

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMACHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR

BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB ŠTETINA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# TERMoeLEKTRICKÝ GENERÁTOR

THERMOELECTRIC GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAKUB ŠTETINA

VEDOUČÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

DOC. ING. RADEK VLACH, PH.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jakub Štetina

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

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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:

### **Termoelektrický generátor**

v anglickém jazyce:

### **Thermoelectric Generator**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zdroje elektrické energie jsou potřeba všude, kam se v dnešní době rozhlédneme. Pro mobilní aplikace a bezdrátovou diagnostiku se jeví jako vhodný zdroj energie gradient teplot, kdy se s využitím Seebeckova efektu z gradientu teplot dokážeme generovat elektrický potenciál.

Tento zdroj energie je vhodný využít v prostředí s velkými rozdílnými teplotami, jako jsou místa, kde vzniká tření, spalování paliv, zařízení se ochlazuje od okolí atd.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršní studie konstrukcí a materiálů TEG
2. Volba parametrů TEG pro zvolenou aplikaci
3. Studie možnosti zpracování a akumulace generované elektrické energie (power management)
4. Testování na zvoleném elementu a závěrečné zhodnocení této metody

Seznam odborné literatury:

[1] Goldsmid, H.J.: Introduction to thermoelectricity, Springer, 2010.

[2] BURKE, E.; BUIST, R.: Thermoelectric coolers as power generators. Marlow Industries, Inc, Dallas, Texas, 2002.

URL <<http://www.root.cz/clanky/strucny-uvod-do-typografie/>>

[3] GAOWEI, L.; JIEMIN, Z.; XUEZHANG, H.: Output Characteristics Analysis of Thermoelectric Generator Based on Accurate Numerical Model. Central South University ,School of Energy Science and Engineering, 2010.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá testováním termoelektrických článků a sestavením zařízení, které by na základě využití termoelektrických jevů sloužilo jako pohotovostní zdroj elektrické energie pro konkrétní účel. Jedná se o využití termoelektrických generátorů (TEG).

## **Abstract**

This thesis describes measuring of thermoelectric modules and building of the device, which would serve as an emergency electric energy source for specific purpose on the basis of thermoelectric effects. We use thermoelectric generators (TEG).

## **Klíčová slova**

Termoelektrický generátor, Zdroj elektrické energie, Získávání energie, Peltierův článek, Seebeckův jev, TEG, DC/DC měnič, SimMechanics

## **Keywords**

Thermoelectric generator, power source, energy harvesting, Peltier, Seebeck effect, TEG, DC/DC converter, SimMechanics

## **Bibliografická citace**

ŠTETINA, J. Termoelektrický generátor. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Termoelektrický generátor“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, 21. května 2012

.....  
Jakub Štetina

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracovávání a za vedení bakalářské práce; Ludřkovi Janákovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a Janovi Kozákovi, Bc. za poskytnutí měřicího přípravku z jeho bakalářské práce a další cenné rady.



# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Cíl práce</b> .....	<b>10</b>
<b>3. Termoelektrické jevy</b> .....	<b>11</b>
3.1. Seebeckův jev .....	11
3.2. Peltierův jev .....	13
3.3. Thomsonův jev .....	14
<b>4. Termoelektrické články</b> .....	<b>15</b>
4.1. Rozdělení .....	15
4.2. Konstrukce .....	16
4.3. Použití termoelektrických generátorů .....	18
<b>5. Návrh zařízení</b> .....	<b>20</b>
<b>6. Matematický model termoelektrického generátoru</b> .....	<b>24</b>
6.1. Rozbor zkoumané soustavy .....	24
6.2. Sestavení matematického modelu .....	28
6.3. Model v programu Matlab .....	30
6.4. Ověření modelu v programu Matlab.....	33
<b>7. DC/DC měniče</b> .....	<b>35</b>
7.1. Princip DC/DC měničů .....	35
7.2. Kategorie a topologie DC/DC měničů .....	35
<b>8. Měření a zpracování dat</b> .....	<b>38</b>
8.1. Matematický model měření .....	41
8.2. Měření naprázdno .....	42
8.3. Měření se zátěží .....	43
8.4. Zhodnocení měření .....	44
<b>9. Závěr</b> .....	<b>45</b>
<b>10. Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>46</b>
<b>11. Seznam seznam použitých zkratk a symbolů</b> ,.....	<b>48</b>
<b>12. Seznam příloh</b> .....	<b>50</b>

# 1. Úvod

Značný nárůst využívání fosilních paliv v posledních letech dává prostor ke zkoumání nových zdrojů energie. Od štěpení atomu uranu, přes štěpení tritia - těžké vody se v posledních letech začalo ve značné míře prozkoumávat a do praxe zapracovávat využití větrné nebo solární energie ke generování elektrické energie. Méně známými formami generování elektrické energie je využití např. z tepla, nebo vibrací.

Tyto typy získávání energie (v angličtině Energy Harvesting) nejsou tolik rozšířené a známé. Konkrétně u termoelektrických jevů se využívá objevů z první poloviny 19. století. Jejich praktické využití se začalo podrobněji zkoumat a zapracovávat do praxe až v posledních letech díky novým technologiím a možnostem výroby.

Zapracování do praxe ovšem není tolik rozšířené z důvodu náročné výroby a ne příliš vysoké účinnosti. Tyto zařízení pracují na základě rozdílu teplot, a tak se spíše zapracovávají pro využívání odpadového tepla.

V následujících kapitolách budou vysvětleny termoelektrické jevy, princip činnosti vyráběných článků, matematický rozbor činnosti a její simulace a v poslední řadě návrh zařízení využívající termoelektrický modul.

## 2. Cíl práce

Hlavním cílem této práce je praktické využití TEG článku pro napájení nízkonapětových zařízení s malým příkonem. Jednotlivé podoblasti, uvedené v zadání, na které je potřeba se zaměřit jsou:

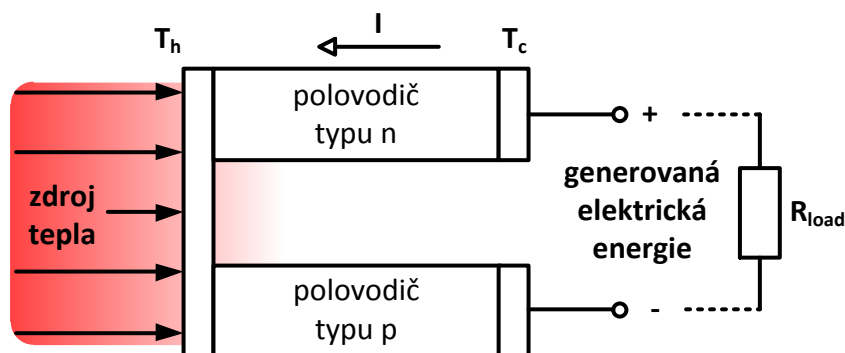
- Rešeršní studie konstrukcí a materiálů TEG
- Volba parametrů TEG pro zvolenou aplikaci
- Studie možnosti zpracování a akumulace generované elektrické energie (power management)
- Testování na zvoleném elementu a závěrečné zhodnocení této metody

## 3. Termoelektrické jevy

### 3.1. Seebeckův jev

Poprvé objevil termoelektrický jev v roce 1821 Thomas Johann Seebeck. Dokázal, že elektromotorické napětí může být vyprodukováno zahříváním spoje mezi dvěma různými elektrickými vodiči. Seebeckův jev může být demonstrován spojením dvou kabelů z různých kovů (např. měď a železo), zbylé konce se připojí ke galvanometru nebo velmi citlivému voltmetru. Jestli se spoj kabelů zahřeje, měřicí přístroj dokáže přítomnost malého napětí. Spojenou dvojici vodičů z různých materiálů pro využití Seebeckova jevu nazýváme termodvojicí. [1]

Seebeckův jev je vznik napětí, který nastává při teplotních rozdílech mezi dvěma rozdílnými kovy nebo polovodiči. To způsobuje nepřetržité proudění elektronů, pokud vodiče vytvoří uzavřený obvod. [2]



Obr. 1 – Seebeckův jev [3]

#### 3.1.1. Seebeckův koeficient

Seebeckův koeficient vyjadřuje poměr velikosti indukovaného termoelektrického napětí vůči teplotnímu rozdílu na termodvojici.

$$\alpha = \frac{U}{\Delta T} \quad (1)$$

$\alpha$	[V·K <sup>-1</sup> ]	Seebeckův (také termoelektrický) koeficient
$U$	[V]	napětí mezi konci vodiče
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot

Protože se jedná o spojení dvou kovů s různou hodnotou Seebeckova koeficientu, celkovou hodnotu termoelektrického koeficientu představuje jejich rozdíl ( $n$  – je z hlediska elektrotechniky materiál typu N,  $\alpha_n < 0$ ;  $p$  – je z hlediska elektrotechniky materiál typu P,  $\alpha_p > 0$ ):

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (2)$$

Tab. 1 – Seebeckovy koeficienty některých běžně používaných prvků [4]

materiál	$\alpha$	materiál	$\alpha$	materiál	$\alpha$
antimon	47	měď	6,5	sodík	-2,0
bismut	-72	nichrom	25	stříbro	6,5
draslík	-9,0	nikl	-15	tantal	4,5
germanium	300	olovo	4,0	telur	500,0
hliník	3,5	platina	0	uhlík	3,0
kadmium	7,5	rhodium	6,0	wolfram	7,5
konstantan	-35	rtuť	0,60	zlato	6,5
křemík	440	selen	900	železo	19

\*jednotka:  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ; všechny hodnoty jsou při teplotě  $0^\circ\text{C}$

### 3.1.2. Indukované napětí

Velikost napětí indukovaného pomocí Seebeckova efektu se určí následovně:

$$U_0 = \int_{T_c}^{T_h} (\alpha_n - \alpha_p) dT \quad (3)$$

$U_0$ [V]	elektromotorické napětí naprázdno
$\alpha_{n(p)}$ [ $\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	Seebeckův koeficient materiálu typu N (P)
$T_{h(c)}$ [K]	teplota teplé (studené) strany

Seebeckův koeficient je nelineárně závislý na teplotě vodiče, použitím materiálu a jeho molekulární struktury. Jestli je možno považovat Seebeckův koeficient v určitém teplotním rozsahu za konstantní, vztah (3) lze linearizovat následovně:

$$U_0 = (\alpha_n - \alpha_p) \cdot (T_h - T_c) = \alpha \cdot \Delta T \quad (4)$$

Tímto se zpětně dostáváme ke vztahu (1).

### 3.1.3. Termoelektrický merit

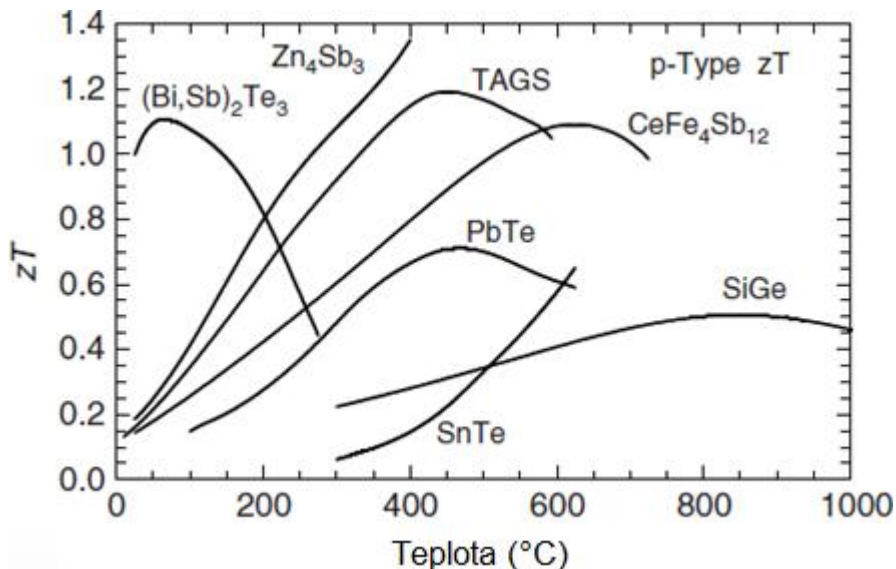
Kvalitativní hodnotou termoelektrických materiálů je výkonnost zařízení při přeměně tepelné energie na energii elektrickou, která se vyjadřuje veličinou zvanou merit. Často se tato veličina mylně popisuje jako účinnost, ovšem nejedná se o žádné procentuální vyjádření.

$$Z \cdot T = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} \cdot T = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\kappa} \cdot T \quad (5)$$

$Z \cdot T$ [1]	termoelektrický merit generátoru
$\rho$ [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	rezistivita (měrný elektrický odpor) vodiče
$\sigma$ [ $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	konduktivita (měrná elektrická vodivost) vodiče; $\sigma = \rho^{-1}$
$\kappa$ [ $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	tepelná vodivost
$T$ [K]	průměrná (střední) absolutní teplota na termočláncu

Dobré termoelektrické materiály by měli splňovat tyto základní parametry:

- velký Seebeckův koeficient ( $\alpha$ )
- malou rezistivitu ( $\rho$ ), tzn. velkou konduktivitu ( $\sigma$ )
- malou tepelnou vodivost ( $\kappa$ )

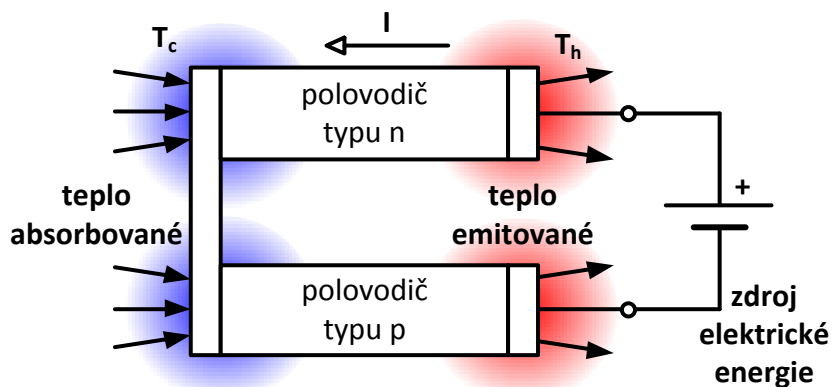


Obr. 2 – Hodnota  $zT$  vybraných termoelektrických materiálů [3]

### 3.2. Peltierův jev

O 13 let později od objevu Seebeckova jevu, v r. 1834 prozkoumal Jean Charles Athanase Peltier reversní jev, který je po něm pojmenován. Peltier zjistil, že když prochází proud obvodem se dvěma rozdílnými vodiči zapojenými v sérii, jedna se styčných ploch se ochlazuje a druhá zahřívá. [5]

Principem tohoto jevu je přechod elektronů z materiálu s větší výstupní prací do materiálu s menší výstupní prací. V místě styku je jejich pohybu kladen menší odpor, elektrony zde mají přebytek kinetické energie a ten uvolňují v podobě tepla. [5]



Obr. 3 – Peltierův jev [3]

### 3.2.1. Peltierův koeficient

Při Peltierově jevu, můžeme vzniklé teplo vyjádřit následujícím vztahem

$$Q = \Pi_{pn} \cdot I \quad (6)$$

$Q$	[W]	teplo vznikající/zanikající na spoji vodičů
$\Pi_{(pn)}$	[V·K <sup>-1</sup> ]	Peltierův koeficient termočládku
$I$	[A]	proud protékající spojem

Ze vztahu (6) vyjádříme přímo Peltierův koeficient

$$\Pi = \frac{Q}{I} \quad (7)$$

Peltierův koeficient je velmi obtížně měřitelný, proto se spíš používá Seebeckův koeficient. Přepočtení mezi nimi je možný pomocí střední teploty na termodvojici:

$$\alpha = \frac{\Pi}{T} \quad (8)$$

### 3.3. Thomsonův jev

Třetí termoelektrický jev objevil v roce 1851 William Thomson, známý také jako Lord Kelvin of Largs. Zjistil, že při zahřátí jednoho konce tyče o délce  $\Delta l$  vznikne v tyči teplotní spád  $\Delta l / \Delta T$  a mezi konci tyče vznikne nepatrné termoelektrické napětí.

Tento jev je podobný Seebeckovu jevu. Rozdílem je, že Thomsonův jev vzniká při ohřátí pouze jednoho vodiče, u Seebeckova efektu jsou to vodiče dva. I proto je naměřené napětí velmi malé.

## 4. Termoelektrické články

### 4.1. Rozdělení

Termoelektrické moduly složené z několika termodvojic vodičů, nazýváme termoelektrické články. Jako termočlánky se označují zdroje stejnosměrného napětí, v nichž se přeměňuje tepelná energie (tj. teplo) na energii elektrickou nebo naopak. [8]

Můžeme je podle využití rozdělit do 3 základních skupin:

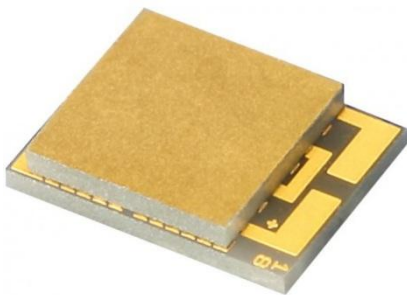
- pro měření teploty
- pro generování elektrické energie (thermoelectric generators) – TEG
- pro chlazení a ohřívání (thermoelectric cooling) – TEC

Termoelektrický článek pro měření teploty je tvořen dvěma vodiči, které jsou na jednom konci spojeny. Jedná se o teplý konec, který je měřicím koncem. V případě odlišnosti teploty teplého konce od referenčního (studeného) vzniká v termoelektrickém článku termoelektrické napětí. Tyto články mohou být podle materiálu rozděleny [9]

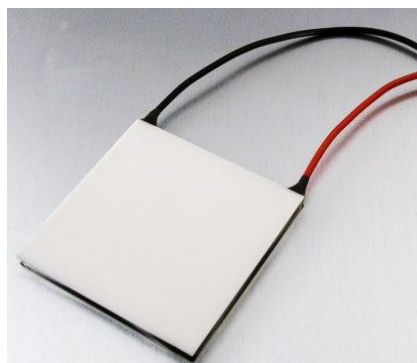
- speciální kovové
- kovové z ušlechtilých kovů
- kovové z neušlechtilých kovů
- nekovové

Nejznámější výrobci termoelektrických článků v současnosti:

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| - Marlow Industries, Inc.            | <a href="http://www.marlow.com">www.marlow.com</a>                       |
| - Nextreme Thermal Solutions, Inc.   | <a href="http://www.nextreme.com">www.nextreme.com</a>                   |
| - Peltron GmbH                       | <a href="http://www.peltier.de">www.peltier.de</a>                       |
| - RMT LTD                            | <a href="http://www.rmtltd.ru">www.rmtltd.ru</a>                         |
| - TE Technology, Inc                 | <a href="http://www.tetech.com">www.tetech.com</a>                       |
| - TEG Power South America Lda.       | <a href="http://www.tegpower.com">www.tegpower.com</a>                   |
| - Tellurex Corporation               | <a href="http://www.tellurex.com">www.tellurex.com</a>                   |
| - thermalforce.de                    | <a href="http://www.thermalforce.de">www.thermalforce.de</a>             |
| - Thermonamic Electronics Corp., Ltd | <a href="http://www.thermonamic.com">www.thermonamic.com</a>             |
| - WA tronix, Inc.                    | <a href="http://www.inbthermoelectric.com">www.inbthermoelectric.com</a> |



Obr. 4 – Nextreme eTEG HV37  
2,1 x 3,4 mm [10]



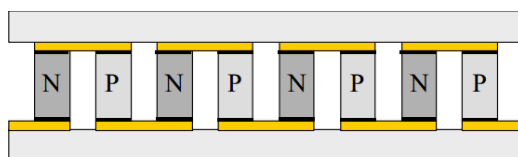
Obr. 5 – TEG/TEC článek  
40 x 40mm [11]



## 4.2. Konstrukce

Termoelektrické články jsou zařízení menších rozměrů. Pro běžné použití se vyrábějí v různých velikostech. Jejich rozměry (čtvercová destička) jsou od MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) článků velikostí kolem 2x2mm a výšky od 0,5mm (výrobce: Nextreme) po články velikosti kolem 65x65mm o tloušťce asi 3 až 6mm (výrobce: thermalforce.de).

