

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

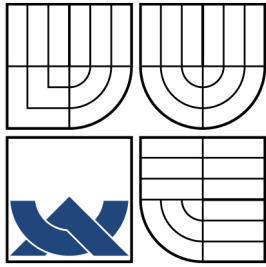
NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU OHŘEVU TUV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

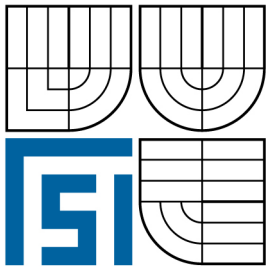
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL KUBA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU OHŘEVU TUV
DESIGN OF EXPERIMENTAL MODEL OF BOILER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL KUBA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. RADEK VLACH, PH.D.

BRNO 2010

Abstrakt

Tato práce popisuje návrh experimentálního modelu ohřevu TUV a identifikaci parametrů systému na základě měření. Podle výsledků rešeršní studie byl zhotoven model ohřívače a měřící jednotka. K měření a přenosu dat do PC byla použita měřící karta NI USB-6216. Ke zpracování dat pak program MATLAB.

Abstract

This thesis describes the design of experimental model of boiler and identification of systems parameters. Model and measuring unit were designed on basis of research study. Data acquisition module NI USB-6216 was used to measure and transfer data to computer. Programme MATLAB was used to proces data.

Klíčová slova

přenos tepla, ohřívač vody, měření teploty, MATLAB, identifikace parametrů

Keywords

heat transfer, water heater, temperature measurement, MATLAB, indentification of systém parameters

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za poskytnutou pomoc při vypracovávání této práce. Dále pak Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za přínosné informace a pomoc při zpracování praktické části.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Návrh experimentálního modelu ohřevu TUV jsem vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce, s pomocí odborné literatury, kterou jsem citoval v seznamu literatury.

V Brně dne :

.....

Pavel Kuba

OBSAH

1. Úvod	7
2. Formulace problému a stanovení cílů	8
3. Základní vztahy termomechaniky	9
3.1. Kondukce.....	9
3.2. Konvekce.....	9
3.3. Radiace.....	10
3.4. Akumulace tepla.....	10
3.5. Tepelné odpory.....	10
4. Modelování procesů pomocí tepelných sítí	11
5. Funkce a konstrukce bojleru	12
6. Teplotní snímače	14
6.1. Dilatační teploměry.....	14
6.2. Odporové snímače.....	15
6.3. Termočlánky.....	15
6.4. Polovodičové odporové snímače.....	16
6.5. Bezkontaktní snímače.....	17
6.6. Kritéria výběru.....	17
7. Návrh modelu bojleru	18
8. Návrh měřicí jednotky	19
8.1. Čidlo LM35DZ.....	19
8.2. Karta NI USB-6216.....	20
8.3. Zapojení.....	21
8.4. Propojení karty NI USB-6216 s PC.....	22
8.5. Nastavení karty v programu MATLAB.....	22
8.6. Nastavení programu Matlab Simulink.....	23
9. Testování měřicí jednotky	24
10. Realizace měření	25
11. Aplikace tepelné sítě na naměřená data	27
11.1. Detailní popis.....	27
11.2. Globální popis.....	29
12. Závěr	31
13. Seznam literatury	32

1. Úvod

Tepelné procesy a jejich modelování jsou důležitou součástí nejen mechatronických systémů. V každém odvětví techniky se řeší více či méně složité problémy přenosu tepla. Ať už se jedná o odvod odpadního tepla či přívod tepla užitkového, vždy je třeba správně identifikovat teplotní parametry systému tak, aby se dalo v rámci možností předpovídat jeho chování. Na první pohled jednoduchý problém může mnohdy svému řešiteli přinést nečekané komplikace. Jedním z takových problémů je i efektivní řízení ohřevu TUV. V rámci konkurenčního boje se přední výrobci bojlerů a regulační techniky snaží o zefektivnění řídicího procesu. Otázka, kterou se tyto firmy zabývají, je možnost řízení ohřevu TUV pomocí jediného snímače teploty. Problém, se kterým se setkávají, je snímání teploty jen na jednom místě jediným čidlem. Pokud je ze zásobníku odebírána teplá voda, je do něj zároveň přiváděna voda studená. Teplá voda se však drží v nejvyšší části zásobníku a čidlo ukazuje neustále dostatek teplé vody. Tak se děje, i když je zásobník téměř celý zaplněn vodou studenou a přesto ještě nebyl spuštěn ohřev. Cílem výrobců je tedy vytvořit systém, který by dokázal jen s pomocí jednoho čidla odhadnout, kdy skutečně teplá voda dojde. Na cestě k řešení je třeba vytvořit matematické i reálné modely soustavy, ale nejdříve je nutné systém identifikovat.

2. FORMULACE PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ

Cílem bakalářské práce je navrhnout experimentální model ohřevu TUV a identifikovat parametry matematického modelu na základě experimentu. Na začátku je třeba analyzovat problém konstrukce modelu a navrhnout jeho co možná nejjednodušší řešení. Následně prozkoumat možnosti snímání teploty v modelu a přenos dat do počítače ke zpracování programem MATLAB. Na základě studie indentifikace parametrů vybrat vhodnou metodu a provést měření.

K dosažení výsledku byly stanoveny tyto dílčí cíle:

- literární průzkum problému
- návrh experimentálního modelu bojleru
- návrh měřící jednotky s přenosem a zpracováním dat v PC
- sestavení programu pro měření v systému MATLAB
- testování navržené měřící jednotky
- realizace měření
- identifikace parametrů modelu ohřevu

3. ZÁKLADNÍ VZTAHY TERMOMECHANIKY

Termomechanika je vědní disciplína, která se zabývá přenosem tepla, jeho přeměnou a vlivem na tělesa. Teplem se označuje vnitřní energie tělesa, které se vymění kontaktem s jiným tělesem nebo prostředím při tepelné výměně. Při tepelné výměně nedochází ke konání práce. Základní rovnice pro stanovení tepelné energie, která se vymění mezi tělesem a okolím je následující. Kde m je hmotnost tělesa, c je měrná tepelná kapacita tělesa a $\Delta\vartheta$ je změna teploty.

(všechny vztahy uvedené v této práci jsou citovány z [1])

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (3.1)$$

Pro popsání přenosu tepla je vhodné zavést zákon zachování energie ve formě energetických toků. Tento vztah popisuje rovnováhu mezi energií do systému dodanou, vydanou a akumulovanou.

$$q_{in} - q_{out} = q_{ak} \quad (3.2)$$

Ve vztahu pak toky q_{in} a q_{out} označují vstupující a vystupující energii. Tato se do systému dostává vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo zářením (radiací). Tok q_{ak} pak představuje energii v systému akumulovanou. V ustáleném stavu se nevyskytuje, pouze při ohřívání nebo ochlazování.

3.1. Konduktce

Jako vedení tepla se označuje proces, při kterém částice látky s vyšší energií (teplotou) předávají část energie skrze srážky s částicemi s nižší energií. Při konduktci se částice nepřemísťují, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh.

