

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE**

PELTIERŮV ČLÁNEK PRO CHLAZENÍ MALÝCH VÝKONŮ

MICRO COOLING WITH PELTIER CELL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARIAN BRÁZDIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Brázdil Marian

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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

Peltierův článek pro chlazení malých výkonů

v anglickém jazyce:

Micro cooling with Peltier cell

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je problematika využití Peltierova článku pro chlazení malých výkonů se zaměřením na výpočetní techniku.

Cíle bakalářské práce:

1. Uvést přehled možných způsobů chlazení malých výkonů.
2. Popsat princip funkce Peltierova článku.
3. Uvést přehled typů článků včetně nejčastějších aplikací.
4. Provést návrh uplatnění Peltierova článku při chlazení procesoru stolního PC.

Seznam odborné literatury:

Firemní literatura výrobců Peltierových článků

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná práce obsahuje podrobný popis Peltierova článku, jeho princip a praktickou realizaci termoelektrického chlazení s Peltierovými články. Experimentální část práce se zabývá chlazením procesoru stolního počítače. Byl měřen průběh teploty na studené a teplé straně Peltierova článku v závislosti na vytížení procesoru. Naměřené teploty byly porovnány s konvenčním způsobem chlazení.

ABSTRACT

This work concerns detail description of thermoelectric cooling modules, principles and practical utilization of thermoelectric cooling modules. Experimental part of this work studies computer cooling. Distribution of temperature at the cold and hot side of the thermoelectric cooling module as a function of load of a processor was measured. The obtained temperatures were compared with the common cooling methods.

KLÍČOVÁ SLOVA

Termoelektrické chlazení, Peltierovy články, procesor, chlazení počítače

KEYWORDS

Thermoelectric Cooling, Thermoelectric Cooling Modules, Processor, Computer Cooling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRÁZDIL, Marian. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Peltierův článek pro chlazení malých výkonů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. dubna 2009

.....

Marian Brázdil

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	10
1 TECHNIKY CHLAZENÍ	11
1.1 POUŽÍVANÉ PRINCIPY CHLAZENÍ	11
1.2 CHLAZENÍ MALÝCH VÝKONŮ	12
2 TERMoeLEKTRICKÉ JEVY	14
2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY TERMoeLEKTRICKÝCH JEVŮ	14
2.2 TERMoeLEKTRICKÉ MATERIÁLY	15
2.3 ROZDĚLENÍ TERMoeLEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ	19
3 PELTIEROVY ČLÁNKY	20
3.1 KONSTRUKCE PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	20
3.2 ROZDĚLENÍ PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	23
3.3 POUŽITÍ PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	24
4 KONSTRUKCE TERMoeLEKTRICKÉHO CHLAZENÍ	26
4.1 ROZDĚLENÍ TERMoeLEKTRICKÉHO CHLAZENÍ	26
4.2 ZPŮSOBY MONTÁŽE PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	28
4.2.1 <i>Mechanické spojení</i>	28
4.2.2 <i>Pájení</i>	29
4.2.3 <i>Lepení</i>	29
4.3 TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST	30
4.4 VÝKON TERMoeLEKTRICKÉHO CHLAZENÍ	31
4.5 NAPÁJENÍ PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	32
4.6 SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST	34
4.7 VÝROBCI PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	34
5 VÝPOČET TERMoeLEKTRICKÉHO CHLAZENÍ	36
5.1 FIREMNÍ SOFTWARE	36
6 NÁVRH TERMoeLEKTRICKÉHO CHLAZENÍ	38
6.1 EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ	38
6.2 MĚŘENÍ TEPLoty	40
6.3 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ZPŮSOBU CHLAZENÍ	44
ZÁVĚR	50
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	51
SEZNAM OBRÁZKŮ	53
SEZNAM GRAFŮ	55
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	56

ÚVOD

Peltierovy články představují zajímavou alternativu ke konvenčním způsobům chlazení a v současnosti nacházejí stále širší uplatnění. Jedná se především o specializované oblasti, ve kterých vynikají přednosti těchto zařízení: nízké náklady, dlouhá životnost, absence pohyblivých zařízení nebo chemických látek, malé rozměry. I přes své mnohdy nezastupitelné místo jim však nebývá v naší literatuře věnována velká pozornost. Ve světě v průběhu několika posledních let došlo k vzestupu zájmu o termoelektrické aplikace. Svědčí o tom například četnost konferencí na toto téma a vznik mezinárodního termoelektrického sdružení.

Protože se dostupná literatura zabývá především principy, na kterých je termoelektrické chlazení založeno a neřeší praktické problémy, je předmětem této práce vlastní návrh a popis konstrukce termoelektrického chlazení. Peltierovy články jsou unikátním způsobem chlazení, lze jich využít i k výrobě elektřiny. V budoucnu by po nalezení lepších termoelektrických materiálů mohly dosahovat vyšších výkonů, a tím i větší použitelnosti. Myšlenka získávání elektrické energie například z odpadního tepla nebo chlazení pomocí zařízení na bázi pevných látek je z environmentálního i ekonomického hlediska velmi zajímavá.

Procesory jsou uvnitř každého počítače. Protože tyto polovodičové součástky za chodu část svého výkonu disipují, můžeme je považovat za zdroje tepla. Množství vyprodukovaného tepla je dáno vytížením procesoru, zvoleném výrobním postupu, frekvencí a napětím, na kterém procesor běží. Výrobci v dokumentaci udávají hodnoty maximálního ztrátového výkonu i pracovní rozsah teplot, za kterých lze procesor bezpečně provozovat. Nabízí se tedy využít procesor běžného stolního počítače k ověření Peltierových článků.

V současnosti existuje několik komerčně dostupných aplikací, využívajících Peltierovy články pro chlazení procesorů nebo grafických čipů. Jsou určeny pro výkonově nejnáročnější řešení a v běžném provozu se s nimi skoro nesetkáme.

Ztrátový výkon procesoru se pohybuje od několika desítek wattů do sto padesáti wattů, a i když je poměrně malý, představuje konstrukčně problém odvést z plochy několika cm² veškeré odpadní teplo. Horní část procesoru tvoří heatspreader, tenká kovová destička, která chrání jádro procesoru před mechanickým poškozením a napomáhá rozvádět teplo do chladiče. Rozměry Peltierových článků jsou téměř identické s rozměry heatspreaderu. Riziko spálení procesoru při špatném odvodu tepla je minimální, protože procesor obsahuje ochranné mechanismy.

1 TECHNIKY CHLAZENÍ

1.1 Používané principy chlazení

Chlazením odnímáme tělesu tolik tepla, aby jeho teplota klesla na požadovanou hodnotu, která je obvykle nižší než teplota okolí. Teplo lze odnímat několika způsoby [2]:

- **tepelnými pochody, při nichž se teplo přijímá - tzv. pochody endotermické**
 1. přeměna tuhého skupenství v kapalně;
 2. přeměna tuhého nebo kapalného skupenství v plynné - vypařování;
 3. chemické pochody, u nichž se přivádí teplo;
 4. molekulární změny vázané na elektrické nebo magnetické pochody, při nichž je zapotřebí tepla;
- **tepelnými pochody, při nichž teplota pracovní látky klesá**
 5. všechny změny stavu mezi adiabatou a izotermou, mezi něž lze zařadit i čisté škrcení tekutin.

Ad 1 Přeměna tuhého skupenství v kapalně

Tepla odnímaného při přeměně tuhých těles v kapalinu (tepla tání) se využívá u chladících směsí, u nichž je zachována rovnováha mezi ledem, vodou a chladicí solí, přechází-li led do roztoku. Přitom odnímá teplo potřebné k tání celé chladicí směsi. K převodu soli a ledu do původního stavu se používá odpařování [2].

Ad 2 Přeměna tuhého nebo kapalného skupenství v plynné - vypařování

Pochodů založených na přechodu látky ze skupenství kapalného do plynného lze využít několika způsoby [2]:

- a) Můžeme snížit tlak nad hladinou nějaké kapaliny tak, že kapalina začne vřít, aby se vyrovnala porušená rovnováha mezi tlakem parní fáze a teplotou kapaliny. Vznikající výparné teplo přitom musíme odebírat kapalině i nádobě, která ji obsahuje. Na tomto principu je založena většina chladících strojů, jak kompresorových chladících strojů (pístové, turbokompresory, paroproudé), tak i chladících strojů absorpčních.
- b) Jiným způsobem chlazení je odpařování chladiva. Není-li prostor nad kapalinou – chladivem nasycen parami chladiva, parciální tlak par na hladině kapaliny je větší než v okolí. Nastane difuze par do oblasti s nižším parciálním tlakem a chladivo se odpařuje do atmosféry. Na tomto principu chladily už staré hliněné nádržky, v nichž se v Indii a Egyptě uchovávala voda.
- c) Vypuzováním plynu rozpuštěného v kapalině dochází k ochlazení. Je-li plyn rozpuštěn v nějaké kapalině, lze předpokládat, že je v ní obsažen v kapalném stavu. Přidáme-li do roztoku látku, která zmenší rozpustnost plynu, je zkapalněný plyn přinucen opustit roztok v plynném stavu, přičemž odnímá roztoku výparné teplo potřebné ke změně skupenství. Plyn zde představuje chladivo, které tím, že se vypařuje, vyrábí chlad. Pro vypuzení chladiva není vždy nutné přidávat látku zmenšující rozpustnost. Lze toho dosáhnout také snížením tlaku pod hodnotu příslušnou hodnotě rovnovážného stavu při dané koncentraci chladiva v rozpouštědle. Tak pracují tzv. resorpční

zařízení. Tento jev můžeme pozorovat u láhve se sodovkou, klesne-li trochu tlak nebo přidáme-li do sodovky šťávu.

- d) U čtvrtého způsobu je vypuzováno chladivo, které je absorbováno tuhými absorpčními nebo adsorpčními látkami. Dosáhne se toho snížením tlaku pod hodnotu rovnovážného stavu. Také zde můžeme předpokládat, že chladivo je v kapalném stavu, když je absorbováno nebo adsorbováno. Takto pracují periodická zařízení plněná absorpčními nebo adsorpčními látkami.
- e) Tuhý oxid uhličitý (suchý led) je známý případ bezprostřední přeměny látky tuhého skupenství ve skupenství plynné, jehož se využívá v technice chlazení [2].

Ad 3 *Chemické pochody, u nichž se přivádí teplo*

Chemické pochody tohoto druhu probíhají zřídka za nízkých teplot, které jsou nutné v technice chlazení. Existují takové případy, avšak řadíme je obvykle ke způsobu chlazení chladícími směsmi, neboť snížení teploty se u nich dosáhne smíšením dvou látek [2].

Ad 4 *Molekulární změny vázané na elektrické nebo magnetické pochody, při nichž je zapotřebí tepla*

V termoelektrických člancích vzniká elektrický proud mezi studeným a teplým pájeným spojem. Na principu Peltierova jevu se ochlazuje spájený spoj, prochází-li jím elektrický proud stejným směrem, jakým by procházel při jeho ohřátí nad teplotu druhého spájeného spoje.

Následkem přeskupení molekul při odmagnetování některých solí klesá teplota [2].

Ad 5 *Všechny změny stavu mezi adiabatou a izotermou, mezi něž lze zařadit i čisté škrcení tekutin*

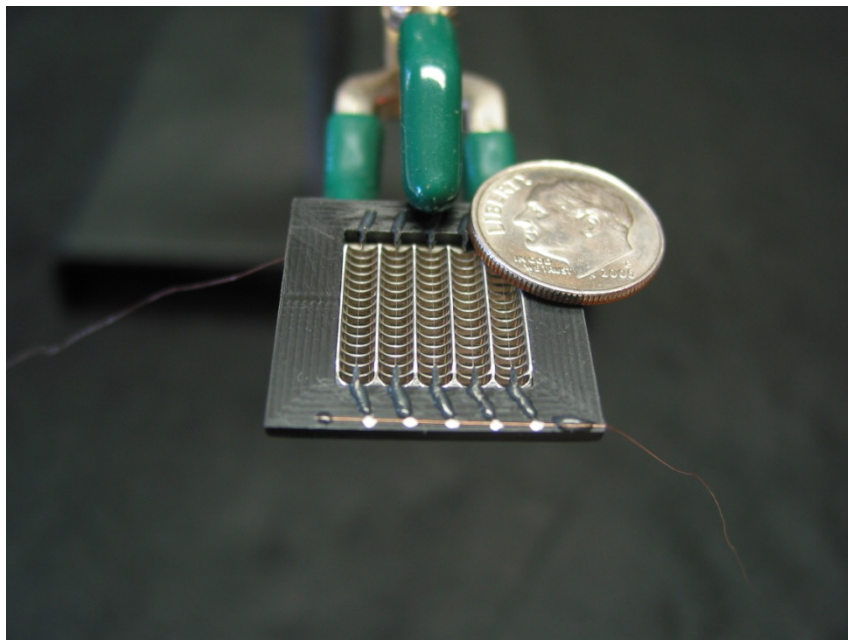
Adiabatou rozumíme takovou změnu tepelného stavu nějaké látky, při níž se látce nepřivádí z okolí žádné teplo a ani se v ní nějakým způsobem nevyvíjí, např. mícháním, třením, rázy apod. Podrobíme-li nějakou látku takové změně stavu a dopustíme-li, aby její vnitřní energie přešla částečně v jinou formu energie, pak musí klesat teplota látky, nemění-li se současně její stav [2].

1.2 Chlazení malých výkonů

Chlazení malých výkonů je možné provádět zařízeními pracujícími na výše uvedených principech. Taková strojní zařízení jsou konstrukčně uzpůsobená pro požadované velikosti výkonů. Výčet je také možné rozšířit o Ranqueho vířivé trubice nebo iontový vítr. Efekt Ranqueho (Hilschovy) vířivé trubice spočívá v rozdělení rotujícího proudu v trubce na jádro a obal rozdílných teplot.

Princip technologie iontového větru je následující: „*Nanotrubičky jsou vyrobeny z materiálu na bázi fullerenu, což je speciální podoba uhlíku. Ta ve formě C60 vytváří tvar podobný fotbalovému míči. Tento materiál se vyznačuje mnoha zvláštními fyzikálními vlastnostmi. Tloušťka těchto trubiček se pohybuje v řádech nanometrů.*“ „*Pevnost je dokonce vyšší než u oceli. Tyto nanotrubičky zde působí jako záporné nabitě elektrody. V systému jsou pak umístěny i kladné elektrody. Pokud je na záporné*

elektrody přivedeno napětí, začnou se pohybovat elektrony směrem ke kladným elektrodám. Tyto elektrony způsobí ionizování vzduchu. Je to stejný princip jako u vzduchu při bouřce. Tímto procesem vznikne proud částic. Tento jev je podobný Koronovému větru, který ovšem vzniká mezi elektrodami při napětí 10 kV". [12]



Obr. 1 Chladič na bázi iontového větru [6]

2 TERMoeLEKTRICKÉ JEVY

2.1 Základní principy termoelektrických jevů

Rozlišujeme tři základní druhy termoelektrických jevů: jev Seebeckův, Peltierův a Thomsonův. Mezi další termoelektrické jevy se řadí jev Benedicksův a Bridgmanův. V souvislosti s termoelektrickým chlazením a Peltierovými články nás budou zajímat především jevy Seebeckův a Peltierův [9].

Seebeckův jev

Obecně Seebeckův jev popisuje vznik termoelektrického napětí v obvodu složeném ze dvou vodičů, jejichž spoje se nacházejí na různých teplotách. Seebeckův jev možné sledovat i na osamoceném vodiči, hovoříme pak o absolutním Seebeckově jevu. U vodiče, jehož konce mají různé teploty, vzniká mezi těmito konci elektrické napětí. Absolutní Seebeckův koeficient α je definovaný jako poměr okamžité změny Seebeckova napětí u_s a změny teploty T při dané teplotě [10]:

$$\alpha = \frac{du_s}{dT} \quad [\mu\text{VK}^{-1}] \quad (2.1)$$

Spojíme-li dva různé vodiče A, B a umístíme spoje a volné konce do míst o různých teplotách, mezi kontakty vznikne relativní Seebeckovo napětí u_{AB} . Relativní Seebeckův koeficient je definován jako poměr okamžité změny Seebeckova napětí u_{AB} a změny teploty T při dané teplotě:

$$\alpha = \frac{du_{AB}}{dT} \quad [\mu\text{VK}^{-1}] \quad (2.2)$$

Mezi absolutním a relativním Seebeckovým koeficientem platí vztah:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad [\mu\text{VK}^{-1}] \quad (2.3)$$

Některé zdroje, např. [4] uvádí výklad termoelektrických jevů pomocí kontaktního napětí. Kontaktní napětí je však podle [9],[10] a dalších dáváno nesprávně do souvislosti s termoelektrickými jevy, protože jsou výsledkem termoelektronové emise. „Seebeckovo napětí nevzniká v důsledku existence přechodu dvou nestejných vodičů, ale je dáno pouze teplotním rozdílem (gradientem) na obou vodičích.“ [10] Existují tedy různé názory na podstatu Seebeckova jevu.

Peltierův jev

Peltierův jev popisuje vznik anebo zánik tepla na styku dvou vodičů při průchodu elektrického proudu. Při průchodu elektrického proudu spojem dvou vodičů se na přechodu teplo buď uvolňuje, nebo pohlcuje, v závislosti na směru proudu. Tento jev je výsledkem změny entropie nosičů náboje při průchodu přechodem.

