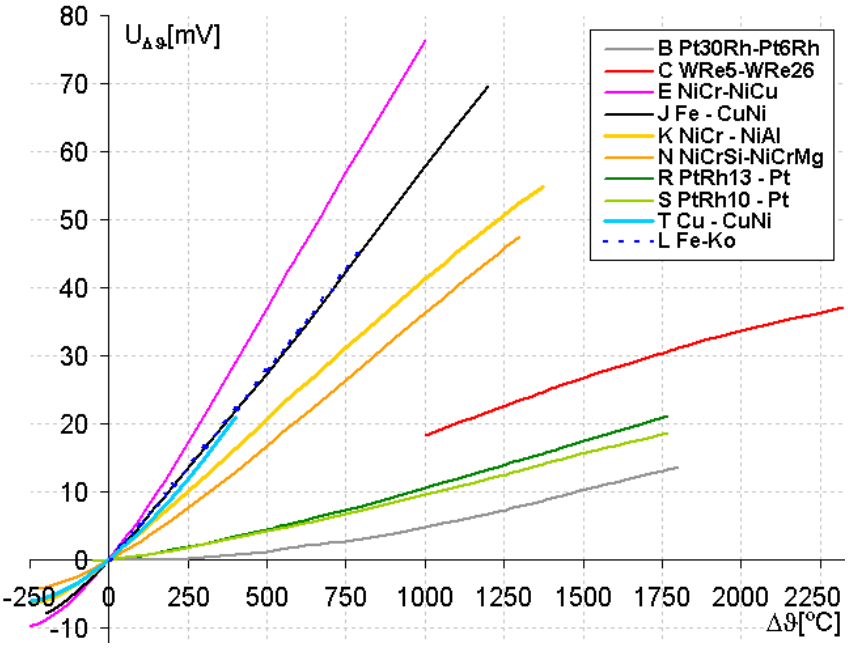
Představitelé termočlánků s nechráněným spojem jsou tzv. drátové termočlánky. Jedná se o nejjednodušší typ čidla, kde konce termočlánkového drátu bývají spojené do kuličky a připevněné přímo na měřený objekt připájením, přivařením atp. V takovém případě je nutné zajistit co nejmenší teplotní spád mezi povrchem a bezprostředním okolím měřicího konce termočlánku k němu připojeného. Vhodné je vést vodiče termočlánku při povrchu v blízkosti měřicího konce, kde je teplota blízká té měřené, čímž se minimalizuje chyba způsobená odvodem tepla z měřicího konce. Drátové termočlánky nejsou sice vhodné pro některé typy měření, jako například při měření ve vlhkém prostředí nebo materiálů s přímým připojením k elektrickým systémům, přesto díky jejich krátké době odezvy najdou uplatnění například pro měření teplot při indukčních ohřevech.

Je-li měřicí spoj termočlánku umístěn do kovové trubice, jde o termočlánkovou sondu. Stěna trubice se nazývá pláštěm sondy a je většinou z nerezavějící oceli pro její dobré chemické odolnosti nebo Inconelu pro větší teplotní rozsahy. V případě uzemněné sondy je termočlánkový vodič spojen s jejím pláštěm a v porovnání s neuzemněnou sondou má kratší dobu odezvy, ale je velice citlivý na uzemněné měřící elektrické smyčky.

Pro měření povrchových teplot, kde je zapotřebí dokonalá přilnavost čidla s měřeným objektem a není možné senzor navařit, jsou vhodné speciální sondy pro měření povrchů. Je využito termočlánků z tenkých ohebných pružných kovů a mohou být umístěné i na rotujících mechanismech. Další možností je magnetické uchycování, které ovšem nefunguje na všech materiálech za všech okolností, jako je ztráta magnetických vlastností po překročení Curieho teploty. U termočlánků se s výhodou používá možnost navaření termočlánkového drátu přímo na měřený objekt, což zajišťuje dobrý přenos tepla a krátkou dobu odezvy.

K vyhodnocování výstupu z termočlánku je možné použít jednoduchého dvouvodičového proudového převodníku s výstupem 4-20mA nebo převodu na číslicový signál pomocí A/D převodníku. Výstup z termočlánku je také možné připojit do vstupu zařízení, které převod malých termoelektrických napětí zajistí a dále zpracují, jako jsou například programovatelné automaty. Pro

připojování termočlánkových snímačů slouží prodlužovací vedení, které je u levnějších typů termočlánků typu J nebo K tvořeno samotným termočlánkovým vodičem. Pro dražší typy za účelem minimalizace rušení naindukovaného k malému termoelektrickému napětí se pak používá speciální kompenzační vedení.



Obr. 9: Závislost výstupního napětí různých termočlánků na teplotě.

Termoelektrické napětí vzniklé na termočlánku vlivem rozdílných teplot na měřicím a referenčním spoji se vypočte podle empiricky zjištěného vztahu (6).

$$E_{AB} = (a_A - a_B)\,(T_2 - T_1) + 0{,}5\,(b_A - b_B)\,(T_2 - T_1)^2 \qquad (6)$$

E_{AB} – elektromotorické napětí

a, b – Seebeckovy koeficienty materiálu A, B

T_1, T_2 – teplota měřicího, referenčního spoje

Typy termočlánků, jejich materiálové složení, teplotní rozsahy, chyby a možné pracovní prostředí je uvedeno v tabulce tab. 8 umístěné v příloze A. Použití termočlánků je jednoduché, jsou mechanicky i teplotně odolné, mají široké rozmezí teplot, malou setrvačnost a jsou cenově velmi dostupné.

3.1.2 Odporové snímače teploty

Princip měření vychází z vlastnosti všech vodivých materiálů a to závislosti elektrického odporu na teplotě. Závislost teploty na měřeném odporu je možné vyjádřit polynomem (7). Odporové elementy bývají tvořeny tenkým drátkem navinutým kolem keramického nebo skleněného tělíska. Pro zlepšení mechanické odolnosti se odporový element umisťuje do ochranné sondy. K realizaci odporových snímačů se používají především čisté kovy jako je platina, měď nebo nikl, které vykazují dostatečně

velký a stálý teplotní součinitel. Nejčastěji se vyskytují platinové senzory díky její chemické čistotě a stálosti. Nikl je chemicky méně stálý a proto niklové senzory mají omezený teplotní rozsah a pro větší teploty mění krystalickou strukturu. Zato jsou citlivější než platinové.

$$\boldsymbol{R = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 + \cdots]} \tag{7}$$

A, B, C – teplotní součinitel

Jak je vidět z rovnice (7), závislost teploty na odporu není lineární. Daný vztah je možné linearizovat okolo pracovního bodu, čímž se získá vztah (8).

$$\boldsymbol{R = R_0[1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)]} \tag{8}$$

α – teplotní součinitel definovaného pracovního bodu T_0

$$\boldsymbol{\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta T}} \tag{9}$$

Tab. 4: Tabulka materiálů k výrobě odporových snímačů teploty

Materiál	Teplotní součinitel α [10^{-3} K^{-1}]	Rozsahy teplot [°C]
Platina (Pt)	3,85 - 3,93	-200 až 850
Nikl (Ni)	6,17 - 6,70	-60 až 200
Měď (Cu)	4,26 - 4,33	-50 až 150

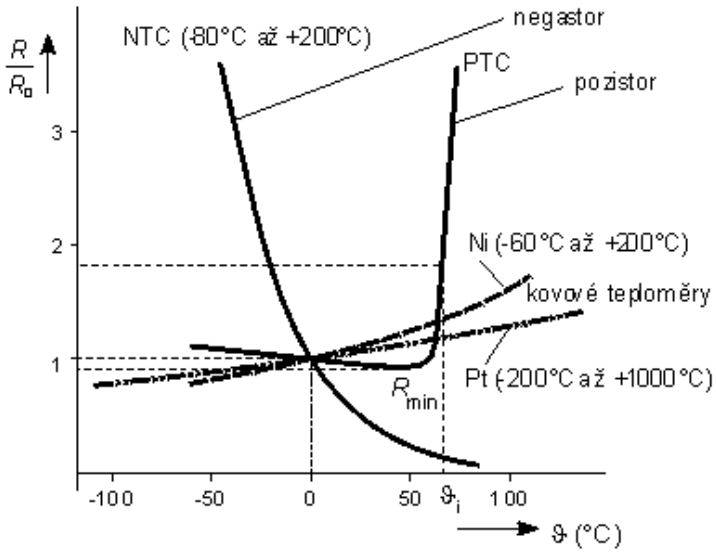
Obecnými výhodami odporových snímačů je dobrá mechanická odolnost, velký teplotní rozsah, přesnost, odolnost vůči vibracím a elektrickému rušení díky stínění nebo dlouhá životnost. Odporové snímače teploty jsou s výhodou používány tam, kde je potřeba vysoké opakovatelnosti a přesnosti. Dále jsou relativně dobře imunní vůči elektrickému rušení, a proto jsou často používané ve výrobě, kde je potřeba v blízkosti motorů, generátorů a jiných vysokonapěťových zařízení měřit teplotu.

Podle přesnosti se tyto snímače dělí do tří tříd: třída přesnosti A s tolerancí 0,15°C, třída přesnosti B s tolerancí 0,30°C a třída přesnosti C s tolerancí 0,60°C. Všechny uvedené tolerance platí pro teplotu 0°C. Na základě těchto definovaných tolerancí jsou dobře zaměnitelné. Při nasazování senzorů jistých tolerančních tříd je možné garantovat měření s určitou chybou, aniž by se musela ověřovat přesnost jednotlivých senzorů. Aby nebyla hodnota odporu stanovující měřenou teplotu zkreslena odporem přívodních vodičů, používá se 3vodičové, popřípadě 4vodičové zapojení eliminující navíc i chybu teploty okolí.

3.1.3 Termistory

Podobně jako kovové odporové snímače teploty i termistory využívají závislosti odporu jistých materiálů na teplotě. Tentokrát se ovšem jedná o materiály polovodičové. S tím jsou spjaty některé rozdíly oproti kovovým odporovým snímačům. Termistory mají obvykle negativní teplotní součinitel, větší citlivost na změnu teploty a tedy i přesnost, ale nevýhodou jsou malé rozsahy teplot.

Existují dva typy termistorů. První je vyznačen kladným teplotním součinitelem odporu, odtud pozistor (PTC). PTC Jsou specifické prudkým nárůstem odporu po překročení určité teploty (obr. 10), proto jsou používané především pro signalizaci dosažení teplotního limitu. Druhým, častěji používaným typem, jsou termistory s negativním teplotním součinitelem odporu, nazývané negastory (NTC). Z následujícího grafu (obr. 10), kde jsou porovnané kovové odporové snímače s termistory, jsou patrné dvě základní vlastnosti termistorů. Jednak je to značná nelinearita a také velmi malý rozsah měřitelných teplot. U negastoru stojí za zmínku velká citlivost znázorněná prudkým poklesem odporu v porovnání s kovovými teploměry.



Obr. 10: Srovnání závislosti oporu na teplotě termistorů (negastor, pozistor) a kovových odporových senzorů. Převzato z [7].

Pro měření teplot při indukčním ohřevu jsou termistory nejméně vhodným senzorem z výše uvedených právě kvůli malým teplotním rozsahům. Většina ohřevů pomocí IH totiž přesahuje horní hranici rozsahu termistorů (200°C) několikanásobně. Přesnost desetin stupňů je sice velkou výhodou termistorů, nicméně pro aplikace IH, kde se pohybuje teplota v řádech stovek až tisíců stupňů celsia, přínosnou v podstatě není.

3.2 Bezkontaktní měření teplot

Ať jsou výše zmíněné kontaktní teploměry více či méně rychlé nebo přesné, v okamžiku, kdy je v praxi nezbytné měřit teplotu pohybujícího se objektu, jsou kontaktní senzory takřka nepoužitelné. Jiná aplikace může vyžadovat měřit teplotu v dlouhém mnohazávitovém induktoru, kde je dostupnost přívodních vodičů kontaktních senzorů velmi ztížená nebo přímo nereálná.

Výhoda bezkontaktních senzorů není jen v možnosti měřit teplotu na pohybujících se nebo těžko dostupných místech. Distančním měření je možné eliminovat chyby specifické pro kontaktní měření způsobené nedokonalým tepelným přenosem mezi měřeným objektem a čidlem, šumem indukovaným v přívodních vodičích nebo působením okolních elektromagnetických polí a jiných zdrojů způsobujících rušení. Navíc oblast měřených teplot je možné změnit pouhým natočením pyrometru, což je nesrovnatelně snazší v porovnání s přemisťováním přivařeného nebo přilepeného termočlánku. Výběrem pyrometru s vhodným zorným polem a nastavením vzdálenosti od objektu je možné stanovit velikost snímané plochy. Nutno podotknout, že tato vlastnost, tedy měření teploty z plochy, se může volbou pyrometru s nevhodným zorným polem stát nevýhodou.

Doba odezvy běžných pyrometrů se pohybuje od 10ms, běžně okolo 100-250ms. Existují i speciální pyrometry s extrémně krátkou dobou odezvy v řádech desítek mikrosekund jako je MI-KF740-HS od firmy Mikron s dobou odezvy 6μs [13].

3.2.1 Teorie pyrometrů

Jakákoliv hmota živá nebo neživá, pevné, kapalné, plynné látky trvale vyzařují energii ve formě radiace v širokém pásmu viditelného i neviditelného spektra. Intenzita záření závisí na vnitřním mechanickém pohybu molekul, který je úměrný teplotě objektu. Při pohybu molekul se přemisťuje i náboj, proto se hovoří o elektromagnetickém záření. Pyrometr pracují na principu měření energie vyzářené pozorovaným objektem na základě Stefan-Bolzmannova zákona. Ten uvažuje intenzitu absolutně černého tělesa a podle tohoto zákona je intenzita závislá na čtvrté mocnině teploty. Doplněním vztahu o emisivitu (viz. 3.2.3) vznikne vztah (10) pro výpočet intenzity záření reálného tělesa.

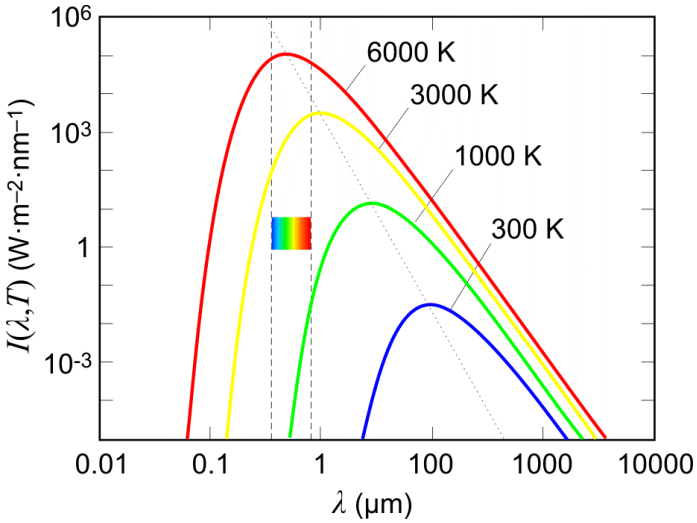
$$\boldsymbol{I = \varepsilon \sigma T^4} \tag{10}$$

ε – emisivita povrchu zářícího tělesa

σ – Stefan-Bolzmannova konstanta $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

T –termodynamická teplota [K]

Wienův zákona říká, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje. Jinými slovy, čím je měřený objekt teplejší, tím kratší jsou vlnové délky jeho záření. Wienův zákon ilustruje graf na obr. 11.



Obr. 11: Wienův zákon o posunu vlnových délek záření v závislosti na rostoucí teplotě.

