

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**TERMoeLEKTRICKÝ SOLÁRNÍ GENERÁTOR**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

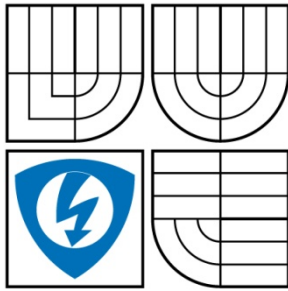
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**BC. ONDŘEJ KOČVÁREK**

**BRNO 2008**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a  
komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektroenergetika

**Student:** Kočvárek Ondřej Bc.

**ID:** 89903

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2007/2008

### NÁZEV TÉMATU:

#### Termoelektrický solární generátor

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Návrh termoelektrického solárního generátoru a ověření funkce na laboratorním modelu

- 1) Na základě měření materiálových vlastností dostupných termoelektrických elementů vyberte typ vhodný pro návrh a konstrukci solárního termoelektrického měniče se žlabovým koncentrátorem slunečního záření.
- 2) Pro vhodný typ termoelektrického prvku navrhnete konstrukční uspořádání solárního generátoru a určete základní geometrické rozměry.
- 3) Navrhnete soubor veličin nezbytných pro monitorování funkce solárního termoelektrického generátoru a realizujete kontinuální měření pomocí automatizovaného systému sběru dat.
- 4) Vyhodnoťte provedená měření a posuďte perspektivy využití termoelektrických výkonových měničů ve středoevropských klimatických podmínkách.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího

**Termín zadání:** 17.12.2007

**Termín odevzdání:** 28.5.2008

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Gregor, CSc.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Ondřej Kočvárek  
Bytem: Bzenecká 4166/22, 62800, Brno – Líšeň  
Narozen/a (datum a místo): 16.6.1984, Brno  
(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Termoelektrický solární generátor  
Vedoucí/školicitel VŠKP: Ing. Jan Gregor, CSc.  
Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů .....
- elektronické formě – počet exemplářů .....

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy

(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

Bibliografická citace práce:

KOČVÁREK, O. *Termoelektrický solární generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Gregor, CSc.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Gregorovi, CSc za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Diplomová práce**

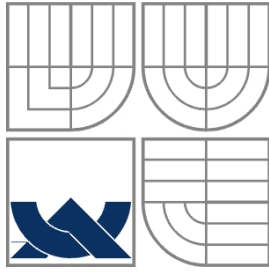
# **Termoelektrický solární generátor**

**Bc. Ondřej Kočvárek**

**vedoucí: Ing. Jan Gregor, CSc.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Master's Thesis**

# **Thermo-electric solar generator**

**by**

**Bc. Ondřej Kočvárek**

**Supervisor: Ing. Jan Gregor, CSc.**

**Brno University of Technology, 2008**

**Brno**

**ABSTRAKT**

Úvod práce je věnován popisu fyzikální podstaty a konstrukce moderních polovodičových termoelektrických měničů. V práci jsou popsány jejich základní vlastnosti a nejvíce používané materiály pro jejich výrobu. Dále jsou uvedeny základní principy a fyzikální jevy, které popisují termoelektrickou přeměnu energie a popsána nedestruktivní metoda určení základních materiálových vlastností termoelektrických měničů.

Podstatnou částí práce je proměření materiálových vlastností dostupných termoelektrických elementů pomocí experimentálního měřicího obvodu. Na základě měření a vyhodnocení materiálových vlastností měřených termoelektrických elementů jsou vybrány a navrženy nejvhodnější konstrukce termoelektrického solárního generátoru pro jednotlivé termoelektrické elementy.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Koncentrace slunečního záření; materiálová konstanta; materiálové vlastnosti; nedestruktivní diagnostika; solární energie; termoelektrické měniče; termoelektrický generátor



**ABSTRACT**

The introduction of this work is devoted to the description of physical principals and condtruction of modern semiconductor thermoelectric transformers. This work describes their basic characters and the most commonly used materials for their production. Further, it mentions the basic principals and physical effects that describe the thermoelectric conversion of energy and the nondestructive method for establishing the basic material characteristics of thermoelectric transformers.

The substantiv part of this work is the measuring of the material's characteristics of the accessible thermoelectric elements through the medium of experimental measuring network. The optimal construction of thermoelectric solar generators used for individual thermoelectric elements are designed based on the taken measurements and the evaluation of material's characteristics of the observed thermoelectric elements.

**KEY WORDS:**

Solar energy; thermoelectric transformers; material constant; material's characteristics; nondestructive diagnostics; the concentration of solar radiation; thermoelectric generator.

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>13</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>14</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>15</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>16</b>
<b>2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA A KONSTRUKCE MODERNÍCH POLOVODIČOVÝCH TERMOELEKTRICKÝCH MĚNIČŮ .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 KONSTRUKCE A USPOŘÁDÁNÍ POLOVODIČOVÝCH TERMOELEKTRICKÝCH MĚNIČŮ.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 TERMOELEKTRICKÁ PŘEMĚNA.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY .....	19
2.2.2 TERMOELEKTRICKÉ MATERIÁLY .....	20
2.2.3 PRINCIP A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI TERMOELEKTRICKÉHO MĚNIČE .....	21
<b>3 URČENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ TERMOELEKTRICKÝCH MĚNIČŮ NEDESTRUKTIVNÍ METODOU .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 POPIS A KONSTRUKCE MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO OBVODU.....</b>	<b>27</b>
<b>4 MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ DOSTUPNÝCH TERMOELEKTRICKÝCH ELEMENTŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 ÚVOD DO MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ TE ELEMENTŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 ROZBOR MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ TE ELEMENTŮ.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 POSTUP MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ TE ELEMENTŮ .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ TE ELEMENTŮ.....</b>	<b>35</b>
4.4.1 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT PRO TYP TEC1 07103.....	35
4.4.2 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT PRO TYP TEC1 07108.....	36
4.4.3 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT PRO TYP TEC1 12710 225°C.....	37
4.4.4 UKÁZKA VÝPOČTU MATERIÁLOVÉ KONSTANTY PRO TERMOČLÁNEK TEC1 07103 .....	38
4.4.5 VÝBĚR VHODNÉHO TERMOELEKTRICKÉHO ELEMENTU PRO NÁVRH KONSTRUKCE.....	40
<b>5 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ SOLÁRNÍHO TERMOELEKTRICKÉHO GENERÁTORU .....</b>	<b>41</b>
<b>5.1 PRINCIP KONSTRUKCE SOLÁRNÍHO TERMOELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>41</b>
<b>5.2 NÁVRH ROZMĚRŮ KONCENTRÁTORU PRO VYSOKOTEPLTNÍ ČLÁNEK TEC1 12710 225°C.....</b>	<b>43</b>
5.2.1 UKÁZKA VÝPOČTU PRO NÁVRH TERMOELEKTRICKÉHO GENERÁTORU A ROZMĚRŮ PYRAMIDOVÉHO KONCENTRÁTORU.....	44
<b>5.3 NÁVRH ROZMĚRŮ PYRAMIDOVÉHO KONCENTRÁTORU PRO TE ELEMENTY TEC1 07103 A     TEC1 07108.....</b>	<b>46</b>
<b>5.4 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ PRO TE ELEMENTY TEC1 071 03 A TEC1 07108.....</b>	<b>47</b>
5.4.1 NÁVRH KONCENTRÁTORU S BOČNÍMI ZRCADLY PRO TE ELEMENTY TEC1 07103 A TEC1 07108.....	48
5.4.2 VÝPOČET ROZMĚRŮ KONCENTRÁTORU S BOČNÍMI ZRCADLY PRO TE ELEMENTY TEC1 07103 A TEC1 07108 .....	49
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>53</b>

---

**POUŽITÁ LITERATURA .....54**

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 2-1 Nákres termoelektrického článku[8]</i> .....	17
<i>Obr. 2-2 Termoelektrický článek[7]</i> .....	18
<i>Obr. 2-3 Popis termoelektrického článku[7]</i> .....	18
<i>Obr. 2-4 Provedení termoelektrického článku</i> .....	22
<i>Obr. 3-1 Uspořádání a zapojení experimentálního měřicího obvodu[1]</i> .....	26
<i>Obr. 4-1 Schéma zapojení měřicí úlohy</i> .....	32
<i>Obr. 4-2 Průběh měření pro termoelektrický element TEC1 07103</i> .....	33
<i>Obr. 4-3 Zatěžovací křivky pro napětí <math>U_2</math> a proud <math>I_2</math> pro TE element TEC1 07103</i> .....	34
<i>Obr. 4-4 Koncentrátor pyramidového typu</i> .....	41
<i>Obr. 5-1 Popis konstrukčního uspořádání pyramidového koncentrátoru s TE elementem</i> .....	42
<i>Obr. 5-2 Nákres bočního pohledu pyramidového koncentrátoru s TE elementem</i> .....	45
<i>Obr. 5-3 Nákres horního pohledu pyramidového koncentrátoru s TE elementem</i> .....	45
<i>Obr. 5-4 Uspořádání koncentrátoru opatřeným dvěma bočními zrcadly</i> .....	47
<i>Obr. 5-5 Nákres bočního pohledu koncentrátoru se dvěma zrcadly</i> .....	48
<i>Obr. 5-6 Nákres horního pohledu koncentrátoru se dvěma zrcadly</i> .....	48
<i>Obr. 5-7 Nákres druhého řešení koncentrátoru s bočními zrcadly</i> .....	51

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 4-1 Katalogové údaje pro vybrané prvky určené k měření .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4-2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro termočlánek TEC1 07103 .....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 4-3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro termočlánek TEC1 07108 .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4-4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro termočlánek TEC1 12710 225°C .....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 4-5 Tabulka vyhodnocených parametrů pro vybrané termoelektrické elementy .....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 5-1 Tabulka vypočtených hodnot pro TE element TEC1 12710 225°C .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5-2 Rozměry pyramidového koncentrátoru pro článek TEC1 12710 225°C .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5-3 Tabulka vypočtených hodnot pro TE element TEC1 07103 .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-4 Rozměry pyramidového koncentrátoru pro článek TEC1 07103.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-5 Tabulka vypočtených hodnot pro TE element TEC1 07108 .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-6 Rozměry pyramidového koncentrátoru pro článek TEC1 07108.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-7 Vypočtené hodnoty TE elementů TEC1 07103 a TEC1 07108 koncentrátoru s bočními zrcadly .....</i>	<i>50</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	rozměr termoelektrického elementu	[m]
G	hustota Slunečního záření	[W/m <sup>2</sup> ]
h <sub>r</sub>	výška (tloušťka) pryžové vložky	[m]
h <sub>s</sub>	výška sloupku A či B aktivního materiálu	[m]
I	proud	[A]
I <sub>1</sub>	proud na spodním termoelektrickém elementu	[A]
I <sub>2</sub>	zatěžovací proud	[A]
L <sub>a</sub>	délka tepelně vodivé desky	[m]
L <sub>c</sub>	celková délka jedné strany pyramidového koncentrátoru	[m]
L <sub>x</sub>	délka pro výpočet koncentrátoru s bočními zrcadly	[m]
l <sub>s</sub>	celková délka všech sloupků A i B zapojených v sérii	[m]
n <sub>p</sub>	počet párů termoelektrického měniče	[-]
N <sub>s</sub>	počet aktivních sloupků	[-]
P <sub>1</sub>	výkon přiváděný na studený konec termoelektrického elementu	[W]
P <sub>2</sub>	potřebný tepelný výkon	[W]
P <sub>2od</sub>	tepelný výkon odnímaný horkému spoji	[W]
Q	tepelný tok	[W]
q <sub>p</sub>	Peltierovo teplo	[W]
q <sub>t</sub>	Thompsonovo teplo	[W]
R <sub>i</sub>	vnitřní odpor	[Ω]
R <sub>z</sub>	zatěžovací odpor	[Ω]
S <sub>c</sub>	celková plocha koncentrátoru	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>r</sub>	plocha pryžové vložky	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>s</sub> '	průřez sloupku	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>sl</sub>	součet průřezů všech sloupků A i B u termoelektrického měniče	[m <sup>2</sup> ]
T <sub>1</sub>	teplota studenějšího spoje při Seebeckově jevu	[°C]
T <sub>2</sub>	teplota teplejšího spoje při Seebeckově jevu	[°C]
T <sub>s</sub>	střední teplota termoelektrického článku	[°C]
t <sub>x</sub>	teplota x-tého termočlánku	[°C]
U <sub>1</sub>	napětí na spodním termoelektrickém elementu	[V]
U <sub>2</sub>	pracovní napětí při optimálním zatížení I <sub>2</sub>	[V]
U <sub>T</sub>	termoelektrické napětí	[V]
Z	materiálová konstanta	[K <sup>-1</sup> ]
α	Seebeckův termoelektrický součinitel	[V.K <sup>-1</sup> ]
γ	měrná elektrická vodivost	[Ω <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ]
η	účinnost	[%]
λ	měrná tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
λ <sub>r</sub>	měrná tepelná vodivost pryžové vložky	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
λ <sub>s</sub>	měrná tepelná vodivost aktivního polovodičového materiálu TE měniče	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
π <sub>s</sub>	Peltierův koeficient spoje	[V]
ρ	měrný elektrický odpor	[Ω.m]
ρ <sub>s</sub>	měrný elektrický odpor aktivního polovodičového materiálu TE měniče	[Ω.m]
τ	Thompsonův materiálový součinitel	[V.K <sup>-1</sup> ]

# 1 ÚVOD

Rozvoj naší technické civilizace s sebou zároveň přináší růst spotřeby elektrické energie. Tento faktor klade stále větší a větší nároky na výrobu elektrické energie a zároveň se vyčerpávají neobnovitelné zdroje energie na naší planetě. Také dochází k závažnému poškozování životního prostředí. Lidstvo stále hledá cesty, jak zachovat stálý hospodářský růst a zároveň udržet kvalitní prostředí pro život.

