

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

POUŽITÍ PELTIEROVA ČLÁNKU PRO ŘÍZENÍ TEPLOTY

APPLICATION OF THERMOELECTRIC MODULE FOR TEMPERATURE CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH GOFROŇ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Gofroň

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Použití Peltierova článku pro řízení teploty

v anglickém jazyce:

Application of Thermoelectric Module for Temperature Control

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je seznámení se použitím Peltierových článků pro řízení teploty a následně se zabývat možnostmi použití těchto článků pro řízení realizované termo-komory.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s Termoelektrickým jevem a konstrukcí Peltierových článků
2. Seznamte se aplikacemi Peltierových článků
3. Identifikujte důležité parametry Peltierových článků pro řízení
4. Navrhněte možná uspořádání termoelektrických modulů pro řízení teploty v termokomorách
5. Navrhněte senzorickou soustavu pro realizaci řízení termokomory

Seznam odborné literatury:

- [1] Ďaďo S., Kreidl M.: Senzory a měřicí obvody, Skriptum ČVUT, 1999
- [2] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4
- [3] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [4] National Instruments: LabVIEW Control Design User Manual[online], 2010, 371057, dostupné z URL:<<http://www.ni.com>>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 21.11.2012



Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi použití Peltierových článků pro regulaci teploty v termokomůře. V teoretické části jsou analyzovány fyzikální principy termoelektrického chlazení, ohřevu a výroby elektrické energie. Hlavní část práce je věnovaná Peltierovým článkům, popisuje jejich konstrukci, použití a důležité parametry článku s ohledem na řízení teploty. Následující kapitola je zaměřena na měření veličin, které jsou důležité při řízení teploty pomocí Peltierových článků. V poslední části je zpracováno několik návrhů termokomory.

ABSTRACT

This bachelor thesis describes the possibilities of use thermoelectric modules for temperature control in a temperature chamber. In the theoretical part are shown physical principles of thermoelectric cooling, heating and power generation. The main part regarding thermoelectric modules describes its design, use and important parameters for temperature control. The next chapter is focused on measuring of quantities important for temperature control using thermoelectric modules. The last part describes few proposals of a temperature chamber design.

KLÍČOVÁ SLOVA

Peltierův článek, termočlánek, termoelektrické chlazení, termokomora, snímače

KEYWORDS

Thermoelectric module, thermocouple, thermoelectric cooling, temperature chamber, sensors

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně dle pokynů a rad vedoucího a s použitím pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Brně dne 24. 5. 2013

Vojtěch Gofroň

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GOFROŇ, V. Použití Peltierova článku pro řízení teploty. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a celkové vedení při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	9
ÚVOD	10
1 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY TERMOELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	11
1.1 Termoelektrický článek	11
1.2 Seebeckův jev	11
1.3 Peltierův jev	12
1.4 Thomsonův jev	13
2 PELTIEROVY ČLÁNKY.....	15
2.1 Konstrukce.....	15
2.1.1 Termočlánky.....	15
2.1.2 Keramické destičky	17
2.1.3 Kaskádové články	18
2.2 Použití.....	18
2.3 Parametry.....	20
2.4 Dynamické vlastnosti	25
2.4.1 Uspořádání experimentu	25
2.4.2 Výsledky experimentu.....	25
3 SENZORICKÁ SOUSTAVA.....	29
3.1 Měřené veličiny	29
3.2 Snímače teploty	30
3.2.1 Kovové odporové snímače	30
3.2.2 Polovodičové odporové snímače.....	32
3.3 Snímače relativní vlhkosti	34
3.3.1 Odporové snímače.....	34
3.3.2 Kapacitní snímače	35
4 NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ TERMOKOMORY.....	37
4.1 Výběr vhodného Peltierova článku.....	37
4.2 Uspořádání Peltierových článků	38
4.3 Uspořádání snímačů	39
ZÁVĚR.....	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Veličina	Symbol	Jednotka
Seebeckův koeficient	α	$V \cdot K^{-1}$
Průřez jednoho polovodičového prvku	A	m^2
Kapacita	C	F
Měrná tepelná kapacita	c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Geometrický koeficient	G	m
Elektrický proud	I	A
Tepelná vodivost	K	$W \cdot K^{-1}$
Délka jednoho polovodičového prvku	L	m
Počet termočlánků	N	-
Příkon	P_0	W
Teplo	Q	J
Tepelný tok	$\dot{Q}$	W
Teplo odebrané na chladné straně	Q_C	J
Chladicí výkon	$\dot{Q}_C$	W
Teplo vznikající na teplé straně	Q_H	J
Joulovo teplo	Q_J	J
Teplo přivedené na chladnou stranu vedením	Q_K	J
Teplo odebrané na základě Peltierova jevu	Q_P	J
Elektrický odpor	R	Ω
Základní hodnota odporu snímače	R_0	Ω
Odpor snímače při 100 °C	R_{100}	Ω
Odpor snímače	R_t	Ω
Celkový Seebeckův koeficient	S	$V \cdot K^{-1}$
Teplota	t	°C
Absolutní teplota	T	K
Teplota studené strany	T_C	K, °C
Maximální dovolená teplota	T_{dov}	K, °C
Teplota teplé strany	T_H	K, °C
Elektrické napětí	U	V
Objem	V	m^3
Koeficient termoelektrické účinnosti	Z	K^{-1}
Bezrozměrný koeficient termoelektrické účinnosti	ZT	-
Teplotní součinitel odporu	α_r	K^{-1}
Thomsonův koeficient	β	$V \cdot K^{-1}$
Rozdíl teplot	ΔT	K
Chladicí faktor	ε_{CH}	-
Součinitel tepelné vodivosti	κ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Peltierův koeficient	π	V
Měrný elektrický odpor	ρ	$\Omega \cdot m$
Hustota	ρ_m	$kg \cdot m^{-3}$
Čas	τ	s

ÚVOD

Přestože fyzikální principy termoelektrických zařízení jsou známy již od 19. století, nenalézaly v minulosti termoelektrické články, vyjma měření teploty, širší uplatnění. Hlavním problémem termoelektrických článků v minulosti byla jejich nízká účinnost v kombinaci s vysokou cenou. Pokrok v materiálovém inženýrství v posledních desetiletích umožnil konstrukci termoelektrických článků s účinností dostačující pro praktické použití.

Termoelektrické baterie primárně určené pro ohřev či chlazení jsou nazývány, podle objevitele jejich fyzikální podstaty, Peltierovými články. Tato termoelektrická zařízení lze použít v řadě aplikací, které využívají jejich předností, kterými jsou absence pohyblivých částí, malé rozměry a mnoho dalších. Díky svým vlastnostem jsou Peltierovy články v některých aplikacích jediným použitelným způsobem chlazení. Peltierovy články je možné rovněž použít pro výrobu elektrické energie, a to všude tam, kde existuje dostatečně velký teplotní rozdíl. V budoucnosti by takto mohlo být využíváno k výrobě elektrické energie odpadní teplo, které produkují např. spalovací motory.

Peltierovy články jsou velmi vhodné pro regulaci teploty, neboť je možné používat je jak pro ohřev, tak chlazení a zároveň je možné jejich tepelný výkon jednoduše řídit elektrickým proudem. Toho se využívá v termokomorách, kde je zapotřebí regulovat vnitřní teplotu. Termokomory umožňují provádění experimentů, které nelze uskutečnit při běžné pokojové teplotě. Pro regulaci teploty je za potřeby také snímání teploty uvnitř termokomory. Je nutné proto vybrat typ snímače teploty, který bude svými parametry vhodný pro tuto aplikaci. Kromě snímačů teploty se v termokomorách uplatňují také snímače relativní vlhkosti, neboť relativní vlhkost a teplota jsou na sobě závislé. Stejná pozornost jako výběru snímače musí být věnována také výběru vhodného Peltierova článku. Pro tento účel je nejprve nutné zjistit potřebné parametry Peltierova článku a následně podle nabídky výrobců zvolit potřebný počet a typ článků. Pro modelování parametrů Peltierova článku je možné využít výpočetní techniky. Pro správnou činnost termokomory je důležité také uspořádání Peltierových článků a snímačů, ve kterém třeba zohlednit nerovnoměrné rozložení teplot uvnitř termokomory.

1 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY TERMOELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

1.1 Termoelektrický článek

Termoelektrický článek (zkráceně termočlánek) je zařízení, které umožňuje přeměnu tepelné energie na elektrickou nebo naopak. Skládá se ze dvou částí tvaru destičky nebo drátu, z nichž každá je vyrobena z jiného materiálu, obvykle kovu nebo polovodiče. Tyto části jsou na obou koncích vodivě spojeny. [1]

Podle způsobu použití můžeme termočlánky rozdělit na [1]:

- články určené k přeměně energie
 - a) pro chlazení
 - b) pro výrobu elektrické energie
- články určené k měření teploty

Termoelektrická zařízení určená pro přeměnu energie obvykle obsahují větší množství termočlánků spojených sériově. Takto spojené termočlánky je možno nazývat termoelektrickou baterií.

V oblasti termoelektrických zařízení se uplatňují tři typy termoelektrických jevů a to jev Peltierův, Seebeckův a Thomsonův. Vliv Thomsonova jevu je ve většině případů zanedbatelný a proto se při konstrukci a návrhu termoelektrického zařízení často uvažuje pouze jev Seebeckův nebo Peltierův. [9] Při provozu termoelektrických zařízení dochází vlivem elektrického odporu také ke vzniku Joulova tepla, které však k termoelektrickým jevům neřadíme.

1.2 Seebeckův jev

Seebeckův jev popisuje chování elektricky vodivého materiálu, jehož části mají rozdílnou teplotu. Pokud bude jeden konec mít rozdílnou teplotu od druhého, objeví se mezi nimi elektromotorické napětí. Velikost tohoto napětí závisí na materiálové vlastnosti, označované jako absolutní Seebeckův koeficient. Vztah mezi naměřeným napětím a rozdílem teplot je dán rovnicí [2],[7],[9]

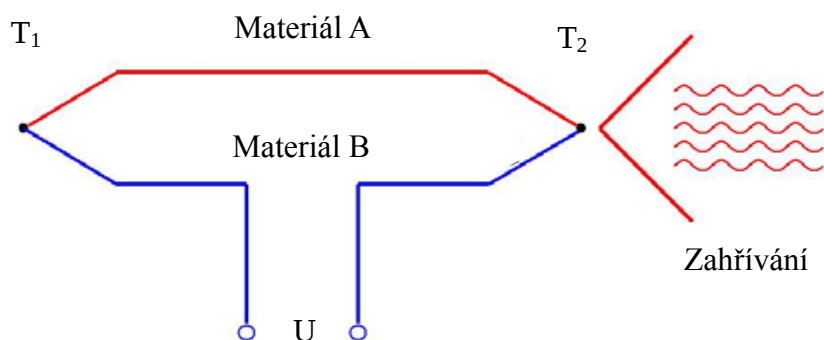
$$\alpha_A = \frac{dU_A}{dT} \quad [\text{V} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.1)$$

Tento vztah vyjadřuje skutečnost, že podíl přírůstku napětí na daném úseku vodiče A a přírůstku teploty je pro danou teplotu konstantní. Tento poměr není konstantní po celé délce vodiče, jelikož Seebeckův koeficient je funkcí teploty.

