



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**METROLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÝCH
TEPLOMĚRŮ**

METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL THERMOMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Telecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Vdoleček, CSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Jakub Telecký**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. František Vdoleček, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metrologické charakteristiky elektrických teploměrů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teplota je jednou z nejčastěji měřených veličin každodenní praxe. Pro její sledování jsou často využívány elektrické teploměry, u nichž nás zajímá řada metrologických charakteristik. Vhodný teploměr je třeba volit podle rozsahu, citlivosti, ale často především podle rychlosti odezvy.

Cíle bakalářské práce:

Ve své práci uveďte stručný přehled metod a prostředků měření teploty s důrazem na obor teploměrů elektrických. Následně se zaměřte i na obecný přehled základních metrologických charakteristik teploměrů. Jako stěžejní část práce pak navrhnete experimentální pracoviště pro testování základního parametru dynamického chování – časové konstanty. Toto pracoviště zprovozníte a na základě realizovaných testů jednotlivé typy teploměrů zhodnotíte a porovnáte.

Seznam doporučené literatury:

CHUDÝ, V., PALENČÁR, R., KUREKOVÁ, E. a HALAJ, M.: Meranie technických veličín. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 1999.

KREIDL, M.: Měření teploty – Senzory a měřicí obvody. BEN – technická literatura, Praha, 2005.

SLÁDEK, Z. a VDOLEČEK, F.: Technická měření. Nakladatelství VUT, Brno, 1992.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce obsahuje přehled měření teploty se zaměřením na odporové snímače a termočlánky, které jsou podrobněji rozebrány z hlediska jejich vlastností. Praktická část se zabývá jejich vzájemným srovnáním, které je provedeno za pomoci softwaru LabVIEW NXG, DAQ karty od National Instruments a teploměrů značky Sensit.

ABSTRACT

This Bachelor's thesis contains an overview of temperature measurement, focusing on resistance sensors and thermocouples, which are analysed in more detail from the point of view of their properties. The practical part deals with their comparison and it was realized using LabVIEW NXG software, DAQ cards from National Instruments and Sensit thermometers.

KLÍČOVÁ SLOVA

měření teploty, teploměry, statické vlastnosti, rozsah, dynamické vlastnosti, přechodová charakteristika, odezva, odporové senzory, termoelektrické senzory, termočlánky

KEYWORDS

temperature measurement, thermometers, static properties, range, dynamic properties, transient response, response, resistance sensors, thermoelectric sensors, thermocouples

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TELECKÝ, J. *Metrologické charakteristiky elektrických teploměrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Vdoleček, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. za pomoc při sestavení experimentálního pracoviště a odborné rady z metrologie. Dále bych poděkoval Pavlu Pastrnekovi z firmy Sensit za ochotu poskytnout veškeré informace o teploměrech a převodnících jež distribuuji.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Františka Vdolečka a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 21. 5. 2018

.....

Jakub Telecký

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	TEPLOTA A MĚŘENÍ TEPLoty	17
2.1	Teplota	17
2.1.1	Definice teploty	18
2.2	Měření teploty.....	18
2.2.1	Dilatační teploměry	18
2.2.2	Elektrické teploměry.....	21
2.2.3	Bezdotykové teploměry (Optické).....	22
3	ELEKTRICKÉ TEPLoměRY	27
3.1	Kovové odporové teploměry (RTD).....	28
3.1.1	Platinové odporové teploměry	28
3.2	Termočlánky	31
3.3	Charakteristiky elektrických teploměrů.....	34
3.3.1	Statické charakteristiky teploměrů	34
3.3.2	Dynamické charakteristiky teploměrů	35
4	MĚŘÍCÍ PRACOVIŠTĚ	37
4.1	Teploměry sady Didaktik 10, ZPA EKOREG a Metex.....	37
4.2	Převodníky Rawet PXN30.A.....	40
4.3	Rawet studio 2 3.1.0	40
4.4	DAQ karta USB NI-6008	42
4.5	Měřicí rozhraní v LabVIEW NXG	43
4.6	Sestavení měřícího přípravku	45
4.7	Sestavení měřícího pracoviště	46
5	OVĚŘOVACÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ	47
5.1	Postup práce na pracovišti	47
5.2	Výsledky	48
5.3	Zhodnocení	52
6	ZÁVĚR	55
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	57
8	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ.....	59
9	PŘÍLOHY	61

1 ÚVOD

Teplota je v průmyslové, ale i obecné praxi jednou z nejrozšířenějších měřených neelektrických veličin a patří mezi sedm základních jednotek podle soustavy SI. K jejímu zjišťování existuje vícero způsobů a můžeme je rozdělit do skupin podle způsobu fungování měřicího přístroje. Jednak máme dilatační a tlakové teploměry využívající teplotní roztažnosti tuhých, kapalných nebo plyných látek za stálého tlaku či objemu. Dále máme elektrické teploměry, které využívají změny odporu vodičů či polovodičů, anebo vzniku termoelektrického napětí. Neposlední skupinou jsou pyrometry, které snímají vyzařování celkové energie tělesa, či pouze spektrální záření, čehož využívá další podskupina infračervených pyrometrů. Existuje řada dalších způsobů zjišťování teploty, ale s nimi se již v praxi běžně nesetkáváme. Teploměry lze také rozdělit jako dotykové a bezdotykové. V zásadě toto rozdělení vzniklo z potřeby měřit teplotu v těžko přístupných místech, nebo protože by umístění teploměru ovlivnilo chod zařízení.

Tato práce se dále zaměřuje již jen na teploměry elektrické, které jsou díky svému principu nejvhodnější do průmyslové praxe a automatizace procesů. Výstupem těchto senzorů jsou hodnoty elektrických veličin (odpor či napětí) snadno převeditelné na unifikovaný signál proudu (0-20 mA či 4-20 mA) nebo napětí (0-10 V), které lze následně jednoduše zpracovat pomocí výpočetní techniky a moderní elektroniky.

Elektrické teploměry se mimo jiné hodnotí podle velmi důležitých dynamických vlastností, konkrétně rychlosti odezvy. Ta je specifikována časovou konstantou. Práce se proto dále zaměřuje na zjišťování tohoto parametru, což umožní srovnat chování různých typů teploměrů a jejich konstrukčních provedení. Je tak možno přiblížit funkční problematiku a stát se názornou laboratorní úlohou v rámci praktické části výuky.

Pro tyto účely byly zvoleny běžně využívané elektrické teploměry a další technické vybavení z nabídky firmy Sensit s.r.o. Rožnov pod Radhoštěm. K realizaci je využít hardware a software od National Instruments.

2 TEPLOTA A MĚŘENÍ TEPLOTY

Jak bylo zmíněno v úvodu, teplota je velmi důležitou veličinou, se kterou se běžně setkáváme, a existuje spousta způsobů, jak ji měřit. Rozeberme si tedy více konkrétněji, co to teplota je a jak přesně fungují různé typy teploměrů na konkrétních příkladech.

2.1 Teplota

Teplota je termodynamickou veličinou, která určuje stav hmoty, aneb mírou kinetické energie pohybu molekul a atomů. Nepůsobí-li na hmotu vnější vlivy, pak se teplota nemění, je konstantní. Za nejnižší teplotu lze považovat absolutní nulu, tedy stav hmoty, kdy nedochází k žádnému pohybu, a tudíž je energie nulová. Tento stav lze popsat v termodynamické stupnici nulou (0 K). Dále platí, je-li tok tepla mezi dvěma tělesy v kontaktu roven nule, pak tyto dvě tělesa mají vzájemně stejnou teplotu.

Teplota se nyní obecně porovnává dle čtyř vzájemně provázaných stupnic.

- Termodynamická stupnice – [K] Kelvin
- Celsiova stupnice – [°C] Stupeň Celsia
- Fahrenheitova stupnice – [°F] Stupeň Fahrenheita
- Rankinova stupnice – [°Ra] Stupeň Rankina

Existují ještě další stupnice (Delisleova, Newtonova, Réaumurova a Romerova), ale ty nejsou v dnešní době již používány. V oblasti Evropy jsou nejčastěji využívány stupnice termodynamická a Celsiova, protože patří také do SI soustavy. Celsiova stupnice je v široké veřejnosti využívána nejvíce, tudíž se s ní setkáváme na všech teploměrech, ať osobních, průmyslových ale i laboratorních. Termodynamická stupnice je využívána výhradně v laboratorním prostředí a na fyzikální půdě. Pod touto stupnicí je teplota definována v SI soustavě, tudíž mnoho vztahů a vzorečků je od ní odvozováno. Často se využívá rovnosti $\Delta t = \Delta T$ (t – Celsiova, T – termodynamická stupnice), což umožňuje zanedbání převodu mezi stupnicemi.

Tabulka 1 - Přepočty teploty mezi stupnicemi používanými v dnešní době

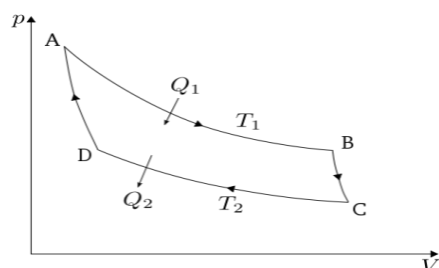
Do \ Z	Kelvinova	Celsiova	Fahrenheitova	Rankinova
Kelvinova	= K	= °C - 273,15	= (°F + 459,67) * 5/9	= °Ra * 5/9
Celsiova	= K - 273,15	= °C	= (°F - 32) * 5/9	= °Ra * 5/9 - 273,15
Fahrenheitova	= K * 1,8 - 459,67	= °C * 1,8 + 32	= °F	= °Ra - 459,67
Rankinova	= K * 1,8	= °C * 1,8 + 491,67	= °F + 459,67	= °Ra

Mezinárodně uznávanou stupnicí využívanou pro kalibraci teploměrů je ITS 90, navazující na předchozí ITS stupnice. V platnost vstoupila roku 1990 a obsahuje pevné teplotní body, které splňují požadavky vycházející ze stavové rovnice. Obsahuje trojné body vodíku, neonu, kyslíku, argonu, rtuti, vody a body tuhnutí indiumu, cínu, zinku, hliníku,

stříbra, zlata a mědi, doplněné o bod tání galia. Na oblastech kolem těchto teplotních bodů je tak definována celá teplotní stupnice pomocí vztahů daných prvků.

2.1.1 Definice teploty

Teplota je termodynamická stavová veličina. Je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Tato účinnost je dána v závislosti na rozdílných teplotách dvou hmot, kdy dochází k odevzdání tepla první hmotou a odebrání tepla druhou hmotou



Obrázek 1 - Carnotův cyklus

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1)$$

kde

η je účinnost Carnotova cyklu

Q_1 je teplo odevzdané do lázně o teplotě T_1

Q_2 je teplo odebrané z lázně o teplotě T_2

$T_2 > T_1$

Z tohoto vztahu lze následně odvodit teplotní stupnici, která byla definována Lordem Kelvinem na základě trojného bodu vody. V této stupnici zaujímá hodnotu $T = 273,16 \text{ K}$, což je po převodu $t = 0,01^\circ\text{C}$. Jeden kelvin (K) je tedy definován jako 273,16-tá část termodynamické teploty trojného bodu vody.

2.2 Měření teploty

Tato část se zabývá všemi způsoby měření teploty, k čemuž se využívají přístroje nazývané teploměry. Budeme se zde zabývat všemi typy vyjma určitých elektrických teploměrů, kterým je věnována vlastní část práce. Je zde rozebrána funkčnost teploměru na konkrétním příkladu z pohledu fyzikálních zákonů a pro lepší představu jsou zde přidány ilustrační obrázky. Toto dělení je vzhledem k ostatním nejlépe rozlišitelným, jelikož umožňuje sledovat výstupy každé kategorie stejným vlastním způsobem (u dilatačních teploměrů sledujeme změnu okem, u elektrických teploměrů dostáváme elektrické výstupy a u optických teploměrů porovnáváme emisivitu).

2.2.1 Dilatační teploměry

Tyto teploměry využívají fyzikálního jevu rozpínání látek. Každá látka, ať je skupenství kapalného, pevného či plynného, se při zvyšující se teplotě rozpíná, čímž se zvedá její objem či délka. Další možností je rozpínání látky v uzavřeném prostoru, což vytváří tlak na vnější obal. Proto můžeme dilatační teploměry rozdělit do následujících skupin.

- Kapalinové dilatační teploměry a plynové teploměry
- Tyčové teploměry a bimetalové teploměry
- Tlakové kapalinové a parní teploměry

Kapalinové dilatační teploměry využívají jako rozpínající se látku kapalinu, uzavřenou nejčastěji ve skle. Nejlepší kapalinou pro své vlastnosti je rtuť. Má velkou objemovou roztažnost, dobrou tepelnou vodivost, je neprůhledná, má vysokou chemickou stálost a nesmáčí. Lze také využít organické látky, jakožto například alkohol, toluol, pentan a další. Plynové teploměry jako teploměrnou látku používají plyn, který také mění svůj objem za stálého tlaku prostředí. Toho se v praxi těžko dosahuje, proto se tolik nevyužívají a nahrazují se tlakovými teploměry. U obou typů se tedy využívá takzvaného koeficientu objemové roztažnosti, který má vliv na výsledný objem po zahřátí kapaliny. Jak vidíme na obrázku 2, u teploměrů lze přímo podle stupnice, která je předem stanovena dle tohoto vztahu, odečítat výslednou teplotu, nejčastěji udávanou ve stupních Celsia a někdy i ve stupních Fahrenheita.

Koeficient objemové roztažnosti

$$\alpha_V = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

kde

dV je změna objemu

dt je rozdíl teplot

V_0 je objem aktivní části snímače

Výsledný objem

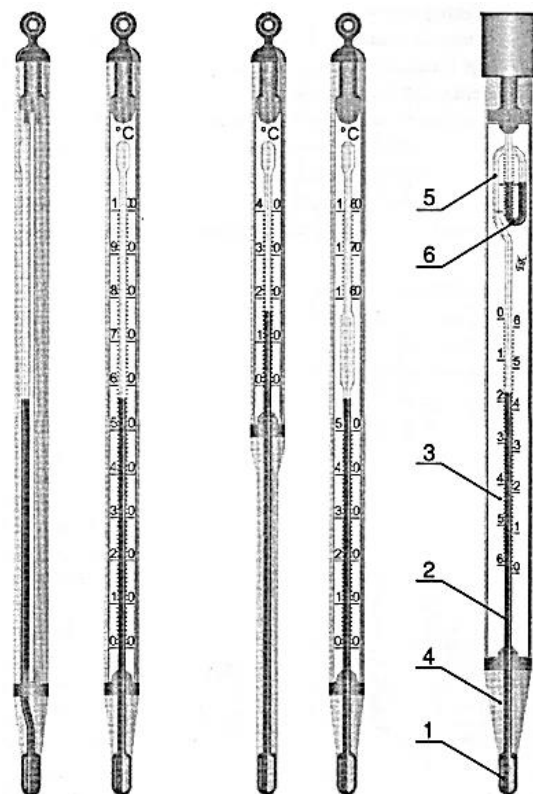
$$V = V_0 (1 + \alpha_V \Delta t) \quad (3)$$

kde

α_V je objemová roztažnost

Δt je rozdíl teplot

V_0 je původní objem kapaliny



Obrázek 2 - Kapalinové teploměry (rtuťové) [1]

Dalšími velmi rozšířenými teploměry jsou bimetalové pásky, nebo tyčové teploměry, které na rozdíl od kapalinových teploměrů, jsou tvořeny kovy a tvarovány tak, aby byl jeden z rozměrů dominantní. Oba dva typy využívají stejného principu, a to délkové roztažnosti. Oba jsou tvořeny dvěma různými typy kovů. Tyčový teploměr je tvořen ze dvou částí. První částí je tyč, která je tvořena látkou s velkou délkovou roztažností. Využívá se proto nejčastěji mosaze, ocele, zinku, hliníku nebo niklu. Ta je uložena v pouzdře, které naopak musí mít co nejmenší délkovou roztažnost, což je například invar, křemenné sklo, porcelán anebo sklo. Bimetalové teploměry využívají tenké pásky dvou pevně spojených materiálů opět s různou délkovou roztažností. Jedná se tedy o kombinace, například invar-mosaz, invar-nikl, invar-ocel a další. U tohoto typu

se jako výsledek změny teploty uvažuje průhyb pásků a za předpokladu, že bereme jeden konec jako vetknutý nosník podle obrázku 3, jej lze určit podle vztahu

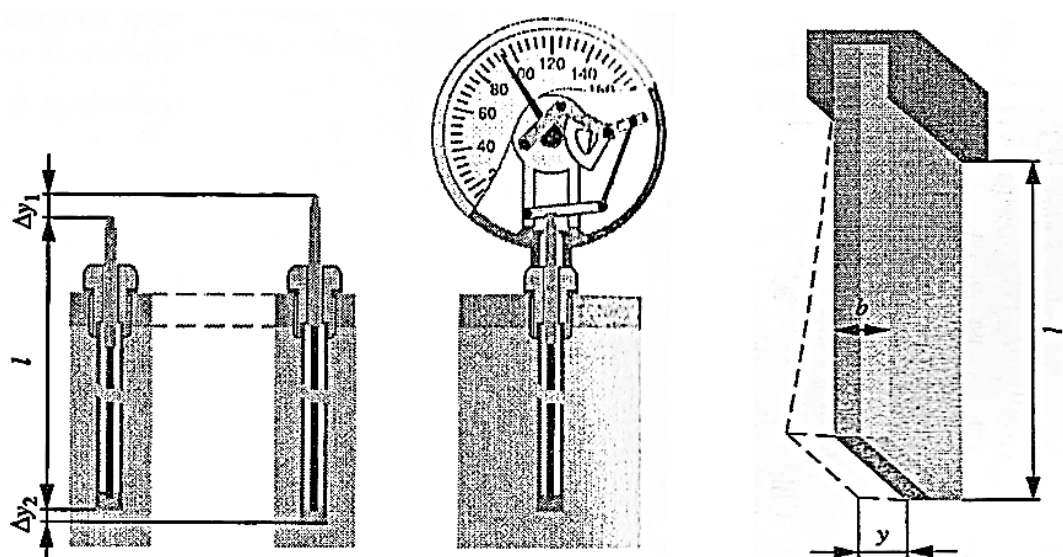
$$y = \frac{\Delta\alpha * l^2}{b} \Delta t \quad (4)$$

Pro tyčové teploměry platí analogicky jako pro kapalinové vztah pro koeficient délkové roztažnosti materiálu

$$\alpha_l = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} \quad (5)$$

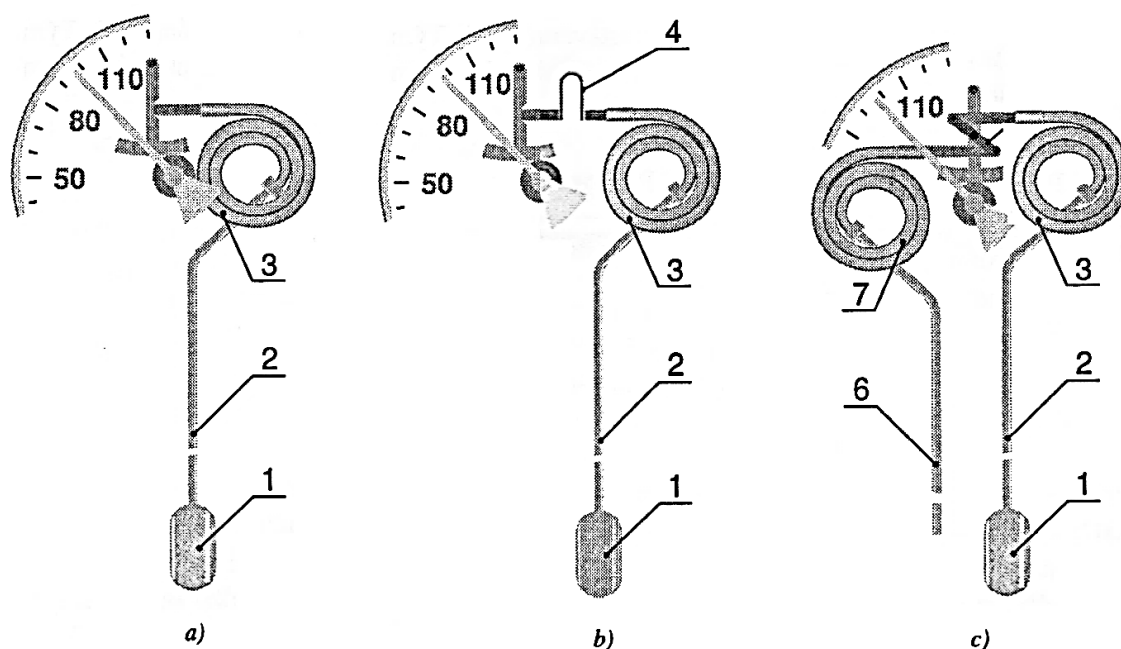
a výsledné prodloužení

$$l = l_0 (1 + \alpha_l \Delta t) \quad (6)$$



Obrázek 3 - Kovový tyčový teploměr a vpravo bimetalový pásek [1]

Poslední skupinou dilatačních teploměrů jsou tlakové kapalinové teploměry a tlakové parní teploměry. Jak již název udává, tyto teploměry ke svému fungování využívají změnu tlaku. Konstrukce obou typů je stejná, liší se pouze ve využití teploměrné látky. Skládají se ze tří částí. První je většinou kovová nádobka, aby odolala vysokému tlaku, který působí na její stěny. Další částí je spojovací kapilára. Ta může být velmi krátká, ale klidně i několik metrů dlouhá. Podle její délky je potřeba zahrnout korekce. Částečná korekce s využitím bimetalového pásku se provádí zhruba od délky 6 metrů. Úplná teplotní korekce se provádí v případě velmi dlouhých kapilár, které mohou dosahovat délky až 50 metrů. Poslední částí je většinou Bourdonova trubice, jež se vlivem změny tlaku deformuje a tím na stupnici vykazuje změnu teploty. Celý tento aparát je naplněn kapalinou. Jako náplně těchto teploměrů jsou využívány stejné látky jako u kapalinových teploměrů. Parní teploměr se liší pouze v teploměrné látce. Nádobka je naplněna kapalinou pouze částečně a zbytek tvoří sytá pára. Využívají se zde proto kapaliny s nízkým bodem varu, jako jsou například metylchlorid, líh, propan apod.



Obrázek 4 - Tlakový kapalinový teploměr a) bez korekce b) s částečnou korekcí c) s úplnou korekcí [1]

2.2.2 Elektrické teploměry

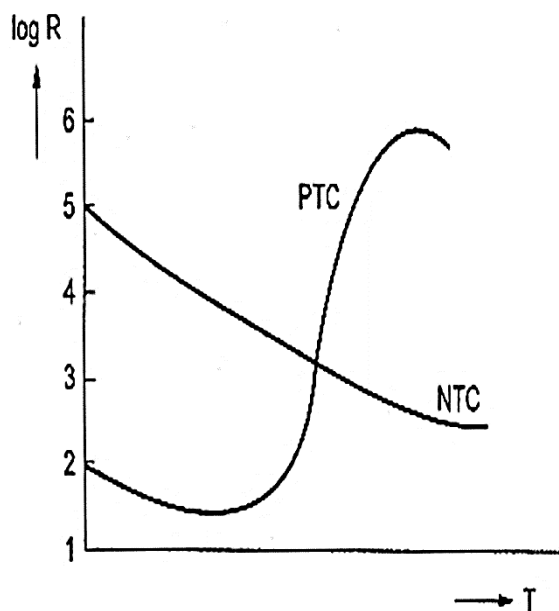
Mezi další elektrické teploměry, se kterými je dobré se seznámit, ale nejsou stěžejními pro tuto práci, patří polovodičové teploměry a další speciální přístroje s elektrickým výstupem. Jako polovodičové teploměry se využívají tzv. pozistory (PTC) a negastory (NTC). Ze speciálních je zajímavý například ultrazvukový teploměr. Ten se využívá k měření teploty v oblastech člověku nebezpečného prostředí, jako jsou například sklady jaderného paliva. Teplota se zde zjišťuje pomocí rychlosti šíření zvukových vln v pevném tělese. Dalšími speciálními teploměry pak jsou například iontové, krystalové, šumový, akustický a magnetický teploměr, dále teploměr využívající orientaci nukleonů a teploměr využívající kvadrupólovou nukleární rezonanci.



