

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Autoreferát disertační práce

**MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ POMOCÍ
KONTAKTNÍCH METOD MĚŘENÍ**

Temperature array measurement by contact methods

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: P 2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Technická kybernetika

**MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ POMOCÍ
KONTAKTNÍCH METOD MĚŘENÍ**
Temperature array measurement by contact methods

Ing. Tomáš Martinec

Školitel: Doc. Ing. Petr Tůma, CSc.
Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické informatiky

Rozsah práce:

Počet stran: 146
Počet obrázků: 87
Počet tabulek: 13
Počet příloh: 5

Liberec, 2009

Anotace

Tato disertační práce se zabývá měřením teplotních polí pomocí dotykových senzorů ve třech konkrétních průmyslových aplikacích. Nabízí tak tři různé úhly pohledu tuto problematiku, včetně porovnání výsledků se simulací a případně i s výsledky bezdotykových metod měření. V poslední z úloh jsou navíc použity různé senzory a metody pro vyhodnocení teplotního pole na formě, včetně vyhodnocení a porovnání nejistot měření. Jednou z navržených a realizovaných metod je použití formy jako jednoho z termočlánekových vodičů. Práce obsahuje i kompletní metodiku pro určení vlastností a výpočet nejistot u takových termočlánců.

Abstract

The main subject of this thesis are temperature arrays in industry and measurement of this arrays by the contact sensors. This thesis offers the three different points of view to this problems, because they are based on three different industry applications. Every part of this work offers comparison with preceding simulations and with afterwards verification by the thermovision (if it is available). The last part (measurement on the slush moulding plate) offers comparisons of using different sensors and different methods for temperature array evaluation in one technology, including evaluation of the measurement uncertainty. The last described method use a plate as a one of the thermocouple materials. This work contains complete description of this method and description of technique, how to measure and evaluate characteristics and uncertainty for this thermocouples.

Obsah

OBSAH	5
1 ÚVOD	4
2 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE VE VSTŘIKOVACÍ FORMĚ	5
2.1 Současný stav problematiky	5
2.2 Charakteristika zvoleného řešení	7
2.3 Výsledky měření	8
2.4 Nejistoty měření	9
2.5 Shrnutí výsledků	10
3 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE V AUTOMOBILOVÉ SEDAČCE	11
3.1 Současný stav problematiky	11
3.2 Charakteristika zvoleného řešení	12
3.3 Časová konstanta senzoru	13
3.4 Kalibrace senzorů	14
3.5 Nejistoty měření	15
3.6 Shrnutí výsledků	16
4 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE NA FORMĚ PRO VÝROBU UMĚLÉ KŮŽE	17
4.1 Současný stav problematiky	17
4.2 Experimentální zařízení pro ohřev	19
4.3 Měření pomocí termočlánků typu K	22
4.4 Jednodrátové připojení termočlánků	25
4.5 Nejistoty měření	35
4.6 Shrnutí výsledků	39
5 ZÁVĚR	41
CITOVANÁ LITERATURA	43
SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ	44

1 Úvod

Teplota patří v praxi k nejčastěji měřeným fyzikálním veličinám. V průmyslu je totiž jedním z nejdůležitějších parametrů u většiny technologických procesů. Její měření je ale důležité i v jiných oborech, jako je stavebnictví nebo zdravotnictví. Je totiž jen velmi málo vlastností látek, které nejsou teplotně závislé. Velmi často také nestačí měřit teplotu pouze jednoho bodu, ale je nutné znát teplotní pole v určité oblasti. V závislosti na velikosti této oblasti a požadované přesnosti měření se můžeme setkat s řadou různých praktických problémů, se kterými se při měření v jednotlivých bodech nesetkáme.

Tato disertační práce popisuje tři konkrétní úlohy, na jejichž řešení se její autor v průběhu studia podílel a jejichž společným jmenovatelem je potřeba měřit a vyhodnocovat teplotní pole v různých prostředích. Všechny popisované úlohy vzešly z požadavků průmyslu, ale vzhledem k rozdílnému zadání byl pro každou z úloh navržen a realizován zcela jiný systém měření. Proto tato práce nabízí porovnání různých senzorů a metod pro měření teploty z hlediska jejich využitelnosti pro měření teplotních polí. Řešení se liší jak použitými senzory, tak i způsobem vyhodnocení a dalšího zpracování měřených signálů. Každý návrh měřicího systému byl totiž prováděn na základě specifických požadavků vždy pro konkrétní aplikaci, proto tato práce popisuje i technologické pozadí a problematiku procesů, které s každou z popisovaných aplikací souvisí.

2 Měření teplotního pole ve vstřikovací formě

2.1 Současný stav problematiky

V současné době se problematikou procesů při vstřikování zabývá mnoho firem i výzkumných týmů. Analýzu vstřikovacího procesu na jednoduchém výrobku lze nalézt např. v disertační práci [1]. V dostupné literatuře se ale věnuje většina autorů pouze vyhodnocování naměřených hodnot z hlediska kvality výrobku pro jeden konkrétní výrobek. Pro měření používají nějaké komerčně dostupné řešení (např. laboratorní měřicí kartu pro PC) a data vyhodnocují offline. Protože pracují většinou s pokusnou formou, nejsou kladeny žádné nároky na včlenění měřicího řetězce do procesu ani na využití naměřených dat pro přímé řízení procesu. Navíc pracují obvykle s výrobky menších rozměrů, které lze snadněji popsat a modelovat, ale kde se řada problémů nemusí projevit.

Při vstřikování dílů větších rozměrů, které mají ještě navíc obvykle poměrně složité tvary, dochází při výrobě k různým nevídaným jevům, jejichž společným jmenovatelem je teplota. Zejména se jedná o nevhodné přehřátí formy před startem cyklu, které ovlivňuje tečení materiálu během vstřiku, a nedostatečné chlazení formy na konci cyklu, které může způsobit deformace výrobku při vyjímání. Při špatném nastavení technologických parametrů tak může docházet k výrobě vadných kusů, přičemž některé vady se nemusí projevit hned, ale až při následném dalším zpracování výrobku (např. během ohřevu při lakování se může projevit na výrobku skryté pnutí a ten pak může změnit rozměry nebo tvar). Pro eliminaci těchto jevů dnes existují různé metody. Obecně je můžeme rozdělit podle způsobu jejich použití do dvou kategorií:

- metody pro optimalizaci návrhu formy při přípravě nového sortimentu, které buď na základě zkušeností, nebo dnes pomocí moderních metod modelování a simulace, doporučí takovou konstrukci formy a chladicího systému, která minimalizuje prostor pro případné problémy
- metody pokročilého řízení procesu, které zlepšují kvalitu a stabilitu výroby pomocí pokročilé regulace nebo na základě informací z různých čidel, dodatečně montovaných na formu

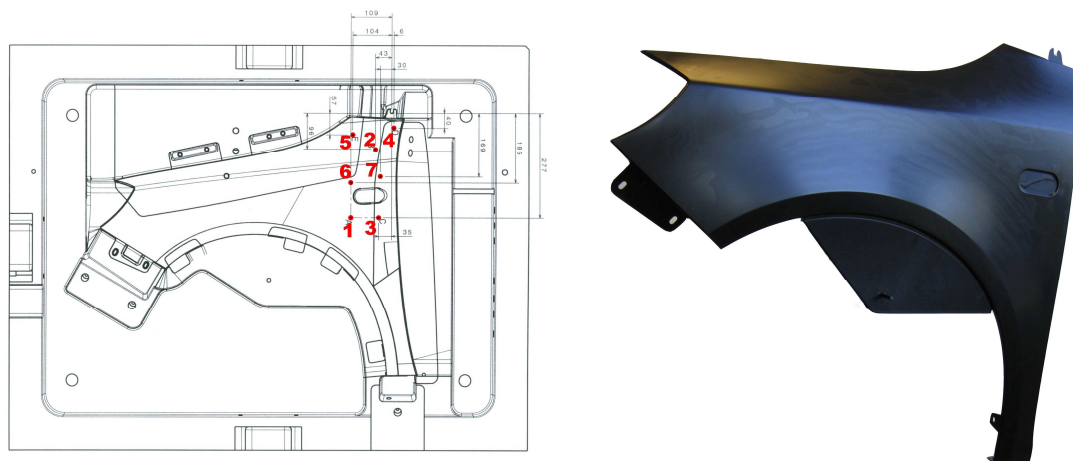
Nevýhodou první popisované množiny metod jsou poměrně úzké limity, ve kterých je možné se při návrhu pohybovat. Omezení jsou dána hlavně konstrukcí a parametry stroje a tvarem požadovaného výrobku. Jedním z nejznámějších nástrojů z této množiny je software *Moldflow*, který umožňuje velmi přesně modelovat procesy během vstřikovacího cyklu. Využití tohoto programu dává velmi přesnou představu o vlastním procesu i o vlivu různých zásahů konstrukce formy nebo do tvaru výrobku (viz [2]). Výsledky simulací tohoto programu budou dále prezentovány i v této práci.

Druhou množinou jsou metody, které se zabývají zdokonalováním vstřikovacího procesu. Jedním ze zástupců těchto metod je např. metoda *Intellimold*, která používá speciální zásah do tvaru výrobku a také přidané čidlo (případně víc čidel) tlaku a teploty, na základě kterých zasahuje do regulace pohonu a tím se snaží dosáhnout rovnoměrného průběhu tlaku po celou dobu procesu a v celém objemu výrobku (podrobnosti viz [3]). V dostupné literatuře o těchto technologiích však nebyla nikde nalezena zmínka o tom, že by pro řízení nebo i jen monitorování vstřikovacího procesu byla měřena teplota ve větším množství bodů a regulační zásahy byly korigovány na základě znalosti teplotního pole ve formě.

Firma Cadence Innovation, jako jeden z předních výrobců plastových dílů pro automobilový průmysl, spolu s firmou LENAM a Technickou univerzitou v Liberci rozhodla pro vývoj vlastní technologie, která by umožňovala optimalizovat výrobu zejména právě velkých plastových dílů na základě informace o teplotním poli ve formě. Předpokládaným výsledkem by měl být systém, který by se využíval online naměřené hodnoty teplotního pole při řízení akčních veličin, nebo by alespoň upravoval jejich žádané hodnoty na základě měření průběhu předchozího cyklu. Měření teplot přímo ve vstřikovací formě ale komplikuje zejména konstrukce formy. Forma samotná se skládá ze dvou oddělitelných částí – tvárníku a tvárnice. Uvnitř obou těchto částí je zabudovaný tlakový a chladicí systém. Senzory nelze zabudovat na povrch formy, protože nesmí být narušen povrch vylisku. Musí být vloženy do speciálně zkonstruované jímky. Takovou jímku ale není možné, vzhledem k ostatním systémům ve formě, umístit do libovolného místa formy. Také nemůže být vedena až těsně k povrchu, aby nebyla narušena mechanická pevnost formy a nemohlo dojít k jejímu poškození při velkém tlakovém namáhání během cyklu.

2.2 Charakteristika zvoleného řešení

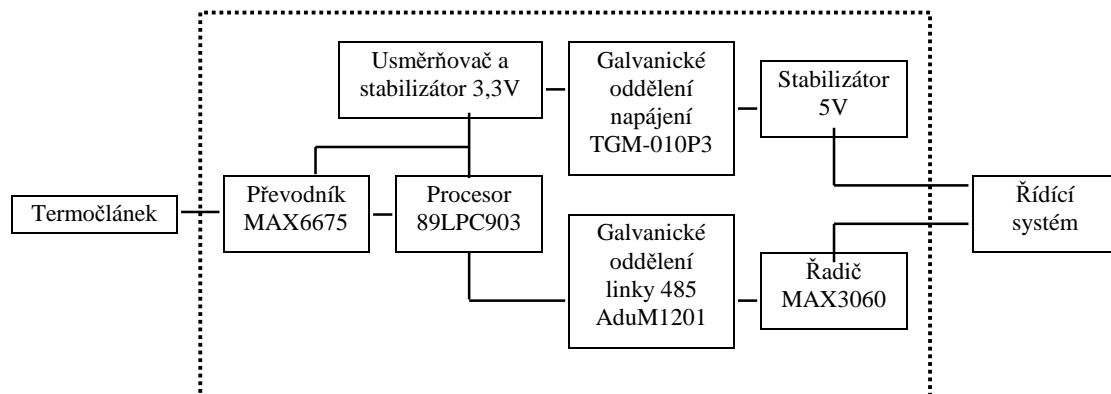
Na základě předchozích zkušeností vybrala firma LENAM na jedné z forem pro výrobu blatníku (viz obr. 2.1) sedm míst v problematické oblasti kolem prolisu pro ukazatel směru, kde bylo dle zadání nutné měřit teplotu v průběhu cyklu. V těchto místech byly ve tvárníku vytvořeny jímky pro senzory. Jako senzory byly vybrány termočlánky typu K. Pro vyhodnocení, digitalizaci a přenos signálu z těchto termočlánků však bylo nutné použít takový měřicí systém, který by splňoval požadavky na přesnost měření, mechanickou odolnost, velkou variabilitu a který by umožňovat začlenění do řídicího systému vstřikovacího lisu. Žádný z komerčně nabízených produktů nesplňoval všechna požadovaná kritéria a proto byl navržen a vyroben prototyp takového systému, který byl posléze testován na výše popsané pokusné formě.



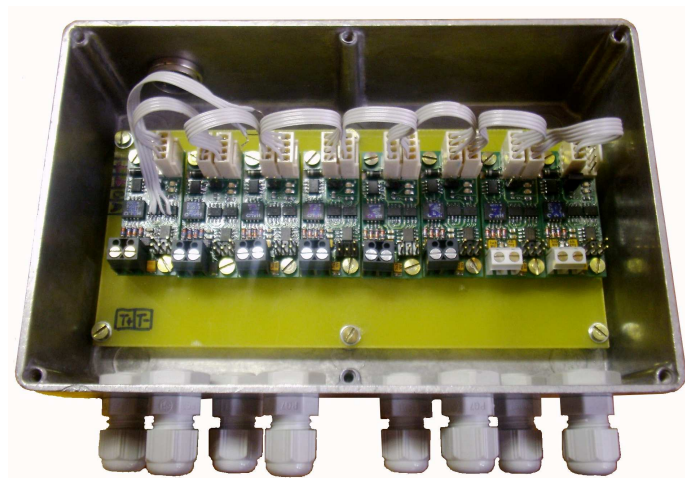
Obrázek 2.1 - Rozmístění čidel a pohled na hotový výlisek blatníku, zdroj: LENAM s.r.o.