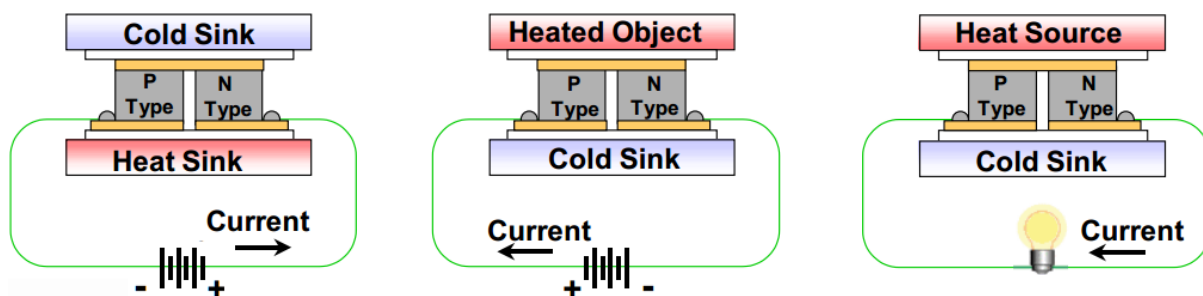
V porovnání termoelektrických článků jsou TEG a TEC články vyráběné zcela jinou technologií než měřicí články. U TEG i TEC článků jsou termodvojice zapojeny do matrice z tepelného hlediska paralelně a z elektrického sériově. Z tohoto důvodu je potřeba zahřívát nebo chladit povrch článku rovnoměrně, jinak vznikne stejný problém jako při nerovnoměrně osvětlených solárních panelech, nebo různě nabitých baterií uspořádaných v sérii za sebou.



Obr. 6 – Uspořádání termodvojic do matrice uvnitř TEG/TEC článku [12]

Pro spojení všech termodvojic a stabilitu termoelektrického článku jako celku jsou použité keramické desky. Ty jsou dostatečně pevné, tvrdé a teplovodivé (tzn., že mají malý tepelný odpor). V drtivé většině běžně prodávaných modulů se používá oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ) z důvodu nízké ceny a dobrých vlastností. Používají se i keramické desky z nitridu hlinitého (AlN) nebo oxidu berylnatého (BeO), které mají několiknásobně vyšší tepelnou vodivost (5 až 7-krát), ale i cenu. Navíc je oxid berylnatý jedovatý. [13]

U článku se rozlišuje teplá a studená strana. V případě TEC článku se po připojení stejnosměrného napětí jedna strana ochlazuje a druhá zahřívá. V případě TEG článku při zahřívání jedné strany a chlazení druhé se na vodičích vystupujících z TEG-u objeví vygenerovaná elektrická energie (stejnosměrné napětí).



a) chlazení pomocí TEC

b) zahřívání pomocí TEC

c) generování pomocí TEG

Obr. 7 – Princip činnosti TEC a TEG článků [12]

TEG a TEC články se vzájemně liší pouze z hlediska materiálu pojiva, které je celkově funkčním omezením, protože tavná teplota pájky omezuje maximální dovolené zahřátí. Materiálem pájky bývá kombinace cínu s antimonem nebo olovem. Propojovací můstky jednotlivých termodvojic bývají, i pro snížení vnitřního elektrického odporu, většinou z mědi. Z teplotního hlediska je článek omezen na nejvyšší teplotní zatížení termoelektrického článku. Běžné články se pohybují do 230 až 250°C. Již bylo zmíněno, že toto omezení je zapříčiněno tavnou teplotou pájky.

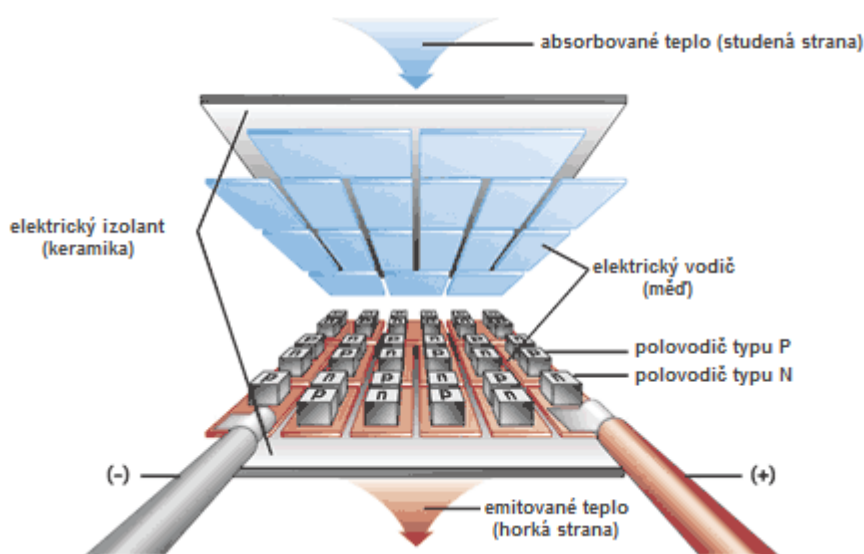
Maximální rozdíl teplot není konkrétně omezen, např. výrobce *thermalforce.de* uvádí ve všech datových listech ke svým výrobkům hodnoty při rozdílu teplot 200°C. Této hodnoty se ovšem obtížně dosahuje, nakolik keramické destičky jsou dobrým tepelným vodičem a tepelný odpor termodvojic je dost nízký. Tepelný odpor článků závisí také na stykové ploše. Stejně jako v elektrotechnice zde platí, že čím větší průřez, tím menší tepelný odpor. Z toho důvodu na tloušťce 3 až 6 mm nastává citelný teplotní přestup. Proto je při vyšších rozdílech použití pasivního chladiče s ventilátorem nedostatečné a je potřeba vodního chlazení.

Výkonově jsou termoelektrické články konstruované až do stovek wattů. Účinnost běžně dostupných článků se pohybuje kolem 5-7%.

U TEC článků se velmi jednoduše reguluje chladicí/ohřívací výkon. TEG i TEC články reagují téměř okamžitě, s ohledem na tepelnou setrvačnost soustavy. Jestliže se v termoelektrickém článku nenacházejí žádné pohyblivé části, je jejich provoz naprosto tichý. Určitý hluk může ovšem způsobovat aktivní chlazení. Další výhodou je, že v případě TEC článku je možno soustředit chlazení na velmi malou plochu, a tím lze chladit např. i preparát pod mikroskopem. Životnost článků je při předepsaném použití teoreticky neomezená.

Mezi nevýhody patří přehřívání, u TEC článku velká spotřeba proudu a nižší účinnost v porovnání s kompresorovým chlazením. [5]

Cena termoelektrických generátorů se v současnosti pohybuje od stovek do tisíců korun.



Obr. 8 – TEC článek zevnitř, u TEG článku jde tepelný tok opačným směrem [14]

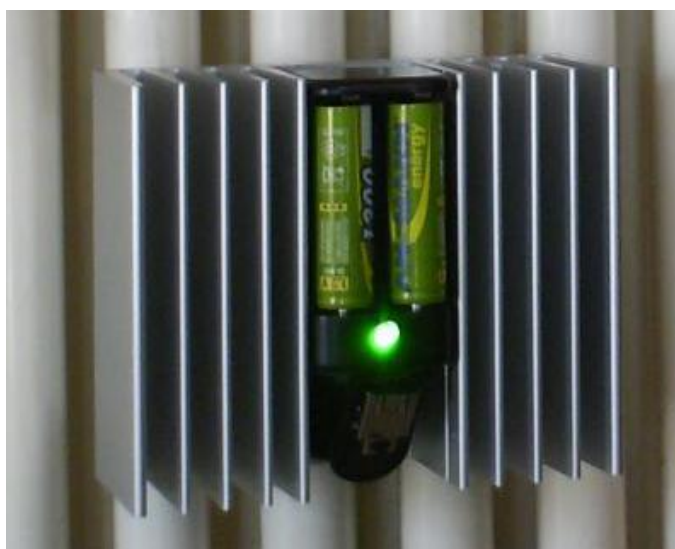
### 4.3. Použití termoelektrických generátorů

Termoelektrické generátory se využívají jako pohotovostní zdroje elektrické energie, nebo jako prostředky pro využití odpadového tepla. V tomto směru se věnují rozvoji termoelektrické přeměně zejména německé automobilky BMW a Volkswagen. Využitím odpadového tepla od spalovacího motoru v oblasti vedení výfukových plynů se dosahuje snížení spotřeby paliva až o více než 5%.



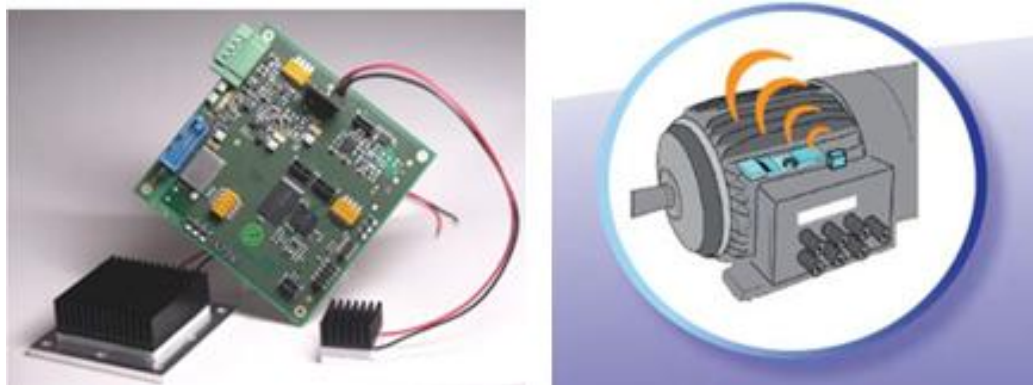
*Obr. 9 – Využívání tepla výfuku pomocí TEG článků automobilkou BMW [15]*

Výrobci TEG článků nabízejí i zařízení k finálnímu používání se zpracováním těchto článků, konkrétně např. LED lampu připojena na radiátor, svítidla napájená jejím zahřívání rukou, nabíječka AA baterií na radiátor, pohotovostní mobilní generátor, univerzální nabíječka na mp3 přehravače, mobily a jiné USB zařízení aj.



*Obr. 10 – Nabíječka AA baterií využívající teplo radiátoru [11]*

Jednou z nejnovějších možností využívání odpadového tepla je jeho využívání pro napájení senzorů. Například elektrické motory se při své činnosti zahřívají. Toto teplo je možno pomocí termoelektrických generátorů získat a přeměnit na energii elektrickou. Z té se dá přímo na povrchu motoru napájet snímač požadované veličiny a zároveň bezdrátový vysílač, který odesílá data do počítače, nebo jiného datového přijímače.



*Obr. 11 – Prototyp soběstačného snímače využívajícího TEG článků (vlevo) a aplikace a sledování stavu (vpravo) [16]*

## 5. Návrh zařízení

Na základě rozboru je vidět, že termoelektrické články jsou z výrobního hlediska složitá zařízení, ovšem pro použití se nejeví nijak náročné. Z tohoto důvodu je možno je vhodně zapracovat jako pohotovostní zdroje elektrické energie. V přírodě není problém najít zdroj tepla nebo si ho s menší výbavou pohotovostně vytvořit (např. sirky a kahan), se zdrojem elektrické energie je to ovšem značně obtížnější.

Proto se pohotovostní nabíječka nízkonapěťových zařízení při využití termoelektrických jevů a článků jeví jako dobrý nápad. Tato nabíječka si určitě najde oblibu zejména u turistů nebo chalupářů, kteří by mohli v případě nízkého stavu baterie ve svém mobilu, fotoaparátu nebo mp3 přehrávači i bez přítomnosti elektrické sítě v jejich okolí doplnit stav baterie pomocí kahanu nebo jiného menšího ohniště.

V dnešní době se sjednocují koncovky nabíječek mobilů a jiných zařízení na mini resp. micro USB koncovky, což napomáhá univerzálnosti i této nabíječky. Stačí zvolit jednu z těchto koncovek, nakolik je na trhu běžně dostupná redukce mezi nimi.



Obr. 12 a) Mini a micro USB koncovky



Obr. 12 b) Redukce mezi koncovkami

Po prozkoumání nabídky na internetu lze u výrobců termoelektrických článků *thermalforce.de* nebo *Tellurex Corp.* najít podobnou nabíječku již ke koupi. Z výše uvedeného vyplývá, že nabíječka by měla být menších rozměrů, rozebíratelná a při častém přenášení nebo neopatrném zacházení např. v batohu by si měla udržet neporušené sestavení.

V první řadě je potřeba si zvolit správný TEG článek. Společnost *thermalforce.de* nabízí články různých velikostí i parametrů. Z jejich online katalogu lze vyčíst kromě rozměrů i termální, elektrické a termoelektrické parametry při uvedeném rozdílu teplot.

Při zahřívání kahanem je možno uvažovat, že teplota plamene nebude teplota na termoelektrickém článku i z důvodu jejich vzájemné vzdálenosti. Protože není vhodné zahřívát bodově, ale celoplošně rovnoměrně je potřeba aby byl kahan dál od TEG článku a také aby byla dodržena maximální teplota a nedošlo k lokálnímu poškození termočlánků roztavením pojiva jednotlivých termodvojic. Z tohoto důvodu bude přiložena deska z dobře teplovodivého materiálu (keramika, hliník). Zavedeme si proto na horkou stranu TEG článku hliníkovou desku o tloušťce cca 5mm, která bude teplo rozvádět rovnoměrně po povrchu a zároveň bude i ochranou před náhlým bodovým zahřátím vysokou teplotou, která by mohla mít destruktivní účinky. Proto je vhodné uvažovat na horké straně článku kolem 140 až 150°C.

Aby se dosáhlo co největšího rozdílu teplot, který má přímý vliv na velikost generované elektrické energie, bude na studenou stranu umístěn chladič. Při uvažovaném určitém prostupu tepla z horké strany na studenou se chladič zahřeje, proto bude dodatečně chlazen ještě

ventilátorem. Za těchto podmínek lze teoreticky uvažovat, že se dosáhne rozdílu teplot 60 až 80°C (hrubý odhad).

Nabíječky mobilních telefonů a také USB napájení z počítače dodávají napájenému zařízení napětí o hodnotě 4,5 až 5V a proud od 200mA po 1A. Za našich podmínek by bylo 200mA dostatečných ale optimálně bychom uvítali hodnotu kolem 500mA. Z toho vyplývá, že hodnota elektrického výkonu požadována na nabíjení je přibližně 2,5W. Spolu s napájením ventilátoru a spotřebou elektroniky by bylo vhodné vygenerovat kolem 4W. Což se nejeví jako problém.

Datové listy TEG článků od vybraného výrobce uvádějí hodnoty při  $\Delta T=200\text{K}$ . Závislost generovaného napětí na rozdílu teplot je v případě konstantního Seebeckova koeficientu lineární, proto je potřeba hledat při našem teplotním rozdílu článek, který vygeneruje napětí o přibližně třikrát větší hodnotě. Z tohoto důvodu volíme článek, který generuje napětí 17,2V při rozdílu 200K, konkrétně TEG 263-250-36. Ten má ovšem dost malý tepelný odpor, proto na porovnání volíme ještě článek TEG 127-230-32.

Tab. 2 – Parametry vybraných TEG článků od *thermalforce.de* [11]

TEG	$L \times B \times H$ [mm]	$U_0$ [V]	$I_K$ [A]	$R_{cor}$ [ $\Omega$ ]	$P$ [W]	$\alpha_{cor}$ [V/K]	$\kappa$ [W/K]	$R_{th}$ [K/W]	$\eta$ [%]
263-250-36	50 x 50 x 3,1	17,200	6,719	2,560	28,891	0,092	2,300	0,435	4,998
127-230-32	40 x 40 x 3,4	11,440	4,643	2,464	13,279	0,062	0,850	1,176	5,957

$U_0$  – napětí naprázdno

$I_K$  – proud nakrátko

$R_{cor}$  – upravená hodnota vnitřního elektrického odporu TEG článku

$P$  – generovaný elektrický maximální možný výkon na zátěži, který se dosáhne v případě rovnosti vnitřního elektrického odporu se zátěžným odporem ( $R_{TEG_e} = R_{load}$ ), v tomto případě výkon na zátěži o velikosti  $R_{cor}$

$\alpha$  – Seebeckův koeficient

$\kappa$  – tepelná vodivost TEG článku

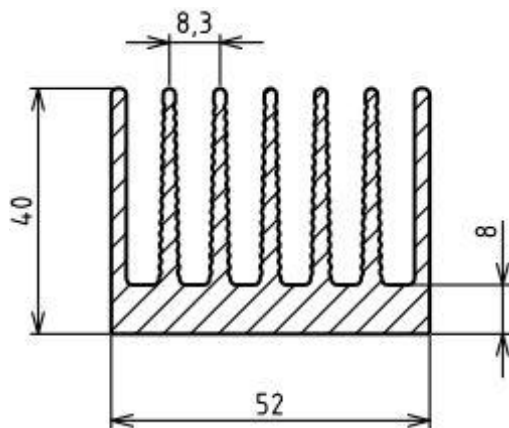
$R_{th}$  – tepelný odpor TEG článku

$\eta$  – účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou

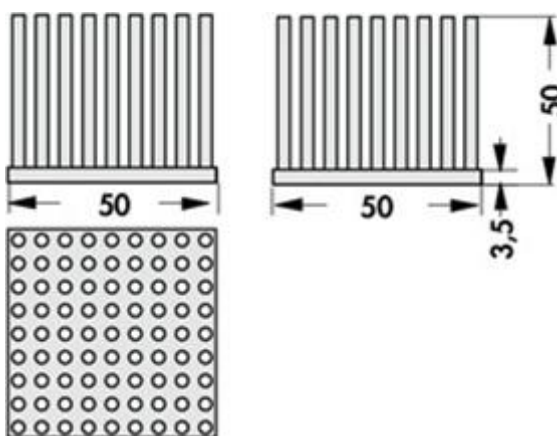
Typové číslo společnosti *thermalforce.de* má své odůvodnění. Konkrétně u typu TEG 263-250-36 se dá z označení vyčíst nejenom, že se jedná o článek primárně určený ke generování elektrické energie, který se skládá z 263 termodvojic a může být zahřát dlouhodobě max. na 250°C. Poslední číslo je interní firemní typové číslo.

