



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY INSTITUTE

TERMoeLEKTRICKÝ GENERÁTOR PRO SPALINOVÝ TAH KOTLE

THERMOELECTRIC GENERATOR FOR FLUE-GAS DUCT OF BOILER TO CONVERT LOW-TEMPERATURE WASTE HEAT TO ELECTRICITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ TŘINÁCTÝ

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): Jiří Třináctý

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 pro spalínový tah kotle

v anglickém jazyce:

Thermoelectric generator for flue-gas duct of boiler to convert low-temperature waste heat to electricity

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zhodnocení možnosti využití termoelektrických modulů jako zdrojů elektrické energie využívajících tepla spalovacích zařízení.

Cíle bakalářské práce:

1. Popis principů termoelektrické přeměny
2. Přehled používaných termoelektrických materiálů
3. Návrh a realizace termoelektrického generátoru pro spalínový tah kotle
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. 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
3. Firemní literatura výrobců termoelektrických generátorových modulů
4. Odborné články z vědeckých databází ScienceDirect, SpringerLink, Knovel a IEEEXplore

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marian Brázdil

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

V Brně, dne 22.10.2012



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

S tenčící se zásobou fosilních paliv, roste zájem o co možná nejefektivnějšího využívání primárních zdrojů energie. V celé řadě dnešních zařízení odchází značná část energie paliva nevyužita v podobě odpadního tepla. Jako vhodné dílčí řešení se ukazují aplikace s termoelektrickým generátorem, čili zařízením přímo přeměňující tepelnou energii na energii elektrickou. Tento trend v posledních letech dokazuje rostoucí zájem o tuto technologii a vývoj nových termoelektrických materiálů. Krom zmíněného využití odpadního tepla lze termoelektrické generátory nalézt v řadě dalších aplikací, především jako zdroje elektrické energie v podmínkách, kde jsou vyžadovány minimální nároky na údržbu, bezporuchovost, spolehlivost a dlouhou životnost.

Text práce je rozdělen do tří částí: teoretické části, části zabývající se návrhem a realizací generátoru a závěrečným zhodnocení. Teoretická část obsahuje popis základních termoelektrických jevů, termoelektrických materiálů a jejich vlastností, popis hlavních komponent termoelektrických generátorů a aplikace, v nichž se termoelektrická přeměna využívá. Část návrhu a realizace se zabývá návrhem termoelektrického generátoru pro spalínový tah kotle a porovnání hodnot návrhu s reálnými naměřenými hodnotami.

KLÍČOVÁ SLOVA

Termoelektrický generátor, termoelektrický modul, Seebeckův jev, termoelektrické materiály, DC/DC měnič, elektřina, termoelektrické aplikace, odpadní teplo

ABSTRACT

With the dwindling supply of fossil fuels is increasing interest in the most efficient use of primary energy sources. In many of today's devices leaving a considerable part of the fuel energy wasted in the form of waste heat. As a partial solution suitable to demonstrate the application of thermoelectric generator, or devices that convert heat energy directly into electrical energy. The trend in recent years shows the growing interest in this technology and the development of new thermoelectric materials. In addition to the use of waste heat thermoelectric generators can be found in a number of other applications, primarily as a source of electricity in conditions where required minimal maintenance, reliability, reliability and durability.

Text is divided into three parts: a theoretical part, the part dealing with the design and implementation of the generator, and a final evaluation. The theoretical part includes a description of the basic thermoelectric phenomena, thermoelectric materials and their properties, a description of the main components of thermoelectric generators and applications in which the thermoelectric conversion uses. Part of the design and implementation deals with the design of thermoelectric generator for chimney flue and comparison of the proposal with real measured values.

KEY WORDS

Thermoelectric generator, thermoelectric module, Seebeck effect, thermoelectric materials, DC / DC converter, electricity, thermoelectric applications, waste heat

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TŘINÁCTÝ, J. *Termoelektrický generátor pro spalinový tah kotle*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marian Brázdil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem mou bakalářskou práci na téma Termoelektrický generátor pro spalínový tah kotle vypracoval samostatně s použitím literatury a pramenů, jež jsou uvedeny v závěru mé práce.

V Brně 24. 5. 2013

.....

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Marianu Brázdilovi, za ochotný a vstřícný přístup, cenné rady a připomínky, které mi byly uděleny při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ladislavu Šnajdárkovi a Ing. Michalu Špiláčkovi za pomoc a poskytnuté pomůcky při měření výkonu termoelektrického generátoru a celé rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1. TERMoeLEKTRICKÁ PŘEMĚNA	11
1.1. SEEBECKŮV JEV	11
1.1.1. Seebeckův koeficient.....	11
1.2. PELTIERŮV JEV.....	12
1.2.1. Peltierův koeficient	13
1.3. THOMSONŮV JEV	13
2. TERMoeLEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI.....	14
2.1. KOEFICIENT TERMoeLEKTRICKÉ ÚČINNOSTI Z , ZT	14
2.2. POROVNÁNÍ KOVŮ A POLOVODIČŮ	15
2.3. VLASTNOSTI POLOVODIČŮ	16
2.3.1. Elektrická vodivost polovodičů.....	16
2.4. PŘEHLED MATERIÁLŮ PRO TERMoeLEKTRICKÝ MODUL	18
3. KONSTRUKCE TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU	20
3.1. TERMoeLEKTRICKÉ MODULY	20
3.1.1. Výkon modulu	22
3.1.2. Účinnost modulu.....	23
3.2. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY	24
3.3. MĚNIČE DC/DC	24
4. APLIKACE TERMoeLEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ.....	27
4.1. KOGENERACE	27
4.2. VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA POMOCÍ TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU	28
4.3. KOTLE MALÝCH VÝKONŮ.....	30
4.4. UPLATNĚNÍ TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU V DALŠÍCH APLIKACÍCH.....	33
NÁVRH A REALIZACE TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU	34
5. NÁVRH TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU PRO SPALINOVÝ TAH KOTLE.....	34
5.1. KOTEL GEMOS KWH	35
5.2. PARAMETRY TERMoeLEKTRICKÉHO MODULU TG 12 – 6 – 01L.....	35
5.3. PARAMETRY HLINÍKOVÉHO CHLADIČE.....	35
5.4. DC/DC MĚNIČ LT 1308	36
5.5. PARAMETRY VODNÍHO BLOKU STIXION B – 400.....	36
6. VÝSLEDKY MATEMATICKÉHO MODELU	37
7. MONTÁŽ TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU	40
8. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	41
ZÁVĚR	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY:	46
SEZNAM OBRAZKŮ	50
SEZNAM TABULEK	51
SEZNAM GRAFŮ	51
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....	52
SEZNAM PŘÍLOH.....	55

ÚVOD

S rostoucím počtem lidské populace roste poptávka a produkce elektrické energie po celém světě. Naopak zásoby paliv, především fosilní zdrojů se celosvětově snižují. Snahou konstruktérů je tedy vyvinout zařízení, které co možná nejefektivněji přeměňuje energii obsaženou v primárním zdroji na užitečnou energii. U většiny dnes používaných technologií prodělává energie obsažená v primárním zdroji několik přeměn, přičemž nejméně účinná z této řady přeměn je přeměna tepelné energie na mechanickou práci. Z toho plyne, že velké množství energie odchází nevyužito v podobě odpadního tepla. Značné úsilí se proto vynakládá na nalezení řešení, které by zužitkovalo toto nevyužitelné odpadní teplo a přispělo by tak k celkovému zvýšení účinnosti celého zařízení. Jako jedno z možných řešení se ukazuje aplikace termoelektrického generátoru.

