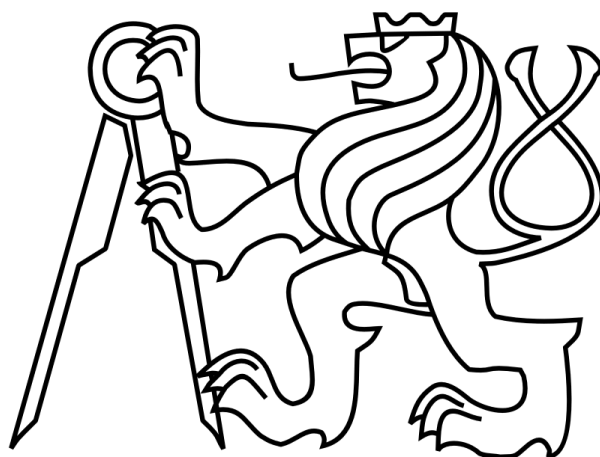


**České vysoké učení technické v Praze**  
**fakulta elektrotechnická**  
**katedra mikroelektroniky**



**Bakalářská práce**  
**Analýza vlastností soustavy Peltierových článků**

**Autor:** Zdeněk Bednář

**Vedoucí práce:** Ing. Lubor Jirásek, CSc.

**2016**



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** B E D N Á Ř Zdeněk

**Studijní program:** Komunikace, multimedia a elektronika

**Obor:** Aplikovaná elektronika

**Název tématu:** Analýza vlastností soustavy Peltierových článků

### Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte literaturu týkající se vlastností termoelektrických chladících článků a možností jejich tepelného sériového řazení.
2. Na základě dle 1) navrhnete kaskádu tří Peltierových článků tak, aby vytvořená kaskáda byla schopna odvádět tepelný tok ze zdroje (integrovaného obvodu). Optimalizujte jednotlivé stupně tak kaskády tak, aby pokles teploty na každý stupeň proti předchozímu byl přibližně 30°C. Navrhnete způsob řízení jednotlivých stupňů soustavy.
3. Provedte podrobné ověřovací měření navržené soustavy s ohledem na měnící se výkon tepelného zdroje, z něhož je tepelná energie odváděna.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky. Pokuste se vysvětlit případné nerovnoměrné rozložení teploty na jednotlivé stupně.
5. Navrhnete další možná řešení a úpravy.
6. Přípravek zůstane v majetku zadavatele.
7. Publikování výsledků je možné jen se souhlasem zadavatele.

### Seznam odborné literatury:

- [1] ANATYCHUK, L. I. Current status and some prospects of thermoelectricity. Journal of Thermoelectricity. 2007, part 1, s. 7-20. ISSN 1607-8829.  
Dostupný z WWW: <[ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/04.pdf](http://ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/04.pdf)>.
- [2] GROMOV, G.: Thermoelectric cooling modules. RMT, [cit. 2016-02-15].  
Dostupný z  
WWW: <[http://rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric\\_Cooling\\_Modules.pdf](http://rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf)>

Vedoucí: **Ing. Lubor Jirásek, CSc.**

Platnost zadání: 9.9.2017

L.S.

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 17.2.2016



# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Analýza vlastností soustavy Peltiérových článků“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 27. 5. 2016

Zdeněk Bednář

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Luborovi Jiráskovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce



## **Anotace**

V předložené práci jsou popsány základní principy termoelektrických jevů a jejich využití. Dále je popsána funkce termoelektrických chladících článků na principu Peltierova jevu a jejich využití jako chladičů určených pro odvod tepla z tepelného zdroje. Práce se věnuje především vícestupňovému zapojení Peltierových článků za účelem dosažení nižších teplot při chlazení malých výkonů. Zabývá se návrhem a řízením kaskády tří Peltierových článků a jejich chováním při odvodu tepla s měnícím se výkonem.

## **Abstract**

In the present work we study basic principles of thermoelectric effects and their applications. Further is described function of thermoelectric cooling cell on the principle of the Peltier effect and their use as coolers for heat transfer from heat source. Work focuses primarily on multi-stage Peltier cells group in order to achieve lower temperatures when cooling systems with low power emitting heat. It deals with the design and control of group of three Peltier cells and their behavior during heat dissipation with varying features.





---

## Obsah

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	3
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	10
1 Úvod.....	11
2 Termoelektrické jevy .....	12
2.1 Seebeckův jev .....	12
2.2 Peltierův jev .....	13
3 Peltierův článek jako chladič .....	14
3.1 Vícestupňové zapojení Peltierových článků .....	15
4 Měření vícestupňového zapojení Peltierových článků.....	16
4.1 Kalibrace termočlánekových teploměrů .....	16
4.2 Specifikace Peltierových článků .....	18
4.3 Měření na sestavě Peltierových článků s použitím Al chladiče .....	18
4.4 Zapojení s použitím chladiče s tepelnými trubicemi.....	23
4.5 Zapojení s použitím efektivnějšího posledního článku .....	25
4.5.1 Řízení kaskády článků dvěma zdroji.....	28
4.6 Zapojení s tepelnou zátěží.....	29
4.6.1 Řízení kaskády článků dvěma zdroji s použitím tepelné zátěže .....	32
5 Závěr .....	34
6 Použitá literatura .....	35
Přílohy.....	36

---

## Seznam použitých zkratk a symbolů

I	A	Proud
$I_E$		Emitorový proud tranzistoru
U	V	Napětí
P	W	Výkon
$P_T$		Ztrátový výkon tranzistoru
Q		Ztrátový výkon
$Q_c$		Tepelný výkon absorbovaný studenou stranou Peltierova článku
$Q_h$		Tepelný výkon emitovaný teplou stranou Peltierova článku
$R_\theta$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	Tepelný odpor
$U_{CE}$		Napětí kolektor emitor
$U_S$		Seebeckovo napětí
T	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
$\Delta T$		Teplotní rozdíl
Z	$\text{K}^{-1}$	Koeficient efektivity
$\alpha$	$\text{VK}^{-1}$	Seebeckův koeficient
$\beta$	$\text{VK}^{-2}$	Seebeckův koeficient

### Zkratky

TEC1	Peltierův článek TEC1-01708
TEC2	Peltierův článek TEC1-07108
TEC3	Peltierův článek TEC1-12708
TEC4	Peltierův článek TEC1-12714 VIGAN
TEC	Soustava Peltierových článků TEC1, TEC2 a TEC3 (TEC4)

---

# 1 Úvod

Dle prvního termodynamického zákona probíhá přenos tepla pouze z teplejšího tělesa na chladnější, Peltierův článek tento zákon zdánlivě popírá. Za předpokladu dodávané energie v podobě elektrického proudu Peltierův článek přenáší teplo v důsledku Peltierova jevu z chladné strany na teplou. Této vlastnosti se využívá především ke chlazení v aplikacích kde je potřebná nízká teplota. Nutno podotknout, že Peltierovy články jsou vysoce energeticky náročné a samy vyzařují více tepelného výkonu než jsou schopny absorbovat, vyzařovaný tepelný výkon lze vyjádřit vztahem:

$$Q_h = Q_c + P \quad (W;W,W) \quad (1.1)$$

kde:

$Q_c$             Tepelný výkon absorbovaný chladnou stranou Peltierova článku

$P$               Ztrátový výkon Peltierova článku

Z toho vyplývá, že v důsledku je třeba odvést daleko více tepla než bez použití Peltierova článku, je ale možno dosáhnout podstatně nižších teplot chlazeného přípravku než s použitím klasického chladiče, který je v ideálním případě schopen chladit pouze na teplotu okolí.

Tato práce se zabývá využitím Peltierových článků ke chlazení, především vícestupňovým zapojením těchto článků za účelem dosažení vyššího teplotního rozdílu mezi teplou a studenou stranou než je možné s použitím pouze jediného článku.

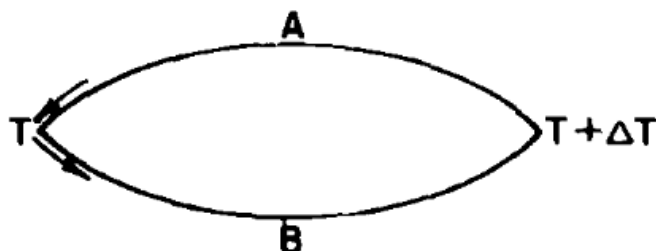
V praktické části jsme se zaměřili na kaskádu tří Peltierových článků, její vlastnosti a schopnost odvádět tepelný tok ze zdroje (integrovaného obvodu).

---

## 2 Termoelektrické jevy

### 2.1 Seebeckův jev

Spojíme-li dva různé vodiče A a B do uzavřeného obvodu, bude tímto obvodem protékat elektrický proud I za předpokladu rozdílných teplot těchto spojů. Nutno podotknout, že pro dané materiály je tento jev závislý pouze na rozdílu teplot mezi spoji těchto dvou různých, homogenních vodičů. Předpokládáme-li neměnné složení termočlánků A a B, nebude Seebeckův jev záviset na ostatních proměnných jako rozložení teplot nebo teplotním gradientu. [3]



Obr. 1 - Seebeckův jev [3]

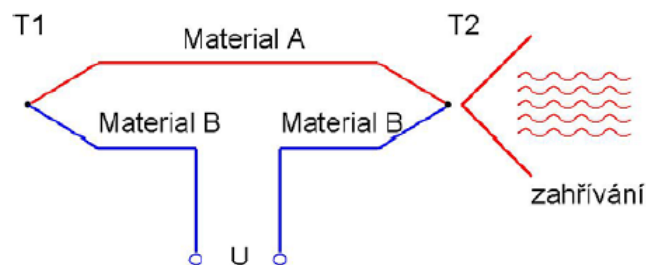
Na výstupních svorkách tohoto obvodu naměříme tzv. Seebeckovo napětí  $U_S$ , které lze vyjádřit vztahem[4]:

$$U_S = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) dT \quad (V; VK^{-1}, K) \quad (2.1.1)$$

kde:

$\alpha_A, \alpha_B$  Seebeckovy koeficienty vodiče A a B

$T_1, T_2$  Teploty spojů vodičů A a B



Obr. 2 - Seebeckovo napětí [3]

Seebeckovy koeficienty se udávají vzhledem k olovu a jsou mj. závislé na přesném složení, struktuře materiálu a teplotě vodičů.[5]

Kov	$\alpha(\mu\text{VK}^{-1})$	$\beta(\mu\text{VK}^{-2})$
Antimon	35,60	0,1450
Bismut	-74,40	0,0320
Konstantan	-38,10	-0,0888
Měď	2,71	0,0079
Nikl	-19,10	-3,0200
Platina	-3,03	-3,2500
Železo	16,70	-0,0297

Tab.1 Seebeckovy koeficienty pro různé kovy [5]

## 2.2 Peltierův jev

Peltierův jev popisuje vyzáření nebo absorpci tepla na rozhraní vodičů ze dvou různých materiálů, pokud jím prochází elektrický proud. Jedná se o vratný jev, zda je teplo vyzařováno nebo absorbováno určuje pouze směr proudu a jeho velikost je nezávislá na tvaru nebo velikosti rozhraní. Množství vyzářeného tepla je závislé na použitých materiálech a je přímo úměrné velikosti proudu a času[3, 6]. Lze je spočítat ze vzorce:

$$Q = \Pi_{AB} I t \quad (\text{J; V, A, s}) \quad (2.2.1)$$

kde

I      A      Proud

t      s      Doba průchodu proudu

$\Pi_{AB}$     V      Relativní Peltierův koeficient platný pro danou kombinaci materiálů

Vzhledem k tomu, že Peltierův jev je inverzní jev k Seebeckovu jevu, lze velikost relativního Peltierova koeficientu určit ze vzorce

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (\text{V; VK}^{-1}, \text{K}) \quad (2.2.2)$$

kde:

$\alpha_{AB}$      $\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$     relativní Seebeckův koeficient pro danou kombinaci materiálů

