

2. MĚŘENÍ TEPLoty TERMOČLÁNKY v2021offline

Úvod

Termočlánky patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v průmyslu. Fungují v širokém rozsahu teplot od kryogenních ($-270\text{ }^{\circ}\text{C}$) po velmi vysoké ($2500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Jejich citlivost je 10 až $80\text{ }\mu\text{V/K}$. Jsou velmi robustní a spolehlivé a při vhodné konstrukci mohou být i velmi rychlé (časová konstanta v řádu ms). V praxi se používá mnoho typů termočlánků, velmi běžný je např. typ „K“ s citlivostí $41\mu\text{V/K}$. Navzájem se liší teplotním rozsahem, citlivostí, linearitou, cenou, ... Výstupem z termočlánku je malé napětí (desítky μV až desítky mV), které je potřeba přesně změřit. Malé napětí se často nejprve zesiluje (např. aby vyhovovalo rozsahu AD převodníku). To se musí provést zesilovačem s nízkou vstupní napětíovou nesymetrií (offsetem) nebo je nutné tento vliv korigovat.

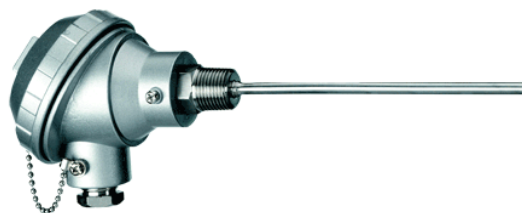
Termočlánky se používají i v dalších aplikacích – hlídají přítomnost plamene v plynovém kotli, mnoho sériově řazených termočlánků lze využít k produkci elektrické energie, viz např. radioizotopové termoelektrické generátory na družicích pro mise v hlubokém vesmíru nebo na Marsu (např. Mars Science Laboratory, Perseverance Rover).



Typický laboratorní termočlánek typu K



Praktické provedení spoje dvou kovů



Průmyslový termočlánek v ochranném pouzdru – často obsahuje i kompenzaci srovnávacího spoje nebo celou měřicí elektroniku.

Naopak **parazitní termočlánky**, vznikající na styku dvou vodičů z různých kovů, mohou způsobit problémy při měření malých napětí na výstupu z jiných senzorů (např. v případě tenzometrů zapojených do Wheatstonova můstku).

Otázky k úloze (domácí příprava)

- Jaká je teplota srovnávacího spoje („studeného konce“), na kterou koriguje kompenzační obvod? Dá se to zjistit jednoduchým měřením?
- Čemu se rovná vstupní a výstupní odpor invertujícího a neinvertujícího zesilovače s ideálním operačním zesilovačem?
- Jak lze korigovat vstupní napětíovou nesymetrii zesilovače?
- Je vhodné použít termočlánek pro měření pokojové teploty? Vysvětlete.

Úkoly měření

Shlédněte video a z něj použijte údaje pro otázky níže.