Protože hovoříme o spojení dvou vodičů, zavádíme relativní Peltierův koeficient, který je definován jako poměr absorbovaného tepla a proudu [10]:

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad [\text{J A}^{-1}] \quad (2.4)$$

Mezi relativním Peltierovým koeficientem a relativním Seebeckovým koeficientem platí vztah [10]:

$$\alpha_{AB} = \frac{\pi_{AB}}{T} \quad [\text{J A}^{-1} \text{K}^{-1}] \quad (2.5)$$

Úplné a korektní vysvětlení dějů probíhajících ve vodičích podává fyzika pevných látek a kvantová fyzika. Následující výklad je proto velmi hrubým nástinem vnitřních pochodů.

Vznik termoelektrického napětí je možné vysvětlit teorií, podle níž se vodiče dělí na vodiče monopolární (typ n a typ p) a vodiče ambipolární. V monopolárních vodičích typu n jsou většinovými nosiči elektrických nábojů elektrony, ve vodičích typu p kladné díry. Tyto vodiče se vzájemně liší ve způsobu přenosu elektrických nábojů, jsou-li umístěné v teplotním gradientu [16].

Při zahřátí vodičů typu n (např. měď) dochází k uvolňování elektronů z atomů, případně molekul krystalové mřížky a jejich přemísťování směrem k chladnějšímu konci vodiče, který nabíjí záporně. Protože velikost celkového náboje ve vodiči se nemění, úbytek elektronů se projevuje kladným nábojem teplejšího konce. U vodiče typu n se tedy při výskytu teplotního rozdílu jeví chladnější konec jako záporný, u vodiče typu p naopak jako kladný [16].

„Pohyb elektronů trvá, dokud jej nezabrzdí elektrostatické pole, které se vytváří mezi elektrony a zbylými pozitivními ionty. V tomto okamžiku vyrovnaného stavu vzniká pak vlivem potenciálního rozdílu difúze elektronů opačným směrem, tj. od studeného konce k teplému – počet difundujících elektronů se rovná právě počtu elektronů sublimujících v obráceném směru následkem teplotního rozdílu.“ [16] Održené elektrony nesoucí záporný náboj jsou volně pohyblivé, chovají se podobně jako molekuly plynu. Protože energie tohoto elektronového plynu závisí na teplotě, elektrony přicházející z teplého konce k chladnému přinášejí více energie než v opačném směru. I po dosažení vyrovnaného stavu tak vzniká trvalý tok tepla směrem od teplého konce k chladnému konci vodiče.

Seebeckův a Peltierův jev jsou jevy reverzibilní. Znamená to, že mohou probíhat opačným směrem. Dokazuje to vzájemnou souvislost mezi vznikem termoelektriny a termoelektrickým chlazením/ohřevem. Jak bude dále uvedeno, přestože v Peltierových člancích mohou probíhat děje i opačným směrem, nejsou články určené k chlazení vhodné na výrobu elektrické energie.

Thomsonův jev

Thomsonův jev popisuje vznik anebo zánik tepla v objemu vodiče s teplotním gradientem při průtoku elektrického proudu. I když se tento jev uplatňuje i v Peltierových člancích, jeho vliv je zanedbatelný [9].

2.2 Termoelektrické materiály

Velikost termoelektrického napětí závisí na použitých materiálech, na teplotě při kterém zařízení pracuje a na dosaženém rozdílu teplot spojů ΔT .

Dobré termoelektrické materiály se vyznačují velkým Seebeckovým koeficientem α , vysokou elektrickou vodivostí σ a malou tepelnou vodivostí κ . Malá tepelná vodivost pomáhá držet teplo v oblasti přechodu, vysoká elektrická vodivost minimalizuje Joulovy ztráty (ohřev vodičů průchodem elektrického proudu). Tyto požadavky na vlastnosti materiálu zohledňuje koeficient termoelektrické účinnosti Z , který je definován jako [10]:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (2.6)$$

Bezrozměrný koeficient ZT získáme vynásobením absolutní teplotou.

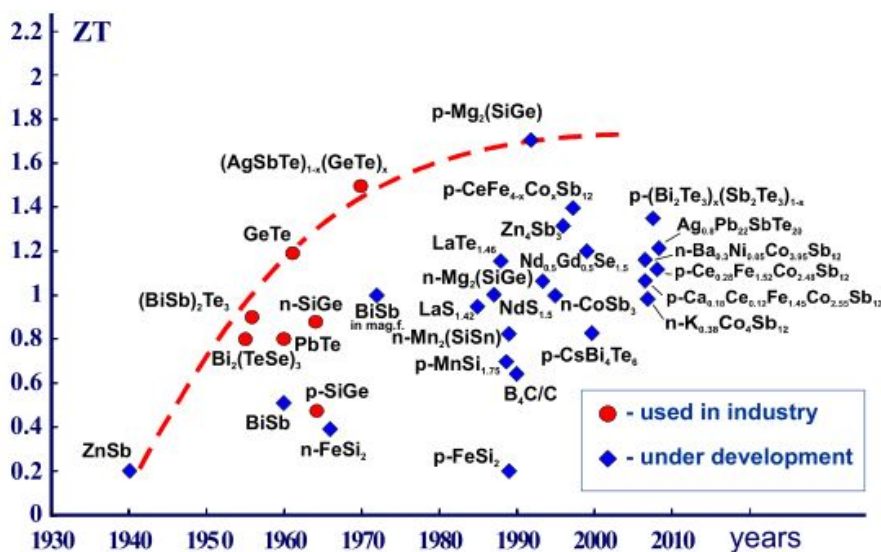
V kovech a kovových slitinách je poměr mezi tepelnou a elektrickou vodivostí konstantní (Franzův-Wiedemannův zákon), snižování tepelné vodivosti a zároveň zvyšování vodivosti elektrické není možné. Většina kovů má Seebeckův koeficient menší než $10 \mu\text{VK}^{-1}$ a účinnost termoelektrické přeměny je proto jen zlomkem procenta. Využití takových materiálů pro zdroj elektrické energie nebo pro termoelektrické chlazení je neekonomické [10].

Už Seebeck v roce 1822 sestavil rozsáhlou termoelektrickou řadu, která ukazuje výhody přírodních polovodičových materiálů. V mnohé literatuře je konstatováno, že použitím prvního a posledního členu své řady mohl Seebeck sestavit termoelektrický článek s elektrickou účinností kolem 3 %. Ve srovnání s nejefektivnějším parním strojem té doby by vycházel velmi příznivě. Nestalo se tak, protože Seebeck odmítal teorii elektrického proudu [9].

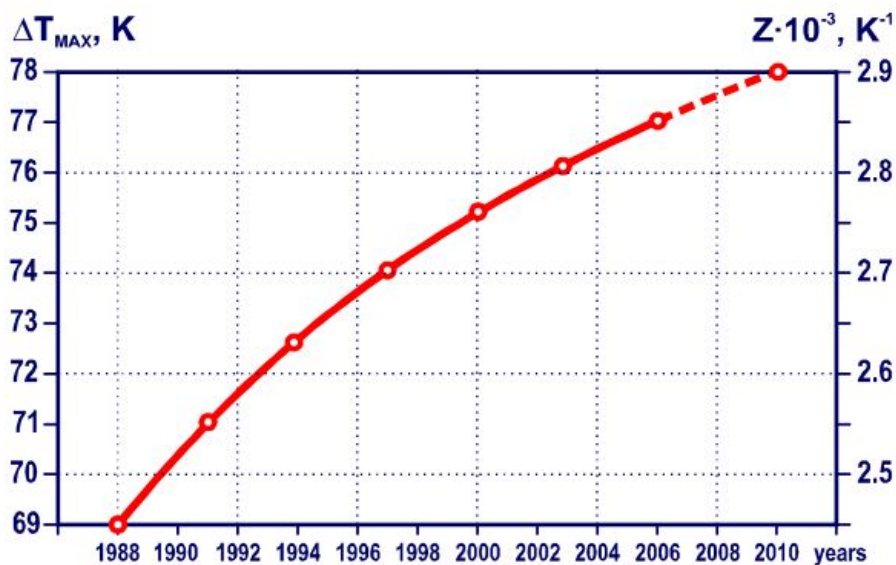
Seebeckova řada 1822	Termoelek- trická řada	α $\mu\text{V}/\text{grad}$	
		JUSTI 1948	MEISNER 1934
PbS			
Bi	Bi	— 80	— 70
amalgam	konstantan	— 39	
Ni	Co	— 21	— 17,5
Co	Ni	— 20	— 18
Pd	K	— 14	— 12
Pt č. 1	Pd	— 8	— 6
U	Na	— 7	— 4,4
Au č. 1	Pt	— 5	— 3,3
Cu č. 1	Hg	— 5	— 3,4
mosaz	C	— 3,5	
Pt č. 2	Al	— 1,5	— 0,6
Hg	Mg	— 1,5	— 0,4
Pb	Pb	— 1,0	— 0,1
Sn	Sn	— 1,0	+ 0,1
Cr	Cs	— 0,5	+ 0,2
Pt č. 3	manganin	+ 0,5	
Cu č. 2	Ir	+ 1,0	+ 2,2
Rh	Rh	+ 1,0	+ 2,5
Au č. 2	Zn	+ 1,5	+ 2,9
Ag	Ag	+ 1,5	+ 2,4
Zn	Au	+ 1,5	+ 2,7
C	Cu	+ 2,0	+ 2,6
Cu č. 3	W	+ 2,5	+ 1,5
Pt č. 4	Cd	+ 3,5	+ 2,8
Cd	Mo	+ 6,5	+ 5,9
ocel	Fe	+ 12,5	+ 16,0
Fe	Sb	+ 42	+ 35
As	Si	+ 44	
Sb	Te	+ 49	+ 400
SbZn (slitina)	Se	—	+ 1000
Te			

Obr. 2 Seebeckova termoelektrická řada [9]

Některé polovodičové materiály objevené v nedávné době se vyznačují velmi dobrým koeficientem termoelektrické účinnosti ($>1,5$). Tyto polovodiče mají výsadní postavení v termoelektrických aplikacích (Obr. 3). S růstem účinnosti dochází současně ke zvyšování maximálního teplotního rozdílu ΔT (Obr. 4) [1],[10].



Obr. 3 Zvyšování koeficientu termoelektrické účinnosti od roku 1940 až do současnosti [1]



Obr. 4 Zvyšování koeficientu termoelektrické účinnosti a maximálního dosažitelného rozdílu teplot Peltierových článků [1]

Výzkum směsných polovodičů započatý v 50. letech dal vzniknout novým termoelektrickým materiálům. Současně s vývojem nových termoelektrických materiálů dochází k navyšování maximálního teplotního rozdílu ΔT [1].

Termoelektrické materiály lze rozdělit do kategorií podle teplotního intervalu jejich nejvhodnějšího použití [10]:

- Telurid bismutitý a jeho slitiny mají největší koeficient termoelektrické účinnosti a maximální pracovní teplotu kolem 450 K, nejvíce využívaný je ke chlazení.
- Slitiny založené na teluridu olovnatém mají druhý nejvyšší koeficient termoelektrické účinnosti, využívají se pro termoelektrické generátory při teplotách okolo 1000 K.
- Další v pořadí jsou slitiny křemíku a germania, pracující při teplotách nad 1300 K rovněž jako termoelektrické generátory.

Pro chlazení se v současnosti tedy využívá zejména Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$, $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ a krystalických materiálů od Bi_2Te_3 , odvozených s různými příměsemi atomů. Jedná se o materiály s tetradymitovou strukturou. Název je odvozen podle struktury $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ - minerálu tetradymit. Vrstevnaté krystaly se strukturou tetradymitu $\text{A}_2\text{B}_2\text{C}_4$ (kde A = Bi, Sb a B = Se, Te) tvoří skupinu úzkopásmových polovodičů a nacházejí v termoelektrických aplikacích uplatnění kvůli výraznému Peltierovu efektu a vysoké hodnotě Seebeckova koeficientu. Využívají se proto pro konstrukci Peltierových článků [10].

Parametry těchto termoelektrických materiálů nejsou dostačující, očekává se vývoj nových materiálů s ještě lepšími termoelektrickými vlastnostmi.

2.3 Rozdělení termoelektrických článků

• Měřicí přístroje

Termoelektrické články pro měření teplot se dělí na články kovové a nekovové pro vysoké teploty. Kovové články je dále možné rozdělit na články speciální, z ušlechtilých a neušlechtilých kovů.

Termoelektrický měřicí článek je tvořen dvěma větvemi, vodiči z různých materiálů, které jsou na jednom konci vodivě spojeny. Tento spoj se nazývá měřicí konec (ekvivalentní k teplému spoji). Pokud je teplota měřicího spoje odlišná od teploty srovnávacích konců (ekvivalentní ke studenému spoji), vzniká v termoelektrickém článku termoelektrické napětí [10].

• Termoelektrické generátory

Termoelektrické články používané pro výrobu se sdružují do skupin a vytváří termoelektrické generátory. Termoelektrické články používané pro přímou přeměnu tepelné energie v elektrickou vyžadují zcela odlišnou technologii nejen při výrobě vlastních vodičů, ale i při vytváření jejich spojů. Jsou zhotovovány z materiálů jiných vlastností než dráty termoelektrických článků pro měření teplot.

„Termoelektrické generátory se hodí pro takový druh aplikací, kde jejich spolehlivost, absence pohyblivých částí a tichý provoz převáží jejich vyšší cenu a malou účinnost (typicky kolem 5 %). Ve srovnání s termomechanickými zařízeními na přeměnu energie jsou hlavními výhodami termoelektrických generátorů jejich jednoduchost a odolnost. V situacích, kde lze spalovat fosilní paliva a za přítomnosti kyslíku, bývá zdrojem tepla pro termoelektrické generátory spalování. Tam, kde nelze tuto možnost využít, mohou být zdrojem tepla radioaktivní izotopy.“ [10]

• Termoelektrické chlazení a ohřev

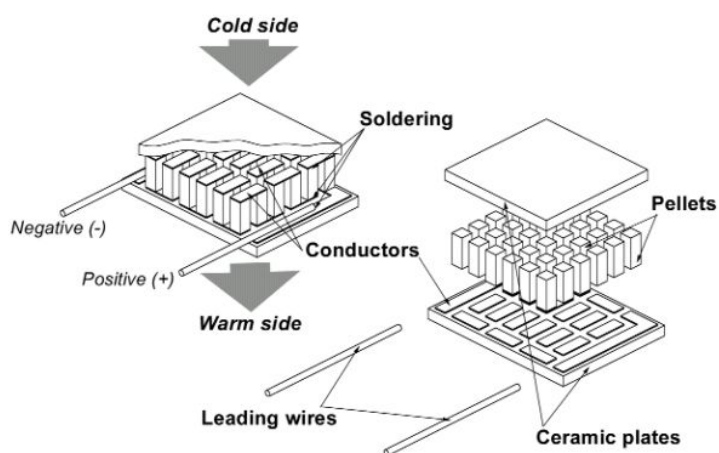
Stejně jako v případě termoelektrických generátorů jsou termočlánky pro chlazení a ohřev zhotovovány z materiálů jiných než termočlánky pro měření teplot [16].

3 PELTIEROVY ČLÁNKY

Pro Peltierovy články se v češtině ustálilo několik označení: Peltierovy termobaterie, termoelektrické chladicí články nebo termoelektrické chladicí moduly. Názvy Peltierovy termobaterie nebo Peltierovy moduly lépe vystihují konstrukci těchto zařízení.

3.1 Konstrukce Peltierových článků

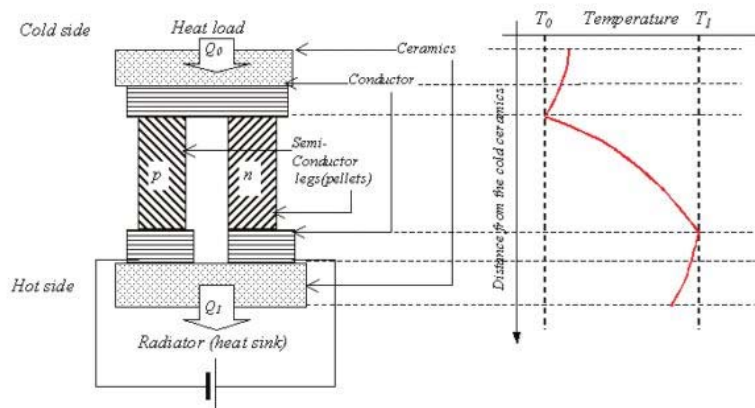
Peltierův článek je zařízení malých rozměrů, tvořené tuhými nepohyblivými částmi. Základem je matrice sériově a paralelně propojených termočlánků, umístěných mezi dvěma keramickými deskami. Pro svůj chod vyžaduje stejnosměrné napájení.



Obr. 5 Ukázka konstrukce jednořadého Peltierova článku [5]

Termočlánek

Jeden termočlánek (Obr. 6) je základní stavební částí celého Peltierova článku. Dva polovodiče typu p a n představují vodiče termočlánku, plochý měděný můstek jejich spoj. Polovodiče jsou k můstku připájeny [5].