Navržený systém se skládá z několika nezávislých modulů (blokové schéma viz obr. 2.2) které s nadřazeným systémem komunikují po sběrnici RS485. Každý z těchto modulů obsahuje galvanicky oddělenou část pro měření termočlánekových vstupů a procesor, který má implementovaný komunikační protokol. Digitalizaci signálu z termočlátku zajišťuje obvod MAX6675. Tento 12 ti bitový převodník má vstupní rozsah teplot 0 °C až 1024 °C a vnitřní kompenzaci studeného konce. Data z převodníku jsou vyčítána řídicím procesorem P89LPC903FD. Datové signály jsou galvanicky odděleny pomocí obvodů AduM1201, napájení modulů je odděleno pomocí miniaturních transformátorů. Použitý komunikační protokol umožňuje propojit až 254 modulů, které je možné rozdělit i do více míst na stroji, podle aktuální potřeby. To dává systému dostatečnou variabilitu. Pro popisovaný případ bylo

rozhodnuto použít osm modulů a umístit je do jedné krabice s dostatečným krytím. Použitá hliníková krabice zajišťuje jak mechanickou odolnost, tak i krytí proti prachu a kapalinám (IP54) a odolnost proti elektromagnetickému rušení. Napájení a sběrnice jsou vyvedeny jedním kabelem mimo vstřikovací lis. Pomocí převodníku sběrnice RS485 na RS232 je celý systém připojen k řídicímu počítači typu PC, který vyčítá naměřené teploty, zobrazuje jejich průběh a ukládá je pro pozdější další zpracování. Během měření se načítají a ukládají hodnoty z vybraných převodníků s periodou 0,2 s a zároveň se všechny hodnoty ukazují v grafu.



Obrázek 2.2 - Blokové schéma měřícího modulu

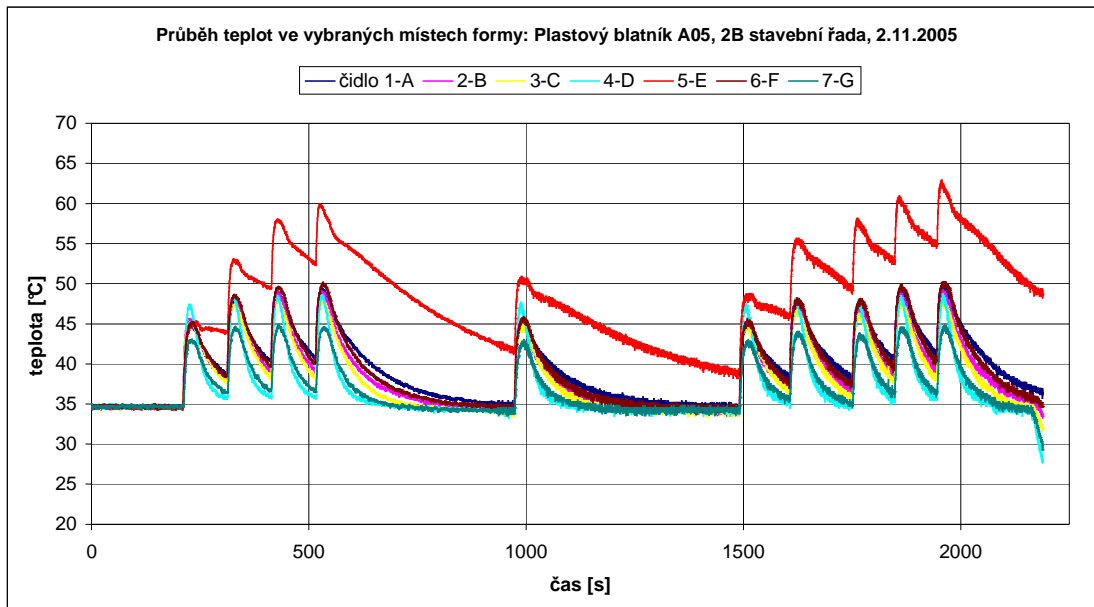


Obrázek 3.3 - Mechanické uspořádání převodníků

2.3 Výsledky měření

Popisované zařízení bylo testováno v provozu na formě tvarově jednoduchého plastového dílu. Během pokusu byl sledován průběh několika pracovních cyklů stroje. V praxi tak bylo ověřeno, že zvolené řešení je dostatečně mechanicky odolné a je možné použít na existujícím stroji. Jímka, ve které byl umístěn teploměr číslo 5, byla bohužel v důsledku špatné

konstrukce narušena. I tak je přesto zřejmé, že teplota formy se v průběhu směny postupně zvyšuje. To znamená, že chladicí systém formy v tomto případě nestačí dostatečně rychle snižovat teplotu formy.



Obrázek 3.4 - Naměřené hodnoty

2.4 Nejistoty měření

Pro správné zhodnocení výsledků je nutná ještě určit nejistotu měření. Ta se skládá ze standardní nejistoty typu A, která se zjišťuje pomocí statistických metod, a nejistoty typu B, která je v tomto případě dána zejména použitým termočlánkem a použitým AD převodníkem (viz [4]). Pro výpočet nejistoty typu A byla použita řada hodnot, která byla naměřena při ustáleném stavu těsně před vlastním měřením na stroji. Postupně byla stanovena směrodatná odchylka pro jednotlivé vstupy. Výsledky ukazují, že směrodatné odchylky naměřených dat mají pro všechna čidla podobné hodnoty. Na hodnotu standardní nejistoty typu B má v tomto případě největší vliv nejistota daná tolerancemi použitých součástek. Pro AD převodník MAX6675 udává výrobce $\Delta t_{AD,max} = 2,25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Použité termočlánky typu K mají dle výrobce standardní chybu 0,75 % z měřeného rozsahu (viz [5]). Pro uvažovaný použitý rozsah teplot tedy můžeme použít $\Delta t_{K,max} = 0,525 \text{ } ^\circ\text{C}$. Dosazením do příslušného vztahu, pak dostaneme pro standardní nejistotu typu B vztah (2.1).

$$u_B(t) = \sqrt{\left(\frac{\Delta t_{AD \max}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{K \max}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2,25}{1,73}\right)^2 + \left(\frac{0,525}{2}\right)^2} = 1,32 \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.1)$$

Kombinovanou standardní nejistotu spočítáme ze standardní nejistoty typu A a typu B. Protože je však hodnota standardní nejistoty zanedbatelná vůči hodnotě standardní nejistoty typu B, můžeme napsat, že $u_c(t) = u_B(t) = 1,32 \text{ } ^\circ\text{C}$. Rozšířenou nejistotu pro interval spolehlivosti 95,5 % podle vztahu (2.2).

$$U(t) = k \cdot u_c(t) = 2 \cdot 1,32 = 2,6 \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.2)$$

2.5 Shrnutí výsledků

Na základě konkrétního zadání z průmyslu, které směřovalo ke zlepšení stávající technologie, byl navržen, realizován a posléze i odzkoušen modulový měřicí systém pro měření teplotních polí. Naměřené výsledky ukazují, že tento systém je plně funkční a použitelný pro daný účel. Dokonce na jejich základě lze pro sledovaný proces konstatovat, že změny teplotního pole v rámci jednoho cyklu se během výroby značně liší. Problémy se stabilitou kvality u popisovaného výrobku jsou tak s velkou pravděpodobností důsledkem rozdílů teplot v mezi cykly v kritické oblasti. Tyto závěry ale nebylo možné učinit na základě předchozích simulací, ani na základě měření teplotního pole termokamerou.

Dalším krokem by měl být návrh vhodných zpětnovazebních zásahů do technologie, které by tento problém minimalizovaly a začlenění měřicího systému do zpětné vazby (např. by bylo možné měnit požadované hodnoty pro chladicí systém na základě naměřených teplot z předchozího cyklu). Bohužel byl tento projekt pozastaven ze strany firmy Cadence Inovation z důvodu změny priorit.

3 Měření teplotního pole v automobilové sedačce

3.1 Současný stav problematiky

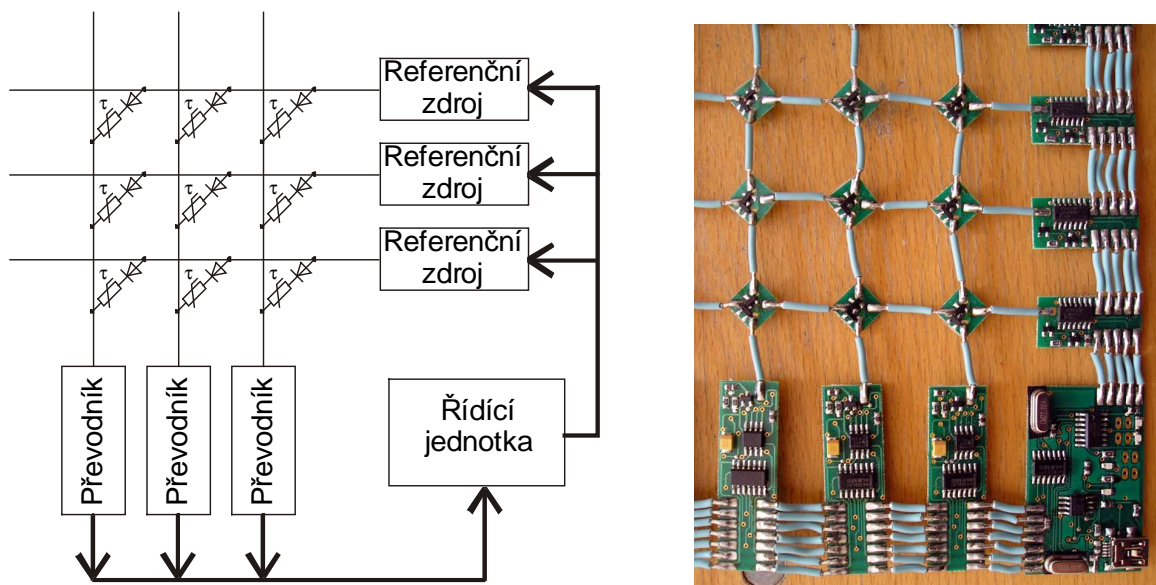
Bezpečnost silničního provozu a komfort posádky (zejména řidiče) jsou oblasti, které spolu velmi úzce souvisí. Kondice řidiče a jeho momentální schopnost reagovat na podněty z okolí během řízení vozu jsou ovlivňovány velkým množstvím parametrů. Proto je v dnešní době stále více sledováno přímé okolí řidiče a je snaha ovlivňovat ty parametry, které mají přímý vliv na pohodu řidiče a snižují jeho únavu při řízení. Zdokonalování automobilů v této oblasti přináší jednak větší bezpečnost na silnicích, ale také přidanou hodnotu pro uživatele čímž zvyšuje schopnost automobilky uspět na náročném trhu. Proto tímto směrem zaměřuje zřejmě většina automobilek a aut jsou čím dál více vybavována systémy, jako je klimatizace, vyhřívání sedaček nebo regulace podsvícení palubní desky podle okolního jasu. Všechny tyto funkce by měly přispívat k tomu, aby se řidič cítil v autě pohodlně a aby jeho pozornost mohla být zaměřena plně na řízení. Bohužel není snadné kvantifikovat vliv jednotlivých parametrů a nebo dokonce stanovit jejich optimální hodnoty.

Jedním z nejdůležitějších parametrů okolí, který má velký vliv na pohodu řidiče, je bezesporu okolní teplota. A to jak teplota okolního vzduchu, tak i teplota jeho sedačky. Aby bylo možné provádět výzkum v této oblasti, je nutné mít dostatečné množství dat z reálného provozu. Bohužel v dostupné literatuře nebyla nalezena žádná zmínka o tom, že by byl podobný výzkum prováděn nebo že by existoval systém pro sledování teploty během jízdy, který by zaznamenával i jinou teplotu, než jen teplotu vzduchu v automobilu.

Na základě zadání od firmy Škoda Auto byl proto navržen a realizován měřicí systém, který umožňuje měřit teplotu na rozhraní mezi automobilovou sedačkou a řidičem a to v celé ploše. Toto zadání znamená, že měření teploty musí být prováděno v dostatečném množství bodů a přitom je potřeba pokud možno neovlivňovat prostup tepla ze sedačky a do sedačky. Důraz je také kladen na to, aby celý systém měl dostatečnou mechanickou odolnost a přitom aby co nejméně omezoval komfort řidiče.

3.2 Charakteristika zvoleného řešení

Rastr pro rozmístění senzorů byl zvolen 25,4 mm. To znamená, že na požadované měřené ploše 50 x 140 cm je celkem 1200 měřených bodů. Tyto body bylo nutné vzájemně pospojovat do matice pomocí drátových propojek. Mimo vlastního odporového teplotního senzoru musí být v každém měřicím bodě i dioda, aby bylo možné postupné vyčítání matice teplot po jednotlivých řádcích. Každý řádek v tomto maticovém uspořádání má vlastní zdroj referenčního napětí a v každém sloupci je A/D převodník.



Obrázek 3.1 - Blokové schéma systému a detail s řídicí jednotkou

Jako teplotní čidlo byl zvolen odporový PTC senzor KTY82-220 od firmy Philips (viz [6]). Deska má rozměry 9,5 x 9,5 mm. Vlastní senzor i dioda jsou v pouzdru SOT23, takže tloušťka celé desky i se součástkami nepřesáhne 2mm. Každý řádek v matici čidel má vlastní řízený referenční zdroj, který se připojuje k tomuto řádku pouze v okamžiku, kdy chceme odečíst aktuální hodnoty teplot. Zdroje se z pohledu procesoru chovají jako jeden 60 ti bitový posuvný registr. Ke každému sloupci je připojen deska s A/D převodníkem TLC1549. Použité zapojení a způsob řízení převodu minimalizuje spotřebu celého zařízení a umožňuje využít maximální rychlost vyčítání dat z převodníků. Celý systém je řízen pomocí jednočipového procesoru DS89C420. Tento procesor je připojen k PC pomocí převodníku z RS232 na USB FTDI 232R. Ze sběrnice USB celý systém i napájen.