Pyrometry je možné dělit podle několika parametrů. Podle vlnových délek, jejichž intenzitu měří, se dělí na:

- **Úzkopásmové** – pracují s úzkým pásmem vlnových délek. To znamená, že umí detekovat záření jen určité malé části spektra. Úzkopásmové pyrometry používají selektivních filtrů, aby omezily svoji odezvu jen na vybranou oblast vlnových délek. Výhodou těchto pyrometrů je schopnost potlačit záření vlnových délek, které by způsobovaly nepřesnost měření. Například potlačení vlnových délek 8-14μm k vyloučení interference s atmosférickou vlhkostí při dlouhé dráze paprsků. Úzkopásmové pyrometry obvykle používají pásmo vlnových délek menších než 1μm a jsou vhodné pro měření vysokých teplot. Kvůli posunu vlnové délky energie záření s měnicí se teplotou (Wienův zákon) mívají úzkopásmové pyrometry malý teplotní rozsah.
- **Širokopásmové (úhrnné)** – nejběžněji se vyskytující pyrometry měřící podstatnou část vyzařované energie objektem v širokém pásmu spektra. Pracují s vlnovými délkami v rozsahu 0,3μm až 20μm. Rozsah spektra závisí na použitém optickém systému. Podrobněji jsou úhrnné pyrometry popsané v samostatné podkapitole 3.2.2.
- **Poměrové** – měří energii vyzařovanou objektem na dvou úzkých pásmech spektra a počítají poměr těchto energií. Jejich velkou výhodou je to, že výsledná teplota není odvozena z absolutní hodnoty naměřené energie, ale z jejího poměru. Více o principu, výhodách a vlastnostech těchto pyrometrů v kapitole 3.2.4.

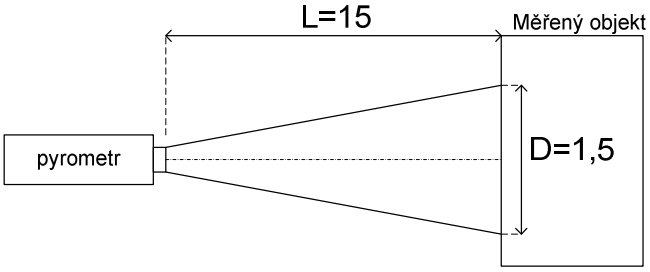
Podle provedení se dělí pyrometry na:

- statické – zpravidla se skládají ze dvou částí: snímací a vyhodnocovací. Používají se v průmyslu, zaměřují staticky jeden bod nebo mohou být připevněny na pohyblivý mechanismus. Jejich pouzdro je z mechanicky odolného materiálu a mají analogový popř.

digitální výstup. Emisivita, alarmy a další nastavení se často provádí mechanicky uvnitř pouzdra, jelikož se nepředpokládá časté přenastavování.

- kompaktní – přenosné pyrometry, bývají ve tvaru pistole pro snadnou manipulaci při měření, mají displej a jsou vybaveny tlačítky na kompletní nastavování a obsluhu přístroje.

Optický systém mívá pevně nastavenou ohniskovou vzdálenost. Ohnisková vzdálenost je definovaná zorným úhlem a udává, jak velká bude snímaná plocha na objektu snímaném z určité vzdálenosti. Některé pyrometry mohou mít laserové světlo, které napomáhá při zaměřování měřeného bodu. U těch nejlepších je laserem vytyčena celá zachycená oblast, která se pochopitelně mění s měnící se vzdáleností mezi pyrometrem a měřeným předmětem.



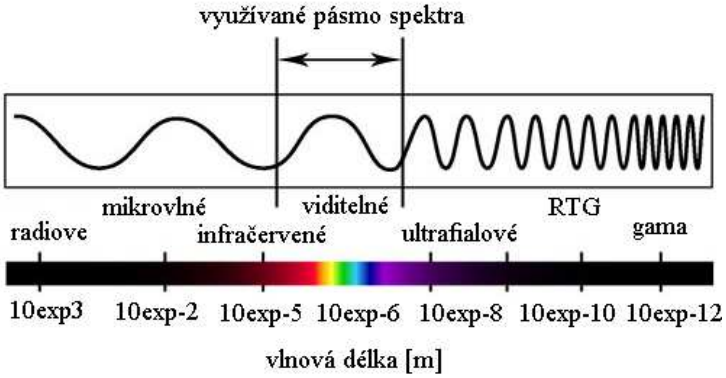
Obr. 12: Zorný úhel pyrometru definovaný jako D:L (1:10).

Pro převod intenzity světelného záření na napětí, proud nebo odpor slouží fotoelektrický detektor. Na detektor se tepelné záření vysílané měřeným objektem soustřeďuje optickým systémem. Ten bývá sestaven z čoček nebo zrcadel. Radiačním čidlem mohou být začerněné termočlánky, bolometry nebo termistory. Použitím vhodných polovodičových snímačů je možné dosáhnout vysoké citlivosti a rychlosti odezvy, ale na úkor omezení pásma vlnových délek.

Většina kompaktních pyrometrů obsahuje ve vyhodnocovací části mikroprocesor, který umožňuje zaznamenat a zobrazit uživateli dosažení maximálních, minimálních eventuálně průměrných teplot, signalizovat překročení limitních hodnot atp.

3.2.2 Úhrnné pyrometry

Širokopásmové nebo také úhrnné pyrometry, jak už název napovídá, měří úhrn energie vyzařované měřeným objektem v široké oblasti frekvenčního spektra (obr. 13).



Obr. 13: Graficky znázorněná část spektra používaná při měření širokopásmovými pyrometry.

Měřená teplota je úměrná vyzářené energii na základě Stafan-Bolzmanova zákona (10), kde intenzita záření je dána vztahem (11).

$$\boldsymbol{I = \frac{d\Phi}{dS}} \tag{11}$$

Φ – zářivý tok [W]

S – plocha povrchu záření [m^2]

Při výběru úhrnného pyrometru je potřeba uvážit volbu i z hlediska ohniskové vzdálenosti v souvislosti s velikostí měřené plochy a vzdáleností pyrometru od objektu. K dosažení údaje přesné teploty měřeného objektu při měření úhrnným pyrometrem je nutné, aby zaměřený povrch zcela překrýval zorné pole zaměřené pyrometrem. Při výskytu pozadí nebo předmětu s jinou teplotou rozdílnou od teploty měřeného objektu dochází k chybě měření. Při snaze o měření malých ploch pyrometrem s malou ohniskovou vzdáleností (např. 1:7) by musel být pyrometr umístěn do těsné blízkosti měřeného objektu. To je pro některé případy nemožné kvůli dodržení maximálních pracovních teplot.

Nesmí se zapomenout na emisivitu ε ze vztahu (10), která významně ovlivňuje hodnoty měřené teploty. Jelikož se jedná o zásadní parametr při bezkontaktním měření teplot, věnuje se mu detailněji následující kapitola.

3.2.3 Emisivita

Úhrnné pyrometry měřící množství energie emitované pozorovaným objektem vychází z předpokladu, že měřený objekt je tzv. černým tělesem. To znamená, že je tělesem, které veškeré dopadající záření všech vlnových délek pohltí a zároveň maximální množství energie vyzáří. V takovém případě totiž celkové množství vyzářené energie odpovídá jeho teplotě. Jelikož absolutně černá tělesa prakticky neexistují, je zavedena emisivita. Emisivita je faktor, který udává, jakou část energie měřené těleso vyzáří vůči celkové energii, kterou by vyzářilo černé těleso o stejné teplotě. Pohybuje se v intervalu $0<\varepsilon<1$, kde nízkým hodnotám odpovídají reflexní materiály a vysokým tmavé, matné povrchy.

I přesto, že ideálně černé těleso neexistuje, je možné jej simulovat dutým tělesem s dostatečně malým otvorem se speciální vnitřní úpravou. Ke kalibraci pyrometrů se používají referenční zářiče, které vychází z principu simulátorů černých těles a mají známou teplotu.

Řešení problémů s emisivitou

Chceme-li měřit přesně absolutní hodnotu teploty pomocí úhrnného pyrometru, je správné určení emisivity měřeného objektu nezbytné. Pro určení emisivity nebo k její vhodné úpravě existuje několik možností.

- Simulování černého tělesa

Do měřeného objektu se vytvoří díra o průměru větším, než je plocha zorného pole na měřeném objektu. Hloubka této díry musí být alespoň 6-ti násobkem jejího průměru. Díra funguje jako simulátor černého tělesa a při měření teploty uvnitř díry se dá počítat s emisivitou ε=1. Poté se měří teplota na povrchu objektu a nastaví se emisivita takové hodnoty, aby teplota povrchu odpovídala teplotě v díře.

- Určení emisivity kontaktním teploměrem

Metoda je podobná té předchozí s tím rozdílem, že referenční teplota není získána pomocí simulátoru černého tělesa, ale některým z kontaktních senzorů teploty.

- Tabulky emisivity

Nejjednodušší, ale zároveň ne vždy přesné, je použít tabulek orientačních emisivit, kde jsou uvedeny běžně se vyskytující materiály. Tabulka emisivit pro některé běžně se vyskytující povrchy bývá často dodávaná pyrometry [18].

- Změna emisivity povrchovou úpravou

Při měření předmětů malé nebo neznámé emisivity je možné povrch vhodně upravit. Úprav se využije také při měření levnými pyrometry, které mají emisivitu nastavenou z výroby, často na hodnotu 0,95.

Jednou z možností je objekt natřít nebo nastříkat barvou známé emisivity. Například speciální spreje s emisivitou okolo ε=0,96, jsou odolné vůči otěru a teplu vzdorné až do 800°C. Další možností je použít samolepicích štítků.

Jsou případy, kdy ani jedno z výše uvedených řešení není účinné. Může se tak stát při ohřevu na velmi vysoké teploty, kdy ohřívaný materiál mění v průběhu procesu barvu povrchu a tedy i emisivitu. V takových aplikacích se nabízí použít poměrové někdy také nazývané jako dvoubarevné pyrometry.

3.2.4 Poměrové pyrometry

Někdy je třeba měřit teplotu povrchu materiálu bezdotykovým způsobem, ale nasazení klasického radiačního pyrometru nepřináší očekávaný efekt. Měření je z nějakých důvodů silně zkresleno. Například není známá emisivita materiálu, emisivita materiálu se rychle mění, zorné pole pyrometru není zcela pokryto měřeným objektem, na měřené ploše se vyskytují chladná místa, provozní atmosféra je silně znečištěna kouřem nebo vodní parou, může docházet k částečnému znečištění objektivu pyrometru apod. To všechno jsou problémy často vyřešitelné použitím poměrového pyrometru.

Hlavní myšlenkou poměrových pyrometrů je detekce intenzity záření minimálně ve dvou sobě blízkých spektrálních pásmech vlnových délek λ_1, λ_2. Poměrový signál je pak dán vztahem (12).

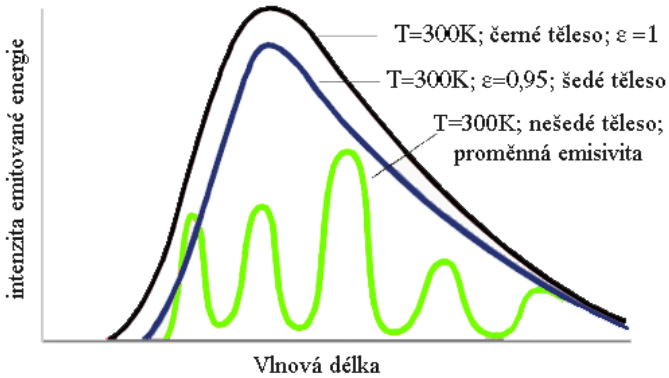
$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{I_{M1}}{I_{M2}} \tag{12}$$

I_{C1},I_{C2} – intenzita vyzařování měřeného objektu o teplotě T na dvou vlnových délkách λ_1, λ_2

I_{M1},I_{M2} – intenzita vyzařování absolutně černého tělesa o teplotě T na dvou vlnových délkách λ_1, λ_2

ε_1, ε_2 – emisivita materiálu při vlnových délkách λ_1, λ_2

Tělesa, u nichž platí předpoklad stejné změny emisivity na všech vlnových délkách, se nazývají tělesa šedá. Podle vztahu (12), při měření teploty šedých těles na emisivitě materiálu vůbec nezáleží. To je bezesporu velká výhoda oproti úhrnným pyrometrům. Ve skutečnosti ale existují nešedá tělesa, u nichž k jisté změně emisivity v závislosti na vlnové délce dochází (obr. 14).



Obr. 14: Porovnání závislosti záření na vlnové délce pro různá tělesa při stejné teplotě.

Vliv této proměnné emisivity může být eliminována korekcí naměřeného poměru podle vlnových délek. Tato úprava je dána koeficientem strmosti. Vhodné nastavení strmosti se musí určit experimentálně.

Některé poměrové pyrometry pracují na více než dvou vlnových délkách. Tyto přístroje detailně analyzují emisivitu nešedých těles v závislosti na vlnové délce, teplotě a chemickém složení povrchu. Data jsou vyhodnocována složitými algoritmy k zjištění závislostí a kompenzaci změn emisivity v různých podmínkách.

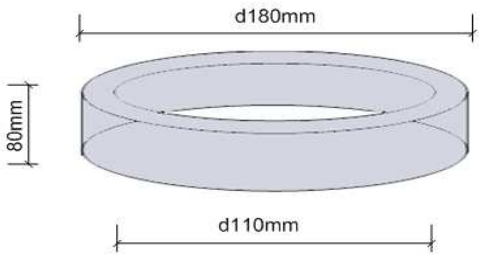
Mezi klíčové výhody poměrových pyrometrů patří vyloučení chyb v měření teploty způsobené vlivem změn emisivity, povrchovou úpravou, absorpcí záření, vodními parami a různými nečistotami v prostoru mezi objektem a senzorem. Příkladem může být i použití při měření teploty skrz ochranné sklo, které je během procesu znečištěno. Ani toto znečištění průhledu neznehodnotí hodnoty měřené teploty. Další velmi užitečnou výhodou je, že změna velikosti pozorovaného objektu v zorném poli nemá vliv na výslednou teplotu. Jinými slovy, teplota není určena na základě absolutního množství energie vyzářené objektem, ale na poměru energií na různých vlnových délkách a ten zůstává zachovaný. Tato vlastnost se uplatní například při měření pohybujících se předmětů, které mohou částečně opustit zorné pole pyrometru nebo při měření teploty proudícího roztaveného železa. Naopak nevýhodou poměrových pyrometrů je snížená přesnost při měření malých rozdílů velkých energií.

4 Hardware

Systém pro měření a regulaci teplot byl vyvíjen pro spolupráci se zapůjčeným zdrojem indukčního ohřevu TM50/10 popsaném v kapitole 4.2. Jednalo se o plně funkční zařízení pracující v otevřené smyčce s možností manuální regulace výkonu, popř. pomocí zadávacího analogového napětí. Jak je naznačeno v úvodu, cílem této práce je realizace přenosného zařízení, pomocí nějž by bylo možné jednak měření a záznam dat v uživatelsky příjemném prostředí a také zpětnovazebně řídit výkon zdroje na základě žádané a měřené teploty.

Obr. 15: Testovací pracoviště. Frekvenční měnič, měřicí kufr, v pozadí ohřívané ložisko v induktoru, PC s vizualizací.

Navržené zařízení bylo testováno při ohřívání vnějšího prstence budoucího ložiska z leštěné ložiskové oceli 14209 o rozměrech označených na obr. 16 a hmotnosti *m=10kg*. Jedná se poměrně velký objem materiálu a tudíž i doba potřebná pro přenos tepla z jeho povrchu do celého objektu je nezanedbatelná.



Obr. 16: Rozměry ohřívaného materiálu - vnější prstenec ložiska.