Pro proudění v jednom směru platí zjednodušený Fourierův zákon. Ve vztahu figuruje měrná tepelná vodivost λ , tloušťka stěny δ , plocha stěny S a rozdíl teplot dvou prostředí oddělených touto stěnou $\vartheta_1 - \vartheta_2$.

$$q_v = \frac{\lambda}{\delta} \cdot S \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (3.3)$$

3.2. Konvekce

Konvekcí se nazývá způsob šíření tepla, při kterém dochází k proudění hmoty o různé teplotě. Tím dochází k promíchání a přenosu tepla mezi různými částmi kapaliny nebo plynu. Konvekce se rozděluje na nucenou a přirozenou.

Při nucené konvektci dochází ke vzniku proudění vnější změnou tlaku (ventilátor, čerpadlo). Nejdříve tedy dochází ke vzniku proudění a následně přenosu tepla.

V případě přirozené konvekce je naopak proudění vyvoláno změnou vztakové síly částic s vyšší teplotou. Hmota s vyšší teplotou snižuje svoji hustotu a stoupá v kapalině nebo plynu vzhůru.

3.3. Radiace

Sálání je přenos tepla pomocí tepelného záření. Tepelné záření je vyzařováno všemi tělesy, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula. Tepelné záření se vyskytuje ve viditelné i neviditelné části spektra. Záření je způsobeno pohybem molekul hmoty, přemísťováním náboje. Protože se jedná o elektromagnetické záření, může přenos tepla radiací probíhat i ve vakuu. Tepelný tok vzniklý při tomto procesu popisuje Stefan-Bolzmannův vztah. Kde ε označuje emisivitu povrchu o ploše A , T_w a T_o jsou teploty povrchu tělesa a okolí a σ je Stefan-Bolzmannova konstanta.

$$q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_o^4) \quad (3.4)$$

Emisivita je poměr zářivosti skutečného tělesa k absolutně černému tělesu, které je ideálním zářičem. Emisivita závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu (teplota) a zpracování (drsnot, barva).

3.4. Akumulace tepla

Pokud se soustava nenachází v ustáleném stavu, obsahuje pak akumulovanou energii. Tato pak ovlivňuje chování soustavy. Tok akumulované energie q_{ak} pak lze vyjádřit následovně. Kde c je měrná tepelná kapacita látky, ρ je její hustota a V její objem.

$$q_{ak} = c \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (3.5)$$

3.5. Tepelné odpory

Při popisu teplotních soustav, se často využívá analogie fyzikálních procesů probíhajících v elektrických soustavách. Pak lze uvažovat tepelný tok q za elektrický proud I , rozdíl teplot $\Delta\vartheta$ za elektrické napětí U a tepelný odpor R_ϑ za elektrický odpor R . Pro teplotní veličiny pak platí analogie Ohmova zákona v následujícím tvaru.

$$q = \frac{\Delta\vartheta}{R_\vartheta} \quad (3.6)$$

Vztah pro výpočet tepelného odporu se liší vždy podle tvaru tělesa, do kterého vstupuje tepelný tok. Rozlišuje se tak mezi tyčemi, stěnami, trubkami a jinými tělesy. Pro případ z kapitoly 3.1. by tak teplotní odpor byl následující.

$$R_\vartheta = \frac{\delta}{\lambda \cdot S} \quad (3.7)$$

Pokud se prostupovaná tělesa skládají z několika vrstev různého materiálu, lze tepelné odpory sčítat a to buď sériově nebo paralelně.

Řešení teplotních odporů lze aplikovat i na případ teplotní kapacity.

4. MODELOVÁNÍ PROCESŮ POMOCÍ TEPELNÝCH SÍTÍ

Metoda tepelných sítí se využívá pro potřeby modelování složitějších tepelných soustav, ve kterých nedochází k jednoduchému jednorozměrnému sdílení tepla a kde se uvažuje kombinace kondukce, konvekce a radiace. Jádro metody opět využívá analogie elektrických a tepelných procesů. Soustava se při řešení nahrazuje elektrickým obvodem s rezistory, kapacitory a zdroji proudu.

Síť sestává z uzlů, které mají vlastní teploty a mohou být i zdrojem generovaného tepla q_g . Mezi jednotlivými uzly se nachází tepelné odpory, ty vytváří tepelné větve propojením s dalšími uzly a odvody tepla do okolí. Odpory ve větvích lze řadit do série nebo paralelně. K řešení teplotní sítě se užívá Kirchhoffových zákonů. Proto stejně jako u elektrického proudu musí být součet tepelných toků do uzlu vstupujících, v uzlu generovaných a z uzlu vystupujících roven nule.

$$q_{in} + q_g - q_{out} = 0 \tag{4.1}$$

U různých tepelných sítí, lze za určitých podmínek spojovat uzly a nahradit je jediným. Na druhou stranu v mnoha případech hraje důležitou roli akumulovaná energie, kterou je možné zařadit do sítě jako kapacitu.

Řešení tepelné sítě s akumulovanou energií vede na soustavu diferenciálních rovnic prvního řádu. Na řadu pak přichází analytické nebo numerické metody řešení.

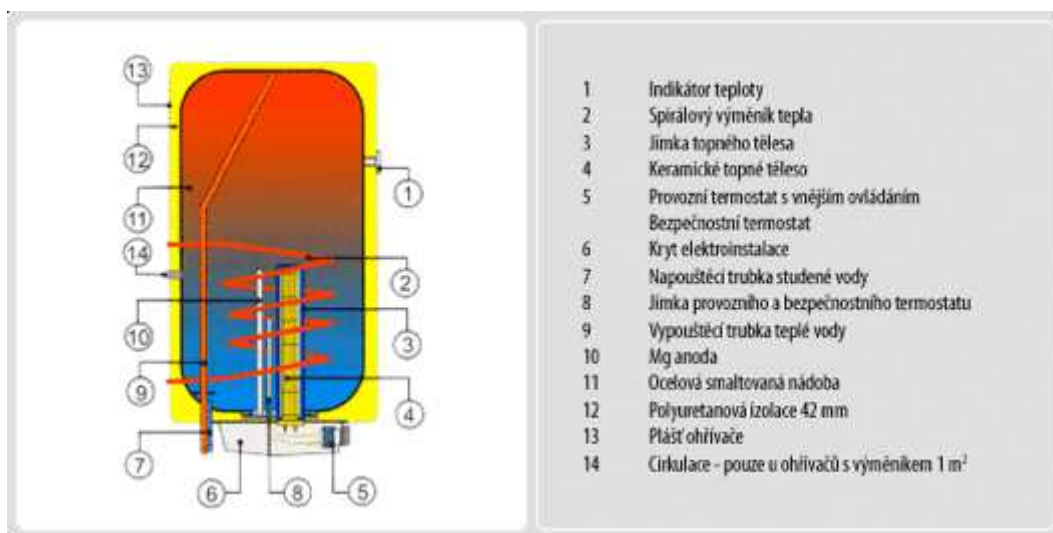
5. FUNKCE A KONSTRUKCE BOJLERU

Bojler je nádoba na ohřev a akumulaci ohřáté vody. K ohřevu vody uvnitř nádoby dochází různými způsoby, přičemž nejčastější je ohřev vody odporovou topnicí, sekundárním ohřevem vody nebo kombinací obou metod. První z metod je založena na předávání tepla mezi kovovou odporovou topnicí a vodou. Tato metoda je založena na principu přeměny elektrické energie na teplo. U vertikálního bojleru má topnice tvar spirály umístěné u dna bojleru, zatímco u horizontálního uspořádání je topnice podlouhlá, aby pokryla co největší plochu.

