

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ**



**ANALÝZA VLASTNOSTÍ  
KASKÁDY PELTIEROVÝCH  
ČLÁNKŮ**

**2017**

**MAREK  
HENDRYCH**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**Student:** Marek Hendrych  
**Studijní program:** Komunikace, multimédia a elektronika  
**Obor:** Aplikovaná elektronika  
**Název tématu:** Analýza vlastností kaskády Peltierových článků

### **Pokyny pro vypracování:**

1. Prostudujte literaturu týkající se vlastností termoelektrických chladicích článků a možností jejich tepelného sériového řazení.
2. Na základu dle 1) navrhnete kaskádu tří stejných Peltierových článků tak, aby vytvořená kaskáda byla schopna odvádět tepelný tok ze zdroje (integrovaného obvodu). Optimalizujte jednotlivé stupně kaskády tak, aby pokles teploty na každý stupeň proti předchozímu byl přibližně 30 °C. Navrhnete způsob řízení jednotlivých stupňů soustavy. Využijte modelu Peltierova článku, který jste odvodil v průběhu přípravných projektů IN1 a IN2.
3. Proveďte podrobné ověřovací měření navržené soustavy s ohledem na měnící se výkon tepelného zdroje, z něhož je tepelná energie odváděna.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky. Porovnejte s dostupnými výsledky dosaženými v práci p. Zdeňka Bednáře. Pokuste se vysvětlit případné nerovnoměrné rozložení teploty na jednotlivé stupně.
5. Navrhnete možná další 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)
- [3] Dřínek, M.: Peltierovy termobaterie, (2017-02-07), Dostupný z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>

**Vedoucí:** Ing. Lubor Jirásek, CSc.

**Platnost zadání:** 10.9.2018

L.S.

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 14.2.2017

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci na téma: „Analýza kaskády Peltierových článků“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou v závěru práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 26.5.2017.

Marek Hendrych

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za vedení mé bakalářské práce, konzultace, jeho vstřícnost a cenné rady.

## **Anotace**

V předložené práci je popsán princip a návrh chlazení termoelektrickými články na základě Peltierova jevu, včetně teoretických podkladů, výpočtů i reálně naměřených hodnot. Důraz byl kladen na dosažení co nejnižších teplot chlazené součástky, byť při malém odváděném výkonu. K těmto účelům bylo v práci použito tří stejných Peltierových článků v kaskádním uspořádání. Zjištěné vlastnosti a naměřené hodnoty byly následně porovnány s výsledky kaskády tří odlišně výkonných Peltierových článků.

## **Abstract**

This bachelor project describes the principle and proposal of cooling with thermoelectric cells, which is based on the Peltier's effect. It includes theoretical materials with calculations and real measured data. An emphasis was put on reaching a temperature of the component being cooled regardless of the performance loss which is produced. Three same Peltier's cells in a cascade arrangement were used for this purpose. The identified properties and measured values were the compared with the results from a cascade built of three different Peltier's cells.

---

## Obsah

Zadání bakalářské práce .....	2
Seznam použitých symbolů a zkratek .....	7
1 Úvod .....	8
2 Peltier-Seebeckův neboli termoelektrický jev .....	8
2.1 Seebeckův jev .....	9
2.2 Peltierův jev .....	9
3 Peltierovy články .....	10
3.1 Konstrukce .....	10
3.1.1 Jednostupňová .....	10
3.1.2 Vícetupňová .....	11
3.2 Výhody: .....	12
3.3 Nevýhody: .....	12
4 Realizace .....	12
4.1 Výběr Peltierova článku .....	12
4.2 Konstrukce měřicího přípravku .....	12
4.3 Ověření totožnosti jednotlivých článků TEC1-01708 .....	14
4.4 Návrh .....	15
4.5 Výpočty .....	15
5 Měření sériově řazených Peltierových článků .....	27
5.1 Kaskáda dvou totožných Peltierových článků TEC1-01708 .....	27
5.2 Kaskáda tří totožných Peltierových článků TEC1-01708 .....	29
5.3 Kaskáda Peltierových článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140 .....	32
6 Závěr .....	36
7 Použitá literatura .....	37
8 Přílohy .....	38
8.1 Teplotní průběhy na kaskádě dvou Peltierových článků TEC1-01708 .....	38
8.1.1 Napájecí proudy: 8,5 A a 3A .....	38

---

8.1.2	Napájecí proudy: 8,5 A a 4 A.....	39
8.1.3	Napájecí proudy: 8,5 A a 5 A.....	40
8.2	Teplotní průběhy na kaskádě tří Peltierových článků TEC1-01708.....	41
8.2.1	Napájecí proudy: 8,5 A, 3 A a 1,5 A.....	41
8.2.2	Napájecí proudy: 8,5 A, 3,5 A a 2 A.....	42
8.2.3	Napájecí proudy: 8,5 A, 4 A a 2,5 A.....	43
8.3	Teplotní průběhy na kaskádě Peltierových článků TEC1-01708, TEC1-7108 a TEC1-127140.....	44
8.3.1	Napájecí proud: 2 A.....	44
8.3.2	Napájecí proud: 4 A.....	45
8.3.3	Napájecí proud: 6 A.....	46
9	Seznam obrázků .....	47
10	Seznam grafů.....	47
11	Seznam tabulek.....	48
12	Seznam rovnic .....	48

## Seznam použitých symbolů a zkratk

$I$	A	Proud protékající Peltierovým článkem
$I_{\max}$		Maximální proud protékající Peltierovým článkem
$n$	-	Počet chladicích elementů Peltierova článku
$P_{ztr}$	W	Celkový ztrátový výkon soustavy
$Q_j$		Ztrátový tepelný výkon Peltierova článku
$Q_h$		Výstupní tepelný výkon z Peltierova článku
$Q_{h1}$		Výstupní tepelný výkon z prvního Peltierova článku
$Q_{h2}$		Výstupní tepelný výkon z druhého Peltierova článku
$Q_{h3}$		Výstupní tepelný výkon z třetího Peltierova článku
$Q_{\max}$		Maximální chladicí výkon Peltierova článku
$Q_s$		Chladicí tepelný výkon Peltierova článku
$Q_{s1}$		Chladicí tepelný výkon prvního Peltierova článku
$Q_{s2}$		Chladicí tepelný výkon druhého Peltierova článku
$Q_{s3}$		Chladicí tepelný výkon třetího Peltierova článku
$Q_{s \text{ vyp}}$		Vypočtený chladicí tepelný výkon Peltierova článku
$R$	$\Omega$	Elektrický odpor Peltierova článku
$R_{th}$	$KW^{-1}$	Tepelný odpor chladiče
$T_1$	$^{\circ}C$	Teplota na první sondě
$T_2$		Teplota na druhé sondě
$T_3$		Teplota na třetí sondě
$T_4$		Teplota na čtvrté sondě
$T_h$		Teplota teplé strany Peltierova článku
$T_s$		Teplota studené strany Peltierova článku
$\Delta T$		Teplotní rozdíl
$\Delta T_{\max}$		Maximální teplotní rozdíl na Peltierově článku
$\Delta T_{p1}$		Teplotní rozdíl na prvním Peltierově článku
$\Delta T_{p2}$		Teplotní rozdíl na druhém Peltierově článku
$\Delta T_{p3}$		Teplotní rozdíl na třetím Peltierově článku
$\Delta T_{\text{vyp}}$		Vypočtený teplotní rozdíl Peltierova článku
$\alpha$	$VK^{-1}$	Termoelektrické napětí Peltierova článku
$\varepsilon$	%	Účinnost chlazení Peltierovým článkem
$\vartheta_a$	$^{\circ}C$	Teplota okolí chladiče
$\vartheta_r$		Maximální teplota chlazené součástky

---

# 1 Úvod

Tepelný šum roste v kvadrátu s rostoucí teplotou, a jelikož je tepelný šum v elektronice nežádoucí, zejména v obrazových snímačích, kde se projevuje v podobě rozmazání nebo sníženého rozlišení, je nutné jej co nejvíce eliminovat. Z již zmíněné úměry je zřetelné, že s nízkou teplotou obrazového snímače bude nižší teplotní šum, proto se snímač snažíme chladit na co možná nejnižší přípustnou teplotu, zejména pokud se jedná o snímače specifické jako například pro astronomické účely, kde je na kvalitu obrazu kladen velký důraz.

## Možností chlazení je několik:

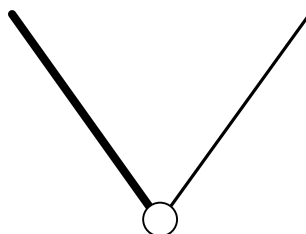
**1. Pasivní:** Jedná se o odvádění tepelného výkonu ze součástky pomocí pasivního chladiče do okolí, a tím i snížení teploty čipu. Avšak pasivní chladiče dokáží snížit teplotu součástky v ideálním případě na teplotu okolí.

**2. Aktivní:** U chlazení aktivního je pasivní chladič doplněn o ventilátor, který vytváří proudění vzduchu mezi žebry chladiče, tím se snižuje jeho tepelný odpor, a dochází tedy ke snazšímu přechodu tepla ze součástky do okolí. Ovšem stejně jako u chlazení pasivního zde nedochází k poklesu teploty chlazené součástky pod teplotu okolí.

**3. Speciální:** V realizacích, kde předchozí typy chlazení nedostačují, je možné použít metody speciální, při kterých dojde k poklesu teploty součástky pod teplotu okolí, a to i velice razantně. V takovýchto případech můžeme použít například chlazení vodní, tekutým dusíkem, kompresorové nebo právě Peltierovy články, tedy využít termoelektrického jevu.

## 2 Peltier-Seebeckův neboli termoelektrický jev

Termoelektrický jev vzniká na termočláncu, což jsou v sérii svařené dva různé kovové vodiče (různé materiály), na nichž vzniká rozdíl napětí při rozdílu teplot a naopak. Tedy na termočláncu dochází k Peltierovu, případně Seebeckovu jevu. Termočlánek je v elektronice známý především, jako součástka pro měření teploty.[1][2]

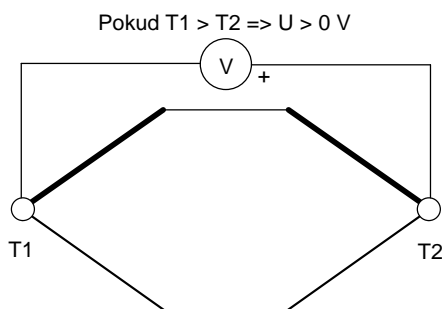


Obrázek 1 - Schematická značka termočláncu



## 2.1 Seebeckův jev

Seebeckův jev vznikne na termočláncu, pokud na jednotlivé kovy tvořící termočlánc působí různá teplota. Jelikož se nejedná o stejné kovy, vzniká na každém jiný potenciál, v jehož důsledku protéká obvodem proud a mezi konci vodičů se objeví napětí, které je přímo úměrné působícímu rozdílu teplot. Výsledné napětí nazýváme termoelektrické a jeho velikost je řádově  $10^{-6}$  až  $10^{-5}$   $VK^{-1}$ , proto je při jeho měření důležité používat měřicí přístroj s velkým vstupním odporem, aby nedocházelo k “zatěžování” termočláncu a ovlivňování měřené hodnoty. [3]



Obrázek 2 - Seebeckův jev na termočláncu

Použitím termočlánců složených z různých kovů dosahujeme různého termoelektrického napětí při jednotné teplotě (při shodném rozdílu teplot), a tím rozlišujeme termočlánc pro různé rozsahy teplot a také pro různá použití.

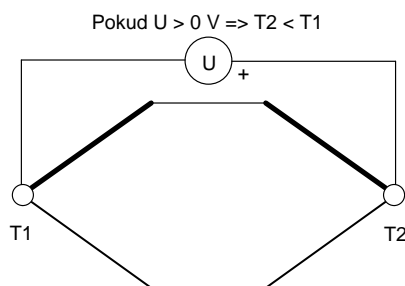
### Rozsah měřených teplot různými termočlánci:

Tabulka 1 - Teplotní rozsahy termočlánců [4]

kovy tvořící termočlánc	rozsah teplot ( $^{\circ}C$ )
konstantan – měď	-200 až 400
konstantan – železo	-200 až 950
platina – platina + 6 až 10% Rhodium	-200 až 1300

## 2.2 Peltierův jev

Peltierův jev je inverzní k jevu Seebeckovu, tedy připojíme-li mezi konce jednotlivých kovů termočláncu stejnosměrné napětí, začne termočláncem protékat proud a vznikne teplotní rozdíl mezi kovy. K této teplotní diferenci dochází kvůli přímé úměře mezi termoelektrickým napětím a teplotním rozdílem na termočláncu. Jeden z kovů se bude ochlazovat a druhý zahřívat, v závislosti na polaritě přiloženého napětí. V případě opačné polaritě přiloženého napětí se změní směr toku proudu, a tím i ochlazovaná a ohřívající část termočláncu, nikoli však dosahované parametry.



Obrázek 3 - Peltierův jev na termočláncu

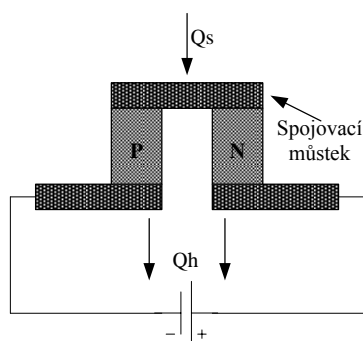
Peltierova jevu se využívá ke konstrukci Peltierových článků, které se používají právě k vytváření teplotních diferencí, ať už k chlazení či ohřevu. [5]

### 3 Peltierovy články

#### 3.1 Konstrukce

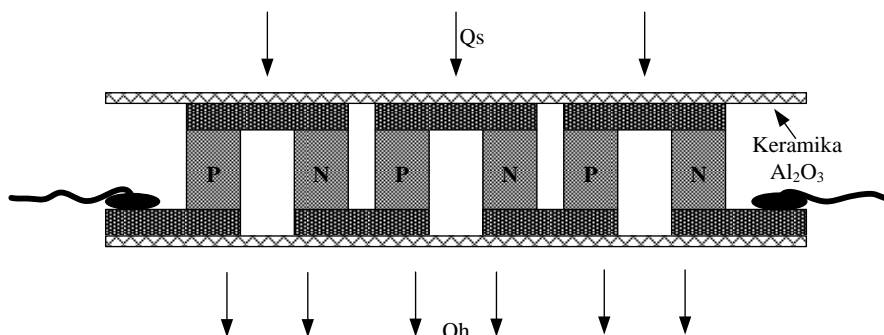
##### 3.1.1 Jednostupňová

Peltierův článek je termočlánek tvořený dvěma polovodiči (P a N) spojenými v sérii. Spojení se realizuje tzv. propojovacími můstky, které slouží jako elektrické vodiče, ale zároveň jako vodiče tepelné. Nejvíce používanými kovy pro tyto přechody jsou bismut a tellur. Vytvořený článek je zobrazen na obrázku 4. Po připojení článku ke zdroji napětí se začnou v polovodiči typu N pohybovat elektrony směrem ke kladnému pólu zdroje napětí, a naopak v polovodiči typu P se budou přesunovat volné díry směrem k zápornému pólu zdroje napětí. Ve spojovacím můstku tedy dochází k poklesu koncentrace volných nosičů náboje a klesá zde kontaktní napětí mezi můstkem a polovodiči. Na opačné straně článku roste koncentrace volných nosičů náboje a zvětšuje se tak kontaktní napětí mezi polovodiči a můstkem. Na straně s menším kontaktním napětím se můstek ochlazuje (absorpce tepla  $Q_s$  ze součástky), a v místech s vyšším kontaktním napětím dochází ke tvorbě tepla  $Q_h$ , které je součtem odvedeného tepla ze součástky a Jouleova tepla, jež vzniká průchodem proudu přes článek. Důsledky těchto účinků jsou závislé na polaritě stejnosměrného napětí, přiloženého na polovodič. Při opačné polaritě budou účinky opačné proti výše popsaným. [5]



Obrázek 4 - Princip Peltierova článku

Tímto způsobem vytvořené články jsou spojovány do větších celků pro dosažení lepších parametrů. Plochy termočlánku určené pro tepelný kontakt se součástí, případně s chladičem, jsou opatřeny keramickými destičkami, které zajišťují kvalitní tepelný přenos a zároveň zajišťují elektrickou izolaci. K těmto účelům se využívá korundová keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). [6]

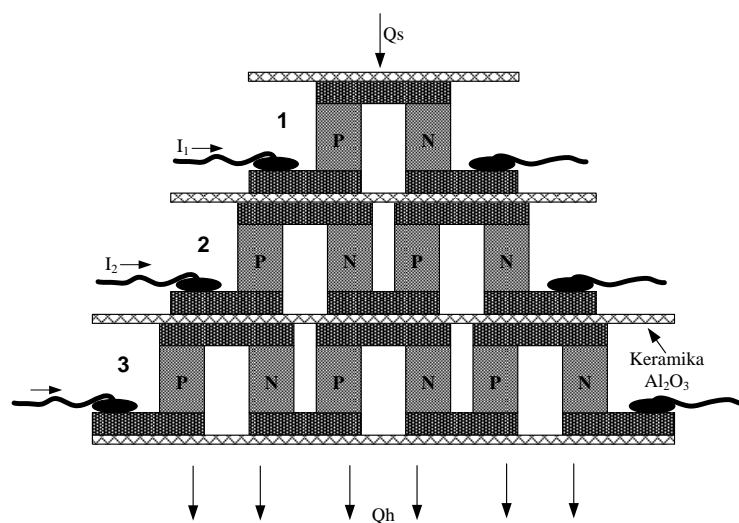


Obrázek 5 - Řez Peltierovým článkem

### 3.1.2 Vícetupňová

Zvýšení chladicí účinnosti a dosažení většího tepelného rozdílu mezi chlazenou součástí a okolím lze dosáhnout pomocí kaskádního řazení výše popsaných článků. Princip je založen na přechodu tepla z jednoho článku na druhý atd. Kaskáda tvořena několika Peltierovými články, kde teplá strana prvního článku je přiložena na chladicí stranu článku druhého atd. tak, aby odebírané teplo proudilo jedním směrem a na konci kaskády bylo chladičem vyzářeno do okolí. Jednotlivé teplotní difference se tedy sčítají a výsledkem je mnohem větší teplotní rozdíl mezi konci kaskády než u jednoho článku. Je však nutné brát ohled na ztrátový výkon jednotlivých článků  $Q_j$  a následující stupeň vždy navrhnout tak, aby byl schopen celkový ztrátový výkon  $Q_h$  odvést. [7]

$$\text{Musí být dodržena rovnost: } Q_h = Q_s + Q_j \quad [7] \quad (3.1.2.1)$$



Obrázek 6 – Kaskáda tří odlišných článků

---

## 3.2 Výhody:

Hlavní výhodou, kvůli které Peltierův článek používáme, je dosažení nízkých teplot na jeho chladnější straně, a to při malých rozměrech. Nástup chladicího výkonu je okamžitý, lze ho snadno regulovat a měnit tepelný tok. Peltierův článek negeneruje žádný zvuk jako například ventilátor, má dlouhou životnost a více využití, nejen že dokáže chladit, hřát, ale také může sloužit jako termoelektrický generátor napětí. [7]

## 3.3 Nevýhody:

I přes značné množství výhod je jeho použití při chlazení složitější než u pasivního, potažmo aktivního chlazení. Jednak je nutné dodávat Peltierovu člátku elektrickou energii, ale složitější je též konstrukční řešení. V souvislosti s napájením je nutné kontrolovat mezní parametry. U Peltierova článku totiž může dojít k přehřátí, a následné překročení maximální pracovní teploty může způsobit nenávratné poškození. Nevýhodou také zůstává nižší účinnost, která je však vykoupena velmi malými rozměry proti jiným metodám. [7]

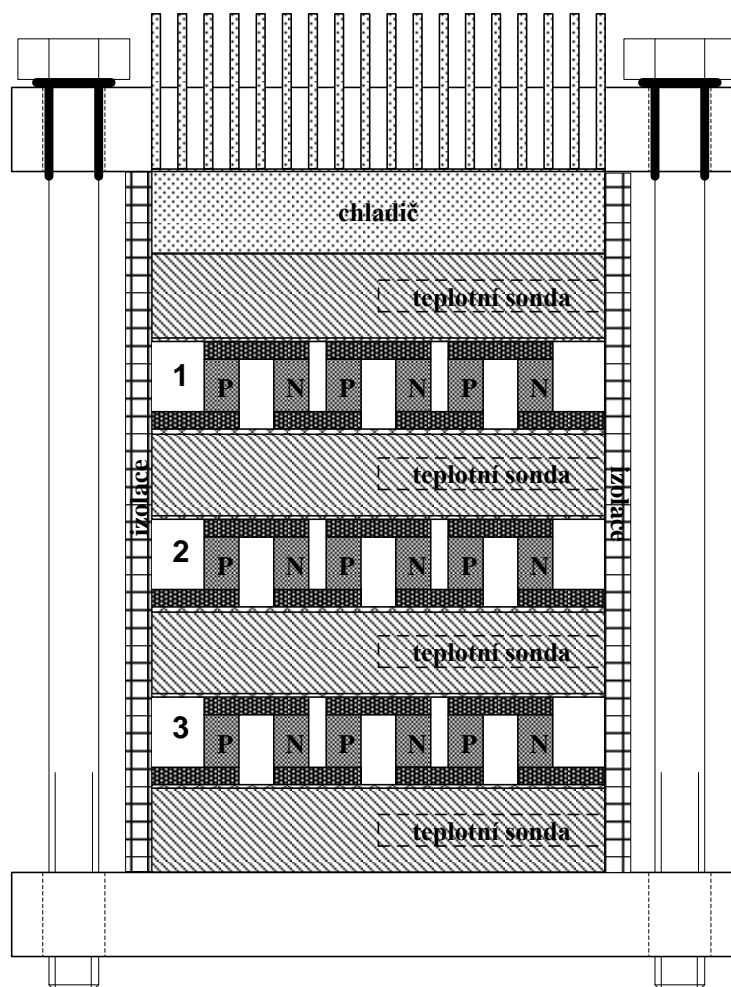
# 4 Realizace

## 4.1 Výběr Peltierova článku

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou vlastností kaskády tří totožných Peltierových článků. V první řadě bylo zapotřebí vybrat typ Peltierova článku. Jelikož není podstatné odvádět velké ztrátové výkony, nýbrž dosáhnout co nejnižších teplot na chlazené součástce, byl zvolen článek TEC1-01708 s rozměry 15 mm x 15 mm a maximálním rozdílem teplot 68 °C. Chladicí výkon udává výrobce cca 9,2 W, a ačkoli se tato hodnota zdá pro výše popsané účely nepodstatná, při návrhu kaskády, zejména pro zvolení pracovních bodů, bude důležitá. [8]

## 4.2 Konstrukce měřicího přípravku

Kaskáda tvořená těmito články musí být pevně fixována, aby nedocházelo k posunu jednotlivých článků, či k jejímu úplnému rozpadu. Každé vychýlení libovolného článku může mít vliv na dosažitelné parametry. Mezi jednotlivými články je nutné měřit aktuální teplotu. Z toho důvodu jsou mezi články vloženy měděné destičky o výšce 3 mm a v každé z nich je otvor o šířce 3 mm pro teplotní sondu. Celá kaskáda článků s měřicími ploškami je přišroubována k chladiči. Přípravek je zobrazen na obrázku 7.