Obrázek 5 - Moderní teploměr využívající termistor [7]

Polovodičové teploměry jsou velmi levnou variantou pro rychlé měření teploty. Díky velkým změnám odporu jsou také relativně dost přesné. Jejich nevýhodou je však výstupní závislost, která je exponenciální, což vede k problémům se zpracováním a linearizací dat. Jejich konstrukce a možnosti provedení v malých velikostech dovolují rozsáhlé nasazení, avšak mohou být následkem toho křehké a rychleji se zahřívají.

Závislost odporu u těchto teploměrů je odlišná. NTC při stoupající teplotě ztrácí svůj odpor, tudíž křivka klesá. U PTC je tomu naopak. Dochází zde sice nejprve k mírnému poklesu, ale následně dojde ke skokovému nárůstu odporu. Pro tuto oblast je charakteristická jmenovitá teplota (t_j). Proto se PTC využívají spíše pro signalizační aplikace. K běžnému měření slouží právě NTC teploměry, kde celý průběh měření lze popsat jednou exponenciální funkcí



$$R = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (7)$$

kde

R je odpor NTC při teplotě T

R_0 je odpor NTC při teplotě T_0

B je jmenovitá konstanta

Pro oblast jmenovité teploty u PLC pak platí závislost

$$R = R_0 e^{At_j} \quad (8)$$

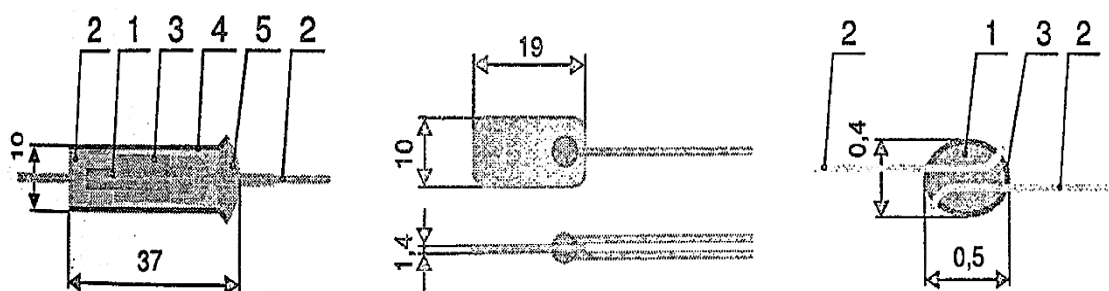
kde

R_0 je odpor PTC při teplotě T_0

$A = 0,16 \text{ K}^{-1}$ je referenční hodnota

Obrázek 6 - Závislost odporu na teplotě pro NTC a PTC [1]

V běžné praxi se jako termistory označují a využívají negastory pro jejich lepší teplotní závislost. Ta se dá pro menší teplotní rozsahy linearizovat, což je výhodnější. Pro různé aplikace existuje řada různých typů termistorů. Vyrábějí se nejčastěji práškovou metalurgií ze směsi niklu, kobaltu, manganu, titanu, mědi, železa a dalších kovů. To umožňuje následně lisovat a formovat tyto teploměry do tvaru perliček, tyčinek a destiček, jak vidíme na obrázku 7 a využívá se dvou vodičového zapojení.



Obrázek 7 - Zleva termistor tyčinkový, destičkový a perličkový [1]

2.2.3 Bezdotykové teploměry (Optické)

Optické teploměry je obecná skupina teploměrů využívajících k měření teploty emisní záření těles. Každé zahřáté těleso, jehož okolí má nižší teplotu, vyzařuje do okolí elektromagnetické záření o určité vlnové frekvenci. Jedná se zde o princip takzvaného černého

tělesa, jež popisuje Stefan-Boltzmannův zákon, čehož však reálná tělesa nemohou dosáhnout, proto taková tělesa nazýváme „šedá“. Tyto teploměry jsou jinak také nazývány pyrometry a měří emisivitu takového tělesa. Je proto logické, že teploměr nemusí přijít do kontaktu s měřeným tělesem. Proto tyto teploměry můžeme taktéž nazývat jako bezdotykové a umožňují nám měřit vysoké teploty, dále umožňují měřit v nebezpečných prostředích z bezpečné vzdálenosti a lze měřit pohybující se či rotující předměty, což například elektrické teploměry nemohou, jelikož by došlo například k zamotání drátu a musí tuto překážku řešit jinými způsoby. K takovému měření se však vztahují i určitá omezení. Je potřeba brát v úvahu prostředí, které může ovlivnit vyzařené záření. Dále musíme uvažovat různé odražené záření. Tyto teploměry taktéž často potřebují být správně zkalibrovány, aby odpovídaly emisivitě objektu. Toto všechno tyto teploměry staví spíše na orientační měření, které je vhodné opakovat vícekrát. Optické teploměry můžeme podle principu fungování rozdělit na následující skupiny.

- Radiační pyrometry
- Fotoelektrické a spektrální pyrometry
- Distribuční pyrometry

Radiační teploměry využívají výše zmíněného Stefan-Boltzmannova zákona. Tyto teploměry měří na základě záření všech vlnových délek, které po průchodu optickou částí zrcadel a čoček ohřívají měřicí prvek a ten pak tuto teplotu snímá. Výsledná teplota lze následně spočítat za pomoci vztahu

$$T_s = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \quad (9)$$

kde

T_s je skutečná teplota

T_p je teplota udaná pyrometrem

ε je poměrná emise záření.

Fotoelektrické a spektrální pyrometry fungují na základě filtrování určitých vlnových délek záření, kde nechají v případě fotoelektrických procházet pouze určitý interval vlnových délek (proto je někdy nazýváme pásmové) a u spektrálních pyrometrů dochází k průchodu jen velmi úzkého spektra záření (často nazývány jako jasové), ideálně jen jedné konkrétní vlnové délky. U pásmových pyrometrů je tento interval dán výrobcem na základě použitých filtrů. Spektrální pyrometry na rozdíl od pásmových mají svůj vlastní zdroj záření a porovnává se zde rozdíl, dokud vlastní záření a záření měřeného objektu nesplyne. To lze dělat dvěma způsoby. Vlastní záření může mít proměnlivou vlnovou délku řízenou elektrickým obvodem, nebo se vkládá do zařízení filtr s nastavitelnou absorpcí tzv. šedý klín. K porovnávání u těchto teploměrů slouží často lidské oko, proto výsledky v kombinaci s potřebou znát správnou emisivitu objektů jsou často velmi špatné. Pro všechny tyto pyrometry pak platí stejný přepočít (10).

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_\lambda \quad (10)$$

kde

T_s je skutečná teplota

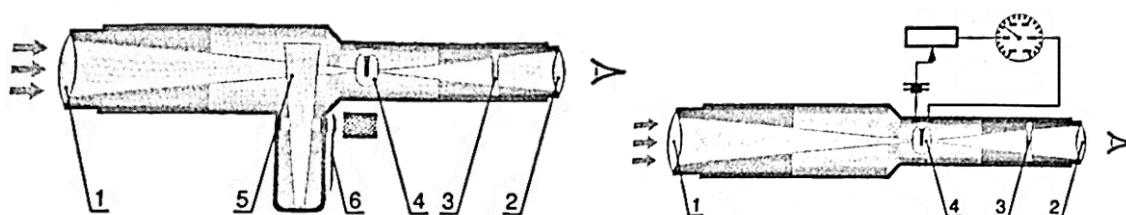
T_p je teplota na pyrometru

λ je charakteristická vlnová délka ve vymezeném pásmu či spektru

c_2 je druhá vyzařovací konstanta

ε_λ je pásmová či spektrální emisivita měřeného objektu

Na obrázcích 8 a 9 můžeme vidět konstrukční řešení těchto teploměrů a rozdíl mezi oběma způsoby provedení. Výstupem je pak stejný obraz žárovky a objektu.



Obrázek 8 - Využití šedého klínu (5) a stálého jasu žárovky [1] Obrázek 9 - Využití proměnlivého jasu žárovky [1]

Poslední vlastní skupinou jsou distribuční (jinak také barevné) pyrometry. Tyto zařízení fungují na stejném principu jako předchozí pyrometry, ale s tím rozdílem, že se zde využívají dvě různá spektra vlnových délek. Využívá se poměrového vztahu, který vychází z vlastností černého tělesa. Zde platí, že pro určité oblasti spektra je stejná poměrová teplota, jako pro šedý zářič. Distribuční pyrometr proto opět využívá šedých klínů (obrázek 10), aby vyfiltroval pouze určitá spektra vlnových délek, které následně spojuje do jednoho paprsku, který musí pozorovatel vnímat jako bílý. Ten se porovnává se zářením žárovky, a po dosažení stejné barvy lze určit spektrální a jasovou teplotu měřeného objektu. Výsledná teplota se spočítá podle vztahu

$$\frac{1}{T_f} = \frac{\frac{1}{\lambda_1 * T_1} + \frac{1}{\lambda_2 * T_2}}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}} \quad (11)$$

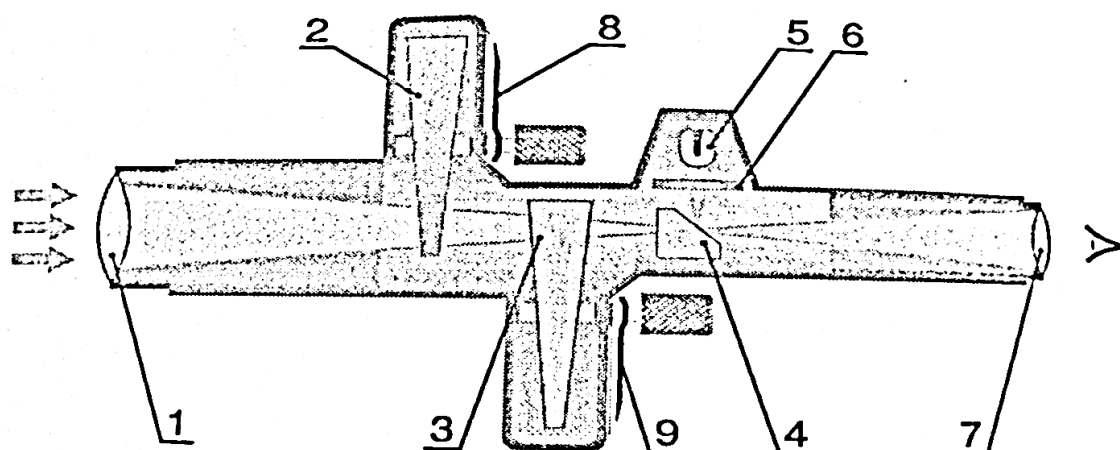
kde

T_f je skutečná teplota měřeného objektu

λ_1 a λ_2 jsou použité vlnové délky záření

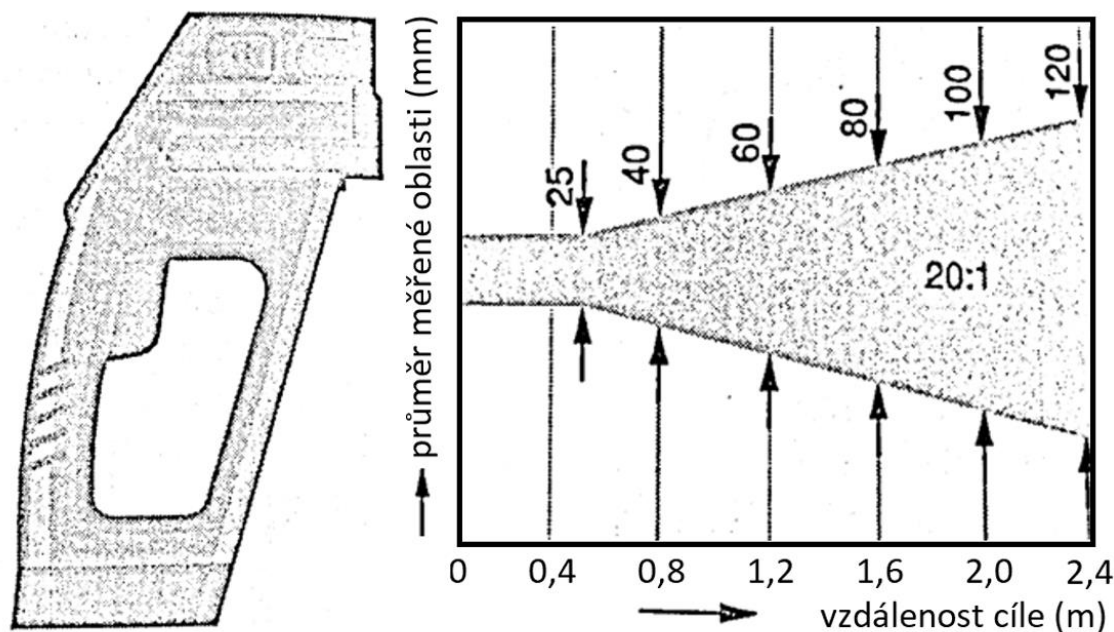
T_1 a T_2 jsou teploty určené na šedých klínech

K měření teploty se v poslední době velmi často používají ještě další dva způsoby. Ty fungují na stejných principech jak bylo již v tomto tématu bezdotykových teploměrů zmíněno, ale využívají ke svému chodu výhradně infračervené záření (IR). Takové teploměry nazýváme infračervené pyrometry, infračervené termočlánky a dále na stejném principu fungují i termovize.



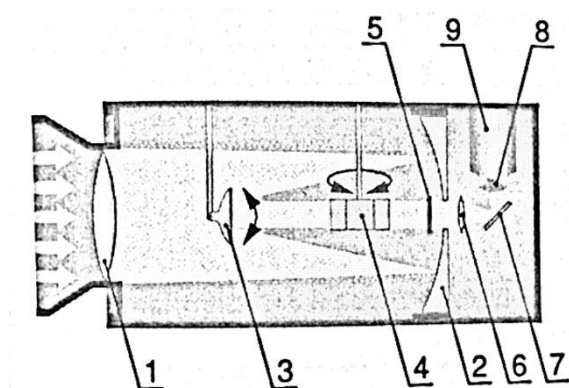
Obrázek 10 - Konstrukce distribučního pyrometru, klíny 2 a 3 slouží k odečtu teplot (8 a 9) [1]

Infračervené pyrometry pracují na stejných principech jako dříve zmíněné spektrální a distribuční pyrometry, tudíž si je zde nebudeme konkrétněji rozebírat. Infračervené termočlánky oproti tomu ke svému chodu využívají jako senzor teploty záření termočlánků, který se ohřívá dopadajícím zářením. Toto řešení přináší velké výhody, protože termočlánky jsou rychlé a nepotřebují externí napájení, takže je možné takovéto zařízení vyrábět v malých velikostech a levně. Nevýhodou jsou však určité nelineární charakteristiky, a proto při linearizaci na menším intervalu teplot vznikají 2-5 % odchylky. Z tohoto důvodu se takovéto měření hodí spíše na rychlé zjištění teploty. Jejich další výhodou je možnost měřit na krátké, ale i dlouhé vzdálenosti. Každý infračervený teploměr má znázorněné svoje zorné pole (obrázek 11). To udává, jak velký objekt na jak velkou vzdálenost měříme. Tyto teploměry měří infračervenou emisi měřeného objektu a výsledná teplota, kterou takovýmto způsobem získáme, je vlastně průměrnou hodnotou teplot měřené oblasti povrchu tělesa.

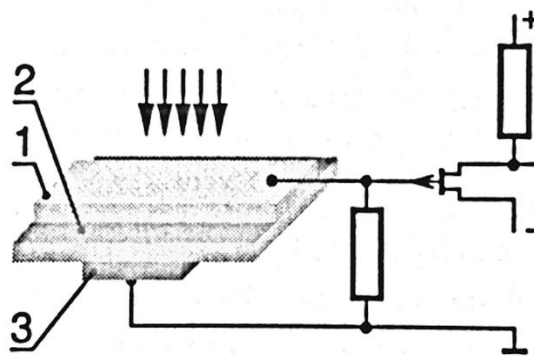


Obrázek 11 - IR teploměr a jeho zorné pole [1]

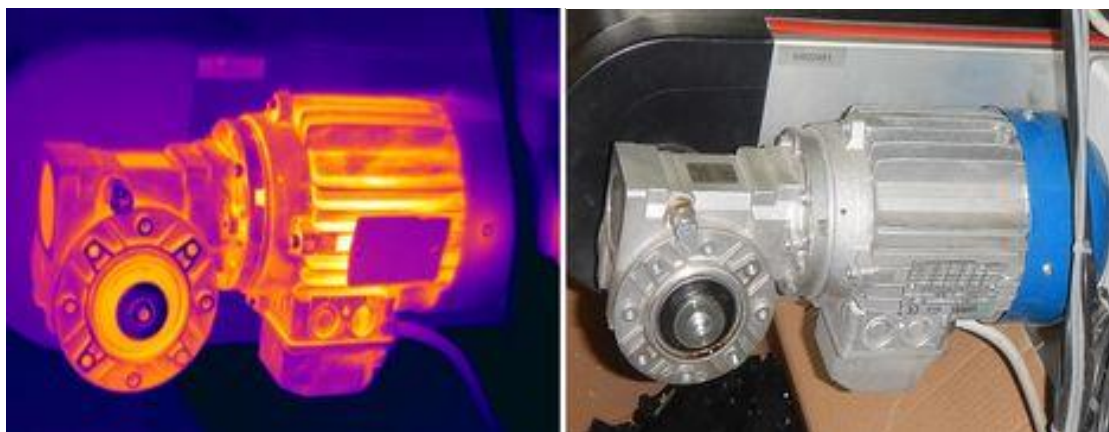
Tento nedostatek se eliminoval s příchodem termovizí. Ty měří takzvané teplotní pole. Jde o zobrazení teplot v jednotlivých bodech velkého objektu. Je potřeba aby záření přicházející do objektivu termovize bylo rozděleno a následně snímáno. To dříve zaručovala opticko-mechanická konstrukce, kterou vidíme na obrázku 12. Nyní je k tomuto účelu využíván opticko-elektronický rozklad. Ke snímání teplot se využívají kvantové či pyroelektrické senzory. Tyto body jsou poté na obrazovce znázorněny různými barvami. Jedná se o tzv. termogram.



Obrázek 12 - Opticko-mechanický rozklad [1]



Obrázek 13 - Pyroelektrický senzor [1]

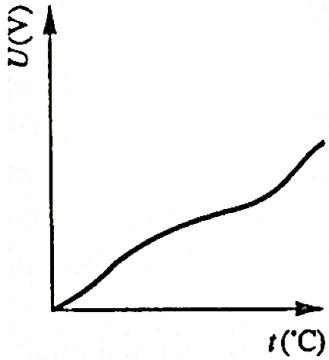
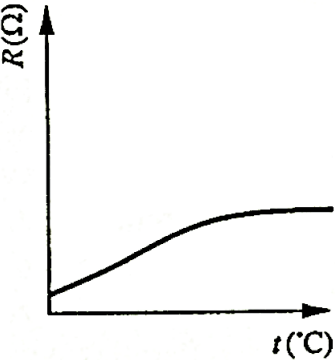
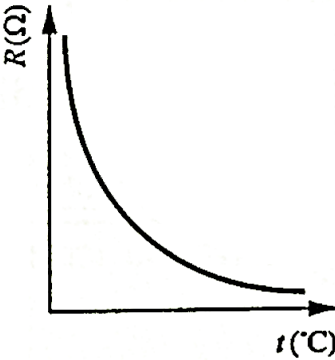


Obrázek 14 - Termogram a reálná fotka zahřátého motoru [9]

3 ELEKTRICKÉ TEPLoměRY

Do této oblasti se řadí převážně odporové teploměry, jejichž přesnost je nejlepší, a termočlánky, které jsou nejvíce využívány pro svou konstrukci, velké rozsahy, univerzálnost a pořizovací náklady. V této kapitole jim je věnována větší pozornost, abychom se seznámili s jejich fungováním, protože jsou využity v praktické části. Dále jako elektrické teploměry považujeme polovodičové teploměry (NTC, PTC) a další speciální přístroje, které jsme již rozebrali v předchozí kapitole. Abychom mohli teploměry mezi sebou objektivně porovnávat, je třeba se taktéž seznámit s určitými charakteristikami, z nichž nejvýznamnější jsou rozsah a časová konstanta, či tzv. odezva.

Tabulka 2 - Obecné srovnání elektrických teploměrů [1]

Termočlánky	Kovové odporové snímače	Termistory
Statická charakteristika		
		
Vyhodnocuje se		
Napěťový výstupní signál	Změna odporu snímače	Změna odporu snímače
Výhody		
• Vlastní napájení • Jednoduché • Robustní • Levné • Mnoho provedení • Velký rozsah	• Nejstabilnější • Nejpresnější • Lineárnější než termočlánky	• Velký výstupní signál • Rychlé • Dvou vodičové zapojení
Nevýhody		
• Nelineární • Nízké napětí • Potřeba referenční hodnota teploty • Málo stabilní • Málo citlivé	• Drahé • Potřeba napájet proudem • Malá změna odporu • Malý měrný odpor • Zahřívají se	• Nelineární • Malý teplotní rozsah • Křehké • Potřeba napájet proudem • Zahřívají se

3.1 Kovové odporové teploměry (RTD)

Využívají změnu odporu vodiče v závislosti na změně teploty. Podle materiálu, ze kterého je teploměr tvořen, jsou dány statické charakteristiky, jako rozsah a přesnost. Dále na základě výběru materiálu máme odlišné teplotní koeficienty odporu a každý materiál jakožto takový má jiný nominální odpor. Toto jsou požadavky, které je nutné předem vhodně zvolit. Materiál odpovídající těmto požadavkům nejlépe je platina. Dalšími materiály vhodnými k měření teploty tímto způsobem jsou nikl, na měření nižších či středních teplot slitina rhodium-železa a pro měření velmi nízkých teplot germanium.