Metoda sekundárního ohřevu spočívá v předávání tepla mezi vodou v bojleru a vodou z vnějšího zdroje. Vnější zdroj rozumíme samostatný kotel, solární panel, či jiné zařízení na ohřev vody. Voda z vnějšího zdroje proudí skrze trubku z materiálu s nízkým tepelným odporem, nejčastěji měděnou, ve tvaru spirály nebo šroubovice. Trubka je umístěna v bojleru a tak dochází k ohřevu. Voda z kotle je v drtivé většině případů používána k centrálnímu vytápění.

Kombinace obou těchto metod nachází uplatnění v rodinných domech a bytech. V topné sezoně se snižují náklady na ohřívání užitkové vody právě sekundárním ohřevem od vody z centrálního vytápění.

Bojler, jakožto nádoba na uchování teplé vody, musí být dobře izolován, aby nedocházelo k úniku tepla do okolí. Toho je docíleno použitím obalu z materiálu s velkým tepelným odporem, jako je například skelná vata, polystyren nebo polyuretanová pěna. Konstrukce vertikálního bojleru je jasně znázorněna na *obrázku 5.1*.



Obrázek 5.1 : řez vertikálním bojlerem (převzato z [12])

Ohřevem vody ve spodní části bojleru dochází ke snížení její hustoty a stoupání středem bojleru nahoru. Přestože je snaha o co nejdokonalejší izolaci, voda se ve vrchních vrstvách ochlazuje a následně stéká po obvodu dolů. Tímto způsobem vzniká vnitřní cirkulace vody.

Bojlery bývají vybaveny teplotním čidlem ve vrchní části u hladiny. Podle údajů z tohoto čidla se může vypínat, či zapínat ohřev vody. Obvykle se v bojlerech setkáme s bimetalovým termostatem nebo odporovým čidlem s A/D převodníkem pro komplexnější regulaci.

6. TEPLOTNÍ SNÍMAČE

Měření teploty je jedna z nejdůležitějších technických disciplín a v této práci hraje zásadní roli. Pro měření teploty se v technické praxi používá mnoho různých snímačů. Podle způsobu měření se v základě dělí na elektrické a mechanické. Elektrické snímače se pak dále dělí na kontaktní a bezkontaktní.

6.1. Dilatační teploměry

Dilatační teploměry patří do skupiny mechanických snímačů. Princip snímání teploty je založen na teplotní roztažnosti jednotlivých látek. Nejčastěji se lze setkat s kapalinovými (rtuťový, ethalonový) nebo bimetalovými teploměry.

Kapalinový teploměr sestává z baňky, kapiláry a stupnice. Změnou teploty se mění objem kapaliny a tím se mění výška hladiny v kapiláře. Podle výšky hladiny se určuje teplota. Rozsah těchto teploměrů se liší v závislosti na použité kapalině.

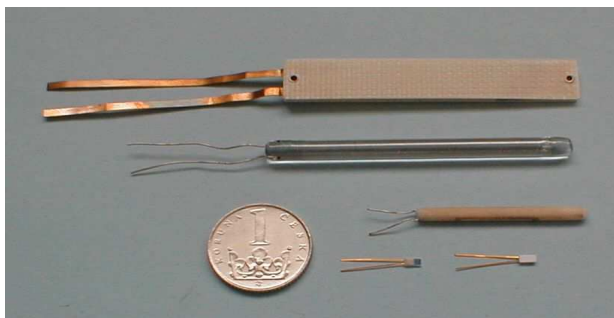
Bimetalové teploměry sestávají ze dvou pruhů různých kovů, které jsou k sobě slišovány nebo svařeny. Tyto dva kovy mají různé tepelné součinitele délkové roztažnosti. Změnou teploty dochází k nestejně změně délky obou pásků a tím k prohnutí. Na rozdíl od kapalinových teploměrů lze bimetalové použít jako akční člen při regulaci teploty. Příkladem je bimetalový termostat.



Obrázek 6.1 : rtuťový teploměr (převzato z [13])

6.2. Odporové snímače

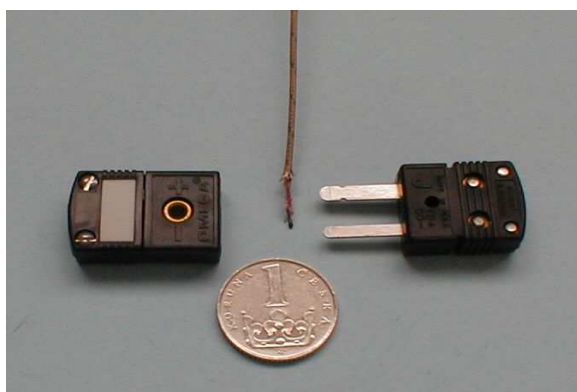
Odporové snímače se řadí do skupiny dotekových elektrických snímačů. Využívají závislosti elektrického odporu kovu na teplotě. Nejčastěji se používají kovy jako platina, nikl, měď a jejich slitiny. Pro malé rozsahy teplot je jejich teplotní závislost lineární. Využívají se ve všech průmyslových odvětvích pro svou stabilitu, přesnost a relativně jednoduché zpracování signálu.



Obrázek 6.2 : odporové snímače typu Pt100 (převzato z [14])

6.3. Termočlánky

Termočlánky ke své činnosti využívají tzv. Seebeckova jevu. Tímto jevem se označuje vznik elektrického proudu v obvodu ze dvou různých kovových vodičů, jejichž dva spojené konce mají rozdílné teploty. V libovolném místě obvodu pak lze po rozpojení změřit napětí. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia. U termočlánků se rozlišuje měřicí a srovnávací konec vodiče. Pro korektní měření je třeba zajistit konstantní teplotu srovnávacího konce. Nejčastěji se toho docílí ponořením srovnávacího konce do nádoby s ledovou tříští.



Obrázek 6.3 : termočlánky typu P (převzato z [15])

6.4. Polovodičové odporové snímače

Polovodičové snímače stejně jako kovové odporové snímače využívají principu změny elektrického odporu v závislosti na teplotě. Ze skupiny odporových snímačů se vyčlenují kvůli odlišným vlastnostem polovodičových materiálů, hlavně jejich velké nelineární závislost odporu na teplotě.

