



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TERMoeLEKTRICKÝ GENERÁTOR MALÉHO VÝKONU

LOW POWER THERMOELECTRIC GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB LOKAJ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARIAN BRÁZDIL

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Lokaj

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

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

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

Termoelektrický generátor malého výkonu

v anglickém jazyce:

Low power thermoelectric generator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce zhodnocuje možnosti využití termoelektrických modulů jako autonomních zdrojů elektrické energie pro energeticky nenáročné aplikace.

Cíle bakalářské práce:

1. Popis principů termoelektrické přeměny
2. Volba parametrů termoelektrického generátoru pro konkrétní nízkoenergetickou aplikaci
3. Návrh a realizace termoelektrického generátoru
4. Experimentální stanovení reálných provozních parametrů

Seznam odborné literatury:

1. ROWE, D. M. (ed.). Thermoelectrics handbook : macro to nano. 1st ed. [Boca Raton] : CRC Press, 2006. 1014 s. ISBN 978-0849322648.
2. GOLDSMID, H. J. Introduction to thermoelectricity. Heidelberg : Springer, 2009. 242 s. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-3-642-00715-6.
3. ROWE, D. M. (ed.). Thermoelectrics and its Energy Harvesting, 2-Volume Set: Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. 1 st ed. ISBN 978-1-4398
4. Odborné články z vědeckých databází ScienceDirect, SpringerLink, Knovel a IEEEExplore

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marian Brázdil

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.10.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá popisem fyzikální podstaty přeměny tepelné energie na energii elektrickou a konstrukcí termoelektrického generátoru. Práce je rozdělena na teoretickou část, praktickou část zahrnují konstrukci a experimentální měření vyrobeného zařízení a závěrečné zhodnocení práce. V teoretické části jsou popsány termoelektrické jevy, vlastnosti materiálů používaných pro výrobu termoelementů, konstrukce a elektrické parametry termoelektrických modulů a aplikace termoelektrických generátorů včetně popisu částí dotvářejících celkové zařízení. Praktická část obsahuje návrh a konstrukci termoelektrického generátoru malého výkonu a experimentální měření zapojeného zařízení s porovnáním výpočtu předpokládaného výkonu. V závěru jsou kromě zhodnocení práce také nastíněny možné návrhy dalšího vylepšení zařízení.

Abstract

The bachelor thesis deals with the description the physical nature of the conversion of thermal energy into electrical energy and construction of thermoelectric generator. The work is divided into a theoretical part, practical part includes the design and experimental measurement constructed device and final assessment of thesis. The theoretical part describes the thermoelectric phenomena, properties of materials used for the manufacture of thermocouple, construction and electrical parameters of thermoelectric modules and applications of thermoelectric generators including a description of parts of which help to complete overall device. The practical part includes the design and construction of low power thermoelectric generator and experimental measurement connected device with the calculation comparing the predicted performance. In conclusion, besides to assessment thesis also outlines suggestions for further improvements the device.

Klíčová slova

Termoelektrický generátor, termoelektrický modul, termoelektrické jevy, Seebeckův jev, termoelektrické materiály, DC/DC měnič, elektřina, termoelektrické aplikace, Energy harvesting, senzory

Key words

Thermoelectric generator, thermoelectric module, thermoelectric phenomenons, Seebeck effect, thermoelectric materials, DC/DC converter, electricity, thermoelectric applications, Energy harvesting, sensors

Bibliografická citace

LOKAJ, J. *Termoelektrický generátor malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marian Brázdil.

Prohlášení

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

V Brně dne 24. 5. 2013

.....
Jakub Lokaj

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli při vypracování bakalářské práce nápomocni. Obzvlášť bych chtěl poděkovat Ing. Marianu Brázdilovi za vstřícný přístup, odborné vedení, poskytnutí materiálů a cenné rady k této bakalářské práci, Ing. Ladislavu Šnajdárkovi a Ing. Petru Kracíkovi za výpomoc při zapojování a připravování vyrobeného zařízení k experimentálnímu měření, Ondřeji Brenkusovi za cenné připomínky a rady při konstrukci zařízení a mé rodině za podporu, kterou mi při celkovém studiu poskytla.

Obsah

1	Úvod.....	10
Teoretická část		
2	Historie objevování termoelektrických jevů a termoelektriny	11
3	Termoelektrické jevy	13
3.1	Seebeckův jev	13
3.2	Peltierův jev	14
3.3	Thomsonův jev	15
3.4	Vztahy mezi termoelektrickými koeficienty	16
3.5	Nernstův a Ettingshausenův jev	16
4	Termoelektrické články	19
4.1	Popis a základní rozdělení	19
4.1.1	Termočlánky pro měření teploty	19
4.1.2	Termoelektrické moduly	20
4.2	Termoelektrické materiály	23
4.2.1	Elektrická vodivost polovodičů	25
4.2.2	Tepelná vodivost polovodičů	28
4.2.3	Seebeckův koeficient polovodičů	29
4.3	Koeficient termoelektrické účinnosti – Merit	29
4.4	Výkon termoelektrického modulu	30
4.5	Účinnost termoelektrického modulu	33
4.6	Životnost termoelektrického modulu	34
5	Termoelektrický generátor elektrické energie	36
5.1	DC/DC měniče	36
5.2	Akumulace elektrické energie – tenkovrstvé baterie	37
5.3	Senzory	38
5.3.1	Klasifikace senzorů	38
5.3.2	Teplotní senzory	38
5.3.3	Chemické senzory	39
5.4	Aplikace termoelektrického generátoru	40
5.4.1	Energy Harvesting zařízení	40
5.4.2	Biomedicínská zařízení	45
Praktická část		
6	Návrh a konstrukce termoelektrického generátoru	47
6.1	Volba a parametry termoelektrického modulu	47
6.2	Návrh konstrukce výměníku tepla	48
6.2.1	Konstrukce teplosměnných elementů výměníku	49
6.2.2	Konstrukce dílů pro přívod kapaliny	50
6.3	CFD simulace termoelektrického generátoru	51
6.3.1	DC/DC měnič – Microchip MCP1640	52
6.3.2	Návrh desky plošného spoje pro DC/DC měnič MCP1640	54
7	Experimentální měření reálných parametrů a zpracování dat	55
7.1	Vyhodnocení naměřených a vypočítaných hodnot	56
7.2	Grafické zpracování naměřených a vypočítaných hodnot	57
Závěrečná část		
8	Návrhy na další vylepšení zařízení	61
8.1	Bez zásahu do designu	61
8.2	Se zásahem do designu	61

9 Závěr	62
Seznam použitých zdrojů	63
Seznam obrázků a grafů	67
Seznam použitých veličin a symbolů	69
Seznam příloh.....	71

1 Úvod

Termoelektrické moduly nabývají v dnešní době více a více na popularitě. Jejich cena se stále snižuje a tak jejich potenciál pro aplikace v mikroelektronice či bezdrátových zařízeních začíná stále narůstat. V nynější době, kdy je kladen důraz na efektivnější výrobu elektrické energie a hospodaření s ní, mohou termoelektrické moduly nabídnout zajímavá řešení například při využití odpadního tepla z výkonných elektráren či v menších decentralizovaných kogeneračních jednotkách. Na scénu také přichází využití termoelektrických článků pro generování elektrické energie (TEG) z okolního prostředí v tzv. Energy harvesting zařízeních, kde z malého teplotního gradientu získáme potřebnou energii pro napájení daného spotřebiče, kterým může být například čidlo nebo senzor, a to aniž bychom potřebovali jiný zdroj elektrické energie například z primárních chemických článků nebo ze sítě.

Termoelektrický generátor je zařízení, které dokáže pomocí termoelektrických jevů transformovat tepelnou energii v energii elektrickou. Mezi výhody tohoto generátoru patří absence pohyblivých částí, jednoduchost, spolehlivost, tichý provoz a relativně dlouhá životnost bez nutnosti pravidelné údržby. Na druhou stranu zařízení dosahuje nízké účinnosti přeměny tepla na elektrickou energii, což v podstatě brání jeho masivnějšímu rozšíření. V současné době probíhá řada výzkumu, které mají za cíl nalézt vhodné materiály s vysokou termoelektrickou účinností, jež dopomůžou k prosazení termoelektrických generátorů v mnoha průmyslových aplikacích a oblastech pro využití odpadního tepla.

V následujících kapitolách budou popsány a vysvětleny historické objevy termoelektriny a jednotlivé termoelektrické jevy. Dále budou popsány vlastnosti materiálů pro výrobu termoelementů, konstrukce termoelektrického generátoru a jeho aplikace.

2 Historie objevování termoelektrických jevů a termoelektřiny

Jako první objevitel termoelektrického jevu se označuje estonsko-německý fyzik Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831), který roku 1823 dokázal, že díky ohřívání spoje dvou vodičů rozdílných materiálů dochází k vychylování stříčky magnetického kompasu. Později však bylo objeveno, že vznikající magnetické pole je způsobeno indukovaným elektromotorickým napětím a proudem procházejícím těmito dvěma vodiči [1].

Po třinácti letech od objevení Seebeckova jevu, tj. roku 1834, zkoumal francouzský fyzik jménem Jean Charles Athanase Peltier (1785 – 1845) změny teploty konců dvou rozdílných kovů, jež tvořily vodiče zapojené v sérii, při průchodu elektrického proudu. Načež zjistil, že styčná plocha jednoho vodiče se ochlazuje a druhého naopak ohřívá v závislosti na směru protékajícího elektrického proudu. Tento jev dostal pojmenování po svém objeviteli a je dodnes popisován jako Peltierův jev [2].

Zprvu se zdálo, že výše uvedené jevy k sobě nebudou vázány žádnou souvislostí, avšak roku 1855 dokázal William Thomson (1824 – 1907), později známý spíše jako Lord Kelvin, tuto myšlenku zcela vyvrátit. Použitím teorie termodynamiky byl schopen stanovit závislost mezi Seebeckovým a Peltierovým jevem. Z jeho teorie navíc vyplynul předpoklad dalšího, v pořadí již třetího, termoelektrického jevu. Tento jev, dnes známý jako Thomsonův, je popisován jako ochlazování či ohřívání homogenního vodiče, kterým prochází elektrický proud při teplotním spádu [2].

Jako první, kdo začal používat model pro odvození maximální účinnosti a výkonu termoelektrického článku, byl roku 1909 Edmund Altenkirch. Jeho výpočetní vztahy se v pozdější době formulovaly až do dnešní podoby termoelektrické účinnosti (tzv. Meritu) ZT , jež shrnuje vlastnosti termoelektrického materiálu, který by měl mít vysoký Seebeckův koeficient, vysokou elektrickou vodivost (pro minimalizování Joulova tepla vznikajícího průchodem elektrického proudu vodičem) a nízkou tepelnou vodivost (pro minimalizování tepelných ztrát). Následně po formulaci těchto vztahů se ukázalo, že vývoj termoelektrických materiálů, který se výhradně soustředil pouze na kovové materiály (dosahujících nízkých hodnot Seebeckova koeficientu), by se mohl ubírat směrem k nerostům s vlastnostmi polovodičů [21].

Koncem 30. let dvacátého století se vyvíjely syntetické polovodiče, které již dosahovaly až desetinásobné hodnoty Seebeckova koeficientu než materiály kovové a tak polovodičové materiály dodaly impuls k novému zájmu o termoelektrická zařízení. Kolem roku 1950 byl zkonstruován první termoelektrický generátor s účinností 5 %. V tu chvíli zavládlo nadšení, že by v budoucnu bylo možné aplikovat termoelektrická zařízení do mnoha průmyslových odvětví a mohly by tak nahradit dřívější tepelné motory a chladničky, Do vývoje se tak pustily korporace jako Národní výzkumná laboratoř v USA nebo univerzita Westinghouse. Bohužel koncem roku 1960 vysoké nasazení a tempo bylo značně zpomaleno a to po zprávách o limitu při dosahování termoelektrické účinnosti, které dle tehdejších informací nebylo možno překročit horní hranici $ZT = 1$. Mnoho výzkumů bylo proto zrušeno a dříve sestavená zařízení demontována [21].

Ještě než vyhasl zájem o termoelektrická zařízení, pracoval ruský fyzik Abram Fedorovič Ioffe na moderní teorii termoelektriny s použitím konceptu termoelektrické účinnosti ZT (Meritu). Později, přesněji roku 1956, jeho práce vyvrcholila vydáním textů a knih o polovodičových termoelementech a termoelektrickém chlazení. Zde Ioffe analyzoval a optimalizoval výsledky měření výkonu a účinnosti termoelektrických článků tvořenými polovodiči. Z jeho pozorování vyplynulo, že materiálem s vysokou termoelektrickou účinností ZT jsou vysoce dopované polovodiče na bázi telluru, bizmutu a olova. O několik let později na univerzitě v Petrohradu sestrojil první komerčně dostupné termoelektrické zařízení (generátor a chladič) a dále pokračoval v jejich výzkumu a vývoji [21].

V roce 1954 prezentoval Hiroshi Julian Goldsmid svůj termoelektrický chladič, jenž dokázal podchladiť své zařízení na teplotu okolo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeho chladič se skládal z termoelementů vyrobených ze slitiny telluridu bismutitého (Bi_2Te_3). H. J. Goldsmid jako první využil termoelektrického faktoru určující význam vysoké mobility nosiče elektrického náboje a nízké tepelné vodivosti materiálové mřížky vysoce dopovaných polovodičů, které vytvářejí velmi dobré termoelektrické materiály [21].

Hledání a výzkum materiálů s vysokým koeficientem termoelektrické účinnosti ZT se zaměřoval na materiály vyráběné z těžkých prvků (polovodičů), jejichž energetický zakázaný pás je velmi úzký. Americký vědec Glen Slack sumarizoval požadavky na materiál do tzv. struktury „phonon-glass electron-crystal“. Tedy materiály, kde fonony, zprostředkovávající tepelnou vodivost se chovají podobně jako ve skle a elektrony dosahují vysoké mobility jako v krystalických polovodičích [21].

Na počátku 60. let minulého století, kdy lidstvo dobývalo vesmír a těžba nerostného bohatství se přesunula do nehostinného či nepřijatelného prostředí, vyvstaly požadavky na autonomní zdroje elektrické energie a tedy i zájem o termoelektrická zařízení, neboť právě ta nabízela spolehlivá a jednoduchá řešení oproti konvenčním efektivnějším zařízením. Do roku 1990 vývoj termoelektrických zařízení poměrně stagnoval. Vyráběly se termoelektrické chladiče na bázi $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$, které obstarávaly chlazení optoelektroniky, popřípadě chladily/vyhřívaly sedadla automobilů a další vývoj byl v nedohlednu. Počátkem 90. let byl ovšem s přílivem nových myšlenek zájem o termoelektrinu opět obnoven. Naděje na zdokonalení materiálu s vyšší termoelektrickou účinností ZT pomocí nanotechnologií jejich vývoj povzbudila a vědce motivovala. Vývoj nových materiálů pokračuje i dodnes. V nedávné době byly nalezeny materiály nazývané skutterudity, do kterých je možno umístit daný atom a jím ovlivnit mřížkovou tepelnou vodivost při zachování elektrické vodivosti. Dále se také pracuje na materiálech s tzv. supermřížkou (superlattice) nebo materiálu s aplikovanými kvantovými body (quantum dots) [21], [23].

3 Termoelektrické jevy

V následující kapitole budou podrobněji popsány termoelektrické jevy, které byly v úvodu pojednávajícím o historii jejich objevů nastíněny.

3.1 Seebeckův jev

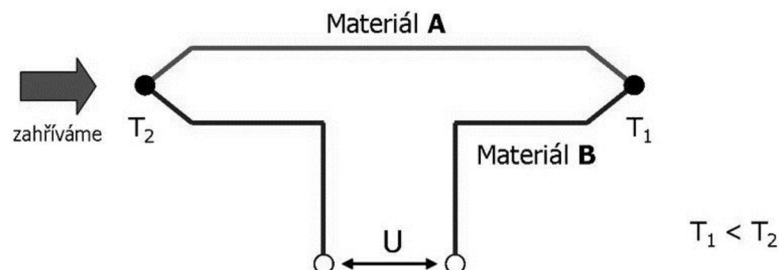
Pokud je aplikován teplotní gradient podél kovového vodiče, elektrony začnou difundovat z jednoho konce vodiče na druhý. Směr elektronové difuze je závislý na elektrických vlastnostech daného vodiče. Difundují-li elektrony od teplého konce vodiče k chladnému, vytvoří se negativní termoelektrické elektromotorické napětí a naopak pozitivní při difuzi elektronů od konce chladného k teplému. Toto generované napětí je lineárně závislé na teplotním rozdílu mezi teplou a studenou stranou termoelektrické dvojice. Stručně řečeno, Seebeckův jev spočívá v přeměně tepelné energie v energii elektrickou a často se s ním v praxi setkáme při měření teploty [2], [3].

Napětí generované termodvojicí:

$$U = \alpha_{AB} \cdot \Delta T = \alpha_{AB} \cdot (T_H - T_C) \quad [V] \quad (3.1)$$

kde:

U	[V]	generované napětí
α_{AB}	[VK ⁻¹]	relativní Seebeckův koeficient
ΔT	[K]	rozdíl teplot konců teplé (T_H) a chladné (T_C) strany



Obr. 1 Termoelektrická dvojice a vznik Seebeckova jevu [9]

Seebeckův koeficient

Absolutní Seebeckův koeficient označovaný jako α je definován pro osamocený vodič, jehož hodnota je určena teplotní změnou a elektromotorickým napětím. Hodnota výsledného koeficientu je závislá na struktuře materiálu, chemickém složení a působící teplotě [3].

$$\alpha = \frac{dU}{dT} \quad [VK^{-1}] \quad (3.2)$$

Jelikož se v praxi setkáváme spíše s termoelektrickými dvojicemi tvořenými dvěma vodiči odlišných materiálů, byl zaveden relativní Seebeckův koeficient, který je pro jejich popis vhodnější.

$$\alpha_{AB} = \frac{dU_{AB}}{dT} \quad [VK^{-1}] \quad (3.3)$$

Vztah mezi relativním a absolutním Seebeckovým koeficientem pak určuje následující rovnice:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad [VK^{-1}] \quad (3.4)$$

Tabulka níže ukazuje příklady Seebeckových koeficientů nejběžněji používaných materiálů (kovů). Jak je možné vidět, prvky dosahují velmi malých hodnot a tak se jako jednotka častěji uvádí μVK^{-1} . Z výše uvedené rovnice pro relativní Seebeckův koeficient vyplývá, že pro dosažení co nejvyššího její hodnoty je vhodné zkombinovat materiály dosahujících vysokých kladných a záporných hodnot α .

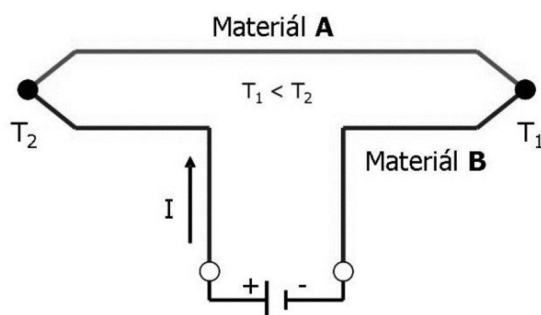
Materiál	α [μVK^{-1}]	Materiál	α [μVK^{-1}]
Železo	19	Sodík	-2
Molybden	10	Draslík	-9
Kadmium	7,5	Nikl	-15
Wolfram	7,5	Konstantan	-35
Zlato	6,5	Bismut	-72
Stříbro	6,5		
Měď	6,5		
Rhodium	6		
Tantal	4,5		
Olovo	4		
Hliník	3,5		
Uhlík	3		
Rtuť	0,6		
Platina	0		

Tab. 1 Absolutní Seebeckovy koeficienty [2]

Ve starší literatuře a textech je možné najít, že Seebeckův koeficient bývá často popisován či nazýván jako termoelektrická síla nebo tepelný EMF koeficient [3].

3.2 Peltierův jev

Peltierův jev je inverzní k jevu Seebeckovu. Fyzikální podstata tohoto jevu taktéž spočívá v difuzi elektronů, ovšem nyní je zdrojem kinetické energie elektronů přivedené externí elektromotorické napětí, které způsobuje tok elektrického proudu obvodem tvořeným termoelektrickou dvojicí. To má za následek absorbování nebo uvolňování tepla na koncových spojích vodičů v závislosti na směru toku elektrického proudu [3].



Obr. 2 Termoelektrická dvojice a vznik Peltierova jevu [9]

Peltierův koeficient

Peltierův koeficient π_{AB} definujeme pro totožnou termoelektrickou dvojici složenou z vodičů A a B (obdobně jako při objasnování Seebeckova koeficientu), kde jeho hodnota je úměrná poměru tepla emitovaného resp. absorbovaného na patřičné straně spoje vodiče k protékajícímu elektrickému proudu. Oblast, kde bude teplo absorbováno nebo naopak emitováno závisí opět na směru protékajícího elektrického proudu [3].

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} [WA^{-1}]; [V] \quad (3.5)$$

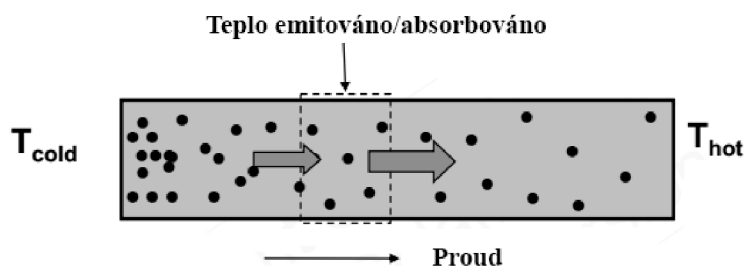
kde:

π_{AB}	[V]	Peltierův koeficient
Q	[W]	teplo prostupující skrze termoelektrickou dvojici
I	[A]	elektrický proud protékající termoelektrickou dvojicí

3.3 Thomsonův jev

Thomsonův jev popisuje vratnou tepelnou změnu, kterou můžeme aplikovat na libovolný vodič homogenního materiálu, jenž je vystaven teplotnímu rozdílu a zároveň jím prochází elektrický proud. Sám Thomson tento jev nazýval „specifickým teplem elektřiny“ projevujícím se zvýšením či snížením potenciální energie nosiče elektrického náboje vlivem pohlcování resp. emitování tepla.

Pro vysvětlení je možné uvést příklad. Jestliže se budou nosiče elektrického náboje pohybovat vlivem elektrického proudu proti směru teplotnímu spádu, jejich potenciální energie bude narůstat vlivem pohlcování tepla, jenž je také formou energie. Naopak při toku nosičů po směru teplotního gradientu bude docházet k uvolňování tepla, což povede ke snížení jejich potenciální energie. Tento jev nehraje zásadní roli při návrhu termoelektrického zařízení, ovšem při detailnějších kalkulacích by měl být zahrnut do výpočtů [1].



Obr. 3 Termoelektrická dvojice a vznik Peltierova jevu [2]

Thomsonův koeficient

Oproti Peltierovu koeficientu měřeného ve voltech je Thomsonův koeficient vyjadřován ve VK^{-1} stejně jako koeficient Seebeckův, neboť jak je uvedeno výše, Thomsonův jev nevytváří elektrický potenciál [1].

Při malé teplotní změně je Thomsonův koeficient uváděn následující rovnicí:

$$\beta = \frac{Q}{I\Delta T} [WA^{-1}K^{-1}]; [VK^{-1}] \quad (3.6)$$

kde:

β	$[VK^{-1}]$	Thomsonův koeficient
Q	$[W]$	teplo prostupující skrze homogenní vodič
I	$[A]$	elektrický proud
ΔT	$[K]$	teplotní rozdíl

3.4 Vztahy mezi termoelektrickými koeficienty

Výše uvedené termoelektrické koeficienty (Seebeckův, Peltierův a Thomsonův koeficient) lze pomocí daných vztahů vyjádřit jejich vzájemnou souvislost. Jejich ověření lze demonstrovat na mnoha termoelektrických materiálech. Tyto vztahy se nazývají po svém objeviteli lordu Kelvinovi – Kelvinovy vztahy [2].