Teplotní koeficient odporu se podle platných předpisů definuje na rozdíl změny teploty o 1 K (= 1 °C), na rozsahu teplot 0 až 100 °C. Ten však není pro celý rozsah teploměru konstantní, ale lze jej s určitou odchylkou linearizovat. Spočítáme jej jako

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (12)$$

kde

Δt je vlastní rozsah teplot, tudíž 100 °C

R_0 je odpor vodiče při teplotě 0 °C

R_{100} je odpor vodiče při teplotě 100 °C

ΔR je roven $R_{100} - R_0$

Výsledný odpor v linearizovaném tvaru je roven

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (13)$$

kde

R_t je odpor vodiče při měřené teplotě t

Tento postup převodů je pro svou jednoduchost velmi rozšířený, avšak je vhodný pouze pro malé rozsahy ideálně v rozmezí teplot definujících teplotní koeficient či poblíž něj. K lepším výsledkům využíváme zpřesňující materiálové konstanty. V kladném rozmezí měřených teplot využíváme polynomiální vztah

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (14)$$

a pro záporné hodnoty dokonce kubický vztah

$$R_t = R_0(1 + Ct + Dt^2 + E(t - 100)^3) \quad (15)$$

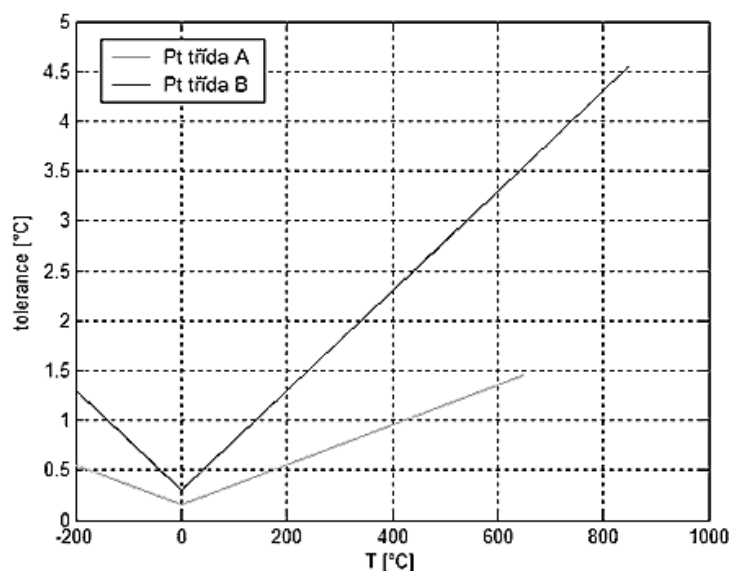
kde

A, B, C, D a E jsou materiálové konstanty

3.1.1 Platinové odporové teploměry

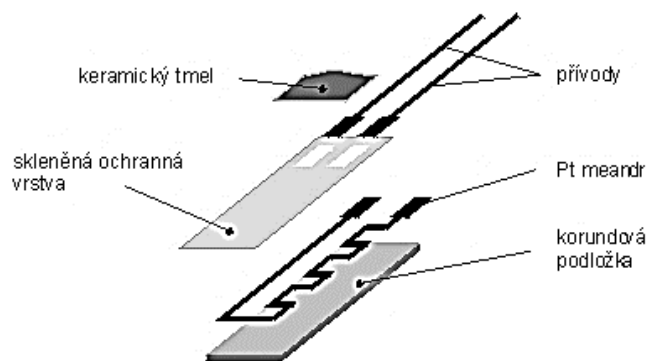
Platina se v metrologii osvědčila velmi dobře. Je chemicky stálá ve velkém rozsahu teplot a má vysokou teplotu tavení. Navíc jsme schopni tento materiál vyrábět velmi čistý a to až 99.999 %. Ani po delším čase se nemění její odpor a v kombinaci s ostatními

vynikajícími vlastnostmi slouží teploměr Pt100 jako etalonový snímač podle ITS 90 pro rozmezí $-259,3467\text{ °C}$ až $961,78\text{ °C}$. Pro běžné měření se používají v menším rozsahu, a to zhruba v intervalu -220 až $+650\text{ °C}$. Podle přesnosti tyto teploměry rozdělujeme do dvou tříd. Třída přesnosti A je definována na menším rozsahu teplot, tudíž tyto teploměry jsou podle předešlého rozboru schopny měřit přesněji, díky menší odchylce od linearizovaného (respektive polynomiálního a kubického) tvaru. Druhou třídou přesnosti je skupina B, která dovoluje zhruba 2,5x větší odchylky.

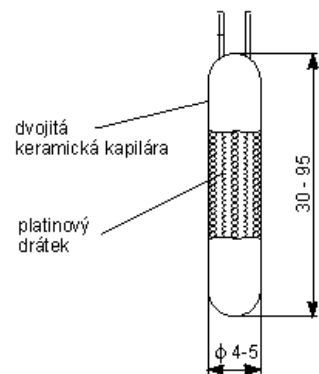


Obrázek 15 - Odchylky teplot v závislosti na měřené teplotě pro Pt100 [15]

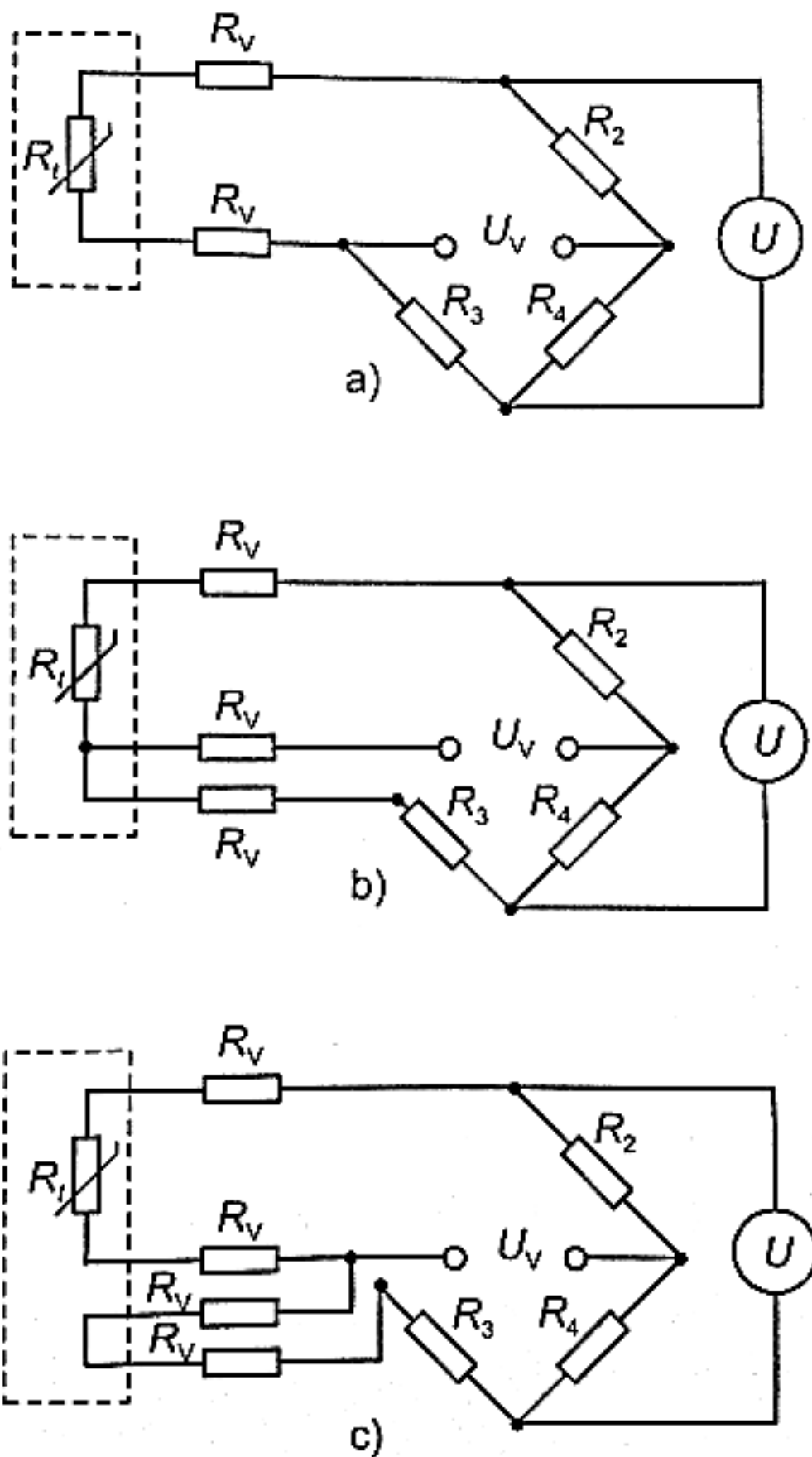
Platinové teploměry se vyrábějí různými způsoby. Prvním způsobem je navinutí tenkého drátku na jádro, což minimalizuje vznik šumu z rušivých magnetických polí. Následně může být zataven do keramiky nebo skla, podle čehož se volí následné využití. Další variantou jsou tenkovrstvé fólie. Firma Sensit využívá speciální metodu napařování. Ty jsou obecně citlivější a mají lepší odezvu, avšak z dlouhodobého hlediska nemusí být natolik spolehlivé jako v předchozím případě a snášejí menší proudové zatížení. Zapojení do měřicího obvodu se následně provádí buď dvou, tří nebo čtyřvodičovým zapojením, což taktéž ovlivňuje chyby měření. Nejpoužívanějším je třívodičové zapojení, protože střední vodič umožňuje porovnání parazitických jevů oproti krajním vodičům. Pro ochranu do náročnějšího prostředí se používají jímky. Ty však zpožďují dobu odezvy.



Obrázek 16 - Plošný odporový teploměr [16]



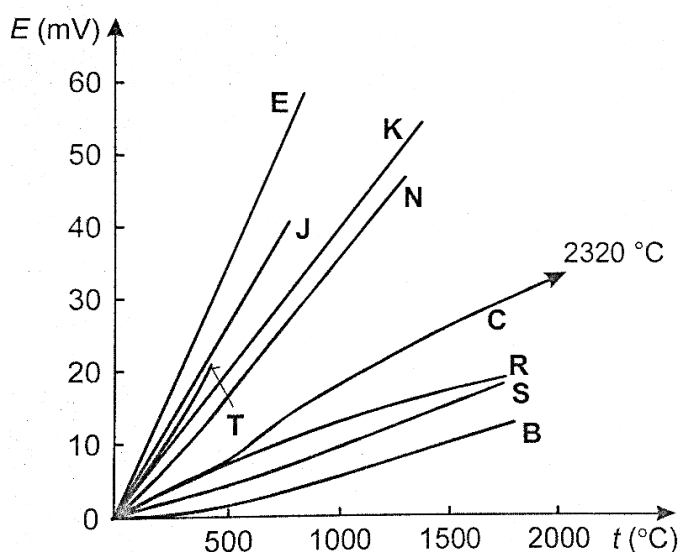
Obrázek 17 - Drátkový teploměr [16]



Obrázek 18 - Zapojení odporového teploměru do obvodu pomocí a) dvouvodičového zapojení b) třívodičového zapojení c) čtyřvodičového zapojení [2]

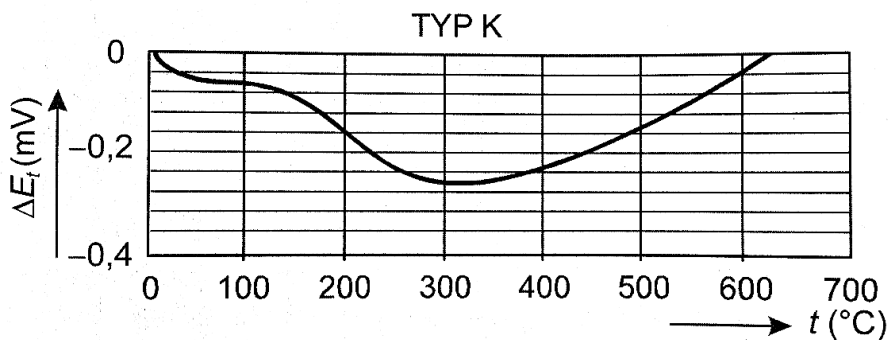
3.2 Termočláanky

Termočláanky jsou vůbec nejlevnější variantou, jak měřit teplotu s elektrickým výstupem. Ke svému fungování využívají Seebeckův jev. Ten popisuje vznik elektromotorického napětí v obvodu ze dvou různých vodičů na obou koncích spojených a jsou proto pojmenovány jako termoelektrické teploměry, avšak pro zjednodušení se využívá kratší název termočláanky. Oba konce musí mít rozdílné teploty. První, tzv. teplý konec, je umístěn na měřeném objektu a tím se zahřívá či ochlazuje. Při této změně se ve vodiči zvětšuje nebo zmenšuje energie nábojů, které difundují z teplejší oblasti ve větším počtu do chladnější, čímž se tvoří elektromotorické napětí. Druhý konec je tzv. spojovací či studený. Tuto část je nutno udržovat ve stálé teplotě, a proto se v laboratořích často umisťuje pod roztékající se led, či v praxi do lázně s termostatem.



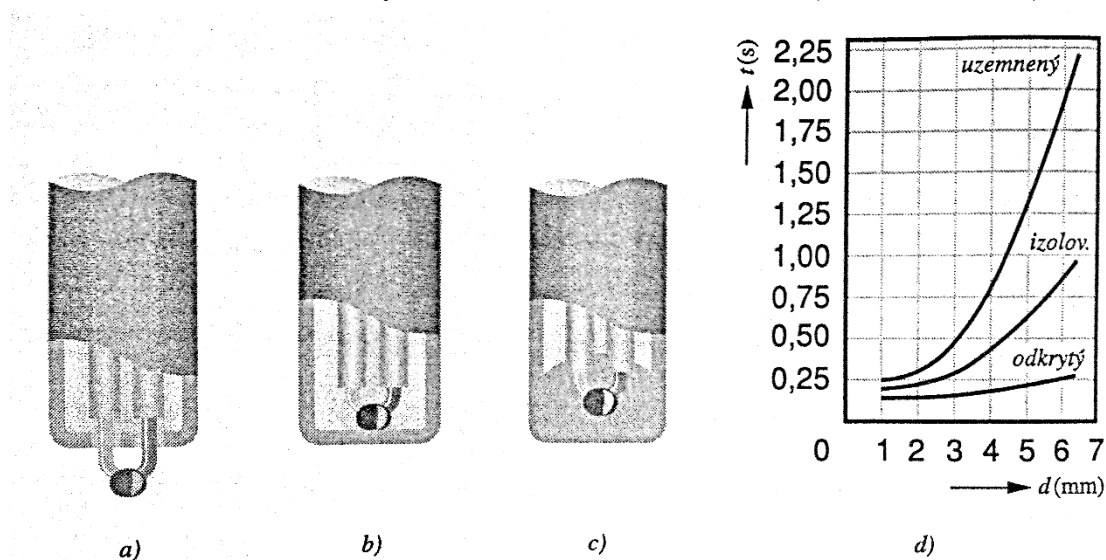
Obrázek 19 - Závislost velikosti elektromotorického napětí na teplotě pro různé typy termočláanek [2]

Z grafu na obrázku 19 vidíme, že termočláanky typu K a typu E mají nejlineárnější charakteristiku. Navíc jsou díky rychlejšímu nárůstu přesnější, protože na každou změnu teploty reagují větší změnou elektromotorického napětí, což umožňuje lepší detekci signálu pro DAQ systémy. Stejně jako u odporových teploměrů však platí, že výstupní charakteristika není úplně lineární, tudíž vznikají odchylky. Proto je lepší provádět měření na menším rozsahu teplot, aby se tento jev co nejvíce zmenšil.



Obrázek 20 - Odchylka od linearizace pro termočláanek typu K [2]

Termočlánky se vyrábějí dvěma způsoby podle uložení jednotlivých větví. Jednak je můžeme uložit do kapilár, nejčastěji vyrobených z keramiky, a následně je vložit například do jímky či sondy. Takto vyrobené termočlánky nazýváme drátkové. Dalším způsobem je uložit obě termočlánekové větve do jednoho pláště a zbylý prostor vyplnit izolační látkou. Tyto termočlánky nazýváme plášťové. Podle vyhotovení spoje (umístění) můžeme ovlivnit dobu odezvy, která se mění v řádech sekund (viz obrázek 21 d).



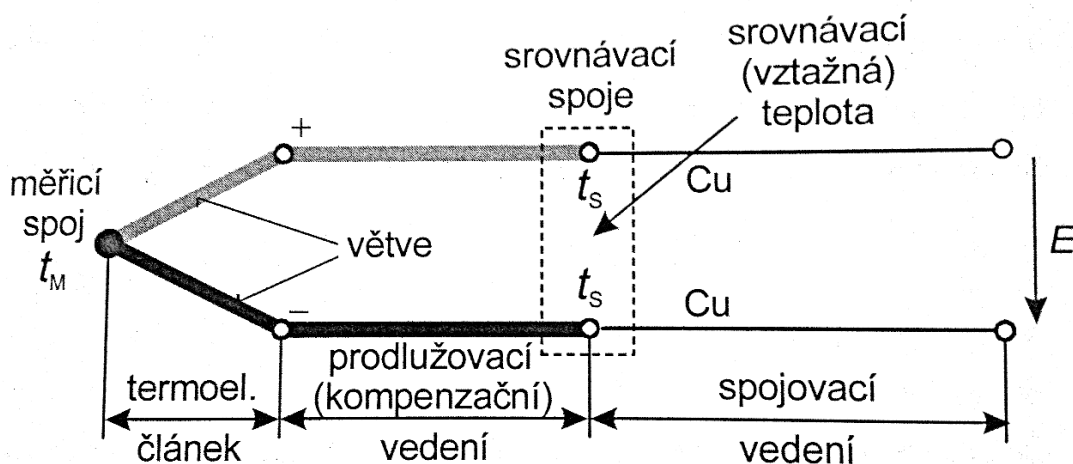
Obrázek 21 - Typy spojů a) otevřený b) uzemněný c) izolovaný... d) změna doby odezvy podle typu spoje [1]

Jak již bylo naznačeno, existuje více různých typů termočlánků. Ty se označují písmeny. Nejrozšířenějšími jsou Typ J, K, T, E, N, R, S, B, G, C a D. Jelikož každý materiál má jiné vlastnosti, má to vliv na využití v praxi a na rozsahy teplot, které jsou schopny měřit.

Tabulka 3 - Výňatek z tabulky 9.7 nepoužívanějších termočlánků [1]

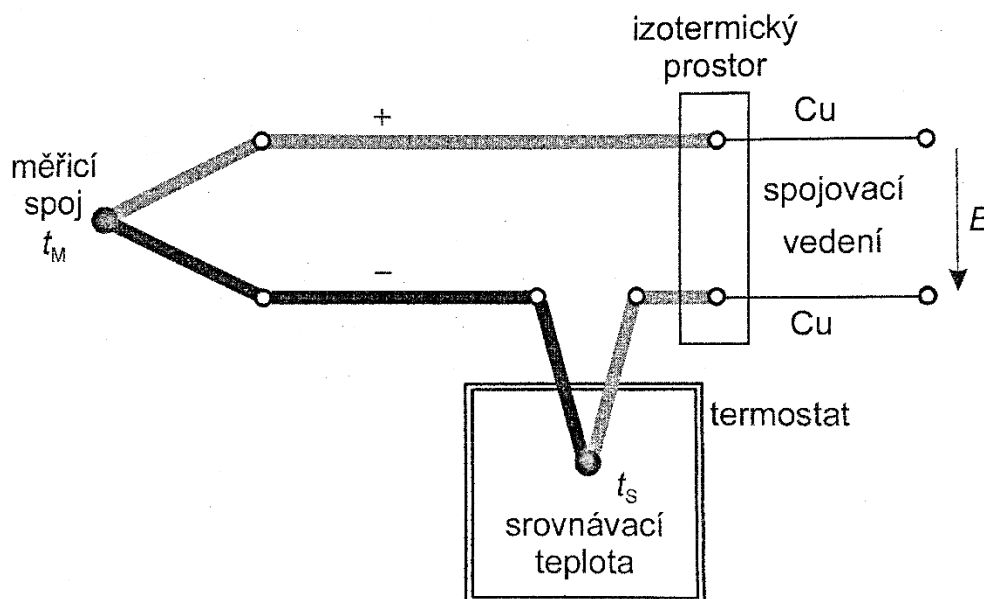
Typ	Kombinace slitin		Teplotní rozsah /°C		Elektromotorické napětí /mV
	Vodič +	Vodič -	Termočlánek	Kompenzace	
J	Fe	Cu-Ni	0 až 750	0 až 200	0 až 42,283
K	Ni-Cr	Ni-Al	-200 až 1250	0 až 200	-5,973 až 50,633
T	Cu	Cu-Ni	-200 až 350	-60 až 100	-5,602 až 17,816
E	Ni-Cr	Cu-Ni	-200 až 900	0 až 200	-8,824 až 68,783
N	Ni-Cr-Si	Ni-Si-Mg	-270 až 1300	0 až 200	-4,345 až 47,502
R	Pt-13 %Rh	Pt	0 až 1450	0 až 150	0 až 16,741
S	Pt-10 %Rh	Pt	0 až 1450	0 až 150	0 až 14,973
B	Pt-30 %Rh	Pt-6 %Rh	0 až 1700	0 až 100	0 až 12,426
G	W	W-26 %Re	0 až 2320	0 až 260	0 až 38,564
C	W-5 %Re	W-26 %Re	0 až 2320	0 až 870	0 až 37,066
D	W-3 %Re	W-25 %Re	0 až 2320	0 až 260	0 až 39,506

Jak můžeme vidět na obrázku 22, samotný termočlánek tvoří velmi malou část. Další částí je prodlužovací vedení, které musí být vyrobeno ze stejného materiálu jako termočlánek a dále spojovací vedení, které se z důvodu úspory nákladů vyrábí z jiného materiálu, než jsou větve, ale je potřeba zaručit, aby nedocházelo na spojích k vytvoření „dalších termočlánků“, proto musí mít v omezeném rozsahu stejný termoelektrický koeficient a podobnou charakteristiku. K tomuto účelu se nejčastěji využívají měděné vodiče, které jsou běžně všude dostupné.



Obrázek 22 - Terminologie měřicího řetězce termoelektrického článku [2]

Protože je termočlánek tvořen dvěma vodiči, tzv. větvemi, zapojuje se do obvodu dvou vodičovým zapojením. Při zapojení se často využívá tzv. kompenzační krabice. Ta má za úkol korigovat odchylku, která vznikne z důsledku systematických chyb. Dále je možné, jak již bylo na začátku tématu uvedeno, využít lázeň, kde je srovnávací teplota udržována pomocí termostatu viz obrázek 23.



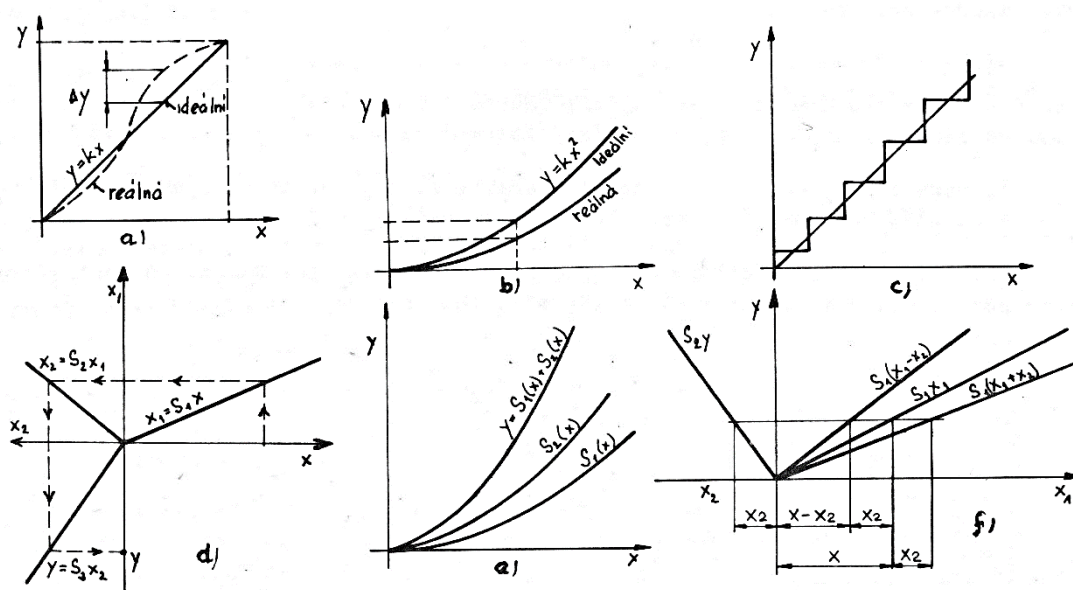
Obrázek 23 - Uspořádání termočlánku v zapojení s termostatem [2]

3.3 Charakteristiky elektrických teploměrů

Charakteristiky elektrických teploměrů se dají rozdělit na dvě skupiny. Jednak můžeme porovnávat vlastnosti, které jsou nezávislé na čase. Těmi jsou tzv. statické charakteristiky, pod které spadá právě statická charakteristika, dále funkční vlastnosti jako je citlivost, přesnost, spolehlivost a životnost a na konec i různé informační vlastnosti jako je rozsah, využití apod. Druhou skupinou jsou dynamické charakteristiky, které jsou naopak závislé na čase a sledují změnu měřené veličiny. Do této skupiny se řadí převážně přechodová a rychlostní charakteristika. V následující části této práce si proto rozebereme ty nejdůležitější z nich.