Na studenou stranu se přiloží již zmíněný pasivní chladič. Volíme chladič se stykovou plochou 50x50 mm a víc, aby byl dostatečný pro větší ze zvolených článků. Rozměrnější chladič nebudeme volit s ohledem na minimalizaci rozměrů zařízení. Na výběr jsou na trhu dva chladiče s co nejnižší hodnotou tepelného odporu.

Společnost Eling Bohemia ([www.eling.cz](http://www.eling.cz)), s.r.o. nabízí hliníkový profil typu K52 s tepelným odporem 2 K/W na 100mm. V případě 50mm délky je hodnota tepelného odporu kolem 4 K/W. Společnost Fischer elektronik ([www.fischerelektronik.cz](http://www.fischerelektronik.cz)) nabízí tyčový pasivní chladič typu ICK S 50 x 50 x 50, co jsou zároveň i jeho rozměry v mm. Tento chladič má v teoretickém případě proudění vzduchu o rychlosti 0 m/s tepelný odpor podobný, a to kolem 4 K/W.

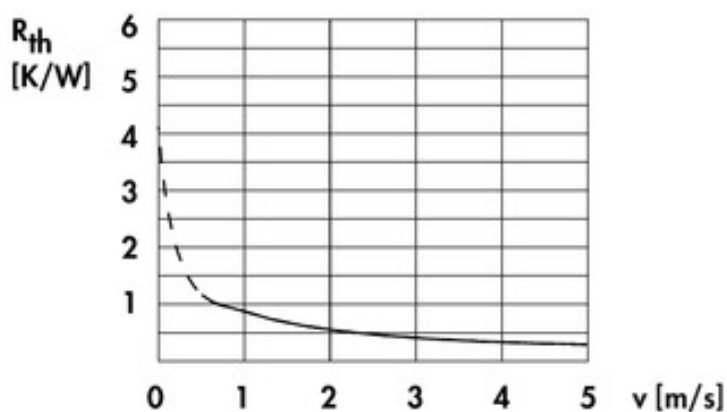


Obr. 13 – Chladič K52 [17]



Obr. 14 – Chladič ICK S 50x50x50 [18]

Tepelný odpor 4K/W je na chladič značný. Z tohoto hlediska nám je jedno, který z dostupných chladičů se použije. Z důvodu lepšího proudění a odvádění tepla z chladiče bude lepší použít tyčový typ (ICK S). Ze závislosti tepelného odporu na rychlosti proudění vzduchu je viditelné že s použitím ventilátoru se tepelný odpor značně sníží.



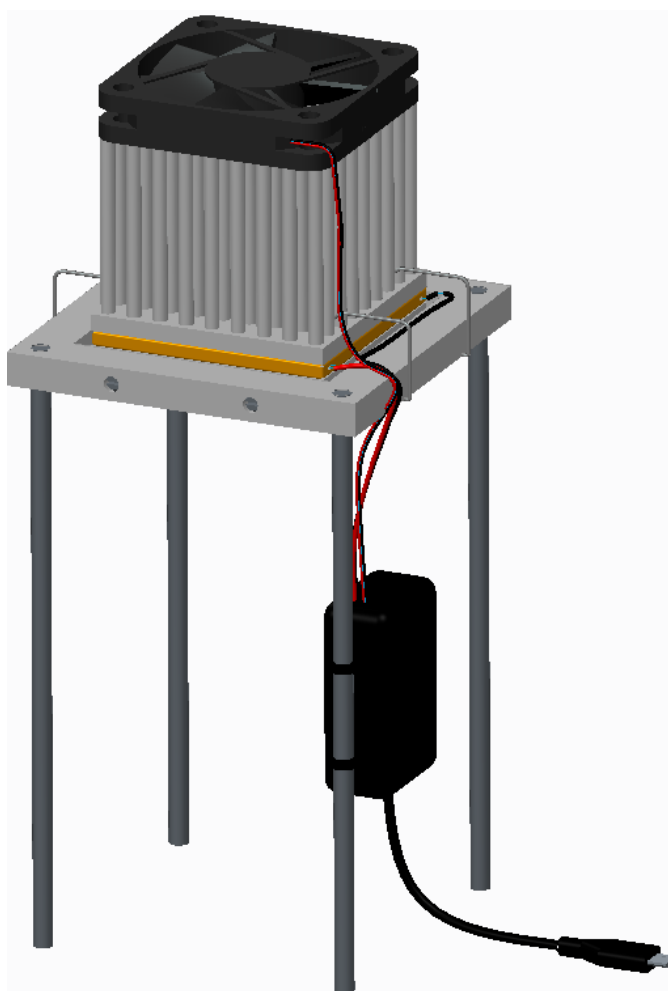
Obr. 15 – Závislost tepelného odporu na rychlosti proudění vzduchu u chladiče ICK S 50x50x50 [18]

Na trhu se vyskytují ventilátory napájené pomocí 5V, 12V nebo vyšších hodnot napětí, které nás nezajímají. Pro naši aplikaci je vhodné použít 5V ventilátoru, aby se nemuseli vyskytovat 2 hladiny napětí. V této kategorii a požadovaných rozměrech je nabídka minimální a nám běžní a dostupní prodejci elektronických součástek nabízejí pouze jeden typ. I tak se ventilátor SUNON ME50100V1-A99 ([www.gme.cz](http://www.gme.cz)) jeví jako dostatečný. Při průtoku vzduchu 13CFM je rychlost proudění vzduchu tímto ventilátorem asi 0,80 až 0,85 m/s. Při této rychlosti se hodnota tepelného odporu chladiče sníží na přibližně 1K/W. Na ventilátor tak malých rozměrů je hodnota průtoku vzduchu dost dobrá, nevýhodou ovšem je příkon 1,3W. Ten se dá snížit snížením napájecího napětí, nakořik ventilátor pracuje v rozmezí napětí 2,2 až cca 6,5V. Snížením napájecího napětí se sníží i průtok vzduchu a tím se zvýší tepelný odpor chladiče. Proto je potřeba toto nastavení provádět s rozvahou.

Hliníková destička bude uchopena na hliníkovou základnu, pomocí stavěcích šroubů. Základna bude mít nožičky, které se budou dát pro přenos ručně vyšroubovat, které budou držet soustavu nad ohněm, resp. pod zdrojem tepla, v případě opačného našroubování.

Hliníková rozváděcí destička se s TEG článkem a ten následně s chladičem spojí pomocí teplovodivé pasty, aby se snížil kontaktní tepelný odpor. Toto spojení je ovšem nedostatečné z hlediska manipulace, ale i vedení tepla, protože se vyžaduje určitý přítlak mezi jednotlivými součástkami. Toto zabezpečí dvě pružné spony vlastní výroby z dostatečně pevného ocelového drátu, kvůli vyvolání pružnosti a přítlaku.

Kabely se svedou do jedné krabičky, která bude ukrývat i potřebnou elektroniku.



Obr. 16 – Návrh zařízení v programu *Creo Parametric 1.0*



## 6. Matematický model termoelektrického generátoru

Pro pochopení činnosti termoelektrického generátoru (TEG-u) je dobré si sjednotit poznatky z teorie. Na základě kterých je možno sestavit matematické vztahy pro výpočet jednotlivých parametrů – teplot a tepelných toků. Z nich můžeme dále určit skutečnou účinnost a vhodnost návrhu zařízení. Na základě získaných hodnot je možné optimalizovat zařízení z tepelného hlediska.

Při sestavování matematického modelu, je lepší pro názornost se opírat o poznatky z elektroniky, která je našemu studiu nejbližší – nejznámější z možných analogií. Pro lepší pochopení zkoumaných problémů, je možno využít fyzikální analogie mezi hydraulickou, tepelnou, elektrickou a mechanickou soustavou následujícím způsobem [19]:

Tab. 3 – Analogie fyzikálních dějů [19]

soustava	fyzikální veličiny		impedance		
	průtokové	rozdílové	odpor	kapacita	indukčnost
<b>hydraulická</b>	průtok $Q$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	tlak $\Delta p$ [Pa]	hydraulický odpor $K$ [ $\text{N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-8}$ ]	-	-
<b>tepelná</b>	tepelný tok $q$ [W]	teplota $\vartheta$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]; $T$ [K]	tepelný odpor $R_{\vartheta}$ [ $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ]	tepelná kapacita $C$ [ $\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	-
<b>elektrická</b>	elektrický proud $I$ [A]	elektrické napětí $U$ [V]	elektrický odpor $R$ [ $\Omega$ ]	elektrická kapacita $C$ [F]	elektrická indukčnost $L$ [H]
<b>mechanická</b>	síla $F$ [N]	rychlost $v$ [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	translační vodivost $G = 1/b$ [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	hmotnost $m$ [kg]	mechanická poddajnost $\delta = 1/k$ [ $\text{m} \cdot \text{N}^{-1}$ ]

### 6.1. Rozbor zkoumané soustavy

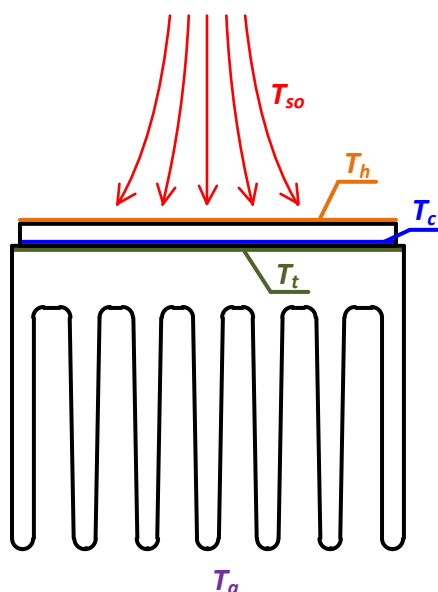
Zkoumanou soustavu je možno si představit jako TEG článek s chladičem (je zatím jedno jestli s ventilátorem, nebo bez něj – ten má vliv pouze na hodnotu tepelného odporu chladiče) zahříváný zdrojem tepla (např. horkovzdušnou pistolí). Pro názornost je vhodné uvažovat zahřívání z vrchu, aby teplota směrem nahoru (ve schématickém vyobrazení) stoupala.

Pro prvotní pozorování je jednodušší sledovat teplotu ve zkoumaných bodech namísto tepelného toku. Proto budou následně rozlišeny tyto teploty:

- $T_{so}$  (source) [ $^{\circ}\text{C}$ ; K] – teplota zdroje
- $T_h$  (hot) [ $^{\circ}\text{C}$ ; K] – teplota na horké straně termodvojic (uvnitř článku, ne na povrchu)
- $T_c$  (cold) [ $^{\circ}\text{C}$ ; K] – teplota na studené straně termodvojic
- $T_t$  (touch) [ $^{\circ}\text{C}$ ; K] – teplota v dotyku chladiče se studenou stranou TEG článku
- $T_a$  (ambient) [ $^{\circ}\text{C}$ ; K] – teplota okolí

Teploty  $T_h$  a  $T_c$  jsou v matematickém modelu teploty uvnitř článku na termodvojicích. Rozdíl těchto dvou teplot má přímý vliv na velikost generované elektrické energie. V praxi se ovšem sleduje teplota na povrchu článku, proto i výrobci uvádějí hodnoty při určitém rozdílu teplot na povrchu článku. Při praktickém měření se tak musí brát do úvahy teplotní spád zapříčiněný keramickými deskami článku a také např. hliníkovými deskami, které jsou přiloženy k článku pro zabezpečení rovnoměrného rozložení tepla po celé ploše TEG článku.

Při zahřívání horkovzdušnou pistolí není potřebné přikládat hliníkovou destičku na rovnoměrné rozložení tepla na horké straně nakolik tryska pistole i průtok tepla jsou dostatečné na rovnoměrné rozložení tepla. Hliníková destička by do soustavy vnesla další tepelný odpor jak jenom svoji přítomností, tak i kontaktní tepelný odpor v místě styku destičky s TEG článkem.



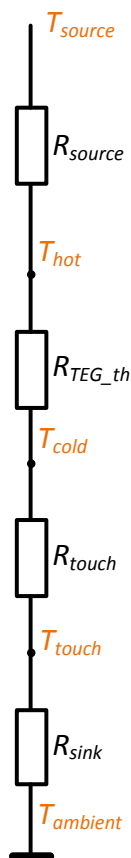
obr. 17 – Měření TEG článku v praktickém použití

### 6.1.1. Soustava v ustáleném stavu

Tuto soustavu je možno uvažovat jako soustavu sériově řazených tepelných odporů a k nim paralelně řazených tepelné kapacity, které se ve výpočtu v ustáleném stavu neuvažují. U zmíněného měření proto budou rozlišovány tyto tepelné odpory:

- $R_{so}$  (source) [ $K \cdot W^{-1}$ ] – tepelný odpor zdroje složený z tepelného odporu keramické desky TEG článku (případně v součtu s odporem jiné desky – např. hliníkové, která je přiložená, aby zabezpečila rovnoměrné rozložení tepla na horké straně článku) a tepelného odporu zapříčiněného konvekcí při zahřívání (teplota na horké straně termodvojic není stejná jako teplota nastavená a vycházející ze zdroje tepla)
- $R_{TEG_{th}}$  (thermal) [ $K \cdot W^{-1}$ ] – tepelný odpor TEG článku
- $R_t$  (touch) [ $K \cdot W^{-1}$ ] – kontaktní tepelný odpor mezi chladičem a studenou stranou TEG článku
- $R_{si}$  (sink/heatsink) [ $K \cdot W^{-1}$ ] – tepelný odpor chladiče

Na základě tohoto rozboru je možno uvažovat uspořádání na obr. 18, ze kterého se bude vycházet při sestavování matematického modelu.



Obr. 18 – Teplotní uspořádání soustavy v počátečním (klidovém) stavu

### 6.1.2. Soustava v průběhu zahřívání a generování

Jako zdroj tepla je možno uvažovat zdroj konstantního tepelného toku o hodnotě  $q_{so}$  [W] (v analogii s elektronikou: zdroj proudu) nebo zdroj konstantní teploty o hodnotě  $T_{so}$  (v analogii: zdroj konstantního napětí). Více bude zmiňován zdroj konstantní teploty, protože teplota je laickému chápání přívětivější.

„Ohřívání nebo chlazení Peltierova článku je fenoménem tepelné absorpce/disipace spojením dvou rozdílných materiálů, kdy elektrický proud protéká napříč spojením. Absorbované/emitované teplo všech termodyojic článku v místech  $T_h$  a  $T_c$  určíme [9]:

$$q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I \quad (9)$$

$$q_c = \alpha \cdot T_c \cdot I \quad (10)$$

kde  $\alpha$  [V·K<sup>-1</sup>] Seebeckův koeficient  
 $I$  [A] generovaný elektrický proud protékající termodyojicemi  
 $q_c$  [W] teplo absorbované na studené straně termodyojic  
 $q_h$  [W] teplo emitované na teplé straně termodyojic

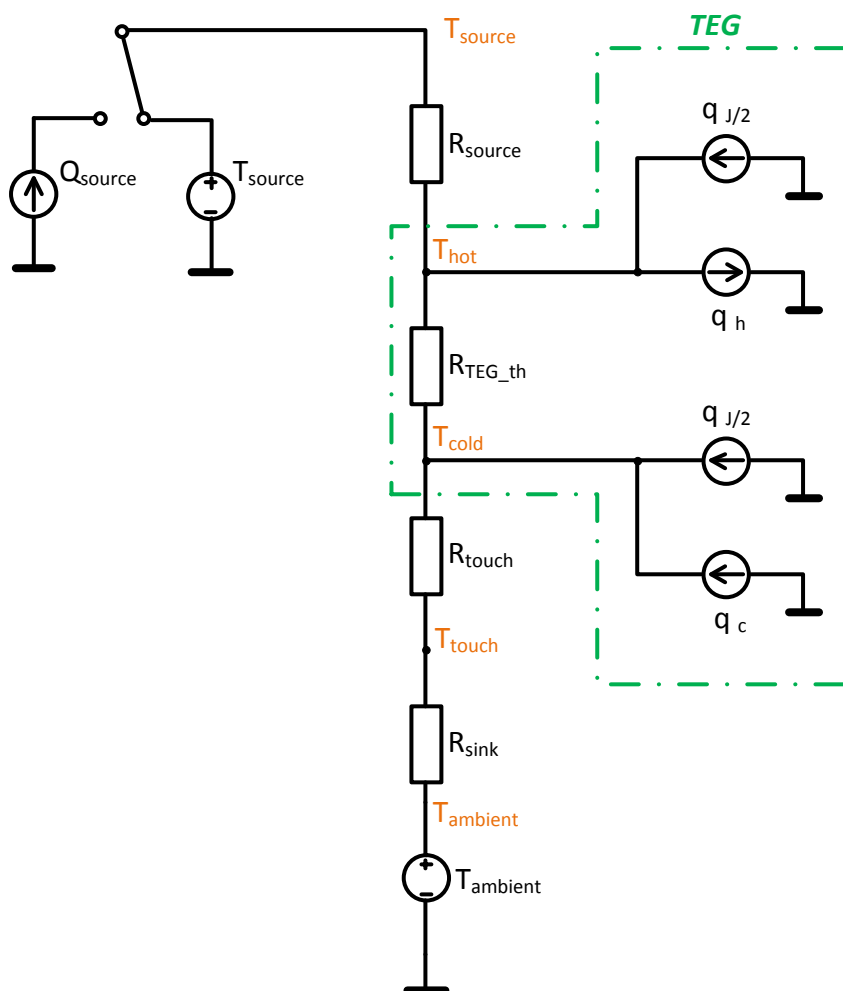
Díky Seebeckovu jevu a vztahu (4) je možno určit směry těchto tepelných toků. Při generování elektrické energie z tepla je na horké straně tepelný tok o hodnotě  $q_h$  odváděn a na studené straně je tok  $q_c$  přiváděn.