Fyzikální podstatou Seebeckova jevu je skutečnost, že nositelé náboje (elektrony, díry) mají v teplejší části vodiče větší energii a přesunují se difuzí do chladnější části vodiče. Podle převažujícího druhu vodivosti se nám potom jeví teplejší konec vodiče jako kladně nebo záporně nabitý, u chladnějšího konce je tomu naopak. [1]

U termočlánu složeného ze dvou vodičů, jejichž spojené konce mají různou teplotu (obr. 1), je možno naměřit elektromotorické napětí, jehož velikost je rovna rozdílu přírůstků napětí vodičů A a B na daném úseku, dle vztahu

$$\alpha_{AB} = \frac{dU_A}{dT} - \frac{dU_B}{dT} = \frac{dU_{AB}}{dT} \quad [\text{V} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.2)$$



Obr. 1 Seebeckův jev u termočlánu. [6]

Jak plyne z rovnic (1.1) a (1.2) relativní Seebeckův koeficient je dán rozdílem absolutních Seebeckových koeficientů jednotlivých vodičů. Tento koeficient platí pouze pro danou dvojici materiálů. [7],[9]

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad [\text{V} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.3)$$

Vyjádřením napětí ze vztahu (1.2) a integrací dostaneme výsledné elektromotorické napětí dodané termočlánkem

$$U_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} dT \quad [\text{V}] \quad (1.4)$$

Pokud lze v daném intervalu teplot považovat Seebeckův koeficient za konstantní, můžeme toto napětí vyjádřit přibližně jako [9]

$$U_{AB} = \alpha_{AB} \cdot (T_2 - T_1) \quad [\text{V}] \quad (1.5)$$

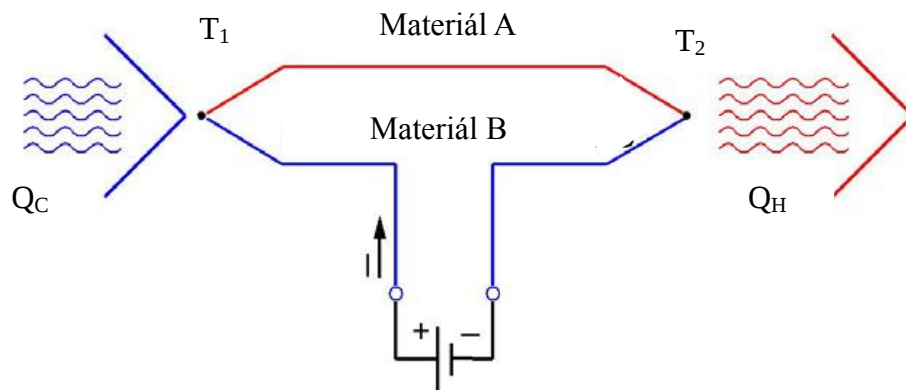
1.3 Peltierův jev

Peltierův jev je inverzním jevem k jevu Seebeckovu. Popisuje vznik teplotního rozdílu na rozhraní dvou vodičů z různých materiálů, kterými protéká elektrický proud (Obr. 2).

Pokud na termočlánek přivedeme elektrické napětí a začne jím protékat proud, bude se jeden spoj ochlazovat a druhý zahřívát. Velikost tepelného toku závisí na protékajícím proudu, použitých materiálech a na teplotě spoje. Je dán rovnicí [7],[9]

$$\dot{Q}_P = \pi_{AB} \cdot I \quad [\text{W}] \quad (1.6)$$

kde π_{AB} je relativní Peltierův koeficient pro danou dvojici materiálů. Tepelný tok vzniklý v důsledku Peltierova jevu je tedy přímo úměrný protékajícímu proudu.



Obr. 2 Peltierův jev u termočládku. [6]

Relativní Peltierův koeficient je roven rozdílu absolutních Peltierových koeficientů jednotlivých materiálů. [9]

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B \quad [\text{V}] \quad (1.7)$$

Vztah mezi Peltierovým a Seebeckovým koeficientem je dán rovnicí [7],[9]

$$\pi = \alpha \cdot T \quad [\text{V}] \quad (1.8)$$

Dosazením do vztahu (1.6) je možné vyjádřit velikost tepelného toku pomocí relativního Seebeckova koeficientu jako

$$\dot{Q}_P = \alpha_{AB} \cdot T \cdot I \quad [\text{W}] \quad (1.9)$$

1.4 Thomsonův jev

Thomsonův jev vzniká ve vodiči, ve kterém je teplotní gradient a je protékán elektrickým proudem. Nezáleží na tom, jestli je proud vyvolán napětím dodaným vnějším zdrojem, nebo napětím vzniklým v důsledku termoelektrického jevu. Na rozdíl od Seebeckova jevu nezpůsobuje Thomsonův jev vznik napětí mezi oběma konci termočládku. Thomsonův jev má za následek vznik tepelného toku, který je dán vztahem [7],[9]

$$\dot{Q} = I \cdot \int \beta dT, \quad [\text{W}] \quad (1.10)$$

kde β je Thomsonův koeficient.

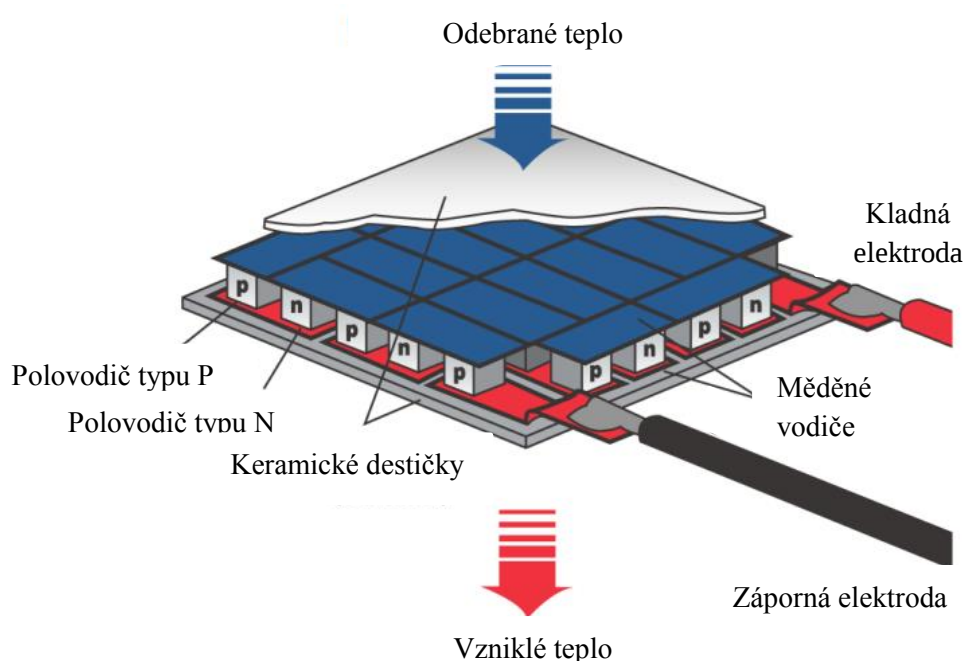
Vztah mezi Thomsonovým a Seebeckovým koeficientem je dán rovnicí [7]

$$\alpha = \int \frac{\beta}{T} dT \quad [\text{V} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.11)$$

2 PELTIEROVY ČLÁNKY

2.1 Konstrukce

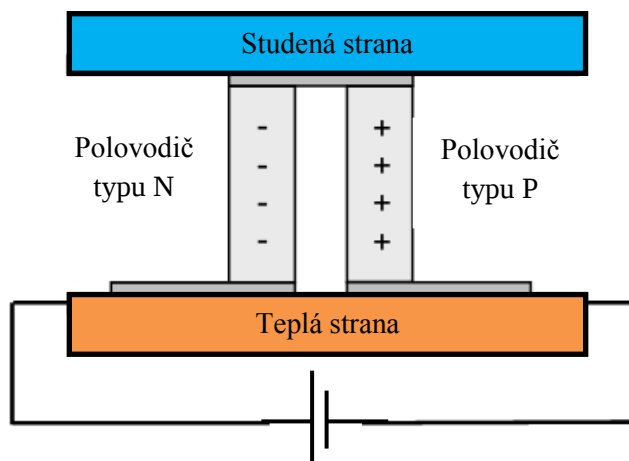
Peltierovy články (v anglické literatuře thermoelectric modules, TEM) jsou termoelektrická zařízení, pracující na základě Peltierova a Seebeckova jevu, určená k termoelektrickému chlazení, ohřevu, nebo výrobě elektrické energie. Skládají se z několika termočlánků, spojených do termoelektrické baterie. Jednotlivé termočlánky jsou spojeny pomocí kovových můstků, které zajišťují jejich elektricky vodivé spojení. Mechanickou integritu a elektrickou izolaci termočlánků zajišťují keramické destičky, na kterých jsou termočlánky upevněny. Napájení zajišťují dvě elektrody vyvedené na okrajích článku. Spojení všech částí je provedeno pájením. [5],[7],[33]



Obr. 3 Konstrukce Peltierova článku. [5]

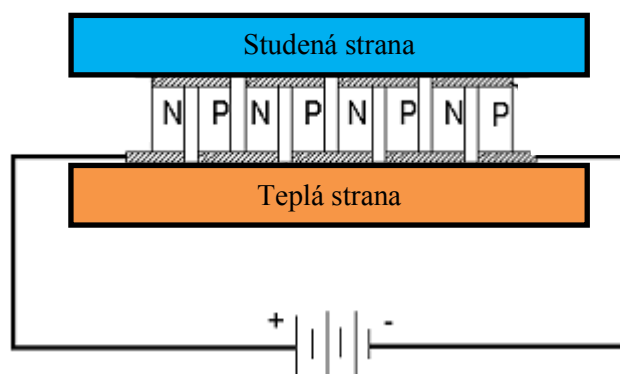
2.1.1 Termočlánky

Každý termočlánek elektrické baterie se skládá ze dvou polovodičových prvků, které mají obvykle tvar hranolu. Tyto polovodičové prvky jsou navzájem spojeny vodivými můstky vyrobenými z mědi. Při průchodu stejnosměrného elektrického proudu se jedna strana termočlánku zahřívá a vzniká na ní teplo Q_H , druhá strana se ochlazuje a odebírá se na ní teplo Q_C . Mezi oběma stranami vzniká teplotní rozdíl ΔT . [1],[5]



Obr. 4 Jeden termoelektrický článek. [33]

Vzhledem k tomu, že napájecí napětí jednoho termočlánku je velmi malé a proud poměrně velký, spojujeme jednotlivé termočlánky elektricky sériově do termoelektrické baterie. Proud protékající všemi články bude stejný, výsledné napájecí napětí bude součtem napájecích napětí všech termočlánků. Spojení je opět provedeno měděnými můstky. Termočlánky jsou v Peltierově článku po geometrické stránce uspořádány tak, aby vzdálenosti mezi nimi byly konstantní a tepelný tok byl co nejvíce rovnoměrný. [5],[33]



Obr. 5 Sériové spojení termočlánků. [5]

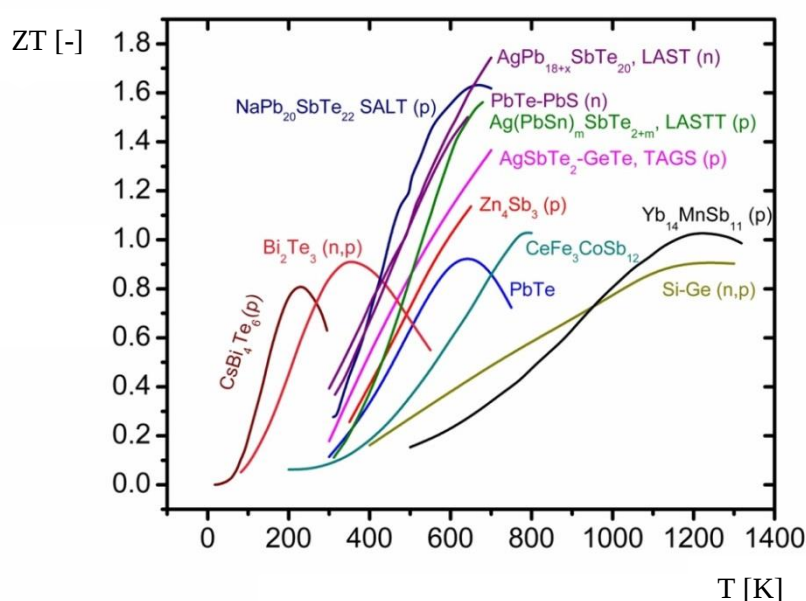
Na materiály termočlánků je kladeno několik požadavků. Jsou to především velký Seebeckův koeficient (v absolutní hodnotě), nízký měrný elektrický odpor a nízký součinitel tepelné vodivosti. Velký Seebeckův koeficient zajišťuje vysokou účinnost termočlánku, nízký měrný elektrický odpor minimalizuje ztráty Joulovým teplem a nízký součinitel tepelné vodivosti zabraňuje nadměrnému ohřívání chladné strany. Všechny tyto požadavky v sobě zahrnuje koeficient termoelektrické účinnosti (v anglické literatuře uváděn jako figure of merit), definovaný jako [1],[5]

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (2.1)$$

Bezrozměrný koeficient termoelektrické účinnosti obdržíme vynásobením vztahu (2.1) teplotou. [34]

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} \cdot T \quad [-] \quad (2.2)$$

Běžně používanými materiály jsou polovodiče na bázi bismut-telluridů, které nabízejí maximální hodnoty ZT okolo 0,9. Jiné materiály mohou dosahovat mnohem vyššího ZT , avšak jejich cena je velmi vysoká a jsou proto vhodné jen pro speciální aplikace. Bismut-tellurové polovodiče mají obecný vzorec Bi_2Te_3 . Pomocí vhodných příměsí můžeme obdržet polovodič typu P (příměs antimonu) i N (příměs selenu). Jejich Seebeckovy koeficienty jsou v absolutní hodnotě přibližně stejné, ale mají opačná znaménka. [6],[34]