Termoelektrický generátor je zařízení přímo přeměňující tepelnou energii na energii elektrickou. Předností termoelektrického generátoru je absence pohyblivých částí, což z něj činí spolehlivý, bezúdržbový zdroj energie s velkou životností. Na druhou stranu, účinnost transformace tepla na elektřinu je velmi malá (řádově jednotky procent), z tohoto důvodu probíhá intenzivní výzkum, jenž by zvýšil efektivitu přeměny energie. Krom výroby elektrické energie se termoelektrické moduly uplatňují také v chladicí technice. Principy transformace tepelné energie na elektrickou a naopak nám popisují termoelektrické jevy.

TEORETICKÁ ČÁST

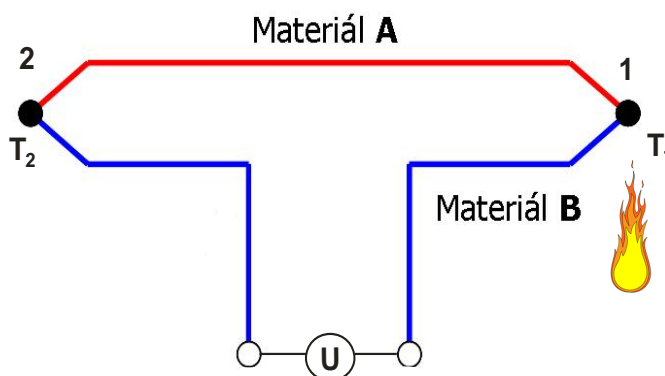
1. TERMOELEKTRICKÁ PŘEMĚNA

Základní fyzikální principy spojené s přímou přeměnou tepelné energie na elektrickou a naopak popisují jevy, které nazýváme termoelektrické. V této práci bude pozornost věnována především dvěma základním jevům, Seebeckovu a Peltierův. Tyto jevy můžeme pozorovat u výroby elektrické energie pomocí termoelektrických generátorů (TEG) a termoelektrického chlazení.

1.1. SEEBECKŮV JEV

Seebeckův jev nazýváme přímou přeměnu tepelné energie na energii elektrickou, objevenou německým fyzikem Thomas Johann Seebeckem. Seebeck v roce 1821 pozoroval střelku kompasu v uzavřené smyčce složené ze dvou různých vodičů. Když na jeden ze spojů přivedl teplo, ručička kompasu se začala působením magnetické síly způsobené vzniklým elektrickým proudem vychylovat.[3]

Samotný jev lze vysvětlit pomocí obvodu na obr. 1 tvořeném dvěma různými vodiči z materiálů A a B. Tyto vodiče jsou spojeny v místech 1 a 2. Jestliže bude mít spoj 1 teplotu T_1 , spoj 2 teplotu T_2 a zároveň bude platit $T_1 > T_2$, naměříme mezi spoji napětí U . Důvodem vzniku napětí U je přivedené teplo ke spoji 1, v jehož oblasti se vytváří vyšší koncentrace nositelů náboje (u kovů elektrony, u polovodičů elektrony a díry), které následně difundují k studenému spoji 2. Jestliže jsou nositelem náboje elektrony, nabíjí se teplejší spoj kladně a chladnější záporně, v případě děr je tomu naopak. Tento popis je velmi stručný, ale pro práci dostačující. Jev lze pozorovat i u samostatného vodiče. V takovém případě mluvíme o absolutním Seebeckovu jevu. Tohoto jevu se také využívá při určení typu elektrické vodivosti polovodiče. [4],[19]



Obr. 1 Schéma Seebeckova jevu

1.1.1. SEEBECKŮV KOEFICIENT

Schopnost materiálu indukovat napětí U za pomoci gradientu teploty ΔT vyjadřuje Seebeckův koeficient. Rozlišujeme dva druhy koeficientu:

- **Absolutní Seebeckův koeficient α** – α definujeme jako okamžitou změnu Seebeckova napětí U mezi konci jediného vodiče a gradientu teploty ΔT nacházející se mezi konci vodiče.

$$\alpha = \frac{U}{\Delta T} \quad [\text{V/K}] \quad (1.1)$$

- **Relativní Seebeckův koeficient α_{AB}** – je dán rozdílem mezi absolutními koeficienty dvou různých materiálů, což vyjadřuje rovnice:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad [\text{V/K}] \quad (1.2)$$

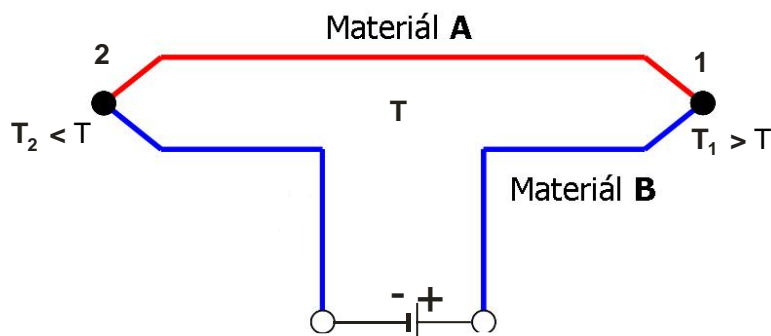
- Koeficient lze také vyjádřit jako okamžitou změnu napětí naměřeném U mezi spoji ze dvou různých vodičů a gradientu teploty ΔT nacházející se na těchto spoji (viz obr. 1), tedy:[1]

$$\alpha_{AB} = \frac{U}{\Delta T} \quad [\text{V/K}] \quad (1.3)$$

1.2. PELTIERŮV JEV

Inverzní termoelektrický jev k Seebeckovu poprvé sledoval v roce 1834 francouzský hodinář a fyzik Jean C. Peltier. Peltier jev pozoroval na obvodu tvořeném dvěma různými vodiči a zdrojem stejnosměrného elektrického proudu. Jakmile obvodem začal protékat proud, jeden ze spojů se zahřál, zatímco na druhém byl zaznamenán pokles teploty. Dokázat tohle chování však bylo velmi složité, neboť průchodem proudu ve vodiči vzniká Joulovo teplo.[2]