Jelikož určení Peltierova koeficientu je vcelku náročné, využívá se k jeho určení Kelvinova vztahu zahrnující koeficient Seebeckův, který můžeme jednodušeji změřit, a je dán rovnicí:

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad [V] \quad (3.7)$$

kde:

π_{AB}	$[V]$	Peltierův koeficient
α_{AB}	$[VK^{-1}]$	relativní Seebeckův koeficient
T	$[K]$	teplota

Další Kelvinův vztah popisuje souvislost mezi Thomsonovým a Seebeckovým koeficientem, který lze uplatnit pro izotropní látky:

$$\frac{d\alpha_{AB}}{dT} = \frac{\beta_A - \beta_B}{T} \quad [-] \quad (3.8)$$

kde:

α_{AB}	$[VK^{-1}]$	relativní Seebeckův koeficient
β_A	$[VK^{-1}]$	Thomsonův koeficient materiálu A
β_B	$[VK^{-1}]$	Thomsonův koeficient materiálu B
T	$[K]$	teplota

3.5 Nernstův a Ettingshausenův jev

Všechny termoelektrické koeficienty daných látek jsou závislé na magnetickém poli, ve kterých se nacházejí a popisují je termoelektrické jevy, jenž byly objeveny německým chemikem Waltherem Hermannem Nernstem a rakouským fyzikem Albertem Von Ettingshausenem při zkoumání Hallova jevu [3].

Pokud necháme působit magnetické pole na vodivý proužek daného průřezu a šířky, kterým protéká elektrický proud, začne se část nosičů elektrického náboje usazovat na jedné z bočních stran vodiče a vytvoří tak elektrické pole s rozdílem elektrického potenciálu, který je roven Hallovu napětí. Takto je popisován Hallův jev, který přestože nevysvětluje bezprostřední přeměnu energie, slouží jako vhodný nástroj k objasnění chování nosičů elektrického náboje. K přesnějšímu popisu však můžeme použít jev Nernstův a Ettingshausenův [3], [5].

První z nich popisuje vznik transversálního (příčného) napětí vytvořeného na vodiči za přítomnosti magnetického pole, které má větší závislost na podélném teplotním gradientu než na protékajícím elektrickém proudu v podélném směru vodiče, jenž charakterizuje právě Hallův jev [3].

Nernstův koeficient N je definován následujícím vztahem:

$$|N| = \frac{\frac{dU}{dy}}{B_Z \frac{dT}{dx}} \quad [Kcm^2s^{-1}] \quad (3.9)$$

kde:

$\frac{dU}{dy}$	$[Vm^{-1}]$	elektrické pole v příčném směru (osa y)
B_Z	$[T]$	magnetické pole v kolmém směru (osa z)
$\frac{dT}{dx}$	$[Km^{-1}]$	teplotní gradient v podélném směru (osa x)

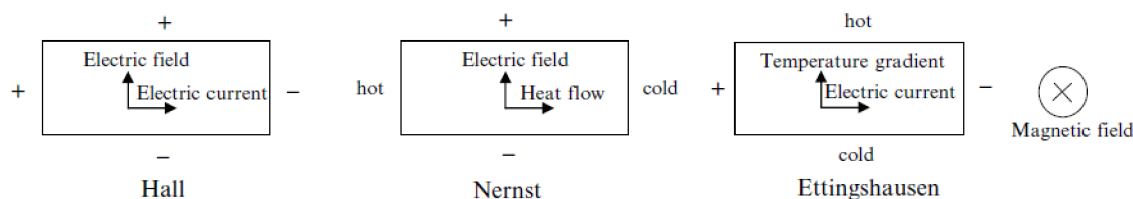
Etingshausenův jev nese souvislost s Nernstovým jevem podobně jako Peltierův jev se Seebeckovým. Pokud je aplikováno magnetické pole v kolmém směru a elektrický proud prochází v podélném směru, dochází tak ke vzniku teplotního gradientu. Oba jevy lépe zachycuje obrázek níže, kde jsou zakresleny všechny směry důležitých složek podílejících se na vytvoření napětí v příčném směru či teplotního gradientu [3].

Etingshausenův koeficient P je určen vztahem:

$$|P| = \frac{\frac{dT}{dy}}{I_x B_Z} \quad [Kcm^3W^{-1}s^{-1}] \quad (3.10)$$

kde:

$\frac{dT}{dy}$	$[Km^{-1}]$	teplotní gradient v příčném směru (osa y)
B_Z	$[T]$	magnetické pole v kolmém směru (osa z)
I_x	$[A]$	elektrický proud procházející v podélném směru (osa x)



Obr. 4 Porovnání Hallova, Nernstova a Ettingshausenova jevu [3]

Termodynamická souvislost mezi Nernstovým a Ettingshausenovým koeficientem je dána vztahem:

$$P_{Et} \cdot \lambda = N_{Ne} \cdot T \quad [-] \quad (3.11)$$

kde:

P_{Et}	$[Kcm^3W^{-1}s^{-1}]$	Etingshausenův koeficient
λ	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	tepelná vodivost daného materiálu
N_{Ne}	$[Kcm^2s^{-1}]$	Nernstův koeficient
T	$[K]$	teplota

Nernstův jev našel své praktické uplatnění v přístrojové technice, kde byl aplikován v měřicích přístrojích pro měření tepelného toku při pokojových teplotách. Zařízení je zkonstruováno z čistého materiálu bismutu, který je na jedné straně ohříván pomocí elektrického odporu skrze měděnou destičku a na druhé straně ochlazován chladičem. V materiálu bismutu obaleného teplotními detektory jsou uprostřed umístěny dvě měděné elektrody, na kterých je po vystavení přístroje tepelnému toku z okolí měřeno Nernstovo napětí. Pomocí převodních vztahů je pak toto napětí přepočítáno na tepelný tok ve wattech [6].

4 Termoelektrické články

Jako termoelektrické články označujeme zdroje stejnosměrného napětí, který využívá principu termoelektrického jevu, v nichž se přeměňuje tepelná energie na energii elektrickou nebo opačně. Termoelektrický článek může být použit i jako zdroj elektrické energie, ovšem jeho energetická účinnost a výkon je velmi malý. Z důvodu navýšení výstupního výkonu se termoelektrické články skládají do tzv. termoelektrických modulů, kde jsou jednotlivé termoelektrické dvojice postupně za sebou zapojovány [7], [8].

4.1 Popis a základní rozdělení

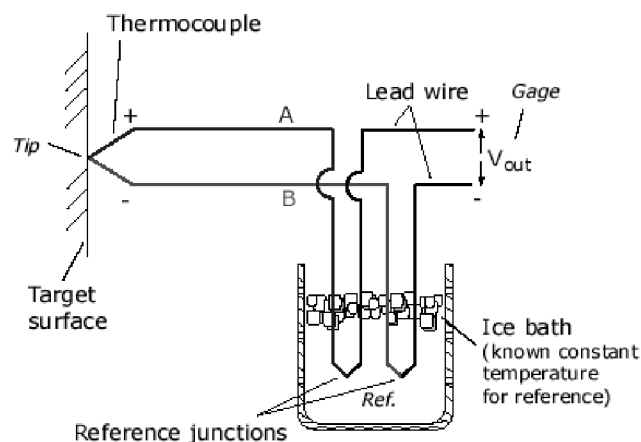
Z praktického hlediska a jejich využití jsou termoelektrické články používány pro aplikace, jež můžeme zařadit do následujících skupin:

- Termočlánky pro měření teploty
- Termoelektrické moduly

4.1.1 Termočlánky pro měření teploty

Konvenční termočlánky tvoří dva vodiče, které jsou vyráběny z kovů nebo kovových slitin. Na jednom konci jsou spojené svařením nebo pájením a na druhém konci jsou připojeny na svorkovnici. Na základě již objasněného Seebeckova jevu generují termočlánky napětí v řádech mikrovoltů na stupeň tepelného rozdílu v Kelvinech. Ačkoli výstupní napětí není nijak závratně vysoké, metalické termočlánky našly v praxi velké uplatnění jako teplotní senzory a teploměry a to hlavně díky jejich poměrně malým rozměrům, které dovolují vyžití při dynamických měření či měření teplot povrchů [8].

Pro měření teplot v laboratorních podmínkách se využívá termočlánků v diferenčním zapojení (Obr. 5), kde je studený (referenční) spoj umístěn do nádoby s látkou o konstantní teplotě (nádoba s ledem a termostatem pro udržení referenčních teplot spojů) a druhý snímá teplotu měřené látky či média [8].



Obr. 5 Měření teploty pomocí termočlánků v diferenčním zapojení [3]

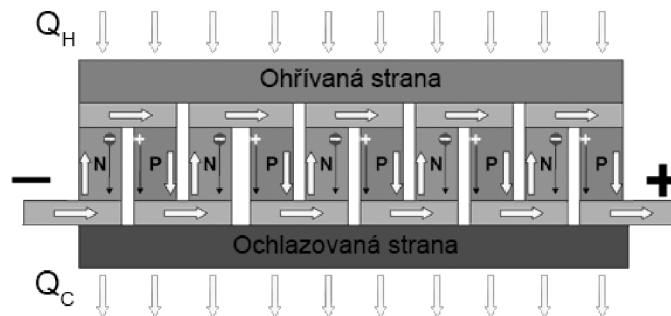
Aplikace termoelektrických teploměrů je velmi výhodná v případě, že při měření chceme použít naměřené signály pro další elektrické zpracování naměřených hodnot. Toho se zejména využívá v oblasti automatizace, regulace či měření s ukládáním dat do PC [8].

4.1.2 Termoelektrické moduly

Termoelektrický modul může pracovat ve funkci chladiče/ohřívače, který využívá Peltierova jevu nebo také jako generátoru využívajícího jevu Seebeckova. Dle využitých jevů a funkcí se moduly dělí následovně:

- TEC – (Thermoelectric cooling) – termoelektrické chladiče
- TEH – (Thermoelectric heater) – termoelektrické ohřívače
- TEG – (Thermoelectric generator) – termoelektrické generátory

Modul ve funkci generátoru je polovodičové zařízení bez pohyblivých částí, které je tiché, spolehlivé a je možné jej aplikovat pro různé výkony. Díky svým vlastnostem je vhodný pro generování elektrické energie malého výkonu z okolního prostředí. Pro způsob získávání této energie z okolí se vžil název Energy harvesting, který bude probrán v pozdější kapitole. Článek pracuje na Seebeckově termoelektrickém jevu, kde po aplikování teplotního gradientu nosiče elektrického náboje začnou difundovat z teplé strany k chladné a vytvoří tak elektrostatický potenciál (napětí) [31].



Obr. 6 Schéma termoelektrického článku ve funkci generátoru

Pro zvýšení generovaného výkonu se TEG článek skládá z několika termoelektrických dvojic tvořenými polovodičovými materiály N-typu a P-typu, přičemž na jedné straně je vždy rozhraní N-P a na druhé P-N. Tyto polovodičové dvojice jsou umístěny střídavě za sebou a spojeny metalickými vodivými můstky. Z tepelného hlediska jsou termoelektrické dvojice naopak spojeny paralelně, aby docházelo ke zvýšení tepelného toku. Spojením termoelektrických dvojic do série docílíme hodnoty termoelektrického napětí v rozmezí i několika voltů. Toto napětí je možné vypočítat dle vztahu [19]:

$$U_S = N \int_{T_H}^{T_C} (\alpha_P - \alpha_N) dT \quad [V] \quad (4.1)$$

kde:

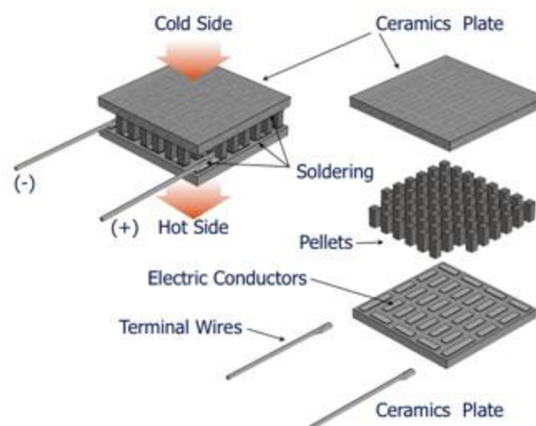
U_S	[V]	termoelektrické napětí (Seebeckovo napětí)
N	[-]	počet termoelektrických dvojic
T_C	[K]	teplota chladné strany článku
T_H	[K]	teplota teplé strany článku
α_P	[VK ⁻¹]	Seebeckův koeficient polovodiče typu P
α_N	[VK ⁻¹]	Seebeckův koeficient polovodiče typu N



Obr. 7 Konstrukce termoelektrického článku bez keramických desek [20]

Metallické můstky, které jsou nejčastěji vyráběny z mědi, jsou připájeny k jednotlivým termoelementům a zprostředkovávají elektrický kontakt a také tepelný přenos. Pájené spoje bývají realizovány slitinami na bázi cín-olovo nebo cín-antimon a jejich teplota tavení výrazně ovlivňuje pracovní teploty termoelektrických článků. V místě styku vodivého můstku a termoelementů může docházet vlivem špatného výrobního procesu k přechodným místním odporům, které pak v konečném důsledku snižují celkový výkon termoelektrického modulu. Postranní můstky jsou využity pro připojení kabeláže, kterou je přiváděn či odváděn elektrický proud v závislosti zdali se jedná o termoelektrický článek s funkcí chladiče (TEC - Peltierův článek) nebo generátoru [21].

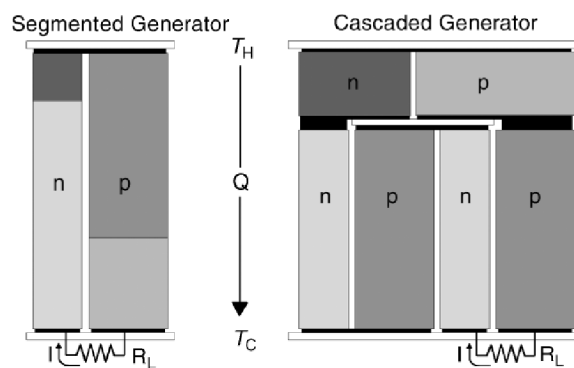
Aby termoelektrický článek byl dostatečně pevný a chráněn proti případnému poškození, pokrývají se teplosměnné plochy článku keramickými deskami. Ty zajišťují elektrickou izolaci od okolí, potřebnou pevnost a zprostředkovávají přívod tepla, tudíž musí dosahovat dobrých tepelných vodivostí. Pro výrobu těchto desek se hojně používá keramického materiálu oxidu hlinitého (Al_2O_3), který dosahuje nejlepšího poměru mezi cenou a tepelnou vodivostí, která se pohybuje okolo $35 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. V aplikacích, kde je potřeba dosáhnout vyšších hodnot tepelné vodivosti se volí keramické desky vyráběné z oxidu berylnatého (BeO) nebo nitridu hlinitého (AlN). Jejich tepelná vodivost je až sedminásobně vyšší (170 až $230 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) oproti deskám z oxidu hlinitého, ovšem tyto vlastnosti jsou kompenzovány většími pořizovacími náklady [21], [22].



Obr. 8 Schéma konstrukce termoelektrického článku [20]

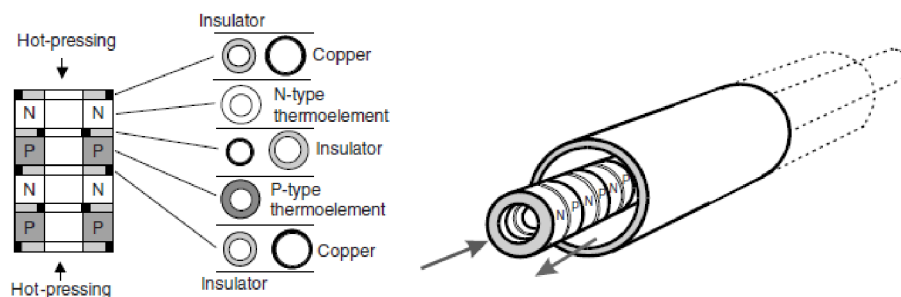
Termoelektrický modul ve funkci generátoru se oproti modulům TEC a TEH fyzickou konstrukcí v podstatě neliší. Jedinou změnou je použitý materiál termoelektrických dvojic a délka termoelementů, která je více přizpůsobena jeho provozu – generování elektrické energie tak, aby TEG článek dosahoval co nejvyšší účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou.

Jednotlivé termoelektrické polovodičové dvojice je možno zapojit hned několika způsoby a v různých geometrických uspořádáních. Nejpoužívanější způsob je segmentové zapojení různých polovodičových materiálů za sebou, které následně tvoří jeden termoelement typu N nebo P. Termoelementy se pak dále zapojují jako jednotné termoelektrické dvojice. Další možností je zapojovat termoelektrické dvojice do tzv. kaskád, kdy se jednotlivé termoelektrické dvojice na sebe pokládají a výsledný termoelektrický modul tak nabývá na své šířce a na výkonu. Obě tato zapojení jsou zobrazeny na Obr. 9 níže [2], [19].



Obr. 9 Geometrie a uspořádání termoelementů a termoelektrických dvojic [2]

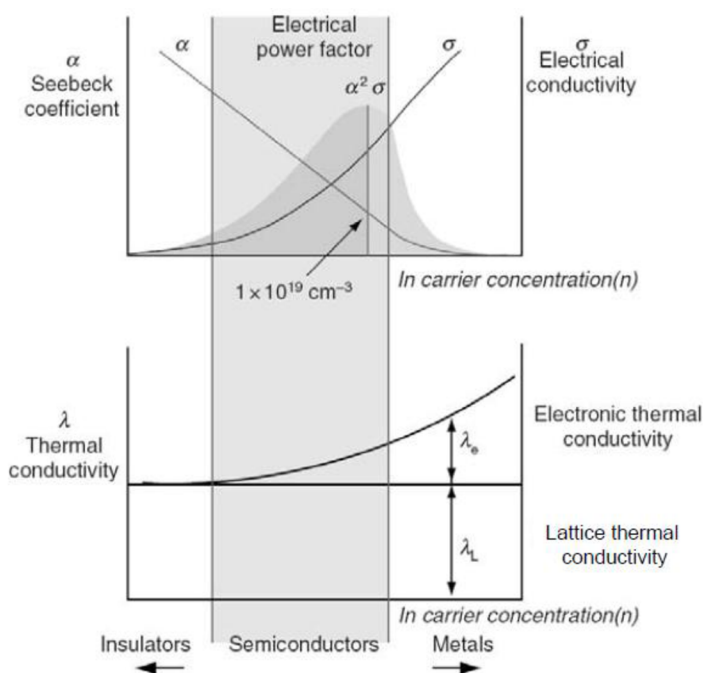
Odlíšné a poměrně netradiční uspořádání termoelektrických dvojic představuje „kroužková struktura“ (ring-structure modul) termoelektrických modulů. Oproti tradičním konstrukcím tvořící pláty, nabízí zapojení termoelektrických dvojic kruhového tvaru možnost aplikovat teplotní gradient v radiálním směru [2].



Obr. 10 Geometrie a uspořádání termoelementů v modulu kroužkové struktury [2]

4.2 Termoelektrické materiály

Jedním z důležitých parametrů pro výběr vhodného materiálu termoelektrického článku je elektrická vodivost. Jak je již známo, kovy mají velmi dobrou měrnou elektrickou vodivost σ (konduktivitu), která je závislá na počtu nosičů náboje, avšak jejich termoelektrické generované napětí a také Seebeckův koeficient α dosahuje velmi nízkých hodnot. S rostoucím počtem nosičů elektrického náboje navíc také stoupá tepelná vodivost λ daného materiálu, která je pro návrh termoelektrického článku nežádoucí a snižuje tak jeho požadovanou termoelektrickou účinnost. Proto se při výrobě termoelektrických článků volí materiály polovodičové, které ačkoli nedominují svou elektrickou vodivostí (leží v oblasti mezi kovy a izolátory), dosahují lepších parametrů a nabízejí použitelnější vlastnosti [2].



Obr. 11 Grafické porovnání Seebeckova koeficientu a měrné elektrické vodivosti a součinitele tepelné vodivosti [2]

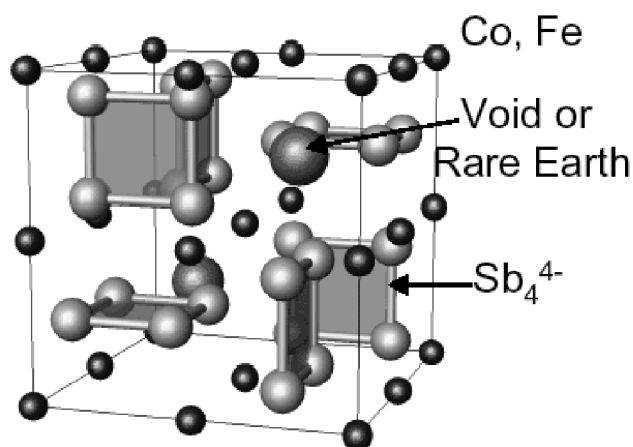
Vhodnými materiály tedy jsou polovodiče, kterými nejčastěji bývají slitiny telluridu bismutitého (Bi_2Te_3), telluridu olovnatého (PbTe), antimonu bismutitého (Sb_2Te_3) nebo slitiny křemíku a germania (SiGe). Tyto materiály můžeme klasifikovat dle jejich rozmezí provozních teplot, viz Tab. 2, kde nabývají svých nejlepších parametrů [10].

Materiál	Bi_2Te_3	Bi_2Sb_3	Sb_2Te_3	PbTe	PbTeSe	SiGe
Typ polovodiče	N, P	N, P	P	N, P	P	N, P
Provozní teploty [K]	200 - 450	300 - 400	200 - 300	400 - 950	650 - 900	900 - 1300

Tab. 2 Pracovní teploty termoelektrických polovodičových materiálů [2]

Od poloviny 50. let minulého století dochází k postupnému objevování nových materiálů vhodných pro konstrukci termoelektrických článků, přičemž za poslední desetiletí došlo k výrazným pokrokům, jež rapidně zvýšily termoelektrickou účinnost.

Kupříkladu objev materiálu nazývaného skutterudit, který je popisován jako materiál (často na bázi kobaltu či arsenu) do jehož mezimřížkového prostoru je možno vložit atom určité velikosti. Tento atom zapříčiní útlum vibrací krystalické mřížky a tím sníží výslednou tepelnou vodivost celého materiálu. Vhodným příkladem skutteruditu je $\text{Yb}_{0,35}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$, který dosahuje termoelektrické účinnosti $ZT = 1,2$ při teplotách okolo 830 K. Vývoj těchto materiálu nadále pokračuje a to nejen ve světě, ale také v České republice, kde se studiem skutteruditů zabývají vědci pardubické univerzity fakulty chemicko-technologické [24], [26].

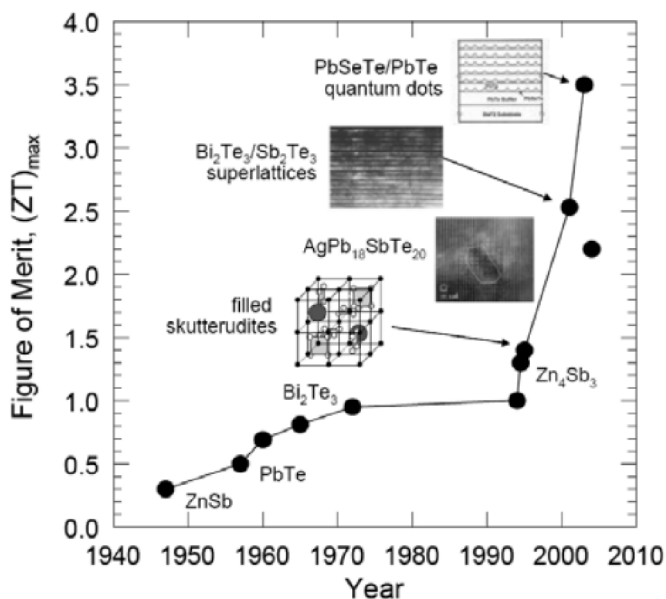


Obr. 12 Krystalická struktura skutteruditu [19]

Materiálem pro termoelementy mohou být také slitiny telluru, antimonu, germania a stříbra, pro které se vžil označení TAGS. Své uplatnění nalézají zejména ve středně vyšších teplotách okolo 400 - 550 K. Při těchto teplotách dosahují termoelektrické účinnosti $ZT \sim 1,4$ a relativně dlouhé životnosti, proto jsou využívány jako materiály pro konstrukci termoelektrických radioizotopových generátorů [40].