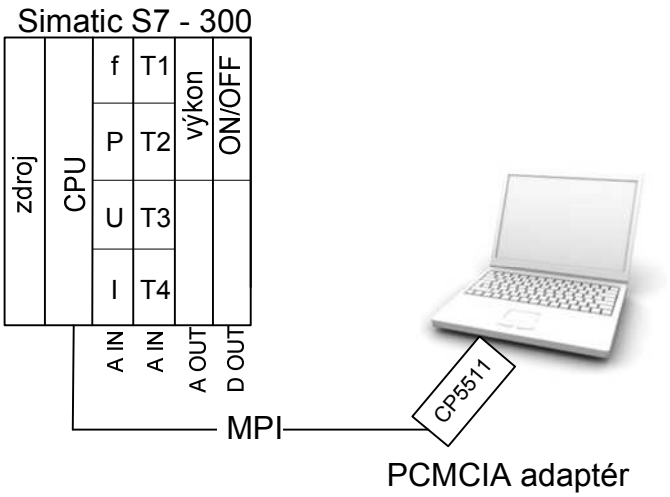
4.1 Měřicí kufr

Aby bylo celé zařízení mobilní, tak jak bylo požadováno, je veškerý hardware umístěn do přenosného technologického kufru (obr. 17). Hlavní jednotkou je procesor programovatelného automatu Siemens S7 315-2 DP s komunikačním rozhraním MPI. Procesor je doplněn dvěma vstupními kartami po osmi 12ti bitových analogových vstupech. Tím se získá celkem osm dvojic navzájem galvanicky oddělených vstupů. Pro každou dvojici je možné nastavit typ a rozsah připojeného zařízení (napěťový vstup od ±80mV do ±10V, proudový vstup 4-20mA, termistory, všechny typy termočlánků, aj.). Navržené zařízení díky tomu může pracovat s hodnotami získanými z libovolných průmyslových senzorů teploty a zaznamenávat doplňkové veličiny měniče jako je proud, napětí, frekvence a výkon. Volba typu vstupního signálu se provádí fyzickým přepínačem umístěným na boku vstupní karty a dospecifikováním v HW konfiguraci.

Obr. 17: Fotka měřicího kufru

Z čtyř kanálové analogové výstupní karty je použit jen jeden výstup pro řízení výkonu zdroje v rozsahu 0-10V odpovídající 0-100% výkonu. Digitální výstupní karta zajišťuje spínání relé, které ovládá klíčovací vstupu frekvenčního měniče. Tím je vyřešeno programové zapínání/vypínání zdroje během nečinnosti, což zaručuje skutečně nulový výkon zdroje během odstávky.

Rozhraní MPI vyžaduje na straně počítače 32bitový HW adaptér *BusCard Profibus* do PCMCIA slotu. Náhradním řešením je použít MPI-RS232 adaptér s maximální rychlostí přenosu 115,2 Kbit/s.



Obr. 18: Vstupně výstupní karty PLC a k nim připojené veličiny. Propojení PLC/PC rozhraním MPI.

Na obr. 18 je znázorněné fyzické zapojení měřených veličin na vstupní karty. Jednotlivé vstupy jsou sice zaměnitelné, ale je k tomu potřeba zásah do HW konfigurace. Aby bylo měření analogových signálů co nepřesnější, jsou veličinám předem definované vstupní brány. Ke každému vstupu byl zvolený nejbližší vyšší rozsah, který byl k dispozici. Schéma rozložení vstupů (obr. 18) doplněné tabulkou rozsahů (tab. 1) určuje HW konfiguraci vstupních karet. Jediný analogový výstup je úrovně 0-10V.

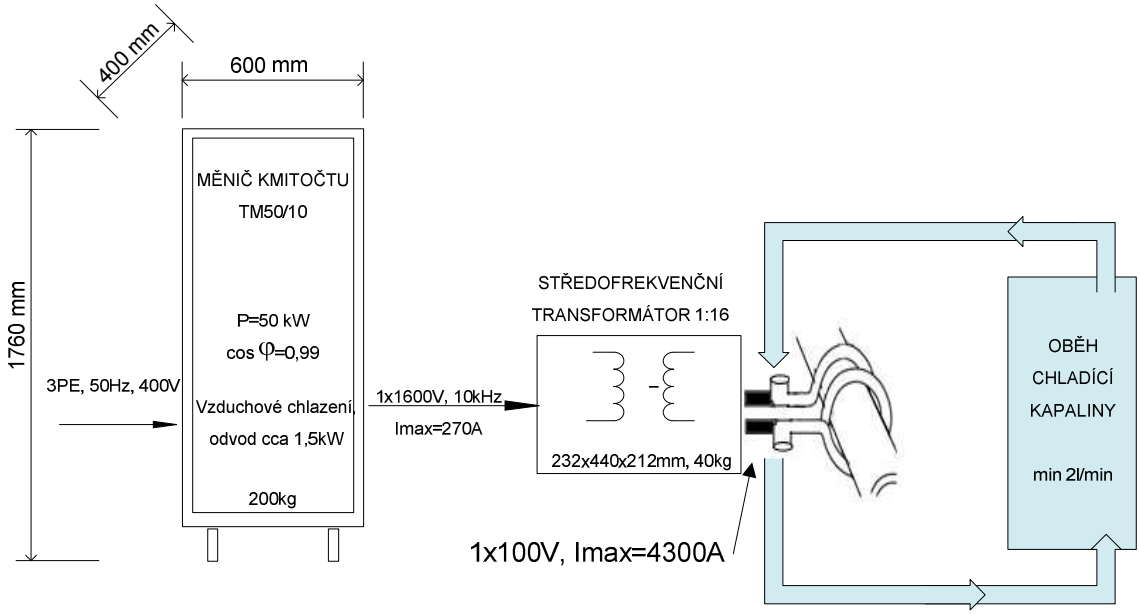
Tab. 5: Vstupní signály, jejich rozsahy a rozsahy nastavené příslušným vstupním kanálům.

Symbol	význam	Rozsah signálu	Zvolený rozsah
f	Frekvence měniče	0-0,1V	0,25V
P	Výkon měniče	0-0,5V	0,5V
U	Výstupní napětí měniče	0-1,6V	2,5V
I	Výstupní proud měniče	0-5,4V	10V
T1-T3	Teplota z termočlánků		Typ K
T4	Teplota pyrometru	0-5V	5V

4.2 Zdroj indukčního ohřevu

Jako zdroj indukčního ohřevu je použit statický měnič kmitočtu TM 50/10 se středofrekvenčním transformátorem. Tento napájecí zdroj přeměňuje trojfázovou energii sítě 3 x 400V, 50Hz na jednofázovou energii o jmenovitém výkonu 50kW a jmenovitém kmitočtu 10kHz. Zátěž induktivního charakteru společně s kondenzátory měniče tvoří sériový rezonanční obvod. Systém pak kmitá na frekvenci ležící těsně pod rezonanční frekvencí tohoto obvodu.

Výstupní napětí a proud jsou řízeny interním regulátorem podle impedance zátěže a požadovaného výkonu tak, aby došlo k dosažení rezonanční frekvence. Středofrekvenční transformátor, umístěný mezi frekvenční měnič a induktor, přizpůsobuje nízkou impedanci induktoru optimální zatěžovací impedanci měniče.



Obr. 19: Blokové schéma zdroje pro indukční ohřev. Frekvenční měnič – transformátor – induktor.

Z interního regulátoru je možné získávat aktuální hodnoty napětí a proudu na výstupu měniče, tedy na primárním vynutí transformátoru, dále frekvenci, na které kmitá rezonanční obvod a výkon. Tyto čtyři výstupní veličiny jsou reprezentovány analogovými signály, jejichž napěťové úrovně představují velikost dané veličiny vypočitatelné podle tab. 6.

Tab. 6: Rozsahy měřených signálů a jejich příslušné napěťové úrovně

	Rozsah	U_{out} [V]
frekvence	0 - 10 kHz	0 – 0,1
výkon	0 - 50 kW	0 - 0,5
napětí	0 - 1600 V	0 - 1,6
proud	0 – 270* A	0 - 5,4

* I_{max}=200 A (270 A po dobu kratší 4 minut)

Při zpracování těchto veličin je nutné brát zřetel na transformační poměr 1:16. Konečný proud induktorem je tedy šestnáctkrát větší, než je proud naměřený na výstupu měniče. Analogicky, napětí na induktoru je šestnáctkrát menší.

Žádaná hodnota výstupního napětí měniče a tedy i celkový výkon zdroje se zadává buď manuálně potenciometrem umístěným na čelní straně zdroje nebo externě analogovým napětím 0-10V. K dispozici je také vstup elektronického klíčování výkonu použitelný například pro řízení pomocí pulzně šířkové modulace. Jelikož i při nulovém napětí externího řídicího signálu si zdroj

udržuje určitý minimální výkon, je klíčování použito k blokování zdroje před zahájením a po dokončení ohřevu.

K přeměně elektrické energie, sloužící k ohřevu objektu v teplo, dochází až v objektu samotném. Přesto je nutné počítat se ztrátami v induktoru, které při proudech až 4000 A jsou nezanedbatelné a společně s teplem sálajícím z ohřívaného tělesa nežádoucně ohřívají induktor. Aby se předešlo mechanickému poškození induktoru, je chlazen vodou proudící jeho středem. Tím je zajištěný dostatečný odvod ztrátového tepla z induktoru i při velkých proudech induktorem a vysokých teplotách ohřívaného materiálu dosahujících i tisíce stupňů celsia.

Induktor byl k dispozici měděný jednozávitový standardního kruhovitého tvaru s měděným pláštěm o průměru *d=220mm* a výšky *v=80mm*.

4.3 Senzory teplot

Pro realizaci měřicí části systému byly použity dvě metody měření teplot. Jak kontaktní, jehož zástupcem byl použit termočlánek typu „K“, tak i radiační úhrnný pyrometr OS137 od firmy Omega, který k odzkoušení zapůjčila firma Newport Electronics s.r.o. Zástupcem špičkových poměrových pyrometrů měl být k dispozici i dvoubarevný pyrometr IR2 také od firmy Omega, bohužel nebyl v době testů k zapůjčení.

Kontaktní měření

Jak je známo z teorie indukčního ohřevu (2.1), vířivé proudy se na základě skinefektu uzavírají při povrchu ohřívaného objektu. V povrchové vrstvě hloubky vniku se podle teorie IH indukuje 86% energie zdroje. To způsobuje, že vsázka bude ohřívána pod povrchem vnějšího pláště, odkud teplot vedením prostupuje do celého objemu vsázky. Je tedy zřejmé, že volba umístění kontaktního senzoru, popř. namíření pyrometru, má zásadní vliv na hodnoty měřených teplot. Vhodným umístěním termočlánku je možné určit, jestli se bude měřit popřípadě řídit podle minimální, maximální nebo jiné teploty ohřívaného objektu.

Pro tuto aplikaci byl termočlánek impulsně navařen pod induktor na vnější stranu prstence ložiska pomocí kondenzátorové svářečky. Důvodem tohoto umístění je možnost simulace rychlých ohřevů i na tak velkém vzorku jako je ohřívaný prstenec (obr. 16). Změna teploty v tomto místě totiž dosahuje i desítek stupňů během času menší než jedna vteřina.

Termočlánek typu K byl zvolen z hlediska dostatečného teplotního rozsahu (-200 až 1250°C) s přesností lepší než 2,2°C nebo 0,75% (podle toho, co je větší).

Bezkontaktní měření

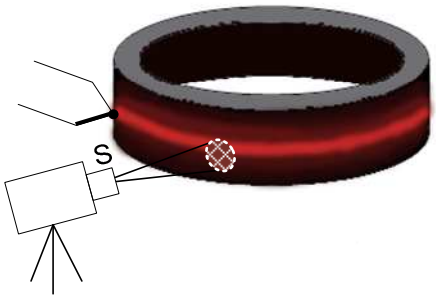
Zapůjčený pyrometr s výrobním označením OS137-3-V1 je průmyslový statický pyrometr s analogovým výstupním napětím 0-5V a rozsahem měřitelných teplot -18 až 538°C s přesností 1°C

nebo 1%. Emisivita je nastavitelná v mezích 0,5 – 1,0 a zorné pole je 10:1. Spektrální odezva 8-14µm a doba odezvy 150ms (0 až 63% z konečné hodnoty). Pyrometr je napájen 12-24 VDC @ 50 mA.

Obr. 20: Pyrometr OS137-3-V1 použitý jako jeden z teplotních senzorů. Rozměry d25,4 mm x 127 mm.

K pyrometru je možné přiobjednat laserový zaměřovač a vodou chlazené pouzdro, které zvýší maximální pracovní teplotu okolí z původních 0-70°C na 0-200°C. Nevýhodou tohoto pyrometru je, že při náhlé změně teploty okolí prochází senzorová hlava tepelným otřesem a chvíli trvá, než se přizpůsobí nové teplotě. Například trvá asi 30 minut pro přizpůsobení vysílače z 25°C na 50°C teploty okolí. Pyrometr má funkci alarmů, což umožňuje nastavit potenciometrem hodnotu hlídané teploty. Je-li alarm aktivován přepínačem a přesáhne-li měřená teplota hodnotu alarmu, dojde k sepnutí výstupu alarmu, který může ovládat externí mechanické relé.

K upevnění senzoru byl použit stativ s nastavitelnou výškou i náklonem senzoru. V boční stěně pláště induktoru byl vytvořen průzor pro pyrometr. Z důvodu citlivosti senzorové hlavy na teplotní změny, byl pyrometr umístěn do vzdálenosti 150mm od měřeného objektu. Průměr zaměřené plochy ve vsázce je tedy 15mm. Jelikož byla vsázka z leštěné oceli, bylo nutné nastavit emisivitu na nejnižší možnou hodnotu, tedy 0,5.



Obr. 21: Umístěný termočlánku a pyrometru na vsázce. Světlejší pruh označuje oblast pod závitem induktoru.

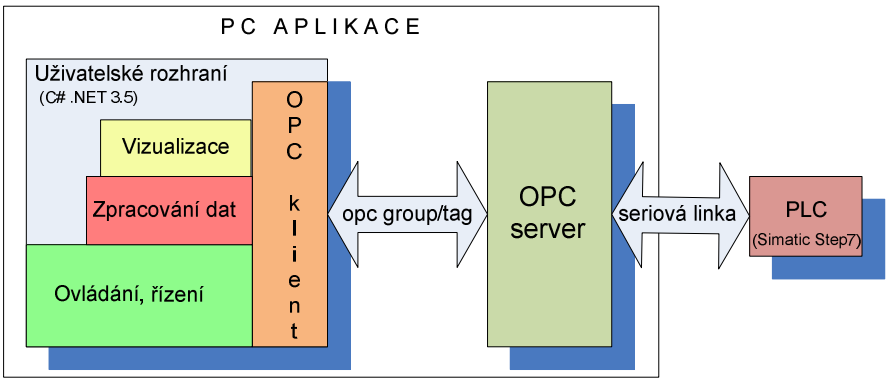
Jak je znázorněné na obr. 21, zatímco termočlánek je umístěn do místa s největší intenzitou pole, pyrometr zabírá svým v průměru 15mm zorným polem i část, která neleží bezprostředně pod induktorem. Z toho důvodu se předpokládá, že průběhy teploty z pyrometrů budou opožděny vůči teplotám z termočlánku o čas potřebný k prostupu tepla do míst zaměřených pyrometrem.

Rozsah teplot do 538°C použitého pyrometru není jistě dostatečný pro většinu aplikací. Tam kde je to nutné, je možné použít více takovýchto obyčejnějších pyrometrů, jejichž rozsahy by se doplňovali na celé požadované teplotní škále anebo využít kvalitnějších pyrometrů s rozsahy až několik tisíc stupňů celsia.

5 Software

Programové vybavení je nejdůležitější a na vývoj nejnáročnější částí tohoto projektu. Jak je předesláno v úvodu, programové vybavení systému je možné rozdělit do dvou částí, vyvíjených v odlišných prostředích pro dvě různá zařízení. Tím prvním zařízením je přenosný počítač, na kterém je uživatelský program pro vizualizaci a ukládání naměřených dat. Zároveň pomocí tohoto programu uživatel nastavuje řídicí posloupnost požadovaného teplotního průběhu a proces ohřevu spouští. Tento program byl vyvinut v prostředí Microsoft Visual Studio 2008 (.NET). Jeho součástí je také OPC klient pro zajištění komunikace s OPC serverem, jehož prostřednictvím jsou zprostředkovávána data mezi uživatelským programem a programovatelným automatem (obr. 22).