Podstatu jevu ukazuje obr. 2 s obvodem složeným ze dvou různých kovových vodičů, A a B spojené v místech 1 a 2. Předpokládáme konstantní teplotu T v obvodu před zapojením vnějšího zdroje proudu. Pokud obvodem bude protékat stejnosměrný proud z vnějšího zdroje, ve směru vyobrazeném na obr. 2, pak spoj 2 bude mít teplotu $T_2 < T$ a spoj 1 teplotu $T_1 > T$. Tento jev je zapříčiněn průchodem proudu spojem, kdy nosiče náboje prochází z prostředí o vyšší střední energii do prostředí o nižší střední energii a naopak. Jestliže přechází nosič náboje z prostředí o vyšší střední energie do nižší, vyzáří přebytečnou energii ve formě tepelné energie (spoj se zahřívá), v opačném případě je nosič náboje nucen přijmout energii na úkor energie tepelné (spoj se ochlazuje). Je třeba zdůraznit, že výše zmíněné chování platí pouze pro materiály, kde jsou nosiči náboje převážně elektrony (kovy, polovodiče typu N). U materiálů s typem elektrické vodivosti P, by chování na spoji bylo opačné. Opačného chování také dosáhneme změnou směru proudu.[1],[19]



Obr. 2 Schéma Peltierova obvodu

1.2.1. PELTIERŮV KOEFICIENT

Podobně jako u Seebeckova koeficientu existují i zde dva druhy Peltierova koeficientu, absolutní pro samostatný materiál a relativní vzniklý průchodem proudu spoji dvou různých materiálů. Následující text bude věnován pouze relativnímu koeficientu.

Relativní Peltierův koeficient udává poměr mezi teplem Q vznikajícím, případně zanikajícím na spoji mezi vodiči A a B a proudem I protékajícím přes spoj. [4]

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} \quad [V] \quad (1.4)$$

Tento koeficient můžeme také vyjádřit pomocí relativního Seebeckova koeficientu.[2]

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} \cdot \Delta T \quad [V] \quad (1.5)$$

1.3. THOMSONŮV JEV

Zahřejeme-li jeden konec homogenního kovového vodiče, vznikne ve vodiči nerovnováha vyvolaná zvýšenou kinetickou energií elektronů, která se projeví slabým elektrickým proudem. Takto si můžeme představit třetím základní termoelektrický jev, tzv. Thomsonův jev, objeven W. Thomsonem, zvaným též Lord Kelvin of Large. Vliv tohoto jevu v termoelektrických modulech je malý a lze ho zanedbat, proto mu není věnována větší pozornost.



Obr. 3 Thomas Johann Seebeck



Jean-Charles-Athanase Peltier
 (1785-1845)

Obr. 4 Jean Charles A. Peltier

2. TERMOELEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

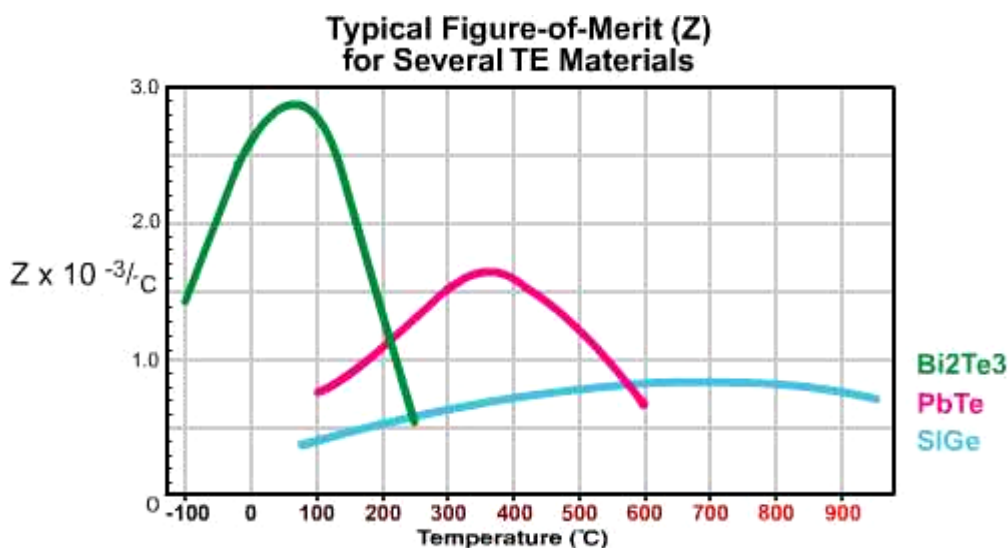
Jak bylo uvedeno v první kapitole, princip přímé výroby elektrické energie z energie tepelné byl znám již v 19. Století. Tehdejší materiály však nebyly pro praktické využití vhodné. Rozšíření se TEG dočkal až v druhé polovině 20. století s rozvojem nových materiálů - polovodičů. Právě polovodiče splňují nejlépe dané požadavky pro termoelektrické materiály. Při použití těchto materiálů dosahuje generátor nevyšší účinnosti, výkonu a zároveň je cenově dostupný.

2.1. KOEFICIENT TERMOELEKTRICKÉ ÚČINNOSTI Z, ZT

Termoelektrické jevy můžeme pozorovat u řady materiálů. Jejich efektivita však bude značně odlišná a jen malé procento materiálů se nám vyplatí komerčně vyrábět. Účinnost termoelektrické přeměny závisí na materiálových parametrech, které jsou shrnuty v koeficientu termoelektrické účinnosti Z. Koeficient udává schopnost jednotlivých materiálů přeměňovat přímým způsobem tepelnou energii na energii elektrickou. Je popsán následující rovnicí.