Roku 2007 byla publikována práce H. Ohty zabývající se výzkumem termoelektrických materiálu na bázi keramiky. Tyto keramické TE materiály byly schopny pracovat ve vysokých teplotách sahajících až k 1300 K. Pro konstrukci termoelementů modulu bylo využito materiálu SrTiO_3 . Jeho termoelektrická účinnost dosahovala až k $ZT = 2,4$, což je dvojnásobná hodnota oproti běžně dostupným materiálům. Problém však byla náročná výroba, jelikož často docházelo k trhlinám v materiálu během jeho přípravy [40].

V současné době pokračuje výzkum materiálu s tzv. supermřížkou (superlattice) a materiálu s aplikovanými kvantovými body (quantum dots), který by měl termoelektrickou účinnost ještě rapidněji zvýšit [2], [40].



Obr. 13 Vývoj termoelektrických materiálů a jejich termoelektrická účinnost ZT [44]

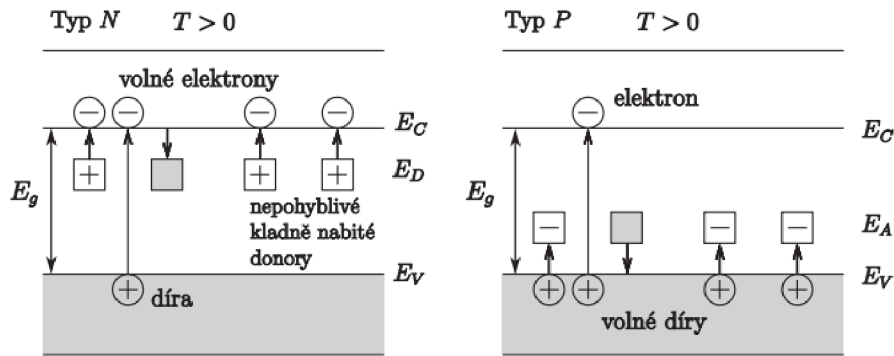
4.2.1 Elektrická vodivost polovodičů

Významnými materiály pro výrobu termoelektrických modulů jsou polovodiče, a proto jim teď bude věnována podkapitola popisující jejich vlastnosti. Polovodič lze definovat jako látku, jenž má vedení elektrického proudu zprostředkované elektrony nebo dírami tzv. elektronovou bipolární vodivostí. Jeho elektrická vodivost σ je závislá na teplotě (se vzrůstající teplotou stoupá elektrická vodivost polovodiče) a lze ji měnit působením fyzikálních dějů jako je například působení světla, tepla, elektrického a magnetického pole, radioaktivního záření nebo také přidáním nepatrného množství dané příměsi do čisté látky polovodiče, které označujeme jako dopování [13].

Polovodiče rozdělujeme podle jejich vodivosti na vlastní a nevlastní, přičemž vlastní vodivost (intrinšická) se vyskytuje u všech polovodičů, kdežto nevlastní (extrinšická, dotovaná) existuje jen u polovodičů s příměsí jiného atomu, které pak dělíme na polovodiče typu P a typu N.

Pro popis elektrické vodivosti polovodičů využíváme pásové diagramy dovolených energií elektronů, někdy také nazývané pásovými teoriemi či modely. Na Obr. 11 je možné vidět pásový model polovodičové látky, kde jsou zakresleny jednotlivé energetické pásy, jež dělíme do těchto skupin [15]:

- Vnitřní pásy – elektrony v tomto pásu jsou pevně vázány k atomovým jádrům a nepodílejí se na přenosu elektrického náboje.
- Valenční pás E_V – obsahuje hladiny elektrony, které vytvářejí chemické vazby s jinými atomy
- Vodivostní pás E_C – označuje se také jako nejvyšší dovolený energetický pás a nacházejí se v něm elektrony uvolněné z chemických vazeb pohybující se v meziatomovém prostoru a způsobují tak elektrickou vodivost, tudíž pro přenos elektrického náboje jsou nejvýznamnější.
- Zakázané pásy E_G – oddělují od sebe pásy dovolených energií tedy pás vodivostní a valenční.

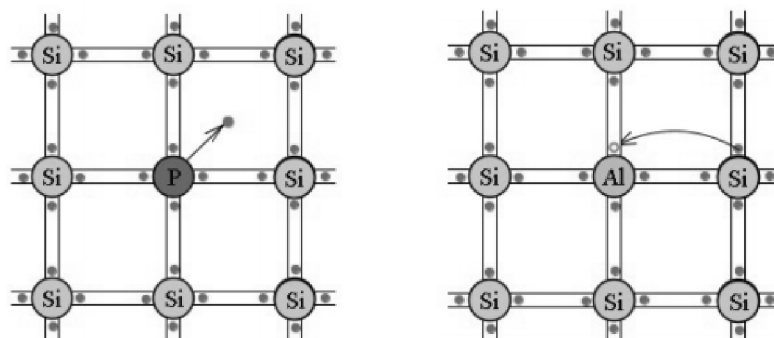


Obr. 14 Zobrazení energetických pásů polovodičů typu N a P [13]

Pásový diagram polovodičů je téměř shodný s diagramem izolantu, který se ovšem liší pouze šířkou zakázaného pásu E_G , který odděluje valenční pás od vodivostního. Při teplotě blízké se 0 K je vodivostní pás polovodiče prázdný a ten tak nemá žádné volné elektrony, které by mohly přenášet elektrický náboj. Tudiž se jedná o izolant. Se zvyšující se teplotou mohou některé elektrony získat dostatek energie, aby mohly přejít do pásu vodivostního a podílet se na přenosu elektrického náboje – vedení elektrického proudu [14].

Polovodič typu N vznikne v případě, nahradíme-li atom v krystalové mřížce čtyřmocného prvku (prvek IV. skupiny v periodické soustavě prvků tvořící základ polovodiče) prvkem pětímocným. V tomto případě pak čtyři elektrony z valenčního pásu se zúčastní tvorby chemické vazby se sousedními atomy a pátý z nich bude vázán velmi slabou energií. Tento elektron pak po dodání energie o hodnotě větší než je jeho vazebná E_A (aktivační energie) může být uvolněn a stát se nosičem elektrického náboje. Hodnota aktivační energie se pohybuje okolo 0,05 eV a tak již při pokojové teplotě se elektrony podílí na vedení elektrického proudu. Polovodiče typu N, jejichž vodivost je ovlivněna příměsí pětímocného prvku (donory) nazýváme polovodiči s elektronovou vodivostí [15].

Podobně jako polovodiče typu N vznikají i polovodiče typu P. U nich se však namísto donorů (pětímocných prvků) využívá dopování krystalové mřížky prvky třímocnými nazývanými akceptory. Chemická vazba mezi atomy prvku čtyřmocného a akceptorem je tvořena třemi valenčními elektrony, přičemž jedna zůstává neúplná. Nyní stačí opět dodání malé aktivační energie, aby se některý z elektronů ze sousedních vazeb uvolnil a zaplnil neobsazený stav. Tímto po uvolněním elektronu vznikne díra, která se může pohybovat v krystalické mřížce a umožnit tak vedení proudu, jelikož nese kladný elektrický náboj. Polovodiče, u kterých převažuje koncentrace děr nad koncentrací elektronů, se nazývají polovodiče typu P [14].



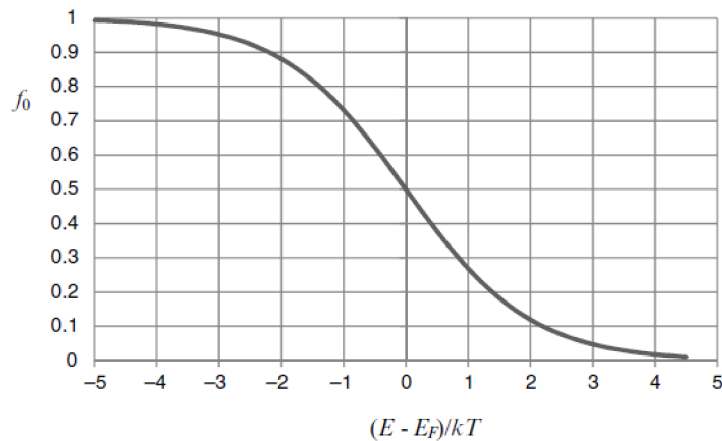
Obr. 15 Zobrazení struktury polovodičů typu N a P a jejich nosičů elektrického náboje [14]

Koncentraci volných nosičů elektrického náboje (elektronů nebo děr) můžeme určit pomocí koncentrace donorů a akceptorů, teploty a pásové struktury polovodiče, která je dána polohou Fermiho energie E_F (elektrochemického potenciálu), jenž je součástí Fermi-Diracova distribuční funkce $f_0(E)$. Tato funkce určuje, kolik existujících dovolených stavů pro danou energii E bude zaplněno elektrony, resp. určuje pravděpodobnost, že dovolený stav bude zaplněn elektronem a má tvar [14], [15]:

$$f_0(E) = \left[e^{\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} + 1 \right]^{-1} \quad (4.2)$$

kde:

$f_0(E)$	[-]	Fermi-Diracova rozdělovací funkce pravděpodobnosti zaplnění
E_F	[eV]	Fermiho energie (hladina)
E	[eV]	energie
k	[JK ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
T	[K]	teplota



Obr. 16 Fermi-Diracova distribuční f -ce pravděpodobnosti zaplnění dovoleného stavu elektronem [2]

Fermiho energii je možné vyjádřit pomocí dvou definic [15]:

1. Při teplotě $T = 0$ K odděluje Fermiho energie obsazené stavy od neobsazených.
2. Při teplotě $T > 0$ K je Fermiho energie definována jako hladina, která je obsazena s pravděpodobností $1/2$.

Celkovou koncentraci elektronů n_e a děr p_h ve vodivostním pásu určíme pomocí následujících rovnic [15]:

$$n_e = \int_0^{\infty} f_0(E) g_C(E) dE \quad [-] \quad (4.3)$$

kde:

n_e	[-]	koncentrace nosičů elektrického náboje – elektronů
$f_0(E)$	[-]	Fermi-Diracova rozdělovací funkce
$g_C(E)$	[-]	hustota dovolených energetických stavů ve vodivostním pásu

$$p_h = \int_0^{\infty} [1 - f_0(E)] g_V(E) dE \quad [-] \quad (4.4)$$

kde:

p_h	[-]	koncentrace nosičů elektrického náboje – děr
$f_0(E)$	[-]	Fermi-Diracova rozdělovací funkce
$g_V(E)$	[-]	hustota dovolených energetických stavů ve valenčním pásu

Po výpočtu celkové koncentrace nosičů elektrického náboje již můžeme určit elektrickou vodivost daného polovodiče ze vztahu [15]:

$$\sigma = q(\mu_n n_e + \mu_p p_h) \quad [\Omega^{-1}m^{-1}] \quad (4.5)$$

kde:

σ	$[\Omega^{-1}m^{-1}]$	měrná elektrická vodivost (konduktivita)
q	$[C]$	náboj částice (elektron – záporný, díra – kladný)
μ_n	$[m^2V^{-1}s^{-1}]$	pohyblivost nosiče elektrického náboje – elektronů
μ_p	$[m^2V^{-1}s^{-1}]$	pohyblivost nosiče elektrického náboje – děr
n_e	$[-]$	koncentrace nosičů elektrického náboje – elektronů
p_h	$[-]$	koncentrace nosičů elektrického náboje – děr

Pohyblivost nosiče elektrického náboje μ popisuje působení elektrického pole na pohyb elektronů nebo děr a je závislá na koncentraci příměsí v polovodiči a na jeho typu (typ P nebo N). Obecně platí, že se vzrůstající koncentrací příměsí pohyblivost klesá a pro všechny důležité polovodiče platí, že $\mu_n > \mu_p$. Z výše uvedeného vztahu (5.4) vyplývá, že vodivost polovodiče je přibližně přímo úměrná koncentraci příměsí. Závislost pohyblivosti nosičů na koncentraci není v praxi až tak významná [15].

4.2.2 Tepelná vodivost polovodičů

Tepelná vodivost je vyjadřována jako schopnost látky vést teplo. Udává množství tepla v ustáleném stavu procházející jednotkovým průřezem při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času a je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ [16].

U polovodičů je tepelná vodivost dána dvěma složkami tepelných vodivostí a to elektrickou a mřížkovou. Celková tepelná vodivost je pak definován jako součet tepelné vodivosti pohybujících se nosičů elektrického náboje a tepelné vodivosti krystalové mřížky [17].

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_L \quad [Wm^{-1}K^{-1}] \quad (4.6)$$

kde:

λ	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	celková tepelná vodivost
λ_e	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	tepelná vodivost nosičů elektrického náboje
λ_L	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	tepelná vodivost krystalové mřížky

Z výše uvedeného vzorce a grafu viz Obr. 11 je patrné, že celková tepelná vodivost polovodičů vzrůstá s koncentrací nosičů elektrického náboje (elektronů nebo děr), avšak velký podíl také nese tepelná vodivost krystalové mřížky, která je zprostředkována tzv. fonony [17]. Fonony jsou kvazičástice (rozruch přesouvající se z místa na místo, který budí dojem pohybu skutečné částice), které se šíří materiálem formou tepelných kmitů atomů vibrujících kolem svých rovnovážných poloh. Pohyb fononů je projevem tepelné energie krystalu a, jelikož se jedná o kmitavý pohyb, můžeme na základě obecné mechaniky definovat jeho amplitudu, závislost energie na frekvenci a vlny kmitů [18].

K dosažení co největší termoelektrické účinnosti je tedy vhodné vybírat materiály, jejichž součinitel tepelné vodivosti s rostoucí teplotou klesá nebo se alespoň udržuje na konstantní hodnotě.

4.2.3 Seebeckův koeficient polovodičů

V kapitole pojednávající o termoelektrických jevech, byly uvedeny jednotlivé Seebeckovy koeficienty kovových materiálů, avšak polovodičové byly záměrně vynechány. Materiály tvořené polokovy (bor, křemík, germanium, arsen, antimon a tellur), ze kterých se po doplnění příměsí stávají polovodiče, dosahují mnohem vyšších hodnot Seebeckova koeficientu a to v řádu i několika stovek μVK^{-1} viz Tab. 3 [40].

Materiál	α [μVK^{-1}]	Materiál	α [μVK^{-1}]	Materiál	α [μVK^{-1}]
Selen	900	Pb ₃ Ge ₃₉ Se ₅₈	1670	PbBi ₄ Te ₇	-53
Tellur	500	Bi ₂ Sb ₂ Te ₃	300	PbTe	-180
Křemík	440	Sb ₂ Te ₃	185	Bi ₂ Te ₃	-230
Germanium	300	SnBi ₃ SbTe ₇	151	Pb ₉ Ge ₃₃ Se ₅₈	-1360
Antimon	47	SnBi ₄ Te ₇	120	Pb ₁₅ Ge ₃₇ Se ₅₈	-1990

Tab. 3 Absolutní Seebeckovy koeficienty vybraných polovodičů [40]

Hodnotu Seebeckova koeficientu pro polovodičové materiály můžeme vypočítat dle následující rovnice:

$$\alpha = \frac{\pi^2 k^2}{3 e} T \left(\frac{d \ln \sigma(E_F)}{d E_F} \right) \quad [VK^{-1}] \quad (4.7)$$

kde:

α	[VK^{-1}]	Seebeckův koeficient
σ	[$\Omega^{-1}m^{-1}$]	měrná elektrická vodivost (konduktivita)
E_F	[eV]	Fermiho energie (hladina)
k	[JK^{-1}]	Boltzmannova konstanta
T	[K]	teplota

4.3 Koeficient termoelektrické účinnosti – Merit

Pro dosažení co nejlepší přeměny tepelné energie na energii elektrickou, tedy termoelektrické účinnosti, je nutné zvolit materiály s co nejvhodnějšími vlastnostmi, které ovlivňují především tři hlavní faktory. Ty jsou:

- Seebeckův koeficient α [VK^{-1}]
- Konduktivita (měrná elektrická vodivost) σ [$\Omega^{-1}m^{-1}$]
- Tepelná vodivost λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]

Následující vztah výše uvedené faktory sjednocuje do jednoho vzorce, jehož výsledkem je termoelektrická účinnost označovaná jako Z_c [2]:

$$Z_c = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2}{\left[\left(\frac{\lambda_A}{\sigma_A} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\lambda_B}{\sigma_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad [K^{-1}] \quad (4.8)$$

Pokud je termoelektrický článek tvořen dvěma materiály podobných vlastností, koeficient termoelektrické účinnosti Z_c (Merit) se zredukuje na vztah:

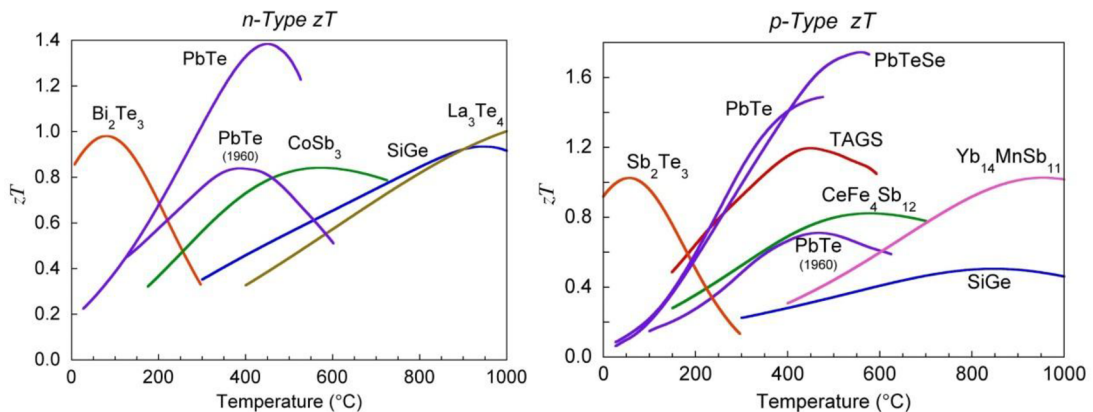
$$Z_C = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad [K^{-1}] \quad (4.9)$$

Jelikož termoelektrická účinnost vyjádřená pomocí Meritu Z_C je závislá nejen na daném materiálu, ale také na teplotě při níž termoelektrický článek pracuje, využívá se v praxi bezrozměrné porovnávací kritérium, které kvalitativně porovnává termoelektrické materiály a označujeme jej ZT . Tento bezrozměrný koeficient termoelektrické účinnosti lze vypočítat dle následující rovnice:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \cdot \frac{T_H + T_C}{2} = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \cdot \bar{T} \quad [-] \quad (4.10)$$

kde:

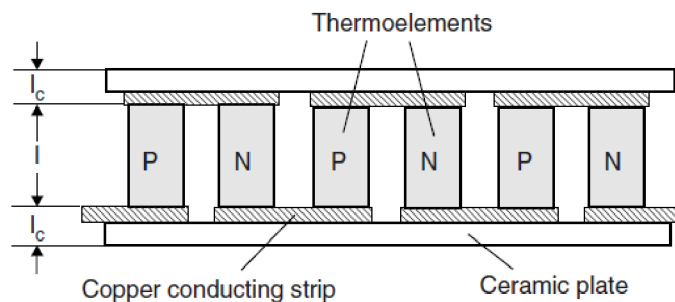
ZT	[-]	bezrozměrný koeficient termoelektrické účinnosti
α	$[VK^{-1}]$	Seebeckův koeficient
σ	$[\Omega^{-1}m^{-1}]$	měrná elektrická vodivost (konduktivita)
λ	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	tepelná vodivost
T_H	[K]	teplota teplé strany
T_C	[K]	teplota studené strany
\bar{T}	[K]	střední teplota



Obr. 17 Termoelektrická účinnost ZT polovodičových materiálů v závislosti na teplotě [19]

4.4 Výkon termoelektrického modulu

Při použití termoelektrického modulu s funkcí generátoru (TEG), je po aplikování tepelného toku přeměňována tepelná energie v energii elektrickou, díky již výše popsanému Seebeckova jevu, a modul tak může dodávat elektrický výkon do externí zátěže. Výkon termoelektrického modulu, jenž pracuje jako elektrický zdroj, je závislý na teplotním rozdílu teplé a studené strany modulu, použitým termoelektrickým materiálem a na geometrickém provedení a počtu termoelektrických dvojic. Dále také na tepelných a elektrických vlastnostech kontaktní vrstvy a přechodových odporů [2].