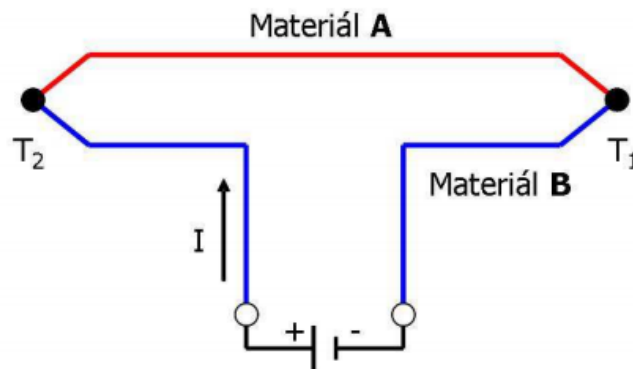
T      K      absolutní teplota

Peltierův jev je lineární, tzn. že relativní Peltierův koeficient je výsledek kombinace absolutních Peltierových koeficientů pro jednotlivé materiály a počítá se ze vzorce:

$$\Pi_{AB} = \Pi_A - \Pi_B \quad (\text{V; V, V}) \quad (2.2.3)$$

---

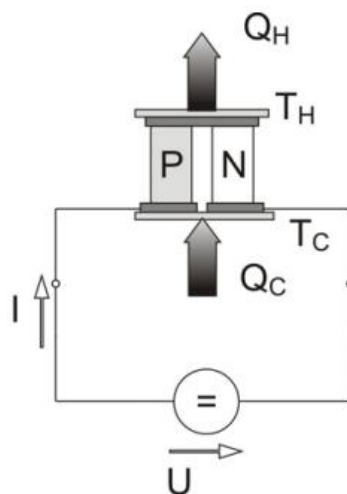
Následující obrázek představuje typické schéma zapojení pro demonstraci Peltierova jevu



Obr. 2.2.1 Principiální schéma funkce Peltierova jevu [6]

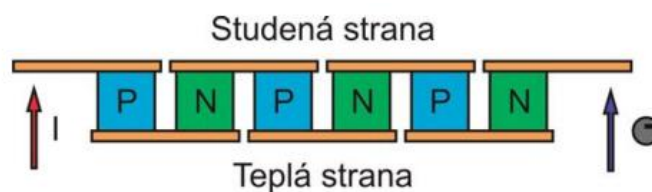
### 3 Peltierův článek jako chladič

Jednou z prvních demonstrací Peltierova jevu byl jeho pokus, při kterém se mu povedlo pomocí dvou rozhraní antimonu a bismutu na jednom z nich zmrazit vodní kapku. V současné době se tohoto jevu využívá ke konstrukci termoelektrických chladičů[4]. Zjednodušené schéma provedení je na následujícím obrázku



Obr. 3.1 Schéma PN přechodu Peltierova článku [4]

Peltierovy články nejsou tvořeny jen jediným přechodem, těchto přechodů je několik, viz následující obrázek.



Obr. 3.2 Soustava PN přechodů Peltierova článku [4]

Sloupky, tvořené polovodiči typu P a N, jsou na jedné straně vodivě spojeny spojovacím můstkem. Spodní kontaktní plošky na druhé straně jsou určeny pro přívod elektrické energie. Spojovací můstek a kontaktní plošky absorbují nebo vyzařují teplo. Tyto sloupky jsou umístěny mezi keramickými destičkami. [4]

Nutným předpokladem pro konstrukci Peltierových článků byl vývoj vhodných materiálů. Do jaké míry je materiál vhodný pro konstrukci termoelektrických chladičů určuje jeho koeficient efektivnosti  $Z$ :

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} \quad (\text{K}^{-1}; \text{VK}^{-1}, \Omega^{-1}\text{m}^{-1}, \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) \quad (3.1)$$

kde:

$\alpha$	$\text{VK}^{-1}$	Seebeckův koeficient
$\sigma$	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$	Měrná elektrická vodivost
$\lambda$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti

V současné době se jako nejlepší jeví převážně bizmut-telluridy, tj. ternární systémy Bi-Te-Se ( N-typ ) a Bi-Sb-Te ( P-typ ). Jako materiál na spojovací můstky se používá měď.

### 3.1 Vícestupňové zapojení Peltierových článků

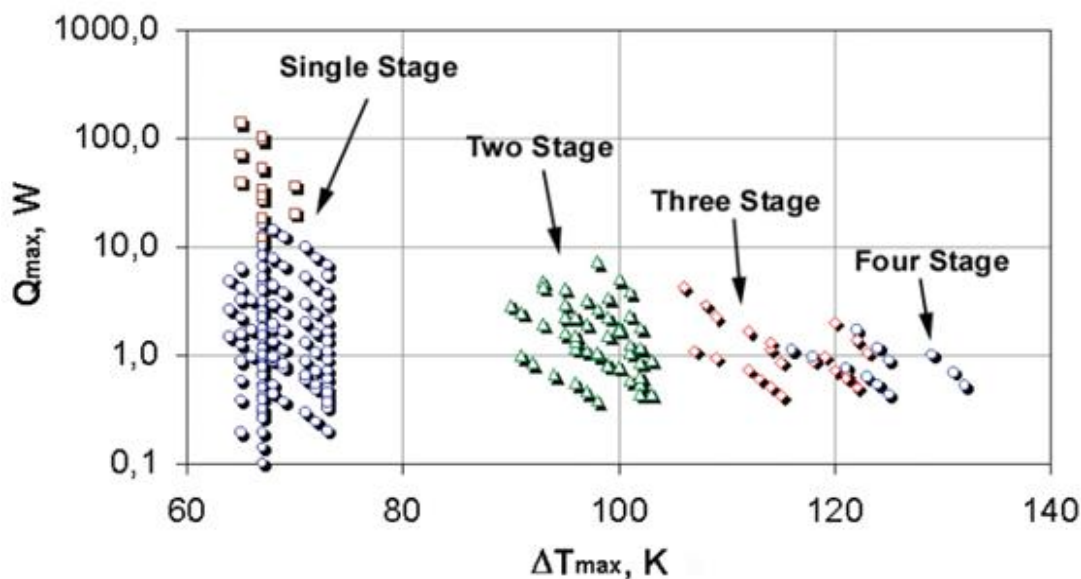
V dnešní době vyráběné Peltierovy články jsou schopny dosáhnout teplotního rozdílu mezi teplou a studenou stranou v rozmezí přibližně  $65^\circ\text{C} - 72^\circ\text{C}$ . [2] Jedna z možností, jak dosáhnout vyšších hodnot, je umístění více Peltierových článků na sebe. Nejběžněji se používá sestava dvou až čtyř článků, přičemž každý následující článek musí být schopen odvést více tepelného toku než předchozí, jelikož každý článek přidá do sestavy vlastní ztrátový výkon

$$Q_{hn} = P_n + Q_{cn} \quad (\text{W}; \text{W}, \text{W}) \quad (3.1.1)$$

kde

$Q_{hn}$	Tepelný výkon vyzařený teplou stranou n-tého Peltierova článku
$P_n$	Ztrátový výkon n-tého Peltierova článku
$Q_{cn}$	Tepelný výkon absorbovaný studenou stranou n-tého Peltierova článku

Z toho vyplývá, že vícestupňové zapojení Peltierových článků je schopno dosáhnout vyšších tepelných rozdílů, ale razantně klesá množství tepelného výkonu, který je možno z tepelné zátěže odvést. Viz graf 3.1.1



Graf 3.1.1 Maximální výkonové charakteristiky komerčně vyráběných jednostupňových až čtyřstupňových Peltierových článků[2]

## 4 Měření vícestupňového zapojení Peltierových článků

### 4.1 Kalibrace termočlánekových teploměrů

Termočlánky použité pro měření teplot se mírně lišily a bylo třeba provést korekci jejich odchylky mezi zobrazovanou a skutečnou hodnotou. Pro tuto kalibraci jsme použili rtuťový teploměr, který jsme považovali za referenční a podle tohoto teploměru jsme sjednotili hodnoty ostatních teploměrů s termočlánky. Měření probíhalo v kádince se silikonovým olejem, do které jsme ponořili čtyři termočlánky a jeden rtuťový teploměr. Kádinka byla v průběhu měření zahřívána a postupně byly odečítány teploty na jednotlivých termočláncích a teploměru.

číslo měření	$T_{k1}(^{\circ}\text{C})$	$T_{k2}(^{\circ}\text{C})$	$T_{k3}(^{\circ}\text{C})$	$T_{k4}(^{\circ}\text{C})$	$T_5(^{\circ}\text{C})$
1	26	26	27	27	25
2	29	30	30	30	28
3	32	33	31	33	30
4	36	37	35	37	34
5	40	41	40	40	37
6	44	45	44	45	42
7	48	48	48	48	45

Tab. 4.1.1 Kalibrace termočláneků

kde:

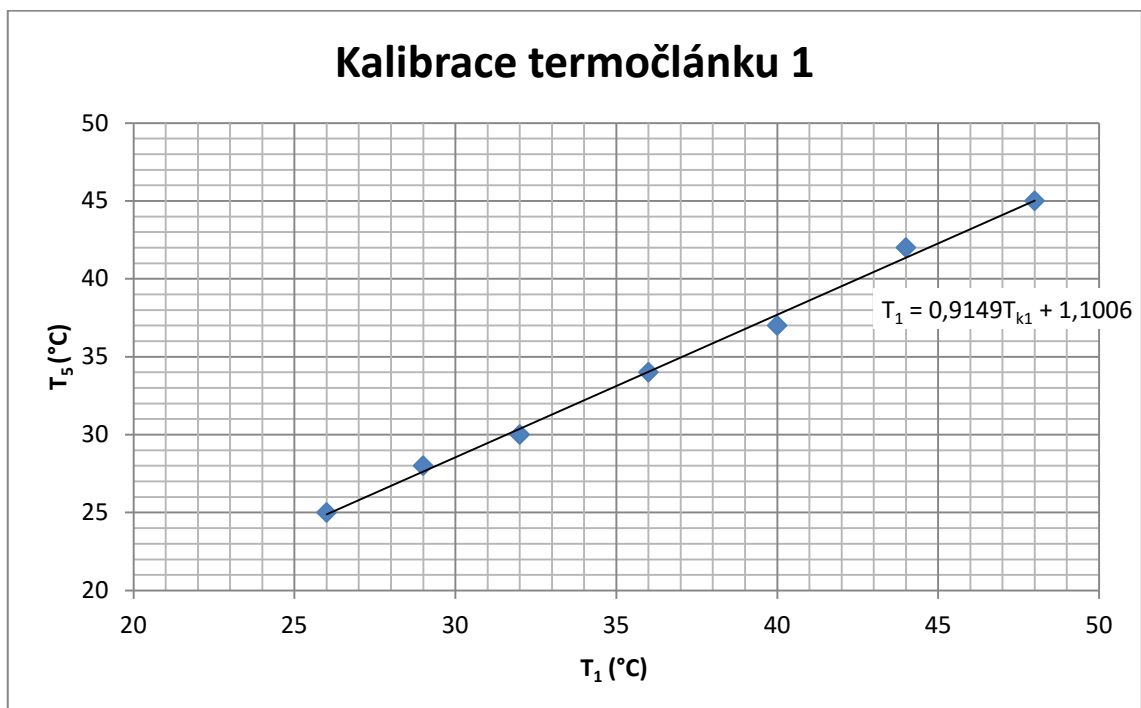
$T_{k1} - T_{k4}$  Teploty odečtené z termočláneků 1 - 4

$T_5$  Teplota odečtená ze rtuťového teploměru



Měření probíhalo v rozmezí 25°C až 45°C, pro přesnější korekci teplot by bylo vhodnější měřit na vyšším tepelném rozsahu (při měření kaskády Peltierových článků dosahovaly teploty rozsahu cca -35°C až 90°C), ale provést kalibraci například v záporných teplotách nebylo v daných podmínkách možné.

Naměřené hodnoty byly poté vyneseny do grafu a proloženy přímkou metodou nejmenších čtverců. Rovnice regrese byla poté použita ke korekci naměřených hodnot. Uvádím pouze kalibrace termočlánku 1, termočlánky 2 - 4 jsou uvedeny v příloze.



