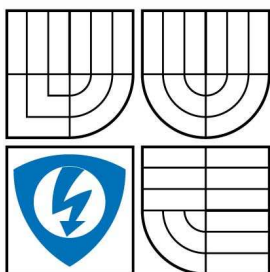


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## Nový teplotní systém pro MR tomograf

New temperature system for MR tomograph

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Tomáš Vomočil

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. Karel Bartušek, DrSc.

BRNO 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Tomáš Vomočil

Bytem: Sedliště 65, Litomyšl 570 01

Narozen/a (datum a místo): 20.10.1984, Litomyšl

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Nový teplotní systém pro MR tomograf

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Karel Bartušek, DrSc.

Ústav: Telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v \*:

- tištěné formě – počet exemplářů .....
- elektronické formě – počet exemplářů .....

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám

\* hodící se zaškrtněte

nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnožení.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ANOTACE**

Je proveden návrh teplotního systému pro MR tomograf s proměnným teplotním rozsahem 20 až 45 stupňů celsia a s přesností 1oC, Systém bude z nemagnetických materiálů.

**Klíčová slova:** teplotní systém, regulace teploty, MR tomografie

## **ABSTRACT**

The design of temperature system for MR tomograph with variable temperature range from 20 to 45oC and presision 1oC is carry out. System is from nonmagnetic materials.

**Kaywords:** temperature system, temperature control, MR tomography

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Nový teplotní systém pro MR tomograf“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....  
( podpis autora )

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Karlu Bartuškoví, DrSc. a odbornému konzultantovi Ing. Zdeňku Dokoupilovi , za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....  
( podpis autora )

## Obsah

1.	<b>Úvod</b> .....	8
2.	<b>Měření teploty</b> .....	9
2.1	Úvod.....	9
2.2	Termoelektrické jevy.....	9
2.3	Měřicí přístroje.....	10
2.4	Odporové teploměry.....	11
2.5	Digitální teploměry.....	12
2.6	Infrateploměry.....	13
2.7	Termokamery.....	13
3.	<b>Termočlánky</b> .....	14
3.1	Úvod.....	14
3.2	Materiály.....	14
3.3	Měření teploty termočlánky.....	15
4.	<b>Optovláknové snímače teploty</b> .....	19
4.1	Úvod.....	19
4.2	Použití.....	19
4.3	Princip optovláknových senzorů teploty.....	20
4.4	Parametry vysílaného světla.....	20
5.	<b>Praktická část</b> .....	22
5.1	Úvod .....	22
5.2	Blokové schéma teplotního systému .....	24
5.3	Měření rychlosti průtoku vzduchu .....	25
5.4	Měření vlastností teplotního systému.....	26
5.5	Zhodnocení.....	31
6.	<b>Závěr</b> .....	32
7.	<b>Použitá literatura</b> .....	33

## 1. Úvod

V mé bakalářské práci jsem se zamyslel nad řešením teplotního systému pro MR tomograf. Proto se v úvodu zaměřuji na základní problematiku, kterou je měření teploty měřicí přístroje a metody měření teploty. Protože tato problematika je velice rozsáhlá zaměřil jsem se jen na vybranou část potřebnou k řešení teplotního systému. Prostor ve kterém potřebujeme stabilizovat a regulovat teplotu je specifický svými parametry (malý prostor, magnetické pole, konstrukce MR tomografu a další parametry). Pro řešení jsem použil nám dostupný přístroj Teplotní kontrolér ( UNIPAN 650H ), který dokáže regulovat teplotu a stabilizovat ji a za pomoci dalších komponent v praktické části bakalářské práce jsem zrealizoval teplotní systém a odzkoušel jeho vlastnosti.

## 2. Měření teploty

### 2.1 Úvod

Na teplotě závisí buď explicitně či implicitně hodnoty všech fyzikálních veličin. Proto existuje velká řada metodik měření teploty.

Na principu změny roztažnosti materiálu s teplotou pracují klasické teploměry a bimetaly. Klasické teploměry mohou využívat roztažnosti jak látek plyných a kapalných tak látek tuhých.

Další možností měření teploty je využití změny elektrického odporu s teplotou (tzv. odporové teploměry).

K měření vysokých teplot se používají tzv. optické pyrometry, které k měření teploty využívají záření, které vydává zahřáté těleso.

Mezi nejvýznamnější a nejčastější způsoby měření teploty patří měření pomocí termočlánků. Princip termočlánku je založen na existenci Seebeckova termoelektrického jevu.

### 2.2 Termoelektrické jevy

Rozdíly teplot mezi jednotlivými částmi elektrického obvodu mají vliv na rozložení elektrického potenciálu a průtoku proudu. A naopak průtok proudu může způsobit vznik rozdílu teplot mezi některými částmi obvodu. U obvodů vytvořených z izotropních těles lze pozorovat tři termoelektrické jevy.

- **Seebeckův jev** se pozoruje tehdy, je-li obvod tvořen alespoň ze dvou různých materiálů. Pak se v obvodě objeví termoelektrická síla, která závisí na rozdílu teplot spojů a na druhu materiálů. Vznik termoelektrické síly se navenek projeví vznikem termoelektrického napětí. Termoelektrické napětí lze naměřit u každých dvou různých materiálů, např. u dvou odlišných čistých kovů, u čistého kovu a slitiny, u dvou různých slitin a také u analogických kombinací materiálů v kapalném stavu. To je však záležitost spíše teoretická, protože je problémem udržet fázové rozhraní mezi danými materiály. Na principu Seebeckova jevu jsou založeny termočlánky.

- **Peltiérův jev** je opak předchozího jevu. Elektrický proud, procházející obvodem vytvořeným ze dvou různých materiálů, způsobuje ohřívání jednoho a chlazení druhého spoje. Změna směru proudu vyvolává ochlazení spoje, který se dříve ohříval, a ohřátí spoje, jenž se dříve ochlazoval.

- **Thomsonův jev** nastane tehdy, když elektrický proud prochází homogenním vodičem s nerovnoměrně rozloženou teplotou. Vodičem potom teče současně elektrický proud a tepelný tok. V částech obvodu, kde je směr proudu a tepla souhlasný, je množství uvolňovaného tepla větší než v částech, v nichž tepelný tok má opačný směr než proud elektrický. Velikost efektu závisí na materiálu vodiče a je úměrná rozdílu teplot.

### 2.3 Měřicí přístroje

V současné době se k měření teplot používají měřicí přístroje několika základních principiálně odlišných typů, které pro zjišťování teploty tělesa nebo látky využívají různé metody měření.

Základní dva pojmy v oboru měření teplot provázející každého, kdo se s měřením teploty setká, jsou přístroj a snímač (čidlo). Přístroj je většinou krabička se zabudovanou elektronikou, která vyhodnocuje signály, jež přicházejí ze snímače, a navíc v některých případech tento snímač také elektricky napájí.

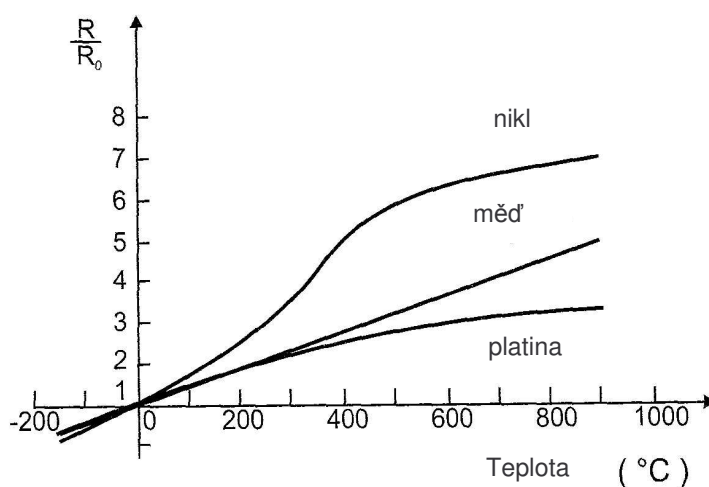
Všeobecně lze obor měření teploty rozdělit na dílčí oblasti měření teploty pevných látek, plynů a kapalin. Podle jejich specifik je třeba správně vybrat měřicí zařízení a popř. snímač teploty.

K měření teploty pevných látek lze využít přístroje jedné ze tří skupin měřících zařízení. Vybírat lze mezi klasickými digitálními teploměry s připojeným snímačem teploty, infrateploměry a termografickými kamerami (termokamerami).

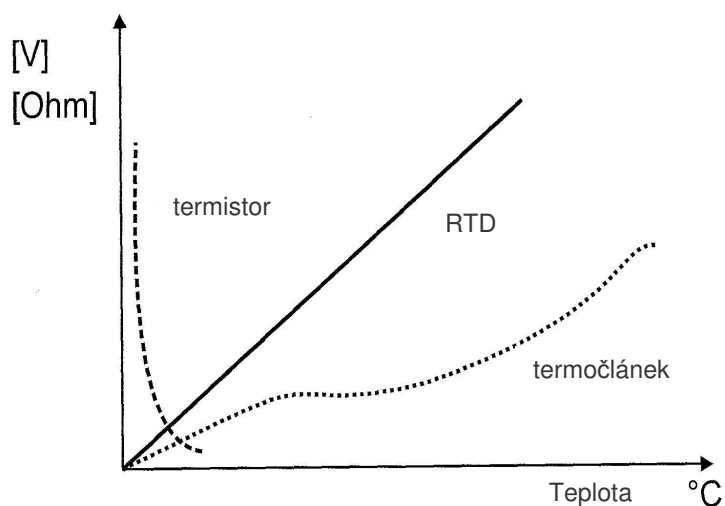
## 2.4 Odporové teploměry

Nejčastěji používaným teplotním senzorem je odporový měřič teploty Pt 100, který je založen na změně odporu Pt materiálu s teplotou. Měřicí rozsah je definován standardem DIN EN 60751. Existují dva druhy platinových čidel: v prvním z nich je platinový drátek stočený do tvaru cívky, zatímco v druhém z nich je platina použita jako povrchová vrstva na tenkém filmu. U prvního modelu je měřicí rozsah od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , u druhého je rozsah mezi  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Při výrobě teploměrů jsou snímací prvky zabudovány do měřicích vložek (insetů) – tenkých trubiček s vnitřním průměrem pouhých 3 až 6 mm, uvnitř nichž jsou dráty propojující senzor s kontakty. K nim lze připojit prvek přímou nebo nepřímou metodou. U přímé metody jsou kontakty svařeny s dráty a na prvek se nasadí kovová hlavice, k níž je poté navařena trubice. Při nepřímé metodě je prvek vložen do materiálu chránícího drátek tak, aby kontakty přesně doléhaly na konce drátků. Všechny výrobní operace jsou prováděny ručně a vyžadují velkou přesnost. Následně je nutné kontrolovat každý senzor, aby byla jistota, že vlastní měřicí prvek je řádně namontován a nebyl poškozen během montáže. Proto se každé jednotlivé čidlo testuje v ledové lázni, aby se před expedicí ověřila hodnota jeho nulového bodu. K zajištění kvality vody s přesně definovaným bodem tuhnutí je využívána interní demineralizační jednotka.