Obr. 18 Názorné schéma jednotlivých termoelementů se zakótovanými přechodnými vrstvami [2]

Výstupní napětí U a proud I termoelektrického modulu jsou dány rovnicemi[2]:

$$U = \frac{N \alpha (T_H - T_C)}{1 + 2r \frac{l_c}{l}} \quad [V] \quad (4.11)$$

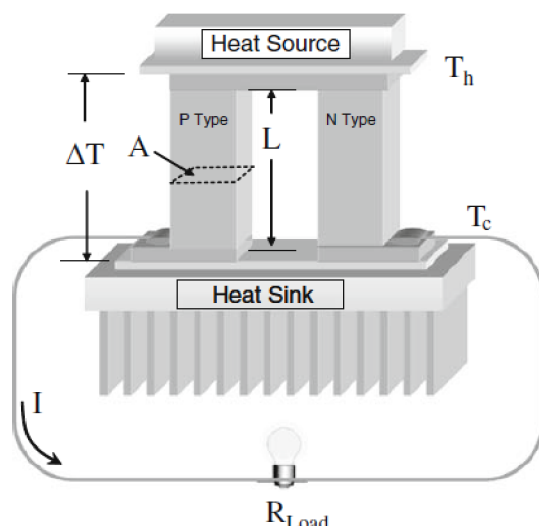
$$I = \frac{A \alpha (T_H - T_C)}{2\rho (n+l) \left(1 + 2r \frac{l_c}{l}\right)} \quad [A] \quad (4.12)$$

Výkon TEG modulu je pak dán součinem výstupního napětí a proudu [2]:

$$P = UI = \frac{\alpha^2}{2\rho} \frac{AN(T_H - T_C)^2}{(n+l) \left(1 + 2r \frac{l_c}{l}\right)^2} \quad [W] \quad (4.13)$$

kde:

U	[V]	výstupní napětí termoelektrického modulu
I	[A]	výstupní proud termoelektrického modulu
P	[W]	výkon termoelektrického modulu
A	[m ²]	plocha příčného průřezu termoelementu
N	[-]	počet termoelektrických dvojic
α_{pn}	[VK ⁻¹]	relativní Seebeckův koeficient termoelektrické dvojice
ρ	[Ωm]	měrný elektrický odpor (rezistivita)
T_H	[K]	teplota teplé strany
T_C	[K]	teplota studené strany
l	[m]	délka termoelementu
l_c	[m]	tloušťka kontaktní vrstvy
n	[-]	elektrický parametr termoelektrického modulu
r	[-]	tepelný parametr termoelektrického modulu



Obr. 19 Schéma obvodu se zapojeným termoelektrickým modulem (TEG) se zátěží [25]

Výše uvedený elektrický a tepelný parametry n a r lze vypočítat dle níže uvedených rovnic, přičemž běžně dostupné termoelektrické moduly dosahují přibližných hodnot parametru $n \sim 0,1$ a $r \sim 0,2$ [2].

$$n = \frac{2\rho_c}{\rho} \quad [-] \quad (4.14)$$

kde:

n	[-]	elektrický parametr termoelektrického modulu
ρ_c	[Ωm]	měrný elektrický kontaktní (přechodový) odpor
ρ	[Ωm]	měrný elektrický odpor (rezistivita)

$$r = \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad [-] \quad (4.15)$$

kde:

r	[-]	tepelný parametr termoelektrického modulu
λ	[$W m^{-1} K^{-1}$]	tepelná vodivost
λ_c	[$W m^{-1} K^{-1}$]	tepelná vodivost kontaktní vrstvy

Jelikož ve většině případů je velmi obtížné se dopátrat k informacím o tloušťce kontaktní vrstvy, neboť výrobci termoelektrických modulů tyto informace a ani parametry n a r ve svých technických dokumentech neuvádí, je pro přibližné stanovení výkonu modulu vhodné použít vzorec pro ideální termoelektrický modul, kde jsou kontaktní odpory zanedbány:

$$P = \frac{\alpha^2 AN(T_H - T_C)^2}{2\rho} \quad [W] \quad (4.16)$$

Z výše uvedené rovnice vyplývá, že výkon termoelektrického modulu roste s počtem použitých termoelektrických dvojic, plochou příčného průřezu termoelementu a se snižující se jeho délkou. Výkon se také zvyšuje s mocninou teplotního rozdílu teplé a studené strany. Těto vlastnosti můžeme využít pro přibližné odvození výkonu termoelektrického modulu při jiných teplotních diferencích než referenčních, které uvádí výrobce [23].

$$P = \frac{P_{ref}}{\Delta T_{ref}^2} \Delta T^2 \quad [W] \quad (4.17)$$

Pro kompletní vyjádření výkonu termoelektrického modulu přivedeného do zátěže je vhodné zohlednit vliv odporu externí zátěže R_L , ze kterého následně vyplývá, že maximální výkon modulu P_{Lmax} bude dosažen právě při rovnosti odporů TE modulu R_{int} a externí zátěže R_L [1], [3].

$$P_L = I_L^2 R_L = \left[\frac{\alpha(T_H - T_C)}{R_L + R_{int}} \right]^2 R_L \quad [W] \quad (4.18)$$

$$P_{Lmax} = \frac{\alpha^2 (T_H - T_C)^2}{4R_{int}} \quad [W] \quad (4.19)$$

kde:

P_L	[W]	výkon termoelektrického modulu přivedený do zátěže
I_L	[A]	výstupní proud termoelektrického modulu
R_L	[Ω]	elektrický odpor zátěže
R_{int}	[Ω]	vnitřní elektrický odpor termoelektrického modulu
α	[VK ⁻¹]	relativní Seebeckův koeficient
T_H	[K]	teplota teplé strany
T_C	[K]	teplota studené strany

Výše uvedený vnitřní elektrický odpor termoelektrického modulu je závislý nejen na elektrickém odporu termoelektrického materiálu, nýbrž také na odporu metalického spoje (měděného můstku) a kontaktních odporů mezi termoelektrickými dvojicemi. Celkový vnitřní elektrický odpor termoelektrického modulu je pak dán rovnicí [19]:

$$R_{int} = N \left(\frac{\rho_N l}{A_N} + \frac{\rho_P l}{A_P} + R_c \right) \quad [\Omega] \quad (4.20)$$

kde:

R_{int}	[Ω]	vnitřní elektrický odpor termoelektrického modulu
N	[-]	počet termoelektrických dvojic
ρ_N	[Ωm]	měrný elektrický odpor termoelementu typu N
ρ_P	[Ωm]	měrný elektrický odpor termoelementu typu P
l	[m]	délka termoelementu
A_N	[m ²]	plocha příčného průřezu termoelementu typu N
A_P	[m ²]	plocha příčného průřezu termoelementu typu P
R_c	[Ω]	elektrický kontaktní odpor termoelektrické dvojice

4.5 Účinnost termoelektrického modulu

Na účinnost (η) přeměny tepelné energie (Q) v energii elektrickou (výkon P dodaný do zátěže) termoelektrického modulu má zásadní vliv teplotní rozdíl mezi ochlazovanou a ohřivanou stranou modulu, použitý materiál termoelementů a koeficient termoelektrické účinnosti Z , který byl popsán výše. Účinnost lze pak popsat dle následujícího vzorce [25]:

$$\eta = \frac{\text{Výkon dodávaný do zátěže}}{\text{Teplota pohlcené na ohřivené straně modulu}} = \frac{P_L}{Q} \quad [-] \quad (4.21)$$

Absorbované teplo na ohřivané (teplé) straně modulu lze vypočítat jako sumu tepla přenášeného vedením (Fourierova rovnice), části tepla kompenzovaného Peltierovým jevem, který je způsoben průchodem elektrického proudu termoelektrickým modulem a polovinou Jouleova tepla vracejícího se ke zdroji tepelného toku. Výsledné teplo je pak možno zapsat rovnicí [23], [25]:

$$Q = \lambda(T_H - T_C) + I\alpha T_H - \frac{1}{2}I^2 R_{int} \quad [W] \quad (4.22)$$

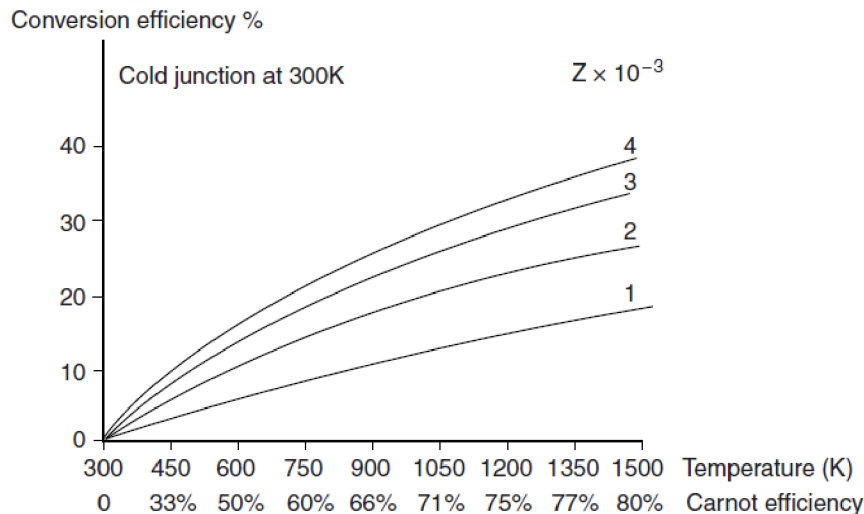
Účinnost termoelektrického modulu po dosažení výše uvedených veličin nabývá následujícího tvaru:

$$\eta = \frac{\left[\frac{\alpha(T_H - T_C)}{R_L + R_{int}} \right]^2 R_L}{\lambda(T_H - T_C) + I\alpha T_H - \frac{1}{2}I^2 R_{int}} \quad [-] \quad (4.23)$$

Termoelektrický modul ve funkci generátoru elektrické energie (TEG) je možno popsat jako tepelný stroj, který se řídí termodynamickými zákony a tudíž lze i jeho účinnost popsat Carnotovou účinností se zohledněním termoelektrické účinnosti ZT . Rovnice pak v konečném tvaru vyjadřuje maximální účinnost modulu [25]:

$$\eta_{max} = \eta_c ZT = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad [-] \quad (4.24)$$

kde první člen odpovídá Carnotově účinnosti (η_c) a druhý bezrozměrné termoelektrické účinnosti (ZT), která již byla popsána v kapitole 4.3.



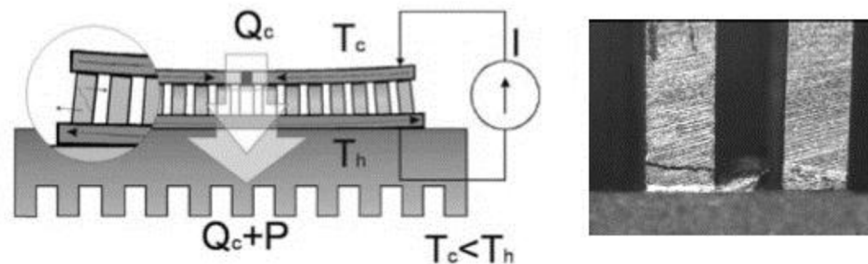
Obr. 20 Závislost účinnosti jako funkce teplotního rozdílu při daných bezrozměrných termoelektrických účinnosti ZT [2]

4.6 Životnost termoelektrického modulu

Díky absenci pohyblivých částí, mají termoelektrické moduly vysokou životnost dosahující až 10 let bezchybného provozu. Životnost může ovšem být někdy i zkrácena a to především nevhodným provozováním, kdy dochází k poškození vlivem překročení maximálních dovolených pracovních teplot, jenž následně přeruší kontakt

mezi termoelementy a článek pak pracuje jen s minimálním nebo až žádným výkonem [22].

Termoelektrické články by neměly být vystavovány také nepříznivým okolním podmínkou jako nadměrné vlhkosti, vibracím nebo prudkým změnám teplot, které vedou k namáhání vlivem vnitřních pnutí. Pokud je však modul vystaven kolísání teplot, neměly by tyto změny překračovat hodnotu větší než $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Dalším faktorem, který ovlivňuje životnost termoelektrického článku, je tepelné namáhání vznikající rozdílem teplot mezi chladnou a teplou stranou či nerovnoměrné rozložení tepla. Rozdílné koeficienty tepelné vodivosti vedou k mechanickým tlakům a mohou způsobovat ohnutí článku či jeho úplnou destrukci [22].



Obr. 21 Teplotní namáhání termoelektrického modulu a deformace termoelementů [22]

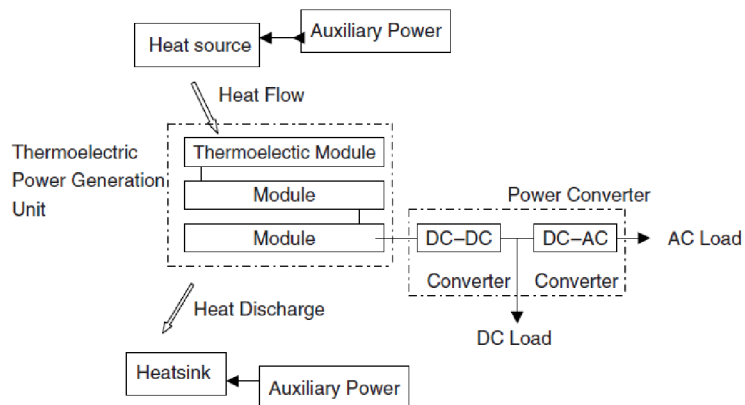
K mechanickému poškození dochází postupně. Nejprve začnou vznikat na termoelementu mikropraskliny, které se projeví zvýšením vnitřního odporu (snížení celkové účinnosti) a po té dojde k prasknutí celého sloupku, jenž přeruší elektrický kontakt a tedy i celý obvod [2].

5 Termoelektrický generátor elektrické energie

Termoelektrické generátory, díky své jednoduché konstrukci nabízejí široká uplatnění v mnoha odvětvích. Kupříkladu k využití odpadní tepelné energie v dopravě (výfukové plyny z motorů) nebo v průmyslových zařízeních (citelné odpadní teplo spalin průmyslových pecí). Dále je možno aplikovat termoelektrické generátory malých rozměrů jako zdroje autonomních systémů obsahujících detektory nebo senzory [2].

V literaturách bývají termoelektrické generátory často označovány jako zařízení TEG, ovšem komplexní zařízení pro generování požadované elektrické energie se skládá nejen ze samotného termoelektrického modulu popřípadě několika dohromady spojených modulů, ale také z částí, které dotváří výsledný termoelektrický generátor. Mezi nejpodstatnější části patří tepelné výměníky, které zprostředkovávají přenos tepla z proudícího média na teplou stranu modulu a také chlazení na straně studené [2].

Jelikož výstupní napětí z termoelektrického modulu není konstantní (mění se s teplotním gradientem) a daný napájený spotřebič požaduje určitou hodnotu napájecího napětí, je nutno výstupní napětí z TE modulu jemu přizpůsobit. V nejčastějších případech se tak děje pomocí zvyšujícího nebo snižujícího měniče stejnosměrného proudu (DC/DC měnič). V případech zapojení elektrických spotřebičů využívajících pro svůj chod střídavý proud lze využít i měniče DC/AC, který ze stejnosměrného proudu vytvoří za pomoci střídače proud střídavý vyhovující požadavkům sítě (v budově či veřejně) [2].



Obr. 22 Schématické znázornění hlavních součástí termoelektrického generátoru [2]

5.1 DC/DC měniče

V kapitole popisující výkon termoelektrického článku bylo zmíněno, že pro dosažení maximálního výstupního výkonu je zapotřebí volit shodnou odporovou zátěž s vnitřním odporem TE článku. V praxi se však spíše setkáváme se spotřebiči rozdílných vnitřních odporů, které také vyžadují jiné úrovně napětí. V případě přímého spojení termoelektrického generátoru se zátěží by docházelo k nežádoucím ztrátám na výkonu. Navíc při změnách teplotního gradientu TE modulu dochází ke kolísání výstupních parametrů generátoru a je namístě je vhodně usměrnit. Mezi nejčastější metody regulace a usměrnění výstupního napětí se využívají DC/DC měniče, které vycházejí ze základního zapojení spínacího zdroje a pracují na principu pulzně šířkové modulace (PWM) [40].

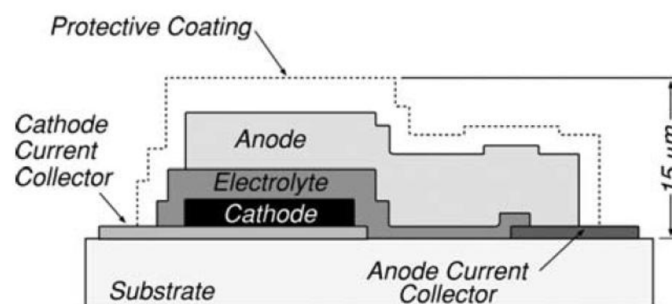
Z hlediska konstrukce DC/DC měničů je můžeme rozdělit na měniče s galvanickým oddělením (charakterizovány použitím transformátoru) a bez galvanického oddělení (neizolující měniče, charakteristické použitím cívky), jehož všechny prvky v daném obvodu jsou spojeny vodičem se vstupní energií. DC/DC měniče se dále rozdělují na měniče [40]:

- Snižující napětí (Buck, Step-Down)
- Zvyšující napětí (Boost, Step-Up)
- Invertující a snižující/zvyšující napětí (Buck-Boost)

5.2 Akumulace elektrické energie – tenkovrstvé baterie

Pro zdroje energie závislé na měnicích se okolních fyzikálních podmínkách (teplotní gradient) je vhodné zařízení vybavit uložištěm získávané elektrické energie. Nabízí se možnost využití superkapacitoru nebo sekundárních článků (chemické baterie). Obě z variant ovšem trpí určitými negativy. Superkondenzátory, které ač jsou schopny dodat v okamžiku plný výkon a nabízí dlouhou životnost (nabíjecí/vybíjecí cykly), mají velké samovybíjení a za určitý čas svou uloženou energii ztratí disipací. Baterie nevyhovují především svým nárokem na prostor a krátkou životností spojenou s nutností výměny. Jejich předností je však vysoká hustota akumulované energie a relativně nízká cena [25].

Od roku 2005 vědci usilovně pracují na novém typu baterií – tzv. tenkovrstvých baterií (Thin film battery). Tento druh baterie je vyráběn na stejné bázi jako dnes rozšířené lithium-iontové baterie ovšem s technologií chemické depozice z plynných fází. Jak již samotný název napovídá, baterie jsou charakteristické svou tloušťkou, která činí okolo 200 μm . Každá vrstva komponenty (katoda, anoda, elektrolyt a ochranný obal) zaujímá 3 μm tloušťku a je možné je na sebe dle požadovaných potřeb vrstvit. Vlastnosti tenkovrstvých baterií sjednocují výše popsané pozitiva komerčně dostupných sekundárních článků a superkapacitorů a staví je tak na pozici nejvhodnějšího akumulárního prostředku pro Energy harvesting zařízení [25].



Obr. 23 Schématický řez tenkovrstvé baterie [25]

Společnost Infinite Power Solution Inc. již tento druh baterií uvedla na trh a nabízí je v několika verzích lišících se velikostí a kapacitou. Kupříkladu model s označením Thinergy MEC101 dosahuje výstupního napětí 3,9 V, kapacity 1 mAh a dokáže uložit energii 14 J. To vše při rozměrech $25,4 \times 25,4$ mm a tloušťky 170 μm . Hmotnost baterie činí 450 mg [43].

5.3 Sensory

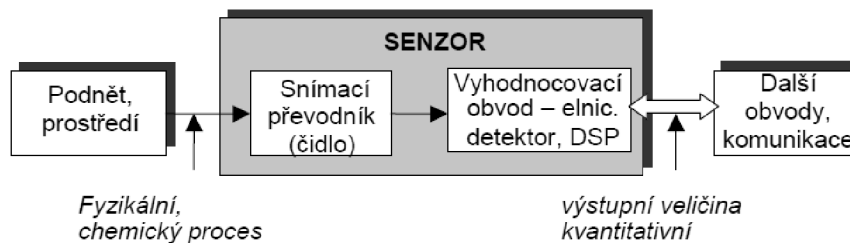
Jelikož termoelektrické generátory disponují malými výkony, pro napájení vysoko příkonových spotřebičů by bylo potřeba mnoho termoelektrických modulů. Vhodnými kandidáty pro aplikaci jednotného termoelektrického modulu (případně dvojice) se jeví senzory elektrických či neelektrických veličin, neboť jejich příkon je relativně nízký. Termoelektrický modul tak může poskytnout dostatek energie pro pokrytí vlastní spotřeby detektoru nebo senzoru pro snímání teploty, průtoku nebo také pro měření vlhkosti v dané místnosti či snímání koncentrací plynů vytvářených během procesu spalování paliva.

Charakteristika vlastní spotřeby senzorů		
Fyzikální veličina	Napětí [V]	Příkon [mW]
Teplota	2,7 – 5,5	0,3 – 0,6
Tlak	3 – 5	1 – 20
Vlhkost	4 – 5,8	1 – 3
Koncentrace plynu	2,3 – 5	< 800

Tab. 4 Charakteristika vlastní spotřeby aplikovatelných senzorů [33]

5.3.1 Klasifikace senzorů

Senzory můžeme klasifikovat dle logického uspořádání od jednoduchých až po komplexní a složité jednotky. Klasifikace nám napomáhá k rozdělení senzorů dle vstupní veličiny, principu převodu, výstupní veličiny, styku s měřeným prostředím, chováním výstupu, převodu neelektrické veličiny na signál a výrobní technologií [32].



Obr. 24 Obecné znázornění funkce senzoru [32]

Výše uvedené klasifikace jsou poměrně obsáhlé a v rámci této práce se již podrobnějšímu výkladu daných klasifikací nebudu zabírat. Pro měření veličin jako je teplota, průtok, vlhkost a objemová koncentrace bude vždy použit senzor s elektrickým signálovým vstupem, neelektrickou vstupní veličinou, ve styku s měřeným prostředím a bude napájený z vnějšího zdroje.

5.3.2 Teplotní senzory

Teplotní senzory lze rozdělit na kontaktní a bezkontaktní a to zdali se citlivá část senzoru fyzicky dotýká nebo nedotýká měřeného tepelného zdroje. Jako příklad nekontaktního teplotního senzoru lze uvést pyroelektrický senzor, který detekuje elektromagnetické vlnění vyzařované tělesem. Tyto senzory jsou ale poměrně drahé a

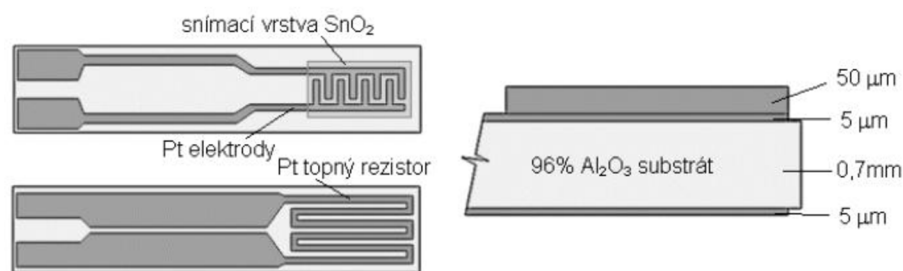
pro konstruované zařízení v této práci bude dostačující použít senzor, jenž přijde do kontaktu s měřitelným prostředím – kapalinou. Jako kontaktní teplotní senzor je možno použít termistor nebo tenkovrstvý (křemíkový či kovový) odporový mikrosenzor [33].

V praxi jsou pro měření teplot často využívány termistory a to díky jejich nízké ceně. Obecně v porovnání s ostatními teplotními senzory mají velkou citlivost (velká změna odporu při změně teploty) ačkoli se vyznačují značně nelineárními charakteristikami, což v určitých případech je nežádoucí. Pro jejich linearizaci se používají jednoduchá analogová zapojení tvořená lineárními rezistory. Termistory se dělí dle teplotního koeficientu vyjadřujícího změnu rezistivity na termistory typu PTC (kladný teplotní součinitel) a typu NTC (negativní teplotní součinitel) [33].

5.3.3 Chemické senzory

Chemický senzor lze definovat jako součástku, jenž je schopna transformovat chemické veličiny na elektrický signál a lze je rozdělit podle základních principů detekce. Nejobecnějšími principy detekce jsou vodivostní, kapacitní, kalorimetrický, gravitační a optický princip. Ideální senzor reaguje pouze na jednu chemickou reakci, přičemž na ostatní je necitlivý. Této selektivity je docíleno volbou vhodného materiálu (organického nebo anorganického) [33].

Nejpoužívanějším principem detekce plynů bývá vodivostní, na kterém následně pracuje chemorezistorový senzor. Působením chemické veličiny (plynu nebo páry) se mění elektrická vodivost chemicky citlivé odporové vrstvy. Složení tohoto senzoru se skládá ze substrátu, který je vyroben z oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo oxidu křemičitého (SiO_2) a na němž jsou vytvořeny dvě elektrody. Dále je zde umístěna chemicky citlivá odporová vrstva nejčastěji vyráběná z organických krystalů či oxidů kovu [33].



Obr. 25 Struktura chemorezistorového senzoru [32]

Chemorezistor s tenkou vrstvou uvedla na trh v 70. letech firma Figaro Engineering Inc., která vyvinula senzor plynů pod obchodním názvem TGS (Taguchi Gas Sensor), přičemž tyto senzory jsou vyráběny i doposud. Senzory TGS se využívají pro detekci reaktivních a výbušných plynů, ale také i jedovatých průmyslových par a plynů, mezi něž kupř. patří H_2 , CH_4 , C_3H_6 , CO , NO_x , H_2S , AsH_3 , SO_2 nebo NH_3 . Senzory jsou vyráběny v keramické trubici pokryté sintrovanou vrstvou SnO_2 a uvnitř s vyhřívací spirálou, jejíž elektrický příkon je okolo 1 W. Na obdobném principu byly realizovány i mikrosenzory, které dosahovaly příkonů do 75 mW. Výhodou senzorů TGS je jejich vysoká citlivost, nízká cena, jednoduchá konstrukce, slučitelnost s elektronickými součástkami a integrovanými obvody. Ovšem hlavním nedostatkem je jejich omezená životnost závislá na žhavené spirále [33].

5.4 Aplikace termoelektrického generátoru

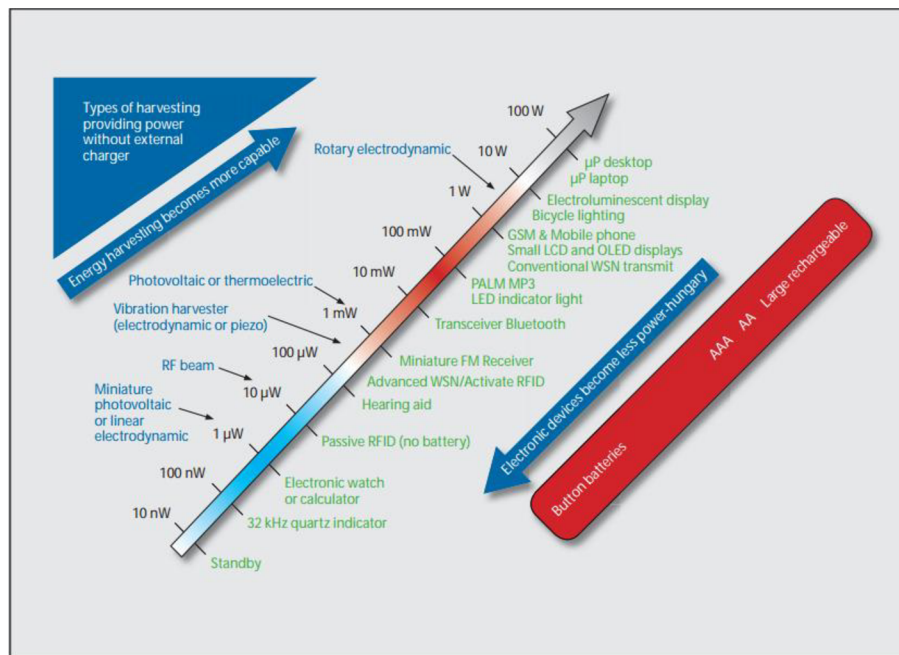
Tato práce se zabývá termoelektrickým generátorem malého výkonu a tak výčet možných aplikací omezím pouze na ty, jež toto kritérium splňují a ostatní aplikace zařízení dosahujících vyššího výkonu nebudou popisovány.