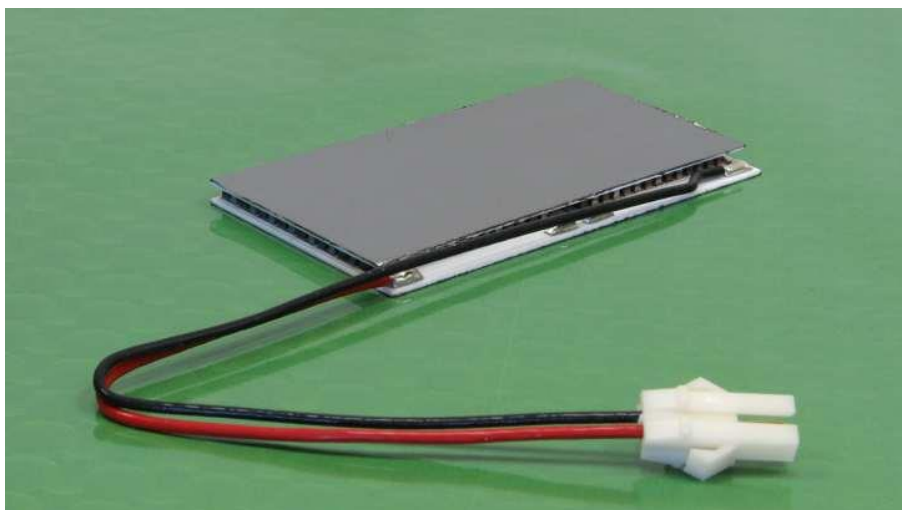


Obr. 6 Koeficient ZT u různých termoelektrických materiálů. [35]

2.1.2 Keramické destičky

Termočlánky jsou umístěny na destičce z technické keramiky, obvykle oxidu hlinitého Al_2O_3 . Ten je pro tuto aplikaci vhodný zejména pro svoji nízkou cenu, mechanické vlastnosti a možnost pájení měděných můstků přímo na keramiku. Jeho nevýhodou je malá tepelná vodivost, která zhoršuje přenos tepla od termočlánků na chladič a do okolí. Materiálem s větší tepelnou vodivostí je např. nitrid hlinitý AlN . Jeho nevýhodou je vyšší cena.

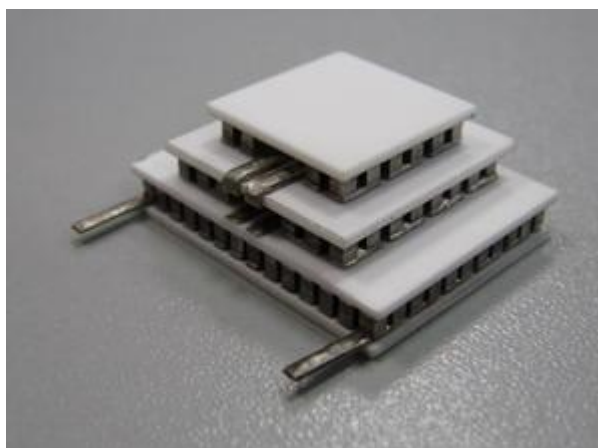
Keramické destičky se vyrábí v mnoha tvarech, odpovídajících určení Peltierova článku. Vyrábí se destičky v rozměrech od 2 x 2 mm do 63 x 63 mm. Nejobvyklejším tvarem je destička o rozměrech 30 x 30 mm. Dále se vyrábí čtvercové destičky s otvorem uvnitř, destičky kruhového či mezikruhového tvaru nebo destičky obdélníkové. [5],[36]



Obr. 7 Peltierův článek obdélníkového tvaru. [12]

2.1.3 Kaskádové články

Pokud nepostačuje maximální teplotní rozdíl, který je schopen poskytnout jeden Peltierův článek, vytváří se z Peltierových článků kaskády. Ty mají podobu pyramidy, kde horní článek je vždy o něco menší, než spodní. Toto uspořádání je nezbytné pro zajištění dostatečného chlazení, neboť pro chlazení článku vyšší úrovně je zapotřebí vždy většího výkonu, než článku nižší úrovně. Toto řazení je z hlediska elektrického i termomechanického sériové. Ke chlazení slouží pouze plocha článku nejvyšší úrovně. Pro dosažení požadovaného teplotního rozdílu je možné řadit za sebou několik stupňů, běžně se vyrábí kaskádové články o dvou až pěti stupních. Jelikož klesá účinná plocha chladné strany, zmenšuje se také teplo odebírané na chladné straně článku, čímž klesá chladicí faktor. Chladicí faktor se tedy stejně jako u jednostupňového Peltierova článku se zvětšujícím se rozdílem teplot zmenšuje. Pětistupňovou kaskádou je možno dosáhnout teplotního rozdílu až 120 K. [5],[36]



Obr. 8 Třístupňový kaskádový Peltierův článek [7]

2.2 Použití

Peltierovy články určené pro chlazení mají široké spektrum uplatnění, především v oblasti elektroniky, telekomunikací, vesmírné techniky, vojenských aplikací a medicíny. Využívá se zde jejich předností, mezi něž patří především malé rozměry a nízká hmotnost, absence pohyblivých částí, absence provozních kapalin či plynů, bezhlučný provoz, vysoká spolehlivost, ekologická nezávadnost a možnost přesné

a rychlé regulace provozní teploty. Peltierovy články je možné použít pro široký rozsah chladících výkonů, od několika miliwattů do několika stovek wattů. [6],[25]

V oblasti elektroniky je možno použít Peltierovy články pro chlazení laserových diod, mikroprocesorů a integrovaných obvodů. V těchto aplikacích se využívá především velkého chladícího výkonu Peltierových článku vzhledem k malé aktivní ploše. Při použití CCD snímacích čipů se pomocí chlazení Peltierovým články omezuje tepelný šum CCD, čímž je možno dosáhnout vyšší citlivosti snímače a vyšší kvality snímků. Chlazení Peltierovými články se rovněž využívá u infračervených snímačů, které je nutné pro zajištění správné funkce chladit na stanovenou teplotu. Využívá se zde především malých rozměrů článku a také schopnosti přesné regulace na stanovenou teplotu. Termoelektrické chlazení se rovněž uplatňuje při komunikaci optickými vlákny. Zde je nutné zajistit danou teplotu zdroje světla – laseru, neboť na jeho teplotě závisí vlnová délka vyzařovaného záření. Ve vojenských aplikacích se Peltierových článků využívá v zařízeních založených na detekci infračerveného záření, jako jsou infračervené pozorovací přístroje a čidla řídicích systémů naváděných střel. Dále je možnost využívat Peltierovy články při chlazení systémů inerciální navigace, letecké avioniky a dalších přístrojů. Kromě malých rozměrů se zde využívá také možnosti dosažení velmi nízkých teplot. Peltierovy články nalézají uplatnění rovněž v medicíně jako součásti chladících zařízení pro uchovávání tkání a jako součásti mnoha přístrojů, například pro syntézu DNA. V běžném životě je možné setkat se s nimi například v přenosných zařízeních pro chlazení či ohřev nápojů, klimatizacích nebo odvlhčovačích vzduchu. [6],[25]



Obr. 9 Přenosná chladnička s Peltierovými články [32]

Jako perspektivní se jeví použití Peltierových článků pro výrobu elektrické energie. Pro tento účel lze Peltierův článek využít všude tam, kde existuje dostatečně velký teplotní rozdíl. Tímto způsobem je možno využívat část odpadního tepla, které produkují např. motory dopravních prostředků, k výrobě elektrické energie, která může být dodávána do palubní elektrické sítě. Většímu rozšíření v těchto aplikacích brání nízká účinnost termočlánků a jejich vysoká cena. Pro výrobu elektrické energie se termočlánky uplatňují v kosmické technice u radioizotopových termoelektrických generátorů (RTG). Zde je zdrojem tepla přirozený rozpad radionuklidu. [6],[25]

2.3 Parametry

Pokud máme řídit Peltierův článek pomocí automatizačních prostředků, či simulovat jeho chování, potřebujeme znát jeho parametry. Základní parametry Peltierových článků můžeme rozdělit do třech skupin

- a) materiálové parametry
- b) geometrické parametry
- c) maximální dovolená teplota

Materiálové parametry určují elektrické, termodynamické a termoelektrické vlastnosti termočlánku. Jsou to [5]:

- měrný elektrický odpor ρ
- součinitel tepelné vodivosti κ
- Seebeckův koeficient α

Tyto parametry se mohou vztahovat k celému termočlánku, nebo pouze k jednomu polovodičovému prvku. Pokud se vztahují k jednomu polovodičovému prvku, jedná se o průměrné hodnoty pro oba materiály termočlánku. Měrný elektrický odpor vyjadřuje odpor materiálu termočlánku o jednotkovém průřezu a jednotkové délce. Součinitel tepelné vodivosti pak vyjadřuje schopnost materiálu termočlánku vést teplo. Tyto parametry nezávisí na geometrickém uspořádání Peltierova článku a mohou být společné pro několik odlišných typů Peltierových článků. Všechny materiálové parametry závisí na teplotě.

Geometrické parametry se vztahují k rozměrům jednotlivých termočlánků a jejich počtu v Peltierově článku. Jedná se o [5]:

- počet termočlánků N
- průřez jednoho polovodičového prvku A
- délka jednoho polovodičového prvku L

Počet termočlánků vyjadřuje, kolik sériově zapojených termočlánků tvoří Peltierův článek. Jelikož se termočlánek skládá ze dvou polovodičových prvků, obsahuje každý Peltierův článek $2N$ polovodičových prvků. Průřez jednoho prvku se počítá v rovině kolmé na směr teplotního spádu, délka ve směru teplotního spádu. Předpokládá se, že oba polovodičové prvky mají stejné geometrické rozměry.

Z průřezu a délky jednoho polovodičového prvku můžeme vyjádřit geometrický koeficient [5]

$$G = \frac{A}{L} \quad [\text{m}] \quad (2.3)$$

Maximální dovolená teplota T_{dov} představuje mez provozní teploty teplé strany Peltierova článku. Při vysokých teplotách dochází k difuzi cizích atomů do struktury polovodiče a tím ke zhoršení jeho vlastností. Při výrazném překročení maximální dovolené teploty dojde k roztavení pájených spojů a ke ztrátě elektrických a mechanických vlastností článku.

Materiálové parametry, které platí pro jeden polovodičový prvek, můžeme pomocí geometrických parametrů přepočítat na materiálové parametry celého Peltierova článku. [5] Obdržíme tak

celkový Seebeckův koeficient $S = 2 \cdot N \cdot \alpha$, [V·K⁻¹] (2.4)

elektrický odpor $R = \frac{2 \cdot N \cdot \rho}{G}$, [Ω] (2.5)

tepelnou vodivost $K = 2 \cdot \kappa \cdot N \cdot G$ [W·K⁻¹] (2.6)

Z těchto základních parametrů můžeme vypočítat důležité výkonové charakteristiky. Vychází se z rovnice tepelné rovnováhy pro studenou stranu, která má tvar

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_P - \dot{Q}_J - \dot{Q}_K , \quad [\text{W}] \quad (2.7)$$

kde je $\dot{Q}_C$ teplo odebrané na chladné straně, $\dot{Q}_P$ teplo odebrané na základě Peltierova jevu, $\dot{Q}_J$ Joulovo teplo a $\dot{Q}_K$ teplo přivedené na chladnou stranu vedením.