Obr.1 Poměrný elektrický odpor různých materiálů používaných jako odporové teploměry (Nikl, Měď, Platina)



Obr.2 Závislost odporu na teplotě (NTC (negative temperature coefficient), PTC (positive temperature coefficient), RTD (resistance temperature detector's))

## 2.5 Digitální teploměry

U přístrojů zvaných digitální teploměry výrobci využívají dvě základní skupiny principiálně různých snímačů teploty. Buď různé typy termočlánků (např. typy K, J, L, N, B, R, U, T), nebo odporové snímače platinové (např. Pt100) nebo niklové (např. Ni100), popř. termistory.

Při výběru konkrétního snímače je třeba dávat pozor na rozměry a provedení citlivého konce tohoto snímače. Je zřejmé, že při použití robustního snímače bude doba potřebná na změření teploty mnohem delší než při použití snímače s tenkým koncem. Rovněž je zapotřebí si dát pozor na použitý přístroj, tj. jednotku s elektronikou, protože na dobu měření nemají vliv jen vlastnosti snímače, ale i rychlost, s jakou reaguje elektronika. Levnější přístroje mohou být velice pomalé právě z důvodu nedokonalé elektroniky, která signál ze snímače nezpracuje okamžitě, ale jejíž výstupní údaj se blíží k jeho aktuální hodnotě měřicího signálu pomalu krok za krokem. Standardní dobrá měřicí souprava digitálního teploměru s vnějším snímačem zpravidla potřebuje k dosažení 90 % skutečné měřené teploty dobu asi 3 s.

## 2.6 Infrateploměry

Infrateploměry využívají k měření tzv. infrasnímače, které bezkontaktně snímají infračervené záření vyzařované z určité plochy na povrchu měřeného materiálu. Velikost této (většinou kruhové) plochy je závislá na zabudované optice přístroje. Po zpracování přijatého záření infrateploměry na svém displeji číslicově zobrazují průměrnou teplotu měřené plochy. Infrateploměry jsou velmi rychlé měřicí přístroje, schopné reagovat během několika desetin sekundy. Výborně fungují při měření teploty materiálů, jako je dřevo, plast, pryž, zdivo, natřené kovy atd. Mají však i své stinné stránky, a to při měření teploty kovů s lesklým povrchem, kdy je třeba před měřením nastavit tzv. emisní číslo (emisivitu) konkrétního materiálu. Jestliže se tato hodnota nastaví špatně, může při měření vzniknout chyba o velikosti až několika desítek kelvinů.

## 2.7 Termokamery

Pro termokamery platí v podstatě totéž co pro levnější infrateploměry. Hlavní rozdíl je v tom, že v termokamerách se k měření používají mnohobodové detektory infračerveného záření, které umožňují na displeji přístroje i následně, s použitím softwaru a počítače, zobrazit celé teplotní pole v tzv. termogramech (většinou barevných obrázcích). Každý bod obrázku má přiřazenu jednu konkrétní teplotu. Termokamery jsou sice nejnákladnější, ale výsledek jejich použití velice dobrý. Prostřednictvím termokamery lze opravdu pouhým okem vidět rozložení teplot na povrchu materiálu a velmi jednoduchou formou měření se rychle dostat podstaty problému, která by zpravidla byla jen obtížně odhalitelná při měření samotnými klasickými digitálními teploměry nebo infrateploměry.

### **Další oblasti použití a dostupnost přístrojů**

K měření teploty kapalin se v současné době stále používají buď klasické rtuťové teploměry nebo, stejně jako při měření teploty pevných materiálů, digitální teploměry se snímačem, infrateploměry a termokamery. K měření teploty plynů lze použít rtuťové teploměry nebo digitální teploměry se snímačem. Infrateploměry ani termokamery pro tento typ měření nelze použít. Všechny uvedené kategorie měřících přístrojů se podle provedení dále dělí na ruční a stacionární s ohledem na jejich určení k provozním měřením při výrobě, ke kontrolním účelům nebo pro oblast vývoje a výzkumu.

### 3. Termočlánky

#### 3.1 Uvod

Termočlánek je zdroj elektrického proudu, používaný především jako čidlo teploty. Využívá principu termoelektrického jevu. Může být také používán jako spolehlivý zdroj elektrického proudu, ale jeho energetická účinnost a výkon jsou malé. Termoelektrické teploměry využívají k měření teploty termoelektrické články. Patří mezi kontaktní snímače používané k dálkovému měření teploty a jejich čidlo (termoelektrický článek) převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického napětí.

Termoelektrický článek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů A a B, které mají srovnávací a pevný konec. Na konci srovnávacího vedení je připojen milivoltmetr. Termoelektrické napětí závisí na rozdílu teplot měřených míst a na druhu použitých kovů pro termočlánek. Jestliže teplota jednoho spoje  $J_m$  bude různá od teploty druhého spoje  $J_o$ , vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. V zjednodušené formě můžeme závislost termoelektrického napětí na teplotě vyjádřit lineárním vztahem kde  $AB$  je koeficient závislý na materiálech použitých kovů, přičemž platí, že  $AB = -BA$ .

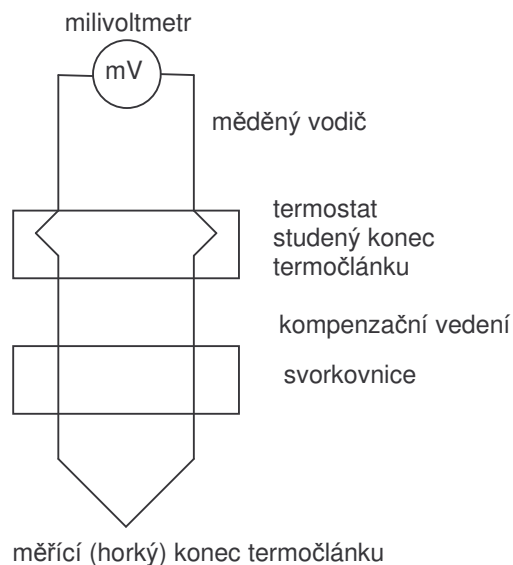
#### 3.2 Materialy

Materiál na výrobu termoelektrických článků musí vykazovat stabilní údaje při dlouhodobém provozu a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům. Často se používají ve spojení se zapisovacím zařízením. Termočlánky, tzn. vhodné dvojice materiálů, jsou normalizovány včetně písmenného a barevného označení - např.: K (niklchrom ~ nikl-hliník / žlutá), T (měď ~ konstantan / oranžová), J (železo ~ měď-nikl / černá), E (chromel~konstantan / hnědá), R (platin-arhodium~platina / zelená). V průmyslu je nejrozšířenější termočlánek typu J (železo~měď-nikl) pro rozsah teplot od -200 do +600 °C. Pro vyšší teploty se používá termoelektrický článek typu K (niklchrom~nikl-hliník) v rozsahu od -50 do 1 000 °C. Termoelektrický článek typu S (platin-arhodium~platina) se používá v rozsahu od 0 do +1 300 °C. Každý termočlánek je nutné při měření chránit. Nejčastěji se používá keramická ochrana (korund) a dále je obalen ochranným pláštěm z kovu NiCr nebo Ni. Termočlánek používaný pro provozní měření by měl být pravidelně kontrolován v intervalu 1 až 1,5 roku. V některých případech je zapotřebí umožnit výměnu termočláneku i během provozu technologického zařízení. Pro zjištění stavu termočlánekového snímače lze s

výhodou využít měření jeho elektrického odporu. Nízká hodnota odporu obecně indikuje uspokojivý stav, zatímco vysoký odpor může signalizovat konec životnosti termočlátku. V současné době se doporučuje používat termočlátky dle normy IEC 584-1, respektive ČSN IEC 584-1, nebo EN 60584-1. Tato norma obsahuje tabulky základních hodnot termoelektrického napětí jednotlivých termočlátků a polynomy pro výpočet jejich charakteristik.

### **3.3 Měření teploty termočlátky**

Při měření teplot fázových přeměn se pro měření teploty používají nejčastěji termočlátky. Aktivní konec termočlátku se nazývá horký (měřící). Druhý konec termočlátku (studený) je nutné udržovat na stálé teplotě. Výsledné termoelektrické napětí je dáno rozdílem napětí na horkém a studeném konci. V případě udržování studeného konce na konstantní teplotě bude výsledné termoelektrické napětí úměrné pouze teplotě na měřícím konci. Teplota studeného konce termočlátku bývá obvykle udržována na 0°C, 20°C, 25°C, případně 50°C a to vhodným termostatem nebo elektronicky. Protože se často používají termočlátky z drahých kovů a bývá obvyklé měřit teploty "na dlouhou vzdálenost" od místa kde se měření vyhodnocuje, je nutné nahradit část drahých termočlátkových materiálů levnějšími. Od svorkovnice až k termostatu je vloženo tzv. kompenzační vedení. Na cestě od svorkovnice až k termostatu dlouhé někdy desítky metrů však nebývá konstantní teplota. Aby výsledné termoelektrické napětí termočlátku nebylo ovlivněno kolísáním teploty kompenzačního vedení je nutné, aby termoelektrické chování materiálu kompenzačního vedení bylo zhruba do teploty 100°C (za předpokladu, že po celé délce kompenzačního vedení nedojde k překročení této teploty) shodné s materiálem termočlátku.

