

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vývoj metrologie a hodnocení měření teplot

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na metrologii a její aplikaci v praxi. Zabývá se také teplotou a jejím měřením, zahrnuje i vývoj měření teplot ve 20 století. V práci je rovněž pojednáno o experimentálním měření teploty a vlhkosti na vápenné peci Maerz v reálném čase. Zmiňovaný praktický experiment slouží k nastavení provozních parametrů pece dle výrobních a zákaznických požadavků. Zpracovaný experiment měření je vyhodnocen nejistotami měření.

Klíčová slova

Metrologie, teplota, teploměr, ITS-90, Kelvin, Celsius, Fahrenheit, Maerz, termočlánek, normální rozdělení, nejistoty měření, chyby měření, termoelektrický snímač, převodník SITRANS, Simatic 7, Win CC.

Abstract

The development of the metrology and the assessment of the temperature

The master thesis presents the metrology and its real application. The thesis deals also with the temperature and the measurement of the temperature, it also involves the historical view into the temperature measurement in 20 century. The thesis enlarges on experimental measurement of temperature and humidity in the lime kiln Maerz in the real time. The experiment mentioned about serves for setting the kiln Maerz to specific production and customers parameters. The experiment is evaluated by measurement uncertainty.

Key words

Metrology, temperature, thermometer, ITS-90, Kelvin, Celsius, Fahrenheit, Maerz, thermocouple, normal distribution, uncertainty, measurement error, converter SITRANS, Simatic 7, Win CC.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomové práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 5.5.2014

Ing. Antonín Franěk

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Olze Tůmové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, které mi pomohly při řešení práce. Na tomto místě bych také chtěl také poděkovat společnosti Vápenka Čertovy schody a.s., konkrétně hlavnímu energetikovi společnosti panu Ladislavu Kulhavému za vstřícnost, ochotu a poskytnutí informací.

Obsah

ÚVOD	8
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 DEFINICE POJMŮ PRO OBLAST MĚŘENÍ TEPLoty	11
1.1 DEFINICE POJMŮ TERMODYNAMIKA, TEPLota, TEPLo	11
1.2 OZNAČENÍ, JEDNOTKY	12
1.3 MĚŘENÍ TEPLoty	12
1.4 TEPLotní STUPNICE	12
1.5 TEPLOMĚRY	13
1.6 TERMOELEKTRICKÉ TEPLOMĚRY (TERMOČLÁNKY)	14
1.6.1 Seebeckův jev	14
1.6.2 Princip činnosti	15
1.6.3 Základní zapojení	16
1.6.4 Výchylkové metody měření teplot termočlánky	16
1.6.5 Kompenzační metoda měření teplot termočlánky	18
1.6.6 Výběr vodičů vhodných termočlánků	20
1.6.7 Typy termoelektrických článků	20
2 VÝVOJ MĚŘENÍ TEPLoty A SOUČASNÉ METROLOGICKÉ ZABEZPEČENÍ (ITS 90)	24
2.1 METROLOGIE	24
2.2 MEZINÁRODNÍ METROLOGICKÝ SLOVNÍK	24
2.3 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ POJMY METROLOGIE [5]	25
2.4 DVACÁTÉ STOLETÍ	27
2.5 MEZINÁRODNÍ TEPLotní STUPNICE ITS-90	28
2.5.1 Trojný bod	30
2.5.2 Bod tání a tuhnutí	32
3 ZPŮSOBY HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	33
3.1 ROZDĚLENÍ CHYB	33
3.1.1 Rozdělení chyb dle příčiny vzniku	33
3.1.2 Rozdělení chyb dle zdrojů	34
3.1.3 Rozdělení chyb dle způsobu výskytu	34
3.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ	35
3.2.1 Termíny související se stanovením nejistot	35
3.2.2 Rozdělení standardních nejistot	36
3.2.3 Standardní nejistota u_A	36
3.2.4 Standardní nejistota u_B	38
3.2.5 Kombinovaná standardní nejistota u_C	40
3.2.6 Rozšířená (celková) standardní nejistota U	40
4 MĚŘENÍ TEPLoty TERMOČLÁNKY NA VÁPENNÉ PECI MAERZ	43
4.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PECE MAERZ	43
4.2 PRINCIP PECE MAERZ	44
4.3 MĚŘENÍ TEPLoty TERMOČLÁNKY	46
4.3.1 Termoelektrický snímač teploty tyčový s ocelovou ochranou trubkou bez převodníku a s převodníkem [18]	47
4.3.2 Převodník SITRANS TW 7NG3242 [19]	49
4.3.3 SIMATIC 7	54
4.3.4 Win CC	54
4.3.5 Měření teploty na peci Maerz	55
4.4 MĚŘENÍ VLHKOSTI VZDUCHU NA VÁPENNÉ PECI MAERZ	61
5 ZÁVĚR	65
POUŽITÁ LITERATURA	66

Úvod

Cílem diplomové práce je seznámit se s terminologií metrologie a měření teplot. Je zde zahrnuta i část, která pojednává o historickém vývoji měření teplot ve 20. století. Diplomová práce se zabývá měřením s termočládky a následným vyhodnocením nejistot měření.

Téma diplomové práce *Vývoj metrologie a hodnocení měření teplot* jsem zvolil především z toho důvodu, že vzhledem k mé profesi procesního inženýra v technickém úseku na Vápence Čertovy schody a.s., mám k danému zadání možnost využít své zkušenosti přímo z praxe, kde na názorném příkladu vysvětluji princip měření teplot na vápenné peci Maerz. Z experimentů vyplývá důležitost měření teploty a její dopad na kvalitu při výrobě a zpracování vápence.

Text diplomové práce je rozdělen do čtyř částí.

První uvádí pojmy z oblasti měření teplot. Závěr kapitoly je zaměřen na termoelektrické teploměry (termočládky). Je zde uveden princip činnosti termočládku, typy termočládků a metody měření.

Druhá část uvádí nejpoužívanější pojmy z oblasti metrologie. Je zde uveden mezinárodní metrologický slovník VIM3. V této kapitole je také popsán vývoj měření teplot a metrologie ve dvacátém století. Druhá část je doplněna o aktuálně používanou mezinárodní teplotní stupnici ITS-90, která je stěžejním dokumentem pro měření teplot. Stupnice ITS-90 je v České republice platná od roku 1990.

Třetí část se zabývá hodnocením výsledků měření. Popisuje rozdělení chyb v oblasti měření a zabývá se nejistotami měření.

Čtvrtá část obsahuje experiment měření teplot na vápenné peci Maerz, její popis a princip fungování. Je zde popsán detailně měřicí proces, který vede k datovému záznamu a grafickému znázornění teploty do počítačového softwaru WinCC. Tento experiment je vyhodnocen z pohledu nejistot měření.

Seznam použitých symbolů a zkratk

$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$f(x)$	hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny X
$^{\circ}\text{F}$	stupeň Fahrenheita
$^{\circ}\text{K}$	Kelvinův stupeň (platil do roku 1967)
$^{\circ}\text{R}$	stupeň Réaumura
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ITS-90	Mezinárodní teplotní stupnice
K	kelvin (platí od roku 1967)
M_k	měřicí konec termočlánku
mV	milivoltmetr
mA	miliampér
p	tlak
P	pravděpodobnost
R	odpor
R_d	odporová dekáda
R_T	odpor závislý na teplotě
S_k	srovnávací konec termočlánku
s	výběrová směrodatná odchylka
s^2	výběrový rozptyl
k	koeficient rozšíření
SI	Mezinárodní soustava jednotek
T	teplota
T1505	termoelektrický snímač teploty
t_C	teplota Celsiova
t_F	teplota Fahrenhaitova
T_M	teplota měřicího konce termočlánku
T_S	teplota srovnávacího konce termočlánku
T1, T2,	termočlánek
U	napětí
u_{AX}	standardní nejistota typu A
u_{BX}	standardní nejistota typu B

u_c	kombinovaná standardní nejistota
VIM3	Mezinárodní metrologický slovník
W	energie
WECC	Západoevropská spolupráce při kalibracích
X	spojitá náhodná veličina
\bar{X}	aritmetický průměr
α	součinitel závislý na druhu materiálu použitého pro výrobu termočlánku
β	součinitel závislý na druhu materiálu použitého pro výrobu termočlánku
μ	střední (skutečná) hodnota náhodné veličiny X
σ	směrodatná odchylka náhodné veličiny X
ϑ	teplota
λ	vlnová délka

1 Definice pojmů pro oblast měření teploty

1.1 Definice pojmů termodynamika, teplota, teplo

Termodynamika jako obor se zabývá vnitřní energií systémů, tzv. tepelnou energií. Stěžejním pojmem termodynamiky je **teplota**, která je jednou ze sedmi základních veličin Mezinárodní soustavy jednotek (SI). Základní jednotkou teploty je kelvin (K) a vedlejší jednotkou stupeň Celsia (°C). Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly 0 K „kelvinů“, což je vyjádřeno ve stupních celsia $-273,15\text{ °C}$. K měření teploty se používají teploměry. [1]

Tabulka č. 1.1 Mezinárodní soustava jednotek SI, jednotky SI [2]

Veličina	Základní jednotka SI	
	Název	Značka
Délka	metr	m
Hmotnost	kilogram	kg
Čas	sekunda	s
Elektrický proud	ampér	A
Termodynamická teplota	kelvin	K
Látkové množství	mol	mol
Svítilivost	kandela	cd

Teplota

Význam termínu teplota pochází z latinského slova "*temperatura*", což lze přeložit jako "příjemný pocit".

Teplota je základní kvantitativní fyzikální stavová skalární veličina, určující stav termodynamické rovnováhy.

Teplo

Teplo je kvantitativní fyzikální dějová veličina popisující termodynamický děj jako posloupnost stavů. Teplo popisuje změny vnitřní energie související s pohybem částic dané soustavy (odpovídá energii, kdy nastává tepelná výměna). Označujeme jej „Q“ s jednotkami „J“ – joule. [3]

1.2 Označení, jednotky

Základní jednotka termodynamické teploty:

- „T“ teplota, základní jednotka 1 kelvin

Základní jednotkou v soustavě SI je 1 kelvin, značka K. 1 kelvin je 273,16-tá část termodynamické teploty trojného bodu vody.

Dalšími používanými veličinami jsou:

- „t_C“ teplota, základní jednotka 1 stupeň Celsia
 $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$
- „t_F“ teplota, základní jednotka 1 stupeň Fahrenheita,
 $1\text{ }^{\circ}\text{F} = 9/5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (používaný v USA)
 $t_{\text{F}} = 9/5t_{\text{C}} + 32$; $0\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 32\text{ }^{\circ}\text{F}$; $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 180 + 32 = 212\text{ }^{\circ}\text{F}$

Oba výše uvedené vztahy platí pro jednotky teplotního rozdílu, pro vyjádření teploty se však tyto jednotky používají v odlišných stupnicích s jinak nastaveným nulovým bodem. [1]

1.3 Měření teploty

Měřením teploty se zabývá termometrie, která je oborem fyziky, jež se dále věnuje definování teplotních stupnic.

V současnosti se používá Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1990 (ITS-90).

1.4 Teplotní stupnice

Následující *Tabulka č. 1.2* uvádí definice nejdůležitějších historických i současných teplotních stupnic pomocí referenčních bodů teploty.

Tabulka č. 1.2 Definice teplotních stupnic

Definice teplotních stupnic				
STUPNICE	Kelvinova	Celsiova	Fahrenheitova	Réaumurova
JEDNOTKA	kelvin	stupeň Celsia	stupeň Fahrenheita	stupeň Réaumura
ZNAČKA	K	°C	°F	°Ré, °Re, °R
Dolní referenční teplota	T_0	$T_t(\text{H}_2\text{O})$	$T(\text{chlad.})^{***}$	$T_t(\text{H}_2\text{O})$
HODNOTA	= 0 K	= 0 °C **	= 0 °F	= 0 °Ré
Horní referenční teplota	$T_{tr}(\text{H}_2\text{O})$	$T_v(\text{H}_2\text{O})$	$T(\text{těl.})^{***}$	$T_v(\text{H}_2\text{O})$
HODNOTA	= 273,16 K *	= 100 °C **	= 96 °F	= 80 °Ré
NAVRHL	W. Thomson, lord Kelvin	Anders Celsius	Gabriel Fahrenheit	R.-A. Ferchault de Réaumur
ROK VZNIKU	1848	1742	1714	1730
OBLAST ROZŠÍŘENÍ	celý svět	celý svět	USA	Záp. Evropa do konce 19. stol.

Legenda k tabulce:

* Původně definována pomocí Celsiovy stupnice (teplotní rozdíl $1 \text{ K} \equiv 1 \text{ }^\circ\text{C}$).

** Referenční body byly v původním návrhu obrácené (podobně jako u Delisleovy stupnice); dnes definována pomocí Kelvinovy stupnice (teplotní rozdíl $1 \text{ }^\circ\text{C} \equiv 1 \text{ K}$).

*** Teplota chladicí směsi ledu, vody a salmiaku nebo mořské soli ($-17,8 \text{ }^\circ\text{C}$) a „tělesná teplota zdravého člověka“ ($36,5 \text{ }^\circ\text{C}$).

1.5 Teploměry

Druhy teploměrů podle funkčního přístupu:

- **Kapalinový teploměr** – k měření teploty se využívá teplotní roztažnosti teploměrné kapaliny. Nejznámější zástupci jsou teploměry rtuťové (při měření vyšších teplot používáme teploměry rtuťové plněné inaktivním plynem pod tlakem až několik megapascalů), lihové, atd.

- **Bimetalový teploměr** - k měření teploty se používá bimetalový pásek. Využívá se zde rozdílné teplotní délkové roztažnosti dvou kovů. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ukazovatel přístroje.
- **Plynový teploměr** - k měření teploty se využívá závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu, popř. závislost objemu plynu na teplotě při stálém tlaku.
- **Odporový teploměr** - k měření teploty využívá závislost elektrického odporu vodiče nebo polovodiče na teplotě.
- **Termoelektrický teploměr (termočlánek)** - k měření teploty využívá termoelektrický jev (nejčastěji používané termočláanky měď-konstantan a železo-konstantan). Výhodou je malá tepelná kapacita a možnost měření rychle se měnící teploty. Změnou teploty spoje dvou různých kovů se mění vzniklé termoelektrické napětí.
- **Radiační teploměr (infrateploměr)** - teploměr určený k měření vysokých teplot založený na zákonech tepelného záření (Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefanův-Boltzmannův zákon). Měří záření vysílané tělesy do okolí.
- **Kontaktní teploměr** - sepne kontakt při dosažení nastavené teploty. Používá se v regulaci a automatizaci, např. termostat pro klimatizaci nebo akvárium.
- **Maximo-minimální teploměr** - teploměr ve tvaru „U“, který si pamatuje maximální a minimální dosaženou teplotu za sledované období, od posledního nulování. [5]

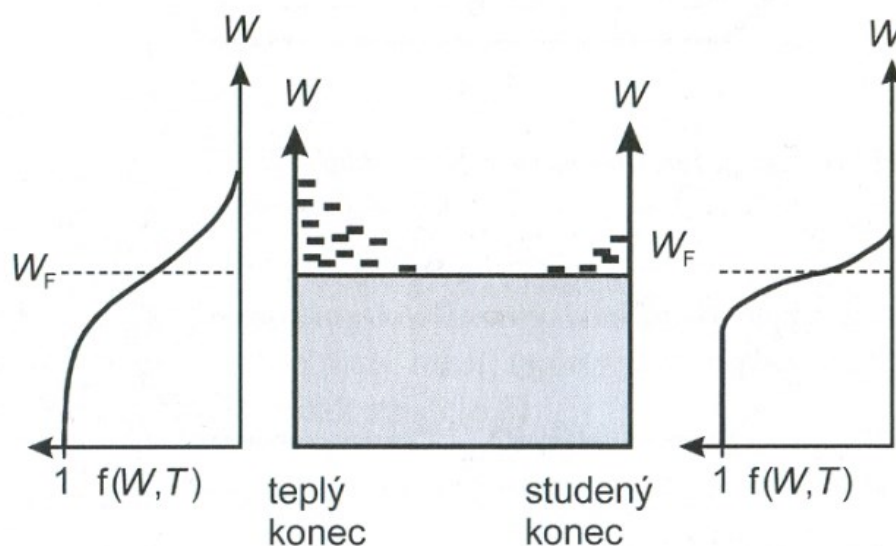
1.6 Termoelektrické teploměry (termočláanky)

Tomuto typu teploměru a metodám měření se budeme věnovat podrobněji, jelikož bude využit princip měření s termočláanky v případové studii v „Kapitole č. 4“.