Druhou částí programového vybavení je software obsluhující programovatelný automat (PLC) a byl implementován v prostředí Simatic S7. PLC cyklicky vyčítá data ze vstupů, upravuje je a ukládá do vlastních datových bloků. Dále obsahuje řídicí algoritmy pro regulaci výkonu zdroje. PLC je na běhu uživatelského programu v PC nezávislé. Systém pro měření a řízení teplot pro indukční ohřev je tedy distribuovaný do dvou vrstev.



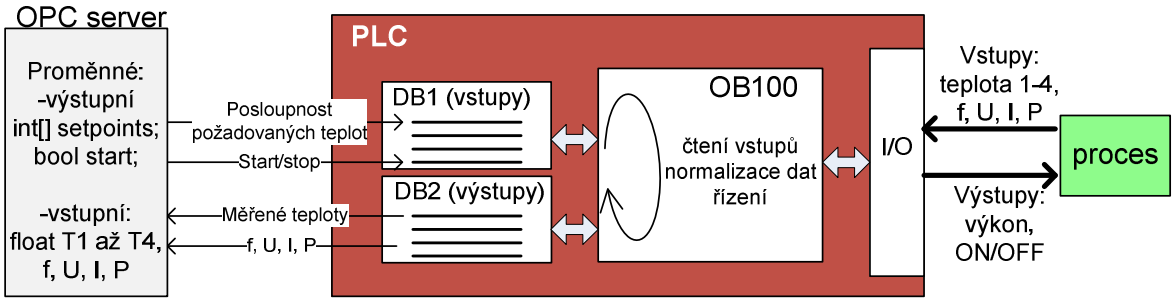
Obr. 22: Schéma programového vybavení.

5.1 Komunikace PG/PC

Propojení mezi programovatelným automatem Simatic S7-300 a uživatelským programem (GUI) je fyzicky realizována rozhraním MPI. Jak již bylo zmíněno v úvodu, komunikace je zajištěna prostřednictvím OPC (OLE for Process Control) serveru. OPC je komunikační protokol, jehož cílem je vytvořit jednotné komunikační rozhraní mezi hardware a software produkty průmyslové automatizace.

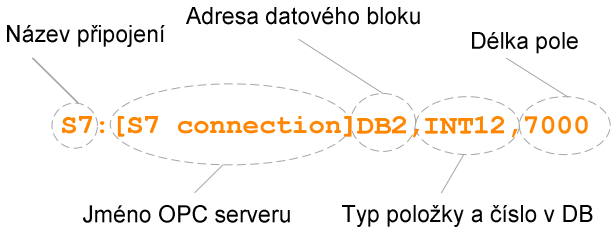
Obecnou výhodou komunikačního protokolu OPC je skutečnost, že v projektu je možné použít různé HW komponenty různých výrobců bez ohledu na jejich komunikační rozhraní (např. PLC Simatic, Allen Bradley, atp.). Stačí, když pro konkrétní komponentu existuje příslušný OPC server a potom vizualizační software (InTouch, Control Web, aj.), popřípadě řídicí program jakéhokoliv výrobce přistupuje k datům libovolné HW komponenty skrz OPC klienta. Díky OPC

standardu je možné relativně snadno vytvořit vlastní vizualizační program, který umí číst hodnoty proměnných umístěných v datových blocích PLC.



Obr. 23: Propojení položek mezi OPC serverem a datovými bloky PLC.

OPC klient v rámci aplikace uživatelského programu definuje tzv. položky. Jedná se o datové proměnné, které jsou definované v rámci OPC serveru. Každá položka je identifikována unikátním názvem (tzv. tagem), prostřednictvím kterého k položce přistupuje uživatelská aplikace. K tomuto názvu je přiřazena adresa a typ položky (obr. 24), což vytváří unikátní označení v rámci celého projektu. Díky těmto tagům je kód aplikace přistupující k proměnným PLC přehledný.



Obr. 24: Unikátní označení jedné položky v rámci OPC serveru.

V komplexních složitých projektech, kde se počty tagů mohou pohybovat i v tisících, je možné s výhodou použít skupiny tagů. Tagy jsou rozděleny do skupin, kterým může být přiřazená jiná perioda při cyklickém čtení. Díky tomu je možné vyčítat klíčové veličiny dostatečně rychle a zároveň nezahlcovat přenosové cesty jinými veličinami, které postačí vyčítat s daleko menší periodou.

Rozhraní MPI s rychlostí 187,5 Kbit/s je použitelné jak pro nahrávání SW z prostředí Simatic Step7 do PLC při vyvíjení programu nebo ladění regulátoru, tak i pro čtení/zápis dat mezi uživatelskou aplikací a PLC prostřednictvím OPC serveru během procesu ohřevu. Nutno podotknout, že tyto dva druhy komunikace nefungují zároveň. Při nahrávání SW do PLC je nutné OPC server zastavit v prostředí *Station Configuration Editoru*, který slouží k ovládání OPC serveru. Aby bylo možné OPC server nainstalovaný na PC používat, je nutné upravit i program v PLC.

5.2 Uživatelské rozhraní

Pro styk uživatele s celým systémem byl vytvořen uživatelský program pracující na přenosném počítači, který je součástí měřicího a řídicího systému. Jedná se o aplikaci vyvinutou pro rozhraní .NET Framework v3.5. Hlavní úkoly tohoto programu byly:

- Vhodně reprezentovat naměřená data v podobě grafů (kap. 5.2.2 vizualizace)
- Ovládání procesu ohřevu včetně nastavování požadovaného průběhu teplot
- Komunikace s PLC potřebná k prvním dvěma bodům
- Archivace naměřených dat
- Intuitivní ovládání
- Možnost zaznamenávat procesní veličiny i bez řízení procesu

Program je možné pomyslně rozdělit do několika částí. Část OPC klienta se stará o posílání a vyčítání dat z a do PLC prostřednictvím nainstalovaného a spuštěného OPC serveru. Další částí je jedna ze záložek aplikace – nastavení. V rámci okna nastavení je možné definovat rozsahy použitých senzorů teplot a připojit/odpojit aplikaci k serveru. Druhá ze tří záložek obsahuje graf vizualizace měřených dat a ovládání procesu ohřevu a grafu. Poslední záložka slouží k zadávání řídicí posloupnosti. Všechny části jsou podrobněji popsány níže.

5.2.1 OPC klient

OPC klient prostřednictvím OPC serveru má za úkol vyčítat z PLC až osm veličin s dostatečně krátkou periodou. Veličinami jsou až čtyři údaje o teplotě z připojených termočlánků anebo pyrometrů, hodnoty napětí, proudu, výkonu a frekvence získávané z měniče kmitočtu. To je dohromady osm tagů neboli vyčítaných veličin. Z těch je nejdůležitější teplota a to jak pro zpětnovazební řízení rychlých ohřevů, tak pro vizualizaci. Při ohřívání se často jedná o velice rychlý proces a je tedy nutné zajistit dostatečně rychlé čtení dat. Jsou dvě možnosti jak čtení dat realizovat. První možností je vyčítané veličiny rozdělit do skupin a k nim napevno přidělit periodu vyčítání. Skupina teplot by tak mohla být aktualizována častěji než doplňkové veličiny z měniče. Při příliš dlouhé době skenovacího cyklu by docházelo ke ztrátě informace a v opačném případě by se velké množství dat přenášelo zbytečně (např. při použití pyrometru s delší dobou odezvy). Druhou možností je využít funkce *OnDataChange*, kterou volá server při detekci změny některého tagu. Jinými slovy, klient čte pouze ty veličiny, u kterých došlo ke změně hodnoty. Tím je zajištěno to, že aplikace dostane všechna a jen ta data, která mohou nést užitečnou informaci.

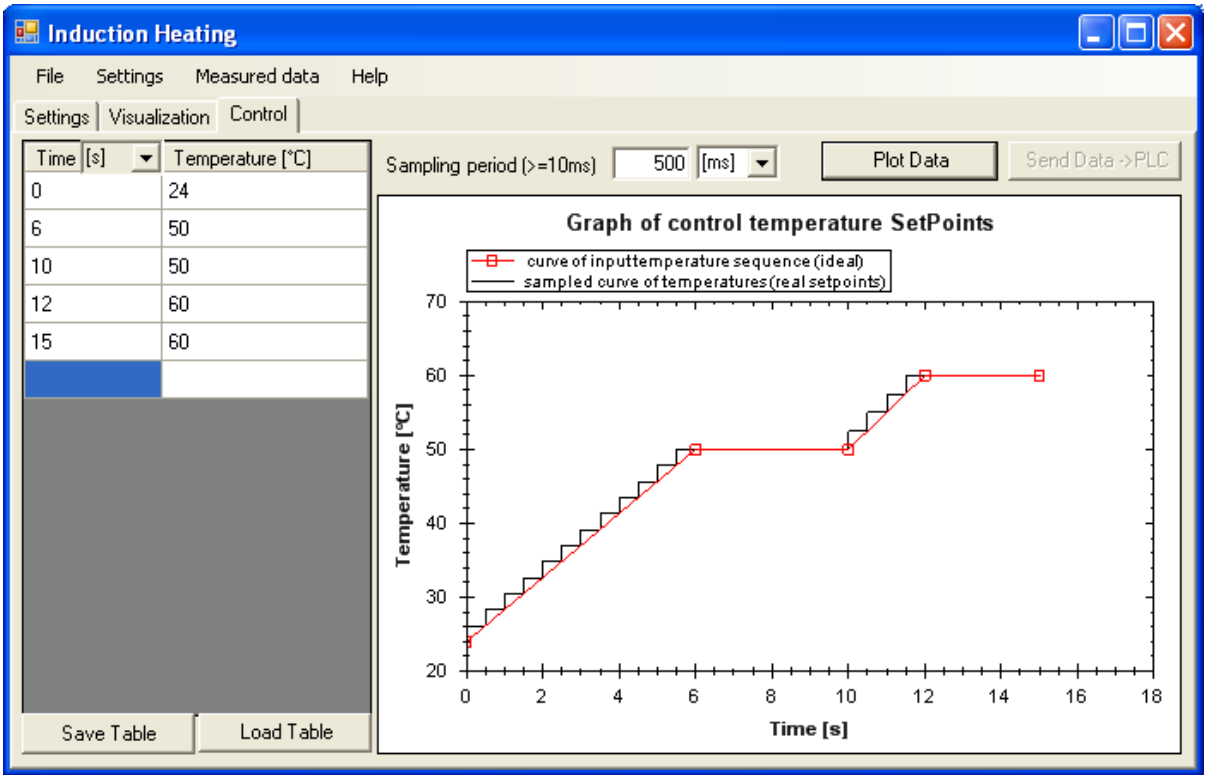
Jelikož je tagů jen osm a počet změn je omezen frekvencí cyklů PLC a nehrozí tak zahlcení přenosové cesty ani uživatelského programu, je využito metody čtení v případě změny a to pro všechny tagy. OPC umí pracovat s periodou od 1ms. Pro tuto aplikaci byla nastavena perioda 10ms, což je z hlediska rychlosti senzorů s dobou odezvy vyšší než 100ms, dostatečné.

5.2.2 Vizualizace

Vykreslovací komponentou byla použita open source knihovna pro prostředí .NET Zedgaph spadající pod licenci LGPL[2] [14]. Pomocí této knihovny s řadou funkcí pro usnadnění vykreslování grafů jsou v uživatelském programu vytvořeny dvě grafická okna pro vykreslování časových průběhů:

1. **Vizualizace zadávané řídicí posloupnosti**

Okno slouží k přehledné kontrole zadané řídicí posloupnosti žádaného teplotního průběhu. Požadované hodnoty teplot v čase (setpointy) zadává uživatel prostřednictvím tabulky, kde se zadávají funkční hodnoty teploty a k nim příslušné časy od začátku procesu.



Obr. 25: Zadávání řídicí posloupnosti teplot v uživatelském programu

Dalším nastavením je vzorkovací perioda. Řídicí posloupnost je posílána do PLC jako pole žádaných teplot. Časová vzdálenost mezi jednotlivými body je právě vzorkovací perioda, která je nastavitelná od 10ms, což je limit daný regulátorem v PLC. Po sestavení tabulky je potřeba vykreslit zadaný teplotní průběh (červená křivka obr. 25). Výhodou je snazší odhalení chyby, které může snadno vzniknout při zadávání čísel do tabulky. Černým průběhem je možné zkontrolovat, jestli je perioda vzorkování zvolená vhodně. V praxi se totiž vyskytují jak velmi rychlé procesy, kde bývá limitujícím faktorem rychlosti doba odezvy teploměrů tak i dlouhé pomalé ohřevy, u kterých postačí perioda

[2] LGPL (Library General Public License) je licencí volně použitelných knihoven v libovolném programu. V případě změny kódu knihovny je programátor povinen modifikovaný kód zveřejnit. Aplikace, které používají nebo spojují tuto knihovnu, mohou být licencované pod podmínkami dle programátorova výběru včetně komerčního software.

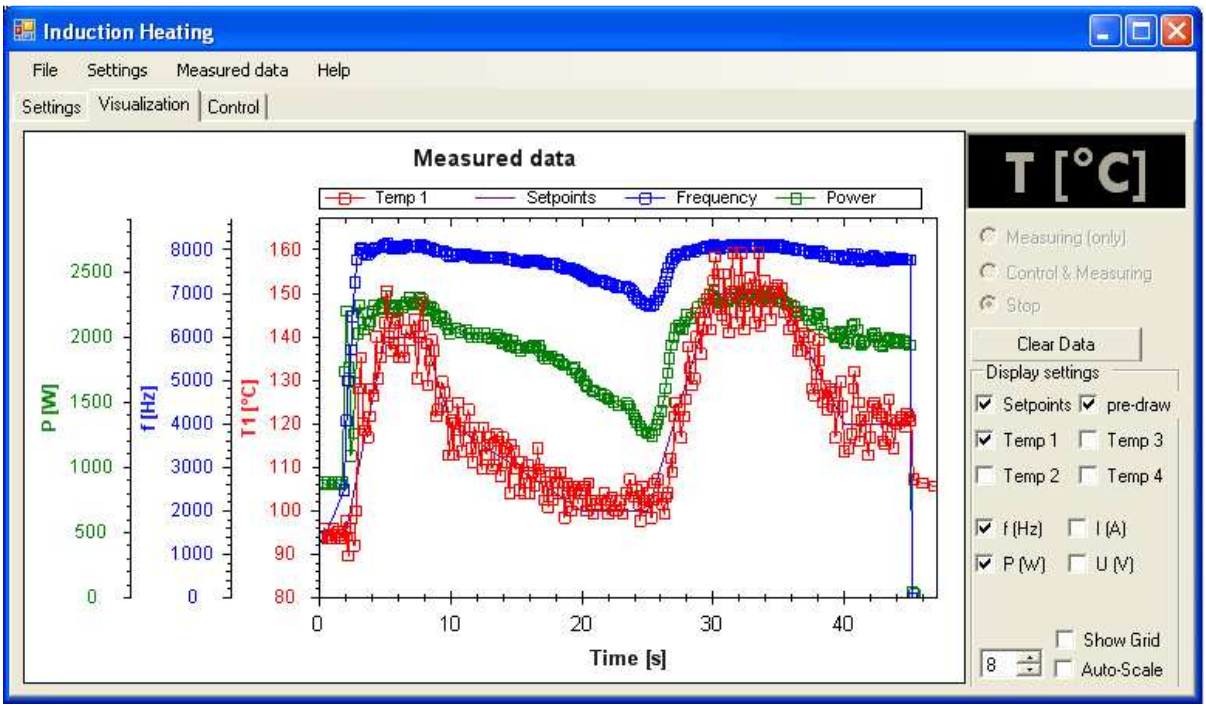
vzorkování v řádu sekund i minut. Je vhodné upozornit, že regulátor v PLC řídí výkon zdroje podle navzorkovaného průběhu teploty, čili černé křivky.