Polovodičové snímače lze rozdělit na termistory a monokrystalické odporové senzory. Rozdíl mezi nimi je v použité struktuře polovodiče. Zatímco u monokrystalických senzorů se jedná o monokrystalickou strukturu (Si, Ge, In), u termistorů se používají polykrystalické polovodiče (BaTiO_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO). Termistory se dále dělí podle teplotního součinitele odporu na negastory (záporný součinitel) a pozistory (kladný součinitel). Pokud se s narůstající teplotou odpor zmenšuje, jedná se o záporný teplotní součinitel, zatímco pokud se s narůstající teplotou odpor zvyšuje, jedná se o kladný teplotní součinitel.

Základní vlastnosti negastorů:

- vysoká citlivost i na rychlé teplotní změny
- malá hmotnost a rozměry
- nestabilita a nízká stálost
- vysoká míra nelinearity

U pozistorů je teplotní součinitel pro teploty do bodu zlomu záporný a s narůstající teplotou se zvyšuje. Teploty se proto mohou efektivně měřit jen v úzkém rozmezí teplot za bodem zlomu. Jako bod zlomu označujeme teplotu, při které mění záporný teplotní součinitel na kladný. Díky svým vlastnostem nacházejí využití jako termostaty, pojistky nebo různé zpozdovače v elektrických obvodech.

Monokrystalické senzory mají stejně jako pozistory kladný teplotní součinitel, ale v jejich teplotně-odporové charakteristice se nevyskytuje bod zlomu. V technické praxi se výhradně používají křemíkové senzory.

Mezi jejich základní vlastnosti patří:

- dlouhodobá stabilita
- vhodnými metodami korigovatelná nelinearita
- měřicí rozsah -50 až 150°C

Monokrystalické senzory se často vyskytují společně v linearizačními prvky v jednom integrovaném obvodu s lineární teplotně-napěťovou charakteristikou. [6]

Ukázka polovodičového snímače je na *obrázku 8.1*.

6.5. Bezkontaktní snímače

Bezkontaktní snímače teploty tvoří specifickou skupinu teplotních snímačů. Dělí se podle způsobu zpracování dat na zobrazovací a měřicí. Zobrazovací, jak název napovídá slouží k zobrazení měřené oblasti pomocí různých barev (termovize) nikoliv přesné teploty. Měřicí oproti nim kalkulují s konkrétní hodnotou teploty. Obě tyto skupiny se dále dělí na mnoho různých podskupin podle způsobu měření a zobrazení. Všechny skupiny mají však společný základní princip, kterým je měření intenzity teplotního záření. Tepelné záření je popsáno v kapitole 3.3.

Bezkontaktní snímače mají řadu výhod, mezi než patří rychlost měření, měření velmi vysokých teplot. Bezkontaktním měřením nedochází k ovlivnění měřeného tělesa. Mají však i nevýhody jako například měření jen na přímou viditelnost, nutnost znát emisivitu tělesa.



Obrázek 6.4 : digitální pyrometr řady AR (převzato z [16])

6.6. Kritéria výběru

Čidla použitá v této bakalářské práci jsou vybrána podle následujících požadavků. Za předpokladu cirkulace vody v bojleru je třeba postihnout změny teplot v různých teplotních hladinách. Je tedy potřeba velký počet čidel. Za dostačující lze považovat 6 vertikálních hladin a 2 horizontální. Čidla by měla být umístěna nad sebou uprostřed sudu a blízko stěny. Uvažujeme symetrické rozložení teploty podle osy rotace.

Vzhledem k rozmezí teplot, ve kterém bude probíhat měření, není nutné zapojovat čidla s velkým rozsahem. Postačuje tedy rozsah 0 – 100°C. Stejně tak vzhledem k povaze problému nemusí rozlišitelnost a přesnost dosahovat velkých hodnot. Postačující rozlišení a přesnost je $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Čidla mohou mít jak analogový, tak číslicový výstup. Z povahy problému vyplývá nutnost použít kontaktních čidel.

7. NÁVRH MODELU BOJLERU

Podle výše popsané konstrukce bojleru v kapitole 5. byl navržen prvotní model. Základ konstrukce tvoří nerezový sud o objemu 50 l s vyříznutým vrchním víkem. Sud je obalen po obvodu izolací a z vrchu uzavřen odnímatelným izolačním víkem. Původní záměr se dvěma ventily pro přívod a odběr vody byl opuštěn pro jednodušší konstrukční řešení bez ventilů. Stejně tak vnitřní ohřev odporovou spirálou byl nahrazen méně tradičním ohřevem topnicí z vnější strany dna.

Obalová izolace je řešena odnímatelně, tím lze provést měření při dvou různých podmínkách prostupu tepla. Prvním pokusem bylo použití konstrukční polyuretanové pěny (PUR). Sud byl vložen do kartonové formy a vnitřní prostor byl vyplněn pěnou. Po několika dnech, kdy pěna zvětšila svůj objem a na povrchu vytvrdla, došlo po rozříznutí obalu na dvě poloviny ke zjištění, že hmota zůstala v místech bez přístupu vzduchu měkká a vytvořila kapsy. Tento pokus byl zhodnocen jako neúspěšný a pro účely modelu nevhodný. PUR pěna byla nahrazena izolační polyetylenovou pěnou známou pod obchodním názvem Mirelon, která nabízí jednodušší konstrukční řešení při srovnatelných izolačních vlastnostech.

Vrchní izolační víko bylo vyříznuto z 10cm vysoké polystyrenové desky do kruhového tvaru o průměru 32cm. V jeho středu a 3 cm od okraje byly vsazeny dvě dřevěné tyče s čidly. Od těchto tyčí vedou vodiče k měřicímu zařízení.



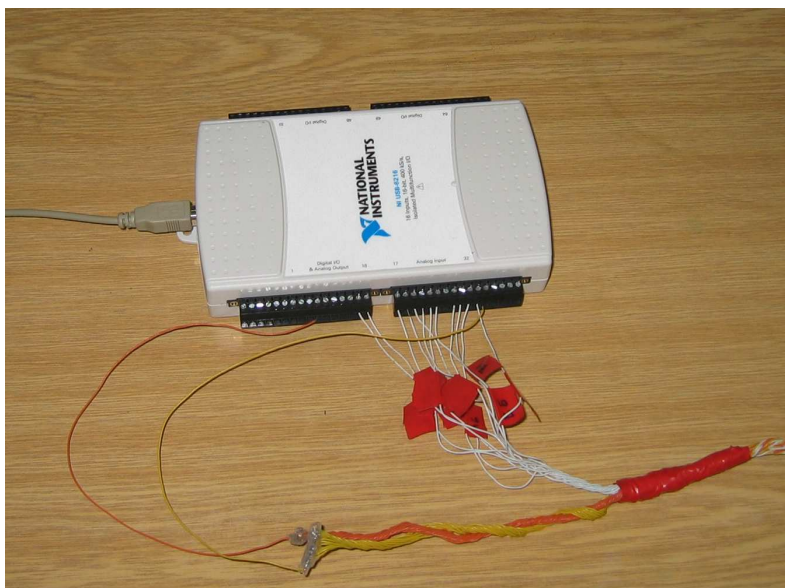
Obrázek 7.1 : experimentální model ohřevu TUV