V TEG článku se začne tokem elektrického proudu generovat také ztrátové Joulovo teplo, ozn.  $q_J$  [W], kterého hodnotu určíme pomocí vztahu:

$$q_J = R_{TEG\_e} \cdot I^2 \quad (11)$$

Jestliže tento zdroj tepelného toku vystupuje uprostřed článku TEG, je potřeba ho do modelu uvažovat, že má rovnoměrný vliv na horkou i studenou stranu, a tak bude zpracován rozdělený na dvě poloviny. Potom do uzlu  $T_h$  a  $T_c$  se připojí zdroj tepelného toku hodnoty:

$$q_{J/2} = \frac{q_J}{2} = \frac{1}{2} \cdot R_{TEG\_e} \cdot I^2 \quad (12)$$



obr. 19 – Tepelná soustava při generování v ustáleném stavu

## 6.2. Sestavení matematického modelu

### 6.2.1. Tepelná část

Na základě znalosti analogie tepelné soustavy s elektrickou, je možno využít i Ohmův a Kirchhoffovy zákony i v tepelné soustavě.

Ohmův zákon

$$U = R \cdot I \quad (13)$$

kde  $U$  [V] – elektrické napětí  
 $R$  [ $\Omega$ ] – elektrický odpor  
 $I$  [A] – elektrický proud

se dá převést do tepelné soustavy následovně:

$$\Delta T = R_g \cdot q \quad (14)$$

kde  $\Delta T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ; K] – rozdíl teplot  
 $R_g$  [ $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ] – tepelný odpor  
 $q$  [W] – tepelný tok

Již bylo zmíněno, že jako zdroj tepelné energie může být použit zdroj tepelného toku, nebo teploty. V případě zdroje tepelného toku (ozn.  $q_{so}$  [W]), se určí teplota zdroje odvozením z Ohmova zákona pomocí vztahu:

$$T_{so} = q_{so} \cdot R_{so} + T_h \quad (15)$$

V případě zdroje teploty jako zdroje tepelné energie se zpětně dopočítá tepelný tok zdroje následujícím vztahem:

$$q_{so} = \frac{T_{so} - T_h}{R_{so}} \quad (16)$$

V obou rovnicích (15 a 16) není známa hodnota  $T_{hot}$ , která se určí pomocí Kirchhoffových zákonů.

*Kirchhoffovy zákony* [20]:

„1. – *Uzlové pravidlo*: Součet proudů vstupujících do uzlu se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících.“

„2. – *Smyčkové pravidlo*: Algebraický součet úbytků napětí při průchodu libovolnou uzavřenou smyčkou je nulový.“

Tyto zákony lze převést do tepelné soustavy následujícím způsobem:

1. součet tepelných toků (proudové veličiny) vstupujících do uzlu se rovná součtu tepelných toků z uzlu vystupujících
2. algebraický součet rozdílů teplot (rozdílové veličiny) při průchodu libovolnou uzavřenou smyčkou je nulový

Prakticky bude využit pouze první zákon k sestavení následujících průtokových rovnic v jednotlivých uzlech:

$$T_{hot}: \quad \frac{T_{so} - T_h}{R_{so}} - \frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot R_{TEG\_e} \cdot I^2}_{q(J/2)} - \underbrace{\alpha \cdot T_h \cdot I}_{q(h)} = 0 \quad (17)$$

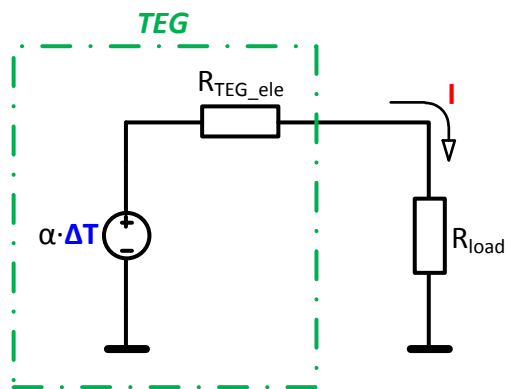
$$T_{cold}: \quad \frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} - \frac{T_c - T_t}{R_t} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot R_{TEG\_e} \cdot I^2}_{q(J/2)} + \underbrace{\alpha \cdot T_c \cdot I}_{q(c)} = 0 \quad (18)$$

$$T_{touch}: \quad \frac{T_c - T_t}{R_t} - \frac{T_t - T_a}{R_{sink}} = 0 \quad (19)$$

Z teplotního hlediska byla odvozena soustava čtyř rovnic (15 nebo 16, 17, 18 a 19) se čtyřmi tepelnými neznámými:  $Q_{so}$  nebo  $T_{so}$ ,  $T_{hot}$ ,  $T_{cold}$  a  $T_{touch}$ . Objevuje se zde ještě jedna neznámá a to generovaný elektrický proud (ozn.  $I$  [A]), který se získá řešením elektrické části termočlánu.

### 6.2.2. Elektrická část

Je známo, že při zahřívání a chlazení TEG článku se generuje napětí a proud o určité velikosti. Termoelektrický článek má jako zdroj vnitřní elektrický odpor, ozn.  $R_{TEG\_e}$  [ $\Omega$ ] a také bude připojena zátěž s elektrickým odporem velikosti  $R_{load}$  [ $\Omega$ ].



Obr. 20 – Elektrická část termočlánu

Z hlediska tepelného rozboru je důležitý jenom elektrický proud protékající termodvojicemi. Ten, jak lze na obrázku pozorovat, závisí na generovaném Seebeckově napětí a příslušných odporech. K určení Seebeckova napětí, je ovšem potřeba rozdílu teplot, který se vypočte pomocí známého proudu.

Tento na první pohled neřešitelný problém je možno vyřešit hrubým odhadem rozdílu teplot ( $\Delta T$  [K]) na TEG článku

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (20)$$

kde  $T_h$  a  $T_c$  se dá vypočítat pomocí výše zmiňované soustavy rovnic, ovšem je potřeba si to zjednodušit o zdroje tepelných toků, nakolik ještě neznáme hodnotu elektrického proudu.

Soustava rovnic pak bude vypadat následovně:

$$\frac{T_{so} - T_h}{R_{so}} = q_{so} \quad (21)$$

$$\frac{T_{so} - T_h}{R_{so}} - \frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{T_h - T_c}{R_{TEG\_th}} - \frac{T_c - T_t}{R_t} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{T_c - T_t}{R_t} - \frac{T_t - T_a}{R_{sink}} = 0 \quad (24)$$

Ze soustavy rovnic (21 až 24) a vztahu (20) se vypočte hodnota rozdílu teplot  $\Delta T$ , na základě které se vypočte odhad hodnoty proudu

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R_{TEG\_e} + R_{load}} \quad (25)$$

V tomto případě se již dá vyřešit původní soustava rovnic (15 až 19). V ní se ovšem dospěje k jiné hodnotě rozdílu teplot, co má vliv na velikost protékajícího proudu. Tato chyba hrubého odhadu se odstraní iteračním výpočtem, tzn. opakováním výpočtu, dokud rozdíl stávající a nově vypočtené hodnoty elektrického proudu nebude dostatečně zanedbatelný. Jednou z možností iteračního řešení je metoda půlení intervalů. Při tomto způsobu se za elektrický proud vstupující do výpočtu volí vždy aritmetický průměr elektrických proudů vypočtených z elektrického a tepelného rozboru. Tento výpočet je potřeba opakovat dokud se nedosáhne požadované přesnosti, a tak se provádí pomocí výpočetního programu na PC.

### 6.3. Model v programu Matlab

Pro lepší názornost bude využito našich možností a zmiňovaný model bude řešen pomocí programu Matlab, jeho nadstavbové části Simulink, která obsahuje část Simscape specializovanou na fyzikální obvody (tepelné, elektrické, hydraulické, pneumatické a mechanické). Při tomto výpočtu odpadávají problémy s rozepisováním rovnic a také s řešením iterace pro výpočet skutečné hodnoty protékajícího elektrického proudu. Tyto rovnice i iterační děj si na pozadí sestavuje a řeší program sám. Výhodou programu, je možnost řešení mechatronického problému – tepelná a elektrická část v rámci programu spolu vzájemně komunikují.

S těmito možnostmi je možno do soustavy přidat již zmiňované tepelné kapacity, které zaručují sledování přechodových dějů jednotlivých teplot nebo generovaného proudu a napětí, na základě čeho je možno např. optimalizovat volbu chladiče. Do již známého schematického rozboru se tedy zapracují tyto tepelné kapacity:

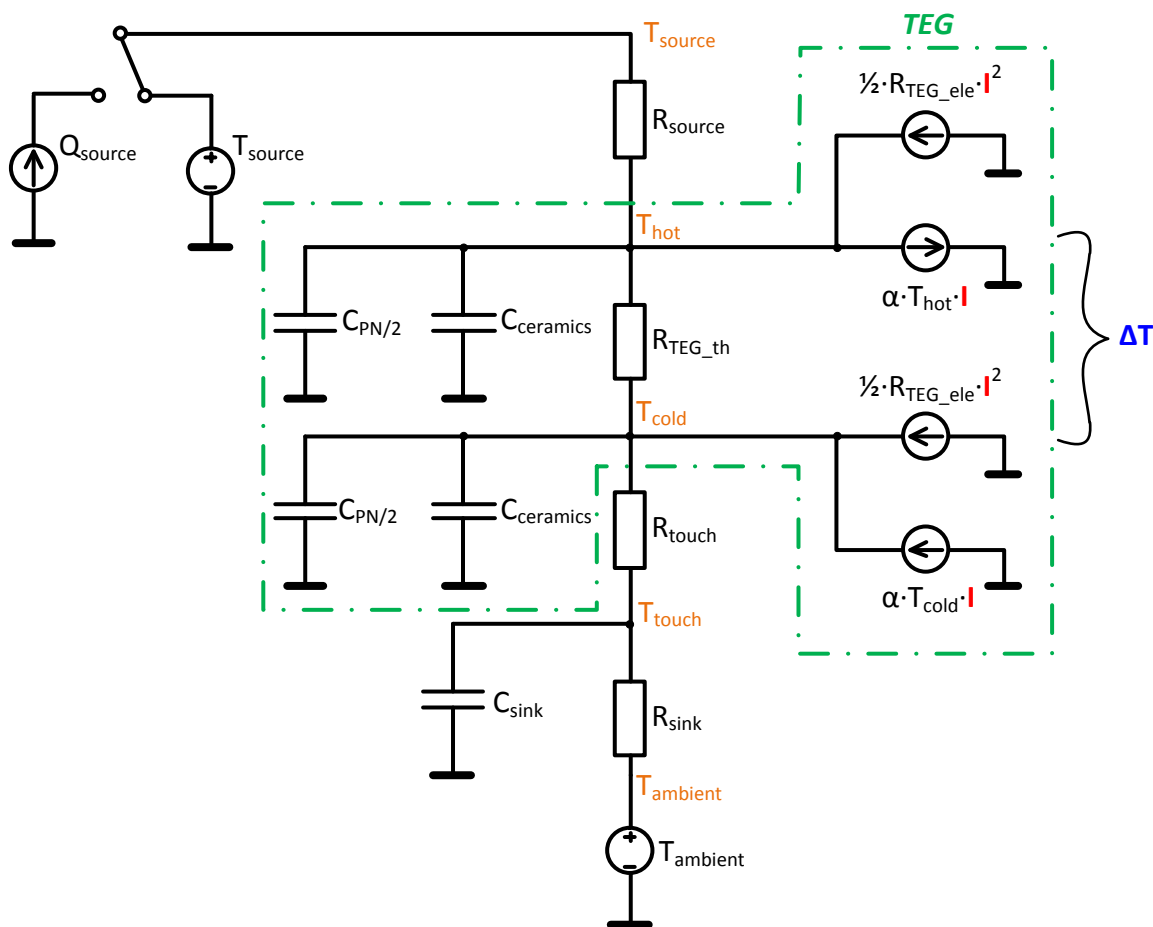
- $C_c$  [ $W \cdot s \cdot K^{-1}$ ] (ceramics) – tepelná kapacita keramické desky TEG článku
- $C_{pn}$  [ $W \cdot s \cdot K^{-1}$ ] – tepelná kapacita termodvojic uvnitř TEG článku
- $C_{si}$  [ $W \cdot s \cdot K^{-1}$ ] (sink/heatsink) – tepelná kapacita chladiče

Výše uvedený tepelný odpor  $R_t$  a pozorování teploty  $T_t$  byly zavedeny, aby bylo možné do soustavy zapracovat všechny tepelné kapacity, protože i ze základů elektroniky je známo, že kapacitor se nemůže zapojit přímo na zdroj napětí. Toto vyplývá ze vztahu pro elektrický proud protékající kondenzátorem

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (26)$$

kde  $i(t)$  [A] – protékající elektrický proud  
 $C$  [F] – kapacita kondenzátoru  
 $u(t)$  [V] – elektrické napětí  
 $du(t)/dt$  – změna elektrického napětí v čase

Z uvedeného vztahu (26) vyplývá, že při připojení kondenzátoru na zdroj napětí je změna elektrického napětí teoreticky skoková a tím pádem  $du(t)/dt = \infty$  a proud protékající kondenzátorem by způsobil jeho výbuch. Je ovšem známo, že v přírodě není možno dosáhnout ideálně ostré skokové změny u fyzikálních jevů, proto v praxi u menších napětí se tato skutečnost může za určitých okolností zanedbat. Ovšem v tepelné soustavě je v praxi tento jev úplně vyloučen, protože není možno dosáhnout skokové změny proudění tepla. Při zapnutí jakéhokoliv zdroje tepla, nebo přiblížením se soustavy k němu a naopak je tento náběh průběžný nikoliv skokový. Program ovšem pracuje na základě teoretických zákonitostí, a tak pro zavedení tepelné kapacity chladiče do soustavy musí být tento kapacitor „nabíjen“ přes tepelný odpor. Z toho důvodu byl zaveden odpor kontaktu TEG článku s chladičem  $R_t$ .

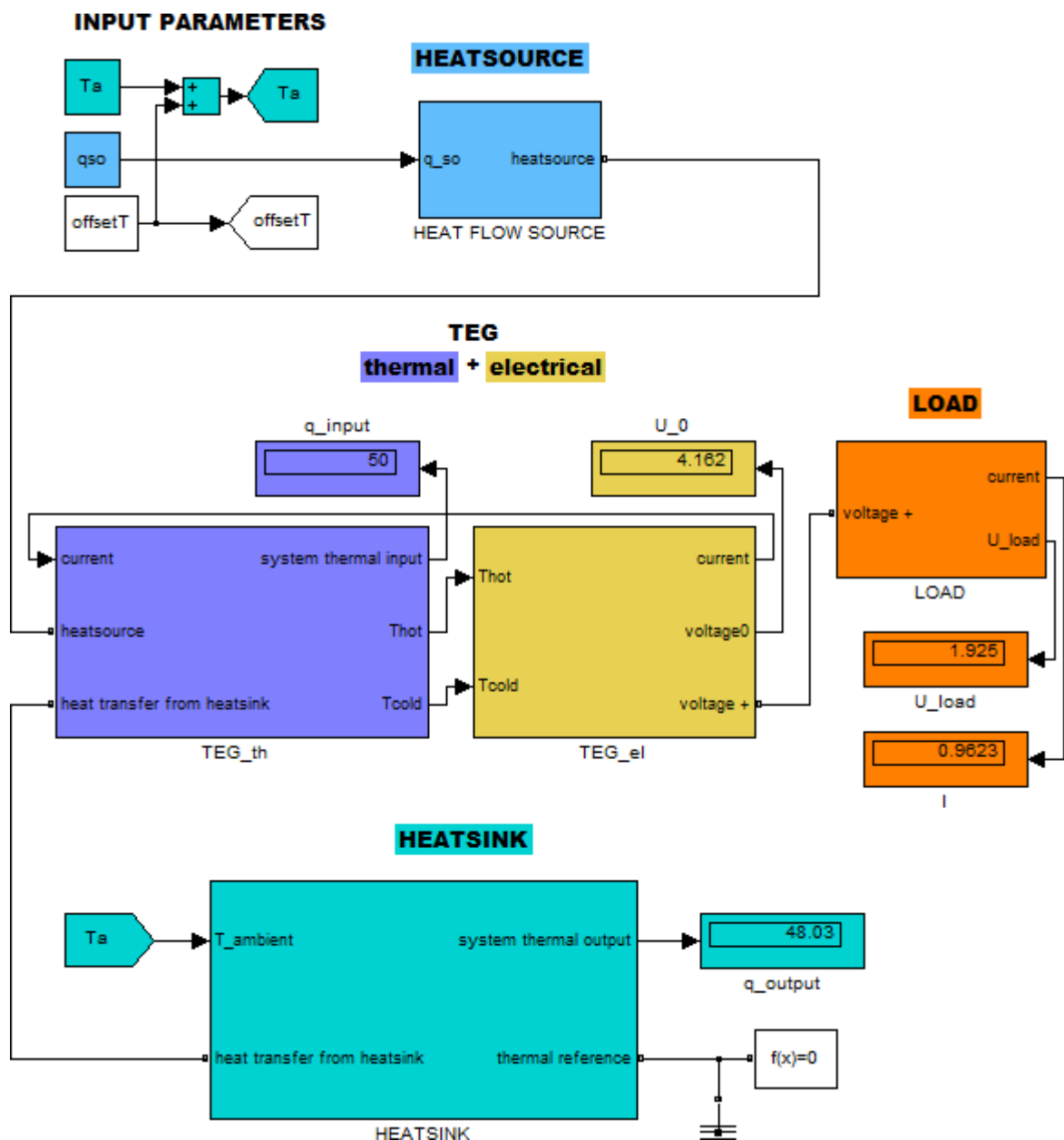


Obr. 21 – Celkové schéma tepelné části při praktické aplikaci TEG článku



Ve schématu pro zjednodušení se uvažuje, že tepelná kapacita termodvojic článku ( $C_{pn}$ ), bude působit ve stejném poměru na teplou i studenou stranu TEG článku, tím pádem tuto se tato kapacita rozdělí na polovinu ( $C_{pn/2}$ ). Podobně se postupovalo i při generovaném teplem toku ( $q_I$ ), způsobenému proudem protékajícím v termodvojicích.

„Zemnicí svorka“ představuje referenční (nulovou) hodnotu teploty, jelikož teplota je rozdílová veličina. Simscape má pro toto „uzemnění“ zavedený bloček *thermal reference*. Kvůli použití tepelných kapacit, již není kvůli možnostem a schopnostem programu možno počítat ve °C ale je potřeba přejít do tepelné stupnice v kelvinech [K]. Z tohoto důvodu se ke všem zadaným teplotám ve °C připočte teplotní ofset (ozn.  $offsetT = 273,15$ ) a při výstupních hodnotách pozorovaných teplot, se tato hodnota zpětně odečte.



obr. 22 – Schematický model měření TEG článku v praxi v programu Matlab/Simulink/Simscape

Parametry soustavy (hodnoty jednotlivých odporů, kapacit, hodnotu seebeckova koeficientu apod.) se budou spouštět z pomocného skriptu, kde budou tyto vlastnosti systému na-definovány. Elektrická část je i při modelování stejná jako je uvedeno na obr. 22, tepelnou část je dobré si po namodelování celého systému pro přehlednost rozdělit do jednotlivých částí: parametry vstupu, zdroj tepla (teploty/tepelného toku), teplotní a elektrická část TEG článku, chladič a elektrická zátěž.