1.6.1 Seebeckův jev

Termoelektrické články jsou založeny na Seebeckově jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii (v polovodičích i větší prostorovou hustotu, tj. koncentraci), a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tím vzniká jednostranná převaha nábojů kladných a záporných, a proto znaménka absolutních Seebeckových koeficientů souhlasí se znaménkem těch nositelů nábojů, kterých

je ve vodiči více. Rozložení nositelů souvisí s Fermiho hladinami W_F dle Obrázku č. 1.1.. Reverzním jevem k Seebeckovu jevu je Peltierův jev. [6]



Obrázek č. 1.1 Seebeckův jev pro jeden materiál
(W -energie, T – termodynamická teplota) [6]

1.6.2 Princip činnosti

Termočlánek vznikne vodivým spojením dvou drátů z vhodných materiálů na obou koncích. Při rozdílné teplotě těchto konců vznikne v obvodu napětí, které je dáno rozdílem termoelektrických napětí materiálů obou spojů.

Termoelektrické napětí v obvodu lze vyjádřit přibližným vztahem:

$$u = \alpha(T_1 - T_2) + \beta((T_1 - T_2)^2)$$

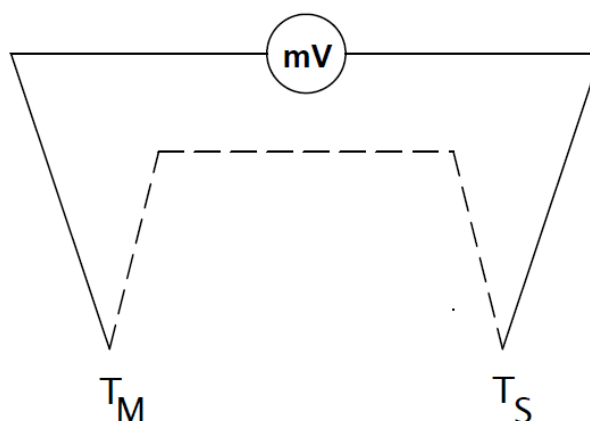
α , β – součinitelé závislí na druhu materiálu použitého pro výrobu termočlásku

T_1 , T_2 – teploty konců termočlásku

Pro zvýšení citlivosti je možné řadit termočlásky do série a vytvářet tak termoelektrické baterie. [6]

1.6.3 Základní zapojení

Konec termočlánku, kterým se měří teplota, se nazývá měřicí konec, druhý konec je buď volně vyveden, nebo je na svorkách měřicího přístroje a nazývá se srovnávací konec termočlánku.



T_M – teplota měřicího konce termočlánku

T_S - teplota srovnávacího konce termočlánku

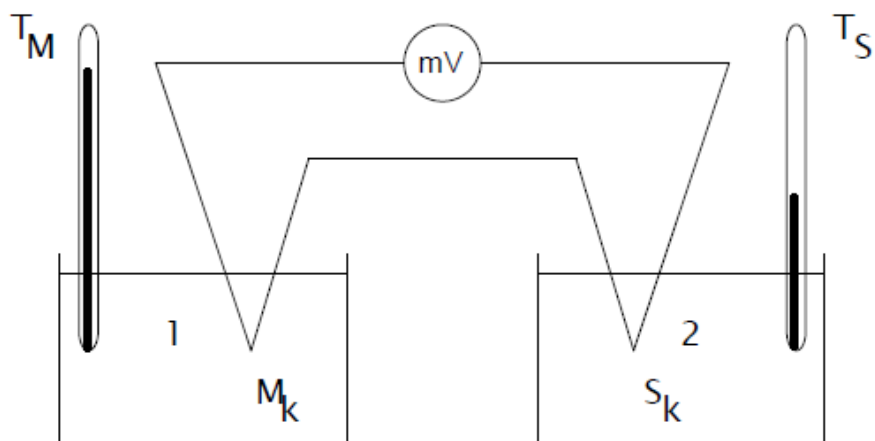
Obrázek č. 1.2 Základní zapojení termočlánku

1.6.4 Výhylkové metody měření teplot termočlánky

Nevýhodou těchto metod je chyba způsobená průchodem proudem. Při jakékoliv změně odporu v obvodu termočlánku se změní velikost procházeného proudu a tím i velikost výchylky (např. změna délky drátů termočlánku). [7]

Výhylková metoda s vyvedeným srovnávacím koncem

Srovnávací spoj je udržován na konstantní teplotě termostatem, který může být vyhříván na konstantní teplotu nejčastěji 50 °C, nebo termoska s ledovou drtí pro teplotu 0 °C. Schéma zapojení je na *Obrázku č. 1.3*.

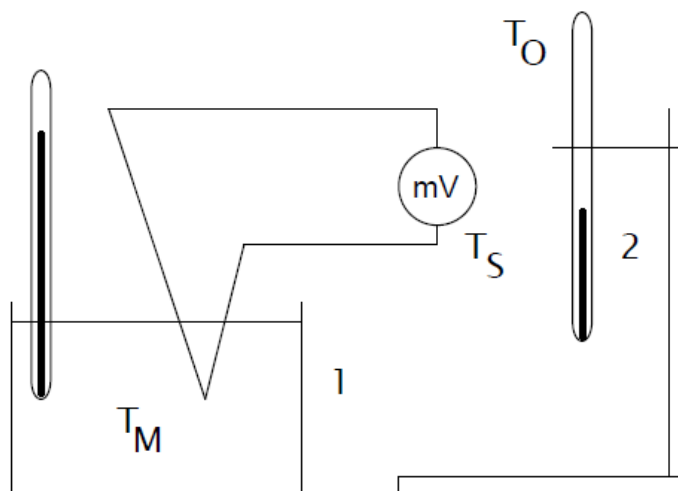


- 1 - měřená teplota T_M
- 2 - termostat s referenční (srovnávací teplotou T_S)
- M_k - měřicí konec
- S_k - srovnávací konec

Obrázek č. 1.3 Výchylková metoda s vyvedeným srovnávacím koncem [7]

Výchylková metoda s nevyvedeným srovnávacím koncem

Tato metoda je vhodná pouze pro hrubá měření, protože teplota srovnávacího konce není v čase konstantní, závisí na teplotě okolí. Vztažná teplota je měřena teploměrem, který má být umístěn co nejbližně milivoltmetru. Schéma zapojení je na Obrázku č. 1.4.

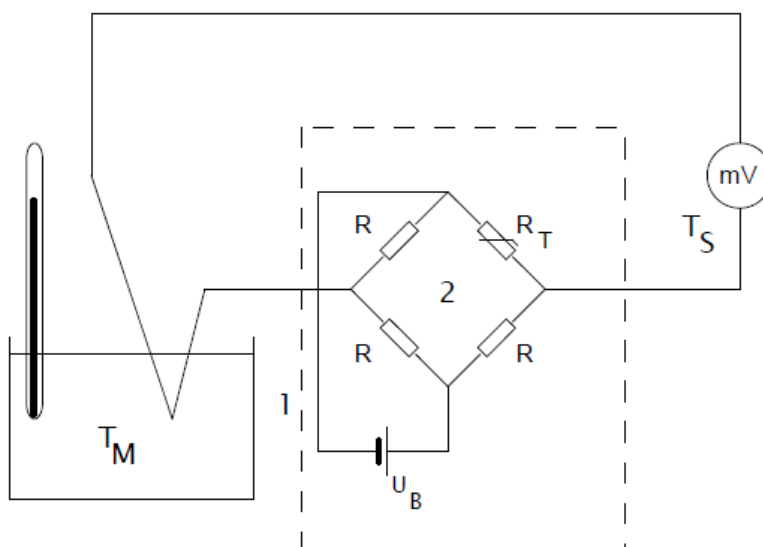


- 1 - měřená teplota T_M
- 2 - teploměr pro měření teploty okolí (teploty srovnávacího spoje)

Obrázek č. 1.4 Výchylková metoda s nevyvedeným srovnávacím koncem [7]

Výchylková metoda se samočinnou kompenzací vlivu teploty okolí

Nepříznivý vliv kolísání vztažné teploty vlivem měnicí se teploty okolí lze kompenzovat teplotně závislým odporem. Schéma zapojení je na *Obrázku č. 1.5*. V můstku je teplotně závislý odpor R_T , změnou tohoto odporu s teplotou způsobí změnu napětí v diagonále můstku takové velikosti a znaménka, že kompenzuje vliv kolísání teploty. Správná funkce je ovlivněna nastavením vhodného napájecího napětí U_B a umístěním můstku (kompenzační krabice) co nejbližže k srovnávacímu konci T_S . [7]



1 - měřená teplota T_M

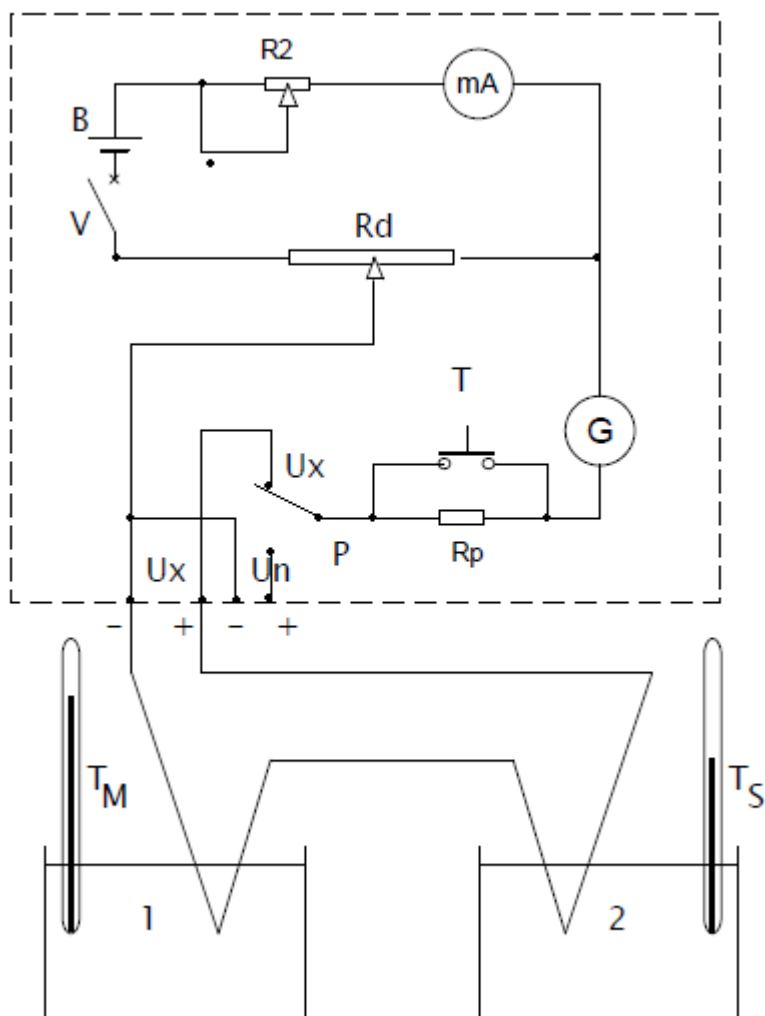
2 - obvod samočinné kompenzace (kompenzační krabice)

Obrázek č. 1.5 Výchylková metoda se samočinnou kompenzací [7]

1.6.5 Kompenzační metoda měření teplot termočlánky

Kompenzační metoda měření termoelektrického napětí termočlánku porovnává napětí termočlánku se stejně velkým napětím (o stejné polaritě) nastaveném na kompenzátoru. Stav vyrovnání indikuje galvanoměr, který ve vykompenzovaném stavu má nulovou výchylku,

která potvrzuje, že mezi termočlánkem a kompenzátorem neteče vyrovnávací proud. Kompenzátor je tedy zdroj proměnného známého napětí a polarity.



R_d - odporová dekáda

T - tlačítka pro změnu citlivosti galvanoměru

P - přepínač měření U_x a cejchování etalonem U_n

V - obvod samočinné kompenzace (kompenzační krabice)

1 - měřené prostředí

2 - teplota srovnávacího konce termočlánku

Obrázek č. 1.6 Technický kompenzátor pro měření stejnosměrných napětí [7]

Princip měření. Nastavením jednotkového proudu odporem R_2 se získá na jednotkovém odporu odporové dekády R_d jednotkový úbytek napětí. Nastavením jednotkového proudu je nejprve podle miliampérmetru (1 mA), pro přesné nastavení proudu I ,

slouží Westonův etalonový článek s přesně určeným napětím ($U_n = 1,01865$ V). Velikost U_n se nastaví na odporové dekádě R_d a v poloze přepínače P na U_n se tlačítkem připojí galvanoměr a případná výchylka se srovná na nulu proměnným odporem R_2 . Údaj miliampérmetru se zaznamenává a ponechává se při každém přepnutí rozsahu kompenzátoru na téže hodnotu. V poloze přepínače P a U_x je na svorkách kompenzátoru označených U_x napětí uvedené polarity a velikosti, které je dáno nastavením klikové dekády R_d . Vykompenzovaný stav je indikován nulovou výchylkou galvanoměru G , který je do obvodu připojován tlačítkem T „hrubě“ a „jemně“.

Termočlánek je třeba připojit ke kompenzátoru ve správné polaritě, která závisí i na znaménku rozdílu teplot T_M a T_S . Výhodou kompenzační metody je skutečnost, že ve vykompenzovaném stavu neteče obvodem termočlánu proud, nezáleží pak ani na jeho odporu. Termočlánek může mít i nevyvedený srovnávací konec, ale pro tuto přesnou metodu měření se používá méně často. [7]

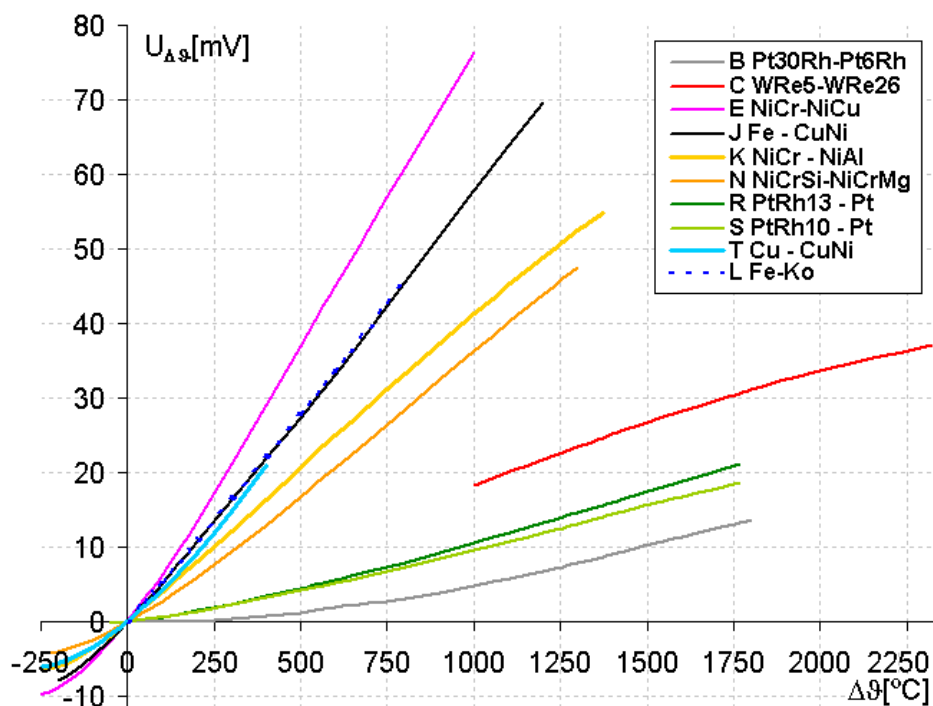
1.6.6 Výběr vodičů vhodných termočlánků

Závisí na těchto pracovních podmínkách:

- rozsah měřených teplot,
- požadovaná přesnost měření,
- chemická odolnost vůči agresivnímu prostředí,
- požadovaná životnost termoelektrického článku.