Graf 4.1.1 Kalibrace termočlánku 1

Rovnice regrese pro termočlánek 1-4:

$$T_1 = 0,9149T_{k1} + 1,1006 \quad (^\circ\text{C}; ^\circ\text{C}) \quad (4.1.1)$$

$$T_2 = 0,914T_{k2} + 0,4815 \quad (^\circ\text{C}; ^\circ\text{C}) \quad (4.1.2)$$

$$T_3 = 0,9398T_{k3} + 0,1914 \quad (^\circ\text{C}; ^\circ\text{C}) \quad (4.1.3)$$

$$T_4 = 0,9518T_{k4} - 0,9252 \quad (^\circ\text{C}; ^\circ\text{C}) \quad (4.1.4)$$

kde:

$T_1 - T_4$       Teplota termočlánku 1-4 po korekci

$T_{k1} - T_{k4}$       Teplota termočlánku 1-4 před korekcí

## 4.2 Specifikace Peltierových článků

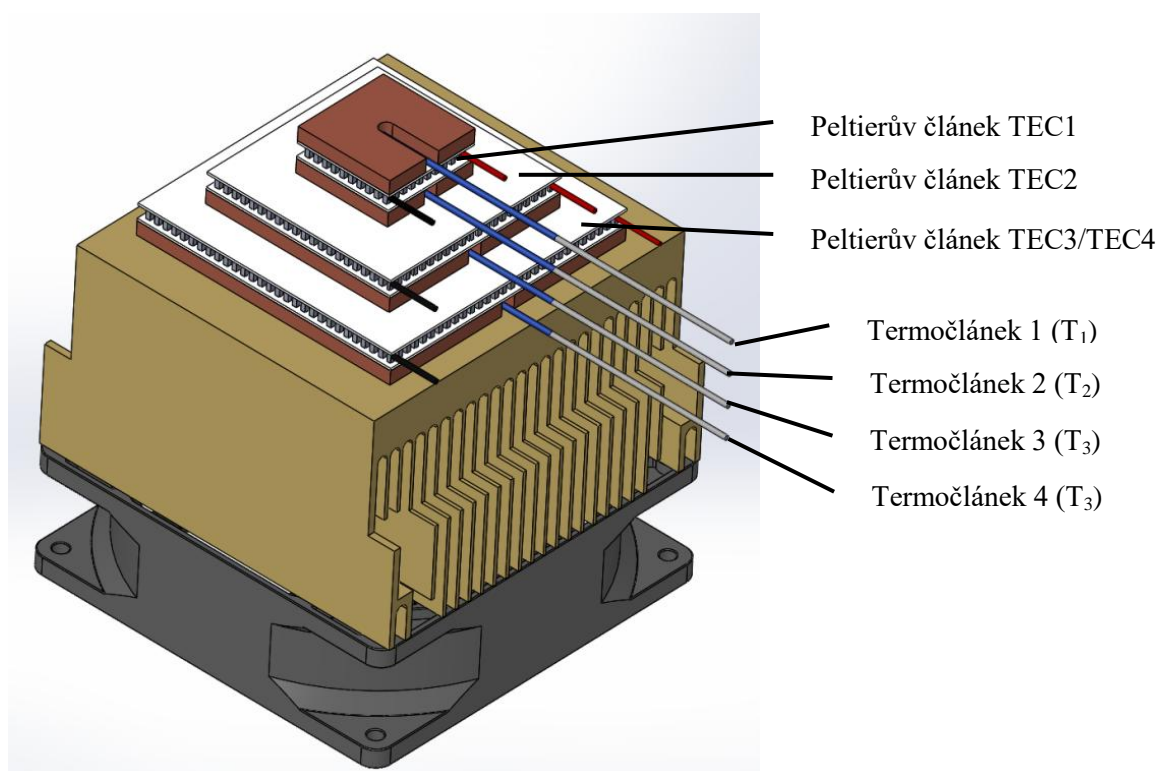
	Rozměry základny (mm)	Výška (mm)	$\Delta T_{\max}$ (°C) ( $Q_c = 0W$ )	$U_{\max}$ (V)	$I_{\max}$ (A)	$Q_{c\max}$ (W) ( $\Delta T = 0^\circ C$ )
TEC1	15x15	3,3	68	2,06	8,5	9,2
TEC2	30x30	3,5	68	8,50	8,5	40,0
TEC3	40x40	3,5	68	15,40	8,5	85,0
TEC4	40x40	-	90	15,40	14,0	120,0

Tab. 4.2.1 Katalogové hodnoty Peltierových článků

Další specifikace pro články TEC3 a TEC4 udávané výrobcem jsou uvedeny v příloze.

## 4.3 Měření na sestavě Peltierových článků s použitím Al chladiče

Peltierovy články TEC1, TEC2 a TEC3 byly kaskádovitě naskládány na sebe přičemž mezi jednotlivé články a na začátku a konci sestavy byly přidány měděné destičky s drážkou, která umožňovala zasazení termočlánku měřícího teplotu co nejbližší středům jednotlivých Peltierových článků. Tepelný výkon  $Q_h$  z konce sestavy byl odváděn pasivním hliníkovým chladičem s ventilátorem původně určeným ke chlazení procesoru počítače. Kontaktní plochy Peltierových článků, měděných destiček a hliníkového chladiče byly vyplněny teplovodivou pastou z důvodů snížení tepelného odporu těchto spojů.



Obr. 4.3.1 Ilustrační schéma sestavy

Celá sestava až na hliníkový chladič byla zasazena do polystyrénové izolace, aby se zamezilo vniku vlhkosti a odpadního tepla z okolí. Peltierovy články byly zvoleny tak, aby je bylo možné zapojit sériově a mohly být řízeny stejným proudem. Sestava byla napájena laboratorním stabilizovaným zdrojem napětí.

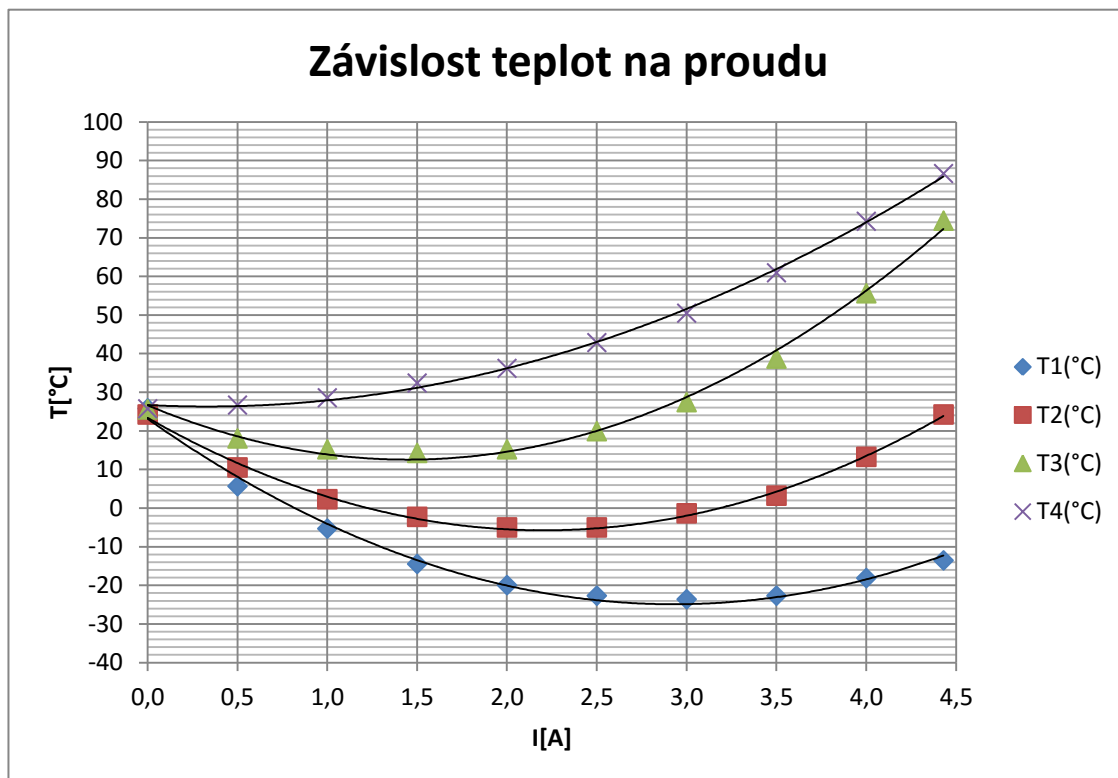
Měření probíhalo postupným zvyšováním odebíraného proudu do sestavy s krokem 0,5 A, přičemž po každém ustálení teplot a požadovaného protékajícího proudu (odpor Peltierových článků klesá s klesající teplotou) byly odečteny teploty  $T_1$ - $T_4$  a napětí na jednotlivých člancích  $U_1$ - $U_3$ .

I(A)	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	U(V)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$R_\theta$ (°CW <sup>-1</sup> )
0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	26	26	26	26	-
0,5	0,15	0,7	1,2	1,9	6	11	18	27	0,72
1,0	0,30	1,2	2,3	3,5	-5	2	15	29	0,73
1,5	0,43	1,7	3,4	5,1	-14	-2	14	32	0,83
2,0	0,54	2,3	4,4	6,7	-20	-5	15	36	0,76
2,5	0,66	2,8	5,6	8,5	-23	-5	20	43	0,79
3,0	0,77	3,5	6,9	10,5	-24	-1	27	50	0,78
3,5	0,90	4,2	8,2	12,6	-23	3	39	61	0,79
4,0	1,03	5,1	9,8	16,0	-18	13	56	74	0,76
4,4	1,19	6,1	11,3	18,6	-14	24	74	87	0,74

Tab 4.3.1 Výsledky měření sestavy Peltierových článků TEC1, TEC2 a TEC3 s použitím Al chladiče

kde:

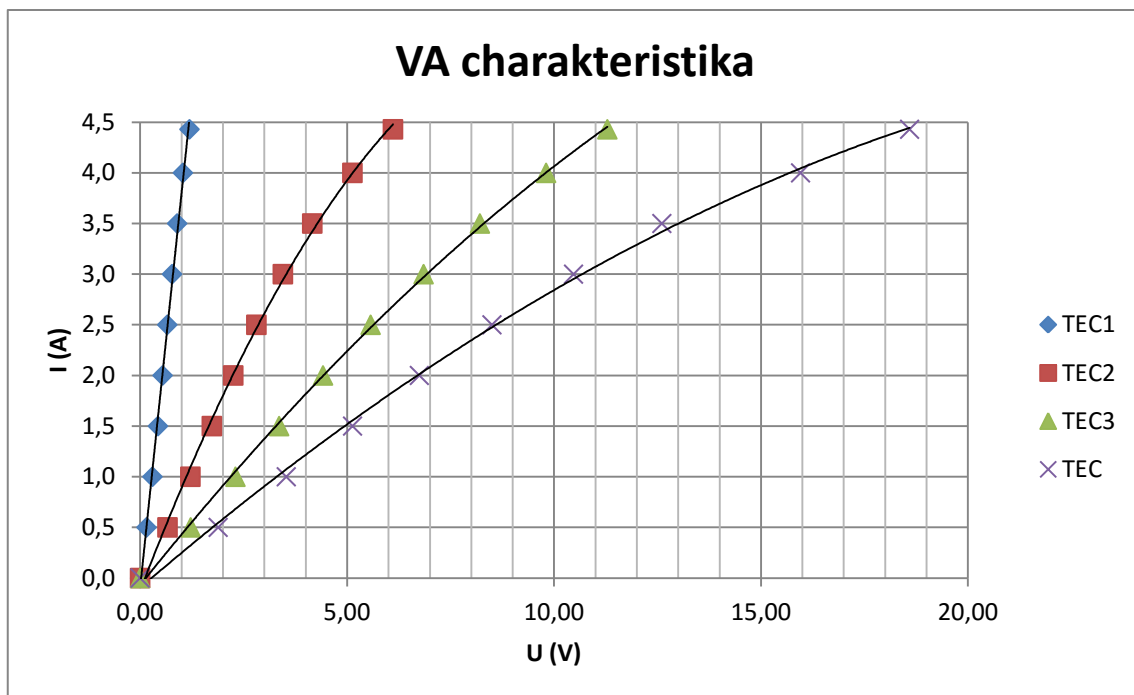
I	Společný proud Peltierových článků
U	Celkové napětí kaskády
$U_1$ - $U_3$	Napětí na člancích TEC1-TEC3
$T_1$	Teplota studené straně kaskády
$T_2$ , $T_3$	Teplota mezi články TEC1, TEC2 a TEC2, TEC3
$T_4$	Teplota na teplé straně kaskády
$R_\theta$	Tepelný odpor chladiče



Graf 4.3.1 Závislost teplot jednotlivých článků na jimi odebíraném proudu

Jak je patrné s grafu 4.3.1 nejnižší teploty na začátku sestavy bylo dosaženo v rozmezí 2,5 A - 3,5 A, s dalším nárůstem vstupního proudu začala teplota teplé strany sestavy neúměrně narůstat a tím se začala zvyšovat i teplota chladné strany kaskády. Z tohoto závěru jsme usoudili, že použitý pasivní chladič nezvládá odvádět dostatečný tepelný výkon vyzařovaný z konce sestavy.