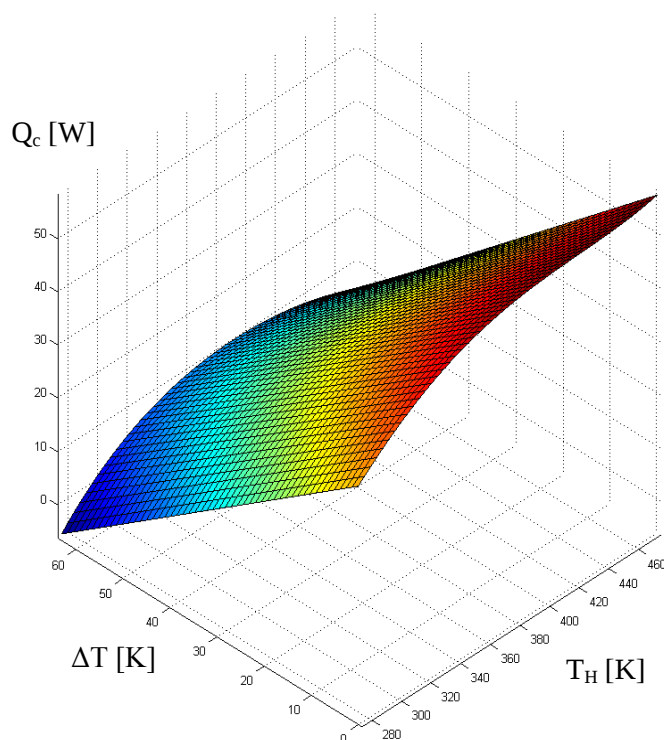
Do této rovnice můžeme dosadit příslušné vztahy s využitím materiálových charakteristik Peltierova článku [1],[5]

$$\dot{Q}_C = S \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T , \quad [\text{W}] \quad (2.8)$$

kde T_C je teplota studené strany a ΔT je rozdíl teplot teplé a studené strany Peltierova článku

$$\Delta T = T_H - T_C \quad [\text{K}] \quad (2.9)$$

Pro daný proud je možné vykreslit závislost odebíraného tepelného toku (chladicího výkonu) na teplotě teplé strany a rozdílu teplot. (obr. 10)

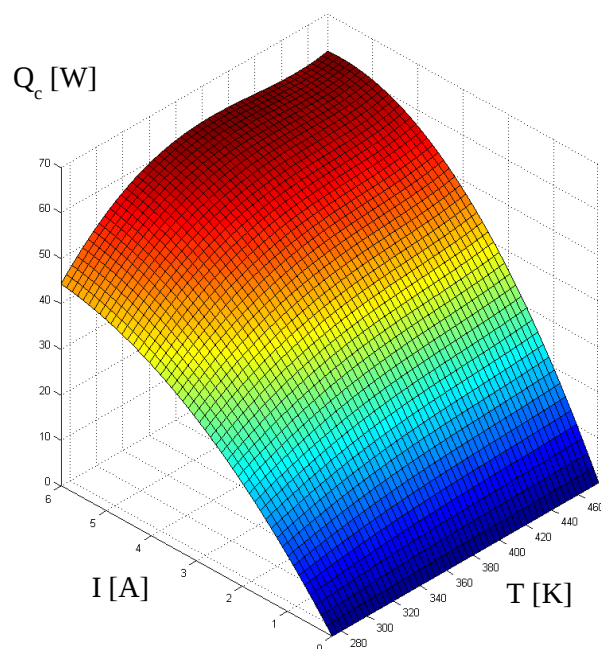


Obr. 10 Chladicí výkon článku Thermoelectric HT6,12,F2,4040,TA,W6 při $I = 4 \text{ A}$.

Maximálního chladicího výkonu se dosáhne při nulovém rozdílu teplot teplé a studené strany.

$$\dot{Q}_{max} = S \cdot T \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R \quad [\text{W}] \quad (2.10)$$

Z grafického vyjádření lze pro daný proud a danou teplotu určit maximální chladicí výkon.



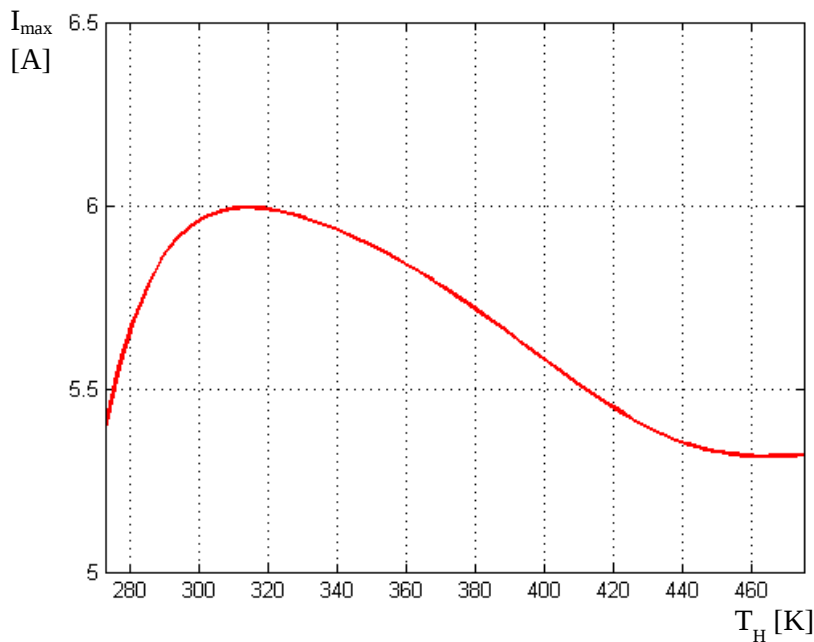
Obr. 11 Chladicí výkon článku Thermoelectric HT6,12,F2,4040,TA,W6 při $\Delta T = 0$.

Pokud ve vztahu (2.8) položíme $T_C = T_H - \Delta T$, $\dot{Q}_C = 0$ a vyjádříme ΔT , obdržíme vztah pro rozdíl teplot při nulovém tepelném toku

$$\Delta T = \frac{S \cdot I \cdot T_H - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R}{K + I \cdot S} \quad [\text{K}] \quad (2.11)$$

Pokud vztah (2.11) budeme derivovat podle I a položíme jej roven nule, můžeme vyjádřit maximální proud protékající Peltierovým článkem v závislosti na teplotě teplé strany jako [3]

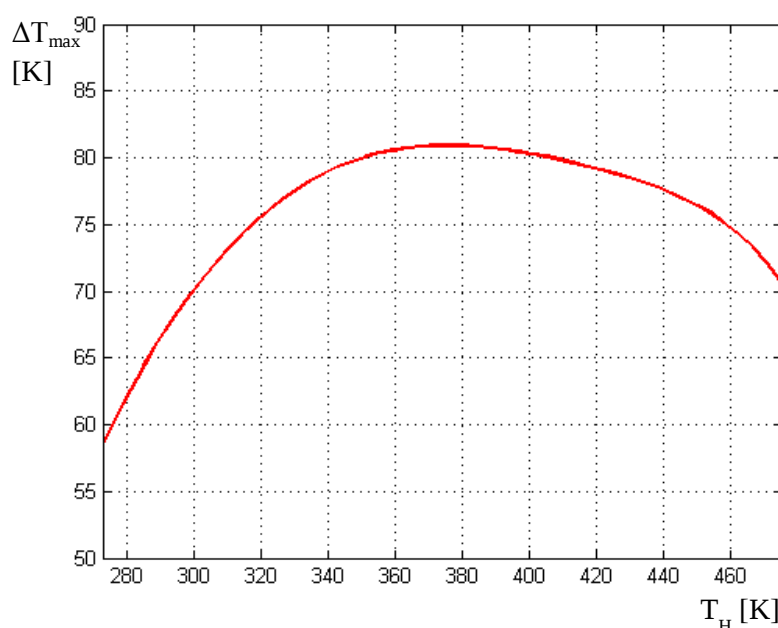
$$I_{max} = \frac{K}{S} \cdot (\sqrt{1 + 2 \cdot T_H \cdot Z} - 1) \quad [\text{A}] \quad (2.12)$$



Obr. 12 Maximální proud článku Thermoelectric HT6,12,F2,4040,TA,W6.

Dosazením vztahu (2.12) do (2.11) obdržíme maximální dosažitelný teplotní rozdíl (při maximálním proudu).

$$\Delta T_{max} = T_H - \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot Z \cdot T_H} - 1}{Z} \quad [\text{K}] \quad (2.13)$$



Obr. 13 Maximální rozdíl teplot článku Thermoelectric HT6,12,F2,4040,TA,W6.

Napětí potřebné pro napájení Peltierova článku získáme jako součet úbytku napětí vlivem elektrického odporu a Seebeckova napětí [3],[5]

$$U = I \cdot R + S \cdot \Delta T \quad [\text{V}] \quad (2.14)$$

Maximálního napětí je dosaženo při průchodu maximálního proudu a maximálním teplotním rozdílu.

$$U_{max} = I_{max} \cdot R + S \cdot \Delta T_{max} \quad [\text{V}] \quad (2.15)$$

Z napájecího napětí je možno určit příkon Peltierova článku jako

$$P_0 = U \cdot I = I^2 \cdot R + S \cdot I \cdot \Delta T \quad [\text{W}] \quad (2.16)$$

Chladicí faktor (v anglické literatuře nazývaný coefficient of performance, *COP*) obdržíme vydělením chladicího výkonu příkonem. Chladicí faktor vyjadřuje energetickou účinnost Peltierova článku. [27]

$$\varepsilon_{CH} = \frac{\dot{Q}_C}{P_0} = \frac{S \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T}{I^2 \cdot R + S \cdot I \cdot \Delta T} \quad [-] \quad (2.17)$$

2.4 Dynamické vlastnosti

Dynamickými vlastnostmi systému se rozumí jeho chování v čase. V případě tepelných systémů se sleduje nárůst teploty v závislosti na čase. Tato závislost se řídí zákonem zachování energie, který lze napsat v diferenciálním tvaru jako [11]

$$\frac{dQ}{d\tau} = \dot{Q} = \rho_m \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{d\tau}, \quad [\text{W}] \quad (2.18)$$

kde T je teplota, τ je čas, ρ_m je hustota, c_m je měrná tepelná kapacita a V je objem.

Pro Peltierův článek lze za tepelný tok dosadit chladicí výkon podle rovnice (2.7). Obdržíme tak vztah [10]

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_P - \dot{Q}_J - \dot{Q}_K = \rho_m \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{d\tau} \quad [\text{W}] \quad (2.19)$$

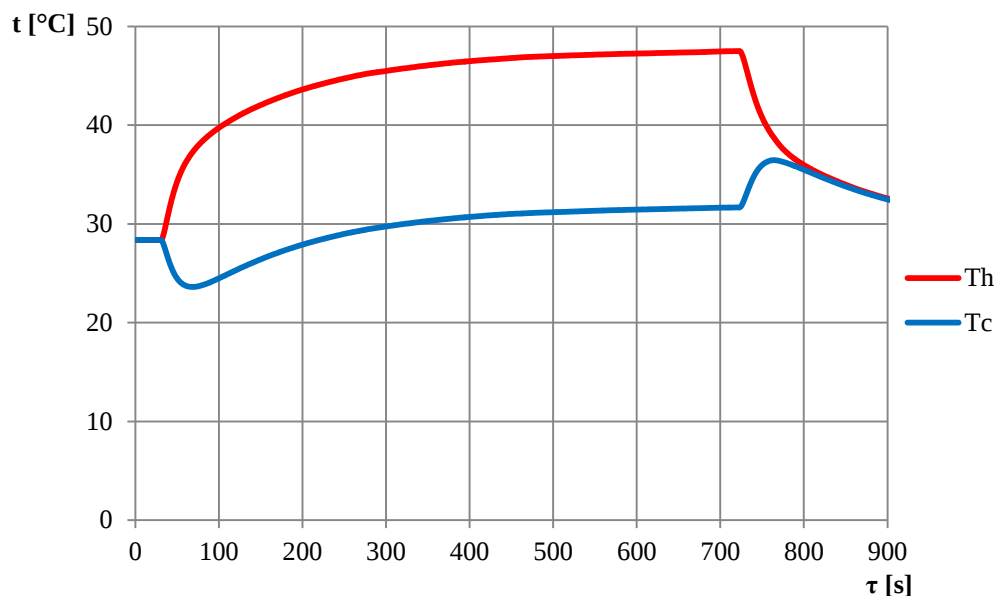
Dynamické chování Peltierova článku lze predikovat dvěma způsoby, numerickým modelováním a experimentem. Numerické modelování je progresivní metoda, s jejíž pomocí je možné predikovat chování systému za libovolných podmínek bez nutnosti jeho fyzické realizace. Numerické modelování je však obsáhlou problematikou, která přesahuje rozsah této práce, proto byl pro účely zjišťování dynamických vlastností Peltierova článku proveden pouze experiment.

2.4.1 Uspořádání experimentu

Pro účely měření dynamických vlastností byl použit Peltierův článek typu TEC1-12703 s parametry $I_{\max} = 3,3 \text{ A}$; $U_{\max} = 14,5 \text{ V}$; $\Delta T_{\max} = 63 \text{ K}$ a $Q_{\max} = 29,3 \text{ W}$ při $T_H = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento Peltierův článek byl na teplé i chladné straně opatřen platinovými odporovými snímači teploty Pt100. Mechanický kontakt byl zajištěn sevřením Peltierova článku spolu se snímači pomocí tepelně a elektricky izolované svěrky. Snímače byly propojeny přes digitální komunikační rozhraní s počítačem, kde se za pomoci programu, vytvořeném v prostředí LabView, prováděl v průběhu měření automatický záznam teplot. Peltierův článek byl napájen ze zdroje stejnosměrného napětí, které bylo na elektrody Peltierovy článku přivedeno do doby ustálení teploty na obou snímačích a poté odpojeno. Měření bylo provedeno při konstantním napětí 3,0; 4,5 a 6,0 V.