Energie je pro hospodářský rozvoj důležitější, než jiné suroviny. To je dáno především tím, že suroviny se dají nahrazovat jedna druhou, zatímco u jednotlivých zdrojů energie je to podstatně obtížnější. Možnost náhrady jednoho energetického zdroje jiným závisí na technických znalostech a ekonomických možnostech konkrétní společnosti. Velkou roli v těchto problémech hraje i geografické rozložení.

Z těchto důvodů se lidé stále více obracejí k obnovitelným zdrojům energie. Obnovitelné zdroje energie jsou takové zdroje energie, které se stále obnovují. Proto jsou z pohledu civilizace nevyčerpateľné, na rozdíl od tradičních fosilních paliv a při přeměně z primární energie na jinou využitelnou formu energie mají minimální dopad na naše životní prostředí.

Mezi základní využívané zdroje energie v dnešní době patří:

- sluneční energie
- vodní energie
- větrná energie
- geotermální energie
- energie biomasy
- a další zdroje, které jsou zatím v rozvojové fázi

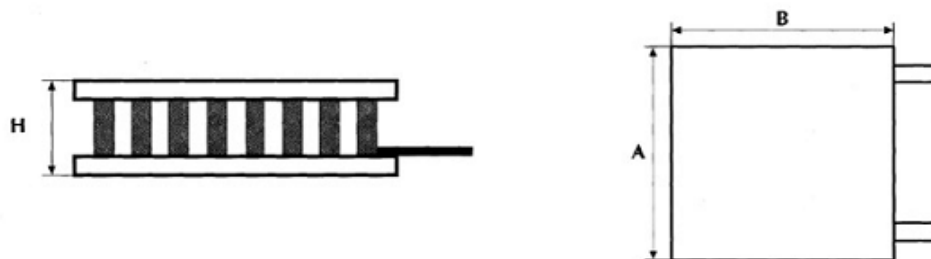
Termoelektrická přeměna patří mezi přímé přeměny tepla na elektrickou energii. Přeměna slunečního záření v teplo je nejpřirozenější, probíhá v přírodě ve velkém rozsahu a konečnou formou veškeré sluneční energie dopadající na Zemi je energie tepelná. Teplo spolu s energií elektrickou a energií mechanickou představuje základní formy energie využívané v technice. Vzhledem ke zvětšující se důležitosti elektrické energie a vzhledem k přeměně velké účinnosti přeměny slunečního záření v teplo se jeví perspektivní přímá přeměna slunečního tepla v elektrickou energii.

## 2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA A KONSTRUKCE MODERNÍCH POLOVODIČOVÝCH TERMOELEKTRICKÝCH MĚNIČŮ

### 2.1 Konstrukce a uspořádání polovodičových termoelektrických měničů

V poslední době pokročil vývoj termoelektrických měničů. Se stále se zlepšující technologií výroby a novými vhodnějšími materiály se zlepšily parametry termoelektrických měničů. Pro srovnatelné výkony jsou nepoměrně levnější než zatím více používané fotovoltaické články. Z těchto hledisek se nabízí možnost využít termoelektrické přeměny k přímé přeměně energie slunečního záření současně na teplo i elektřinu.

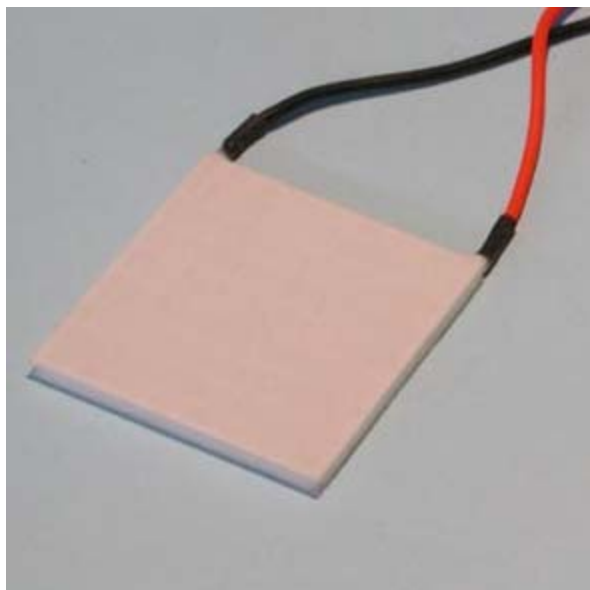
Je proto nutné vybrat ten článek, který bude mít nejlepší parametry a vhodné rozměry pro sestavení termoelektrického měniče sluneční energie.



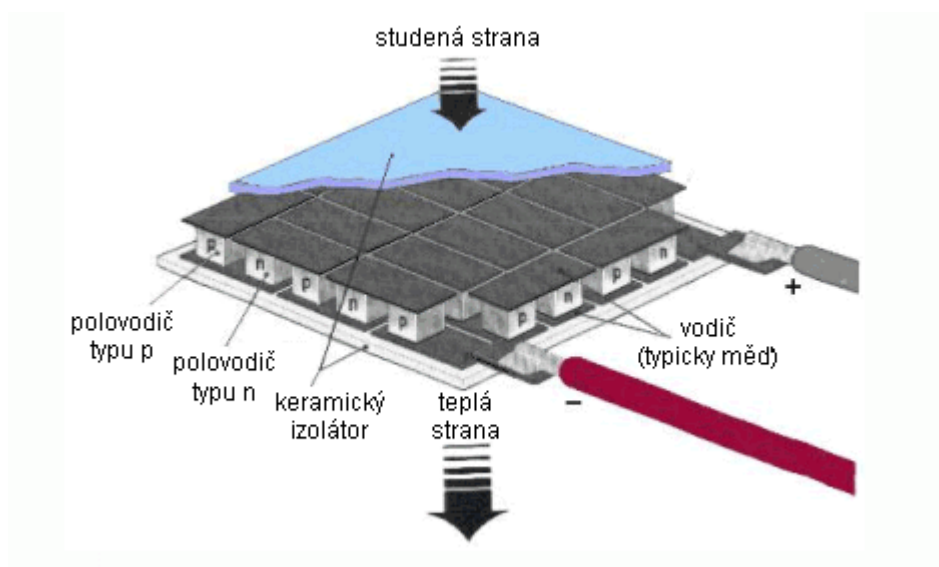
Obr. 2-1 Návrh termoelektrického článku[8]



Převážně se používají materiály vizmut-telluridy, které mají vhodné vlastnosti pro to, aby články dosáhly dostatečné účinnosti.[7]



Obr. 2-2 Termoelektrický článek[7]



Obr. 2-3 Popis termoelektrického článku[7]

## 2.2 Termoelektrická přeměna

### 2.2.1 Základní principy

Termoelektrická přeměna energie je založena na fyzikálních jevech, které se označují jako Seebeckovy jevy. Mezi tato základní termoelektrické jevy patří:

#### Seebeckovo napětí

Základem je Seebeckův jev. Uvažujme obvod, který je složen ze dvou různých kovových materiálů, které jsou udržovány na různých teplotách. V místě jejich styku vzniká elektromagnetické napětí. Velikost termoelektrického napětí závisí na teplotě teplého spoje  $T_2$ , teplotě studeného spoje  $T_1$  a na druhu použitého materiálu termoelektrického článku. Termoelektrické napětí je dáno vztahem [6]:

$$U_0 = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{V}; \text{VK}^{-1}, \text{K}) \quad (2.1)$$

kde  $\alpha$  je Seebeckův termoelektrický součinitel. Jeho velikost závisí na druhu použitých materiálů a na rozsahu teplot.[6]

#### Peltierovo teplo

Základem je Peltierův jev. Tento jev spočívá v tom, že prochází-li proud spojem, který je vytvořený dvěma různými vodiči různých vlastností, dochází v tomto spoji k vyvíjení nebo pohlcování tepla. Vyvíjení nebo pohlcování je v závislosti na směru proudu. Takovému teplu, které se vyvine nebo pohltí za jednotku času, říkáme Peltierovo teplo. Toto Peltierovo teplo je dáno vztahem [6]

$$q_p = \frac{dQ_p}{dt} = \pi_s \cdot I \quad (\text{W}; \text{V}, \text{A}) \quad (2.2)$$

kde  $\pi_s$  je Peltierův koeficient spoje. Tento koeficient závisí na druhu spojovaných materiálů.

$I$  je procházející proud.

Mezi Peltierovým a Seebeckovým součinitelem platí vztah:  $\pi_s = \alpha \cdot T$

### Thompsonův jev

Uvažujme homogenní vodič, který je protékán proudem a který je zároveň nerovnoměrně zahříván. Vytváří se na něm teplotní gradient, vzniká tzv. Thompsonovo teplo. Toto teplo je přídavným teplem k Jouleovu teplu, jež je úměrné činnému odporu vodiče. Podle směru protékajícího proudu se v takovém vodiči Jouleovo teplo uvolňuje nebo pohlcuje úměrně proudu a rozdílu teplot podle vztahu [6]

$$q_t = \frac{dQ_t}{dt} = \tau \cdot (T_2 - T_1) \cdot I \quad (\text{W}; \text{VK}^{-1}, \text{K}, \text{A}) \quad (2.3)$$

kde  $\tau$  je Thompsonův materiálový součinitel. Velikost tohoto součinitele závisí na teplotě a druhu materiálu.

Podobně jako elektrická vodivost a tepelná vodivost, tak i termoelektrické jevy Seebeckovy, Peltierovy a Thompsonovy souvisí s atomovou strukturou daných materiálů.[6]

### 2.2.2 Termoelektrické materiály

Jakost termoelektrického materiálu se určuje komplexním parametrem, který zavedl fyzik Joffe. Tento komplexní parametr se nazývá činitel jakosti  $Z$ .

Termoelektrická přeměna je založena na úkazu, že v uzavřeném obvodu složeném ze dvou různých vodičů, jejichž spoje jsou udržovány na různých teplotách prochází elektrický proud. Tento článek je nejjednodušší zařízení k přeměně tepla na elektrickou energii.[3]

Účinnost termoelektrické přeměny závisí na třech parametrech, které jsou:

- Seebeckův činitel  $\alpha$
- Měrná tepelná vodivost  $\lambda$
- Měrná elektrická vodivost  $\gamma$  obou materiálů.

Účinnost se vyjadřuje kombinací všech tří parametrů a to se nazývá činitel jakosti  $Z$ .

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \gamma}{\lambda} \quad (\text{K}^{-1}; \text{V} \cdot \text{K}^{-1}, \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2.4)$$

kde  $\alpha$  je Seebeckův činitel  
 $\gamma$  je měrná elektrická vodivost  
 $\lambda$  je měrná tepelná vodivost

Podle tohoto činitele jakosti se určuje správná vhodnost materialu. Čím má určitý materiál větší činitel  $Z$ , tím je vhodnější k použití pro termoelektrické generátory. Pro termoelektrické články jsou tedy vhodné takové materiály, které mají velký Seebeckův činitel, velkou měrnou elektrickou vodivost a malou měrnou teplotu vodivosti. Polovodiče mají právě vhodné vlastnosti. S teplotou vzrůstá koncentrace nosičů náboje a jejich energie, na teplém konci polovodiče je proto tlak elektronového plynu větší než na konci studeném. Dochází k rychlé difúzi elektronů ze zahřívajícího spoje směrem k chladnějšímu spoji. Tím vznikají prostorové náboje, to je vlastní příčina vzniku napětí.

V kovech je tento jev velmi nevýrazný, proto kovy nejsou vhodným materiálem pro termoelektrickou přeměnu energie. Vhodný materiál musí vyhovovat dvěma protichůdným požadavkům, má být dobrým elektrickým vodičem a špatným tepelným vodičem. Tyto požadavky jsou nejlépe splněny ve smíšených krystalech s vysokou čistotou.

Soustava spojených termoelektrických článků, umístěných mezi zdrojem tepla a chladičem, se nazývá termoelektrický generátor. Praxe zatím ukázala, že ekonomicky výhodné jsou termoelektrické generátory s malým výkonem do několika set wattů. Cena za jednotku energie z takového generátoru je mnohonásobně menší, než je jednotka energie z baterií nebo z mobilních generátorů s výbušným motorem.[3]

### 2.2.3 Princip a základní vlastnosti termoelektrického měniče

Stýkají-li se dva různé materiály A a B, které nemají navzájem stejný potenciál, mohou elektrony z části s menším výstupním potenciálem přecházet do protější části snadněji, než naopak. Tím vznikne mezi oběma částmi potenciální rozdíl, který se zvětšuje tak dlouho, až se vytvořeným elektrickým polem další přechod elektronů zastaví.