8.2. Karta NI USB-6216

Tato karta je multifunkční měřicí zařízení pracující se sběrnicí USB, která zajišťuje napájení a přenos dat do PC. Zpracování naměřených dat pak probíhá v programu MATLAB Simulink pomocí balíčku Data Acquisition Toolbox. Karta obsahuje jak analogové, tak digitální vstupy a výstupy. Pro potřeby tohoto měření stačí využít analogové vstupy (AI). Základní charakteristika analogových vstupů: [3]

- 16 analogových vstupů
- vstupní rozsah ± 10 V, ± 5 V, ± 1 V, ± 0.2 V
- maximální vzorkovací frekvence 400 000 S/s (vzorků za vteřinu)

Zařízení rovněž disponuje portem +5V, který dodává max. 50mA. Na tento port jsou připojena všechna čidla, čímž je zabráněno vytvoření zemních smyček. Zmiňovaných 50 mA bohatě dostačuje pro napájení 13 čidel s odběrem 60 μ A.



Obrázek 8.2 : karta NI USB-6216 se zapojenými čidly

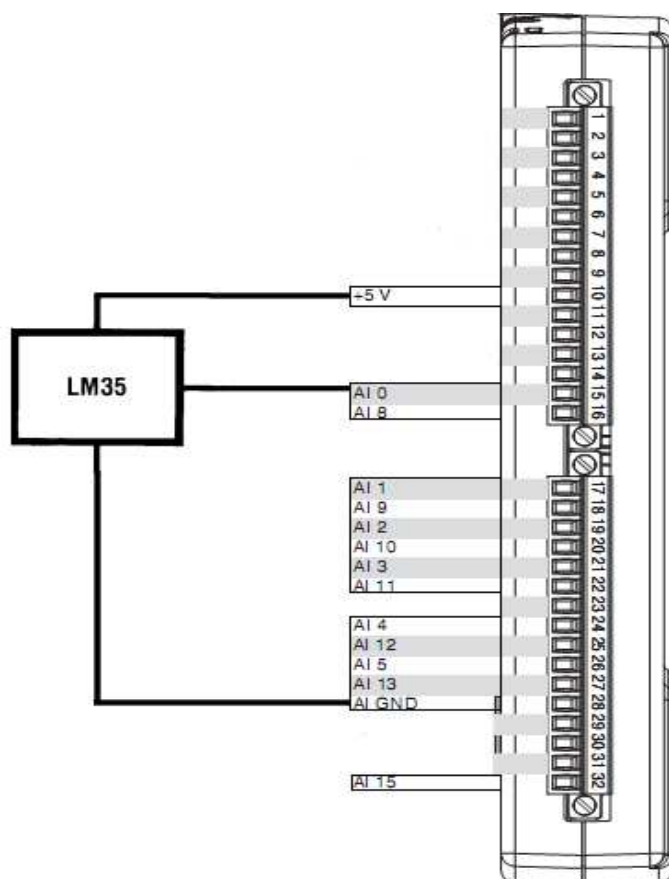
8.3. Zapojení

Zapojení čidel je řešeno velmi jednoduše. Čidla jsou vůči sobě řazena paralelně, všechna sdílí napájecí a zemní vodič. Zapojení jednotlivých svorek měřicí karty je znázorněno na obrázku. Čidla jsou v místě spoje s vodičem obalena vrstvou izolace, která brání natečení vody a tím zkratu.

Čidla jsou rozdělena do tří skupin podle jejich umístění. Skupina *A* obsahuje čidla z prostřední tyče, čidla tak snímají 6 teplotních hladin ve středu bojleru. Do skupiny *B* spadají čidla z tyče boční, snímají 6 teplotních hladin u stěny bojleru. Skupinu *amb* tvoří pouze jedno čidlo snímající teplotu okolí.

- Skupina čidel *A* je zapojena do svorek AI0 – AI5.
- Skupina čidel *B* je zapojena do svorek AI8 – AI13.
- Kontrolní čidlo *amb* je zapojeno do svorky AI15.

Použité svorky mohou být libovolné, zapojení bylo zvoleno z čistě praktického hlediska, pro orientaci podle párů čidel (A1 B1, A2 B2...).



Obrázek 8.3 : ukázka zapojení jednoho čidla s kartou [3][4]

8.4. Propojení karty NI USB-6216 s PC

Spojení měřicí karty s počítačem je realizováno pomocí sběrnice USB. Ke správné funkci karty v operačním systému Windows je třeba nainstalovat balík ovladačů a kontrolních aplikací od výrobce karty. Tyto ovladače jsou volně přístupné z internetových stránek společnosti National Instruments. Pomocí nainstalované aplikace lze provést kontrolu funkce karty a její kalibraci.

8.5. Nastavení karty v programu MATLAB

Nastavení měřícího zařízení probíhá pomocí příkazů z knihovny DAQ toolboxu. Na následujících řádcích je popsána část kódu, který nastavuje základní parametry. Zdrojový kód se nachází v *příloze 1*.

V prvním řádku se zavádí proměnná analogových vstupů. Parametry funkce určují, které zařízení se má použít. Druhý řádek mění typ měřícího vstupu na SingleEnded, tedy měření mezi svorkou vstupu a zemí. Výchozím je přitom diferenční měření dvou sousedních svorek. Následující tři řádky přidávají kanály do proměnné analogových vstupů. Na posledním řádku se nastavuje vstupní rozpětí snímačů a přepočtení pro prostředí MATLAB. Pokud by bylo na svorky přivedeno napětí 0,5 V, bude tato hodnota uložena jako 50. Tímto způsobem lze pracovat s teplotou přímo ve stupních a ne ve voltech. [5]

8.6. Nastavení programu Matlab Simulink

Program MATLAB Simulink s Data Acquisition toolboxem byl použit pouze ke kontrole zapojení a testování čidel v rané fázi práce. Rozhraní Simulink je velmi uživatelsky přívětivé, avšak náročnější na systémové prostředky. Pro potřeby této práce bylo výhodnější použít prostředí MATLAB, kvůli specifickým požadavkům popsáných v kapitole 10. Nastavení probíhá v grafickém rozhraní pomocí sady funkčních bloků.