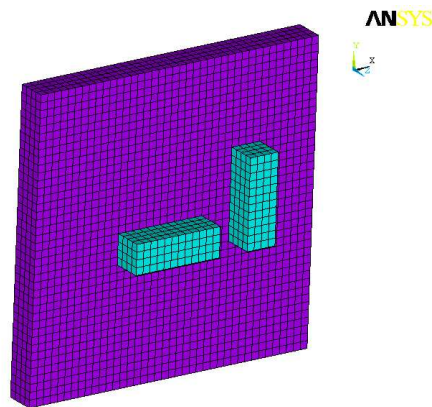
3.3 Časová konstanta senzoru

Aby bylo možné zhodnotit, zda je takto vytvořený systém v praxi použitelný pro sběr dat v uvažované aplikaci, je nutné zjistit časovou jednotlivého senzoru. Pokud se nám podaří zjistit alespoň přibližně hodnotu této časové konstanty, pak můžeme určit, zda je tato chyba zanedbatelná vzhledem k očekávaným vlastnostem celé měřené soustavy. Parametry modelu destičky se senzorem lze obecně zjistit dvěma způsoby: pomocí experimentu nebo pomocí simulace. Pro zjištění parametrů modelu sensorové desky byl nejprve proveden experiment s jednou takovou deskou, ke které byly připojeny měřící vodiče přímo k senzoru aby měření nebylo ovlivněno připojenou sériovou diodou (které je také na desce normálně také osazena) Naměřená přechodová charakteristika byla identifikována pomocí programu Matlab a výsledkem je obrazový přenos (3.1). Velikost časové konstanty tohoto čidla při měření v automobilové sedačce můžeme tedy očekávat cca 15s, což je pro předpokládané rychlosti dějů v autosedačce naprosto dostačující.

$$F_p(s) = \frac{24}{14,7s + 1} \quad (3.1)$$

Aby bylo možné porovnat výsledky výše popsaného experimentu se simulací, byl vytvořen model jednoho senzoru a okrajové podmínky byly nastaveny tak, aby se co nejvíce přiblížily reálnému průběhu experimentu. Materiál použitého plošného spoje je FR4, jehož materiálové vlastnosti jsou dobře známé. Bohužel firma Philips neuvádí materiál, ze kterého je vyrobeno pouzdro senzoru a tak nebylo možné najít jeho přesné vlastnosti. Proto byly zvoleny hodnoty, které odpovídají plastické hmotě, ze kterého se tato pouzdra obvykle vyrábějí. Všechny ostatní součásti senzoru bylo možné vzhledem k celkovým rozměrům senzoru zanedbat. Simulace pak byla provedena na zjednodušeném modelu, viz obr. 3.2. Výstupem transientní FEM analýzy byl časový průběh teplotních toků, teplotních gradientů a teplotního pole na povrchu senzoru během simulovaného přechodového jevu a také průběh v několika konkrétních zvolených bodech uvnitř pouzdra senzoru, na rozhraní senzoru a desky plošného spoje a uvnitř desky plošného spoje. Identifikace takto získaných hodnot ukazuje, že časová konstanta, získaná simulací, odpovídá hodnotě 0,07 s. Pokud tuto hodnotu porovnáme s hodnotou, získanou experimentálně (viz (3.1)), zjistíme, že se řádově liší. Proto byla provedena citlivostní analýza modelu. Pomocí variací zvolených parametrů (měrná tepelná

kapacita, teplotní vodivost apod. byl zkoumán jejich vliv na výslednou časovou konstantu. Ani pomocí poměrně značných změn v parametrech modelu však nebylo dosaženo srovnatelných výsledků s výsledky experimentu. Aby bylo možné dosáhnout reálnějších výsledků, bylo by nutné použít přesnější model senzoru který by obsahoval i informaci o vnitřní struktuře čipu. Takový model však z dostupných informací o tomto integrovaném obvodu není možné sestavit. Další možností je pak pokračovat v citlivostní analýze a nalézt takové parametry modelu, které odpovídají přesně naměřeným hodnotám. Tento postup by nám umožnil používat i tento zjednodušený model pro následné simulace.

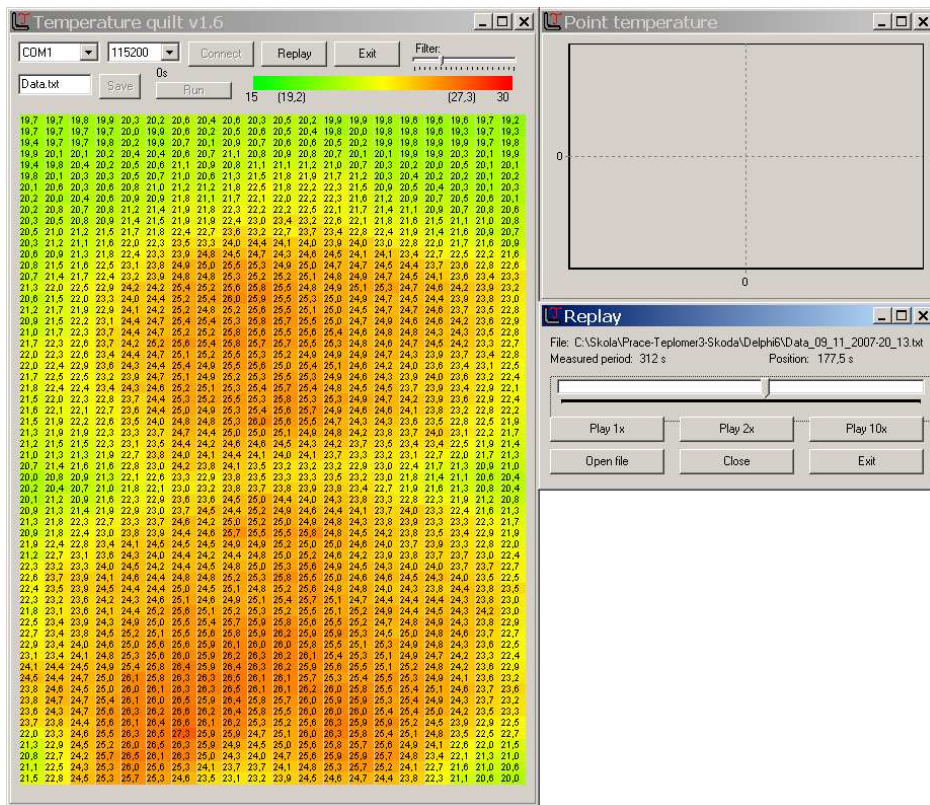


Obrázek 3.2 – Model senzoru pro simulaci

3.4 Kalibrace senzorů

Pro účely kalibrace bylo nutné provést měření v kalibrační peci, které bylo provedeno v rámci diplomové práce (viz [7]). Pro vyhodnocení naměřených dat byl vytvořen v rámci diplomové práce kalibrační program, který určuje koeficienty regrese pro každý jednotlivý bod. Bylo provedeno měření pro pět různých teplot, pro každou teplotu byly uloženy tři odměry krátce po sobě. Vstupem vytvořené aplikace jsou výstupy z převodníků měřícího systému při ustálení na referenčních teplotách a výstupem pak koeficienty polynomů, které převádějí výstup převodníku v jednotlivých měřených bodech na konkrétní hodnotu teploty. K tomuto účelu aplikace používá aproximační metody nejmenších čtverců. Aplikace nejprve provede průměry ze všech pěti odměrů, které byly získány při každé měřené teplotě. Na základě vyhodnocení grafu průběhu teploty byla zvolena pro prokládání lineární funkce. Výstupem z kalibračního programu je pak textový soubor, který obsahuje koeficienty polynomu pro každý měřící bod. Tento soubor je pak načítán z programu, který slouží pro

čtení a ukládání měřených dat (viz obr. 3.3). Program dokáže i vizualizovat uložená data a procházet naměřené průběhy.



Obrázek 3.3 - Vizualizační program

3.5 Nejistoty měření

Pro stanovení standardní nejistoty typu A použijeme data, naměřená dne 9.11.2007 v 20:13 při jízdě v automobilu. Pro analýzu volíme např. bod [1,1]. Průměrná teplota ve zvoleném intervalu byla 18,09 °C a vypočtená směrodatná odchylka je 0,035 °C. Vzhledem k tomu, že při kalibraci byl pro každý bod zjištěn kalibrační polynom pro převod výstupních hodnot z AD převodníku na teplotu, není nutné do nejistoty typu B zahrnovat tolerance použitých součástek. Postačí zohlednit nejistotu, která je daná interpolací při kalibraci a nejistotu měření AD převodníku. Nejistotu interpolace odhadneme pomocí maximálního rozdílu mezi naměřenou a interpolovanou hodnotou v měřeném rozsahu. V tomto případě je to pro zvolený bod [1,1] hodnota $\Delta t_{[1,1]max} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Protože jde o nepřímé měření, musíme standardní nejistotu typu B pro použitý AD převodník spočítat podle příslušného vztahu. Maximální chyba AD převodníku, deklarovaná výrobcem, je $\pm 1 \text{ LSB}$. Pro bod [1,1] z interpolačního polynomu pro výpočet teploty spočítáme citlivostní koeficient A. Pak můžeme pro nejistotu typu B pro bod [1,1] psát vztah (3.1).

$$u_{B[1,1]}(t) = \sqrt{\left(\frac{\Delta t_{[1,1]\max}}{k_1}\right)^2 + \left(A \frac{\Delta t_{AD\max}}{k_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(0,286 \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 1,17 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.1)$$

Protože je hodnota standardní nejistoty typu A zanedbatelná vůči hodnotě standardní nejistoty typu B, můžeme napsat $u_{c[1,1]}(t) = u_{B[1,1]}(t) = 1,17 \text{ }^\circ\text{C}$. Rozšířenou nejistotu pro interval spolehlivosti 95,5 % pak určíme dle příslušného vzorce. Pro maximální nejistotu naměřené hodnoty v bodě [1,1] v celém měřeném rozsahu a se zvolenou spolehlivostí platí vztah (3.2). Stejným způsobem by bylo možné provést výpočet nejistoty i ve všech ostatních bodech. Lze ale očekávat, že výsledné hodnoty by budou velmi podobné.

$$U_{[1,1]}(t) = k \cdot u_{c[1,1]}(t) = 2 \cdot 1,17 = 2,3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2)$$

3.6 Shrnutí výsledků

Tato úloha se od ostatních dvou v této práci liší v tom, že naměřená data nejsou používána pro řízení technologického procesu, ale jsou ukládána pro pozdější další zpracování. Jedná se totiž o podporu výzkumu, který by měl kvantifikovat vliv různých parametrů okolí řidiče na jeho únavu a pozornost při řízení. Tento předpokládaný výzkum zapadá do celé řady dalších podobných projektů firmy Škoda Auto, které mají za úkol přinášet nové podněty k vylepšování vlastností aut, zvyšování bezpečnosti silničního provozu a v neposlední řadě i zvyšování komfortu jak řidiče, tak i ostatních cestujících v automobilu. Tato práce pokrývá metodiku pro měření jednoho z důležitých parametrů pro pohodu řidiče, a to teplotu v sedačce. Vlastní výzkum a vyhodnocení vlivu na řidiče musí zahrnovat ještě další parametry, jako je teplota vzduchu, intenzita okolního osvětlení, intenzita hluku apod. Lze předpokládat, že podobnými výzkumy se zabývají všechny velké automobilky. Bohužel v dostupné literatuře nebyla nalezena žádná zmínka o nějakém podobném měřicím systému. Další předpokládanou oblastí využití popsaného měřicího systému je pak hodnocení vlastností různých materiálů. Navržený a realizovaný prototyp je aktuálně umístěn ve vývojovém oddělení firmy Škoda Auto a další prováděná měření i jejich výsledky jsou vlastnictvím firmy Škoda Auto a není možné je zveřejnit. Systém doplňuje doposud prováděná měření pomocí termokamery, která neumožňovala kontinuální měření teplotního pole a kde každý odměr měl velký vliv na vlastní pole.

4 Měření teplotního pole na formě pro výrobu umělé kůže

4.1 Současný stav problematiky

V kapitole číslo 2 byla zmíněna technologie vstřikování (*injection moulding*), která se využívá pro výrobu tvrdých plastových dílů. Pro některé typy výrobků (jako je např. přístrojová deska v autě) je ale dnes požadován kvalitnější typ povrchu, který by byl příjemnější na pohled i na omak. Proto se podklad z tvrdého plastu potahuje ještě další vrstvou (případně několika vrstvami) tak, aby se docílilo požadovaných vlastností. Pro výrobu poslední vrstvy (tzv. umělé kůže) se obvykle používá technologie *slush moulding*. Hlavním principem této technologie pro výrobu umělých kůží je nanesení PVC materiálu ve formě prášku na povrch formy, která je rovnoměrně předehřátá na vhodnou teplotu. Poté je forma ještě po nějakou dobu udržována na požadované teplotě, aby došlo k úplnému spečení prášku. Hotová umělá kůže se pak pokládá na výlisek z tvrdého plastu a vnitřní prostor je vyplněn PUR pěnou. Tím vzniká polotovar, který je dále upravován (např. frézováním jsou vytvořeny vnitřní otvory) a do kterého je následně montováno další příslušenství (např. osazení pro airbag).

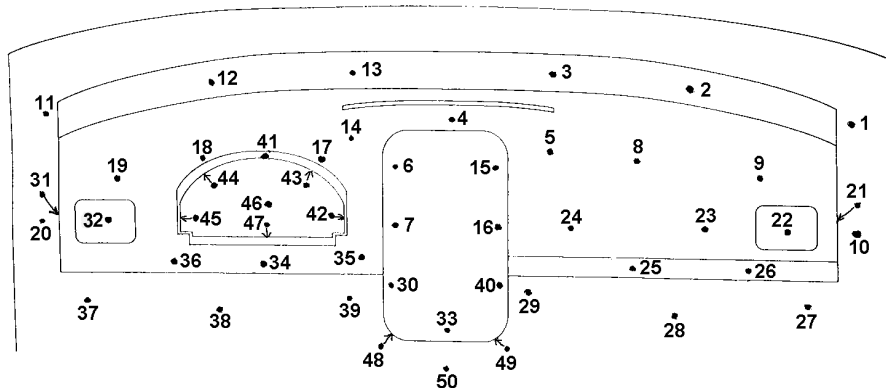
Firma Cadence Innovation je jedním z předních výrobců palubních desek a proto vyrábí i palubní desky, které obsahují měkčené plasty. Na výrobu umělých kůží však neměla strojové vybavení a na světě je pouze několik velkých dodavatelů, kteří dokáží vyrábět umělé kůže a mají pro jejich výrobu dostatečnou kapacitu. Proto se firma rozhodla pro získání vlastní linky na výrobu těchto dílů, které pak může použít pro kompletování celých palubních desek za příznivějších podmínek, než když byla nucena nakupovat tyto díly u různých dodavatelů. V současné době existuje několik firem, které nabízejí stroje pro technologii *slush moulding* (viz např. prezentace [8] nebo [9]). Existující stroje používají pro ohřev povrchu formy různé technologie, prakticky všechny používané postupy jsou však patentově chráněny. Pro přenos tepla na formu se využívá např. horký olej, písek, vzduch nebo záření. Některé stroje využívají dokonce i kombinaci několika různých metod pro co nejrychlejší dosažení rovnoměrného rozložení teplot. Každá z uváděných metod má ale své problémy. U oleje a písku je to hlavně nutnost zřídít materiálové hospodářství a přepravovat velké

objemy média, u horkého vzduchu jsou zase problémem velké rozměry stroje a velká hluková zátěž. Relativně nejméně náročnou metodou ohřevu z hlediska provozních nákladů je využití přenosu tepla záření. Problémem u této metody jsou zejména velké nároky na řízení ohřevu (aby byl dostatečně rychlý a přitom rovnoměrný) a s tím související nutnost přesného měření teplot na velké ploše ve velkém počtu bodů. Proto v dnešní době není známé žádné zařízení, které by využívalo záření jako jediný nebo alespoň jako hlavní způsob ohřevu formy.

Z těchto důvodů se firma Cadence Innovation rozhodla pro vývoj vlastní technologie ve spolupráci s firmou Aura Engineering, která dodávala stroj a přidružené technologie, s firmou LENAM, která prováděla předběžné i podpůrné studie po celou dobu vývoje, a s Technickou univerzitou v Liberci, která prováděla vývoj části software, regulačních algoritmů a měřicího systému. Základem této nové technologie se stalo využití potenciálu IR zářičů, které s použitím vhodných metod automatického řízení dokáží nabídnou velkou variabilitu zařízení, velmi efektivní ohřev (a s tím nižší energetické náklady na výrobek) a to vše při přijatelné ceně zařízení a bez nutnosti velkých zásahů do formy. Pokročilé metody řízení a regulace, které dokáží plně využít potenciál zářičů, nám navíc umožní splnit i takové požadavky, které v současnosti používané technologie splňují jen s velkými problémy.