Tabulku setpointů je možné uložit a načíst ve formátu CSV. Uživatel si tak může teploty, podle kterých chce proces ohřevu řídit, předpřipravit v jakémkoliv tabulkovém editoru typu Excel nebo i v obyčejném poznámkovém bloku. Vyplněnou tabulku je možné řadit vzestupně i sestupně podle času nebo podle teplot. Řádky nemusí být při zadávání chronologicky řazené podle času, seřadí se tak automaticky při vykreslení průběhu do grafu.

Jen v případě, že je aplikace připojena k OPC server, je možné vykreslená data odeslat do PLC. S hodnotami žádaných teplot ve formě pole je do PLC posílaná vzorkovací perioda. Tím je možné křivku řídicí posloupnosti zrekonstruovat pomocí minimálního počtu přenesených dat. O úspěšnosti či neúspěšnosti přenosu je uživatel v zápětí informován vyskakovacím oknem. Po odeslání dat do PLC je systém připraven k zahájení procesu a je možné spustit měření, řízení nebo oboje zároveň v okně vizualizace.

2. Vizualizace procesních veličin

V záložce vizualizace je hlavní grafické okno pro zobrazování průběhů měřených veličin a ovládací panel pro nastavení grafu a spouštění procesu (obr. 26). V pravém horním rohu se při spuštěném měření teplot zobrazuje aktuální teplota prvního vstupního kanálu, což je teplota, podle které se proces ohřevu řídí.



Obr. 26: Vizualizační okno uživatelské aplikace pro zobrazování procesních veličin s ovládacím panelem.

Ovládání vizualizace

V prvém panelu ovládacích prvků je možné určit, které veličiny mají být vykreslovány, zobrazit nebo skrýt pomocnou mřížku, nastavit velikosti písma popisků os a nastavit automatický přepočet měřítka. Měření resp. řízení se zahajuje volbou přepínače v horní části ovládacího panelu. Graf je překreslovaný průběžně při příchodu každé nové hodnoty. Po ukončení procesu je nutné záznam zastavit.

Pravým klikem myši na plochu grafu se zobrazí nabídka, která mimo jiné umožňuje ukládání grafu jako obrázek (typu jpg, png, bmp, emf, aj.), graf vytisknout, oddálit, vyvolat automatický přepočet měřítka nebo spustit funkci zobrazování souřadnic při najetí kursoru na vykreslený bod. Pomocí stisknutého prostředního tlačítka myši (rolovacího kolečka) je možné graf plynule posouvat všemi směry.

Automatický přepočet měřítka

Každý zobrazovaný průběh má svojí osu *y*. Je to z toho důvodu, aby mohly být všechny průběhy vykreslené do jednoho grafu pro snadnější porovnání a zároveň, aby každý průběh mohl být přizpůsoben velikosti okna. Pro každou osu tedy musí existovat vlastní měřítko. Funkce automatického přepočtu měřítka určuje aktuální měřítko pro každou z os z minimální a maximální teploty průběhu.

5.2.3 Práce s daty

Příchozí data každé veličiny jsou ukládána do vlastního datového seznamu, který má ke každému zápisu časovou značkou. Čas je počítán od spuštění procesu a pro zpětnou časovou identifikaci je při startu zaznamenaný datum a čas spuštění. Naměřená data je možné vyexportovat do souboru typu CSV. Volba právě tohoto typu souboru byla vybrána kvůli možnosti editovat a popřípadě i dále zpracovávat naměřená data pomocí programu MS Office, jiného tabulkového procesoru eventuelně i jakýmkoliv textovým editorem v podobě středníkem oddělených hodnot. Exportovaný soubor je opatřen hlavičkou obsahující kromě jiného datum a čas zahájení procesu pro jednoznačnou identifikaci dat.

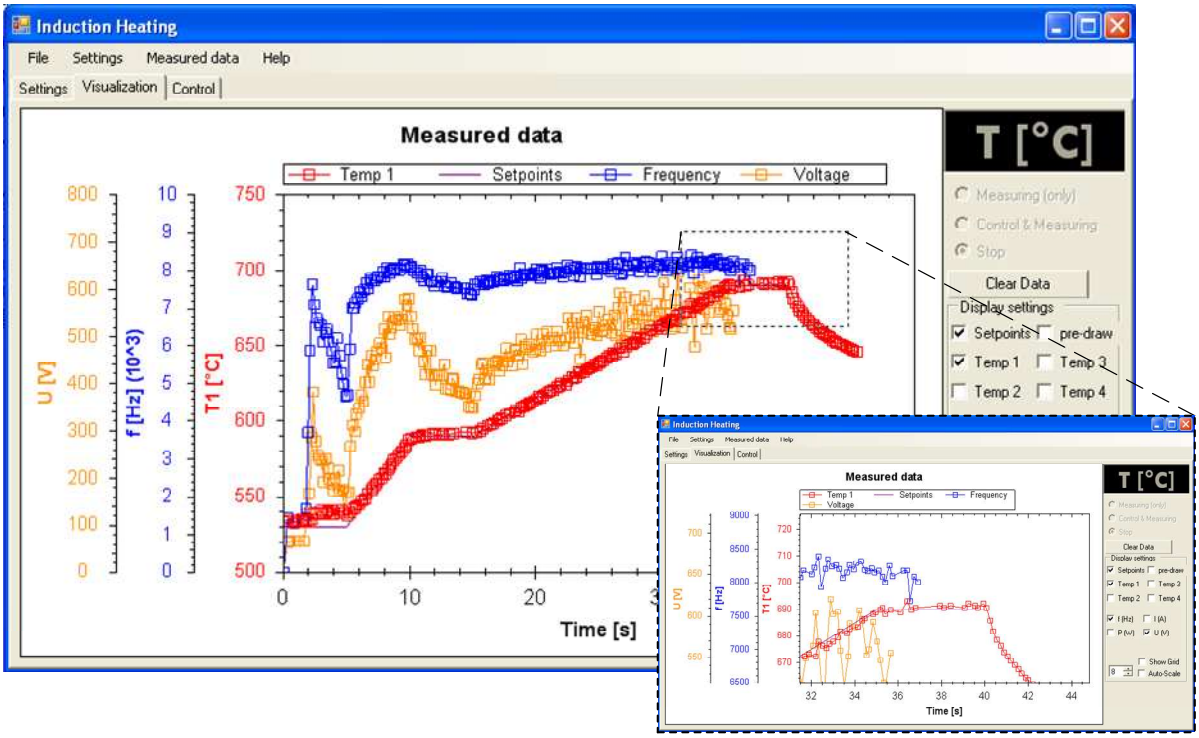
Data získávaná z procesu z PLC jsou zaznamenávána všechna a to i v případě, že během měření nebyla zobrazována. Jinými slovy, když během měření bude zobrazovaná jen požadovaná teplota a teplota prvního kanálu, ve vyexportovaném souboru dat budou všechny veličiny, které byly během procesu snímány (f, U, I, P, T2-T4) včetně jejich časových značek. Všechna data je pak možné pomocí MS Excel zobrazit popřípadě z nich vytvořit grafy, aniž by bylo zapotřebí uživatelského programu. Soubor dat může být v praxi předán zákazníkovi jako vysvědčení prokazující dodržení požadovaného průběhu ohřevu.

Možnost zpětného nahrání libovolného souboru dat je samozřejmostí. Importované průběhy je možné například uložit jako obrázek, vytisknout nebo s nimi pracovat dle libosti jak s daty právě naměřenými.

5.2.4 Shrnutí vlastností

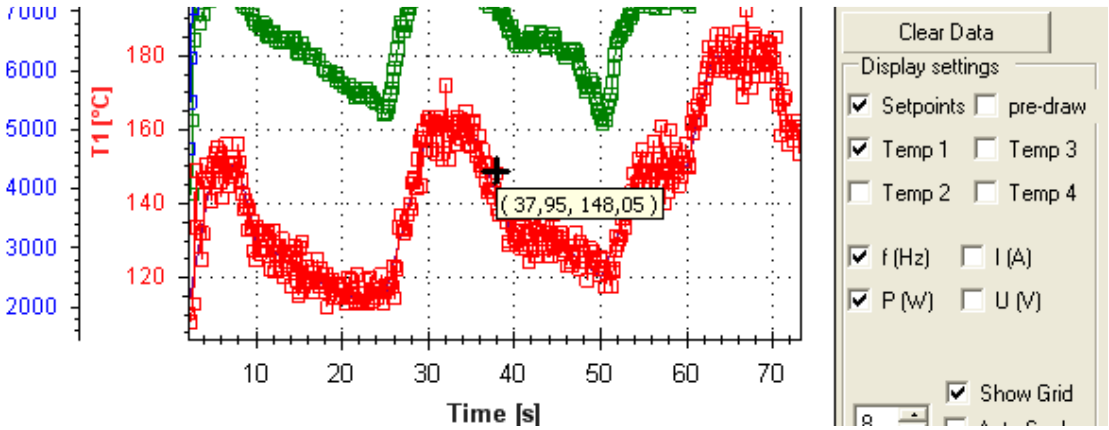
Aplikace navržená pro styk s obsluhou splňuje požadavky, které na ní byly kladeny. Následuje přehled funkcí a nejdůležitějších vlastností uživatelského programu.

- Vizualizace
  - Přibližování částí grafu výběrem oblasti (zoom)



Obr. 27: Ukázka funkce přiblížení (zoom)

  - Zobrazení mřížky „grid“
  - Funkce pro zobrazení hodnoty křivky pod kursorem myši („show value“)



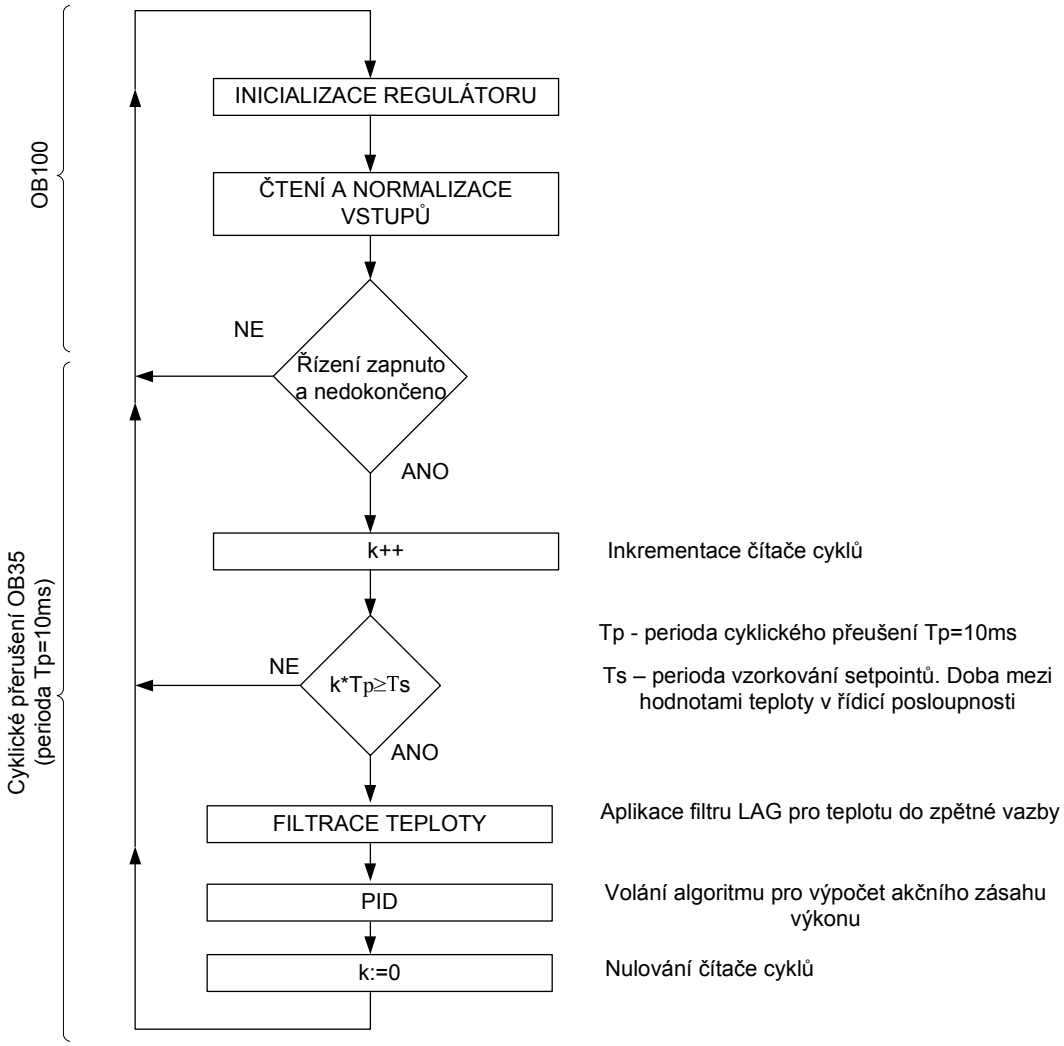
Obr. 28: Ukázka použití funkcí zobrazení hodnoty a zobrazení mřížky

    - Automatický přepočet měřítka všech ypsilonových os
    - Snadné porovnání až osmi průběhů v jednom grafu
    - Porovnatelnost žádané a skutečné teploty v jednom grafu
    - Změna velikosti fontů popisek os
    - Online vykreslování během měření
    - Plynulé posouvání grafu – funkce „drag and drop“
    - Barevně označené průběhy s osami příslušných barev
  - Ovládání
    - Intuitivní zadávání průběhů požadovaných teplot s grafickým ověřením
    - Přehledné a jednoduché ovládání
  - Práce s daty
    - Export/import všech dat do/z CSV
    - Ukládání grafů jako obrázky
    - Export data a času počátku měření
    - Export/import tabulky žádané posloupnosti řízení

5.3 Řídicí program PLC

Program pro PLC byl vyvíjen v prostředí Simatic Step 7. Úkolem bylo zajistit cyklické čtení vstupních signálů, jejich základní zpracování, uchování řídicí posloupnosti ohřevu a především zajistit regulaci teplot nezávislou na operátorském počítači.

Program PLC pracuje v cyklech, jak je znázorněno vývojovým diagramem (obr. 29). Pro správnou funkci PID regulátoru je nezbytné vědět periodu jeho volání. K tomu je využito softwarového přerušení procesoru pomocí cyklicky volaného bloku OB35. Tento organizační blok je volán každých 10ms k tomu, aby na základě známé periody mezi setpointy v řídicí posloupnosti vyhodnotil, jestli je čas volat řídicí algoritmus PID regulátoru. Proměnná označená jako *k* počítá kolikrát byla volaná OB35 a podle toho je přesně stanoven čas volání PID regulátoru v násobcích 10ms. Jinými slovy, před zahájením řízení pošle uživatelský program (z PC do PLC) hodnoty teplot požadované řídicí posloupnosti a s nimi i časový interval mezi jednotlivými hodnotami (setpointy). Podle tohoto intervalu (Ts) a periodě cyklického přerušení (Tp) se určí při kolikátém volání OB35 se zavolá řídicí algoritmus PID.



Obr. 29: Vývojový diagram hlavní kostry PLC programu

5.3.1 Sběr dat, normalizace vstupů

Signály určené k záznamu jsou připojeny na vstupní karty PLC. Z nich vyčtená data jsou cyklicky ukládána do datového bloku DB1. V neceločíselném tvaru jsou tak každý cyklus PLC (2-3ms) zaznamenány okamžité hodnoty teplot ze všech připojených senzorů, rezonanční frekvence, výkon, napětí a proud na primárním vynutí transformátoru.