Obr. 6 Průřez termočlánkem [5]

Pájené spoje jsou funkčním omezením, protože teplota tavení pájky je současně maximální pracovní teplotou článku. Ve skutečnosti je maximální pracovní teplota z důvodu životnosti nižší. Pro pájení se používají slitiny na bázi cín-antimon nebo cín-olovo, spojovací můstky bývají většinou z mědi. Měď má malý měrný elektrický odpor, dobře se pájí, její nevýhodou je však schopnost difuze do polovodičového materiálu, a tím zhoršení vlastností článku. V místě styku polovodičů s můstkem vznikají nežádoucí přechodové odpory, které při špatném výrobním postupu degradují výkon celého článku. Můstky zprostředkovávají jak elektrický kontakt, tak přenos tepla. Na studené straně odnímají teplo chlazenému objektu, na teplé straně odebrané teplo předávají chladiči.

Zjednodušeně si můžeme funkci Peltierova článku představit jako tepelnou pumpu, kdy průchodem proudu odčerpáváme teplo. Na teplé straně se ovšem vyzařuje jak teplo absorbované studenou stranou, tak příkon článku.

Z důvodu napájení jsou termočlánky řazeny v sériích. Paralelní propojení pak zajišťuje zvětšení tepelného toku a zvyšuje výkon termobaterie. Jednořadé Peltierovy články jsou v současnosti schopné přenést 3 W/cm^2 až 6 W/cm^2 .

Keramické desky

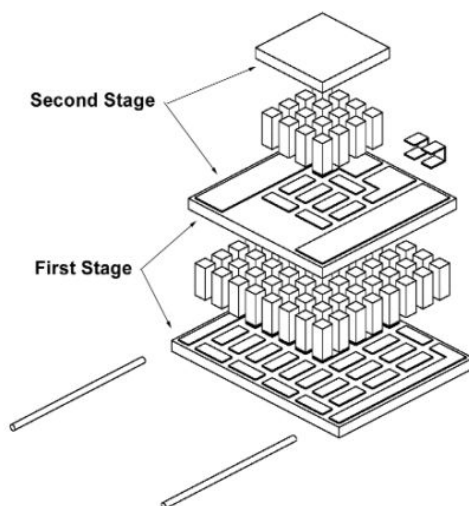
Keramické desky poskytují termoelektrickému článku potřebnou pevnost a elektricky izolují můstky od chlazeného objektu a chladiče. Aby teplo přecházelo s minimálním odporem, jsou desky vyráběny z materiálů s dobrou tepelnou vodivostí.

Nejčastěji jsou na výrobu desek používány keramické materiály založené na oxidu hlinitém (Al_2O_3). Vykazují dobrý poměr cena/výkon. Keramické materiály z nitridu hlinitého (AlN) a oxidu berylnatého (BeO) mají mnohem lepší tepelnou vodivost, pět až sedmkrát vyšší, jsou ale mnohem dražší. Navíc, oxid berylnatý je jedovatý.

Můstky, kromě vzájemného kontaktu mezi polovodičovými sloupky, slouží také k napojení na přívodní kabely. U článků s menšími výkony se měděné sloupky nanášejí naprašováním (deponováním) tenkých vrstev na povrch keramické desky. Pro snížení elektrického odporu se v modulech větších výkonů používají měděné destičky [5].

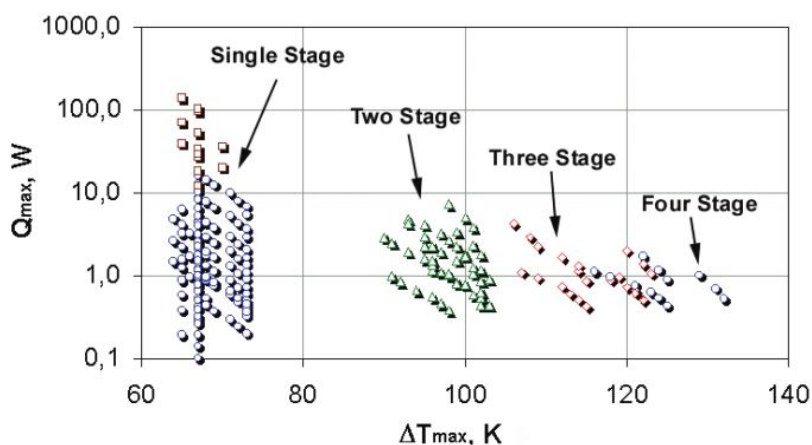
Kaskády

Pro dosažení větších teplotních rozdílů je možné skládat Peltierovy články do kaskádových termobaterií (Obr. 7). Konstrukce takové termobaterie se podobá pyramidě, kdy jednotlivé termobaterie jsou skládány jedna na druhou. Nižší řada je vždy větší, protože k odvodu tepla, které je disipováno vyšším článkem v kaskádě, je třeba větší chladicí kapacity. Pouze nejvyšší termobaterie v kaskádě slouží přímo k chlazení [5].



Obr. 7 Ukázka konstrukce kaskádového Peltierova článku [5]

Maximální teplotní rozdíl $\Delta T_{\max}$ mezi studenou a teplou stranou jednořadého Peltierova článku je přibližně $70\text{ }^{\circ}\text{C} - 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (může se značně lišit v závislosti na konkrétním modelu a teplotě, při které je Peltierův článek provozován). Použitím většího počtu článků dosáhneme větších teplotních rozdílů a tedy i nižší absolutní teploty (Obr. 8) [23].



Obr. 8 Maximální výkony komerčně dostupných Peltierových článků [5]

Použití vícestupňových termobaterií je opodstatněné pouze v případech, kdy jednostupňové termobaterie nedosahují potřebného výkonu. S rostoucím počtem kaskád totiž také rostou strmě provozní náklady. Z tohoto důvodu zavádíme tzv. koeficient optimálního výkonu COP_{Max} . Definujeme ho jako poměr tepla absorbovaného studenou stranou a příkonu (Q_c/P) [5].

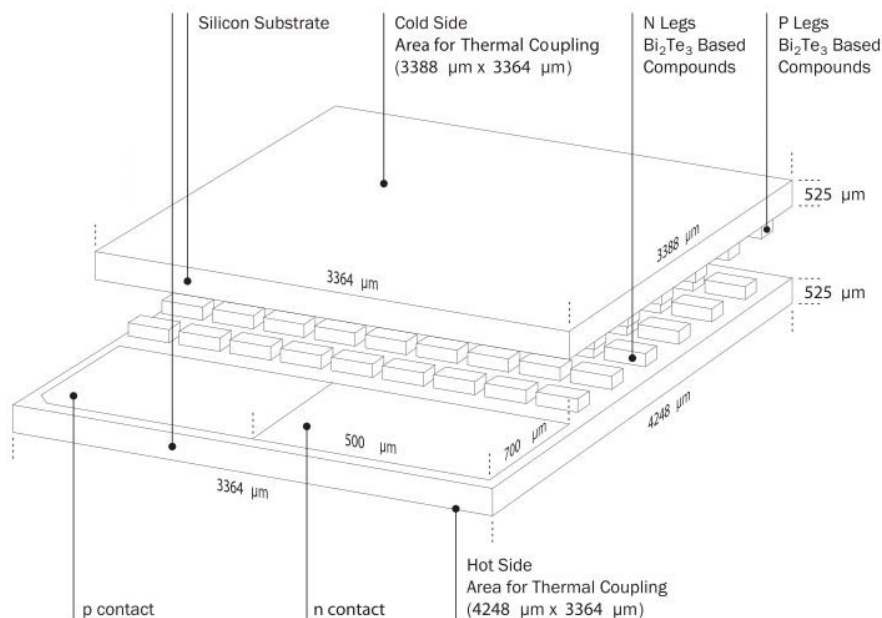
Maximální teplotní rozdíl u kaskádových termobaterií je v současnosti přibližně $\Delta T_{max} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ za současného použití 6 stupňů. Při udržení teploty horké strany $T_h = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ tomu odpovídá absolutní získaná teplota studené strany článku $T_c = -125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koeficient optimálního výkonu se v tomto případě blíží hodnotě 0,0001, což svědčí o obrovské spotřebě elektrické energie pro dosažení takto nízké teploty [27].

V praxi se nejčastěji setkáváme s jedno- až dvoustupňovým chlazením.

3.2 Rozdělení Peltierových článků

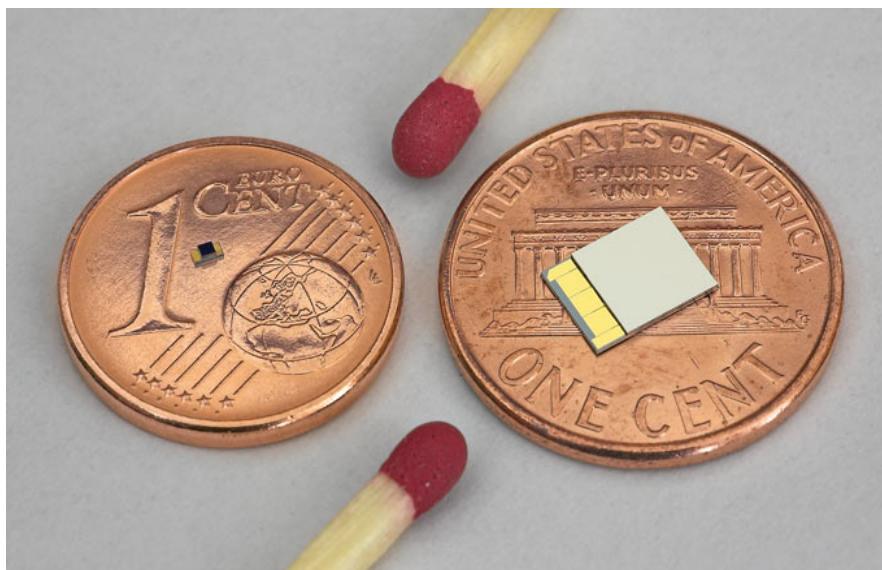
- Dělení podle výkonu

Výkony komerčně dostupných Peltierových článků se pohybují v řádu jednotek μW až stovek W [21]. Články do výkonu jednotek W se značně liší od článků větších. Tyto „mikročlánky“ se vyrábí technikou deponování tenkých vrstev. Tato technika je v současnosti velmi progresivní a články takto vyrobené nacházejí stále širší uplatnění. Mikročlánky využívají pro svou konstrukci křemíkových waferů, tedy v podstatě stejného materiálu, který slouží k výrobě procesoru stolního počítače. Zatímco u běžného Peltierova článku se na ploše $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ nachází zhruba 8 samostatných termočlánků, u mikročlánků se na stejné ploše nachází článků 50krát více. Mikročlánky mají mnohem rychlejší odezvu a výkon. Pokud bychom je srovnávali s klasickými jednořadými články, dokáží přenést 60 W/cm^2 až 100 W/cm^2 oproti běžným 3 W/cm^2 až 6 W/cm^2 [32].



Obr. 9 Ukázka konstrukce mikročlánku [32]

Nicméně největší mikročlánky zatím dosahují pouze $3,4\text{ mm} \times 4,3\text{ mm}$.



Obr. 10 Ukázka velikosti mikročlánku [7]

- **Dělení podle geometrie**

Peltierovy články se vyrábějí v různých rozměrech a odlišných tvarech. Téměř vždy jsou keramické desky čtvercového nebo obdélníkového tvaru, jen výjimečně tvaru kruhového. Články mohou být opatřeny dírou pro snazší montáž.

- **Dělení podle použití**

Termoelektrického chlazení se využívá v mnoha odvětvích. Jednotliví výrobci Peltierovy články dělí odlišně. Nejčastěji jsou články rozděleny na články pro průmyslové použití, články pro optoelektroniku, na výrobu elektrické energie a články v chladicích systémech pro potraviny.

3.3 Použití Peltierových článků

Peltierových článků se využívá v mnoha aplikacích. Jsou v zařízeních používaných v armádě, zdravotnictví, průmyslu, vědě, telekomunikacích i v běžném životě. Nacházejí uplatnění jak při chlazení potravin a nápojů v přenosných lednicích, tak ve velmi sofistikovaných systémech u raket a vesmírných objektů. Na rozdíl od jiných způsobů chlazení, umožňují Peltierovy články velmi přesně regulovat teplotu. Změna směru proudu má za následek přenos tepla opačným směrem. Této skutečnosti lze využít při konstrukci přesných teplotních stabilizátorů pro tepelně citlivá elektronická zařízení (lasery, fotodetektory, krystalové oscilátory atd.). Díky lineární závislosti je možné dosáhnout vhodným regulátorem teplotní stability lepší než ± 1 mK [21]. V minulosti byly pro chlazení ponorek a železničních vozů sestaveny i velké termoelektrické systémy o výkonu několika kW. Systémy takové velikosti jsou dnes velmi cenné v aplikacích, jako jsou polovodičové výrobní linky [21],[29].

Mezi typické aplikace Peltierových článků patří:

- avionika, kalorimetry, odvlhčovače, environmentální analyzátoři;
- infračervené kalibrační zdroje, CCD, CID, vidikonové trubice;
- chlazení mikroprocesorů, laserových diod, laserových kolimátorů a vybavení pro noční vidění;
- infračervené detektory, osmometry, krevní a DNA analyzátoři;
- preparace a skladování tkání;

- přesná chladicí zařízení, kalibrace termostatů;
- ledničky u letadel, automobilů a lodí, chladiče vína.

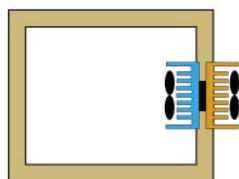
4 KONSTRUKCE TERMoeLEKTRICKÉHO CHLAZENÍ

4.1 Rozdělení termoelektrického chlazení

Podle způsobu konstrukce dělíme systémy termoelektrického chlazení na systémy typu [31]:

- **vzduch – vzduch**

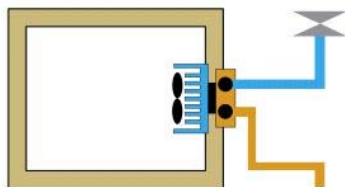
Teplo odebrané vzduchu v uzavřeném prostoru je rozptýleno do okolního ovzduší. Chladiče tohoto typu se používají pro chlazení (ohřev) objektů ve schránkách. Typické aplikace zahrnují boxy pro chlazení a transport jídla nebo chlazení elektroniky.



Obr. 11 Systém termoelektrického chlazení typu vzduch - vzduch [28]

- **vzduch – kapalina**

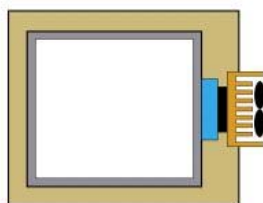
Teplo odebrané vzduchu v uzavřeném prostoru je předáno kapalině cirkulující v chladicím okruhu.



Obr. 12 Systém termoelektrického chlazení typu vzduch - kapalina [28]

- **chlazení vzduchem**

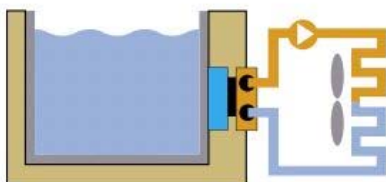
Teplo odebrané z povrchu pevného tělesa (nebo kapalně látky) je předáno do okolního ovzduší. Chlazený objekt může být připevněn ke studené straně Peltierova článku přímo nebo prostřednictvím nádoby z vhodného materiálu. Typické aplikace zahrnují chlazení laserů, elektroniky nebo malé přenosné ledničky.



Obr. 13 Systém termoelektrického chlazení vzduchem [28]

- **chlazení kapalinou**

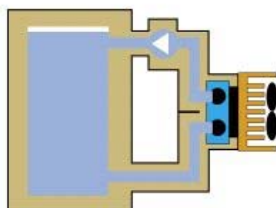
Teplo odebrané z povrchu pevného tělesa (nebo kapalné látky) je předáno kapalině cirkulující v chladicím okruhu. Chlazený objekt může být připevněn přímo nebo prostřednictvím nádoby. Typické aplikace zahrnují cyklické chlazení elektronických komponent.



Obr. 14 Systém termoelektrického chlazení kapalinou [28]

- **kapalina – vzduch**

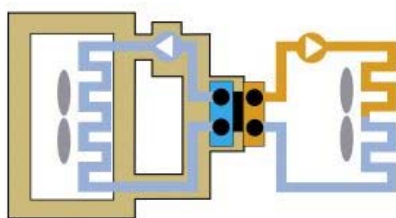
Kapalině v uzavřeném okruhu je odebíráno teplo a rozptýleno do okolního ovzduší. Tento typ chlazení (ohřev) se používá i pro plyny.



Obr. 15 Systém termoelektrického chlazení typu kapalina - vzduch [28]

- **kapalina – kapalina**

Kapalině v uzavřeném okruhu je odebíráno teplo a předáváno kapalině cirkulující v chladicím okruhu. Mezi typické aplikace se řadí lékařské vybavení.



Obr. 16 Systém termoelektrického chlazení typu kapalina - kapalina [28]

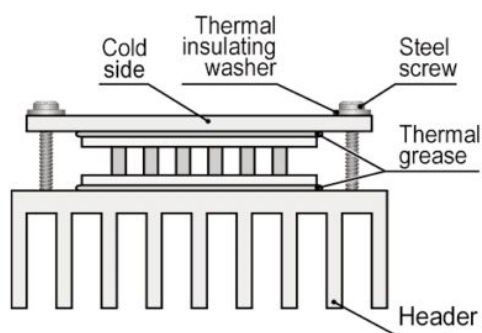
Doporučený průtok kapaliny u chladících okruhů je 120 l/hod a více. Také se doporučuje používat vodu s glykolem nebo fluorinertem [28].