3.3.1 Statické charakteristiky teploměrů

Statická charakteristika udává závislost výstupního signálu na měřené veličině. V našem případě elektrických teploměrů to je průběh změny odporu či elektromotorického napětí v závislosti na změně teploty. Řídí se podle fyzikálních zákonů, tudíž pro každý stejně vyrobený teploměr je tato charakteristika stejná.



Obrázek 24 - Různé typy statických charakteristik [3]

Přesnost a citlivost jsou spolu velmi svázány. Na obě tyto charakteristiky mají velký vliv chyby, největší pak šum, který mění výstupní signál nezávisle na reálné změně. Citlivost je definována jako schopnost přístroje reagovat na změnu měřené veličiny.

$$C = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} = f'(x) \quad (16)$$

kde

Δy je změna hodnoty měřené veličiny udaná přístrojem

Δx je požadovaná hodnota měřené veličiny odpovídající nejmenšímu dílku stupnice (intervalu stupnice)

Přesnost charakterizuje schopnost přístroje udávat správnou hodnotu měřené veličiny. Podle chyb, které mohou v měření nastávat, určujeme třídu přesnosti přístroje. Ta je dána maximální absolutní chybou (Δy_{pmax}) na celém měřicím rozsahu (M).

$$T_p = \frac{\Delta y_{pmax}}{M} * 100 \quad (17)$$

Třídou přesnosti je tedy definována relativní dovolená chyba v %, kterou přístroj může udávat a výsledné měření je stále považováno za správné. Dle ČSN rozeznáváme následující třídy přesnosti: 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 1,5 - 2,5 - 5.

V poslední době se však dovolená chyba určuje odlišněji. Za pomoci nejistot typu A, vyplývající z náhodných chyb, a nejistot typu B, které jsou způsobeny známými příčinami, v kombinaci s maximální hodnotou měřené veličiny ji spočítáme jako

$$\Delta_{dovolená} = A + Bx_{max} \quad (18)$$

Poslední důležitou charakteristikou je rozsah měřených teplot. Jak jsme již v předchozích částech měli možnost vidět, každý teploměr má jiný rozsah. Je to dáno jeho konstrukcí a použitím materiálu, tudíž fyzikálními a chemickými omezeními. Překročení tohoto rozsahu by mohlo způsobit zničení teploměru.

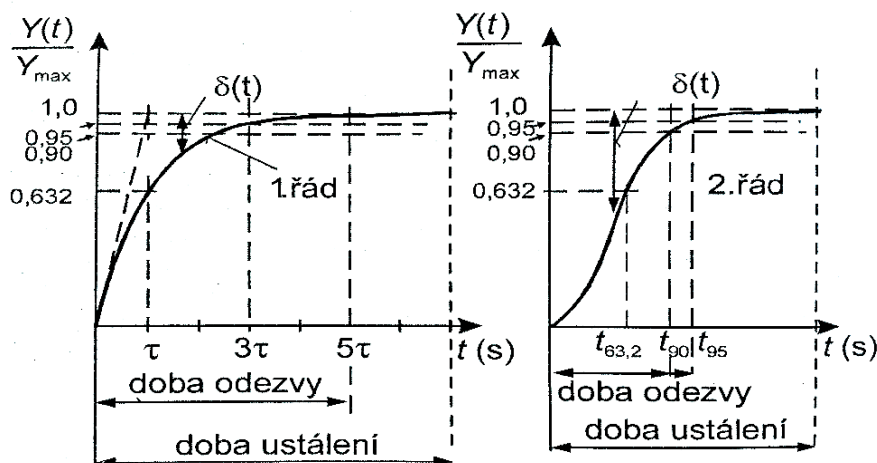
3.3.2 Dynamické charakteristiky teploměrů

Dynamické charakteristiky jsou velmi důležitými vlastnostmi, protože nám popisují, jak teploměr reálně měří teplotu. Jsou popsány diferenciálními rovnicemi s konstantními koeficienty a nejčastěji pro teploměry využíváme rovnice prvního či druhého řádu.

$$a_n Y^{(n)} + \dots + a_2 \ddot{Y} + a_1 \dot{Y} + a_0 Y = X \quad (19)$$

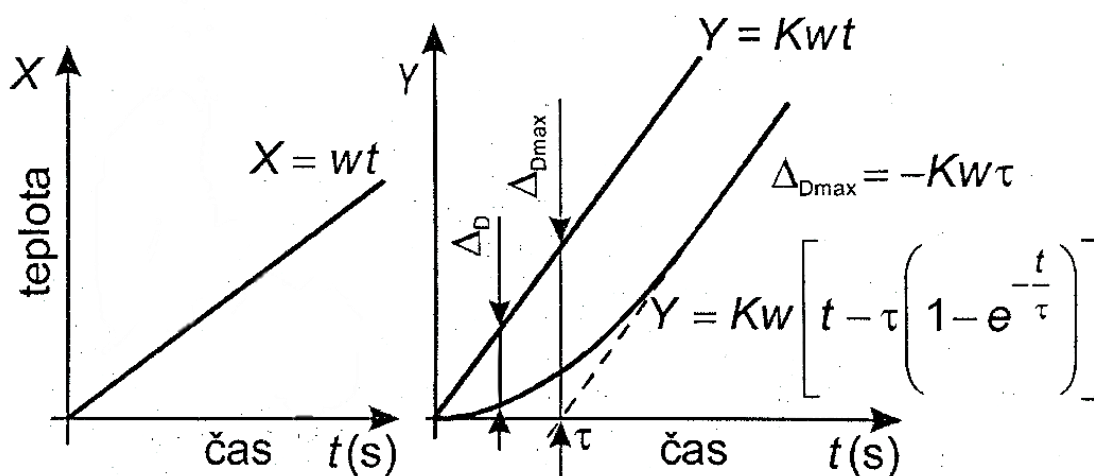
Graficky tyto charakteristiky popisujeme přechodovou charakteristikou, což je změna na tzv. jednotkový skok. To znamená, že měřená veličina z konstantní hladiny se okamžitě zvedne na jinou konstantní hladinu. Teploměr na tuto změnu začne reagovat s určitou prodlevou, tzv. dobou zpoždění, která je dána konstrukčními vlastnostmi. Senzor umístěný volně má tuto dobu velmi krátkou, avšak senzory umístěné například v jímce, mohou reagovat na takovou změnu v řádech sekund, než se jímka nahřeje a přenesení tepla na senzor. Následuje fáze, kde teploměr již reaguje na změnu teploty a zaznamenává ji, než nabyde své nominální hodnoty. Tato fáze je popsána tzv. dobou odezvy, což je trojnásobek časové konstanty teploměru a dosahuje v tomto bodě více než 99 % nominální hodnoty změny teploty. Časová konstanta je zpravidla čas, za který teploměr dosáhne 63,2 % nominální změny teploty a vychází z diferenciální rovnice. Dalším parametrem, který lze z přechodové charakteristiky odečítat je doba ustálení. To je čas, za který senzor dosáhne úplné změny teploty v reakci na jednotkový skok.

Snímače reagující přímo na změnu teploty jsou popsány rovnicí prvního řádu. Naopak snímače ukryté v jímkách snímají převáděné teplo později s pomalejším nástupem a popisujeme je proto rovnicí druhého řádu.



Obrázek 25 - Přechodová charakteristika 1. a 2. stupně [2]

Dalším způsobem, jak zjistit dynamické charakteristiky teploměrů je rychlostní charakteristika. Ta na rozdíl od přechodové měří změnu konstantně se měnící veličiny. Zde pak můžeme odečíst z prvotního náběhu časovou konstantu, protože zbylý průběh teploty se bude měnit stejně, jako měníme měřenou veličinu. Toho však v této práci využívat nebudeme, protože na ohřívání či ochlazování teploměrné látky by mohlo mít vliv hodně okolních faktorů.



Obrázek 26 - Rychlostní charakteristika prvního řádu [2]

4 MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ

Úkolem této práce je vzájemně srovnat různé typy teploměrů a určit podle jejich charakteristik následné využití. Je proto nutné provést měření a určit přechodové charakteristiky teploměrů, díky kterým určíme časovou konstantu, respektive dobu odezvy. K tomu byla vybrána sada teploměrů Didaktik 10 od firmy Sensit. Tyto teploměry je následně potřeba vhodným způsobem propojit s výpočetní technikou, která je schopna zpracovat jejich výstupní signály. Proto byly zajištěny moderní tzv. teplotní převodníky PXN30.A vyráběné ve firmě Rawet s distribucí firmou Sensit. Ty převádějí výstupní signál na standardizovaný tvar a je možné s ním následně lépe pracovat. Zpracování tohoto signálu je realizováno pomocí DAQ systému od firmy National Instruments, konkrétně USB kartou NI-6008 a jejich softwaru LabVIEW NXG.

4.1 Teploměry sady Didaktik 10, ZPA EKOREG a Metex



Obrázek 27 - Sada teploměrů DIDAKTIK 10 od firmy sensit [10]

Sada teploměrů Didaktik 10 vznikla jako učební pomůcka. Obsahuje celkem 8 kabelových teploměrů, redukční přípravek a CD s učebními texty. Teploměry obsažené v této sadě jsou převážně odporové (Pt100, Pt1000 a Ni1000), ale obsahuje také termočlánky typu K a polovodičový teploměr NTC. Pro tuto práci pak byly vybrány pouze konkrétní typy.

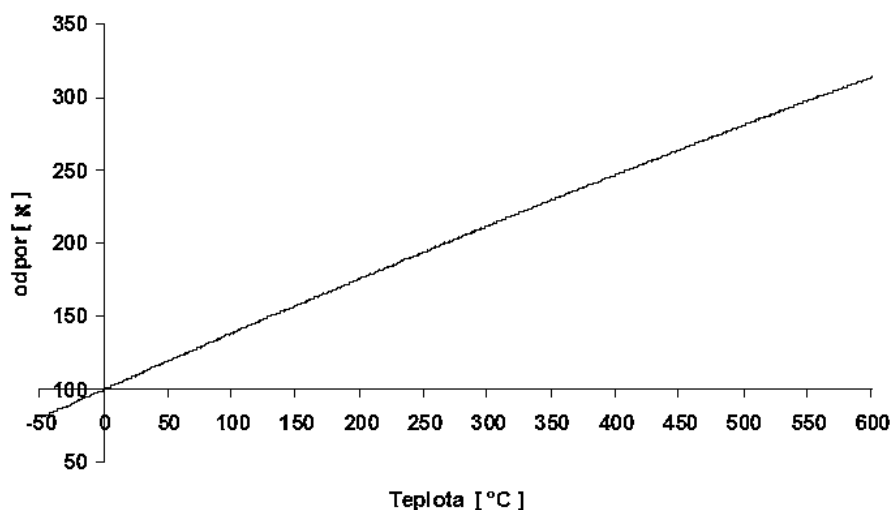
Teploměr Pt100/3850 a Pt1000/3850

- Využívá jako snímací prvek tenkovrstvý platinový odpor.
- Maximální rozsah pracovních teplot je -30 až 200 °C.
- Jmenovitý odpor při 0 °C je 100 Ω respektive 1000 Ω
- Dlouhodobá stabilita odporu je 0,03 % po 1000 hod. při teplotě 400 °C.
- Doporučený, respektive maximální ss měřicí proud je 1 mA, či 3 mA.
- Statická charakteristika je popsána rovnicemi:

$$R = 100_{(1000)} (1 + At + Bt^2 + C (t-100)t^3) \quad \text{v rozsahu teplot } -50 \text{ až } 0 \text{ °C}$$

$$R = 100_{(1000)} (1 + At + Bt^2) \quad \text{v rozsahu teplot } 0 \text{ až } 600 \text{ °C}$$

$$\text{kde} \quad A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1} \quad B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2} \quad C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-4}$$



Obrázek 28 - Statická charakteristika teploměru Sensit Pt100/3850 [10]

Teploměr Ni1000/5000 a Ni1000/6180

- Využívá jako snímací prvek tenkovrstvý niklový odpor.
- Maximální rozsah pracovních teplot je -60 až 250 °C.
- Jmenovitý odpor při 0 °C je 1000 Ω
- Dlouhodobá stabilita odporu je 0,1 % po 1000 hod. při teplotě 250 °C.
- Doporučený, respektive maximální ss měřicí proud je 0,3 mA, či 1 mA.
- Statická charakteristika je popsána rovnicemi:

Ni1000/5000

$$R = 1000 (1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad \text{v rozsahu teplot } -60 \text{ až } 250 \text{ } ^\circ\text{C}$$

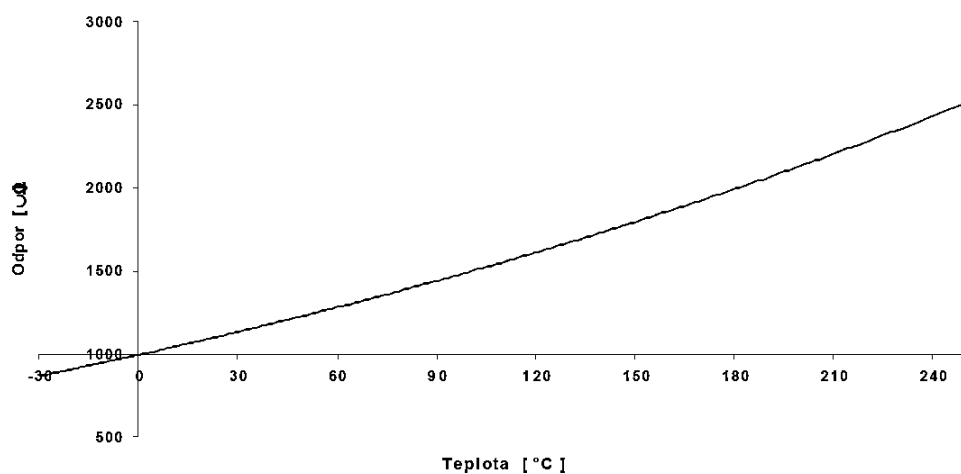
$$\text{kde } A = 4,427 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad B = 5,172 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \quad C = 5,585 \cdot 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$$

Ni1000/6180

$$R = 1000 (1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6) \quad \text{v rozsahu teplot } -60 \text{ až } 250 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{kde } A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

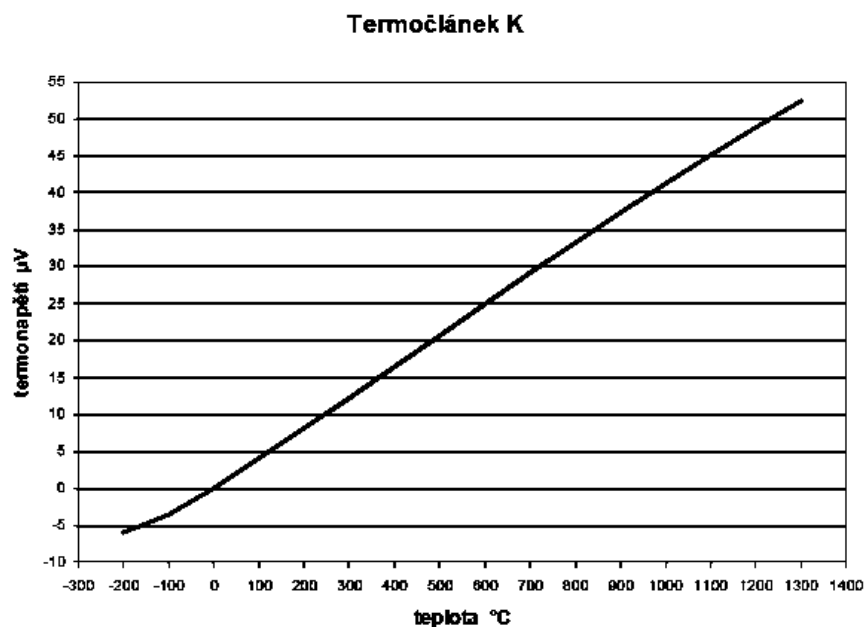
$$B = 6,650 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \quad D = -2,00 \cdot 10^{-17} \text{ } ^\circ\text{C}^{-6}$$



Obrázek 29 - Statická charakteristika teploměru Sensit Ni1000/5000 [10]

Termočlánek Typ K

- Využívá jako snímací prvek termočlánek typu K
- Maximální rozsah teplot je -30 až 180 °C
- Referenční napětí při 0 °C je 0,00 mV
- Rovnice statické charakteristiky viz. příloha typK.pdf



Obrázek 30 - Graf statické charakteristiky pro termočlánek typu K [10]

Teploměr Pt100 klasický od firmy ZPA EKOREG s.r.o.

- Snímací prvek je vinutý platinový drátek
- Maximální rozsah pracovních teplot je -200 až 650 °C
- Měřicí proud je 1 mA
- Dvou vodičové zapojení
- Jmenovitý odpor 100 Ω



Obrázek 31 - Klasický odporový snímač Pt100 [13]

Termočlánek Typ K z příslušenství multimetru Metex

- Snímací prvek je termočlánek typu K
- Měřicí rozsah -60 až 250 °C
- Další informace nejsou k dispozici

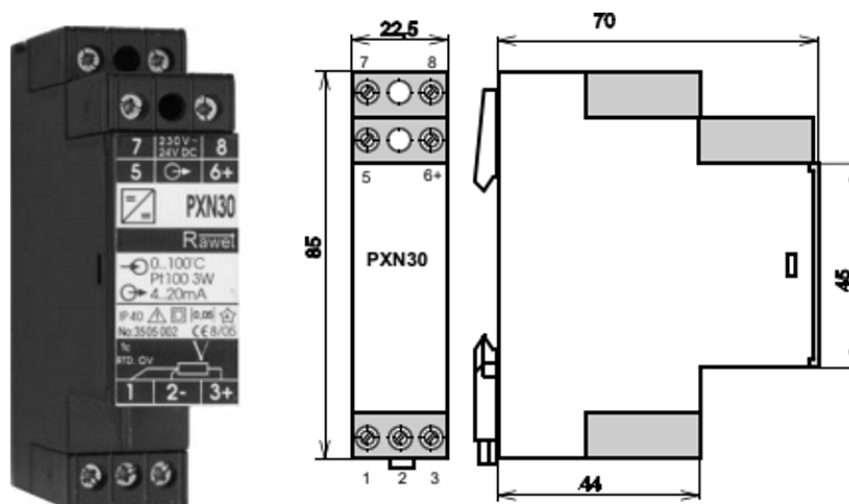


Obrázek 32 - Termočlánek z příslušenství multimetru Metex[14]

4.2 Převodník Rawet PXN30.A

Jedná se o tzv. inteligentní převodník teploty. Protože v běžné praxi nelze využívat přímo signálu z teploměru (výstupem teploměrů jsou malé změny odporu či napětí), využívají se převodníky, které na svém vstupu signál zesílí a vhodně upraví. Převodník je vybaven integrovanými obvody, které zajišťují linearizaci signálu podle tabulkových hodnot uložených v převodníku. Výstupem jsou unifikované proudové či napěťové signály, se kterými lze lépe pracovat a aplikovat na ně obecně naprogramovaný software. Převodníky jsou tudíž téměř nepostradatelným prvkem. Obecně jsou takovéto převodníky nazývány jako programovatelné, protože umožňují zapojení velké škály teploměrů, volbu rozsahů a typu výstupu. Shrnutí funkcí převodníku PXN30.A:

- Připojení termočlánků typu J, K, T, B, L, S, F, E, N, R, C, D, G, U, M
- Připojení odporových teploměrů Pt100, Pt1000 Ni100, Ni1000
- Výstupní signály aktivní 4..20mA, 0..20mA, 0..10V nebo inverzní převod
- Pomocné napájení galvanicky odděleno 19 – 300VDC a 90 - 250 VAC
- Programování pomocí softwaru Rawet Studio
- Interní kompenzace studeného konce pro termočlánek
- Dvou a tří vodičové zapojení teploměrů

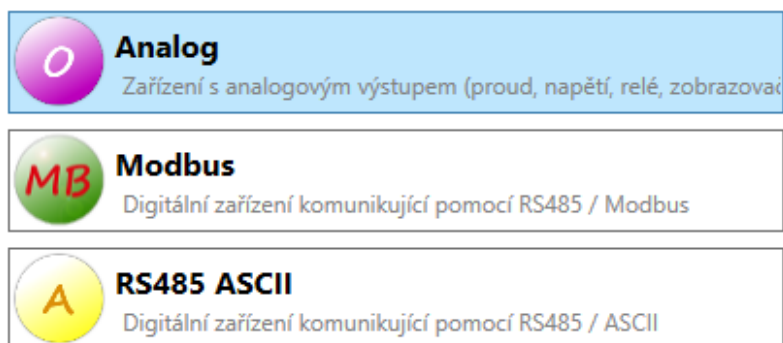


Obrázek 33 - Převodník PXN30.A a jeho rozměrový náčrt (mm) [12]

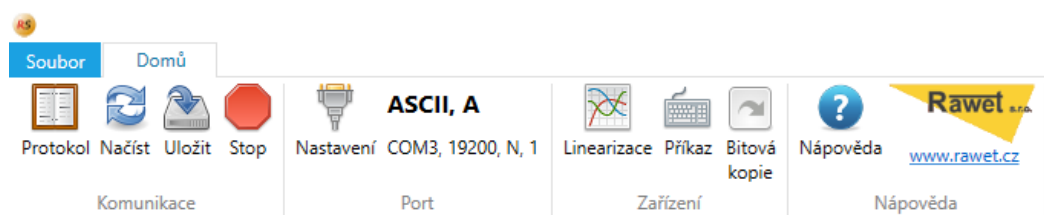
4.3 Rawet studio 2 3.1.0

Jedná se o velmi jednoduchý software spravovaný firmou Rawet. S jeho pomocí lze nastavovat převodníky na požadované teploměry a rozsahy. Obsahuje databázi linearizací, které jsou spolu s přesným nastavením nahrány přes AY-USB adaptér do převodníku. Adaptér připojíme k převodníku a do počítače. Zapneme aplikaci Rawet Studio. Následný postup s popisem je zřejmý z obrázků 34 až 38.