1.6.7 Typy termoelektrických článků

Jednotlivé páry termoelektrických materiálů pro výrobu termoelektrických článků jsou normalizovány. Byly vybrány materiály zajišťující přijatelnou nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření, dlouhodobou stabilitu charakteristiky $E = f(\Delta t)$. Označení jednotlivých termoelektrických článků se provádí velkými písmeny. Statické charakteristiky termočlánků jsou na *Obrázku č. 1.7*.



Obrázek č. 1.7 Charakteristiky termoelektrických článků [8]

Vlastnosti a použitelnost termoelektrických článků:

- TYP B: má složení PtRh30-PtRh6 a je používán až do teploty 100 $^{\circ}C$ (v rozsahu do 300 $^{\circ}C$ má velmi malou citlivost), obdobné vlastnosti jako R a S, při teplotách nad 1200 $^{\circ}C$ je stabilnější.
- TYP C: má složení WRh5-WRh26 a stejné vlastnosti jako typ G.
- TYP E: má složení NiCr-CuNi (chromel-konstantan), má nejvyšší hodnotu termoelektrického koeficientu, vhodný pro vakuum a středně oxidační atmosféru kde se dá využít bez ochranného krytí.
- TYP G: má složení W-WRh a je vhodný pro extrémně vysoké teploty, obvykle se nepoužívá pod 400 $^{\circ}C$, je chemicky stabilní a vhodný pro použití v oxidační a inertní atmosféře, ve vakuu a vodíku.

- TYP J: má složení Fe-CuNi (železo-konstantan) je vhodný pro oxidační, redukční i inertní atmosféru vakuu. V redukční atmosféře ho lze použít bez ochranného krytí.
- TYP K: má složení NiCr-NiAl (chromel-alumel), vhodný pro oxidační a inertní atmosféru, je necitlivý pro neutronový tok, není vhodný pro měření ve vakuu.
- TYP N: má složení NiCrSi-NiSiMg (nicosil-nisil) a má velmi stabilní charakteristiku až do 1300 °C, vhodný pro cyklické změny teploty a dále je vhodný pro jadernou energetiku, neboť je odolný vůči neutronovému toku.
- TYP R: má složení PtRh13-Pt a je používán pro měření vysokých teplot až do 1780°C, je odolný vůči oxidaci a korozi, ale vždy musí být v ochranném provedení.
- TYP S: má složení PtRh10-Pt a je používán pro měření vysokých teplot až do 1780°C, je odolný vůči oxidaci a korozi, ale vždy musí být v ochranném provedení, stejně jako R.
- TYP T: má složení Cu-CuNi (měď-konstantan), nejlepší termoelektrický článek pro nízké teploty kryogenní aplikace, v redukční, oxidační atmosféře a ve vakuu ho lze použít až do teploty 700 °C. [6]

Tabulka č. 1.3 Typy termoelektrických článků a základní údaje dle IEC 584.1 (ČSN EN 60584-1), dlouhodobé a krátkodobé využití závisí na konstrukci snímače a průměru termoelektrických vodičů. [14]

Kód	složení	dlouhodobě (°C) přibližné hodnoty	krátkodobě (°C) přibližné hodnoty	přibližná hodnota α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) při 100 °C	přibližná hodnota α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) při 500 °C	přibližná hodnota α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) při 1000 °C
K	NiCr (+) NiAl (-)	0 až +1100	-180 až +1350	42	43	39
T	Cu (+) CuNi (-)	-185 až +300	-250 až +400	46	-	-
J	Fe (+) CuNi (-)	+20 až +700	+180 až +750	54	56	59
N	NiCrSi (+) NiSiMg (-)	0 až +1100	-270 až +1300	30	38	39
E	NiCr (+) CuNi (-)	0 až +800	-40 až +900	68	81	-
R	PtRh13 (+) Pt (-)	0 až +1600	-50 až +1700	8	10	13
S	PtRh10 (+) Pt (-)	0 až +1550	-50 až +1750	8	9	11
B	PtRh13 (+) PtRh6 (-)	+100 až +1000	+100 až +1820	1	5	9
G	W (+) WRh (-)	+20 až +2320	+0 až +2600	5	16	21
C	WRh5 (+) WRh26 (-)	+50 až +1820	+20 až +2300	15	18	18

2 Vývoj měření teplot a současné metrologické zabezpečení (ITS 90)

2.1 Metrologie

Slovo metrologie vzniklo složením dvou řeckých slov: metron, které lze přeložit jako měřidlo a logos, které znamená slovo.

Metrologie je vědní a technický obor, který se zabývá všemi činnostmi týkajícími se měření (měřicími jednotkami a metodami, technikou měření a měřidly a také některými vlastnostmi osob provádějících měření). V užším slova smyslu je to disciplína, která se zabývá zajišťováním jednotnosti a přesnosti měření. Obsahem metrologie jsou zejména měřicí jednotky (soustava jednotek a jejich realizace pomocí etalonů), vlastnosti měření (metody, zpracování výsledků, teorie chyb a nejistot), vlastnosti měřidel a měřících přístrojů. Do metrologie patří také stanovení fyzikálních a technických konstant.

Metrologie představuje systematické zkoumání, organizaci a využití vhodných metod, pomocí kterých se shromažďují informace z okolního světa. [9]

Metrologie zasahuje významným způsobem do všech odvětví výroby, hospodářství, vědy a ochrany životního prostředí.

2.2 Mezinárodní metrologický slovník

Jako stěžejní terminologický dokument metrologie slouží International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM3), tedy metrologický slovník (dále jen slovník). Terminologie a překlady tohoto dokumentu do národních verzí jsou dále přejímány do národních norem. Platná třetí verze slovníku má označení TNI 01 0115 a byla vydána 1. února 2009.

Překlad slovníku VIM3 obsahuje termíny a definice metrologických pojmů v českém a anglickém jazyce. Ve slovníku je uveden soubor definic a jim příslušejících termínů pro systém základních a všeobecných pojmů používaných v metrologii spolu s pojmovými diagramy pro vysvětlení jejich vztahů. U mnoha definic jsou uvedeny doplňkové informace ve formě příkladů a poznámek.

Slovník je určen k obecnému použití jak pro vědecké pracovníky a techniky, tak

také pro odborníky zabývající se plánováním nebo prováděním měření bez ohledu na úroveň nejistoty měření a bez ohledu na obor aplikace. Je také obecně použitelný pro vládní a nevládní orgány, obchodní společnosti, akreditační orgány, řídicí orgány a odborné společnosti.

Slovník je určen k podpoře celosvětové harmonizace terminologie používané v metrologii. VIM3 je rozdělen do pěti kapitol, kde jsou uvedeny termíny a jejich definice v originálu v anglickém a francouzském jazyce. [5]

Kapitoly:

1. Veličiny a jednotky.
2. Měření.
3. Prostředky pro měření.
4. Vlastnosti měřicích zařízení.
5. Etalony (standardy měření).

2.3 Nejpoužívanější pojmy metrologie [5]

Justování

Justování je činnost, která zajišťuje, aby funkční stav a správnost měřidla odpovídaly podmínkám používání měřidla. Nastavení a připravení měřidla tak, aby mohlo správně měřit v potřebném rozsahu a s požadovanou přesností. To vše samozřejmě v konkrétním prostředí, kde má měření probíhat.

Kalibrace měřidla

Kalibrace je soubor úkonů, kterými se za specifikovaných podmínek stanoví vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem, systémem, hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony. Jde o takové činnosti, aby měřidlo, se kterým měříme veličiny, ukazovalo správné hodnoty v návaznosti na příslušný etalon.

Kalibrace je souhrn operací, jejichž úkolem je zjistit metrologické vlastnosti měřidla a potvrdit, že měřidlo vyhovuje daným předpisům. U některých měřidel a měřicích přístrojů je předpisem (Zákon o metrologii) stanoveno jejich periodické ověřování.

Kontrola

Kontrola je hodnocení shody pozorováním a posouzením, doplněné podle vhodnosti měření, zkoušením nebo srovnáváním. Kontrola je taková činnost, při které se zjišťuje, zda bylo uděláno to, co jsme chtěli, nebo bylo dosaženo výsledků, které jsme požadovali.

Metrologická konfirmace

Metrologická konfirmace je soubor úkonů požadovaných pro zajištění toho, aby měřicí vybavení bylo ve shodě s požadavky na jeho zamýšlené použití. Metrologická konfirmace obecně zahrnuje kalibraci nebo ověřování, jakékoli nezbytné seřízení nebo opravu a následnou recalibraci, porovnání s metrologickými požadavky na zamýšlené použití vybavení, stejně jako jakékoli požadované zapečetění a označení štítkem.

Monitorování

Monitorování je opakované a trvalé sledování metrik, funkcí, činností a jiných jevů, za účelem včasné detekce odchylek. Pravidelné monitorování slouží k tomu, abychom měli procesy, činnosti a jiné aktivity firmy pod kontrolou a včas zjistili, že dochází k odchylkám, které mohou firmě způsobit ztráty.

Ověřování

Ověřování je potvrzení prostřednictvím poskytnutí objektivních důkazů, že specifikované požadavky byly splněny. O tom, že skutečně byly všechny požadavky splněny, jsou jednoznačné důkazy.

Ověření měřidla

Ověření měřidla jsou úkony prováděné autorizovaným metrologickým střediskem za účelem zjištění a potvrzení, že měřidlo vyhovuje požadavkům předpisů pro ověření. Zahrnují zkoušku měřidla, opatření měřidla ověřovací značkou, resp. vyhotovení ověřovacího listu.

Přezkoumání

Přezkoumání je činnost prováděná k určení vhodnosti, přiměřenosti a efektivnosti předmětu přezkoumání k dosažení stanovených cílů.

Schvalování

Schvalování je formální vyjádření souhlasu s návrhem nebo potvrzením, že osoba

nebo předmět splňují požadavky.

Sledovatelnost

Sledovatelnost je schopnost vysledovat historii, použití nebo umístění toho, co je předmětem úvah. Umožní nám zpětně zjistit, kdy byl výrobek vyroben, z jakého materiálu, kdo kontroloval rozměry apod. O tom, co budeme potřebovat zpětně zjistit, rozhoduje zákazník nebo firma sama.

Validace

Validace je potvrzení prostřednictvím poskytnutí objektivních důkazů, že požadavky na specifické zamýšlené použití nebo na specifickou aplikaci byly splněny. Jedná se o důkaz, že zamýšlené použití postupu (procesu) činnosti je správné. Validace se používá tam, kde není možné použít měření, zkoušky, testy apod., kde tedy nelze jednoduše prokázat, že použití je naprosto správné. Je možné dokladovat, že při dodržení daných činností bylo dosaženo požadovaných výsledků. Při opakování činnosti bychom s vysokou pravděpodobností měli dosáhnout stejných výsledků.

Zkouška

Zkouška je stanovení jedné nebo několika charakteristik (hodnot) podle určitého postupu. Zkouškou chceme zjistit, zda dosahujeme zcela konkrétní veličiny nebo charakteristiky.

2.4 Dvacáté století

Ve 20. století byl zaznamenán objev polovodičových součástek, jako jsou termistory, integrované obvody - senzory a také optické teplotní senzory. 20. století také upřesnilo teplotní stupnice. Teploty lze nyní měřit s přesností asi na 0,001 °C.

V roce 1954 na 10. Generální konferenci pro váhy a míry byl zvolen kelvin metrickou jednotkou termodynamické teploty. Tato konference přiřadila k trojnému bodu vody přesnou hodnotu 273,15 °K. Trojný bod látky je termodynamická singularita, ve které plyn, kapalina a pevná fáze mohou koexistovat v termodynamické rovnováze. Trojný bod je proto mnohem přesnější než referenční teplotní, buď bod mrazu nebo bod varu.

V roce 1967 na 13. Generální konferenci pro váhy a míry byl změněn název termodynamické jednotky stupeň teploty Kelvin (značka °K) pouze na kelvin (symbol K). Na

základě dokonalejších a přesnějších metod měření byla upřesněna hodnota trojného bodu vody o 0,01 K na 273,16 K.

Poslední změna nastala s aktualizací Mezinárodní teplotní stupnice v roce 1990 na **Mezinárodní teplotní stupnice 1990 (ITS-90)**. Obsahuje definici jednotky tepla (kelvin, stupeň Celsia) a 17 teplotních bodů látek (trojný bod, tání, var, atd.).

2.5 Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 (přijata v roce 1990) překrývá teplotní rozsah od 0,65 K až do nejvyšších prakticky měřitelných teplot s použitím Planckova radiačního zákona. Stupnice ITS-90 je dělena na teplotní rozsahy a podrozsahy. Rozsah stupnice je od 0,65 K až po nejvyšší teploty měřitelné optickým pyrometrem.

Zákon Planckův - emise a absorpce zářivé energie se může dít jen po celistvých násobcích kvanta $e = h \cdot n$, kde n je vlastní frekvence oscilátoru a h „účinkové kvantum“, tedy Planckova konstanta h . Neplatí tedy klasický předpoklad, že energie se může sdělovat plynule. Planckův zákon spektrálního (monochromatického) vyzařování lze vyjádřit vztahem:

$$H_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

kde c_1 je první radiační konstanta, λ je vlnová délka záření, c_2 druhá radiační konstanta, T Kelvinova teplota. [1]

Stupnice ITS-90 je založena:

1. na řadě definičních pevných bodů,
2. na interpolačních metodách, jež se používají mezi těmito body. Definičními pevnými body jsou teploty určitého počtu termodynamických stavů realizovatelných experimentálně, jež byly přijaty pro označení konvenčních hodnot. Interpolace jsou definovány mezi 0,65 K a 5 K pomocí rovnice tlaku nasycené páry helia, mezi 3 K a 24,5561 K interpolačním stejnoobjemovým plynovým teploměrem, mezi

13,8033 K a 961,78 °C pomocí odporového platinového teploměru a pro teploty vyšší pomocí Planckova vyzařovacího zákona.

Základní rozsahy ITS-90 jsou

- Rozsah 0,65 K až 5,0 K, kde je T_{90} definována tlakem par ^3He a ^4He (rozsah I. viz *Tabulka č. 2.3*).
- Rozsah 3,0 K až 24,5561 K (trojný bod neonu), kde je T_{90} definována plynovým teploměrem pomocí pevných bodů a zvláštních interpolačních postupů (rozsah II. viz *Tabulka č. 2.3*).
- Nejběžnější rozsah 13,8033 K (trojný bod vodíku) až 961,78 °C (bod tuhnutí stříbra) je T_{90} definována pomocí platinových odporových teploměrů (rozsah III. viz *Tabulka č. 2.3*).
- Nad 961,78 °C je T_{90} definována pomocí jednoho teplotního bodu (bod tuhnutí stříbra) a Planckova radiačního zákona (rozsah IV. viz *Tabulka č. 2.3*). [10]

Podrozsahy ITS-90 pod 0 °C (zabezpečené platinovými odporovými teploměry):

- Interval 13,8033 K (trojný bod vodíku) až 273,16 K (trojný bod vody).
- Interval 24,5561 K (trojný bod neonu) až 273,16 K (trojný bod vody).
- Interval 54,3584 K (trojný bod kyslíku) až 273,16 K (trojný bod vody).
- Interval 83,8058 K (trojný bod argonu) až 273,16 K (trojný bod vody).

Podrozsahy ITS-90 nad 0 °C (zabezpečené platinovými odporovými teploměry):

- Interval 0 °C až 961,78 °C (bod tuhnutí stříbra).
- Interval 0 °C až 660,3210 °C (bod tuhnutí hliníku).
- Interval 0 °C až 419,527 °C (bod tuhnutí zinku).
- Interval 0 °C až 231,928 °C (bod tuhnutí cínu).
- Interval 0 °C až 156,5985 °C (bod tuhnutí india).
- Interval 0 °C až 29,7646 °C (bod tání galia).