4.2 Způsoby montáže Peltierových článků

Výkonnost termoelektrického chlazení jako celku závisí na kvalitě spojení Peltierova článku s chlazeným objektem a chladičem. Podle zkušenosti výrobců je selhání Peltierova článku způsobeno nejčastěji špatnou instalací. Při návrhu konstrukce chlazení by proto měly být brány v potaz okolní nepříznivé vlivy jako vibrace a nárazy, je zapotřebí také zajistit dobrý přenos tepla mezi styčnými plochami. Spojení Peltierova článku s okolím se provádí: mechanicky, pájením nebo lepením [5],[23].

4.2.1 Mechanické spojení

Peltierův článek je umístěn mezi dvěma výměníky a přichycen šrouby (Obr. 17). Pro lepší tepelnou vodivost se mezery mezi stěnami vyplňují teplovodivou pastou. Metoda je používána pro upevňování velkých jednořadých Peltierových článků, pro mikromoduly má pouze omezené využití. Šroubové spojení u mikromodulů zabírají mnoho prostoru a způsobují významné tepelné ztráty [5],[23].



Obr. 17 Montáž Peltierova článku mechanickým spojením [23]

Výhodou této konstrukce je možnost rozebrání, a tedy i možná údržba. Kontaktní plochy by měly být zbaveny vměstků, nerovností a cizích částic. Rovinatost ploch by neměla přesáhnout 0,02 mm, protože působením tlaku může dojít k prasknutí článku. Velká drsnost vede ke zhoršení tepelného kontaktu, proto se nedoporučuje drsnost styčných ploch větší než $R_a = 2,5 \mu\text{m}$.

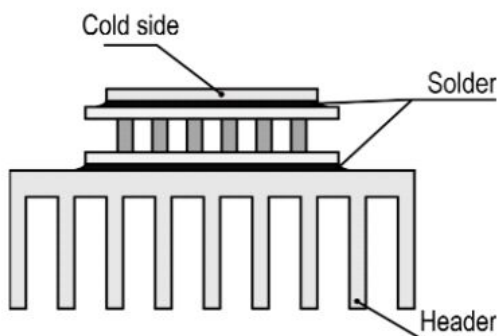
Teplovodivé směsi slouží ke kompenzaci nerovností ploch. Tyto směsi jsou obvykle založené na bázi silikonových olejů, s různými příměsemi zlepšující tepelnou vodivost. Důležité je nanášet pouze nezbytně nutné množství směsi. Zvětšování

tloušťky nanesené vrstvy vede k horšímu přenosu tepla a rovněž zhoršuje mechanickou odolnost spojení.

Protože šroubové spoje vytváří tepelné mosty, eliminujeme ztráty použitím vhodných těsnících podložek a výběrem šroubů s nízkou tepelnou vodivostí (např. šrouby z nerezové oceli). Vlivem tepelné roztažnosti dochází za provozu ke zkrácení nebo naopak prodloužení šroubového spoje. Aby nedocházelo k nadměrnému nebo nedostatečnému tlaku na článek a zhoršení tepelného kontaktu, používáme pod šrouby pružné podložky [5],[23].

4.2.2 Pájení

Pájení Peltierova článku k chladiči a chlazenému objektu provádíme měkkou pájkou. Plochy Peltierova článku se pro lepší pájitelnost pokovují. Běžně používaným způsobem je poniklování povrchu a následné pokrytí vrstvou cínu s aditivy (například Sn-Bi nebo Sn-Co) nebo slabou vrstvou zlata. Oba způsoby pokovování, jak cínem, tak zlatem, poskytují dobrou pájitelnost. Povrchová vrstva cínu je méně nákladná než pozlacení, po čase však dochází k oxidaci povrchu a zhoršení pájitelnosti. Teplota tavení pájky používané pro spojování musí být nižší, než teplota tavení pájky použité pro výrobu Peltierova článku (Obr. 18) [5],[23].



Obr. 18 Montáž Peltierova článku pájením [23]

Mezi nesporné výhody pájení patří dobrá mechanická odolnost spoje, dobrý tepelný kontakt mezi plochami a metoda je také vhodná pro aplikace pracující za podtlaku. Navíc odpadá nutnost dalšího prostoru jako v případě mechanického spojení a je umožněno částečné rozebrání spoje. Stejně jako v případě mechanického spojení jsou na kontaktní plochy kladeny kvalitativní požadavky.

Tato metoda je vhodná hlavně pro jednořadé a kaskádové mikromoduly. Není vhodná pro velké moduly z důvodu rozdílných tepelných roztažností spojovaných materiálů a tedy velkého mechanického namáhání [5],[23].

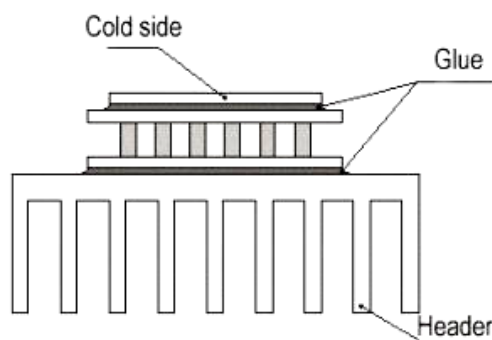
4.2.3 Lepení

Peltierův článek je k chladiči a chlazenému objektu přilepen lepidlem s dobrou tepelnou vodivostí. Přenos tepla a mechanická odolnost je hodně závislá na použitém lepidle. Doporučuje se, aby vrstva lepidla nepřesahovala tloušťku 10-20 μm . Nadměrná drsnost a nestejnorodost ploch může vést ke zvětšování tloušťky lepidla a zhoršovat vedení tepla.

Adhezivní lepení je spolehlivá a relativně jednoduchá metoda spojování. Na rozdíl od mechanického spojování odpadá nutnost dalšího prostoru pro šroubové spoje a článek není vystavován zvýšeným teplotám, jako v případě pájení. Nevýhodou je problematická demontáž článku, v mnohých případech není možná vůbec.

Proces lepení je také zdoluhavý. A v neposlední řadě, maximální pracovní teploty Peltierova článku se mohou pohybovat pouze v rozmezí teplot $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ v závislosti na použitém lepidle.

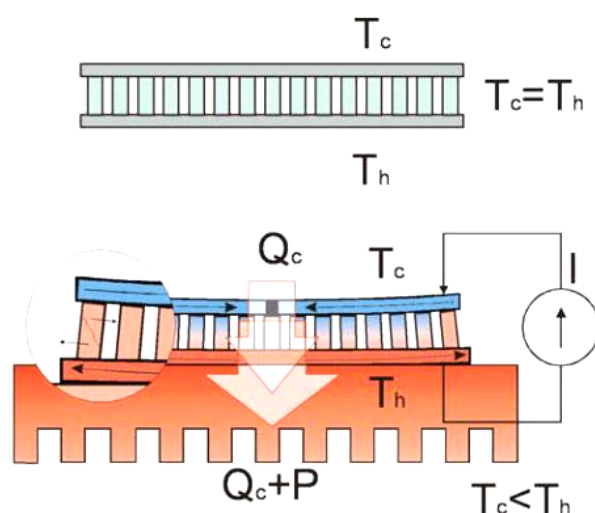
Metoda adhezního lepení je užívána hlavně pro mikromoduly a moduly velkých rozměrů. V ostatních případech je užití této metody limitované [5],[23].



Obr. 19 Montáž Peltierova článku lepením [23]

4.3 Teplotní roztažnost

V každé z uvedených metod montáže dochází ke kontaktu odlišných materiálů. Za provozu vznikají mezi studenou a teplou stranu velké teplotní rozdíly. Rozdílné koeficienty tepelné vodivosti vedou k mechanickým tlakům a mohou způsobit destrukci článku (Obr. 20). Napětí se vyskytují jak ve vodorovném směru na teplé a studené straně, tak ve směru svislém - podél spoje. Teplotní roztažnost je problematická zejména v případě použití „nepohyblivých“ metod konstrukce chlazení, jako je pájení nebo lepení. V menší míře se daný problém týká mechanických spojení.



Obr. 20 Vznik napětí na Peltierově článku [23]

Nejprve dochází k výskytu mikropřasklin. Projevují se zvyšováním odporu článku a korespondujícím snížením účinnosti. Poté následuje celkové mechanické narušení sloupku (Obr. 21).



Obr. 21 Ukázka mechanického narušení sloupku [23]

Návrh konstrukce se špatnou volbou materiálů může spolehlivost snižovat, přestože článek samotný má dlouhou životnost a dobrou odolnost vůči teplotním změnám. V případech, kdy je to možné, je řešením použití kompozitních materiálů jako Cu/W nebo Cu/Mo. Koeficient těchto materiálů je podobný koeficientům keramických desek Peltierova článku, nákladnost těchto materiálů ale zásadně omezuje jejich použití. U chlazení s malými toky tepla je řešením použití materiálu Kovar (slitina Ni-Co-Fe) nebo za studena válcované oceli.

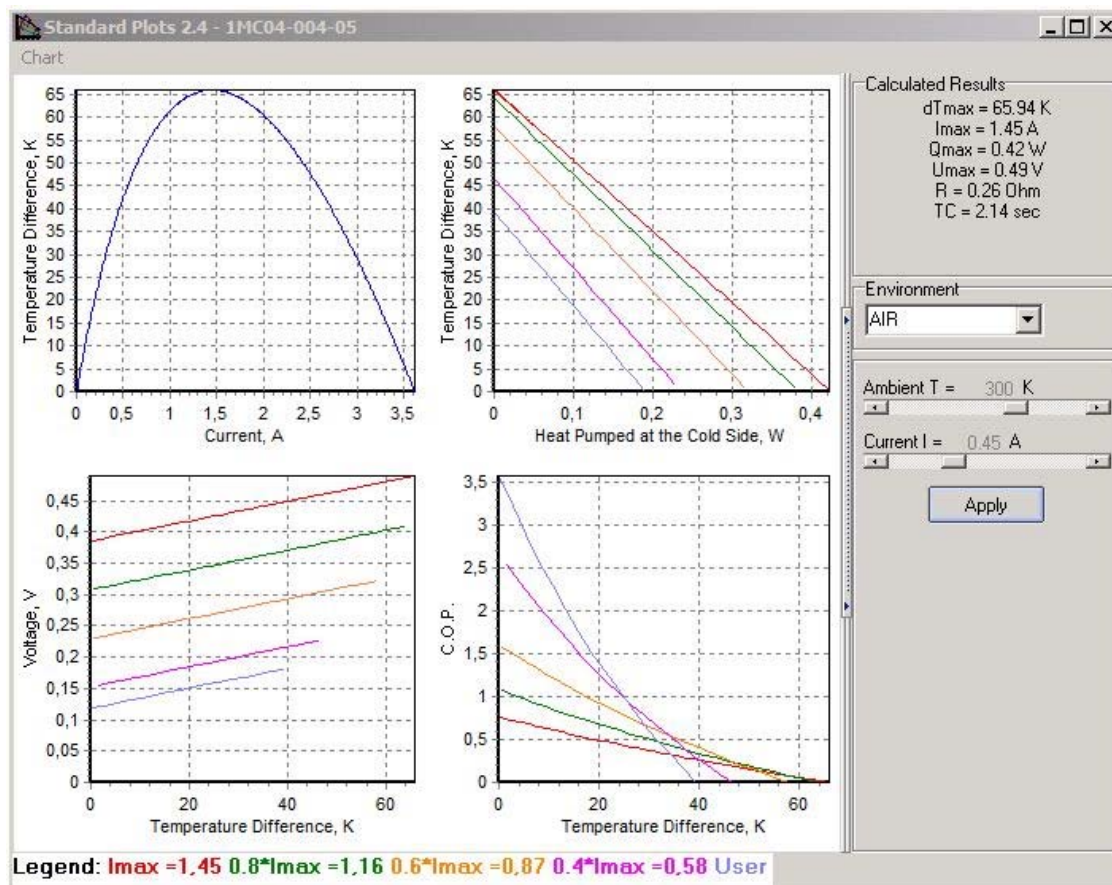
V některých případech je konstrukčně jednodušší nahradit velkou plochu jednoho článku za množství malých článků a předejít tak velkému zakřivení horké strany článku. To může vznikat u pružných spojů: mechanických nebo lepených [5],[23].

4.4 Výkon termoelektrického chlazení

Výkon Peltierova článku je charakterizován jednotlivými výkonovými parametry [23]:

- $\Delta T_{\max}$ – maximální teplotní rozdíl mezi teplou a studenou stranou Peltierova článku při nulovém chladícím výkonu ($Q_c = 0$)
- $Q_{\max}$ – chladící výkon při nulovém teplotním rozdílu mezi teplou a studenou stranou Peltierova článku ($\Delta T_{\max} = 0$)
- $I_{\max}$ – maximální proud procházející Peltierovým článkem při maximálním teplotním rozdílu mezi teplou a studenou stranou $\Delta T_{\max}$
- $U_{\max}$ – maximální napětí při průchodu maximálního proudu a nulovém chladícím výkonu ($Q_c = 0$)

Návrh zařízení a výběr vhodného Peltierova článku pro danou konkrétní aplikaci vychází z grafů, které popisují vzájemné souvislosti parametrů určujících výkon Peltierova článku.



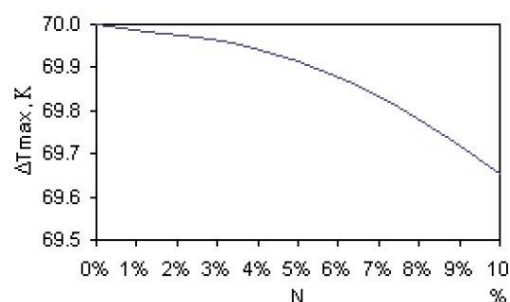
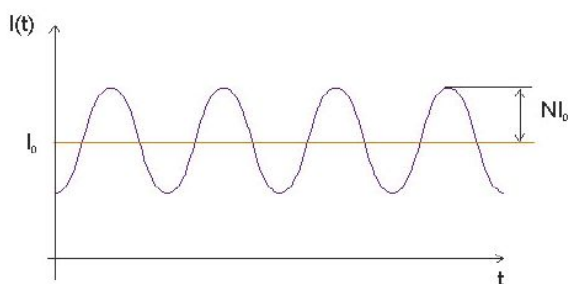
Obr. 22 Ukázka výkonových křivek, jednotlivé parametry jsou vzájemně závislé [22]

4.5 Napájení Peltierových článků

Peltierovy články jsou stejnosměrné prvky. Přesto, zejména v případě vysoce účinných a přesných regulátorů teploty, je pracovní proud generován PWM měničem. Následkem toho, i po důkladné filtraci, obsahuje tento proud střídavou složku. Větší střídavá složka může způsobit snížení dosažitelného teplotního rozdílu ΔT_{max} a tím nezanedbatelný pokles účinnosti. Proto by podle většiny výrobců neměly být hodnoty zvlnění proudu větší než 10 % [5],[23]¹.

Existuje několik možností jak regulovat pracovní proud Peltierova článku. Běžně používanou metodou je metoda harmonickým modulačním signálem nebo pulsně šířkové modulace.

¹ Pro měření v experimentální části je použito zdroje Fortron ATX-300 PNF, u něhož výrobce udává maximální zvlnění na samostatné napájecí větvi do 10 %. [23]

Modulace harmonickým modulačním signálem

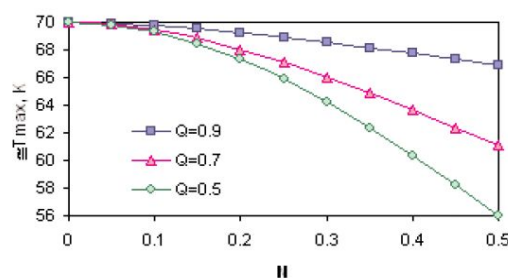
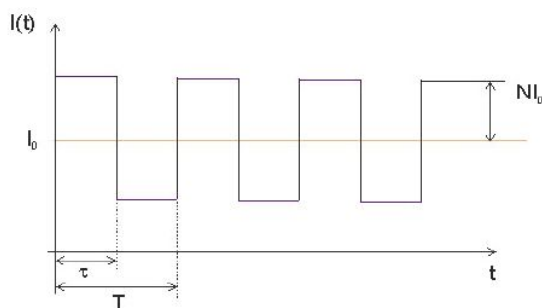
Obr. 23 Průběh střídavého proudu v čase [23]

Obr. 24 Vliv zvlnění na teplotní rozdíl ΔT [23]

V případě modulace harmonickým modulačním signálem se vliv střídavé složky na výkon Peltierova článku počítá jako poměr maximálního teplotního rozdílu při střídavém a stejnosměrném napájení [5]:

$$\frac{\Delta T_{\max}(AC)}{\Delta T_{\max}(DC)} = \frac{1}{1 + \frac{N^2}{2}} \quad [-] \quad (4.1)$$

kde N je zvlnění proudu.