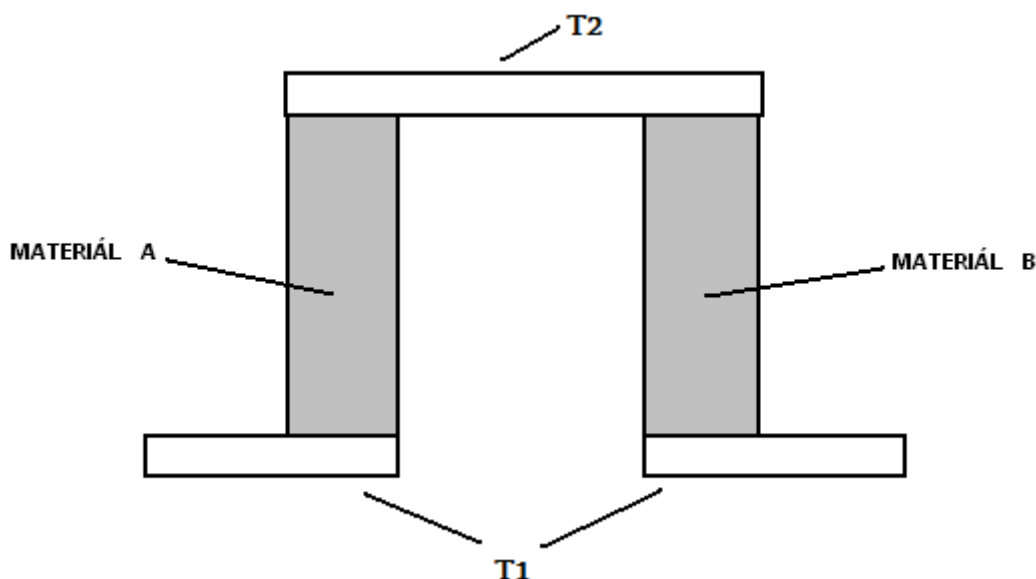
Tento potenciální rozdíl při daných materiálech závisí na teplotě spoje, takže spojí-li se obě části na protější konci, který má jinou teplotu, např. přes voltmetr, působí v tomto obvodu výsledné, tzv. termoelektrické napětí velikosti:

$$U_T = \alpha \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1)^2 \quad (2.5)$$

kde  $T_2$  a  $T_1$  jsou teploty teplejšího a chladnějšího spoje  
 $\alpha$  a  $\beta$  jsou činitele příslušející dané dvojici materiálů A, B.

Okolnost, že chladné konce jsou spojeny dalším materiálem, např. měděným vodičem Cu, nemění termoelektrické napětí (oba vzniklé spoje A – Cu a Cu – B působí proti sobě, takže jejich

napětí se navzájem ruší). Proto také při obvyklém uspořádání termoelektrických článků mohou být oba sloupky A i B propojeny spojkami bez vlivu na výsledné termoelektrické napětí.[3]



Obr. 2-4 Provedení termoelektrického článku

Jelikož nejsou teplotní rozdíly příliš velké, lze tedy v rovnici (2.5) zanedbat kvadratický člen. Podle tohoto předpokladu bude mít rovnice následující zjednodušený tvar:

$$U_T = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.6)$$

V této rovnici (2.6) se vyskytuje jen jeden, tzv. Seebeckův činitel  $\alpha$ . Tento činitel lze považovat za rozdíl individuálních činitelů obou spojovaných materiálů. Tyto materiály se zpravidla volí tak, aby jeden materiál měl činitel  $\alpha$  kladný a druhý materiál záporný, tak aby výsledný Seebeckův činitel byl co největší.

Tento princip má větší použití, protože tento jev je vratný. Protéká-li uzavřeným obvodem elektrický proud  $I$ , který vznikne působením termoelektrického napětí  $U_T$  nebo připojením vnějšího napětí, lze odnímat horkému spoji tepelný výkon.[3]

$$P_{2od} = \alpha \cdot T_2 \cdot I \quad (\Omega; U, I) \quad (2.7)$$

A na studeném konci se přivádí:

$$P_1 = \alpha \cdot T_1 \cdot I \quad (2.8)$$

To je tzv. Peltierův jev, jehož se v poslední době využívá ke chlazení.

Termoelektrického jevu se už dlouho dobu využívá k měření teplot kovovými termoelektrickými články. Při tomto použití nezáleží na velikosti vnitřního odporu článku ani na vynaloženém tepelném příkonu a stačí, je-li článek dostatečně citlivý a stálý a má-li nejlépe lineární závislost mezi teplotou a termoelektrickým napětím.

Má-li však termoelektrický článek pracovat jako energetický zdroj, je nutno uvažovat o účinnosti přeměny tepla v elektřinu. Při odběru proudu se vlivem Peltierova jevu odvádí z horkého spoje tepelný výkon  $P_2$  podle rovnice (2.7), takže k udržení nezměněné teploty je nutno stejný tepelný výkon přivádět. Mimoto je nutno přivádět další tepelný výkon, který neúčinně přechází k chladnému spoji vlivem tepelné vodivosti obou sloupků. Proto má být tato vodivost co nejmenší a sloupky A, B by měly tedy mít malý průřez s velkou délkou. Ze získaného elektrického výkonu se část neúčinně ztrácí ve vnitřním odporu článku  $R_i$ , proto by tento odpor měl být malý a tedy sloupky A, B krátké a velkého průřezu. Protože oba uvedené požadavky jsou protichůdné, je zřejmé, že je nelze splnit volbou rozměrů článků, ale jen volbou vhodných materiálů, které při dostatečném Seebeckově činiteli  $\alpha$  mají co nejmenší měrnou tepelnou vodivost  $\lambda$  a co nejmenší měrný elektrický odpor  $\rho$ . [3]

Přítom zatěžovací odpor potřebný k dosažení největší účinnosti termoelektrického článku má mít velikost podle vztahu:

$$R_z = R_i \sqrt{1 + Z \cdot T_s} \quad (2.9)$$

kde  $R_i$  je vnitřní odpor

$T_s$  je střední teplota termoelektrického článku

Střední teplota termoelektrického článku je dána vztahem:

$$T_s = \frac{T_2 - T_1}{2} \quad (\Omega; U, I) \quad (2.10)$$

Za těchto podmínek by účinnost přeměny byla v ideálním případě, kdyby nebylo dalších ztrát, jako vyzařování tepla do okolí, elektrických ztrát v přechodových odporech apod., mohlo dosáhnout hodnoty:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT_s} - 1}{\sqrt{1 + ZT_s} + \frac{T_1}{T_2}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Jak je zřejmé z rovnice (2.11), nemají na účinnost vliv rozměry článku, ale jen teploty spojů a materiálová konstanta  $Z$ . Prvním činitelem v rovnici (2.11) je známá termodynamická účinnost Carnotova cyklu, kterou žádný termodynamický měnič, pracující mezi teplotami  $T_2$  a  $T_1$  nemůže překročit. Druhý činitel závisí na konstantě  $Z$  a je vždy menší než jedna.

Seebeckův činitel  $\alpha$ , měrná tepelná vodivost  $\lambda$  a měrný elektrický odpor  $\rho$  nejsou veličiny navzájem nezávislé, ale všechny souvisí s koncentrací volných elektronů  $n_e$  v daném materiálu.

U kovů je Seebeckův činitel poměrně malý, nejvýše několik desítek mikrovoltů na stupeň a tepelná vodivost poměrně značná, což je oboje pro velikost činitele jakosti nevýhodné. Zato elektrický odpor je malý. U izolantů je Seebeckův činitel mnohem větší, až desítky milivoltů na stupeň, také tepelná vodivost je malá, avšak přesto nejsou použitelné pro velký elektrický odpor. Vhodný kompromis lze nalézt u polovodičů, které mají Seebeckův činitel řádu set až tisíc mikrovoltů na stupeň a zároveň mohou mít poměrně malou tepelnou vodivost i měrný elektrický odpor.

O vhodnosti materiálu na termoelektrický článek rozhoduje však ještě řada dalších vlastností, především teplota, kterou materiál vydrží bez porušení, dále způsoblost ke sváření nebo spájení, opracovatelnost a samozřejmě i dostupnost a cena.[3]

### 3 URČENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ TERMOELEKTRICKÝCH MĚNIČŮ NEDESTRUCTIVNÍ METODOU

Znalost materiálových vlastností materiálu, ze kterého je vyroben termoelektrický prvek je velmi důležité pro další návrhy aplikací pro přímou přeměnu tepelné energie na energii elektrickou.[1]

Zjišťování materiálových vlastností materiálu se provádí na základě matematicko-fyzikálního popisu rozložení tepelných toků a teplotních gradientů podél obvodu tvořeného ze dvou termoelektrických článků. Parametry, které jsou potřebné pro určení materiálových vlastností termoelektrického článku jsou:

- Seebeckova konstanta  $\alpha$
- Měrný elektrický odpor  $\rho$
- Měrná tepelná vodivost  $\lambda$

Měřicí obvod je složen ze dvou stejných termoelektrických článků. První článek je napájen z vnějšího elektrického zdroje, tudíž pracuje jako Peltierův článek a generuje do obvodu tepelný tok. Tento tepelný tok prochází druhým článkem, který je zapojen jako termoelektrický generátor.

K dostatečně přesnému určení materiálových konstant termoelektrických článků se vychází z matematického popisu zákona zachování energie v experimentálním obvodu a pomocí naměřených integrálních hodnot.[1]

Mezi tyto integrální hodnoty patří:

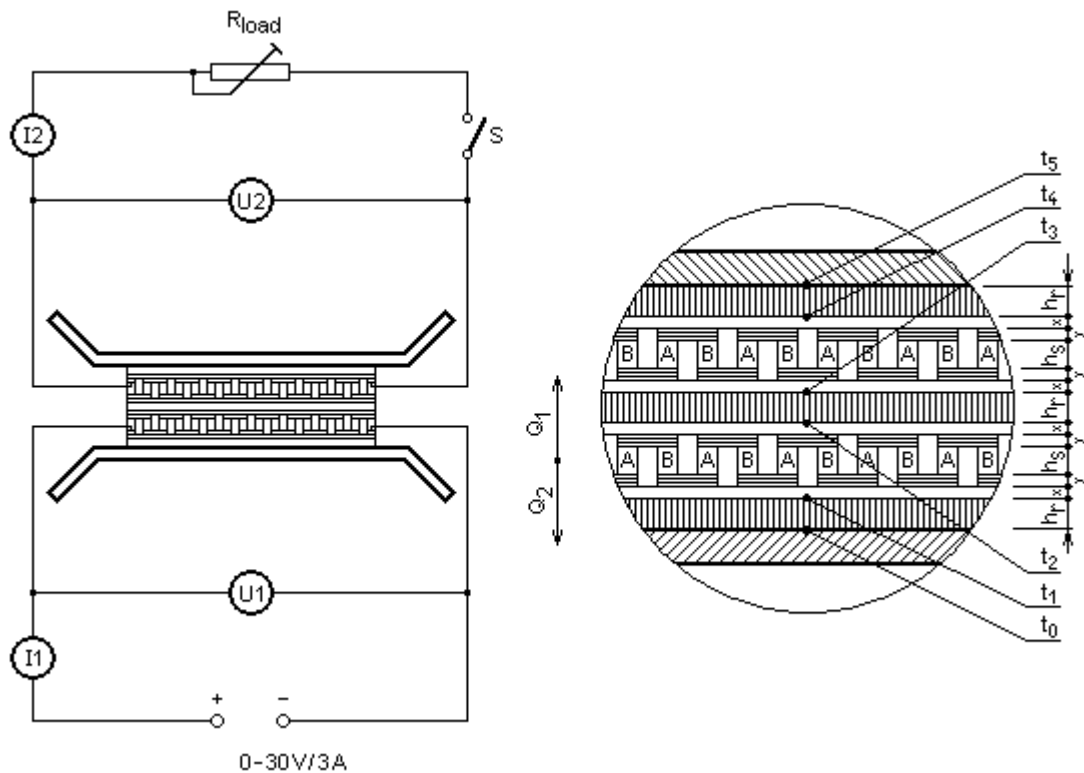
- příkon Peltiéroveho článku
- chod naprázdno
- napětí při zatížení termoelektrického generátoru
- proud při zatížení termoelektrického generátoru
- rozložení teplot podél experimentálního obvodu



### 3.1 Popis a konstrukce měřícího zařízení

Měřící zařízení je složeno ze dvou termoelektrických měničů. Jeden tento měnič pracuje jako Peltierův článek a generuje do obvodu tepelný tok, jehož jedna část prochází druhým termoelektrickým článkem, který pracuje jako termoelektrický generátor. Pro výkonové bilance v obvodu je nutno zjistit hodnoty tepelných toků. Tyto veličiny určíme na základě tepelných odporů, které představují vložky z ploché silikonové pryže.

Konstrukce takového poměrně jednoduchého experimentálního obvodu ukazuje následující obrázek 3-1. Kde  $t_1-t_5$  jsou teploty snímané termočlánkem, který je mezi vrstvami umístěn. Přitom teplota  $t_5$ , která je naznačena na obrázku 3-1 slouží ke kontrole oprávněnosti jednorozměrného zjednodušení, a proto není ani uvedena v matematickém popisu. Hodnota  $h_r$  je tloušťka pryžové podložky a hodnota  $h_s$  je výška sloupku.[1]



Obr. 3-1 Uspořádání a zapojení experimentálního měřícího obvodu[1]

### 3.2 Matematicko-fyzikální popis experimentálního obvodu

Jak již bylo zmíněno, tak experimentální měřicí zařízení je složeno ze dvou termoelektrických měničů. Spodní termoelektrický měnič je napájen z regulovaného zdroje se stabilizací nastaveného proudu. Tento spodní termoelektrický měnič generuje do obvodu tepelné toky  $Q_1$  a  $Q_2$ , které směřují z tohoto měniče na obě strany.

Jakmile se teploty podél obvodu měřené termočlánky Cu-Ko již nemění, tj. příkon měniče se rovná součtu obou tepelných toků (žádná další energie se již neakumuluje v tepelných kapacitách prvků obvodu), potom platí vztah (3.1). Tento popsáný děj se nazývá ustálený stav.[1]

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = Q_1 + Q_2 \quad (3.1)$$

Pro další matematický popis obvodu zanedbáme ztráty energie v horizontálním směru. Tímto zanedbáním se úloha stane jednorozměrnou ve svislém směru. To znamená, že náš předpoklad je takový, že tepelné toky  $Q_1$  a  $Q_2$  se nemění a přecházejí v plné hodnotě, až do hliníkových chladičů odkud jsou odvedeny do okolí pomocí přirozené konvekce a radiace.