- Změřte teplotu v kalibrační pícce termočlánkem. Napětí termočlánku měříme:
 - přímo pomocí ručního multimetru a stolního multimetru. Je třeba ho **spočítat** - při výpočtu teploty uvažte skutečnou teplotu srovnávacího spoje termočlánku, kterou měříme pokojovým teploměrem;
 - stejnými přístroji jako v bodě a), ale s připojeným kompenzačním obvodem AD8495.
- Určete rozšířenou nejistotu měření **napětí** termočlánku ($k_r=2$) použitými číslicovými voltmetry.
- Navrhněte zapojení s OZ, pomocí kterého zesílíte napětí termočlánku (bez kompenzačního obvodu). Požadované zesílení je 100 (101). **Zvolte takové zapojení, aby chyba metody způsobená vstupním odporem zesilovače byla zanedbatelná.** S tímto obvodem opakujeme měření 1a) s tím, že napětí termočlánku je nyní zesíleno navrženým zesilovačem.
- Nakreslete zapojení pro **určení napěťové nesymetrie** OZ – a) přímo b) pomocí komutace svorek. Uveďte rovnice pro výpočet, a napěťovou nesymetrii vypočtete: použijte hodnoty z videa. Jaké jsou typické hodnoty U_o ? (pro OZ OP07 najděte a srovnejte s naměřenou/vypočtenou hodnotou).
- Změřte teplotu v kalibrační pícce pomocí USB modulu s izotermální svorkovnicí. Pokud je indikovaná hodnota jiná, než teplota na kalibrační pícce, pokuste se nalézt možné zdroje odchylek.
- Srovnejte nejistotu měření **teploty** přímým měřením (1a+2) a měřením se zesilovačem s OZ (3) pro oba multimetry, při ideální znalosti teploty okolí. Jak se výsledek změní a jaká nejistota dominuje, pokud uvažujeme nejistotu měření teploty místnosti $0,5^\circ\text{C}$ ($k_r=2$)? **poznámka: nejistotu zesílení, vliv U_o a I_o v tomto případě považujeme za zanedbatelné**

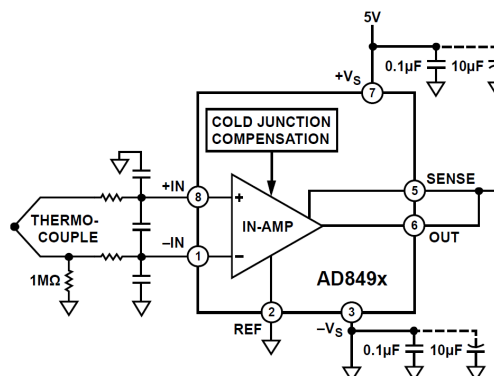
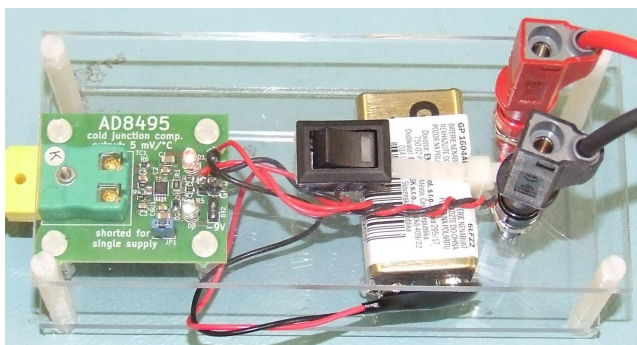
Nepovinná část

- Jaký vliv má vstupní klidový proud a vstupní odpor zesilovače při daném odporu termočlánku?
- V případě použití zesilovače (neideálního) vstupuje navíc nejistota způsobená napěťovou vstupní nesymetrií a nejistota zesílení (uvažujeme 1% toleranci odporů, vstupní klidové proudy je možné zanedbat). Jak pak určíme celkovou nejistotu typu B pro měření napětí při použití zesilovače?.

Poznámky k měření

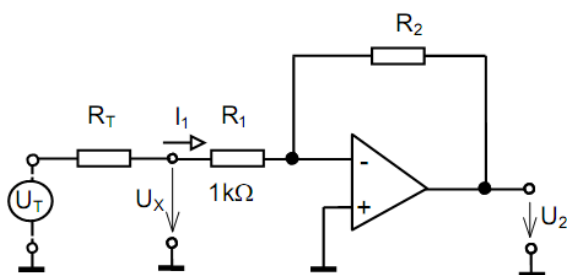
Konstanta termočlánků se pohybuje v řádech desítek $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. V úloze je použit termočlánek typu K (chromel-alumel), jehož citlivost je $40,8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (pozor, neplatí v celém rozsahu možných měřených teplot). Pro výpočet teploty předpokládejte teplotu srovnávacího spoje termočlánku rovnou teplotě v laboratoři, kterou změřte pokojovým teploměrem).