Blok Analog input slouží k nastavení analogových vstupů, což jsou v tomto případě napětí mezi zemí karty a jednotlivými připojenými čidly. Nastavení bloku probíhá pomocí následujících parametrů : [5]

- Device – výběr ze seznamu použitelných zařízení. Pro zařízení National Instruments je to „nidaq1“. DAQ Toolbox dokáže snímat vstupy i z ostatních zařízení v počítači např. zvukové karty.
- Hardware sample rate – udává, kolik vzorků karta sejme pro každé čidlo za jednu vteřinu.
- Block size – udává, kolik vzorků pro každý vstup se zahrne do výstupu během jedné periody. Pro periodu platí vztah $T = \text{SampleRate}/\text{BlockSize}$
- Input type – určuje, zda bude karta snímat diferenční signál dvou sousedních svorek nebo z každé svorky zvlášť (differential / single ended). Zvoleno single ended
- Channels – na tomto místě lze vybrat ze seznamu vstupů jen použité, volit měřicí rozsah a přiřadit jméno. Měřicí rozsah byl u všech čidel zvolen ± 1 V, pojmenována byla podle kapitoly 6.3.
- Number of ports – upřesňuje počet výstupů bloku. Byla zvolena možnost, kdy každý hardwareový vstup má svůj vlastní výstup z bloku.

9. TESTOVÁNÍ MĚŘÍCÍ JEDNOTKY

V rámci testování měřící jednotky byly provedeny následující zkoušky

- správné zapojení všech čidel
- vodotěsnost
- vliv stínění na kvalitu signálu
- odchylky čidel od referenční teploty

Čidla byla zapojena podle popisu v *kapitole 8.3*. Zkoušky proběhly v programu MATLAB Simulink s následujícím nastavením.

- Hardware sample rate : 100
- Block size : 10
- ostatní parametry podle *kapitoly 8.6*.

Všech 13 vstupů zobrazovalo měřená data a reagovalo na změnu teploty čidla. Tím bylo potvrzeno správné zapojení.

Při měření vodotěsnosti se čidla ponořila do vody a měření proběhlo znovu. Po několika okamžicích se u některých čidel projevil vadu izolace zobrazováním nesmyslných hodnot. Toto bylo ošetřeno opětovným izolováním pomocí univerzálního lepidla, které jako jediné z mnoha vyzkoušených prostředků dokázalo odolat vodě a vyšším teplotám.

Vliv stínění byl testován na nestíněném a stíněném vodiči. Za stejných podmínek jako v předchozích měření byla zjištěna velikost šumu u obou vodičů. Amplituda šumu u nestíněného vodiče byla $0,2^{\circ}\text{C}$ a u stíněného $0,1^{\circ}\text{C}$. Výsledný rozdíl je z hlediska aplikace v této práci zanedbatelný.

Ke změření odchylek jednotlivých čidel bylo třeba určit jedno čidlo jako referenční a změřit jeho odchylku od známé teploty. Vybrané čidlo bylo ponořeno do nádoby s ledovou tříští a prověřeno. Led dosahuje teploty 0°C ve chvíli, kdy se začne měnit jeho skupenství na kapalné. Vybrané čidlo vykazovalo odchylku $0,2^{\circ}\text{C}$, což je pod úroveň přesnosti. Toto čidlo lze v mezích přesnosti $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ označit za dobře zkalibrované. Vzhledem k referenčnímu čidlu byly při stejné teplotě porovnány ostatní. Výchylky všech čidel byly oproti referenčnímu menší jak $0,8^{\circ}\text{C}$, což lze vzhledem k potřebné přesnosti tolerovat.

10. REALIZACE MĚŘENÍ

K jednorázovému snímání teploty slouží v MATLABu funkce `getsample`. Jednorázové snímání dat má velkou výhodu, zejména v možnosti zvolit si libovolnou periodu měření. K tomuto účelu pak slouží časovač, který periodicky volá požadovanou funkci. Použitý skript se nachází v příloze 1. Princip skriptu je následující. Do proměnné t , která funguje jako časovač (timer), vstupují parametry $tasks$ (počet opakování) a $period$ (čas mezi jednotlivými opakováními). Po uplynutí periody se spustí funkce, která sejme teplotu a přiřadí ji do připravené proměnné $sample$. Současně se do proměnné času $time$ připíše další časový krok. Pro orientaci se s každým opakováním vykreslí graf závislosti naměřených teplot na čase. [5]

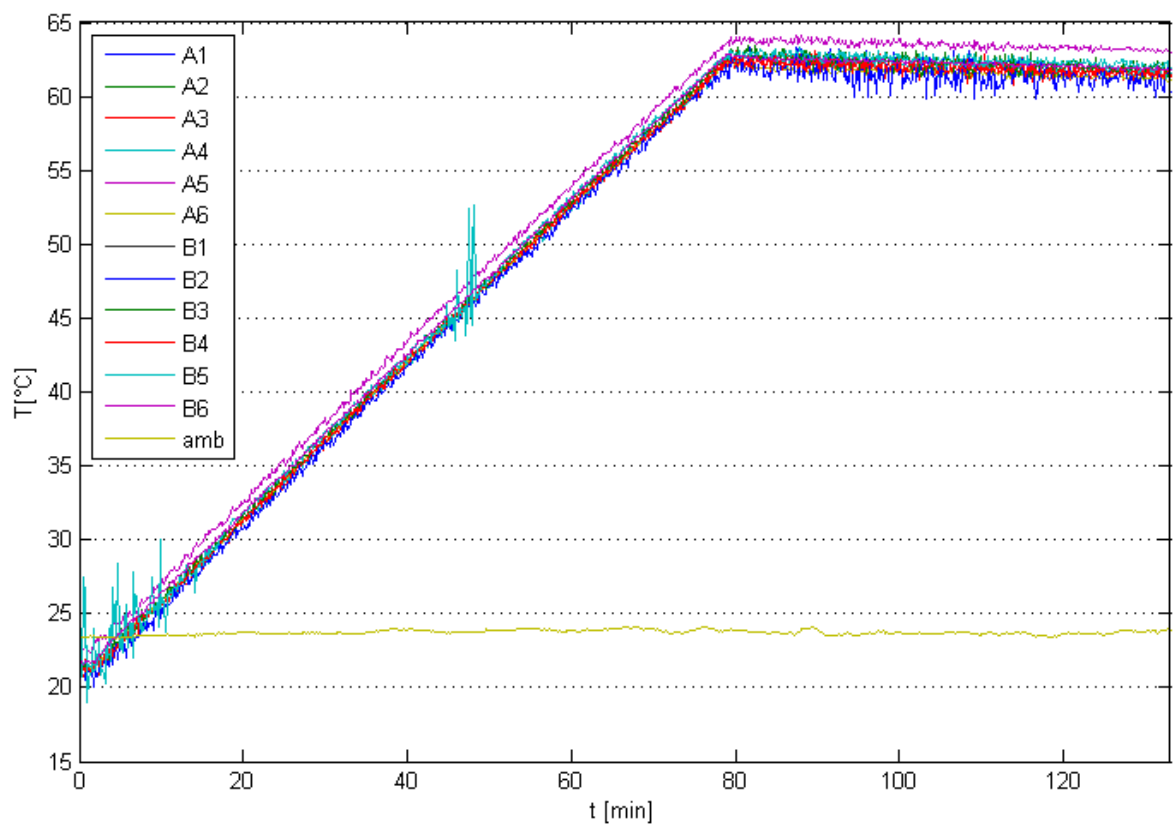
Parametry, které řídí měření, jsou délka měření a perioda snímání teploty. Délka měření je určena jako dvojnásobek času potřebného k ohřátí vody v bojleru na 60°C. Potřebný čas je zhruba určen pomocí vztahu 3.1. Kde m je hmotnost ohřívající vody, c je její měrné skupenské teplo, ϑ je požadovaná teplota, ϑ_{amb} je teplota okolí (počáteční teplota vody) a P je výkon ohříváče.