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

Koeficient Z není nevhodnějším porovnávacím kritériem. Jak můžeme vidět na grafu 1, hodnota Z závisí nejen na materiálu, ale taky na pracovní teplotě. Je třeba brát i v úvahu, že určité materiály jsou schopny pracovat jen v určitém rozsahu teplot. Při nedodržení předepsaného rozsahu, ztrácí materiál svou účinnost. Při výrazném překročení doporučené teploty může dokonce dojít k jeho nevratnému poškození. Například materiály založené na Bi-Te mají vysoký koeficient Z, ale jejich pracovní oblast je omezena jen do teplot okolo 450K. Oproti tomu materiály Si - Ge mají malou hodnotu Z, dokážou ovšem pracovat v teplotách okolo 1300K. [1]



Graf 1 Závislost Z na Teplotě[17]

Mnohem vhodnějším a v praxi také používanějším měřítkem výkonu je bezrozměrný koeficient ZT. Ten zohledňuje teploty, při nichž má daný materiál pracovat pomocí střední teploty T_s . Proto materiál, s vyšší maximální hodnotou koeficientu Z, ovšem pracující při

nízkých teplotách nemusí dosahovat vyššího výkonu jako materiál s nízkým Z , avšak schopným pracovat ve vysokých teplotách.[8]

$$ZT = \frac{\sigma \cdot \alpha^2}{\lambda} T_S \quad [-] \quad (2.2)$$

Střední teplota T_S je dána aritmetickým součet teplot nacházejících se na horké (T_H) a studené (T_C) straně termoelektrického modulu.[1]

$$T_S = \frac{T_H + T_C}{2} \quad [K] \quad (2.3)$$

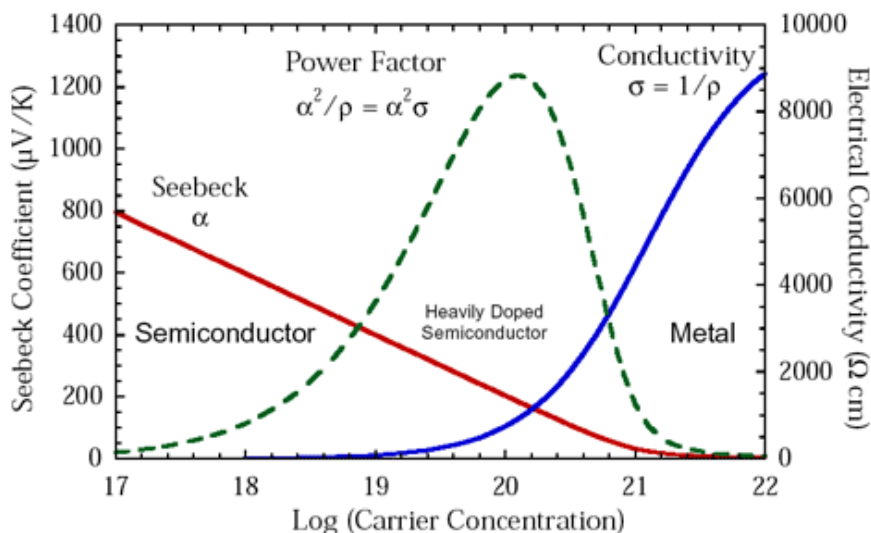
2.2. POROVNÁNÍ KOVŮ A POLOVODIČŮ

Z rovnice pro bezrozměrný termoelektrický koeficient ZT můžeme odvodit parametry pro ideální termoelektrický materiál. Ten by měl mít vysokou elektrickou vodivost σ , vysokou hodnotu Seebeckova koeficientu α , nízkou hodnotu tepelné vodivosti λ a být schopen si své vlastnosti udržet i při požadovaných pracovních teplotách. Hodnota σ závisí na koncentraci volných nosičů náboje v materiálu. S rostoucí koncentrací nosičů náboje, ale také roste tepelná vodivost λ a zároveň klesá Seebeckův koeficient α , což je nežádoucí.

Kovy dosahují nejvyšší koncentrace volných nosičů náboje, mají tedy nejvyšší hodnoty λ i σ . Jestliže dáme tyto dva parametry do poměru λ/σ , zjistíme, že u kovů a jejich slitin je poměr konstantní podle Wiedemann-Franzova zákona a přímo závisí pouze na teplotě. Navíc díky vysoké koncentraci nosičů náboje dosahuje u kovů Seebeckův koeficientu α hodnoty $10 \mu V K^{-1}$ nebo nižší.

Oproti tomu polovodičové materiály mají hodnotu koncentrace nosičů náboje s porovnání s kovy menší. Nedosahují tedy takových hodnot elektrické vodivosti jako kovy, v ostatních parametrech se však ukazují jako vhodnější. Velkou výhodou polovodičů je schopnost snižovat poměr λ/σ . Toho dosahujeme pomocí legování vhodných příměsí. Polovodiče mají vysoký koeficient α , který dosahuje hodnot vyšších jak $100 \mu V K^{-1}$. [20]

V grafu 2 můžeme vidět porovnání parametrů v závislosti na koncentraci nosičů náboje. Je patrné, že dosažené maximum koeficientu termoelektrické účinnosti Z , se nachází v oblasti silně dopovaných polovodičů. Jsou tedy nejvhodnějším termoelektrickým materiálem.



Graf 2 Závislost parametrů α , λ , σ a Z na koncentraci nosičů náboje[34]

2.3. VLASTNOSTI POLOVODIČŮ

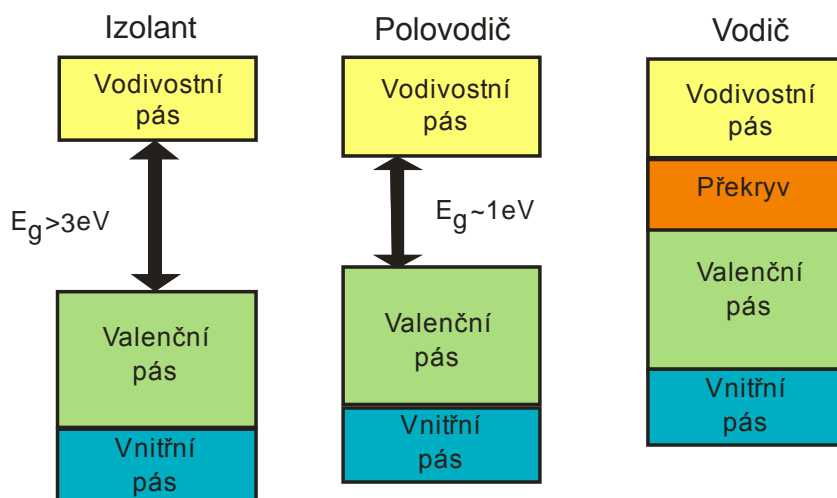
Polovodiče jsou látky, jež se můžou chovat za určitých podmínek jako elektrické izolanty nebo elektrické vodiče. Na rozdíl od kovů mluvíme u polovodičů o tzv. bipolární elektronové vodivosti. Znamená to, že se na vedení elektrického proudu se podílí dva typy nosičů elektrického náboje, elektrony a díry. Významnou vlastností elektrické vodivosti u polovodičů je schopnost měnit svou hodnotu díky působení vnějších fyzikálních dějů jako je působení tepla (se zvyšující se teplotou elektrická vodivost roste), světla, magnetického a elektrického pole a radioaktivního záření. Změnu elektrické vodivosti lze dosáhnout také přidáním malého množství příměsi cizích atomů do čisté látky polovodiče.[21]

2.3.1. ELEKTRICKÁ VODIVOST POLOVODIČŮ

Důležitým modelem pro studium elektrické vodivosti pevných látek jsou pásové diagramy dovolených hodnot energií elektronů. Skládá se ze čtyř pásem: vnitřního, valenčního, zakázaného a vodivostního pásu.