Všechny vstupy jsou napěťové, ale měřítko, kterým by bylo možné vypočíst aktuální hodnotu měřené veličiny, je různé. Podle následujícího vztahu je možné vypočíst skutečnou velikost vstupní veličiny v jejích základních jednotkách. Tento převod je jako blok použit ve funkci „FC1 Scaling“ k normalizaci všech vstupů.

$$X_{REAL} = \frac{X_{INT}}{27648} \times (HIGH_LIM - LOW_LIM) + LO_LIM \tag{13}$$

X_{INT} je celočíselná hodnota reprezentující velikost napětí příslušného vstupu. HIGH_LIM (resp. LOW_LIM) představuje hodnotu vstupní veličiny, která by odpovídala její horní (resp. dolní) hranici rozsahu. Tyto limitní hodnoty jsou pro názornost dopočítané v tabulce tab. 7.

Tab. 7: Tabulka rozsahů

	U_{in} (V)	zvolený rozsah U (V)	LOW_LIM	HIGH_LIM
frekvence	0 - 0,1	0,25	0	25000
Výkon	0 - 0,5	0,5	0	50000
Napětí	0 - 1,6	5	0	2500
Proud	0 - 5,4	10	0	500

V případě termočlánků jako senzorů tepla je přepočet snadný a pro všechny typy stejný. Stačí mít fyzický přepínač na vstupní kartě nastaven na typ „A: 0-100mV/Thermocouple“ a v hardwarové konfiguraci vybrat odpovídající typ termočlánku, v tomto případě typ „K“. Potom změřená hodnota datového typu INT přímo odpovídá desetinásobku měřené teploty ve stupních celsia. Druhou možností přepočtu je využít skutečnosti, že rozsah INT odpovídá teplotám 0-2764,8 °C. Není tedy nutné dělit vstupní hodnotu deseti, jak se to standardně řeší, k získání teploty ve stupních celsia z termočlánku. Díky tomu je možné použít naprosto stejný normalizační blok jako u všech ostatních vstupních signálů, pochopitelně s jinými konstantami HIGH/LOW_LIM. Tím se stávají jednotlivé vstupní brány modulární a není předem definované, které vstupy jsou určené pro připojení termočlánků a které pro pyrometry popř. jakékoliv jiné standardizované napěťové vstupy 0-10V.

5.3.2 Regulátor

V úvodu je sice uvedena skutečnost, že indukční ohřev pracuje na jednoduchém principu elektricky vodivého materiálu umístěného do elektromagnetického pole, nicméně, popsat takový proces matematicky snadné rozhodně není. Proces IH je relativně složitý děj z důvodu vzájemné interakce elektromagnetického a teplotního pole tak, jak je popsáno v teorii indukčního ohřevu v kapitole 2.4. Z toho vyplývá, že najít přenos systému z matematického modelu je při uvažování různých vlastností ohřívaných materiálů, které se ke všemu během procesu mění, nemožné.

Na volbě regulátoru měly jistý vliv omezené možnosti vývojového prostředí Simatic S7. Oproti jiným programovacím nástrojům typu Matlab je implementace regulátorů z moderní teorie řízení o dost komplikovanější. Naopak PID regulátory, které se objevují v drtivé většině běžné průmyslové automatizace, jsou snadno použitelné díky předpřipraveným řídicím blokům.

Je vhodné si uvědomit, že indukční ohřev nepatří mezi standardní tepelné procesy, které jsou specifické dlouhým dopravním zpožděním a velkou setrvačností. Dopravní zpoždění teplot při indukčním ohřevu záleží víc na umístění senzorů na vsázce než na výkonu zdroje nebo velikosti vsázky. V tomto případě bylo dopravní zpoždění menší než doba odezvy nejrychlejšího ze senzorů, tedy menší než 150ms.

Samo-nastavovací PID

Jako první byl navržen samo-ladící PID regulátor. Výhodou je jeho funkce automatického nastavení parametrů. Pro takovou aplikaci, jako je indukční ohřev, by byla tato vlastnost výhodná. To z toho důvodu, že různé vsázky mají nestejnou dynamiku systému. Při ohřívání nových, jiných předmětů by nebylo nutné měnit parametry PID regulátoru.

Pro regulaci samo-nastavovacím PID regulátorem byl použit připravený blok FB58 v prostředí Simatic. Kromě samotného řídicího algoritmu s automaticky nastavovanými parametry je možné použít funkcí jako je potlačení určité části proporční složky při změně požadované hodnoty nebo omezení akčního zásahu na programátorem definovaný limit. Tyto funkce umožňují upravit chování tohoto regulátoru.

PID regulátor

Parametry PID regulátoru bylo možné nastavit z části empirickými metodami a z části pomocí metod Ziegler-Nichols (Z-N). Metoda Z-N vychází z přechodové charakteristiky systému, kde parametry PID regulátoru jsou určeny vyřešením triviálních lineárních rovnic, do kterých se dosazují koeficienty odečtené z naměřené přechodové charakteristiky. Jedním ze dvou koeficientů je kritické zesílení K_P, neboli takové zesílení proporčního regulátoru, při kterém dochází k oscilacím výstupu a druhým je perioda těchto oscilací.

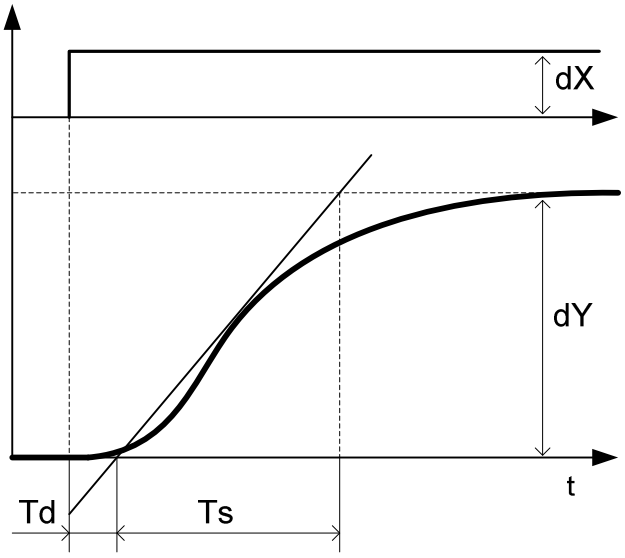
Jelikož, z výše vysvětlených důvodu, matematický popis systému není k dispozici, není možné získat přechodovou charakteristiku simulací a je nezbytné provést odezvu na jednotkový skok. Koeficienty k výpočtu (14) parametrů PID se odečtou z přechodové charakteristiky podle následujícího obrázku (obr. 30).

$$\boldsymbol{K} = \frac{\boldsymbol{T_S}}{\boldsymbol{T_d}} \frac{\mathbf{dX}}{\mathbf{dY}} \tag{14}$$

T_S – časová konstanta systému

T_d – dopravní zpoždění

$\frac{dY}{dX}$ - zesílení systému



Obr. 30: Určení parametrů PID regulátoru pomocí metody Ziegler-Nichols

Následují zmíněné rovnice pro výpočet parametrů PI (15) a PID (16) regulátoru [19].

$$\boldsymbol{P = 0,9 \cdot K; \quad I = 3,3 \cdot T_d} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{P = 1,2 \cdot K; \quad I = 2 \cdot T_d; \quad D = 0,5 \cdot T_d} \tag{16}$$

5.3.3 Filtrace dat

Měřením teplot pomocí termočlánku je ovlivněno šumem, který může být indukován v přívodních vodičích nebo v termočlánku samotném vlivem vystavení silnému elektromagnetickému poli. Pro vizualizaci měřených teplot by mohl být použit datový filtr až v rámci uživatelské aplikace před vykreslením dat. To by bylo nevhodné z hlediska řízení. Teplota prvního kanálu je totiž zavedena jako zpětná vazba, podle které se proces řídí. Aby nebylo řízení ovlivněné šumem a rozkmitané, ale co nejvíc plynulé, je aplikován integrační část *LEAD-LAG* filtru funkčního bloku FB80. Rovnice (17), která popisuje *LEAD LAG* algoritmus bez derivačního členu, je v podstatě filtr dolní propusti.

$$\boldsymbol{T_{OUT}(t) = \left(\frac{t_{LAG}}{t_{LAG} + T_s}\right) T_{OUT}(t-1) + \left(\frac{T_s}{t_{LAG} + T_s}\right) T_{IN}(t)} \tag{17}$$

$T_{OUT}(t)$ – odfiltrovaná teplota [°C]

t_{LAG} – integrační čas filtru [s]

T_s – doba mezi dvěma výpočty (perioda vzorkování teplot) [°C]

T_{IN} – teplota vstupující do filtru [°C]

6 Výsledky testování

Po navržení, sestavení celého systému a obstarání potřebných komponent, bylo zařízení podrobeno reálným testům. Během necelého jednoho týdne bylo naměřeno a zaznamenáno téměř 200 teplotních průběhů. Hlavním úkolem experimentů bylo ověření funkce všech dílčích částí pracujících jako celek. Výsledky a vyhodnocení zrealizovaného systému pro měření a řízení teplot indukčního ohřevu jsou rozděleny do dvou podkapitol doplněné o závěrečné shrnutí.

Testovalo se při okolní teplotě od 10°C do 15°C. Rozměry a materiál vsázky jsou popsané v úvodu kapitoly 4. Průběhy teplot, frekvence, napětí, proudu a výkonu frekvenčního měniče byly zaznamenávány pomocí vizualizace uživatelského programu spuštěného na přenosném počítači. Data byla ukládána společně s podmínkami ohřevu, nastavenými parametry regulátorů a filtrů tak, aby bylo možné průběh procesu zpětně zrekonstruovat a zhodnotit.

Obr. 31: Testování řídicího a měřicího zařízení.

6.1 Měření teplot

Pomocí pyrometru byly měřeny teploty jen do jeho horní hranice rozsahu *538°C*, termočlánkem až do nejvyšší teploty dosažené během testů *1025°C*. Jedním z hlavních důvodů použití zástupců obou, jak kontaktních tak i bezkontaktních metod měření, bylo porovnat jejich vlastnosti jako je rychlost odezvy, citlivost a hlavně použitelnost pro měření teplot pro indukční ohřev. Každá z metod je principielně odlišná a je možné vzájemným porovnáním výsledků měření odhalit chyby způsobené například nevhodným nastavením emisivity při měření pyrometrem nebo vliv elektromagnetického pole na přesnost měření termočlánkem.

Nerovnoměrnost rozložení teplot ve vsázce

Nerovnoměrnost teplotního pole ve vsázce se dá rozdělit do dvou směrů. Nerovnoměrnost od povrchu vsázky do jejího středu je hloubkou vniku (kapitola 2.1). Ten druhý směr je rovnoběžný se středovou osou válcové vsázky, způsobený větší intenzitou pole pod induktorem. Během testů nebylo potřeba ani termokamery k tomu, aby byla přítomnost obou nerovnoměrností prokázána. I z obyčejné fotografie ohřívaného prstence ložiska (obr. 32) je vidět, že rozdíl teplot mezi jeho vnitřní a vnější stěnou je několik desítek až stovek stupňů celsia. Podobně tak i rozdíl teplot v rámci vnější stěny prstence, kde bezprostředně pod induktorem je vidět světlejší pruh vyšších teplot.

Hloubka vniku při pokojové teplotě je možné za předpokladu kmitočtu f=10kHz, poměrné permeability oceli $\mu_r=50$ [12] a rezistivity $\rho=0{,}16\ \mu\Omega\cdot m$ odhadnout podle vztahu (1) na $a=0{,}29mm$. Hloubka vniku se s rostoucí teplotou zvětšuje. Těsně před dosažením teploty Curieova bodu a tedy ztráty magnetických vlastností se dá hloubka vniku odhadnout na $a=0{,}78mm$ (při $\rho=1{,}2\ \mu\Omega\cdot m$). Po překročení CB hloubka vniku skokově vzroste na $a=5{,}51mm$.

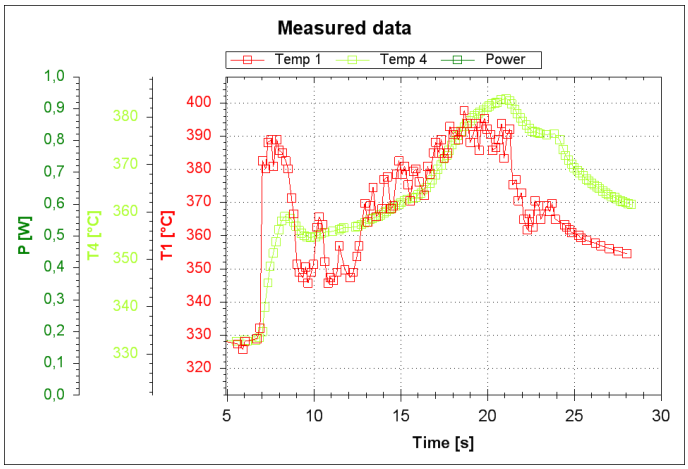
Obr. 32: Rozložení teplot ve vsázce. Zleva přivařený termočlánek obložen tepelnou izolací.

Než toto teplo naindukované v povrchové vrstvě vnějšího pláště prostoupí skrz materiál na plášť vnitřní a než se teploty vyrovnají, může to v závislosti na velikosti a tvaru materiálu trvat několik desítek vteřin, v tomto případě minut.

Jak je vidět, umístění senzorů teplot mělo zásadní vliv na měřené teploty. Nutno předeslat, že této extrémní teplotní nerovnoměrnosti (obr. 32) bylo pro ilustraci dosaženo úmyslně a to za pomoci plného výkonu zdroje.

Srovnání metod měření

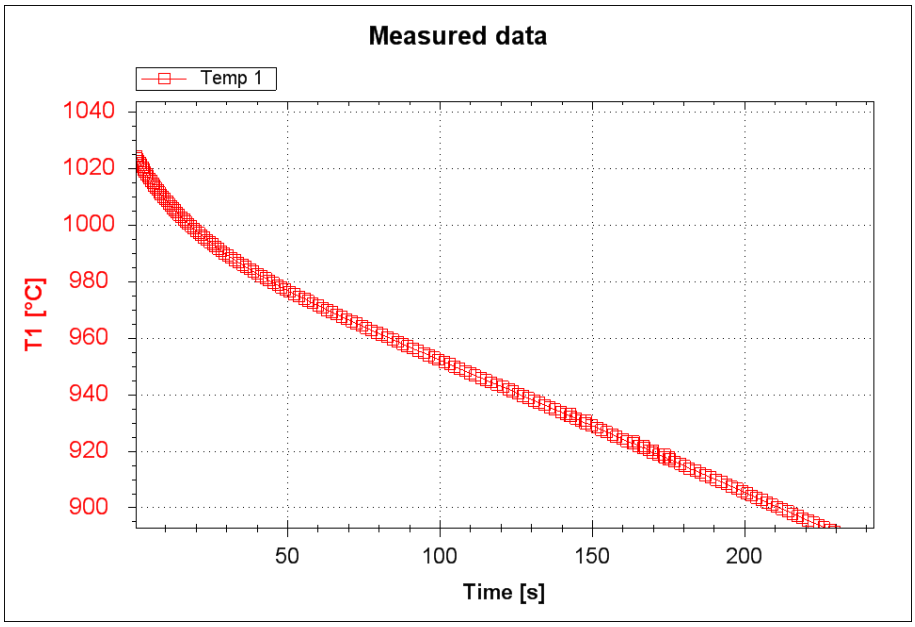
Termočlánek byl úmyslně umístěn do nejrychleji ohřívaného místa (viz. obr. 21 v kapitole 4.3) pro dosažení co nejrychlejší odezvy sytému. Z následujícího grafu je vidět dopravní zpoždění teploty měřené pyrometrem. Vývoj teploty z pyrometru T4 je jakoby opožděn za teplotou termočlánku T1. Až ke konci měření, kdy teplo prostoupilo do míst měřených pyrometrem, je nárůst teploty z pyrometru rychlejší než z termočlánku.