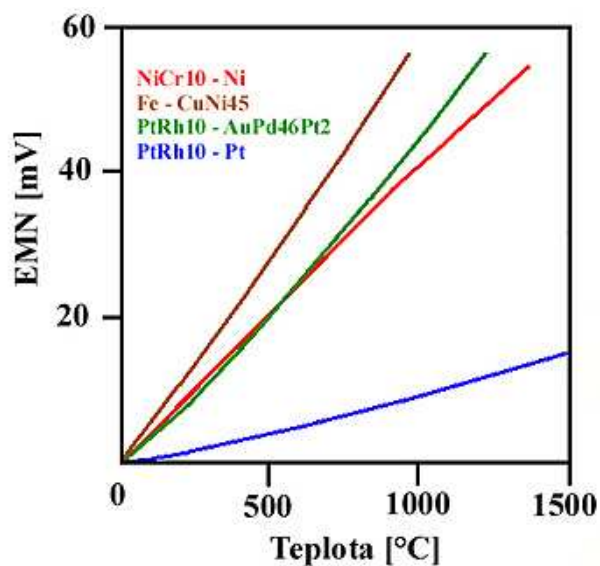


Obr.3 Schéma zapojení termočlátku

Závislost termoelektrického napětí termočlátku však není lineární, obecně jí lze vyjádřit polynomickým rozvojem, a proto se jako termočláanky vybírají ty dvojice materiálů, které:

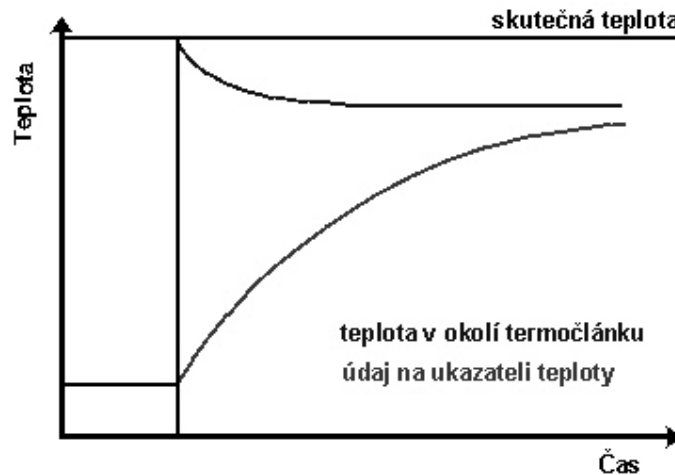
- mají závislost termoelektrického napětí na teplotě v daném intervalu teplot co nejlineárnější
- mají co nejvyšší termoelektrické napětí
- jsou fyzikálně stabilní a odolné v daném pracovním prostředí
- dají se zpracovat na drát potřebných rozměrů

Obr.4 ukazuje závislost termoelektrického napětí na teplotě u nejběžněji využívaných termočláneků. Vyplyvá z něj například, že nejlineárnějším průběhem se vyznačuje termočlánek NiCr10-Ni, nejvyšší termoelektrické napětí poskytuje termočlánek Fe-CuNi45, ale lze ho použít jen při nízkých teplotách. Termočlánek PtRh10-Pt poskytuje sice nejnižší termoelektrické napětí (k měření je nutné používat citlivější milivoltmetry), zato je však chemicky stabilní (neoxiduje se) a proto je použitelný i při vysokých teplotách.



Obr.4 Přehled vybraných termočlánků

Vzhledem k vedení tepla má být termočlánek co nejtenčí. Tloušťka termočlánekových drátů je však omezena jejich trvanlivostí - u ušlechtilých kovů bývá průměr drátů 0,1-0,6 mm, u neušlechtilých kovů 0,5-4,0 mm. S ohledem na vedení tepla má být také vhodně upravena délka termočlánu. Vodivé spojení (svar) měrného konce musí být provedeno pečlivě, protože na něm závisí kvalita vyrobeného termočlánu. Proti mechanickému a chemickému poškození je nutné termočlánek chránit keramickým nebo kovovým obalem, což má však za následek pomalejší odezvu termočlánu na změny teploty. Schematické znázornění chyb při měření termočlánekem je na obr. 5. Po vložení termočlánu do místa měření dojde díky odvodu tepla termočlánekem k poklesu teploty v daném místě (modrá čára). Po vložení termočlánu do měřeného místa postupně dochází k jeho ohřevu z laboratorní teploty. Skutečné teplotě se také postupně přibližuje také údaj na ukazateli teploty (červená čára). Každý termočlánek je nutné cejchovat. To se provádí buď kontrolním měřením teplot fázových přeměn různých čistých kovů nebo některých sloučenin. Dále následuje uvedena stručná charakteristika vybraných termočlánu.



Obr.5 Znárodnění chyb při měření termočlánkem

### **Termočlánek PtRh10 (platin-arhodium) – Pt**

Je nejčastěji používaným termočlánkem. Je vysoce stálý. Dlouhodobě se používá do 1300°C, krátkodobě až do 1600°C. Produkuje nízké termoelektrické napětí, proto vyžaduje citlivější zařízení pro přesné měření, které nelze používat v provozním měřítku. Používá se jako laboratorní termočlánek nebo k cejchování jiných termočlánků.

### **Termočlánek NiCr10 (nikl-chrom) – Ni**

Je nejčastěji používaným termočlánkem v průmyslu. Je levný, produkuje relativně vysoké termoelektrické napětí, a proto je možné použití méně citlivých přístrojů pro jeho měření. Trvale se používá do 900°C, krátkodobě až do 1200°C. Při teplotách nad 800°C dochází v důsledku oxidace k trvalému zvýšení termoelektrického napětí asi o 1-2 % pro teploty 200 - 400°C.

### **Termočlánek Fe-CuNi45 (konstantan)**

Tento termočlánek se v průmyslu rovněž velmi často používá, je ho však možno použít pouze do teploty 600°C. Termoelektrické napětí je jen o málo větší než u termočlánku NiCr10 - Ni.

## 4. Optovláknové snímače teploty

### 4.1 Uvod

V praxi existují případy kdy nelze pro měření teploty použít "standardní metody", jako např. měření ve výbušných a snadno vznětlivých prostředích elektráren. Pak přichází na řadu optika - optovláknové senzory teploty, jejichž princip je založen na změně šíření světla vláknem nebo jeho odrazu na konci vlákna.

V praxi existuje několik druhů aplikací vyžadující měření teploty, kde neprakticky nebo z legislativních důvodů nelze použít obvykle používané senzory teploty pracující na principu převodu teploty na změnu elektrické veličiny (napětí, proud), jako jsou například odporové senzory teploty (termistor, Pt100, Ni1000), termočlánky nebo polovodičové senzory s PN přechodem. Pokud to podmínky a vyžadované parametry měření dovolují, mohou se nasadit bezkontaktní snímače teploty, které umožňují měřit teplotu vzdáleně, mimo nebezpečnou oblast. Jenže takové senzory potřebují opticky průchozí prostředí s přímou viditelností na měřený objekt a navíc měří teplotu jen na povrchu objektu a ne například v jeho nitru. Tedy pro tyto aplikace, kde nelze využít ani jednu z výše uvedených typů teploměrů, se může využít optovláknových senzorů teploty.

Optovláknové senzory teploty využívají, jak název napovídá, světla a jeho šíření v optických vláknech. V obecném pohledu jde v tomto případě vlastně o kombinaci obou "klasických" principů. Využívá se k měření teploty světlo, které je bezpečné pro použití v nebezpečných prostorách a navíc je konkrétně vymezena jeho oblast působení a jeho vedení prostřednictvím optického kabelu. V tomto směru existuje několik využívaných principů založených buď na změně odrazu světla s teplotou na konci optického vlákna, nebo změně vlastností šíření světla určitým úsekem samotného optického kabelu.

### 4.2 Použití

- Měření teploty v jakkoliv nebezpečných prostředích - např. atomová elektrárna
- Měření teploty ve výbušných a vznětlivých prostředích - např. uhelné elektrárny a teplárny
- Plošné měření teploty uhlí - ochrana proti samovznícení
- Měření teploty v prostředí se zemním plynem

- Měření na velké vzdálenosti od vyhodnocovací elektroniky stovky metrů až kilometry
- Monitorování teploty mechanických částí strojů, např. letadel
- Měření teploty proudových motorů
- Měření teploty při indukčním ohřevu

### 4.3 Princip optovláknových senzorů teploty

Základním principem uvedených senzorů je změna některé z vlastností světla, vysílaného zdrojem záření do optického vlákna, vlivem působící změny teploty v měřeném místě. Měněna může být amplituda světla, jeho fáze, vlnová délka a tím i spektrum světla, nebo časové zpoždění vysílaných impulsů.

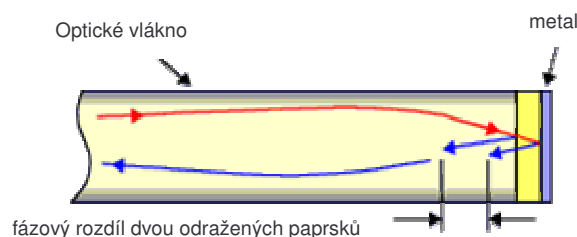
### 4.4 Parametry vysílaného světla

se mohou měnit dvěma základními způsoby přímou změnou parametrů optického vlákna vlivem změny teploty ( viz. obr.6 ) .