Vyberte typ zařízení

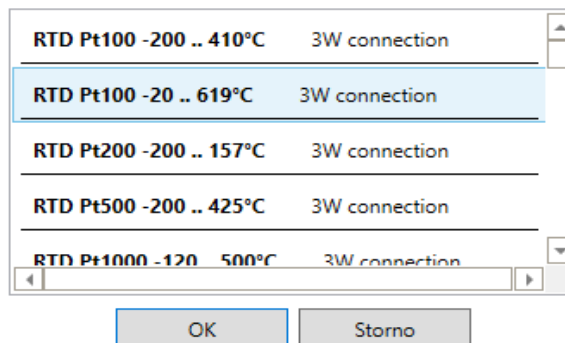


Obrázek 34 - Převodník PXN30.A má analogový výstup



Obrázek 35 - V nabídce se automaticky zobrazí připojený port (COM3)

Vyberte linearizaci pro nahrání do zařízení



Obrázek 36 - V nabídce linearizace zvolíme teploměr a přibližný rozsah měřených teplot



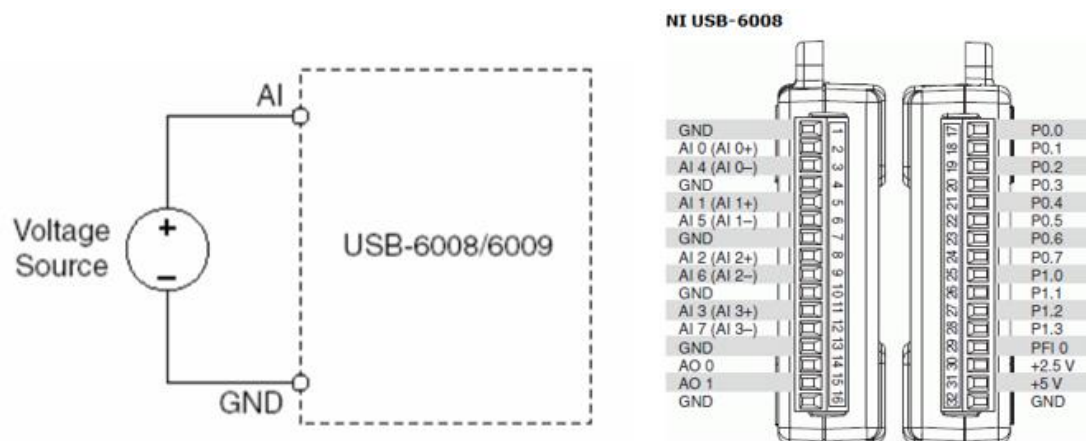
Obrázek 37 - V záložce zařízení vidíme úspěšně nahranou linearizaci

Obrázek 38 - Vstup pro RTD je vždy 3-vodič a níže upravíme konkrétní měřicí rozsah, v nabídce klikneme na načíst

4.4 DAQ karta USB NI-6008

Data acquisition systémy slouží ke zpracování analogových či digitálních signálů. Tyto speciální zařízení přijímají signály vysílané ze senzorů, které následně upraví a převedou na číslicový signál, se kterým následně pracují softwary nebo je ukládán přímo do tabulek k pozdější analýze.

Tato karta je řazena mezi obvyčejnější zařízení, nicméně pro tuto práci je zcela dostatečná. Přijímá analogové i digitální signály s rozlišením 12 bitů. Při měření jednoho kanálu je maximální vzorkovací frekvence 10kS/s. Je vybavena dvěma analogovými výstupy. Maximální počet zapojených analog. vstupů je závislý na způsobu připojení. Diferenciálně lze připojit 4 analogové vstupy, na společnou zem (RSE) 8 analogových vstupů. V této práci zapojujeme vstupy na společnou zem, kdy kladný pól připojujeme na měřicí pin (AI) a záporný pól na zem (GND). Názorně je toto zapojení předvedeno na obrázku 39. Maximální napětí takto zapojeného analogového vstupu je ± 10 V.



Obrázek 39 - Zapojení na společnou zem (RSE) a pinout této DAQ karty [11]

4.5 Měřicí rozhraní v LabVIEW NXG

Jedná se o software, který je firmou National Instruments (NI) doporučován k tomuto typu vyžití. Obsahuje předpřipravené moduly, ale také umožňuje vytvoření vlastních VI projektů. V této práci byl zvolen připravený modul pro zobrazování analogových signálů (*Analog input*). Tento modul zobrazuje přímým výstupem data do grafu nebo tabulky a vyjma změny nastavených parametrů jej nelze dodatečně upravovat. Naměřená data je proto třeba exportovat a upravovat je či zpracovávat externě.

Nastavení a následné použití je opět velmi jednoduché. Připojená DAQ karta pomocí USB kabelu se automaticky načte a v dialogovém okně NI Device Monitor, kde můžeme otevřít různé informace a nastavení této karty, lze spustit LabVIEW NXG či jiný nainstalovaný software od NI.

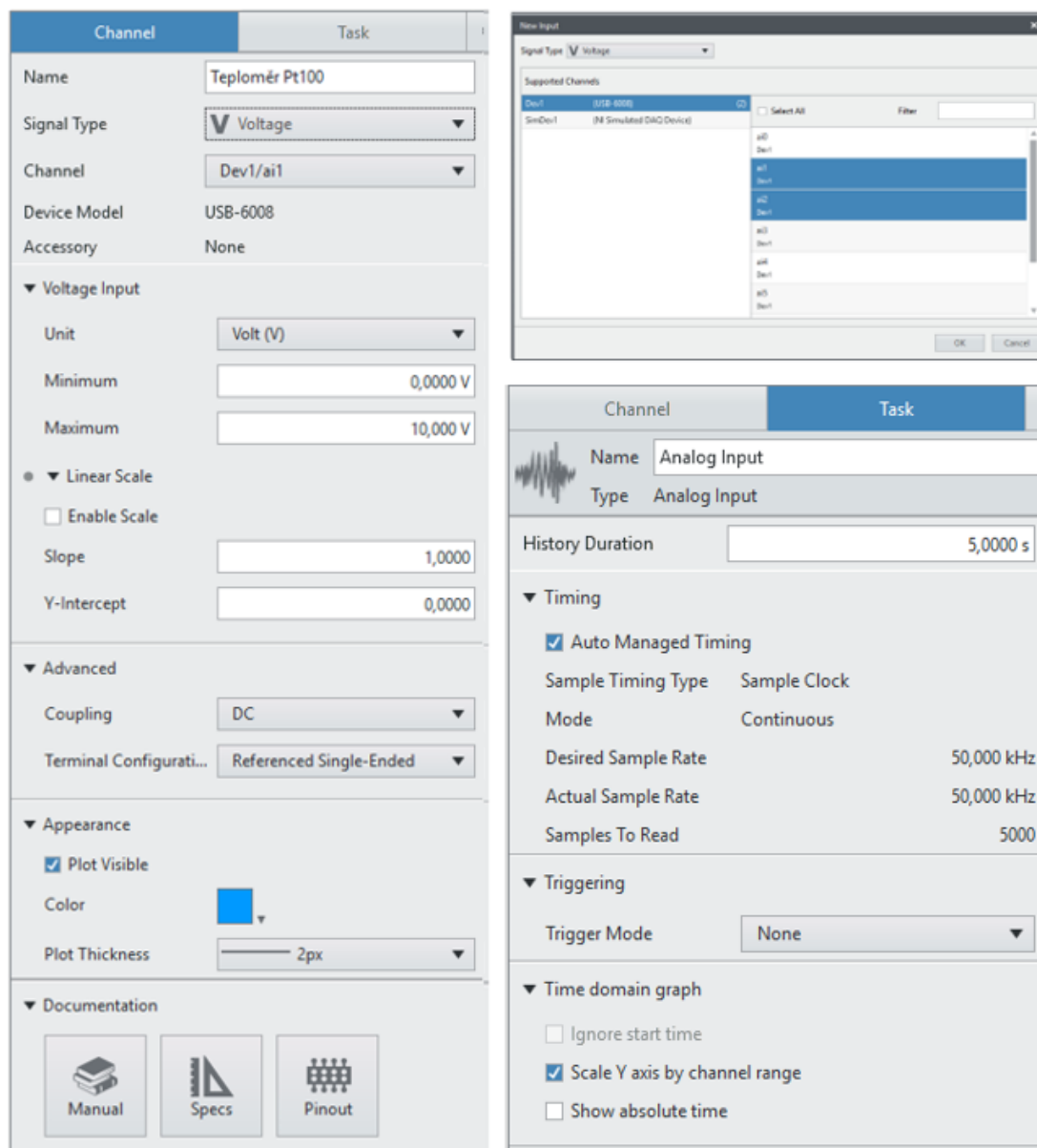
Po spuštění přepneme na záložku *PROJECT* a následně zvolíme *MEASUREMENT PANEL*. Zde je modul *Analog Input*. Po spuštění tohoto modulu se založí nový projekt, který si následně již ukládáme s vlastními nastaveními a provedenými měřeními.



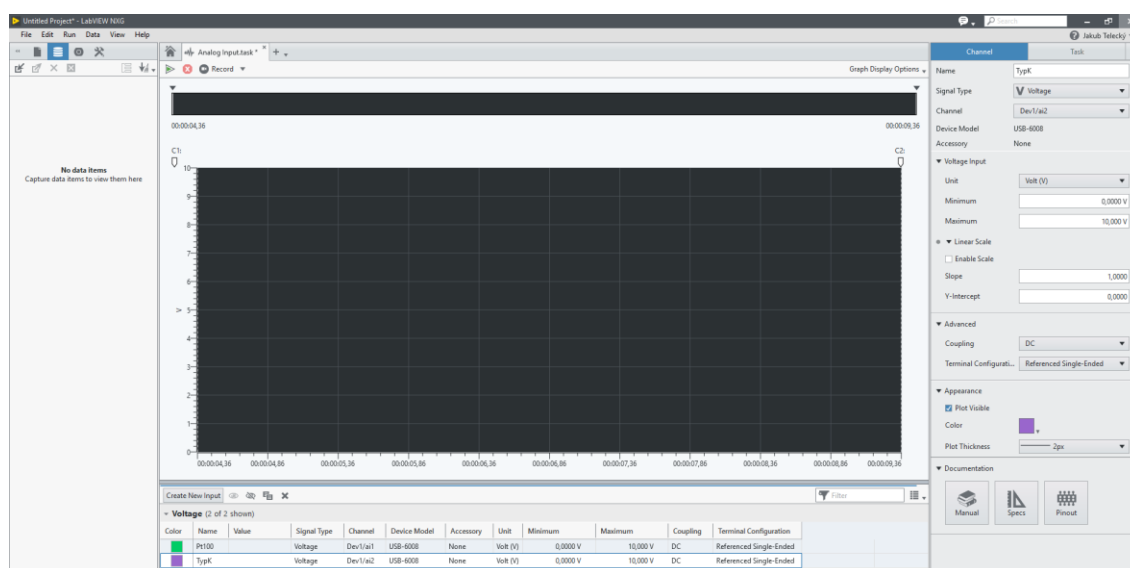
Obrázek 40 - Založení nového projektu v LabVIEW NXG

Je-li připojená DAQ karta, automaticky se nastaví zobrazení signálu na prvním analogovém portu. Pro další práci je potřeba si tento vstup přenastavit nebo smazat a založit vlastní vstupy, které odpovídají pinům, kam jsou přivedeny výstupy z převodníků. Jako typ signálu zde volíme *Voltage*, protože tak jsou nastaveny převodníky. V boční liště, v záložce *Channel*, nastavujeme vstupní rozsah (0-10 V) a způsoby zapojení (Diferenciální nebo RSE). V druhé záložce *Task* lze nastavit vzorkovací frekvenci.

V tomto postranním panelu se provádí taktéž grafické úpravy. Nastavujeme zde měřítko grafu, barevně rozlišujeme jednotlivé křivky výstupů, které zde můžeme také pojmenovat, abychom později věděli, jaký teploměr byl využit.



Obrázek 41 - Založení nových vstupů a jejich nastavení

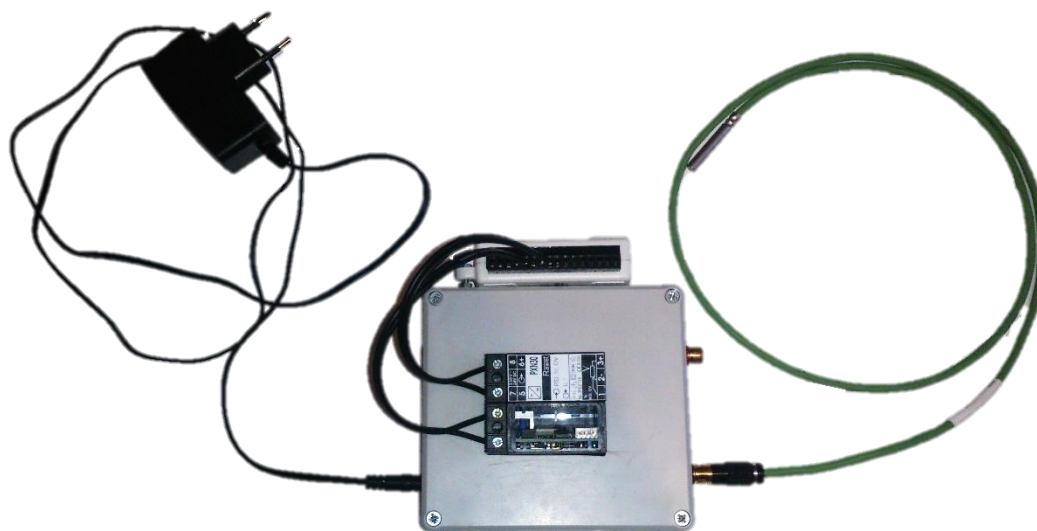


Obrázek 42 - Připravené rozhraní pro měření

Takto připravené rozhraní zaznamenává celý rozsah výstupů teploměrů, protože jejich signály jsou převodníkem upraveny na standardizovaný tvar 0-10 V. Tyto data lze poté exportovat ve formátu .csv buď z daného zobrazeného grafu (pozor, maximální zobrazovací doba lze nastavit na 50 s) nebo je lze nahrávat tlačítkem *Record* a následně celé měření exportovat ke zpracování. Výstupem jsou tedy hodnoty napětí, které uživatel podle zvoleného rozsahu měření teploměru převede na °C (pro rozsah 0-100 °C platí převod $10\text{ °C} = 1\text{ V}$) nebo využije vlastní software.

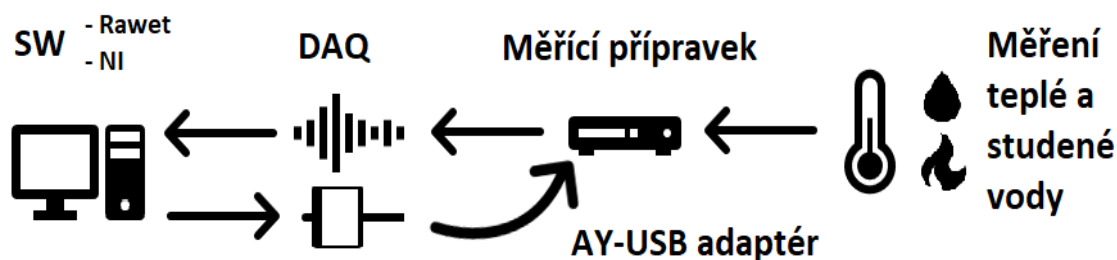
4.6 Sestavení měřicího přípravku

Měřicí přípravek se skládá z výše uvedených prvků, bezpečně oddělených a uzavřených v pevné krabici. Teploměry sady Didaktik 10 jsou zakončeny konektorem Cinch, proto jsou na přední straně připraveny jejich protikusy, které jsou uvnitř krabice spojené měděnými stíněnými vodiči s převodníky. Stejným vodičem je u převodníku pro RTD teploměry propojena svorka 1 a 2. V zadní stěně krabice je protikus konektoru napájení (5,5 / 2,1 mm). Ten je spojen s převodníky obyčejným izolovaným měděným vodičem. Převodníky jsou ukotveny na DIN liště a pro jejich obsluhu jsou uloženy s přesahem ven z krabice. Na konektor ve vrchní části převodníku připojujeme AY-USB adaptér. Z výstupů převodníku pak měděnými stíněnými dráty vedeme signál na svorkovnici.



Obrázek 43 - Krabice se zapojeným napájením a termočlánkem TypuK (shora je vidět programovací konektor)

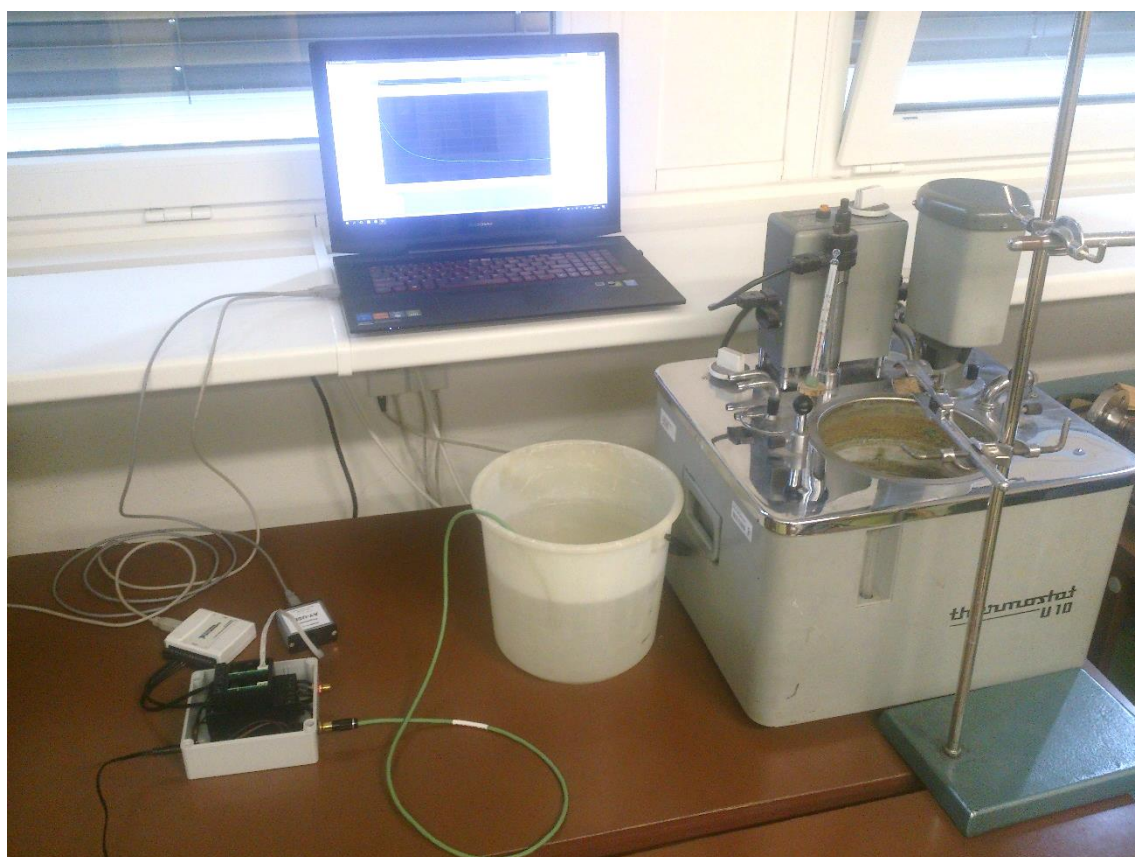
4.7 Sestavení měřícího pracoviště



Obrázek 44 - Schéma sestavení měřícího pracoviště

Měřící pracoviště se skládá z počítače, na kterém je potřeba mít nainstalovaný software LabVIEW NXG dostupný z [17] a Rawet Studio 2 dostupný z [18]. Počítač je propojen USB A-B kabelem s DAQ kartou NI-6008, do které je zasunuta svorkovnice připojených výstupů z měřícího přípravku. Ten je dále propojen přes AY-USB adaptér opět USB A-B kabelem s počítačem a jsou přes něj nahrávány nastavení převodníků.

Sensory měřícího přípravku měří teplotu teplé nebo studené vody. Signál je veden přes převodníky měřícího přípravku a výstupy snímá DAQ karta. Ta převádí analogový signál na diskrétní a odesílá jej do počítače ke zpracování a vyhodnocení.



Obrázek 45 - Foto měřícího pracoviště z laboratoře, ochlazování termočlánku TypuK

5 OVĚŘOVACÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Tato praktická část počítá s minimálními znalostmi nabytými v předchozí kapitole **4 Měřicí pracoviště** aneb nastudováním práce s ovládacím softwarem a znalostí konstrukčních vlastností a rozsahů teploměrů. V opačném případě by mohlo dojít k poškození měřicí či výpočetní techniky. K úplnému pochopení a možnosti zpracování naměřených dat je nutné mít nastudovanou kapitolu **3 Elektrické teploměry**.

5.1 Postup práce na pracovišti

První částí je příprava měřicího pracoviště. Pro zjišťování časové konstanty je zapotřebí vyvolat skokovou změnu teploty. Toho lze docílit například měřením teplé a studené vody. K co nejlepšímu průběhu měření je vhodné udržovat teploměrné látky v konstantní teplotě, například pomocí termostatu. V našem případě si nahřejeme pomocí termostatu vodu na 80 °C a pro skokovou změnu využijeme studenou vodu z kohoutku, natočenou do velkého kýble, aby nedocházelo k rychlému ohřevu z okolí (17-23 °C).

Následujícím krokem je příprava měřicího přípravku. K tomu je zapotřebí vybrat si jeden nebo dva teploměry, kterými budeme měřit a zjišťovat jejich časovou konstantu. Ty připojíme do cinch konektorů na přední straně krabičky a je zapotřebí nahrát jejich linearizace do převodníků. Pod vrchním krytem převodníku je konektor, do kterého je nutné připojit AY-USB adaptér. Přes něj ze softwaru Rawet Studio nahrajeme příslušné linearizace, jak je rozebráno v kapitole **4.3 Rawet Studio 2 3.1.0**. Po úspěšném nahrání odpojíme konektor a připojíme výstupní svorkovnici ke kartě NI USB-6008. Výstupní konektory jsou připojené v zapojení RSE a signál je veden po pinech AI1 a AI2 (možné i jiné zapojení podle obrázku 39 v kapitole **4.4 DAQ karta NI USB-6008**).

Po spuštění a nastavení měřicího softwaru dle kapitoly **4.5 Měřicí rozhraní v LabVIEW NXG** je měřicí pracoviště nachystáno na samotné měření. V tuto chvíli je možné připojit napájecí adaptér, protože jsme schopni identifikovat případné problémy.