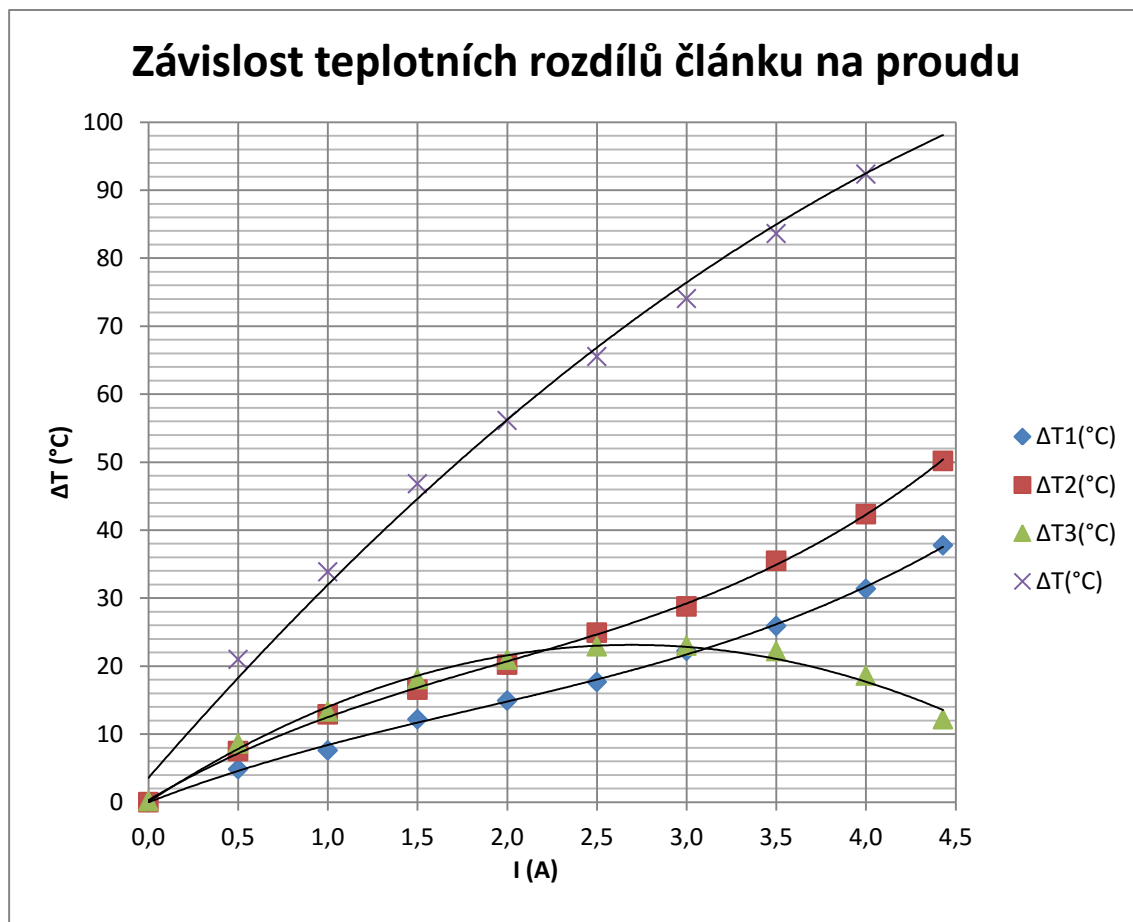
Přestože články mohou být napájeny vstupním proudem až 8,5 A, muselo být měření ukončeno již při proudu 4,4 A protože teplá strana Peltierova článku TEC3 dosáhla teploty téměř 90 °C, což je maximální pracovní teplota použitých článků a při jejím překročení by mohlo dojít k poškození, či dokonce zničení termoelektrického článku.



Graf 4.3.2 Voltampérová charakteristika článků TEC1, TEC2, TEC3 a celé kaskády TEC

$I$ (A)	$\Delta T_1$ (°C)	$\Delta T_2$ (°C)	$\Delta T_3$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
0,0	0	0	0	0
0,5	5	8	9	21
1,0	8	13	13	34
1,5	12	17	18	47
2,0	15	20	21	56
2,5	18	25	23	66
3,0	22	29	23	74
3,5	26	35	22	84
4,0	31	42	19	92
4,4	38	50	12	100

Tab. 4.3.2 Teplotní rozdíly jednotlivých článků a celé kaskády při daném proudu



Graf 4.3.3 Závislost teplotních rozdílů jednotlivých článků a celé kaskády v závislosti na jimi odebíraném proudu

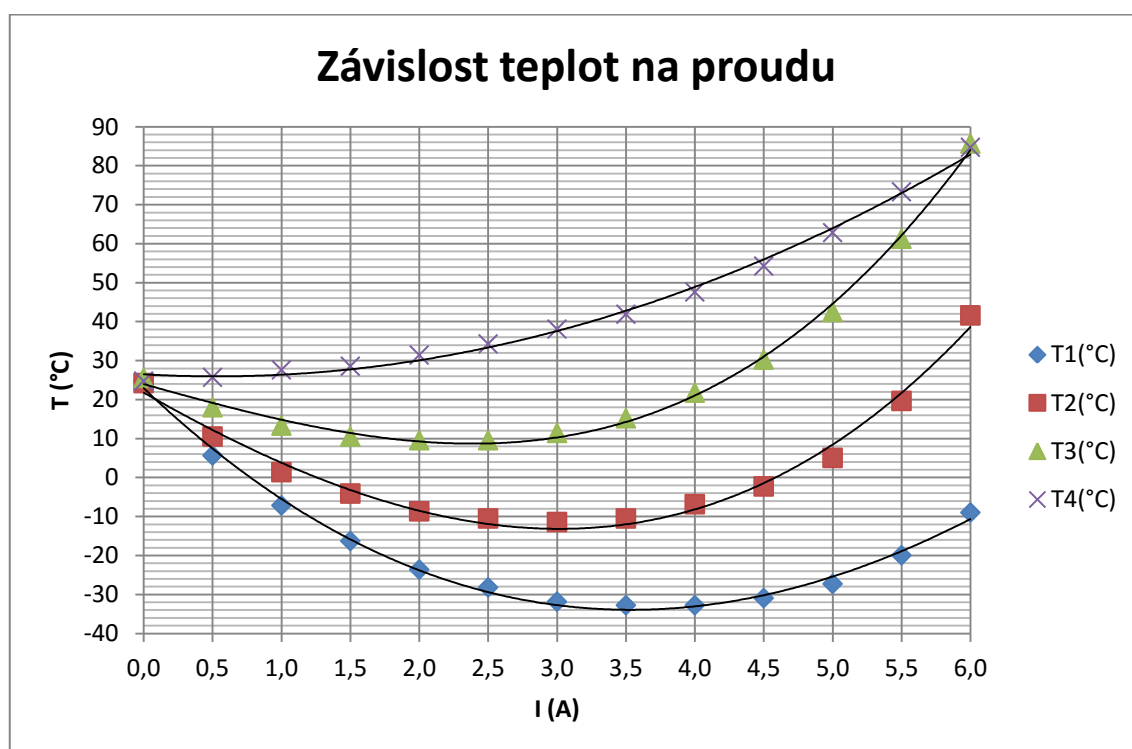
Z vyhodnocení výsledku jsme dospěli k rozhodnutí nahradit hliníkový chladič výkonnějším chladičem schopným odvést vyšší ztrátový výkon z kaskády Peltierových článků a nižším tepelným odporem za účelem snížení teplot jednotlivých prvků sestavy při zachování stejného výkonu a tepelného toku.

#### 4.4 Zapojení s použitím chladiče s tepelnými trubicemi

Při předchozím měření jsme usoudili, že chladič k odvodu tepelného výkonu z teplého konce kaskády nebyl schopen odvádět dostatečný ztrátový výkon. Tento chladič byl nahrazen jiným, efektivnějším chladičem s tepelnými trubicemi a kaskáda Peltierových článků byla zasazena do robustnější izolace, která byla schopna efektivněji izolovat okolní teplo a vlhkost.

I(A)	U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	U(V)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	R <sub>θ</sub> (°CW <sup>-1</sup> )
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25	24	26	25	-
0,5	0,1	0,6	1,2	2,0	6	11	18	26	0,74
1,0	0,3	1,2	2,3	3,7	-7	1	13	28	0,71
1,5	0,4	1,7	3,3	5,3	-16	-4	11	29	0,45
2,0	0,5	2,2	4,2	6,8	-24	-9	10	31	0,47
2,5	0,5	2,6	5,2	8,3	-28	-10	10	34	0,45
3,0	0,6	3,1	6,2	9,9	-32	-11	11	38	0,44
3,5	0,7	3,7	7,2	11,6	-33	-10	15	42	0,42
4,0	0,9	4,3	8,3	13,4	-33	-7	22	48	0,42
4,5	1,0	5,0	9,4	15,4	-31	-2	30	54	0,42
5,0	1,1	5,9	10,7	17,7	-27	5	42	63	0,43
5,5	1,4	7,1	12,0	20,4	-20	20	61	73	0,43
6,0	1,7	8,6	13,3	23,7	-9	42	86	85	0,42

Tab. 4.4.1 Výsledky měření sestavy Peltierových článků TEC1, TEC2 a TEC3 s použitím chladiče s tepelnými trubicemi



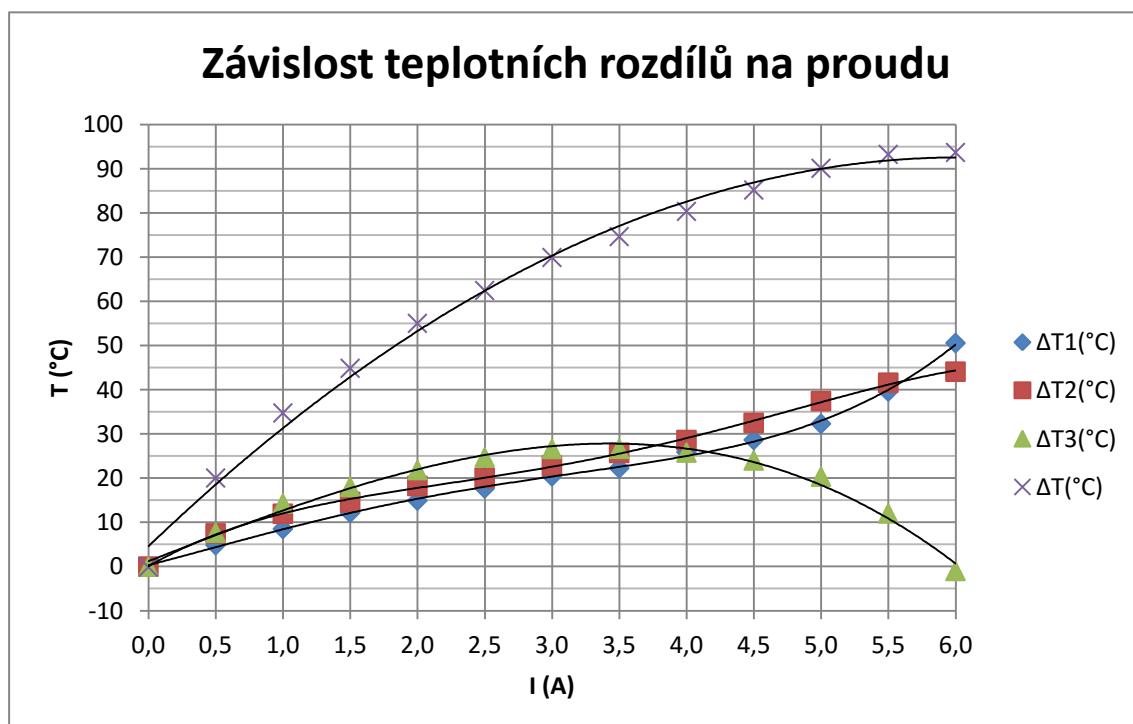
Graf 4.4.1 Závislost teplot jednotlivých článků na jimi odebíraném proudu

S novým chladičem bylo možno měřit až do vstupního proudu 6 A, při kterém bylo opět dosaženo teploty teplé strany sestavy téměř 90 °C a zároveň bylo dosaženo limitu maximálního přeneseného tepelného výkonu článku TEC3 při daném protékajícím proudu.

Nejnižších teplot chladné strany sestavy bylo v tomto případě dosaženo při vstupním proudu 3 A - 4 A, při kterém se teplota chladné strany pohybovala okolo -33 °C. Teplotní rozdíly  $\Delta T$  jednotlivých článků se v tomto případě pohybovaly v rozmezí 20 °C - 27 °C.