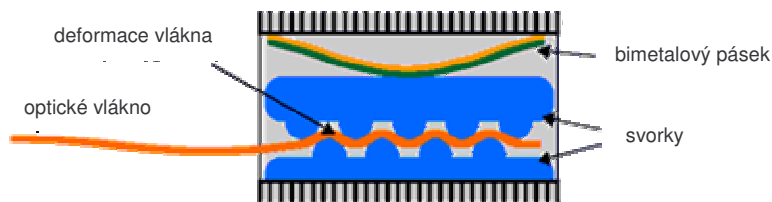
- využívá se zde jinak parazitních vlastností vláken, jako např. disperze, optický útlum, změna rychlosti šíření světla - vhodné pro plošné měření teploty

nepřímo změnou vlastností materiálu na konci optického vlákna ( viz. obr.7 ).

- nejčastěji se zde využívá změny odrazu nebo rozptylu světla na odrazné plošce na konci optického kabelu; optický kabel se tedy využívá jen vodič světla - vhodné pro bodové místní měření teploty



Obr.6 Princip změny fáze světla prostřednictvím změny různého odrazu složek světla



*Obr.7 Změna amplitudy procházejícího světla prostřednictvím změny útlumu vlákna vlivem změny teploty*

Obr. 6 ( změna amplitudy procházejícího světla prostřednictvím změny útlumu vlákna vlivem změny teploty ) znázorňuje princip klasické koncepce optovláknových senzorů teploty se změnou odrazu světla na konci vlákna. Buď se využívá již přímo změny samotné odrazné plochy, reflektoru, který v rostoucí nebo klesající teplotou mění svojí schopnost odrážet nebo pohlcovat celé nebo část spektra příchozího světla, nebo reflektor má stále stejné vlastnosti, ale je mu předřazen materiál se s měnící se propustností (transparentností). V prvním případě se vyhodnocuje změna amplitudy odraženého světla, případně jeho některých složek, tzn. vyhodnocuje se spektrum. V druhém případě s nejčastěji vyhodnocuje změna fáze odraženého světla, zpoždění impulsu nebo interference způsobené složení složky světla odražené již teplotně citlivým materiálem a složky odražené pevným reflektorem. Obr. 7 ( změna amplitudy procházejícího světla prostřednictvím změny útlumu vlákna vlivem změny teploty ) pak ukazuje jednu z mnoha možností plošného měření teploty vlivem změny deformace optického vlákna. Zde konkrétně bimetalový proužek reaguje na změnu teploty prohnutím a tím různým stlačením čelistí. Ty mezi sebou deformují optické vlákno, kde vzniklé mikroohyby způsobují zvýšení útlumu světla tohoto úseku. Mimo to se v praxi ještě využívá závislosti útlumu, rychlosti šíření světla a disperze optického vlákna na teplotě. Tyto principy lze nalézt v případě plošného měření teploty, např. uvnitř hromady uhlí.

## Zhodnocení

Optovláknové senzory teploty sice nejsou nijak masově rozšířené, hlavně z důvodu vysoké ceny, ale umožňují realizovat měření teploty i tam, kde jiné běžnější principy měření teploty selhávají nebo nejdou z principu nebo z bezpečnostních důvodů použít. Jde i o zajímavá použití optických kabelů i jiným způsobem než jen pro přenos dat a vytváření komunikačních sítí.

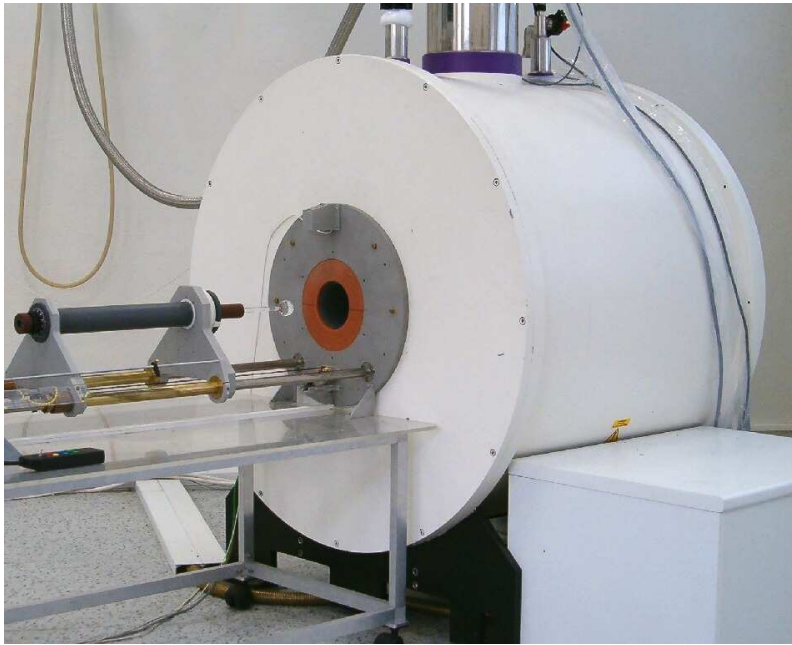
## 5. Praktická část

### 5.1 Úvod

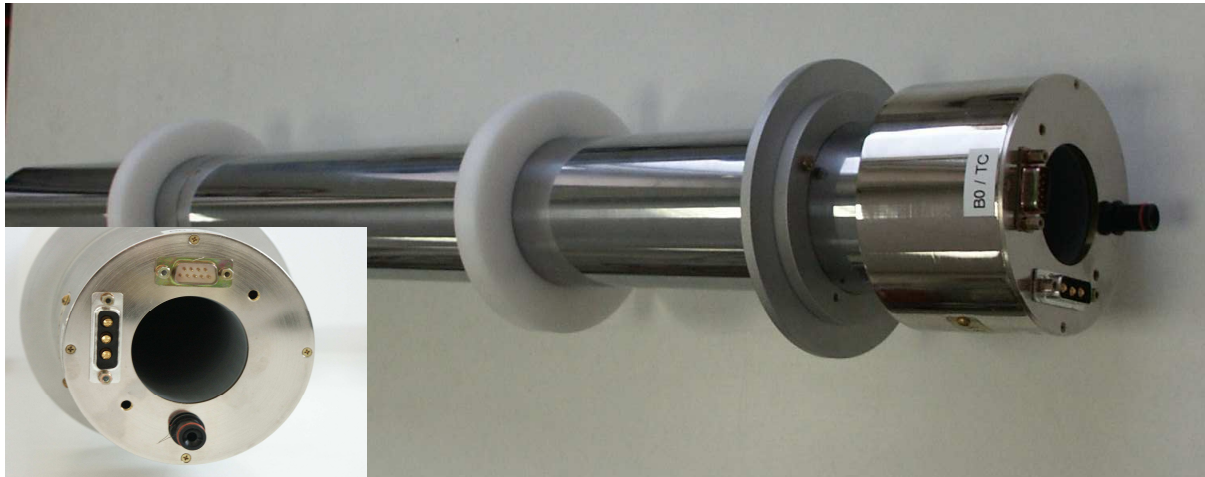
Celý teplotní systém je vytvořen výhradně pro potřebu MR tomografu, který vidíme na obr. 8 a obr. 9. Při zkoumání různých vzorků v tomto tomografu je potřeba v prostoru vzorku stabilizovat a regulovat teplotu a právě proto byl zhotoven tento teplotní systém. Teplotní systém je založen na principu ohřevu ( topná spirála ) a regulace ( teplotní kontrolér ) teploty vzduchu vháněného do prostoru vzorku za pomoci tlakového vzduchu v místnosti laboratoře. Prostor vzorku je vidět na obr. 10, který ukazuje gradientní cívku.



*Obr. 8 MR tomograf*



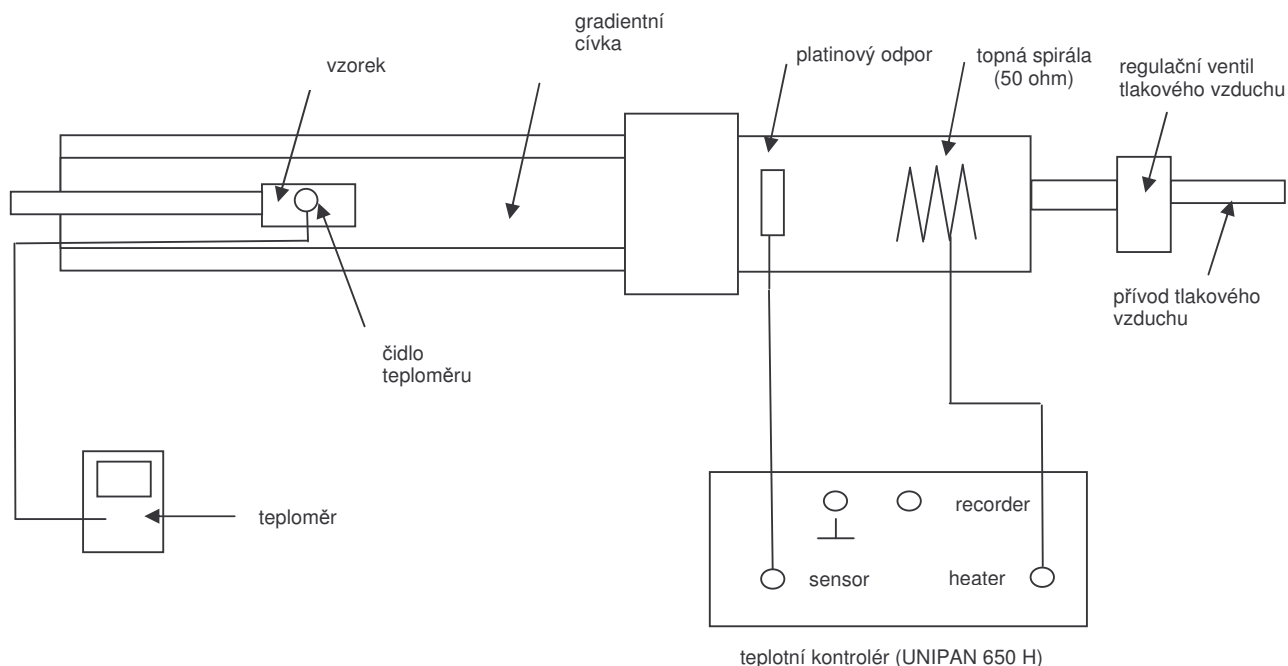
*Obr. 9 MR tomograf - v levé části obrázku vidíme upevněný vzorek na posuvu, který nám vzorek přesně zasune do prostoru cívek kde se měří.*