Pulsně-šířková modulace

Obr. 25 Změna velikosti proudu pulsně šířkovou modulací PWM [23]

Obr. 26 Vliv zvlnění na teplotní rozdíl ΔT při různých hodnotách Q [23]

$$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\max}} = \frac{(1 + N(2Q - 1))^2}{1 + 2N(2Q - 1) + N^2} \quad [-] \quad (4.2)$$

kde N je zvlnění proudu a $Q = \frac{\tau}{T}$ je pracovní cyklus.

Nicméně, v souladu se závěry [21] není pokles pravděpodobně tak dramatický, jak by se ze vztahů výše dalo usuzovat. Při zvlnění 10 % může při pracovních proudech I_{dc} ($I_{dc} < I_{max}$) docházet i k poklesu ΔT o méně než 0,1 %.

4.6 Spolehlivost a životnost

Peltierovy články jsou velmi spolehlivé, protože se skládají pouze z pevných částí. Výrobci u komerčně dostupných článků udávají provozní životnost 200 000 hodin a vyšší. V mnoha aplikacích jsou rozhodující složkou, protože ovlivňují teplotu celého zařízení a mohou mít vliv na jeho správnou funkci. Negativně se na chodu článků podílejí vlivy prostředí (nárazy, vibrace, vlhkost), zvýšená teplota a špatná kvalita spojení s okolními objekty.

Vlhkost nesmí do článku pronikat, způsobuje korozi. Koroze poškozuje materiál článku, vodiče i pájku. Vlhkost může také vytvořit zkrat nebo tepelný šok (propojení teplé a studené strany).

Nerovnoměrné stlačení způsobené rozdílným krouticím momentem u šroubových spojů způsobuje poškození. Články jsou relativně pevné, ale špatně odolávají namáhání na stříh. Nerovnoměrný krouticí moment a hrubé styčné plochy mohou vyvolat velké stříhové síly [23].

Spoje Peltierova článku jsou pájené, existují proto provozní omezení. Při teplotách vyšších než 80 °C dochází k difuzi mědi ze spojovacích můstků do polovodičového materiálu. Při dalším zvyšování teploty dochází k trvalému snížení účinnosti a narušování stavby článku následované celkovým mechanickým poškozením.

Podnětem pro posouzení spolehlivosti by mělo být:

- snížení maximálního teplotního rozdílu ΔT_{max} pod příslušnou hodnotu;
- zvýšení odporu Peltierova článku obvykle o 5 a více procent.

Z-meter je zařízení sloužící k měření parametrů Peltierova článku. Posuzuje impedanci Z_{AC} , koeficient termoelektrické účinnosti Z a maximální teplotní rozdíl ΔT_{max} . Koeficient termoelektrické účinnosti a impedance jsou extrémně citlivé na kvalitu Peltierova článku. Jakékoliv nepatrné změny v modulu jako narušení sloupků, spojů nebo keramiky, se okamžitě projevují snížením koeficientu termoelektrické účinnosti a zvýšením impedance [23].

4.7 Výrobci Peltierových článků

Vývoj, výzkum a výroba Peltierových článků se nachází v mnoha zemích světa. V České republice má pobočku společnost Laird Technologies, jedna z mnoha společností zabývajících se termoelektrickým chlazením. Leadeři tohoto odvětví se nacházejí především ve Spojených státech amerických, Rusku a Německu.

Ferrotec Corporation	http://www.ferrotec.com/	
Komatsu Electronics, Inc.	http://www.komatsu.com	
Kryotherm	http://www.kryotherm.ru;	http://www.kryothermusa.com
Laird Technologies	http://www.lairdtech.com	
Melcor	http://www.melcor.com/aboutus.html	(člen Laird Technologies)
HiTECH Technologies, Inc.	http://www.hitechtec.com/	
Micropelt GmbH	http://www.micropelt.com/	
TE Technology, Inc.	http://www.tetech.com/	
TECA Corporation	http://www.thermoelectric.com	

Tellurex Corporation
RMT Ltd
Swiftech

<http://www.tellurex.com/>
<http://www.rmtltd.ru/>
<http://www.swiftnets.com/>

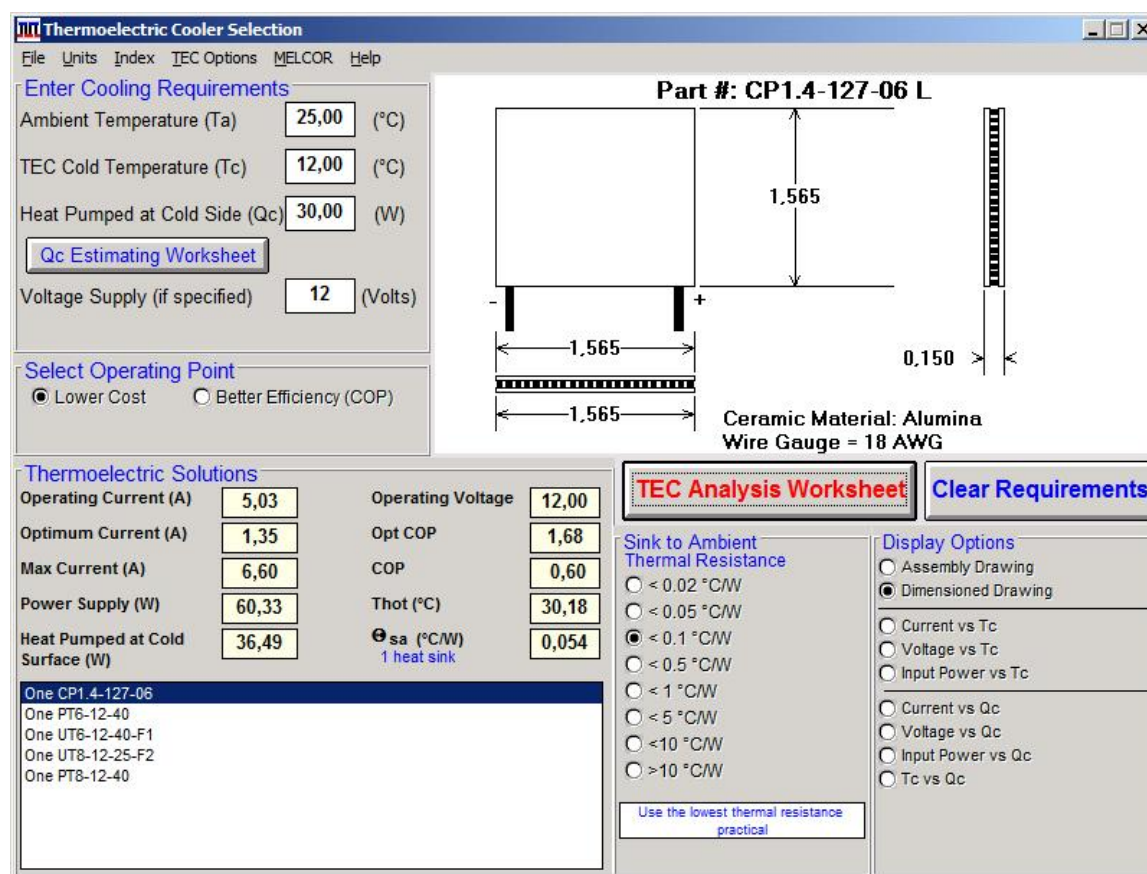
5 VÝPOČET TERMoeLEKTRICKÉHO CHLAZENÍ

Výpočet termoelektrického chlazení je možné provádět pomocí vzorců nebo s použitím firemních softwarů jednotlivých výrobců.

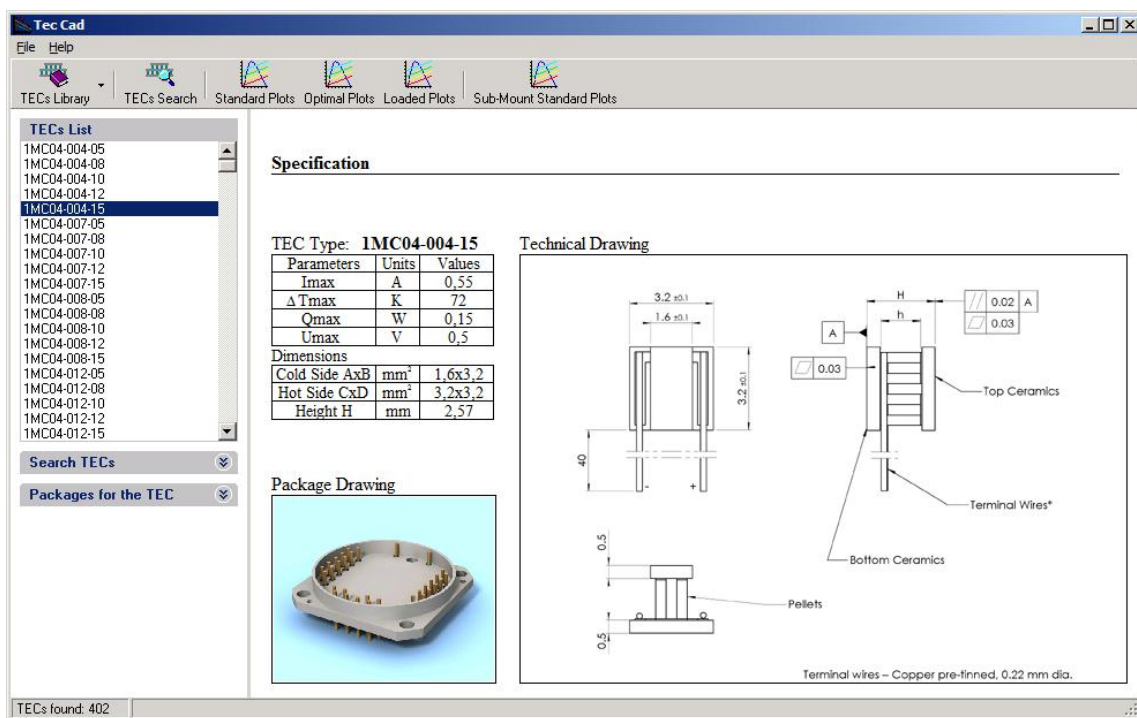
5.1 Firemní software

Společnosti, které vyvíjejí a prodávají Peltierovy články, většinou nabízí volně ke stažení software pro výběr Peltierova článku. Někdy bývá software také přístupný ve formě Java apletu pro webový prohlížeč.

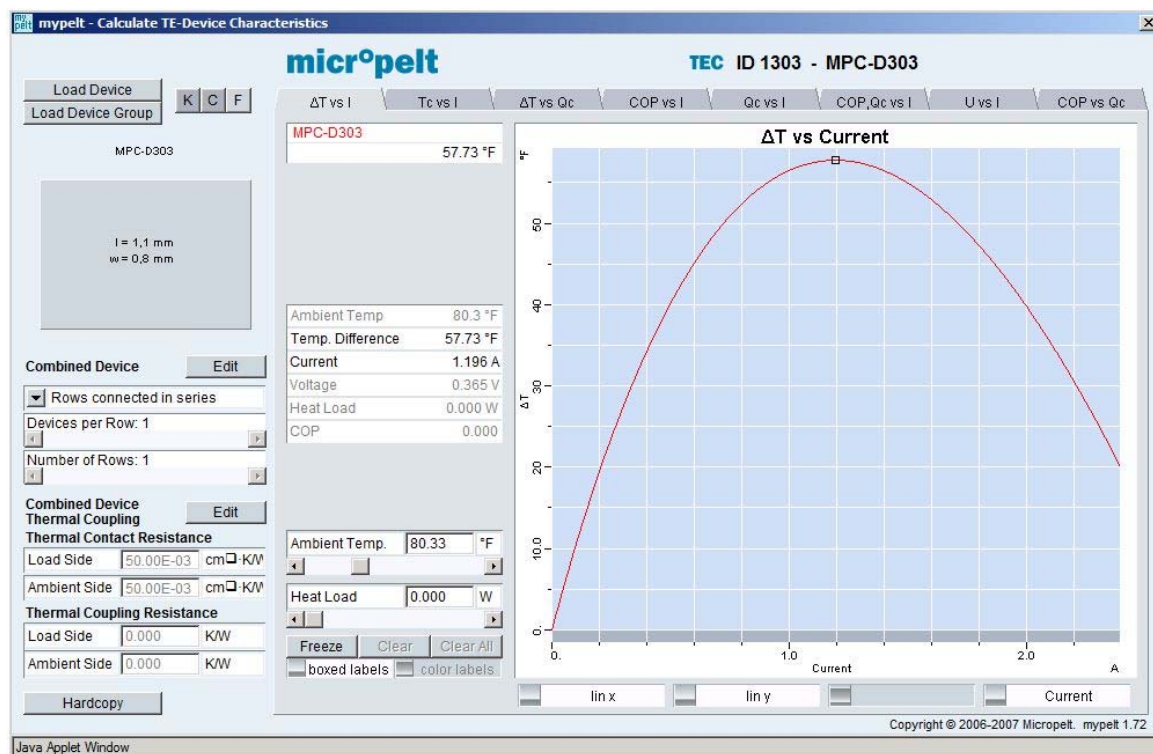
V programu lze standardně zadat teplotu okolního prostředí, teplotu studené strany Peltierova článku, množství tepla, které má být odvedeno, požadavky na napájení, případně další parametry. Software vyhodnotí požadavky a nabídne dostupné články. Po výběru konkrétního Peltierova článku následuje zobrazení výkonnostních grafů.



Obr. 27 Program pro volbu Peltierových článků od společnosti Melcor [18]



Obr. 28 Program pro volbu Peltierových článků od společnosti RMT Ltd [23]



Obr. 29 Program pro volbu Peltierových článků od společnosti Micropelt [32]

6 NÁVRH TERMOELEKTRICKÉHO CHLAZENÍ

6.1 Experimentální uspořádání

Cílem práce je provést návrh uplatnění Peltierova článku pro chlazení procesoru stolního počítače. Současné výkonné procesory mají ztrátový tepelný výkon větší než 100 W a pro chlazení těchto procesorů by bylo zapotřebí článků o výkonech větších, než 100 W. Peltierovy články jsou ovšem napájeny nízkým napětím. U výkonnějších Peltierových článků protékají obvodem již značné proudy a vyžadují tak kvalitní napájení. Z tohoto důvodu bude chlazen méně výkonný procesor s maximálním ztrátovým tepelným výkonem 45 W.

Použité komponenty:

Základní deska: Biostar TA690G AM2

Procesor: AMD Sempron LE1200 EE

Operační paměť: Kingston DIMM 1024 MB DDRII 400 MHz

Pevný disk: Toshiba 20GB MK2018GAS

Zdroj: Fortron ATX-350PNF, Fortron ATX-300PNF

Peltierův článek: M-TEC1-12705HT

Čerpadlo: Thermaltake CL-W0132 P500

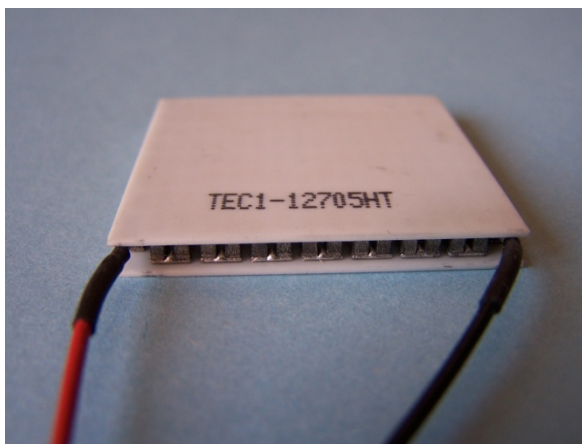
Teplovodivá folie pro elektroniku – typ 8810 3M

Měřič spotřeby: Standby Energy-Monitor SEM16



Obr. 30 Fotografie chlazeného procesoru²

² Rozměry procesoru jsou téměř identické s rozměry použitého Peltierova článku.



Obr. 31 Fotografie Peltierova článku použitého pro měření³

Peltierův článek M-TEC1-12705HT o rozměrech 40 mm x 40 mm x 4 mm je napájen pracovním proudem $I_{\max} = 4,6$ A, maximálním pracovním napětím $U_{\max} = 15,4$ V, maximální výkon $Q_{\max} = 46,2$ W a maximální dosažitelný teplotní rozdíl $\Delta T_{\max} = 68$ °C. Napájen bude ze samostatného zdroje Fortron ATX-300PNF. Zdroj dodává do článku napětí pouze 12 V, maximální dosažitelný výkon bude tedy nižší.