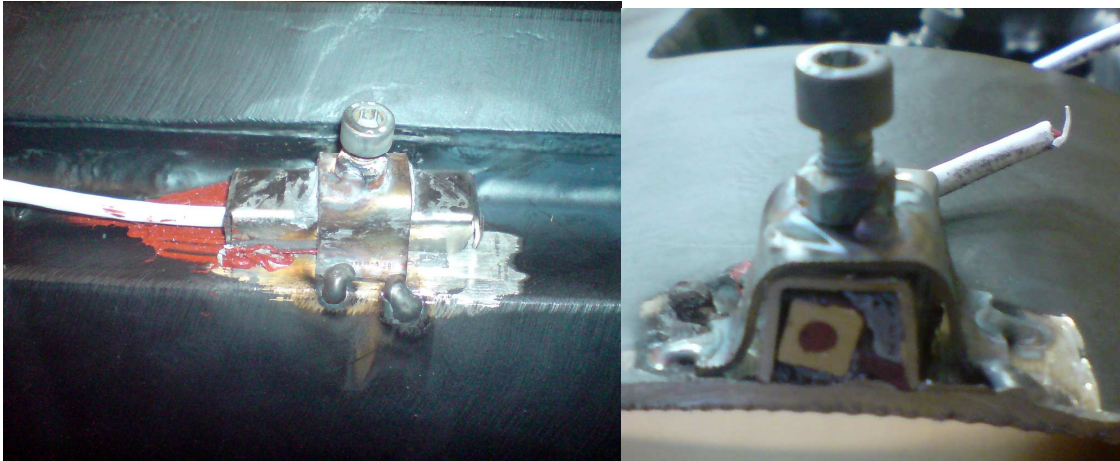
První série pokusů s ohřevem byla prováděna na vyřazené formě, na které byly zářiče umístěny na základě prvních simulací a čidla byla umístěna na základě odhadu chování teplotního pole. Tato fáze sloužila pro získávání zkušeností, testování řídicího a měřicího systému a pro odladění regulačních mechanismů. V této fázi ještě všechny pokusy probíhali bez materiálu. Výsledkem byl model formy pro potřeby regulace, regulační algoritmus a řada doporučení pro změny v konstrukci prototypového stroje, která probíhala současně s těmito pokusy. Po dokončení prototypového stroje byl celý systém ohřevu odzkoušen na několika různých formách na základě dalších získaných zkušeností byl navržen nový systém pro měření teploty (pomocí jednodrátově připojených termočlánků). Ten byl nejprve odzkoušen na malém modelu stroje, který byl pro tyto účely vyroben. Následně byl nasazen na sériovou formu a s úspěchem odzkoušen i na prototypovém a posléze sériovém stroji. Všechna použitá řešení pro měření teploty a získané zkušenosti popisují následující kapitoly této práce. Více informací o použitém způsobu umístění světla, čidel a o regulačním algoritmu viz článek [23] nebo disertační práce [10].

4.2 Experimentální zařízení pro ohřev



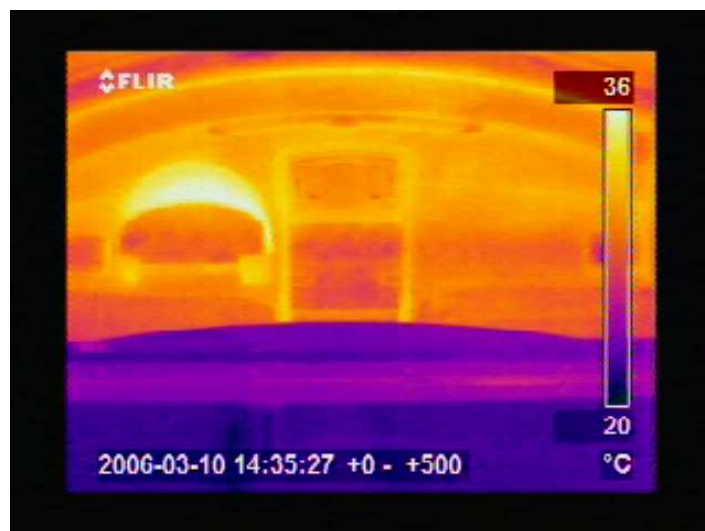
Obrázek 4.1 - Schematický náčrtek formy s rozmístěním senzorů

Na základě předběžných simulací, které prováděla firma LENAM (viz výzkumná zpráva [11]), bylo vyrobeno první zařízení, které dovolovalo ohřev formy pomocí IR zářičů. Jednalo se pouze o stacionární zařízení, které nedovolovalo pracovat s materiálem. Základem zařízení byla konstrukce z nerezových profilů, která nesla zářiče. Rozmístění zářičů bylo zvoleno tak, aby co nejlépe odpovídalo simulacím. Do této konstrukce byla vložena forma, osazená čidly. Infračervené zářiče byly ovládány přes výstupní moduly PLC Siemens řady S7-300. Pro snímání teploty formy byly zvoleny senzory typu Pt100. Jejich poloha byla volena tak, aby pokud možno rovnoměrně pokrývali plochu formy (viz obr. 4.1). Teplotní senzory byly připojeny ke vstupním modulům stejného PLC, které řídilo výstupy a které bylo připojeno pomocí sběrnice ProfiBus k počítači typu PC. Použité senzory (a způsob jejich připevnění k formě) se však ukázali jako nevhodné pro tyto účely. Jejich velká tepelná kapacita, spolu s nedostatečně zajištěným prostupem tepla mezi formou a senzory, způsobovala velké problémy při regulaci. Použitá čidla Pt100 byla překryta pouzdrem z nerezového plechu. Těleso čidla bylo v pouzdře připevněno tmelem. Jiným typem tmelu pak byla celá tato sestava připevněna k formě. Použitý postup výroby však nedokázal zajistit stejné množství a stejné rozložení tmelu ve všech pouzdrech. Také umístění tělesa čidla uvnitř pouzdra bylo pokaždé jiné (viz obr. 4.2). Při opakovaném tepelném namáhání se začala čidla z formy postupně uvolňovat. Proto byl tmel nahrazen třmeny, které byly přivařeny k formě (viz obr. 4.2). Každý třmen byl opatřen šroubem, který držel pouzdro s čidlem na formě a tím zajišťoval jeho pevnou polohu. Kontakt čidel s formou se tím ale u některých čidel ještě zhoršil.



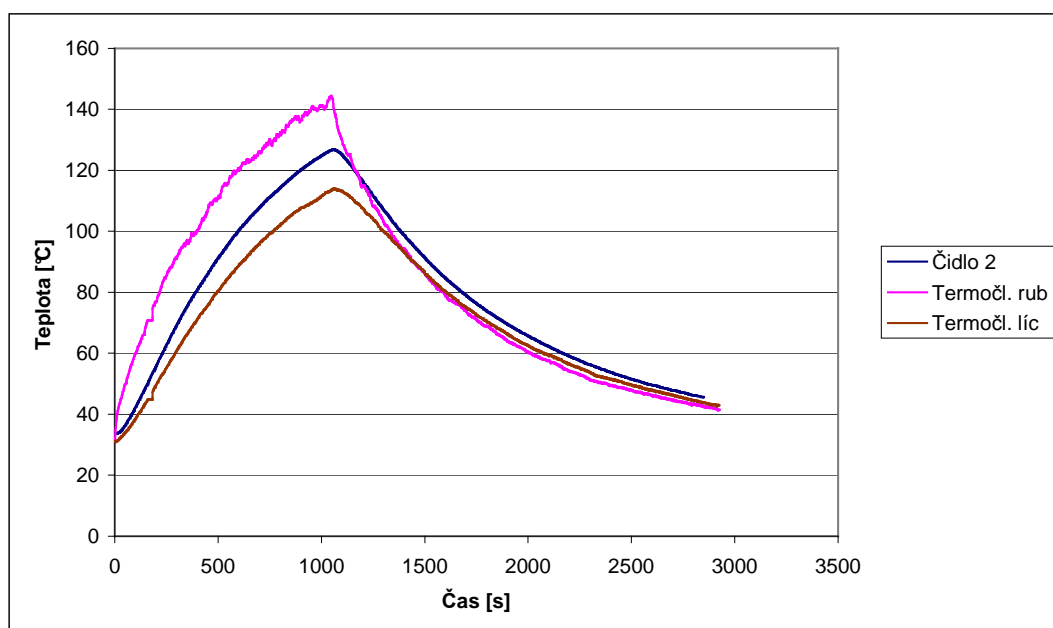
Obrázek 4.2 - Detail zapouzdřeného čidla Pt100 s třmenem a řez pouzdrém

Cílem pokusů bylo ověřit předpoklady, které vzešly ze simulací, a vytvořit pokud možno homogenní teplotní pole v co nejkratším čase. Aby bylo možné zhodnotit výsledky, bylo provedeno i kontrolní měření pomocí termokamery. Snímána byla lícová strana formy. Ukázalo se, že i přes správně nastavenou hodnotu emisivity neodpovídají výsledky měření termokamerou skutečným hodnotám teplot. Potvrdilo se tak, že povrch formy není vhodný pro měření teplot pomocí bezdotykových metod. Je totiž lesklý a velmi členitý. Problémem je také rozdílný úhel natočení jednotlivých ploch a měření teploty v dutinách. Naměřené hodnoty nelze přímo použít pro hodnocení kvality ohřevu. Snímky z termokamery se však velmi dobře hodí například pro lokalizaci účinků jednotlivých zářičů. K tomuto účelu bylo využito i výsledků tohoto měření a získané informace byly využity při vývoji regulačních algoritmů.



Obrázek 4.3 - Snímek z termokamery v průběhu chladnutí

Regulace popsaného systému má mnoho specifik, která tento problém předurčují pro pokročilé metody řízení. Jedná se o masivní MIMO systém, u něhož je možné efektivně řídit pouze ohřívání, nikoli chladnutí formy nebo pasivní odvod tepla do okolí (který se ještě navíc mění během cyklu nanesením materiálu). Výsledky předběžných simulací ukázaly, že výkon použitých lamp je dostatečný pro ohřev formy v požadovaném čase. Také se ukázalo, že dvoupolohová regulace v tomto případě generuje méně homogenní teplotní pole s množstvím přehřátých míst (viz [12]). Postupně bylo odzkoušeno i několik pokročilých algoritmů regulace. Tyto metody (např. kooperativní řízení) přinesly zajímavé výsledky a byly posléze aplikovány i na prototypovém stroji. Podrobnosti viz disertační práce [10]. Během identifikačních měření se ukázalo, že regulovaný systém se chová jako soustava druhého řádu, i když podle všech předpokladů by se spíše měla chovat jako soustava prvního řádu. Proto bylo rozhodnuto o provedení kontrolního měření, aby se odhalila příčina tohoto chování. Dalším důvodem pro provedení kontrolního měření pomocí nezávislé metody byl požadavek na porovnání teplot na rubové a lícové straně formy. Proto byly provedeny dva experimenty, při kterých byly postupně pod třmeny senzorů číslo 2 a číslo 20 připevněny termočlánky typu K a druhý takový termočlánek byl připevněn do stejného bodu na lícové straně formy. V obou případech byly zapnuty zářiče, které ohřívaly blízké okolí sledovaného čidla. Výsledný průběh teplot byl v obou případech velmi podobný. Z naměřených dat (viz obr. 4.4) je zřejmé, že v ustálených stavech jsou všechny měřené hodnoty prakticky stejné.

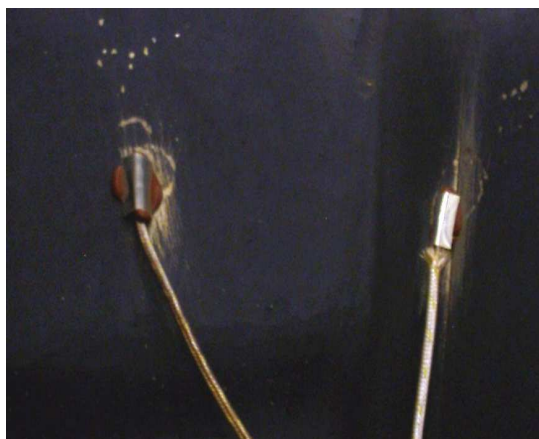


Obrázek 4.4 - Kontrolní měření na čidle 2

Během dynamických změn teploty se ale čidla Pt100 reagují se zpožděním. Tyto průběhy odpovídají situaci, kdy by mezi „správný“ signál ze senzoru a vstup měřícího systému byl vložen filtr prvního řádu. Hodnota zesílení je v obou případech menší než jedna. To je způsobeno zejména odvodem tepla z čidla do okolí. Parazitní časová konstanta je pak způsobena velkou tepelnou kapacitou senzoru a špatným vedením tepla mezi formou a senzorem. Model, získaný touto identifikací, lze zahrnout do výpočtu optimálního nastavení regulátoru a i přes uvedené problémy bylo dosaženo poměrně kvalitních výsledků. Problémem jsou ale velké rozdíly mezi vlastnostmi jednotlivých senzorů. Aby bylo možné dosáhnout kvalitních výsledků na celé formě, bylo by nutné provést popsanou identifikaci pro každé čidlo a na základě získaných hodnot pak nastavit individuálně každý regulátor. Proto bylo rozhodnuto o změně systému měření teploty form na prototypovém stroji, který byl na základě získaných zkušeností konstruován.

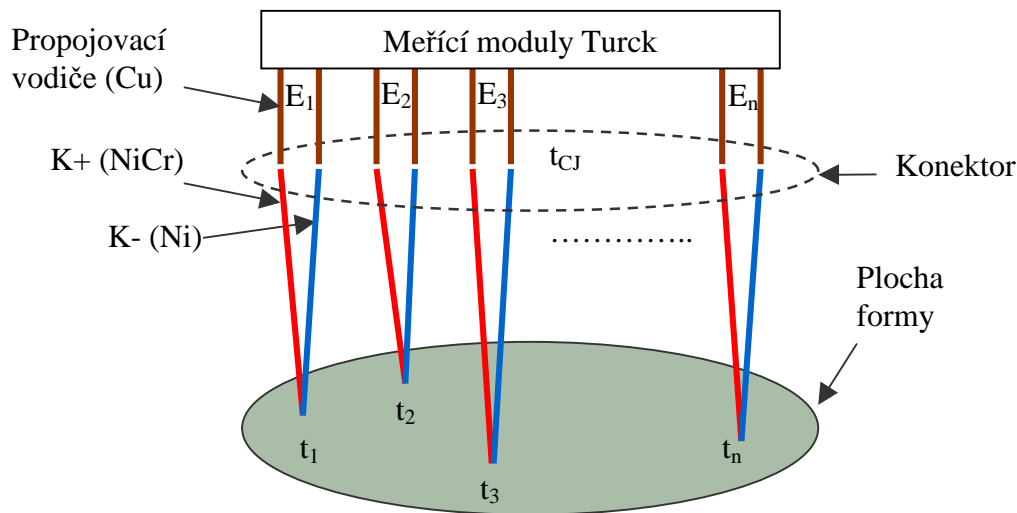
4.3 Měření pomocí termočlánků typu K

Všechny získané zkušenosti byly využity při práci na prototypové lince, která je oproti zkušebnímu zařízení již vybavena vším potřebným pro výrobu umělých kůží - obsahuje rotační stanici, chladič stanici i vyjímací pozici. Přesun formy mezi pozicemi je řešen pomocí vozíků a robotů. Celý stroj je řízen pomocí PLC, které řídí všechny pohony a roboty. Toto PLC komunikuje s počítačem typu PC, který měří teplotní pole a řídí ohřev formy. Obsluha pak ovládá a monitoruje celý stroj pomocí dotykového panelu. Vyhřívání formy je prováděno, stejně jako na pokusném zařízení, pomocí infračervených zářičů. Řídící software na PC integruje funkci regulátorů pro jednotlivá světla a vizualizaci teplotního pole na formě. Také umožňuje detailní nastavení regulačního procesu, jako jsou např. lokální odchylky žádané teploty (pro dosažení různých vlastností kůže v různých oblastech) nebo přiřazení optimálního typu regulátoru ke každému světlu. Měření teplot na prvních dvou formách bylo zajištěno pomocí dvoudrátově připojených termočlánků, které byly přivařeny přímo k ploše formy na její rubovou stranu. Tento způsob připevnění termočlánků zajišťuje nejlepší možný kontakt s formou a také vysokou opakovatelnost výroby. Místo sváru pak bylo překryto malou stříškou z nerezového plechu, která bránila jeho přímému ohřevu od zářiče (viz obr. 4.5).