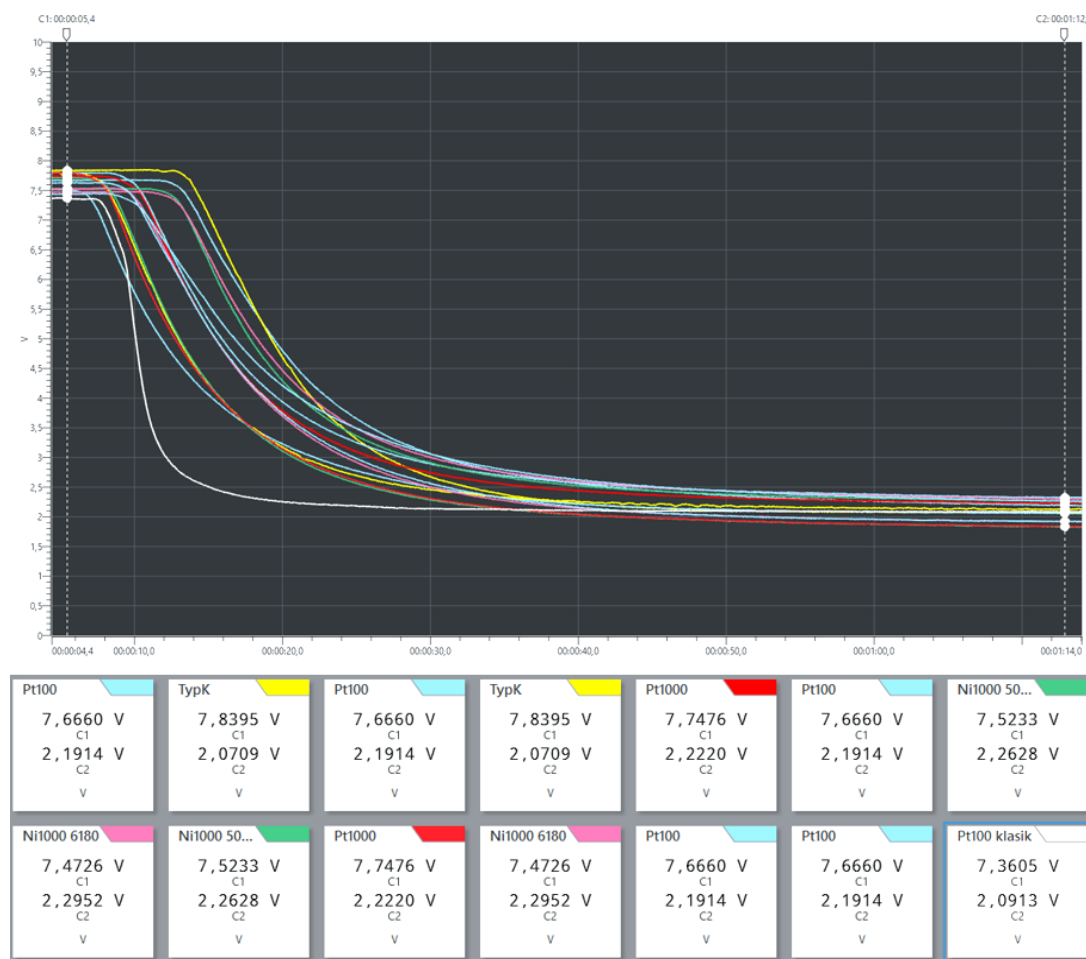
V této práci je skoková změna realizována ochlazováním. Proto teploměry vložíme do teplé vody a necháme je tři minuty tzv. nahřát (to platí pro teploměry Sensit, další typy je vhodnější sledovat přes spuštěný software). Po tomto čase měří teploměry již ustálenou teplotu a můžeme zahájit vlastní měření. To provedeme kliknutím na tlačítko *Record* abychom mohli následně zpracovávat data. Teploměry z teplé vody co nejrychleji přemístíme do kýble se studenou vodou a pro minimalizaci negativních vlivů přenosu tepla s nimi pomalu hýbeme, aby kolem nich docházelo k proudění teploměrné látky. Měření zastavíme pomocí tlačítka stop znázorněného červeným kolečkem s bílým křížem. Takto naměřená data exportujeme ve formátu .csv a můžeme je zpracovávat.

Zpracovaná data lze poté zpět importovat a již ve formátu °C je nechat zobrazit a získat tak grafy průběhu teploty v závislosti na čase. Z tohoto grafu lze poté jednoduše

odečíst původní a konečnou teplotu, spolu s potřebnými hodnotami času. Časovou konstantu získáme tak, že spočítáme rozdíl teplot a z grafu odečteme průsečík teploty, která má hodnotu 63,2 % změny teploty. Jako názorný příklad: $T_0=80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_K=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Změna teploty je rovna $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, z čehož 63,2 % je $37,92\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota při ochlazování, kdy odečítáme časovou konstantu, je proto $80-37,92\text{ }^{\circ}\text{C}$, což se rovná $42,08^{\circ}\text{C}$. Zobecněním na vzorec lze vyjádřit jako: $T_{\check{c}}=T_0-0,632*(T_0-T_K)$.

Toto měření můžeme následně opakovat, abychom dosáhli přesnějších dat, jelikož při přemísťování mezi nádobami dochází k velkým chybám. Pro měření s jinými teploměry je pak nutné opět pomocí Rawet Studio změnit linearizace, aby nedošlo k zcela chybnému měření, protože každý typ teploměru má jiné statické charakteristiky.

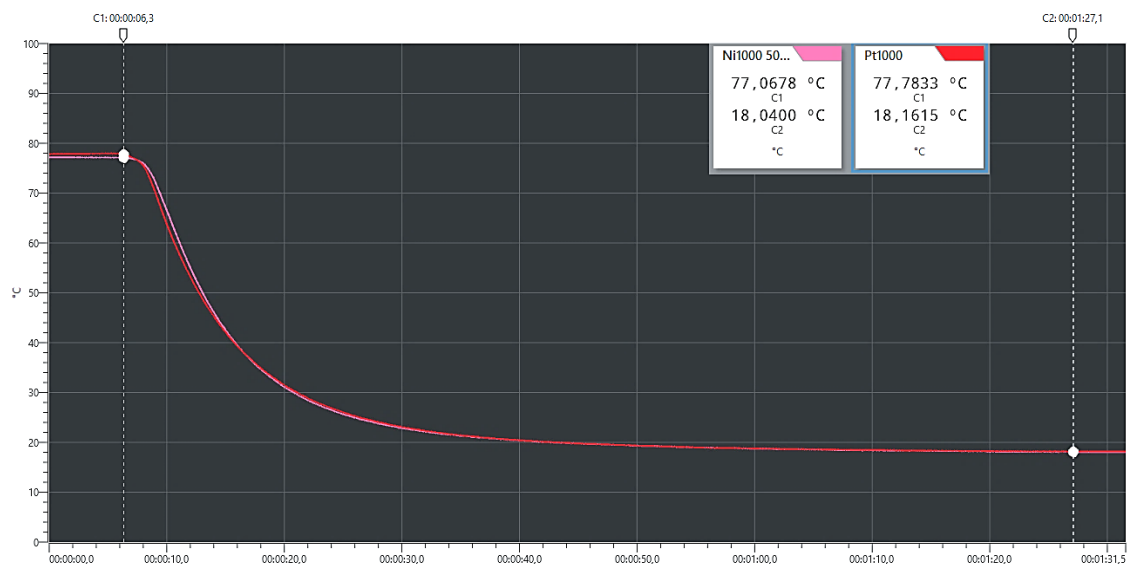
V tomto případě k měření byly využity všechny dříve zmíněné teploměry (některé opakovaně) a výsledný přímý výstup (V) části z nich je na obrázku 46 (kombinace po dvou měřeních, proto jsou křivky opožděné). Zpracovaná data převedená na $^{\circ}\text{C}$ jsou v následující podkapitole **5.2 Výsledky**.



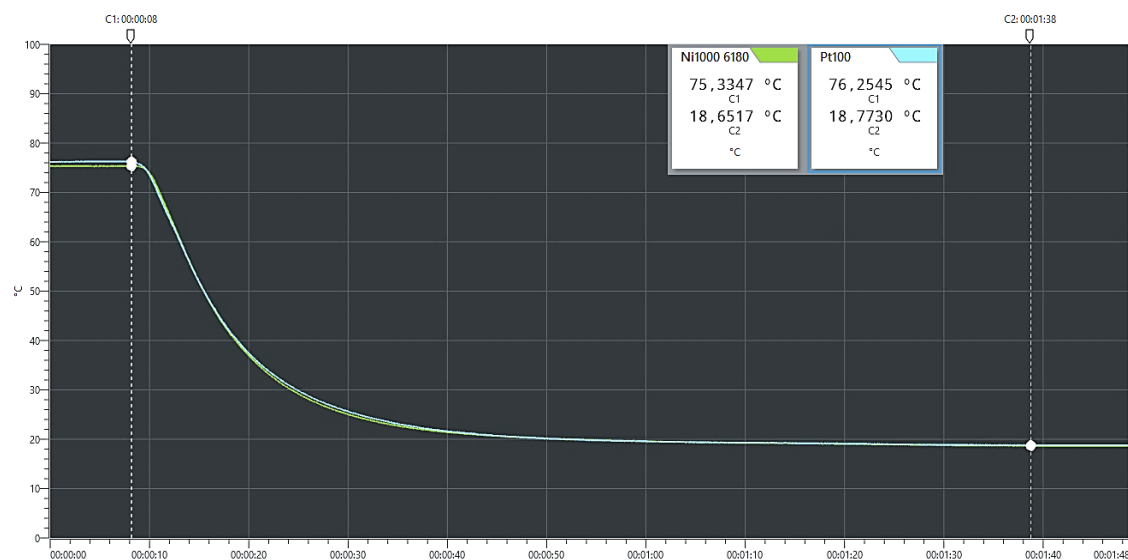
Obrázek 46 - Část naměřených výstupních signálů z převodníku ve standardizovaném tvaru 0-10 V

5.2 Výsledky

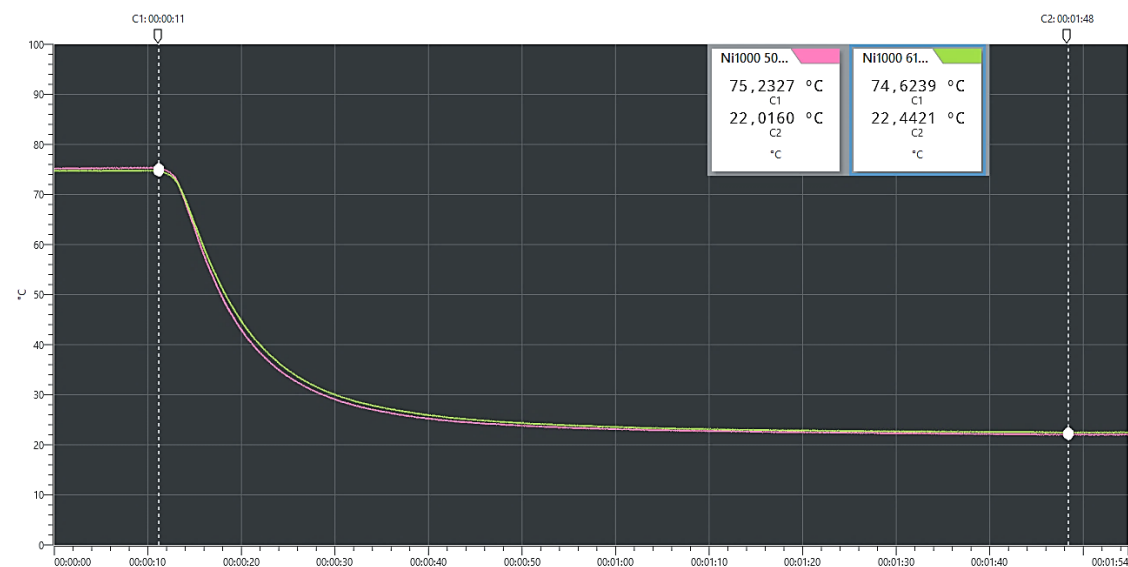
Zpracovaná data jsou importována zpět do LabVIEW NXG a zde hledáme stěžejní body, ze kterých určujeme časovou konstantu. Počáteční a konečná teplota je vždy vyznačena.



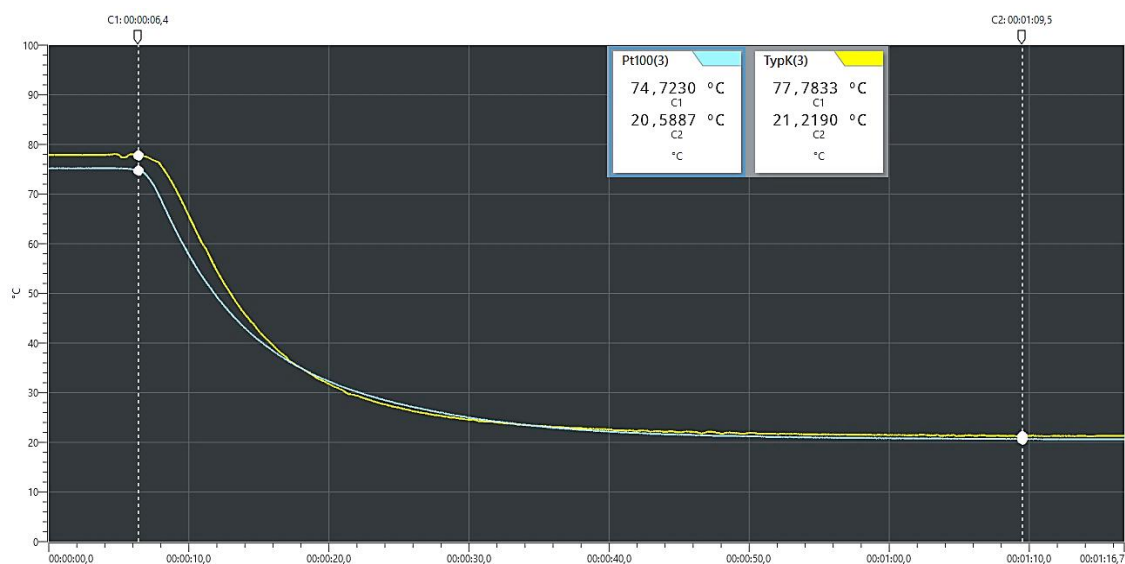
Obrázek 47 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Ni1000 5000 a Pt1000



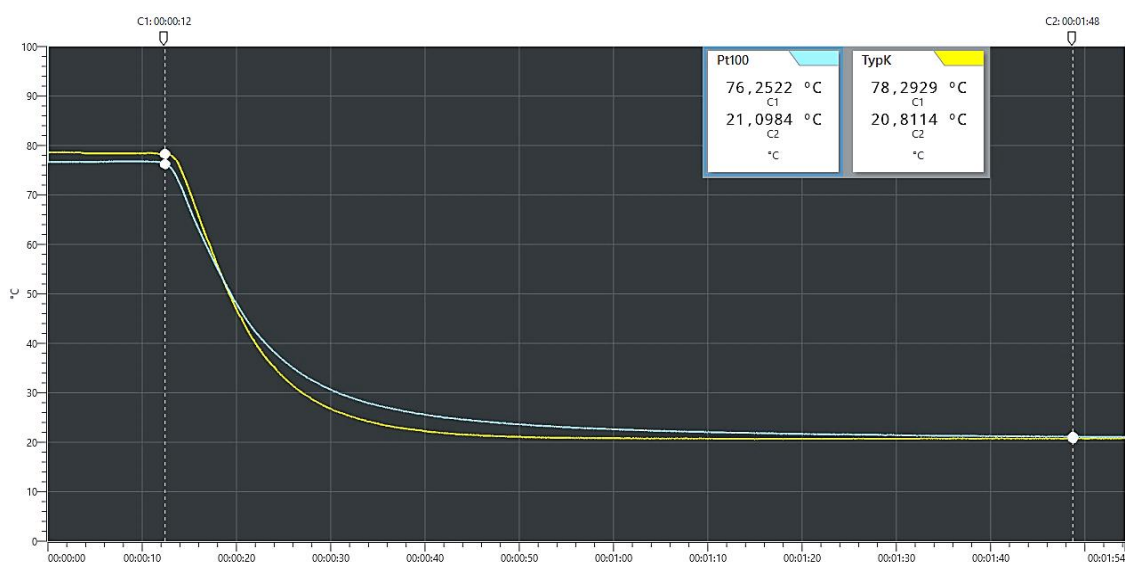
Obrázek 48 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Ni1000 6180 a Pt100



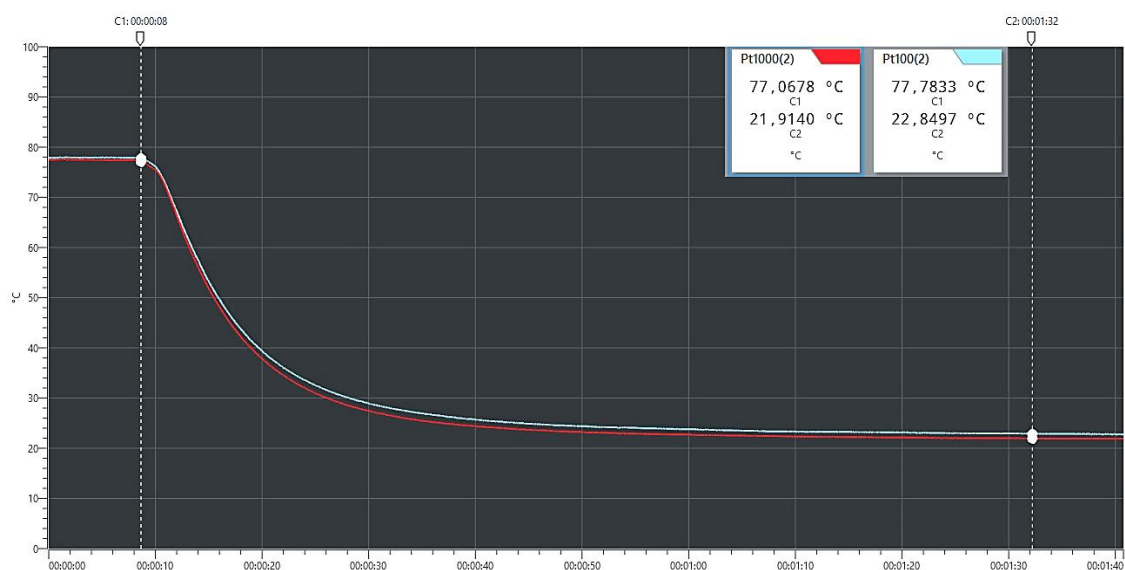
Obrázek 49 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Ni1000 5000 a Ni1000 6180



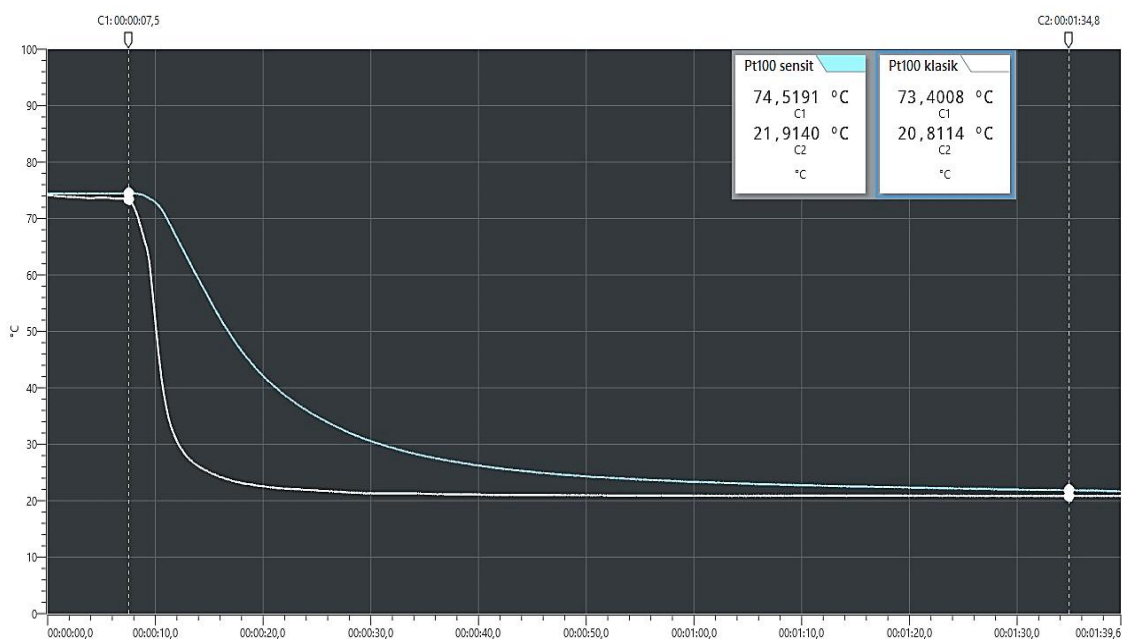
Obrázek 50 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Pt100 a TypK



Obrázek 51 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Pt100 a TypK

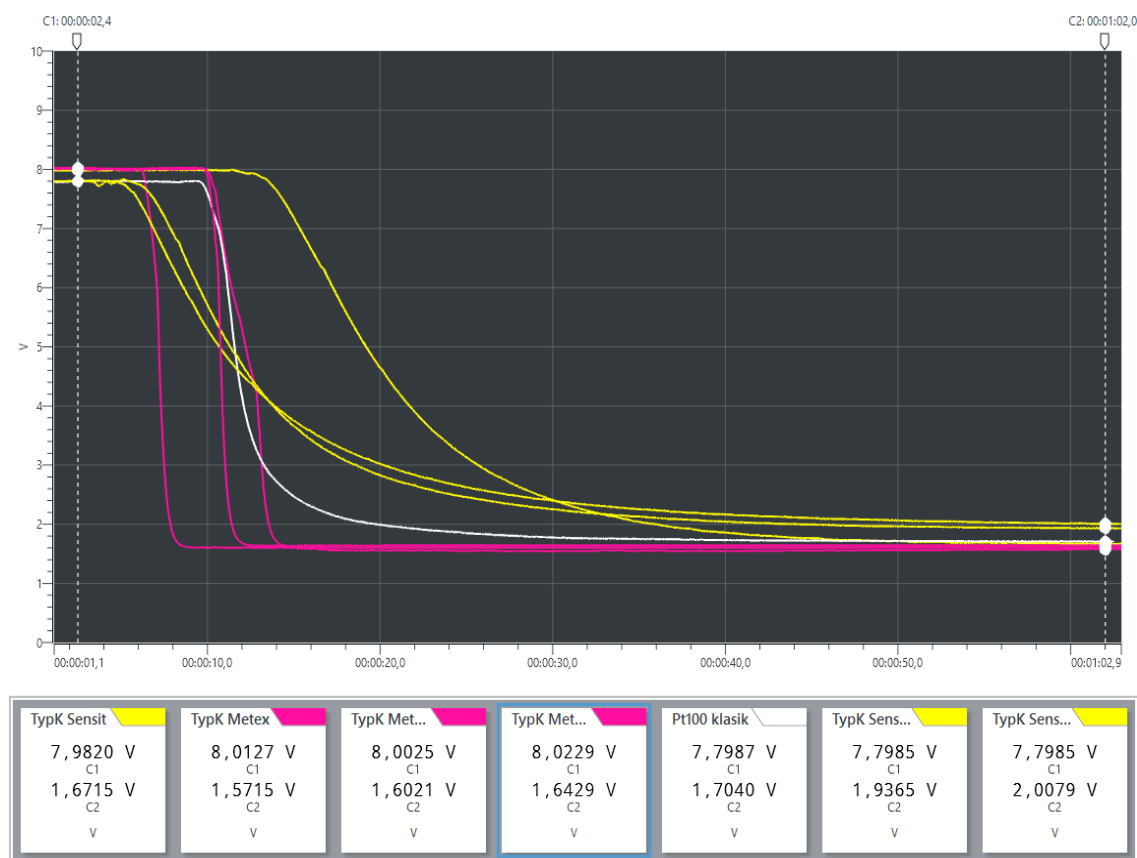


Obrázek 52 - Průběh teploty v závislosti na čase pro Pt1000 a Pt100



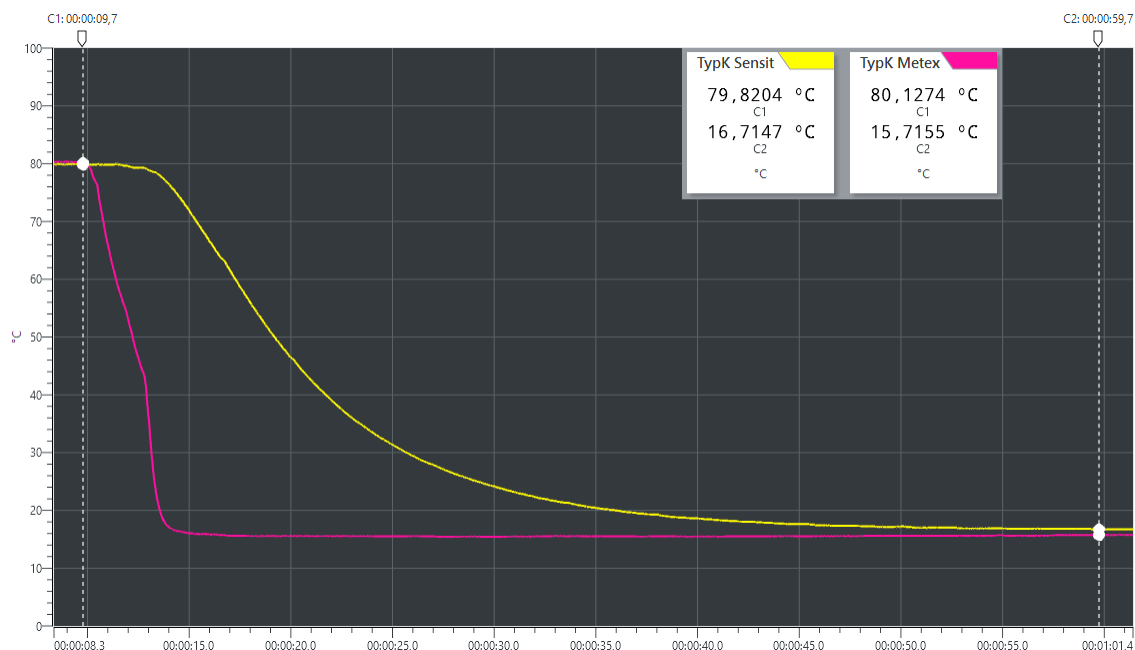
Obrázek 53 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Pt100 Sensit a Pt100 Ekoreg