Tabulka č. 2.1 Seznam pevných teplotních bodů v ITS-90 [2]

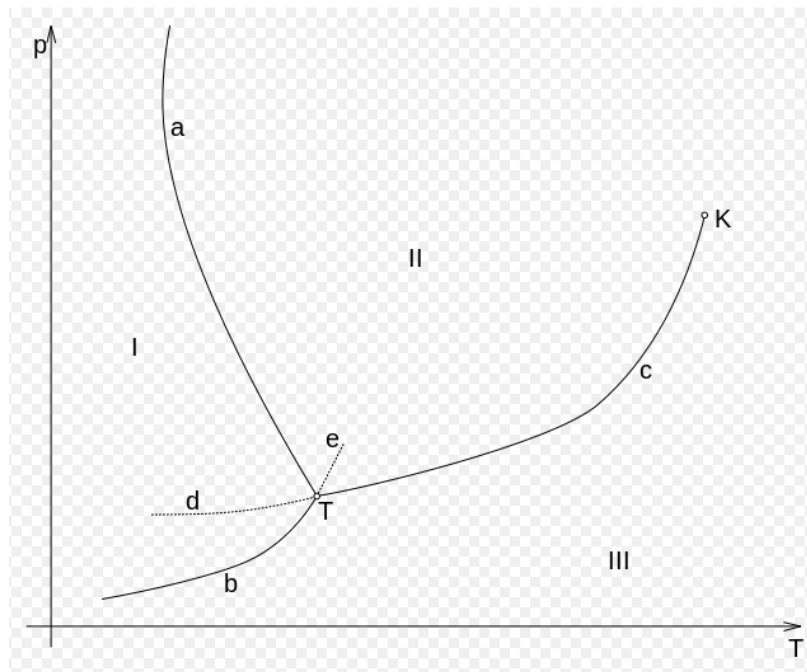
Číslo	Substance a její stav	Definující bod v Kelvinech (rozsah)	Definující bod ve stupních Celsia (rozsah)	Základní rozsah ITS-90
1	tlak vodní páry / teplotní vztah pro helium	3 až 5	-270,15 až -268,15	I.
2	trojný bod vodíku	13,8033	-259,3467	
3	vodík v rovnovážné koncentraci, bod tlaku par	17	-256,15	II.
4	vodík v rovnovážné koncentraci, bod tlaku par	20,3	-252,85	
5	trojný bod neonu	24,5561	-248,5939	
6	trojný bod kyslíku	54,3584	-218,7916	
7	trojný bod argonu	83,8058	-189,3442	III.
8	trojný bod rtuti	234,3156	-38,8344	
9	trojný bod vody	273,16	0,01	
10	bod tání gallia	302,9146	29,7646	
11	bod tuhnutí india	429,7485	156,5985	
12	bod tuhnutí cínu	505,078	231,928	
13	bod tuhnutí zinku	692,677	419,527	
14	bod tuhnutí hliníku	933,473	660,323	
15	bod tuhnutí stříbra	1234,93	961,78	IV.
16	bod tuhnutí zlata	1337,33	1064,18	
17	bod tuhnutí mědi	1357,77	1084,62	

Tato tabulka základních pevných bodů ITS-90 je definována na základě trojných bodů látek, bodů tuhnutí a tání.

2.5.1 Trojný bod

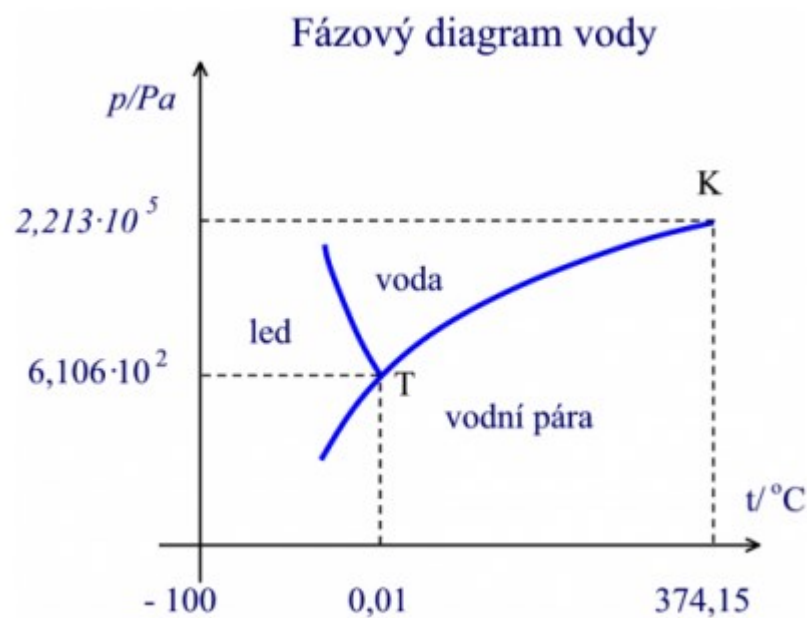
Trojný bod udává teplotu a tlak, při kterých existuje rovnovážný stav mezi všemi třemi skupenstvími současně, tedy mezi pevnou látkou, kapalinou a plynem. Na fázovém diagramu je určen jako průsečík křivky tání, křivky nasycených par a sublimační křivky (např. bod T na *Obrázku č. 2.1*).

Trojný bod je fyzikální pojem označující bod ve fázovém diagramu (*Obrázek č. 2.1* a *č. 2.2*).



a – křivka tání, b – sublimační křivka, c – křivka nasycených par,
 I – pevné skupenství, II – kapalné skupenství, III – plynné skupenství,
 T – trojný bod, K – kritický bod

Obrázek č. 2.1 Fázový diagram p - T (trojný bod T – průsečík křivek a , b , c) [11]



T – trojný bod vody
 K – kritický bod vody

Obrázek č. 2.2 Fázový diagram vody [12]

2.5.2 Bod tání a tuhnutí

Bod tání, respektive tuhnutí, je nejlépe definován jako rovnovážný stav mezi pevnou a kapalnou fází látky. Tání je přeměna pevné látky na kapalinu a tuhnutí je opak, kapalná látka se mění na pevnou.

3 Způsoby hodnocení výsledků měření

Přesnost celého měřicího procesu je souhrnem přesnosti měřidla, přesnosti měřicí metody a přesnosti operátora, který s měřidlem zachází. Je třeba zdůraznit všeobecný rys měření: měřicím zařízením a zvolenou metodou se na měřeném objektu určuje velikost jisté veličiny. Vlivem zpětného působení měřicího zařízení na měřený objekt dochází vždy ke změnám poměrů v měřeném objektu. To je důvod, proč nelze změřit pravou (skutečnou) hodnotu dané veličiny. Při každém reálném procesu měření dochází k chybám. S výsledkem měření se pak musí zacházet vždy jako s náhodnými (přibližnými hodnotami), a v tom smyslu je taky zpracovávat.

Obecně platí požadavek měření, že absolutní chyba $\Delta \rightarrow 0!$, jinak by měření nemělo smysl. [9]

3.1 Rozdělení chyb

3.1.1 Rozdělení chyb dle příčiny vzniku

- **Chyby metody**, jsou většinou korigovatelné, jde o systematické chyby, které vznikají vzájemným působením měřicího přístroje a měřeného obvodu. Zapojením přístroje do obvodu se připojí do obvodu přídavný rezistor, kondenzátor nebo cívka. Měřicí přístroj koná v obvodu práci, a proto odebírá energii z měřeného signálu.
- **Chyby měřicích přístrojů**, dány vlastnostmi přístrojů a nedokonalostí jejich výroby i vlivem okolí. Základní jsou zahrnuty v třídě přesnosti. Je to maximální dovolená chyba, pokud se přístroj používá podle pokynů a za podmínek udaných výrobcem. Pokud nejsou nebo nemohou být dodrženy podmínky stanovené výrobcem, dochází k přídavným chybám (mohou být vyšší než chyby základní).
- **Chyby členů měřicího obvodu**, jsou způsobeny nepřesnostmi vyrovnání a kalibrace etalonů (napětí, odporu, kapacity). Pro přesná měření je udána největší dovolená odchylka od jmenovité hodnoty.
- **Chyby způsobené rušivými vlivy**, způsobené rušivým napětím, kapacitními a

induktivními vazbami apod.

- **Chyby čtení**, způsobeny pozorovatelem při čtení údajů z měřicího přístroje.
- **Celkové chyby měření**, jsou výsledkem většího počtu dílčích chyb.

3.1.2 Rozdělení chyb dle zdrojů

- Objektivní (objektivní příčiny).
- Subjektivní (zaviněné obsluhou).

3.1.3 Rozdělení chyb dle způsobu výskytu

- **Systematické (soustavné) chyby**, při opakování téhož experimentu mají stále stejné matematické znaménko, zůstávají konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem. Tyto chyby můžeme teoreticky eliminovat zavedením početních korekcí při zpracování výsledků měření, nebo úpravou měřicího systému odstraněním příčin vzniku této chyby nebo zavedením korekční veličiny. Prakticky jsou ovšem tyto chyby korigovatelné jen tehdy, známe-li příčinu a zákonitosti jejich vzniku, nebo pokud je můžeme s jistou přesností určit kontrolním měřením. Referenční hodnotou veličiny pro systematickou chybu měření je pravá hodnota veličiny nebo naměřená hodnota veličiny etalonu.
- **Náhodné (nahodilé) chyby**, příčiny těchto chyb nejsou známé a jejich vliv lze zmenšit pouze opakovaným měřením za stejných měřicích podmínek. Při opakovaných měření se mění tyto chyby nepředvídatelným způsobem. (způsobeny například nepravidelným kolísáním teploty). Při opakování měření jsou náhodné chyby rozloženy kolem pravé hodnoty veličiny při normálním rozdělení. Referenční hodnotou je zde aritmetický průměr, získaný teoreticky z nekonečného počtu opakovaných měření téže měřené veličiny.
- **Hrubé chyby (omyly)**, dosahují někdy takové velikosti, že zcela zkreslí a znehodnotí výsledek. Jsou snadno rozeznatelné od ostatních chyb. Je nutné je vyloučit ze souboru naměřených hodnot. [9]

3.2 Nejistoty měření

V současné době se používá při vyhodnocování měření kromě termínu „chyba měření“ při přesných měřeních a v metrologii termín „nejistota měření“.

Nejistota měření (výsledku měření) je takový nezáporný parametr, který charakterizuje rozptýlení hodnot přirozených k měřené veličině na základě určité použité informace. Nejistota se udává nejen u výsledku měření, ale i u parametrů měřidel, u hodnot použitých konstant, atd. Uvádějí se při ověřování přístrojů, při kalibracích a jejich stanovení je metodicky ovlivněno tím, zda se vyhodnocuje:

- přímé měření jedné veličiny,
- nepřímé měření jedné veličiny,
- nepřímé měření více veličin.

Nejistota měření se obvykle skládá z mnoha složek. Základem určování nejistot je statistický přístup k vyhodnocení. Předpokládá se rozdělení pravděpodobnosti, které udává, jak se může měřená hodnota odchylovat od skutečné hodnoty, popřípadě je uvedena pravděpodobnost, s jakou se skutečná hodnota může nacházet na intervalu daném nejistotou. Mírou nejistoty je směrodatná odchylka. [9]

3.2.1 Termíny související se stanovením nejistot

- **Přesnost** (accuracy), je těsnost shody mezi výsledky po sobě jdoucích měření téže měřené veličiny vykonaných za stejných podmínek.
- **Správnost** (trueness), je těsnost shody mezi průměrnou hodnotou získanou z řady výsledků a přijatou referenční hodnotou.
- **Shodnost** (precision), je těsnost shody mezi nezávislými výsledky zkoušek, které byly získány za předem daných podmínek.
- **Opakovatelnost** (repeatability), je těsnost shody mezi výsledky při stejném postupu měření, stejným pozorovatelem, při měření použit stejný měřicí přístroj za stejných podmínek, stejné místo měření a opakování měření v průběhu krátkého časového intervalu nejmenší variabilita výsledků).

- **Reprodukovatelnost** (reproducibility), je těsnost shody mezi výsledky měření téže veličiny provedených za změněných podmínek měření (největší variabilita výsledků).
- **Analýza systému měření** (Measurement System Analysis – MSA), kontrola střední hodnoty, rozptylu, linearity, strannosti, opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.
- **Způsobilost měřicích přístrojů**, stanovení ukazatele způsobilosti C_g a C_{gk} . [9]

3.2.2 Rozdělení standardních nejistot

1. Nejistoty řešené způsobem A (značené u_A)

- způsobeny většinou náhodnými chybami,
- určí se statistickou analýzou naměřených hodnot získaných za přesně definovaných podmínek měření,
- uplatňuje se zde přístup matematicko-statistický.

2. Nejistoty řešené způsobem B (značené u_B)

- způsobeny známými nebo odhadnutelnými příčinami,
- stanovení, postupy které nejsou přímo definovány ve standardu,
- u složitějších zařízení při požadované zvýšené přesnosti je nutné provést podrobný rozbor vzniku chyby a z nich stanovit nejistotu způsobem B,
- příčina vzniku standardních nejistot hodnocených způsobem B může být více a výsledná standardní nejistota u_B je dána jejich geometrickým součtem.

3.2.3 Standardní nejistota u_A

Tato nejistota se získává statistickým vyhodnocováním série opakovaných měření. Je-li n nezávislých pozorování provedeno za stejných podmínek, je odhad výsledné hodnoty prezentován hodnotou výběrového aritmetického průměru \bar{x} . Základem pro vyhodnocování nejistot způsobem A je rozptyl a jeho odmocnina – směrodatná odchylka.

Vztahy pro stanovení variability základního souboru a náhodného výběru:

X_i - hodnota i-tého vzorku měření,

\bar{X} - aritmetický průměr výběru ze základního souboru.

- aritmetický průměr,

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

- rozptyl základního souboru,

$$\sigma^2(X_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

- směrodatná odchylka základního souboru,

$$\sigma(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

- odhad rozptylu náhodného výběru (výběrový rozptyl),

$$s^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

- výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru,

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

- výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru = standardní nejistota řešená způsobem A,

$$u_{AX} = s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

- výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru = standardní nejistota řešená způsobem A pro $n < 10$.

$$u_{AX} = k_s \cdot s(\bar{X})$$

Je-li počet měření n menší než 10, potom se výběrová směrodatná odchylka výběrových průměrů násobí koeficientem k_s , viz *Tabulka č. 3.1*, který závisí na počtu měření.

Tabulka č. 3.1 Koeficienty k_s

Počet měření	9	8	7	6	5	4	3	2
Koeficient k_s	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

- výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru = standardní nejistota řešená způsobem A pro nepravidelný počet opakování měření. [9]

Pokud je nepravidelný počet opakování měření, pak z prvního a posledního měření (N , ostatní četnost n) se určí odhad výběrové směrodatné odchylky a celková nejistota typu A se určí následně:

$$u_{AX} = s(\bar{x}) \sqrt{\frac{N}{n}}$$

3.2.4 Standardní nejistota u_B

Vyhodnocení standardních nejistot řešené způsobem B je založeno na metodě hodnocení nejistoty pomocí jiných způsobů, než je statistická analýza řady pozorování. Analýza série naměřených hodnot vychází z racionálních úsudků a využívá všech dostupných metod o měřicím řetězci, metodě i ostatních vlivech, které výsledky měření mohou ovlivnit. Základem určování tohoto typu nejistoty je zjišťování dílčích nejistot u_{Zj} od dílčích zdrojů Z_j .

Nejistoty B jsou způsobeny nedokonalostmi:

- měřicích prostředků,
- použitých metod měření,
- nestálostí místních podmínek při měření a jejich případných změn,
- vliv operátora,
- ostatní možné vlivy,
- nedokonalostí vztahů, konstant nebo závislostí, které jsou použity při vyhodnocování.

Obecně doporučovaný postup při odhadování u_{ZJ} :

- odhadne se maximální rozsah změn (odchylek) $\pm \Delta z_{j,MAX}$ od jmenovité hodnoty veličiny příslušející zdroji Z_j ,
- posoudí se průběh pravděpodobnosti této změny (odchylky) v intervalu a najde se nejvhodnější aproximace,
- dílčí standardní nejistoty stanovené způsobem B se určí maximální změny daného zdroje $\pm \Delta z_{j,MAX}$,

$$u_{ZJ} = \frac{\Delta Z_{j,MAX}}{\chi}$$

- kde χ je směrodatná odchylka příslušného typu rozdělení. (Tabulka č. 3.2)

Tabulka č. 3.2 Typy rozdělení a koeficienty χ

Typ rozdělení	Změna $\pm \Delta Z_{MAX}$	Koeficient χ	Poznámky
Normální	a	3	pro P = 0,997
normální	b	2	pro P = 0,95
rovnoměrné	a	1,732	v praxi nejčastější
trojúhelníkové - Simpsonovo	a	2,45	
bimodální - trojúhelníkové	A	1,41	
bimodální - Diracovo	A	1	
lichoběžníkové	a, b= a/3	2,32	kde a, b jsou délky rovnoběžných stran lichoběžníku
	a, b= a/2	2,19	
	a, b = 2a/3	2,04	

Odhadnuté u_{ZJ} od jednotlivých zdrojů ovlivnění Z_j se přenášejí do celkové standardní nejistoty řešené způsobem B měřené veličiny X. [9]

$$u_{BX} = \sqrt{\sum_J u_{ZJ}^2}$$

Pokud zdroje J nejistot B tvoří různé fyzikální vlivy, mající různé veličiny, je nutné určit citlivostní koeficienty c_{XZ} , které nejsou obecně bezrozměrné.

$$u_{X,ZJ} = c_{X,ZJ} \cdot u_{ZJ}$$

Stanovení citlivostního koeficientu:

$$c_{X,Z_j} = \frac{\partial X}{\partial Z_j}$$

$z = [z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_m]$ jsou aktuální hodnoty Z .