- **Vnitřní pás** – V tomto pásu jsou elektrony pevně vázány k jádru atomu a na přenosu elektrického proudu se nepodílí.
- **Valenční pás** – Zde se nachází množina všech energetických stavů elektronů, vytvářející chemickou vazbu.
- **Zakázaný pás** – Představuje energetickou bariéru mezi nevyšší energií vázaného elektronu valenčního pásma a nejnižší energií volného elektronu vodivostního pásma.
- **Vodivostní pás** – jedná se o množinu všech energetických stavů volných elektronů v mezimřížkových polohách.

Na obr. 5 můžeme vidět rozložení pásem u izolantů, polovodičů a vodičů. Z hlediska elektrické vodivosti je důležitá šířka zakázaného pásma E_g . U izolantů je E_g nejširší ($>3\text{eV}$), valenční pás je zcela zaplněn a izolanty téměř nevedou elektrický proud. Naopak vodiče mají velmi malou šířku zakázaného pásma ($E_g < 0,1\text{eV}$) nebo se valenční s vodivostním pásem rovnou překrývají. Jsou tedy dobrými elektrickými i tepelnými vodiči. Polovodiče mají menší šířku zakázaného pásma ($E_g \sim 1\text{eV}$) než izolanty, ale větší než kovy. Mohou tedy za určitých podmínek být vodiči i izolanty.



Obr. 5 Energetické pásy krystalických látek

Podle toho, jestli se v krystalické mřížce vyskytuje příměs nebo ne, můžeme polovodiče dělit na vlastní (intrinzické) a nevlastní (extrinzické). Vlastní polovodiče neobsahují žádné příměsi a mají pouze vlastní vodivost. Při teplotě 0 K se vlastní polovodič chová jako izolant, všechny elektrony jsou vázány v chemických vazbách, vodivostní pás neobsahuje žádné elektrony. Působením vnějších vlivů (například teploty) může elektron nabít aktivační (ionizující) energii E_A ($E_A > E_g$) a přeskočit z valenčního pásu do vodivostního. Na místě chybějícího elektronu vznikne kladně nabitý iont, který se může zneutralizovat přijetím elektronu ze sousedního atomu krystalové mřížky a ten zase přijetím dalším elektronem ze sousedního atomu. Tím v materiálu vznikne pohybující se kladný nosič náboje nazývaný se díra. Ve vlastním polovodiči jsou nosiči náboje jak elektrony, tak díry. Protože uvolněním každého záporného elektronu vznikne na jeho místě kladná díra, musí být počet uvolněných elektronů roven počtu vzniklých děr.

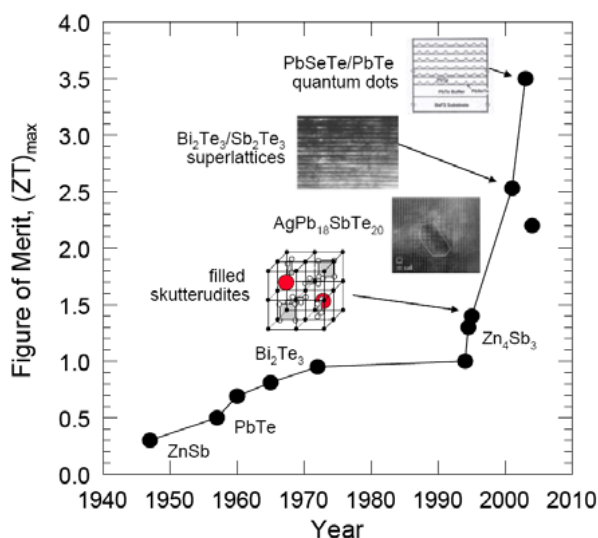
Nevlastní polovodiče záměrně obsahují v krystalické mřížce příměsi, s jejichž pomocí získává materiál požadované vlastnosti. Mají tedy kromě vlastní vodivosti i vodivost nevlastní. Podle druhu příměsi dělíme nevlastní polovodiče na dva typy, N a P.

Je-li například základní polovodičový čtyřmocný (chemické vazby se účastní čtyři elektrony valenční vrstvy) atom v krystalové mřížce nahrazen pětímocným atomem příměsi nazývaným donorem, na chemické vazbě se podílí pouze čtyři valenční elektrony atomu příměsi a zbylý elektron je vázán velmi slabou vazbou. Snadno se proto „daruje“ do vodivostního pásma dodáním malé aktivační energie. Z atomů příměsi se po darování elektronu stávají kladné nepohyblivé ionty, zůstávající v mřížkových polohách. Majoritní podíl na elektrické vodivosti mají tak elektrony. Hovoříme tedy o elektronové vodivosti polovodiče a polovodič označujeme jako typ N

U stejného základního polovodičového atomu můžeme však docílit i vodivosti typu P. Ta vznikne, nahradíme-li základní čtyřmocný polovodičový atom trojmocným atomem příměsi nazývaný akceptorem. Na chemické vazbě se podílí všechny tři valenční elektrony akceptoru. Poslední vazba mezi základním atomem a akceptorem tak zůstane neúplná. Stačí tedy dodání malé aktivační energie k tomu, aby došlo k uvolnění elektronu ze sousední vazby a zaplnění neúplné vazby mezi akceptorem a základním atomem. Akceptor se ionizuje záporně a vytváří tím v sousedním atomu kladnou díru, která se může pohybovat a umožňuje vedení elektrického proudu. U polovodičů typu P jsou majoritními nosiči kladné díry, mluvíme tedy o děrové vodivosti.[22]

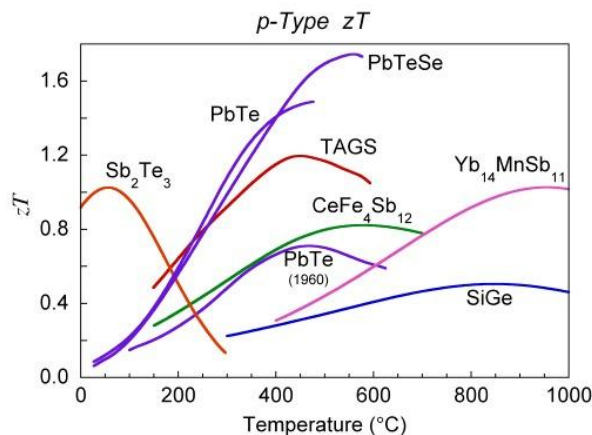
2.4. PŘEHLED MATERIÁLŮ PRO TERMOELEKTRICKÝ MODUL