V modelu je možné vidět vzájemnou interakci tepelné a elektrické části, konkrétně: vliv rozdílu teplot ( $\Delta T$ ) horké ( $T_h$ ) a studené ( $T_c$ ) strany článku na generovanou elektrickou energii a vliv protékajícího proudu ( $I$ ) na generované teplo. Velikost generovaného proudu závisí jak na generovaném napětí, tak na připojené zátěži.

V praxi se nezkoumají všechny veličiny, které jsou pozorovány ve zde vytvořeném modelu v programu Matlab. Proto ze subsystémů jsou vyvedeny jenom některé veličiny, které se při běžném praktickém používání sledují. Hodnotu tepelného toku vstupujícího do TEG článku ( $q_{input}$ ) a vystupujícího z něj ( $q_{output}$ ) pozorujeme z důvodu určení energické bilance.

Provedení jednotlivých subsystémů je vyobrazeno v příloze.

## 6.4. Ověření modelu v programu Matlab

Pro názornost funkčnosti vytvořeného modelu, je vhodné si vytvořit vzorový příklad s konkrétními parametry zmiňované soustavy.

Vzorové parametry pro simulaci TEG článku, konkrétně od výrobce thermalforce.de článek typu: TEG 263-250-36 [11]:

### Vnější parametry soustavy:

$$T_{so} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{so} = 0,1 \text{ K/W}$$

$$R_{si} = 0,5 \text{ K/W}$$

$$R_{load} = 5 \text{ } \Omega$$

### Parametry TEG článku [11]:

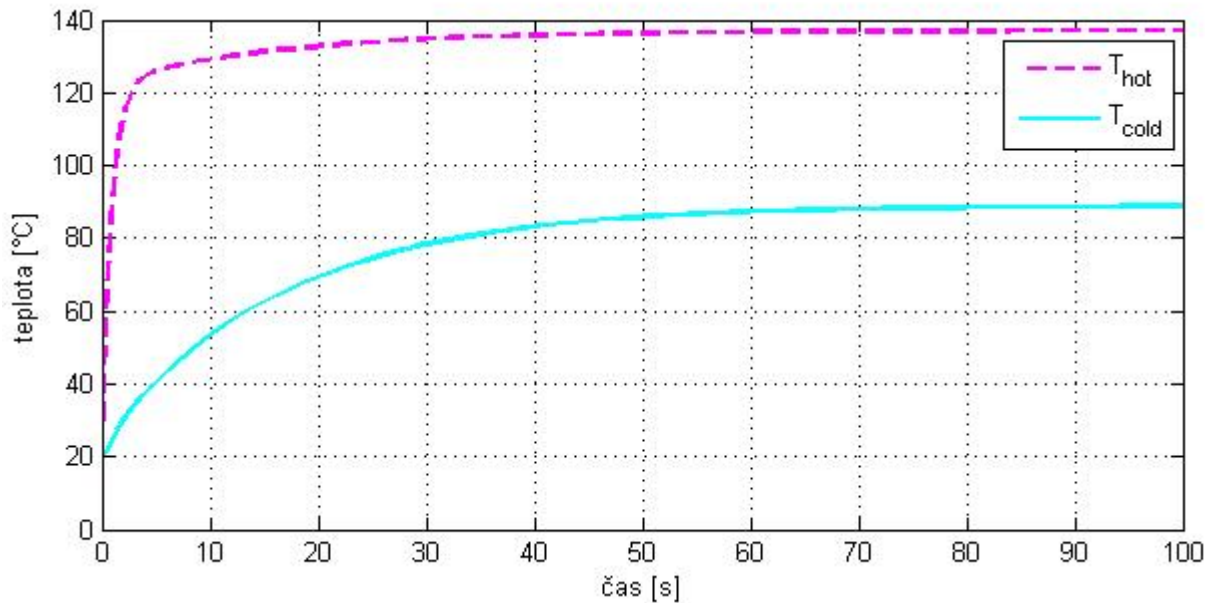
$$\alpha = 0,092 \text{ V/K} \quad (\text{Seebeckův koeficient celého článku})$$

$$R_{TEG\_th} = 0,435 \text{ K/W}$$

$$R_{TEG\_e} = 1,6 \text{ } \Omega$$

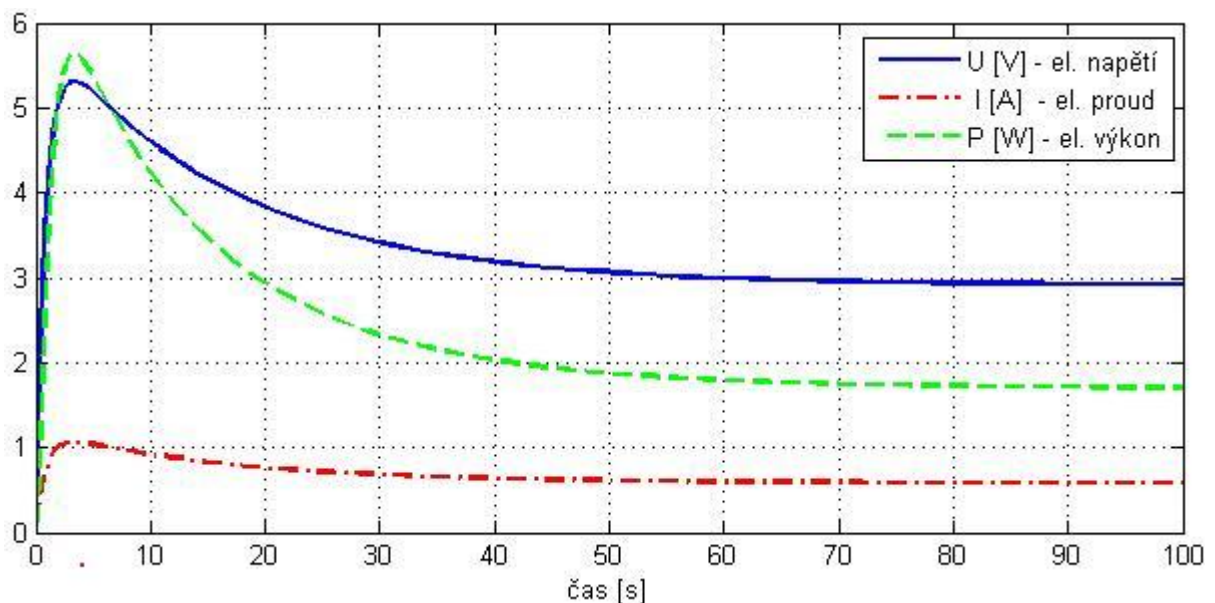
$$l_{TEG} = 50 \text{ mm} \quad (\text{délka strany TEG článku čtvercového profilu})$$

$$h_{cer} = 0,8 \text{ mm} \quad (\text{tloušťka jedné keramické desky})$$



Obr. 23 – Průběh teplot uvnitř článku na počátku zahřívání

Z průběhu teplot na obr. 23 je vidět, vliv tepelného odporu  $R_{so}$  na velikost ustálené hodnoty teploty horké strany termodvojic ( $T_{hot}$ ), že se liší od teploty zdroje ( $T_{so} = 150^{\circ}\text{C}$ ). Tepelná kapacita keramické desky a termodvojic způsobuje plynulý náběh teploty  $T_{hot}$  i  $T_{cold}$ . Teplota studené strany termodvojic ( $T_{cold}$ ) je ovšem pomalejší v dosažení ustáleného stavu kvůli značně větší tepelné kapacitě chladiče v porovnání s tepelnou kapacitou TEG článku.



Obr. 24 – Průběh jednotlivých složek generované elektrické energie na počátku zahřívání, při zátěži  $R_{load} = 5\Omega$ ;

Z průběhu elektrických veličin na obr. 24 je vidět, že delší ustalování teploty studené strany termodvojic zabezpečuje „překmit“ elektrických veličin, čeho by se dalo využít na rozběhnutí ventilátoru na chladiči, který sníží tepelný odpor chladiče, čímž se dosáhne vyššího rozdílu teplot a tak se vygeneruje víc elektrické energie pomocí TEG článku.

## 7. DC/DC měniče

Stejnoseměrný proud (*direct current* – DC) nelze na rozdíl od střídavého (*alternative current* – AC) transformovat, a tak je potřeba změnit velikost jeho napětí jiným způsobem. DC/DC měniče přeměňují stejnosměrné napětí určité hodnoty na napětí jiné hodnoty. V moderních elektronických systémech je potřeba přeměňovat napájecí napětí ze zdroje elektrické energie na napětí o velikosti, kterou požaduje cílový spotřebič. DC/DC měniče také mohou regulovat výstupní napětí. Pro využití TEG-ů v automobilovém průmyslu se většinou používají DC/DC měniče pro zvýšení napětí generovaného termoelektrickým článkem tak, aby se dosáhlo úrovně napětí, které je vyžadováno pro různou elektroniku automobilu.

V této kapitole bude uveden přehled různých architektur DC/DC měničů. [4]

### 7.1. Princip DC/DC měničů

Při návrhu DC/DC měniče se berou do úvahy dvě základní hlediska: účinnost a regulace. Problémem účinnosti je potřeba se zabývat, protože každý elektrický okruh má buď přímo odporové složky, nebo parazitní odpory, které jsou po stránce účinnosti náročné pro chod převodníku. Návrháři těchto měničů potřebují optimalizovat jejich účinnost, i když nemohou nikdy dosáhnout 100%. Problém regulace je způsoben tím, že žádný elektrický zdroj není zcela konstantní, ale elektronika vyžaduje určitou úroveň stability napájení.

Obecným principem DC/DC měničů je ukládání elektrické energie do součástek jako jsou kondenzátory a induktory a následné uvolnění energie do zátěže. Řízením času pro ukládání a uvolňování energie může být kontrolována průměrná úroveň napětí na zátěži. Tato hodnota tak může být vyšší nebo nižší než napětí elektrického zdroje.

Střídání stavu ukládání a uvolňování energie je zabezpečeno spínacími zařízeními. V současnosti se v DC/DC měničích nejčastěji používá na spínání tranzistor. Téměř všechny moderní stejnosměrné konvertory používají signál pulsní šířkové modulace (*pulse-width-modulation* – PWM) pro řízení spínání. PWM má výhodu lineárního řízení napájení zátěže. Vypovídajícím parametrem PWM řízení je střída. [4]

$$s = \frac{t_{on}}{t} \quad (27)$$

$s$  [1] – střída

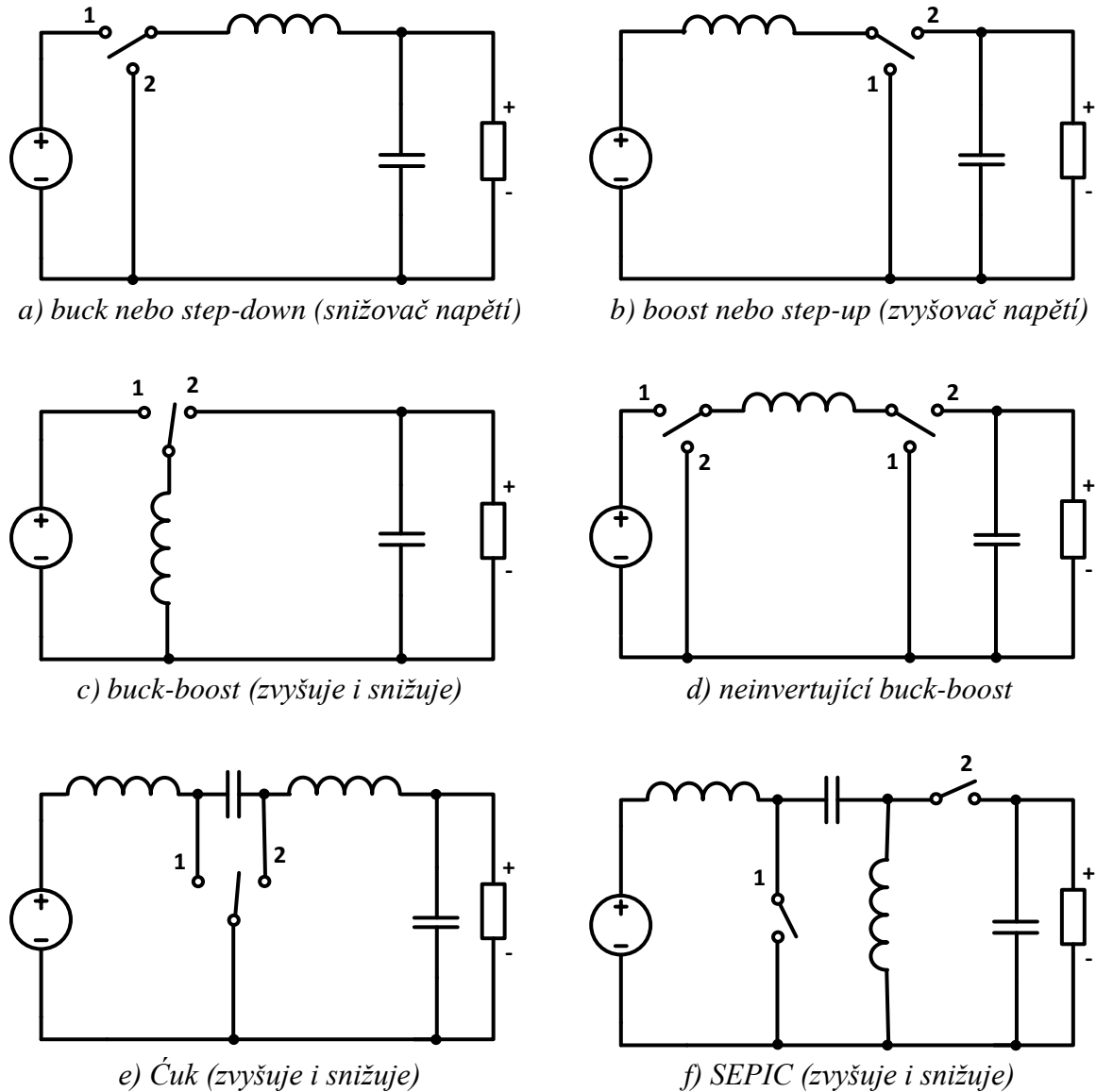
$t_{on}$  [s] – doba zapnutí signálu („logická 1“)

$t$  [s] – perioda

### 7.2. Kategorie a topologie DC/DC měničů

Existuje několik druhů stejnosměrných měničů. Každý typ je optimalizován z několika hledisek podle požadavků cílové aplikace a neohrožení výkonu a účinnosti měniče. DC/DC měniče mohou být klasifikovány mnoha způsoby. Nejzákladnější rozdělení měničů je na základě použití transformátoru. Transformátory bývají zapracovány do DC/DC měničů, aby zaručili odizolování vstupu a výstupu ze stejnosměrného hlediska. Měniče s transformátory se nazývají oddělovacími resp. izolujícími měniči, bez transformátorů jsou označovány jako neizolující měniče. Pro naši problematiku není potřeba oddělovat výstup měniče od jeho vstupu. [4]

Rozeznává se několik základních zapojení neizolujících měničů.



Obr. 25 – Zjednodušené topologie neizolujících měničů [4]

Další typy stejnosměrných (DC/DC) měničů jsou např. Watkins-Johnsonův konvertor, H-můstek a pod. Konkrétní zapojení lze detailně a pracně konstruovat např. dle návodu v [21]. Nakolik jsou vícero typy DC/DC měničů s různými parametry v současnosti běžně k zakoupení v podobě integrovaných obvodů, stává se konkrétní návrh vlastního DC/DC měniče spíše záležitostí odborníků z oblasti elektroniky.

Vodícím parametrem pro volbu topologie DC/DC měniče je poměr konverze tzv. přenos, který u jednotlivých zapojení závisí na hodnotě řídicí střídavy.

Tab. 4 – Přenosové funkce vybraných neizolujících DC/DC měničů [4]

<b>topologie</b>	<b>přenosová funkce</b>
<i>buck</i>	$s$
<i>boost</i>	$\frac{1}{1-s}$
<i>buck-boost</i>	$-\frac{s}{1-s}$
<i>neinvertující buck-boost</i>	$\frac{s}{1-s}$
<i>Ćuk</i>	$-\frac{s}{1-s}$
<i>SEPIC</i>	$\frac{s}{1-s}$

Další rozbor DC/DC měničů, jeho výběr nebo případný vlastní návrh a vyhotovení pro zvolenou aplikaci je nad rámec této práce. Tento výběr je potřeba provést na základě naměřených hodnot generované elektrické energie. Dále brát do úvahy účinnost měniče a příkon ventilátoru pro chlazení pasivního chladiče studené strany.

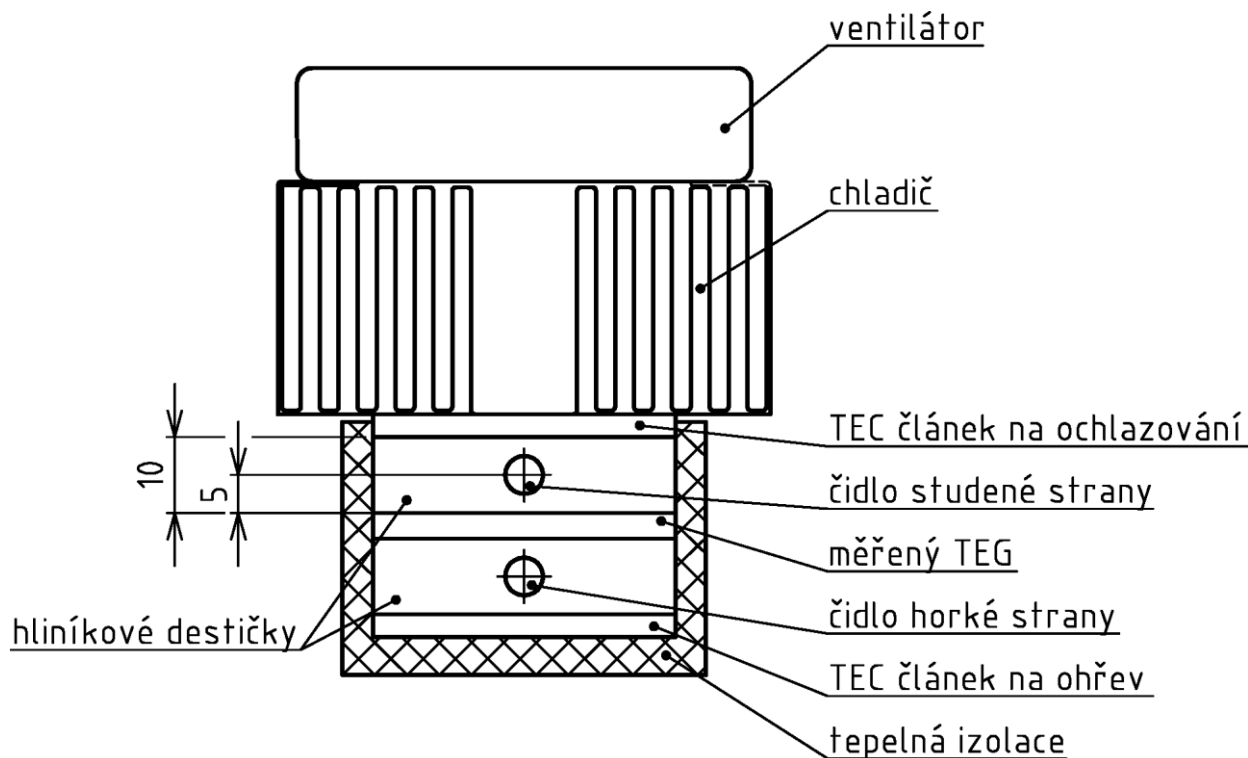
Tato problematika bude jedním z bodů dalšího zkoumání.