I(A)	$\Delta T_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_2(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_3(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
0,0	0	0	0	0
0,5	5	8	8	20
1,0	9	12	14	35
1,5	12	15	18	45
2,0	15	18	22	55
2,5	18	20	25	62
3,0	20	23	27	70
3,5	22	26	27	75
4,0	26	29	26	80
4,5	29	33	24	85
5,0	32	37	20	90
5,5	40	42	12	93
6,0	51	44	-1	94

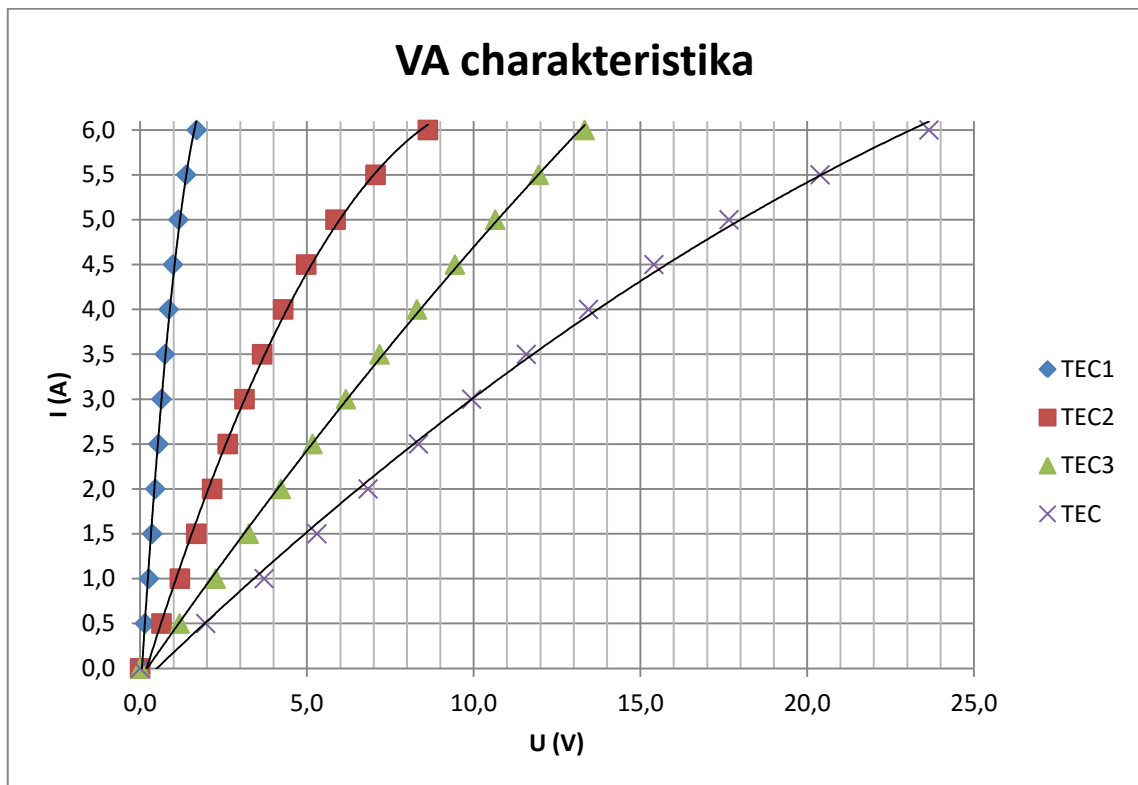
Tab. 4.4.2 Teplotní rozdíly jednotlivých článků a celé kaskády při daném proudu



Graf 4.4.2 Závislost teplotních rozdílů jednotlivých článků a celé kaskády v závislosti na jimi odebíraném proudu



Z grafu 4.4.2 je vidět, že teplotní rozdíly jednotlivých článků rostou přibližně stejně až do hranice 4 A kde poslední článek ztrácí schopnost efektivně odvádět tepelný tok předchozích Peltierových článků a teplotní rozdíl mezi jeho teplou a chladnou stranou začíná klesat. Při odebíraném proudu 6 A dosáhl svého limitu přenášeného tepelného výkonu, který v tomto bodě činil přibližně 62 W a dále již nevytváří žádný teplotní rozdíl.



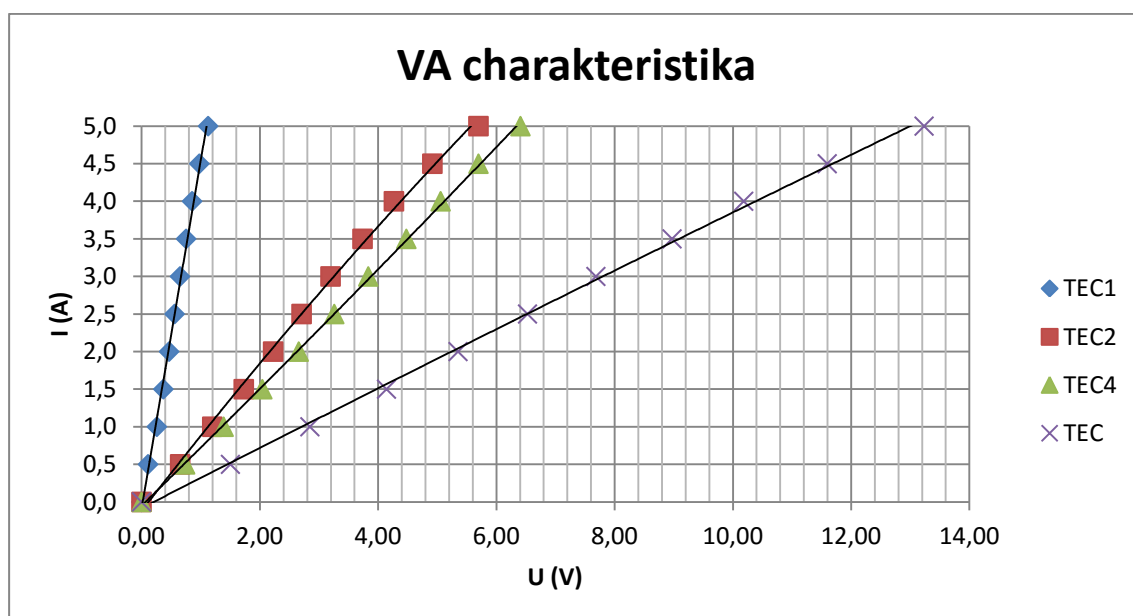
Graf 4.4.3 Voltampérové charakteristiky článků TEC1, TEC2, TEC3 a celé kaskády TEC

#### 4.5 Zapojení s použitím efektivnějšího posledního článku

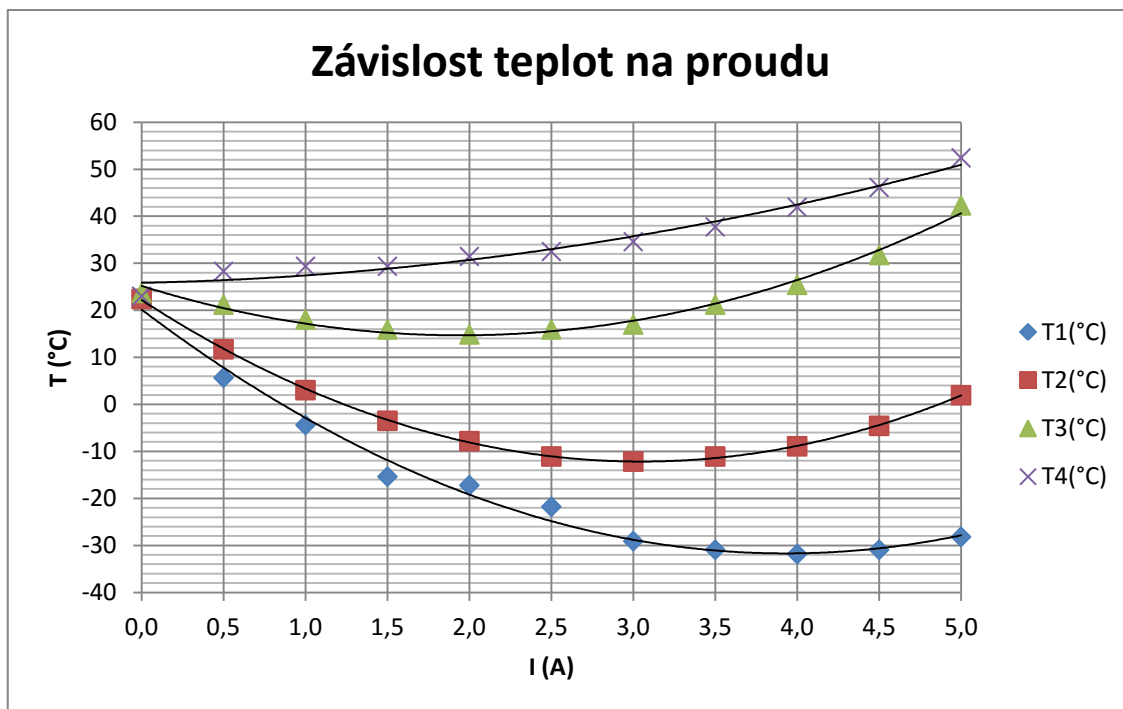
Peltierův článek TEC3 byl nahrazen výkonnějším článkem TEC4, jehož maximální proudový odběr je až 14 A (maximální proud ostatních článků je 8,5 A). Přestože tento článek je stavěn na vyšší proud, sestava byla opět zapojena sériově a využito se tak jeho vyšší efektivity proti původnímu článku TEC3. Přenesený tepelný výkon a dosažený tepelný rozdíl byl ekvivalentní s článkem TEC3 s tím rozdílem, že požadovaného proudového odběru bylo docíleno při nižším napětí, a tedy i nižšího ztrátového výkonu. Jeho voltampérová charakteristika se téměř blížila článku TEC2 (viz graf 4.5.3). Tímto se snížily požadavky na odvod tepelného výkonu celé kaskády.

I(A)	U1(V)	U2(V)	U3(V)	U(V)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	Rth(°C/W)
0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	23	22	24	23	-
0,5	0,11	0,7	0,7	1,5	6	12	21	28	7,05
1,0	0,26	1,2	1,4	2,8	-4	3	18	29	2,23
1,5	0,37	1,7	2,0	4,1	-15	-3	16	29	1,02
2,0	0,47	2,2	2,7	5,4	-17	-8	15	31	0,79
2,5	0,56	2,7	3,3	6,5	-22	-11	16	32	0,58
3,0	0,65	3,2	3,8	7,7	-29	-12	17	35	0,50
3,5	0,76	3,7	4,5	9,0	-31	-11	21	38	0,47
4,0	0,86	4,3	5,1	10,2	-32	-9	25	42	0,46
4,5	0,98	4,9	5,7	11,6	-31	-5	32	46	0,44
5,0	1,13	5,7	6,4	13,2	-28	2	42	52	0,44

Tab. 4.5.1 Výsledky měření sestavy Peltierových článků TEC1, TEC2 a TEC4 s použitím chladiče s tepelnými trubicemi



Graf 4.5.1 Voltampérové charakteristiky článků TEC1, TEC2, TEC3 a celé kaskády TEC



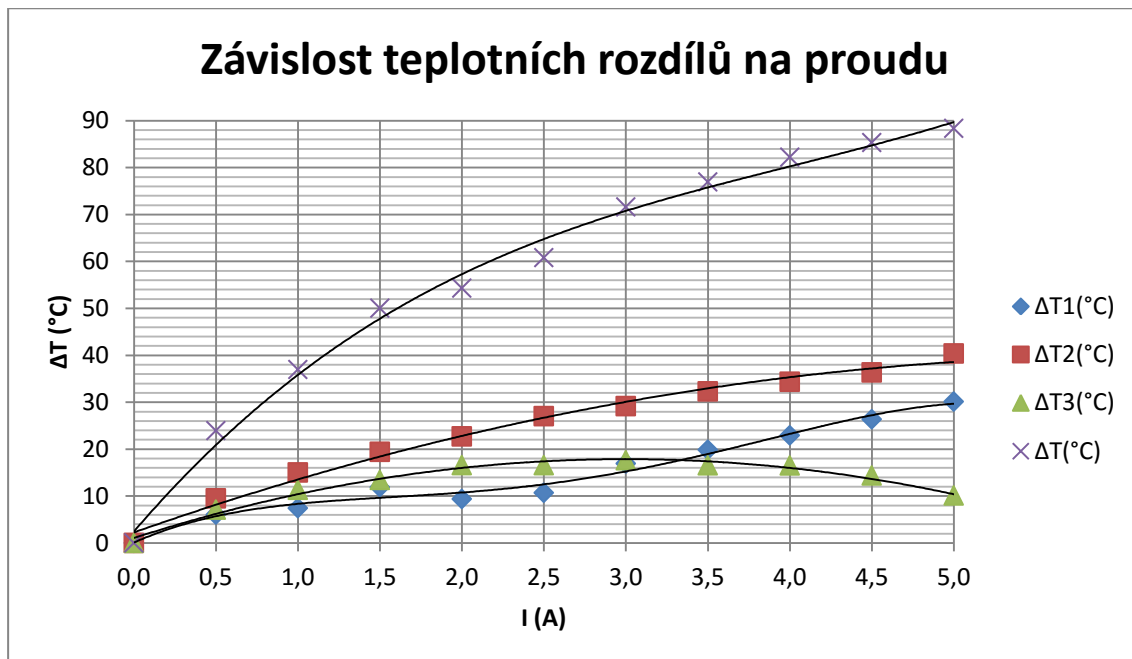
Graf 4.5.2 Závislost teplot jednotlivých článků na jimi odebíraném proudu

Po výměně článku TEC3 za článek TEC4 bylo dosaženo nejnižších teplot chladné části sestavy při protékajícím proudu 3,5 A - 4,5 A, při kterém tato teplota nevzrostla nad  $-31^{\circ}\text{C}$ . Při proudovém odběru 5 A začala teplota na všech článcích narůstat, z výsledků předchozích měření bylo předpokládáno další zvyšování tohoto nárůstu teplot a měření bylo ukončeno.