Největší nedostatkem TEG od samotného počátku je jeho malá účinnost. Proto byl, v posledních desítkách let velký zájem věnován vývoji novým termoelektrickým materiálům, snažící se o zvýšení termoelektrické účinnosti. Přestože se výzkum věnoval celé řadě možných termoelektrických materiálů, v dnešní době se v komerčních aplikacích používají pouze některé z nich, V práci jsem se zaměřil na tradiční, komerčně používané materiály, Skutterudity, TAGS a keramické materiály.[4],[9]

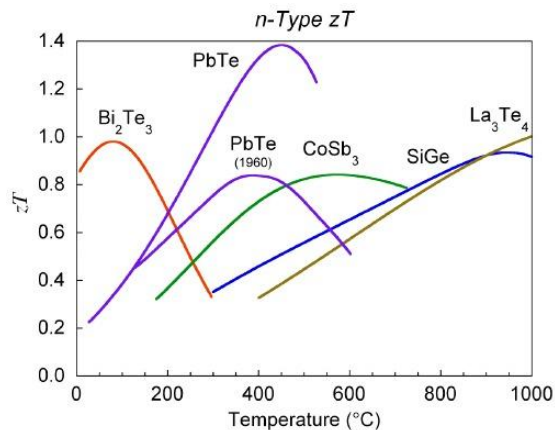


Graf 3 Přehled vývoje termoelektrických materiálů [15]

Jak už bylo zmíněno výše, velký vliv na koeficient termoelektrické účinnosti Z má pracovní teplota. Podle teploty, v které daný TEG pracuje s největší účinností, můžeme také rozdělit tradiční, komerčně využívané termoelektrické materiály. Do skupiny nízkoteplotních materiálů patří slitiny Bi v kombinaci s Sb, Te nebo Se pracují v optimálních teplotách do 450K, materiály pracující ve středních teplotách jsou založené především na slitinách Pb a nejvyšší účinnosti dosahují do teploty 850K. Vysokoteplotní slitiny Si a Ge jsou vhodné do 1300K. Všechny tyto materiály dosahují při optimálních podmínkách bezrozměrného koeficient $ZT_{max} \sim 1$, což byl dlouhou dobu horní limit termoelektrických materiálů. Dnes už je známa celá řada nových termoelektrických materiálů s vyšším ZT , ty ale stále nejsou v komerční oblasti dostupné.[17]



Graf 4 Závislost ZT na teplotě – p typ



Graf 5 Závislost ZT na teplotě – n typ

Skutterudity jsou materiály, které využívají pokroku, dosažený výzkumem zaměřeným na snížení tepelné vodivosti krystalické mřížky λ_L . Ukázalo se, že ideálním termoelektrický materiál by měl mít tepelnou vodivost skla a zároveň elektrickou vodivost krystalu. Tento ideální materiál nazýváme „phonon glass electronic crystals“ (PEGC). Skutterudity vlastnosti PEGC do určité míry splňují. Jejich krystalická struktura obsahuje dutiny, které jsou vhodné pro zabudování velkých a těžkých atomů příměsí, které tlumí vibrace krystalické mřížky a zmenšují tak její tepelnou vodivost λ_L . Příkladem skutteruditu je materiál $\text{Yb}_{0,35}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$, který při teplotě 820K dosahuje hodnoty $ZT = 1,2$. Studium a vývojem skutteruditů se mimo jiných zabývá tým vědců chemicko – technologické fakulty Pardubické Univerzity.[17], [18], [25]

Materiály označované jako TAGS jsou v dnešní době jedny z neperspektivnějších termoelektrických materiálů. Jedná se o slitinu $(\text{GeTe})_{0,85}(\text{AgSbTe}_2)_{0,15}$, přičemž dolní index za závorkami představuje procentuální zastoupení sloučenin. Dosahují $ZT \sim 1,4$ v teplotách okolo 400 až 550K.[27]

Zajímavou variantou termoelektrických materiálů jsou keramické termoelektrické materiály. Například $\text{Ca}_{0,95}\text{Sm}_{0,05}\text{MnO}_3$ (n – typ) a $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ (p – typ). Termoelektrický modul vyrobený z těchto materiálů je schopný pracovat ve vysokých teplotách okolo 1300K. Tyto typy materiálů ale stále čelí spoustě problémů, mezi nejzávažnější patří způsob výroby, protože při přípravě vznikají v materiálu trhliny.[29]

Tab. 1 Vybrané termoelektrické materiály [35]

Materiál	Složení	Typ elektrické vodivosti	Maximální ZT [-]	Pracovní teplota [°C]
Slitiny Bi - Te	Bi_2Te_3	N	1	0 – 200
	Bi_2Te_3	P	0,7	0 - 200
Silicidy (sloučeniny křemíku)	Mn - Si	P	0,8	300 - 600
	Mg - Si	N	1,07	380 – 600
Slitiny Si - Ge	$\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$	N	1	730
	$\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$	P	0,7	730
Oxidy	NaCo_2O_4	P	1,2	30 - 500
	$(\text{Ca,Sr,Bi})_2\text{Co}_2\text{O}_5$	P	-	330 – 730
	$(\text{ZnO})_5(\text{In}_{0,97}\text{Y}_{0,003})_2\text{O}_3$	N	0,031	430 - 800
	$\text{Zn}_{0,98}\text{Al}_{0,02}\text{O}$	N	0,42	430 – 700
Slitiny PbTe	PbTe	N	0,7	230 - 577
Slitina TAGS	$(\text{GeTe})_{0,85}(\text{AgSbTe}_2)_{0,15}$	P	1,4	430
LaTe	LaTe~1.4	N	1,17 – 1,43	730
Skutterudity	$\text{YbCO}_{0,9}(\text{PtPd})_{0,1}\text{Sb}_3$	N	1,12	330 - 630
	$\text{Ce}_{0,12}\text{Fr}_{0,7}\text{Co}_{3,29}\text{Sb}_{12}$	P	0,93	330 - 630
Bi-Sb-Te-Se	Bi-Sb-Te-Se	N, P	0,3 – 1,01	180 – 250
Slitiny Zn_4Sb_3	$\text{Zn}_4(\text{Sb}_{0,97}\text{Sn}_{0,03})_3$	P	1	230 - 480
	Zn_4Sb_3	P	1,22	230 - 480