## 8. Měření a zpracování dat

Pro měření chování TEG článku od firmy thermalforce.de typ: TEG127-230-32, byl využit měřicí přípravek z bakalářské práce J. Kozáka (VUT FSI Brno, Bc. SZZ 2011) a jeho model vytvořen v Simulink-u byl upraven jen po stránce přepočtu čidel, jelikož se použili jiné teplotní čidla, konkrétně LM35DZ. Pomocí bloků *Relay* se nastavili hystereze pro řízení nastavených teplot. Je zřejmé, že při chlazení ale zejména ohřevu se projevuje teplotní setrvačnost soustavy. Proto se hystereze nastavila v intervalu  $0,5^{\circ}\text{C}$  pod požadovanou hodnotu.

Ohřívání a chlazení bylo vykonáno dalšími dvěma neznámými TEC články. Rovnoměrné rozložení tepla na TEG článku zabezpečovali hliníkové destičky.

Druhý pořízený článek TEG263-250-36 se touto metodou neměřil, protože má menší tepelný odpor, než měřený článek a průstup tepla touto metodou neumožňoval dosáhnout dostatečného teplotního rozdílu. Generovaná elektrická energie byla velmi malá. Proto pro zvolenou aplikaci je nepoužitelný, nakořik by bylo potřeba vodního chlazení dle doporučení výrobce.

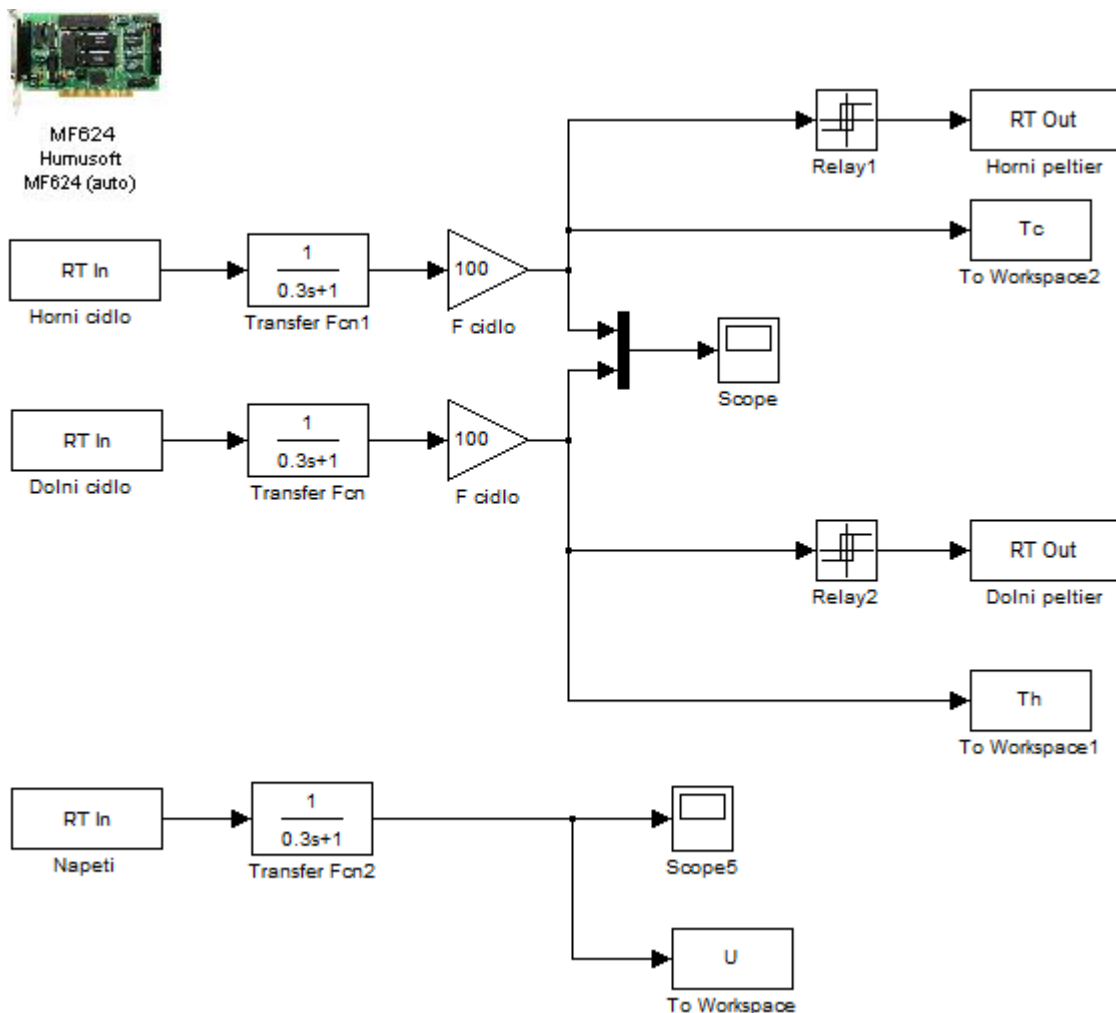


Obr. 26 – Měřicí soustava

Teplota naměřená čidlem na studené i horké straně není teplota na termodvojicích, ani teplota na povrchu TEG článku. Hliníková destička resp. její část „pod“ čidlem (směrem k měřenému TEG-u) má určitý teplotní odpor, a tak tu nastává jistý teplotní spád. Proto je vhodné soustavu uvažovat jako 3 za sebou zapojené tepelné odpory – 2x tepelný odpor od destičky a tepelný odpor TEG článku.

Hodnoty pro zavedení odporu hliníkové destičky v Simulink-u:

- plocha:  $40 \times 40 \text{ mm}^2$
- výška: 5mm (pouze mezi čidlem a měřeným TEG-em)
- tepelná vodivost:  $237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



Obr. 27 – Model měření pomocí Simulink-u (Matlab-u)

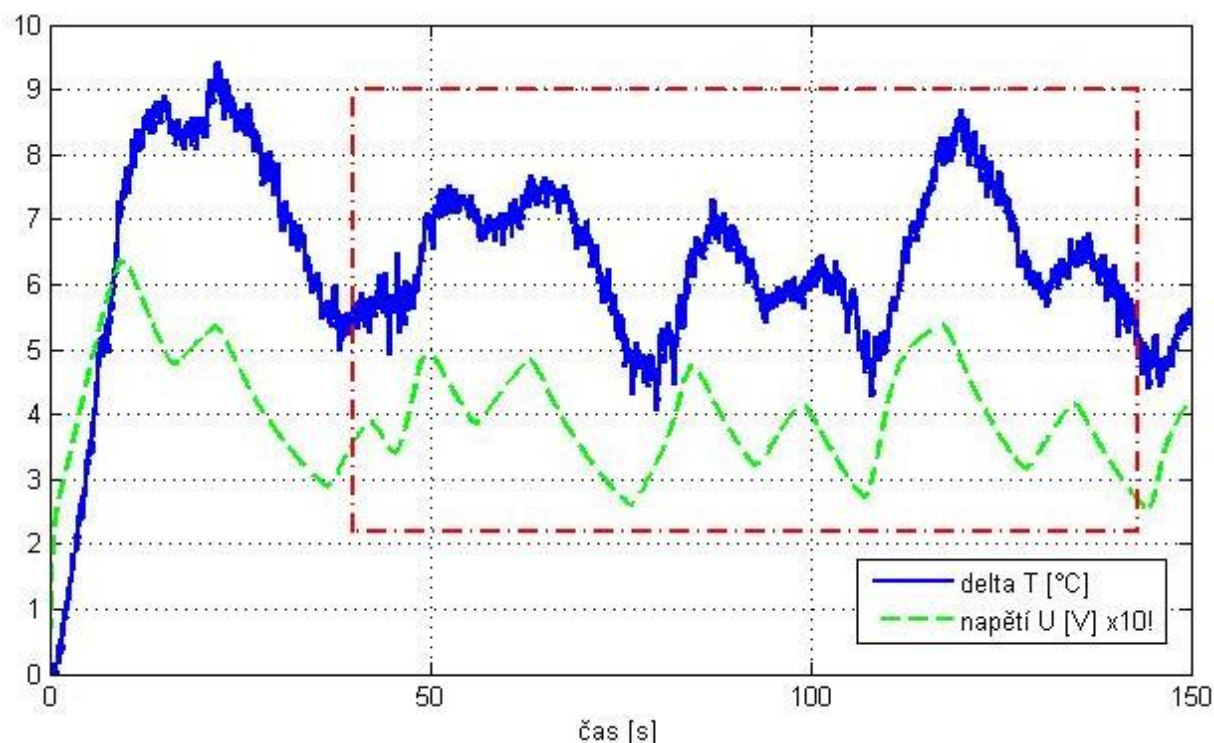
Do porovnávacího výpočtu budou zavedeny z datasheet-u TEG článku tyto hodnoty:

- tepelná konduktivita (vodivost):  $0,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- elektrický odpor:  $2,4 \Omega$
- Seebeckův koeficient spolu:  $0,062 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$

Tepelná kapacita TEG článku ani hliníkových destiček není brána do úvahy, nakolik jsou zkoumané pouze ustálené stavy. Jako teploty  $T_{hot}$  a  $T_{cold}$  jsou do výpočtu zavedeny skutečně naměřené hodnoty. Z naměřených dat se vyselektují hodnoty pouze v ustáleném stavu, který kvůli hysterezi není ideálně ustálen, ale kolísá kolem určité hodnoty. Tato hodnota se



určí aritmetickým průměrem vybraných dat. Stejným způsobem se určí i výsledné napětí na tom samém rozsahu.



Obr. 28 – Příklad výběru dat a určení hodnot

Ve vyobrazení závislosti  $\Delta T$  ( $T_{hot} - T_{cold}$ ) a  $U_0$  v čase je hodnota napětí 10x vyšší, pro lepší názornost.

Z grafu se vybere ustálená část (při tolerování hystereze). V ukázkovém případě čas 40 až 143s. Naměřené data se na základě těchto hranic „oříznou“ a vypočte se průměrná hodnota jednotlivých veličin:

- $T_{hot} = 35,8727 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{cold} = 29,5044 \text{ }^\circ\text{C}$
- $U_0 = 0,3883 \text{ V}$

Na porovnání se dopočítají hodnoty napětí simulací analytického řešení pomocí modelu v Simulink-u, aby se zjistila správnost teoretických poznatků v praxi.

Při simulování průběhu měření je potřeba uvažovat ještě tepelný odpor kontaktu hliníkových desek s článkem. Hodnotu tohoto odporu určíme:

$$R_{contact} = \frac{1}{k \cdot S_{TEG}} \quad (28)$$

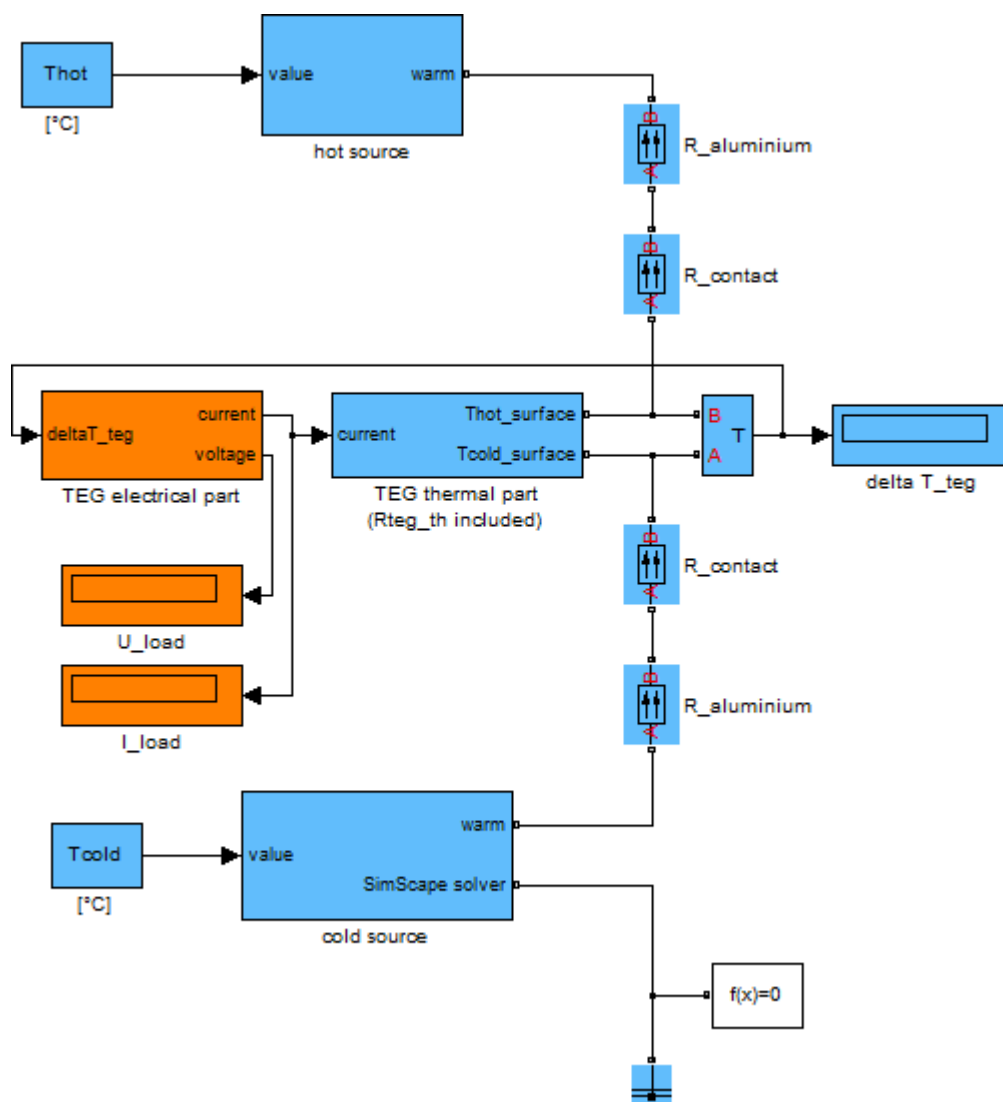
- kde
- $R_{contact} [\text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$  - tepelný odpor v doteku
  - $S_{TEG} [\text{m}^2]$  - velikost kontaktní plochy;  $S = 40^2 \text{ mm}^2 = 0,0016 \text{ m}^2$
  - $k [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$  - koeficient tepelné kontaktní vodivosti;  $k = 10\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Do Simulink-u se zadává převrácená hodnota tepelného odporu, která se nazývá tepelnou vodivostí.

## 8.1. Matematický model měření

Na základě výše uvedeného rozboru měření, byl pro simulaci analytického řešení ustáleného stavu sestaven model (obr. 29) pomocí programu Matlab a jeho části Simulink – SimMechanics. V blocích *hot source* a *cold source* se nachází programové bloky pro převod číselné hodnoty, na fyzikální vedení tepla, přepoččet ze °C do K a teplotní reference (vysvětleno v kap. 6.3.).

TEG článek je rozdělen na tepelnou a elektrickou část, které se vzájemně ovlivňují. V tepelné části jsou zahrnuty i zdroje Joulova tepla i tepla absorbovaného a emitovaného na termodvojicích při generování elektrické energie. V elektrické části je zahrnut vnitřní elektrický odpor TEG-u i elektrický odpor zátěže. Ten je v subsystému *TEG electrical part* zahrnut, i když ve skutečnosti se nachází vně TEG článku. Pro případ měření naprázdno je ovšem potřeba, aby byl elektrický obvod uzavřen, a tak se použije hodnota odporu zátěže 10 MΩ, což lze v elektrické praxi považovat za stav „rozpojeno“. Takto lze realizovat analytické řešení měření napětí naprázdno.