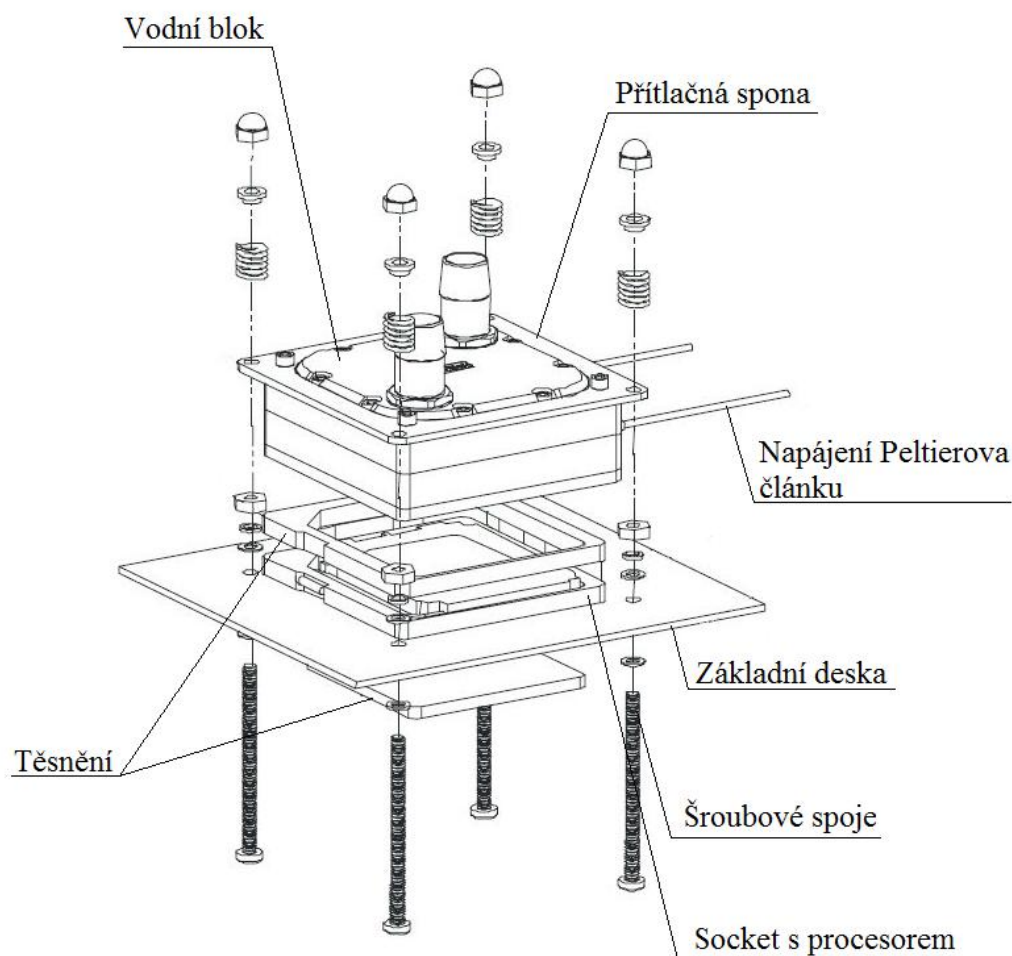
Konstrukce chlazení vychází ze zásad uvedených v kapitole 4. Peltierův článek bude k procesoru připevněn mechanicky šroubovým spojením. Mezi procesorem a studenou stranou Peltierova článku bude umístěna měděná destička. Destička sloužící pro zrovnoměnění přenosu tepla a zabraňuje lokálnímu přehřátí procesoru. Pro lepší přenos tepla mezi procesorem, destičkou a chladičem bude na rozhraních aplikované malé množství teplovodivé pasty.

V úvahu připadají dva typy chlazení Peltierova článku: nucené chlazení vzduchem nebo chlazení kapalinou v uzavřeném okruhu. Chlazení vzduchem pravděpodobně neumožní dosáhnout dostatečně nízkých teplot na teplé straně Peltierova článku a teplota studené strany bude výrazně vyšší.

Při dosažení nízkých teplot dochází ke kondenzaci vlhkosti z okolního vzduchu a při dalším poklesu teploty pod bod mrazu následně dochází ke vzniku ledu. Vlhkost a zmrzlá voda negativně ovlivňuje jak článek, tak základní desku počítače. Aby nedošlo ke zkratu a nebo až ke zničení desky, bude na povrch desky z obou stran aplikována tenká vrstva laku na bázi akrylové pryskyřice. Prostor mezi základní deskou a chladičem bude navíc vyplněn plastelínou. Zamezí se tak vzniku vlhkosti v neutěsněných místech. Plastelína je horší tepelný vodič než vzduch, při chlazení Peltierův článek odebírá teplo především procesoru a snižují se tak tepelné ztráty z okolního vzduchu. Průmyslová řešení využívají speciálních izolačních pěn nebo pryží, například neoprenu.

Chladič bude k článku připevněn pružně, pomocí spony a tlačných pružin.

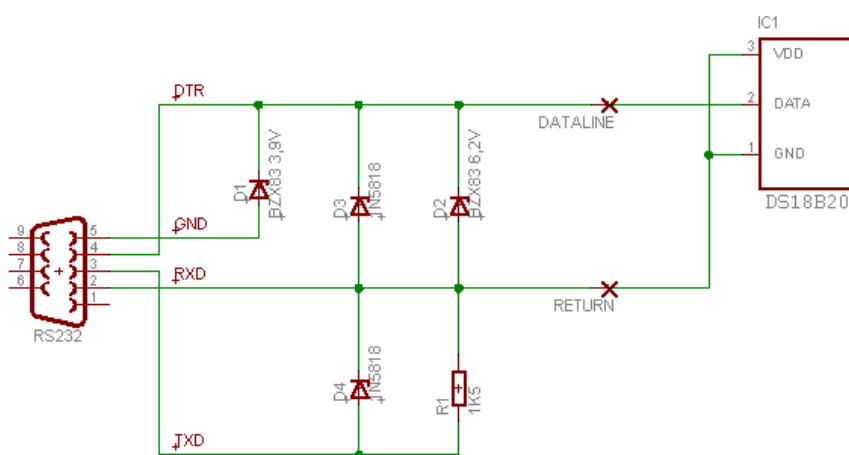
³ Jedná se o běžný článek, není zatěsněn a není tedy ani chráněn proti vlhkosti.



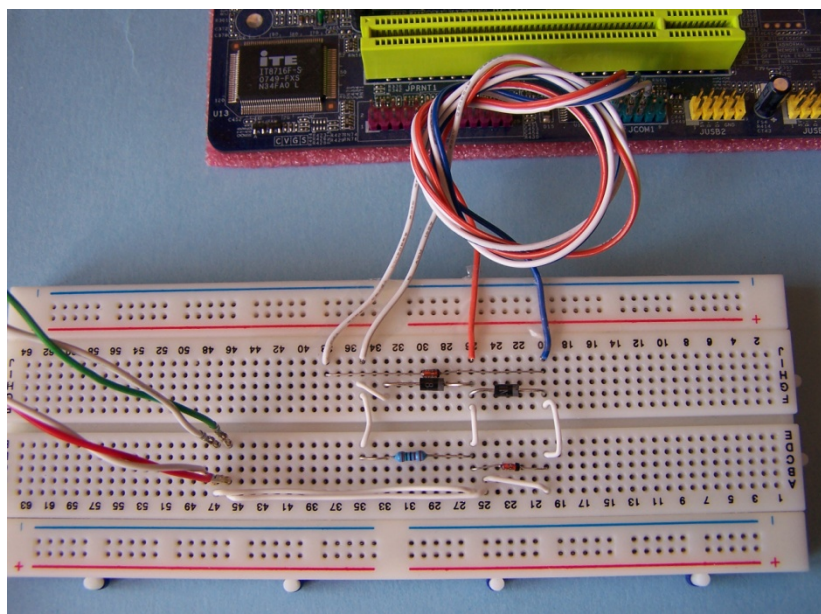
Obr. 32 Schéma zapojení komerčního chladicího systému společnosti Swiftech pro chlazení procesorů [14]

6.2 Měření teploty

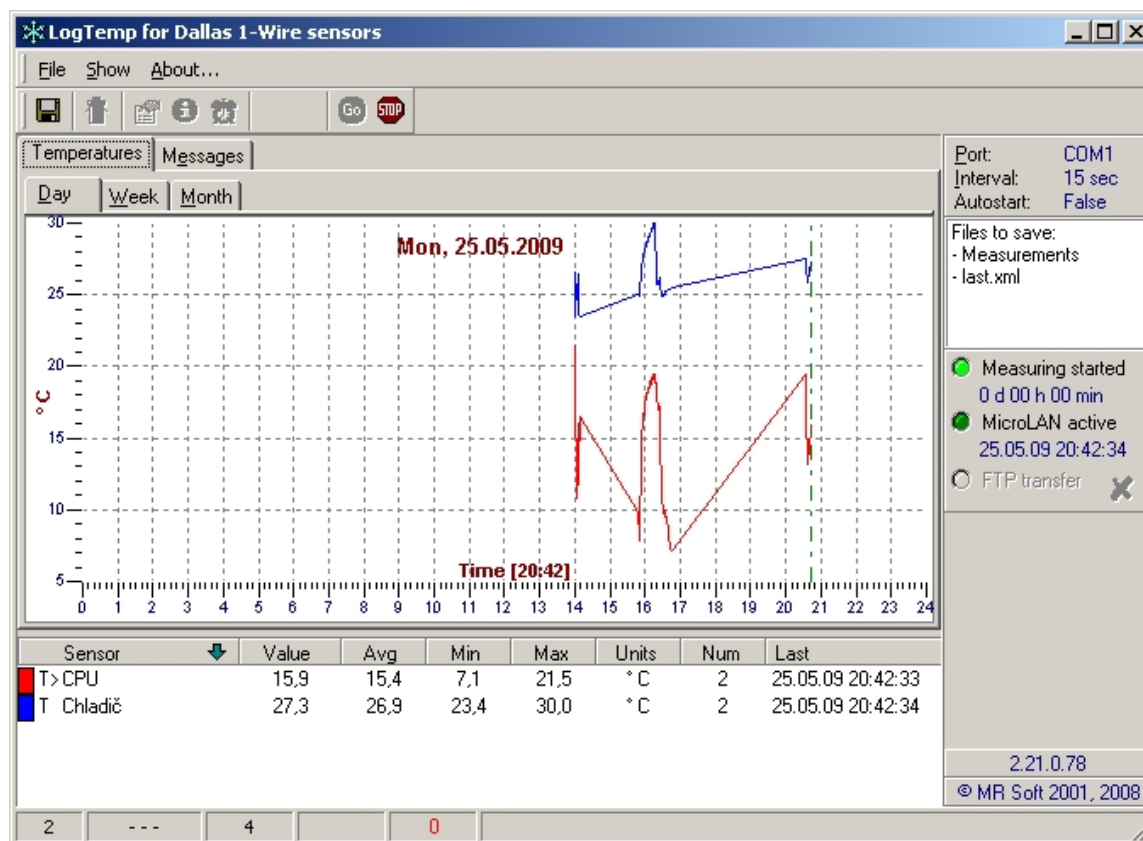
Hodnota teploty procesoru získaná z čidla umístěného na základní desce jsou pouze informativní, protože přesnost čidla je velmi hrubá. Čidlo ukazuje po startu počítače teplotu mnohdy nižší, než je teplota okolí a nehodí se tedy pro vyhodnocování výsledků. Z tohoto důvodu bude pro měření použit digitální teploměr skládající se z čidel Maxim/Dallas DS18B20 umístěných v pouzdře TO92. Přesnost čidla je $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a čidlo je schopné měřit v rozsahu teplot od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na Obr. 33 je vidět schéma zapojení. Po připojení na COM port počítače je možné pomocí softwaru LogTemp (Obr. 35) měřenou teplotu číst a zaznamenávat do textového souboru.



Obr. 33 Schéma zapojení digitálního teploměru [19]



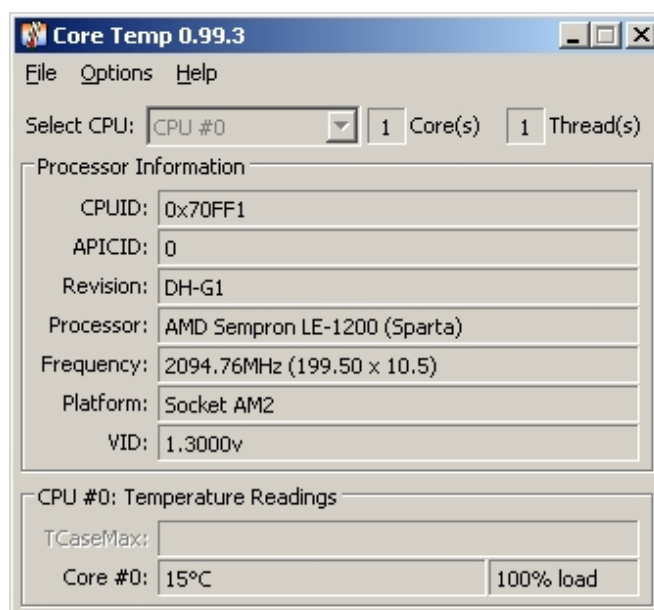
Obr. 34 Pohled na zapojený teploměr v kontaktním nepájivém poli



Obr. 35 Software LogTemp sloužící k zaznamenávání teplot z čidel DS18B20 [13]

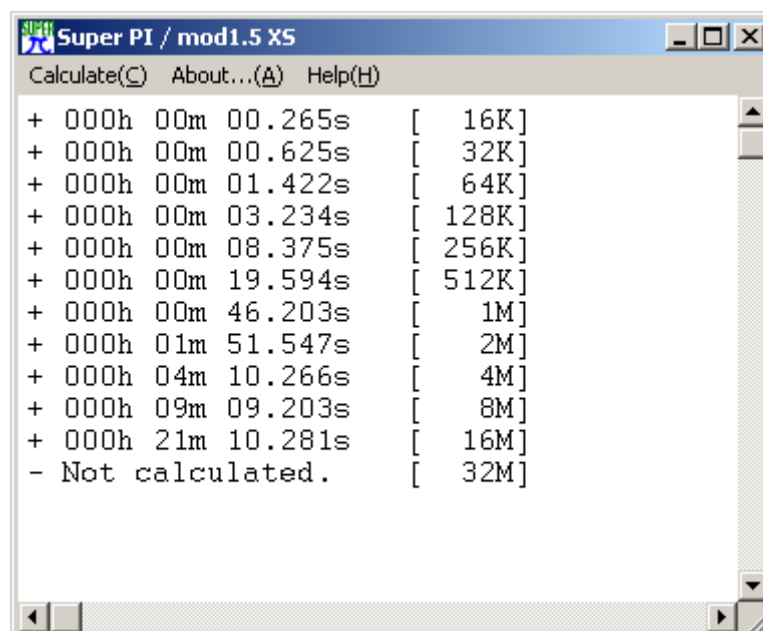
Dalším používaným programem pro měření teploty bude Core Temp (Obr. 36). Program čte a zaznamenává teplotu pomocí digitálního senzoru umístěného uvnitř procesoru. Podle autora programu Core Temp, jsou takto naměřené hodnoty velmi přesné, neboť senzor se nachází přímo uvnitř procesorového jádra. Podobně jako u programu LogTemp bude teplota zaznamenávána do textového souboru, jen s tím rozdílem, že teplota jádra je měřena pouze v celých číslech.

Čidlem DS18B20 bude měřena teplota teplé a studené strany Peltierova článku. V grafech bude tedy možné posoudit odchylky naměřených teplot z integrovaného senzoru a teploměru s čidlem DS18B20.



Obr. 36 Program Core Temp zaznamenávající teplotu jádra procesoru [3]

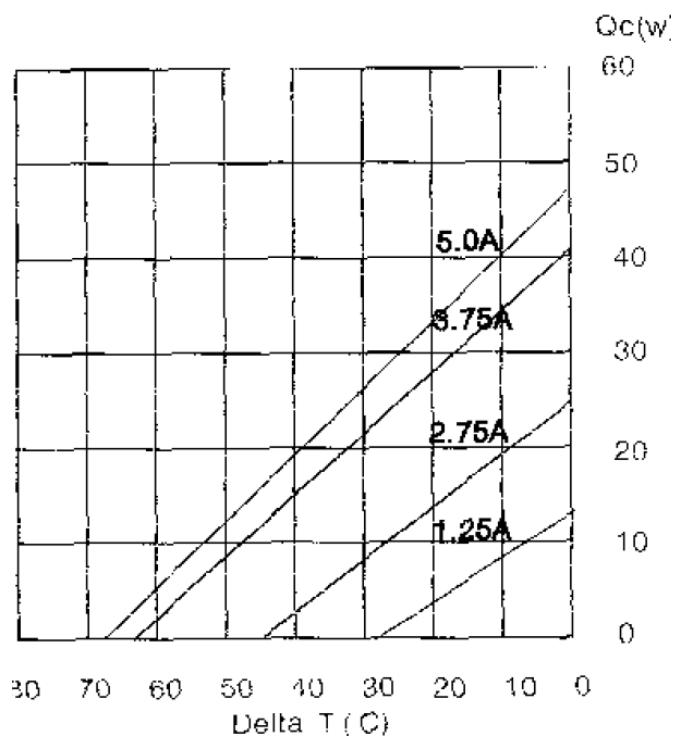
Teplota procesoru se mění v závislosti na jeho vytížení. Aby bylo dosaženo konstantní teploty a tedy konstantního vyzařování ztrátového výkonu, bude procesor měřen při nulovém a stoprocentním vytížení. K úplnému vytížení procesoru poslouží softwarový program Super PI (Obr. 37), který bude provádět výpočet čísla π na 16 miliónů desetinných míst.



Obr. 37 Rozhraní programu Super PI [19]

Výpočet čísla π na 16 miliónů desetinných míst vytíží procesor na 100 % přibližně po dobu 21 minut.