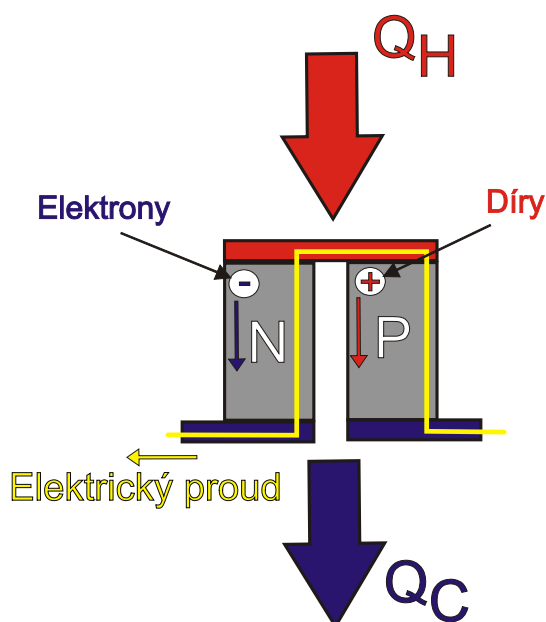
3. KONSTRUKCE TERMOELEKTRICKÉHO GENERÁTORU

Termoelektrický generátor je zařízení projektované a konstruované tak, aby splňovalo následující, často protichůdná kritéria: Spolehlivost, bezporuchovost, minimální údržba, dlouhá životnost, výkon a účinnost, příznivá cena. Je třeba nalézt optimální řešení a hledat kompromisy mezi jednotlivými kritérii s ohledem na pracovní podmínky.

Samotné komponenty TEG můžeme rozdělit do dvou skupin, hlavní a pomocné. Mezi hlavní patří termoelektrický modul vhodný pro generování elektrického proudu, tepelné výměníky a DC/DC měniče. Tyto základní komponenty obsahuje každý TEG, a proto jim budu věnovat pozornost níže. Pomocná zařízení jsou rovněž nezbytná k správné činnosti TEG, ale jsou jiná pro různé konstrukce generátoru. Patří sem různé typy potrubních cest dopravující teplotně nosná média, čerpadla a podobně.

3.1. TERMOELEKTRICKÉ MODULY

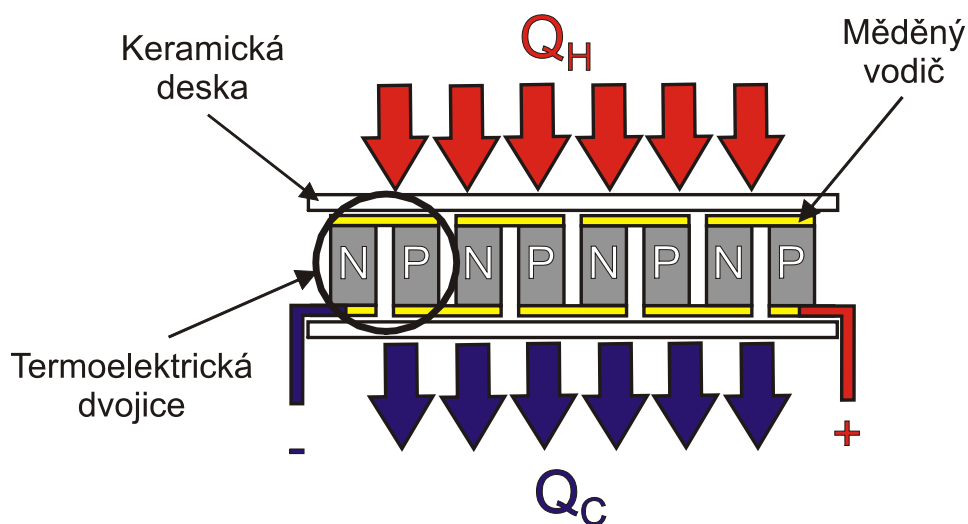
Princip termoelektrického modulu je odvozen od Seebeckova jevu. Nejsnáze ho lze popsat pomocí dvou spojených polovodičů různého typu, který nazýváme termoelektrická dvojice (obr. 6). Na horní stranu dvojice je přivedeno teplo Q_H a ze spodní strany je odváděno teplo Q_C . Vzniká tak teplotní rozdíl ΔT mezi horkou a studenou stranou dvojice. V polovodiči N jsou majoritními nosiči náboje elektrony, které se pohybují od horkého konce k studenému. Stejným směrem teče i v polovodiči typu N elektrický proud. V polovodičích typu P jsou majoritními nosiči kladné díry, které se pohybují stejným směrem jako elektrony ve vodiči typu N, tedy od horkého konce k studenému. Elektrony tak v polovodiči typu P tečou od studené strany k horké a stejným směrem teče i v tomto druhu polovodiče elektrický proud. Z tohoto důvodu je nezbytné střídání jednotlivých druhů polovodiče v TE modulu.[14]



Obr. 6 Termoelektrická dvojice

TE moduly můžeme označit jako nejdůležitější komponenty TEG, neboť v nich probíhá přeměna tepelné energie na energii elektrickou díky principům, které byly popsány výše. Schéma konstrukce nejpoužívanějšího TE modul můžeme vidět na obr. 7. Skládá se střídavě

ze silně dopovaných polovodičů typu N a P, sloupkového tvaru, spojené (spájené) měděným vodičem a sevřené dvěma keramickými deskami. Jednotlivé termoelektrické dvojice jsou mezi sebou zapojeny z elektrického pohledu sériově, z tepelného paralelně. Keramické desky bývají obvykle vyrobeny z oxidu hlinitého (Al_2O_3) a mají tři základní funkce: přívod tepla, elektrickou izolaci modulu od okolí a zajištění potřebné pevnosti modulu. Množství přeměněné energie závisí na počtu termoelektrických dvojic v modulu, jejich geometrii, termoelektrických vlastnostech termoelementů, tepelných a termoelektrických vlastnostech kontaktních vrstev a teplotním rozdílu napříč modulem. [1],[12],[13]



Obr. 7 Schéma termoelektrického modulu

Z hlediska funkce můžeme termoelektrické moduly rozdělit do tří kategorií:

- Termoelektrické moduly vhodné pro generování elektrického proudu
- Peltierovy články pro chlazení
- Peltierovy články pro ohřev

Konstrukčně se mezi sebou jednotlivé typy modulů příliš neodlišují, rozdílný je však materiál, z něhož jsou jednotlivé moduly vyrobeny. V práci jsem se zaměřil pouze na termoelektrické moduly vhodné ke generování elektrického proudu. Tyto moduly mají často stejnou zkratku jako termoelektrické generátory (TEG). Proto budu termoelektrické moduly vhodné pro generování označovat zkratkou TE. Označení není úplně korektní, protože zkratkou TE můžeme označit jak moduly pro generování, tak i moduly pro chlazení a ohřev.