*Obr.10 Gradientní cívka pro MR tomograf – v detailu přední části je uprostřed vidět prostor ve kterém se má teplota stabilizovat a regulovat. Na toto čelo bude teplotní systém upevněn.*

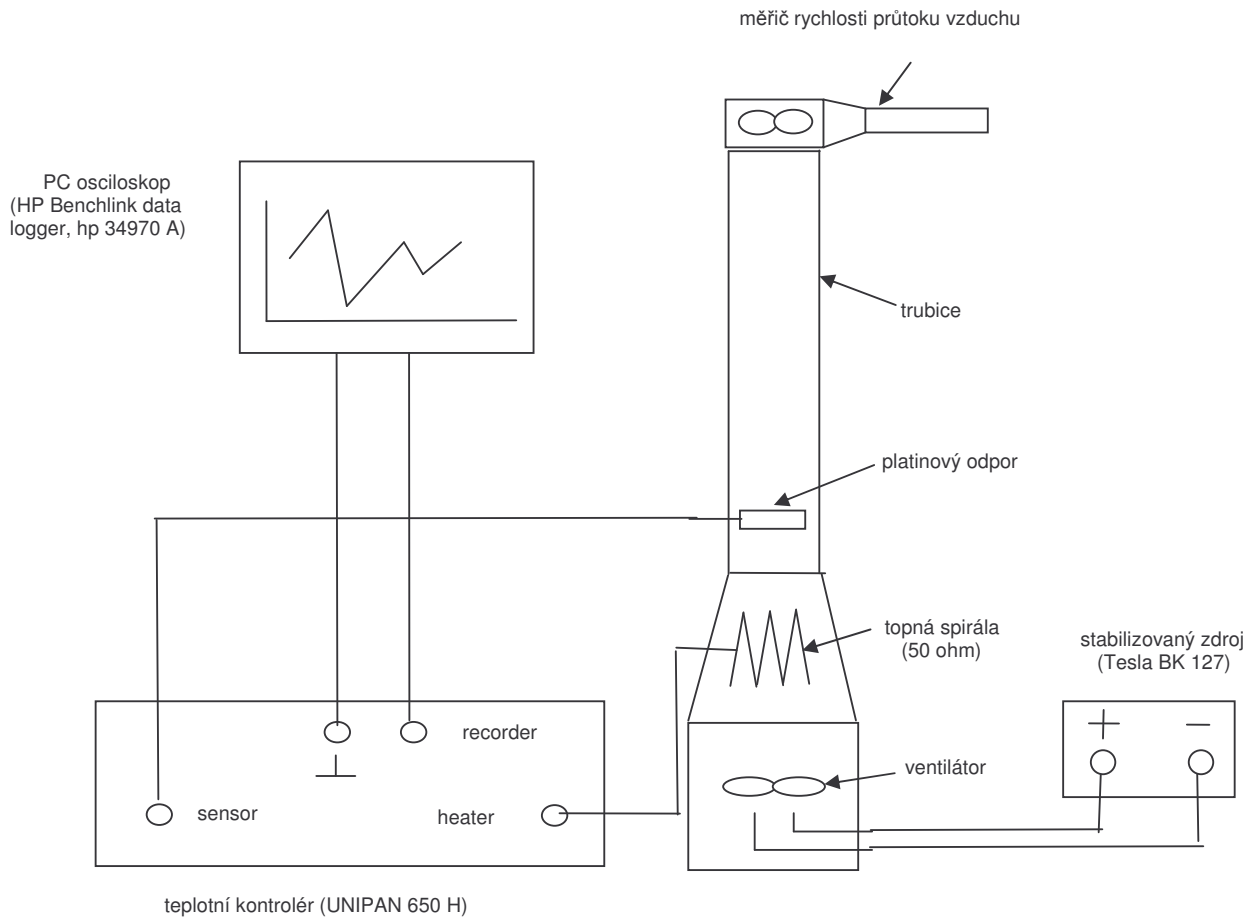
## 5.2 Blokové schéma teplotního systému

Obr. 11 ukazuje teplotní systém s gradientní cívkou. V levé části je měřený vzorek umístěný v gradientní cívce u kterého je čidlo teploměru, který kontroluje teplotu v místě vzorku. Na čelo gradientní cívky je upevněno víko s platinovým odporem a topnou spirálou, která ohřívá vzduch. Na toto víko je pak připevněn přívod tlakového vzduchu z místnosti, který je opatřen regulačním ventilem pro nastavení rychlosti průtoku vzduchu.



Obr.11 blokové schéma teplotního systému pro gradientní cívku

Z důvodu zjištění chování navrženého teplotního systému, jsem vytvořil experimentální laboratorní zapojení, které vidíme na obr.12. V laboratorním zapojení je oproti skutečnému zapojení přímo na MR tomograf nahrazen rozvod tlakového vzduchu ventilátorem. Proto je i přidán měřič rychlosti průtoku vzduchu, pro budoucí nastavení tlakového vzduchu. Hlavním jádrem systému je teplotní kontrolér ( UNIPAN typ 650H ), který nám umožňuje nastavovat teplotu a při změnách teploty měnit proporcionální, integrační a derivační složku. Tyto proměnné složky nám umožňují měnit průběh nastavení a ustálení teploty. Poslední proměnnou složkou tohoto systému je nastavení rychlosti průtoku vzduchu, které bude zajištěno regulačním ventilem v rozvodu tlakového vzduchu. Vháněný vzduch se ohřívá topným drátem, který je napájen z teplotního kontroléru ( maximální napětí je 50V proud 3 A což umožňuje maximální výkon 150W z výstupu „heater“ ). Samotný topný drát je opatřen bimetalovou ochranou, která rozpojí obvod topení v případě přehřátí. Další částí je platinový odpor, který je napojen také na teplotní kontrolér ( svorka „sensor“ ). Platinový odpor mění svou hodnotu odporu se změnou teploty a podle této změny teplotní kontrolér stabilizuje a ustaluje teplotu na požadovanou.



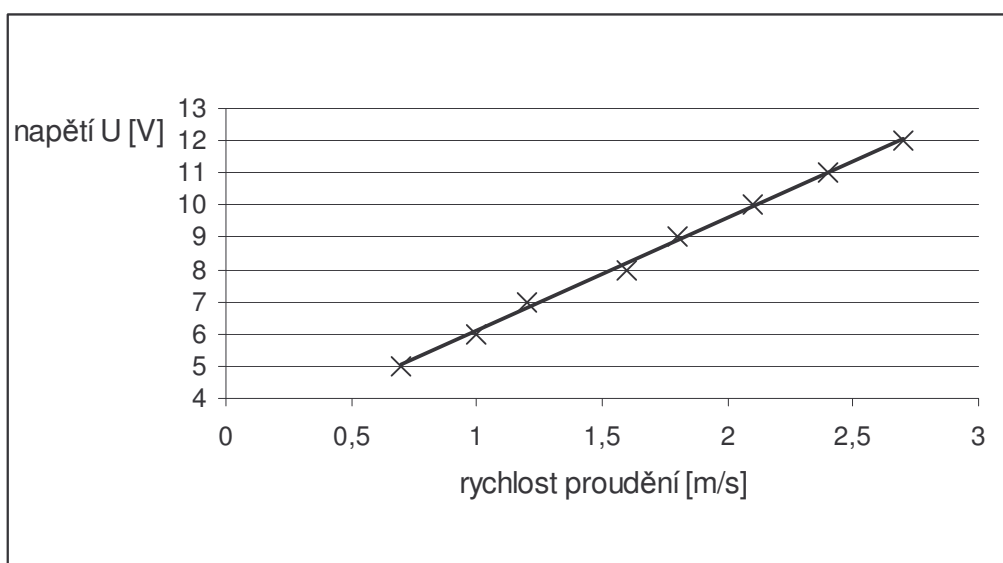
Obr.12 blokové schéma laboratorního zapojení teplotního systému

### 5.3 Měření rychlosti průtoku vzduchu

Měření rychlosti průtoku vzduchu v závislosti na napětí elektromotorku ventilátoru. Z důvodu možnosti nastavení rychlosti průtoku tlakového vzduchu v místnosti s MR tomografem při laboratorním zapojení je tento tlakový vzduch nahrazen ventilátorem a měříme rychlost průtoku pro budoucí nastavení. Měřící přístroj pracuje na jednoduchém systému vrtulky umístěné v proudu vzduchu. Přístroj je ocejchován a převádí rychlost otáčení vrtulky na údaj rychlosti vzduchu v metrech za sekundu, který zobrazuje na displeji. V tab.1 jsou hodnoty napájecího napětí elektromotorku a k nim odpovídající hodnoty průtoku vzduchu. Na obr. 12 je v grafu vidět lineární charakter závislosti napětí na rychlosti vzduchu.