Obrázek 4.5 – Termočlánky typu K s krytkou

Měřících míst bylo cca 120 a byly rozmístěny na plochu formy tak, aby byla měřena teplota v místech, kam přímo dopadá světlo ze zářičů. Termočlánky byly vyhodnocovány pomocí průmyslových modulů od firmy Turck. Termočlánky však nejsou připojeny termočlávkovým drátem až do těchto modulů, ale pouze k 300-pinovému konektoru, kterým se forma připojuje ke stroji. Mezi moduly a konektorem je připojení provedeno pomocí měděných vodičů. Proto je vnitřní kompenzace studeného konce v těchto modulech vypnuta a místo toho je měřena teplota v připojovacím konektoru. K tomuto účelu je použit modul, který má čtyři vstupy pro čidla Pt100. Vzhledem k popsanému použitému způsobu připojení termočlávků (blokové schéma viz obr. 4.6) bylo nutné číselně kompenzovat teplotu studeného konce termočlávků. Závislost termoelektrického napětí na teplotě je totiž obecně nelineární a charakteristiky termočlávků jsou obvykle tabelovány při teplotě studeného konce 0 °C. Proto pokud má referenční spoj termočlávků jinou teplotu, než při které je tabelována charakteristika tohoto termočlávků, je nutné odečíst od měřeného napětí hodnotu napětí, které vznikne na referenčním spoji, jehož teplotu měříme nezávislou metodou. Podrobněji je princip softwarové kompenzace popsán např. v monografii [14], strana 8-33. Závislost termoelektrického napětí na teplotě je pro normované typy termočlávků velmi dobře známá a je tabelována. V praxi se pak většinou používá pro výpočet teploty její proložení polynomem. Řád tohoto polynomu a konkrétní hodnoty koeficientů se určují vždy pro konkrétní aplikaci a pro daný rozsah měření. Charakteristika daném rozsahu termočlávků typu K je ale téměř lineární, proto je možné pro výpočet teploty v použít linearizovaný vztah. Skutečnou hodnotu teploty v každém bodě spočteme v tomto případě jako součet teploty studeného konce (v tomto případě je to teplota, kterou naměříme v připojovacím konektoru na formě) a funkce rozdílu napětí mezi pozitivním a negativním koncem daného termočlávků.



Obrázek 4.6 - Dvoudrátové připojení termočlánků

Standardní nejistota typu A, vypočtená statisticky z naměřených dat, je u této metody měření menší, než $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ a lze ji tedy zanedbat. Nejistota typu B se v tomto případě skládá z nejistot měření studeného konce (modulu pro Pt100 a odchylky od linearity při kompenzaci studeného konce) a nejistoty měření termočlánku (měřicího modulu a termočlánekového vedení). Nejistotu měření studeného konce můžeme vyjádřit pomocí udávané přesnosti modulu jako $\Delta t_{Pt100max} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Z udávané přesnosti modulu můžeme vyjádřit nejistotu měření jako $\Delta t_{ADmax} = 1,3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Použité termočlánky typu K mají dle výrobce pro teploty nad $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ standardní chybu $0,75 \%$. Pro uvažovaný použitý rozsah teplot tedy můžeme použít $\Delta t_{K,max} = 1,95 \text{ } ^\circ\text{C}$. Dosazením do příslušného vztahu získáme vztah pro celkovou nejistotu typu B. Protože nejistotu typu A lze zanedbat, můžeme pro kombinovanou standardní nejistotu přímo psát vztah (4.1) a pro rozšířenou nejistotu pro interval spolehlivosti $95,5 \%$ pak platí vztah (4.2).

$$u_C(t) = u_B(t) = \sqrt{\left(\frac{\Delta t_{CJmax}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{Pt100max}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{ADmax}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{Kmax}}{2}\right)^2} = 1,34 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (4.1)$$

$$U(t) = k \cdot u_C(t) = 2 \cdot 1,34 = 2,7 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (4.2)$$

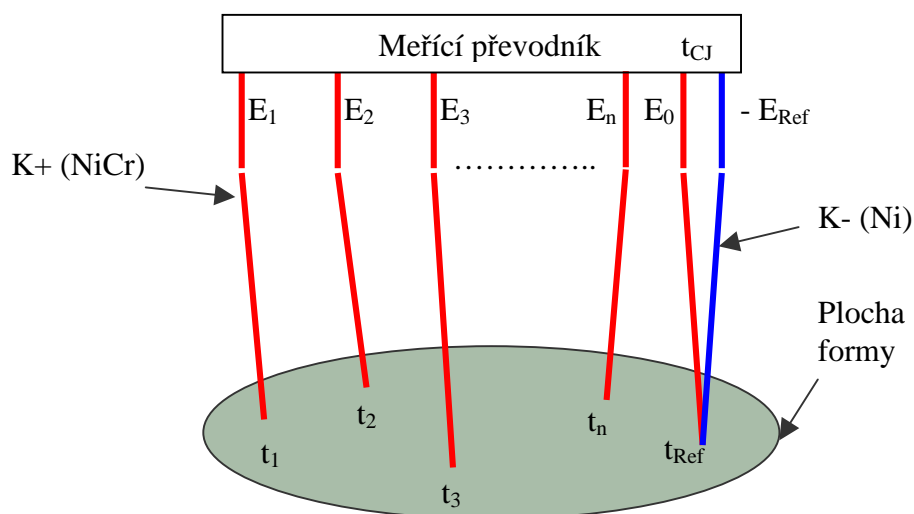
Popsaný měřicí systém na prototypovém stroji dovolil provádět všechny potřebné experimenty, směřující k výrobě umělé kůže požadovaných parametrů. V průběhu pokusů se však projevovalo několik slabých míst tohoto řešení. Docházelo zejména ke dvěma jevům:

- poškození izolace termočlánků - docházelo mechanickému poškození izolace zejména v místech, kde se termočlánky spojovali k sobě do svazků.
- přerušení termočlánekového vedení na připojovacím konektoru – použitý 300-pinový konektor má sice pozlacené piny a předpružení, aby byl zajištěn co nejlepší kontakt, ale přesto dochází k problémům s kontaktem. Vibracemi se totiž opotřebovává pozlacená vrstva a také přítlaču není rovnoměrný v celé ploše konektoru. Vlivem přechodového odporu na opotřebovaném pinu pak dochází k tomu, že při vibracích se chvílemi termočlánek jeví jako rozpojený, nebo ukazuje velké odchylky od správné hodnoty.

Z výše uvedených důvodů byla navržena změna metody pro měření teploty na formě. Nový způsob měření teploty na formě by měl odstraňovat zejména dva výše popsané problémy. Požadavkem bylo, aby měřicí systém byl umístěn přímo na formě, což by minimalizovalo potřebný počet spojovacích kontaktů mezi formou a strojem, a aby umožňoval připojení termočlánků bez izolace, tzn. aby byl decentralizovaný a měřicí vedení netvořilo svazky.

4.4 Jednodrátové připojení termočlánků

Vlastní forma je vyrobena galvanizací z niklu. Přesné složení ani vlastnosti tohoto materiálu sice neznáme, ale můžeme zkusit ověřit předpoklad, zda by nebylo možné využít formu místo jednoho z termočlánekových materiálů. Svým složením je totiž forma velmi blízká materiálu, ze kterého se vyrábí negativní vodič termočlánekového vedení typu K.



Obrázek 4.7 - Jednodrátové připojení termočlánků

Pokud tedy použijeme místo negativního termočlánekového vodiče formu a jako druhý vodič použijeme pozitivní termočlánekový vodič typu K, měl by vzniknout termočlánek s podobnými vlastnostmi, jako má termočlánek typu K. Pokud by se potvrdilo, že takto složený termočlánek má dostatečnou citlivost a linearitu, stačilo by z každého měřicího místa vést pouze jeden vodič. Mimo to je ale ještě nutné vyřešit připojení referenčního bodu na formě, měření teploty referenčního bodu a výpočet teploty z naměřených napětí. Protože není možné vytvořit spojení formy s měřicí svorkovnicí uvnitř modulu pomocí materiálu formy, je nutné použít k tomuto účelu jiný materiál. Tím ale vznikne nový termočlánek, takže v místě tohoto kontaktu je nutné měřit teplotu nějakou nezávislou metodou. Tento bod pak bude sloužit jako referenční a veškerá napětí na ostatních termočláncích musí být měřena vůči tomuto bodu. V této konkrétní aplikaci se přímo nabízí měření teploty pomocí dvoudrátově připojeného termočlátku typu K. Toto řešení je výhodné nejen vzhledem ke své jednoduchosti (není nutné vyhodnocovat jiný typ čidla, které by měřilo teplotu referenčního bodu) ale i vzhledem k tomu, že takto připojený termočlánek bude mít prakticky stejné dynamické vlastnosti, jako ostatní termočlánci na formě. Do referenčního bodu připojíme jednak pozitivní termočlánekový drát typu K (vůči kterému budeme měřit ostatní termočlánci), ale také negativní drát. Tím vytvoříme kompletní termočlánek typu K. Termoelektrické napětí mezi těmito vodiči pak určuje rozdíl teplot mezi studeným koncem termočlátku (v tomto případě je to svorkovnice v krabici s měřicím převodníkem) a teplotou referenčního bodu na formě. Pokud pro vyhodnocení teploty z naměřeného napětí použijeme lineární funkci, pak lze pro teplotu referenčního bodu použít vztah (4.3). Teplotu ve všech ostatních bodech spočítáme jako funkci napětí na pozitivních termočlánekových drátech v měřeném a referenčním bodě, viz vztah (4.4).

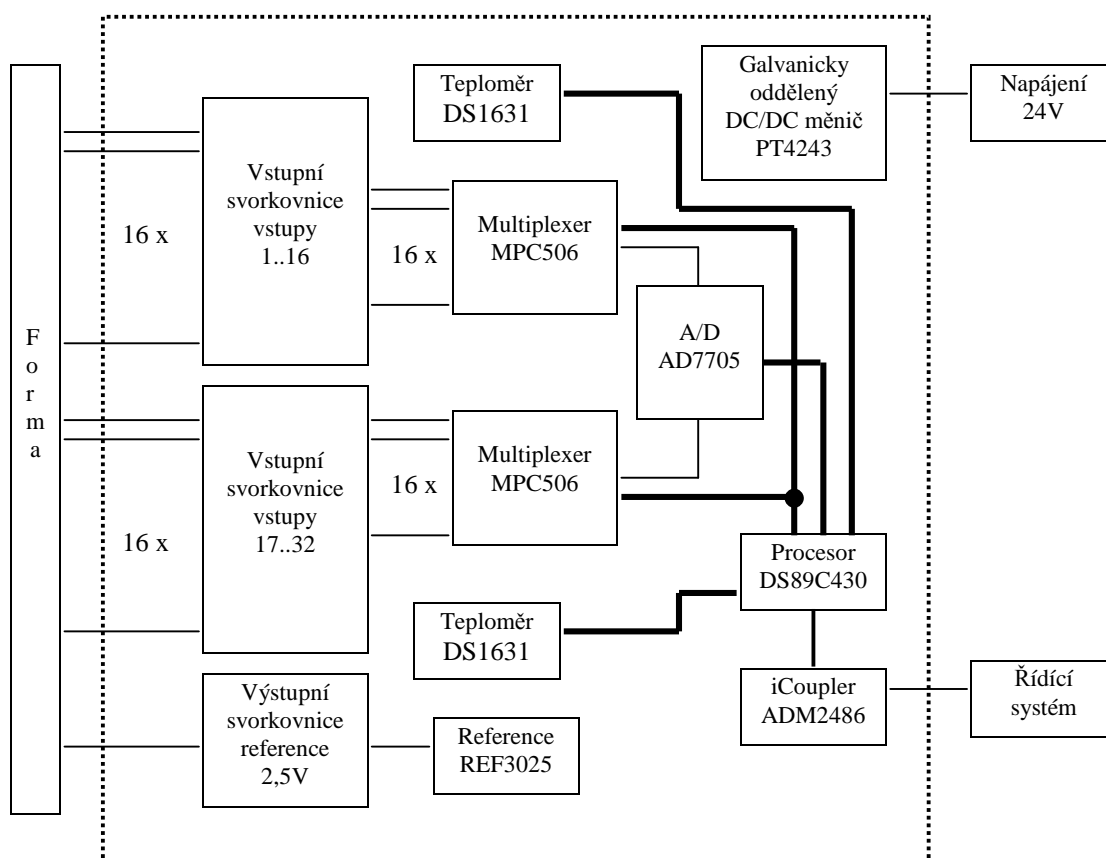
$$t_{Ref} = t_{CJ} + f(E_{Ref}) \quad (4.3)$$

kde t_{Ref} [°C] je teplota v referenčním bodě, t_{CJ} [°C] je teplota v konektoru, E_{Ref} [V] je termoelektrické napětí, měřené na termočlátku v referenčním bodě

$$t_i = f(E_i, E_{Ref}) \quad (4.4)$$

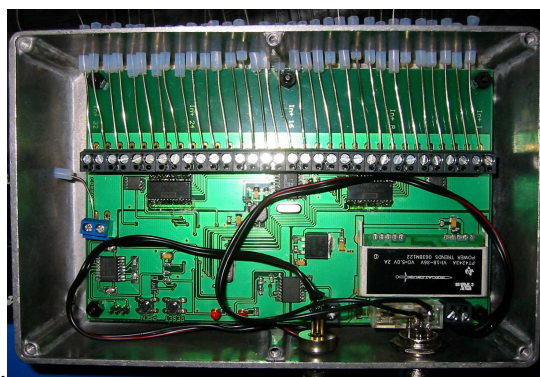
kde t_i [°C] je teplota v bodě i , t_{Ref} [°C] je teplota v referenčním bodě, E_i [V] je termoelektrické napětí, měřené na vodiči v měřeném bodě i , E_{Ref} [V] je termoelektrické napětí, měřené na termočlátku v referenčním bodě.