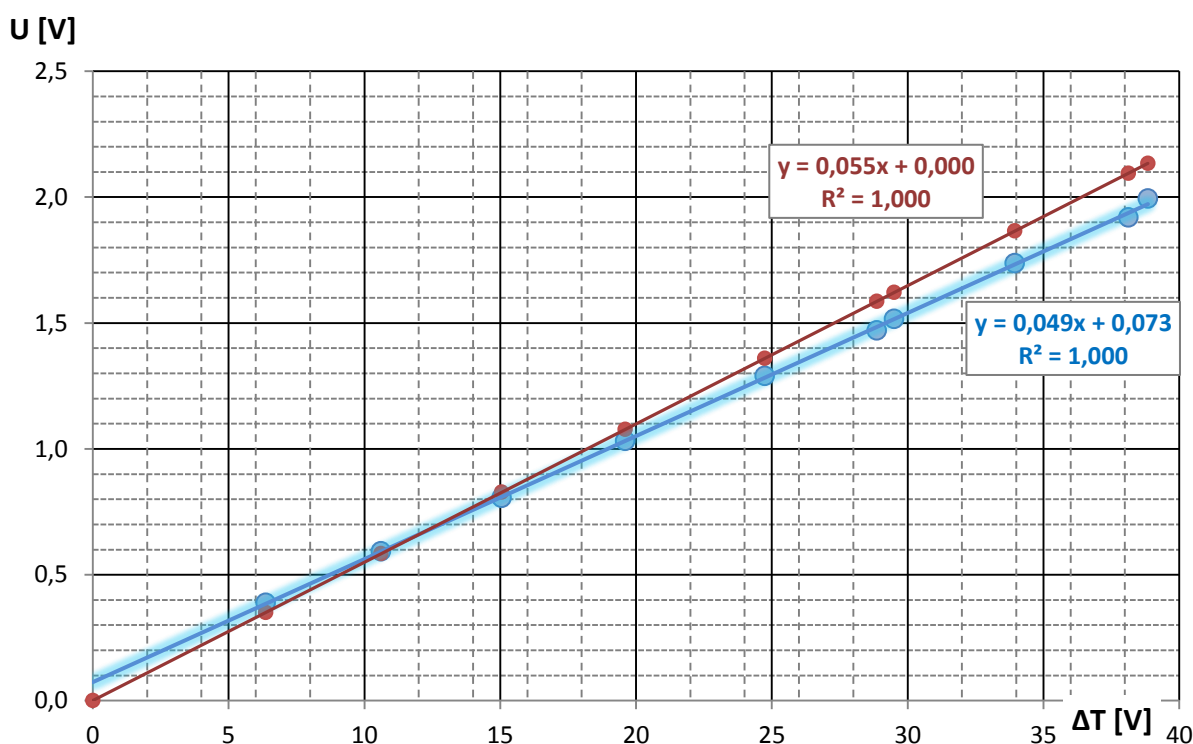


Obr. 29 – Výpočtový model skutečné měřicí soustavy

## 8.2. Měření naprázdno

Tab. 5 – Hodnoty naměřené a nasimulované při  $R_{load} = \infty \Omega$ , ( $R_{load}$  výpočet = 10 M $\Omega$ )

nastaveno			naměřeno				vypočteno	$U_0 / U_v$ [%]
$\Delta T$ [°C]	$T_c$ [°C]	$T_h$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$T_{cold}$ [°C]	$T_{hot}$ [°C]	$U_0$ [V]	$U_v$ [V]	
5	30	35	6,3683	29,5044	35,8727	0,3883	0,3498	111,00
10	30	40	10,6148	30,0052	40,6200	0,5922	0,5831	101,55
15	30	45	15,0590	30,2194	45,2784	0,8049	0,8272	97,31
20	30	50	19,6100	30,4272	50,0371	1,0310	1,0772	95,71
25	35	60	24,7470	35,0885	59,8356	1,2895	1,3594	94,86
30	35	65	28,8688	35,6302	64,4990	1,4696	1,5858	92,67
30	40	70	29,5083	39,9722	69,4805	1,5158	1,6210	93,51
35	40	75	33,9481	40,2758	74,2239	1,7362	1,8648	93,10
40	40	80	38,1287	41,0007	79,1294	1,9182	2,0945	91,58
40	45	85	38,8482	45,2549	84,1031	1,9931	2,1340	93,40



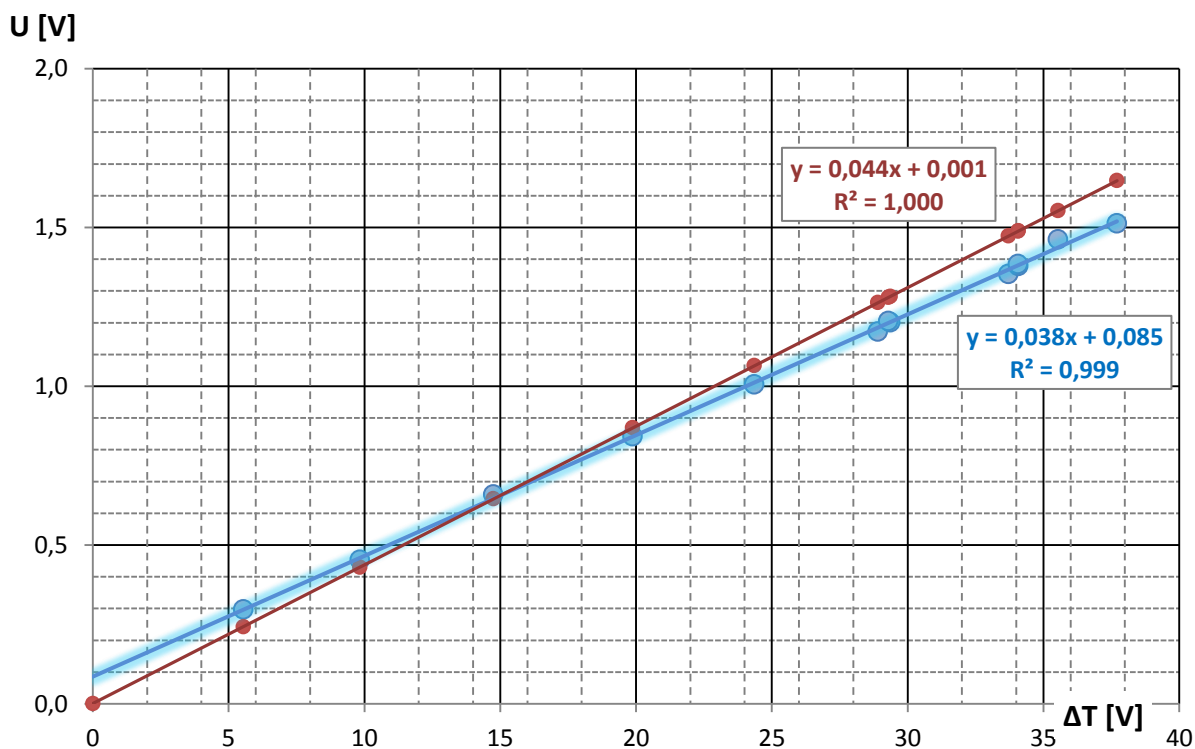
Obr. 30 – Měření naprázdno (vypočtené, naměřené)

Na základě vztahu (4), pro výpočet napětí generovaného TEG článkem, lze z naměřeného vidět, že dle teoretického výpočtu se Seebeckův koeficient uváděný výrobcem vlivem provedení měřicí soustavy a tepelných odporů „sníží“ z  $0,062 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$  vyčíslených pouze pro TEG článek na  $0,055 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$  pro celou soustavu. V praxi zpětně ze zlinearizované závislosti (při 99,96% shodě s měřením) napětí na rozdílu teplot se vypočte Seebeckův koeficient pouze  $0,049 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$ . Přesnost měření vůči výpočtu je  $96,47 \pm 5,86\%$ . Vzhledem na možné nepřesnosti (čidel, měřicí karty, resp. jiné parazitní jevy) lze výpočet požadovat za správný.

### 8.3. Měření se zátěží

Tab. 6 – Hodnoty naměřené a nasimulované při  $R_{load} = 10 (\pm 1\%) \Omega$

nastaveno			naměřeno				vypočteno		$U_0 / U_v$ [%]
$\Delta T$ [°C]	$T_c$ [°C]	$T_h$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$T_{cold}$ [°C]	$T_{hot}$ [°C]	$U_0$ [V]	$U_v$ [V]		
5	30	35	5,5488	29,7149	35,2637	0,2970	0,2427	122,37	
10	30	40	9,8368	30,2606	40,0973	0,4531	0,4303	105,30	
15	30	45	14,7539	30,1420	44,8959	0,6587	0,6453	102,08	
20	30	50	19,8751	30,0899	49,9650	0,8423	0,8692	96,91	
25	35	60	24,3571	35,2422	59,5993	1,0053	1,0648	94,41	
30	35	65	28,9053	35,4968	64,4021	1,1717	1,2635	92,73	
30	40	70	29,3573	40,0288	69,3860	1,2013	1,2830	93,63	
30	45	75	29,2881	45,0902	74,3783	1,2051	1,2798	94,17	
35	40	75	33,7117	40,5023	74,2140	1,3530	1,4732	91,84	
35	45	80	34,0811	45,0362	79,1173	1,3782	1,4890	92,55	



Obr. 31 – Měření se zátěží  $R_{load} = 10\Omega$  (vypočtené, naměřené)

Z naměřeného průběhu je vidět, že dle teoretického výpočtu se Seebeckův koeficient „sníží“ z  $0,062 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$  (pouze pro TEG) na  $0,044 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$  (pro celou měřicí soustavu). V praxi zpětně ze zlinearizované závislosti (při 99,93% shodě s měřením) napětí na rozdílu teplot se vypočte Seebeckův koeficient pouze  $0,038 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$ . Přesnost měření vůči výpočtu je  $97,31 \pm 8,56\%$ . Vidíme, že při nastaveném rozdílu  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  je přesnost znatelně odlišná než při ostatních měřeních. V případě zanedbání tohoto jedno měření, je přesnost výpočtu  $95,22 \pm 4,24\%$ . Vzhledem na možné nepřesnosti lze výpočet pomocí matematického modelu považovat za správný.

## 8.4. Zhodnocení měření

Toto měření bylo úspěšné, protože se ověřila platnost teorie se skutečností. Nejdůležitějším poznatkem zjištěným při měření je skutečnost, že největším problémem termoelektrického generátoru je uchládit jeho studenou stranu za běžných podmínek a běžných chladících metod. Toto je citelný problém zejména díky značnému prostupu tepla TEG článkem z horké strany na studenou. Při výše vyčísleném měření se již při rozdílu  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$  chladila horká strana chladícího TEC článku pomocí 5 ventilátorů, které měli spolu příkon víc než 8W. Při použité konfiguraci by nejspíš jenom 3 ventilátory měli stejný chladící účinek, přičemž spotřeba elektrické energie pouze na chlazení by byla pořád značná. Při zmíněném rozdílu se z naměřených dat museli vzít pouze data v „přechodové části“, protože po delší době měření se horká strana na měřeném TEG článku začala značně ovlivňovat jeho studenou stranu a další (chladící) TEC článek to nedokázal za žádnou cenu.

Teoretický výpočet v rozmezí do 10% souhlasí s naměřenými daty, co lze považovat za úspěšné. Tato nepřesnost by se možná dala dále snížit nebo odstranit některým z následujících způsobů:

- přesnějším určením odporu hliníkové destičky, nakolik je počítáno s tepelnou konduktivitou čistého hliníku a také se počítá s výškou masy jako polovina hliníkové destičky
- nepřesnost čidel, kterou uvádí výrobce
- rozložení tepla na čidle
- odpozorované časové opoždění čidel LM35DZ vnáší další nepřesnost
- rušení a nepřesnost karty Humusoft MF624 nakolik se jedná o rozlišení pouze  $10\text{mV}/1^{\circ}\text{C}$
- dodatečným rozložením tepelného odporu TEG článku na odpor keramických destiček a termodvojic spolu s pojivem a měděnými vodiči

Ve výpočtu se původně uvažovalo, zda-li hodnota tepelné vodivosti příp. tepelného odporu uváděna výrobcem je hodnota tepelného odporu pouze termodvojic nebo celého článku (termodvojice + pojivo + keramické desky). Analýzou výpočtu se dospělo k závěru, že hodnota tepelného odporu a k němu převrácená hodnota tepelné vodivosti, stejně tak i elektrický odpor se stahují na TEG článek jako na celek.

## 9. Závěr

V uvedeném textu byly nejdříve vysvětleny základní principy termoelektrických jevů (kap. 3) a termoelektrických článků (kap. 4). Jejich osvojení si je základem pro pochopení dalších kapitol.

Hlavním cílem této práce bylo navržení a zprovoznění termoelektrického generátoru v praktické aplikaci jako pohotovostní nabíječka. Návrh musel zohledňovat několik kritérií, které jsou rozebrány v kap. 5. Následně byl sestaven matematický model a jeho provedení pomocí programu Matlab a jeho součásti Simulink/SimMechanics. Jeho rozbor a sestavení jsou uvedeny v kap. 6. Na základě generované elektrické energie by se měla zhotovit elektronika tak, aby plnila svůj účel. Rozbor DC/DC měničů se nachází v kap. 7.

Nakolik se údaje od výrobců nemusí shodovat se skutečným výrobkem, nebo s teorií v kap. 8 jsme se věnovali měření a zpracování naměřených dat. Zde jsme využili přípravku z bakalářské práce J. Kozáka a pomocí komunikační karty Humusoft MF624 a programu Matlab/Simulink jsme proměřili funkčnost TEG článků. Používali jsme termoelektrické generátory od firmy thermalforce.de. Jejich měřením se zjistilo, že článek TEG263-250-36 je pro jeho malý tepelný odpor pro náš návrh nepoužitelný a článek TEG127-230-32 nám vygeneruje lepší hodnoty elektrické energie, ale z důvodu nedostatečného chlazení nastává teplotní prostup a množství generované elektrické energie je pořád nedostatečné.

Nakolik jsou na trhu takového nabíječky k sehnání, bude se v této práci nadále pokračovat, aby se prozkoumali účinnější možnosti chlazení. Výrobcem doporučené vodní chlazení, by pro naše zařízení nebylo vhodné. Po vyřešení tohoto problému se přistoupí k vyřešení elektroniky pro usměrnění a stabilizaci pro cílové použití. Toto bude předmětem dalšího zkoumání.

Hlavní nevýhodou termoelektrických článků je jejich nízká účinnost a náročnost na dosažení dostatečného teplotního gradientu. I tak se najdou jejich zajímavé aplikace jako např. zdroj napájení pro bezdrátové snímání různých fyzikálních veličin nebo pro využívání odpadového tepla z výfuku motoru.

## 10. Seznam použitých zdrojů

- [1] GOLDSMID, H. *Introduction to thermoelectricity*. New York: Springer, 2010, 242 s. ISBN 978-3-642-00715-6.
- [2] Termoelektrický jev. 2006. [online], [rev. 2012-02-10], [cit. 2012-04-04]. URL <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrický\\_jev](http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrický_jev)>
- [3] ROWE, David Michael. *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. Boca Raton: CRC/Taylor, 2006. ISBN 08-493-2264-2.
- [4] MOLAN, Li: *Thermoelectric-Generator-Based DC-DC Conversion Network for Automotive Applications*. 2010, 71 s., KTH Royal Institute of Technology, Stockholm
- [5] Peltierův článek. 2006. [online], [rev. 2011-08-20], [cit. 2012-04-04]. URL <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltierův\\_článek](http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltierův_článek)>
- [6] SYNDER, Jeff. *Thermoelectrics* [online]. [cit. 2012-04-04]. URL <<http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics>>
- [7] SYNDER, Jeff. *Thermoelectrics Engineering* [online]. [cit. 2012-04-04]. URL <<http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/engineering.html>>
- [8] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky: Termoelektrické články* [online]. [rev. 2009-02-19], [cit. 2012-04-04] URL <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/909-termoelektricke-clanky>>
- [9] KARAMAZOV, Simeon. *Interakce bodových poruch ve vybraných krystalech tetradymitové struktury*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2007, 56 s. ISBN 978-80-7395-012-5.
- [10] Nextreme Thermal Solutions, Inc. [online]. [cit. 2012-04-04]. URL <[www.nextreme.com](http://www.nextreme.com)>
- [11] thermalforce.de [online]. [cit. 2012-05-05]. URL <[www.thermalforce.de](http://www.thermalforce.de)>
- [12] MCCARTY, R. *Optimized, Low  $\Delta T$  Thermoelectric Energy Harvesters for Water, Air or Solid Heat Sources and Sinks*. In *sensor expo & conference, Rosemont IL, 6. - 8. června 2011*. [online]. [cit. 2012-04-04] URL <<http://www.sensormag.com/sensors-expo/symposium2optimizedlowthermoeletricenergyharvesters>>
- [13] BRÁZDIL, M.: *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

- [14] *Review MACS Triumph Deluxe*. 2011. [online]. [cit. 2012-04-04]  
URL <<http://www.madboxpc.com/contenido.php?id=2690>>
- [15] MALÁK, L.: *BMW získava elektrinu z tepla výfuku*. [online], [rev. 2011-09-03], [cit. 2012-04-04]  
URL <<http://www.automoto.sk/galeria/3636/?foto=0>>
- [16] BENECKE, S.: *Modeling and optimization of energy harvesting-systems under non-ideal operating temperatures with regard to availability of power-supply and reduction of environmental impacts*. In *IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference: Lake Buena Vista, Florida, USA, 31. květen - 3. červen 2011*. [online]. [cit. 2012-05-05]  
URL <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05898741&tag=1>>
- [17] ELING BOHEMIA, s.r.o. [online]. [cit. 2012-04-04]  
URL <[www.eling.cz](http://www.eling.cz)>
- [18] Fischer Elektronik GmbH und Co. KG [online]. [cit. 2012-04-04]  
URL <[www.fischerelektronik.de](http://www.fischerelektronik.de)>
- [19] VLACH, Radek. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 94 s. ISBN 978-80-214-3976-4.
- [20] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006. ISBN 80-214-1868-0.
- [21] PATOČKA, M.: *Vybrané statě z výkonové elektroniky – svazek II: Měniče bez impulsního transformátoru*, 4. vyd. Brno: Novpress, 2010. 100 s., ISBN: 978-80-214-4177-0
- [22] KOZÁK, J.: *Termoelektrický generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vlach, Ph.D..
- [23] Mathworks: *MATLAB Help*. [online]  
URL <<http://www.mathworks.com/help/techdoc>>
- [24] *User's manual - MF 624 multifunction I/O card*. [online]  
URL <<http://www2.humusoft.cz/www/datacq/manuals/mf624um.pdf>>
- [25] *Temperature Sensors LM35 – Datasheet*. [online]  
URL <<http://www.gme.cz/dokumentace/313/313-909/dsh.313-909.1.pdf>>
- [26] VUT Brno: *Citace Pro*. [online]  
URL <<http://citace.lib.vutbr.cz>>



## 11. Seznam seznam použitých zkratk a symbolů,

$\alpha$	$[\text{V}\cdot\text{K}^{-1}]$	Seebeckův (také termoelektrický) koeficient
$\alpha_p$	$[\text{V}\cdot\text{K}^{-1}]$	Seebeckův koeficient materiálu typu P
$\alpha_n$	$[\text{V}\cdot\text{K}^{-1}]$	Seebeckův koeficient materiálu typu N
$\kappa$	$[\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}]$	tepelná vodivost
$\eta$	[%]	účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou
$\Pi_{(pn)}$	$[\text{V}\cdot\text{K}^{-1}]$	Peltierův koeficient termočlánku
$\rho$	$[\Omega\cdot\text{m}]$	rezistivita (měrný elektrický odpor) vodiče
$\sigma$	$[\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}]$	konduktivita (měrná elektrická vodivost) vodiče; $\sigma = \rho^{-1}$
$C_c, C_{ceramics}$	$[\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná kapacita keramické desky TEG článku
$C_{pn}$	$[\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná kapacita termodvojic uvnitř TEG článku
$C_{pn/2}$	$[\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná kapacita termodvojic uvnitř článku rozdělená na 2 strany
$C_{sis}, C_{sink}$	$[\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná kapacita chladiče
$C$	[F]	kapacita kondenzátoru
$h_{cer}$	[mm]	tloušťka jedné keramické desky TEG článku
$i(t)$	[A]	protékající elektrický proud (průběh v čase)
$I$	[A]	elektrický proud
$I_K$	[A]	proud nakrátko
$k$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	koeficient tepelné kontaktní vodivosti
$l_{TEG}$	[mm]	délka strany TEG článku čtvercového profilu
$offsetT$	[K]	rozdíl teplotné stupnice ve °C a K
$P$	[W]	generovaný elektrický maximální možný výkon na zátěži,
$q$	[W]	tepelný tok
$q_c$	[W]	teplo absorbované na studené straně termodvojic
$q_h$	[W]	teplo emitované na teplé straně termodvojic
$q_J$	[W]	Joulovo teplo
$q_{J/2}$	[W]	Joulovo teplo rozdělené na každou stranu TEG článku
$q_{so}$	[W]	tepelný tok od zdroje tepelné energie
$q_{input}$	[W]	celkový tepelný tok vstupující do TEG článku
$q_{output}$	[W]	celkový tepelný tok vystupující z TEG článku
$R$	$[\Omega]$	elektrický odpor
$R_{cor}$	$[\Omega]$	upravená hodnota vnitřního elektrického odporu TEG článku
$R_{load}$	$[\Omega]$	elektrický odpor zátěže
$R_{TEG_e}$	$[\Omega]$	elektrický odpor TEG článku
$R_{TEG_{th}}$	$[\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$	tepelný odpor TEG článku
$R_{contact}$	$[\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$	tepelný odpor v doteku
$R_{si}, R_{sink}$	$[\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$	tepelný odpor chladiče
$R_{so}, R_{source}$	$[\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$	tepelný odpor zdroje tepla
$R_b, R_{touch}$	$[\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$	kontaktní tepelný odpor mezi chladičem a studenou stranou TEG -u
$R_{\vartheta}$	$[\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]$	tepelný odpor
$s$	[1]	střída
$S_{TEG}$	$[\text{m}^2]$	velikost kontaktní plochy
$t$	[s]	perioda
$t_{on}$	[s]	doba zapnutí signálu („logická 1“)
$T$	[K]	průměrná (střední) absolutní teplota na termočlánku
$T_a, T_{ambient}$	[°C; K]	teplota okolí