Ofukování chladičů při měření nebylo použito, aby se umělou konvekcí neodváděl výkon v horizontálním směru a uvedené zjednodušení bylo korektní. Za tohoto předpokladu lze vyjádřit tepelné toky prostřednictvím měřeného teplotního rozdílu na pryžových vložkách, které jsou dány vztahy:

$$Q_1 = \frac{\lambda_r}{h_r} \cdot S_r \cdot (t_1 - t_0) \quad (3.2)$$

$$Q_2 = \frac{\lambda_r}{h_r} \cdot S_r \cdot (t_2 - t_3) \quad (3.3)$$

- kde:
- $\lambda_r$  je měrná tepelná vodivost pryžové vložky
  - $h_r$  je výška (tloušťka) pryžové vložky
  - $S_r$  je plocha pryžové vložky, kterou prochází příslušný tepelný tok  $Q_i$
  - $t_i$  jsou teploty měřené v místech vyznačených v detailním řezu *obrázku 3-1*

Dosazením vztahů (3.2) a (3.3) do bilanční rovnice (3.1) lze vyjádřit explicitně reálnou hodnotu měrné tepelné vodivosti pryžové podložky:

$$\lambda_r = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot h_r}{S_r \cdot (t_1 - t_0 + t_2 - t_3)} \quad (3.4)$$

Dosažením této hodnoty do rovnice (3.3) můžeme pak určit velikost obou toků  $Q_1$  a  $Q_2$ . Tepelný tok  $Q_2$  rovněž prochází horním termoelektrickým měničem, na kterém vytvoří měřený teplotní rozdíl mezi teplotami  $t_3$  a  $t_4$  a lze jej vyjádřit adekvátním vztahem:

$$Q_2 = \frac{\lambda_s}{h_s} \cdot S_{sl} \cdot (t_3 - t_4) \quad (3.5)$$

kde:

- $\lambda_s$  je měrná tepelná vodivost aktivního polovodičového materiálu TE měniče
- $h_s$  je výška sloupku A či B aktivního materiálu (viz. *Obrázek 3-1*)
- $S_{sl}$  je součet průřezů všech sloupků A i B u TE měniče kterým prochází  $Q_2$

Dále je důležité, že tepelný odpor měděných spojek propojujících jednotlivé termoelektrické dvojice sloupků A a B elektricky do série (na *obrázku 3-1* značeno jako  $y$ ) stejně jako horní a dolní krycí desky termoelektrického měniče z tepelně vodivé keramiky (na *obrázku 3-1* značeno jako  $x$ ) vzhledem k očekávané řádově nižší měrné tepelné vodivosti polovodičového materiálu zanedbáváme. Ze vztahu (3.5) lze potom explicitně vyjádřit:

$$\lambda_s = \frac{Q_2 \cdot h_s}{S_{sl} \cdot (t_3 - t_4)} \quad (3.6)$$

Z napětí naprázdno  $U_{20}$  (rozepneme spínač S na *obrázku 3-1*) horního termoelektrického měniče určíme snadno Seebeckův činitel  $\alpha$  jako:

$$\alpha_s = \frac{2 \cdot U_{20}}{N_s \cdot (t_3 - t_4)} \quad (3.7)$$

kde  $N_s$  je počet všech aktivních sloupků A i B (výraz  $N_s/2$  představuje počet termoelektrických párů – dvojic A+B).

Sepnutím spínače S se termoelektrický generátor zatíží, svorkové napětí klesne na hodnotu  $U_2$  o úbytek na vnitřním odporu vyvolaném zatěžovacím proudem  $I_2$ . Vnitřní odpor lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$R_i = \frac{U_{20} - U_2}{I_2} = \rho_s \cdot \frac{l_s}{S_s} \quad (3.8)$$

kde

- $\rho_s$  je měrný odpor aktivního polovodičového materiálu TE měniče
- $l_s$  je celková délka všech sloupků A i B zapojených v sérii protékána proudem  $I_2$
- $S'_s$  je průřez sloupku A resp. B (za předpokladu, že tyto sloupky jsou stejné)

Celková délka všech sloupků se vypočítá podle vztahu:

$$l_s = N_s \cdot h_s \quad (3.9)$$

Dále lze ze vztahu (3.8) explicitně vyjádřit:

$$\rho_s = \frac{S'_s \cdot (U_{20} - U_2)}{l_s \cdot I_2} \quad (3.10)$$

Pomocí naznačeného matematicko-fyzikálního modelu energetické bilance experimentálního obvodu tak lze nedestruktivním způsobem určit s dostatečnou přesností průměrné hodnoty  $\alpha$ ,  $\rho$  a  $\lambda$  aktivních materiálů A i B termoelektrického měniče, konstruovaného ze sloupků lišících se vodivostí typu N a P odvozených obvykle ze stejného základního polovodičového materiálu.[1]

Potom hodnoty i ostatní fyzikální vlastnosti (tepelná roztažnost, tepelná odolnost, atd.) i technologické (obrobitelnost, hájitelnost, atd.) jsou u obou typů sloupků velmi blízké, ne-li shodné. Pro vyhodnocení vhodnosti původních Peltierových článků pro inverzní funkci jako termoelektrických generátorů slouží porovnávací veličina označená jako tzv. materiálová konstanta, nazývaná též jako termoelektrická efektivita, které je dána vztahem:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda} \quad (3.11)$$

## 4 MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ DOSTUPNÝCH TERMOELEKTRICKÝCH ELEMENTŮ

### 4.1 Úvod do měření materiálových vlastností TE elementů

V poslední době velmi pokročil vývoj termoelektrických měničů. V souvislosti se stále se zlepšující technologií výroby a novými a vhodnějšími materiály se zvýšily (zlepšily) parametry termoelektrických měničů. Pro srovnatelné výkony jsou nepoměrně levnější než zatím více používané fotovoltaické články. Z těchto hledisek se nabízí možnost využití termoelektrické přeměny k přímé přeměně slunečního záření současně na teplo i elektřinu.

Úkolem tohoto měření je stanovení materiálových vlastností dostupných termoelektrických elementů. Na základě tohoto měření materiálových vlastností se vybere vhodný typ pro návrh a konstrukci solárního termoelektrického měniče.

Za účelem výběru vhodného typu termoelektrického elementu ke konstrukci malého termoelektrického generátoru bude prošetřována řada běžně dostupných termoelektrických měničů, které jsme měli k dispozici. Tyto jednotlivé měniče budou proměřeny a naměřené hodnoty budou vyhodnoceny a uvedou se v tabulkách, kde budou přehledně uvedeny veškeré hodnoty potřebné k vyhodnocení včetně samotných výsledků.

Na základě vyhodnocení těchto naměřených hodnot a určení materiálových konstant u všech dostupných typů termoelektrických elementů, bude vybrán jeden prvek, který bude mít nejlepší vlastnosti a předpoklady pro konstrukci solárního termoelektrického generátoru na přímou přeměnu sluneční energie. Pro tento prvek bude navrženo konstrukční řešení a uspořádání celkového termoelektrického generátoru na přímou přeměnu sluneční energie. K dispozici máme různé typy termoelektrických elementů o různých rozměrech a vlastnostech, které budou mít vliv na celkovou velikost termoelektrického generátoru při návrhu.

### 4.2 Rozbor měření materiálových vlastností TE elementů

Pro proměření a následné vyhodnocení byly vybrány tři typy termoelektrických elementů, které budou porovnány a bude z nich vybrán ten prvek, který bude mít nejlepší vlastnosti pro sestavení termoelektrického generátoru. Jedná se o běžně dostupné typy prvků a jejichž rozměry jsou:

- Prvek TEC1 07108 s rozměry 30 x 30 x 3,3 mm
- Prvek TEC1 07103 s rozměry 30 x 30 x 4,7 mm
- Prvek TEC1 12710 225°C s rozměry 40 x 40 x 3,3 mm

Katalogové údaje pro dostupné termoelektrické články nám ukazuje následující tabulka:

Tab. 4-1 Katalogové údaje pro vybrané prvky určené k měření

k a t a l o g o v é    ú d a j e						
TYP	A x B x H [mm]	$U_{\max}$ [V]	$I_{\max}$ [A]	$Q_{\text{tep,max,o}}$ [W]	Počet TE párů	Cena [Kč/ks]
<b>TEC1-07103</b>	30x30x4,7	8,1	3,3	16,4	71	110
<b>TEC1-07108</b>	30x30x3,3	8,6	8,5	38,5	71	129
<b>TEC1-12710 225°C</b>	40x40x3,3	15,8	10	89	127	195

Po důkladném výběru termoelektrického článku je také důležitá věc, jaké konstrukční uspořádání se zvolí. Toto uspořádání musí být nejvíce vhodné pro dané účely a musí být také nenáročné z ekonomického hlediska.

Pro zvýšení intenzity dopadajícího slunečního záření (energie) na termoelektrický měnič je nutné opatřit takovou sestavu termoelektrických článků soustavou zrcadel, která bude usměřňovat sluneční záření na vhodný absorbér, kterým bude získaný tepelný tok převeden přímo k termoelektrickému článku.

Při návrhu termoelektrického měniče se musí také brát velký zřetel na vhodný typ a výběr chladiče, který bude chladit stranu termoelektrického článku, na kterou se přivádí tepelný tok získaný ze slunečního záření. Nejúčinnějším řešením je chlazení měděným nebo hliníkovým blokem, kterým protéká kapalné chladicí medium. Pro tyto účely chlazení je vhodným chladicím medium voda. S takovým uspořádáním lze dosáhnout nejmenšího tepelného odporu chladiče. Nevýhodou tohoto řešení jsou vyšší pořizovací náklady a složitější instalace chladicího systému.

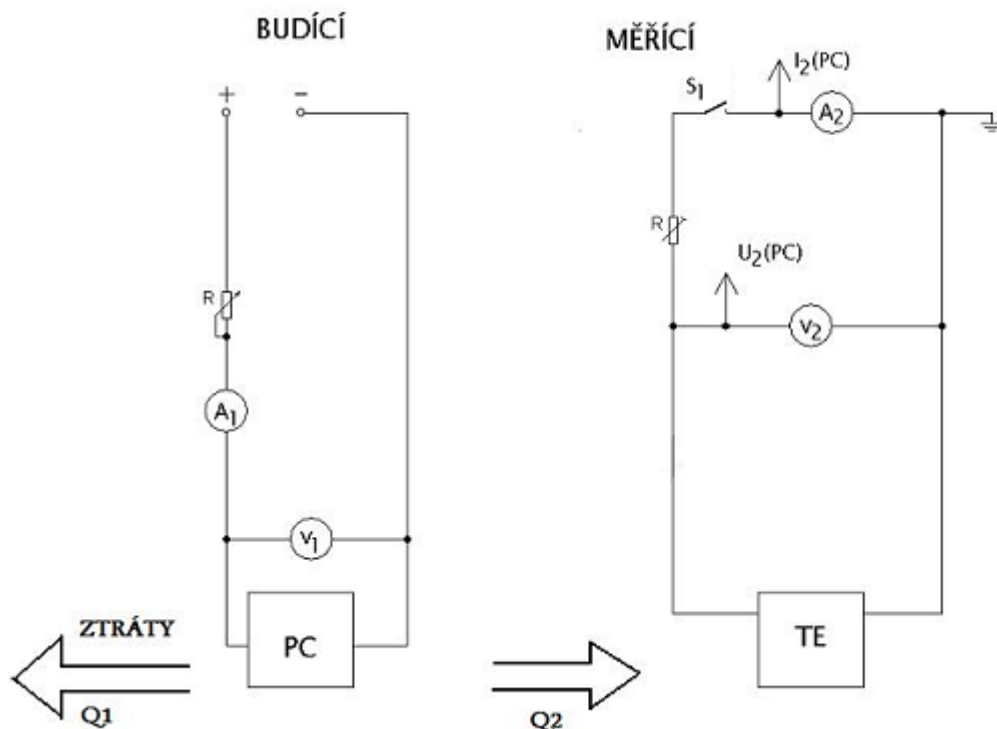
Pro chlazení vzduchem by bylo nutné opatřit chlazenou stranu žebrovaným chladicím blokem, který by byl ofukován vzduchem. Nevýhodou tohoto řešení je to, že chladicí blok by musel být dostatečně veliký, aby dokázal tak velké snížení teploty. Proto je toto řešení nevýhodné a i po stránce konstrukční by se značně zvětšily rozměry celého termoelektrického generátoru, díky tomuto chladicímu bloku. Nevýhodou je také to, že odváděné teplo, které přejímá chladicí blok, je bez využití odváděno do okolí.

Pro chlazení vodou by nemusela být chlazená strana opatřena tak velkým chladicím blokem. Stačil by menší, kterým by protékala voda, která by odváděla teplo. Výhodou tohoto chladicího systému je, že voda přijme nízkopotencionální teplo, které lze dále využít například u přípravku TUV, tepelného čerpadla, nebo přímo do podlahového topení aj. Nevýhodou je, že konstrukční řešení je složitější a musí být opatřeno několika součástmi pro správný oběh a cirkulaci vody.

### 4.3 Postup měření materiálových vlastností TE elementů

Do měřícího přípravku vložíme dva stejné typy termoelektrických elementů, u kterých budeme zjišťovat jejich materiálové vlastnosti. Uspořádání elementů v přípravku je znázorněno na *obrázku 3-1* v pravé zvětšené části.