Obr. 33: Porovnání teploty měřené termočlánkem (T1) a pyrometrem (T4)

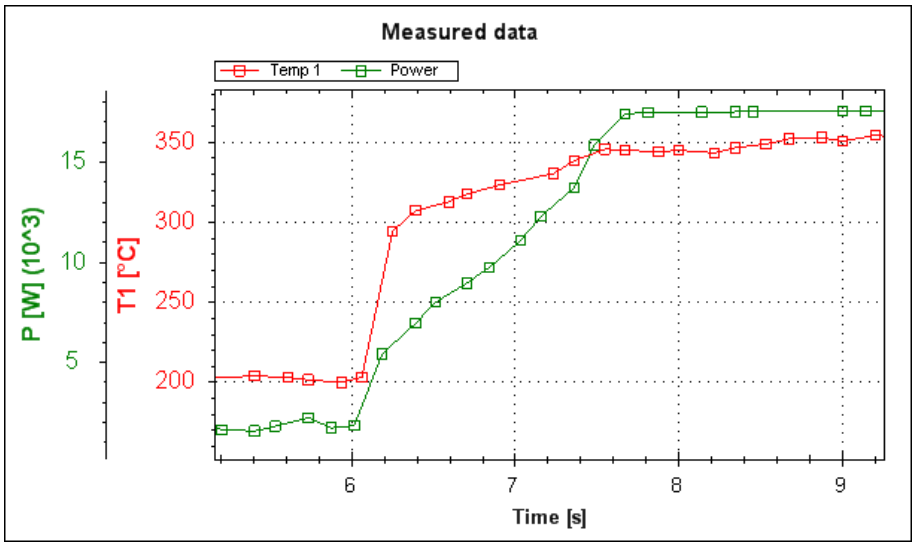
Z průběhů (obr. 33) je také patrné příliš velké zašumění teploty T1. Tento šum téměř *±5°C* se nepochybně indukuje v termočlánku nebo v přívodních vodičích vlivem silného elektromagnetického pole. Důkazem je následující průběh chladnutí z vyšších teplot, ale měřený za stejných podmínek. Rozdíl je pouze v tom, že zdroj indukčního ohřevu je vypnutý a termočlánek poli vystaven není. A jak je vidět, šum zde není vůbec pozorovatelný. Tím, že pyrometr měří v podstatě průměr teplot z plochy vytyčené zorným polem a hlavně není ovlivněn působením elektromagnetického pole, filtrovat teploty z pyrometru není nutné.

Co se týče doby odezvy, jsou oba teplotní senzory srovnatelné. Pohybovala se pro oba senzory do *180 ms*.



Obr. 34: Rychlost chladnutí. Teplota měřená termočlánkem bez filtru.

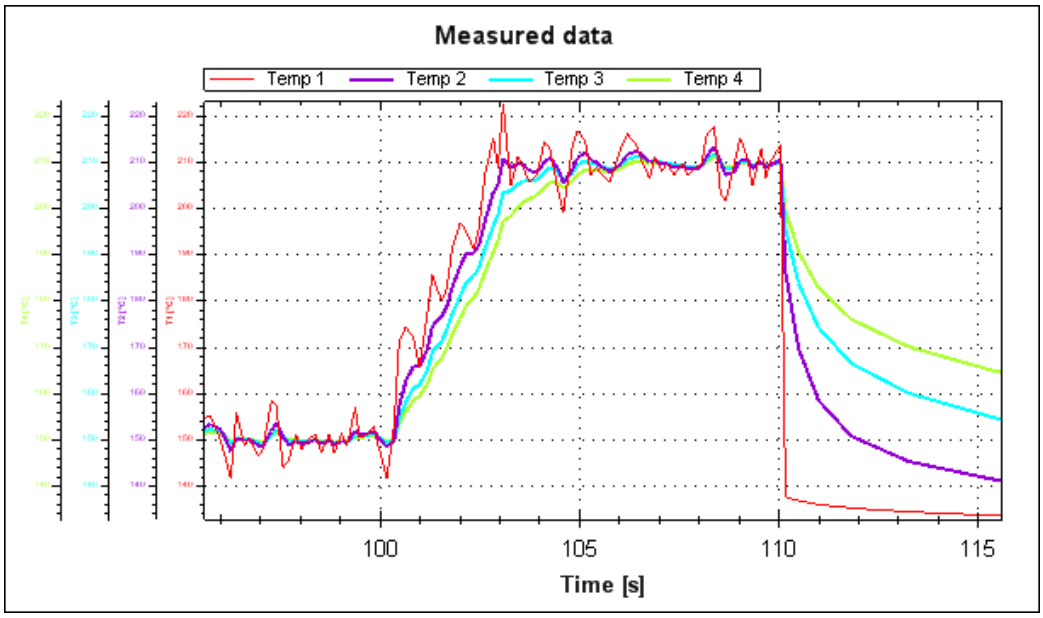
Z obr. 35 je vidět jak rychlá je reakce teploty na změnu výkonu. Proces je to tak rychlý, že počet zaznamenaných teplot neumožňuje stanovit koeficienty pro Ziegler-Nicholsovu metodu určování PID parametrů.



Obr. 35: Rychlost změny teploty termočlánku na skokovou změnu výkonu.

Filtrování měřené teploty

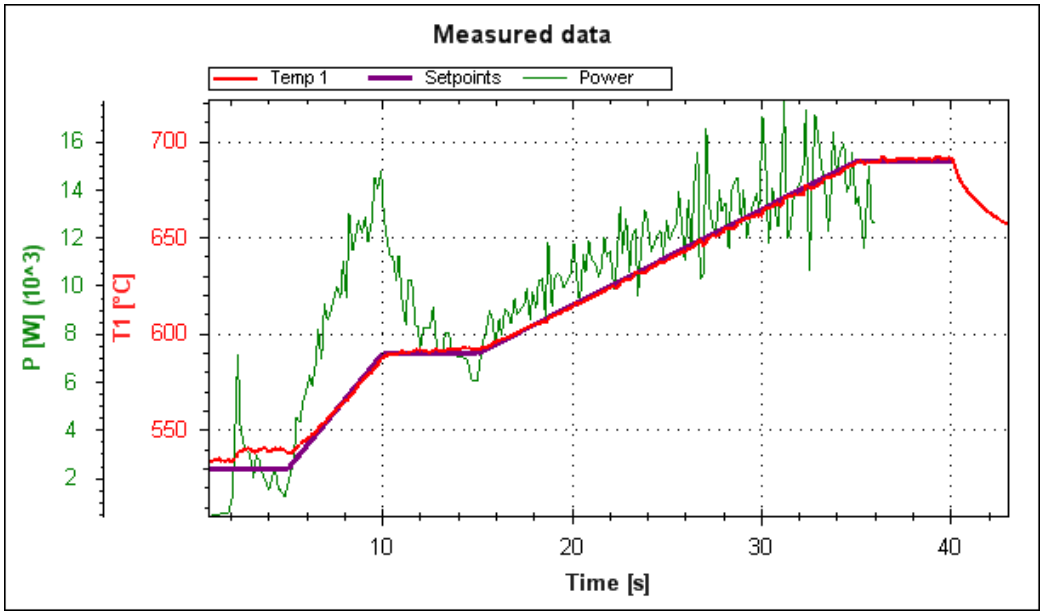
Jak bylo uvedeno v kapitole 5.3.3, pro filtrování měřených teplot z termočlánku určených pro zavedení zpětné vazby regulátoru byla použita integrační část filtru LEAD-LAG algoritmu (17). Integrační čas, kterým je nastavitelná míra filtrace, byla volena tak, aby byl odfiltrován nežádaný šum, ale aby signál neztrácel užitečnou informaci. Na následujícím grafu (obr. 36) je porovnání filtru LAG s různými integračními časy. Filtr s nejdelším integračním časem *Temp 4* je vyhlazen na úkor užitečné informace o teplotě. Jako vhodný parametr filtru byl vybrán čas $t_{LAG} = 400\ ms$.



Obr. 36: Porovnání filtrů s různým stupněm filtrace. T1 bez filtru, T2: t_{LAG}=400ms; T3: t_{LAG}=500ms; T4:t_{LAG}=600ms

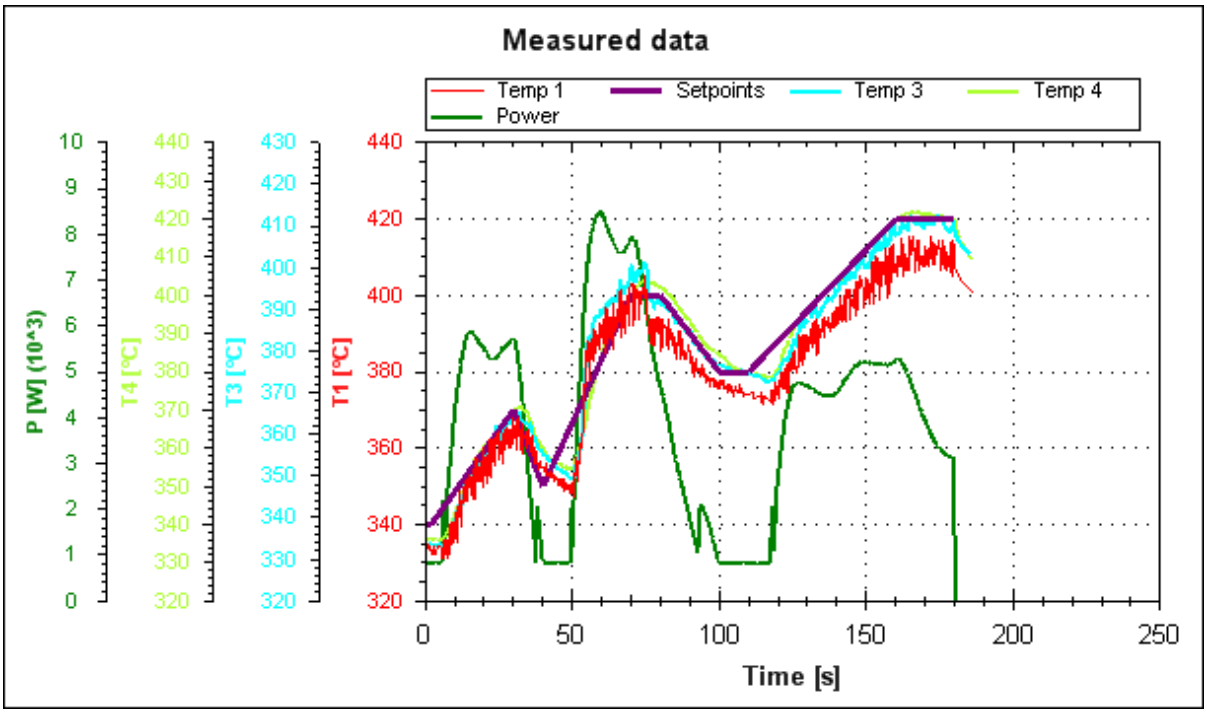
6.2 Regulace

Prvních pár ohřevů se samo-nastavovacím PID regulátorem naznačily, že není vhodný pro řízení takhle rychlých, dynamických procesů. Akční zásah byl velice rozkmitaný. Problém vychází pravděpodobně z faktu, že použitý blok samo-ladicího regulátoru je určen pro jiný typ procesů. I přesto, že nese v názvu regulaci teploty, jak již bylo zmíněno dříve, tak indukční ohřev je velice atypický proces ohřevu a od běžných teplotních procesů se liší především nesrovnatelně větší dynamikou. Proto byl nasazen PID regulátor, který po nastavení vhodných parametrů dosahoval mnohem lepších výsledků. První z ohřevů byl řízen podle teploty termočlánku bez filtrace s výsledkem na obr. 37.



Obr. 37: Řízení PI regulátorem bez filtru.

Z obr. 37 je vidět, že termočlánkem měřená teplota doslova překrývá křivku žádaných teplot, ale akční zásah je příliš rozkmitaný. To je způsobené tím, že signál z termočlánku je zašuměný působením elektromagnetického pole a regulátor se snaží tento šum kompenzovat. Ve skutečnosti úsilí kmitajícího výkonu je vynaložené zbytečně až kontraproduktivně. Proto je teplota termočlánku filtrována, jak je popsáno výše.



Obr. 38: PI regulace (P=0,08; I=300ms). Termočlánek bez filtru (T1) a s filtrem t_{LAG}=400ms (T3); pyrometr (T4)

Na průběhu regulace (obr. 38) je výkon zdroje řízen podle teploty termočlánku s filtrem délky t_{LAG}=400ms. V porovnání s průběhem regulace bez filtru je akční zásah (tmavě zelený průběh) mnohem plynulejší a požadovaná teplota je kopírována jak odfiltrovanou teplotou z termočlánku tak i teplotou měřenou pyrometrem. Tím je zároveň dokázáno, že pyrometr byl nastaven správně a průběhy teploty z obou metod měření si odpovídají.

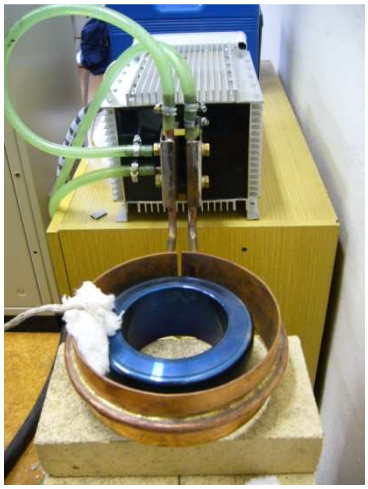
6.3 Vyhodnocení experimentálních testů

Během testů se prokázal přínos vizualizačního programu, pomocí kterého bylo relativně snadné zpracovávat a hodnotit výsledky experimentů. S výhodou byly použity funkce archivace a možnost zpětné rekonstrukce průběhů.

Co se týče porovnání kontaktních a bezkontaktních měření, nelze říci, že nějaká z metod by byla nevhodná nebo naopak bezchybná. Zatímco teploty z kontaktního měření jsou zašuměné, ale nezávislé na měřeném povrchu, bezkontaktní nejsou rušeny elektromagnetickým polem, ale bez správného nastavení nebo nevhodným použití mohou proměřovat desítky stupňů celsia. Už jenom to, že pro kalibraci emisivity pyrometru byl použit termočlánek, svědčí o tom, že se obě metody výborně

doplňují. Tudíž, je-li to prakticky možné, je dobré použít při měření teplot pro indukční ohřev kombinaci obou metod měření.

Při řízení musely být voleny takové strmosti ohřevu, které odpovídaly výkonu zdroje a velikosti vsázky. Stejně tak rychlost chladnutí, kterou je možné pro případ grafu (obr. 34) odhadnout jako 0,5°C za sekundu, je značně limitující. Při simulování rychlejších ohřevů bylo potřeba využít nerovnoměrně rozloženého teplotního pole a skutečnosti, že se měří povrchová teplota vnějšího pláště vsázky. Přesto se nepodařilo odzkoušet chování systému při extrémně rychlém ohřevu. Nicméně existuje i mnoho aplikací pomalého indukčního ohřevu, kde je nezbytné dodržet maximálních teplotních změn za určitý čas. Například i při kalení může být maximální rychlost ohřevu stanovena na 200°C za hodinu [20].