Pokud by byla naměřená závislost termoelektrického napětí na teplotě u nově vzniklých termočlánků dostatečně lineární, bylo možné použít zjednodušený vztah (podobný vztahu (4.3)). Tato funkce je však závislá na materiálu formy, jehož přesné složení bohužel není známé. Proto bylo nutné provést vhodný experiment, abychom získali její průběh a mohli tento předpoklad ověřit, nebo vyvrátit. K měření a vyhodnocení takového signálu bylo nutné nejprve navrhnout speciální měřicí systém, který bude měřit napětí na takto vzniklých termočláncích. Vzhledem k uvedeným požadavkům by měl být systém distribuovaný (aby nebylo nutné vést termočláncové vedení z celé formy do jednoho místa), měl by být snadno rozšiřitelný (forma může mít jen 30 čidel, nebo také až 200) a také dostatečně odolný (zejména proti mechanickému poškození, statickým výbojům, elektromagnetickému rušení a neustálému připojování a odpojování během cyklu). Proto bylo navrženo a vyroben prototyp takového měřicího zařízení (viz obr. 4.8), které splňuje nastíněné požadavky. Obsahuje 32 napěťových vstupů, dva polovodičové teploměry pro měření teploty svorkovnice a rozhraní RS485 pro připojení k nadřazenému systému.



Obrázek 4.8 - Blokové schéma měřicího přípravku

Základem přípravku je dvoukanálový, 16-ti bitový sigma-delta převodník. Počet napěťových vstupů je rozšířen pomocí dvou analogových multiplexerů na 32. Do referenčního bodu formy je připojeno napětí referenční napětí 2,5 V, které je vytvořeno pomocí napěťové reference. Výstupní napětí termočlánků se tedy měří diferenčně od tohoto napětí. Díky tomu není nutné vytvářet symetrické napájecí napětí pro multiplexery a pro AD převodník. Teplota svorkovnice je měřena pomocí dvou polovodičových teploměrů s digitálním výstupem. Oba tyto obvody jsou umístěny co nejbližší připojovací svorkovnici, každý na jedné její straně. Napájení měřícího modulu je provedeno pomocí izolovaného měniče a pro připojení ke sběrnici RS485 je použit také použit obvod s galvanickým oddělením od sběrnice. Díky tomu je celé zařízení galvanicky oddělené od okolního prostředí a tak je možno naprosto nezávisle připojovat k formě více modulů, aniž by se vzájemně ovlivňovali.



Obrázek 4.9 - Prototyp měřícího přípravku

Pro ověření funkčnosti prototypu bylo nejprve provedeno kontrolní měření v kalibrační peci. Jako senzory byly použity komerční termočlánky typu K a také termočlánky, které byly vyrobeny přivařením termočlánekového vedení k pásku z niklu, který byl získán vyříznutím z vyřazené formy a sloužil také k ověření, zda bude možné dvoudrátové termočlánky vyrábět tímto způsobem i na skutečné formě. Měřený rozsah teplot byl zvolen od $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s krokem cca $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tím by měl být také pokryt celý předpokládaný rozsah měřených teplot. Proto můžeme naměřené hodnoty použít pro získání polynomu, který pak použijeme pro výpočet teploty z naměřeného napětí. Z naměřených hodnot je zřejmé, že naměřené a tabelované hodnoty pro termočlánky typu K se docela dobře shodují. Odchytky naměřených a tabelovaných hodnot (po číslíkové kompenzaci teploty studeného konce) jsou u termočlátku v průmyslového provedení v intervalu $<-27\text{ }\mu\text{V} ; -56\text{ }\mu\text{V}>$. Průměr odchylek v měřených bodech je pak $-40\text{ }\mu\text{V}$, což po přepočtu na teplotu odpovídá chybě cca $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato chyba

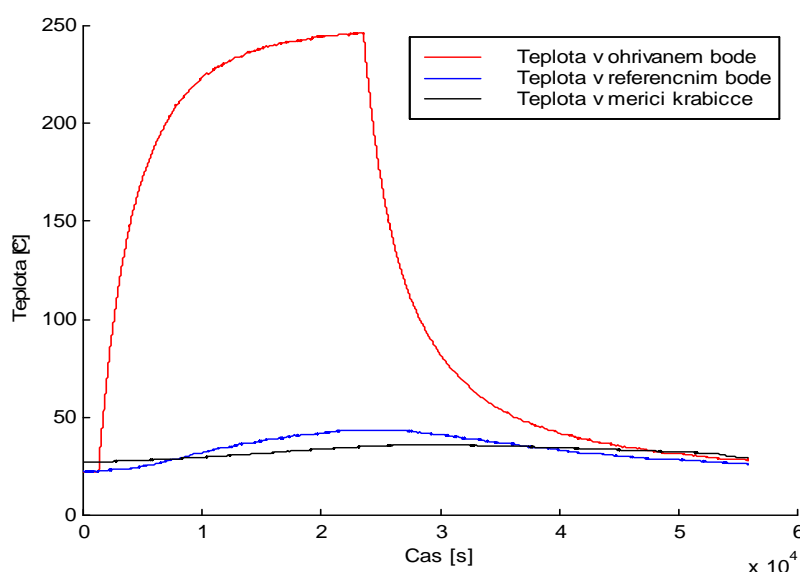
je pravděpodobně způsobena tolerancí použitých součástek a zejména nejistotou měření použitého AD převodníku a lze jí částečně odstranit tím, že pro výpočet teploty použijeme polynom, který získáme interpolací naměřených dat. Takto naměřené hodnoty byly dále zpracovávány pomocí programu Matlab. Byla vytvořena m-funkce, která proloží naměřená data (upravená kompenzací studeného konce termočlásku) polynomem zvoleného stupně pomocí metody konečných prvků. Další funkce pak pro výsledný polynom, vypočtený touto funkcí, provede zhodnocení významnosti jednotlivých koeficientů a výpočet Akaikeho a Bayesova informačního kritéria. Další funkce pak zopakuje toto vyhodnocení pro polynomy prvního až desátého stupně a zobrazí výsledné hodnoty kritérií do grafu. Optimální stupeň polynomu určíme tak, že ve výsledné řadě hodnot informačních kritérií najdeme takový stupeň polynomu, kterému u zvoleného kritéria odpovídá lokální minimum. V tomto případě se ukazuje první lokální minimum u obou kritérií již pro polynom prvního stupně a další dvě lokální minima pro polynomy čtvrtého a sedmého stupně. Zvolíme polynom prvního řádu a získáme linearizovaný vztah (4.5). Ten můžeme používat v rozsahu měřených teplot od 4 °C do 178 °C. Maximální odchylka od správné teploty v tomto rozsahu pak bude 1 °C.

$$t_{Ref} = t_{CJ} + 24,448 \cdot E - 0,429 \quad (4.5)$$

kde t_{Ref} [°C] je teplota v referenčním bodě, t_{CJ} [°C] je teplota v konektoru, E [mV] je naměřené termoelektrické napětí na termočláskových vodičích

Ve druhé fázi bylo provedeno proměření vlastností jednodrátově připojeného termočlásku. Cílem bylo zjistit převodní funkci mezi naměřeným napětím a teplotou pro termočlánek, který vznikne spojením pozitivního termočláskového drátu typu K s materiálem formy. Pro tyto účely byl vytvořen zmenšený model vyhřívacího zařízení slush linky (viz obr. 4.10). Pro jeho výrobu byly použity totožné díly, které jsou i na skutečném stroji. Proto tento model posloužil i k ověření možností, jak vést termočláskové vedení do měřícího modulu bez izolace jen pomocí keramických oček. Forma, která byla použita v tomto modelu, je fragment formy, popisované v kapitole 4.2 Pro vyhřívání je použité dvanácti zářičů o výkonu 2 kW. Na formu je přivařeno do různých míst 31 pozitivních termočláskových drátů, v referenčním bodě je jeden pozitivní (připojený k referenčnímu napětí) a jeden negativní drát (připojený ke vstupu 32) a ještě jeden negativní drát je umístěn k pozitivnímu drátu v bodě číslo 26 (je připojen na vstup 22, viz obr. 4.11).

nad formou můžeme dosáhnout ustálené teploty na ohřivaném čidle až 250 °C. Během experimentu byl zaznamenán průběh ohřívání i průběh chladnutí bodu 26 (viz obr. 4.12). Na základě takto naměřených dat je možné vypočítat hledanou závislost termoelektrického napětí na teplotě. Naměřené hodnoty ale nelze přímo použít pro proložení polynomem, je nejprve nutné provést kompenzaci studeného konce termočlátku. K tomu ale nelze použít tabelované hodnoty (jak tomu bylo u termočlátku typu K), protože vlastnosti měřeného termočlátku nejsou zatím známy. V tomto případě je tedy nutné hledat požadovaný polynom jiným způsobem.



Obrázek 4.12 - Průběh teplot během experimentu ve sledovaných bodech

Označme si teplotu v referenčním bodě (bod číslo 32) jako t_1 , termoelektrické napětí termočlátku v tomto bodě (za předpokladu nulové teploty studeného konce) jako E_1 . Stejně tak teplotu v ohřivaném bodě (bod číslo 26) si označme jako t_2 a termoelektrické napětí termočlátku v ohřivaném bodě E_2 (také za předpokladu nulové teploty studeného konce). Pak lze z termoelektrických zákonů pro danou konfiguraci odvodit, že výsledné měřené termoelektrické napětí E můžeme spočítat jako rozdíl těchto dvou napětí $E = E_2 - E_1$.

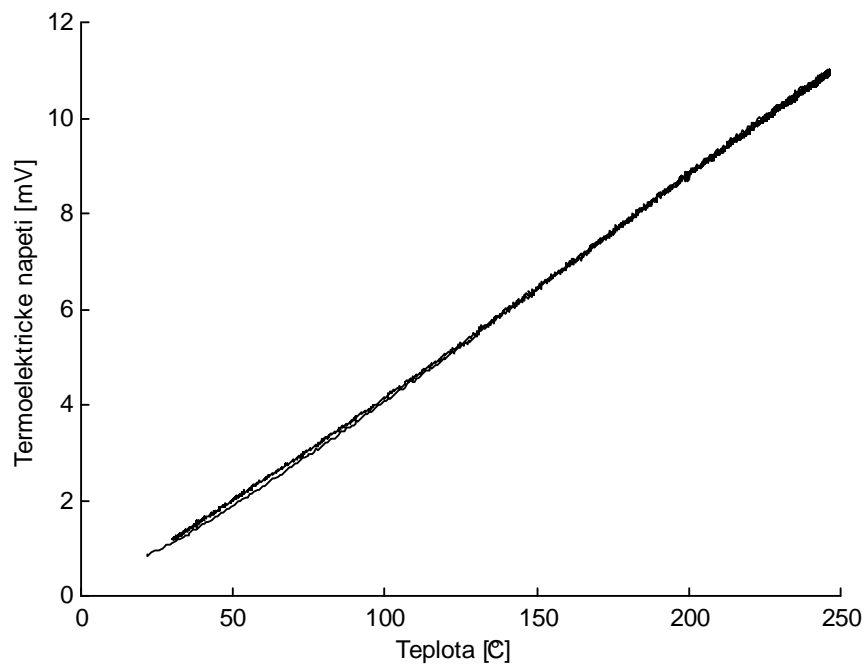
Aby bylo možné provést korektní kompenzaci teploty studeného konce, musíme nejprve najít funkci, která bude popisovat závislost termoelektrického napětí na teplotě. Pro každou naměřenou hodnotu musí platit vztah (4.6). Zvolme, že funkce f je polynom n -tého stupně. Pokusíme se najít takové koeficienty polynomu pro $n=1..10$, které budou pro zvolený stupeň polynomu nejlépe odpovídat naměřeným datům.

$$E_{26}(\tau) = f(t_2(\tau)) - f(t_1(\tau)) \quad (4.6)$$

kde $E_{26}(\tau)$ [mV] je naměřené termoelektrické napětí na vstupu 26 v čase τ , $t_1(\tau)$ [°C] je teplota v referenčním bodě v čase τ , $t_2(\tau)$ [°C] je teplota ohříváného bodu v čase τ a f je funkce závislosti napětí termočládku na teplotě

Pro hledání takových koeficientů pro každý zvolený stupeň polynomu byla použita funkce *fmins* programu Matlab. Jako kritérium bylo zvoleno minimum sumy kvadrátů odchylek od naměřených dat. Pro každý stupeň polynomu spočteme hodnoty Bayesova a Akaikeho informačního kritéria, aby bylo možné zvolit optimální stupeň polynomu. Na základě hodnot obou kritérií byl v tomto případě zvolen jako optimální polynom čtvrtého stupně. Po nalezení optimálních koeficientů pak pro termoelektrické napětí na měřeném termočládku můžeme psát vztah (4.7), což je aproximace hledané funkce f . Tento vztah lze použít pro rozsah teplot od 22 °C do 246 °C s maximální odchylkou ΔE_{max} cca 0,05 mV.

$$E = -5,469 \cdot 10^{-10} \cdot t^4 + 1,735 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 1,161 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,03939 \cdot t - 0,04049 \quad [mV, \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (4.7)$$

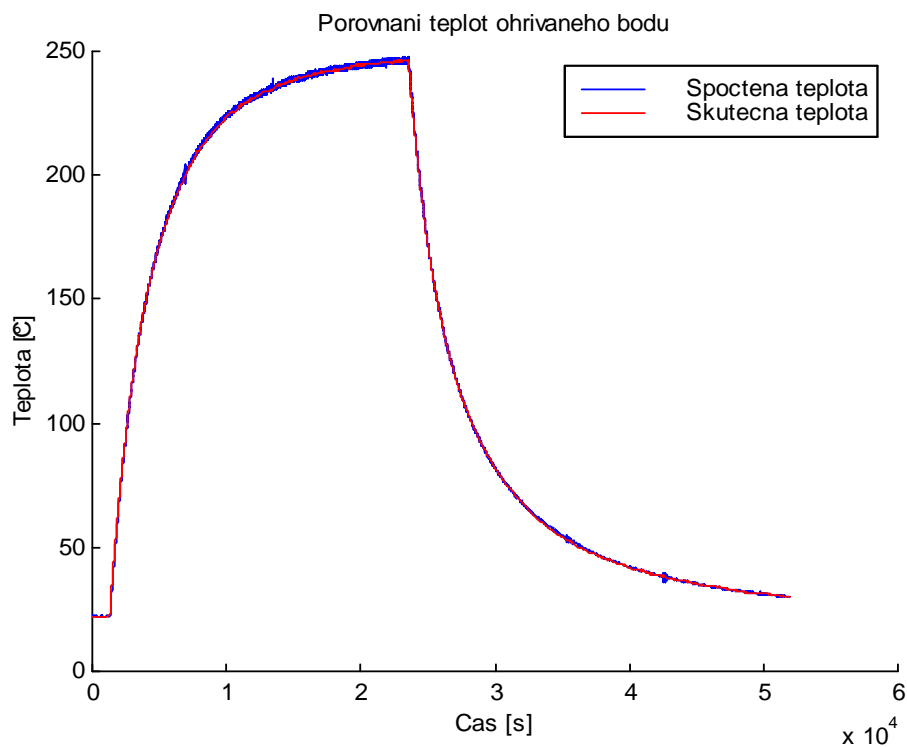


Obrázek 4.13 - Naměřená závislost napětí na teplotě po kompenzaci teploty studeného konce