Protože při měřeních bylo zjištěno, že provedení teploměrů s označením firmou Sensit TGL40 staví všechny tyto teploměry na podobné hodnoty, bylo provedeno ještě druhé doplňkové měření. Stejně jako v prvním měření tedy bylo postupováno podle návodu a výstupní signály před zpracováním, opět přímo vykreslené do grafů (V), jsou:

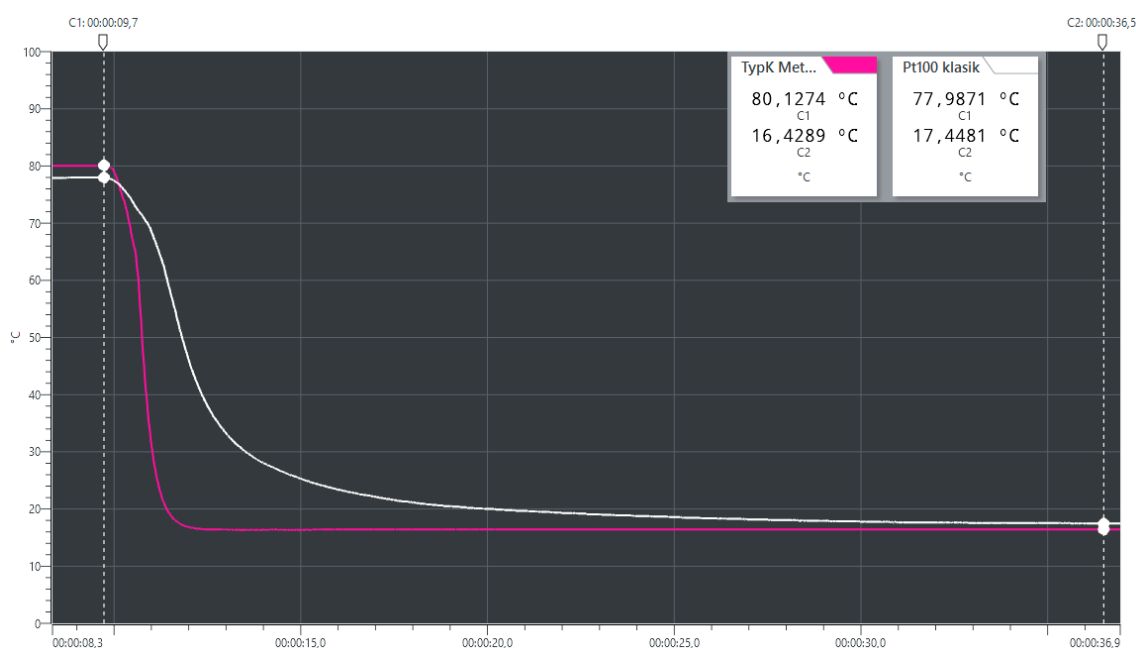


Obrázek 54 - Průběhy měřených signálů (V) z teploměrů v doplňkovém měření

Stejně jako v prvním měření byla data exportována a upravena na °C dle převodu. Výsledné grafy průběhů měření dodatečných kombinací ke srovnání:



Obrázek 55 - Srovnání průběhu měření termočlánků TypuK Sensit a Metex



Obrázek 56 - Srovnání holých snímačů, termočlánku TypuK Metex a Pt100 Ekoreg

5.3 Zhodnocení

Získaná data jsou v tabulce 4, kde vidíme všechny potřebné hodnoty pro výpočet a odečtení časové konstanty (τ), která je rovnou v tabulce určena. Jako orientační hodnoty byly také přidány 3τ a 5τ , které někdy bývají označovány (pro přechodovou charakteristiku 1. řádu) jako doba odezvy a doba ustálení. Barevné rozlišení teploměrů v grafech je záměrně sjednocené, protože teploměry byly pro měření využity vícekrát.

Tabulka 4 - Přehled důležitých naměřených hodnot a časové konstanty

Unit	T_0 °C	T_K °C	ΔT °C	$T_{(0,632)}$ °C	t_0 (s)	$t_{(0,632)}$ (s)	τ (s)	3τ (s)	5τ (s)
ni5000	77,1	18,0	59,0	39,8	6,3	15,9	9,6	28,8	48,0
pt1000	77,8	18,2	59,6	40,1	6,3	15,7	9,4	28,2	47,0
ni6180	75,3	18,7	56,7	39,5	8,1	18,9	10,8	32,3	53,9
pt100	76,3	18,8	57,5	39,9	8,1	18,9	10,8	32,5	54,1
ni5000	75,2	22,0	53,2	41,6	11,2	20,5	9,3	27,9	46,5
ni6180	74,6	22,4	52,2	41,6	11,2	21,2	10,0	29,9	49,9
pt100	74,7	20,6	54,1	40,5	6,4	15,1	8,7	26,0	43,3
typk s	77,8	21,2	56,6	42,0	6,4	15,1	8,7	26,1	43,5
pt100	76,3	21,1	55,2	41,4	12,5	22,5	10,0	29,9	49,8
typk s	78,3	20,8	57,5	42,0	12,5	20,1	7,6	22,7	37,8
pt1000	77,1	21,9	55,2	42,2	8,7	18,0	9,3	28,0	46,6
pt100	77,8	22,8	54,9	43,1	8,7	18,3	9,6	28,8	48,0
pt100s	74,5	21,9	52,6	41,3	7,5	20,5	13,0	38,9	64,8
pt100k	73,4	20,8	52,6	40,2	7,5	10,7	3,2	9,6	16,0
typk s	79,8	16,7	63,1	39,9	9,9	21,8	11,9	35,7	59,5
typk m	80,1	15,7	64,4	39,4	9,9	12,9	3,0	9	15
typk m	80,1	16,0	64,1	39,6	6,2	7,3	1,1	3,3	5,5
typk m	80,1	16,4	63,7	39,9	9,8	10,9	1,1	3,3	5,5
pt100k	80,0	17,4	60,5	39,7	9,8	12,4	2,6	7,8	13

Pro srovnání jiného konstrukčního provedení teploměru byl do této práce přidán klasický vinutý odporový teploměr a klasický neizolovaný termočlánek typu K Metex. Ty, jak vidíme z grafů i tabulky, měly velmi dobré vlastnosti. Jejich časová konstanta je oproti teploměrům Sensit velmi malá, pro odporový teploměr přibližně třikrát a pro termočlánek, který se dostal u časové konstanty na hodnotu jedné sekundy to je skoro desetinásobně menší hodnota než u ostatních teploměrů.

Z výsledků je dále patrné, že časové konstanty ostatních použitých teploměrů se moc neliší. To vypovídá o tom, že konstrukční provedení firmou Sensit je sladeno na podobné hodnoty časové konstanty, a proto bylo vhodné zavedení dodatkových měření, respektive přidání klasických teploměrů.

Ze vzájemného porovnání stejných teploměrů, při rozdílných měření však vidíme, že velmi záleží na okolních podmínkách. Takovým příkladem je třeba teploměr Pt100 (Sensit), se kterým je měřeno celkem pětkrát. Jeho časové konstanty jsou 10,8 s, 8,7 s, 10 s, 9,6 s a 13 s. Jeho poslední časová konstanta je oproti ostatním větší z důvodu zanedbání pohybu ve studené vodě, protože druhým teploměrem v tomto měření byl právě vinutý odpor Pt100 firmy Ekoreg, který byl s měřícím zařízením spojen jinými vodiči a hrozilo nebezpečí ponoření vodičů do vody a tím zkratování obvodu.

Pomalý přesun do studené vody, která přenáší teplo mnohem rychleji než vzduch, je důvodem mírnějšího klesání křivky z maximální hodnoty a z grafu je patrné, že teprve při ponoření do vody je nejstrmější. Tento proces tudíž výrazně ovlivňuje výsledné

průběhy měření a lze je tak považovat za dominantní chybu, kdy nepřesnosti způsobené přenosem a zpracováním signálu jsou zanedbatelné.

Dále z grafů můžeme vypočítat, že v porovnání teploměrů firmy Sensit podle předpokladů měřil termočlánek o něco rychleji, avšak rozdíl nebyl až tak velký, aby to nahradilo jeho nepřesnost. Ta, oproti jiným teploměrům, dosahovala až 3 °C, což je velká chyba. Přičteme-li vypočítané zahřívání převodníku, u kterého je nutné pro termočlánek mít nastavenou interní kompenzaci, což vnáší další chyby způsobené rozdílnou teplotou na spoji a uvnitř převodníku, pak je využití tohoto sensoru pro obvyklé měření nevhodné. Aby bylo měření přesnější, je nutno převodníky se srovnávacími spoji umístit do klimatizovaného prostoru s konstantní teplotou, aby teplota uvnitř převodníku a na srovnávacím spoji byla stejná.

Výsledné porovnání charakteristik ukazuje, že nekryté sensory mají okamžitou reakci a lze je popisovat diferenciální rovnicí prvního řádu. Naopak ostatní teploměry od firmy Sensit, které jsou zakončeny ochranným obalem musíme popisovat rovnicí druhého řádu, protože jímka musí přenášet teplo na sensor a nedochází tak k ideálnímu snímání.

6 ZÁVĚR

V rámci praktické části bylo ukázáno, že dynamické charakteristiky teploměrů jsou závislé na více parametrech a na jejich zjišťování má velký vliv okolní prostředí a podmínky, ve kterých je měření prováděno. Vzorové měření bylo prováděno s teplou vodou o teplotě pohybující se okolo 80 °C a studenou vodou, která se postupně zahřívala od cca 17 °C až do 23 °C. To však pro náš účel nemělo negativní účinky, protože změna teploty probíhala pomalu, řádově déle než jednotlivá měření.

Samotné ověření časových konstant pak dopadlo podle předpokladů. Teploměry sady Didaktik 10 jsou konstrukčně vyrobeny a uloženy v podobných materiálech. Proto rozdíly mezi jejich výstupními charakteristikami, a tudíž i časovou konstantou byly velmi malé a daly by se zahrnout do chyb měření. Byl však dokázán teoretický předpoklad, kdy termočlánek by měl mít menší časovou konstantu. Možným důvodem, proč odporové teploměry z této sady nezaostávaly za termočlánekem je jejich výrobní proces. Odpor je napařován, a tudíž vzniká jen velmi tenký odporový film, který je schopen reagovat na změnu tepla velmi dobře.

Díky dodatečnému zahrnutí teploměrů Pt100 Ekoreg a termočlátku Metex do této práce bylo možné srovnat i jiný způsob provedení a uložení. Z tohoto měření vyplynulo, že uložení sensorů od firmy Sensit má sice ochranné účinky, aby nedošlo k rychlé degradaci a poškození, avšak způsobuje nárůst časové konstanty z důvodu nepřímého kontaktu sensoru s teploměrnou látkou.

Mimo jiné se ukázalo velmi vhodné využití převodníků teploty, které zajišťovaly po správném nastavení úpravu výstupního signálu ze sensorů na standardizovaný tvar, který je možné lépe zpracovávat. Bez jejich využití by byly naměřené hodnoty velmi malé a projeví by se na nich ve větším měřítku systematické chyby. Navíc se jejich použitím využil maximální rozsah DAQ karty, která nedovoluje pro RSE zapojení překročení maximálního napětí 10 V.

Cíle této práce byly splněny a výsledkem je funkční laboratorní úloha, na které si studenti mohou ověřit základní dynamické vlastnosti teploměrů v prakticky zaměřené části studia předmětů Technické měření a Automatická diagnostika.

Protože školní licence National Instrument nezahrnují rozhraní LabVIEW NXG (využité k demonstraci nového doporučeného softwaru od NI – možno využít 45 denní zkušební verzi), je dodatečně vytvořené VI, nahané do počítače v laboratoři, kompatibilní s verzí LabVIEW 2016. Umožňuje studentům zaznamenávat a zobrazovat data do grafu, s následným exportem ve formátu .csv.

Jako vylepšení lze navrhnout softwarové řešení, které bude automaticky určovat časovou konstantu teploměru pomocí určení nejstrmější směrnice tečny z průběhu měření, která se nachází na počátku skokové změny. Je však potřeba brát v úvahu množství chyb, které při takovém měření vznikají, a proto se tímto problémem tato práce nezabývá.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

Literatura

- [1] CHUDÝ, V., PALENČÁR, R., KUREKOVÁ, E. a HALAJ, M.: Meranie technických veličín. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 1999.
- [2] KREIDL, M.: Měření teploty – Senzory a měřicí obvody. BEN – technická literatura, Praha, 2005.
- [3] SLÁDEK, Z. a VDOLEČEK, F.: Technická měření. Nakladatelství VUT, Brno, 1992.
- [4] Konstrukční příručka Sensit 8. vydání [online] (červen 2017). Dostupné z: <http://www.sensit.cz/soubory-stazeni/>
- [5] KADLEC, K., KMÍNEK, M. a KADLEC, P.: Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výroбах. Ostrava: Key Publishing, 2015
- [6] JENČÍK, J. a VOLF J.: Technická měření. Praha: ČVUT, 2003

Internetové zdroje

- [7] https://www.omega.co.uk/temperature/images/RH85_1.jpg
- [8] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1575>
- [9] <https://www.termocert.com/index.php/badanie-maszyn/>
- [10] <http://www.sensit.cz/>
- [11] <http://search.ni.com/nisearch/app/main/p/ap/tech/lang/cs/pg/1/sn/ssnav:dwl/>
- [12] https://www.rawet.cz/data/files/products/13-01-2017_15-05_pxn30.pdf
- [13] <http://www.zpaul.cz/blog/wpcproduct/typ-03001-03002/>
- [14] <https://www.revizeshop.cz/Greisinger-teplotni-sonda>
- [15] <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [16] <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [17] <http://www.ni.com/cs-cz/shop/labview/download.html>
- [18] <https://www.rawet.cz/produkt/113>

8 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tabulka 1 - Přepočet teploty mezi stupnicemi používanými v dnešní době.....	17
Tabulka 2 - Obecné srovnání elektrických teploměrů [1].....	27
Tabulka 3 - Výňatek z tabulky 9.7 nejpoužívanějších termočlánků [1]	32
Tabulka 4 - Přehled důležitých naměřených hodnot a časové konstanty	53
Obrázek 1 - Carnotův cyklus	18
Obrázek 2 - Kapalinové teploměry (rtuťové) [1].....	19
Obrázek 3 - Kovový tyčový teploměr a vpravo bimetalový pásek [1]	20
Obrázek 4 - Tlakový kapalinový teploměr a) bez korekce b) s částečnou korekcí c) s úplnou korekcí [1]	21
Obrázek 5 - Moderní teploměr využívající termistor [7].....	21
Obrázek 6 - Závislost odporu na teplotě pro NTC a PTC [1]	22
Obrázek 7 - Zleva termistor tyčinkový, destičkový a perličkový [1]	22
Obrázek 8 - Využití šedého klínu (5) a stálého jasu žárovky [1].....	24
Obrázek 9 - Využití proměnlivého jasu žárovky [1].....	24
Obrázek 10 - Konstrukce distribučního pyrometru, klíny 2 a 3 sloužící k odečtu teplot (8 a 9) [1]	25
Obrázek 11 - IR teploměr a jeho zorné pole [1]	25
Obrázek 12 - Opticko-mechanický rozklad [1].....	26
Obrázek 13 - Pyroelektrický senzor [1]	26
Obrázek 14 - Termogram a reálná fotka zahřátého motoru [9]	26
Obrázek 15 - Odchylny teplot v závislosti na měřené teplotě pro Pt100 [15]	29
Obrázek 16 - Plošný odporový teploměr [16].....	29
Obrázek 17 - Drátový teploměr [16].....	29
Obrázek 18 - Zapojení odporového teploměru do obvodu pomocí a) dvou vodičového zapojení b) třívodičového zapojení c) čtyřvodičového zapojení [2]	30
Obrázek 19 - Závislost velikosti elektromotorického napětí na teplotě pro různé typy termočlánků [2].....	31
Obrázek 20 - Odchylka od linearizace pro termočlánek typu K [2]	31
Obrázek 21 - Typy spojů a) otevřený b) uzemněný c) izolovaný... d) změna doby odezvy podle typu spoje [1].....	32
Obrázek 22 - Terminologie měřícího řetězce termoelektrického článku [2]	33
Obrázek 23 - Uspořádání termočlánku v zapojení s termostatem [2].....	33
Obrázek 24 - Různé typy statických charakteristik [3].....	34
Obrázek 25 - Přechodová charakteristika 1. a 2. stupně [2]	36
Obrázek 26 - Rychlostní charakteristika prvního řádu [2].....	36
Obrázek 27 - Sada teploměrů DIDAKTIK 10 od firmy sensit [10].....	37

Obrázek 28 - Statická charakteristika teploměru Sensit Pt100/3850 [10].....	38
Obrázek 29 - Statická charakteristika teploměru Sensit Ni1000/5000 [10].....	38
Obrázek 30 - Graf statické charakteristiky pro termočlánek typu K [10]	39
Obrázek 31 - Klasický odporový snímač Pt100 [13]	39
Obrázek 32 - Termočlánek z příslušenství multimetru Metex[14]	39
Obrázek 33 - Převodník PXN30.A a jeho rozměrový náčrt (mm) [12]	40
Obrázek 34 - Převodník PXN30.A má analogový výstup.....	41
Obrázek 35 - V nabídce se automaticky zobrazí připojený port (COM3)	41
Obrázek 36 - V nabídce linearizace zvolíme teploměr a přibližný rozsah měřených teplot	41
Obrázek 37 - V záložce zařízení vidíme úspěšně nahranou linearizaci	41
Obrázek 38 - Vstup pro RTD je vždy 3-vodič a níže upravíme konkrétní měřící rozsah, v nabídce klikneme na načíst	42
Obrázek 39 - Zapojení na společnou zem (RSE) a pinout této DAQ karty [11].	42
Obrázek 40 - Založení nového projektu v LabVIEW NXG.....	43
Obrázek 41 - Založení nových vstupů a jejich nastavení	44
Obrázek 42 - Připravené rozhraní pro měření	44
Obrázek 43 - Krabice se zapojeným napájením a termočlánekem TypuK (shora je vidět programovací konektor)	45
Obrázek 44 - Schéma sestavení měřícího pracoviště	46
Obrázek 45 - Foto měřícího pracoviště z laboratoře, ochlazování termočlánu TypuK	46
Obrázek 46 - Část naměřených výstupních signálů z převodníku ve standardi- zovaném tvaru 0-10 V	48
Obrázek 47 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Ni1000 5000 a Pt1000.....	49
Obrázek 48 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Ni1000 6180 a Pt100.....	49
Obrázek 49 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Ni1000 5000 a Ni1000 6180	49
Obrázek 50 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Pt100 a TypK.	50
Obrázek 51 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Pt100 a TypK.	50
Obrázek 52 - Průběh teploty v závislosti na čase pro Pt1000 a Pt100	50
Obrázek 53 - Průběh teploty v závislosti na čase pro teploměry Pt100 Sensit a Pt100 Ekoreg	51
Obrázek 54 - Průběhy měřených signálů (V) z doplňkového měření	51
Obrázek 55 - Srovnání průběhu měření termočláneků TypuK Sensit a Metex	52
Obrázek 56 - Srovnání holých snímačů, termočlánu TypuK Metex a Pt100 Ekoreg	52

9 PŘÍLOHY

CD obsahující vlastní práci a přílohy:

- Metrologické charakteristiky Jakub Telecký.pdf
- typK.pdf
- pt100 3850.pdf
- pt1000 3850.pdf
- ni1000 6180.pdf
- ni1000 5000.pdf
- rawet pxn30a.pdf
- niusbmanual.pdf
- typ03001.pdf
- dataměření100hz.csv

<i>Sensor</i>	<i>Pt100</i>	<i>TypK</i>	<i>Pt100 sensit</i>	<i>Pt100 klasik</i>	<i>Pt100 sensit</i>	<i>Pt100 klasik</i>	<i>Ni1000 6180</i>	<i>Pt100</i>	<i>Ni1000 5000</i>
<i>Time (s)</i>	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	76,66	78,60	74,42	74,11	72,48	71,46	75,33	76,15	77,17
1	76,66	78,70	74,42	74,01	72,38	71,46	75,33	76,15	77,17
2	76,66	78,60	74,42	73,81	72,38	71,57	75,33	76,15	77,17
3	76,66	78,60	74,42	73,81	72,28	71,46	75,33	76,25	77,17
4	76,66	78,39	74,42	73,60	72,28	71,26	75,33	76,25	77,17
5	76,66	78,39	74,42	73,71	72,28	70,75	75,33	76,25	77,07
6	76,66	78,39	74,42	73,60	72,07	66,67	75,33	76,25	77,07
7	76,76	78,39	74,42	73,50	71,36	61,68	75,33	76,25	76,97
8	76,76	78,39	74,52	72,18	69,93	49,25	75,44	76,25	75,95
9	76,76	78,39	74,01	66,06	65,75	37,63	75,23	75,74	72,38
10	76,76	78,39	72,89	51,49	60,86	34,37	73,81	73,50	66,57
11	76,66	78,50	70,24	36,71	56,07	33,14	70,03	69,22	60,55
12	76,56	78,19	66,57	30,60	51,89	32,33	65,45	64,74	55,05
13	75,54	78,09	62,90	27,74	48,01	31,82	60,65	60,46	50,26
14	72,28	75,64	59,23	26,11	44,75	29,58	56,07	55,97	46,08
15	67,59	70,95	55,86	25,09	41,90	28,35	51,78	51,90	42,51
16	63,10	65,66	52,29	24,28	39,65	27,84	48,11	48,23	39,45
17	59,02	60,56	49,34	23,67	37,61	27,64	44,75	44,97	36,90
18	55,15	55,67	46,59	23,16	35,98	27,44	41,69	42,11	34,66
19	51,48	51,08	44,24	22,85	34,56	27,23	39,25	39,67	32,82
20	48,01	46,90	42,10	22,54	33,33	27,13	37,00	37,42	31,09
21	44,95	43,34	40,37	22,34	32,31	27,03	35,07	35,59	29,76
22	42,41	40,07	38,74	22,14	31,29	26,82	33,33	33,86	28,44
23	40,16	37,32	37,41	22,03	30,48	26,82	31,70	32,33	27,42
24	38,23	35,28	36,08	21,93	29,76	26,62	30,38	31,00	26,50
25	36,59	33,14	34,96	21,83	29,15	26,31	29,25	29,88	25,69
26	35,07	31,41	33,84	21,73	28,54	26,11	28,13	28,76	24,97
27	33,74	29,98	32,92	21,63	28,13	26,01	27,22	27,84	24,36
28	32,52	28,76	32,11	21,52	27,73	25,91	26,40	27,03	23,85
29	31,50	27,74	31,29	21,42	27,22	25,81	25,69	26,31	23,24
30	30,68	26,82	30,58	21,32	26,91	25,70	25,07	25,60	22,93
31	29,87	26,01	29,97	21,32	26,60	25,60	24,46	25,09	22,53
32	29,15	25,40	29,36	21,32	26,30	25,50	23,95	24,48	22,12
33	28,54	24,79	28,85	21,32	25,99	25,40	23,55	24,07	21,81
34	27,93	24,17	28,44	21,32	25,69	25,30	23,14	23,56	21,61
35	27,42	23,77	27,93	21,22	25,48	25,19	22,73	23,16	21,30
36	27,01	23,36	27,62	21,22	25,28	25,09	22,42	22,75	21,10
37	26,60	22,95	27,22	21,12	25,07	25,09	22,12	22,44	20,89
38	26,20	22,75	26,81	21,12	24,87	24,99	21,91	22,14	20,69
39	25,89	22,44	26,60	21,12	24,67	24,89	21,61	21,93	20,49
40	25,58	22,24	26,20	21,12	24,56	24,89	21,40	21,63	20,38
41	25,28	22,03	25,99	21,02	24,46	24,68	21,30	21,42	20,28
42	24,97	21,83	25,79	21,02	24,26	24,58	21,10	21,22	20,08