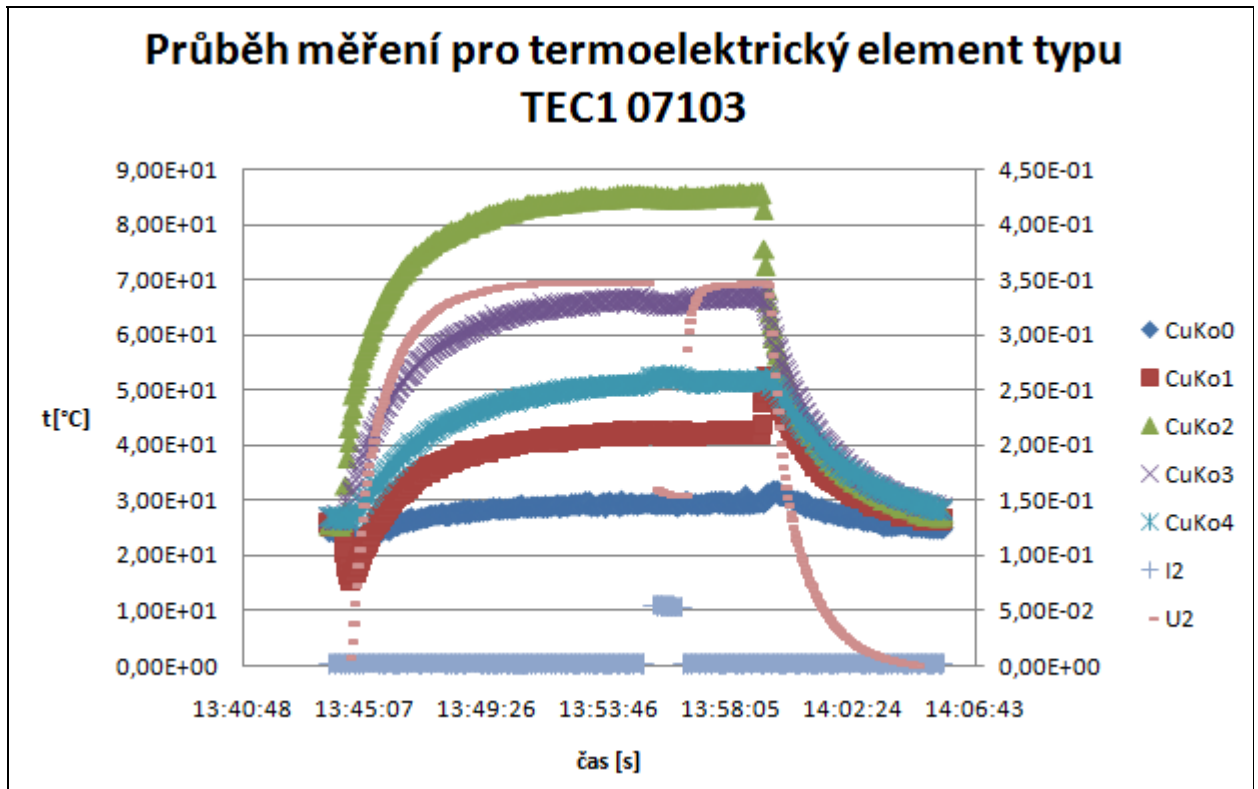
Schéma zapojení celého měření je znázorněno na *obrázku 4-2*.



Obr. 4-1 Schéma zapojení měřící úlohy

Rovnice pro výpočet materiálové konstanty platí pro ustálený stav. Měření probíhá tak, že se zapne napájení Peltierova článku a čeká se, až se teplotní křivky (náběhy teplot) ustálí, respektive až se dosáhne ustálení  $U_{20}$ . V tomto okamžiku se zapne zatěžování. Celé měření je automatizované a průběhy jednotlivých termočlánků lze sledovat na monitoru počítače a měřené hodnoty se exportují do textového souboru, ze kterého se zpracovává vyhodnocení.

Z těchto vyexportovaných hodnot se sestavuje grafická závislost, která dokumentuje celý průběh měření. *Obrázek 4-3* nám ukazuje záznam průběhu měření pro termoelektrický element TEC1 07103.



Obr. 4-2 Průběh měření pro termoelektrický element TEC1 07103

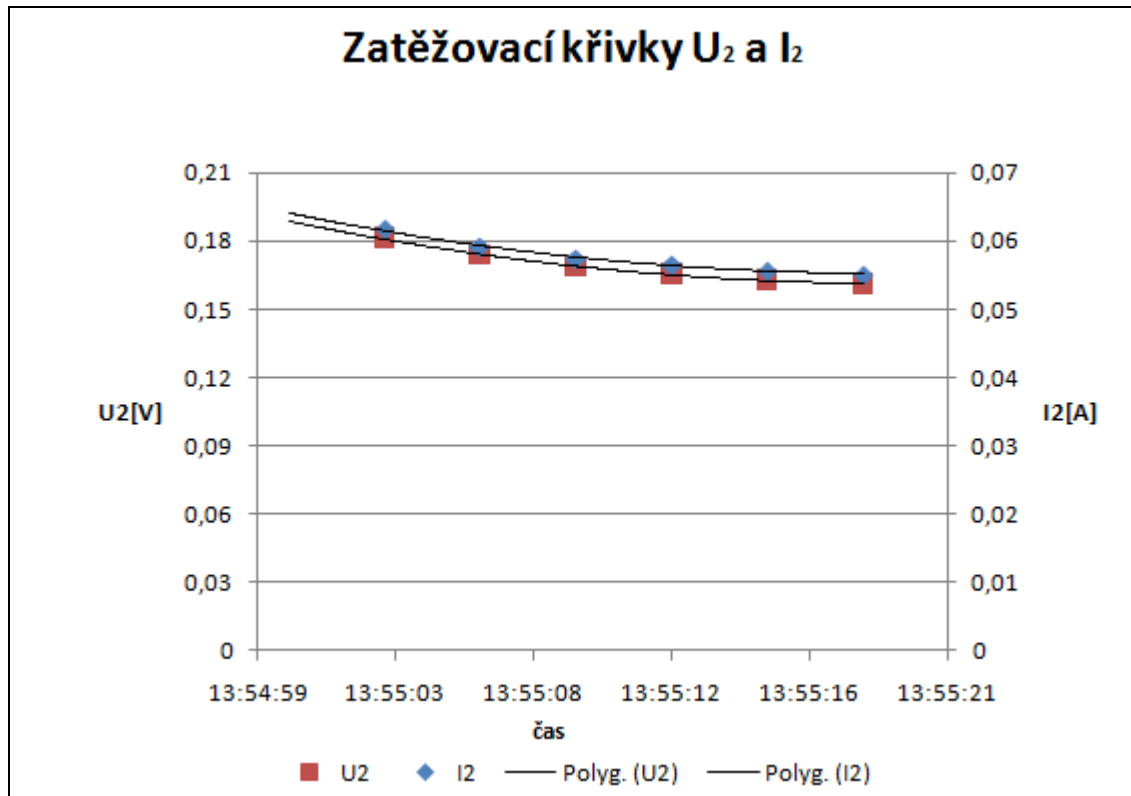
Obrázek 4-3 nám ukazuje grafický průběh měření teplot na jednotlivých termočláncích. V okamžiku zapnutí měření nastává fáze nahřívání, jak je patrné z grafu. Tato fáze trvá tak dlouho, než se teploty a napětí ustálí a nemění se jejich hodnoty. Po ustálení hodnot se provede zatížení. Toto zatížení se provedlo v čase 13:55:00, jak je patrné z průběhu napětí znázorněného na obrázku 4-3.

Zatěžování patří k nejdůležitějším částem celého měření a vyhodnocování jednotlivých prvků. Hlavně zde patří chod naprázdno těsně před zatěžováním a chod po zatížení. Z této části se získávají hodnoty pro vyhodnocování.

Měřící kroky jsou prováděny po třech sekundách. Pro naše vyhodnocení je důležitý bod těsně před zatěžováním a prvním měřeným bodem hned po zatížení. Časová vzdálenost těchto dvou bodů jsou tři sekundy, proto je nutné extrapolovat hodnoty zatížení těsně na tento bod. Tato extrapolace se uskutečňuje proložením a prodloužením zatěžovacích křivek proudu a napětí do času, kdy bylo měření ještě naprázdno. Námi provedená extrapolace byla udělána pro šest hodnot pro oba zatěžovací průběhy těsně před zatížením. Tuto extrapolaci nám ukazuje následující obrázek, kde je naznačeno prodloužení zatěžovacích křivek, pomocí kterých odečteme hodnoty napětí  $U_2$  a hodnotu proudu  $I_2$ , které jsou nezbytné pro následné vyhodnocení celého měření.

Naznačení extrapolace a odečtení hodnoty napětí  $U_2$  a hodnoty proudu  $I_2$  je pro termoelektrický element TEC1 07103.





Obr. 4-3 Zatěžovací křivky pro napětí  $U_2$  a proud  $I_2$  pro TE element TEC1 07103

Z grafu odečteme hodnotu napětí  $U_2$  a hodnotu proudu  $I_2$  pro stav těsně před zatížením. Odečtené hodnoty jsou:

- $U_2 = 0,19 \text{ V}$
- $I_2 = 0,065 \text{ A}$

Po získání těchto odečtených hodnot lze přistoupit k vyhodnocování měření a počítání materiálové konstanty pro jednotlivé typy článků, které máme k dispozici. Toto odečtení bylo naznačeno pouze pro první typ termoelektrického elementu TEC1 07103. Pro zbývající dva termoelektrické elementy je postup měření i vyhodnocování totožný.

## 4.4 Vyhodnocení měření materiálových vlastností TE elementů

### 4.4.1 Vyhodnocení naměřených a vypočtených hodnot pro typ TEC1 07103

Tab. 4-2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro termočlánek TEC1 07103

MĚŘENÁ VELIČINA	HODNOTA	JEDNOTKA
$I_1$	1,68E+00	A
$U_1$	3,32E+00	V
$U_{20}$	3,47E-01	V
$I_2$	6,50E-02	A
$U_2$	1,90E-01	V
$h_r$	1,00E-03	m
$S_r$	9,00E-04	m <sup>2</sup>
$h_s$	2,40E-03	m
$S_{sl}$	1,8225E-06	m <sup>2</sup>
$n_p$	7,10E+01	-
$t_0$	2,93E+01	°C
$t_1$	4,18E+01	°C
$t_2$	8,51E+01	°C
$t_3$	6,62E+01	°C
$t_4$	5,09E+01	°C
$P_1$	<b>5,58E+00</b>	<b>W</b>
$\lambda_r$	<b>1,98E-01</b>	<b>W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup></b>
$Q_2$	<b>3,36E+00</b>	<b>W</b>
$R_i$	<b>2,41E+00</b>	<b>Ω</b>
$\lambda_s$	<b>2,03E+00</b>	<b>W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup></b>
$\alpha_s$	<b>3,18E-04</b>	<b>V.K<sup>-1</sup></b>
$\rho_s$	<b>1,29E-05</b>	<b>Ω.m</b>
$Z$	<b>3,87E-03</b>	<b>K<sup>-1</sup></b>

## 4.4.2 Vyhodnocení naměřených a vypočtených hodnot pro typ TEC1 07108

Tab. 4-3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro termočlánek TEC1 07108

MĚŘENÁ VELIČINA	HODNOTA	JEDNOTKA
$I_1$	1,71E+00	A
$U_1$	3,35E+00	V
$U_{20}$	1,90E-01	V
$I_2$	6,00E-02	A
$U_2$	1,07E-01	V
$h_r$	1,00E-03	m
$S_r$	9,00E-04	m <sup>2</sup>
$h_s$	1,30E-03	m
$S_{sl}$	1,8225E-06	m <sup>2</sup>
$n_p$	7,10E+01	-
$t_0$	2,68E+01	°C
$t_1$	3,81E+01	°C
$t_2$	8,11E+01	°C
$t_3$	6,13E+01	°C
$t_4$	5,15E+01	°C
$P_1$	5,73E+00	W
$\lambda_r$	2,05E-01	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$Q_2$	3,66E+00	W
$R_i$	1,38E+00	Ω
$\lambda_s$	1,87E+00	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\alpha_s$	2,72E-04	V.K <sup>-1</sup>
$\rho_s$	1,36E-05	Ω.m
$Z$	2,90E-03	K <sup>-1</sup>

### 4.4.3 Vyhodnocení naměřených a vypočtených hodnot pro typ TEC1 12710 225°C

Tab. 4-4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro termočlánek TEC1 12710 225°C

MĚŘENÁ VELIČINA	HODNOTA	JEDNOTKA
$I_1$	1,66E+00	A
$U_1$	4,89E+00	V
$U_{20}$	2,44E-01	V
$I_2$	6,80E-02	A
$U_2$	1,16E-01	V
$h_r$	1,00E-03	m
$S_r$	1,60E-03	m <sup>2</sup>
$h_s$	2,10E-03	m
$S_{sl}$	1,8225E-06	m <sup>2</sup>
$n_p$	1,27E+02	-
$t_0$	3,75E+01	°C
$t_1$	4,68E+01	°C
$t_2$	8,64E+01	°C
$t_3$	6,70E+01	°C
$t_4$	5,81E+01	°C
$P_1$	<b>8,12E+00</b>	<b>W</b>
$\lambda_r$	<b>1,76E-01</b>	<b>W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup></b>
$Q_2$	<b>5,48E+00</b>	<b>W</b>
$R_i$	<b>1,88E+00</b>	<b>Ω</b>
$\lambda_s$	<b>2,80E+00</b>	<b>W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup></b>
$\alpha_s$	<b>2,16E-04</b>	<b>V.K<sup>-1</sup></b>
$\rho_s$	<b>6,41E-06</b>	<b>Ω.m</b>
$Z$	<b>2,60E-03</b>	<b>K<sup>-1</sup></b>

#### 4.4.4 Ukázka výpočtu materiálové konstanty pro termočlánek TEC1 07103

V následující části bude naznačeno, jaký je postup výpočtu materiálové konstanty pro termoelektrický element typu TEC1 07103. Jedná se o ukázkový výpočet, kdy podle stejného postupu jsou určovány i ostatní materiálové konstanty pro zbývající dva termoelektrické elementy.