K bodu 1b): Kompenzační obvod slouží ke kompenzaci termoelektrických napětí srovnávacího spoje. Dříve byl tvořen například můstkem s teplotně závislým prvkem napájeným ze zdroje stabilizovaného napětí. Nyní se používají integrovaná řešení, viz obvod Analog Devices AD8495 (Obr. 1). V tomto obvodu je integrován polovodičový senzor teploty a zesilovač (výstup $5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$), takže jeho výstup může být připojen přímo na vstup AD převodníku. Běžné je také řešení s externím senzorem teploty a číslicovou korekcí ve firmware (používá modul **AD24USB** z bodu 5).

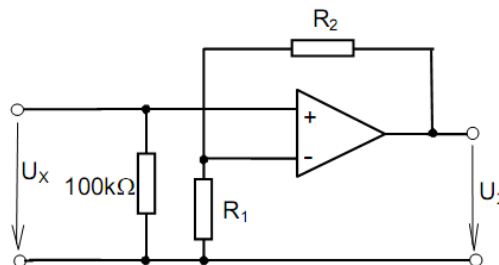


Obr. 1: Přípravek s kompenzačním obvodem AD8495C a jeho zapojení.

K bodu 3: Termočlánek je zdrojem napětí s vnitřním odporem. Tento odpor je v řádu jednotek ohmů, tudíž při měření číslicovými voltmetry je tímto způsobená chyba metody velmi malá (vstupní odpor voltmetru 10 MΩ). Při použití zesilovače s OZ závisí jeho vstupní odpor na použitém zapojení.



Obr. 2: Invertující zesilovač



Obr. 3: Neinvertující zesilovač

Ze schémat je zřejmé, že zatímco u invertujícího zesilovače (Obr. 2) je vstupní odpor 1 kΩ (R_1), u neinvertujícího zesilovače (Obr. 3) je vstupní odpor prakticky určen rezistorem 100 kΩ připojeným paralelně ke vstupním svorkám. Tento rezistor není pro funkci zapojení nutný. V praxi definuje úroveň na vstupu zesilovače v případě, že by došlo k odpojení termočlátku.

Poznámka:

Výrazně vyšší hodnotu R_1 než cca 10 kΩ nelze použít, protože by pak vycházela příliš velká hodnota odporu R_2 , což je nevhodné ze dvou důvodů:

- a) na velkém odporu vzniká příliš vysoké šumové napětí;
- b) příliš se projeví vstupní proudy operačního zesilovače.

K bodu 4: Vstupní napěťovou nesymetrii zesilovače zjistíme změřením výstupního napětí při komutaci měřeného zdroje (komutace - reverzace polarity). Druhým možným způsobem je změřit výstup zesilovače při zkratovaném vstupu zesilovače. V obou případech je třeba změřené napětí přepočítat na vstup operačního zesilovače, tedy vydělit ho zesílením zesilovače pro napěťovou nesymetrii. Přitom je třeba vzít v úvahu, že i v případě invertujícího zesilovače je napětí vstupní napěťové nesymetrie operačního zesilovače zesilováno neinvertujícím zesilovačem, tedy je v případě invertujícího zesilovače rovno 101 (pro odpory $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$).

K bodu 5: Použitý USB modul obsahuje A/D převodník a izotermální svorkovnici. Izotermální svorkovnice je opatřena čidlem teploty (v našem případě polovodičovým odporovým senzorem Siemens), které nám umožní přesně změřit teplotu srovnávacího spoje termočlátku a pak tuto teplotu kompenzovat softwarově. Pro měření spusťte program AD24Control, který je na ploše. Modul lze použít i pro změření teploty v laboratoři zkratováním vstupu.