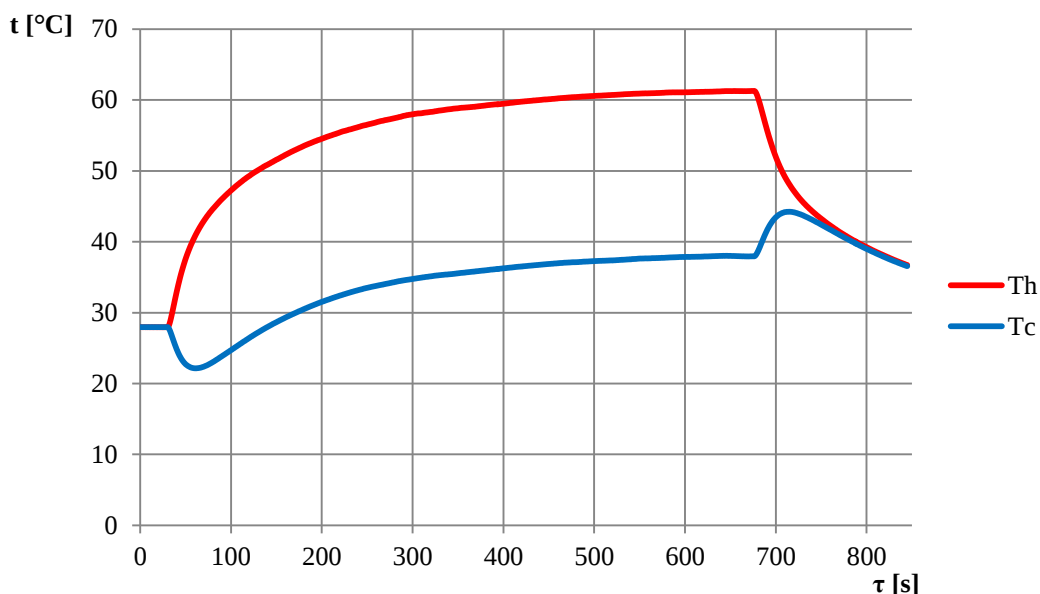
2.4.2 Výsledky experimentu

Jak je patrné z průběhu teplot při měření č. 1, uskutečněném při konstantním napětí 3,0 V (obr. 14), po připojení napájecího napětí se teplota teplé strany začala zvyšovat a teplota studené strany snižovat. Po určité době se vlivem vedení tepla od teplé strany snižování teploty studené strany zastavilo a studená strana se začala také ohřívat. K ustálení teplot došlo přibližně po 700 s, a to na teplotách $47,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $31,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota studené strany byla tedy vyšší, než počáteční teplota, která činila $28,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíl teplot se se vzrůstající teplotou teplé strany zvětšoval, až dosáhl ustálené hodnoty přibližně $15,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Proud v ustáleném stavu měl hodnotu 0,41 A. Po odpojení napájení došlo v čase do 100 s k vyrovnaní teplot.



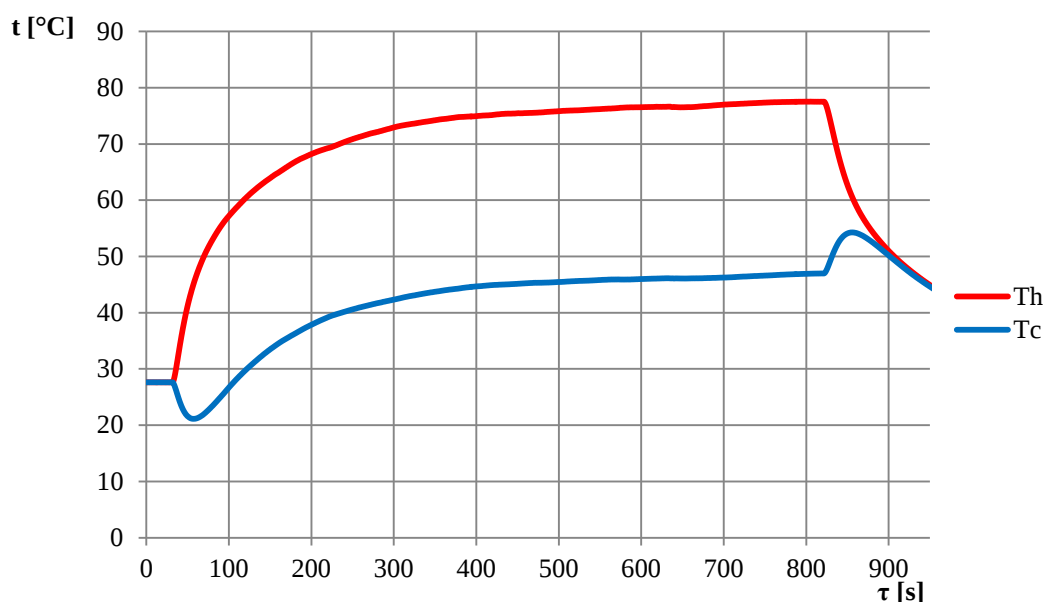
Obr. 14 Průběh teplot při měření č. 1.

Průběh teplot při měření č. 2, uskutečněném při napětí 4,5 V (obr. 15), měl podobný charakter jako u měření č. 1. K ustálení teplot došlo přibližně po 650 s na teplotách 61,3 °C a 38,0 °C. Teplota studené strany byla opět vyšší, než počáteční teplota, která činila 28,0 °C. Rozdíl teplot dosáhl ustálené hodnoty přibližně 23,3 °C. Proud v ustáleném stavu měl hodnotu 0,56 A.



Obr. 15 Průběh teplot při měření č. 2.

Průběh teplot při měření č. 3, uskutečněném při napětí 6,0 V (obr. 16), měl podobný charakter jako u předchozích měření. K ustálení teplot došlo přibližně po 750 s na teplotách 77,5 °C a 47,0 °C. Konečná teplota studené strany byla vyšší, než počáteční teplota, která činila 27,6 °C. Rozdíl teplot dosáhl ustálené hodnoty přibližně 30,5 °C. Proud v ustáleném stavu měl hodnotu 0,71 A.



Obr. 16 Průběh teplot při měření č. 3.

Z naměřených průběhů teploty v čase je zřejmé, že se vzrůstajícím napájecím napětím a proudem vzrůstá dosažitelný rozdíl teplot. Teplota teplé strany však roste rychleji, než rozdíl teplot, v důsledku čehož se zvyšuje teplota studené strany. Při uskutečnění experimentu, kdy nebyla teplá strana opatřena chladičem, byla ustálená teplota studené strany vyšší, než počáteční. V praxi je proto vždy nutné teplou stranu účinně chladit. Teplota studené strany nabývala minima vždy krátce po připojení napájení. Tento jev je způsoben měrnou tepelnou kapacitou materiálu Peltierova článku, která brání okamžitému ohřívání studené strany. Rovnovážný stav nastal při všech měřeních po stejné době, která činila přibližně 700 s. Po odpojení napájení došlo k rychlému vyrovnání teplot na obou stranách a k jejich pozvolnému poklesu.

3 SENZORICKÁ SOUSTAVA

3.1 Měřené veličiny

Při řízení Peltierových článků je snahou dosažení požadovaných hodnot výstupní (regulované) veličiny, kterou je teplota na teplé nebo studené straně. Peltierův článek je možno řídit pomocí dvou akčních veličin, napětí a proudu. Pro realizaci regulačního obvodu je nutno hodnoty akční i regulované veličiny snímat. Kromě nich je možno snímat také veličiny, které nejsou nezbytně nutné pro regulaci, ale jsou důležité pro danou aplikaci, například vlhkost vzduchu.

Elektrický proud

Pokud je Peltierův článek používán v otevřeném obvodu, hodnota protékajícího proudu zůstává konstantní. Při použití regulačního obvodu se napětí mění v závislosti na regulační odchylce. Řízení proudem má výhodu jednodušší regulace, jelikož velikost tepelného toku vznikajícího v důsledku Peltierova jevu je přímo úměrná proudu. Maximální proud se u většiny dostupných článků pohybuje v hodnotách do 20 A. [36],[4] Pro napájení Peltierova článku je možné použít také pulzně-šířkovou modulaci (PWM). Vždy je nutné zajistit, aby v proudu procházejícím Peltierovým článkem nebyla přítomna střídavá složka, která snižuje jeho výkon. [5]

Elektrické napětí

Maximální provozní napětí většiny Peltierových článků se pohybuje do 20 V. [36],[4] Regulace napětím je složitější, neboť velikost tepelného toku v důsledku Peltierova jevu závisí na napětí nelineárně. Také při řízení proudem je nutné zajistit, aby v napájecím napětí nebyla přítomna střídavá složka. [5]

Teplota

Typický dosažitelný rozdíl mezi teplou a studenou stranou jednostupňového Peltierova článku se pohybuje okolo 70 °C. [5] Maximální provozní teplota článků je v rozmezí 125 až 200°C. Tato teplota je dána bodem tání pájených spojů a při jejím překročení dojde k poškození Peltierova článku. [36],[4] Teplá strana bývá zpravidla osazena chladičem, tudíž její teplota nepřesahuje 100 °C. Z toho plyne, že pro jednostupňový Peltierův článek bude zapotřebí měřit teplotu v rozsahu od -50 do 100°C. Žádoucí je umístit snímače teploty přímo na keramickou destičku teplé a studené strany. Pokud je na keramické destičce umístěn chladič (ohříváč), který zajišťuje rychlejší výměnu tepla s okolím, snímač teploty se umísťuje na chladič co nejbližší Peltierova článku. V uzavřených termokomorách má význam měřit také teplotu uvnitř komory a teplotu okolí. Měření teploty je vždy měřením nepřímým, proto je nutné převést teplotu na jiné fyzikální veličiny, nejčastěji elektrické napětí.

Relativní vlhkost

U vlhkého vzduchu se stoupající teplotou klesá relativní vlhkost a naopak. Díky tomu můžeme pomocí teploty regulovat vlhkost vzduchu. V některých aplikacích má význam pouhé snímání vlhkosti (v otevřeném regulačním obvodu). Snímání vlhkosti se uplatňuje především v uzavřených termokomorách, ve kterých je nutno udržovat stále prostředí. Existuje několik typů snímačů vlhkosti, které měří vlhkost relativní, nebo absolutní. Absolutní vlhkost se při zachování objemu s teplotou nemění, proto její měření v souvislosti se změnami teploty nemá význam. Stejně jako měření teploty je měření vlhkosti vždy měřením nepřímým.

3.2 Snímače teploty

Snímače teploty můžeme rozdělit z hlediska fyzikálního principu na:

- kovové odporové
- polovodičové odporové
- termoelektrické
- optické
- radiační
- chemické
- a další.

Z hlediska styku s měřeným prostředím můžeme snímače teploty rozdělit na dotykové a bezdotykové. Podle typu přenosu dat na snímače s analogovým výstupem a s digitálním výstupem. [2]

Pro snímání teploty a vlhkosti v termoelektrických zařízeních jsou vhodné zejména kovové a polovodičové odporové snímače teploty, a to především díky snadnému převodu teploty na elektrické veličiny, dostatečné přesnosti, vysoké spolehlivosti a malým rozměrům.

3.2.1 Kovové odporové snímače

Kovové odporové snímače teploty pracují na principu teplotní změny odporu kovu, který je ve snímači ve formě tenkého filmu naneseného na základní materiál. S rostoucí teplotou se vlivem tepelného pohybu částic krystalické mřížky odpor zvětšuje, s klesající teplotou klesá.

Materiálovým parametrem, který určuje závislost odporu na teplotě je teplotní součinitel odporu α_r , pro který platí [2],[8]

$$\alpha_r = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial T}, \quad [\text{K}^{-1}] \quad (3.1)$$

kde R je elektrický odpor a T je teplota.