První hodnotou, která je potřeba vypočítat je výkon  $P_1$ . Tento výkon se spočítá z naměřených hodnot napětí  $U_1$  a proudu  $I_1$ :

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 1,68 \cdot 3,32 = 5,58W$$

Dále určíme hodnotu měrné tepelné vodivosti pryžových vložek:

$$\lambda_r = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot h_r}{S_r \cdot (t_1 - t_0 + t_2 - t_3)} = \frac{1,68 \cdot 3,32 \cdot 0,001}{9 \cdot 10^{-4} \cdot (41,8 - 29,3 + 85,1 - 66,2)} = 0,198W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Pomocí této tepelné vodivosti pryžových vložek můžeme určit velikost tepelného toku  $Q_2$ , který prochází také horním termoelektrickým měničem, na kterém vytvoří teplotní rozdíl a lze jej spočítat následovně:

$$Q_2 = \frac{\lambda_r}{h_r} \cdot S_r \cdot (t_2 - t_3) = \frac{0,198}{0,001} \cdot 9 \cdot 10^{-4} \cdot (85,1 - 66,2) = 3,36W$$

Měrná tepelná vodivost aktivního polovodičového materiálu termoelektrického měniče se určí:

$$\lambda_s = \frac{Q_2 \cdot h_s}{[S_{sl} \cdot n_p \cdot 2 \cdot (t_3 - t_4)]} = \frac{3,36 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3}}{[1,822 \cdot 10^{-6} \cdot 71 \cdot 2 \cdot (66,2 - 50,9)]} = 2,03W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Dále určíme Seebeckův čísel  $\alpha$ . Určíme jej z napětí naprázdno  $U_{20}$  horního termoelektrického měniče:

$$\alpha_s = \frac{U_{20}}{N_p \cdot (t_3 - t_4)} = \frac{0,347}{71 \cdot (66,2 - 50,9)} = 3,18 \cdot 10^{-4} V \cdot K^{-1}$$

Měrný odpor aktivního polovodičového materiálu termoelektrického měniče má následující hodnotu:

$$\rho_s = \frac{S_{sl} \cdot (U_{20} - U_2)}{(h_s \cdot n_p \cdot 2) \cdot I_2} = \frac{1,8225 \cdot 10^{-6} \cdot (0,347 - 0,190)}{(2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 71 \cdot 2) \cdot 0,065} = 1,29 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$$

Vnitřní odpor vznikne při sepnutí spínače S, kdy se termoelektrický generátor zatíží, svorkové napětí klesne na hodnotu  $U_2$  o úbytek na vnitřním odporu vyvolaném zatěžovacím proudem  $I_2$ . Tento vnitřní odpor má velikost:

$$R_i = \frac{U_{20} - U_2}{I_2} = \rho_s \cdot \frac{l_s}{S_s} = 1,29 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 71 \cdot 2}{1,8225 \cdot 10^{-6}} = 2,41 \Omega$$

Na základě matematicko-fyzikálního modelu energetické bilance jsme určili nedestruktivním způsobem a s dostatečnou přesností průměrné hodnoty  $\alpha$ ,  $\rho$  a  $\lambda$  pro aktivní materiál A i B termoelektrického měniče. Nyní můžeme vypočítat materiálovou konstantu, která je důležitá pro celkové vyhodnocení měření:

$$Z = \frac{\alpha_s^2}{\rho_s \cdot \lambda_s} = \frac{(3,18 \cdot 10^{-4})^2}{1,29 \cdot 10^{-5} \cdot 2,03} = 3,87 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

Takto naznačený postup výpočtu byl proveden pro všechny dostupné typy termoelektrických elementů a všechny dosažené výsledky výpočtu jsou uvedeny v příslušných tabulkách pro jednotlivé termoelektrické elementy. Dalším krokem bude vyhodnocení vypočtených hodnot a návrh samotné konstrukce solárního termoelektrického generátoru s vybraným termoelektrickým elementem.

#### 4.4.5 Výběr vhodného termoelektrického elementu pro návrh konstrukce

V tabulce 4-5 je uveden přehled vyhodnocení pro jednotlivé typy termoelektrických elementů. Na základě toho přehledu bude vybrán prvek, nebo prvky pro návrh typů konstrukce solárního termoelektrického generátoru.

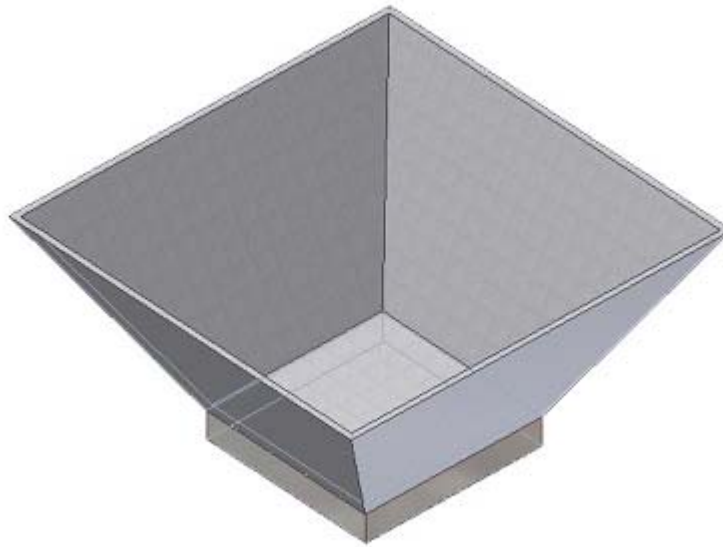
Tab. 4-5 Tabulka vyhodnocených parametrů pro vybrané termoelektrické elementy

TYP	Porovnání			Parametry získané vyhodnocením měření			
	Cena [Kč/ks]	$\eta$ [%]	$Q_2$ [W]	$Z$ [K <sup>-1</sup> ]	$\alpha$ [VK <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [Ωm]	$\lambda$ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
TEC1-07103	110	1,93	17,5	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	2,03
TEC1-07108	129	1,45	29,8	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	1,87
TEC1-12710 225°C	195	2,92	111	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-4}$	$6,41 \cdot 10^{-6}$	2,80

Pro vysokoteplotní termoelektrický element TEC1 12710 225°C je vhodné zvolit typ pyramidového koncentrátoru. Tento typ termoelektrického elementu umožňuje daleko vyšší účinnosti termoelektrického generátoru, protože snáší větší rozdíl teplot.

Ukázka takového základního pyramidového koncentrátoru je znázorněna na obrázku 4-1. Kde vnitřní stěny pyramidového koncentrátoru jsou vyrobené ze zrcadlového materiálu, aby co nejlépe odrážely sluneční záření na absorpční plochu. Dalším velice důležitým faktorem, jak lze dosáhnout co nejlepší absorpce, je selektivní povrch absorberu na který dopadá přímé sluneční záření i záření ze zrcadel umístěných po stranách.

Z měření a vyhodnocení vyplynulo, že z dvojice termoelektrických elementů TEC1 07103 a TEC1 07108 o rozměrech 30 x 30 mm je vhodnější použít termoelektrický element TEC1 07103. Tento termoelektrický element je vyšší a má menší požadavky na tepelný příkon pro dosažení dostatečně vysokého napětí.



Obr. 4-4 Koncentrátor pyramidového typu

## 5 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ SOLÁRNÍHO TERMOELEKTRICKÉHO GENERÁTORU

### 5.1 Princip konstrukce solárního termoelektrického zařízení

Základem návrhu termoelektrického solárního generátoru je, aby se dosáhlo potřebného tepelného toku, který musí projít naším vybraným termoelektrickým elementem, aby se dosáhlo příslušného plotního rozdílu. Z tohoto teplotního rozdílu se dále odvíjejí výstupní parametry (proud a napětí).

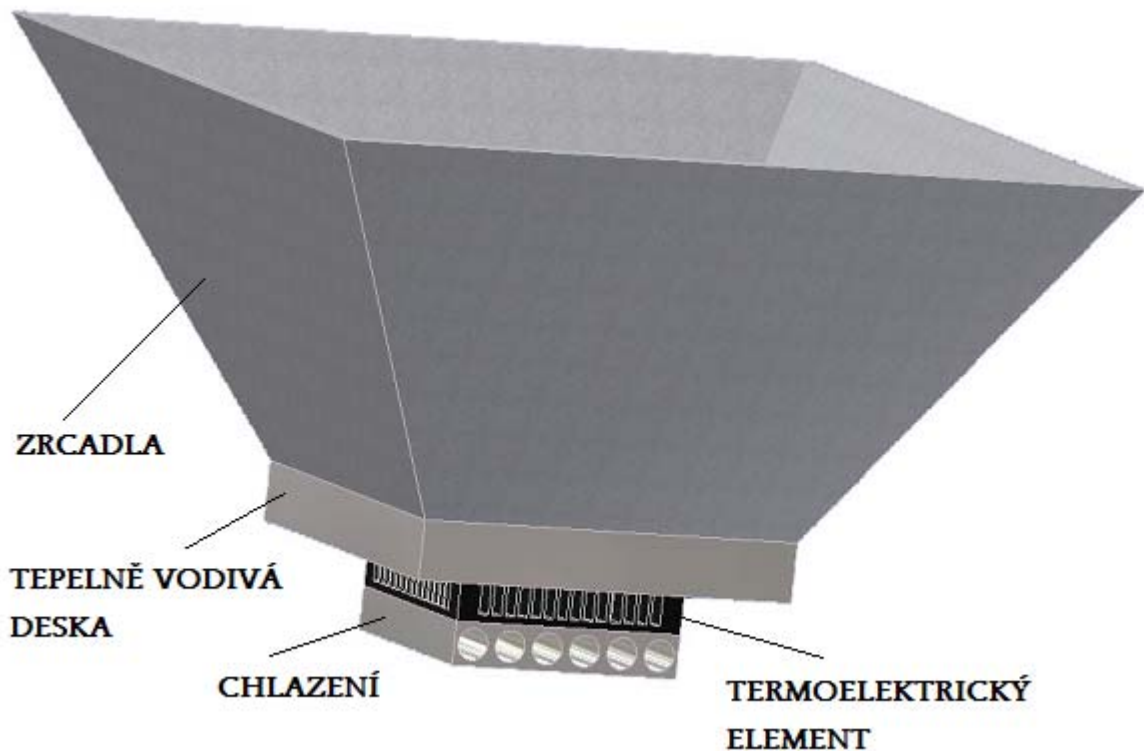
Vzhledem k hustotě slunečního záření  $G=1000 \text{ W/m}^2$ , kterou při konstrukci uvažujeme, nemůže rozměr termoelektrického elementu stačit. Z tohoto důvodu se musí přidat koncentrátor. Jelikož termoelektrický element nelze sám o sobě považovat za bodový, není možné proto použít koncentrátory typu kulového zrcadla nebo parabolického zrcadla.

Použije se tedy ten nejvhodnější koncentrátor, který je opatřen rovinnými zrcadly, z nichž nejvyšší stupeň dosahuje pyramidový koncentrátor (ukázkové znázornění viz. obrázek 4-1), který zesiluje světelný tok přibližně na trojnásobek. Jedna třetina záření dopadá přímo na plochu termoelektrického elementu. Každá dvojice zrcadel přidá 100% zesílení záření, tudíž celkové využití záření má trojnásobnou velikost.



Z vypočtených potřebných přijímaných tepelných toků označených  $Q_2$  vychází, jaká musí být absorpční plocha koncentrátoru (vnější plocha). Protože rozměry vnitřní plochy koncentrátoru a rozměru zrcadel (vnějšího rozměru pyramidy) je 1:2. To je dáno úhly  $60^\circ$ , které jsou optimální z hlediska stínění záření (difuzního). Opět nepůjde záření stáhnout na tak malý čtvereček, bude mezi to vložena nějaká dobře tepelně vodivá deska, která bude na povrchu začerněná. Tato dobře tepelně vodivá deska přijme záření z absorberu a pak ho vedením tepla svede ke chlazenému termoelektrickému elementu, který bude zezadu opatřen kapalinovým chlazením.

Konstrukční uspořádání solárního termoelektrického generátoru s pyramidovým koncentrátorem je znázorněn na *obrázku 4-5*. Rozměry toho solárního termoelektrického generátoru jsou dány vlastnostmi vybraného termoelektrického elementu, který použijeme.



*Obr. 5-1* Popis konstrukčního uspořádání pyramidového koncentrátoru s TE elementem

## 5.2 Návrh rozměrů koncentrátoru pro vysokoteplotní článek TEC1 12710 225°C

Maximální provozní teplota tohoto termoelektrického elementu udávaná výrobcem je 225°C.