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{m \cdot c \cdot (\vartheta - \vartheta_{amb})}{P} = \frac{50 \cdot 4180 \cdot 40}{3 \cdot 680} = 4100s \quad (10.1)$$

Za předpokladu, že doba ohřevu je asi 70 minut, lze měřit v delších časových krocích. Perioda byla proto určena jako 10s. Platí, že parametr $tasks$ je délka měření podělená periodou.

Měření probíhalo po dobu 8000 sekund, což je zhruba 2:15 hodiny. Po 80 minutách byl vypnut ohřev, protože teplota uvnitř bojleru přesáhla hodnotu 60°C. Po zbývajícím času bylo pozorováno velmi pozvolné chlazení. Průběh měření je znázorněn v grafu 10.1.

Z grafu je patrný téměř lineární průběh se zlomem v místě vypnutí ohříváče. Průběh teploty čidla amb , tedy čidla okolní teploty, má charakter konstanty. Zašuměný průběh na všech čidlech je způsoben rušením z okolí. Zvláště viditelný je na čidlech $A4$ a $B2$



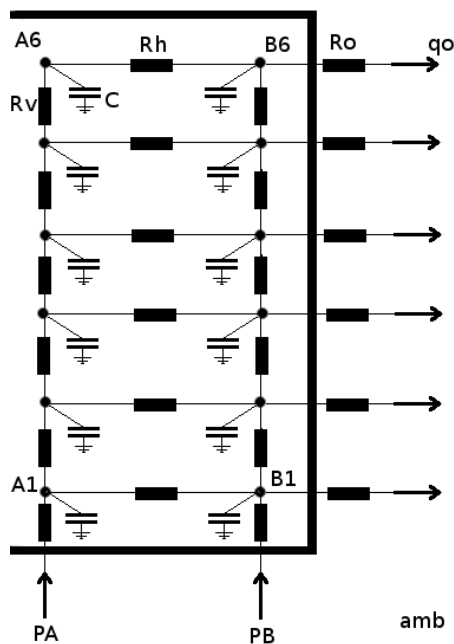
Graf 10.1. : průběh teplot během měření

11. APLIKACE TEPELNÉ SÍTĚ NA NAMĚŘENÁ DATA

Měřenou soustavu lze bez větších problémů znázornit pomocí sítě tepelných odporů. Ta může být sestavena buďto z globálního hlediska nebo detailním popisem interního chování. Detailním popisem je myšlen popis chování uvnitř bojleru tzn. přestup tepla mezi jednotlivými teplotními hladinami. Řešení soustavy je pak značně komplikované a vede na rozsáhlou soustavu diferenciálních rovnic prvního řádu. Oproti tomu globální popis zanedbává rozdíly teplot v teplotních hladinách a vyjadřuje všechny tepelné odpory v soustavě pouze jedním jediným. Soustava je řešena z pohledu pozorovatele, který neví nic o procesech, které se odehrávají uvnitř.

11.1. Detailní popis

Tepelná síť znázorňující detailní soustavu interního chování je zobrazena na obrázku 11.1. Protože se jedná o symetrickou úlohu, je zobrazena jen jedna polovina bojleru. Jak je patrné, jedná se o poměrně komplikovaně strukturovanou síť.



Obrázek 11.1 : tepelná síť s detailním popisem vnitřního chování

Sít' obsahuje několik druhů teplotních odporů, rozlišených podle typu přenosu tepla. Odporů R_v představují vertikální teplotní odpory mezi jednotlivými uzly. Jedná se o prostup tepla přes rovinnou stěnu. Pro odporů R_v platí již výše popsany vztah 3.7.

Odporů R_h zastupují horizontální teplotní odpory mezi jednotlivými teplotními uzly. Platí pro ně prostup tepla přes válcovou stěnu. Popisuje je následující vztah. Kde poloměry r_1 a r_2 určují tloušťku materiálu, kterým prostupuje teplo. λ je měrná tepelná vodivost válcové stěny a L je její délka.

$$R_v = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda \cdot 2\pi \cdot L} \quad (11.1)$$

Odporů R_o jsou vždy sériovým součtem odporů povrchového přestupu tepla a odporu prostupu tepla přes válcovou stěnu (izolace). Vztah pro tepelný odpor válcové stěny je shodný se vztahem 11.1. Vztah pro tepelný odpor povrchového přestupu tepla obsahuje součinitel přestupu tepla α a chladící plochu A .

$$R_v^\alpha = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (11.2)$$

Do sítě vstupují tepelné toky P_A a P_B , které představují teplo generované ohříváčem. Velikosti těchto tepelných toků nejsou stejné, ale v poměru podle následujícího vztahu. Součet příkonů P_A a P_B je celkový tepelný tok ohříváče. Součet ploch A_A a A_B je celková ohřívána plocha. Ze sítě vystupuje tepelný tok úniku tepla do okolí q_o .

$$\frac{P_A}{A_A} = \frac{P_B}{A_B} \quad (11.3)$$

Kapacity C zde znázorňují schopnost soustavy akumulovat energii. Akumulovaná energie je vyjádřena pomocí vztahu 3.5.

Dalším krokem při řešení této detailní soustavy, by bylo sepsání rovnic energetických bilancí pro jednotlivé uzly. Rovnice popisuje vztah 4.1. Následovně by se vyjádřily závislosti teplot jednotlivých uzlů a vytvořila soustava diferenciálních rovnic. Tyto je možné řešit analyticky nebo pomocí iteračních numerických metod

Řešení této teplotní sítě je zde jen teoreticky nastíněno, důkladnější rozbor by mohl být náplní samostatné práce.

11.2. Globální popis

Tepelná síť popsaná z globálního hlediska je oproti předchozímu případu velmi jednoduchá. Síť je tvořena pouze jedním odporem, jedním uzlem a jednou kapacitou, což je znázorněno na *obrázku 11.2*. Tento odpor nahrazuje všechny odpory z předchozího případu, stejně tak i kapacita a teplotní uzel nahrazují všechny prvky svého typu. Do soustavy v tomto případě nevstupuje žádný tepelný tok, veškeré teplo je pro zjednodušení generováno přímo v teplotním uzlu. Rovnici teplotní bilance je možno zapsat v následujícím tvaru.

$$q_{ak} = q_g - q_{out} \quad (11.4)$$

Tento vztah lze vyjádřit pomocí *vztahů 3.5 a 3.6* následovně.

$$c \cdot \rho \cdot V \frac{d\vartheta}{dt} = P_i - \frac{1}{R_{eq}} \cdot (\vartheta - \vartheta_{amb}) \quad (11.5)$$

Jak je patrné z *grafu 10.1*, měření probíhalo v oblasti téměř lineárního průběhu. Proto lze bez obav použít diferenční zápis místo derivace.

$$c \cdot \rho \cdot V \frac{\vartheta - \vartheta_{amb}}{\Delta t} = P_i - \frac{1}{R_{eq}} \cdot (\vartheta - \vartheta_{amb}) \quad (11.6)$$

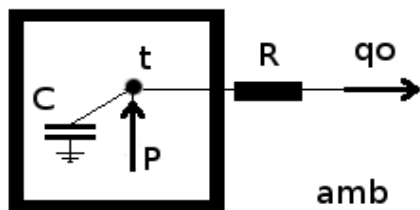
Z tohoto vztahu již lze vyjádřit hledaný odpor R_{eq}

$$\frac{\Delta t \cdot (\vartheta - \vartheta_{amb})}{P_i \cdot \Delta t - c \cdot \rho \cdot V \cdot (\vartheta - \vartheta_{amb})} = R_{eq} \quad (11.7)$$

Hodnoty jednotlivých veličin jsou následující.