Pokud použijeme vzorec (4.7) pro kompenzaci teploty studeného konce u naměřených dat ze vstupu 26, získáme hledanou závislost napětí na teplotě. Takto upravená data tedy opět

zkusíme proložit polynomy různých stupňů pro získání závislosti teploty na naměřeném napětí. V tomto případě hodnoty informačních kritérií nemají žádné výrazné lokální minimum. Na základě hodnot kritérií ale můžeme konstatovat, že použití polynomu čtvrtého a vyšších stupňů nám již nepřinese žádný významný rozdíl. Po nalezení optimálních koeficientů pro polynom třetího stupně pak pro teplotu měřeného termočlánku můžeme psát vztah (4.8). Tento vztah je aproximací inverzní funkce k funkci f a lze jej použít pro rozsah teplot od 22 °C do 246 °C s maximální odchylkou Δt_{max} cca 1,5 °C.

$$t = 0,03285 \cdot E^3 - 0,7653 \cdot E^2 + 27,021 \cdot E - 1,072 \quad [^{\circ}\text{C}, \text{mV}] \quad (4.8)$$



Obrázek 4.14 - Porovnání teplot v ohřivaném bodě

Při výpočtu teploty v měřeném bodě 26 pak použijeme postupně vztahy (4.5), (4.7) a (4.8). Postup výpočtu:

1. pomocí vztahu (4.5) nejprve vypočteme teplotu v referenčním bodě z teploty v měřící krabici a termoelektrického napětí, naměřeného na vstupu 32
2. pomocí vztahu (4.7) vypočteme termoelektrické napětí, které bychom naměřili na jednodrátovém termočlánku pokud by měl teplotu, kterou jsme v bodu 1 spočetli pro referenční bod a studený spoj tohoto termočlánku by měl teplotu 0 °C

3. hodnotu napětí, spočtenou v bodě 2, přičteme k termoelektrickému napětí, naměřenému na vstupu 26
4. výsledné kompenzované napětí dosadíme do vztahu (4.8) a tím získáme hodnotu aktuální teploty, která je v bodě 26

Zkusme tento popsaný postup aplikovat na naměřená data. Spočítáme s jeho pomocí teplotu referenčního a pak i ohřívaného bodu a zkusíme porovnat získané hodnoty s teplotami, které byly naměřeny pomocí modulu Siemens. Na grafu 4.14 můžeme vidět, že se výsledky obou metod docela dobře shodují.

Popsaná metoda měření teploty pomocí jednodrátově připojených termočlánků (kdy jako druhý materiál pro termočlánek je použit přímo měřený objekt) přináší některé vlastnosti, které se mohou pro konkrétní aplikaci ukázat jako klíčové (viz popsaná aplikace). Využití této metody má však některá omezení, která je nutné před jejím použitím zohlednit. Aby bylo možné použít v nějaké technologii tento způsob připojení a vyhodnocení termočlánků, musí být splněny následující podmínky:

1. Materiál měřeného objektu musí být homogenní v celém objemu. Jakékoli lokální odchylky siebeckova koeficientu vytvoří další nežádoucí termočlánky v ploše objektu. Tyto parazitní termočlánky pak mohou způsobit, že plochou formy bude protékat proud, který bude způsobovat úbytky napětí na ploše, které se budou přičítat k měřenému napětí. Stejný problém můžou ale způsobit např. i různé držáky nebo úchyty, připevněné k ploše objektu. Pokud budou z jiného materiálu, než je měřený objekt, a pokud jejich velikost bude nezanedbatelná (budou mít na různých místech styku s objektem různou teplotu), vytvoří také nežádoucí termočlánky.
2. Měřený objekt musí mít na celé měřené ploše stejný potenciál, nesmí jím protékat žádný proud. Pokud by jím nějaký proud protékal, jednalo by se o stejný problém, jako u bodu 1. Tento případ by mohl nastat například v případě, když by byl na jedné straně objektu byl tento připojen k ochrannému vodiči a na druhé straně by přes něj bylo k ochrannému vodiči připojeno jiné zařízení. Proto je nutné velmi obezřetně volit i způsob spojování jednotlivých částí stroje.

3. K materiálu objektu musí existovat materiál s takovým siebeckovým koeficientem, aby tyto dva materiály vytvořily termočlánek s dostatečnou citlivostí. Pokud k tomuto druhému materiálu existuje ještě třetí, který vytvoří s druhým materiálem také dostatečně citlivý termočlánek, lze pak vyhodnotit teplotu referenčního přidáním jediného vodiče. Pokud by tomu tak nebylo, bylo by nutné do referenčního bodu připojit jiný dvoudrátový termočlánek (případně měřit jeho teplotu zcela jinou metodou). Proto je výhodou, pokud jako druhý materiál lze použít některý ze standardizovaných termočlánekových materiálů (jak tomu bylo u popisované aplikace).
4. Jednodrátové připojení termočláneků je mnohem citlivější na indukované elektromagnetické rušení, než dvoudrátové. Dvoudrátové připojení je principiálně velmi odolné proti rušení, protože se rušivý signál indukuje stejnou měrou na oba vodiče a vzhledem k diferenčnímu vyhodnocení se pak tento indukovaný signál odečítá. U jednodrátového připojení tomu však není. Navíc může být citlivost jednodrátového termočlátku mnohem nižší, než při použití standardizované dvojice materiálů, a tím je pak celé měření mnohem citlivější na podobné chyby (i když u popisované aplikace byla citlivost srovnatelná s termočlánekem typu K).
5. Nejistota měření pomocí jednodrátových termočláneků bude vždy větší, než nejistota měření se srovnatelným standardizovaným termočlánekem. To je dáno zejména způsobem vyhodnocení naměřeného signálu a také tím, že standardizované dvojice materiálů jsou pečlivě vybírány z hlediska optimální citlivosti a linearitativy termočlátku. Pokud je ale jeden z materiálů dán předem (je z něj měřený objekt vyroben), není snadné k němu najít optimální materiál, který by byl navíc běžně komerčně dostupný. A to ani pokud bychom znali přesně jeho vlastnosti, což v praxi často neznáme (viz popsaná aplikace). Proto je nutné stanovit včas nejistotu měření a zkonfrontovat její hodnotu s požadavky technologie aby bylo možné rozhodnout, zda je tato metoda použitelná v konkrétní aplikaci.

4.5 Nejistoty měření

Pro vyhodnocení standardní nejistoty typu A byla použita naměřená data pro bod 26 z výše popsaného identifikačního měření. Hodnoty byly odečteny během ustáleného stavu

a převedeny na teplotu podle výše popsaného postupu. Vypočtená hodnota průměrné teploty je 22,24 °C a směrodatná odchylka 0,046 °C. Stejný výpočet provedeme i pro hodnoty z referenčního bodu (vstup 32). Pro tento bod je výsledná průměrná hodnota 22,62 °C a směrodatná odchylka 0,031 °C. Pro oba tyto měřené body tedy můžeme, vzhledem k hodnotám ostatních nejistot, standardní nejistotu typu A zanedbat.

Výpočet nejistoty typu B nejprve provedeme pro měření teploty referenčního bodu. Použitý AD převodník AD7705 má deklarovanou maximální chybu linearity 0,003 % z rozsahu, chybu nuly 0,1 μV a chybu zesílení 0,5 ppm z rozsahu. Vzhledem k použitému rozsahu ± 20 mV můžeme tedy pro maximální chybu AD převodníku psát $\Delta u_{ADmax} = 0,71 \mu V$. Teplota je měřena nepřímo a její hodnota je spočtena z naměřeného napětí. Pro výpočet teploty je použit vzorec (4.5), takže citlivostní koeficient A můžeme vypočítat jako jeho derivaci. Další zdroje nejistot jsou linearizace charakteristiky termočlánku typu K, chyba termočlánekového vedení a nejistota měření teploty studeného konce. Použité termočlánky typu K mají dle výrobce pro teploty nad 0 °C standardní chybu 0,75 %. Pro uvažovaný rozsah teplot do 160 °C tedy můžeme vyjádřit $\Delta t_{K,max} = 1,2 \text{ } ^\circ C$. Maximální odchylka od linearity pro použitý vztah v daném rozsahu byla stanovena jako $\Delta t_{Lin max} = 1 \text{ } ^\circ C$. Teplota studeného konce uvnitř krabičky je měřena pomocí obvodu DS1631, který má pro teploty od 0 °C do 70 °C uváděnu chybu $\Delta t_{CJ,max} = 0,5 \text{ } ^\circ C$. Dosazením uvedených chyb do příslušného vztahu získáme vztah pro celkovou standardní nejistotu typu B. Protože nejistotu typu A lze zanedbat, můžeme pro kombinovanou standardní nejistotu přímo psát vztah (4.9). Pro rozšířenou nejistotu pro interval spolehlivosti 95,5 % pak platí vztah (4.10).

$$u_C(t_{Ref}) = u_B(t_{Ref}) = \sqrt{\left(A \frac{\Delta u_{ADmax}}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{CJmax}}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{Kmax}}{k_3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{Linmax}}{k_4}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(24,4 \frac{0,71 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1,2}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} = 0,833 \text{ } [^\circ C] \quad (4.9)$$

$$U(t_{Ref}) = k \cdot u_C(t_{Ref}) = 2 \cdot 0,833 = 1,6 \text{ } [^\circ C] \quad (4.10)$$

Obdobně budeme postupovat i při určování nejistoty měření v jednodrátově připojených bodech. Zde je ale situace poněkud složitější, protože zdrojů nejistoty je více a chybu termočlánekového materiálu neznáme, takže ji lze pouze odhadovat. Při výpočtu teploty je nejprve spočteno napětí jednodrátového termočlátku v referenčním bodě na základě teploty tohoto bodu (dle vztahu (4.7), teplota referenčního bodu je měřena pomocí dvoudrátového termočlátku). Standardní nejistotu typu B pro tento způsob měření již máme vyjádřenu. Toto napětí je pak odečteno od měřeného napětí v daném bodě a z této kompenzované hodnoty je pak dle vztahu (4.8) spočtena výsledná teplota. Proto nejprve stanovíme standardní nejistotu typu B pro vypočtené napětí jednodrátového termočlátku v referenčním bodě. Zdrojem nejistot při tomto výpočtu je nejistota měření teploty referenčního bodu, chyba AD převodníku a chyba interpolace. Nejistotu teploty referenčního bodu máme vyjádřenou pomocí vztahu (4.9) a můžeme tedy použít hodnotu $u_b(t_{ref}) = 0,883 \text{ } ^\circ\text{C}$. Pro výpočet termoelektrického napětí při této teplotě je použit vztah (4.7). Protože je tato funkce nelineární, získáme citlivostní koeficient parciální derivací tohoto vztahu pouze pro konkrétní naměřenou teplotu. Protože nás ale více zajímá maximální nejistota v celém rozsahu měření, použijeme maximum z derivace v používaném rozsahu. Takto vypočtená hodnota citlivostního koeficientu A je pak $A = 0,046$. Pro chybu měření použitého AD převodníku platí (stejně jako u předchozího případu) $\Delta u_{ADmax} = 0,71 \text{ } \mu\text{V}$. Maximální odchylka naměřených hodnot od aproximované funkce (4.7) je $\Delta E_{Lin \ max} = 0,05 \text{ mV}$. Pro tuto chybu budeme uvažovat normální rozdělení. Pak nejistotu vypočteného napětí získáme pomocí vztahu (4.11).

$$\begin{aligned}
 u_B(E_{Ref}) &= \sqrt{(A \cdot u_B(t_{Ref}))^2 + \left(\frac{\Delta u_{ADmax}}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_{Lin \ max}}{k_3}\right)^2} = \\
 &= \sqrt{(0,0446 \cdot 0,883)^2 + \left(\frac{0,71 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,0471 \text{ [mV]} \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

Hlavní zdroje nejistoty při výpočtu teploty v jednodrátově měřených bodech jsou nejistota kompenzace teploty studeného konce, nejistota materiálových vlastností termočlátku, chyba AD převodníku a chyba linearizace. Chybu linearizace vyjádříme pomocí maximální odchylky naměřených dat od aproximované funkce (5.13) a její hodnota je $\Delta t_{Lin \ max} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Kompenzaci teploty studeného konce provádíme odečtením termoelektrického napětí,

spočteného pro referenční bod na základě jeho teploty. Nejistotu měření tohoto napětí popisuje vztah (4.11) a rozložení této nejistoty budeme uvažovat normální. Pro chybu AD převodníku můžeme, stejně jako v předchozím případě, psát $\Delta u_{ADmax} = 0,71 \mu V$. Citlivostní koeficienty pro tyto dvě nejistoty pro konkrétní hodnotu měřeného napětí získáme parciální derivací vztahu (4.8). Protože chceme stanovit hodnotu nejistoty pro celý rozsah, budeme postupovat stejně, jako v předchozím případě (u nejistoty termoelektrického napětí v referenčním bodě). Maximální vypočtená hodnota citlivostního koeficientu pro tyto dvě nejistoty v používaném rozsahu je pak $A = 27,03$.