Obrázek 7 - Měřicí přípravek

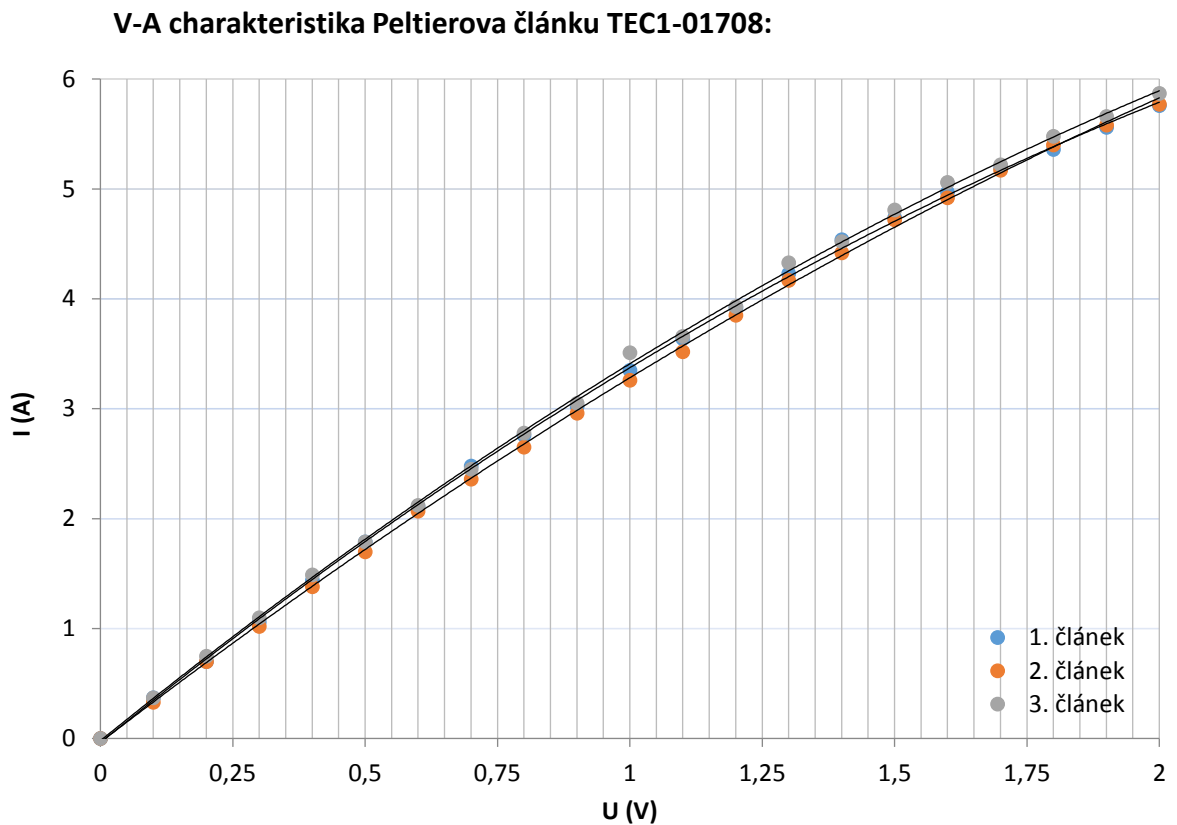
Před mechanickým složením bylo nutné zajistit co nejlepší tepelné parametry. Na každý tepelný přechod mezi součástkami byla nanесena tepelně vodivá pasta Extrém od výrobce Elchemco, pro zajištění maximálního tepelného přenosu. Ačkoli pasta vnáší do spoje malý tepelný odpor, konkrétně  $0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , dokáže vyplnit nepatrné nerovnosti na styčných plochách, a tím dochází k lepšímu tepelnému přechodu.

Přítlačná konstrukce tepelně spojuje teplou a studenou stranu kaskády a přes šrouby by tedy mohlo docházet k přechodu tepla ze strany studené na teplou a naopak. Z tohoto důvodu jsou pod šrouby vloženy nylonové průchodky, které od sebe izolují teplou a studenou stranu tepelně i elektricky.

Peltierův článek není nijak tepelně izolován a skrz jeho chladičí elementy tak může proudit okolní vzduch. Při běžných podmínkách má tento jev marginální vliv, ale v daném případě, kdy teploty na studené straně kaskády budou dosahovat záporných hodnot, by i proudění vzduchu o pokojové teplotě mohlo zásadně ovlivnit dosažitelné výsledky. Proto jsou články ze všech stran izolovány polystyrenem a riziko vnějšího ovlivňování nebo ztráty tepla ze stran kaskády je tedy minimalizováno.

### 4.3 Ověření totožnosti jednotlivých článků TEC1-01708

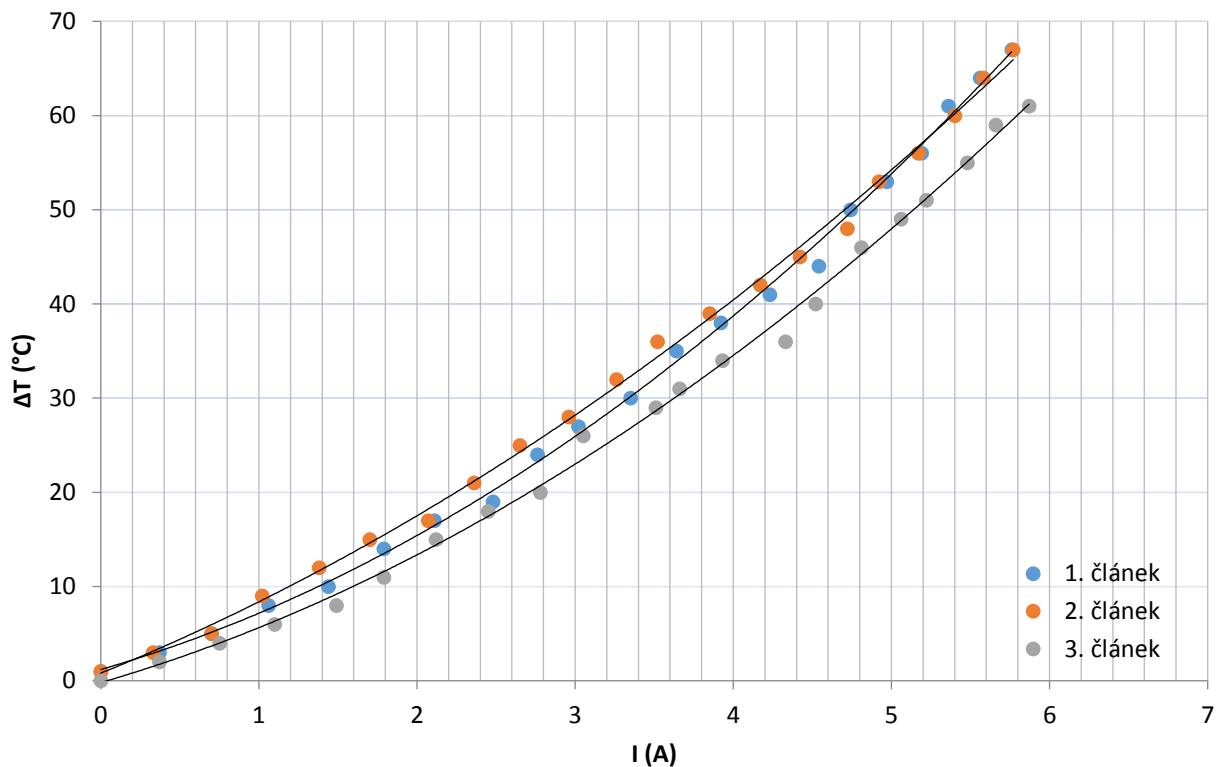
Základní požadavek při konstrukci kaskády stejných Peltierových článků je jejich totožnost. Zakoupené články je nutné porovnat. Pro toto základní porovnání byla zvolena V-A charakteristika jednotlivých článků, která potvrdí, případně vyvrátí, zásadní rozdíly mezi jednotlivými články.



Graf 1 - V-A charakteristika Peltierových článků TEC1-01708

Naměřené V-A charakteristiky vykazují pouze minimální rozdíly mezi jednotlivými články. Zásadní rozdíly byly vyloučeny, ovšem je nutno ověřit, zda i požadované tepelné parametry jednotlivých článků jsou identické. K tomuto účelu bylo zvoleno měření rozdílu teplot mezi teplou a chladnou stranu Peltierova článku při daném pracovním bodě (napájecím proudu), viz graf 2.

**Graf závislosti rozdílu teplot na proudu:**



*Graf 2 - Závislost rozdílu teplot na proudu Peltierových článků TEC1-01708*

Z grafu jsou patrné mírné rozdíly mezi pracovními body jednotlivých článků. Je však nutné podotknout, že v grafu je vyneseno rozdílu teplot jednotlivých článků, a tedy se zde projevuje fakt, že u každého měření měl chladič jinou počáteční teplotu, způsobenou předešlými měřeními či okolním prouděním vzduchu. Značná chyba byla do tohoto měření zanesena použitým měřicím teploměrem, jímž byl multimetr HC-81, který byl opatřen termočlánekem pro měření teploty. Přesnost této soustavy byla 1 °C, takže naměřená hodnota byla zaokrouhlována, ovšem není známo, na kterou stranu.

#### 4.4 Návrh

Po ověření totožnosti jednotlivých článků bylo možno začít s návrhem kaskádního uspořádání, respektive s návrhem pracovních bodů jednotlivých článků. Jak již bylo zmíněno výše, při návrhu kaskády je nutné brát v úvahu, že každý článek vnáší do kaskády svůj ztrátový výkon, a tudíž každý další stupeň kaskády musí být schopen tento výkon odvést. A to v takové míře, aby bylo zajištěno dostatečné chlazení každého stupně, včetně chlazené součástky. Z tohoto důvodu musí experimentálnímu uspořádání předcházet výpočty.

#### 4.5 Výpočty

Základ pro modelování průběhů a chování Peltierova článku je znalost jeho parametrů, případně jejich dopočítání. Výrobce uvádí pouze základní parametry, důležité konstanty je nutné dopočítat.

## Parametry Peltierova článku TEC1-01708 udávané výrobcem:

Tabulka 2 - Parametry Peltierova článku TEC1-01708 [8]

$U_{\max}$	V	2,06
$I_{\max}$	A	8,5
$Q_{\max}$	W	9,2
$\Delta T_{\max}$	°C	68
$n$	-	34

Se znalostí těchto parametrů je možné dopočítat elektrický odpor  $R$  Peltierova článku, a následně termoelektrické napětí  $\alpha$ . K elektrickému odporu se dostaneme přes výpočet pro maximální chladicí výkon  $Q_{\max}$ , pro něj platí:

$$Q_{\max} = n(\alpha \Delta T I_{\max} + \frac{1}{2} R I_{\max}^2) \quad (\text{W}) \quad (4.5.1)$$

pro  $\Delta T = 0$  platí:

$$Q_{\max} = n \frac{1}{2} R I_{\max}^2 \quad (\text{W}) \quad (4.5.2)$$

z čehož vyplývá:

$$R = \frac{2Q_{\max}}{n I_{\max}^2} \quad (\Omega) \quad (4.5.3)$$

Vypočtená hodnota  $R$  platí pro dva elementy, respektive jeden můstek Peltierova článku. Výsledný elektrický odpor pro celou Peltierovu termobaterii je:

$$R = \frac{Q_{\max}}{I^2} \quad (\Omega) \quad (4.5.4)$$

$$R = \frac{Q_{\max}}{I^2} = \frac{9,2}{8,5^2} = 0,127 \Omega$$

Získaná hodnota je založena pouze na datech udávaných výrobcem, ten však v datovém listu ke článku TEC1-01708 uvádí maximální chladicí výkon  $Q_{\max}$  jako minimální hodnotu, tedy hodnotu, které bude dosaženo vždy. Reálně může být tato hodnota větší. Avšak tuto hodnotu budeme nadále považovat za korektní elektrický odpor pro všechny použité články TEC1-01708.

Vzorec pro termoelektrické napětí vychází též ze vzorce 4.5.1 pro  $Q_{\max}$ . Po derivaci vzorce 4.5.1 podle  $I$  dostaneme:

$$\frac{dQ_{\max}}{dI} = n(\alpha \Delta T + \frac{1}{2} R I_{\max}) \Rightarrow \alpha = \frac{R I_{\max}}{T_s} \quad (\text{VK}^{-1}) \quad (4.5.5)$$

Termoelektrické napětí je určeno pro nulový rozdíl teplot, tedy  $T_s$  je rovno teplotě okolí, dle literatury, zvoleno  $T_s = 300,15 \text{ K}$ :

$$\alpha = \frac{R I_{\max}}{T_s} = \frac{0,152 \cdot 8,500}{300,150} = 4,305 \text{ mVK}^{-1}$$



---

Konstanty a parametry už známe, lze tedy začít s počítáním dosažitelných výsledků. Následující vzorce jsou základem výpočetního „modelu“.

Chladicí výkon  $Q_s$  je přímo závislý na termoelektrickém napětí, proudu a teplotě chlazené strany.

$$Q_s = \alpha IT_s \quad (\text{W}) \quad (4.5.6)$$

S odváděným výkonem se v každém článku spojuje Jouleovo teplo  $Q_j$ , vzniklé průchodem napájecího proudu článkem.

$$Q_j = RI^2 \quad (\text{W}) \quad (4.5.7)$$

Na teplé straně článku se potom uvolňuje tepelný výkon  $Q_h$ .

$$Q_h = \alpha IT_h \quad (\text{W}) \quad (4.5.8)$$

Výkon, který z článku vychází lze též vyjádřit jako součet výkonů, který odvádíme ze součástky  $Q_s$ , a jeho vlastního příkonu. Příkon je dán součtem Jouleova tepla a energie potřebné pro překonání termoelektrické síly. Termoelektrická síla je přímo úměrná rozdílu teplot na článku, tedy  $\Delta T$ .

$$Q_h = P + Q_s \quad (\text{W}) \quad (4.5.9)$$

$$P = RI^2 + \alpha I \Delta T \quad (\text{W}) \quad (4.5.10)$$

$$\Delta T = T_h + T_s \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.5.11)$$

Se znalostí dosažitelných výkonů, potažmo příkonu, lze snadno určit efektivitu takového chlazení. Výsledná účinnost jednoho Peltierova článku je:

$$\varepsilon = \frac{Q_s}{P} 100 \quad (\%) \quad (4.5.12)$$

Předešlé výpočty platí vždy pro jeden Peltierův článek. V kaskádě se budou jednotlivé účinky spojovat, a tím i přidávat další teplo vzniklé Jouleovými ztrátami. Výsledný ztrátový výkon tedy bude součtem všech dílčích tepelných výkonů  $Q_h$ . V daném případě výpočet celkového ztrátového výkonu pro tři Peltierovy články:

$$P_{ztr} = Q_{h1} + Q_{h2} + Q_{h3} \quad (\text{W}) \quad (4.5.13)$$

Pro správnou funkci celé kaskády musí platit, že  $Q_{h1} < Q_{h2} < Q_{h3}$ , za předpokladu, že na článku 1 je nejnižší teplota, tzn., že odvádí teplo z chlazené součástky. Se znalostí celkového ztrátového výkonu  $P_{ztr}$  můžeme navrhnout vhodný chladič, pro rozptýlení tepla z posledního článku kaskády do okolí. K tomuto výpočtu již stačí určit maximální teplotu  $\vartheta_r$ , která se může na chladiči objevit, a znát teplotu okolního prostředí  $\vartheta_a$  v místě měření, či používání této kaskády.

$$R_{th} = \frac{\vartheta_r - \vartheta_a}{P_{ztr}} \quad (\text{KW}^{-1}) \quad (4.5.14)$$

Na základě těchto vzorců byl pro jednodušší kalkulace sestaven početní „model“. Model v současné podobě po zadání parametrů článku a jeho pracovního bodu (požadované teploty, pracovního proudu) dokáže vypočítat chladicí výkon, který bude možné odvést ze součástky. Dále model vypočítá Jouleovy ztráty vlivem průchodu proudu článkem a určí účinnost chlazení daného pracovního bodu. Následně vypočítá výkon, který je nutné z daného stupně kaskády odvést, ať už chladičem nebo dalším stupněm. Po dopočítání všech stupňů následuje doporučení tepelného odporu chladiče pro danou soustavu.

Model byl vytvořen za účelem zjednodušení výpočtů a jejich přehlednosti. Je nutné podotknout, že výsledky pro jednotlivé články je nezbytné brát v úvahu pro výpočet dalšího článku v kaskádě. Model totiž není schopen spočítat parametry všech článků samostatně. Pokud se začíná s výpočtem třetího článku, který pochopitelně odvádí celý ztrátový výkon na chladič, tak dle možností tohoto článku musíme navrhnout pracovní bod článku o pozici níže v kaskádě, až se dostaneme k článku poslednímu, a je zcela zřetelné, jakého chladicího výkonu může kaskáda dosáhnout.

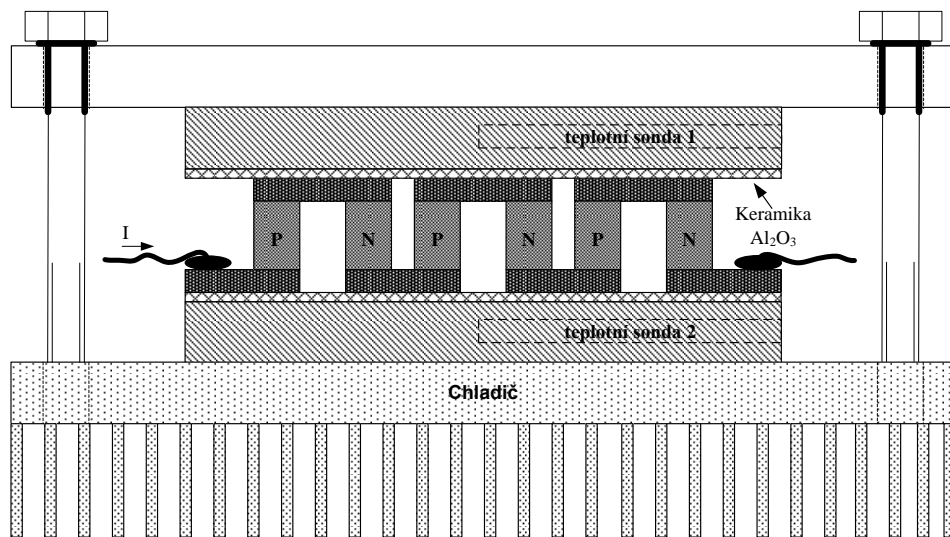
V následující tabulce jsou do výpočtů modelu dosazeny hodnoty pro kaskádu tří Peltierových článků TEC-01708, jejichž pracovní bod je určen pro dosažení 90 °C tepelného rozdílu při odváděném výkonu 0,96 W. Pro ilustraci je zde zobrazen výpočet pouze jednoho stupně kaskády.

Tabulka 3 - Výpočetní model, vyobrazení výpočtů pro jeden stupeň kaskády

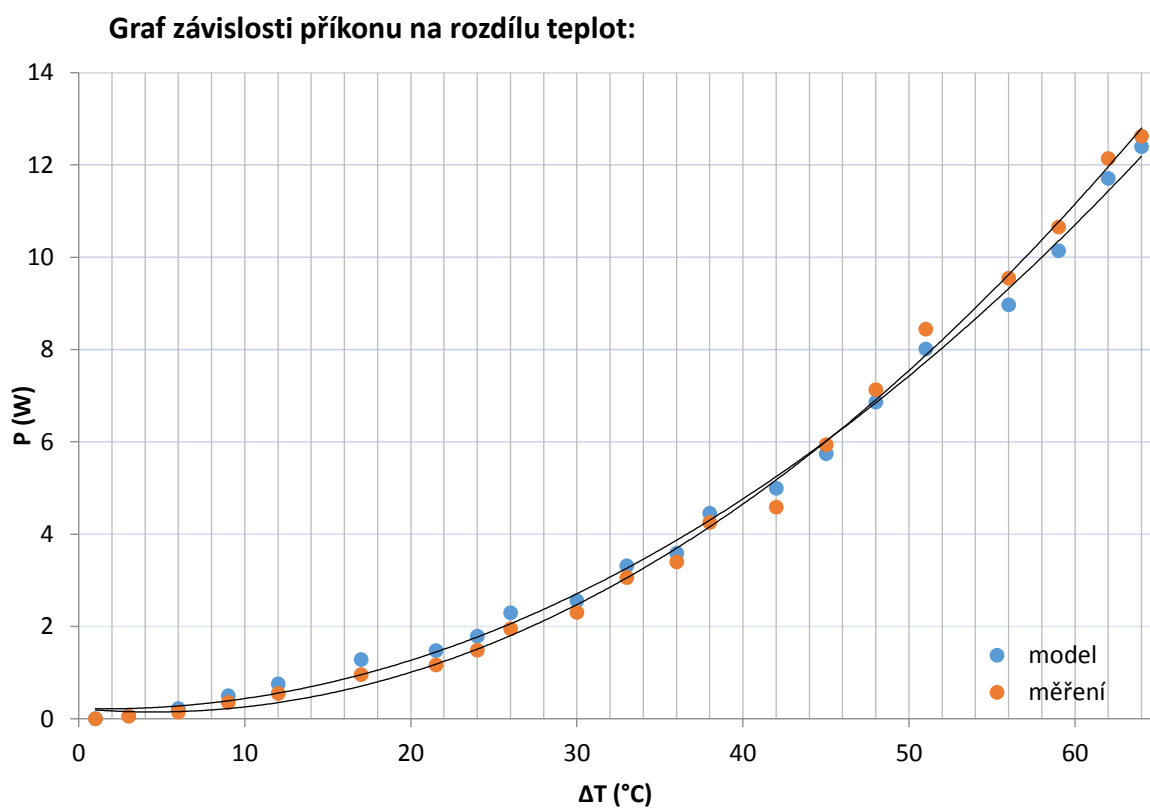
### Výpočetní model pro kaskádu Peltierových článků:

Teplota chlazené součástky $T_s$	°C	-50
Maximální teplota chladiče $\vartheta_r$	°C	40
Teplota okolí $\vartheta_a$	°C	25
<b>Celkový rozdíl teplot</b>	°C	<b>90</b>
<b>Rozdíl teplot na 1. Peltierově článku</b>	°C	<b>40</b>
<b>Rozdíl teplot na 2. Peltierově článku</b>	°C	<b>30</b>
<b>Rozdíl teplot na 3. Peltierově článku</b>	°C	<b>20</b>
<b>Výpočet parametrů 3. Peltierova článku:</b>		
Počet elementů Peltierova článku $n$	-	34
Maximální proud Peltierovým článkem $I_m$	A	8,5
Maximální chladicí výkon $Q_m$	W	9,2
Proud procházející Peltierovým článkem $I$ (pracovní bod)	A	8,5
<b>Elektrický odpor Peltierova článku <math>R</math></b>	$\Omega$	<b>0,12700</b>
<b>Termoelektrické napětí Peltierova článku <math>\alpha</math></b>	VK <sup>-1</sup>	<b>0,00359</b>
<b>Odebíraný tepelný výkon <math>Q_s</math> (Peltierův chladicí výkon)</b>	W	<b>8,96176</b>
<b>Jouleovo teplo vzniklé průchodem proudu <math>Q_j</math></b>	W	<b>9,17575</b>
<b>Příkon Peltierova článku <math>P</math></b>	W	<b>18,1375</b>
<b>Výstupní výkon z P. článku (ztrátový výkon na chladiči) <math>Q_h</math></b>	W	<b>27,0993</b>
Účinnost $\mathcal{E}$	%	49,4100
<b>Celkový ztrátový výkon <math>P_{ztr}</math></b>	W	<b>36,4082</b>
<b>Maximální tepelný odpor chladiče <math>R_{th}</math></b>	KW <sup>-1</sup>	<b>0,41199</b>

Po sestavení výpočtů bylo nezbytné vypočítané parametry a pracovní body ověřit. Ověření probíhalo měřením dosažených rozdílů teplot v porovnání s příkonem jednoho Peltierova článku. Výsledky měření v porovnání s vypočítanými hodnotami jsou zobrazeny v grafu 3.