43	24,77	21,73	25,48	21,02	24,16	24,58	20,89	21,02	19,98
44	24,56	21,63	25,28	21,02	24,05	24,48	20,79	20,91	19,88
45	24,36	21,42	25,18	21,02	23,95	24,38	20,69	20,71	19,77
46	24,16	21,32	24,97	21,02	23,85	24,28	20,49	20,51	19,67
47	24,05	21,32	24,77	21,02	23,75	24,17	20,49	20,51	19,57
48	23,95	21,22	24,56	21,02	23,65	24,17	20,28	20,40	19,47
49	23,75	21,12	24,46	21,02	23,55	24,07	20,18	20,20	19,47
50	23,65	21,12	24,26	20,91	23,44	23,97	20,18	20,20	19,37
51	23,55	21,02	24,16	20,91	23,44	23,87	20,08	20,10	19,26
52	23,34	20,91	24,16	20,91	23,34	23,77	19,98	20,00	19,16
53	23,24	20,91	23,95	20,91	23,24	23,77	19,98	19,89	19,16
54	23,14	20,91	23,85	20,91	23,24	23,67	19,88	19,89	19,06
55	23,04	20,91	23,75	20,91	23,14	23,56	19,77	19,79	18,96
56	22,93	20,81	23,65	20,91	23,14	23,46	19,77	19,69	18,96
57	22,83	20,81	23,55	20,91	23,04	23,36	19,67	19,69	18,86
58	22,73	20,81	23,55	20,91	22,93	23,36	19,67	19,69	18,86
59	22,73	20,81	23,44	20,91	22,93	23,26	19,57	19,59	18,86
60	22,63	20,81	23,34	20,91	22,83	23,16	19,57	19,59	18,75
61	22,53	20,81	23,24	20,91	22,83	23,16	19,57	19,49	18,75
62	22,53	20,81	23,14	20,91	22,83	23,16	19,47	19,49	18,65
63	22,42	20,81	23,14	20,91	22,83	23,16	19,37	19,38	18,65
64	22,32	20,81	23,14	20,81	22,83	23,16	19,37	19,49	18,65
65	22,32	20,81	23,04	20,81	22,83	23,16	19,37	19,38	18,55
66	22,32	20,81	22,93	20,91	22,83	23,16	19,26	19,38	18,55
67	22,22	20,81	22,93	20,91	22,83	23,16	19,37	19,38	18,45
68	22,12	20,81	22,83	20,91	22,83	23,16	19,37	19,28	18,45
69	22,12	20,71	22,83	20,91	22,83	23,16	19,26	19,28	18,45
70	22,02	20,71	22,83	20,91	22,83	23,16	19,26	19,28	18,45
71	22,02	20,71	22,73	20,91	22,83	23,16	19,26	19,28	18,35
72	22,02	20,71	22,63	20,91	22,83	23,16	19,26	19,28	18,35
73	21,91	20,71	22,63	20,91	22,83	23,16	19,26	19,28	18,35
74	21,91	20,71	22,63	20,91	22,83	23,16	19,16	19,18	18,35
75	21,81	20,61	22,53	20,91	22,83	23,16	19,16	19,18	18,35
76	21,81	20,71	22,53	20,91	22,83	23,16	19,16	19,18	18,24
77	21,81	20,71	22,42	20,91	22,83	23,16	19,16	19,18	18,24
78	21,71	20,71	22,42	20,91	22,83	23,16	19,06	19,18	18,24
79	21,71	20,71	22,32	20,91	22,83	23,16	19,06	19,08	18,14
80	21,71	20,71	22,32	20,91	22,83	23,16	19,06	19,08	18,14
81	21,61	20,71	22,32	20,91	22,83	23,16	19,06	19,08	18,14
82	21,61	20,71	22,22	20,91	22,83	23,16	18,96	19,08	18,14
83	21,61	20,71	22,22	20,91	22,83	23,16	18,96	19,08	18,14
84	21,61	20,71	22,22	20,91	22,83	23,16	18,96	18,98	18,14
85	21,51	20,71	22,12	20,81	22,83	23,16	18,96	18,98	18,04
86	21,51	20,71	22,12	20,81	22,83	23,16	18,96	18,98	18,14
87	21,51	20,71	22,12	20,81	22,83	23,16	18,86	18,98	18,04
88	21,51	20,71	22,02	20,81	22,83	23,16	18,86	18,98	18,04

89	21,40	20,71	22,02	20,81	22,83	23,16	18,86	18,87	18,04
90	21,40	20,71	22,02	20,81	22,83	23,16	18,86	18,87	18,04
91	21,40	20,71	21,91	20,81	22,83	23,16	18,75	18,87	18,04
92	21,30	20,71	21,91	20,81	22,83	23,16	18,75	18,87	18,04
93	21,30	20,71	21,91	20,81	22,83	23,16	18,75	18,87	18,04
94	21,30	20,81	21,91	20,81	22,83	23,16	18,75	18,87	18,04
95	21,30	20,71	21,81	20,81	22,83	23,16	18,75	18,87	18,04
96	21,30	20,71	21,81	20,81	22,83	23,16	18,75	18,77	18,04
97	21,30	20,71	21,81	20,81	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
98	21,30	20,71	21,81	20,81	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
99	21,30	20,71	21,71	20,81	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
100	21,20	20,71	21,61	20,81	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
101	21,20	20,81	21,61	20,81	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
102	21,20	20,71	21,51	20,81	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
103	21,20	20,81	21,40	20,71	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
104	21,20	20,71	21,30	20,71	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
105	21,20	20,71	21,30	20,71	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
106	21,20	20,81	21,20	20,61	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
107	21,20	20,71	21,20	20,61	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
108	21,10	20,71	21,10	20,61	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
109	21,10	20,71	21,00	20,61	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
110	21,10	20,71	21,00	20,51	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
111	21,10	20,71	21,00	20,61	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
112	21,10	20,71	21,00	20,51	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
113	21,10	20,71	21,00	20,51	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
114	21,10	20,81	20,89	20,51	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
115	21,10	20,81	20,89	20,51	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
116	21,10	20,81	20,89	20,61	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
117	21,10	20,81	20,79	20,61	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
118	21,10	20,71	20,79	20,71	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
119	21,00	20,81	20,79	20,71	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
120	21,10	20,81	20,79	20,81	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
121	21,10	20,81	20,79	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
122	21,10	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
123	21,10	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
124	21,00	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
125	21,10	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
126	21,00	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
127	21,10	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
128	21,00	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
129	21,00	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
130	21,00	20,91	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
131	21,00	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04
132	21,00	20,81	20,89	20,91	22,83	23,16	18,65	18,77	18,04

Sensor	Pt 1000	Pt100 sensit	Pt100 klasik	Pt 1000	Pt100	Ni1000 5000	Ni1000 6180	Pt100	TypK
Time(s)	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	77,89	73,50	71,67	77,48	77,89	75,23	74,73	75,23	77,89
1	77,89	73,50	71,67	77,48	77,99	75,23	74,73	75,23	77,89
2	77,89	73,50	71,67	77,48	77,99	75,23	74,73	75,23	77,89
3	77,89	73,50	71,57	77,48	77,89	75,23	74,73	75,23	77,89
4	77,89	73,50	71,46	77,48	77,89	75,23	74,73	75,23	77,89
5	77,99	73,40	71,57	77,37	77,99	75,23	74,73	75,23	77,89
6	77,89	73,50	71,87	77,37	77,89	75,23	74,73	74,93	77,99
7	77,17	73,50	72,18	77,37	77,89	75,33	74,73	73,70	77,48
8	75,54	73,40	69,83	77,37	77,89	75,33	74,73	69,01	75,85
9	70,24	72,79	64,94	76,76	77,58	75,33	74,73	63,10	71,26
10	63,72	71,77	59,85	75,44	76,15	75,33	74,73	57,80	65,66
11	58,11	70,34	55,97	71,87	72,28	75,23	74,73	53,31	59,85
12	53,22	68,20	46,29	66,26	67,29	74,82	74,22	49,34	54,55
13	49,04	64,53	39,46	60,86	62,09	73,09	72,69	45,97	49,96
14	45,27	60,35	35,49	56,17	57,50	68,50	69,02	43,02	45,88
15	42,11	56,58	33,55	51,89	53,32	63,20	64,13	40,57	42,42
16	39,36	52,91	32,23	48,22	49,76	57,90	59,23	38,43	39,56
17	37,02	49,85	31,21	45,06	46,49	53,42	54,85	36,59	37,02
18	34,88	47,10	30,49	42,30	43,74	49,34	51,08	34,96	34,98
19	33,14	44,55	29,98	39,96	41,40	45,97	47,72	33,54	33,25
20	31,51	42,41	29,58	37,82	39,36	42,92	44,76	32,31	31,82
21	30,09	40,47	29,27	36,08	37,63	40,47	42,11	31,09	30,49
22	28,86	38,74	29,07	34,56	36,10	38,33	39,97	30,17	29,37
23	27,74	37,21	28,76	33,23	34,77	36,59	38,04	29,25	28,46
24	26,93	35,78	28,56	32,01	33,55	34,96	36,30	28,54	27,64
25	26,01	34,66	28,46	30,99	32,53	33,64	34,88	27,73	26,93
26	25,30	33,54	28,25	30,07	31,61	32,52	33,65	27,11	26,31
27	24,68	32,52	28,15	29,36	30,80	31,50	32,53	26,50	25,81
28	24,07	31,60	28,05	28,54	30,09	30,58	31,61	25,99	25,30
29	23,56	30,89	27,95	27,93	29,47	29,76	30,80	25,48	24,99
30	23,16	30,07	27,84	27,42	28,96	29,05	30,09	24,97	24,58
31	22,65	29,46	27,84	26,91	28,46	28,44	29,37	24,56	24,28
32	22,34	28,85	27,64	26,50	28,05	27,93	28,76	24,16	24,07
33	22,03	28,34	27,64	26,09	27,64	27,42	28,25	23,85	23,77
34	21,63	27,83	27,54	25,79	27,23	27,01	27,84	23,55	23,46
35	21,42	27,32	27,33	25,48	26,93	26,71	27,44	23,24	23,26
36	21,22	26,91	27,03	25,18	26,62	26,30	27,13	22,93	23,05
37	20,91	26,60	26,93	24,97	26,42	25,99	26,82	22,73	22,95
38	20,81	26,30	26,72	24,77	26,21	25,79	26,52	22,53	22,85
39	20,61	25,99	26,62	24,56	25,91	25,38	26,21	22,32	22,75
40	20,40	25,69	26,52	24,36	25,70	25,28	25,91	22,12	22,54
41	20,30	25,38	26,42	24,16	25,50	25,07	25,70	22,02	22,44
42	20,20	25,18	26,31	24,05	25,30	24,87	25,50	21,91	22,24

43	20,00	24,87	26,21	23,95	25,19	24,67	25,30	21,71	22,24
44	19,89	24,67	26,11	23,75	25,09	24,56	25,19	21,61	22,14
45	19,79	24,56	26,11	23,65	24,89	24,36	24,99	21,61	21,93
46	19,69	24,36	26,01	23,55	24,79	24,26	24,79	21,51	22,14
47	19,59	24,16	25,91	23,44	24,58	24,16	24,68	21,40	22,03
48	19,49	24,05	25,81	23,34	24,58	24,05	24,58	21,30	21,73
49	19,49	23,85	25,70	23,24	24,48	23,95	24,48	21,30	21,93
50	19,38	23,75	25,70	23,24	24,38	23,75	24,38	21,20	21,93
51	19,28	23,55	25,60	23,14	24,28	23,75	24,17	21,10	21,73
52	19,18	23,44	25,60	23,04	24,28	23,65	24,17	21,10	21,63
53	19,18	23,34	25,50	23,04	24,17	23,55	24,07	21,10	21,73
54	19,08	23,24	25,50	22,93	24,07	23,44	23,97	21,00	21,63
55	18,98	23,14	25,50	22,93	24,07	23,44	23,97	20,89	21,63
56	18,98	23,04	25,40	22,83	23,97	23,34	23,87	20,89	21,63
57	18,87	22,93	25,50	22,83	23,97	23,34	23,77	20,89	21,52
58	18,87	22,83	25,40	22,83	23,87	23,24	23,77	20,89	21,52
59	18,77	22,73	25,40	22,73	23,87	23,24	23,67	20,89	21,52
60	18,77	22,63	25,40	22,73	23,77	23,14	23,56	20,79	21,42
61	18,77	22,53	25,40	22,63	23,77	23,04	23,46	20,89	21,52
62	18,67	22,42	25,40	22,63	23,67	23,04	23,46	20,79	21,42
63	18,67	22,32	25,19	22,53	23,56	22,93	23,36	20,79	21,42
64	18,67	22,32	24,99	22,53	23,56	22,93	23,36	20,79	21,32
65	18,57	22,22	24,89	22,53	23,46	22,93	23,26	20,69	21,32
66	18,57	22,12	24,89	22,42	23,46	22,83	23,26	20,69	21,42
67	18,57	22,12	24,89	22,42	23,36	22,83	23,26	20,69	21,32
68	18,47	22,12	24,89	22,42	23,36	22,83	23,16	20,69	21,32
69	18,47	22,02	24,79	22,32	23,36	22,73	23,16	20,69	21,32
70	18,47	22,02	24,79	22,32	23,36	22,73	23,16	20,69	21,32
71	18,47	21,91	24,79	22,32	23,26	22,73	23,05	20,59	21,22
72	18,47	21,91	24,68	22,32	23,26	22,73	23,05	20,59	21,32
73	18,37	21,91	24,68	22,22	23,26	22,73	22,95	20,59	21,22
74	18,37	21,91	24,68	22,22	23,26	22,63	22,95	20,59	21,32
75	18,37	21,91	24,68	22,22	23,26	22,63	22,95	20,59	21,32
76	18,37	21,91	24,68	22,22	23,26	22,53	22,95	20,59	21,32
77	18,26	21,91	24,68	22,22	23,16	22,53	22,95	20,59	21,32
78	18,26	21,91	24,68	22,12	23,16	22,53	22,85	20,59	21,32
79	18,26	21,91	24,68	22,12	23,16	22,53	22,85	20,59	21,32
80	18,26	21,91	24,68	22,12	23,16	22,53	22,85	20,59	21,32
81	18,26	21,91	24,68	22,12	23,16	22,42	22,85	20,59	21,32
82	18,26	21,91	24,68	22,12	23,05	22,42	22,85	20,59	21,32
83	18,26	21,91	24,68	22,12	23,05	22,42	22,75	20,59	21,32
84	18,26	21,91	24,68	22,12	23,05	22,42	22,75	20,59	21,32
85	18,16	21,91	24,68	22,02	23,05	22,42	22,75	20,59	21,32
86	18,16	21,91	24,68	22,02	22,95	22,32	22,75	20,59	21,32
87	18,16	21,91	24,68	22,02	22,95	22,42	22,65	20,59	21,32
88	18,16	21,91	24,68	22,02	22,95	22,32	22,75	20,59	21,32

89	18,16	21,91	24,68	22,02	22,95	22,32	22,75	20,59	21,32
90	18,16	21,91	24,68	22,02	22,95	22,32	22,65	20,59	21,32
91	18,16	21,91	24,68	21,91	22,95	22,32	22,65	20,59	21,32
92	18,16	21,91	24,68	21,91	22,95	22,32	22,65	20,59	21,32
93	18,16	21,91	24,68	21,91	22,85	22,32	22,65	20,59	21,32
94	18,16	21,91	24,68	21,91	22,85	22,22	22,65	20,59	21,32
95	18,16	21,91	24,68	21,91	22,85	22,22	22,65	20,59	21,32
96	18,16	21,91	24,68	21,91	22,85	22,22	22,65	20,59	21,32
97	18,16	21,91	24,68	21,91	22,85	22,22	22,54	20,59	21,32
98	18,16	21,91	24,68	21,91	22,85	22,22	22,54	20,59	21,32
99	18,16	21,91	24,68	21,91	22,85	22,22	22,54	20,59	21,32
100	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
101	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
102	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
103	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
104	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
105	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
106	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
107	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,54	20,59	21,32
108	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,44	20,59	21,32
109	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
110	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,54	20,59	21,32
111	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
112	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,12	22,44	20,59	21,32
113	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
114	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
115	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,54	20,59	21,32
116	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
117	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
118	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
119	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
120	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
121	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
122	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
123	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
124	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
125	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
126	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
127	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
128	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
129	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
130	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
131	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32
132	18,16	21,91	24,68	21,91	22,75	22,02	22,44	20,59	21,32

<i>Sensor</i>	<i>TypK Sensit</i>	<i>TypK Metex</i>	<i>TypK Metex</i>	<i>TypK Metex</i>	<i>Pt100 klasik</i>	<i>TypK Sensit</i>	<i>TypK Sensit</i>
<i>Time (s)</i>	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	79,820	80,331	80,127	80,229	77,885	77,985	77,985
1	79,820	80,127	80,127	80,229	77,783	77,985	77,985
2	79,820	80,127	80,025	80,229	77,987	78,087	77,985
3	79,820	80,127	80,025	80,229	77,987	78,087	77,985
4	79,820	80,127	79,924	80,025	77,987	78,087	77,578
5	79,922	80,127	80,025	79,822	77,987	78,189	77,679
6	79,820	80,127	80,127	79,822	77,987	77,476	74,825
7	79,922	80,229	63,107	80,025	77,885	74,621	69,320
8	79,922	80,229	18,365	79,924	77,885	69,320	63,509
9	79,922	80,331	16,021	80,025	77,987	63,203	58,004
10	79,820	79,720	16,021	79,006	77,478	57,086	53,008
11	79,820	66,063	16,021	31,207	68,509	51,581	48,828
12	79,515	53,119	16,021	16,837	46,087	46,993	45,362
13	78,903	36,099	16,021	16,327	33,245	42,813	42,406
14	76,456	17,040	16,021	16,327	28,048	39,347	39,755
15	71,868	16,021	16,021	16,327	25,296	36,594	37,512
16	66,567	15,919	16,021	16,429	23,359	34,250	35,779
17	61,572	15,614	16,021	16,429	22,136	32,313	33,944
18	55,965	15,512	16,021	16,429	21,117	30,783	32,619
19	50,867	15,614	16,021	16,429	20,506	29,458	31,293
20	46,483	15,614	16,021	16,429	19,996	28,235	30,274
21	42,507	15,614	16,021	16,429	19,690	27,317	29,254
22	39,041	15,512	16,021	16,429	19,283	26,604	28,337
23	36,085	15,512	16,021	16,429	18,977	25,788	27,623
24	33,536	15,512	16,021	16,429	18,773	25,176	26,909
25	31,293	15,512	16,021	16,429	18,569	24,565	26,298
26	29,458	15,614	16,021	16,429	18,365	24,055	25,686
27	27,929	15,512	16,021	16,429	18,162	23,647	25,176
28	26,400	15,410	16,021	16,429	18,060	23,239	24,769
29	25,176	15,512	16,021	16,429	17,958	22,832	24,361
30	24,157	15,410	16,021	16,429	17,754	22,526	23,953
31	23,137	15,410	16,021	16,429	17,754	22,220	23,647
32	22,322	15,512	16,021	16,429	17,652	21,914	23,341
33	21,608	15,614	16,021	16,429	17,550	21,710	23,035
34	20,996	15,512	16,021	16,429	17,550	21,506	22,832
35	20,385	15,512	16,021	16,429	17,550	21,302	22,526
36	19,977	15,512	16,021	16,429	17,448	21,098	22,322
37	19,467	15,512	16,021	16,429	17,448	20,895	22,118
38	19,263	15,512	16,021	16,429	17,448	20,691	22,016
39	18,754	15,512	16,021	16,429	17,346	20,589	21,812
40	18,652	15,512	16,021	16,429	17,346	20,385	21,710
41	18,346	15,512	16,021	16,429	17,244	20,283	21,506
42	18,142	15,512	16,021	16,429	17,244	20,181	21,404

43	17,938	15,512	16,021	16,429	17,244	20,079	21,302
44	17,734	15,614	16,021	16,429	17,244	20,079	21,200
45	17,632	15,512	16,021	16,429	17,244	19,977	20,996
46	17,428	15,512	16,021	16,429	17,244	19,875	20,895
47	17,326	15,512	16,021	16,429	17,244	19,773	20,895
48	17,224	15,512	16,021	16,429	17,244	19,671	20,793
49	17,122	15,614	16,021	16,429	17,244	19,671	20,793
50	17,224	15,614	16,021	16,429	17,142	19,671	20,589
51	16,919	15,614	16,021	16,429	17,142	19,569	20,589
52	17,021	15,614	16,021	16,429	17,142	19,569	20,487
53	16,817	15,614	16,021	16,429	17,142	19,569	20,487
54	16,919	15,614	16,021	16,429	17,142	19,467	20,385
55	16,817	15,715	16,021	16,429	17,142	19,467	20,283
56	16,817	15,614	16,021	16,429	17,142	19,467	20,283
57	16,817	15,614	16,021	16,429	17,142	19,467	20,283
58	16,817	15,715	16,021	16,429	17,142	19,365	20,181
59	16,817	15,715	16,021	16,429	17,040	19,365	20,181
60	16,715	15,715	16,021	16,429	17,142	19,365	20,079
61	16,715	15,715	16,021	16,429	17,142	19,263	20,079
62	16,715	15,715	16,021	16,429	17,040	19,365	20,079
63	16,715	15,817	16,021	16,429	17,040	19,365	19,977
64	16,715	15,817	16,021	16,429	17,040	19,365	20,079
65	16,715	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,977
66	16,715	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,977
67	16,613	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,977
68	16,715	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,875
69	16,613	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,875
70	16,613	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,875
71	16,613	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,875
72	16,715	15,919	16,021	16,429	17,040	19,263	19,773
73	16,613	15,919	16,021	16,429	17,040	19,161	19,875
74	16,715	16,123	16,021	16,429	17,040	19,161	19,773
75	16,613	15,715	16,021	16,429	17,040	19,161	19,773
76	16,613	15,715	16,021	16,429	17,040	19,161	19,671
77	16,715	15,715	16,021	16,429	17,040	19,161	19,671
78	16,715	15,614	16,021	16,429	17,040	18,958	19,671
79	16,715	15,614	16,021	16,429	17,040	19,059	19,671
80	16,715	15,614	16,021	16,429	17,040	19,059	19,671