K bodu 6: Jedná se o stanovení nejistoty nepřímého měření, správný postup je vyjádřit rovnici a jednotlivé parciální derivace. Správně bychom měli uvažovat i nejistotu znalosti převodní konstanty termočlátku, pro náš účel porovnání různých metod se stejným termočlátkem ji můžeme považovat za zanedbatelnou.

Parametry použitých přístrojů

1. Ruční multimetr Mastech MY-64

3. ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Accuracy is given as \pm (% of reading + number of least significant digits) for one year, at $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ RH<75%

1) DCV

Range	Accuracy					
	MY-60	MY-60T	MY-61	MY-62	MY-63	MY-64
200mV	0.5% \pm 1					
2V	0.5% \pm 2					
20V						
200V						
1000V	0.8% \pm 2					

Input impedance: 10M Ω on all range

Úplný návod je v příloze.

2. Stolní multimetr Agilent U3401A

DC voltage

DCV resolution, full-scale reading and accuracy [\pm (% of reading + count)]

U3401A 4.5-digit DMM

Range	Resolution	Maximum reading	Accuracy (1 year; $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)	Typical input impedance ^[1]
500.00 mV	10 μV	510.00	0.02% + 4	10.0 M Ω
5.0000 V	100 μV	5.1000	0.02% + 4	11.1 M Ω
50.000 V	1 mV	51.000	0.02% + 4	10.1 M Ω
500.00 V	10 mV	510.00	0.02% + 4	10.0 M Ω
1000.0 V	100 mV	1200.0 ^[2]	0.02% + 4	10.0 M Ω

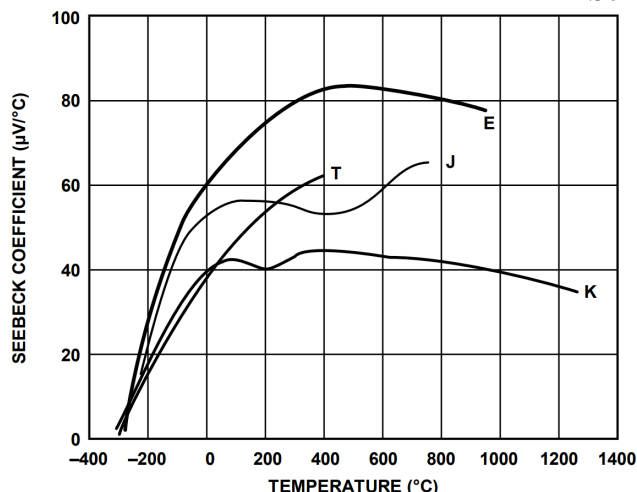
[1] Input impedance is in parallel with capacitance <100 pF.

[2] In VDC 1000 V range, 1200 V is readable with audio warning.

Úplný návod je v příloze.

3. Kompenzační obvod AD8495C

- Kalibrováno pro termočlánky typu K
- Kompenzace teploty srovnávacího spoje je optimalizována pro rozsah pokojové teploty 0-50 $^{\circ}\text{C}$
- Laserově trimováno pro počáteční absolutní chybu kompenzace max. 1 $^{\circ}\text{C}$
- Maximální změna výstupu při změně teploty studeného konce: 0.025 $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$
- Napájecí napětí a proud: 2,7-36 V (nebo symetrické \pm 2,7-18 V), 250 μA
- Šířka pásma (-3 dB): 25 kHz
- Možnost použít obvod jako termostat (s externě nastavitelnou hysterezí).
- Maximální chyba $\pm 2^{\circ}\text{C}$ pro rozsah měřených teplot -25°C až $+400^{\circ}\text{C}$, v případě požadavku na širší rozsah nebo nižší chybu je třeba použít dodatečnou číslicovou korekci. Chyba je primárně způsobena nelinearitou termočlánku - nad teplotou 0 $^{\circ}\text{C}$ je Seebeckův koeficient přibližně konstantní (41 μV), pro nízké teploty se výrazně snižuje:



Závislost Seebeckova koeficientu na teplotě pro různé typy termočlánků.