Pokud vztah $X = f(X)$ není známý, stanoví se c_{X,Z_j} experimentálně změřením hodnoty ΔX_{Z_j} při malé změně ΔZ_j , potom lze psát:

$$c_{X,Z_j} \approx \frac{\Delta X_{Z_j}}{\Delta Z_j}$$

Standardní nejistota typu B se stanoví z dílčích nezávislých nejistot typu B:

$$u_{BX} = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_{X,Z_j}^2 \cdot u_{Z_j}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_{X,Z_j}^2}$$

3.2.5 Kombinovaná standardní nejistota u_c

Standardní nejistota výsledku měření, pokud je výsledek získán z hodnot řady dalších veličin, je nazývána *kombinovaná standardní nejistota* a označena u_c . Je to odhadnutá směrodatná odchylka spojená s výsledkem a je rovna kladné hodnotě druhé odmocniny kombinovaného rozptylu, získaného ze všech složek rozptylu a kovariance.

Je dána geometrickým součtem standardní nejistoty řešené způsobem A a standardní nejistoty řešené způsobem B. Při normálním rozdělení hustoty pravděpodobnosti $N(\mu, \sigma^2)$ měřené veličiny za specifických podmínek udává interval, ve kterém se vyskytuje pravá hodnota měřené veličiny s pravděpodobností $P = 68,27 \%$. [14]

$$u_c = \sqrt{u_{AX}^2 + u_{BX}^2}$$

3.2.6 Rozšířená (celková) standardní nejistota U

Rozšířená nejistota U získaná násobením kombinované standardní nejistoty u_c činitelem rozšíření k , je určena pro splnění potřeb některých průmyslových a obchodních aplikací, stejně jako požadavků v oblasti zdravotnictví a bezpečnosti. Zamýšleným účelem

rozšířené nejistoty U je poskytnout interval výsledků měření, ve kterém je očekáván předpoklad, že bude obsahovat velký podíl hodnot, které by mohly být přiměřeně přiřazeny k měřené veličině. Výběr činitele k , který je obvykle v rozsahu 2 až 3, je založen na pravděpodobnosti pokrytí nebo požadované konfidenční úrovni intervalu. [14]

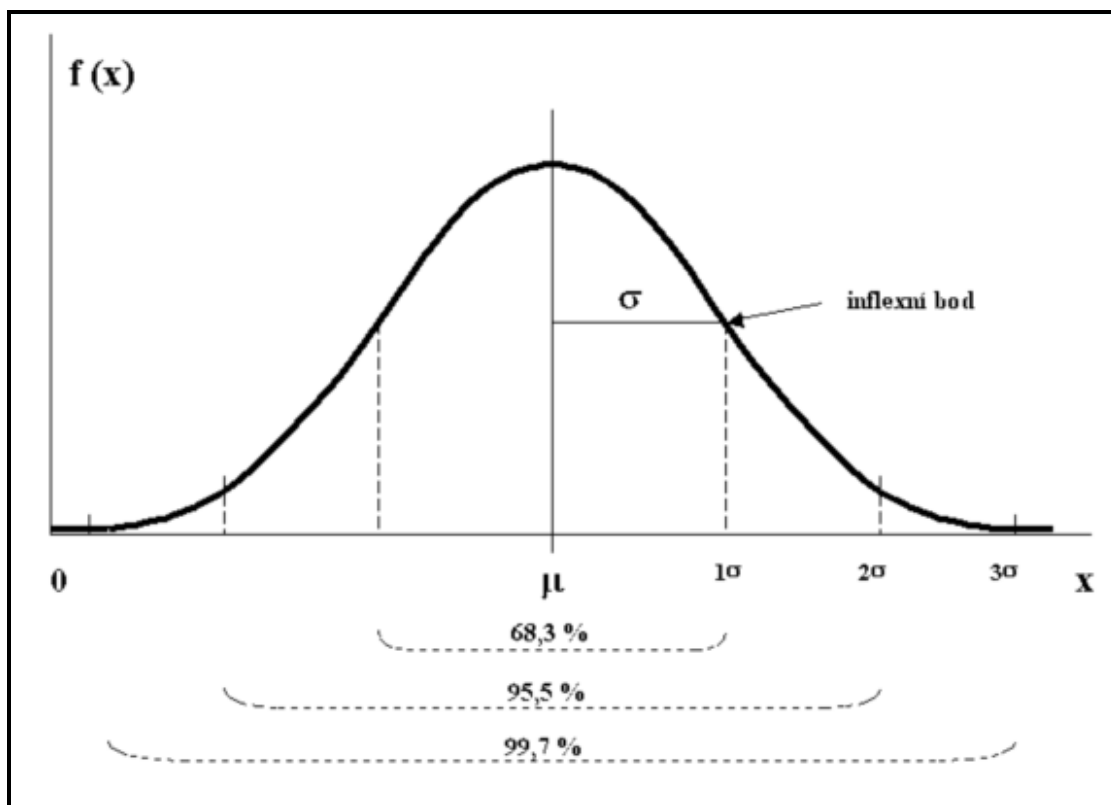
$$U = k \cdot u_c$$

(k - koeficient rozšíření platí pro normální rozdělení hustoty pravděpodobnosti)

Tabulka č. 3.3 Hodnoty koeficientu rozšíření k v závislostech na intervalu rozdělení hustoty pravděpodobnosti $N(\mu, \sigma^2)$

Rozdělení $N(\mu, \sigma^2)$ pravděpodobnost P (%)	Koeficient rozšíření k (-)
68,27	1,00
95,45	2,00
99,00	2,58
99,73	3,00

V rámci WECC (z angl. Western European Calibration Cooperation) platí dohoda, že se používá $k = 2$, že skutečná hodnota se nachází v daném intervalu s pravděpodobností $P = 95,45$ %. Rozšířená nejistota se používá pouze při udávání výsledku měření v protokolu o měření a musí být uvedena použitá hodnota k nebo pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty.



X = spojitá náhodná veličina
 $f(x)$ = hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny X
 μ = střední hodnota náhodné veličiny X
 σ = směrodatná odchylka náhodné veličiny X

Obrázek č. 3.1 Normální rozdělení $N(\mu, \sigma^2)$ [15]

4 Měření teploty termočláanky na vápenné peci Maerz

Ve čtvrté kapitole je čerpáno z interní dokumentace k vápenné peci Maerz. [16]

Cílem měření je zjistit skutečný stav teploty v jednotlivých částech pece a na základě výsledků dokázat vhodně regulovat teplotu v peci.

4.1 Základní parametry pece Maerz

- Výrobce: Maerz Ofenbau AG, Rakousko.
- Dvoušachtová souproutá regenerativní pec Maerz na výpal vápna dle *Obrázku č. 4.1.*
- Kapacita pece: 600 t/d .
- Přepočet: z 1000 kg vápence -> 572 kg vápna.
- Vsázka během jednoho cyklu: 4650 kg x 2 (pec je složena ze dvou šachet).



Obrázek č. 4.1 Vápenná pec Maerz

Rozměry pece a výšky jednotlivých pásem jsou uvedeny v následující *Tabulce č. 4.1*.

Tabulka č. 4.1 Rozměry pece Maerz

Pec	Průměr šachty	Přehřívací pásmo	Pálící pásmo	Chladicí pásmo
Maerz	4,3 m	3,2 m	8,3 m	5,4 m

Pec Maerz byla v roce 1995 spuštěna do provozu na zemní plyn. Olejofikace, která umožnila využívání kapalných paliv, byla následně provedena v roce 1999.

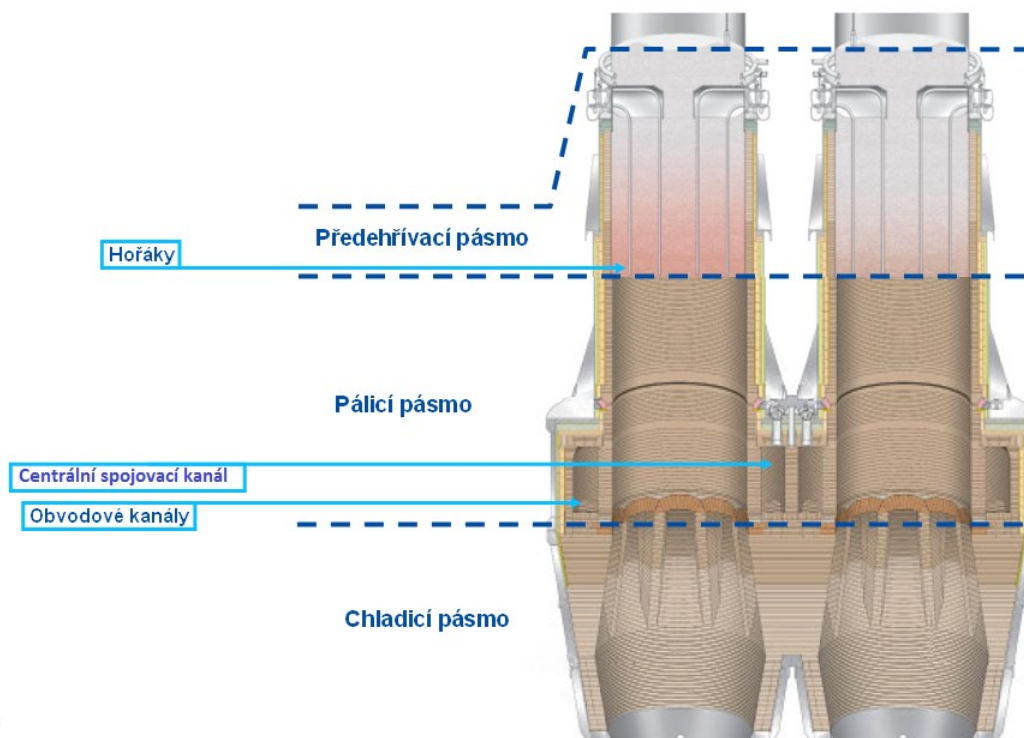
4.2 Princip pece Maerz

Postup kamene a jeho přeměna na vápno:

Vsázka vápence je cyklicky dávkována do horní části obou šachet. V přehřívací části na *Obrázku č. 4.2* se kámen přehřeje až na teplotu cca 800 °C a postupuje do pálícího pásma na témže obrázku, na jehož horní hranici jsou umístěny hořáky. Teplota v pálícím pásmu se pohybuje mezi 900 °C a 1300 °C. Při této teplotě se vápenec rozkládá, přičemž uniká uvolněný oxid uhličitý, který se mísí se spalinami. Po průchodu pálícím pásmem vápno postupuje do chladicího pásma, kde se protiproudě proudícím vzduchem postupně vychladí z teploty kolem 1000 °C až na teplotu kolem 60 °C. Vychlazené vápno se z dolní části šachet periodicky odtahuje k dalšímu zpracování. Postup vsázky je relativně pomalý a při nominálním výkonu pece je zdržení v jednotlivých pásmech pecí následující v *Tabulce č. 4.2*.

Tabulka č. 4.2 Zdržení materiálu v pásmech pece

Pásmo	Doba pobytu (hodiny)
Přehřívací	6
Pálící	9
Chladicí	9



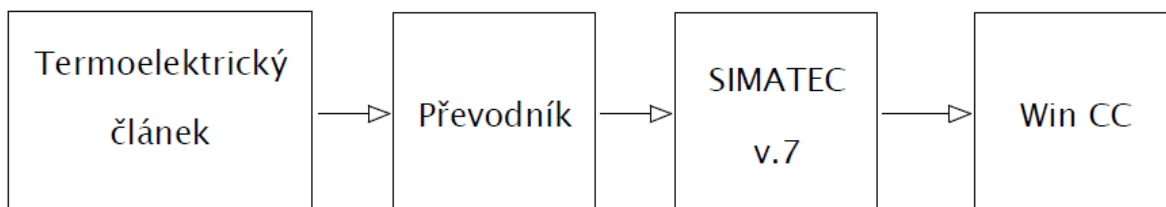
Obrázek č. 4.2 Řez pece Maerz - pásma pece

Dávkování paliva a postup spalin:

Palivo je přiváděno do hořáků vždy jedné z šachet umístěných v horní části pálicího pásma, kde hoří při teplotě cca 1300 °C. Spalovací vzduch vstupuje do této šachty vrchem pece a postupuje předehřátou vrstvou vsázky dolů do prostoru hořáků, kde umožňuje hoření paliva. Spaliny postupují šachtou směrem dolů, ochlazují se na teplotu cca 1050 °C, zároveň se mísí s uvolněným oxidem uhličitým z rozkladu vápence, následně vstupují do rozšířené části pece (rozhraní pálicího a chladicího pásma), kde se smísí s chladícím vzduchem ohřátým na teplotu cca 950 °C a vstupují do spojovacího kanálu mezi oběma šachtami. Ze spojovacího kanálu vstupují spaliny do druhé z šachet, postupují vzhůru přes pálicí pásmo druhé šachty (teplota 900-1200 °C) a i zde se obohacují o uvolňující se CO₂ z rozkladu vápence. Po opuštění pálicího pásma postupují k vrcholu pece, přičemž odevzdají teplo předehřívání vsázce a ochladí se z cca 1200 °C až na teplotu 110 – 180 °C. S touto teplotou vstupují spaliny přes odtahové potrubí do tkaninového filtru a dále přes odtahový ventilátor do komína. Doba zdržení spalin při teplotě nad 850 °C je vyšší než 2 sekundy, jak je garantováno výrobcem pece Maerz. Funkce obou šachet se cyklicky mění v periodě cca 15 minut.

4.3 Měření teploty termočláanky

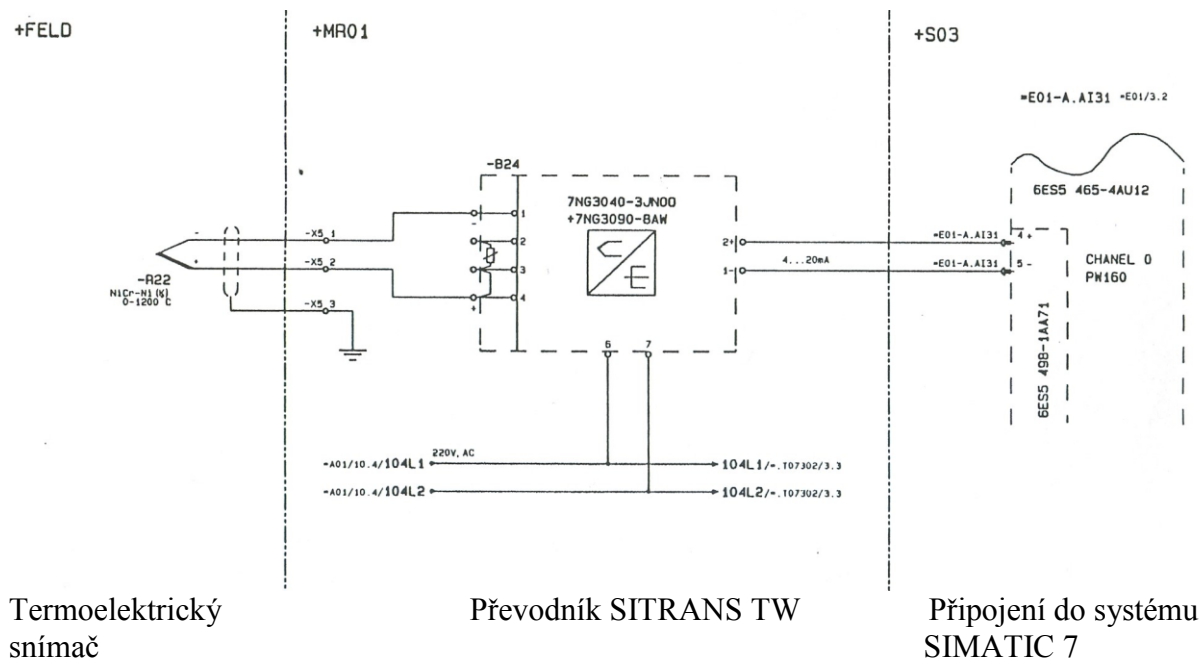
Měřicí řetězec



Obrázek č. 4.3 Měřicí řetězec

Jednotlivým článkům měřicího řetězce se detailněji věnuji v následujících podkapitolách 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 a 4.3.4.