Tab. 1 Měření rychlosti průtoku vzduchu v závislosti na napětí el. motorku ventilátoru

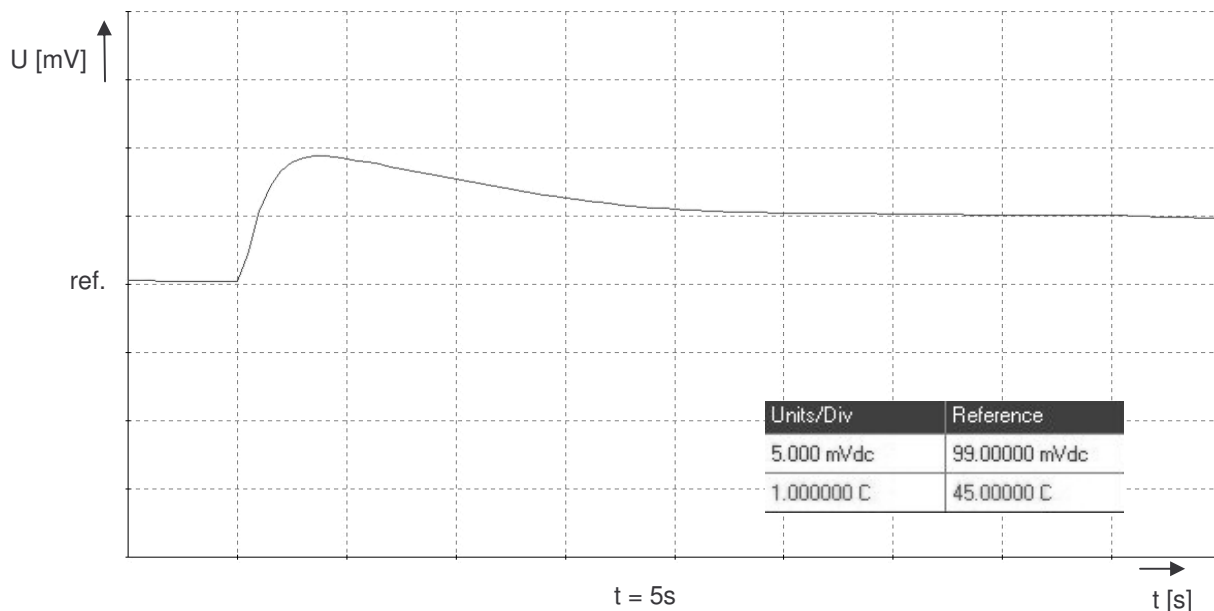
napětí U [V]	rychlost proudění [m/s]
min 5	0,7
6	1,0
7	1,2
8	1,6
9	1,8
10	2,1
11	2,4
max 12	2,7



Obr. 13 Měření rychlosti průtoku vzduchu v závislosti na napětí el. motorku ventilátoru

#### 5.4 Měření vlastností teplotního systému

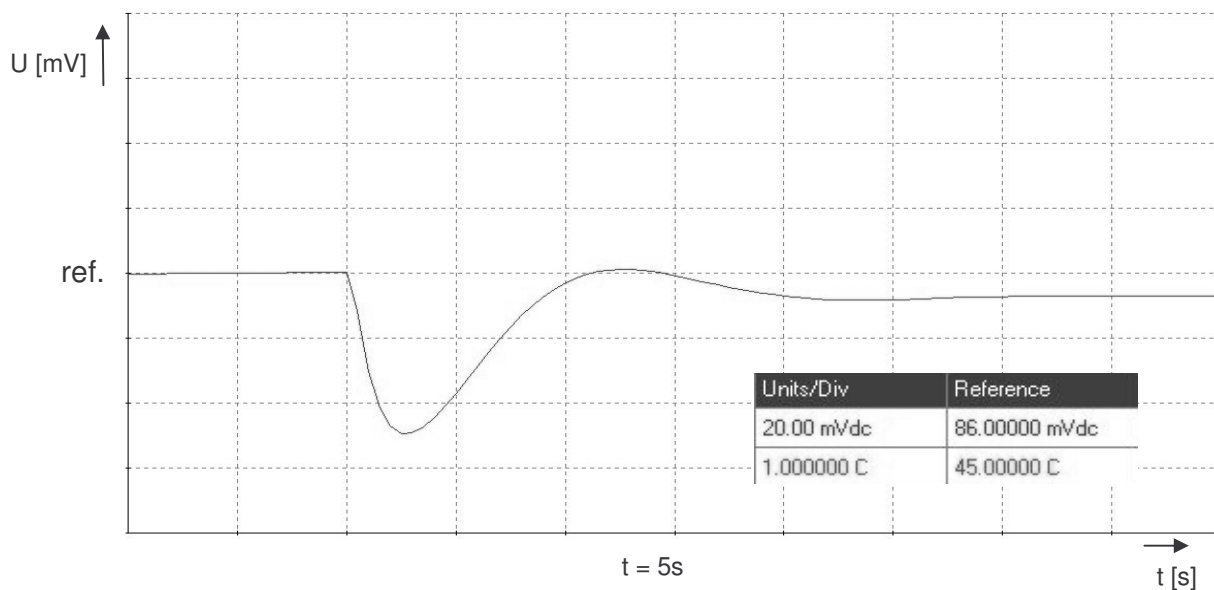
Grafy ukazují závislost odchylky skutečné od požadované teploty v závislosti na čase. Zobrazené grafy jsou z měření osciloskopu, který je připojen na svorku „recorder“. Tato svorka nám udává údaj o momentální odchylce teploty převedené na napětí v závislosti na čase. Grafy znázorňují chování systému při změnách teploty s nastavením různých hodnot proporcionální ( P ), integrační ( I ) a derivační ( D ) složky přístroje. Všechny znázorněné měření jsou provedeny s rychlostí průtoku vzduchu 1m/s což odpovídá napájecímu napětí elektromotorku ventilátoru 6V. Tato rychlost proudění vzduchu se po několika zkušebních měřeních ukázala jako nejvhodnější pro tento teplotní systém z důvodu výkonu topného drátu. Hodnoty integrační a derivační složky jsou uvedeny v minutách tak jak je ocejchována stupnice na přístroji. Teplota místnosti při měření byla 24,1 °C. Odchylka teploty je nastavena na  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( tato hodnota nám udává jen citlivost zobrazení ).



Obr. 14 Graf č. 1 skok z ustálené hodnoty 44°C na teplotu 45°C.

( $P = 0,1$ ,  $I = 0$ ,  $D = 0$ )

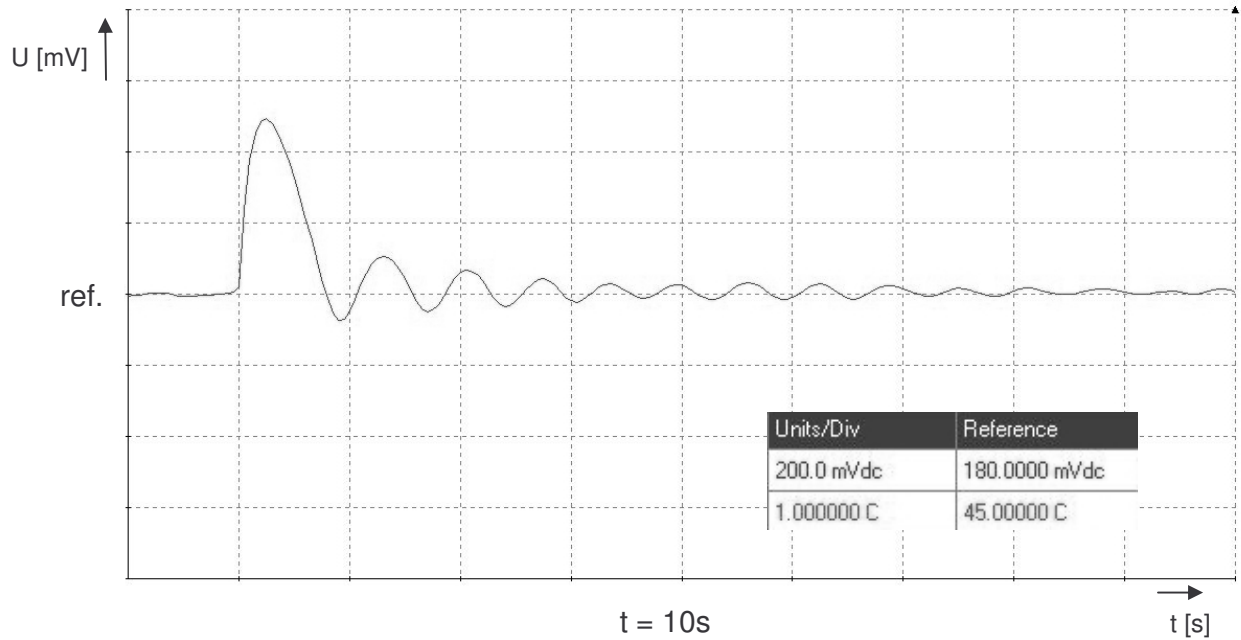
- při tomto měření je ukázáno jak se systém chová při vypnuté integrační i derivační složky a nastavené proporcionální složky na minimum. V případě malého zesílení a vypnuté integrační složky se nám teplota nedostane na požadovanou.



Obr. 15 Graf č. 2 skok z ustálené hodnoty 35°C na teplotu 34°C.