Při tomto měření byly nejnižší teploty chladné části kaskády srovnatelné s předchozí sestavou, ale teplota na chladiči se snížila o  $6^{\circ}\text{C}$  a ztrátový výkon celé sestavy klesl téměř o 13 W.

I(A)	$\Delta T_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_2(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_3(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
0,0	0	0	0	0
0,5	6	9	7	24
1,0	7	15	11	37
1,5	12	19	13	50
2,0	9	23	17	54
2,5	11	27	17	61
3,0	17	29	18	72
3,5	20	32	17	77
4,0	23	34	17	82
4,5	26	36	14	85
5,0	30	40	10	88

Tab. 4.5.2 Teplotní rozdíly jednotlivých článků a celé kaskády při daném proudu



Graf 4.5.3 Závislost teplotních rozdílů jednotlivých článků a celé kaskády v závislosti na jimi odebraném proudu

#### 4.5.1 Řízení kaskády článků dvěma zdroji

Jelikož byl Peltierův článek TEC3 stavěný na vyšší protékající proud, rozhodli jsme se zkusit napájet tento článek samostatně. Nejprve byl nastaven odebíraný proud všech článků na 4 A, jelikož při tomto proudu bylo dosaženo nejnižší teploty chladné strany kaskády, a poté se jemnou regulací proudu  $I_{12}$  a  $I_3$  experimentálně hledala minimální ustálená teplota chladné části kaskády.

$I_3$ (A)	$I_{12}$ (A)	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	$U$ (V)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$R_\theta$ (°C·W <sup>-1</sup> )
5,0	3,5	0,74	3,7	6,9	11,3	-32	-10	15	42	0,32
5,6	3,9	0,84	4,2	7,7	12,7	-33	-8	20	46	0,30

Tab. 4.5.1.1 Výsledky měření sestavy Peltierových článků se samostatně řízeným článkem TEC4

$I_3$ (A)	$I_{12}$ (A)	$\Delta T_1$ (°C)	$\Delta T_2$ (°C)	$\Delta T_3$ (°C)
5,0	3,5	21	26	27
5,6	3,9	25	28	26

Tab. 4.5.1.2 Teplotní rozdíly jednotlivých článků a celé kaskády při daném proudu

---

kde:

$I_3$  Proud Peltierova článku TEC4

$I_{12}$  Společný proud Peltierových článků TEC1 a TEC2

V tomto měření byly nalezeny optimální hodnoty proudů  $I_3 = 5,6$  A a  $I_{12} = 3,9$  A , při kterých byla nejnižší teplota chladné strany sestavy  $-33$  °C. Při tomto nastavení fungoval nejefektivněji i chladič k odvodu tepla z konce sestavy, jehož tepelný odpor klesl na zatím nejnižší hodnotu  $0,3$  °C·W<sup>-1</sup>. Rozdíly teplot chladných a teplých stran jednotlivých článků se v tomto případě pohybovaly v rozmezí  $25$  °C -  $28$  °C.

#### 4.6 Zapojení s tepelnou zátěží

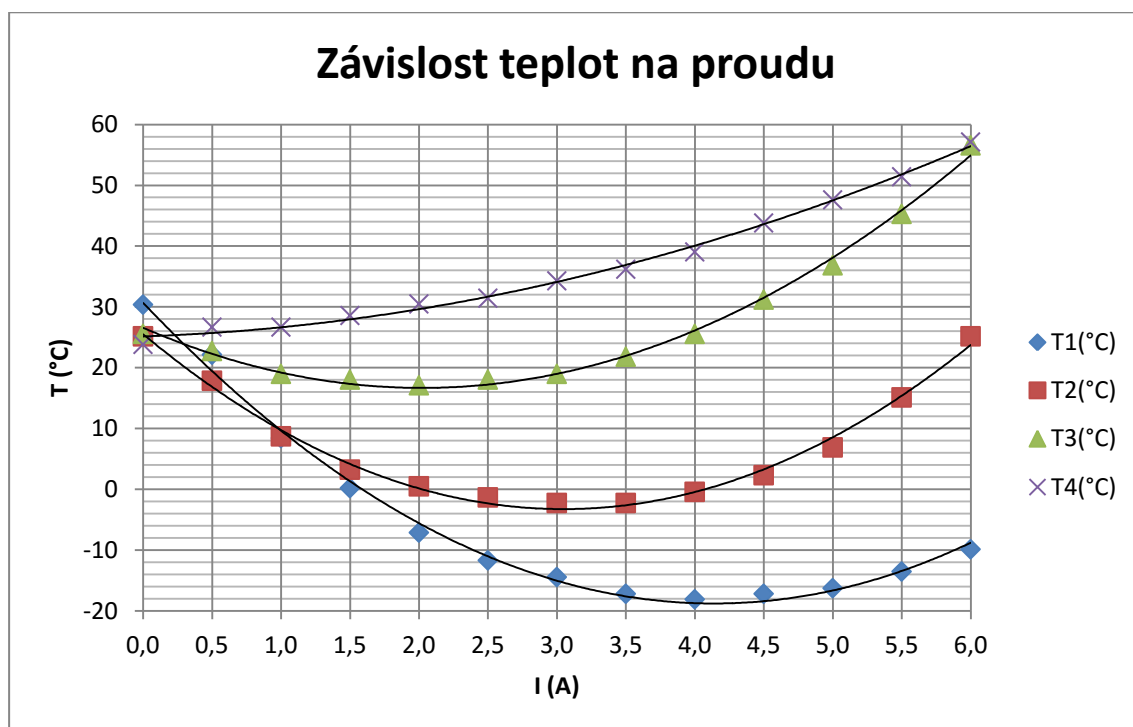
Na chladnou stranu kaskády jsme přidali NPN výkonový tranzistor BD711 jako tepelnou zátěž. Tranzistor byl v průběhu měření regulován tak, aby po celou dobu měření dodával do sestavy tepelný výkon přibližně 1 W.

I(A)	U1(V)	U2(V)	U3(V)	U(V)	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	R <sub>θ</sub> (°C·W <sup>-1</sup> )
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	30	25	26	24	-
0,5	0,09	0,57	0,66	1,31	22	18	23	27	1,67
1,0	0,22	1,17	1,30	2,68	8	9	19	27	0,74
1,5	0,33	1,72	1,89	3,94	0	3	18	29	0,67
2,0	0,44	2,23	2,30	4,97	-7	0	17	30	0,59
2,5	0,54	2,70	2,90	6,13	-12	-1	18	31	0,46
3,0	0,64	3,20	3,46	7,29	-14	-2	19	34	0,45
3,5	0,74	3,71	4,04	8,49	-17	-2	22	36	0,40
4,0	0,86	4,29	4,64	9,79	-18	0	26	39	0,38
4,5	0,99	4,90	5,23	11,12	-17	2	31	44	0,39
5,0	1,12	5,54	5,99	12,65	-16	7	37	48	0,37
5,5	1,13	6,41	6,65	14,19	-14	15	45	51	0,35
6,0	1,48	7,28	7,37	16,13	-10	25	57	57	0,34

Tab. 4.6.1 Výsledky měření sestavy Peltierových článků s přidanou tepelnou zátěží

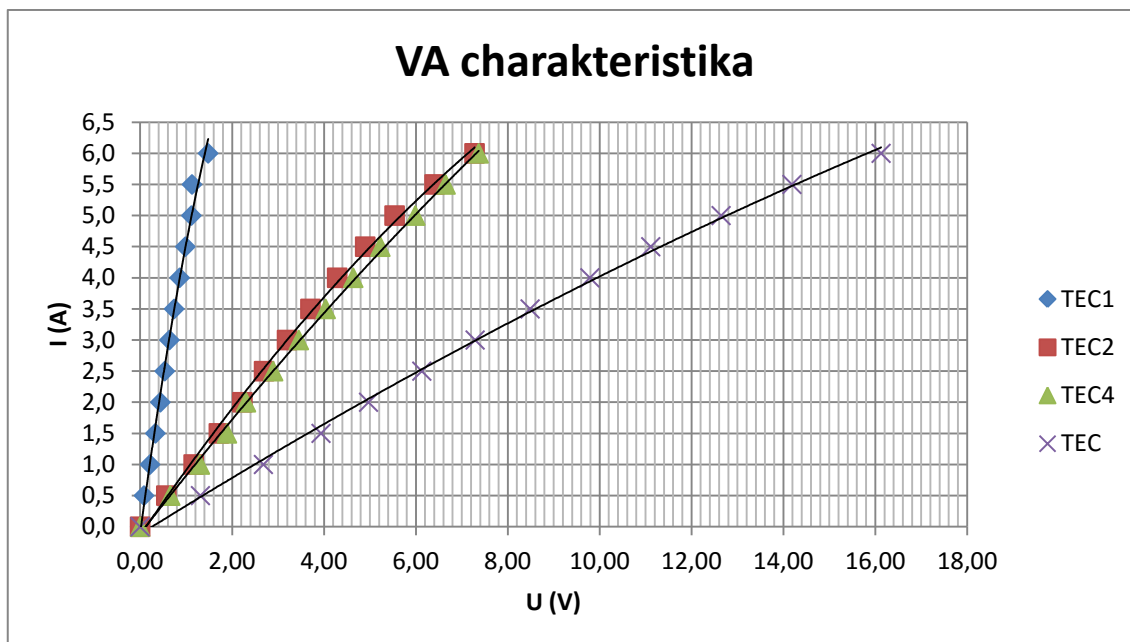
I(A)	$\Delta T_1(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_2(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_3(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
0,0	-	-	-	-
0,5	-4	5	4	5
1,0	0	10	8	18
1,5	3	15	11	28
2,0	8	17	13	38
2,5	10	19	13	43
3,0	12	21	15	49
3,5	15	24	14	53
4,0	18	26	13	57
4,5	20	29	13	61
5,0	23	30	11	64
5,5	29	30	6	65
6,0	35	31	1	67