6.3 Zhodnocení navrženého způsobu chlazení



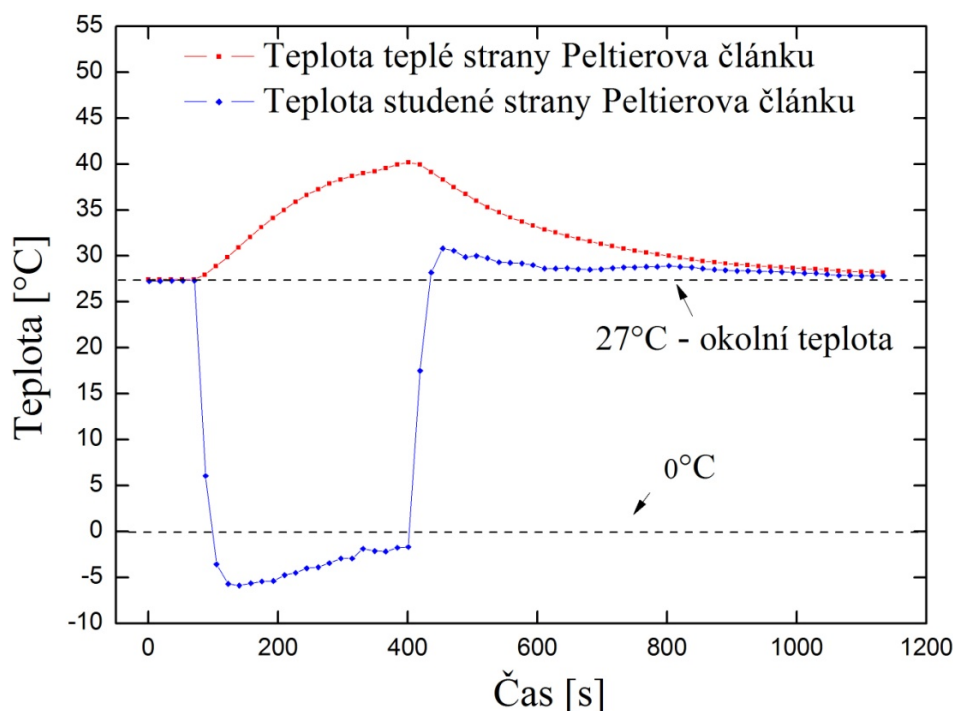
Graf 1 Výkonnostní graf pro článek M-TEC1-12705HT [24]

Peltierův článek chlazený vzduchem – bez zátěže

Zatímco na studené straně Peltierova článku je teplo absorbováno, na teplé straně je odebrané teplo vyzařováno. Článek pracuje jako pumpa a odebrané teplo je zapotřebí někam odvést. V tomto případě je teplo odváděno do hliníkového chladiče opatřeného ventilátorem.

Následující graf (Graf 2) ukazuje, jak při sepnutí chlazení v čase $t = 80$ s dochází k rychlému ochlazení studené strany Peltierova článku a poklesu na teplotu $-5,9$ °C. Teplá strana má ve stejném okamžiku teplotu $30,9$ °C. Vzduchový chladič není schopný účinně odvádět teplo a s tím, jak se zahřívá, teploty obou stran postupně stoupají. Po vypnutí Peltierova článku a vzduchového chladiče (čas $t = 400$ s) teplota studené strany rychle narůstá. Průchodem tepla skrz článek se ohřívá od teplé strany. Teplota teplé strany naopak pomalu klesá.

Tento způsob, tedy použití Peltierova článku se vzduchovým chladičem, není pro chlazení procesoru vhodný. Chladič není schopný dostatečně rychle odvádět teplo z přechodu a jeho teplota rychle roste.



Graf 2 Naměřené teploty na teplé a studené straně Peltierova článku při současném chlazení článku vzduchovým chladičem

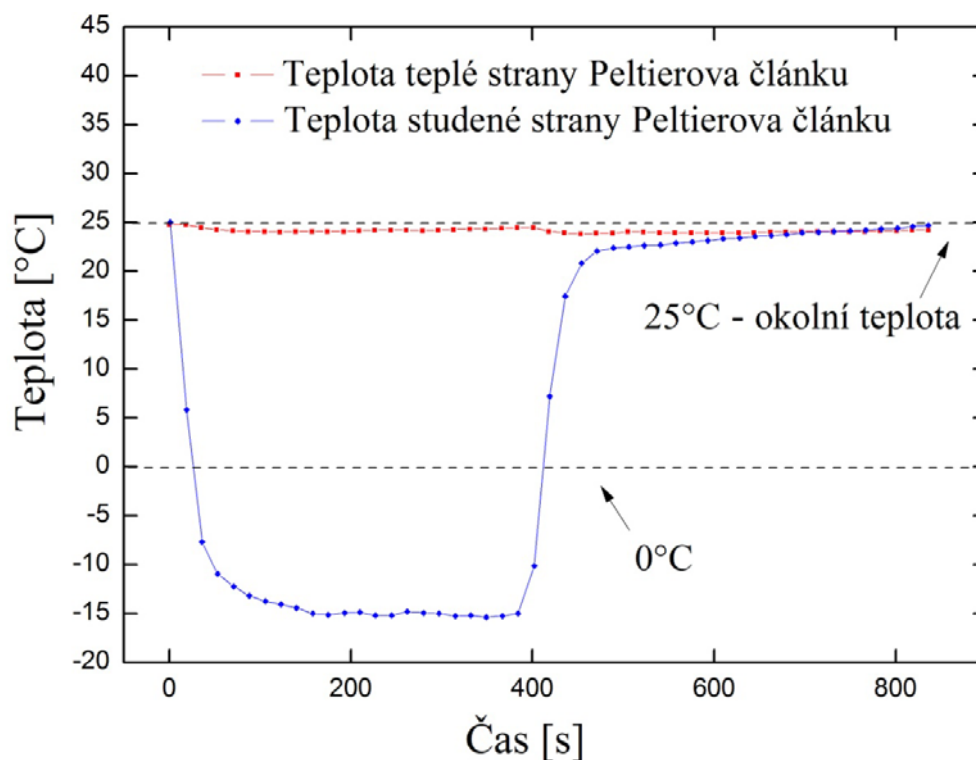
Peltierův článek chlazený vodou – bez zátěže

Teploty Peltierova článku chlazeného vodou se výrazně liší od teplot Peltierova článku chlazeného vzduchem (Graf 3). Chladicí okruh s vodou ochlazuje Peltierův článek účinněji, a proto můžeme dosáhnout mnohem nižších teplot.

Krátce po sepnutí (start v čase $t = 0$ s) teplota studené strany rychle klesá a po čase se ustálí na teplotě přibližně -15 °C. Z grafu je vidět, že odezva Peltierova článku je velmi rychlá. Teploty -15 °C dosáhne studená strana článku během 3 minut. Teplota teplé strany výrazněji nepřekračuje po celou dobu měření 24 °C. Z toho vyplývá, že teplo odebrané na studené straně je plynule odváděno a na teplé straně předáváno do proudícího média. Po vypnutí chlazení (čas $t = 400$ s) teplota studené strany rychle stoupá a přibližuje se pokojové teplotě.

Maximální teplotní rozdíl mezi teplotou a studenou stranou Peltierova článku se blíží hodnotě $\Delta T_{\max} = 39$ °C.

Z výkonnostních grafů dodaných výrobcem vyplývá, že při teplotě teplé strany $T_h = 25$ °C, naměřeném proudu $I = 3,74$ A a naměřeném $\Delta T_{\max} = 39$ °C by měl článek dosahovat teoretického chladicího výkonu $Q_c = 13$ W (Graf 1).

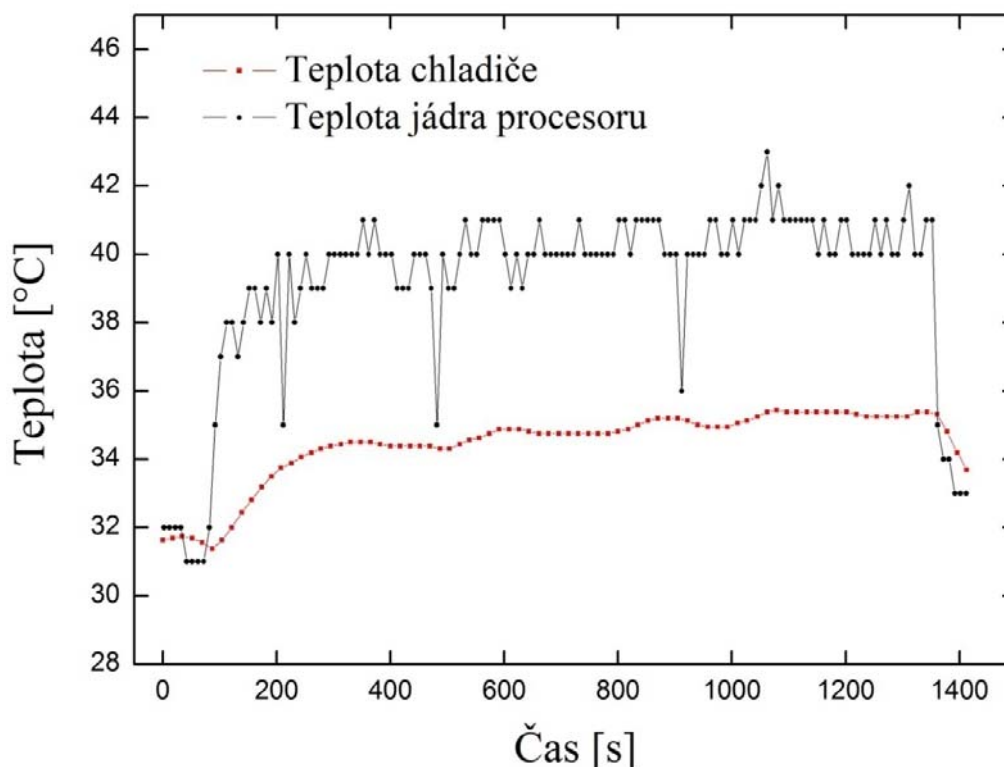


Graf 3 Naměřené teploty na teplé a studené straně Peltierova článku při současném chlazení článku vodním chlazením

Chlazení procesoru - vzduchový chladič

Na následujícím grafu (Graf 4) je vidět průběh teplot procesoru a na chladiči při použití výrobcem dodávaného vzduchového chlazení. Při nulovém vytížení procesoru se teploty v jádře procesoru a na chladiči ustálí přibližně na teplotě 31 °C. V čase $t = 100$ s dochází k plnému vytížení procesoru a následnému růstu teploty. Nárůst teploty je v rozmezí 6 °C až 18 °C nad teplotou okolí.

Spotřeba sestavy se vzduchovým chlazením je při plném vytížení procesoru 63 W, při nulovém vytížení procesoru 46 W. Z toho vyplývá, že procesor spotřebovává v klidu 28 W a při úplném vytížení dojde k vzrůstu o maximálně 17 W. Toto množství elektrické energie představuje v grafu naměřené zvýšení teploty.



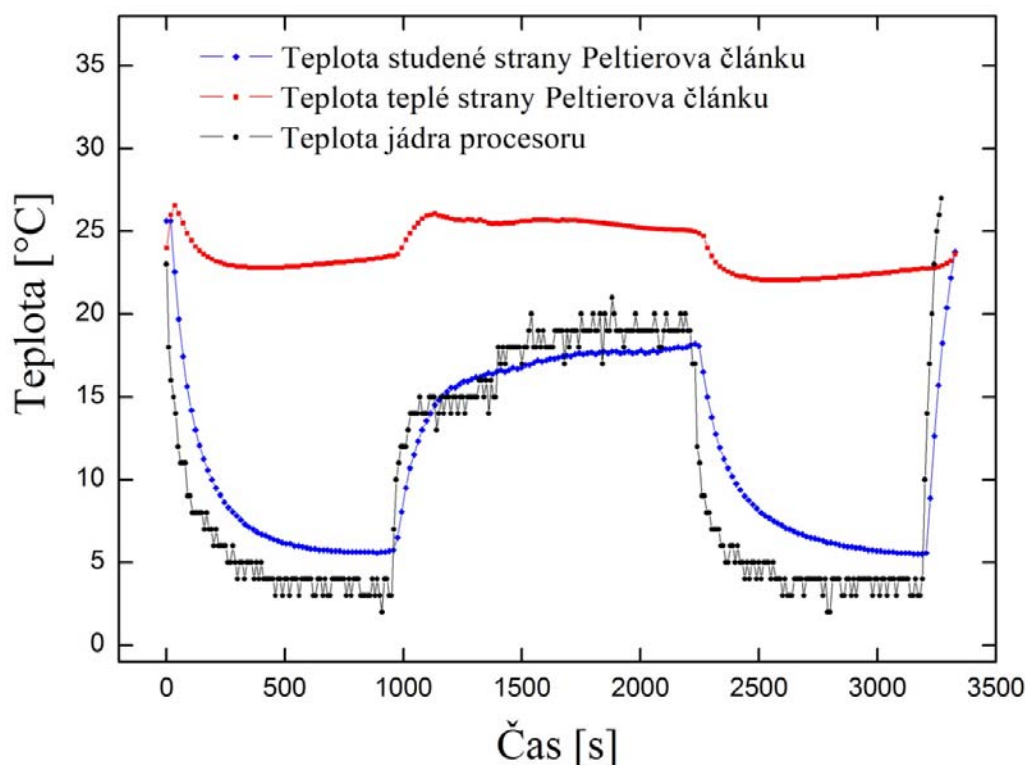
Graf 4 Naměřené teploty na chladiči a v jádře procesoru při současném chlazení procesoru vzduchovým chlazením

Chlazení procesoru Peltierovým článkem – vodní chlazení

Z předchozího měření je patrné, že Peltierův článek je pro potřeby chlazení procesoru nutné opatřit vodním chlazením. Vzduchové chlazení by nebylo schopné dostatečně rychle odvádět odpadní teplo procesoru a Peltierova článku. Vodní okruh je opatřen pumpou s průtokem 500 l/hod a velkým zásobníkem vody, aby nedocházelo k výraznému ohřívání vody v chladícím okruhu, a tím ke zkreslení výsledků.

Čidla teploty jsou umístěna blízko teplé a studené strany Peltierova článku. Současně je měřena teplota uvnitř procesoru. Výsledné hodnoty teploty na studené straně Peltierova článku a uvnitř procesoru by se měly navzájem blížit. Z naměřených hodnot je vidět, že rozdíly mezi naměřenou teplotou blízko povrchu procesoru a v jádře procesoru jsou menší, než v případě měření se vzduchovým chlazením. Obě křivky charakterizující teplotu procesoru vykreslují podobný průběh teplot. V čase $t = 0$ s bylo spuštěno chlazení. Procesor nebyl zatěžován, cílem bylo zjistit maximální teplotní rozdíl a nejnižší dosažitelnou teplotu. Maximální teplotní rozdíl dosahuje hodnoty $\Delta T_{\max} = 18$ °C. Teplota se postupně ustálí na 6 °C, při současném průtoku proudu obvodem $I = 4,0$ A a tedy chladícím výkonu článku $Q_c = 32$ W. Teplota teplé strany Peltierova článku se nyní mění výrazněji než při běhu článku naprázdno.

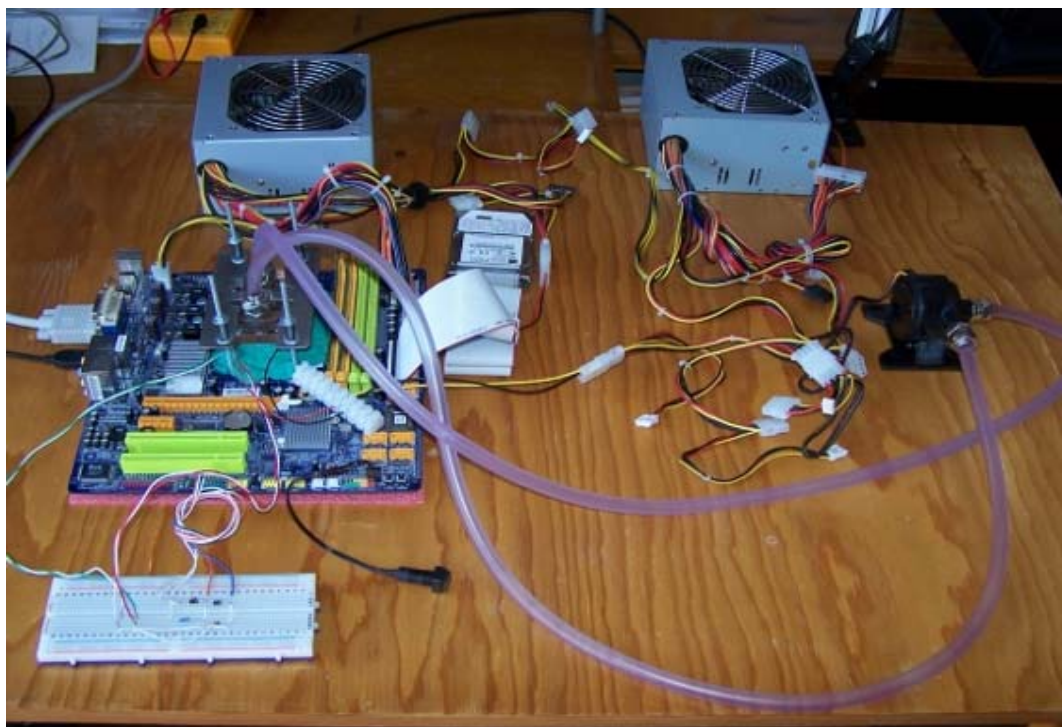
V čase $t = 1000$ s bylo spuštěno vytížení procesoru na 100 %. Dochází k výraznému nárůstu teplot studené a teplé strany Peltierova článku. Z předchozího měření víme, že skok způsobila dodatečná spotřeba 17 W elektrické energie procesoru. Na konci zatěžování dosahuje maximální teplotní rozdíl Peltierova článku hodnoty $\Delta T_{\max} = 7$ °C, při současném průtoku proudu $I = 4,03$ A. Z toho vyplývá chladící výkon článku $Q_c = 39,5$ W.