Obrázek 8 - Konstrukční uspořádání pro měření příkonu v závislosti na teplotním rozdílu Peltierova článku TEC1- 1708

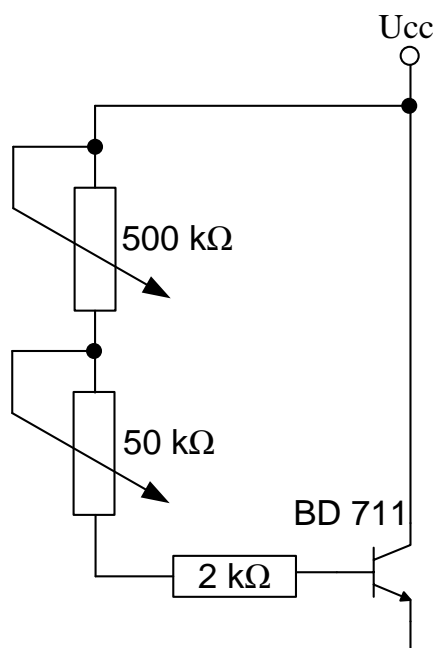


Graf 3 - Závislost příkonu Peltierova článku TEC1-01708 na rozdílu teplot

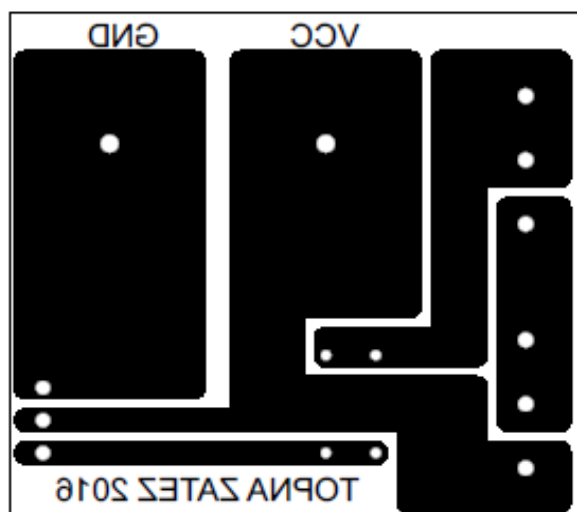
V grafu jsou tedy dvě křivky, jedna znázorňuje vypočítaný průběh a druhá průběh změřený. Porovnáním křivek je vidět, že oba průběhy jsou téměř identické a malé rozdíly lze přiřknout chybě při měření. Například je to tepelný rozdíl, který se vytváří na měřicích ploškách pro sondy, vliv proudícího vzduchu a v neposlední řadě neideální chladič. Výpočtový model samozřejmě žádnou z těchto stěžejních podmínek neuvažuje. Z ověřovacího měření tudíž plyne, že vypočítané hodnoty lze brát vážně, ačkoli je lepší ponechat si v dalším návrhu rezervu, aby nedošlo k překročení limitních stavů některého z článků.

Výše uvedené ověření nezahrnovalo výpočty ohledně chlazeného výkonu, avšak tento parametr je zcela zásadní, a proto musí být ověřen též. Na základě výpočtů proběhlo měření. Pro účely tohoto měření byl zapotřebí zdroj tepelného výkonu, který lze plynule regulovat a zároveň daný tepelný výkon snadno určovat (měřit). Jelikož byl požadován relativně malý tepelný výkon (důraz je kladen hlavně na vysoký rozdíl teplot) byl pro „topení“ zvolen bipolární NPN tranzistor BD711. Tranzistor BD711 je postupným otevíráním protékán proudem ze zdroje, tedy jeho ztrátový výkon je přímo úměrný součinu napětí zdroje a dodaného proudu. Plynulá regulace je zajištěna dvěma potenciometry (hrubé a jemné nastavení), které omezují proud do báze tranzistoru. V sérii s potenciometry je zařazen rezistor, který omezuje bázový proud v případě, že jsou potenciometry zcela otevřeny.

Schéma navržené tepelné zátěže s hodnotami příslušných prvků je na obrázku 9. Z důvodu přesného měření, minimalizace ztrát a případných chyb na vodičích byl vytvořen plošný spoj pro dané zapojení z obrázku 9. Zrcadlená předloha pro výrobu DPS je vyobrazena na obrázku 10. Výsledný plošný spoj byl přenesen na Cuprexitovou desku fotocestou a následně vyleptán v lázni chloridu železitého. Nakonec byl DPS osazen THT součástkami a připraven k měření.



Obrázek 9 - Schéma tepelné zátěže s BD711



Obrázek 10 - DPS tepelné zátěže s BD711

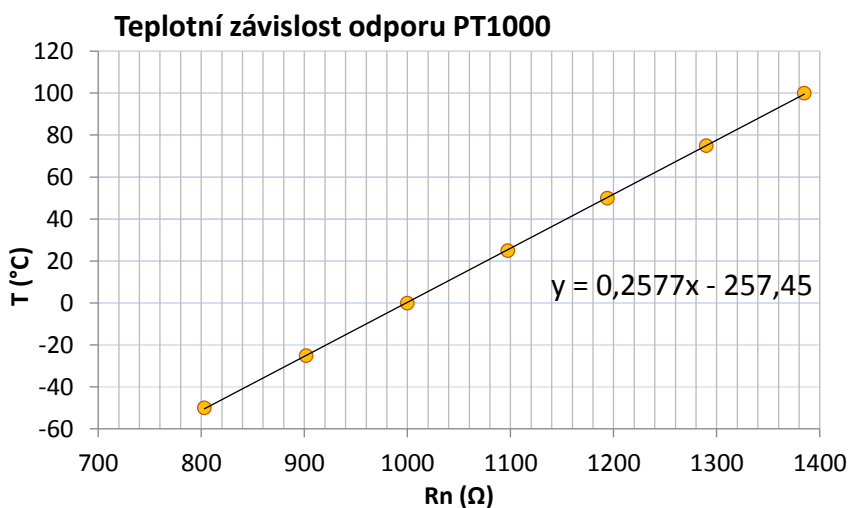
K detailnějšímu měření byly použity platinové teplotní sondy PT1000 s teplotním rozsahem od - 50 °C do 500 °C a třídou přesnosti 0,12 %. Tato platinová čidla mění s teplotou svůj odpor, který je při 0 °C 1000 Ω. Přesné změny odporů s měnící se teplotou udává výrobce v podrobné tabulce, viz tabulka 4. Ačkoli je teplotní rozsah až do 500 °C, k danému použití stačí hodnoty do 100 °C. Z tohoto omezeného rozsahu byla pomocí lineární regrese zjištěna rovnice prokládové přímky bodů:

$$y = 0,25773330965485x - 257,44735671765$$

Pomocí této rovnice byly následně přepočítávány naměřené odpory sond na reálné teploty. Proklad přímkou je zobrazen v grafu 4, na němž lze pozorovat, že body udávané výrobcem neleží zcela na této přímce, a tedy změny odporu s teplotou nejsou zcela lineární. Tím, že přepočet probíhá s použitím rovnice této přímky, je do měření teploty zanášena nepatrná chyba. Vyhodnocování jednotlivých odporů probíhalo pomocí čtyř-svorkového zapojení pro měření odporu na multimetru HP 34401a, který na daném rozsahu měří proudem 1 mA, takže nedocházelo k ohřívání sond PT1000 vlivem průchodu proudu.

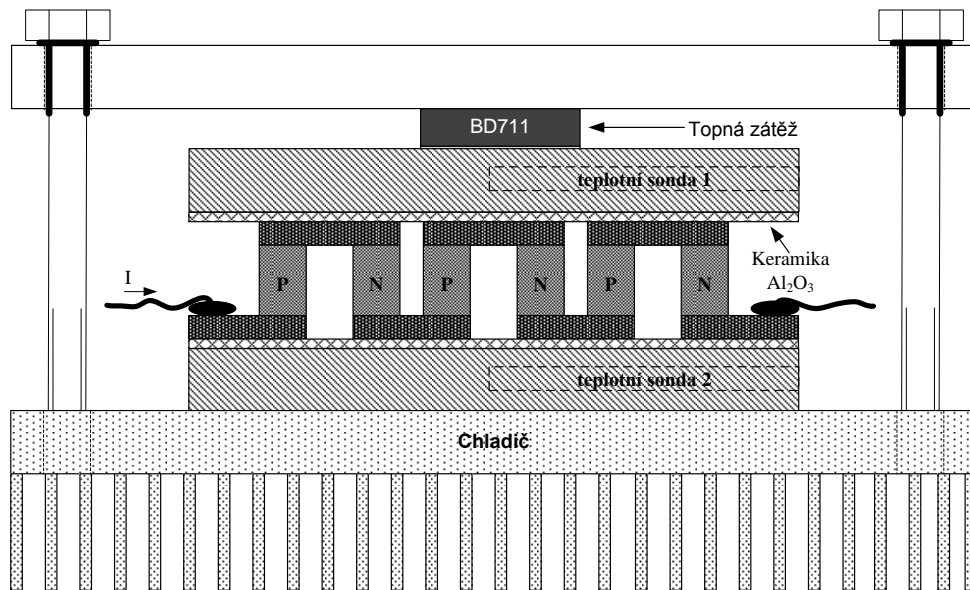
Tabulka 4 - Teplotní závislost odporu PT1000

Teplota (°C)	Rn (Ω)
-50	803,06
-25	901,92
0	1000
25	1097,35
50	1193,97
75	1289,87
100	1385,06



Graf 4 – Závislost odporu PT1000 na teplotě vč. lineárního prokladu

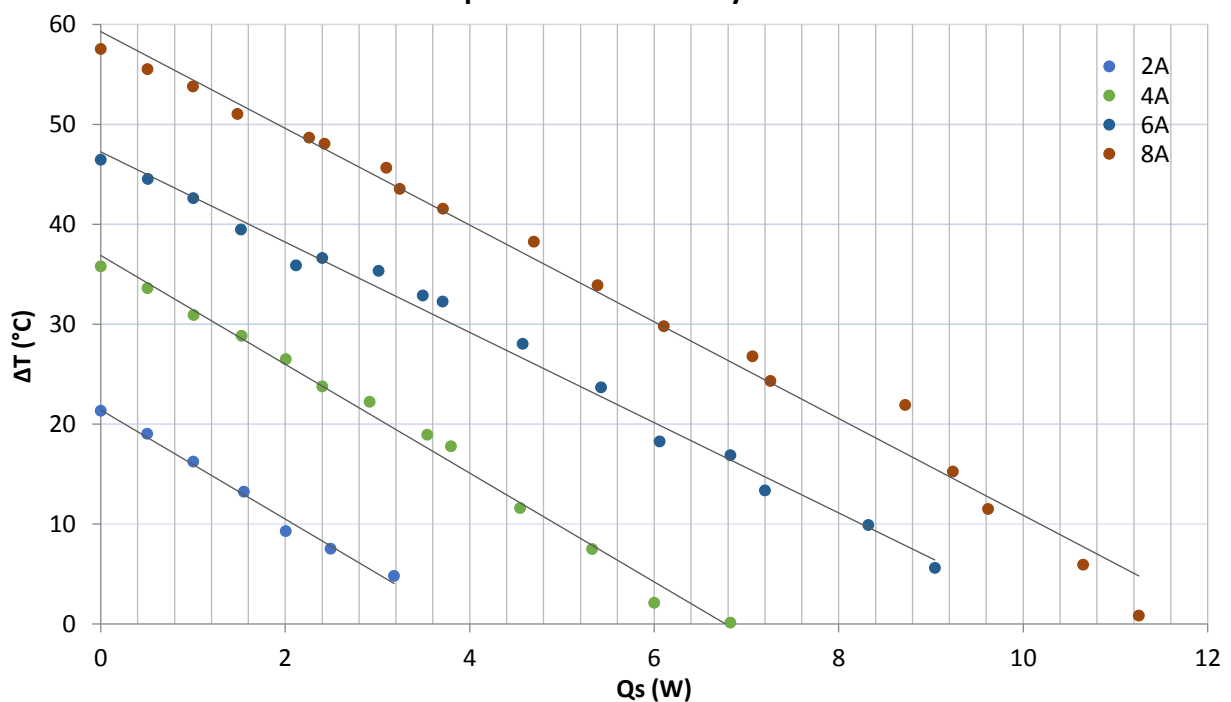
K ověření modelovaných chladicích výkonů bylo zvoleno měření teplotního rozdílu v závislosti na chlazeném výkonu. Měření bylo provedeno pro jeden Peltierův článek TEC1-01708, dle schématu na obrázku 11.



Obrázek 11 - Konstrukční uspořádání pro měření teplotního rozdílu Peltierova článku TEC1-01708 v závislosti na chladicím výkonu

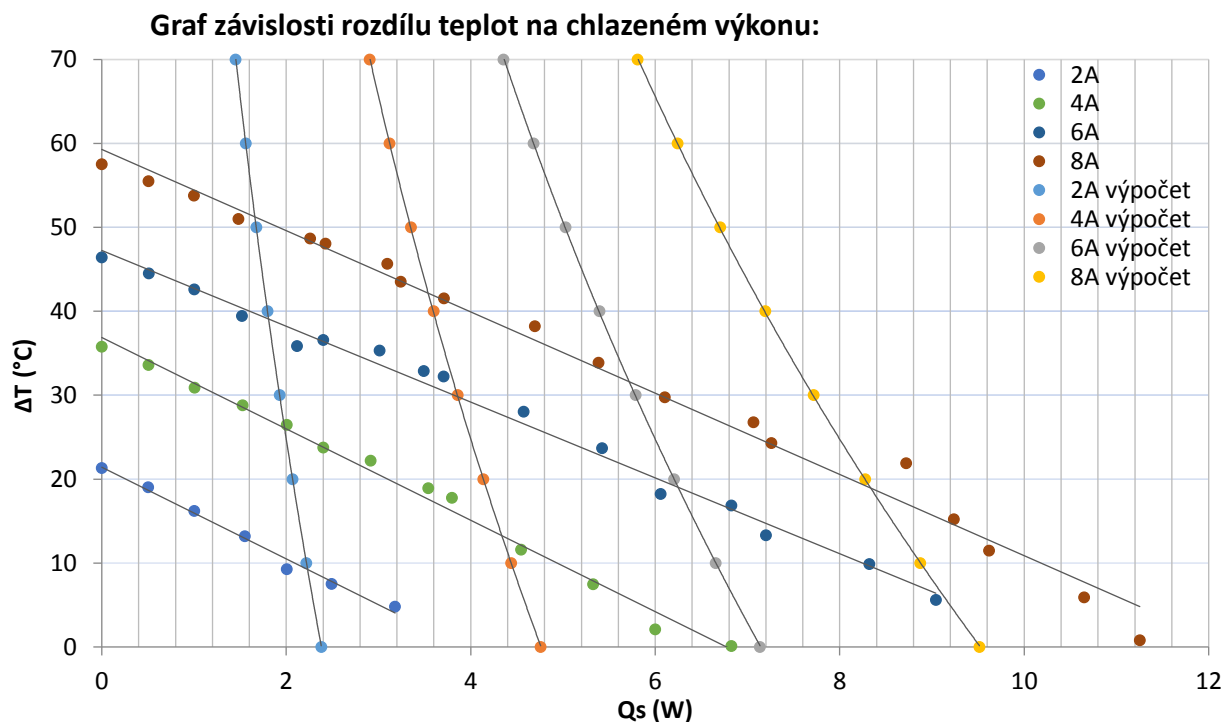
Naměřené hodnoty jsou vyobrazeny v grafu 5.

Graf závislosti rozdílu teplot na chlazeném výkonu:



Graf 5 - Závislost rozdílu teplot na chlazeném výkonu

V grafu 5 jsou čtyři křivky, každá zobrazuje chladicí schopnosti Peltierova článku TEC1-01708 pro jednotlivý pracovní bod, konkrétně pro napájení protékajícím proudem 2 A, 4 A, 6 A a 8 A. Naměřené body pro jednotlivé napájení vytvářejí v grafu téměř lineární průběhy a dosažené chladicí výkony skutečně předčily údaje od výrobce. Podstatné je však srovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými. Srovnání těchto hodnot je zobrazeno v grafu 6.



*Graf 6 - Porovnání modelace a měření závislosti teplot na chlazeném výkonu*

Vypočítané a naměřené křivky se v tomto případě zásadně liší. Při detailnějším pohledu je však vidět, že rozdíly jsou především ve strmosti a velikosti y-nové osy grafu, tedy v teplotních rozdílech. Tyto rozdíly jsou způsobeny několika faktory. Nejzásadnější roli zde hraje horší chladič. Model totiž počítá s ideálním odvodem tepla z článku a použitý chladič se takovému ideálu rozhodně nepřibližuje. Další zhoršující vlastností je rozptyl tepla do okolí, a nelze také zanedbat již zmíněné měřicí plošky pro sondy, na kterých se může vytvářet teplotní rozdíl, jež sondy nezaznamenají.

Z důvodu nevyhovujícího chladiče, bylo nutné vybrat jiný, aby bylo možné dosáhnout lepších výsledků. Výpočetní model nám tepelný odpor počítá, avšak čím nižšího tepelného odporu bude nový chladič dosahovat, tím lépe. Ideální případ by samozřejmě byl chladič s nulovým tepelným odporem. Z široké škály chladičů byl nakonec použit chladič ČKD A140 typ 77.1, který dle údajů od výrobce dosahuje při nuceném chlazení s průtokem vzduchu kolem rychlosti 5 m/s tepelného odporu cca  $0,2 \text{ KW}^{-1}$ , což je hodnota nižší, než dopočítaná pomocí modelu. Chladič by tedy měl zvládnout odvést všechno teplo, a zároveň udržet co nejbližší teplotu okolí na posledním nejteplejším článku v kaskádě. Rozměry chladiče jsou (140 x 100 x 100) mm a tvar žebrování je patrný z obrázku 10. Pro dosažení těchto parametrů je nutné zajistit dostatečné proudění vzduchu a také jeho rovnoměrnost po celé ploše chladiče.

Proudění vzduchu zajišťuje ventilátor Sunon PF92251V1-A99 s 4500 otáčkami za minutu a průtokem vzduchu  $127,43 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Rovnoměrného proudění je dosaženo “oplechováním” žebor chladiče, čímž se simuluje vzduchový kanál pro proudění vzduchu. Výsledná konstrukce je zobrazena na obrázku 11.

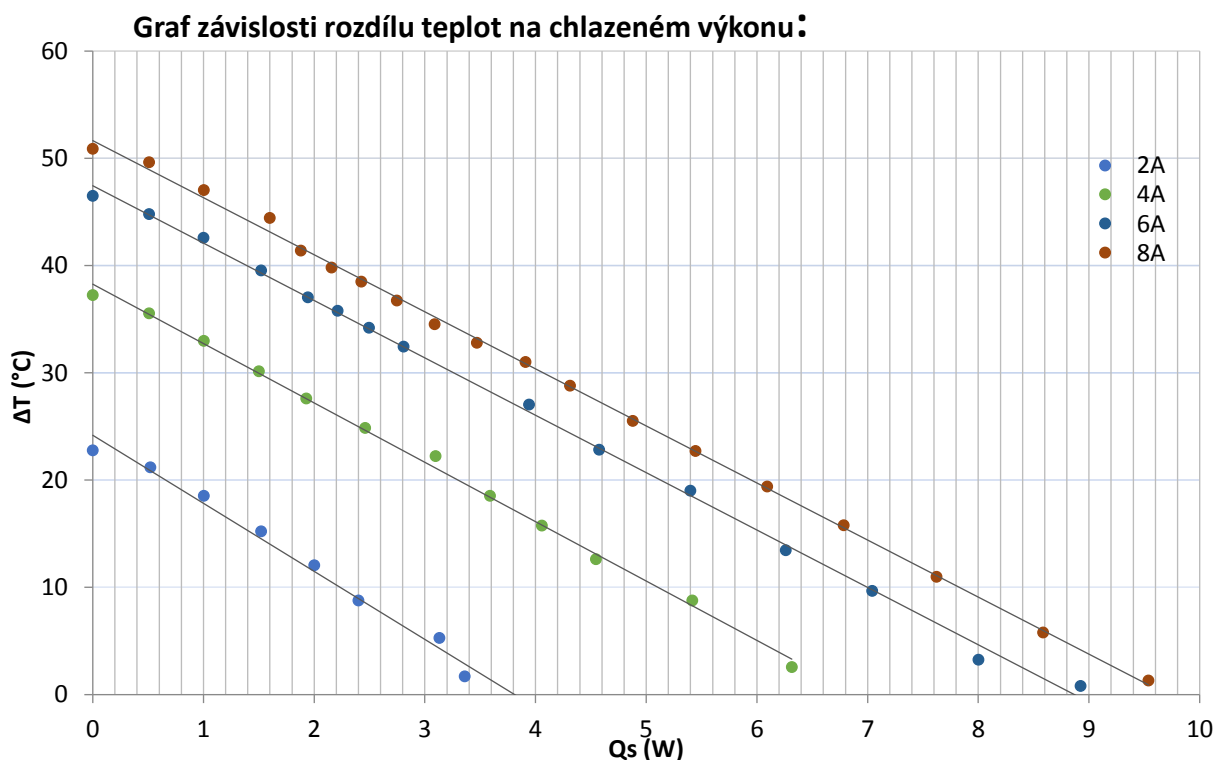


Obrázek 10 - Chladič ČKD A140 typ 77.1



Obrázek 11 - Chladič ČKD A140 typ 77.1 s oplechováním

S vyměněným chladičem bylo nutné znovu změřit závislost tepelného rozdílu na chlazeném výkonu a následně provést porovnání s měřením předchozím a také s výpočty. Výsledky tohoto měření zobrazuje graf 7.