5.4.1 Energy Harvesting zařízení

Získávání elektrické energie pro napájení různých mikrosystémů či mikrosenzorů je v současné době věnována velká pozornost. Moderní součástky již umožňují značné snížení napájecího napětí i celkového příkonu systému a tak vyvstává možnost využití generátorů malých výkonů, které poskytnou dostatek energie pro jejich chod. V takovémto případě pak můžeme eliminovat napájení z baterií a rovněž i ze sítě [27].

Energy harvesting, nebo také power harvesting se může doslovně přeložit jako „sklizeň energie“ a označuje tak způsob získávání elektrické energie z okolního fyzikálního prostředí, kterým může být například magnetismus, sluneční záření, teplotní a chemické gradienty, mechanické vibrace, proudění tekutiny apod. Podle analýzy provedené společností Frost & Sullivan náleží Energy harvesting mezi klíčové technologie vytipované do roku 2020 [27].

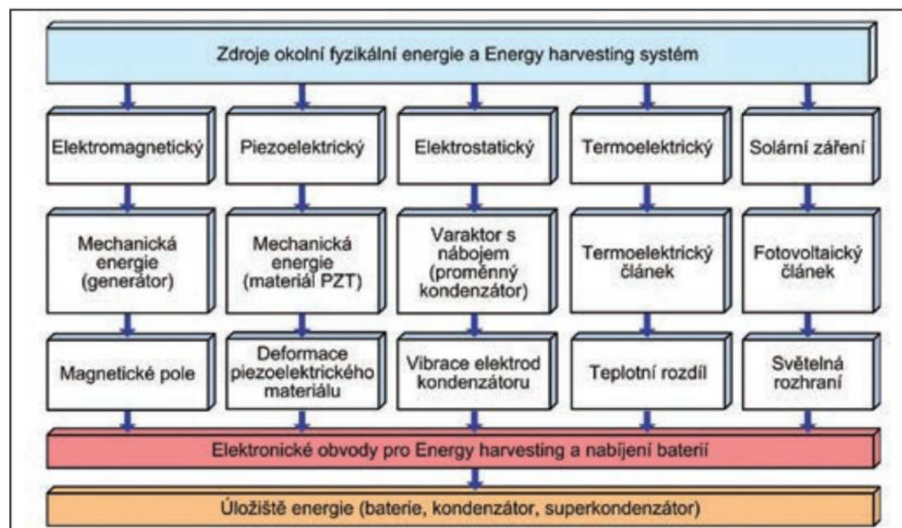
V dnešní době jsou již na trhu dostupné nové vysoce úsporné mikročipy, které mohou pracovat s velmi nízkým napájecím příkonem. Na druhé straně se pracuje na zvyšování účinnosti a dosažitelných výkonů systémů Energy harvesting. Tento trend zachycuje obrázek níže (Obr. 26), který znázorňuje snižování příkonů elektronických zařízení společně s rostoucími výkony zdrojů elektrické energie v podobě zařízení Energy harvesting [27].



Obr. 26 Porovnání příkonů elektronických čipů a dosažitelných výkonů Energy harvesting zařízení [27]

Systémy Energy harvesting se na trhu mohou uplatnit téměř ve všech odvětvích, přičemž aplikace ve stavebnictví je jednou z nejpoužívanější. Nalezneme je například v komerčních budovách, kde slouží jako napájecí zdroje pro bezdrátové přepínače osvětlení nebo také jako bezdrátové detektory a senzory (přítomnosti osob, teploty, vlhkosti apod.). Jejich širšímu rozšíření hlavně napomáhá snížení velkých nákladů spojených s instalací zařízení, které by jinak muselo být připojeno skrze kabeláž a napájeno z elektrické sítě. Dále možnost a úspory energií díky detektorům, které automaticky vypnou osvětlení v nepřítomnosti osob nebo udrží danou místnost na konstantní teplotě a zamezí tak jejímu přetopení. V neposlední řadě lze systémy Energy harvesting použít v nedostupných místech, kde by nebyla možná výměna chemických zdrojů energie bateriemi napájených zařízení či v nehostinném prostředí [25], [27].

Proces Energy harvesting se skládá ze dvou hlavních fází a to primárního získávání energie převodem fyzikální energie na elektrickou a dále její uložení ve vhodných elektronických obvodech či součástkách (kondenzátor, baterie). Ve většině případů se jedná o napájení nízkopříkonových elektronických obvodů, jako jsou například bezdrátové sensorové sítě, malá přenosná elektronická zařízení nebo autonomně napájené malé přístroje. Obecný přehled jednotlivých systémů založených na získávání elektrické energie z okolního prostředí je zobrazen na obrázku níže viz obr. 27 [27].



Obr. 27 Obecný přehled Energy harvesting zařízení využívajících okolních zdrojů energie [27]

Okolní zdroje energie můžeme rozlišit podle generování elektrické energie ve formě stejnosměrného (DC zdroje) či střídavého proudu (AC zdroje). Charakteristickým rysem DC zdrojů jsou pomalé časové změny a jedná se především o intenzitu světla či teplotní gradient. AC zdroje využívají vibrace, RF výkon získaný z piezoelektrických materiálů, elektromagnetických generátorů apod. Výstupní energie z těchto zdrojů musí být usměrněna tak, aby bylo možno získanou energii uskladnit. Proto se ve většině případů Energy harvesting zařízení doplňují DC/DC měniči, neboť formou uložení energie často bývá baterie popřípadě kondenzátor/superkondenzátor, které pracují se stejnosměrným proudem. Díky uložení „sklizené energie“ je možno napájet danou zátěž i v případě, kdy není k dispozici daná okolní fyzikální energie [27].

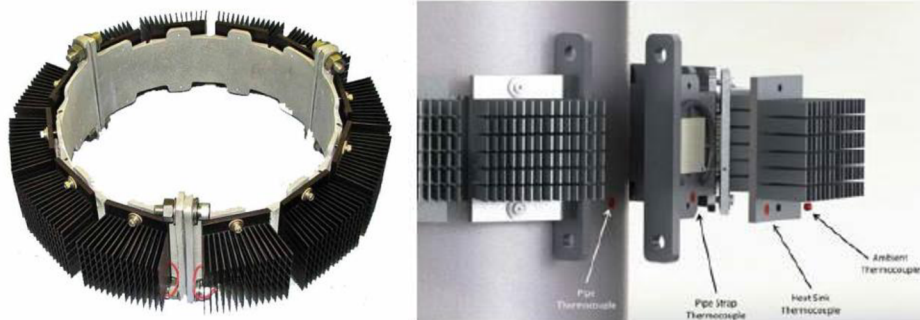
Systém Energy harvesting založený na termoelektrickém principu je jednou z mnoha možností jak získávat potřebnou energii z okolí. Využívá teplotního gradientu

z povrchu látek nebo proudícího média a okolního prostředí, který díky již objasněnému principu Seebeckova jevu, může sloužit k přímé přeměně na elektrickou energii. Tato zařízení jsou schopna dodávat energii pouze po dobu trvání teplotního rozdílu případně do doby, než dojde k vyčerpání uložené energie kondenzátoru nebo baterie. Pro omezení šíření tepla se využívají teplotně izolované mikroelektromechanické systémy (MEMS). Ačkoli tyto systémy dokážou pracovat již při malém teplotním rozdílu, jejich výstupní napětí je velmi nízké a dodaný výkon malý ($15 \mu W cm^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$). V budoucnu se ale počítá s rozvojem těchto technologií a jejich postupnému navyšování výstupního výkonu [23], [27].

Z možných zdrojů tepelné energie, která může být zkonvertována na elektrickou energii je například teplo vznikající třením v ložiskách, teplo z parního potrubí, ústřední vytápění, procesní zařízení, klimatizace, horké či studené tekutiny, odpadní teplo z motorů a disipační teplo v elektrických rozvodných sítích. Zúžitkováním odpadní tepelné energie přeměněné v energii elektrickou vhodnou k napájení měřicího zařízení dochází k výrazným snížením nákladů na opravy díky včasnému zjištění závad a dále také k možnosti úspory primárních energií, které vedou ke snížení produkce skleníkových plynů a tedy i snížení dopadu na životní prostředí [28].

Marlow Industries Inc.

Jednou z firem, které již uvedly na trh Energy harvesting zařízení pracujícím na termoelektrickém principu, je společnost Marlow Industries Inc. Ta představila své zařízení EverGen™ PowerStrap, které je určeno pro využití tepla z protékající kapaliny či plynu v průmyslovém, chemickém či rafinérském potrubním systému. Výkony generátorů jsou závislé na množství použitých termoelektrických modulů a teplotním rozdílu proudícího média v potrubí a teploty okolního prostředí. Získaná energie pak může posloužit jako zdroj pro napájení senzorů, jejichž naměřená data o vlastnostech proudícího média mohou být pomocí bezdrátového systému přenášeny na centrálu a tam dále zpracovávána [29].

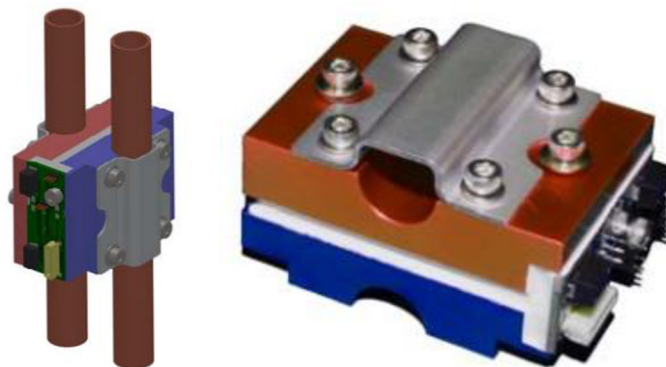


Obr. 28 Zařízení EverGen™ PowerStrap pro průmyslová potrubí [29]

Pro potrubí menšího průměru (DN 10 a DN 15) jsou vyráběny kompaktnější zařízení EverGen Energy Harvesters. Jejich konstrukce s rozměry $54 \times 41 \times 38$ mm (D×V×Š) jim umožňuje obepnutí pomocí speciálního uchycení na potrubí s protékající kapalinou a to jak na teplé, tak i studené straně a využít tak lepšího přestupu tepla nebo většího tepelného spádu. Velkou nevýhodou této konstrukce spatřuji v nutnosti dodržení daného rozestupu potrubí s teplým a chladným médiem a tudíž nemožnosti aplikovat toto zařízení na libovolné potrubní systémy. Pro aplikace pouze s jedním potrubím

společnost Marlow Industries Inc. nabízí Evergreen Energy Harvester s chlazením studené strany pomocí přirozené konvekce okolního vzduchu [30].

Obě zařízení jsou vybavena DC/DC měničem LTC 3108 a disponují pouze konektorem pro připojení zátěže, kterou by měl s největší pravděpodobností tvořit senzor určité veličiny. Výkon zařízení s aplikací na dvě rovnoběžná potrubí s rozdílnými teplotami dosahuje 5,1 mW při výstupním napětí 5 V a teplotním rozdílu 35 °C. Energy Harvester s žebrovaným chlazením studené strany přirozenou konvekcí vzduchu disponuje výkonem 2,3 mW, kdy teplotní rozdíl je roven 60 °C a výstupní napětí 5 V. Cena obou zařízení je stanovena na 259 USD [30].



Obr. 29 Zařízení EverGen™ Energy Harvester pro potrubí menších rozměrů [30]

Micropelt GmbH

Mezi další produkty na trhu se řadí zařízení TE-Power-Ring společnosti Micropelt. Jedná se o bezbateriové a bezdrátové zařízení využívajícího odpadního tepla v ložiskách vznikající vlivem tření, které je umístěno v přímém kontaktu s ložiskem. Přeměnu tepelné energie v elektrickou zajišťují dva termogenerátory MPG-D751 umístěné po obvodu. Zařízení je vybaveno měničem napětí, mikrokontrolérem a senzory pro měření teploty a otáček ložisek, v určitých verzích je možno měřit i vibrace a okolní vlhkost. Naměřená data ze senzorů jsou pak cyklicky odesílána pomocí bezdrátového modulu a v případě překročení kritických hodnot vyšle zařízení poplašnou zprávu [31].



Obr. 30 Bezdrátové zařízení TE-Power-Ring monitorující teplotu a vibrace ložisek [31]

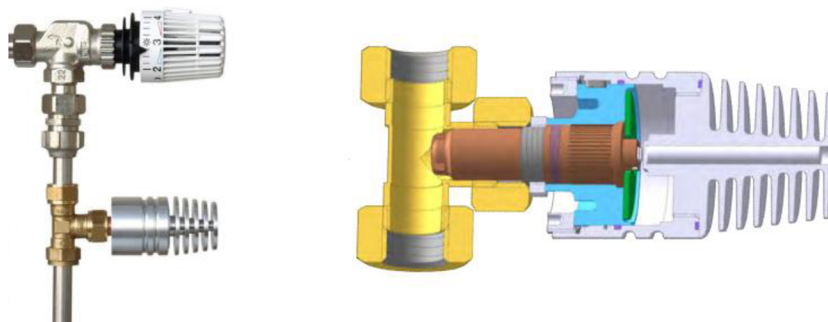
Obdobnými produkty stejnojmenné společnosti Micropelt jsou zařízení TE-qNode a TE-Power Probe. První z nich využívá tepla vznikajícího disipací elektrické energie na pásových vodičích v rozvodných soustavách, přičemž kontinuálně měří jejich teplotu (případně i zasilá naměřená data bezdrátovým přenosem) a tím tak snižuje riziko

možného poškození vlivem přehřátí. Dle výrobce je pro provoz zařízení dostačující teplotní rozdíl pouhých 5 °C mezi okolním prostředím a měřeným vodičem [28].



Obr. 31 Zařízení TE-qNode měřící teplotu vodičů rozvodné sítě [28]

Energy harvesting zařízení TE-Power Probe připomíná svým designem termohlavici ústředního vytápění, které je speciálně navrženo pro získávání energie z proudící kapaliny v potrubí. Nejvyšší účinnosti dosahuje zařízení při horizontální instalaci, kde je studená strana integrovaného termoelektrického modulu ochlazována přirozenou konvekcí vzduchu okolního prostředí. Výstupní napětí je udržováno na stabilních 4,5 V a dosažitelný výkon při teplotním gradientu 20 °C je 1 mW. V případě teplotního rozdílu 54 °C je výstupní výkon roven 10 mW, který je dostačující pro provoz nízkopříkonového senzoru nebo elektroniky řídicí termostatickou hlavici regulující topná tělesa. V případě, kdy není dostupný teplotní gradient, je možno doplnit zařízení o kondenzátor nebo tenkou mikrobaterii s nízkým samovybíjením. V kooperaci společností ABB a Micropelt vznikl prototyp systému založený na zařízení TE-Power Probe, který disponoval dvěma mikrotermogenerátory MPG D651 a obstarával napájení pro bezdrátový senzor teploty v průmyslových aplikacích. Na mnichovské konferenci IDTechEx byl tento prototyp oceněn jako nejlepší technologie v oblasti bezdrátových senzorů pracujících v reálném čase [4], [28].

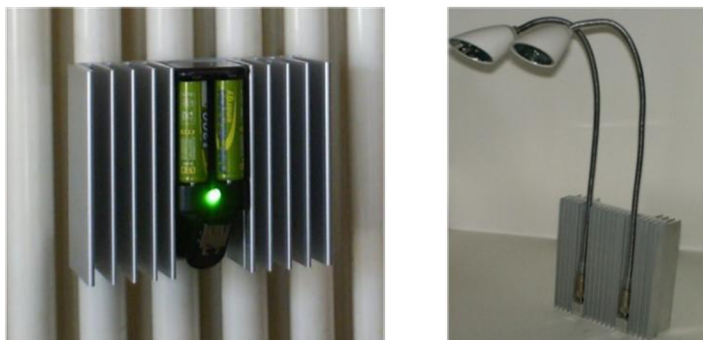


Obr. 32 Zařízení TE-Power Probe pro napájení elektroniky termostatické hlavice [28]

Thermalforce.de

Německá společnost Thermalforce, ačkoli se nezabývá přímo výrobou zařízení Energy harvesting její portfolio výrobků je velmi podobné zařízením konkurenčních výše uvedených společností. Mezi ně patří kupříkladu LED lampa nebo nabíječka AA baterií, které se instalují na radiátory ústředního vytápění nebo na potrubí s horkým médiem. Dále tato společnost nabízí speciální ruční LED svítidlo, která po uchopení do dlaní začne měnit emitované teplo z lidské pokožky na elektrickou energii a napájet

integrované LED diody. Ovšem značnou nevýhodou svítivky je její teplotní omezení, kdy může optimálně svítit pouze v prostředí do 22 °C, po té ztrácí na intenzitě osvětlení [34].

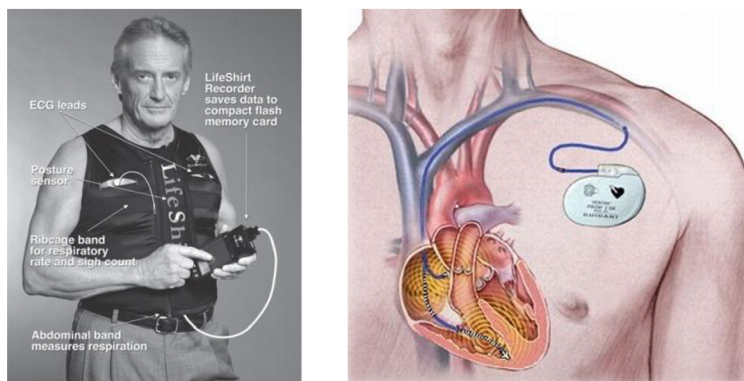


Obr. 33 Nabíječka AA baterií a LED lampa využívající tepla z radiátorů ústředního vytápění [34]

5.4.2 Biomedicínská zařízení

Diagnostické nástroje ve zdravotnictví se neustále vyvíjejí a zdokonalují a nynějším trendem je jejich miniaturizace a s ní i spojená mobilita. Pacienti, kteří jsou odkázáni na neustálé monitorování zdravotního stavu nebo jsou připojeni k přístrojům zajišťující důležité životní funkce, mohou být po implantování přenosného biomedicínského zařízení oprostěni od permanentní hospitalizace v nemocnicích [4].

Lidské tělo využije přibližně 80 % z metabolické přeměny energie ke své termoregulaci a udržení teploty okolo 37 °C, přičemž neustále vytváří teplo o přibližné hodnotě 100 W, které odchází vlivem kondukce, konvekce, záření a odpařování do okolí. Ačkoli lidské tělo vytváří nízkopotenciální teplo, pro určitá biomedicínská zařízení na termoelektrickém principu je tento zdroj energie dostačující. Biomedicínské přístroje můžeme rozdělit na zařízení vhodná k nošení a na implantáty [4].



Obr. 34 Biomedicínská zařízení napájená termoelektrickým generátorem [4]

Díky kompaktní velikost přenosných diagnostických přístrojů může být pacient vybaven speciálními tělními senzory kontinuálně monitorující fyziologické funkce, které skrze bezdrátový přenos mohou být zasilány do počítače pacienta a přes něj dále přímo ke zdravotním pracovníkům. Při náznacích možných zdravotních potíží může být ve velmi krátkém čase přivolána zdravotní pomoc a pacient tak zachráněn. U méně závažných onemocnění mohou být naměřené výsledky pacienta odeslány lékaři k

dalšímu zpracování a vyhodnocení, aniž by pacient musel lékaře navštěvovat. Přenosná měřící zařízení se senzory fyziologických funkcí jsou napájeny mikrotermogenerátory, které již dodávají výkon při rozdílu teploty na povrchu kůže a okolního prostředí okolo 5 °C. Studie ukazují, že konstantní výkon 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ a napětí 1 V jsou ideální provozní podmínky pro provoz těchto zařízení [4].

V případě implantátů se v nynější době využívají a nadále provádějí výzkumy aplikovatelnosti termoelektrických generátorů pro napájení kardiostimulátorů, defibrilátorů, neurologických a žaludečních stimulátorů a monitoru hladiny glukózy. Jelikož se jedná o přístroje implantované v lidském těle, kde je poměrně obtížné docílit významnějšího teplotního gradientu, termogenerátory jsou schopny dodávat elektrický výkon již při teplotním rozdílu 1 °C [4].

6 Návrh a konstrukce termoelektrického generátoru

Základem návrhu termoelektrického generátoru je dosažení co nejvyššího teplotního rozdílu na plochách termoelektrického modulu. Z tohoto teplotního rozdílu se pak dále budou odvíjet výkonnostní parametry celého generátoru. Cílem experimentálního termoelektrického generátoru je využití tepelné energie z proudící kapaliny, která odchází z plynového kotle jako teplá užitková voda a přeměna této tepelné energie v elektrickou za účelem možnosti napájení periferního elektronického obvodu. Konstrukce termoelektrického generátoru byla navržena se zohledněním parametrů kondenzačního plynového kotle určeného pro vytápění a průtokový ohřev vody. Další parametry, ke kterým bylo přihlíženo při návrhu konstrukce, jsou:

- Jednoduchost zařízení
- Snadná montáž a možnost rychlé opravy
- Malá tlaková ztráta v aplikovaném okruhu
- Spolehlivost a životnost
- Nízká cena

6.1 Volba a parametry termoelektrického modulu

Po prozkoumání technických dokumentací vhodných termoelektrických modulů pro danou aplikaci, byl v konečném důsledku vybrán typ TG 12-6-01L společnosti Marlow Industries Inc., jelikož byl dříve pořízen školou pro experimentální stanovení jiných aplikací termoelektrických generátorů. Po úvaze možnosti napájení periferního obvodu výsledným generátorem, byly zvoleny dva moduly pro zajištění dostatečného výkonu i při nízkých teplotních rozdílech.

Parametry termoelektrického modulu TG 12-6-01L		
Veličiny	Jednotka	Hodnota
Délka studené strany	mm	40,13
Délka teplé strany	mm	44,7
Šířka	mm	40,13
Výška	mm	3,91
Maximální přípustná teplota	°C	250
Maximální přípustný přitlak	MPa	1,379
Teplota studené strany (ref.)	°C	50
Teplota teplé strany (ref.)	°C	110
Seebeckův koeficient	VK ⁻¹	0,054
Napětí naprázdno	V	3,29
Proud nakrátko	A	1,14
Termoelektrická účinnost ZT	-	0,73
Elektrický odpor modulu (ACR)	Ω	2,15
Tepelná vodivost modulu	Wm ⁻¹ K ⁻¹	1,54
Tepelná vodivost keram. desek	Wm ⁻¹ K ⁻¹	30,1
Počet termoelektrických dvojic	-	254
Materiál termoelektrických dvojic	Bi ₂ Te ₃	
Materiál keramických desek	Al ₂ O ₃	

Po prostudování technických listů společnosti Marlow Industries Inc. [36] a po odečtení všech potřebných hodnot z grafů v technické dokumentaci (datasheetu) termoelektrického modulu TG 12-6-01L [37], byla sestavena tabulka pro orientační výpočet parametrů, kterých by měl tento jeden modul při daných aplikovaných podmínkách dosahovat.