- ohřev trval $\Delta t = 4700\text{s}$
- rozdíl teplot $\vartheta - \vartheta_{amb} = 62,7 - 21,2 = 41,5^\circ\text{C}$
- výkon ohříváče $P_i = 2,04\text{kW}$
- měrná tepelná kapacita vody $c = 4180\text{Ws/kg K}$
- hustota vody $\rho = 998\text{kg/m}^3$
- objem vody $V = 50\text{l} = 0,05\text{m}^3$
- $C = c \rho V = 208,6\text{kJ/K}$

$$R_{eq} = \frac{4700 \cdot 41,5}{2,04 \cdot 4700 - 208,6 \cdot 41,5} = 209,5 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (11.8)$$



Obrázek 11.2 : tepelná síť popsaná globálně

Pomocí vypočteného tepelného odporu lze nyní zjistit časovou tepelnou konstantu τ a ustálenou hodnotu teploty. Vztah 11.5 lze analytickým řešením diferenciální rovnice upravit na tvar

$$\vartheta(t) = P_i \cdot R_{eq} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{eq} \cdot C}}\right) + \vartheta_{amb} \quad (11.9)$$

Vztah pro tepelnou konstantu τ

$$\tau = R_{eq} \cdot C = 209,5 \cdot 208,6 = 43701,7s$$

$$5\tau = 5 \cdot R_{eq} \cdot C = 5 \cdot 209,5 \cdot 208,6 = 218508,5s$$

(11.10)

Po uplynutí pěti časových tepelných konstant lze považovat teplotu za ustálenou.

$$\vartheta(t) = P_i \cdot R_{eq} \cdot (1 - e^{-5}) + \vartheta_{amb} = 2,04 \cdot 209,5 \cdot (1 - e^{-5}) + 21 = 445,5^\circ C$$

(11.11)

Z těchto údajů se dá usoudit, že v soustavě k ustálení teploty nedojde, neboť ustálená teplota leží mimo hranice kapalného skupenství vody.

Pro zajímavost jsou v následující tabulce zapsány ustálené teploty pro různě velké výkony topnic.

$P[\text{kW}]$	$\vartheta [^\circ\text{C}]$
2,04	445,5
1	229
0,5	41,8

12. ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly splněny všechny hlavní zadané cíle. Experimentální model byl navržen a zkonstruován tak, že svými parametry odpovídá skutečnému bojleru. Měřicí jednotka umožňuje spolehlivé snímání teploty na postačující úrovni. Společně s měřicím skriptem programu MATLAB představuje jednoduché řešení měření teplot v modelu. Po měření a zpracování dat byly vyvráceny některé předpoklady. Tím nejpřekvapivějším bylo zjištění, že průběh teplot v závislosti na čase je téměř lineární, a že teploty v jednotlivých částech modelu se od sebe výrazně neliší. Toto chování je způsobeno použitím silného zdroje tepelné energie a současně kvalitním zaizolováním. Z tohoto důvodu lze zanedbat vliv úniku tepla do okolí. Průběh teploty je proto možno považovat za lineární. Nespornou výhodou ohřevu v lineární oblasti je velmi jednoduchá identifikace parametrů systému. To však s sebou nese i jistá negativa. Nelze objektivně posoudit, zda se matematický model chová stejně jako model experimentální mimo lineární oblast. Experimentální model by se totiž při překročení teploty 100°C začal chovat velmi odlišně než doposud. K přesnější identifikaci parametrů by bylo třeba provést více měření za různých podmínek a použití složitější teplotní sítě. To však již překračuje rozsah této bakalářské práce.

13. SEZNAM LITERATURY

- [1] VLACH, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách, Brno 2009
- [2] NOSKIEVIČ, P. : Modelování a identifikace systémů, Ostrava 1999
- [3]National Instruments: NI USB-621x User Manual, 2009
- [4]National Semiconductor: LM35 datasheet, 2000
- [5]Humusoft: MATLAB help, 2008
- [6] HW.CZ: Polovodičové senzory, <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty---polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>, 2010-5
- [7] WIKIPEDIE.ORG: Termodynamika, <http://cs.wikipedia.org/wiki/Termodynamika>, 2010-5
- [8] WIKIPEDIE.ORG: Proudění tepla, http://cs.wikipedia.org/wiki/Proud%C4%9Bn%C3%AD_tepla, 2010-5
- [9] WIKIPEDIE.ORG: Tepelné záření, http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A9_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD, 2010-5
- [10] WIKIPEDIE.ORG: Tepelný odpor, http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%BD_odpor, 2010-5
- [11] ATERM.CZ: Měření teploty, <http://www.aterm.cz/Teperm.htm>, 2010-5
- [12] popis bojleru, <http://www.dzd.cz/glr/rez-okc-cs.png>, 2010-5
- [13] rtuťový teploměr, <http://mydailycolumn.files.wordpress.com/2009/07/graphics-mdc-mercury-thermometer.jpg>, 2010-5
- [14] odporový snímač, <http://www.aterm.cz/Images/Pt100Sn1.jpg>, 2010-5
- [15] termočlánek, <http://www.aterm.cz/Images/TermoclP.jpg>, 2010-5
- [16] pyrometr, http://www.prag-info.cz/_shop/image_0232005hi/1241011572pyrometr_AR.JPG, 2010-5

PŘÍLOHA 1

```
clear; clc;
ai = analoginput('nidaq','Dev1');
ai.InputType = 'SingleEnded';
addchannel(ai,0:5);
addchannel(ai,8:13);
addchannel(ai,15);
set(ai.Channel(1:13),'InputRange',[-1 1],'SensorRange',[-0.1 0.1]);
tasks=800;
period=10;
time=0;
sample=getsample(ai);
t=timer('TimerFcn','sample(end+1,:)=getsample(ai);time(end+1)=time(end)
+period;plot(time,sample)','ExecutionMode','fixedRate','BusyMode','drop',
'Period',period,'TasksToExecute',tasks);
start(t);
wait(t);
delete(timerfind);
```