4. operační zesilovač OP 07

Jedním z důležitých parametrů operačního zesilovače je velikost vstupního napětového offsetu a jeho teplotní a časová stabilita, viz relevantní část datasheetu níže:

OP07E ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_S = \pm 15\text{ V}$, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
INPUT CHARACTERISTICS						
T_A = 25°C						
Input Offset Voltage ¹	V _{OS}			30	75	μV
Long-Term V _{OS} Stability ²	V _{OS} /Time			0.3	1.5	μV/Month
Input Offset Current	I _{OS}			0.5	3.8	nA
Input Bias Current	I _B			±1.2	±4.0	nA
Input Noise Voltage	e _n p-p	0.1 Hz to 10 Hz ³		0.35	0.6	μV p-p
Input Noise Voltage Density	e _n	f ₀ = 10 Hz		10.3	18.0	nV/√Hz
		f ₀ = 100 Hz ³		10.0	13.0	nV/√Hz
		f ₀ = 1 kHz		9.6	11.0	nV/√Hz
Input Noise Current	I _n p-p			14	30	pA p-p
Input Noise Current Density	I _n	f ₀ = 10 Hz		0.32	0.80	pA/√Hz
		f ₀ = 100 Hz ³		0.14	0.23	pA/√Hz
		f ₀ = 1 kHz		0.12	0.17	pA/√Hz
Input Resistance, Differential Mode ⁴	R _{IN}		15	50		MΩ
Input Resistance, Common Mode	R _{INCM}			160		GΩ
Input Voltage Range	IVR		±13	±14		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V _{CM} = ±13 V	106	123		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _S = ±3 V to ±18 V		5	20	μV/V
Large Signal Voltage Gain	A _{VO}	R _L ≥ 2 kΩ, V _O = ±10 V	200	500		V/mV
		R _L ≥ 500 Ω, V _O = ±0.5 V, V _S = ±3 V ⁴	150	400		V/mV
0°C ≤ T_A ≤ 70°C						
Input Offset Voltage ¹	V _{OS}			45	130	μV
Voltage Drift Without External Trim ⁴	TCV _{OS}			0.3	1.3	μV/°C
Voltage Drift with External Trim ³	TCV _{OSN}	R _P = 20 kΩ		0.3	1.3	μV/°C
Input Offset Current	I _{OS}			0.9	5.3	nA
Input Offset Current Drift	TCI _{OS}			8	35	pA/°C
Input Bias Current	I _B			±1.5	±5.5	nA
Input Bias Current Drift	TCI _B			13	35	pA/°C
Input Voltage Range	IVR		±13	±13.5		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V _{CM} = ±13 V	103	123		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _S = ±3 V to ±18 V		7	32	μV/V
Large Signal Voltage Gain	A _{VO}	R _L ≥ 2 kΩ, V _O = ±10 V	180	450		V/mV

5. USB měřicí modul AD24USB

Technické parametry

AD část - galvanicky oddělený integrační převodník s programovatelným rozlišením 22 až 26 bitů, 8 diferenčních vstupů nebo 16 SE, vst. rozsah 0-10 V/ ± 5 V, programovatelné zesílení 1 až 128 (1 až 512 pro diferenční verzi), šum 15 nV_{ss} pro 1 měření/s, **expandery** pro připojení **termočlánků**, **tenzometrů** nebo odporových teploměrů **Pt100**. Součástí dodávky je rovněž obslužný program **AD24control** umožňující odměr dat, jejich zobrazení, a uložení na disk.