( $P = 0,6$ ,  $I = 0$ ,  $D = 0$ )

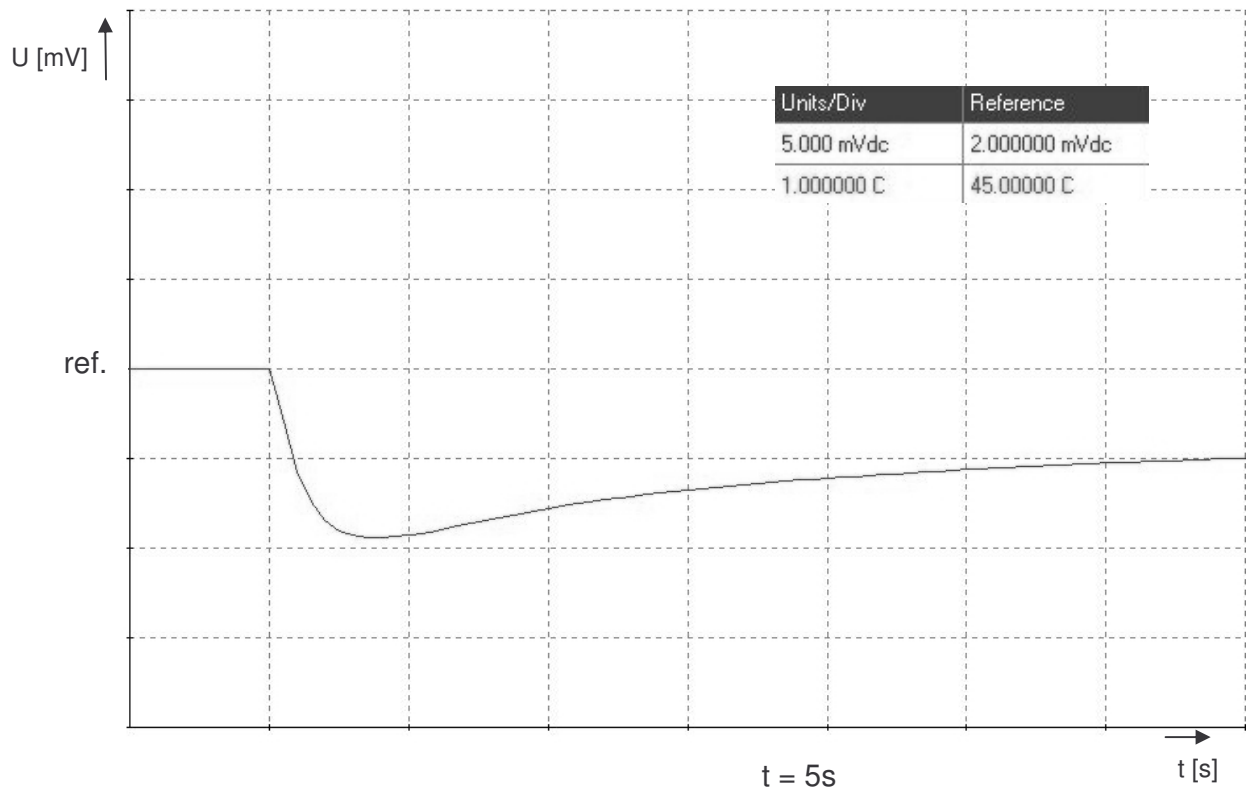
- na tomto grafu vidíme podobnou situaci, jako v předchozím případě, pouze jsme zvětšili zesílení na hodnotu 0,6. Křivka ukazuje, že při zvyšování zesílení teplota dosáhne požadované hodnoty avšak s neustálým charakterem.



Obr. 16 Graf č. 3 skok z ustálené hodnoty 44°C na teplotu 45°C.

( $P = 6,1$ ,  $I = 0$ ,  $D = 0$ )

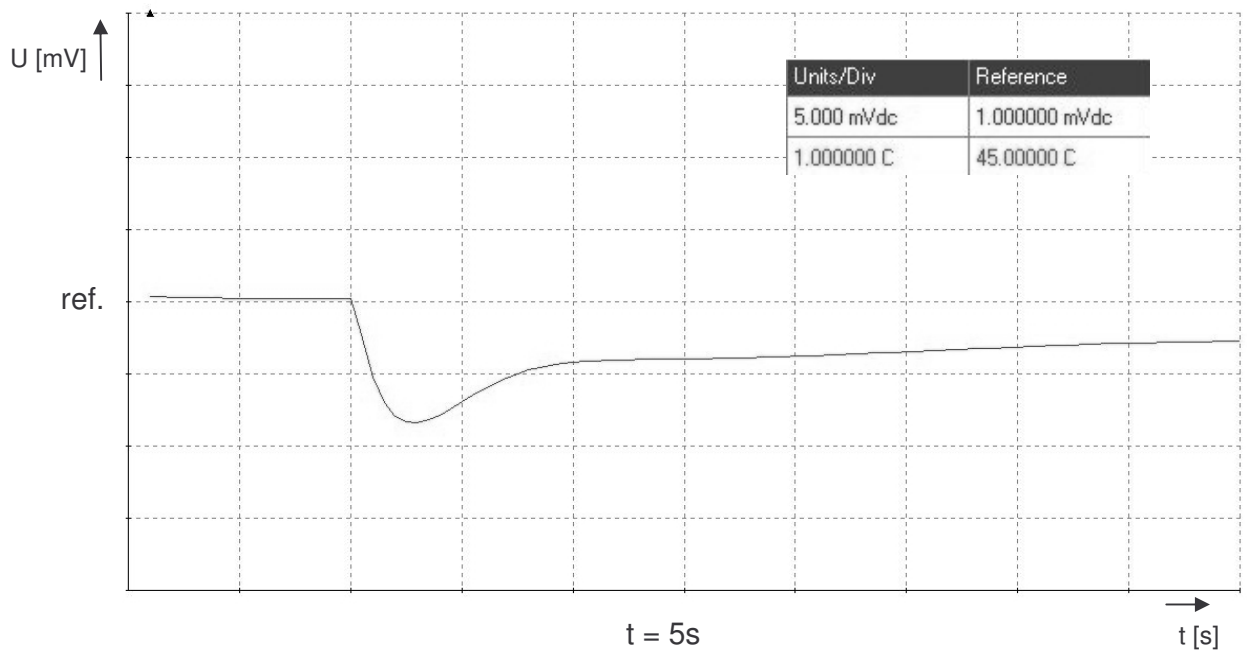
- při tomto měření je nastavena proporcionální složka na vysokou hodnotu. Při velkém zesílení se soustava rozkmitá, což je nežádoucí.



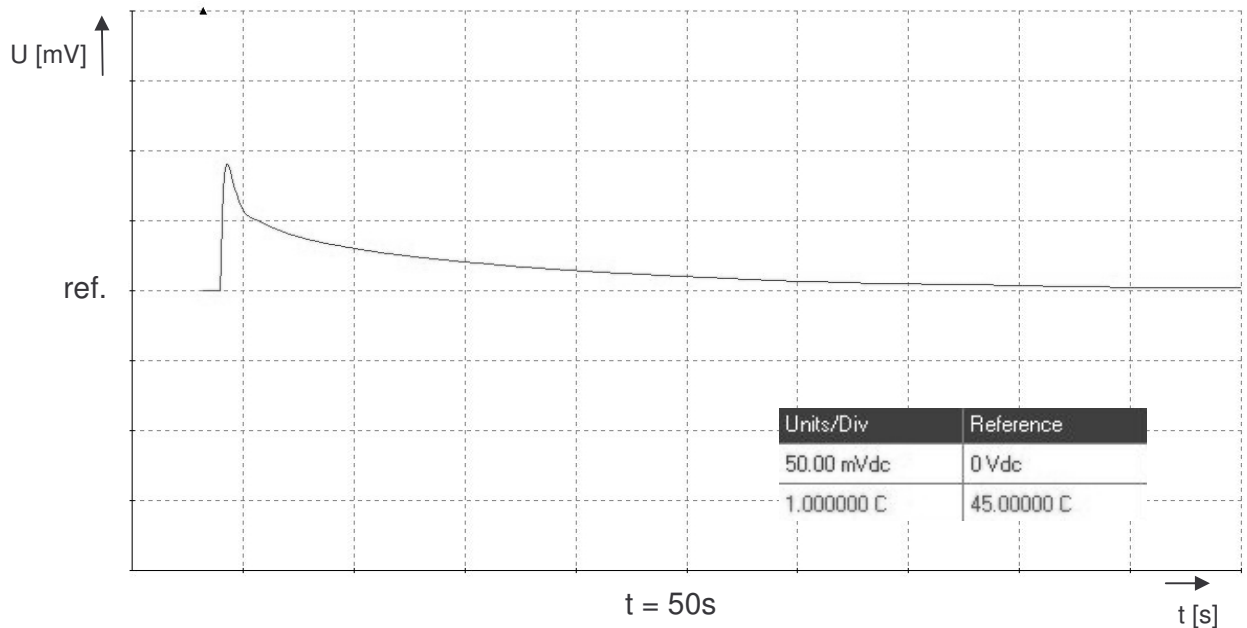
Obr. 17 Graf č. 4 skok z ustálené hodnoty 27°C na teplotu 26°C.

( $P = 0,1$ ,  $I = 1,2$ ,  $D = 0,2$ )

- při tomto měření jsou nastaveny proměnné složky na vhodnou kombinaci pro tento teplotní systém. Křivka ukazuje změnu teploty a její plynulé ustálení.