Obr. 39: Ohřívané ložisko v induktoru s navařeným termočlánkem s tepelnou izolací. (T~350°C)

7 Závěr

Z metod měření teplot uvedených v teoretické části byli pro navrhovaný systém měření a řízení teplot pro indukční ohřev zvoleni dva zástupci. Z kontaktního měření to byl termočlánek typu K a z bezkontaktních senzorů širokopásmový pyrometr OS137. Oba teploměry jsou si velice podobné a to jak přesností, tak i dobou odezvy. To, čím jsou naprosto odlišné, je princip měření a z toho vycházejí jejich charakteristické vlastnosti a aplikace, ve kterých jsou s výhodou použitelné. Nutno zdůraznit, že přestože cena testovaného pyrometru byla řádově dvacetkrát větší než cena termočlánku, existují mnohem dražší a kvalitnější pyrometry s daleko rychlejší dobou odezvy, většími rozsahy i větší přesností. Takovýmto špičkovým přístrojům se termočlánek jen těžko vyrovná. Je vhodné si však uvědomit, že tyto vlastnosti jsou vykoupené cenou blížící se k hranici jednomu stu tisíc korun a více.

V rámci této diplomové práce byl fyzicky vytvořen technologický kufr obsahující programovatelný automat, do kterého je možné připojit až čtyři libovolné průmyslové senzory teploty a až čtyři doplňkové procesní veličiny ze zdroje indukčního ohřevu. Získaná data zprostředkovává operátorskému pracovišti, které je v rámci uživatelského programu vykresluje do grafů. Mimo to je v PLC zajištěno řízení procesu indukčního ohřevu podle zadané řídicí posloupnosti nastavené pomocí uživatelského programu na operátorském pracovišti. Pro řízení byl použit PID regulátor, který se pro danou aplikaci ukázal být naprosto dostačující. Správně nastavený regulátor dokázal řídit výkon zdroje tak, že měřená teplota kopírovala křivku požadovaného průběhu zadanou uživatelem a to i při nejrychlejších možných změnách teploty a maximálním výkonu zdroje.

Pro styk s uživatelem byl vyvinut uživatelský program operátorského pracoviště pro měření, záznam a vizualizaci teplot a doplňkových procesních veličin ze zdroje. Program uživatelského rozhraní zároveň slouží k nastavení rozsahů teploty použitých senzorů. Díky tomu je možné použít jakýkoliv termočlánek, pyrometr nebo jiný senzor se standardizovaným průmyslovým výstupem. Implementované funkce pro práci s naměřenými daty dělají z uživatelského programu velmi užitečný nástroj. Za zmínku stojí grafické možnosti vizualizace jako je funkce zoom nebo porovnání až osmi průběhů v jenom grafu s automatickým přepočtem měřítka pro každý průběh zvlášť nebo uživatelsky příjemné zadávání teplot řídicí posloupnosti a nebo možnost vyexportovat naměřená data do CSV souboru. V porovnání s běžnými komerčními vizualizačními softwary je vyvinutý program pro vizualizaci a ovládání procesu ohřevu minimálně srovnatelný. Program byl od začátku vyvíjen a konzultován s případnými budoucími uživateli navrhovaného systému a jejich požadavky a návrhy, které byly do návrhu promítnuty, přinesly výsledný efekt.

Navrhnutý a zrealizovaný systém byl testován v reálném provozu. Na teplotu měřenou termočlánkem byl pro účely regulace aplikován integrační filtr pro potlačení poruch procesu a zpřesnění řízení. Parametry regulátoru byly získány empirickými metodami. Při ohřívání masivního desetikilogramového ocelového prstence byly ověřeny jednak funkce a snadnost obsluhy

uživatelského programu v čele s vizualizací průběhu procesu, tak i schopnost PID regulátoru řídit ohřev zapůjčeným 50kW zdrojem indukčního ohřevu. Přestože byl ohřívaný materiál příliš objemný, bylo dosaženo rychlosti ohřevu v řádu několika desítek stupňů celsia za sekundu. K rychlejším ohřevům by byly potřeba menší vzorky vsázky nebo zdroj většího výkonu. Při použití systému pro ohřev jiných předmětů s jinými dynamickými vlastnostmi se předpokládá nezbytné doladění parametrů PID regulátoru.

Využití navrženého systému pro konkrétní aplikaci zatím není. Jeho nespornou výhodou je universálnost. Systém může být snadno modifikován pro řízení, měření a zobrazování jakýchkoliv průběhů procesních veličin i z jiné oblasti než je měření a řízení teplot. Navržený systém je snadno rozšiřitelný co do počtu měřených veličin, k čemuž stačí přidání analogových karet k PLC a drobná úprava obou programu. Takto rozšířený systém najde uplatnění při měření složitých nebo rozměrných objektů, u nichž je vyžadováno sledování teplot na více místech. Výzvou do budoucna jako možné vylepšení systému může být řízení teploty podle více měřených teplot.

Literatura

[1] Klír, J., Seidl, L. *Syntéza logických obvodů*. Praha, SNTL 1996.

[2] Pěchouček, M. Toleranční analýza logických obvodů. Sdělovací technika, 8, 1973, s. 293-298.

[3] Burnett, R.: *Induction Heating*. Získáno Leden 2009, Dostupné z Richie´s Teslacoil WebPage: http://www.richieburnett.co.uk/indheat.html

[4] Powel,J.R.: *Advances in Pipe Line Coating Using Induction Heating.* Sydney, Australia. 2009 Dostupné z: http://www.read-tpt.com/powell.cfm

[5] Bajda, M.: *Plamenopráškové stavované povlaky a jejich využití v praxi.* 2006. Dostupné z: http://www.svarak.cz/c/cz-2/plamenopraskove-stavovane-povlaky-a-jejich-vyuziti-v-praxi.htm

[6] Hanzlík, M.: *Analýza elektromagnetického a teplotního pole v elektricky vodivé vsázce umístěné do jedno a více závitového induktoru.* 2006, diplomová práce, FEL ZČU v Plzni.

[7] Kadlec, K., Kmínek, M.: *Měřicí a řídicí technika.* Ústav počítačové a řídicí techniky VŠCHT Praha, e-text. ver. 2.01, únor 2005. Dostupné z < http://uprt.vscht.cz/ucebnice/MRT >.

[8] Matička,O., Musil L., Prskavec L., Kyncl J., Doležel I., Ulrych B.: *SIMULACE INDUKČNÍHO OHŘEVU.* Dostupné z <http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab02/musil.pdf>

[9] Černý V.: *Indukční ohřev 2*. Elektro. Nakladatelství FCC Public, s.r.o. 11/ 2002.

[10] Malík M.: *Indukční ohřev válcové vsázky pro tváření za tepla dvojím kmitočtem.* Plzeň, 2006, diplomová práce, FEL ZČU v Plzni.

[11] Zinn S., Semiatin S.L.: *Coil design and fabrication –Basic design and modifications.* Heat treating, 10/1988. Dostupné z http://www.ameritherm.com/PDFs/coil_design.pdf

[12] *Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials.* Dep.of Physics and Astronomy, Georgia State Uni. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/tables/magprop.html#c2>

[13] Katalogový list pyrometru MI-KF740-HS. Dostupný z: http://www.mikroninfrared.com/literature/MI-KF740_e1.pdf

[14] Champion, J.: *ZedGraph Class Library*. 11/2007. Dostupné z: <http://zedgraph.org>

[15] Szeruda, R.: *Bezdotykové měření teploty poměrovým pyrometrem.* Dostupné z: <http://sweb.cz/pyrometrie/Pompyr.htm>

[16] Induction srl. 2009. Dostupné z: <http://www.induction.it>

[17] Mareš, L.: *Teplota a její měření.* Větrání a klimatizace, 3/2006. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3115&h=244&pl=47>

[18] Newport Electronics, s.r.o. 2007. Dostupné z: < http://www.omegaeng.cz/ >

[19] Hans, D. I., Eder, H.: *Ziegler-Nichols PID Tunning.* Oberwart, Austria. Dostupné z: <http://ourworld.compuserve.com/homepages/ACTGMBH/zn.htm>

[20] *Zpracování nástrojových ocelí.* 2004. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojovky/zpracovaniNO>

Seznam obrázků

Obr. 1: Blokové schéma navrhovaného řídicího systému 3
Obr. 2: Schematicky znázorněný princip indukčního ohřevu....5
Obr. 3: Rozdělení zdrojů IH podle použitých obvodových komponent měniče....7
Obr. 4: Teplotní průběh ohřevu při nanášení práškových stavovaných povlaků....10
Obr. 5: Elektrický obvod analogie mezi principy zdroje indukčního ohřevu a transformátorem....12
Obr. 6: Principielní zapojení termočlánku typu K....16
Obr. 7: Vliv průměru pláště termočlánkové sondy a její provedení na dobu odezvy vodě. 17
Obr. 8: Reakce čidla na jednotkový skok teploty. M - časová konstanta čidla. 18
Obr. 9: Závislost výstupního napětí různých termočlánků na teplotě....19
Obr. 10: Srovnání závislosti oporu na teplotě termistorů a kovových odporových senzorů.. 21
Obr. 11: Wienův zákon o posunu vlnových délek záření v závislosti na rostoucí teplotě....23
Obr. 12: Zorný úhel pyrometru definovaný jako D:L (1:10)....24
Obr. 13: Graficky znázorněná část spektra používaná při měření širokopásmovými pyrometry. 24
Obr. 14: Porovnání závislosti záření na vlnové délce pro různá tělesa při stejné teplotě. 27
Obr. 15: Testovací pracoviště.. 28
Obr. 16: Rozměry ohřívaného materiálu - vnější prstenec ložiska. 28
Obr. 17: Fotka měřicího kufru 29
Obr. 18: Vstupně výstupní karty PLC a k nim připojené veličiny....30
Obr. 19: Blokové schéma zdroje pro indukční ohřev. Frekvenční měnič – transformátor – induktor. 31
Obr. 20: Pyrometr OS137-3-V1 použitý jako jeden z teplotních senzorů. 33
Obr. 21: Umístěný termočlánku a pyrometru na vsázce....33
Obr. 22: Schéma programového vybavení. 34
Obr. 23: Propojení položek mezi OPC serverem a datovými bloky PLC. 35
Obr. 24: Unikátní označení jedné položky v rámci OPC serveru. 35
Obr. 25: Zadávání řídicí posloupnosti teplot v uživatelském programu....37
Obr. 26: Vizualizační okno uživatelské aplikace pro zobrazování procesních veličin. 38
Obr. 27: Ukázka funkce přiblížení (zoom) 40
Obr. 28: Ukázka použití funkcí zobrazení hodnoty a zobrazení mřížky 40
Obr. 29: Vývojový diagram hlavní kostry PLC programu 42
Obr. 30: Určení parametrů PID regulátoru pomocí metody Ziegler-Nichols....45
Obr. 31: Testování řídicího a měřicího zařízení. 46
Obr. 32: Rozložení teplot ve vsázce. Zleva přivařený termočlánek obložen tepelnou izolací. 47
Obr. 33: Porovnání teploty měřené termočlánkem (T1) a pyrometrem (T4)....48
Obr. 34: Rychlost chladnutí. Teplota měřená termočlánkem bez filtru. 49

Obr. 35: Rychlost změny teploty termočlánku na skokovou změnu výkonu. 49
Obr. 36: Porovnání filtrů s různým stupněm filtrace 50
Obr. 37: Řízení PI regulátorem bez filtru. 50
Obr. 38: PI regulace (P=0,08; I=300ms). 51
Obr. 39: Ohřívané ložisko v induktoru s navařeným termočlánkem s tepelnou izolací. (T~350°C)....52

A. Přehled termočlánků

Tab. 8: Shrnutí vlastností nejpoužívanějších termočlánků (čerpáno ze zdrojů firmy Newport [18])

	Kombinace slitin		Tepel. rozsah (°C)[2]		U_{te} (mV)[4]	Dovolená chyba [5]		Prostředí, ve kterém může termočlánek pracovat, pozn.
	Vodič +	Vodič –	Termočlánky.	Kom.v.[3]		Standard.	Speciál.	
J	Fe (železo)	Cu-Ni (Konstantan)	0 až 750	0 až 200	0 až 42,283	2,2°C nebo 0,75%	1,1°C nebo 0,4%	Redukční, vakuum, inertní.Nedopor. pro nízké teploty
K	Ni-Cr (nikl-chrom)	Ni-Al (nikl-hliník)	-200 až 1250	0 až 200	-5,973 až 50,633	a) 2,2°C nebo 0,75% b) 2,2°C nebo 2,0%	1,1°C nebo 0,4%	Čisté oxidační a inertní. Omezené použití ve vakuu a redukč.prostředí.
T	Cu (měď)	Cu-Ni (Konstantan)	-200 až 350	-60 až 100	-5,602 až 17,816	a) 1,0°C nebo 0,75% b) 1,0°C nebo 1,5%	0,5°C nebo 0,4%	Střední oxid., redukční vakuum nebo inertní. Dobré použití ve vlhkém prostř.Nízké teplot. a kryogenika.
E	Ni-Cr (nikl-chrom)	Cu-Ni (Konstantan)	-200 až 900	0 až 200	-8,824 až 68,783	a) 1,7°C nebo 0,5% b) 1,7°C nebo 1,0%	1,0°C nebo 0,4%	Oxidační nebo inertní. Omez. Použití ve vakuu nebo v redukč. prost.Největší přírůst.U_{te} na 1°C.
N[1]	Ni-Cr-Si (nicrosil)	Ni-Si-Mg (nisil)	-270 až 1300	0 až 200	-4,345 až 47,502	a) 2,2°C nebo 0,75% b) 2,2°C nebo 2,0%	1,1°C nebo 0,4%	Alternativa k typu K.Stabilnější při vysokých teplotách.
R	Pt-13%Rh (platina-rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 16,741	1,5°C nebo 0,25%	0,6°C nebo 0,1%	Oxidační neboinertní. Nevkládat do kovov.ochr.obalů. Chránit před kontaminací.
S	Pt-10%Rh (platina-rhódium)	Pt (platina)	0 až 1450	0 až 150	0 až 14,973	1,5°C nebo 0,25%	0,6°C nebo 0,1%	Oxidační neboinertní. Nevkládat do kovov.ochr.obalů. Chránit před kontaminací.

B	Pt-30%Rh (platina-rhódium)	Pt-6%Rh (platina-rhodium)	0 až 1700	0 až 100	0 až 12,426	0,5% nad 800°C	neudává se	Oxidační neboinertní. Nevkládat do kovov.ochr.obalů. Chránit před kontaminací.
G[1]	W (wolfram)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 38,564	4,5°C do 425°C 1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen. Nepraktické pod 750°C.Chránit před zkřehnutím. Nevhodné pro oxid. prostředí.
C[1]	W-5%Re (wolfram-rhenium)	W-26%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 870	0 až 37,066	4,5°C do 425°C 1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen. Nepraktické pod 750°C.Chránit před skřehnutím. Nevhodné pro oxid. prostředí.
D[1]	W3%Re (wolfram-rhenium)	W-25%Re (wolfram-rhenium)	0 až 2320	0 až 260	0 až 39,506	4,5°C do 425°C 1,0% do 2320°C	neudává se	Vakuum, inertní, hydrogen. Nepraktické pod 750°C.Chránit před skřehnutím. Nevhodné pro oxid. prostředí.

[1] Uvedené označení není oficiální nebo normované

[2] Myslí se užitečný teplotní rozsah. Termočlánek generuje napětí i mimo uvedený teplotní rozsah, nezaručuje se ale uvedená dovolená chyba.

[3] Kompenzační vinutí.

[4] Rozsah elektromotorického napětí generovaného v užitečném teplotním rozsahu.

[5] Uvádí se v °C nebo v % neměřené hodnoty, podle toho co je větší.

a) Nad 0°C

b) Pod 0°C

B. Obsah přiloženého CD

CSV data – adresář naměřených dat ve formátu CSV

Datasheets – adresář katalogových listů vybraných pyrometrů

Foto dokumentace – adresář fotek a videí pořízených během testování systému

PC aplikace – zdrojové kódy a program pro vizualizaci a ovládání systému (Visual Studio 2008)

PLC program – zdrojové kódy a program pro PLC (Simatic S7)

DIP_CENDELIN_2009.pdf – text diplomové práce