Tab 4.6.2 Teplotní rozdíly jednotlivých článků a celé kaskády při daném proudu



Graf 4.6.1 Závislost teplot jednotlivých článků na jimi odebíraném proudu

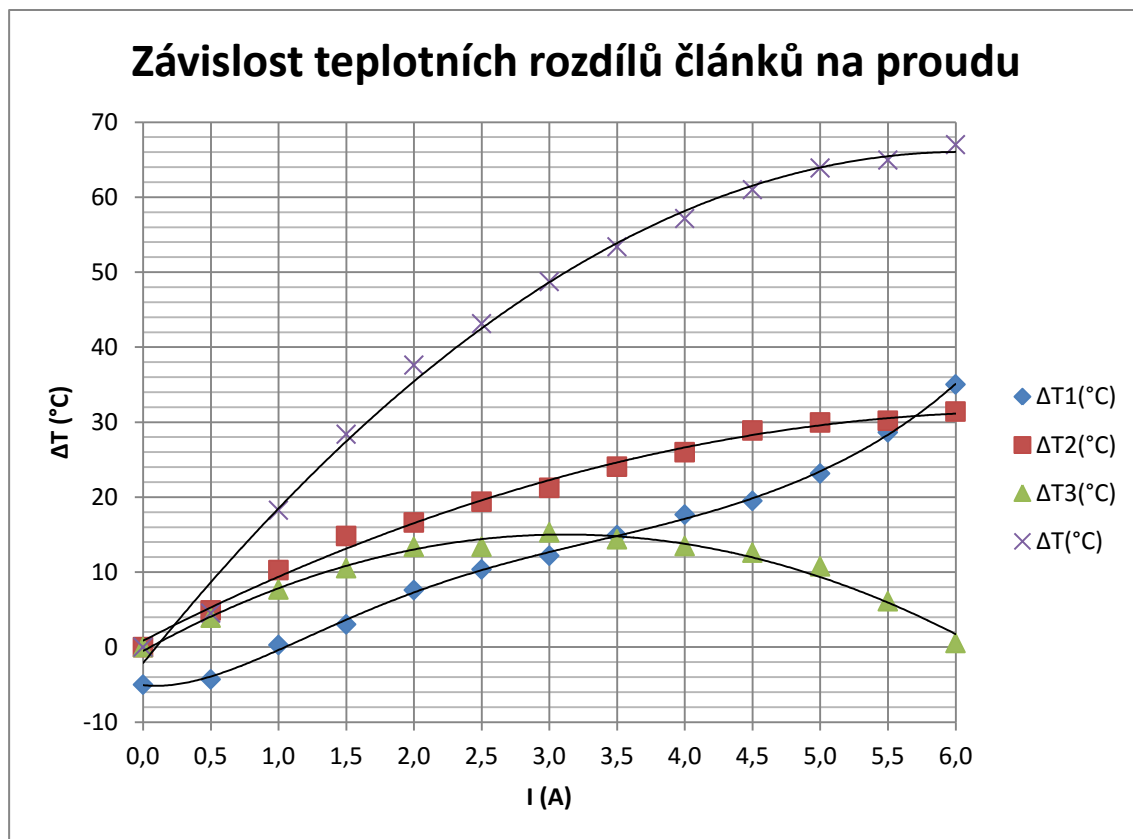
V tomto případě bylo dosaženo nejnižší teploty na chladné straně kaskády při proudovém odběru 3,5 A - 5 A, kde se tato teplota pohybovala v rozmezí -18 °C až -16 °C. Při odebíraném proudu 6A poslední článek opět přestal efektivně odvádět tepelný výkon a teplotní rozdíl mezi jeho teplou a studenou stranou činil pouze 1 °C a to při odváděném tepelném výkonu 54 W, přestože výrobce uvádí teplotní rozdíl při těchto podmínkách přibližně 20 °C. Viz. příloha graf 7.5.



Graf 4.6.2 Voltampérové charakteristiky článků TEC1, TEC2, TEC4 a celé kaskády TEC

$I$ (A)	$\Delta T_1$ (°C)	$\Delta T_2$ (°C)	$\Delta T_3$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
0,0	-	-	-	-
0,5	-4	5	4	5
1,0	0	10	8	18
1,5	3	15	11	28
2,0	8	17	13	38
2,5	10	19	13	43
3,0	12	21	15	49
3,5	15	24	14	53
4,0	18	26	13	57
4,5	20	29	13	61
5,0	23	30	11	64
5,5	29	30	6	65
6,0	35	31	1	67

Tab. 4.6.2 Teplotní rozdíly jednotlivých článků a celé kaskády při daném proudu



Graf 4.6.3 Závislost teplotních rozdílů jednotlivých článků a celé kaskády v závislosti na jimi odebraném proudu

#### 4.6.1 Řízení kaskády článků dvěma zdroji s použitím tepelné zátěže

Stejně jako v kapitole 4.5.1 byl článek TEC4 řízen samostatně. Výchozí stav byl zvolen z předchozího měření, konkrétně  $I_3 = I_{1,2} = 4 \text{ A}$  a opět se hledala nižší teplota chladné strany kaskády.

$I_3$ (A)	$I_{1,2}$ (A)	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	$U$ (V)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$R_{\theta}$ (°C/W)	$P$ (W)
4,5	4,1	0,87	4,3	5,3	10,5	-18	0	25	42	0,39	45
4,5	4,1	0,87	4,3	5,4	10,5	-19	-1	24	41	0,37	45
5,0	4,5	0,97	4,8	5,9	11,7	-20	0	28	45	0,37	55
6,3	4,9	1,07	5,2	7,9	14,2	-20	2	32	52	0,35	81

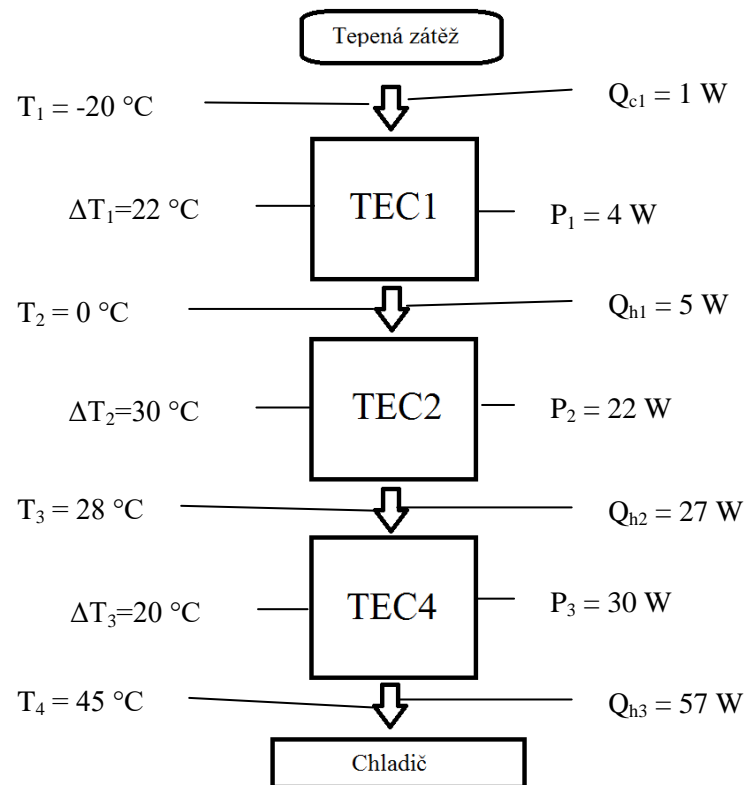
Tab. 4.6.1.1 Výsledky měření sestavy Peltierových článků s přidanou tepelnou zátěží

$I_3$ (A)	$I_{1,2}$ (A)	$\Delta T_1$ (°C)	$\Delta T_2$ (°C)	$\Delta T_3$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
4,5	4,1	18	25	17	60
4,5	4,1	18	25	17	60
5,0	4,5	20	28	16	65
6,3	4,9	22	30	20	72

Tab. 4.6.1.2 Teplotní rozdíly jednotlivých článků a celé kaskády při daném proudu



Nejnižší teploty  $-20\text{ °C}$  bylo dosaženo ve dvou případech, viz tab. 4.6.1.1, přičemž při proudech  $I_3 = 5\text{ A}$  a  $I_{1,2} = 4,5\text{ A}$ , byla nižší teplota i na teplém konci kaskády a přibližně o třetinu nižší ztrátový výkon celé sestavy proti kombinaci proudů  $I_3 = 6,3\text{ A}$  a  $I_{1,2} = 4,9\text{ A}$ .



Obr. 4.6.1.1 Ilustrační schéma teplot jednotlivých článků a tepelného toku v kaskádě při tepelné zátěži  $1\text{ W}$  a proudech  $I_3 = 5\text{ A}$  a  $I_{1,2} = 4,5\text{ A}$

---

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo změřit a vyhodnotit vlastnosti kaskády tří Peltierových článků a optimalizovat jí tak aby byla schopna co nejefektivněji odvádět tepelný tok ze zdroje tepelného výkonu.

Zdroj tepelného výkonu 1 W se podařilo uchládit v nejlepším případě o 72 °C, tedy při pokojové teplotě na -20 °C. Dosáhnout poklesu teploty o přibližně 30 °C na každý článek kaskády se v tomto případě podařilo jen částečně a to v rozmezí 20 °C až 30 °C.

Přestože měď má poměrně vysokou tepelnou vodivost, odstraněním použitých měděných destiček, které byly použity z důvodu měření jednotlivých teplot, by se mohly vlastnosti chladicí sestavy zlepšit.

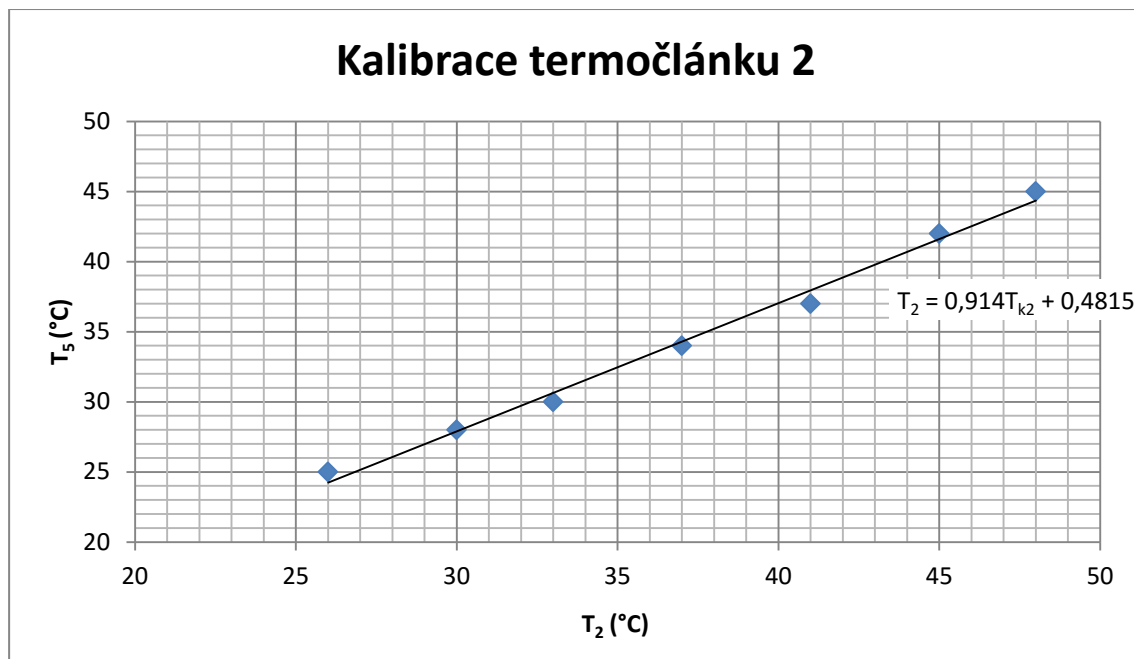
Další možností zvýšení účinnosti sestavy by bylo snížit propustnost izolace kaskády proti okolnímu teplu a vlhkosti. Výměna posledního Peltierova článku v sestavě za větší, by mohla zvýšit efektivitu odvodu tepla, případně i celkový pokles teploty mezi teplou a studenou stranou sestavy článků. S větším článkem by bylo potřeba také použít jiný chladič s odpovídající schopností odvádět ztrátový výkon z kaskády a dostatečně velkou styčnou plochou odpovídající velikosti posledního článku.