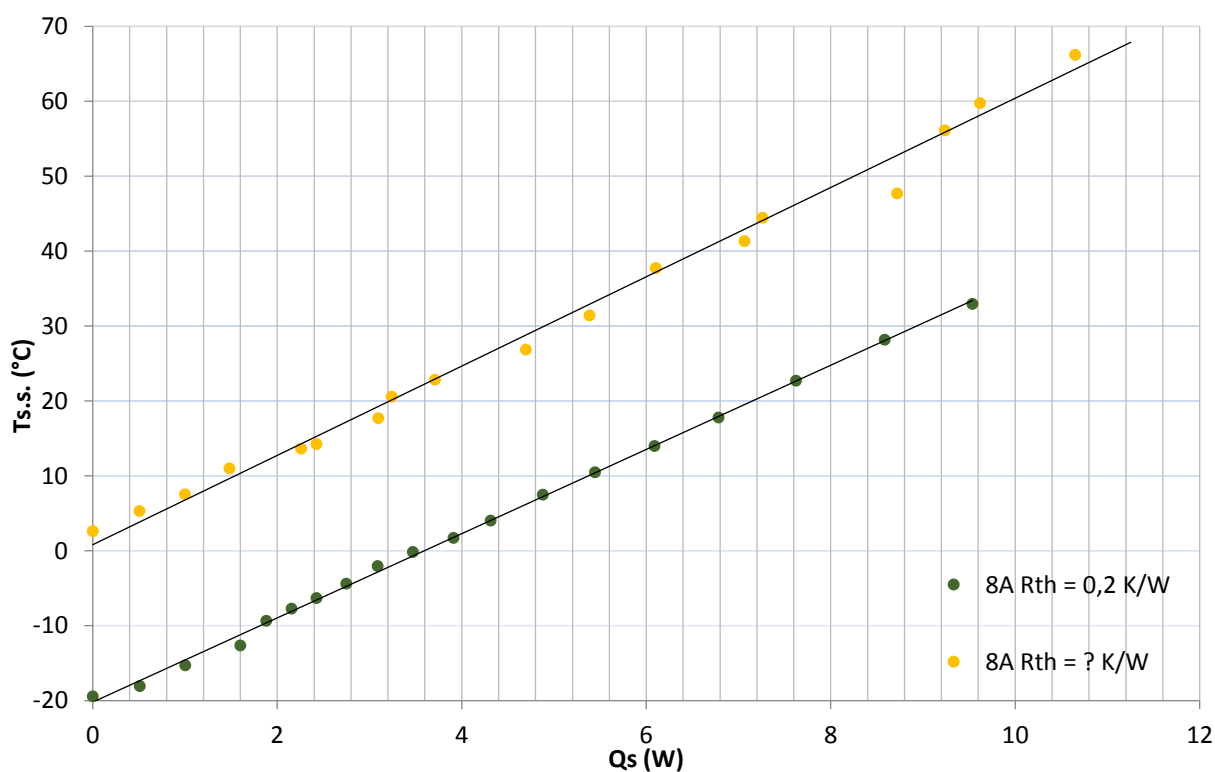
Graf 7 - Graf závislosti rozdílu teplot na chlazeném výkonu, chladič s  $R_{th} = 0,2 \text{ KW}^{-1}$

Na první pohled není z grafu patrné, že by se změnou chladiče došlo k nějakým změnám, realita je však jiná. Na ose y je vynesena rozdíl teplot, a s nižším tepelným odporem chladiče je možné udržet teplou stranu chladiče chladnější než s chladičem předchozím.



Tento fakt se v grafu neprojevuje právě proto, že Peltierův článek je schopen udržet téměř stejný teplotní rozdíl, ovšem s lepším chladičem, a tedy nižší teplotou na straně teplé je možné dosáhnout i citelně nižší teploty na straně studené. Konkrétně při prvním měření, kdy byl použit chladič o neznámých parametrech, byla dosažena minimální teplota 2,63 °C, přičemž na chladiči byla teplota 60,16 °C. Tyto hodnoty byly dosaženy při pracovním bodě 8 A. Se stejným pracovním bodem, ovšem s chladičem s tepelným odporem  $R_{th} = 0,2 \text{ KW}^{-1}$  bylo dosaženo minimální teploty -19,43 °C, a to právě kvůli tomu, že teplota chladiče byla pouze 31,45 °C. Přestože byl v prvním případě teplotní rozdíl na článku větší, než v případě druhém, konkrétně 57,53 °C proti 50,88 °C, nižších teplot chladné strany bylo dosaženo u druhého měření. Je nutné podotknout, že výše uvedené srovnání bylo pro nulový chladicí výkon, tedy chladná strana nebyla ohřívána tranzistorem. Porovnání účinků chlazení s těmito dvěma chladiči pro zmiňovaný pracovní bod 8A v celém jeho chladicím rozsahu je znázorněno v grafu 8.

**Graf závislosti teploty chladné strany článku na chlazeném výkonu:**

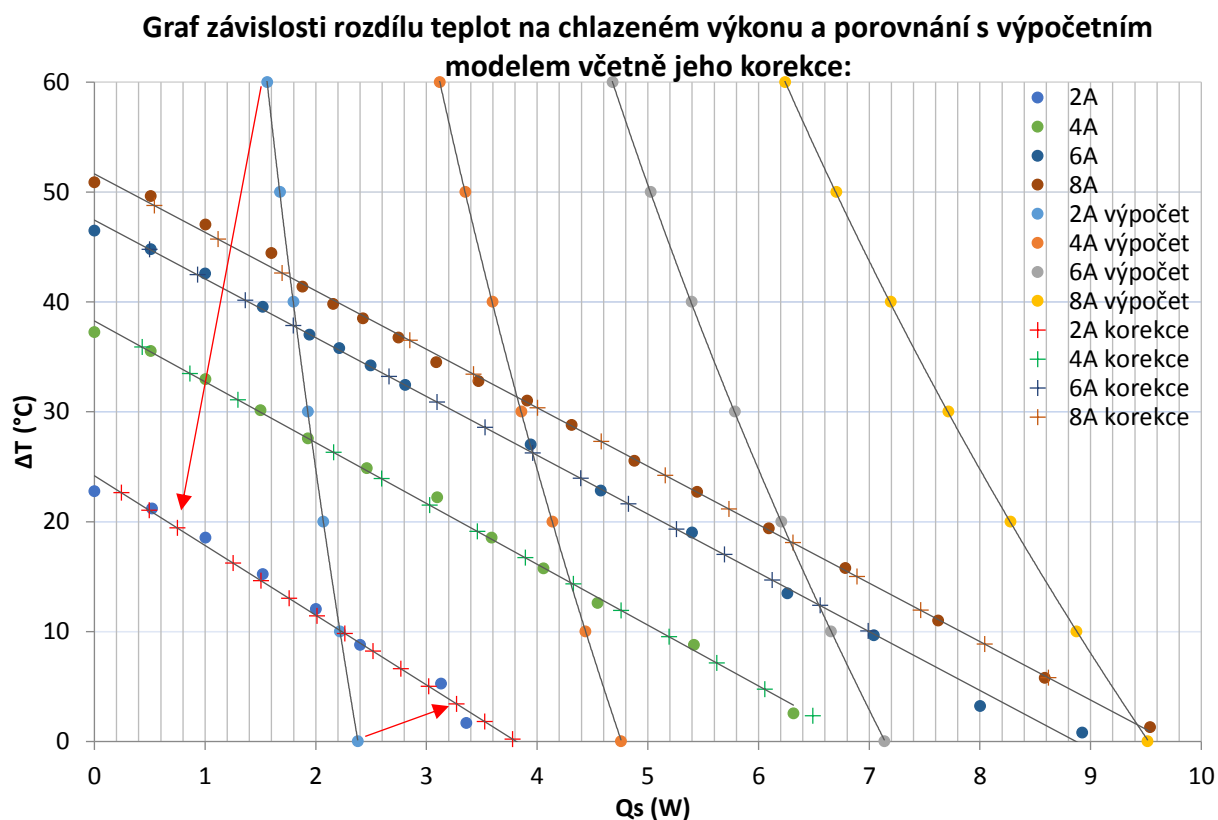


\*Poznámka: otazník značí neznámý tepelný odpor použitého chladiče

Graf 8 - Závislost teploty chladné strany článku na chlazeném výkonu, porovnání výsledků s různými chladiči

Zcela zjevně se výměnou chladiče zvýšila celková efektivita chlazení, a bylo dosaženo mnohem nižších teplot na chlazené součástce! Se snížením teploty chladné strany přichází i omezení chladicího výkonu, který je článek schopen přenést.

Porovnání naměřených hodnot s chladičem ČKD o tepelném odporu  $0,2 \text{ KW}^{-1}$  a vypočtených hodnot stále vykazuje velké rozdíly viz graf 9. Tedy se změnou chladiče nedošlo k zásadnímu zmenšení rozdílů mezi výpočty a reálnými průběhy.



Graf 9 - Porovnání modelace a měření závislosti teplot na chlazeném výkonu a následná korekce vypočtených hodnot, použitý chladič:  $R_{th} = 0,2 \text{ KW}^{-1}$

Pro zkvalitnění výsledků modelu bylo nutné najít vhodnou korekci, aby vypočtené hodnoty odpovídaly reálným. Průběhy byly porovnávány pomocí jejich směrnic. Následnými úpravami vypočtených hodnot bylo dosaženo totožných směrnic naměřených a vypočtených křivek. Při porovnání naměřených a vypočtených křivek nebyly nalezeny žádné závislosti, pouze byl zjištěn trend, kdy s rostoucím proudem stoupá směrnice křivek. Z tohoto důvodu byly jednotlivé křivky porovnávány samostatně a výsledné korekční hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5. Následný přepočtení vypočtených hodnot je pouhé dosazení vypočtené hodnoty do vzorce, který obsahuje korekční hodnoty.

Přepočtení probíhá dle rovnice:  $x = k * y + q$  (4.5.15)

Teplotní rozdíl pro napájení proudem 2 A:  $\Delta T = 0,16014 * \Delta T_{vyp} + 0,222$

Chladičový výkon pro napájení proudem 2 A:  $Q_s = 3,5 * Q_{s \text{ vyp}} - 3,8$

Takto přepočtené hodnoty jsou v grafu zobrazeny křížky, obdobně lze provést korekci všech vypočtených hodnot dle tabulky 5.

Tabulka 5 - Korekční prvky modelu

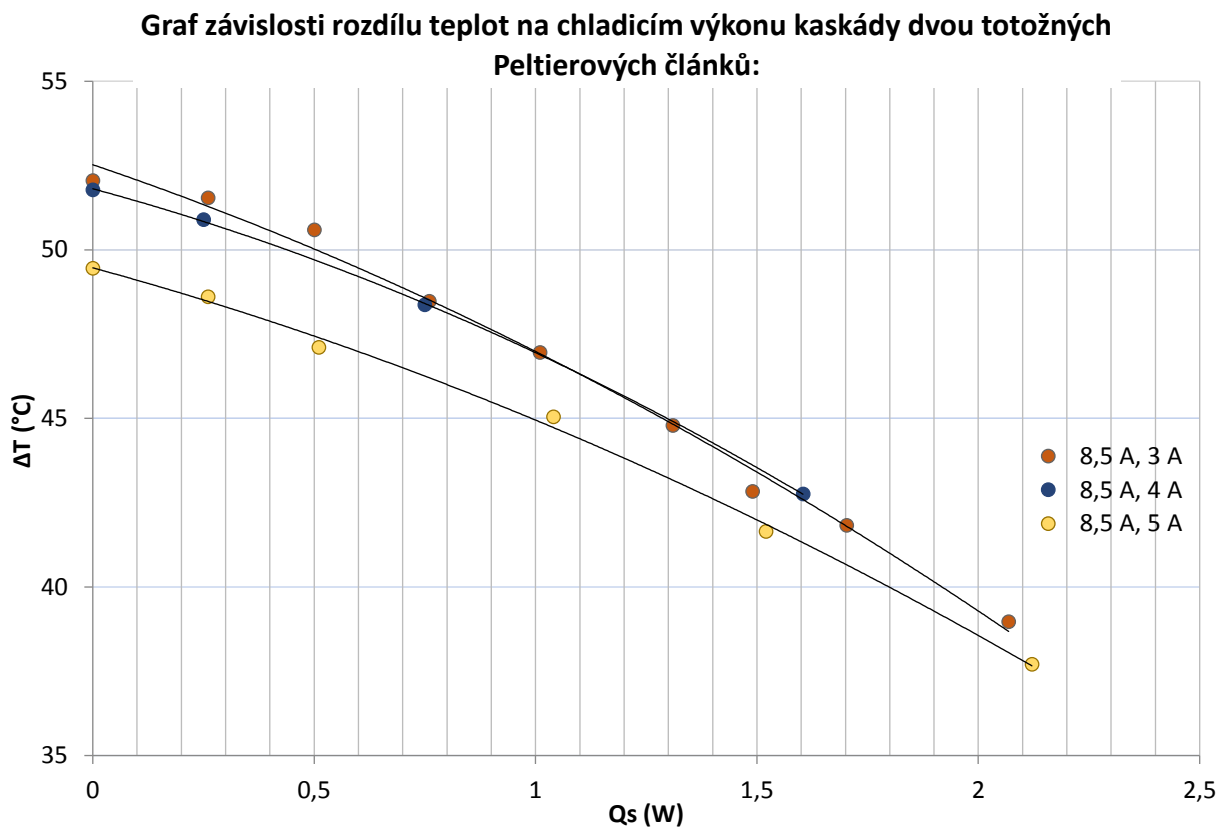
I (A)		$\Delta T$ (°C)	$Q_s$ (W)
<b>2A</b>	k	0,160140	3,5
	q	0,222000	-3,8
<b>4A</b>	k	0,239548	3,0
	q	2,350000	-6,5
<b>6A</b>	k	0,231502	2,0
	q	10,06000	-6,0
<b>8A</b>	k	0,306945	2,0
	q	5,805000	-8,7

## 5 Měření sériově řazených Peltierových článků

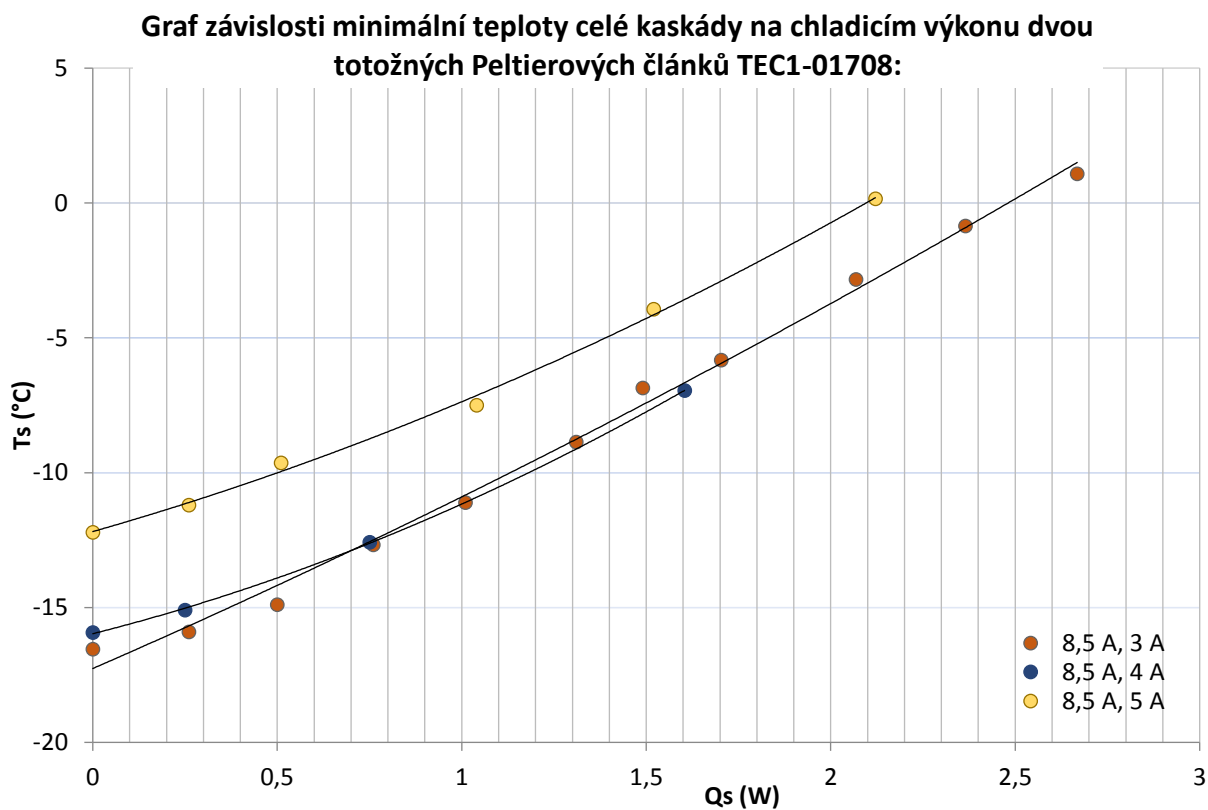
### 5.1 Kaskáda dvou totožných Peltierových článků TEC1-01708

Sériovým řazením Peltierových článků lze za určitých podmínek dosáhnout nižších teplot chladné strany kaskády, tato aplikace je podrobněji popsána v kapitole 3.1.2. S chladičem od ČKD A140 typu 77.1 je možno snadno odvádět všechny ztrátový výkon jak z chlazené součástky, tak ztrátový výkon generovaný vlastními chladičnými komponenty. K základní analýze chování kaskády byly použity pouze dva Peltierovy články.

Pracovní body článků byly nejprve vypočítány pomocí modelu, avšak v měření bylo použito experimentálního nastavení pro zjištění reálných hodnot. Článek uložený na chladiči byl po celý čas měření provozován na maximu jeho chladičného výkonu, tzn., že byl napájen proudem 8,5 A, a k regulaci docházelo pouze na v kaskádě výše položeném článku, který již chladil součástku. Na tomto článku byl měněn napájecí proud od 1 A do 6 A. Napájením druhého článku v rozmezí proudů mezi 1 A a 3 A článek nebyl schopen mezi svými stranami vytvořit kladný teplotní rozdíl. Kladného teplotního rozdílu dosahoval až mezi proudy 3 A a 5 A, na nichž tedy bylo provedeno detailní měření, jehož výsledky jsou zobrazeny na grafech 10 a 11. S napájecím proudem vyšším než 5 A nedokázal spodní článek odvádět ztrátový výkon výše položeného článku, natož pak ještě ztrátový výkon chlazené součástky.



Graf 10 – Závislost rozdílu teplot na chladicím výkonu pro kaskádu dvou Peltierových článků TEC1-01708



Graf 11 – Závislost minimální teploty na chladicím výkonu pro kaskádu dvou Peltierových článků TEC1-01708

Z naměřených hodnot je zřejmé, že největšího teplotního rozdílu na celé kaskádě bylo dosaženo pro napájení druhého článku nejnižším proudem použitým při měření, tedy 3 A. Následně graf 11 ukazuje, že nejnižší teploty chlazené součástky bylo dosaženo také při napájení druhého článku proudem 3 A. Důvod je jednoduchý, s vyšším napájecím proudem roste i ztrátový výkon samotné kaskády, tím se zahřívá chladič, a i relativně velký teplotní rozdíl nestačí k dosažení nízkých teplot na jejím studeném konci. Všechna naměřená data jsou uvedena v tabulkách 6, 7 a 8.