Zadané hodnoty		
Teplota teplé strany	°C	60
Teplota studené strany	°C	15
Zátěž	Ω	3
Výpočet parametrů modulu		
Teplotní rozdíl	°C	45,000
Tepelný tok	W	28,543
Tepelný odpor	°C/W	1,577
Napětí naprázdno	V	2,468
Napětí - optimální	V	1,403
Výkon - optimální	W	0,539
Proud - optimální	A	0,384
Účinnost - optimální	%	1,889
Záťaž - optimální	Ω	3,649
Napětí se zátěží	V	1,437
Proud se zátěží	A	0,479
Výkon se zátěží	W	0,689

Tab. 5 Výpočet parametrů modulu TG 12-6-01L ze zadaných hodnot

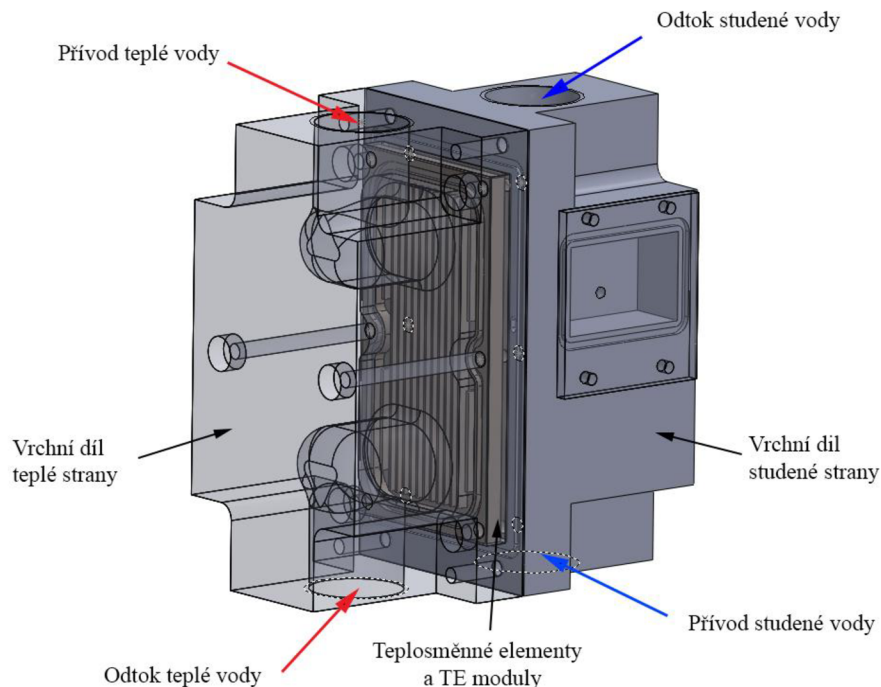
6.2 Návrh konstrukce výměníku tepla

Výměník tepla je zařízení sloužící k průběžnému nebo přerušovanému předávání tepelné energie pomocí proudících teplotných médií o různých parametrech. Dochází zde k předávání tepla z teplého média (ohřívacího) do média chladnějšího (ohřívávaného) ve většině případů přes oddělovací stěnu, tedy tak jak udává druhý zákon termodynamiky [8], [38].

Tepelné výměníky jsou klasifikovány dle charakteru proudění média a typu konstrukce. Pokud teplotné médium proudí ve stejném směru a ose jako médium ohřívávané, nazýváme tento typ výměníků jako souprůdný. V opačném případě, kdy jsou směry proudů médií rovnoběžné, ale mají opačný smysl, se jedná o výměníky protiproudé. Dalším možným konstrukčním uspořádáním je křížový výměník, v němž proud ohřívací látky proudí kolmo na ohřívávané médium [38].

Při návrhu konstrukce tepelného výměníku pro termoelektrický generátor malého výkonu bylo rozhodnuto využít protiproudého uspořádání. Jak již bylo na úvodu této kapitoly nastíněno, generátor bude aplikován do okruhu plynového kotle s průtočným ohřevem pro přípravu TUV. Kotel disponuje přípojitelnými armaturami ve stejné výši a tak je namístě, kvůli jednodušší montáži, toto rozvržení zachovat a využít právě protiproudé řešení.

Pro získání co nejvyššího teplotního gradientu, byl tepelný výměník termoelektrického generátoru navržen tak, aby protékající médium bylo v kontaktu s oběma stranami termoelektrických modulů. Samotný výměník se skládá ze čtyř částí – vrchní části pro přívod chladícího média, dvou teplosměnných základen dosedajících na termoelektrické moduly a vrchní části s přívodem ohřívacího média. V určitých pohledech se jedná o dva zrcadlově shodné segmenty, viz obrázek níže.



Obr. 35 Částečně průhledný pohled na výměník termoelektrického generátoru malého výkonu

6.2.1 Konstrukce teplosměnných elementů výměníku

Nejčastějšími materiály pro konstrukci teplosměnných ploch bývá hliník, měď nebo ocel. Po rozvaze a přihlédnutí k vlastnostem jednotlivých materiálů, bylo rozhodnuto i přes vyšší cenu použít měď. Ta oproti ostatním materiálům dosahuje nejvyšší tepelné vodivosti ($384 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) a tedy i výsledného přestupu tepla. Na rozdíl od hliníku je nezávadná a odolává agresivnímu prostředí. Z měděného polotovaru o rozměru $200 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ byly vyrobeny dvě základny (pro teplou a studenou stranu TE modulů), ve kterých byly vyfrézovány závity M4, žebra a drážky pro těsnění. Žebrování poslouží pro zvětšení teplosměnné plochy, což vede ke zlepšení přestupu tepla z média do materiálu [38].

Obě základny disponují vybráním materiálu na stranách dosedajících na TE moduly pro jejich snadnější umístění. Těsnosti mezi svrchní částí a měděným teplosměnným elementem bylo dosaženo použitím silikonového těsnění umístěného v drážce po obvodu. Dostatečná přitlačná síla je realizována pomocí šesti šroubových spojů. Aby nedocházelo ke korozi povrchu mědi vlivem protékající vody, je vhodné použít povrchovou úpravu v podobě galvanického poniklování či pochromování. Ovšem zásadní nevýhodou této úpravy je, že dojde ke zhoršení tepelné vodivosti materiálu a v případě niklu by se mohly do vody uvolňovat nežádoucí nečistoty a kontaminovat tak TUV. Aplikování povrchové úpravy tak zůstává možnou variantou dalšího vylepšení zařízení po dohledání patřičných informací o vlivu na lidské zdraví.



Obr. 36 Měděné teplosměnné elementy výměníku

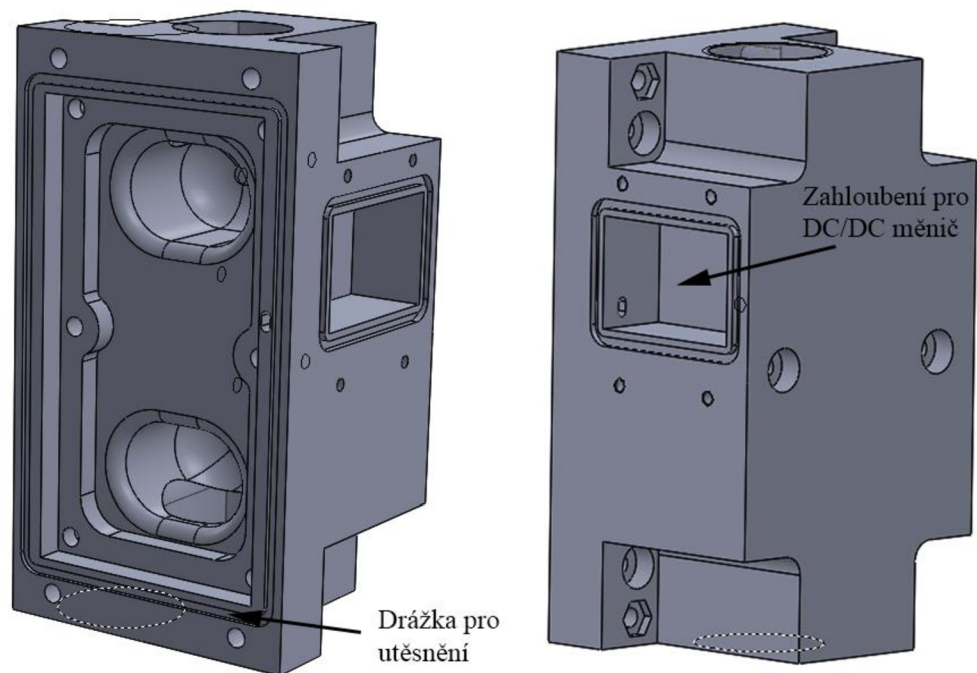
6.2.2 Konstrukce dílů pro přívod kapaliny

Vrchní část krytí měděných základen slouží zároveň jako přívod kapaliny k žebrované ploše. Jako materiál pro výrobu tohoto dílu byl použit technický plast ertacetal s označením POM-C. Jedná se o acetalový kopolymer, který nabízí skvělé vlastnosti pro obrábění, je odolný proti hydrolýze a tepelně-oxidační degradaci. V mechanických vlastnostech při 23 °C dosahuje meze pevnosti v tahu 68 MPa a modulu pružnosti v tahu 3100 MPa. Díky jeho tepelné vodivosti $0,31 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ jej lze použít v konstrukci výměníku jako tepelný izolant vůči okolnímu prostředí [39].

Konstrukce vrchního dílu (tzv. TOPu) je podobně jako u měděných základen shodná s protějším kusem. Rozdílem však jsou detaily, které tyto dva díly od sebe odlišují. U vrchního dílu, kterým bude protékat studená voda, je vytvořeno zahloubení s krytím pro plošný spoj osazený elektronickými součástkami (DC/DC měnič) z důvodu možnosti jeho chlazení. Dále je v tomto díle vyfrézována drážka pro těsnění, která slouží k úplnému zatěsnění vnitřních zapuštěných částí (měděných teplosměnných elementů a termoelektrických modulů), aby nedocházelo k jejich degradaci vlivem působení vlhkosti.

Spojení obou TOPů dohromady lze provést pomocí čtyř šroubů M4 a k nim příslušných matic, pro které jsou předvrtány díry (pro matice šestihranné zahloubení). Sešroubováním vrchních částí s předem namontovanými měděnými základnami a vloženými termoelektrickými moduly do patřičných pozic dojde k dosednutí teplosměnných ploch měděných dílu na TE moduly z obou stran a celkovému složení termogenerátoru. Pro eliminaci namáhání šroubových spojů vlivem teplotní roztažnosti byl materiál v oblasti děr pro šrouby a matice záměrně odebrán. Tímto způsobem, by se mělo zabránit pnutí a nadměrnému přitlaku vyvinutého na termoelektrické moduly vlivem teploty.

Oba vrchní díly mají otvor pro vstup a výstup kapaliny opatřeny závitem G 3/4“, který slouží pro našroubování topenářských fitinek a celkovému připojení generátoru k plynovému kotli pomocí hadic či potrubí.

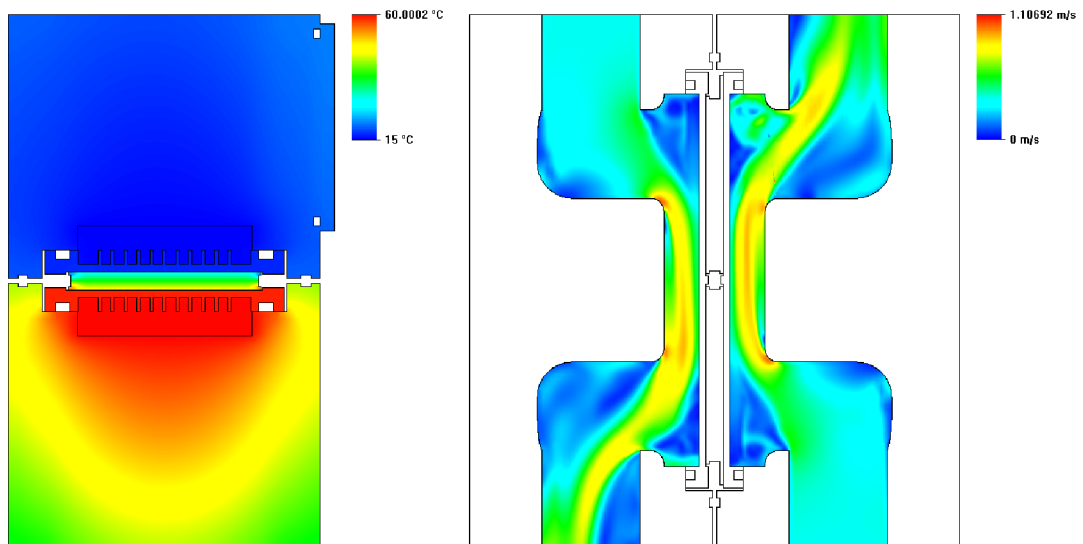


Obr. 37 Vrchní díl studené strany výměníku (TOP)

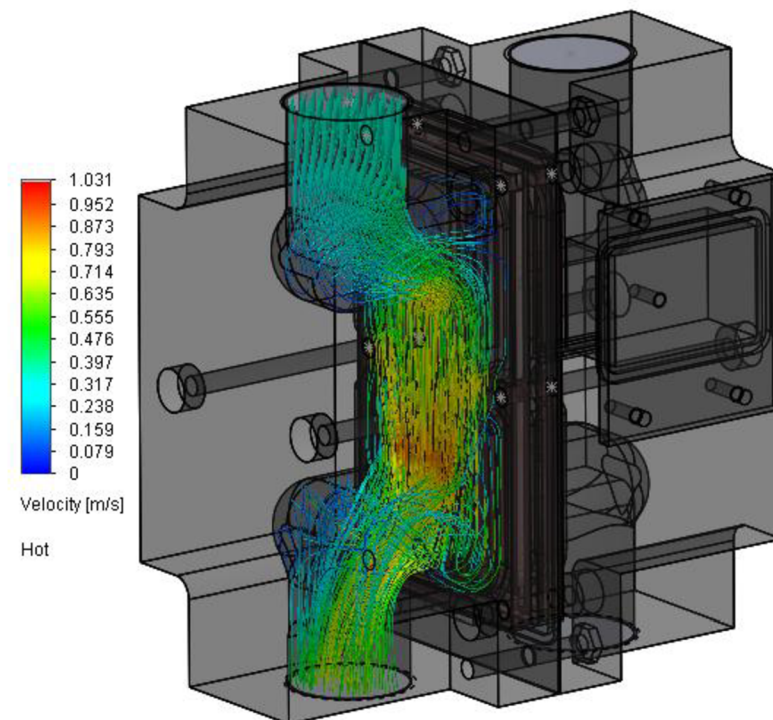
6.3 CFD simulace termoelektrického generátoru

Model tepelného výměníku termoelektrického generátoru byl vytvořen ve strojírenském 3D CAD softwaru SolidWorks 2012. Aby mohla být optimalizována konstrukce generátoru, bylo využito možnosti rozšíření softwaru o simulaci proudění Flow Simulation. Po vytvoření výpočetní sítě, zadání vstupních a předem vypočítaných okrajových podmínek (podobné jako v konkurenčním softwaru Fluent), byl získán přibližný pohled na charakteristiku proudění kapalin a prostupu tepla, který byl důležitý pro optimalizování samotných částí generátoru. Hlavními optimalizacemi konstrukce byly zejména způsoby zaoblení hran, umístění vstupních otvorů a změny průřezu průtočné plochy nad žebrováním teplosměnného elementu, které nejvíce ovlivňovaly nežádoucí tlakovou ztrátu.

Díky simulaci bylo také možno předem odhadnout přibližnou teplotu stran termoelektrických modulů a z nich následně dopočítat přibližné výstupní parametry (napětí, proud a výkon), které posloužily pro orientaci při výběru termoelektrických modulů.



Obr. 38 Simulace prostupu tepla a proudění kapaliny v termoelektrickém generátoru



Obr. 39 Znáznornění trajektorií rychlosti kapaliny pomocí simulace proudění v TE generátoru

6.3.1 DC/DC měnič – Microchip MCP1640

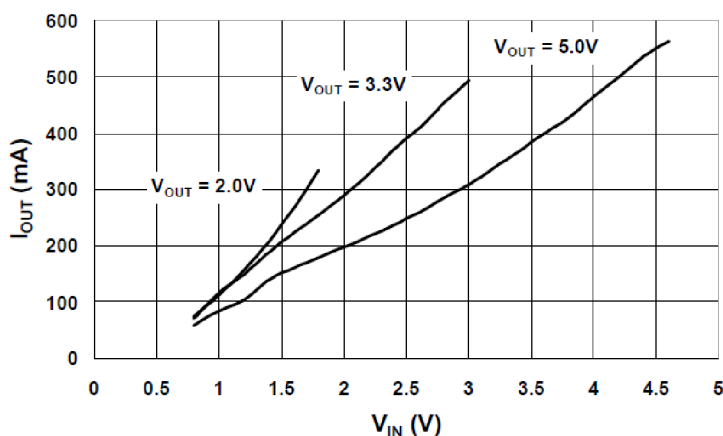
Pro konstruované zařízení termoelektrického generátoru malého výkonu bylo rozhodnuto na základě předpokladů využít zvyšující neinvertující měnič bez galvanického oddělení. Jedním z vhodných monolitických obvodů dostupných na trhu je stejnosměrný měnič MCP1640 vyráběný společností Microchip, který dokáže pracovat již při vstupním napětí 0,65 V, přičemž na výstupu je generováno zvýšené napětí od 2,0 do 5,5 V. Měnič nabízí aplikovatelnost pro mnoho zařízení, jejichž vstupní napětí je 3,3 nebo 5 V. Vhodný je pro použití v přenosných zdravotnických přístrojích,

GPS navigacích, BT headsetech, zařízeních napájených knoflíkovými bateriemi a také pro bezdrátové senzory [41].

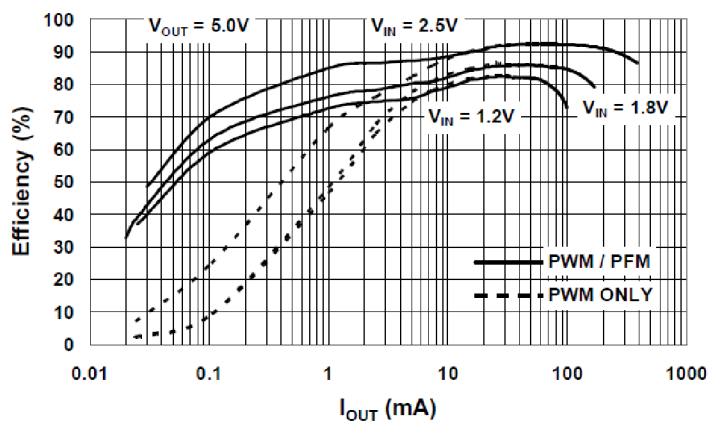
Samotný obvod měniče má 6 vstupních/výstupních pinů a je uzavřen v pouzdře typu SOT-32. Dále disponuje vysokou mírou účinnosti, pulzně šířkovou i pulzně frekvenční modulací (PWM a PFM), vynikajícími dynamickými parametry a stabilizací struktury pomocí vestavěné kompenzace (zesilovače odchylky s kompenzací strmosti). Jeho provozní parametry jsou shrnuty v následující tabulce a grafech [41], [42].

Parametry DC/DC měniče MCP1640 - SOT32		
Parametr	Jednotka	Hodnota
Rozsah vstupních napětí	V	0,65 - 5,5
Rozsah výstupních napětí	V	2 - 5,5
Maximální spínací proud	mA	400
Maximální pracovní kmitočet	kHz	575
Maximální účinnost	%	60 96
Maximální klidový proud	uA	19
Maximální provozní teplota	°C	125
Tepeľný odpor pouzdra	°CW-1	192

Tab. 6 Provozní parametry DC/DC měniče MCP1640 s pouzdrem SOT32 [41]



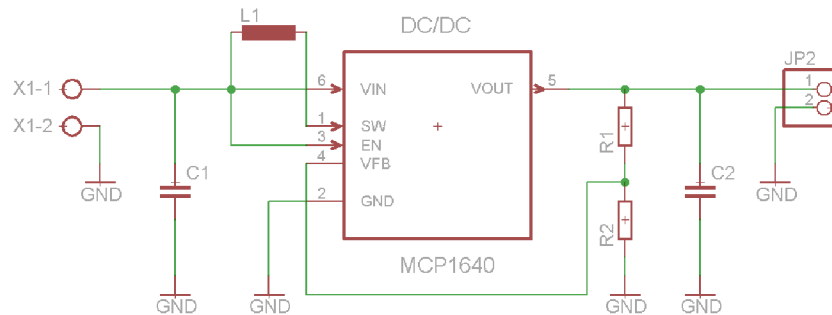
Graf 1 Zatěžovací charakteristika (vliv vstupního napětí na výstupní proud) obvodu MCP1640 [41]



Graf 2 Zatěžovací charakteristika (vliv výstupního proudu na účinnost) obvodu MCP1640 [41]

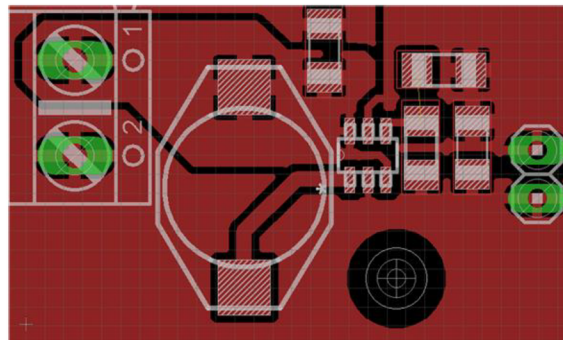
6.3.2 Návrh desky plošného spoje pro DC/DC měnič MCP1640

Pro komplexní ucelení konstrukce termoelektrického generátoru malého výkonu je zapotřebí navrhnout desku plošného spoje (DPS) pro vybraný DC/DC měnič obstarávající zvyšování výstupního napětí z termoelektrických modulů na požadovanou úroveň. DPS byla navržena dle obecně známých faktů a výrobcem doporučených návrhů v technické dokumentaci měniče.



Obr. 40 Schéma zapojení obvodu s DC/DC měničem MCP1640

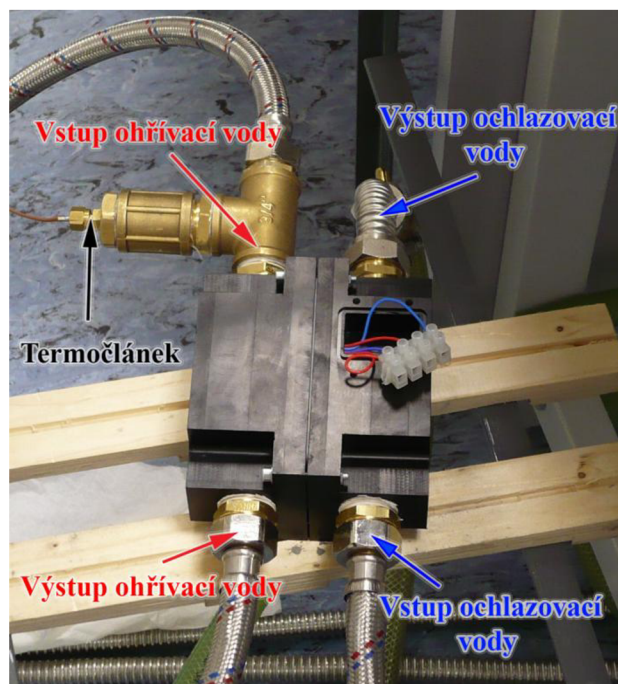
Předloha pro výrobu DPS byla navržena v programu Eagle 6.4.0. Veškeré použité součástky bylo nutno dopočítat dle vzorců uvedených v datasheetu měniče MCP1640 a případně zvolit jejich ekvivalenty. Jako vstupní konektor byla využita svorkovnice AK300 2P, pomocí které budou výstupní vodiče termoelektrických modulů připojeny k DPS. Pro periferní obvod s elektronikou (senzor) je připraven výstupní 2pin konektor s pojistným zámkem.