Schéma zapojení měřicího řetězce



Obrázek č. 4.4 Měřicí řetězec - schéma zapojení [17]

4.3.1 Termoelektrický snímač teploty tyčový s ocelovou ochranou trubkou bez převodníku a s převodníkem [18]

4.3.1.1 Technické parametry

- Drátový termočlánek "J", "K" s průměrem větví 2 nebo 3 mm.
- Měřicí rozsah -40 až +800 °C ("J"), -40 až +1100 °C ("K").
- Třída přesnosti 2 dle ČSN IEC 584-2.
- Hlavice B dle DIN.
- Materiál ochranné trubky nerezová ocel 17248, 17255.
- Volitelná délka ochranné trubky.
- Upevnění snímače teploty pomocí přesuvné upevňovací příruby nebo přesuvného upevňovacího šroubení.
- Stupeň krytí IP 65.
- Možnost montáže převodníku s výstupem 4 až 20 mA do hlavice, včetně provedení s galvanickým oddělením a provedení (Ex) II 1GD Ex ia iaD IIC T4-T6 (ATEX).

4.3.1.2 Použití

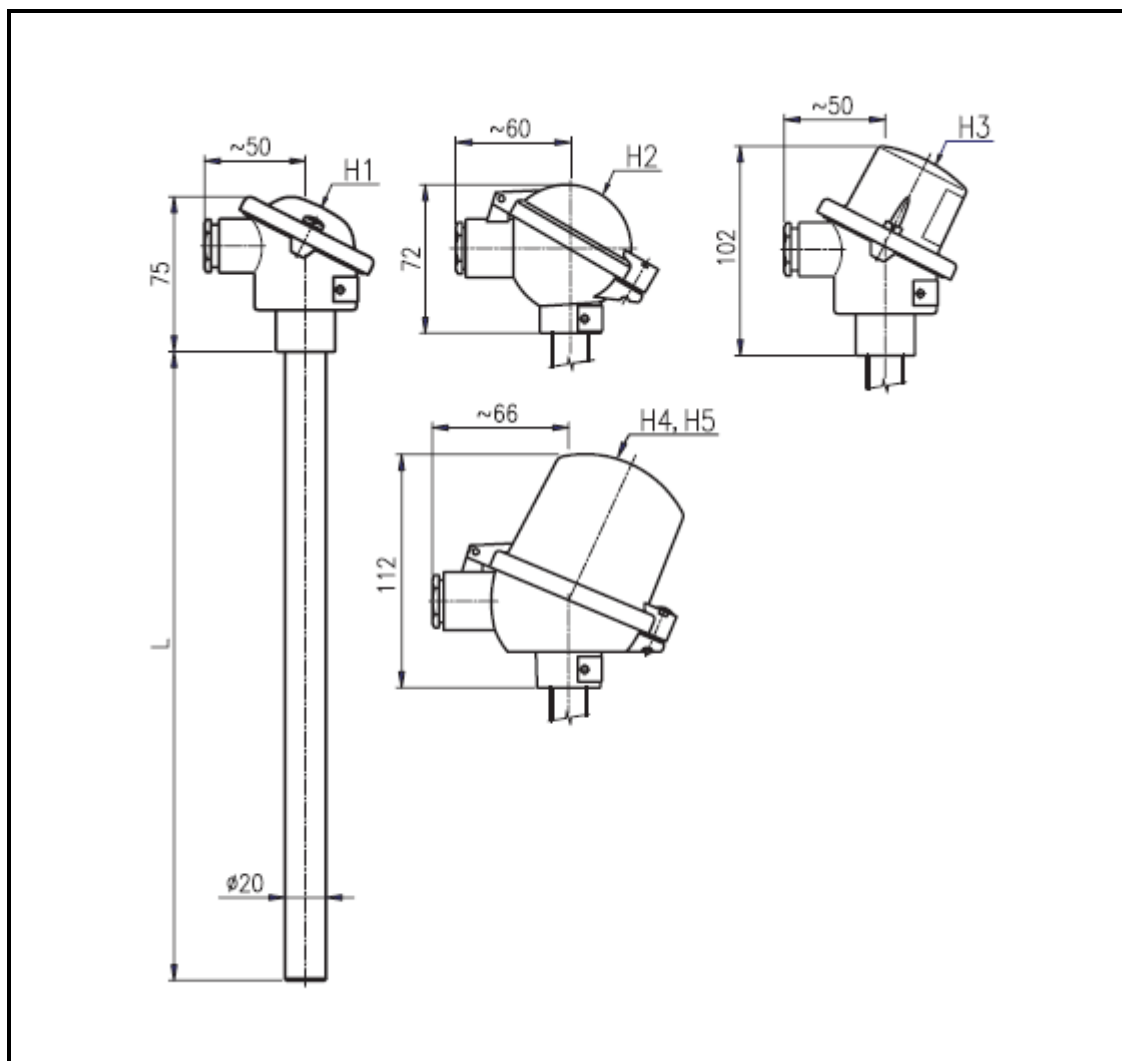
Termoelektrické snímače teploty T1505 tyčové jsou určeny k dálkovému měření teploty v pecích, spalovnách apod. Snímače mohou být dodány s přípojovací svorkovnicí nebo s převodníkem umístěným v hlavici snímače.

Snímač bez zabudovaného převodníku se připojuje k vyhodnocovacím přístrojům měděným kabelovým kompenzačním nebo prodlužovacím vedením s průřezem žil 0,5 až 1,5 mm².

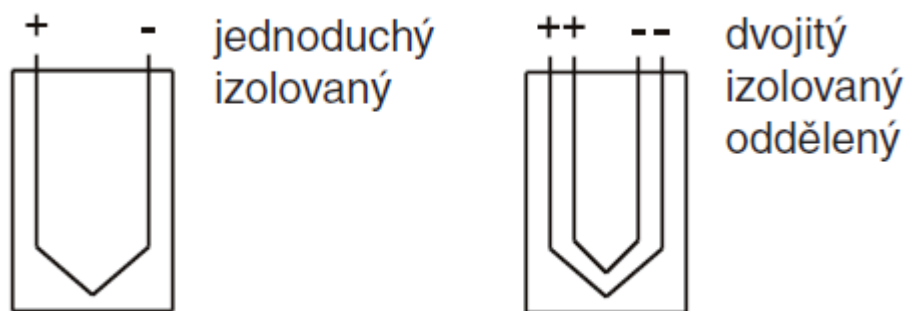
4.3.1.3 Popis

Jednoduchý nebo dvojitý drátový termočlánek typu "J", "K" je uložen v izolačních korálích a v ochranné kovové trubce. Volné konce termočládku jsou připojeny na svorkovnici v hlavici. Pro měření teploty se využívá vzniku termoelektrického napětí, jehož velikost je závislá na rozdílu teplot měřicího konce a srovnávacích konců termočládku. U snímačů s převodníkem se termoelektrické napětí dále převádí na unifikovaný linearizovaný proudový

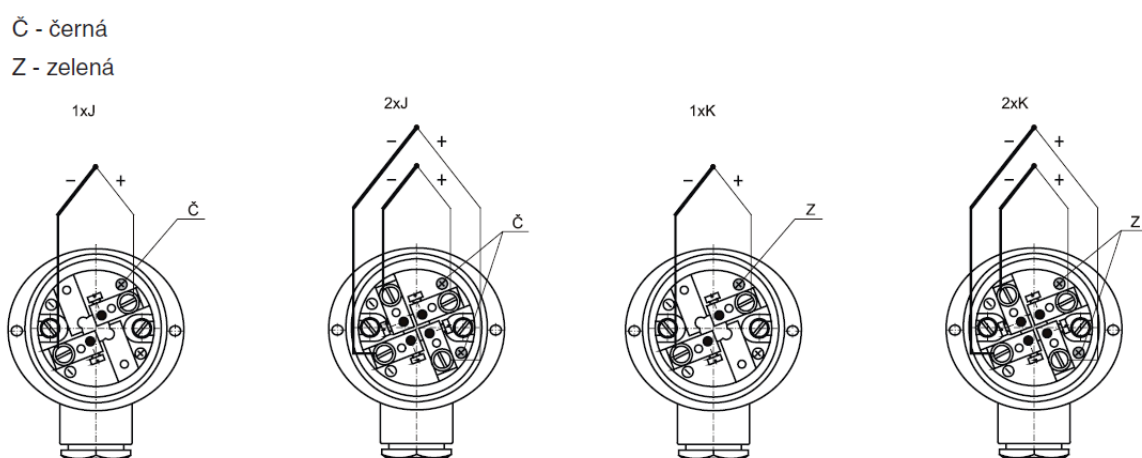
signál 4 až 20 mA, případně na výstup HART, Profibus, Fieldbus. Snímače se montují pomocí přesuvného upevňovacího šroubení do pecí apod.



Obrázek č. 4.5 Termoelektrický snímač T1505



Obrázek č. 4.6 Provedení měřicího konce termoelektrického snímače T1505



Obrázek č. 4.7 Elektrické připojení termoelektrického snímače T1505

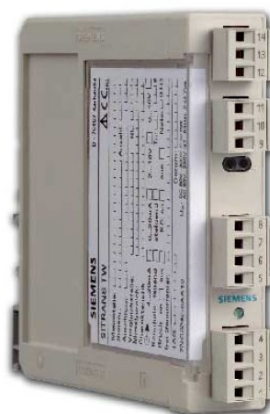
Pro měření na vápenné peci Maerz se používá termoelektrický snímač bez převodníku s dvojitým izolovaným odděleným drátovým termočlánkem typu „K“.

4.3.2 Převodník SITRANS TW 7NG3242 [19]

4.3.2.1 Technické parametry

- Převodník v čtyřvodičovém zapojení s rozhraním HART.
- Kryt k montáži na DIN lištu 35 mm nebo G - lištu 32 mm.
- Konektor šroubovacího typu.

- Galvanické oddělení všech obvodů.
- Výstupní signál 0/4 ... 20 mA nebo 0/2 ... 10V.
- Možnost dodání s variantami napájení UC 230V nebo UC 24V.
- Ochrana proti výbuchu [EEx ia], příp. [EEx ib] pro 7NG3242-1 k měření technologických veličin v oblastech s nebezpečím výbuchu při odpovídajícím provedení přístroje (Ex pro plyn a prach).
- Lineární teplotní charakteristika pro všechny snímače teploty.
- Specifické uživatelské charakteristiky.
- Automatická oprava nulového bodu a měřicího rozsahu.
- Kontrola snímače a jeho připojení na zkrat a přerušení vedení.
- Chyba snímače a/nebo mezní hodnota může být hlášena prostřednictvím volitelného signalizačního zařízení pro chybu snímače a mezní hodnotu (signalizační relé).
- Hardwarová ochrana před zápisem pro komunikaci HART.



Obrázek č. 4.8 SITRANS TW 7NG3242

4.3.2.2 Použití

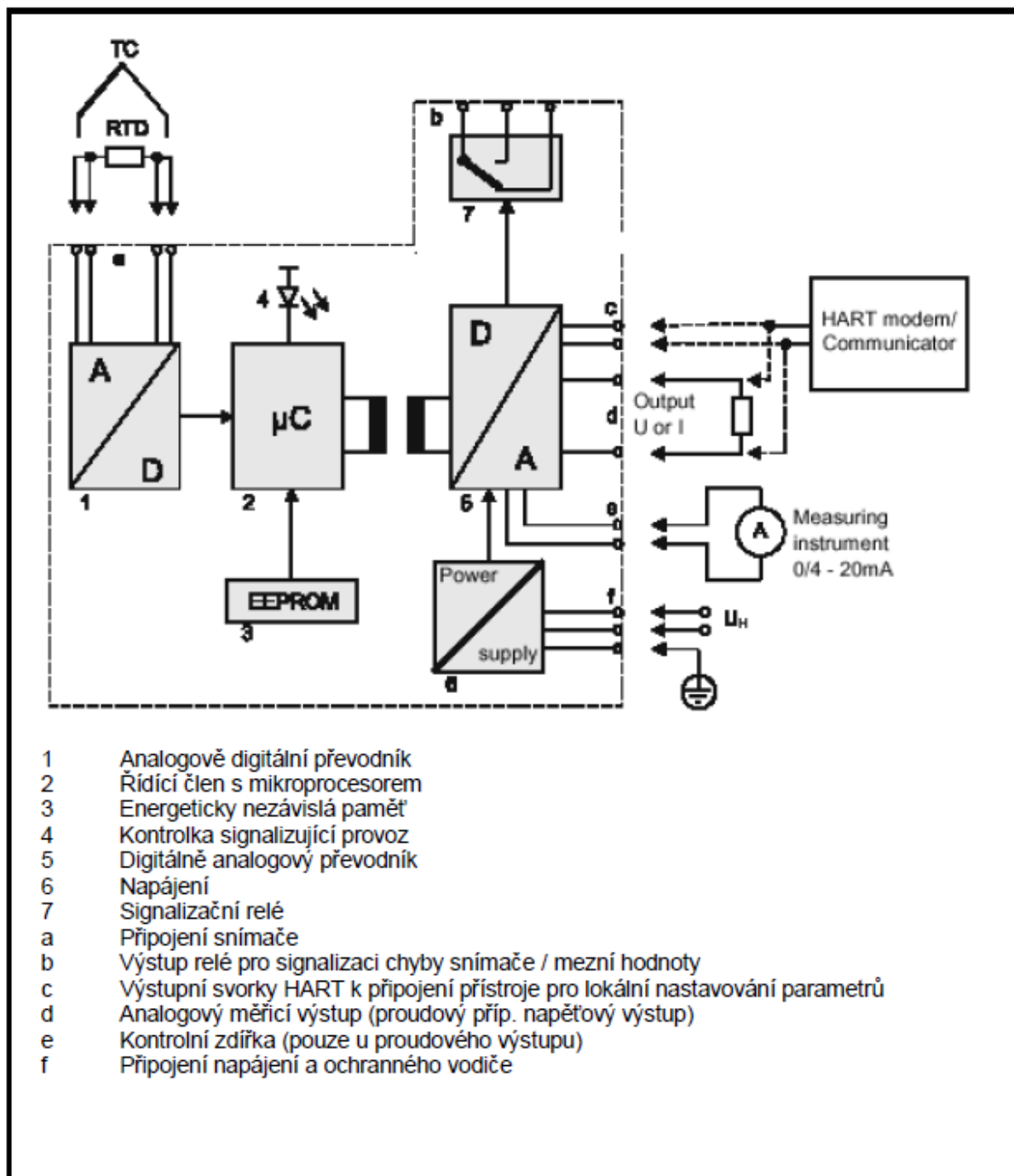
SITRANS TW je univerzální převodník na lištu pro čtyřvodičové zapojení. Je to měřicí převodník s univerzálním vstupním obvodem pro připojení následujících snímačů a zdrojů signálů:

- odporové teploměry,
- termočlánky,

- odporové snímače / potenciometry,
- mV – převodníky,
- jako speciální varianta:
 - V – převodníky, proudové zdroje.