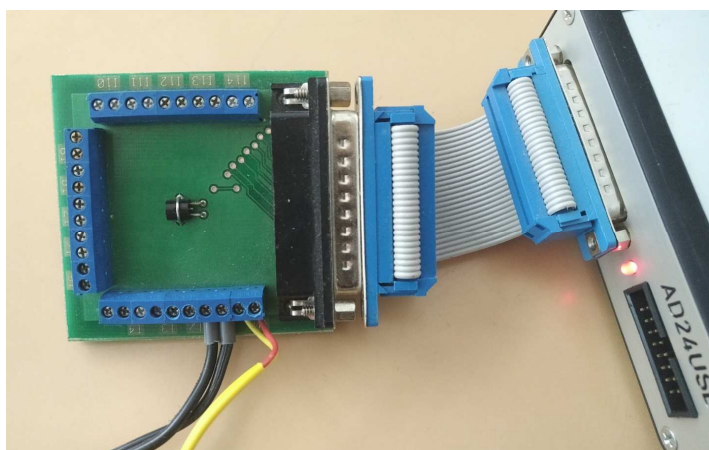
Teplotní kompenzace a linearizace se provádí programově v programu AD24control, který dovoluje i zadání vlastního linearizačního polynomu. Manuál je v příloze nebo ke stažení přímo z <http://www.janascard.cz/>.



Kalibrační pírka OMEGA CL1000 s termočlánky



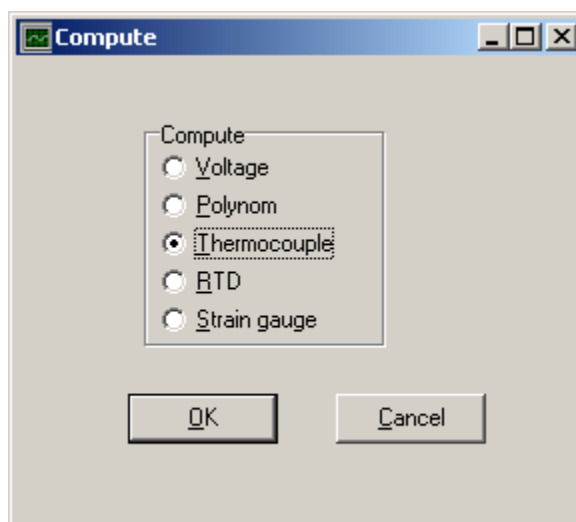
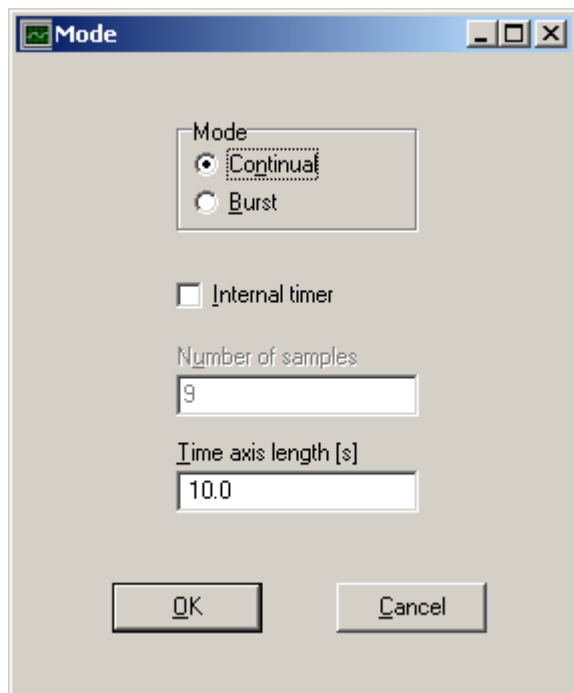
Detail konektoru termočlánku (zelený) a prodlužovacího vedení k modulu (žlutá)