Pro malý teplotní rozsah je možné závislost odporu na teplotě vyjádřit lineární závislostí

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha_r \cdot t) \quad [\Omega] \quad (3.2)$$

Teplotní součinitel odporu lze určit z měření při teplotách 0 °C a 100 °C

$$\alpha_r = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}, \quad [\text{K}^{-1}] \quad (3.3)$$

kde R_{100} je odpor snímače při 100 °C a R_0 je základní hodnota odporu při 0 °C. [2],[8]

Pro větší rozsahy je nutno použít nelineární vztahy, které jsou určeny normou ČSN EN 60 751. Dalšími vlastnostmi, které odporový snímač charakterizují, jsou míra disipace tepla, dlouhodobá stabilita, rychlost odezvy, rozsah pracovních teplot a mechanické rozměry. Nejpoužívanějšími kovovými odporovými snímači teploty jsou snímače platinové a niklové, dalšími typy jsou měděné, molybdenové a ze speciálních slitin. [2]

Platinové odporové snímače

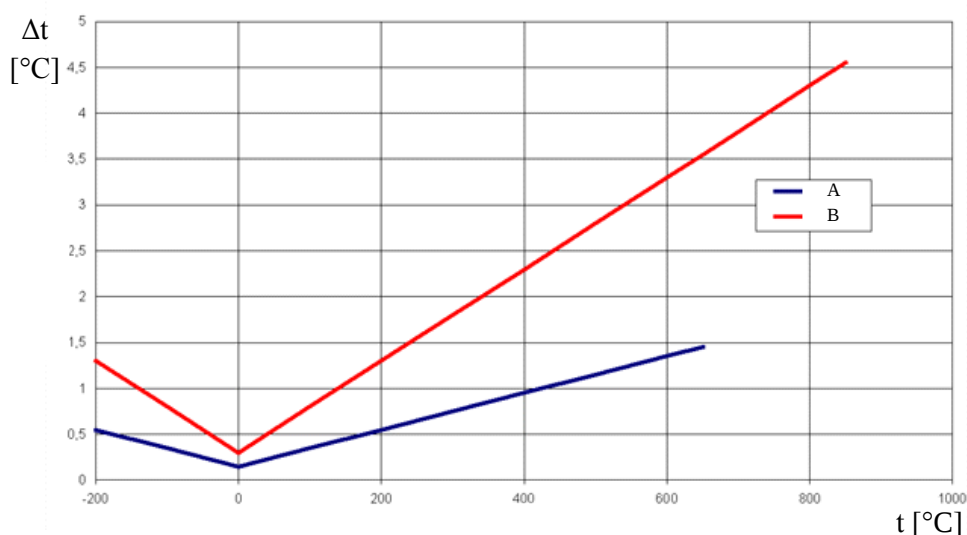
Parametry platinových odporových snímačů jsou určeny normou ČSN EN 60 751. V této normě jsou uvedeny standardizované hodnoty materiálových charakteristik, vztahy určující závislost odporu na teplotě, vztahy pro výpočet teploty z odporu snímače a třídy přesnosti snímačů [2],[14]

Závislost odporu snímače na teplotě je pro teploty od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ dána vztahem

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 \cdot (t - 100)] , \quad [\Omega] \quad (3.4)$$

kde A , B , C jsou konstanty dané normou. [8]

Platinové odporové snímače je možné použít pro teploty od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jejich teplotní součinitel odporu má hodnotu $3,85 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$. Dělí se do dvou tříd z hlediska přesnosti, třídy A a třídy B. Jak je patrné z obr. 12, snímače třídy A mají výrazně lepší přesnost. Třída A je však definována pouze do teploty $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, na rozdíl od $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ u třídy B. [2]



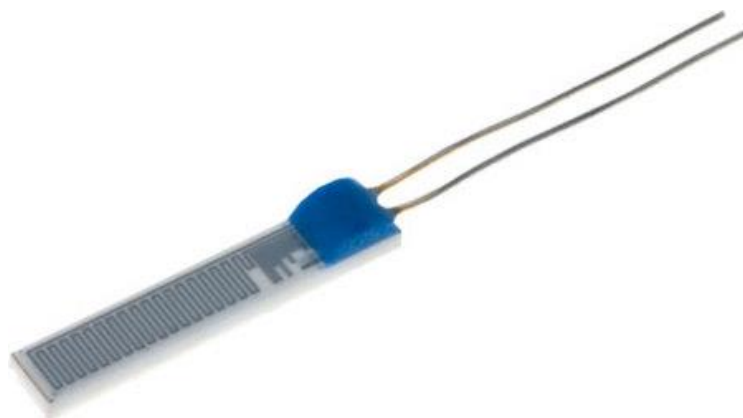
Obr. 17 Závislost dovolené odchylky snímače na teplotě. [13]

Platinové odporové snímače se vyrábí v několika jmenovitých hodnotách odporu R_0 , v rozmezí 50 až $2000\ \Omega$. Nejběžnějšími jsou snímače Pt100 a Pt1000, které mají jmenovité základní hodnoty odporu 100 a $1000\ \Omega$.

Následující údaje platí pro snímač Pt1000 PCA 1.2010.10L od firmy JUMO:

Základní hodnota odporu [Ω]	1000
Rozsah teploty [$^{\circ}\text{C}$]	-70 až 300
Teplotní součinitel odporu	dle EN 60 751
Třída přesnosti	A, B
Doba odezvy na změnu teploty [s]	22
Disipace tepla [$\text{K} \cdot \text{mW}^{-1}$]	0,2
Měřicí proud, max [mA]	1
Rozměry [mm]	$2 \times 1,3 \times 10$

Tab. 3-1 Parametry snímače Pt1000 PCA 1.2010.10L. [20]



Obr. 18 Platinový odporový snímač teploty typu Pt1000 [16]

Niklové odporové snímače

Niklové odporové snímače je možné použít pro teploty od -70 do 200°C . Materiálové charakteristiky a vztahy pro výpočet odporu a teploty jsou určeny normou ČSN EN 60 751.

Závislost odporu na teplotě je určena polynomem [2]

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^4 + D \cdot t^6), \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

kde A , B , C , D jsou konstanty dané normou.

Teplotní součinitel odporu má u niklových odporových snímačů hodnotu $6,178 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Třídy přesnosti udává norma DIN 43760. Dovolené odchylky niklového odporového snímače jsou pro danou teplotu větší, než u snímače platinového. Výhodou niklových odporových snímačů je rychlejší odezva a nižší cena. Stejně jako u platinových snímačů se niklové snímače vyrábí v několika jmenovitých základních hodnotách odporu, v rozmezí 100 až 2000 Ω . [2],[15],[30]

Následující údaje platí pro snímač Ni1000 ND1K0.102.2W.B.010 od firmy IST AG:

Základní hodnota odporu [Ω]	1000
Rozsah teploty [$^{\circ}\text{C}$]	-60 až 200
Teplotní součinitel odporu	dle EN 60 751
Doba odezvy na změnu teploty [s]	20
Disipace tepla [$\text{K} \cdot \text{mW}^{-1}$]	0,1
Měřicí proud, max. [mA]	2
Rozměry [mm]	2 x 1,3 x 10

Tab. 3-2 Parametry snímače Ni1000 ND1K0.102.2W.B.010. [15]

3.2.2 Polovodičové odporové snímače

Polovodičové odporové snímače jsou založeny na změně odporu polovodiče v závislosti na teplotě. Můžeme je rozdělit na termistory, které obsahují keramický polovodičový prvek, a monokrystalické snímače. Závislost odporu polovodičových snímačů na teplotě je silně nelineární, proto nelze v žádném intervalu teplot s vyhovující přesností použít lineární vztah (3.2). [2]

Termistory

Termistory se dělí na pozistory a negastory. Pozistory mají teplotní součinitel odporu kladný, negastory záporný. Pro měření teploty se užívají především negastory, pozistory nalézají uplatnění jako tepelná ochrana a omezovače proudu.

Odpor termistoru je dán vztahem

$$R_t = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

kde A a B jsou konstanty zahrnující vliv geometrie a materiálu.

Derivací tohoto vztahu podle (3.1) obdržíme vztah pro teplotní součinitel odporu

$$\alpha_r = -\frac{B}{T^2} \quad [K^{-1}] \quad (3.7)$$

Závislost teploty na odporu lze aproximovat vztahem

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln R + c \cdot (\ln R)^3, \quad [K^{-1}] \quad (3.8)$$

kde a , b , c jsou konstanty, které se určí měřením při teplotách 25 °C, 40 °C a 70 °C, nebo je udává výrobce v technické dokumentaci. Pomocí tohoto vztahu je možno vypočítat teplotu v rozmezí –50 až 150 °C s přesností $\pm 0,15$ K. [8]

Termistory obsahují amorfnní keramický polovodičový materiál, který se vyrábí spékáním prášků z oxidů kovů. Je možné je použít pro rozsah teplot –50 až 150 °C. Teplotní součinitel odporu se pohybuje v rozmezí –0,03 až –0,06 K⁻¹. Nevýhodou termistorů je značná nelinearita závislosti odporu na teplotě a nižší rozsah pracovních teplot. Základní hodnota odporu se stanovuje pro teplotu 25 °C a pohybuje se v rozmezí 1 až 100 kΩ. [21],[22]

Následující údaje platí pro termistor NTCASCWE3 od firmy Vishay:

Základní hodnota odporu [Ω]	1000
Rozsah teploty [°C]	–40 až 100
Teplotní součinitel odporu [K ⁻¹]	0,0387
Doba odezvy na změnu teploty [s]	7,5
Disipace tepla [K·mW ⁻¹]	0,04
Měřicí proud, max. [mA]	22
Rozměry [mm]	8 x 8 x 14,7

Tab. 3-3 Parametry termistoru NTCASCWE3. [22]

Monokrystalické snímače

Monokrystalické polovodičové snímače se vyrábí z křemíku, který je dopován příměsovými prvky tak, aby byl monokrystal polovodičem typu N. Tyto snímače mají kladný teplotní součinitel odporu, který nabývá hodnot přibližně 0,008 K⁻¹. Rozsah pracovních teplot je větší než u termistorů, –55 až 300 °C. Základní hodnota odporu se stanovuje pro teplotu 25°C a pohybuje se v rozmezí 1 až 100 kΩ. Výhodou oproti termistorům je nižší nelinearita závislosti odporu na teplotě a dlouhodobá stabilita. [2],[21]

Následující údaje platí pro snímač KTY81 od firmy NXP:

Základní hodnota odporu [Ω]	1000
Rozsah teploty [$^{\circ}\text{C}$]	-40 až 100
Teplotní součinitel odporu [K^{-1}]	0,0079
Doba odezvy na změnu teploty [s]	30
Měřicí proud, max. [mA]	10
Rozměry [mm]	4,8 x 5,2 x 4,2

Tab. 3-4 Parametry snímače KTY81. [23]

Z důvodu nelinearity závislosti odporu na teplotě u křemíkového monokrystalu se křemíkové polovodičové snímače vyrábí také jako linearizované a to buď s analogovým výstupem, nebo s digitálním. Digitální snímače obsahují v jednom integrovaném obvodu samotný snímač, A-D převodník a komunikační rozhraní. Odečet teploty ze senzoru je velice snadný, jelikož není potřeba provádět přepočty z odporu na teplotu. Tyto senzory umožňují měřit teplotu s přesností $\pm 1^{\circ}\text{C}$ v rozmezí -25 až 100°C . [23]

3.3 Snímače relativní vlhkosti

Relativní vlhkost je definována jako podíl tlaku vodní páry obsažené ve vzduchu a tlaku nasycených par o stejné teplotě.

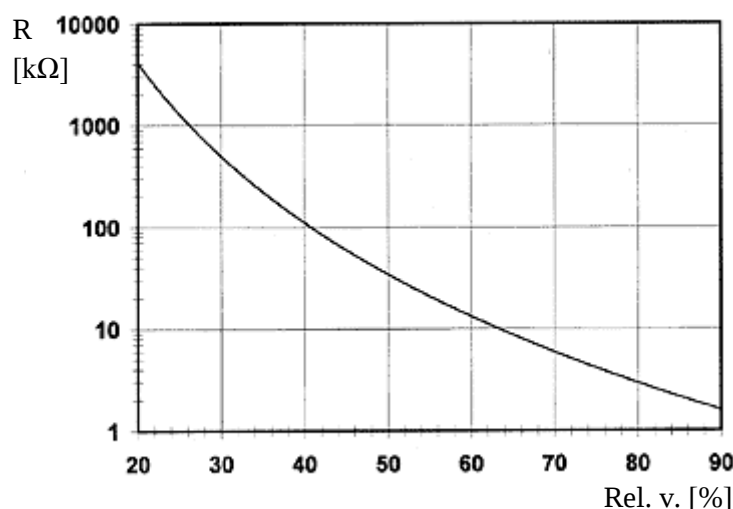
Snímače vlhkosti můžeme rozdělit na:

- kapacitní
- odporové
- kondenzační
- optické
- s vyhřívanými termistory
- a další. [26]

Pro snímání relativní vlhkosti v termoelektrických zařízeních jsou vhodné odporové a kapacitní snímače vlhkosti. Tyto druhy snímačů jsou vhodné především díky snadnému převodu vlhkosti na elektrické veličiny, dostatečné přesnosti a malým rozměrům.