Tab. 5-1 Tabulka vypočtených hodnot pro TE element TEC1 12710 225°C

$t_3[^\circ\text{C}]$	$t_4[^\circ\text{C}]$	$U_{20}[\text{V}]$	$U_2[\text{V}]$	$I_2[\text{A}]$	$P_2[\text{W}]$	$Q_2[\text{W}]$	$\eta[\%]$
60	40	0,549	0,274	0,146	0,04	12,4	0,325
80	40	1,10	0,549	0,292	0,161	24,7	0,65
100	40	1,65	0,823	0,439	0,361	37,1	0,974
120	40	2,20	1,10	0,585	0,642	49,4	1,30
140	40	2,74	1,37	0,731	1,00	61,8	1,62
160	40	3,29	1,65	0,877	1,45	74,2	1,95
180	40	3,84	1,92	1,02	1,97	86,5	2,27
200	40	4,39	2,20	1,17	2,57	98,9	2,60
220	40	4,94	2,47	1,32	3,25	111	2,92

Rozměry pyramidového koncentrátoru navržené pro hustotu slunečního záření s hodnotou  $G=1000 \text{ W/m}^2$

Tab. 5-2 Rozměry pyramidového koncentrátoru pro článek TEC1 12710 225°C

$S_c[\text{m}^2]$	$L_c[\text{m}]$	$L_a[\text{m}]$
1,11E-01	3,34E-01	1,67E-01

### 5.2.1 Ukázka výpočtu pro návrh termoelektrického generátoru a rozměrů pyramidového koncentrátoru

Výpočet bude naznačen pro poslední řádek tabulky, kde teplota  $t_3 = 220^\circ\text{C}$  a teplota  $t_4 = 40^\circ\text{C}$ .

$$U_{20} = \alpha_p \cdot n_p \cdot (t_3 - t_4) = 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot 127 \cdot (220 - 40) = 4,94V$$

$$U_2 = \frac{U_{20}}{2} = \frac{4,94}{2} = 2,47V$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_i} = \frac{0,274}{1,88} = 0,146A$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 2,47 \cdot 0,146 = 0,36W$$

$$Q_2 = \frac{\lambda_p}{h_s} \cdot S_{sl} \cdot n_p \cdot 2 \cdot (t_3 - t_4) = \frac{2,8}{2,1 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,8225 \cdot 10^{-6} \cdot 127 \cdot 2 \cdot (220 - 40) = 111W$$

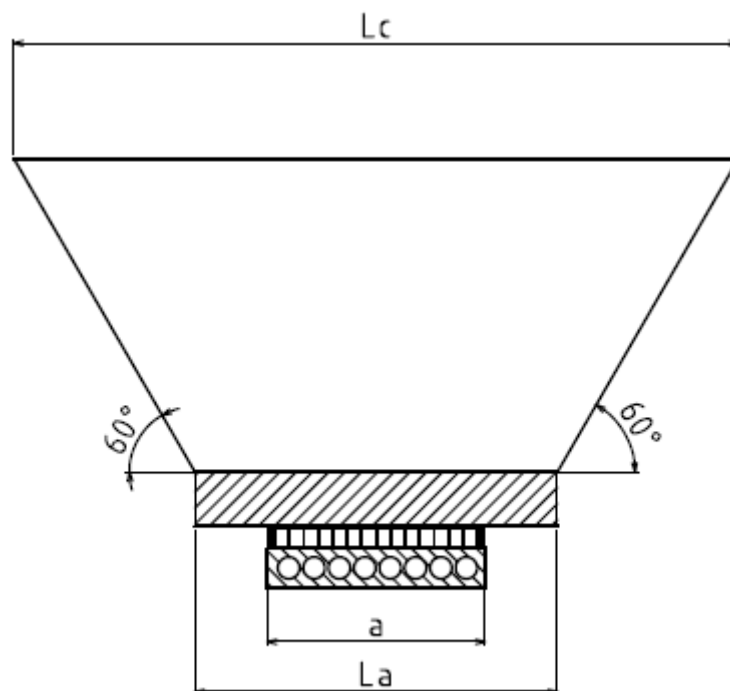
$$\eta = \frac{P_2}{Q_2} \cdot 100 = \frac{0,36}{111} \cdot 100 = 0,32\%$$

Rozměry koncentrátoru:

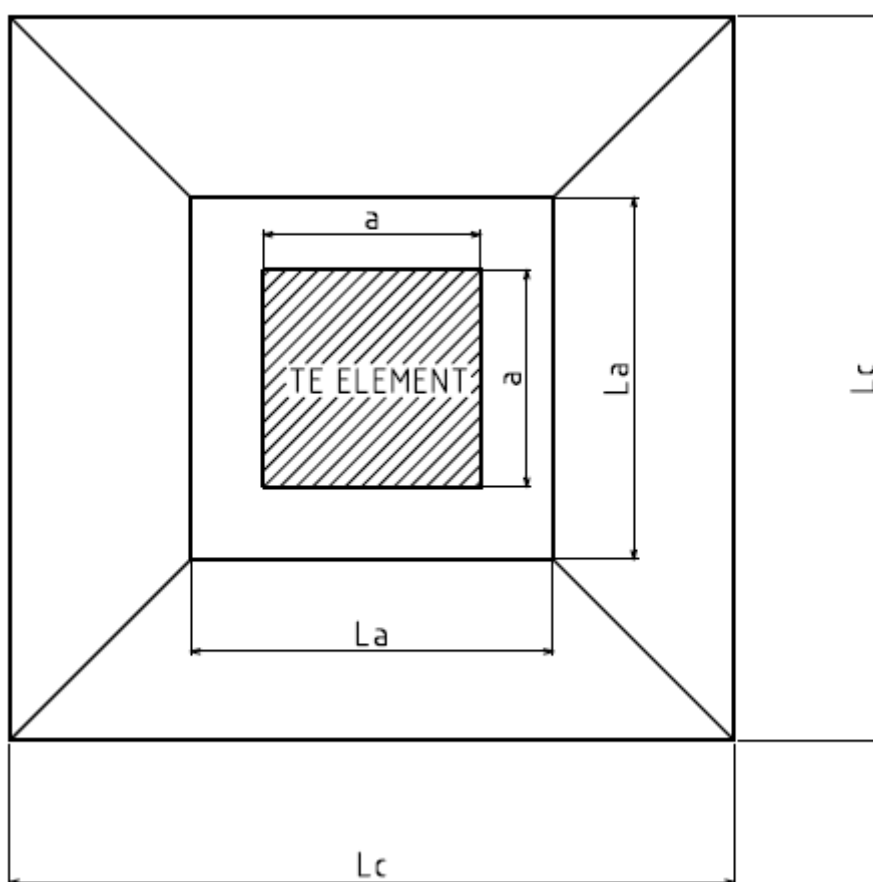
$$S_c = \frac{Q_2}{G} = \frac{111}{1000} = 0,111m^2$$

$$L_c = \sqrt{S_c} = \sqrt{0,111} = 0,334m$$

$$L_a = \frac{L_c}{2} = \frac{0,334}{2} = 0,167m$$



Obr. 5-2 Nákres bočního pohledu pyramidového koncentrátoru s TE elementem



Obr. 5-3 Nákres horního pohledu pyramidového koncentrátoru s TE elementem

### 5.3 Návrh rozměrů pyramidového koncentrátoru pro TE elementy TEC1 07103 a TEC1 07108

Maximální provozní teplota těchto termoelektrických elementů je 120°C. Rozměry pyramidového koncentrátoru navržené pro hustotu slunečního záření s hodnotou  $G=1000 \text{ W/m}^2$

Tab. 5-3 Tabulka vypočtených hodnot pro TE element TEC1 07103

$t_3[^\circ\text{C}]$	$t_4[^\circ\text{C}]$	$U_{20}[\text{V}]$	$U_2[\text{V}]$	$I_2[\text{A}]$	$P_2[\text{W}]$	$Q_2[\text{W}]$	$\eta[\%]$
60	40	0,452	0,226	0,0937	0,0212	4,38	0,483
80	40	0,903	0,452	0,187	0,0846	8,75	0,967
100	40	1,35	0,677	0,281	0,190	13,1	1,45
120	40	1,81	0,903	0,375	0,338	17,5	1,93

Tab. 5-4 Rozměry pyramidového koncentrátoru pro článek TEC1 07103

$S_c[\text{m}^2]$	$L_c[\text{m}]$	$L_a[\text{m}]$
1,75E-02	1,32E-01	6,61E-02

Tab. 5-5 Tabulka vypočtených hodnot pro TE element TEC1 07108

$t_3[^\circ\text{C}]$	$t_4[^\circ\text{C}]$	$U_{20}[\text{V}]$	$U_2[\text{V}]$	$I_2[\text{A}]$	$P_2[\text{W}]$	$Q_2[\text{W}]$	$\eta[\%]$
60	40	0,386	0,193	0,140	0,027	7,45	0,363
80	40	0,773	0,386	0,280	0,108	14,9	0,725
100	40	1,160	0,580	0,419	0,243	22,3	1,090
120	40	1,550	0,773	0,559	0,432	29,8	1,450

Tab. 5-6 Rozměry pyramidového koncentrátoru pro článek TEC1 07108

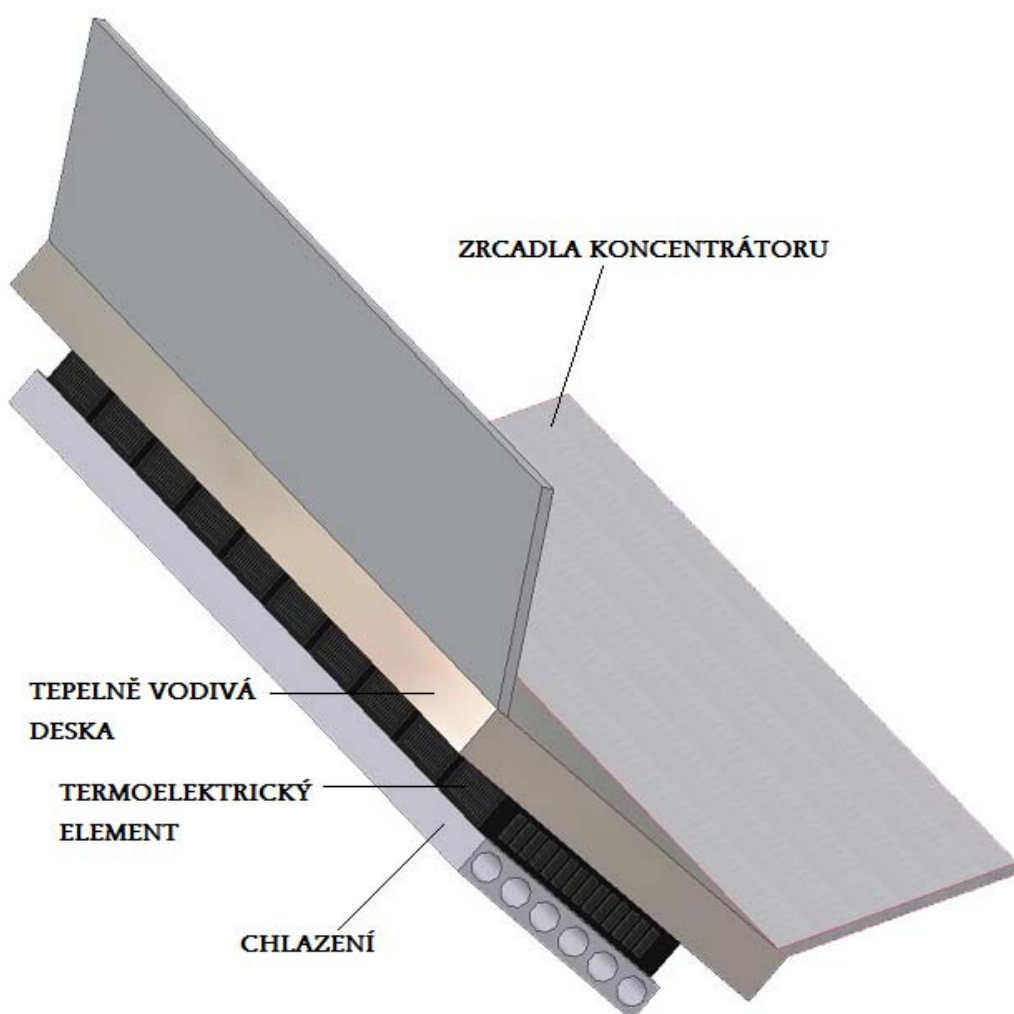
$S_c[\text{m}^2]$	$L_c[\text{m}]$	$L_a[\text{m}]$
2,98E-02	1,73E-01	8,63E-02

## 5.4 Návrh konstrukčního řešení pro TE elementy TEC1 071 03 a TEC1 07108

Z tabulek rozměrů pro termoelektrické elementy TEC1 07103 a TEC1 07108 (*tabulka 5-4 a tabulka 5-6*) je patrné, že velikost pyramidového koncentrátoru bude velmi malá.

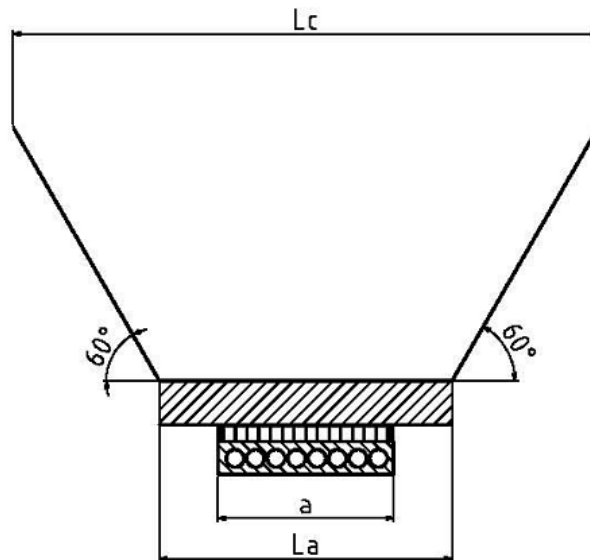
Z tohoto důvodu lze koncentrátor pyramidový nahradit koncentrátorem, který bude opatřen pouze dvěma zrcadly umístěných po stranách. Toto uspořádání zjednoduší konstrukci jednak zrcadlového systému a umožní také na jedno těleso umístit větší množství těchto menších článků do série, což je velmi výhodné. Zjednoduší se také konstrukce chladicího zařízení, které bude tvořeno blokem, kterým bude protékat voda a bude společné pro všechny termoelektrické elementy umístěné v tomto celku.