---

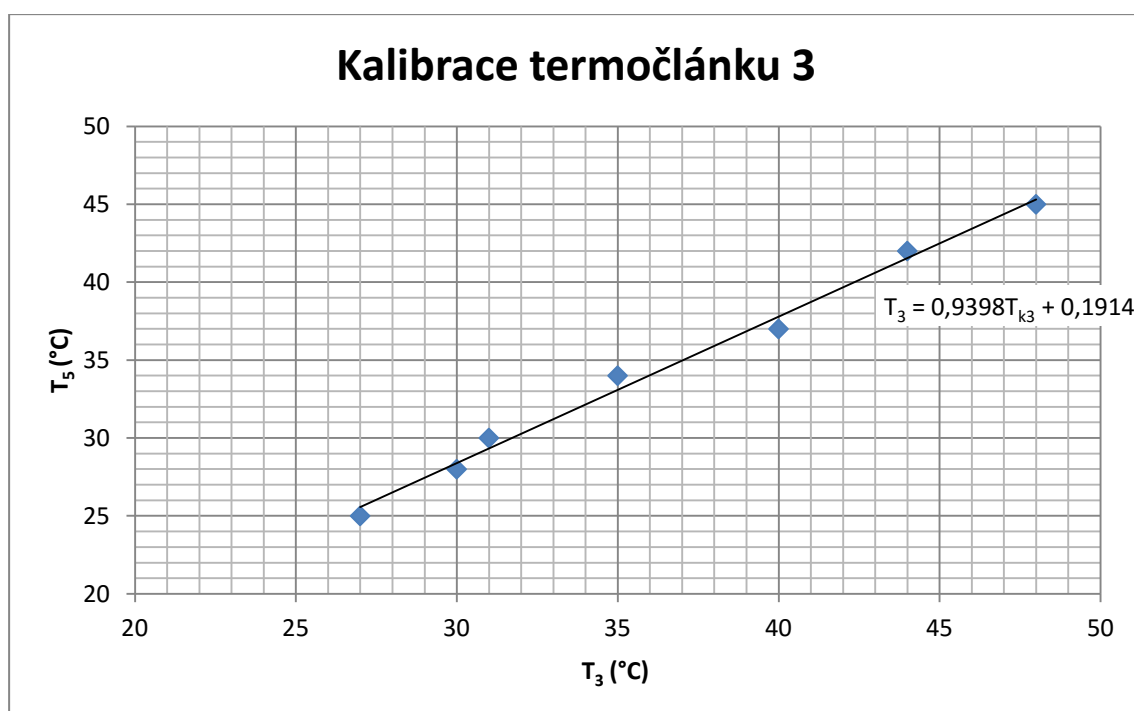
## 6 Použitá literatura

- [1] ANATYCHUK, L. I. Current status and some prospects of thermoelectricity. *Journal of Thermoelectricity*. 2007, part 1, s. 7-20. ISSN 1607-8829.  
Dostupný z WWW: <[ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/04.pdf](http://ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/04.pdf)>.
- [2] GROMOV, G.: Thermoelectric cooling modules. RMT, [cit. 2016-02-15].  
Dostupný z WWW:  
<[http://rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric\\_Cooling\\_Modules.pdf](http://rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf)>
- [3] POLLOCK, Daniel D. *Thermoelectricity: theory, thermometry, tool*. Philadelphia, PA: ASTM, c1985. ISBN 080310409X.
- [4] MEJZLÍK, Michal. Návrh a tvorba laboratorní úlohy s Peltierovým článkem [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-05-21]. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Macháček. Dostupný z WWW:  
<[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15693](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15693)>.
- [5] BUREŠ, Jiří. *Seebeckův jev* [online]. 2002 [cit. 2016-04-29]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.converter.cz/tabulky/seebeck.htm>>.
- [6] VORÁLEK, Jan. *Kontrolér termoelektrického chladiče infračerveného fotodetektoru* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-05-21]. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D. Dostupné z WWW:  
<[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=103333](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103333)>.

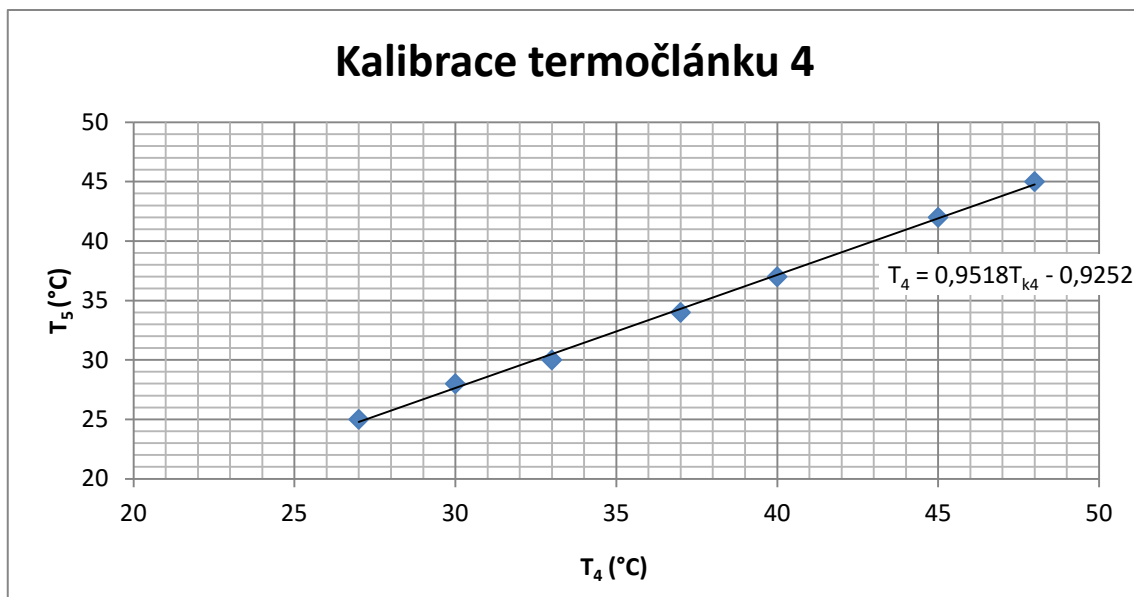
## Přílohy



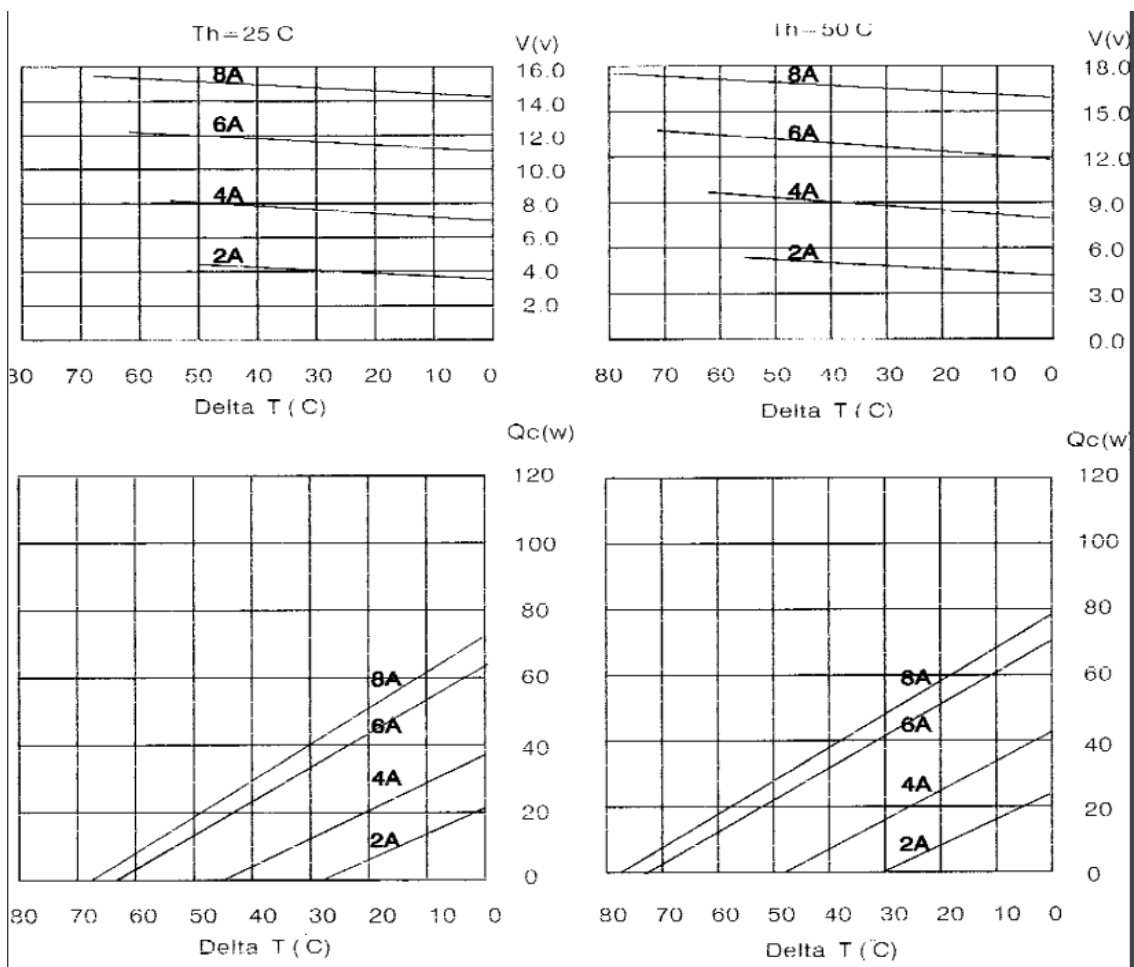
Graf 7.1 Kalibrace termočlánku 2



Graf 7.2 Kalibrace termočlánku 3

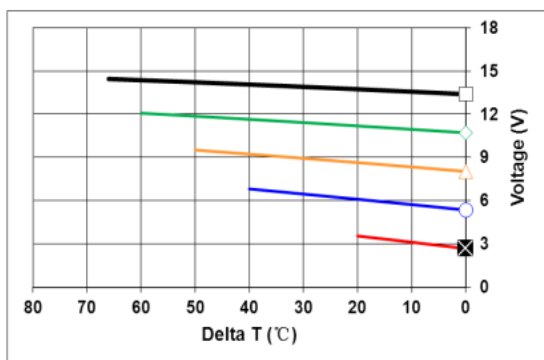


Graf 7.3 Kalibrace termočlánku 4

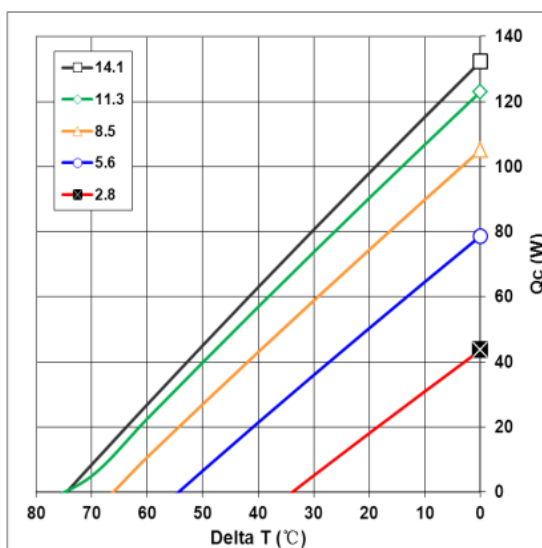
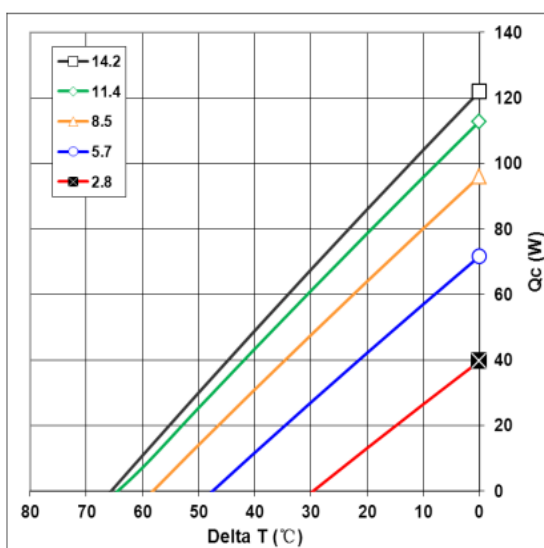
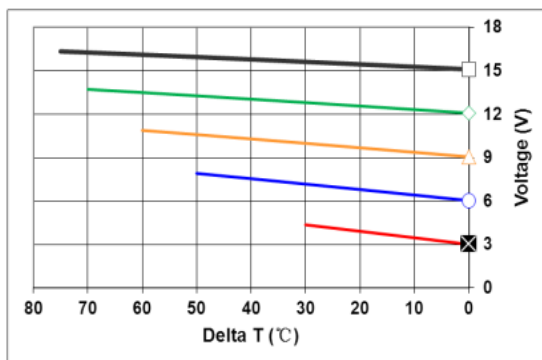


Graf 7.4 Specifikace Peltierova článku TEC3 pro  $T_h = 25$  °C a  $50$  °C dodávané výrobcem

Performance Curves Th=25 °C



Performance Curves Th=50 °C



Graf 7.5 Specifikace Peltierova článku TEC4 pro Th = 25 °C a 50 °C dodávané výrobcem