3.3.1 Odporové snímače

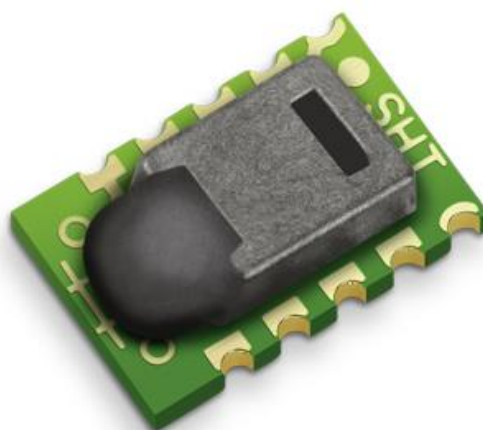
Odporové snímače využívají závislosti elektrického odporu některých materiálů (elektrolytů) na vlhkosti. Elektrolyty mohou být kapalné nebo tuhé. Jako elektrolyt se ve skupenství kapalném využívá chlorid lithný, ve skupenství tuhém soli, keramické materiály nebo polymery. Tyto materiály mají schopnost absorbovat vzdušnou vlhkost, v důsledku čehož dojde k ionizaci molekul materiálu a ke zvýšení vodivosti. Odpor elektrolytu tedy se zvyšující se relativní vlhkostí klesá



Obr. 19 Závislost odporu na relativní vlhkosti. [19]

Přesnost snímání se u odporových snímačů pohybuje do 5% rel. vlhkosti. Doba odezvy je v rozmezí 10 až 30 s. Rozsah provozních teplot se pohybuje od -40 do 120°C . Odpor snímače se pohybuje v jednotkách $\text{k}\Omega$ až stovkách $\text{M}\Omega$.

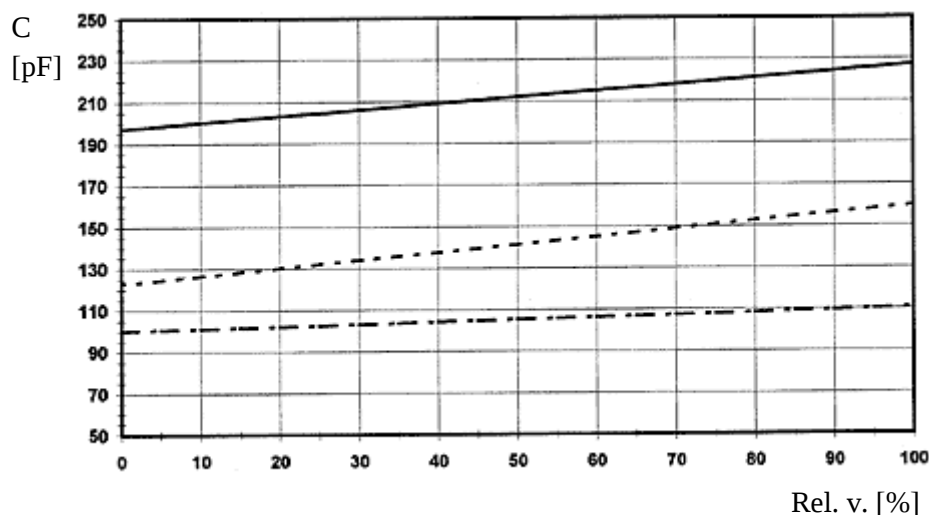
Nevýhodou odporových snímačů vlhkosti je závislost snímané hodnoty vlhkosti na teplotě. Projevuje se zde vliv kolísání okolní teploty a také zahřívání elektrolytu vlivem disipace tepla. Proto se snímače relativní vlhkosti konstruují také jako integrované se snímači teploty. Snímače teploty snímají teplotu elektrolytu, na základě které je možné provést korekci hodnoty relativní vlhkosti. Oba snímače jsou umístěny společně v jednom pouzdře. Jsou zpravidla vybaveny digitálním komunikačním rozhraním, které umožňuje snadný přenos informací z obou snímačů. [18],[19]



Obr. 20 Kombinovaný snímač SHT15 od firmy Sensirion. [17]

3.3.2 Kapacitní snímače

Kapacitní snímače využívají změny relativní permitivity některých materiálů v závislosti na změně relativní vlhkosti. Skládají se ze dvou elektrod, mezi kterými je dielektrikum, které tvoří matrice (obvykle sklo nebo keramický materiál) pokrytá tenkou aktivní vrstvou polymeru nebo oxidu. Tato aktivní vrstva absorbuje vzdušnou vlhkost a v důsledku toho mění svoji relativní permitivitu. Se změnou permitivity dielektrika se mění kapacita snímače. S rostoucí relativní vlhkostí relativní permeabilita dielektrika roste a současně roste i kapacita.



Obr. 21 Závislost kapacity na relativní vlhkosti. [19]

Přesnost se u kapacitních snímačů pohybuje do 3% rel. vlhkosti. Rozsah pracovních teplot je větší, než u snímačů odporových, od -50 do 200 °C. Čas odezvy je vyšší, 30 až 60 s. Kapacita snímače se pohybuje v řádu stovek pF. Výhodou kapacitních snímačů je, že hodnota relativní vlhkosti je málo ovlivněna teplotou. I tyto druhy snímačů se vyrábí jako kombinované se snímači vlhkosti a teploty, umístěné v jednom pouzdře. [18],[19],[24]

4 NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ TERMOKOMORY

Termokomora je zařízení, které umožňuje udržovat a měnit ve svém vnitřním prostoru teplotu. Termokomory mohou pracovat v režimu chlazení nebo ohřevu vnitřního prostoru. Slouží k provádění experimentů, pro které je nutné udržovat určitou teplotu nebo teplotní cyklus. [29]

4.1 Výběr vhodného Peltierova článku

Pro výběr vhodného Peltierova článku je zapotřebí znát minimálně tři parametry, kterými jsou teplota teplé strany, teplota studené strany a chladicí výkon.

Teplota teplé strany je dána tepelným tokem přiváděným z termoelektrických článků a tepelným tokem odebíraným chladičem (výměníkem), popř. přirozeným prouděním. Teplota změřená na chladiči nebo na keramické destičce Peltierova článku však není skutečnou teplotou teplé strany. Kvůli tepelným odporům je teplota teplé strany Peltierova článku vždy o něco větší, než teplota chladiče. Rozdíl mezi teplotou chladiče a skutečnou teplotou lze přibližně určit podle druhu použitého chlazení. Přibližné hodnoty teplotního rozdílu jsou pro teplou stranu

- 2 až 5 °C při chlazení kapalinou
- 10 až 15 °C při chlazení žebrovaným chladičem s nuceným prouděním vzduchu
- 20 až 40 °C při chlazení přirozeným prouděním [5]

Teplota studené strany je naopak o něco nižší, než teplota na výměníku nebo keramické destičce. Rozdíly teplot jsou vzhledem k menšímu tepelnému toku přibližně poloviční, než u teplé strany. Pokud známe požadovanou provozní teplotu uvnitř termokomory a teplotu, na kterou je chladič schopen trvale chladit druhou stranu, pak je možné určit rozdíl teplot, kterého musí být Peltierův článek schopen dosáhnout. [5]

Pro udržení konstantního teplotního rozdílu musí být tepelný tok odebíraný článkem větší nebo roven tepelnému toku, který vzniká uvnitř termokomory. Tepelný tok vznikající uvnitř termokomory je dán součtem tepelných toků daných vedením z vnější strany termokomory a zdroji tepla uvnitř termokomory. Zdroji tepla mohou být předměty vložené dovnitř termokomory a také elektrické ventilátory, měřicí prvky a ostatní elektrické obvody. [28]

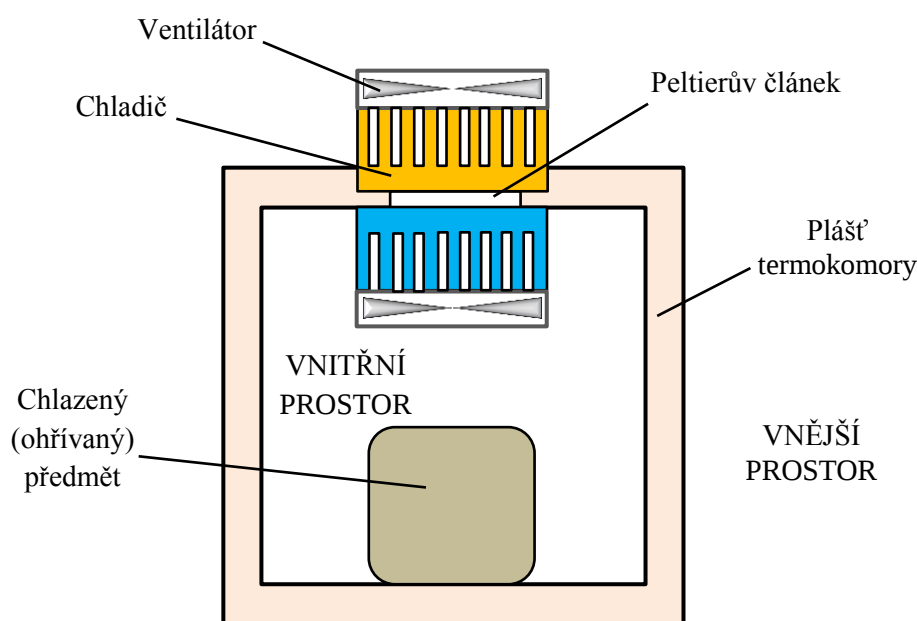
Pokud známe požadovaný rozdíl teplot a požadovaný tepelný tok odebíraný článkem, je možné vybrat konkrétní článek pro danou aplikaci. Je třeba mít na paměti, že výrobce udává hodnoty maximálního rozdílu teplot a maximálního tepelného toku, kterých nelze dosáhnout současně. Pro výběr Peltierova článku je nutné použít vztah (2.8), pomocí kterého lze vypočítat proud, který by musel procházet článkem pro dosažení daných parametrů. Následně je třeba zkontrolovat, jestli pro daný proud a teplotní rozdíl nepřekračuje napájecí napětí maximální hodnotu pro daný článek. Z důvodu vyšší účinnosti se doporučuje se Peltierův článek napájet napětím dosahujícím hodnoty 40 až 80% maximálního napětí. [5] Pokud je požadovaný tepelný tok příliš velký, je nutné použití více Peltierových článků zapojených z hlediska termomechanického paralelně. V případě, že je příliš velký požadovaný rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou, použije se kaskádové zapojení (z hlediska termomechanického sériové).

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.4, tepelný systém je možné kromě jeho statického chování možné posuzovat také z hlediska dynamických vlastností. V případě termokomory se dynamické vlastnosti projeví v čase, za který je možné dosáhnout

určité změny teploty uvnitř komory. Dalším požadavkem pro výběr Peltierových článků pro chlazení termokomory by tak mohla být schopnost dosažení změny teploty v komoře za určitý čas. Pro ověření tohoto požadavku by bylo nutné provést simulaci nebo experiment.

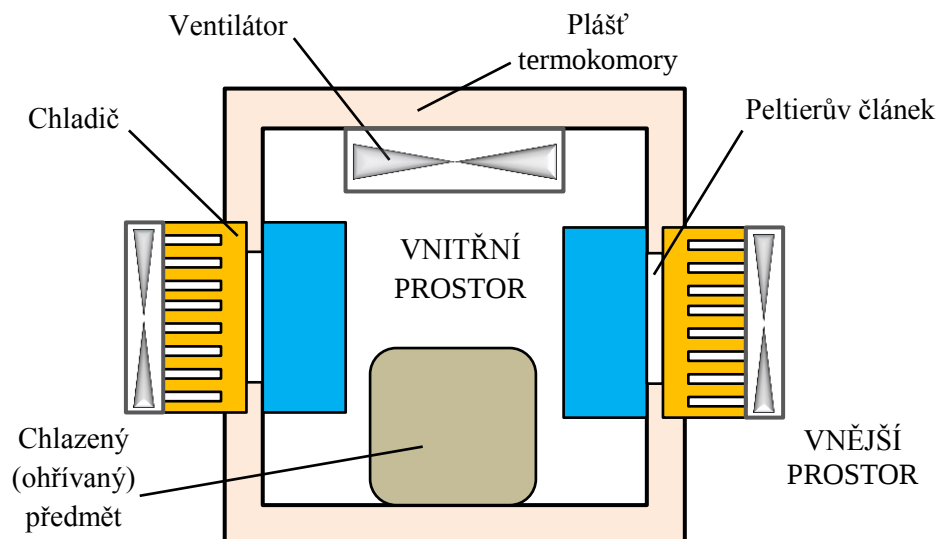
4.2 Uspořádání Peltierových článků

V případě použití jednoho jednostupňového Peltierova článku je jedno z možných uspořádání na obr. 22. Při tomto uspořádání je Peltierův článek umístěn na vrchní stěně termokomory a je opatřen na obou stranách žebrovanými chladiči. Nucené proudění vzduchu z vnější strany a cirkulaci vzduchu uvnitř termokomory zajišťují ventilátory umístěné přímo na chladiči. Toto uspořádání umožňuje používat termokomoru pro chlazení i ohřev.