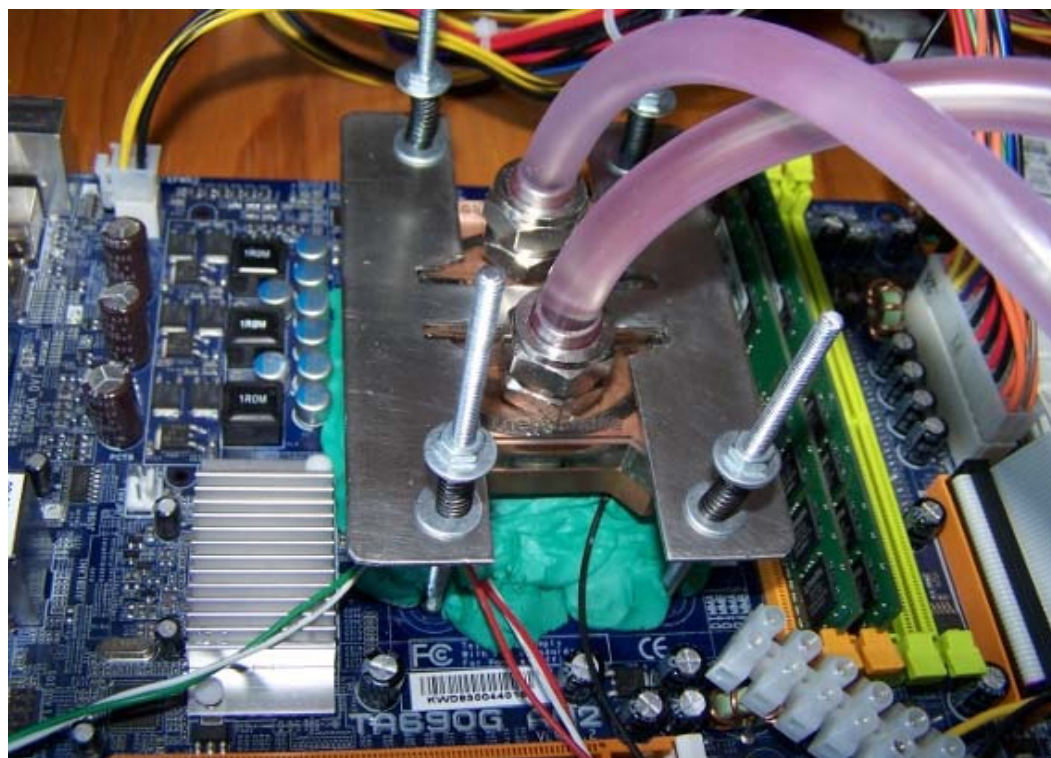
Graf 5 Chlazení procesoru Peltierovým článkem (naměřené teploty na Peltierově článku a v jádře procesoru se mění současně se změnou vytížení procesoru)

Spotřeba sestavy byla změřena při běhu naprázdno 122 W, v průběhu zatížení 146 W. Nejvyšší teplota na chladiči nepřesáhla hodnotu 17,5 °C, uvnitř procesoru 21 °C. Výsledné teploty byly tedy nižší než okolní teplota.

Z výsledků měření vyplývá, že Peltierův článek M-TEC1-12705HT o maximálním výkonu $Q_{\max} = 46,2$ W je schopen chladit procesor AMD Sempron LE1200 EE o maximálním ztrátovém výkonu 45 W na teplotu nižší, než je teplota pokojová. Nicméně Peltierův článek je zapotřebí chladit vodním chlazením. Přestože použitý procesor i Peltierův článek se řadí k výkonově slabším, nároky na chlazení takovéto konfigurace jsou neúměrné výkonu. Obzvlášť zvažíme-li, že spotřeba sestavy při použití vzduchového chladiče byla pouhých 63 W, v případě chlazení Peltierovým článkem až 146 W. Tedy více než dvojnásobná.



Obr. 38 Pohled na měřicí sestavu (zdroj vpravo slouží pouze k napájení čerpadla a Peltierova článku)



Obr. 39 Pohled na vodní blok usazený na procesoru a zaizolované chlazení

ZÁVĚR

Peltierovy články jsou polovodičové prvky umožňující termoelektrický ohřev, chlazení a přímou přeměnu tepelné energie. Jsou postaveny na fyzikálních principech, které jsou známy po dlouhou dobu, přesto se jim pozornosti dostává zejména v posledních letech. Objevení nových materiálů s výrazně lepšími termoelektrickými vlastnostmi by pomohlo zlepšit jejich účinnost.

Peltierovy články představují unikátní způsob chlazení. Na rozdíl od jiných způsobů, umožňují články velmi přesně regulovat teplotu. Z toho důvodu je jich využíváno zejména pro chlazení malých výkonů. V případě chlazení větších výkonů nejsou energeticky výhodné.

Pro efektivní práci a dlouhou životnost termoelektrického chlazení je důležitá zejména kvalita spojení Peltierova článku s chladičem a chlazeným objektem, minimalizace tepelných ztrát, dobrý přenos tepla na styčných plochách a kvalitní napájení. Články jsou napájeny stejnosměrným napětím.

Výrobci Peltierových článků prodávají rozsáhlé produktové řady. Nabízí také výpočetní programy usnadňující volbu Peltierova článku. Článek samotný funguje jako pumpa. Z jedné strany teplo odebírá, na druhé straně teplo předává chladiči. Na studené straně Peltierova článku jsme schopni dosáhnout teplot i nižších než 0°C. Ovšem pouze za předpokladu, že teplo přicházející na teplou stranu článku bude dostatečně rychle odváděno. Z tohoto důvodu je v experimentální části práce použit Peltierův článek s vodním chlazením. Vodní blok je připevněn k Peltierovu článku a společně odebírají teplo procesoru. Chlazení je energeticky náročné, Peltierův článek spolu s vodním chlazením navyšují spotřebu sestavy na více než dvojnásobek. Procesory jsou uzpůsobeny pro pracovní teploty přesahující 50 °C. Z důvodu vysoké spotřeby se chlazení této sestavy Peltierovým článkem do budoucna jeví jako neopodstatněné. Existují ovšem aplikace, u nichž je termoelektrické chlazení jediným možným způsobem chlazení a v těchto případech není energetická náročnost rozhodujícím faktorem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [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>.
- [2] BÄCKSTRÖM, M. *Technika chlazení: Určeno inž., technikům, mistrům a montérům v chladírenství a stud. prům. a vys. škol.* 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. 679 s.
- [3] *CoreTemp* [online]. [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.alcpu.com/CoreTemp/>>.
- [4] GOLAB, F.; KAMENČÁK, F. *Termoelektrické jevy a jejich užití*. 1. vyd. Praha: SNP, 1975. 83 s.
- [5] GROMOV, G. *Thermoelectric cooling modules* [online]. RMT, [cit. 2009-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.rmtltd.ru/articles/Thermoelectric%20Cooling%20Modules.pdf>>.
- [6] HAGEDOORN, H. A true "ion-wind" silent fan no mechanical parts [online]. c1997-2009 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <www.guru3d.com/imageview.php?image=12880>.
- [7] *High dynamic rating, cooling, cycling and thermal management* [online]. Micropelt, July 2008 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <http://www.micropelt.com/down/cooling_and_heating.pdf>.
- [8] HOCH, V. *Chladicí technika*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. 183 s. ISBN 80-214-0412-4.
- [9] IOFFE, A. F. *Fysika polovodičů*. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1959. 454 s.
- [10] KARAMAZOV, S. *Interakce bodových poruch ve vybraných krystalech tetradymitové struktury*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, Ústav elektrotechniky a informatiky, 2007. 56 s. ISBN 978-80-7395-012-5.
- [11] KREIDL, M. *Měření teploty – senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 239 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [12] KŘIVOHLÁVEK, J. *Chlazení počítače: kompletní průvodce (nejen) pro hráče*. 1. vyd. Brno : Computer Press, 2007. 183 s. ISBN 978-80-251-1509-1.
- [13] *LogTemp* [online]. MR Soft, c2002, 2009, akt. 11. 4. 2009 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.mrsoft.fi/ohj01en.htm>>.
- [14] *MCW6500-T 775™ Thermoelectric waterblock: installation guide for Intel® Core2 Processors* [online]. Swiftech, [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <http://www.swiftnets.com/products/MCW6500-T_775_installation_guide.pdf>.
- [15] *MCW-CHILL 452™ Thermoelectric liquid chiller* [online]. Swiftech, [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.swiftnets.com/products/MCWCHILL-452.asp>>.
- [16] MIKYŠKA, L. *Termoelektrické články: určeno prac. v elektrotechn., energetice, regulační techn. a automatizaci*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964. 152 s. Malá elektrotechn. knihovna. Řada elektrotechn. lit.; sv. 24.
- [17] ROWE, D. M. *CRC handbook of thermoelectrics*. 1st ed. New York: CRC Press, 1995. 701 s. ISBN 9780849301469.
- [18] *Software* [online]. [cit. 2007-10-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.melcor.com/software.html>>.

- [19] *Super PI for Windows* [počítačový program]. Ver. 1.1. Kanada Laboratory University of Tokyo, 21. 9. 1995 [cit. 2009-03-09]. Dostupné z < ftp://pi.super-computing.org/windows/super_pi.zip>.
- [20] ŠTĚPÁNEK, M. *Teploměr pro PC* [online]. c2005 [cit. 2009-02-11]. Dostupný z WWW: <<http://trifid2.sweb.cz/teplomer/index.htm>>.
- [21] ŠVARNÝ, J. Vliv zvlhnutí napájecího proudu na účinnost termoelektrické baterie. In MENTLÍK, Václav. *Sborník příspěvků z mezinárodní konference Diagnostika '07, Nečtiny 11. - 13. září 2007*. 1. vyd. Plzeň: Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření, Oddělení elektrotechnologie, 2007. Část 2. 4 s. Dostupný z WWW: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/16.pdf>>. ISBN 978-80-7043-5.
- [22] *TECCAD software* [online]. TEC Microsystems, c2008 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.tec-microsystems.com/EN/TECCad.html>>.
- [23] *TE modules datasheets: thermoelectric cooling* [online]. RMT, c2003-2008 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.rmtltd.ru/catalogues/TEC2005_DS.pdf>.
- [24] *Thermoelectric cooler TEC1-12705: performance specifications* [online]. HB, [cit. 2009-03-29]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/601/601-020/dsh.601-020.1.pdf>.
- [25] *Thermoelectric coolers* [online]. Kryotherm, c1992-2008 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.kryotherm.ru/?tid=44>>.
- [26] *Thermoelectric cooling versus traditional refrigeration* [online]. Ferrotec (USA) Corporation, c2001-2009 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/teVsTraditional/>>.
- [27] *Thermoelectric handbook* [online]. Melcor, [cit. 2009-02-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.melcor.com/handbook.html>>.
- [28] *Thermoelectric solutions* [online]. Supercool, [cit. 2009-02-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.supercool.com>>.
- [29] *Thermoelectric technical reference — applications of thermoelectric coolers* [online]. Ferrotec (USA) Corporation, c2001-2009 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef03/>>.
- [30] *Thermoelectric technical reference — introduction to thermoelectric cooling* [online]. Ferrotec (USA) Corporation, c2001-2009 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef01/>>.
- [31] *Thermoelectric | thermal management solutions* [online]. Laird Technologies, c2009 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.lairdtech.com/Products/Thermal-Management-Solutions/>>.
- [32] *Thin film thermogenerators and sensing devices* [online]. Micropelt, [cit. 2009-03-16]. Dostupný z WWW: <http://www.micropelt.com/down/datasheet_mpg_d602_d751.pdf>.
- [33] ZEMAN, M. *Teplotní čidlo pro základní desku* [online]. [cit. 2009-02-03]. Dostupný z WWW: <http://helium.webz.cz/hw/ntc_10k_2.html>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Chladič na bázi iontového větru	13
Obr. 2	Seebeckova termoelektrická řada	17
Obr. 3	Zvyšování koeficientu termoelektrické účinnosti od roku 1940 až do současnosti	18
Obr. 4	Zvyšování koeficientu termoelektrické účinnosti a maximálního dosažitelného rozdílu teplot Peltierových článků	18
Obr. 5	Ukázka konstrukce jednořadého Peltierova článku	20
Obr. 6	Průřez termočlánkem	21
Obr. 7	Ukázka konstrukce kaskádového Peltierova článku	22
Obr. 8	Maximální výkony komerčně dostupných Peltierových článků	22
Obr. 9	Ukázka konstrukce mikročlánku	23
Obr. 10	Ukázka velikosti mikročlánku	24
Obr. 11	Systém termoelektrického chlazení typu vzduch - vzduch	26
Obr. 12	Systém termoelektrického chlazení typu vzduch - kapalina	26
Obr. 13	Systém termoelektrického chlazení vzduchem	27
Obr. 14	Systém termoelektrického chlazení kapalinou	27
Obr. 15	Systém termoelektrického chlazení typu kapalina - vzduch	27
Obr. 16	Systém termoelektrického chlazení typu kapalina - kapalina	28
Obr. 17	Montáž Peltierova článku mechanickým spojením	28
Obr. 18	Montáž Peltierova článku pájením	29
Obr. 19	Montáž Peltierova článku lepením	30
Obr. 20	Vznik napětí na Peltierově článku	30
Obr. 21	Ukázka mechanického narušení sloupku	31
Obr. 22	Ukázka výkonových křivek, jednotlivé parametry jsou ve vzájemně závislé ..	32
Obr. 23	Průběh střídavého proudu v čase	33
Obr. 24	Vliv zvlnění na teplotní rozdíl ΔT	33
Obr. 25	Změna velikosti proudu pulsně šířkovou modulací PWM	33
Obr. 26	Vliv zvlnění na teplotní rozdíl ΔT při různých hodnotách Q	33
Obr. 27	Program pro volbu Peltierových článků od společnosti Melcor	36
Obr. 28	Program pro volbu Peltierových článků od společnosti RMT Ltd	37
Obr. 29	Program pro volbu Peltierových článků od společnosti Micropelt	37
Obr. 30	Fotografie chlazeného procesoru.....	38
Obr. 31	Fotografie Peltierova článku použitého pro měření.....	39
Obr. 32	Schéma zapojení komerčního chladičového systému společnosti Swiftech pro chlazení procesorů	40
Obr. 33	Schéma zapojení digitálního teploměru	41

Obr. 34	Pohled na zapojený teploměr v kontaktním nepájivém poli.....	41
Obr. 35	Software LogTemp sloužící k zaznamenávání teplot z čidel DS18B20	42
Obr. 36	Program Core Temp zaznamenávající teplotu jádra procesoru	43
Obr. 37	Rozhraní programu Super PI	43
Obr. 38	Pohled na měřicí sestavu (zdroj vpravo slouží pouze k napájení čerpadla a Peltierova článku)	49
Obr. 39	Pohled na vodní blok usazený na procesoru a zaizolované chlazení	49

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1	Výkonnostní graf pro článek M-TEC1-12705HT	44
Graf 2	Naměřené teploty na teplé a studené straně Peltierova článku při současném chlazení článku vzduchovým chladičem	45
Graf 3	Naměřené teploty na teplé a studené straně Peltierova článku při současném chlazení článku vodním chlazením	46
Graf 4	Naměřené teploty na chladiči a v jádře procesoru při současném chlazení procesoru vzduchovým chlazením	47
Graf 5	Chlazení procesoru Peltierovým článkem (naměřené teploty na Peltierově článku a v jádře procesoru se mění současně se změnou vytížení procesoru)	48

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Veličina	Symbol	Jednotka
Seebeckův koeficient	α	μVK^{-1}
relativní Seebeckův koeficient	α_{AB}	μVK^{-1}
Seebeckovo napětí	u_s	μV
Peltierův koeficient	π	$\text{J}\cdot\text{A}^{-1}$
relativní Peltierův koeficient	π_{AB}	$\text{J}\cdot\text{A}^{-1}$
teplo	Q	J
proud	I	A
stejnoseměrný proud	I_{dc}	A
maximální proud	I_{max}	A
zvlnění proudu	N	A
napětí	U	V
maximální napětí	U_{max}	V
čas	t	s
teplota	T	$\text{K } (^\circ\text{C})$
maximální rozdíl teplot	ΔT_{max}	$\text{K } (^\circ\text{C})$
teplota teplé strany Peltierova článku	T_h	K
teplota studené strany Peltierova článku	T_c	K
elektrická vodivost	σ	S
tepelná vodivost	κ	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
koeficient termoelektrické účinnosti	Z	K^{-1}
koeficient termoelektrické účinnosti	ZT	-
příkon	P	W
chladicí výkon	Q_c	W
maximální chladicí výkon	Q_{max}	W

koeficient optimálního výkonu	COP_{Max}	-
příkon	P	W
drsnost	Ra	μm
pracovní cyklus	Q	%
impedance	Z_{AC}	Ω