$T_c, T_{cold}$	[°C; K]	teplota studené strany
$T_h, T_{hot}$	[°C; K]	teplota teplé strany
$T_{so}, T_{source}$	[°C; K]	teplota zdroje
$T_t, T_{touch}$	[°C; K]	teplota v dotyku chladiče se studenou stranou TEG článku
$\Delta T$	[K]	rozdíl teplot
$u(t)$	[V]	elektrické napětí (průběh v čase)
$U$	[V]	elektrické napětí
$U_0$	[V]	elektromotorické napětí naprázdno
$Z \cdot T$	[1]	termoelektrický merit generátoru
$z \cdot T$	[1]	termoelektrický merit materiálu

## 12. Seznam příloh

### **Příloha A**

*Obrazová příloha – termo-elektrický model soustavy za praktického využití TEG článku*

### **Příloha B**

CD s následujícími soubory:

*TEGdata.m*

skript programu Matlab, obsahuje parametry článku TEG127-230-32 (thermalforce.de)

*mereni\_komunikace.mdl*

model pro komunikaci, měření a sběr naměřených dat v programu Matlab/Simulink

*mereni\_MatModel.mdl*

model analytického řešení měřicí soustavy v programu Matlab/Simulink

*soustava\_MatModel.mdl*

model analytického řešení tepelno-elektrické soustavy praktického využití TEG článku

*Datasheet - Temperature Sensors LM35.pdf*

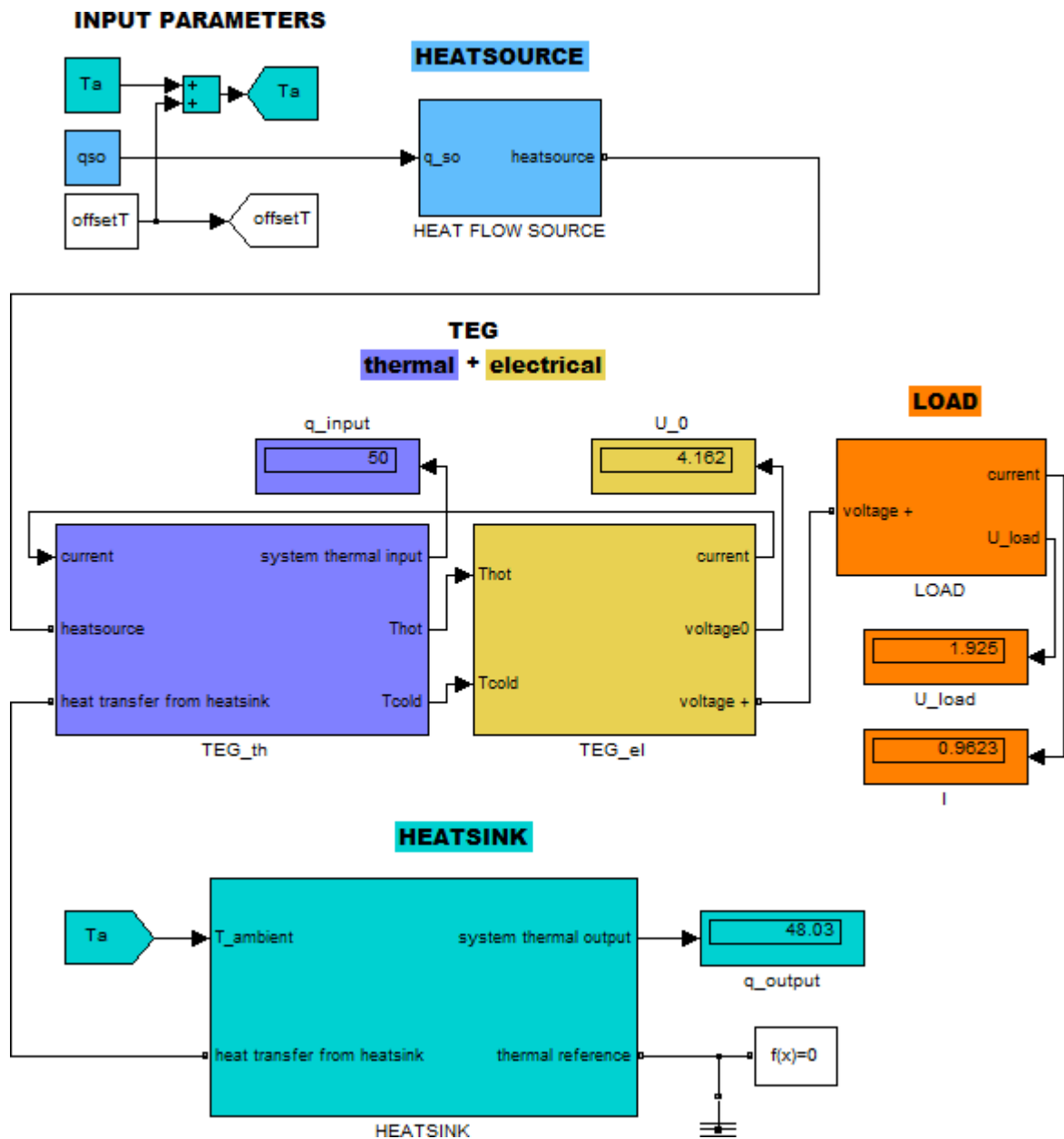
manuál k teplotním čidlům LM35DZ

*User's manual - MF 624 multifunction IO card.pdf*

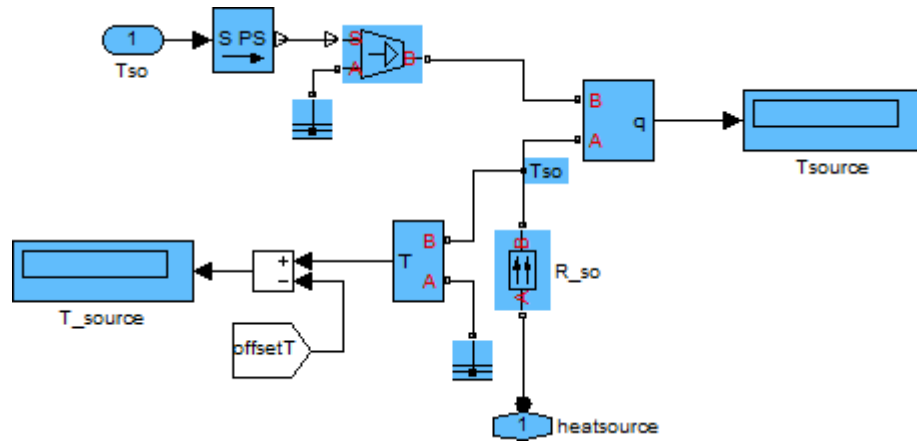
manuál ke komunikační PC kartě

# Příloha A

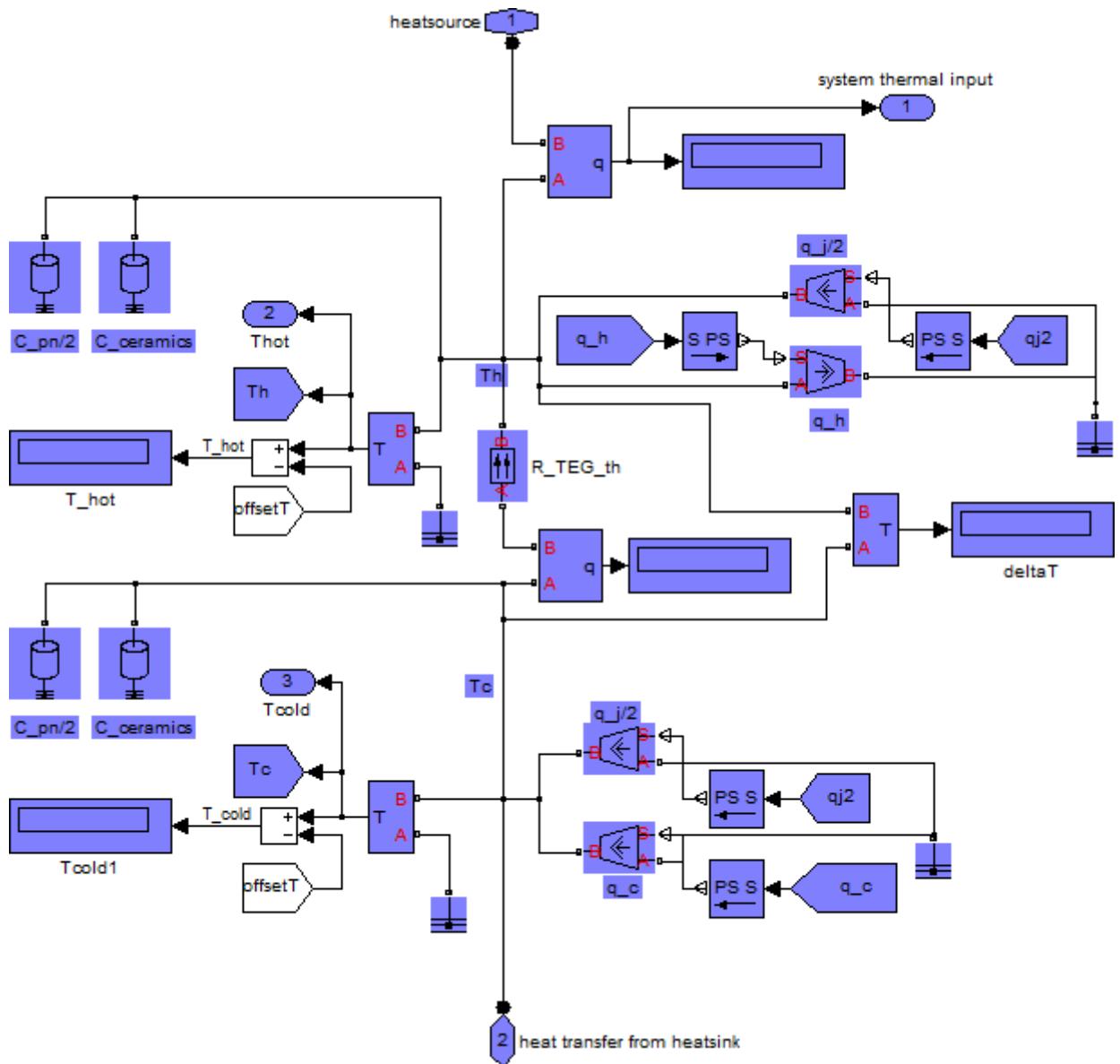
Obrazová příloha – termo-elektrický model soustavy za praktického využití TEG článku



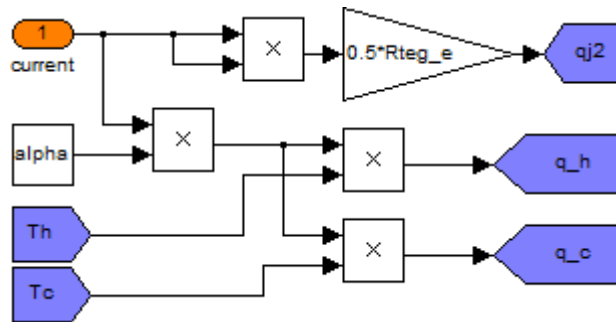
Obr. A1 – Model měření TEG článku v praxi v programu Matlab/Simulink/Simscape



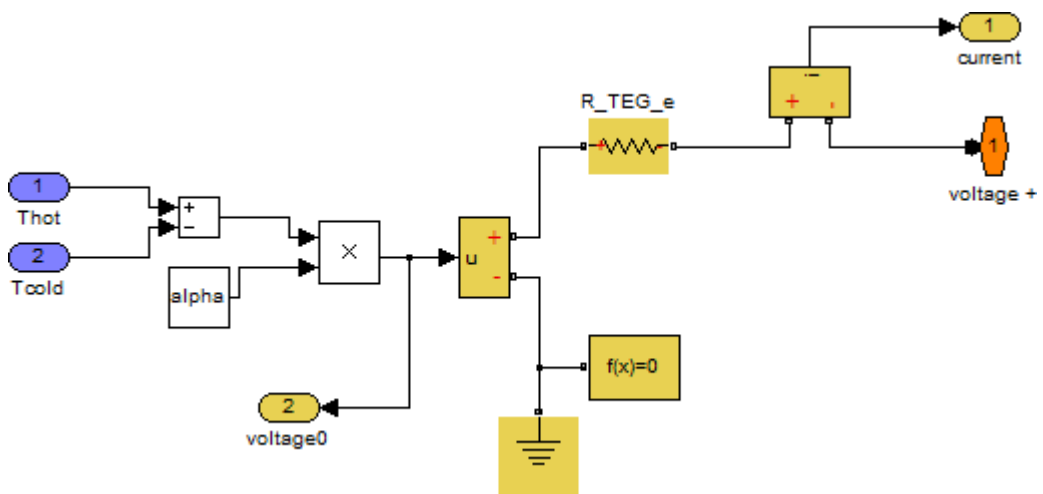
Obr. A2 – Subsystem HEAT FLOW SOURCE



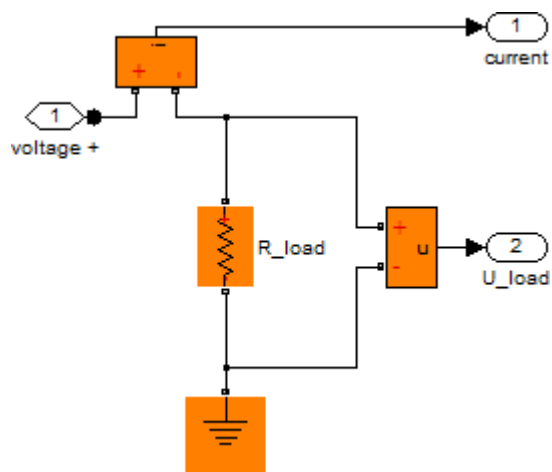
Obr. A3 – Tepelná větva v subsystemu TEG\_th



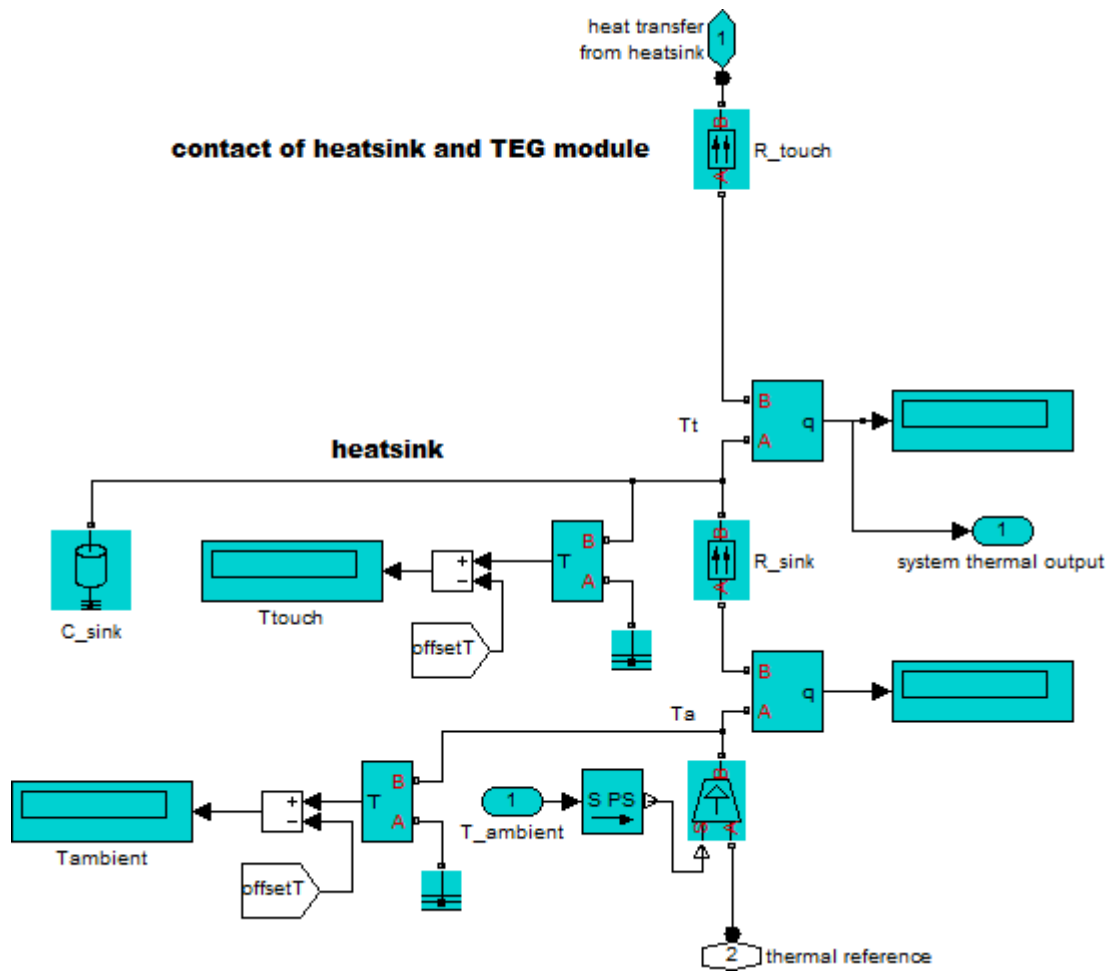
Obr. A4 – Výpočet vzniknutých tepelných toků v subsystému TEG\_th



Obr. A5 – Subsystém TEG\_e



Obr. A6 – Subsystém LOAD



Obr. A7 – Subsystem HEATSINK