Další velkou výhodou tohoto řešení je možnost rozšíření celého zařízení na libovolný počet termoelektrických elementů umístěných v sérii. Uspořádání takového koncentrátoru je znázorněno na *obrázku 5-4*.

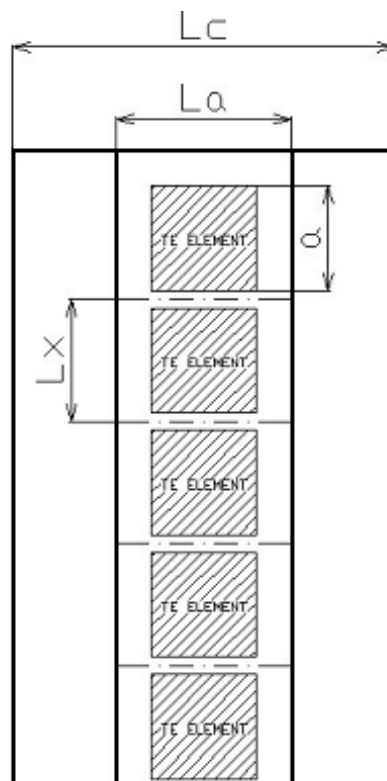


Obr. 5-4 Uspořádání koncentrátoru opatřeným dvěma bočními zrcadly

### 5.4.1 Návrh koncentrátoru s bočními zrcadly pro TE elementy TEC1 07103 a TEC1 07108



Obr. 5-5 Nákres bočního pohledu koncentrátoru se dvěma zrcadly



Obr. 5-6 Nákres horního pohledu koncentrátoru se dvěma zrcadly

### 5.4.2 Výpočet rozměrů koncentrátoru s bočními zrcadly pro TE elementy TEC1 07103 a TEC1 07108

Výpočet velikosti koncentrátoru pro termoelektrický element TEC1 07103 je naznačen v následujícím postupu výpočtu.

Pro výpočet potřebujeme hodnotu tepelného výkonu  $Q_2$  při největším teplotním rozdílu, kterou určíme z *tabulky 5-3* a vypočítáme celkovou plochu koncentrátoru pro jeden termoelektrický element pro hustotu slunečního záření  $G=1000 \text{ W/m}^2$ . Pro koncentrátor se dvěma rovinnými zrcadly po stranách, lze rozměr  $L_x$  volit. Pro náš návrh byl zvolen rozměr  $L_x=3,5 \text{ cm}$ , aby jednotlivé termoelektrické elementy nebyly v přímém kontaktu. Hodnota tepelného výkonu  $Q_2=17,5 \text{ W}$  a celková plocha koncentrátoru bude:

$$S_c = \frac{Q_2}{G} = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 175 \text{ cm}^2$$

Dále vypočítáme celkový rozměr  $L_c$ , který je naznačen na obrázku 5-5.

$$L_c = \frac{S_c}{L_x} = \frac{175}{3,5} = 50 \text{ cm}$$

Jakmile známe rozměr  $L_c$  určíme rozměr tepelně vodivé desky  $L_a$ :

$$L_a = \frac{L_c}{2} = \frac{50}{2} = 25 \text{ cm}$$

Postup návrhu velikosti koncentrátoru pro termoelektrický element TEC1 07108 bude mít stejný postup, jako předchozí termoelektrický element TEC1 07108:

Celková plocha koncentrátoru pro  $G=1000 \text{ W/m}^2$  a tepelný výkon  $Q_2=29,8 \text{ W}$  určený z *tabulky 5-5* je:

$$S_c = \frac{Q_2}{G} = \frac{29,8}{1000} = 29,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 298 \text{ cm}^2$$

Celkový rozměr koncentrátoru  $L_c$  bude:

$$L_c = \frac{S_c}{L_x} = \frac{298}{3,5} = 85,2 \text{ cm}$$



Rozměr tepelně vodivé desky  $L_a$  je:

$$L_a = \frac{L_c}{2} = \frac{85,2}{2} = 42,6 \text{ cm}$$

Přehled vypočítaných rozměrů pro termoelektrické elementy TEC1 07103 a TEC1 07108 ukazuje následující tabulka:

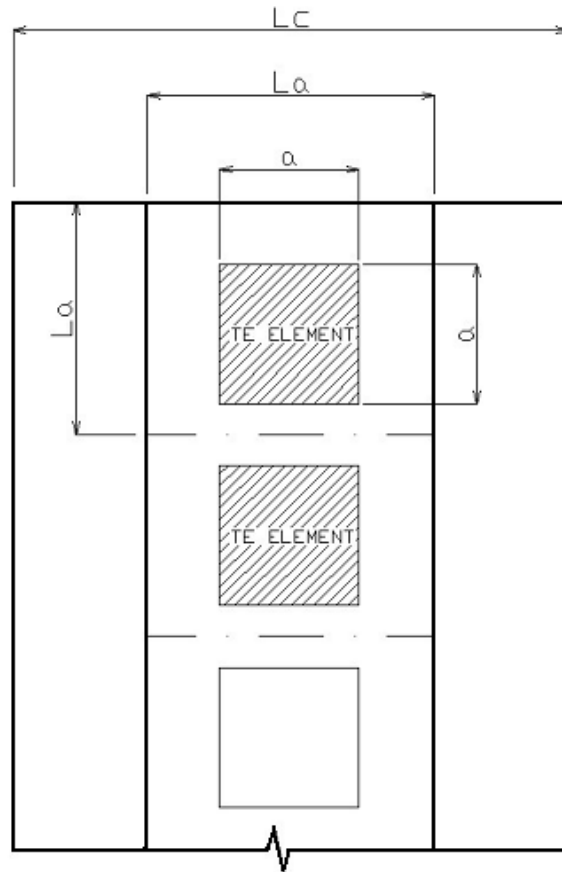
Tab. 5-7 Vypočtené hodnoty TE elementů TEC1 07103 a TEC1 07108 koncentrátoru s bočními zrcadly

TYP	Vypočítané údaje					
	A x B x H [mm]	$Q_2$ [W]	$L_x$ [cm]	$L_c$ [cm]	$L_a$ [cm]	Cena [Kč/ks]
TEC1-07103	30x30x4,7	17,5	3,5	50	25	110
TEC1-07108	30x30x3,3	29,8	3,5	85,2	42,6	129

Z tabulky 5-7 je patrné, že z dvojice termoelektrických elementů TEC1 07103 a TEC1 07108 je vhodnější použít prvek TEC1 07103, protože je vyšší a má menší požadavky na tepelný příkon pro dosažení dostatečně vysokého napětí a také rozměry nevyšly tak veliké oproti druhému elementu TEC1 07108.

Pokud se zvolí koncentrátor se dvěma rovinnými zrcadly umístěnými po stranách, lze rozměr  $L_x$  libovolně volit. Extrémní případ bude, kdy rozměr  $L_x$  zvolíme pouze o 5mm větší, než je samotný rozměr termoelektrického elementu. K tomuto případu vyjde pro vhodnější prvek velikost koncentrátoru  $L_c=50\text{cm}$ . Toto řešení je stále hůře realizovatelné. Optimální totiž je, aby byla co nejmenší plocha, ze které se z absorberu stahuje tepelný tok do vlastního generátoru. Toho lze docílit tak, že velikost  $L_x$  dáme rovnu velikosti  $L_a$ , čímž vznikne pro jeden termoelektrický element čtvercová plocha, ze které bude tepelný tok přijímán rovnoměrně. Celé toto zjednodušení je uvedeno na obrázku 5-7 a následující výpočet nám určí velikost čtvercové základny, ze které bude přijímán tepelný tok a rozměry koncentrátoru.

Zrcadla zesílí sluneční tok na dvojnásobek, tím se sníží plocha absorberu na poloviční hodnotu a získáme celkovou plochu, ze které bude přijímán tepelný tok na termoelektrický element. Po odmocnění této velikosti plochy získáme hodnotu velikosti  $L_a$ , jak nám ukazuje následující výpočet.



Obr. 5-7 Návrh druhého řešení koncentrátoru s bočními zrcadly

Vzhledem k tomu, že pyramidový koncentrátor zesiluje sluneční záření pouze třikrát, musíme určit jeho rozměry z rozměrů absorbérů, který přijímá přímo jenom jednu třetinu slunečního záření.

Velikost plochy absorbérů získáme podělením tepelného toku  $Q_2$  třemi a vztáhneme ho k hustotě slunečního záření  $G$ , jak ukazuje následující vztah:

Celková plocha absorbérů bude rovna:

$$S_c = \frac{Q_2}{3 \cdot G} = \frac{17,5}{3 \cdot 1000} = 5,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 58,3 \text{ cm}^2$$

Celková plocha koncentrátoru pro velikost absorbérů je:

$$S_c = 2 \cdot S_c = 2 \cdot 58,3 = 116 \text{ cm}^2$$

Velikost  $L_a$  se určí:

$$L_a = \sqrt{S_c} = \sqrt{58,3} = 7,64\text{cm}$$

Celková velikost koncentrátoru  $L_c$  se určí:

$$L_c = 2 \cdot L_a = 2 \cdot 7,64 = 15,28\text{cm}$$

Velikost tohoto koncentrátoru již není tak velká a z konstrukčního hlediska nebude tak náročná výroba a značně se sníží i spotřeba materiálu při výrobě.

## 6 ZÁVĚR

Podle katalogových údajů byly předem vybrány tři typy termoelektrických elementů, které se jevily vhodné pro konstrukci solárního termoelektrického generátoru. Jedná se o dva termoelektrické elementy o rozměrech 30 x 30 mm s označením TEC1 07103 a TEC1 07108, které mají maximální provozní teplotu do 120° C. Třetí termoelektrický element má rozměry 40 x 40 mm, označení TEC1 12710 225°C s maximální provozní teplotou až 225°C. Z měření a následného vyhodnocení vyplynulo, že z dvojice termoelektrických elementů o rozměrech 30 x 30 mm je z hlediska tepelného příkonu potřebného k dosažení maximálního přípustného rozdílu provozních teplot vhodnější typ TEC1 07103, který je rozměrově vyšší avšak má nižší energetickou účinnost než nižší typ TEC1 07108. Jako nejvhodnější se jeví vysokoteplotní termoelektrický element 40 x 40 mm TEC1 12710 225°C, který umožňuje nejen dosažení daleko vyšší účinnosti solárního termoelektrického generátoru díky většímu dosažitelnému rozdílu teplot, ale má i nejlepší ekonomické hodnocení vztahu ceny na jednotkový výkon (Kč/Wp).

Na základě tohoto zjištění byly navrženy dvě konstrukce koncentrátorů. První typ je koncentrátor s rovinnými zrcadly umístěnými po stranách pro termoelektrický element TEC1 07103 resp. TEC1 07108. Toto konstrukční uspořádání umožní umístění většího množství termoelektrických elementů do jednoho konstrukčního celku. Pro vysokoteplotní termoelektrický element TEC1 12710 225°C jsem navrhl pyramidový koncentrátor. Rozměry pyramidového koncentrátoru pro vysokoteplotní termoelektrický element TEC1 12719 225°C vychází i pro jediný prvek konstrukčně reálně. Oproti tomu návrh pyramidového koncentrátoru pro menší termoelektrické elementy TEC1 07103 a TEC1 07108 vyšel ve velmi malých rozměrech, což by bylo pro sestavení termoelektrického generátoru srovnatelného výkonu realizačně velmi náročné. Do ukončení diplomové práce se nepodařilo funkční modely navržených konstrukcí solárních termoelektrických generátorů zrealizovat, proto nebylo možné jejich proměření v reálných provozních podmínkách. Z teoretických vztahů a výpočtů však vyplývá jejich konkurenceschopnost v porovnání s fotovoltaickými měniči solární energie z hlediska pořizovacích nákladů, nevýhodou je však nutnost průběžné orientace koncentrátorů ke Slunci a přibližně kvadratická závislost výkonu na intenzitě slunečního záření.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BOREK, R., GREGOR, J., JAKUBOVÁ, I.: NON-DESTRUCTIVE DETERMINATION OF THE THERMOELECTRIC CONVERTER'S MATERIAL CONSTANT. CONFERENCE NTF, FEKT VUT, BRNO 2007
- [2] CIHELKA, J.: SOLÁRNÍ TEPELNÁ TECHNIKA. PRAHA, T. MALINA 1994, 201 s.
- [3] GREGOR J., MASTNÝ, P. LABORATORNÍ NÁVODY KE CVIČENÍ "NEKONVENČNÍ PŘEMĚNY ENERGIE", ÚEEN FEKT VUT BRNO
- [4] KLECZEK, J.: SLUNEČNÍ ENERGIE. ÚVOD DO HELIO ENERGETIKY. PRAHA, SNTL 1981, 192s.
- [5] KOČVÁREK, O.: KOMBINOVANÉ MĚNIČE SLUNEČNÍ ENERGIE. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. BRNO 2006, ÚEEN FEKT VUT BRNO
- [6] MATOUŠEK, A.: NEKONVENČNÍ PŘEMĚNY ENERGIE. SOUBOR PŘEDNÁŠEK NA FEKT VUT, BRNO 2008
- [7] [HTTP://WWW.SVETHARDWARE.CZ](http://www.svethardware.cz)
- [8] [HTTP://WWW.GME.CZ](http://www.gme.cz)