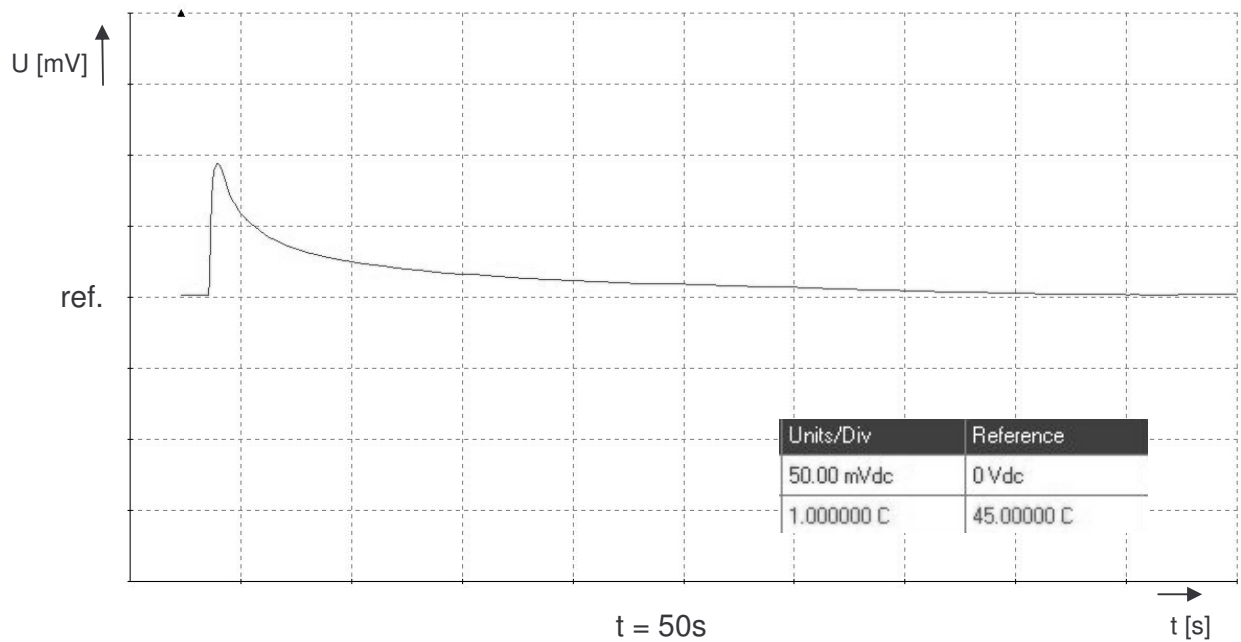


Obr. 18 Graf č. 5 skok z ustálené hodnoty 35°C na teplotu 34°C.  
( $P = 0,1$ ,  $I = 1,2$ ,  $D = 0,2$ )

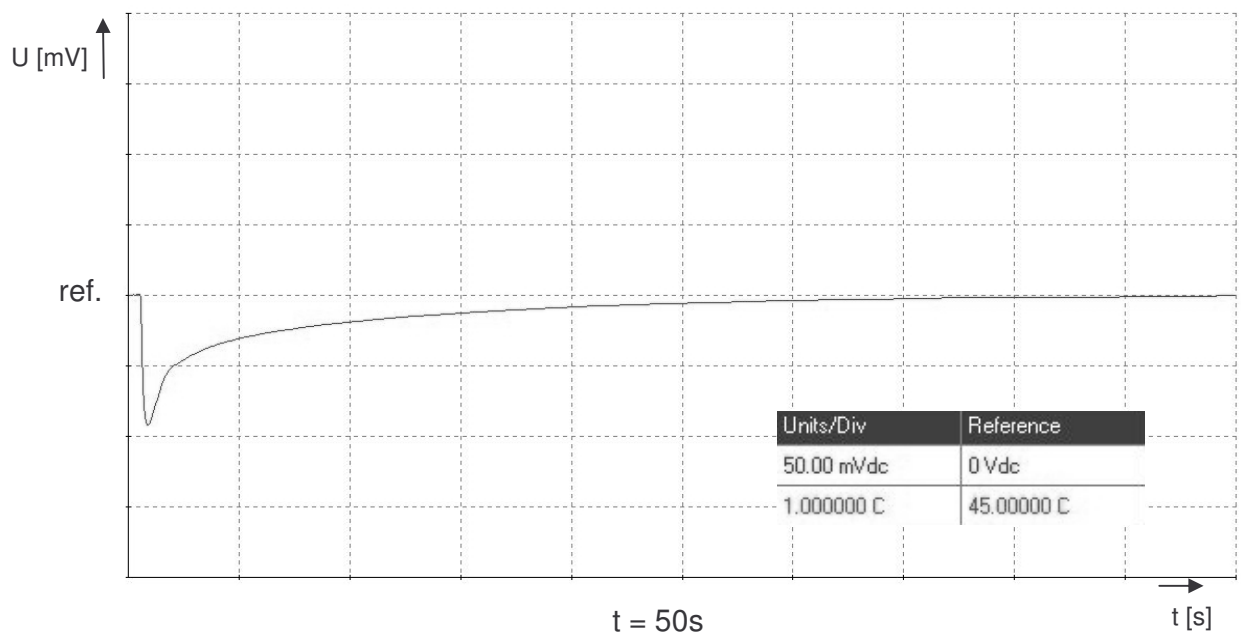


Obr. 19 Graf č. 7 skok (zvýšení o 10°C) z ustálené hodnoty 25°C na teplotu 35°C.  
( $P = 0,1$ ,  $I = 1,2$ ,  $D = 0,2$ )

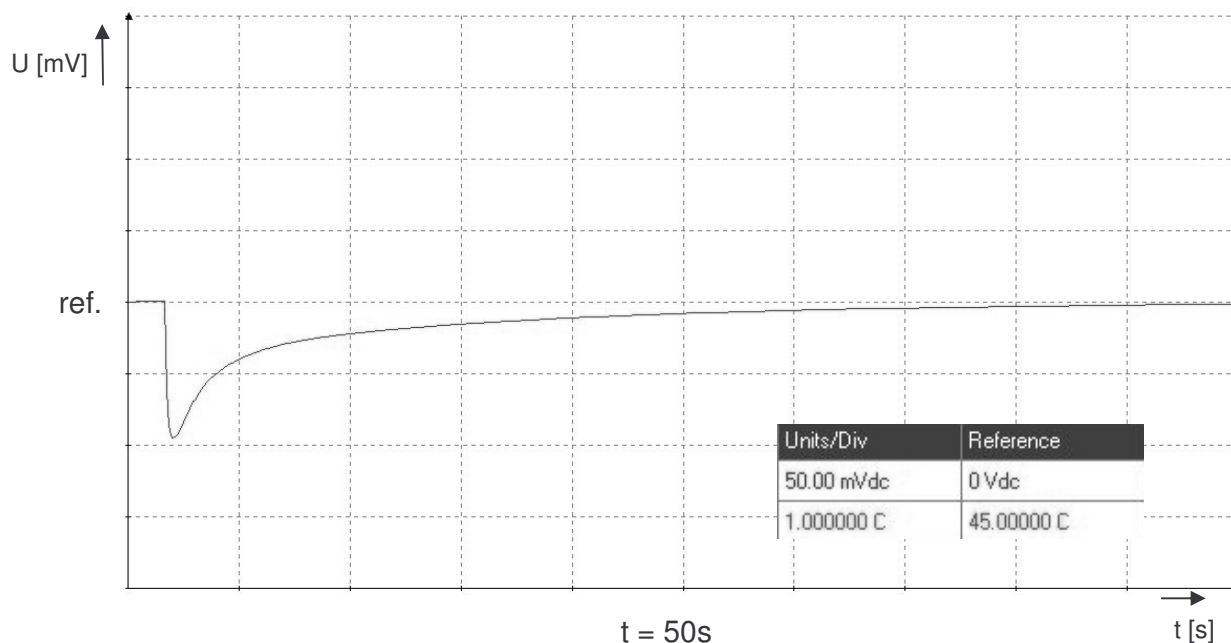
- v tomto měření je ukázáno chování teplotního systému při větší změně teploty skoku o 10°C. Křivka ukazuje vzrůst teploty a její ustálení na požadovanou hodnotu.



Obr. 20 Graf č. 8 skok ( zvýšení o  $10^{\circ}\text{C}$  ) z ustálené hodnoty  $35^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $45^{\circ}\text{C}$ .  
 (  $P = 0,1$  ,  $I = 1,2$  ,  $D = 0,2$  )



Obr. 21 Graf č. 9 skok ( pokles o  $10^{\circ}\text{C}$  ) z ustálené hodnoty  $45^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $35^{\circ}\text{C}$ .  
 (  $P = 0,1$  ,  $I = 1,2$  ,  $D = 0,2$  )



Obr. 22 Graf č. 10 skok (pokles o  $10^{\circ}\text{C}$ ) z ustálené hodnoty  $35^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $25^{\circ}\text{C}$ .  
 ( $P = 0,1$  ,  $I = 1,2$  ,  $D = 0,2$ )

### 5.5 Zhodnocení:

V grafech vidíme, jak se chová teplotní soustava při různých změnách, při změně o jeden stupeň ale i při změně o deset stupňů. Po mnoha zkušebních měřeních jsme našli vhodnou kombinaci všech proměnných (  $P$ ,  $I$ ,  $D$ , průtok vzduchu ), které je dobré nastavit při běžném používání teplotního systému, abychom dosáhli potřebné změny teploty a její ustálení v dostatečném časovém úseku. Získané hodnoty jsou  $P = 0,1$  ,  $I = 1,2$  ,  $D = 0,2$  a rychlost průtoku vzduchu nastavena na 1m/s. Všechny proměnné lze při potřebě specifického měření upravovat.

## 6. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval řešením teplotního systému pro konkrétní MR tomograf zjišťoval jsem výhody a nevýhody různých metod měření teploty její stability a regulace. Z důvodu rozměrové náročnosti prostoru kde se teplota má stabilizovat a regulovat jsem navrhl a prakticky zhotovil řešení tohoto systému, které jsem následně laboratorně odzkoušel. Také jsem se podrobněji seznámil s přístrojem Teplotní kontrolér type 650H s jehož pomocí jsem praktickou realizaci provedl. Provedl jsem s ním několik měření pro odzkoušení jeho vlastností a schopnosti regulace. Následně jsem pak provedl odzkoušení celého teplotního systému, jeho chování a vlastností při různých změnách teploty a také jsem našel vhodné nastavení všech proměnných tohoto systému při jeho běžném používání. Celá studie nám ukazuje možnosti řešení, vysvětluje zrealizovaný teplotní systém a možnosti jeho nastavení a použití.

## 7. Použitá literatura

- [1] Kříž R., Vávra P: Strojírenská příručka, Scientia, SNTL, Praha , 1992.
- [2] Dorazil E.: Nauka o materiálu I., přednášky 1989
- [3] Stephen Pople, Peter Whitehead: Přehled učiva Fyzika, Praha 1999
- [4] Ripka P., Típek A. – Master Book on Sensore
- [5] Pluhař a kol.: Nauka o materiálech, SNTL/ALFA Praha 1989
- [6] Časopis Elektro (04/2006)
- [7] UNIPAN Scientific Instruments, Temperature Controller type 650H, Instruction manual, Poland
- [8] Internet : <http://wikipedia.infostar.cz/>