Obr. 41 Návrh plošného spoje obvodu s DC/DC měničem MCP1640

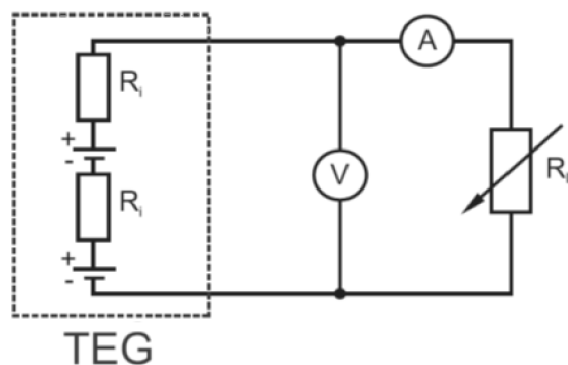
7 Experimentální měření reálných parametrů a zpracování dat

Po úspěšném složení zkonstruovaného zařízení bylo zapotřebí termoelektrický generátor připojit teplou stranu k okruhu plynového kotle pro přípravu TUV. Před vstup ohřivané vody do termoelektrického generátoru byl umístěn termočlánek pro měření teploty vstupující kapaliny. Studená strana generátoru byla připojena na chladicí smyčku, jež byla realizována pomocí hadice napojené na vodovodní baterii se studenou vodou a z měřeného zařízení ústila do barelu s ponorným čerpadlem. Zapojení zařízení je zachyceno na následujícím obrázku.



Obr. 42 Zapojení termoelektrického generátoru k potrubí s ohřivací a ochlazovací vodou

Pro měření samotného termoelektrického generátoru malého výkonu byla sestavena měřicí aparatura zahrnující ampérmetr, voltmetr a reostat s ohmmetrem pro nastavení potřebné odporové zátěže. Níže uvedený obrázek charakterizuje schéma zapojení zařízení s měřicí aparaturou a zátěží.



Obr. 43 Schéma zapojení zařízení a aparatury pro měření elektrických veličin

7.1 Vyhodnocení naměřených a vypočítaných hodnot

Jako proměnná zátěž simulující spotřebič byl použit reostat s rozsahem odporu $0 - 6,7 \Omega$ o maximálním přípustném proudu 10 A , který byl pro přesné nastavení daného odporu (R_L) proměřován mutlimetrem Unit-T UT55. Pomocí multimetrů Metex M-3890D, které byly připojeny přes sériovou sběrnici USB k notebooku, byly zaznamenávány hodnoty výstupního napětí (U_L) a proudu (I) v zátěži. Po odpojení zátěže byly proměřovány hodnoty svorkového napětí (U_{OC}). Pomocí termočlánků, které byly umístěny před vstupem ohřivací (T_H) a ochlazovací (T_C) vody do generátoru, byly zaznamenávány hodnoty těchto teplot. Při měření byla regulována pouze teplota ohřivací vody, přičemž ochlazovací voda nebyla ochlazována ani ohřívána.

Z naměřených hodnot pak byl dopočítán rozdíl teplot (ΔT), tepelný tok (Q), výkon (P) a účinnost generátoru (η). Na základě těchto hodnot pak byly sestrojeny příslušné grafy zachycující charakteristiky termoelektrického generátoru při daných teplotních rozdílech. Výsledek měření je zpracován v Tab. 7.

T_H [°C]	T_C [°C]	ΔT [°C]	Q [W]	U_{OC} [V]	R_L [Ω]	U_L [V]	I [mA]	P [mW]	η [%]
47,40	15,20	32,20	20,42	1,97	0,05	0,99	165,10	163,12	0,80
47,40	15,20	32,20	20,42	1,97	1,00	1,03	158,40	162,36	0,79
47,40	15,20	32,20	20,42	1,97	2,00	1,10	146,40	161,19	0,79
47,40	15,20	32,20	20,42	1,97	3,00	1,16	137,20	158,47	0,78
47,40	15,20	32,20	20,42	1,97	5,80	1,29	114,80	147,86	0,72
54,50	15,20	39,30	24,93	2,58	0,05	1,32	220,20	289,78	1,16
54,50	15,20	39,30	24,93	2,58	1,00	1,36	211,20	287,02	1,15
54,50	15,20	39,30	24,93	2,58	2,00	1,45	194,80	282,07	1,13
54,50	15,20	39,30	24,93	2,59	3,00	1,54	180,20	277,33	1,11
54,50	15,20	39,30	24,93	2,58	5,80	1,69	151,20	256,13	1,03
58,90	15,20	43,70	27,72	2,94	1,00	1,54	237,60	364,95	1,32
58,90	15,20	43,70	27,72	2,93	2,00	1,63	219,60	357,29	1,29
58,90	15,20	43,70	27,72	2,93	3,70	1,76	195,60	343,47	1,24
58,90	15,20	43,70	27,72	2,93	4,80	1,83	181,80	333,24	1,20
66,40	15,20	51,20	32,47	3,35	0,05	1,67	279,20	464,87	1,43
66,40	15,20	51,20	32,47	3,35	1,00	1,73	266,20	459,73	1,42
66,40	15,20	51,20	32,47	3,35	2,00	1,85	247,60	457,07	1,41
66,40	15,20	51,20	32,47	3,35	3,00	1,94	231,20	448,99	1,38
66,40	15,20	51,20	32,47	3,35	5,80	2,18	194,20	422,39	1,30
70,50	15,20	55,30	35,08	3,74	0,05	1,81	301,40	545,23	1,55
70,50	15,20	55,30	35,08	3,74	1,00	1,89	292,20	551,67	1,57
70,50	15,20	55,30	35,08	3,74	1,10	1,91	289,40	551,60	1,57
70,50	15,20	55,30	35,08	3,74	2,00	2,04	275,40	562,09	1,60
70,50	15,20	55,30	35,08	3,74	3,70	2,22	245,00	544,88	1,55
70,50	15,20	55,30	35,08	3,74	4,80	2,34	229,40	537,03	1,53

Tab. 7 Naměřené a vypočítané hodnoty termoelektrického generátoru

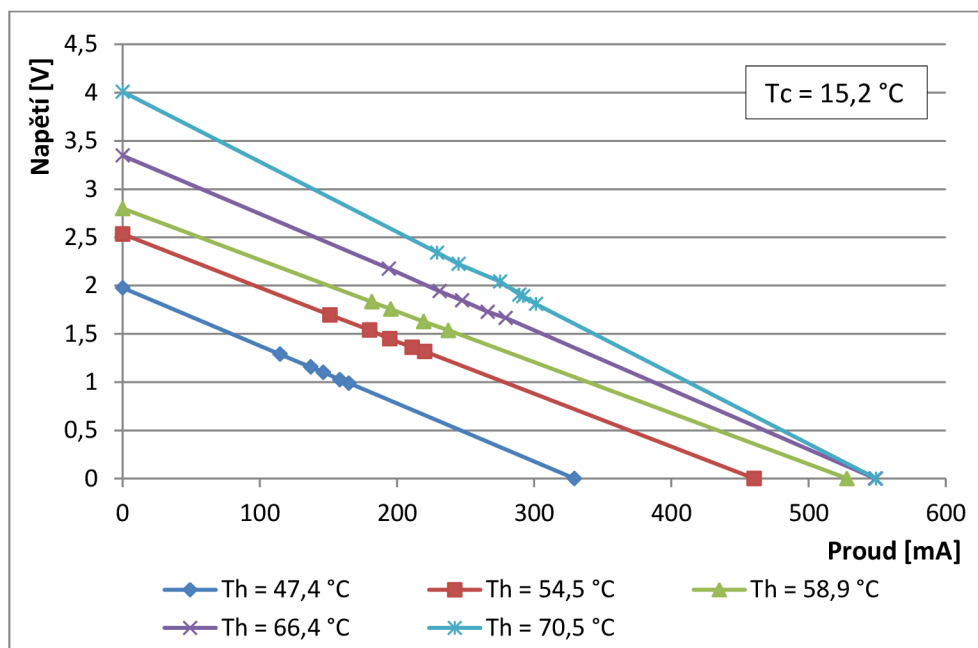
Měření bylo provedeno pomocí těchto měřicích přístrojů:

Typ měřidla	Označení	Měřená veličina
Multimetr	Metex M-3890D	Napětí
Multimetr	Metex M-3890D	Proud
Multimetr	Unit-T UT55	Odpor
Termočlánek	typ T	Teplota
A/D převodník	ADAM 4018	Napětí

Tab. 8 Seznam měřicích přístrojů

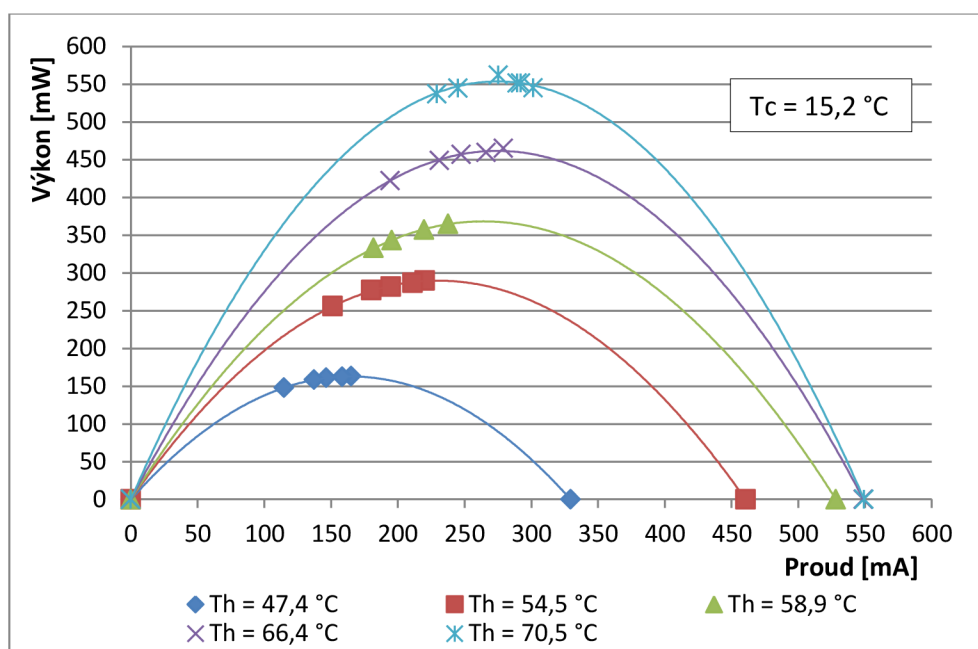
7.2 Grafické zpracování naměřených a vypočítaných hodnot

Z naměřených hodnot napětí a proudu pro danou zátěž byly zkonstruovány volt-ampérové charakteristiky termoelektrického generátoru pro daný teplotní rozdíl. Hodnoty protínající osy grafu (svorkové napětí a zkratový proud) byly dopočítány pomocí příslušných regresních rovnic přímek.



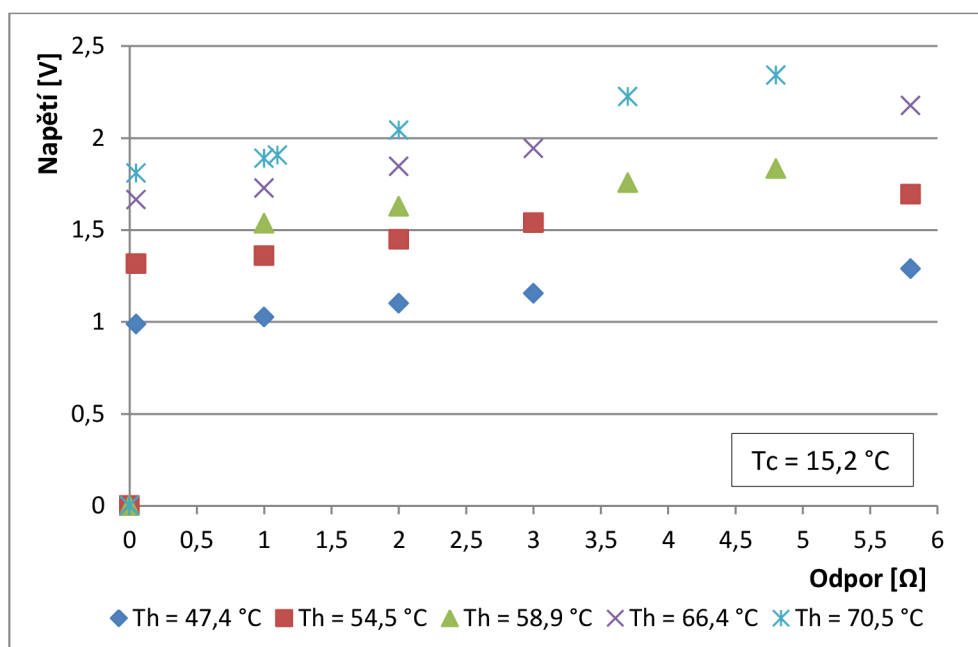
Graf 3 Volt-ampérová charakteristika TE generátoru při daném teplotním rozdílu

Dále díky získaným hodnotám zkratového proudu (I_{SC}) z regresních rovnic bylo možno sestavit výkonové charakteristiky TEG při různých teplotách teplé strany vůči konstantní studené straně.

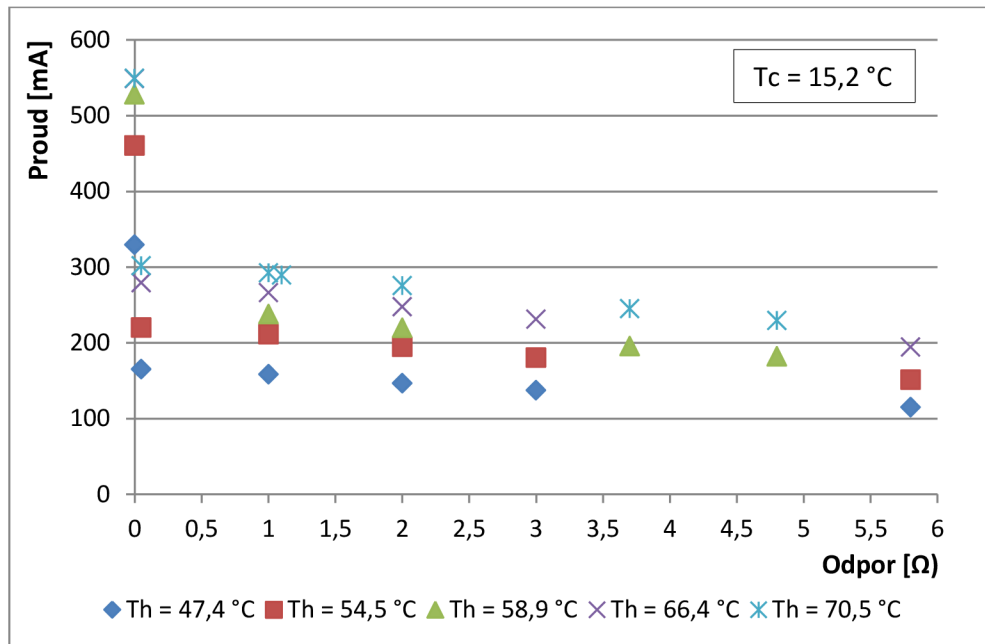


Graf 4 Výkonová charakteristika TE generátoru při různém teplotním rozdílu

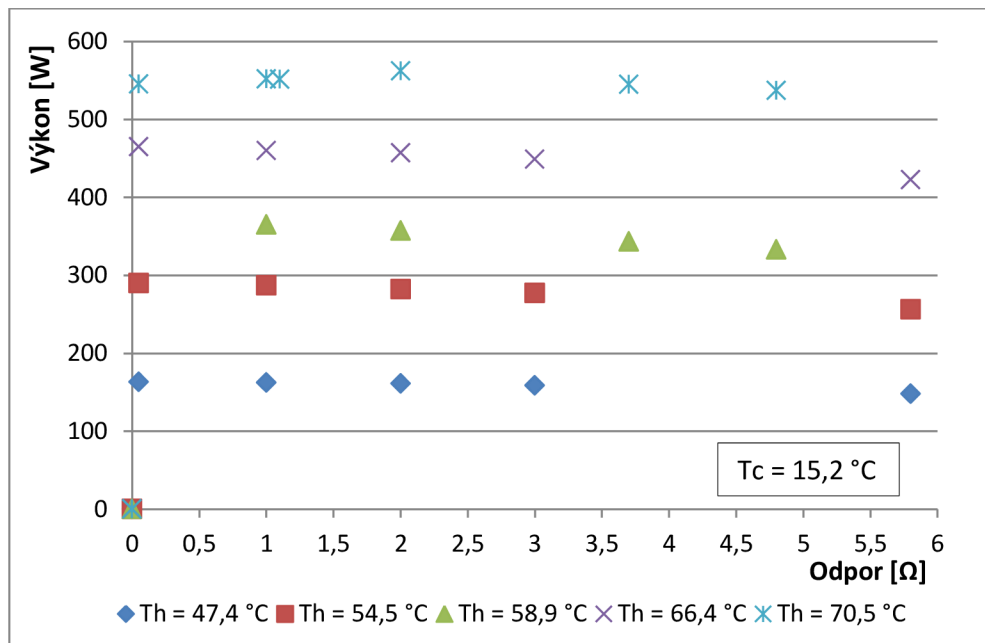
Následující grafy zachycují závislosti napětí v zátěži (Graf 5), proudu (Graf 6) a výkonu (Graf 7) na proměnném zatěžovacím odporu. Spojnice naměřených bodů nebyla záměrně použita, jelikož neměla žádaný hladký průběh, neboť bylo pro každé měření odečteno pět hodnot. Pro hladký průběh spojnice bodů by bylo zapotřebí provést důkladnější měření, které z časových důvodů nebylo možno realizovat.



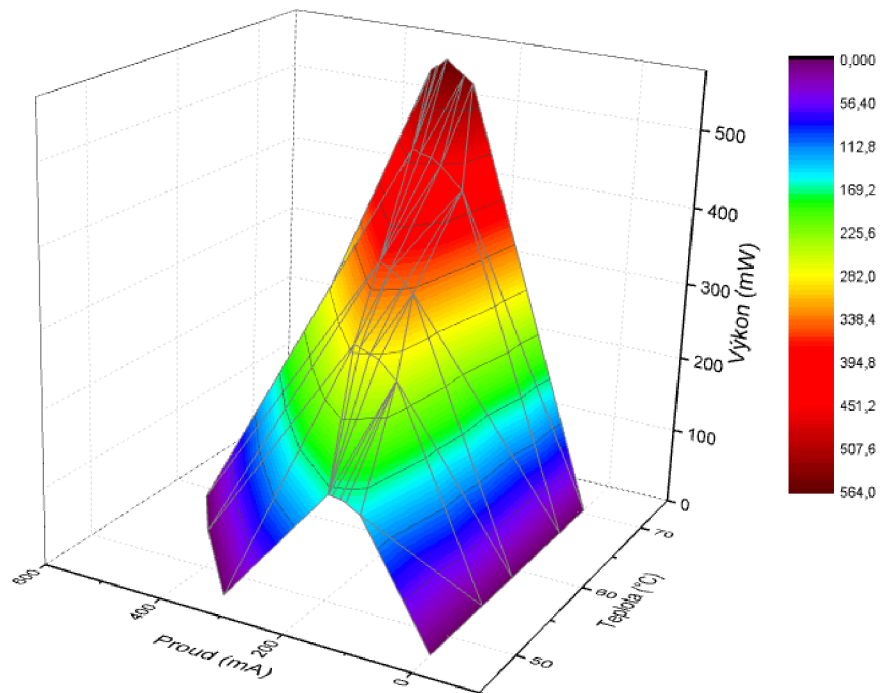
Graf 5 Závislost napětí v zátěži na proměnném zatěžovacím odporu při různém teplotním rozdílu



Graf 6 Závislost proudu v zátěži na proměnném zatěžovacím odporu při různém teplotním rozdílu

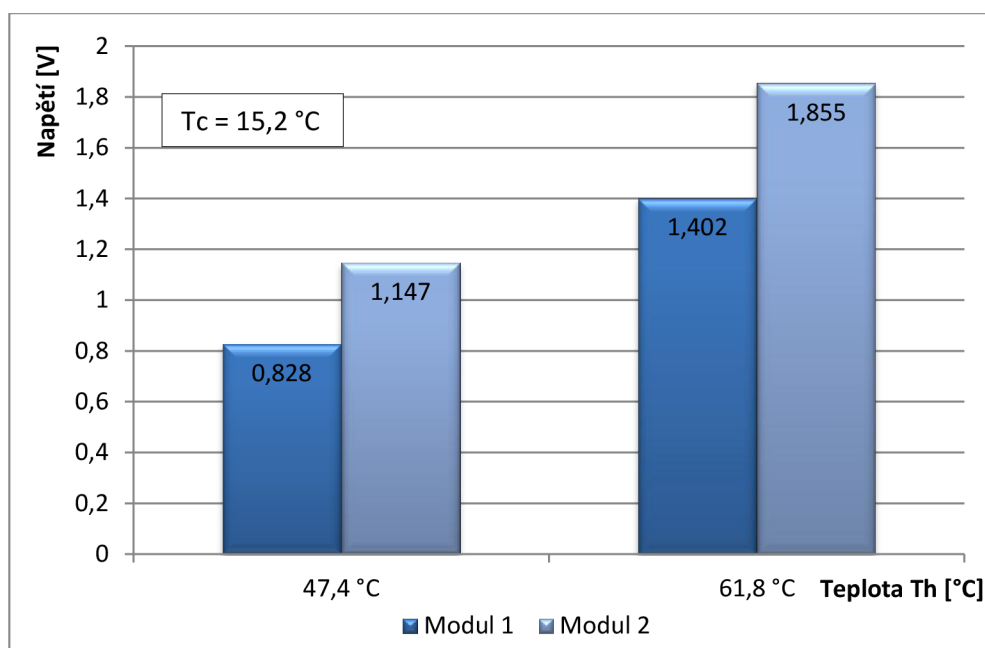


Graf 7 Závislost výkonu TE generátoru dodaného do zátěže na proměnném zatěžovacím odporu při různém teplotním rozdílu



Graf 8 3D Grafické znázornění výkonové charakteristiky při různém teplotním rozdílu

Ke konci experimentálního měření byla odečtena výstupní svorková napětí jednotlivých termoelektrických modulů použitých v TE generátoru bez připojené odporové zátěže. Dle naměřených hodnot dosahoval jeden modul znatelně nižšího výstupního napětí. Tato situace mohla nastat kvůli nerovnoměrnému přítlaku na jeden modul při montáži zařízení nebo mohlo dojít ke špatnému tepelnému kontaktu plochy termoelektrického modulu se styčnou plochou měděného teplosměnného elementu vlivem nedostatečné rovinatosti (konkávnosti) měděné základny.



Graf 9 Porovnání výstupních svorkových napětí použitých termoelektrických modulů v TE generátoru při daných teplotních rozdílech

8 Návrhy na další vylepšení zařízení

8.1 Bez zásahu do designu

Prvním návrhem na vylepšení konstrukce termoelektrického generátoru malého výkonu je aplikování povrchové úpravy galvanického poniklování či pochromování na teplosměnné měděné elementy, kterým by se dalo zabránit případné korozi materiálu. Tato úprava je však doposud v rozporu s eventuální kontaminací protékající vody. Před provedením povrchové úpravy je nutné nejprve provést ověření a vyloučení možných zdravotních následků.

Druhý neinvazivní návrh inovace spočívá v osazení spojovacích šroubů pružinami, které zabrání nerovnoměrnému přitlaku dosedacích ploch na termoelektrické moduly. V případě nedostatečné rovinnosti dosedací plochy měděné základny termoelektrického modulu je možno použít místo teplovodivé pasty grafitovou teplovodivou podložku, která přestože nedosahuje tepelné vodivosti jako pasta, zprostředkuje tepelný kontakt mezi TE modulem a teplosměnným elementem i v místech se značnou nerovnoměrností.

8.2 Se zásahem do designu

Další modifikace konstrukce lze provést již se zásahem do jejího designu. Vystává zde možnost zoptimalizovat oblast, v níž protéká kapalina tak, aby bylo docíleno ještě nižších tlakových ztrát způsobenými místními odpory. Tato úprava může být realizována vyfrézováním zaoblených podélných drážek do vrchní dílu (TOPů) na ploše rovnoběžné s teplosměnnými elementy výměníku.

Teplosměnné měděné základny lze ještě dále konstrukčně upravit. Pro zintenzivnění přestupu tepla z proudícího média do materiálu lze modifikovat tvar žebrování či případně i jeho výšku a rozestupy jednotlivých žeborů. Na zvážení ale zůstává, zdali uváděné úpravy budou pro zlepšení tepelných a hydraulických parametrů opravdu přínosné a zbytečně tak nezkomplikují výrobu a nepodraží zařízení.