4.3.2.3 Popis

Měřicí signál dodávaný odporovým snímačem (dvou, tří, čtyřvodičové zapojení), napěťovým snímačem nebo termočlánkem je v analogově digitálním převodníku přeměňován na digitální signál. Ten je vyhodnocován řídicím členem s mikroprocesorem, korigován podle charakteristiky snímače a v digitálně analogovém převodníku přeměňován na výstupní proud (0/4 ... 20 mA) nebo na výstupní napětí (0/2 ... 10 V). Charakteristiky snímačů stejně jako data potřebná k nastavení parametrů měřicího převodníku jsou uloženy v energeticky nezávislé paměti. Jako napájení je možno využít střídavá nebo stejnosměrná napětí. Díky můstkovému usměrňovači v napájecí jednotce je možné libovolné připojení napájení. Připojení přístroje na ochranný vodič je nutné z bezpečnostních důvodů. Modem HART, příp. komunikátor HART umožňuje nastavení parametrů měřicího převodníku prostřednictvím protokolu podle specifikace HART. Prostřednictvím výstupních svorek HART je možné takové nastavení parametrů měřicího převodníku, které vyhovuje přímo podmínkám měřicího místa. Kontrolka signalizující provoz hlásí bezporuchový provozní stav převodníku. Signalizační relé umožňuje signalizaci chyby snímače a/nebo překročení mezní hodnoty, příp. pokles pod mezní hodnotu. Přes kontrolní zdířku může být při výstupu proudu kontrolován proud 0/4 ... 20 mA pomocí měřicího přístroje na *Obrázku č. 4.9.*

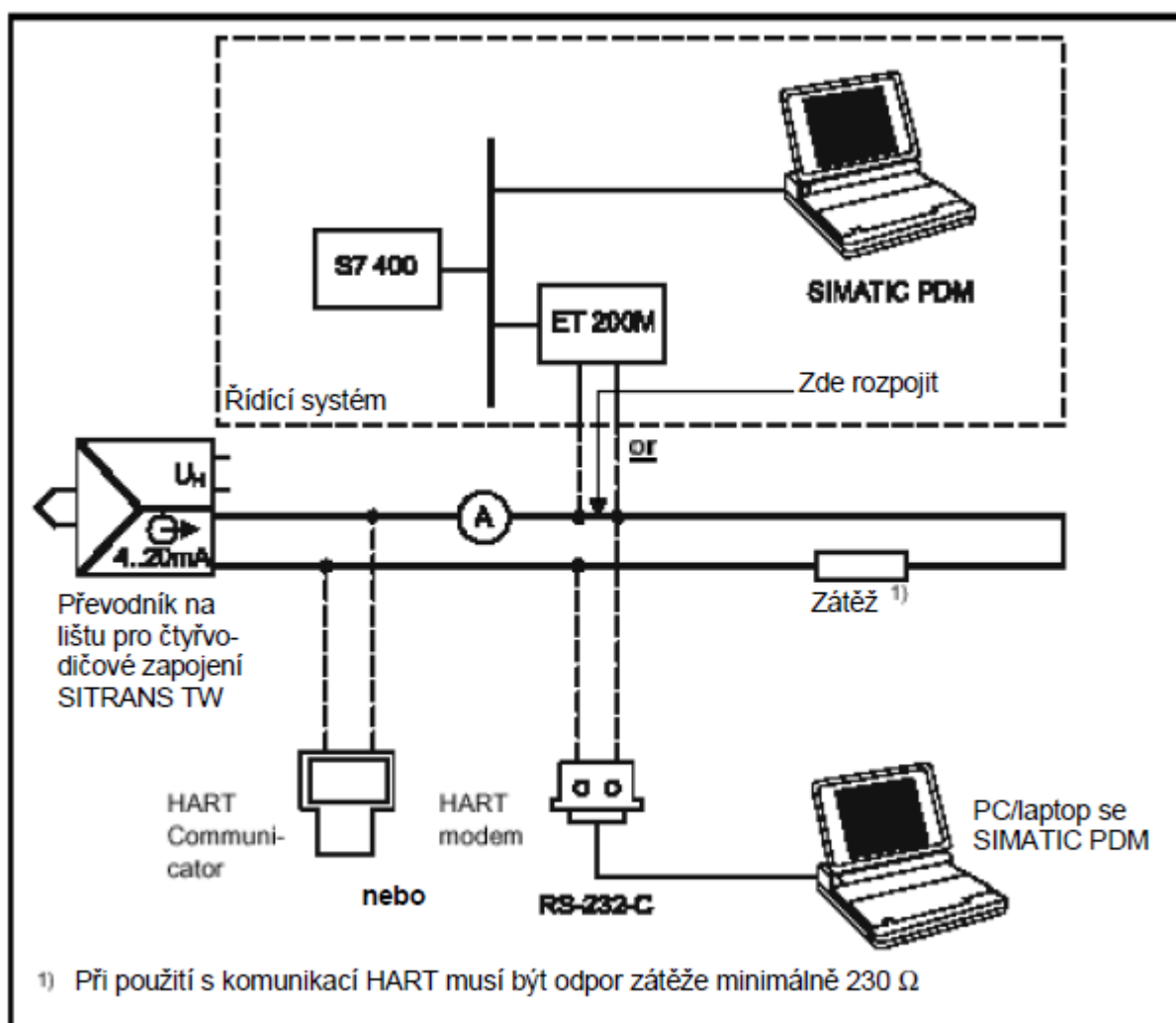


Obrázek č. 4.9 Schéma zapojení převodníku na lištu pro čtyřvodičové zapojení SITRANS TW

Převodník na lištu pro čtyřvodičové zapojení SITRANS TW se může použít v celé řadě konfigurací: jako verze Stand-Alone nebo také jako součást komplexního systému, jako je např. SIMATIC S7. Přitom je veškerý rozsah funkcí k dispozici prostřednictvím komunikace HART.

Přes rozhraní HART může komunikace probíhat podle volby:

- s komunikátorem HART,
- s modemem HART s připojeným PC nebo laptopem, na němž je nainstalován vhodný software, jako např. SIMATIC PDM,
- s řídicím systémem schopným komunikace HART (jako např. SIMATIC S7 s ET200M).



Obrázek č. 4.10 Příklad možných konfigurací systému

4.3.3 SIMATIC 7

Řídicí systémy SIMATIC jsou známy především svojí spolehlivostí a robustností. Již řadu let jsou stabilním prvkem nejrůznějších technologií. Své renomé si získala dnes už výběhová řada SIMATIC S5. Na ni úspěšně navázala řada SIMATIC S7, která dodnes nabízí nejmodernější způsoby řešení technologických aplikací a je často nositelem inovací v celém oboru průmyslové automatizace. Tak jak se mění požadavky řešených úloh, jsou neustále vyvíjeny i nové řídicí prvky tak, aby co nejlépe vyhovovaly potřebám technologie, splňovaly náročné podmínky efektivního projektování a přitom respektovaly kontinuitu a pracovaly v souladu s již osvědčenými postupy a principy. Ve Vápence Čertovy schody používáme PLC SIMATIC S7-300, který je určen pro realizaci rozmanitých automatizačních úloh středního rozsahu. Poskytuje univerzální automatizační platformu pro systémová řešení s hlavním důrazem na výrobní technologii. [20]



Obrázek č. 4.11 Průmyslový automatizační systém SIMATIC

4.3.4 Win CC

Software SIMATIC WinCC pokrývá celou oblast projekčního a vizualizačního software pro rozhraní člověk-stroj (HMI). Software SIMATIC WinCC lze použít téměř pro všechny SIMATIC operátorské zařízení. Funkční rozsah zahrnuje vizualizační úlohy potřebné přímo na stroji, stejně jako SCADA aplikace na bázi PC u multi-uživatelských systémů.

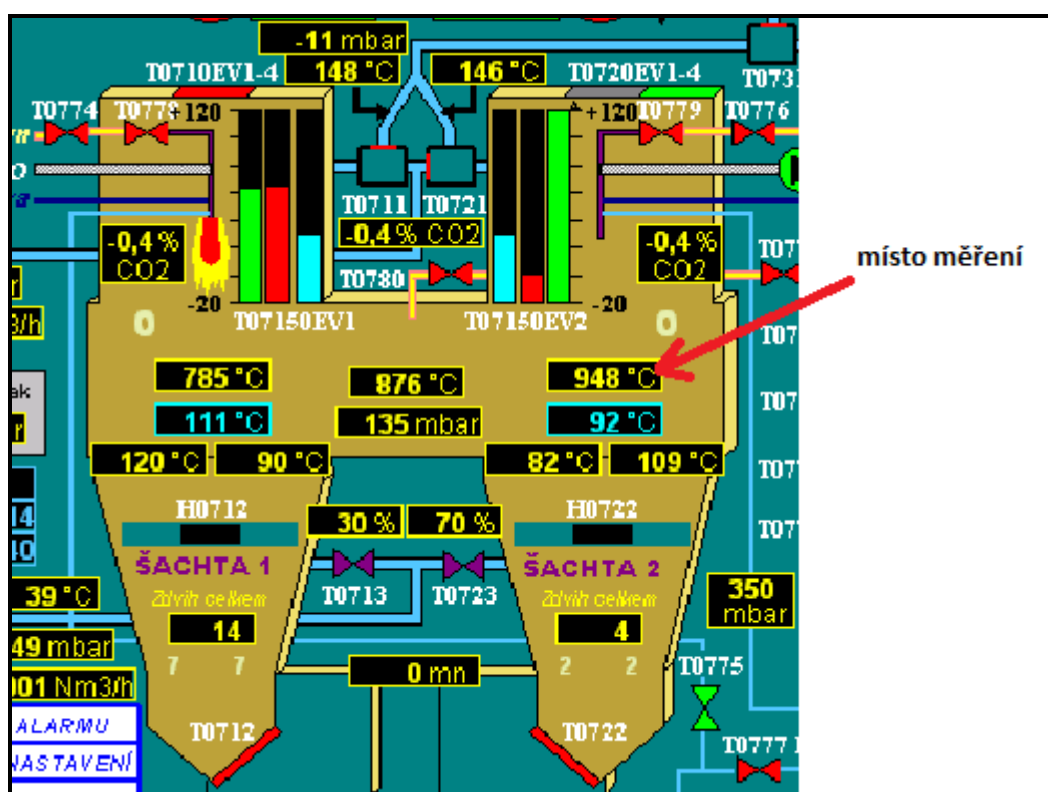
Pomocí software lze realizovat úkoly procesní vizualizaci nejvyšší složitosti a SCADA aplikací, např. s redundantní architekturou a vertikální integrací do stromu Inteligence Simatic WinCC ve své aktuální verzi 7.

Architektura WinCC Open source je směřována na vysoce specifické požadavky koncových zákazníků a modifikaci na Non-Windows platformách. [21]

4.3.5 Měření teploty na peci Maerz

4.3.5.1 Výsledky měření teploty na vápenné peci Maerz

Na Obrázku č. 4.12 je označeno místo měření teploty na vápenné peci Maerz. Při hodinovém měření za stejných podmínek jsem zaznamenal údaje a vyhodnotil jsem je na nejistoty měření.



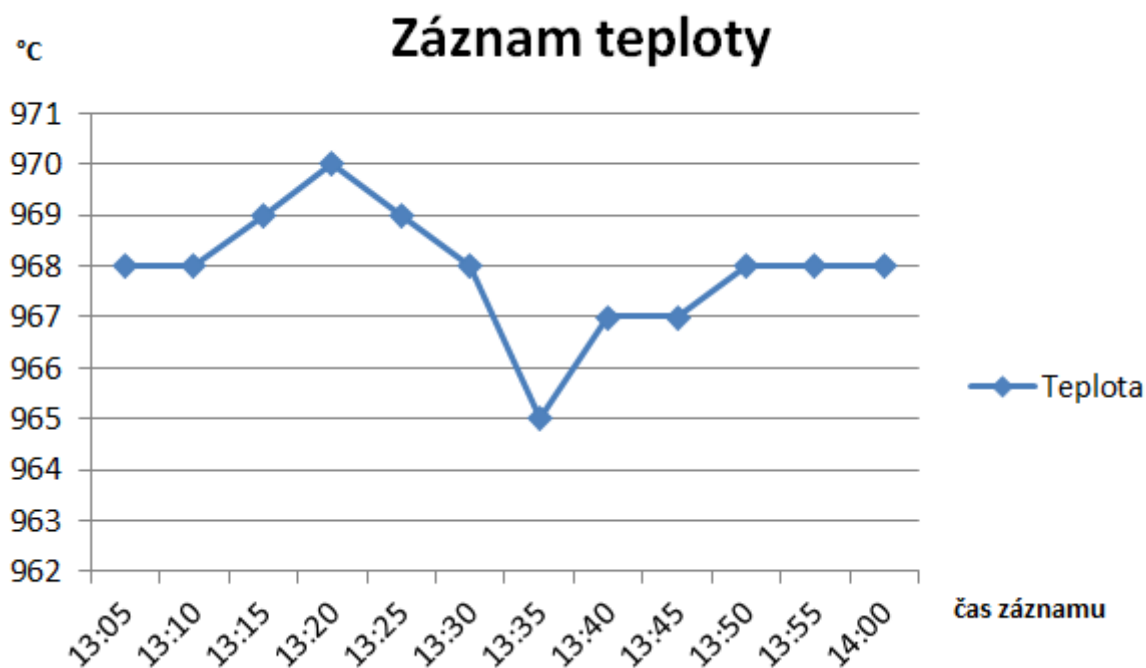
Obrázek č. 4.12 Pec Maerz – místo měření termočláanky [16]

4.3.5.2 Vyhodnocení nejistot měření

Záznam měření teploty:

Tabulka č. 4.3 Záznamy teplot při měření

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Čas měření [hh:mm]	13:05	13:10	13:15	13:20	13:25	13:30	13:35	13:40	13:45	13:50	13:55	14:00
Teplota X_i [°C]	968	968	969	970	969	968	965	967	967	968	968	968



Obrázek č. 4.12 Grafický záznam z měření teplot

Nejistota řešená způsobem A:

X_i - hodnota i-tého vzorku měření,

\bar{X} - aritmetický průměr výběru ze základního souboru.

- aritmetický průměr,

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\bar{X} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} X_i = 967,9167 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- odhad rozptylu náhodného výběru (výběrový rozptyl),

$$s^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

$$s^2(X_i) = \frac{1}{12-1} \sum_{i=1}^{12} (X_i - 967,9167)^2 = \frac{1}{11} \cdot 16,9167 = 1,5379 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru,

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{12-1} \sum_{i=1}^{12} (X_i - 967,9167)^2} = \sqrt{1,5379} = 1,2401 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru = standardní nejistota řešená způsobem A.

$$u_{AX} = s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

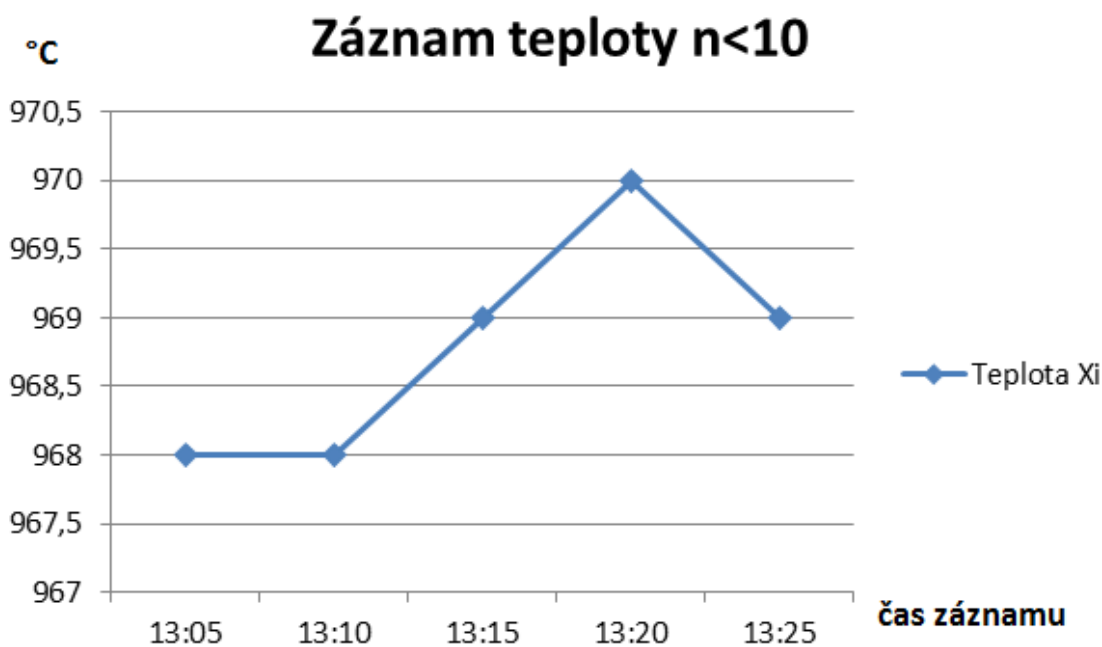
$$u_{AX} = s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1,5379}{12}} = \sqrt{0,1282} = 0,3581 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výsledná nejistota řešená způsobem A je 0,3581 °C.