Obr. 22 Uspořádání termokomory s jedním Peltierovým článkem.

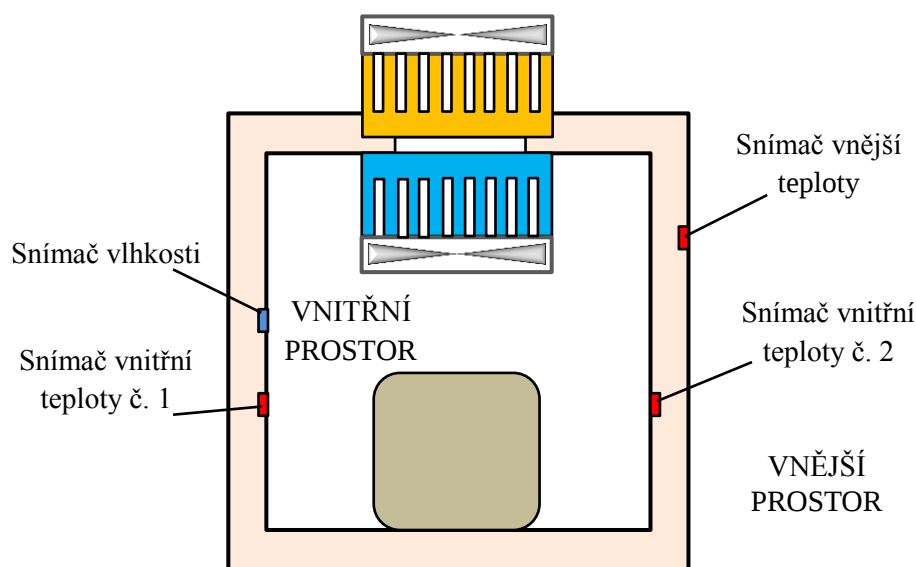
Při použití více jednostupňových Peltierových článků je možné použít uspořádání na obr. 23. Při tomto uspořádání jsou jednotlivé Peltierovy články umístěny na stranách termokomory. Z vnější strany je chlazení zajištěno žebrovanými chladiči, na kterých je umístěn ventilátor. Uvnitř komory jsou Peltierovy články opatřeny žebrovanými chladiči bez ventilátoru. Cirkulaci vzduchu uvnitř komory zajišťuje jeden ventilátor na vrchní stěně. Uspořádání s jedním ventilátorem poskytuje větší prostor uvnitř termokomory. Ventilátor musí poskytovat dostatečný průtok vzduchu, aby byla zajištěna dostatečná výměna tepla uvnitř komory. Žebra chladiče jsou orientována rovnoběžně se směrem proudění vzduchu. Stejně jako v předchozím případě je toto uspořádání možné použít pro chlazení i ohřev.



Obr. 23 Uspořádání termokomory s více Peltierovými články.

4.3 Uspořádání snímačů

Při měření teploty je třeba zohlednit fakt, že teplota vzduchu v termokomoře není konstantní. Mění se jak s polohou v rámci komory, tak i v čase vlivem proudění vzduchu. Proto je zapotřebí měřit teplotu na více místech v zájmové oblasti a z těchto hodnot udělat průměr. Při uspořádání podle obr. 22 je zájmovou oblastí spodní část termokomory, kde bude umístěn chlazený nebo ohříváný předmět. Snímače teploty jsou proto v uspořádání podle obr. 24 umístěny na stěnách termokomory, a to v jejich spodní polovině. Jelikož teplota okolí termokomory ovlivňuje chlazení vnější strany Peltierových článků a tím i dosažitelnou teplotu na vnitřní straně, má význam teplotu okolí snímat. Jelikož zde není potřeba takové přesnosti jako u měření vnitřní teploty, postačí jeden snímač umístěný na vnějším plášti termokomory. Pro snímání vlhkosti uvnitř termokomory je možné použít jeden senzor, jelikož lze předpokládat, že vlhkost se v jednotlivých částech komory liší jen málo. Tento snímač je možné umístit na kteroukoliv ze stěn termokomory.



Obr. 24 Uspořádání snímačů v termokomoře.

ZÁVĚR

Chlazení Peltierovými články představuje progresivní způsob realizace chladicího systému. Je vhodnou alternativou všude tam, kde je zapotřebí odebrat velký tepelný tok z malé plochy nebo tam, kde se klade důraz na malé rozměry chladicího systému. Důležitou roli hrají Peltierovy články také v oblasti regulace teploty.

Při použití Peltierových článků pro regulaci teploty je třeba stanovení jejich přesných parametrů. Hodnoty udávané výrobcem jsou často nedostatečné, neboť se jedná o extrémní hodnoty, kterých nelze dosáhnout za všech okolností. Pro výpočet parametrů statického chování Peltierova článku je možné aplikovat základní rovnice tepelné rovnováhy. Je nutné zjistit tepelný tok, který musí Peltierův článek při dané aplikaci odebrat a teplotní rozdíl teplého a studeného konce Peltierova článku. Po dosažení požadovaných parametrů chlazení do příslušných rovnic je možné zjistit nutné parametry Peltierova článku. Na základě těchto parametrů je možné z nabídky výrobců zvolit Peltierův článek vhodný pro danou aplikaci. Pro určení dynamických vlastností Peltierova článku byl proveden experiment. Na základě tohoto experimentu je možné říct, že dynamické chování tepelného systému je důležitou vlastností, která by měla být při výběru Peltierova článku zohledněna. Z průběhu měřených teplot v průběhu experimentu je patrná důležitost dostatečného chlazení teplé strany Peltierova článku.

Pro realizaci termokomory chlazené Peltierovými články bude stěžejní výběr Peltierových článků s dostatečným chladicím výkonem, jejich chlazení a výběr snímačů použitých pro realizaci regulačního obvodu. Peltierovy články musí mít dostatečnou výkonovou rezervu, aby byla zajištěna správná funkce termokomory i při zvýšené teplotě okolí a tím i teplé strany článku. Výkyvy teploty teplé strany lze eliminovat dostatečným chlazením. Jako vhodné se jeví použití chladičů s ventilátory s automatickou regulací otáček, používaných pro chlazení procesorů. Pro dobrou funkci regulačního obvodu je nutné přesné a rychlé snímání teploty. Pro tuto aplikaci jsou tedy vhodné snímače s nízkou dobou odezvy a dobrou přesností. Tyto parametry splňují zejména platinové a niklové odporové snímače.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MIKYŠKA, Ladislav. *Termoelektrické články*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964, 152 s.
- [2] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [3] LINEYKIN, Simon; BEN-YAAKOV, Shmuel. *Modeling and analysis of thermoelectric modules* [online]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2007, 43.2: 505-512 [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4132878>>.
- [4] *Thermoelectric modules* [online]. Ferrotec Corporation, 2007 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <<http://www.ferrotec.com/downloads/FerrotecGlobalTECatalog0507.pdf>>.
- [5] *Thermoelectric Handbook* [online]. Laird Technologies, Inc., 2010 [cit. 2013-02-26] Dostupné z: <<http://www.lairdtech.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=5016>>.
- [6] *Thermoelectric Technical Reference — Applications of Thermoelectric Coolers* [online]. Ferrotec Corporation, 2001–2013 [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <<http://www.ferrotec.com/technology/thermal/thermoelectric-reference-guide/>>.
- [7] *Introduction to Thermoelectric Systems* [online]. European Thermodynamics Limited, 2012 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <<http://www.eurothermodynamics.com/index.php/latestnews/technical-library/introduction-to-thermoelectric-systems>>.
- [8] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1996, 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [9] ASTM COMMITTEE E20 ON TEMPERATURE MEASUREMENT. *Manual on the use of thermocouples in temperature measurement* [online]. Astm International, 1993. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <<http://books.google.cz/books?id=Pos-MXDWb6MC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>>.
- [10] LAU, Paul G.; BUIST, Richard J. *Temperature and time dependent finite-element model of a thermoelectric couple* [online]. In: Thermoelectrics, 1996., Fifteenth International Conference on. IEEE, 1996. p. 227-233. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <<https://www.titech.com/publications/pubs/ICT96PGL.pdf>>.
- [11] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999, 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
- [12] *Power generating modules* [online]. Ferrotec Nord Corporation, 2012 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <<http://ferrotec-nord.com/power%20generating%20modules>>.
- [13] *Messprinzipien und Sensoren zur Temperaturmessung* [online]. Lufft, 2013 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <<http://www.lufft.com/de/support/temperatur-feuchte/>>.
- [14] *Construction and application of platinum temperature sensors* [online]. JUMO Instrument Co. Ltd. [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <<http://www.jumo.de/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=3008&filename=t90.6000gb.pdf>>.

- [15] *Nickel Temperature Sensors* [online]. IST AG [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <[http://www.ist-ag.com/eh/ist-ag/resource.nsf/imgref/Download_Nickel_EN_V5.2_181109_dane.pdf/\\$FILE/Nickel_EN_V5.2_181109_dane.pdf](http://www.ist-ag.com/eh/ist-ag/resource.nsf/imgref/Download_Nickel_EN_V5.2_181109_dane.pdf/$FILE/Nickel_EN_V5.2_181109_dane.pdf)>.
- [16] *Temperature sensors PT1000 MFK-422* [online]. ELKOMPserviss, 2009 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.elkomp.lv/en/item.php?id=6012>.
- [17] *SHT15 - Digital Humidity Sensor (RH&T)* [online]. Sensirion AG [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <<http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature/humidity-sensor-sht15/>>.
- [18] MAREŠ, Luděk. Vlhkost vzduchu a její měření. *TZB-info* [online]. 2006 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>>.
- [19] ROVETI, Denes K. Choosing a Humidity Sensor: A Review of Three Technologies. *Sensors* [online]. 2001 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <<http://www.sensormag.com/sensors/humidity-moisture/choosing-a-humidity-sensor-a-review-three-technologies-840>>.
- [20] *Platinum Chip Temperature Sensors with Connection Wires to EN 60 751* [online]. JUMO Instrument Co. Ltd., 2011 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <<http://www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=3404>>.
- [21] SMUTNÝ, Lubomír. Snímače teploty – současný stav a směry vývoje. *AUTOMA* [online]. 2007 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34041>.
- [22] *NTC Thermistors, Screw Threaded Sensors* [online]. VISHAY, 2012 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <<http://www.vishay.com/docs/29065/ntcascw.pdf>>.
- [23] *Temperature sensors* [online]. NXP Semiconductors, 2006-2013 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/products/sensors/temperature_sensors/>.
- [24] *Relative Humidity Sensors* [online]. General Electric Company, 2013 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <<http://www.ge-mcs.com/en/moisture-and-humidity/relative-humidity-sensors.html>>.
- [25] *TEM Advantages & Main Applications* [online]. Kryotherm [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <<http://kryotherm.ru/?tid=88>>.
- [26] STĚPÁNEK, Pavel. *Měření vlhkosti* [online]. 2004 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://web.umel.feec.vutbr.cz/BMMS/.%5Cprojekty_2004%5CStepanek%5Cindex.htm>.
- [27] MÜLLER, Claudio. *Leistungszahlen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme* [online]. REFTEC, 2008 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <<http://www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf>>.
- [28] *Thermal Test Chamber Construction, Considerations and Constraints* [online]. Sigma Systems Incorporated [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <<http://www.sigmasystems.com/tech-docs/download-files/tech-documents/chamber-size-discussion.pdf>>.
- [29] *ATS-Series THERMOSTREAM Systems* [online]. inTEST Thermal Solutions, 2011 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <<http://www.intest-thermal.com/thermostreamats.html>>.

- [30] *Resistance Temperature Detectors* [online]. Spectrum Sensors & Controls, Inc. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://sensors.apitech.com/pdfs/rtd.pdf>>.
- [31] *3-stage thermoelectric coolers* [online]. Kryotherm [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.kryotherm.ru/index.phtml?tid=79&type=&what=>>>.
- [32] *Ardes TK 45* [online]. Datart International, 2012. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <<http://www.datart.cz/Chladnicka-Ardes-TK-45.html>>.
- [33] *Peltier-Element kurz erklärt* [online]. Deltron AG [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.deltron.ch/pdf/produkte/peltier/peltier-element_kurz_erklaert_d.pdf>.
- [34] *Thermoelectrics, The Science of Thermoelectric Materials* [online]. California Institute of Technology, 2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/>>.
- [35] *The Best Thermoelectric Materials* [online]. Mercouri G. Kanatzidis research group, 2009 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <<http://chemgroups.northwestern.edu/kanatzidis/greatthermo.html>>.
- [36] *Thermoelectric Modules* [online]. Laird Technologies, 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <<http://www.lairdtech.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=2147487938>>.