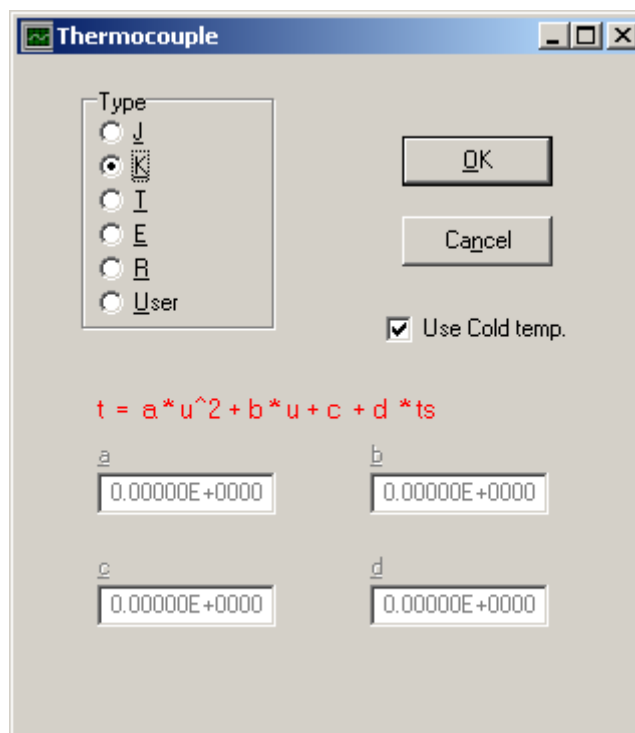
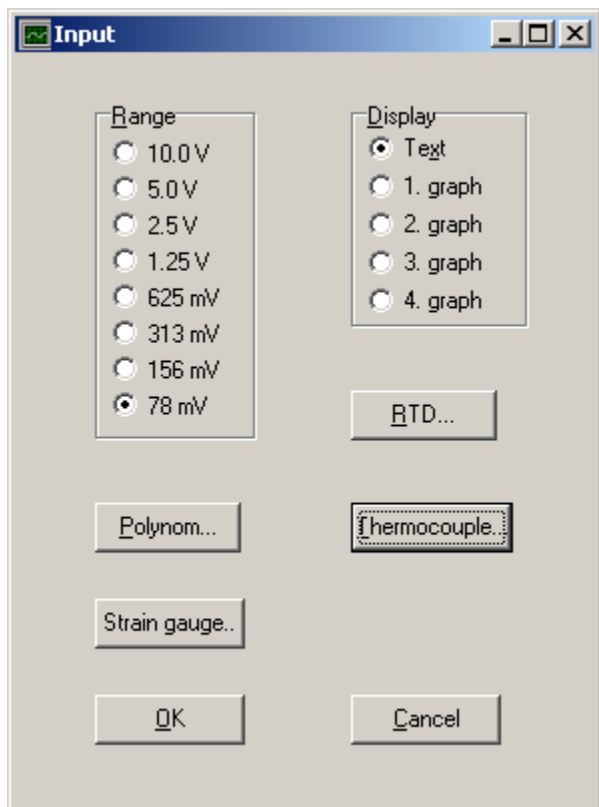
Detail „izotermální svorkovnice“ modulu AD24USB. Plošný spoj s dostatečnou tloušťkou a velkou plochou mědi zaručí dobrou tepelnou vodivost mezi senzorem teploty a „studeným“ koncem termočlánku.

Jen pro referenci: návod k obsluze programu AD24Control

V menu *Configuration* zvolte položku *Mode*, vyberte možnost *Continual* a položku *Time axis length* nastavte na přibližně 60 s. Dále v menu *Mathematics* (Compute) zvolte možnost *Thermocouple*, čímž zapnete výpočet teploty, Program bude jinak jen měřit napětí.



V menu *Input* vyberte položku *Input 0*, na který je připojen termočlánek. V části *Range* nastavte nejvyšší citlivost, tedy 78 mV. V části *Display* můžete vybrat typ zobrazení ve formě textového okna, nebo grafu. Stiskněte tlačítko *Thermocouple* a vyberte termočlánek typu K.



Samotné měření spustíte kliknutím na Start ve stavovém řádku hlavního okna, nebo stisknutím F2. Měření ukončíte stisknutím F3.