Po složení generátoru a experimentálním měření se ukázalo, že pro spojení vrchních dílu (TOPů) by bylo vhodné použít šroubů většího průměru, které přinesou konstrukci větší pevnost a přispějí k menšímu namáhání těchto šroubových spojů.

9 Závěr

V teoretické části práce byly popsány základní fyzikální principy termoelektrických jevů, kdy je přeměňována tepelná energie na energii elektrickou, používané polovodičové materiály pro výrobu termoelementů, konstrukce termoelektrických modulů a jejich vlastnosti a konstrukce termoelektrických generátorů včetně jejich aplikace. Tyto dílčí kapitoly jsou neméně důležité pro pochopení funkčnosti vyrobeného zařízení, které je popisováno v praktické části.

Praktická část práce se již věnuje návrhu a realizaci termoelektrického generátoru malého výkonu. Nejprve byly nastudovány potřebné informace o dostupných termoelektrických modulech a po té na základě teoretických a praktických znalostí byl vytvořen model tepelného výměníku pro zprostředkování tepelného toku termoelektrickým modulům. Model byl vytvořen v několika krocích a to tak, aby splnil předem daná kritéria – dobrý přestup tepla, nízkou tlakovou ztrátu, jednoduchost a snadnou montáž, dlouhou životnost a nízké pořizovací náklady. Pro optimalizaci konstrukce zařízení bylo využito simulačního CFD programu Flow Simulation. Po uskutečněných simulacích a konstrukčních úprav byl termoelektrický generátor vyroben, zkompletován a následně také zapojen do vodovodního okruhu pro přípravu TUV pomocí plynového kotle.

Zapojený termoelektrický generátor byl proměřován pro pět různých teplotních rozdílů, kdy teplota ohřívací vody v plynovém kotli byla zvyšována od 47,4 °C až po 70,5 °C. Teplota studené ochlazovací vody byla udržována na konstantní hodnotě 15,2 °C. Pomocí proměnné zátěže realizované reostatem, byl termoelektrický generátor proměřován pěti hodnotami zatěžovacího odporu simulujícího spotřebič. Naměřené hodnoty elektrických veličin (svorkové napětí, napětí a proud v zátěži) a teplot byly po ustálení zaznamenávány do příslušné tabulky, ze kterých byly dopočítány výkony a účinnosti zařízení a následně také sestrojeny grafy příslušných závislostí.

Z naměřených experimentálních hodnot a vypočítaných výsledků lze usoudit, že zkonstruovaný termoelektrický generátor splňuje očekávání. I při nejnižším aplikovaném teplotním rozdílu o hodnotě 32,2 °C byl generátor schopen dodávat průměrný výkon 160 mW s výstupním napětím pohybujícím se okolo 1 V. Těmito výstupními hodnotami by mohl termoelektrický generátor bez problému obstarávat energii pro periferní zařízení tvořené například senzorem či detektorem. V případě zvýšení teploty ohřívací vody na hodnotu 70,5 °C (teplotní rozdíl roven 55,3 °C) se výkon generátoru zvýšil až na hodnotu 562,09 mW, při zátěžovém odporu 2 Ω, což odpovídalo maximálnímu výkonu dosaženého při experimentálním měření. Výstupní napětí činilo 2,041 V a protékající proud 275,4 mA. Při těchto parametrech dosahoval termoelektrický generátor účinnosti přeměny tepelné energie na energii elektrickou rovných 1,6 %.

Na základě výše uvedených hodnot je zkonstruovaný termoelektrický generátor malého výkonu schopen plnit svou funkci zdroje elektrické energie pro periferní elektronický obvod. Při vyšších teplotních gradientech je možno využít pouze jednoho termoelektrického modulu a tím tak snížit celkovou pořizovací cenu výsledného zařízení.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ROWE, David Michael. *CRC handbook of thermoelectrics*. 1st edition. CRC Press, 1995. 701 s. ISBN 978-0849301469.
- [2] ROWE, David Michael. (ed.). *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. 1st ed. [Boca Raton] : CRC Press, 2006. 1014 s. ISBN 978-0849322648.
- [3] GOLDSMID, H. Julian. *Introduction to thermoelectricity*. Heidelberg: Springer, 2010. 242 s. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-3-642-00715-6.
- [4] ROWE, David Michael. (ed.). *Thermoelectrics and its Energy Harvesting, 2-Volume Set: Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics*. 1st ed. ISBN 978-1-4398
- [5] HALLIDAY, David; RESNICK Robert a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [6] GALLIN, Francis. *A heat fluxmeter based on the Nernst effect*, IEEE Transactions on Magnetics [online], vol.26, no.2, pp.1080,1082, [cit. 2013-03-04] Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=106507>> DOI: 10.1109/20.106507.
- [7] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky: Termoelektrické články* [online]. [rev. 2009-02-19], [cit. 2013-03-04] Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/909-termoelektricke-clanky>>
- [8] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [9] ČERMÁK, Patrik. *Elektrina přímo z tepla* [online], [rev. 2010-02-15], [cit. 2013-03-04] Dostupný z WWW: <<http://3pol.cz/888-elektrina-primo-z-tepla>>
- [10] BITSCHI, Andreas. *Modelling of thermoelectric devices for electric power generation*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 2009. 145 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Dr. K. Fröhlich.
- [11] GOUPIL, Christophe, SEIFERT Wolfgang, ZABROCKI Knud, MÜLLER Eckhart a G. Jeffrey SNYDER. *Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications*. Entropy [online]. 2011, vol. 13, issue 12, s. 1481-1517 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.mdpi.com/1099-4300/13/8/1481/>> DOI: 10.3390/e13081481.
- [12] ŠTETINA, Jakub. *Termoelektrický generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

- [13] FRANK, Helmar. *Fyzika a technika polovodičů: celost. vysokošk. učebnice pro vys. školy techn., stud. obor. 1. vyd.* Praha: SNTL, 1990. 283 s. ISBN 80-030-0401-2.
- [14] ŘEZŇÁK, Lukáš. *Fyzika polovodičů* [online]. [cit. 2013-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.trunky.cz/bp/fypolo/data/2-3.pdf>>
- [15] MUSIL, Vladislav. *Elektronické součástky*. Vyd. 4., upr. Brno: VUTIUM, 2005, 187 s. ISBN 80-214-2627-6.
- [16] VAŠÍČEK, Radek. *Termofyzikální vlastnosti* [online]. [cit. 2013-03-04]. Dostupný z WWW: <http://ceg.fsv.cvut.cz/misc/jirka/vyuka/lpg/tepelne_vyber_%20cz.pdf>
- [17] GODART, C., GONÇALVES A. P., E. B. LOPES a B. VILLEROY. Role of Structures on Thermal Conductivity in Thermoelectric Materials [online]. pp. 19 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z WWW: <http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-90-481-2892-1_2> DOI: 10.1007/978-90-481-2892-1_2.
- [18] VOVES, Jan. *Fyzika polovodičových součástek*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 163 s. ISBN 80-01-01684-6.
- [19] SYNDER, Jeff. *Thermoelectrics* [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics>>
- [20] DENKO, Showa. *SDK and PLANTEC Test Thermoelectric Power Generation Modules* [online]. [rev. 2010-02-03], [cit. 2013-03-29]. Dostupné z WWW: <http://www.sdk.co.jp/english/news/2010/aanw_10_1208.html>
- [21] Laird Technologies. c2013 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.lairdtech.com/temhandbook/>>
- [22] BRÁZDIL, Marian. *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.
- [23] BRÁZDIL, Marian. *Peltierovy články pro výrobu elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [24] YANG, J., Q. HAO, H. WANG, Y. LAN, Q. HE, A. MINNICH, D. WANG, J. HARRIMAN, V. VARKI, M. DRESSELHAUS, G. CHEN a Z. REN. *Solubility study of Yb in n-type skutterudites YbxCo4Sb12 and their enhanced thermoelectric properties*. Physical Review B [online]. 2009, vol. 80, issue 11, pp. - [cit. 2013-03-29]. Dostupné z WWW: <<http://prb.aps.org/abstract/PRB/v80/i11/e115329>> DOI: 10.1103/PhysRevB.80.115329.

- [25] PRIYA, S.; *Energy harvesting technologies*. New York: Springer, c2009, xx, 517 s. ISBN 978-0-387-76463-4.
- [26] NAVRÁTIL, Jiří. *Termoelektrické materiály*. [online]. [rev. 2010-09-08], [cit. 2013-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.upce.cz/en/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html>>
- [27] HUSÁK, Miroslav. *Mikroelektronické zdroje energie z okolního prostředí – Energy harvesting*, DPS-AZ [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z WWW: <http://www.dps-az.cz/media/pdf/ukazky/vyvoj_1302.pdf>
- [28] Micropelt. *Thermoharvesting: infinite power for wireless sensors* [Freiburg]. 22 s. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z WWW: <http://www.micropelt.com/download/energy_harvesting.pdf>.
- [29] MOCZYGEMBA, Joshua. *Energy Harvesting TEG Power Strap for industrial, chemical, oil and gas applications* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z WWW: <http://www.marlow.com/media/marlow/images/support_guide/EverGen_Power_Strap_White_Paper.pdf>
- [30] Marlow Industries Inc. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.marlow.com/products/power-generators/energy-harvesting-kits-1.html>>
- [31] *TE-Power-ring by Micropelt* [online]. c2006-2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z WWW: <http://www.micropelt.com/download/te_power_ring.pdf>
- [32] VRBA, Radimír., HUBÁLEK, Jaromír a Martin ADÁMEK: *Mikrosenzory a mikrochemické systémy*. Elektronická skripta FEKT VUT v Brně, 2004.
- [33] HUSÁK, M. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008, 540 s. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [34] Thermalforce.de [online]. c2006-2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.thermalforce.de>>
- [35] *Nano Generator Produce Electricity With The Pinch Of Two Fingers Energy Harvesting Technologies* [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/piezo-electric-crystals-to-produce-electricity/>>
- [36] *TG Technical Data Sheet Guidelines* [online]. c2012 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.marlow.com/media/marlow/images/Downloads/TG%20Datashet%20Instructions.pdf>>
- [37] *Technical datasheet TG 12-6* [online]. c2012 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.marlow.com/media/marlow/product/downloads/tg12-6-011/TG12-6.pdf>>

- [38] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 109 s. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [39] *Technické plasty: výrobní program a fyzikální vlastnosti* [online]. c2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.technicke-plasty-tribon.cz/data/documents/technicke-plasty-tabulky.pdf>>
- [40] LI, Molan, XU Shaohui, CHEN Qiang a Li-Rong ZHENG. *Thermoelectric-Generator-Based DC–DC Conversion Networks for Automotive Applications*. Journal of Electronic Materials [online]. 2011, vol. 40, issue 5, s. 1136-1143 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://link.springer.com/10.1007/s11664-011-1557-5>> DOI: 10.1007/s11664-011-1557-5
- [41] *Start-up Synchronous Boost Regulator MCP1640/B/C/D – Technical datasheet* [online]. c2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22234B.pdf>>
- [42] ROBENEK, Jan. *Navrhujeme zvyšující měnič, pracující z jediného článku* [online]. [rev. 2010-05-04], [cit. 2013-05-10] Dostupné z WWW: <<http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/navrhujeme-zvysujici-menic-pracujici-z-jedineho-clanku-1-dil.html>>
- [43] *THINERGY™ MEC101 Thin-Film Micro-Energy Cell – Product datasheet* [online]. c2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z WWW: <http://www.infinitepowersolutions.com/images/pdfs/THINERGY_MEC101_DataSheet_v3-4_DS1001.pdf>
- [44] FAIRBANKS, J. W. Thermoelectric applications in vehicles status 2008. In 6th European conference on thermoelectrics : July 2 - 4, 2008, Paris, France [online]. 2008 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/0-PL-00-Fairbanks.pdf>>.

Seznam obrázků

Obr. 1 Termoelektrická dvojice a vznik Seebeckova jevu	13
Obr. 2 Termoelektrická dvojice a vznik Peltierova jevu	14
Obr. 3 Termoelektrická dvojice a vznik Peltierova jevu	15
Obr. 4 Porovnání Hallova, Nernstova a Ettingshausenova jevu.....	17
Obr. 5 Měření teploty pomocí termočlánků v diferenčním zapojení.....	19
Obr. 6 Schéma termoelektrického článku ve funkci generátor.....	20
Obr. 7 Konstrukce termoelektrického článku bez keramických desek.....	21
Obr. 8 Schéma konstrukce termoelektrického článku	21
Obr. 9 Geometrie a uspořádání termoelementů a termoelektrických dvojic	22
Obr. 10 Geometrie a uspořádání termoelementů v modulu kroužkové struktury	22
Obr. 11 Grafické porovnání Seebeckova koeficientu a měrné elektrické vodivosti a součinitele tepelné vodivosti	23
Obr.12 Krystalická struktura skutteruditu	24
Obr.13 Vývoj termoelektrických materiálů a jejich termoelektrická účinnost ZT.....	25
Obr. 14 Zobrazení energetických pásů polovodičů typu N a P	26
Obr. 15 Zobrazení struktury polovodičů typu N a P a jejich nosičů elektrického náboje	26
Obr. 16 Fermi-Diracova distribuční f-ce pravděpodobnosti zaplnění dovoleného stavu elektronem	27
Obr. 17 Termoelektrická účinnost ZT polovodičových materiálů v závislosti na teplotě.....	30
Obr. 18 Názorné schéma jednotlivých termoelementů se zakotovanými přechodnými vrstvami	31
Obr. 19 Schéma obvodu se zapojeným termoelektrickým modulem (TEG) se zátěží ...	32
Obr. 20 Závislost účinnosti jako funkce teplotního rozdílu při daných bezrozměrných termoelektrických účinnostech ZT	34
Obr. 21 Teplotní namáhání termoelektrického modulu a deformace termoelementů	35
Obr. 22 Schématické znázornění hlavních součástí termoelektrického generátoru.....	36
Obr. 23 Schématický řez tenkovrstvé baterie	37
Obr. 24 Obecné znázornění funkce senzoru	38
Obr. 25 Struktura chemorezistorového senzoru	39
Obr. 26 Porovnání příkonů elektronických čipů a dosažitelných výkonů Energy harvesting zařízení	40
Obr. 27 Obecný přehled Energy harvesting zařízení využívajících okolních zdrojů energie.....	41
Obr. 28 Zařízení EverGen™ PowerStrap pro průmyslová potrubí	42
Obr. 29 Zařízení EverGen™ Energy Harvester pro potrubí menších rozměrů	43
Obr. 30 Bezdrátové zařízení TE-Power-Ring monitorující teplotu a vibrace ložisek	43
Obr. 31 Zařízení TE-qNode měřící teplotu vodičů rozvodné sítě	44
Obr. 32 Zařízení TE-Power Probe pro napájení elektroniky termostatické hlavice.....	44
Obr. 33 Nabíječka AA baterií a LED lampa využívající tepla z radiátorů ústředního vytápění.....	45
Obr. 34 Biomedicínská zařízení napájená termoelektrickým generátorem	45
Obr. 35 Částečně průhledný pohled na výměník termoelektrického generátoru malého výkonu	49
Obr. 36 Měděné teplosměnné elementy výměníku	50
Obr. 37 Vrchní díl studené strany výměníku (TOP).....	51

Obr. 38 Simulace proudění kapaliny a prostupu tepla v termoelektrickém generátoru .	52
Obr. 39 Znáznornění trajektorií kapaliny pomocí simulace proudění v TE generátoru ...	52
Obr. 40 Schéma zapojení obvodu s DC/DC měničem MCP1640	54
Obr. 41 Návrh plošného spoje obvodu s DC/DC měničem MCP1640	54
Obr. 42 Zapojení TE generátoru k potrubí s ohřívací a ochlazovací vodou	55
Obr. 43 Schéma zapojení zařízení a aparatury pro měření elektrických veličin	55

Seznam tabulek

Tab. 1 Absolutní Seebeckovy koeficienty	14
Tab. 2 Pracovní teploty termoelektrických polovodičových materiálů	23
Tab. 3 Absolutní Seebeckovy koeficienty vybraných polovodičů	29
Tab. 4 Charakteristika vlastní spotřeby aplikovatelných senzorů	38
Tab. 5 Výpočet parametrů modulu TG 12-6-01L ze zadaných hodnot	48
Tab. 6 Provozní parametry DC/DC měniče MCP1640 s pouzdrem SOT32	53
Tab. 7 Naměřené a vypočítané hodnoty termoelektrického generátoru	56
Tab. 8 Seznam měřících přístrojů	57

Seznam grafů

Graf 1 Zatěžovací charakteristika (vliv vstupního napětí na výstupní proud) obvodu MCP1640	53
Graf 2 Zatěžovací charakteristika (vliv výstupního proudu na účinnost) obvodu MCP1640	53
Graf 3 Volt-ampérová charakteristika TE generátoru při daném teplotním rozdílu.....	57
Graf 4 Výkonová charakteristika TE generátoru při různém teplotním rozdílu	58
Graf 5 Závislost napětí v zátěži na proměnném zatěžovacím odporu při různém teplotním rozdílu.....	58
Graf 6 Závislost proud v zátěži na proměnném zatěžovacím odporu při různém teplotním rozdílu.....	59
Graf 7 Závislost výkonu TE generátoru dodaného do zátěže na proměnném zatěžovacím odporu při různém teplotním rozdílu	59
Graf 8 3D znázornění výkonové charakteristiky při různém teplotním rozdílu	60
Graf 9 Porovnání výstupních svorkových napětí použitých termoelektrických modulů v TE generátoru při daných teplotních rozdílech.....	60

Seznam použitých veličin a symbolů

Veličina	Symbol	Jednotka
Seebeckův koeficient	α	$V.K^{-1}$
Absolutní Seebeckův koeficient	α_A, α_B	$V.K^{-1}$
Relativní Seebeckův koeficient	α_{AB}, α_{pn}	$V.K^{-1}$
Plocha příčného průřezu termoelementu	A	m^2, mm^2
Thomsonův koeficient	β	$V.K^{-1}$
Magnetické pole	B	T
Účinnost	η	-
Carnotova účinnost	η_C	-
Maximální účinnost	η_{max}	-
Aktivační energie	E_A	eV
Fermiho energie	E_F	eV
Šířka zakázaného pásma	E_G	eV
Fermi-Diracova rozdělovací funkce	$f_0(E)$	-
Hustota energetických stavů ve vodivostním pásu	$g_C(E)$	-
Hustota energetických stavů ve valenčním pásu	$g_V(E)$	-
Proud	I	A
Zkratový proud	I_{SC}	A
Boltzmannova konstanta	k	$J.K^{-1}$
Délka termoelementu	l	m, mm
Tloušťka kontaktní vrstvy	l_c	m, mm
Tepelná vodivost	λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Tepelná vodivost kontaktní vrstvy	λ_c	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Tepelná vodivost nosičů elektrického náboje	λ_e	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Tepelná vodivost krystalové mřížky	λ_L	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Pohyblivost nosiče elektrického náboje – elektronů	μ_n	$m^2.V^{-1}.s^{-1}$
Pohyblivost nosiče elektrického náboje – děr	μ_p	$m^2.V^{-1}.s^{-1}$
Elektrický kontaktní parametr	n	-
Počet termoelementů	N	-
Nernstův koeficient	N_{Ne}	$K.cm^2.s^{-1}$
Koncentrace nosičů elektrického náboje – elektronů	n_e	-
Relativní Peltierův koeficient	π_{AB}	V, $W.A^{-1}$

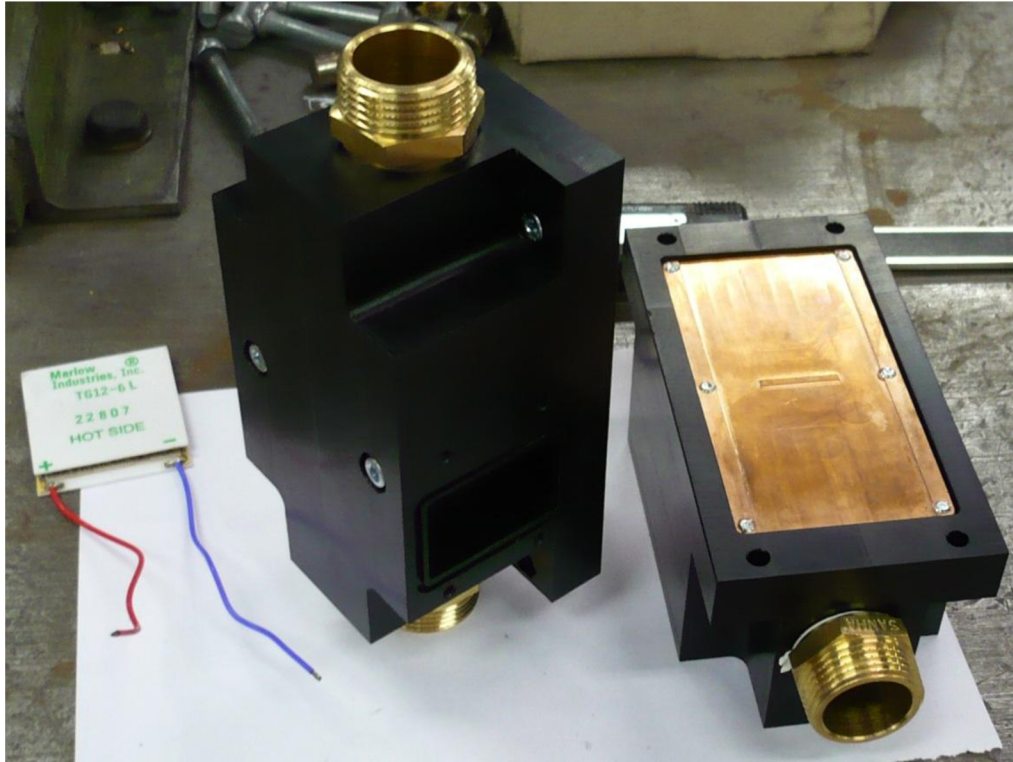
Veličina	Symbol	Jednotka
Koncentrace nosičů elektrického náboje – děr	p_h	-
Výkon	P	W
Výkon termoelektrického modulu v zátěži	P_L	W
Maximální výkon	P_{Lmax}	W
Ettingshausenův koeficient	P_{Et}	$K.cm^3.W^{-1}.s^{-1}$
Náboj částice	q	C
Teplo, Tepelný tok	Q	W
Teplo přivedené na teplou stranu TE modulu	Q_H	W
Teplo odvedené ze studené strany TE modulu	Q_C	W
Měrný elektrický odpor TE materiálu	ρ	$\Omega.m$
Měrný elektrický kontaktní (přechodový) odpor	ρ_c	$\Omega.m$
Měrný elektrický odpor termoelementu typu N	ρ_N	$\Omega.m$
Měrný elektrický odpor termoelementu typu P	ρ_P	$\Omega.m$
Elektrický kontaktní odpor termoelektrické dvojice	R_c	Ω
Vnitřní elektrický odpor termoelektrického modulu	R_{int}	Ω
Elektrický odpor zátěže	R_L	Ω
Tepelný kontaktní parametr	r	-
Elektrická vodivost (konduktivita)	σ	$S.m^{-1}, \Omega^{-1}.m^{-1}$
Teplota	T	K, °C
Rozdíl teplot	ΔT	K, °C
Střední teplota	\bar{T}	K, °C
Teplota teplé strany termoelektrického modulu	T_H	K, °C
Teplota studené strany termoelektrického modulu	T_C	K, °C
Napětí	U	V
Napětí při zátěži	U_L	V
Napětí naprázdno (svorkové napětí)	U_{oc}	V
Seebeckovo napětí	U_S	V
Koeficient termoelektrické účinnosti	Z_C	K^{-1}
Bezrozměrný koeficient termoelektrické účinnosti	ZT	-

Seznam příloh

- Příloha PI Vyrobený model tepelného výměníku TE generátoru malého výkonu
Příloha PII Měření termoelektrického generátoru malého výkonu

Příloha PI

Vyrobený model tepelného výměníku TE generátoru malého výkonu



Příloha PII

Měření termoelektrického generátoru malého výkonu