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty na kaskádě dvou článků TEC1-01708, proud 8,5 A a 3 A

Pztr. (W)	T 1 s.s. (°C)	T2 (°C)	T3 t.s. (°C)	$\Delta T_{p1}$ (°C)	$\Delta T_{p2}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
0,00	<b>-16,54</b>	3,19	35,52	19,73	32,33	<b>52,06</b>
0,26	<b>-15,90</b>	3,33	35,65	19,23	32,32	<b>51,55</b>
0,50	<b>-14,89</b>	3,79	35,70	18,69	31,91	<b>50,59</b>
0,76	<b>-12,68</b>	4,82	35,80	17,50	30,98	<b>48,48</b>
1,01	<b>-11,11</b>	5,54	35,85	16,65	30,31	<b>46,96</b>
1,31	<b>-8,86</b>	6,68	35,93	15,54	29,25	<b>44,79</b>
1,49	<b>-6,85</b>	7,76	35,98	14,61	28,22	<b>42,84</b>
1,70	<b>-5,82</b>	8,15	36,01	13,97	27,86	<b>41,83</b>

Tabulka 7 - Naměřené hodnoty na kaskádě dvou článků TEC1-01708, proud 8,5 A a 4 A

Pztr. (W)	T 1 s.s. (°C)	T2 (°C)	T3 t.s. (°C)	$\Delta T_{p1}$ (°C)	$\Delta T_{p2}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
0,00	<b>-15,93</b>	14,00	35,85	29,92	21,86	<b>51,78</b>
0,25	<b>-15,10</b>	14,36	35,80	29,46	21,44	<b>50,90</b>
0,75	<b>-12,57</b>	15,36	35,80	27,94	20,44	<b>48,38</b>
1,60	<b>-6,96</b>	18,30	35,80	25,26	17,50	<b>42,76</b>

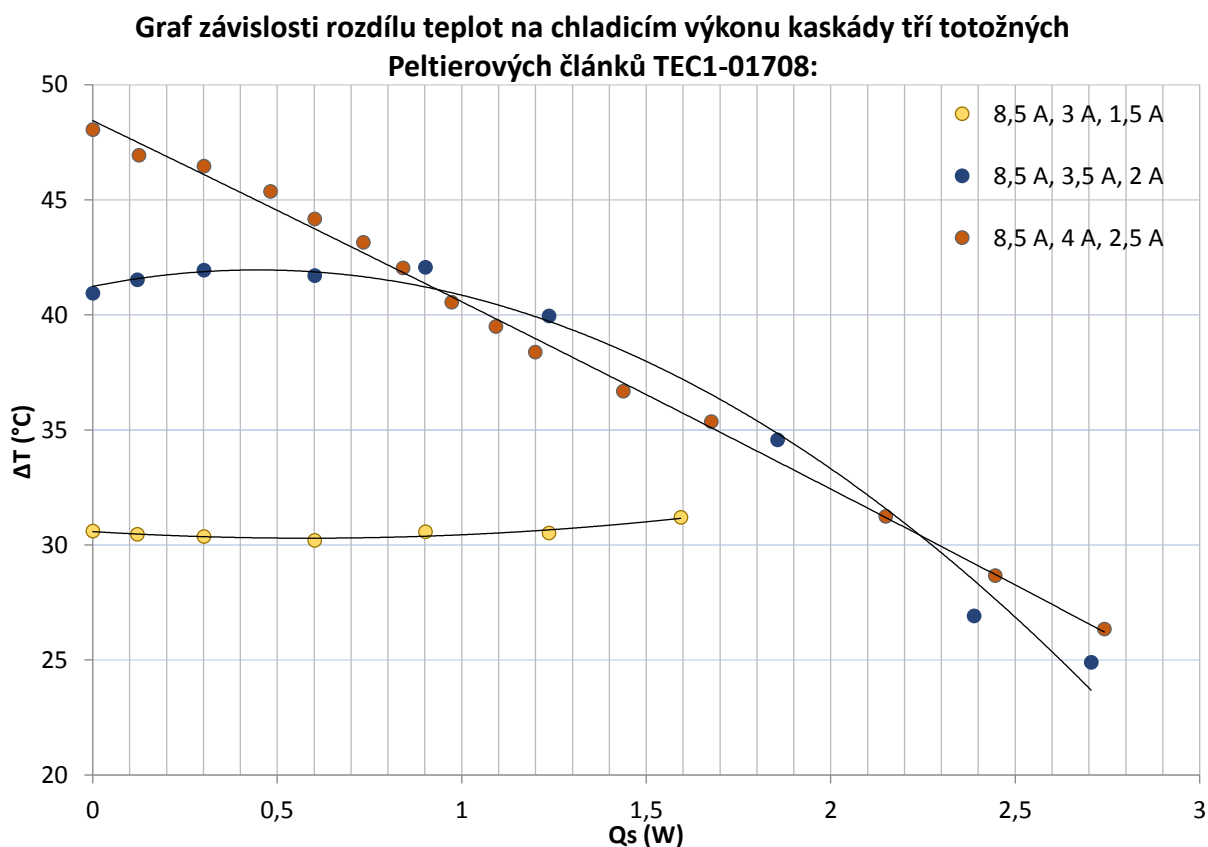
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty na kaskádě dvou článků TEC1-01708, proud 8,5 A a 5 A

Pztr. (W)	T 1 s.s. (°C)	T2 (°C)	T3 t.s. (°C)	$\Delta T_{p1}$ (°C)	$\Delta T_{p2}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
0,00	<b>-12,21</b>	28,95	37,24	41,16	8,30	<b>49,46</b>
0,26	<b>-11,21</b>	30,08	37,40	41,29	7,32	<b>48,61</b>
0,51	<b>-9,64</b>	30,78	37,48	40,41	6,70	<b>47,11</b>
1,04	<b>-7,50</b>	31,81	37,55	39,30	5,75	<b>45,05</b>
1,52	<b>-3,94</b>	33,61	37,71	37,55	4,10	<b>41,65</b>

## 5.2 Kaskáda tří totožných Peltierových článků TEC1-01708

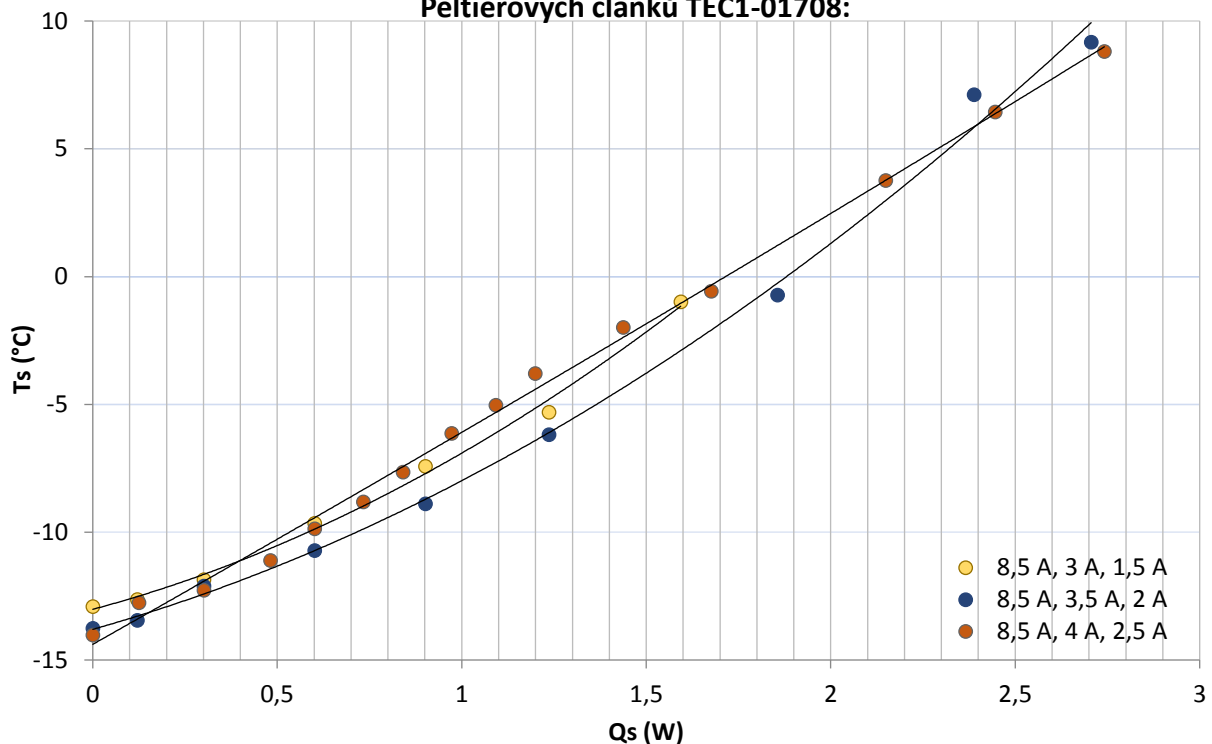
Kaskáda tvořená třemi články TEC1-01708 může být regulovaná pomocí jednotlivých článků. Výhoda je, že lze ovlivňovat rozložení teplotních úbytků na jednotlivých člancích. Ve skutečnosti je však velice složité zvolit „kombinaci“ pracovních bodů tak, aby se kaskáda svým vlastním ztrátovým výkonem nepřehřivala, a aby poslední článek dokázal udržet rozumný teplotní rozdíl mezi svými stranami.

Předpokládané pracovní body byly vypočteny pomocí „modelu“, avšak vypočítané hodnoty je nutné brát pouze jako orientační, kvůli nepřesnostem a zanedbání některých faktorů při výpočtech. Vypočítané pracovní body byly 8,5 A pro spodní článek, 3 A pro střední článek, a 1 A pro poslední článek před chlazenou součástkou. Při reálném testu kaskády ale bylo nutné poslední článek napájet proudem minimálně 1,5 A. Při nižších hodnotách proudu totiž článek nedokázal mezi svými stranami vytvořit kladný teplotní rozdíl. Detailní měření bylo provedeno pro tři různé konfigurace napájení, a to: 8,5 A, 3 A a 1,5 A, dále 8,5 A, 3,5 A a 2 A a poslední 8,5 A, 4 A a 2,5 A (proudy od nejnižšího po nejvyšší článek). Při dalším zvýšení proudu prvního a druhého článku nedokáže poslední článek odvádět ztrátový výkon soustavy a tvoří se na něm záporný teplotní rozdíl. V takovém stavu nelze kaskádu provozovat. Naměřené hodnoty jsou vyneseny do grafů 12 a 13, ze kterých je patrné, že největšího teplotního rozdílu i nejnižší teploty dosahuje kaskáda při nejvyšších napájecích proudech. Nejeфекtivnější je však pouze v okolí nízkých chlazených výkonů. V intervalu od zhruba 1 W do 2 W vyniká větším teplotním rozdílem i nižšími teplotami chlazené součástky pracovní bod 8,5 A, 3,5 A a 2 A. Proto se zde opakuje podobná situace jako při měření na dvou článcích, kdy vyšší napájecí proud neúměrně zatěžuje kaskádu vlastními ztrátami a klesají tak parametry a použití je neefektivní.



Graf 12 - Závislost teplotního rozdílu na chladicím výkonu kaskády tří totožných článků TEC1-01708

**Graf závislosti minimální teploty na chladícím výkonu kaskády tří totožných Peltierových článků TEC1-01708:**



*Graf 13 - Závislost minimální teploty na chladícím výkonu kaskády tří totožných článků TEC1-01708*

*Tabulka 9 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, proud 8,5 A, 3 A a 1,5 A*

Pztr. (W)	T1s (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3h (°C)	$\Delta T_{p1}$ (°C)	$\Delta T_{p2}$ (°C)	$\Delta T_{p3}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
0,00	<b>-12,91</b>	-7,94	10,49	33,56	4,97	2,56	23,07	<b>30,60</b>
0,12	<b>-12,63</b>	-7,89	7,86	33,56	4,73	0,03	25,70	<b>30,46</b>
0,30	<b>-11,85</b>	-7,52	8,07	33,56	4,33	0,55	25,49	<b>30,37</b>
0,60	<b>-9,64</b>	-6,52	8,38	33,59	3,13	1,86	25,21	<b>30,19</b>
0,90	<b>-7,42</b>	-5,23	9,02	33,61	2,19	3,79	24,59	<b>30,57</b>
1,24	<b>-5,31</b>	-4,20	9,49	33,61	1,11	5,29	24,12	<b>30,52</b>
1,59	<b>-0,98</b>	-1,67	10,78	33,56	-0,70	9,10	22,78	<b>31,19</b>

*Tabulka 10 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, proud 8,5 A, 3,5 A a 2 A*

Pztr. (W)	T1s (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3h (°C)	$\Delta T_{p1}$ (°C)	$\Delta T_{p2}$ (°C)	$\Delta T_{p3}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
0,00	<b>-13,76</b>	-3,19	15,72	33,56	10,57	12,53	17,84	<b>40,93</b>
0,12	<b>-13,45</b>	-2,78	16,29	33,64	10,67	13,51	17,35	<b>41,53</b>
0,30	<b>-12,11</b>	-1,93	16,73	33,69	10,18	14,80	16,96	<b>41,94</b>
0,60	<b>-10,72</b>	-1,36	17,06	33,71	9,36	15,70	16,65	<b>41,71</b>
0,90	<b>-8,89</b>	-0,28	17,50	33,74	8,61	17,22	16,24	<b>42,07</b>
1,24	<b>-6,18</b>	1,11	18,25	33,77	7,29	17,14	15,52	<b>39,95</b>
1,86	<b>-0,72</b>	4,13	20,16	33,84	4,85	16,03	13,69	<b>34,56</b>
2,39	<b>7,12</b>	9,15	22,43	34,02	2,04	13,27	11,60	<b>26,91</b>
2,71	<b>9,18</b>	10,54	23,20	34,07	1,37	12,65	10,88	<b>24,90</b>

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, proud 8,5 A, 4 A a 2,5 A

Pztr. (W)	T1s (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3h (°C)	Δ Tp1 (°C)	Δ Tp2 (°C)	Δ Tp3 (°C)	Δ T (°C)
0,00	<b>-14,02</b>	3,87	26,55	34,02	17,89	22,68	7,47	<b>48,04</b>
0,13	<b>-12,76</b>	4,75	27,43	34,18	17,51	22,67	6,75	<b>46,93</b>
0,30	<b>-12,27</b>	5,08	27,68	34,20	17,35	22,60	6,52	<b>46,46</b>
0,60	<b>-9,87</b>	6,42	28,43	34,30	16,29	22,01	5,87	<b>44,17</b>
0,84	<b>-7,65</b>	7,91	29,31	34,38	15,57	21,39	5,08	<b>42,04</b>
1,20	<b>-3,79</b>	10,47	30,78	34,59	14,25	20,31	3,81	<b>38,38</b>
1,68	<b>-0,56</b>	12,43	31,88	34,80	12,99	19,46	2,91	<b>35,36</b>
2,15	<b>3,77</b>	14,87	33,25	35,00	11,11	18,38	1,75	<b>31,24</b>
2,45	<b>6,45</b>	16,86	34,28	35,11	10,41	17,42	0,82	<b>28,66</b>
2,74	<b>8,82</b>	18,20	35,13	35,16	9,38	16,93	0,03	<b>26,34</b>

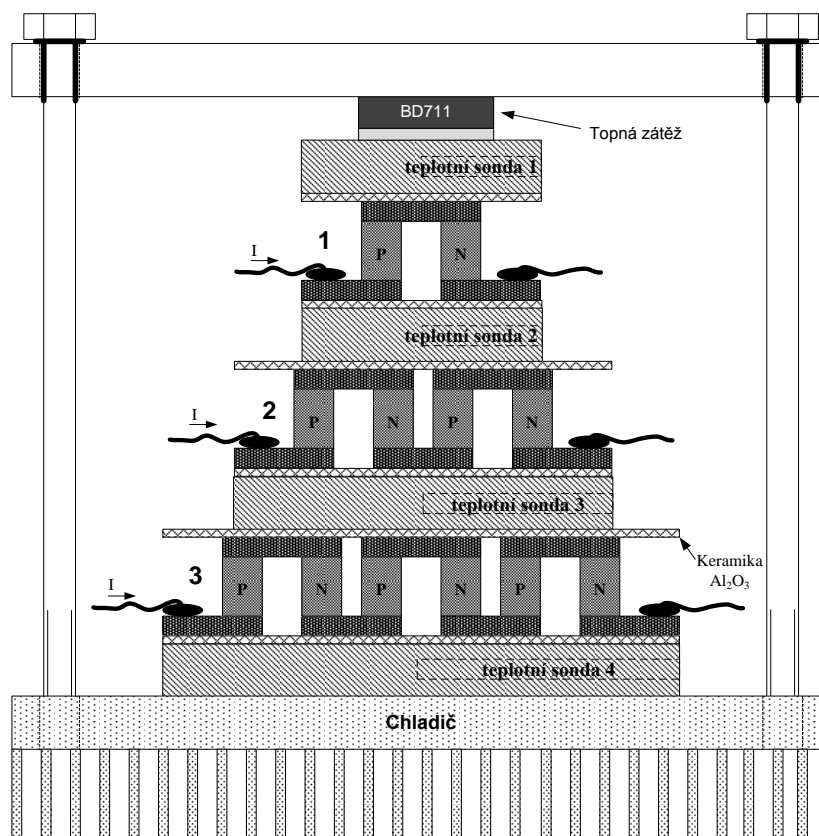
Kompletní naměřené hodnoty pro jednotlivé napájecí proudy jsou uvedeny v tabulkách 9, 10 a 11. Dosažené hodnoty kaskády tří totožných článků jsou v porovnání teplotních parametrů o jednotky °C horší proti měření na kaskádě dvou článků. Podobně je kaskáda se dvěma články dosaženými hodnotami srovnatelná s článkem samostatným. Je to kvůli velkému množství tepla, které se tvoří průchodem proudy jednotlivými články, čímž dochází k zatěžování kaskády, aniž by odváděla ztrátový výkon ze součástky.

Jelikož jsou články totožné, nelze na nich nastavováním pracovního proudu vytvořit dostatečně velké odstupy pro přenos předešlých ztrátových výkonů, a tím ani dosáhnout lepších hodnot. Tím se tedy prokazuje neefektivnost tohoto použití, protože je nutné dodávat velký příkon kaskádě, která má téměř identické parametry jako samostatný článek.

### 5.3 Kaskáda Peltierových článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140

Konstrukce kaskády s třemi odlišně velikými a výkonnými články s sebou přináší větší výkonové odstupňování mezi jednotlivými články, a nemělo by tedy docházet k výraznému zahřívání vlivem ztrátového výkonu samotných článků. Respektive k zahřívání vlivem průchodu proudy jistě docházet bude, ale každý nižší stupeň by měl být schopen všechny ztrátový výkon přenést. Určitou výhodou se také jeví možnost sériového řazení v oblasti napájení. Pokud je kaskáda správně navržena, je možné dodávat všem článkům stejný napájecí proud. Uspořádání tohoto typu má také nevýhody, například spojení jednotlivých článků do pravidelné pyramidy. Uspořádání jednotlivých částí a měřicích sond bylo obdobné jako u předchozích měření, konstrukční uspořádání je zobrazeno na obrázku 12.

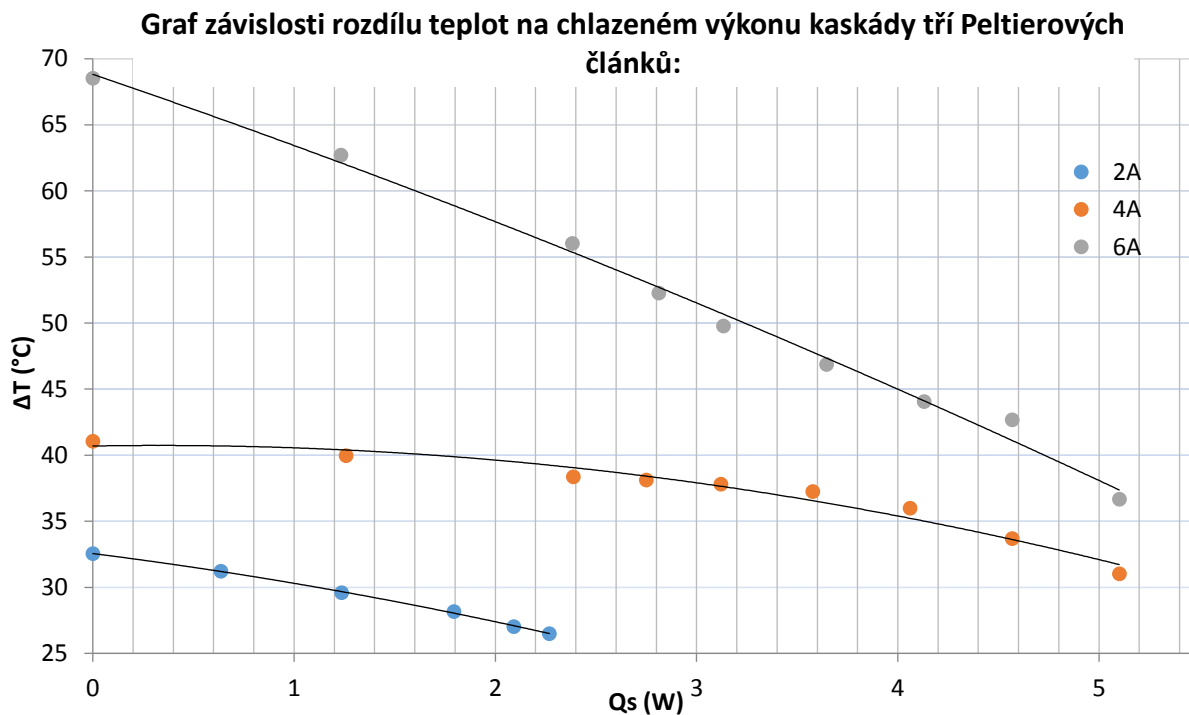




Obrázek 12 - Konstrukce pro měření kaskády tří různých článků

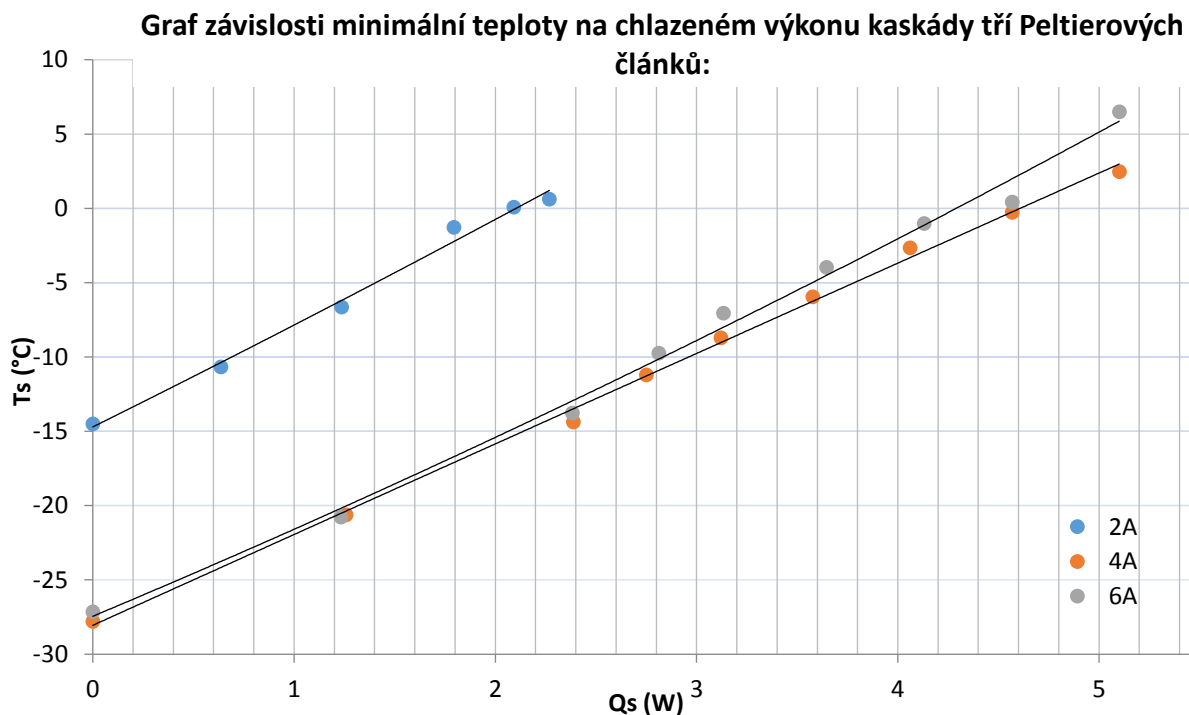
Napájecí proud celé kaskády byl limitován maximálním napájecím proudem nejmenšího článku, tj. 8,5 A. Měření bylo provedeno při napájecích proudech od 2 A do 8 A, přičemž od 7 A docházelo k přehřívání posledního článku v soustavě a ten nebyl schopen přenést ztrátový výkon ani při nezátíženém stavu, tedy bez chlazené součástky.

Určitý vliv na to má i použitý chladič ČKD, který byl svým tepelným odporem navržen pro odvod celkově menších ztrátových výkonů. Pyramidová kaskáda má celkově mnohem větší příkon než kaskáda předešlá, a tudíž samotné Peltierovy články vytváří mnoho tepla a chladič se při vyšších napájecích proudech zahříval až na hodnoty kolem 50 °C. I přesto budou výsledky porovnány s předchozími měřeními, jelikož teplotní rozdíl, který je kaskáda schopna vytvořit, by měl být stále stejný. Naměřené průběhy pro napájení 2 A, 4 A a 6 A jsou zobrazeny v grafu 14.



Graf 14- Závislost teplotního rozdílu na chladičím výkonu kaskády článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1- 127140

Z grafu jsou patrné velké odstupy mezi jednotlivými pracovními body, jichž u kaskády totožných článků dosaženo nebylo. Zároveň je dosaženo velkého teplotního rozdílu při maximálním napájení a jeho následný pokles je téměř lineární.