Neproblematičtější je v tomto případě stanovení nejistoty materiálových vlastností u jednodrátově připojených termočlánků. Pro experimentální stanovení této nejistoty by bylo nutné provést proměření dostatečného množství takových termočlánků v celém předpokládaném pracovním rozsahu teplot. To ale není v tomto případě technicky možné. Vzhledem ke zvolenému rozmístění čidel na použitém zařízení není totiž možné bez zásahů do zařízení provést proměření jiného bodu, než bodu číslo 26. Případné doplnění dalších termočlánků na formu by dovolilo proměření více bodů, ale ani tak by jich nebylo dostatečné množství pro věrohodné stanovení této nejistoty. Protože ale jako jeden z termočlánekových drátů je použit pozitivní termočlánekový drát typu K a vzhledem k tomu, že forma je vyrobena galvanizací a tak lze předpokládat její velmi dobrou homogenitu, použijeme v tomto případě stejnou hodnotu chyby, která je deklarovaná pro termočlánky typu K. Pak pro předpokládaný rozsah teplot do $260 \text{ }^\circ\text{C}$ bude platit $\Delta t_{K,max} = 1,95 \text{ }^\circ\text{C}$. Dosazením uvedených chyb do příslušného vztahu získáme vztah pro celkovou standardní nejistotu typu B. Protože nejistotu typu A lze zanedbat, můžeme pro kombinovanou standardní nejistotu přímo psát vztah (4.12). Rozšířenou nejistotu pro interval spolehlivosti 95,5 % pak určíme dle vztahu (4.13).

$$\begin{aligned}
 u_c(t_J) = u_B(t_J) &= \sqrt{\left(A \left(u_B(E_{Ref}) + \frac{\Delta u_{ADmax}}{k_1} \right) \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{Linmax}}{k_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{Kmax}}{k_3} \right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(27,03 \cdot \left(0,0471 + \frac{0,71 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} \right) \right)^2 + \left(\frac{1,5}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{1,95}{2} \right)^2} = 1,82 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

$$U(t_J) = k \cdot u_c(t_J) = 2 \cdot 1,82 = 4 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.13)$$

4.6 Shrnutí výsledků

Tato část disertační práce pojednává o měření teplotního pole na formě pro výrobu umělé kůže technologií *slush moulding*. Klíčovým problémem u této technologie je totiž dosažení homogenního teplotního pole na celé ploše formy, která je poměrně tvarově složitá. Z hlediska sériové výroby je nejvýhodnějším způsobem ohřevu formy využití IR záření. Tento způsob přináší mnoho výhod - energie je přenášena přímo bez nutnosti použít nějaké médium, celý stroj má poměrně kompaktní rozměry a v neposlední řadě je možné lokálně ovlivňovat teplotu v průběhu cyklu. Podmínkou využití IR zářičů pro tuto technologii je však precizní měření teploty v poměrně náročných podmínkách (vysoké teploty, agresivní prostředí, nutná poměrně složitá manipulace s formou). Nikde v literatuře nebyl nalezen podobně rozsáhlý systém pro měření teplotního pole ani pro regulaci IR zářičů u takto složitého systému. Na lince pro výrobu umělých kůží technologií *slush moulding* bylo postupně odzkoušeno několik metod pro měření teplotního pole formy. Po počátečním neúspěšných pokusech se senzory Pt100 a po prvních zkušenostech s výrobou po nasazení termočlánků typu K byl navržen nový způsob měření teploty, a k němu i odpovídající měřicí systém. Po praktickém vyzkoušení prototypových měřících modulů bylo během následujících dvou let vyrobeno celkem více než třicet měřících modulů, se kterými bylo osazeno ještě sedm dalších forem. Tyto formy jsou používány pro výrobu na popsané prototypové i na následné sériové lince. V praxi se ukázalo, že i když je nejistota měření větší, než při použití dvoudrátově připojených termočlánků typu K, je výsledná kvalita kůží srovnatelná. Proces je navíc natolik stabilní, že na vyvíjené lince mohla být spuštěna sériová výroba.

Prototypová linka je dále používána, mimo vlastní sériové výroby, i k přípravě nových projektů do sériové výroby. Pro tyto účely jsou používány také formy ze slitiny hliníku, jejichž výroba je méně finančně i časově náročná. Pomocí nich je pak možné velmi rychle vyrobít první kusy umělých kůží pro nově připravované projekty. Hlavní nevýhodou forem z hliníku je jednak menší přesnost a také mnohem menší životnost, než u forem niklových. Pro měření teploty na těchto formách je prozatím používán původní systém měření s termočlánky typu K a moduly Turck (viz kapitola 4.3). Vzhledem k malému počtu vyrobených kusů na těchto před sériových formách se popsané problémy s připojovacím konektorem a izolací termočlánků neprojevují v takové míře, jako u sériové výroby. Přesto

se jako logické pokračování této práce jeví nalezení vhodného termočlánekového materiálu a experimentální stanovení jeho vlastností pomocí popsané metodiky i pro tyto hliníkové formy, aby bylo možné použít stejný systém měření pro oba druhy forem.

Výsledná nejistota měření je velmi závislá na vlastnostech použitých materiálů (zejména na citlivosti takto vytvořeného termočlátku) a na použitém měřicím systému. Hodnota rozšířené nejistoty pro měření teploty referenčního bodu pomocí dvoudrátově připojeného termočlátku typu K (pro zvolený interval spolehlivosti 95,5 %), dosažené pomocí popsaného měřicího systému v této práci, je 1,6 °C (tato hodnota odpovídá chybě 1 % z pracovního rozsahu). Pro měření teploty v ostatních bodech pomocí výše navržené metody je spočtená hodnota nejistoty 4 °C (to odpovídá chybě 1,5 % z pracovního rozsahu). Tyto hodnoty nejistot jsou pro daný proces přijatelné a jsou srovnatelné s původním systémem měření, kde byla nejistota měření vyčíslena jako 2,7 °C (to odpovídá chybě 1 % z pracovního rozsahu).

Největší vliv na hodnotu nejistoty mají nejistota vlastností materiálu a chyba použité aproximace. Pokud bychom chtěli dosáhnout větší přesnosti měření, pak by bylo nutné zaměřit se na tyto dva zdroje nejistoty. Nejistotu materiálových vlastností bychom mohli snížit například tím, že bychom provedli proměření dostatečně velkého vzorku použitých termočláneků a novou hodnotu nejistoty bychom určily z rozdílů naměřených charakteristik. Tento postup bylo v tomto případě možné provést pouze u termočlátku typu K pro měření teploty referenčního bodu. Proměření termočláneků v ostatních bodech (přímo na formě) by však vyžadovalo přesně definovaný a lokálně ohraničený ohřev formy postupně pro nejméně deset bodů, což je na použitém modelu problematické vzhledem k jeho malým rozměrům. Nejistotu aproximace by bylo možné snížit použitím polynomu vyššího stupně pro popis naměřené charakteristiky termočláneků. V tomto konkrétním případě by však pouhé zpřesnění aproximace mělo pouze minimální vliv na snížení nejistoty. Aby bylo možné tuto nejistotu reálně snížit, bylo by nutné provést opakované proměření termočláneků s použitím přesnějšího systému pro vyhodnocení a za lépe definovaných podmínek (konstantní teplota referenčního bodu, lépe definovaný způsob ohřevu). To je však problematické vzhledem k důvodům, popsaným v předchozím odstavci. Řešením by bylo například použití vodiče z totožného materiálu, jako je forma a jeho proměření v kalibrační peci podobně, jako to bylo provedeno pro termočlánek typu K. Tento postup ale nebylo možné použít v popsané aplikaci.

5 Závěr

Práce přispívá k rozšíření teoretických poznatků oboru:

1. Porovnává různé metody měření teplotních polí v různých aplikacích
2. Konfrontuje naměřené výsledky s výsledky provedených simulací
3. Navrhuje metodu pro měření teplotního pole s využitím měřeného objektu jako jednoho z termočlánekových materiálů
4. Formuluje příslušná omezení pro použití této metody
5. Předkládá metodiku pro určování vlastností takto vzniklých termočláneků

Okamžitý přínos práce pro praxi:

1. Jsou navrženy tři různé měřicí systémy pro měření teplotních polí pro různá prostředí v průmyslové praxi
2. Všechna navrhovaná řešení jsou i realizována a odzkoušena při praktickém použití
3. Je provedena analýza vlastností jednodrátového připojení termočláneků na Ni formu a uvedeny vztahy pro výpočet teploty v konkrétních bodech
4. Pro porovnání jsou vypočteny nejistoty měření pro všechny uvedené metody měření teplotních polí

V rámci této práce jsem vytvořil tři kompletní měřicí systémy a to jak po hardwarové stránce, tak i příslušný software. Všechny tyto systémy byly vyzkoušeny v praxi a mimo prvního z nich jsou nadále využívány. Kapitoly 3, 4 a 5 této práce popisují princip měření u těchto systémů, způsob vyhodnocení dat, ale také podmínky a okolnosti jejich vzniku (zejména technologii a prostředí, pro které byly navrženy) a dosažené výsledky.

Projekt, na základě kterého vznikl měřicí systém popsany v kapitole 3, je v této chvíli pozastavený. Přesto bylo prokázáno, že by bylo možné ho využít pro zvýšení stability procesu. Práce také obsahuje návrhy na případné začlenění vytvořeného systému do technologie a případné modifikace systému pro jeho využití i v jiných projektech.

Měřicí systém, popsany v kapitole 4, slouží vývojovému oddělení firmy Škoda Auto pro sběr dat. Výsledky následných výzkumů jsou však majetkem této firmy a jsou důvěrné povahy.

Pátá kapitola pak popisuje vývoj měřicího systému pro měření teplotního pole na formě pro proces *slush moulding*. Původní měřicí systém, osazený na formu firmou Aura Engineering, používal senzory Pt100 a byl nevhodný pro požadované účely. Na základě vyhodnocení stávajícího stavu byla navržena změna čidel na termočlánky typu K. Při nasazení tohoto systému na prototypovém stroji se ukázalo několik slabých míst tohoto řešení, které znemožňovali jeho použití pro sériovou výrobu. Proto jsem navrhl nový systém pro měření teplot s využitím formy jako jednoho z termočlánekových materiálů, navrhl a realizoval prototyp měřicího přípravku a pomocí něho provedl proměření vlastností takového jednodrátově připojeného termočlánku na modelu stroje. Na základě výsledků jsem navrhl způsob vyhodnocení teplotního pole, který jsem následně implementoval do řídicího software pro regulaci teplotního pole na formě. Celé řešení bylo odzkoušeno na jedné formě na prototypovém stroji a v této době je již reálně nasazeno do sériové výroby pro osm forem na prototypové i na následné sériové lince. Součástí práce je i metodika pro určení vlastností jednodrátově připojených termočláneků v reálných podmínkách a vyhodnocení nejistoty pro takové měření. Získané poznatky lze tak aplikovat i na objektech z jiných materiálů, než je galvanicky vyrobená Ni forma.

Citovaná literatura

- [1] LENFELD, Petr. *Teplotní pole ve vstřikovacích formách*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 1997. 138 s. Disertační práce.
- [2] Autodesk. *Moldflow* [online]. 2008 [cit. 2008-12-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.moldflow.com>>.
- [3] MGV ENTERPRISES. *IntelliMold* [online]. 2008 [cit. 2008-12-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.intellimold.com/>>.
- [4] KREIDL, Marcel. *Měření teploty – senzory a měřící obvody*. Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-154-4.
- [5] Omega. *Revised Thermocouple Reference Tables : Type K*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 3 s. Dostupný z WWW: <<http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z204-206.pdf>>.
- [6] Philips. *KTY82 series : Silicon temperature sensors*. [s.l.] : NXP B.V., 2008. 17 s. Dostupný z WWW: <http://www.nxp.com/acrobat_download/datasheets/KTY82_SER_4.pdf>.
- [7] BAŘINOVÁ, Zuzana. *Kalibrace senzorů pro měření teplotního pole*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2008. 96 s. Diplomová práce.
- [8] Kiefel INC. Technologies. *SLUSH-MOLDING* [online]. 2008 [cit. 2008-12-21]. Dostupný z WWW: <http://www.kiefeltech.com/index.php?option=com_content&task=view&id=3&Itemid=4>.
- [9] Krauss Maffei. *Slush moulding machines* [online]. 2008 [cit. 2008-12-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.krauss-maffei.de/index.php>>.
- [10] ŠKOLNÍK, Petr. *Řízení teplotních polí pomocí ohřevu infračervenými zářiči*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. 120 s. Disertační práce.
- [11] LENAM s.r.o.. *Výzkumná zpráva 051208 : Radiation of Galvano/Heating & Cooling*. Liberec, 2005. 27 s., dostupné v archivu firmy LENAM
- [12] LENAM s.r.o.. *Výzkumná zpráva 5110/02 : Numerická simulace možností regulace procesu ohřevu Galvana*. Liberec, 2005. 15 s., dostupné v archivu firmy LENAM
- [13] Piconet : *Modulární sběrnice I/O systém s IP67*. Hradec Králové : Turck s.r.o., 2004. 94 s. Dostupný z WWW: <http://www.turck.cz/download/files/C300146_Piconet.pdf>.
- [14] *Master Book on Sensors - Part A*. Ripka, P., Típek, A.. Praha : BEN, 2003. Temperature sensors. ISBN 80-7300-129-2.

Seznam vlastních prací

- [15] MARTINEC, Tomáš. *Přenos technologických informací pomocí služeb GSM*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2003. 65 s. Diplomová práce.
- [16] MARTINEC, Tomáš. Vytvoření řídicí aplikace s využitím PC a portu LPT. *K7 : vědecko populární časopis Fakulty Mechatroniky*. 2004, roč. 1, č. 2, s. 34-40, ISSN 1214-7370. Dostupný z WWW: <http://k7.tul.cz/download/k7_04_2.pdf>.
- [17] MARTINEC, Tomáš. Dataloger s ukládáním na Compact Flash Kartu. *K7 : vědecko populární časopis Fakulty Mechatroniky*. 2004, roč. 1, č. 3, s. 39-43, ISSN 1214-7370. Dostupný z WWW: <http://k7.tul.cz/download/k7_04_3.pdf>.
- [18] MARTINEC, Tomáš, RUKAVIČKOVÁ, Lenka. Data logger for measured data from boreholes. In *Mechatronika 2005 : Proceedings of 8th international symposium on mechatronics*. Trenčín : Alexander Dubček University, 2005. s. 54. ISBN 8075-058-0.
- [19] MARTINEC, Tomáš. Napište si překladač 1. díl : Úvod do problematiky. *K7 : vědecko populární časopis Fakulty Mechatroniky*. 2005, roč. 2, č. 2, s. 40-42, ISSN 1214-7370. Dostupný z WWW: <http://k7.tul.cz/download/k7_05_2.pdf>.
- [20] MARTINEC, Tomáš. Napište si překladač 2. díl : Vyhodnocování výrazů. *K7 : vědecko populární časopis Fakulty Mechatroniky*. 2005, roč. 2, č. 3, s. 7-11, ISSN 1214-7370. Dostupný z WWW: <http://k7.tul.cz/download/k7_05_3.pdf>.
- [21] MARTINEC, Tomáš. Napište si překladač 3. díl : Složitější výrazy, proměnné a funkce. *K7 : vědecko populární časopis Fakulty Mechatroniky*. 2005, roč. 2, č. 4, s. 2-5, ISSN 1214-7370. Dostupný z WWW: <http://k7.tul.cz/download/k7_05_4.pdf>.
- [22] MARTINEC, Tomáš. Napište si překladač 4. díl : Interpretý. *K7 : vědecko populární časopis Fakulty Mechatroniky*. 2006, roč. 3, č. 1, s. 2-5, ISSN 1214-7370. Dostupný z WWW: <http://k7.tul.cz/download/k7_06_1.pdf>.
- [23] MARTINEC, Tomáš, ŠKOLNÍK, Petr, HUBKA, Lukáš. *Modelling and control of temperature field of an industrial form with infrared radiators*. In *ECMS 2007*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. s. 125-127. ISBN 978-80-7372-2.
- [24] MARTINEC, Tomáš. Measurement of the temperature field on the metal plate. In *Proceedings of 8th International Carpathian Control Conference ICC'2007*. Štrbské Pleso: TU Košice, 2007. s. 109. ISBN 978-80-8073-8.
- [25] MARTINEC, Tomáš, TŮMA, Petr. Measurement of the temperature field on automobile seat. In *Summaries Volume 16th International Conference on Process Control 2007*. Bratislava : Slovak University of Technology, 2007. s. 205. ISBN 978-80-2.

Měření teplotních polí pomocí kontaktních metod měření

Autoreferát disertační práce

Ing. Tomáš Martinec

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Rozsah: 44 stran

Náklad: 14 výtisků

březen 2009