Pro porovnání přesnosti výsledků nejistot a šíře jejich intervalu byly počítány nejistoty A (příklad 1) z $n = 12$ naměřených hodnot a poté A (příklad 2) pouze z $n = 5$ hodnot ($n = 5$, koeficient $k_s=1,4$).

Tabulka č. 4.4 Záznamy teplot při měření

Číslo měření	1	2	3	4	5
Čas měření [hh:mm]	13:05	13:10	13:15	13:20	13:25
Teplota X_i [°C]	968	968	969	970	969



Obrázek č. 4.13 Grafický záznam z měření teplot $n=5$

- aritmetický průměr,

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i = 968,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- odhad rozptylu náhodného výběru (výběrový rozptyl),

$$s^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

$$s^2(X_i) = \frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (X_i - 968,8)^2 = \frac{1}{5} \cdot 2,8 = 0,56$$

- výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru,

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (X_i - 968,2)^2} = \sqrt{0,7} = 0,8367$$

$$s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

$$s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{n}} = \sqrt{\frac{0,56}{5}} = \sqrt{0,112} = 0,3347$$

- výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru = **standardní nejistota řešená způsobem A pro n<10.**

$$u_{AX} = k_s \cdot s(\bar{X})$$

$$u_{AX} = 1,4 \cdot 0,3347 = 0,4686$$

Výsledná nejistota řešená způsobem A při 5 měřeních (n<10) je 0,4686 °C, což je hodnota vyšší při porovnání s hodnotou při 12 měřeních, která je 0,3581 °C.

Nejistota řešená způsobem B:

- Maximální chyba způsobená 1. zdrojem nejistoty řešené způsobem B:
Roztažnost α pro termočlánek typu K je dán 0,0075.

$$\Delta\vartheta = \pm(1 + \alpha\vartheta) = \pm(1 + 0,0075 \cdot 967,9167) = \pm 8,2593 \text{ }^{\circ}\text{C} = z_{1MAX} [^{\circ}\text{C}]$$

Předpokládáme rovnoměrné rozdělení, proto z tabulky vybereme.

$$\chi = \sqrt{3}$$

Nejistota způsobená 1. zdrojem:

$$|u_{z1}| = \frac{z_{1MAX}}{\chi} = \frac{8,2593}{\sqrt{3}} = \pm 4,7685 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Nejistota způsobená 1. zdrojem a vztažená k měřeným jednotkám:

$$u_{xz1} = c \cdot u_{z1} = c \cdot \frac{z_{1MAX}}{\chi} = 1 \cdot \frac{8,2593}{\sqrt{3}} = \pm 4,7685 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Kde citlivostní koeficient $c = 1$ (dovolené chyby jsou přímo v měřených jednotkách).

- Odvod tepla ochranným pouzdrům způsobí, že teplota spoje je nižší než teplota v peci (teplotní vodivost, tepelná izolace, teplotní spád, zasunutí termočlátku). Snížení teploty odvodem je odhadováno v rozsahu 6 - 12 $^{\circ}\text{C}$ na základě předchozí skutečnosti).

Střední hodnota snížení teploty:

$$t_{STR} = \frac{6 + 12}{2} = 9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = (9 \pm 3) \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Chyba způsobená odvodem tepla:

$$z_{2MAX} = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Nejistota způsobená tímto zdrojem a vztažená k teplotě:

$$u_{xz2} = c \cdot \frac{z_{2MAX}}{\chi} = 1 \cdot \frac{3}{\sqrt{3}} = \pm 1,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Výsledná nejistota řešená způsobem B:

$$|u_{BX}^2| = \sum_{j=1}^2 u_{XZj}^2 = 4,7685^2 + 1,73^2 = 25,7314 \text{ } ^\circ\text{C}^2$$

$$|u_{BX}| = \sqrt{25,7314} = 5,0726 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výsledná nejistota řešená způsobem B je 5,0726 °C.

Kombinovaná nejistota

$$u_c = \sqrt{u_{AX}^2 + u_{BX}^2} = \sqrt{0,3581^2 + 5,0726^2} = 5,0852 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Při pohledu na výslednou kombinovanou nejistotu, lze říci, že nejistotu řešenou způsobem A je možné zanedbat, protože výsledná kombinovaná nejistota $u_c = 5,0852 \text{ } ^\circ\text{C}$ je téměř shodná s hodnotou nejistoty řešené způsobem B.

Rozšířená nejistota

Pro $k_u = 2$ ($P=95\%$).

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 5,0852 = 10,1704 \text{ } ^\circ\text{C} \approx \pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Zápis výsledku měření je:

$$(967,9167 \pm 10)^\circ\text{C}$$

4.4 Měření vlhkosti vzduchu na vápenné peci Maerz

Spolu s měřením teploty na vápenné peci Maerz je úzce spjato i měření rosného bodu. Měření probíhá pravidelně jednou za tři měsíce, jako kontrola správnosti údajů za sušiči

vzduchu. V případě špatné funkce sušičů vzduchu, může docházet k hromadění vody ve vzduchovém systému, což způsobuje nemalé problémy u ovládacího vzduchu hlavně v zimním období. Úkolem sušičů vzduchu je odlučování vody z dopravního a ovládacího vzduchu.

K nejdůležitější terminologii patří teplota rosného bodu.

Klesá-li teplota vzduchu, který obsahuje přehřátou vodní páru (aniž se při tom mění absolutní vlhkost vzduchu), pak při určité teplotě t_r zvané *teplota rosného bodu* se vodní pára stane sytou a při dalším snížení teploty začne kapalnět. Z vodní páry vzniká na chladných předmětech rosa, nad povrchem země se tvoří mlha, ve větších výškách mraky. Ze znalosti teploty rosného bodu můžeme vypočítat absolutní a relativní vlhkost.

Sušiče vzduchu:

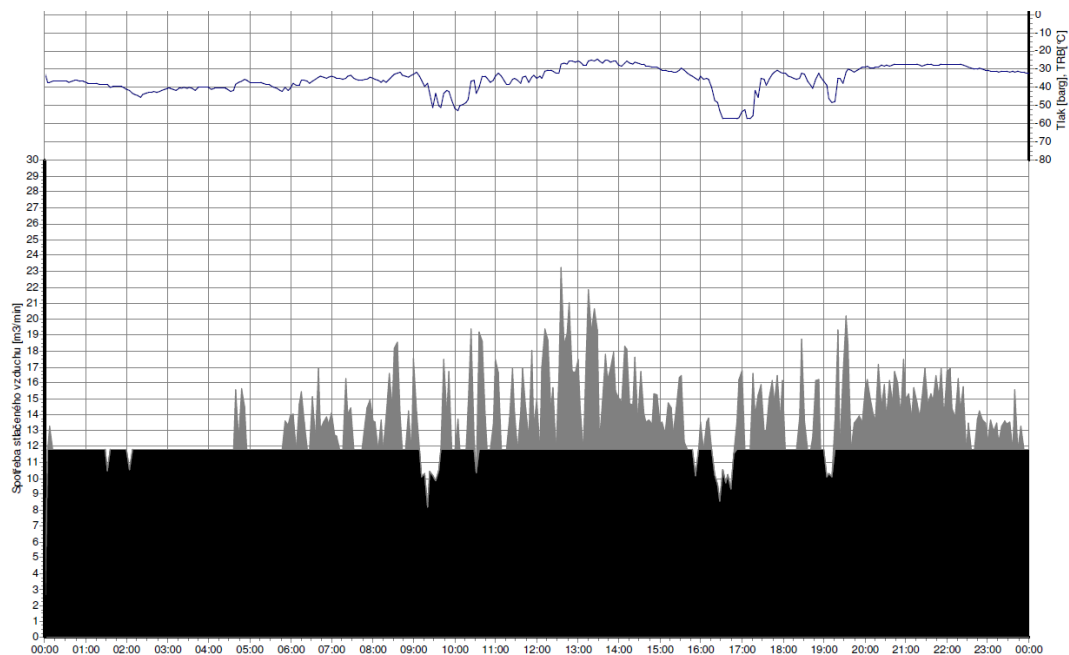
- Kondenzační sušiče -> úprava vzduchu na $t_r = 3\text{ °C}$.
- Adsorpční sušiče -> úprava vzduchu na $t_r = -40\text{ °C}$.

Pro úpravu vzduchu na vápenné peci Maerz jsou používány adsorbční sušiče KAESER DC 266E nastavené na úpravu vzduchu $t_r = -40\text{ °C}$, číslo 266 znamená, že stroj zvládne upravit $26,6\text{ m}^3/\text{min}$ vzduchu z kompresoru. Upravený vzduch je použit jako ovládací, z toho důvodu je důležité, aby byl dokonale vysušen a jeho kvalita neovlivňovala negativně nastavení parametrů pece při výrobě. Kromě preventivní údržby ze strany servisu k tomu napomáhá i pravidelné kontrolní měření.



Obrázek č. 4.14 Adsorpční sušiče vzduchu DC 266E

Cílem měření bylo zjistit současné hodnoty tlakového rosného bodu (dále jen TRB) v rozvodech stlačeného vzduchu. Byly zaznamenávány analogové signály (4 - 20 mA) z čidel TRB po dobu 14 dní.



Obrázek č. 4.15 Časový snímek měření za 24 hodin

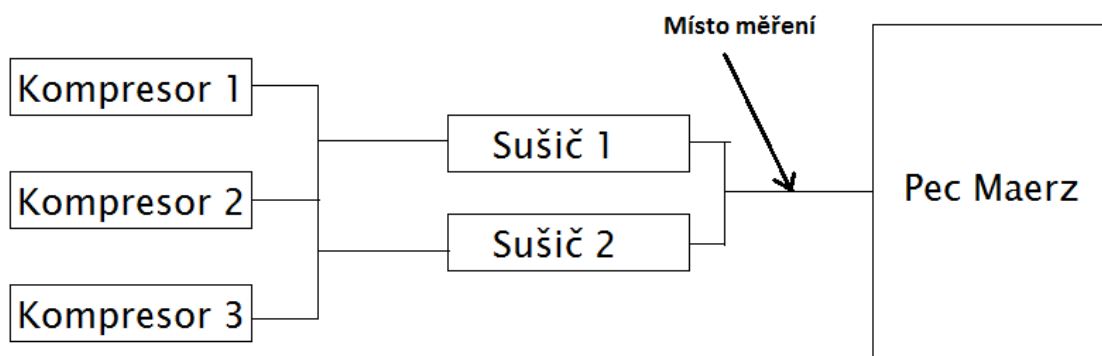
Vlhkostní senzor Testo 6740

Vlhkostní senzor Testo 6740 je výrobcem zkalibrován na více bodů, díky čemuž vykazuje menší odchylky. Pro měření zbytkové vlhkosti je u něj prováděna kalibrace pomocí vysoce přesného referenčního měření kondenzačním vlhkoměrem při -40°C (TRB). Doklad o prvotní kalibraci je dodáván s přístrojem. [22]



Obrázek č. 4.16 Testo 6740 [22]

V kompresorové stanici bylo instalováno čidlo TRB za adsorpčními sušiči číslo 1 (nastaveno -40°C) a číslo 2 (nastaveno -40°C). TRB za sušiči se pohyboval okolo -45°C , což značí správnou funkci sušiček.



Obrázek č. 4.17 Místo měření - schéma kompresorovny

5 Závěr

Určení a měření teploty je pro lidstvo velmi důležité, jak v pracovním, tak mimopracovním procesu. Postupným zdokonalováním teplotních měřidel se zvyšuje spolehlivost a přesnost měření, dokážeme pracovat s teplem a využít ho například k nepřerušování různých výrobních procesů zautomatizováním, čímž je možné minimalizovat výrobní ztráty způsobené přerušováním produkce.

Těžiště předložené práce je ve čtvrté kapitole, která se zabývá měřením teploty a vlhkosti na vápenné peci Maerz a následným vyhodnocením výsledků měření.

Z experimentu je patrné, že sledování teploty na vápenné peci Maerz ovlivňuje kvalitu výpalu vápence a jeho následnou přeměnu na pálené nehašené vápno. Teplota není měřena přímou metodou, ale využívá se metod nepřímých, v našem případě se převádí pomocí termoelektrického napětí termočlánku (napětí mezi měřicím a srovnávacím koncem). K průběžnému sledování měření teploty na peci existuje dnes mnoho různých systémů, které samy sledují, zaznamenávají a vyhodnocují průběh teplotního profilu na daná kritéria. V našem případě využíváme možnosti systému společnosti SIEMENS, Simatic verze 7 v kombinaci s nadstavbovým grafickým programem WinCC.

Metodou měření dokážeme kontrolovat, diagnostikovat, regulovat a vyhodnotit stav tělesa (vápenné pece Maerz) a zjistit jeho případné závady, případně analýzou získaných dat předcházet možným poruchám. Znalost tepla a tepelné úpravy je také velmi podstatná pro úpravy surovin (kvalitní výpal vápence), kdy materiál, který byl zahříván či ochlazován, může změnit hmotnost nebo spotřebovat tepelnou energii v materiálu.

Měření teploty podléhá stejně jako jiné měřicí procesy potenciálním chybám, které jsem v diplomové práci analyzoval. Podrobněji jsem se zabýval nejistotami měření řešené způsobem „A“ a řešené způsobem „B“, kombinovanou a rozšířenou nejistotou.

Obecně lze konstatovat, že teplota je charakteristika tepelného stavu, kterou člověk dokáže vnímat, rozlišovat, přiřazovat a používat. Technologie měření teploty se postupně zdokonaluje na základě nových poznatků a přesnějších zařízení a řídicích systémů.

Použitá literatura

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [2] *Techniques for approximating the International Temperature Scale of 1990*. 1990.
- [3] ŠAPOŠNIKOV, V. *Nauka o teple*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [4] CSN 01 0115. *Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [5] TNI 01 0115:2009. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny*.
- [6] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [7] BERAN, Vlastimil. *Technické měření*. Plzeň: VŠSE, 1991.
- [8] Porovnání charakteristik termoelektrických snímačů teploty. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U12110/TEM/senzory/grafy.htm>.
- [9] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 231 s. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [10] ŠINDELÁŘ, Václav a Zdeněk TŮMA. *Metrologie, její vývoj a současnost*. Praha: ČMS, 2002.
- [11] Trojný bod, fázový diagram. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Fazovy_diagram_priklad.svg.
- [12] Fázový diagram vody. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.enviroexperiment.cz/fyzika-stredni-skola/fazovy-diagram-vody>.
- [13] *Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM)2012* [CD]. Praha: UNMZ, 2012.
- [14] ČSN EN 60584-1. *Termoelektrické články - Část 1: Referenční tabulky*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [15] Normální rozdělení. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Normalni_rozdeleni.png.
- [16] VČS A.S. *Interní dokumentace k řízení a údržbě vápenné pece Maerz*. Tmaň, 2010.
- [17] VČS A.S. *Interní elektrodokumentace*. Tmaň, 2010.
- [18] JSP S.R.O. *Návod T1505: Termoelektrické snímače teploty tyčové s ocelovou ochrannou trubicí bez převodníku a s převodníkem*. Jičín, 2011.

- [19] SIEMENS AG. *SITRANS TW 7NG3242: Univerzální převodník na lištu pro čtyřvodičové zapojení*. 2001.
- [20] Průmyslové automatizační systémy SIMATIC. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=6ce260aa8e&ctxp=home>.
- [21] Vizualizace WinCC TIA. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: http://www.hapesoft.cz/tia_hmi.htm.
- [22] TESTO S.R.O. *Manuál k měřidlu Testo 6740*. Praha, 2003.
- [23] FRANĚK, Antonín. *Vývoj měření a metrologie teplot*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Olga Tůmová.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Antonín FRANĚK**
Osobní číslo: **E12N0003K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Vývoj metrologie a hodnocení měření teplot**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Definujte pojmy z oblasti měření teplot.
2. Popište vývoj měření teplot a současné metrologické zabezpečení (ITS 90).
3. Popište způsoby hodnocení výsledků měření.
4. Zpracujte případovou studii.
5. Proveďte zhodnocení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Tůmová, O.: Metrologie a hodnocení procesů, BEN, 2009
2. Beran, V.: Technická měření, ZČU, 1999
3. Kreidl, M.: Měření teploty, BEN, 2005
4. Kuneš, J.: Měřicí technika, VŠSE, 1991

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Olga Tůmová, CSc.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013