Graf 15- Závislost minimální teploty na chladičím výkonu kaskády článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1- 127140

Nižších teplot chlazené součástky dosahoval téměř při celém měření pracovní bod 4 A, což je opět způsobeno nadměrným zahříváním článků při vyšších proudech, a také vyšší teplotou chladiče. I přesto jsou minimální teploty na chlazené straně až o cca 14 °C nižší než u kaskády tří totožných článků. Lepší chladicí schopnosti jsou však na úkor velkého příkonu, a to 38,8 W při napájecím proudu 4 A. Pro porovnání měla kaskáda tří stejných článků při dosažení nejnižší teploty příkon 11,24 W, přičemž bylo dosaženo nejnižší teploty -14,02 °C. Podrobné naměřené hodnoty jsou uvedeny dle napájecích proudů v tabulkách 12, 13 a 14.

Tabulka 12 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140 při proudu 2 A

Pztr. (W)	T1s (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3h (°C)	Δ Tp1 (°C)	Δ Tp2 (°C)	Δ Tp3 (°C)	Δ T (°C)
0,00	<b>-14,51</b>	-4,38	13,82	26,81	10,13	9,44	12,99	<b>32,56</b>
0,64	<b>-10,67</b>	-3,17	14,13	26,88	7,50	10,96	12,76	<b>31,22</b>
1,24	<b>-6,65</b>	-1,98	14,44	26,91	4,66	12,45	12,47	<b>29,59</b>
1,79	<b>-1,29</b>	-0,07	15,00	27,04	1,21	14,93	12,04	<b>28,18</b>
2,09	<b>0,08</b>	0,34	15,11	27,12	0,26	14,77	12,01	<b>27,04</b>
2,27	<b>0,62</b>	0,52	15,18	27,12	-0,10	14,67	11,93	<b>26,49</b>

Tabulka 13 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140 při proudu 4 A

Pztr. (W)	T1s (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3h (°C)	Δ Tp1 (°C)	Δ Tp2 (°C)	Δ Tp3 (°C)	Δ T (°C)
0,00	<b>-27,78</b>	-9,02	17,01	31,32	18,76	7,99	14,30	<b>41,06</b>
1,26	<b>-20,62</b>	-6,34	18,25	32,04	14,28	11,91	13,79	<b>39,98</b>
2,39	<b>-14,38</b>	-4,22	19,07	32,45	10,15	14,85	13,38	<b>38,38</b>
2,75	<b>-11,21</b>	-2,91	19,64	32,73	8,30	16,73	13,09	<b>38,12</b>
3,12	<b>-8,71</b>	-1,90	20,03	32,91	6,80	18,12	12,89	<b>37,81</b>
3,58	<b>-5,95</b>	-0,95	20,31	33,20	5,00	19,36	12,89	<b>37,25</b>
4,06	<b>-2,65</b>	0,34	20,78	33,35	2,99	20,44	12,58	<b>36,01</b>
4,57	<b>-0,26</b>	1,14	21,03	33,43	1,39	19,90	12,40	<b>33,69</b>
5,10	<b>2,48</b>	1,94	21,29	33,51	-0,54	19,36	12,22	<b>31,03</b>

Tabulka 14 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140 při proudu 6 A

Pztr. (W)	T1s (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T3h (°C)	Δ Tp1 (°C)	Δ Tp2 (°C)	Δ Tp3 (°C)	Δ T (°C)
0,00	<b>-27,14</b>	7,73	38,15	41,39	34,87	30,41	3,25	<b>68,53</b>
1,23	<b>-20,77</b>	10,29	39,28	41,96	31,06	28,99	2,68	<b>62,73</b>
2,38	<b>-13,76</b>	13,22	40,39	42,27	26,98	27,17	1,88	<b>56,03</b>
2,81	<b>-9,74</b>	15,21	41,16	42,53	24,95	25,95	1,37	<b>52,27</b>
3,13	<b>-7,06</b>	16,45	41,65	42,73	23,51	25,21	1,08	<b>49,79</b>
3,65	<b>-3,97</b>	17,71	42,09	42,92	21,68	24,38	0,82	<b>46,88</b>
4,13	<b>-1,03</b>	18,87	42,45	43,04	19,90	23,58	0,59	<b>44,07</b>
4,57	<b>0,41</b>	19,51	42,63	43,10	19,10	23,12	0,46	<b>42,68</b>
5,10	<b>6,50</b>	21,78	43,30	43,17	15,28	21,52	-0,13	<b>36,68</b>

Teplotní průběhy a rozdíly na jednotlivých člancích pro všechna výše uvedená měření na kaskádách jsou zobrazeny v grafech, které se nacházejí v přílohách, kapitola 8.

---

## 6 Závěr

Cíl této bakalářské práce byl navrhnout a realizovat kaskádu tří totožných Peltierových článků, a s nimi dosáhnout poklesu teploty o přibližně 30 °C na každý stupeň. Na realizované kaskádě bylo dosaženo nejnižší teploty chlazené součástky -14,02 °C při nulovém chladicím výkonu a napájecích proudech 8,5 A, 4 A a 2,5 A. Když byl z chlazené součástky odváděn ztrátový výkon 1 W, kaskáda dokázala ochladit danou součástku na teplotu cca -8 °C, a to s napájecími proudy 8,5 A, 3,5 A a 2 A. Dosažené hodnoty jsou obdobné jako u jednoho článku, přičemž kaskáda má značně vyšší příkon. Z naměřených hodnot tedy vyplývá, že provoz navržené kaskády není efektivní. Z důvodů „přehřívání“ jednotlivých článků nebylo možné zvolit napájecí proudy tak, aby byly teplotní rozdíly na jednotlivých článcích stejné. Nelze však tvrdit, že kaskáda stejných článků je obecně neefektivní. V daném případě nebylo možné mezi jednotlivými články vytvořit dostatečný výkonový odstup, a proto se kaskáda „přehřívala“. Je však možné, že s použitím výkonnějších článků by bylo možné vytvořit větší výkonové odstupy, a tedy by i poslední článek zvládl přenést všechny výkon na chladič. Daná kaskáda tedy není vhodná pro chlazení součástek, ale lze ji využít například jako teplotní referenci pro nízké teploty.

Provedené výpočty se od naměřených teplotních parametrů kaskády zásadně lišily. Odlišnosti naměřených a vypočtených hodnot byly přiřazeny faktorům, které měření zhoršují, a ve výpočtech nebyly zohledněny. Konkrétně se jednalo o neideální chladič, měřicí plošky mezi jednotlivými články, a také nespécifikovaný únik tepla do okolí. Byla tedy snaha zpětně najít korekční faktory pro zkvalitnění vypočtených hodnot. Jednotlivé křivky byly porovnávány na základě jejich směrnic, z nich byly zjištěny korekční hodnoty. Korekce byla provedena dle rovnice 4.5.15, do které byly dosazovány hodnoty z tabulky 5. V současném stádiu jsou tedy známé odchylky výpočtů a jejich korekce, případné zjištění přesných příčin nepřesností by vyžadovalo detailnější zkoumání.

Dosažené výsledky měly být porovnány s prací p. Bednáře, tedy s kaskádou odlišných článků. Měření na pyramidě probíhalo za totožných podmínek jako měření kaskády stejných článků. Kaskáda odlišně velkých článků vykazuje velké výkonové odstupy, a proto jednotlivé články dokáží vytvořit větší teplotní rozdíly mezi svými konci. Danou kaskádou bylo dosaženo nejnižší teploty chlazené součástky -27,78 °C při nulovém chladicím výkonu, s napájecím proudem 4 A. Se stejným pracovním bodem bylo dosaženo nejnižší teploty cca -22 °C, kdy byl kaskádou odváděn výkon 1 W. Použité články by bylo možné napájet vyšším proudem, ale dalším zvyšováním proudu docházelo k většímu ohřevu celé kaskády, a tím ke zvýšení teploty na jejím konci. Ze srovnání daných kaskád vychází lépe právě pyramida, na níž lze zvolit pracovní bod tak, že je na jednotlivých článcích stejný teplotní rozdíl. Tohoto stavu bylo dosaženo při měření s napájecím proudem 4 A, kdy při ztrátovém výkonu cca 1,5 W byly rozdíly teplot na jednotlivých článcích téměř totožné, a to cca 14 °C.

---

## 7 Použitá literatura

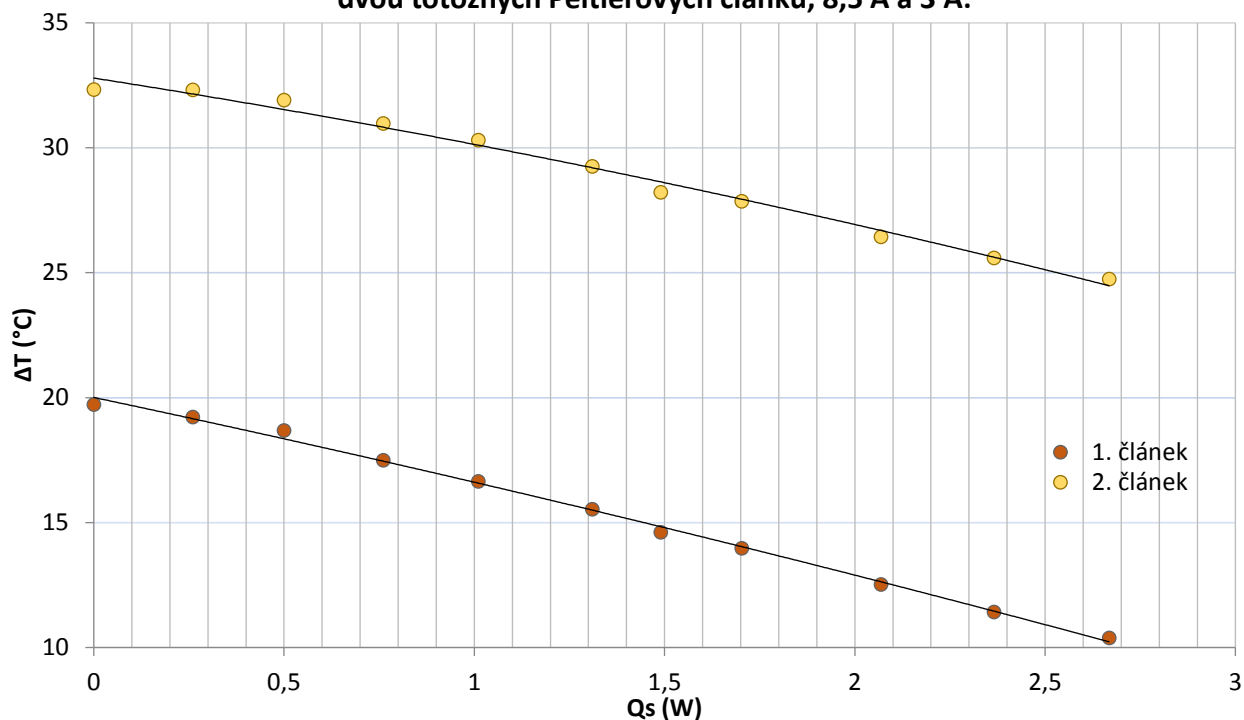
- [1] VŠCHT Praha: Termoelektrický jev, (2017-02-17), Dostupné z:  
<https://old.vscht.cz/fch/pokusy/21.html>
- [2] E-konstruktor: Termočlánky: konstrukce, využití a konstrukce, (2017-01-22), Dostupné z:  
<http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>
- [3] Reichl, J., Všetická, M.: Seebeckův jev, (2016-11-5), Dostupné z:  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [4] Bureš, J.: Seebeckův jev, (2017-02-11), Dostupné z:  
<http://www.converter.cz/tabulky/seebeck.htm>
- [5] Reichl, J., Všetická, M.: Peltierův jev, (2016-10-8), Dostupné z:  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/911-peltieruv-jev>
- [6] BRÁZDIL, Marian. Peltierův článek pro chlazení malých výkonů. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně.[cit. 2016-02-21]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php), 2009.
- [7] Dřínek, M.: Peltierovy termobaterie, (2017-02-07), Dostupné z:  
<http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>
- [8] <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.601-011.1.pdf>

## 8 Přílohy

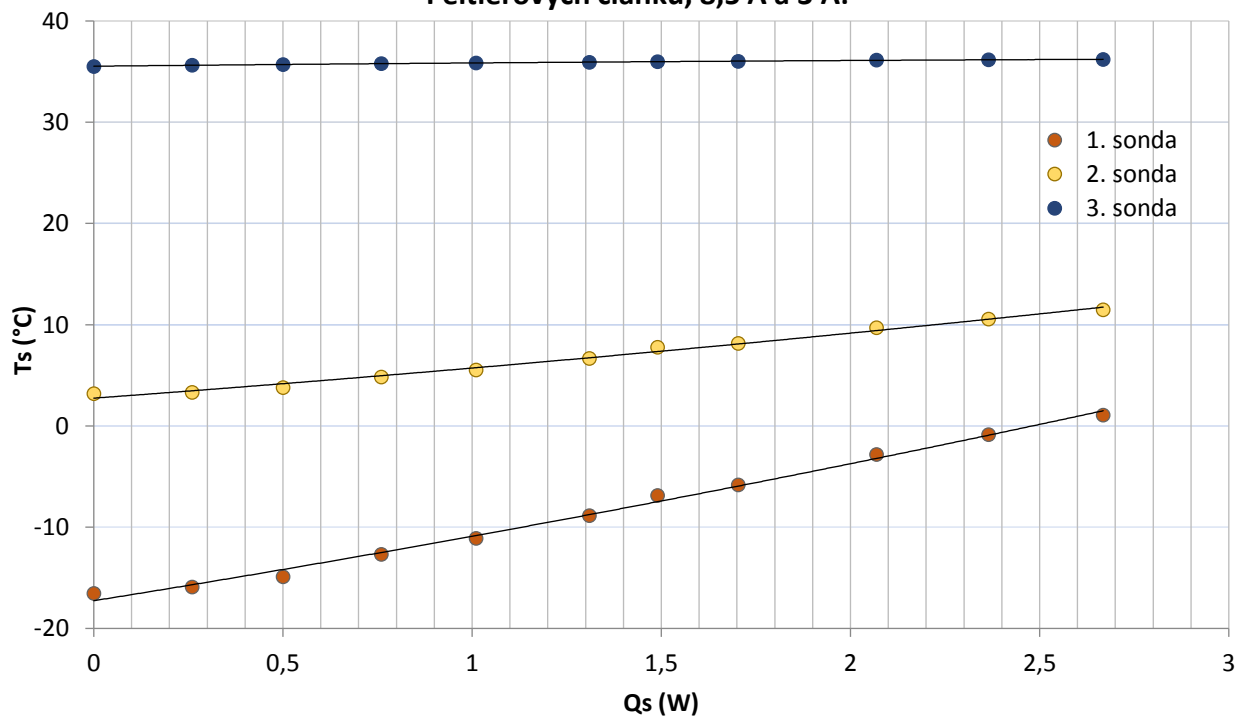
### 8.1 Teplotní průběhy na kaskádě dvou Peltierových článků TEC1-01708

#### 8.1.1 Napájecí proudy: 8,5 A a 3 A

Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády dvou totožných Peltierových článků, 8,5 A a 3 A:

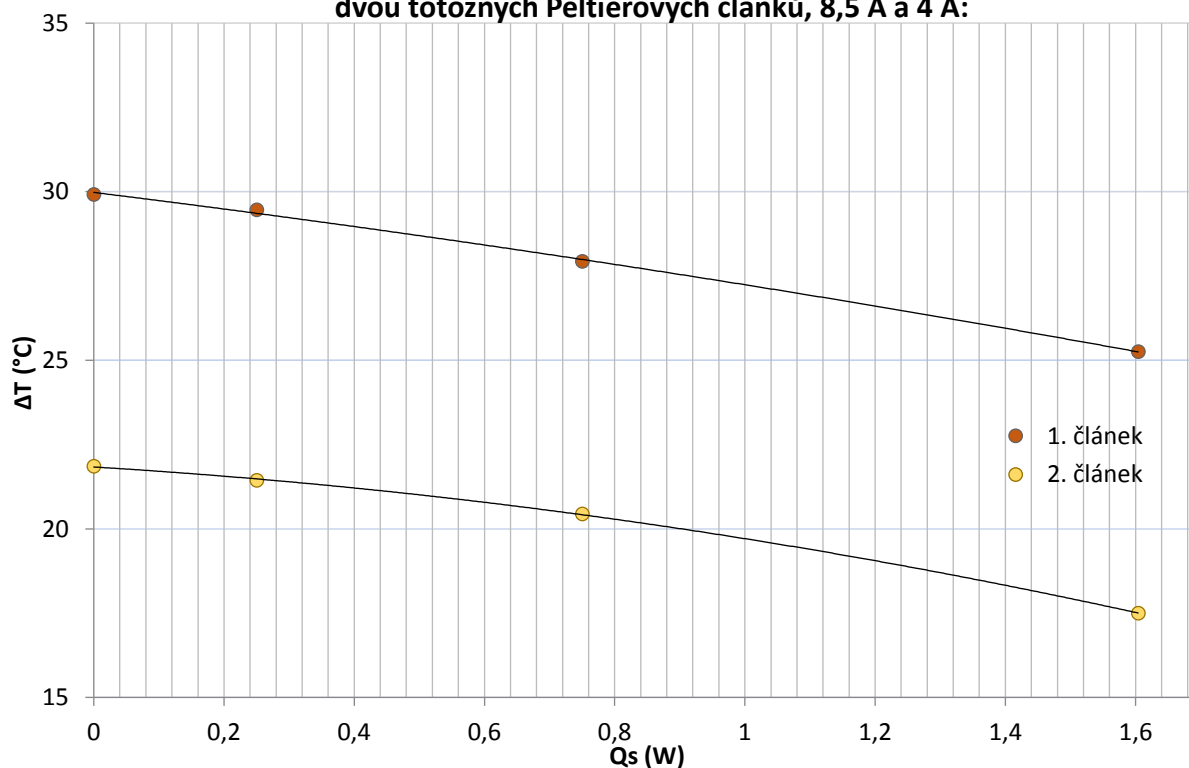


Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády dvou totožných Peltierových článků, 8,5 A a 3 A:

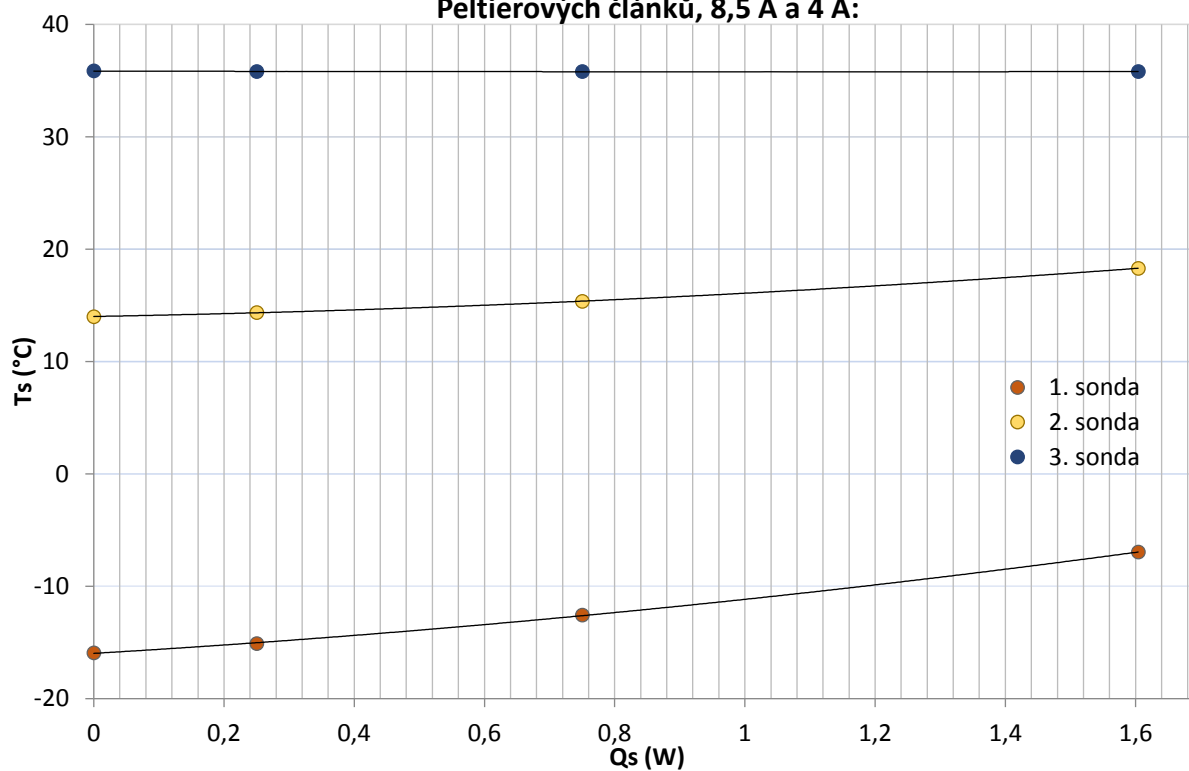


## 8.1.2 Napájecí proudy: 8,5 A a 4 A

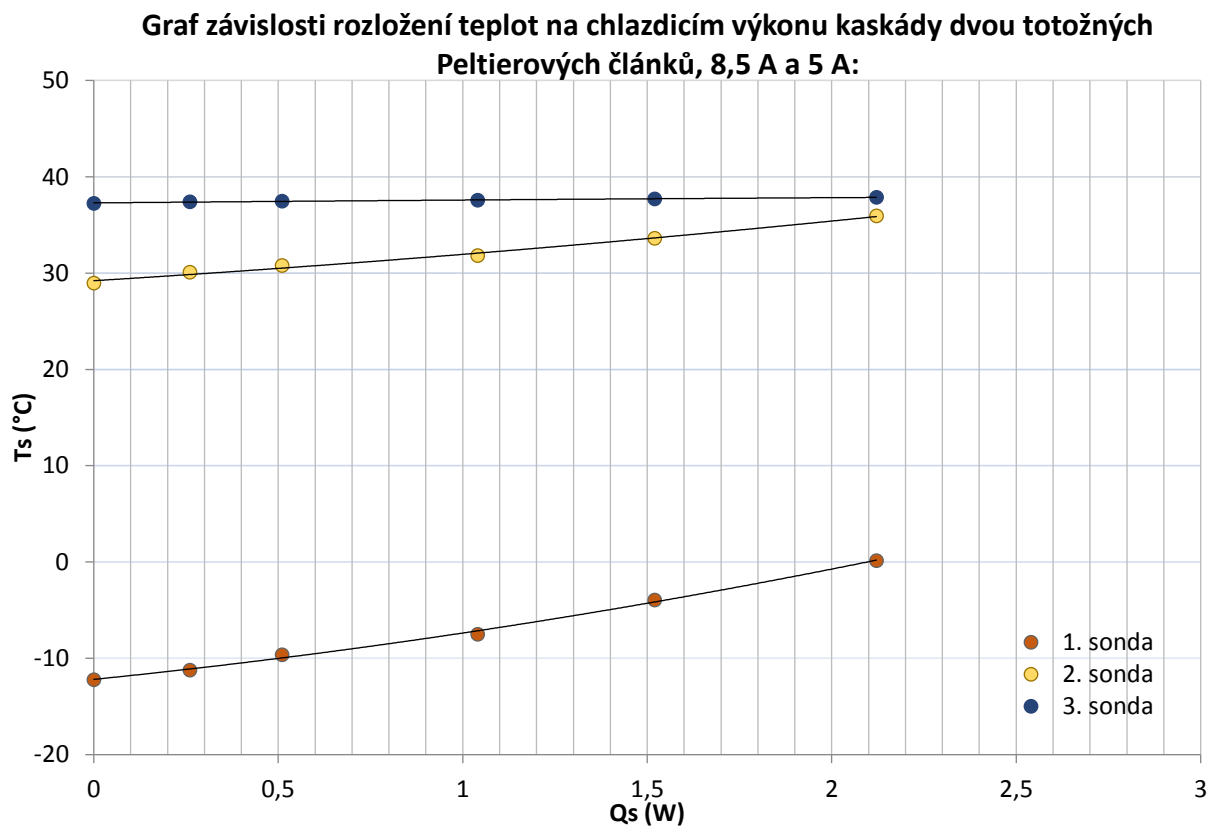
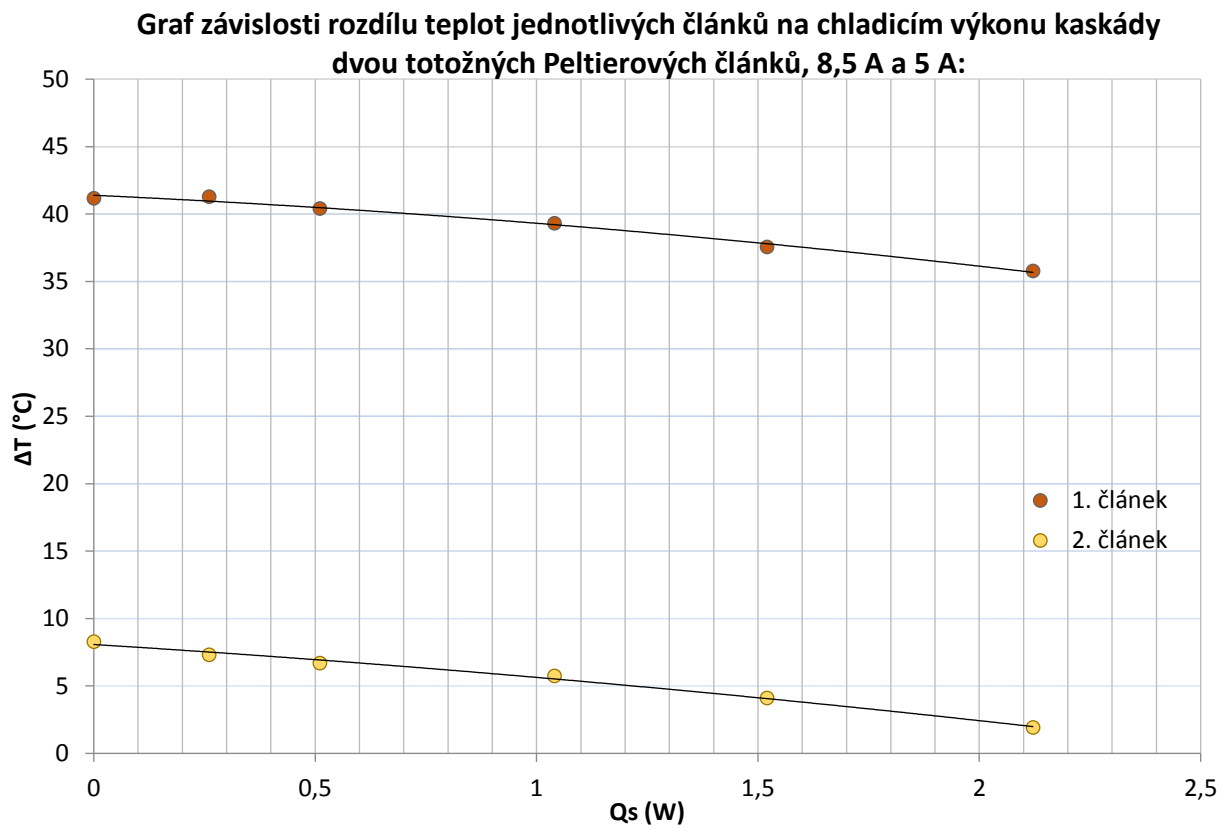
Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády dvou totožných Peltierových článků, 8,5 A a 4 A:



Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády dvou totožných Peltierových článků, 8,5 A a 4 A:



### 8.1.3 Napájecí proudy: 8,5 A a 5 A

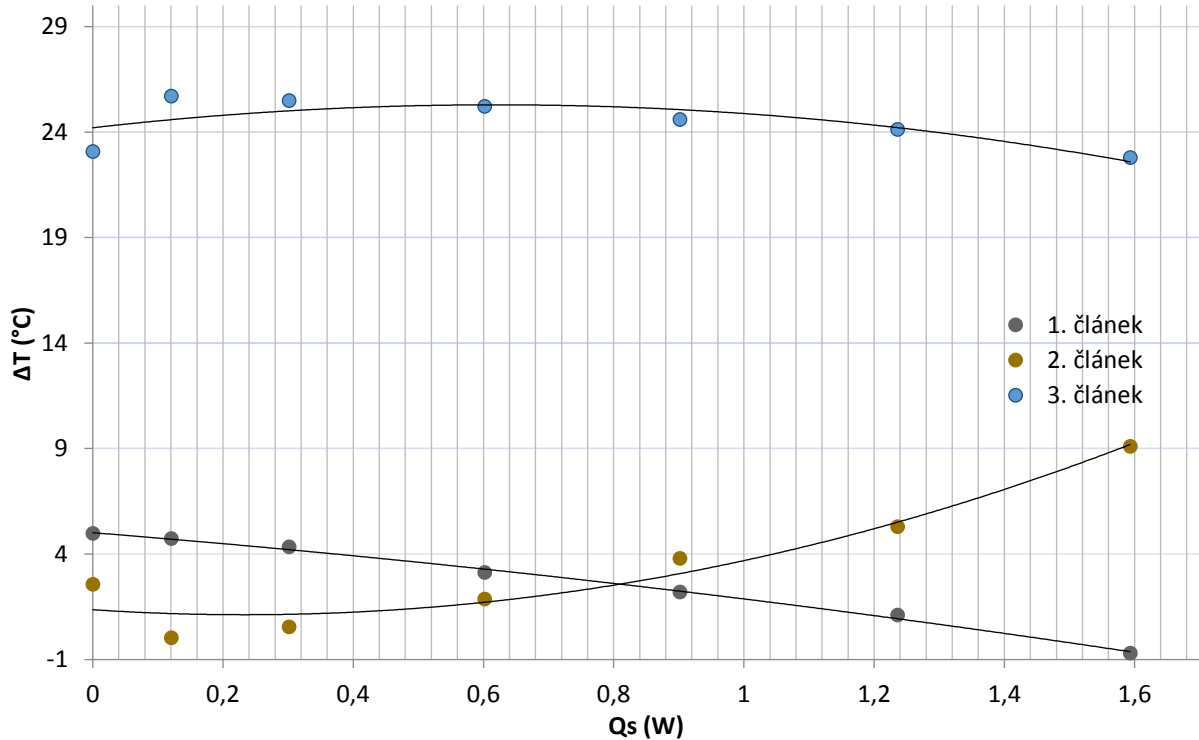




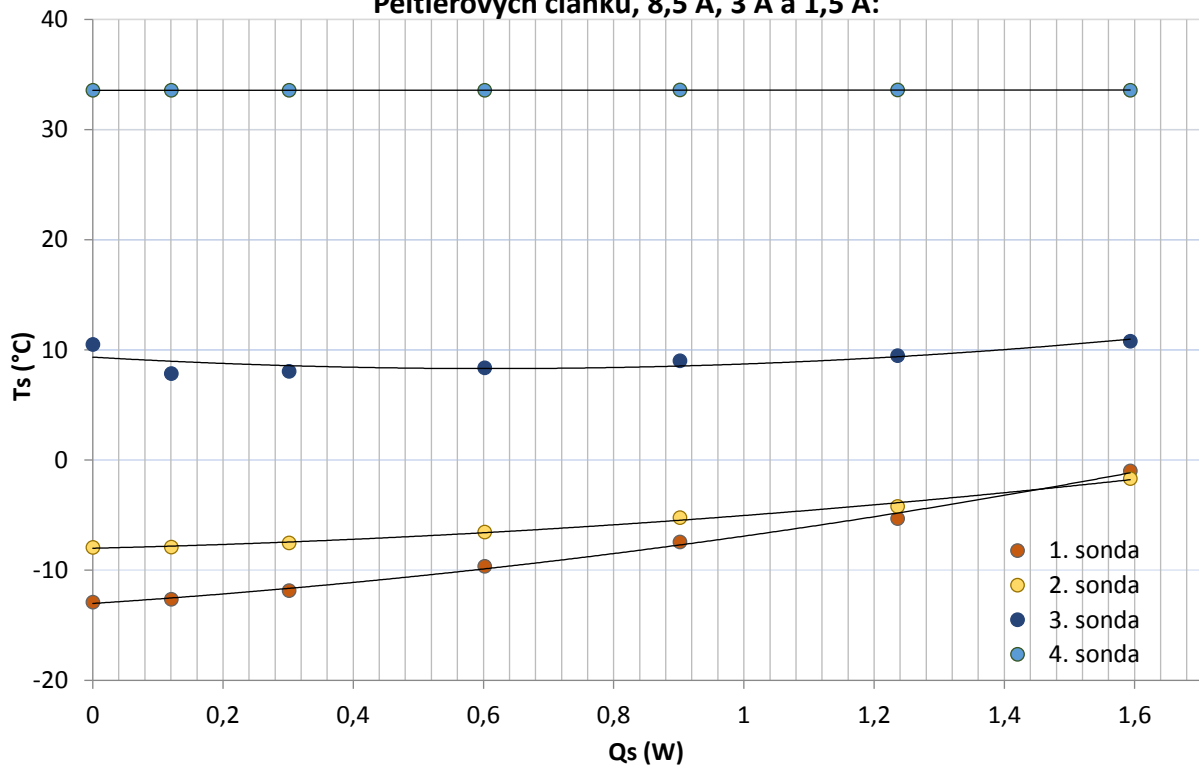
## 8.2 Teplotní průběhy na kaskádě tří Peltierových článků TEC1-01708

### 8.2.1 Napájecí proudy: 8,5 A, 3 A a 1,5 A

Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády tří totožných Peltierových článků, 8,5 A, 3 A a 1,5 A:

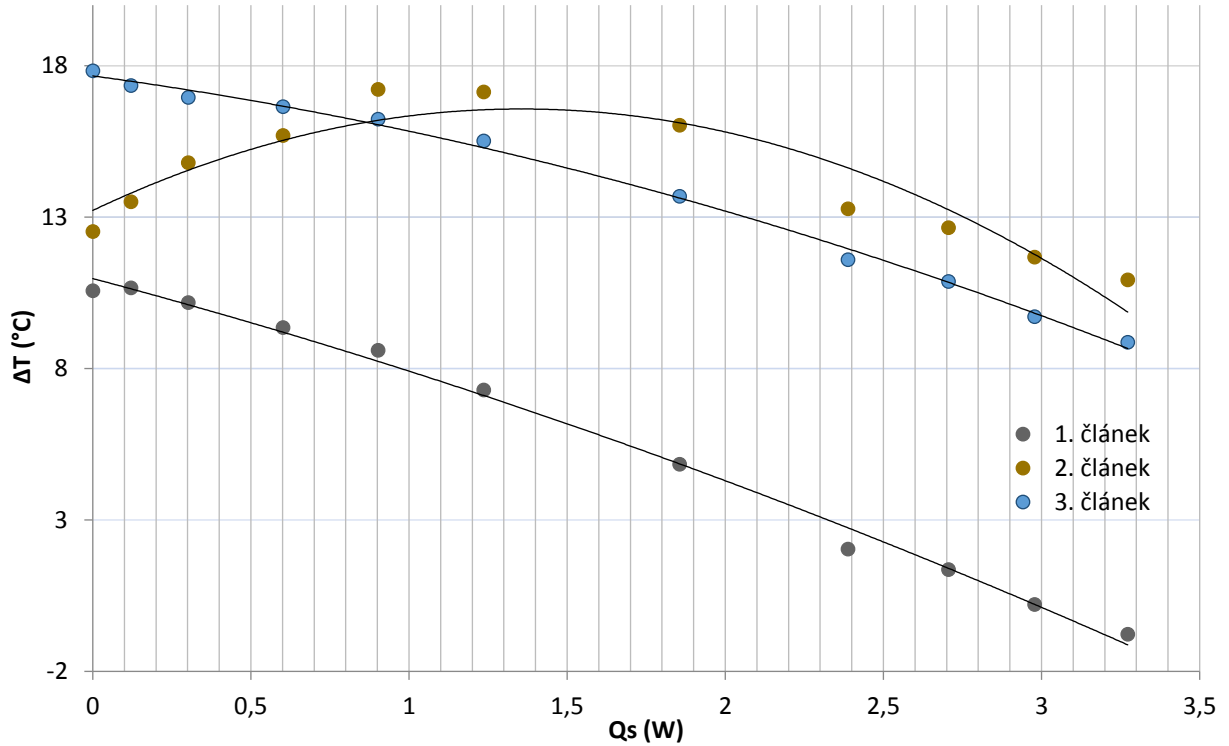


Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády tří totožných Peltierových článků, 8,5 A, 3 A a 1,5 A:

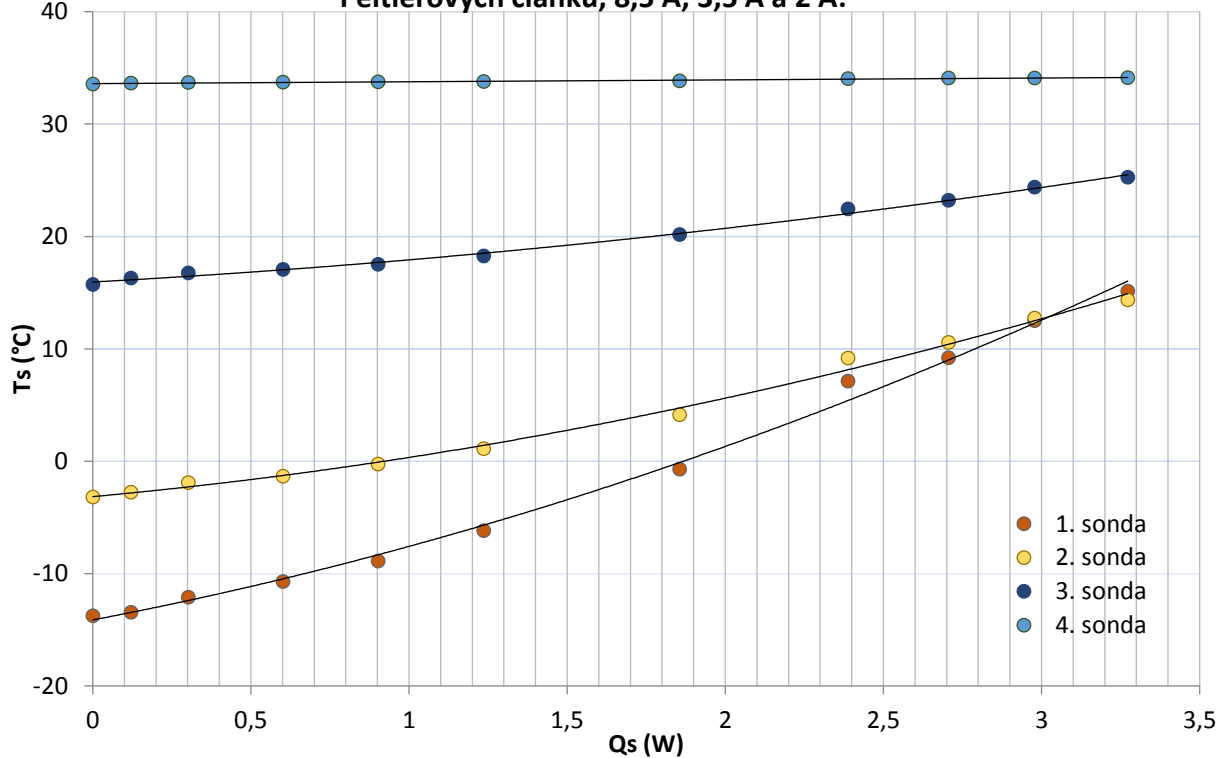


## 8.2.2 Napájecí proudy: 8,5 A, 3,5 A a 2 A

Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády tří totožných Peltierových článků, 8,5 A, 3,5 A a 2 A:

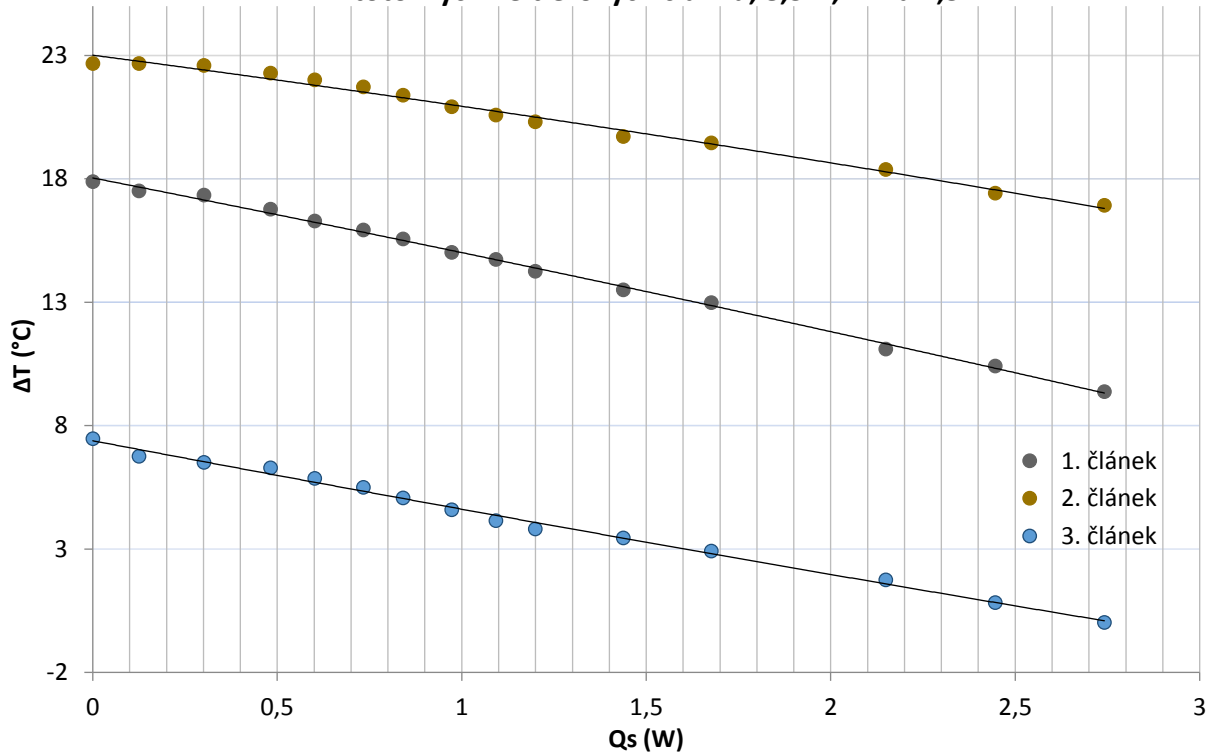


Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády tří totožných Peltierových článků, 8,5 A, 3,5 A a 2 A:

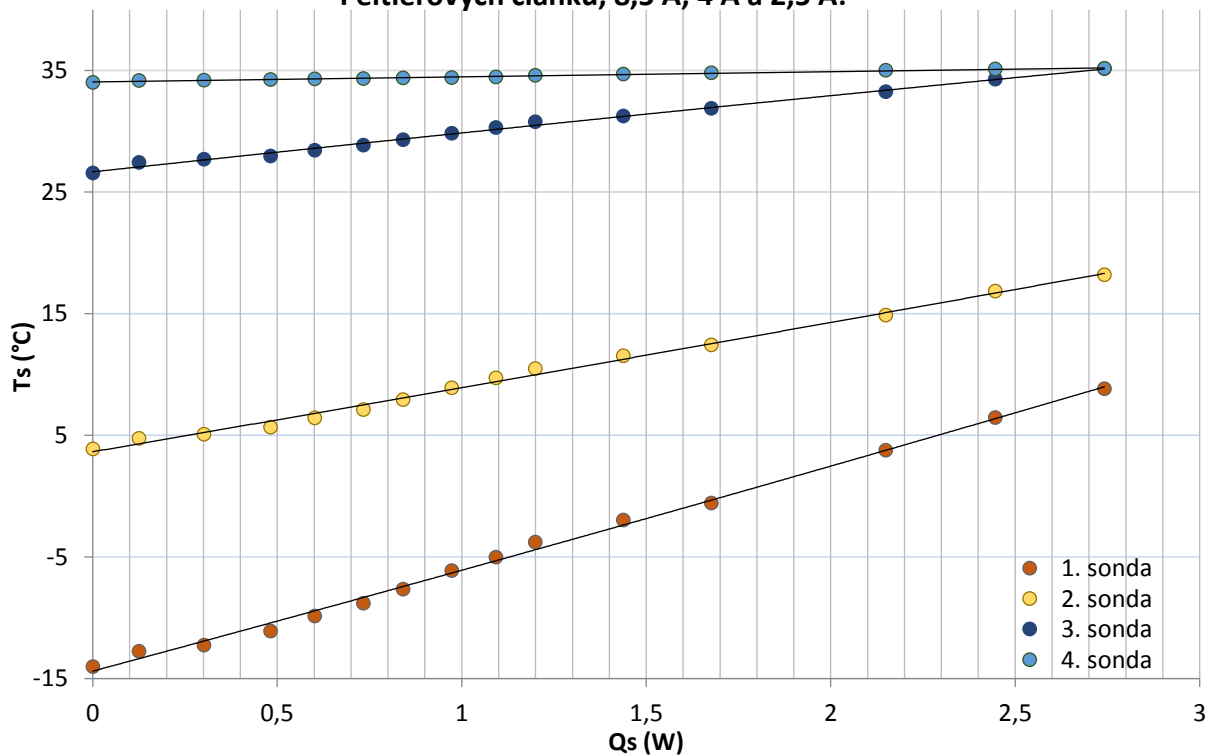


### 8.2.3 Napájecí proudy: 8,5 A, 4 A a 2,5 A

Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády tří totožných Peltierových článků, 8,5 A, 4 A a 2,5 A:



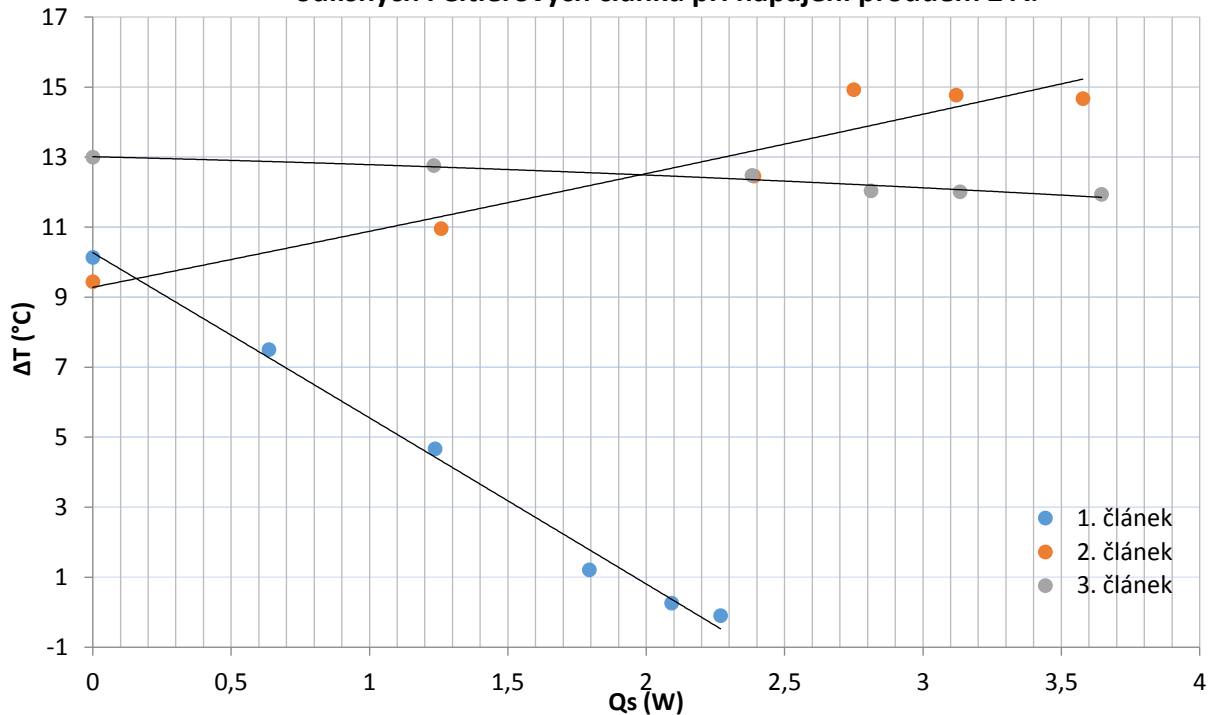
Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády tří totožných Peltierových článků, 8,5 A, 4 A a 2,5 A:



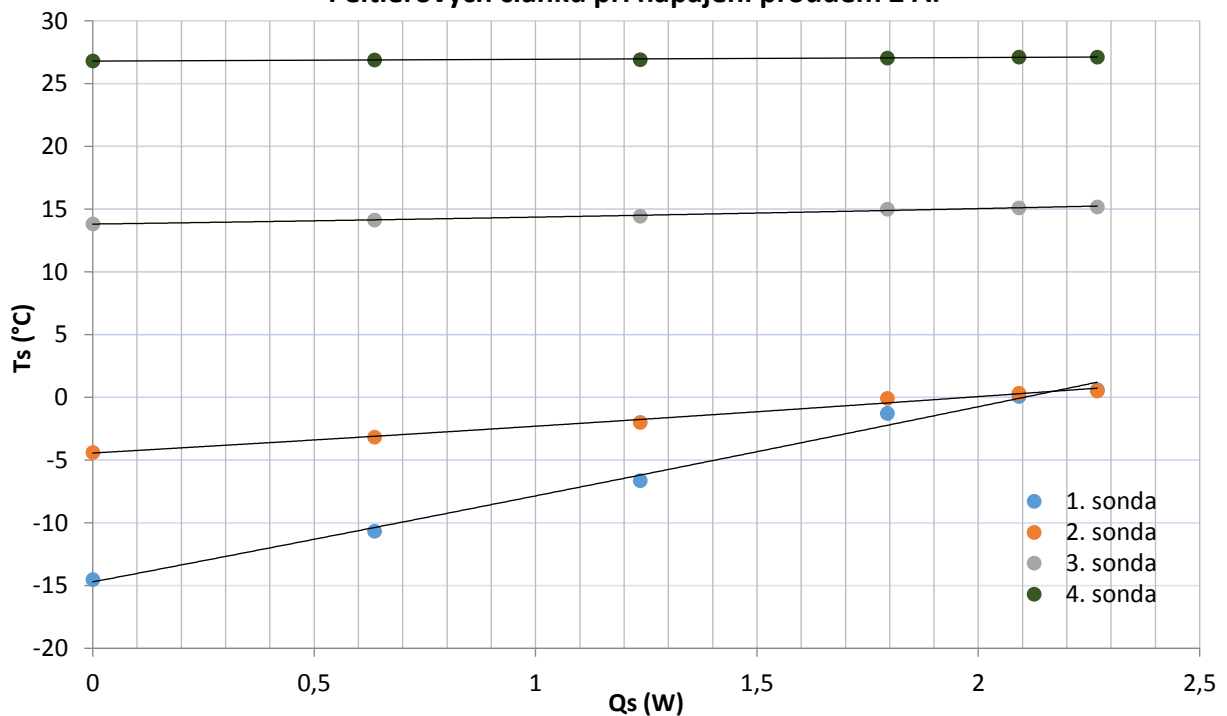
### 8.3 Teplotní průběhy na kaskádě Peltierových článků TEC1-01708, TEC1-7108 a TEC1-127140

#### 8.3.1 Napájecí proud: 2 A

Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády tří odlišných Peltierových článků při napájení proudem 2 A:

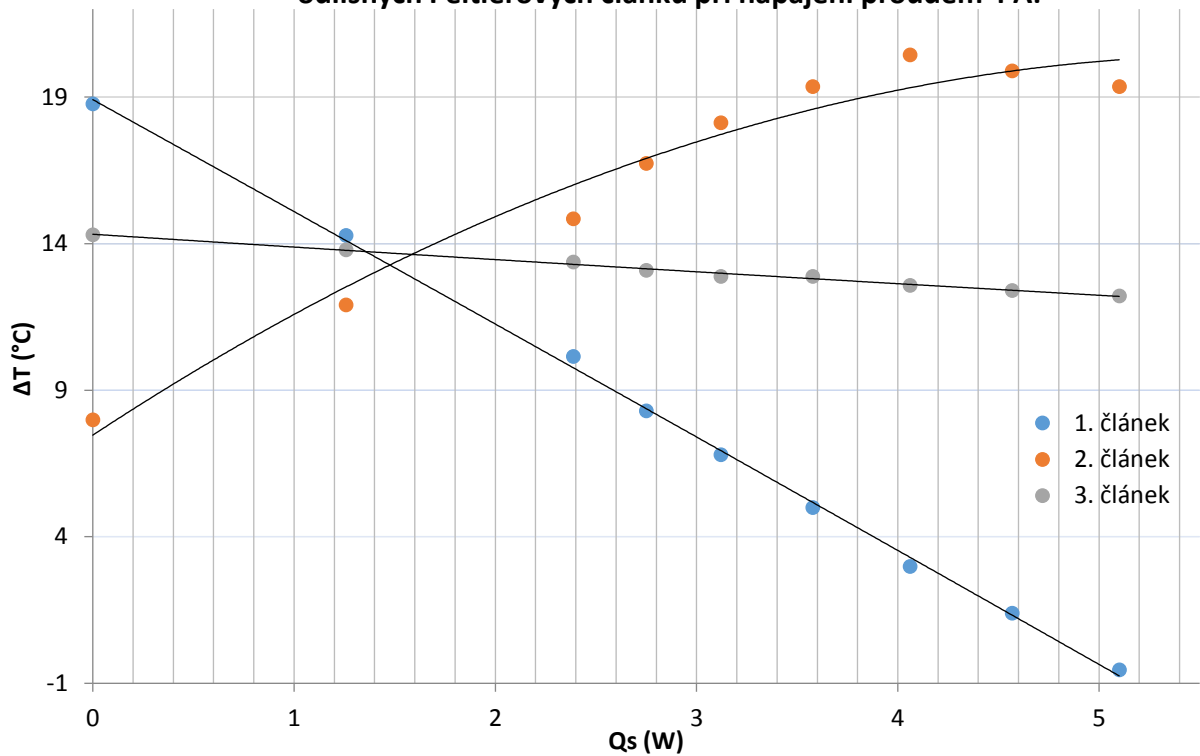


Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády tří odlišných Peltierových článků při napájení proudem 2 A:

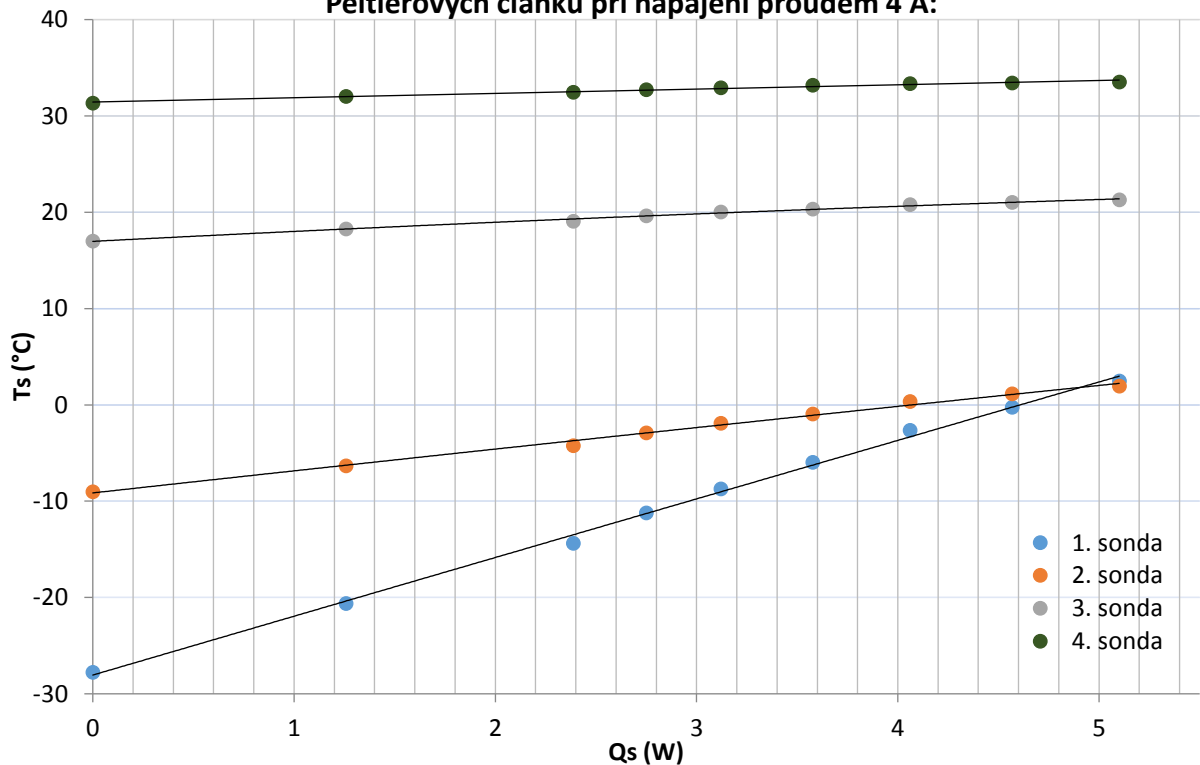


### 8.3.2 Napájecí proud: 4 A

Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády tří odlišných Peltierových článků při napájení proudem 4 A:

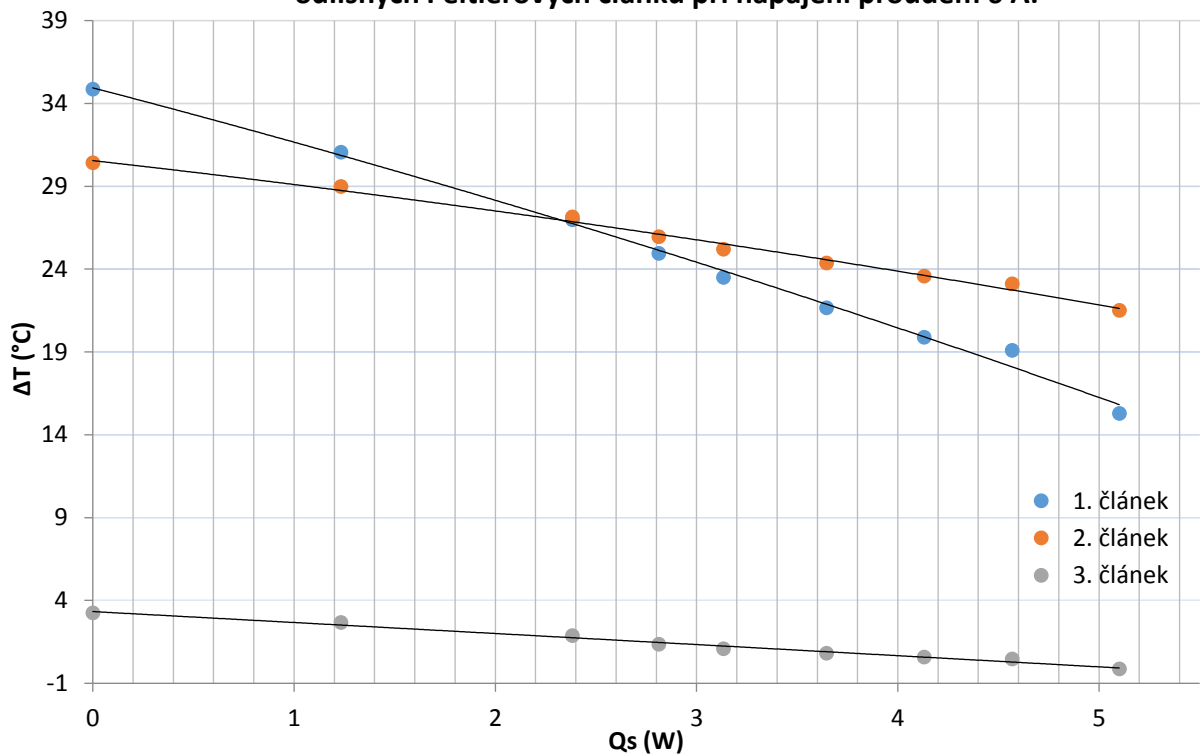


Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády tří odlišných Peltierových článků při napájení proudem 4 A:

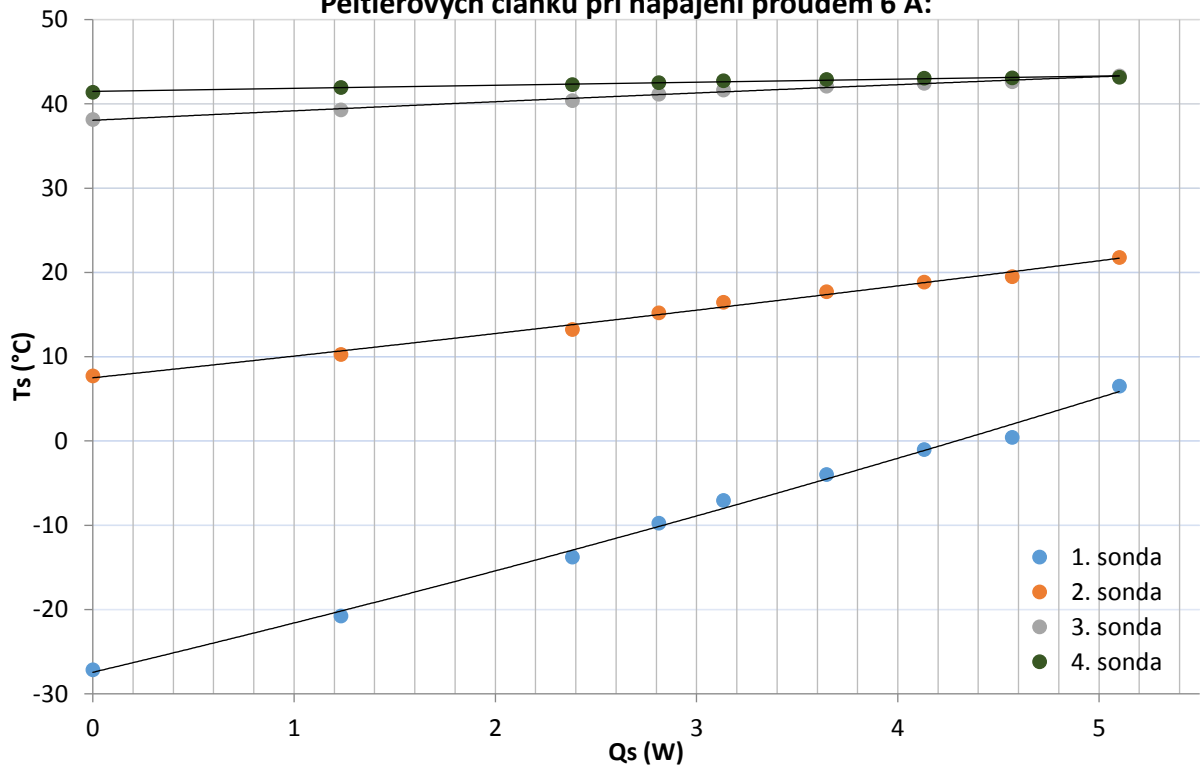


### 8.3.3 Napájecí proud: 6 A

Graf závislosti rozdílu teplot jednotlivých článků na chladicím výkonu kaskády tří odlišných Peltierových článků při napájení proudem 6 A:



Graf závislosti rozložení teplot na chladicím výkonu kaskády tří odlišných Peltierových článků při napájení proudem 6 A:



---

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schematická značka termočlánku .....	8
Obrázek 2 - Seebeckův jev na termočlánku .....	9
Obrázek 3 - Peltierův jev na termočlánku .....	10
Obrázek 4 - Princip Peltierova článku .....	10
Obrázek 5 - Řez Peltierovým článkem .....	11
Obrázek 6 – Kaskáda tří odlišných článků .....	11
Obrázek 7 - Měřicí přípravek .....	13
Obrázek 8 - Konstrukční uspořádání pro měření příkonu v závislosti na teplotním rozdílu Peltierova článku TEC1- 1708 .....	19
Obrázek 9 - Schéma tepelné zátěže s BD711 .....	20
Obrázek 10 - DPS tepelné zátěže s BD711 .....	20
Obrázek 11 - Konstrukční uspořádání pro měření teplotního rozdílu Peltierova článku TEC1-01708 v závislosti na chladicím výkonu .....	22
Obrázek 12 - Konstrukce pro měření kaskády tří různých článků .....	33

## 10 Seznam grafů

Graf 1 - V-A charakteristika Peltierových článků TEC1-01708 .....	14
Graf 2 - Závislost rozdílu teplot na proudu Peltierových článků TEC1-01708.....	15
Graf 3 - Závislost příkonu Peltierova článku TEC1-01708 na rozdílu teplot.....	19
Graf 4 – Závislost odporu PT1000 na teplotě vč. lineárního prokladu .....	21
Graf 5 - Závislost rozdílu teplot na chlazeném výkonu.....	22
Graf 6 - Porovnání modelace a měření závislosti teplot na chlazeném výkonu.....	23
Graf 7 - Graf závislosti rozdílu teplot na chlazeném výkonu, chladič s $R_{th} = 0,2 \text{ KW}^{-1}$ .....	24
Graf 8 - Závislost teploty chladné strany článku na chlazeném výkonu, porovnání výsledků s různými chladiči .....	25
Graf 9 - Porovnání modelace a měření závislosti teplot na chlazeném výkonu a následná korekce vypočtených hodnot, použitý chladič: $R_{th} = 0,2 \text{ KW}^{-1}$ .....	26
Graf 10 – Závislost rozdílu teplot na chladicím výkonu pro kaskádu dvou Peltierových článků TEC1-01708.....	28
Graf 11 - Závislost minimální teploty na chladicím výkonu pro kaskádu dvou Peltierových článků TEC1-01708.....	28
Graf 12 - Závislost teplotního rozdílu na chladicím výkonu kaskády tří totožných článků TEC1-01708 .	30
Graf 13 - Závislost minimální teploty na chladicím výkonu kaskády tří totožných článků TEC1-01708 .	31
Graf 14- Závislost teplotního rozdílu na chladicím výkonu kaskády článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1- 127140.....	34
Graf 15- Závislost minimální teploty na chladicím výkonu kaskády článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1- 127140.....	34

---

## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Teplotní rozsahy termočlánků [4] .....	9
Tabulka 2 - Parametry Peltierova článku TEC1-01708 [8] .....	16
Tabulka 3 - Výpočetní model, vyobrazení výpočtů pro jeden stupeň kaskády .....	18
Tabulka 4 - Teplotní závislost odporu PT1000 .....	21
Tabulka 5 - Korekční prvky modelu .....	27
Tabulka 6 - Naměřené hodnoty na kaskádě dvou článků TEC1-01708, proud 8,5 A a 3 A .....	29
Tabulka 7 - Naměřené hodnoty na kaskádě dvou článků TEC1-01708, proud 8,5 A a 4 A .....	29
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty na kaskádě dvou článků TEC1-01708, proud 8,5 A a 5 A .....	29
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, proud 8,5 A, 3 A a 1,5 A .....	31
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, proud 8,5 A, 3,5 A a 2 A .....	31
Tabulka 11 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, proud 8,5 A, 4 A a 2,5 A .....	32
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140 při proudu 2 A .....	35
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140 při proudu 4 A .....	35
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty na kaskádě tří článků TEC1-01708, TEC1-07108 a TEC1-127140 při proudu 6 A .....	35

## 12 Seznam rovnic

- (4.5.1) Výpočet maximálního chladičového výkonu
- (4.5.2) Výpočet maximálního chladičového výkonu pro  $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
- (4.5.3) Výpočet elektrického odporu jednoho chladičového segmentu Peltierova článku
- (4.5.4) Výpočet celkového elektrického odporu Peltierova článku
- (4.5.5) Vyjádření  $\alpha$  z derivované rovnice 4.5.1
- (4.5.6) Výpočet chladičového výkonu
- (4.5.7) Výpočet Jouleových ztrát vlivem průchodu proudu Peltierovým článkem
- (4.5.8) Výpočet vyzařovaného výkonu na teplé straně Peltierova článku z pracovního bodu
- (4.5.9) Výpočet vyzařovaného výkonu na teplé straně Peltierova článku z chladičového výkonu a příkonu
- (4.5.10) Výpočet příkonu Peltierova článku
- (4.5.11) Výpočet teplotního rozdílu na Peltierově článku
- (4.5.12) Výpočet účinnosti chlazení s Peltierovým článkem
- (4.5.13) Výpočet ztrátového výkonu chladičí soustavy tří Peltierových článků
- (4.5.14) Výpočet tepelného odporu chladiče
- (4.5.15) Rovnice pro korekci vypočtených hodnot