3.1.1. VÝKON MODULU

Pracuje – li článek jako zdroj elektrické energie, dodává do externí zátěže elektrický výkon. Ten je v obvodech stejnosměrného elektrického proudu přímo úměrný napětí a proudu. Vezněme si jeden termočlánek, tedy dvojici termoelementů P a N. Ze vztahu (1) vyjádříme napětí:

$$U = \alpha(T_H - T_C) \quad [V] \quad (3.1)$$

α je Seebeckův koeficient a T_H teplota teplé strany modulu, T_C teplota studené strany modulu. Použitím Ohmova zákona si můžeme vyjádřit proud jako:

$$I = \frac{U}{R} = \alpha(T_H - T_C) \frac{A_{TM}}{\rho_{TM} 2l_{TM}} \quad [A] \quad (3.2)$$

A_{TM} představuje plochu příčného řezu termoelementu, ρ_{TM} měrný elektrický odpor termoelektrického materiálu a $2l_{TM}$ je délka dvou termoelementu tvořící termočlánek. Výkon termočlánek můžeme tedy psát ve tvaru:

$$P = \frac{\alpha^2}{2\rho_{TM}} \frac{A_{TM}(T_H - T_C)^2}{l_{TM}} \quad [W] \quad (3.3)$$

Jestliže modul obsahuje N termočláneků, bude výsledný vztah modulu:

$$P = \frac{\alpha^2}{2\rho_{TM}} \frac{NA_{TM}(T_H - T_C)^2}{l_{TM}} \quad [W] \quad (3.4)$$

Výše zmíněné vztahy jsou vztahy ideální. Chceme li dospět k přesnějším hodnotám, musíme uvažovat také, elektrický, tepelný kontaktní parametr n , r a kontaktní výšku kontaktní vrstvy l . Vzorce pak budou vypadat následovně: [13]

$$U = \frac{\alpha(T_H - T_C)}{1 + 2r \frac{l_c}{l_{TM}}} \quad [V] \quad (3.5)$$

$$I = \frac{A_{TM} \alpha (T_H - T_C)}{\rho_{TM} 2(l_{TM} + n)(1 + 2r \frac{l_c}{l_{TM}})} \quad [A] \quad (3.6)$$

$$P = \frac{\alpha^2}{2\rho_{TM}} \frac{NA_{TM}(T_H - T_C)^2}{(l_{TM} + n)(1 + 2r \frac{l_c}{l_{TM}})} \quad [W] \quad (3.7)$$

Zapotřebí je také zmínit vliv odporu zátěže R_L . Ten nám charakterizuje následující vzorec:

$$P_L = I^2 R_L = \frac{[\alpha(T_H - T_C)]^2 \frac{R_L}{R_i}}{R_i (\frac{R_L}{R_i} + 1)^2} \quad [W] \quad (3.8)$$

Z tohoto vztahu plyne, že maximální výkon modulu bude největší při rovnosti odporu termoelektrického modulu R_i s odporem zátěže R_L . Maximální výkon tedy bude roven: [1]

$$P_{Lmax} = \frac{[\alpha(T_H - T_C)]^2}{4R_i} \quad [W] \quad (3.9)$$

Tento způsob výpočtu výkonu, je přesný pouze v případě, kdy se zátěž chová jako ideální odpor.

3.1.2. ÚČINNOST MODULU

Účinnost termoelektrického modulu můžeme definovat jako:

$$\eta = \frac{\text{Výkon modulu dodávaný do zátěže}}{\text{Teplo pohlcené modulem}} \quad [\%] \quad (3.10)$$

Výkon modulu uvažujeme s vlivem zátěže (rovnice 3.8). Teplo pohlcené modulem, bude záležet nejen na teplotě dodané vnějším zdrojem, ale i Peltierovu efektu, který vzniká v modulu průchodem elektrického proudu a také Joulovým teplem.[1]

$$\eta = \frac{P_L}{Q_{\text{zdroj}} - Q_{\text{Peltier}} - Q_{\text{Joule}}} = \frac{I^2 R_L}{\lambda(T_H - T_C) + \alpha I T_H - \frac{I^2 R}{2}} \quad [\%] \quad (3.11)$$

Častěji se účinnost TE vyjadřuje pomocí koeficientu termoelektrické účinnosti Z . Závislost η na Z získáme, jestliže upravíme rovnici (3.11) a nahradíme poměr R_L/R vztahem:

$$\frac{R_L}{R} = \sqrt{1 + ZT} \quad [-] \quad (3.12)$$

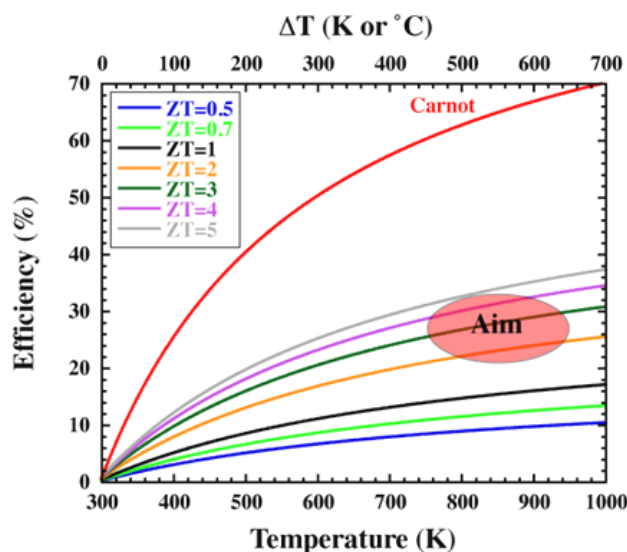
Z toho vztahu také vyplývá, že maximální účinnosti bude dosaženo, jestliže se odpor zátěže bude rovnat:

$$R_L = R\sqrt{1 + ZT} \quad [\Omega] \quad (3.13)$$

Za ideálních podmínek (neuvažujeme tepelné ani elektrické ztráty) tak účinnost TE modulu můžeme vyjádřit vztahem:

$$\eta = \eta_{Tc} \cdot \eta_{\text{Mat}} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad [-] \quad (3.14)$$

Kde se celková účinnost η skládá se ze dvou dílčích účinností, Carnotovy η_{Tc} , a účinnosti závislé na materiálu η_{Mat} . Carnotova účinnost se rovná termodynamické účinnosti Carnotova cyklu. Tuto hodnotu nemůže překročit žádný stroj pracující v rozmezí teplot T_1 a T_2 . Velikost materiálové účinnosti závisí především na hodnotě koeficientu termoelektrické účinnosti ZT . Porovnání Carnotovy účinnosti s účinnostmi termoelektrických modulů s různými hodnotami ZT znázorňuje graf 6.[10]



Graf 6 Porovnání Carnotovy účinnosti s účinnostmi TE pro různé hodnoty ZT [38]

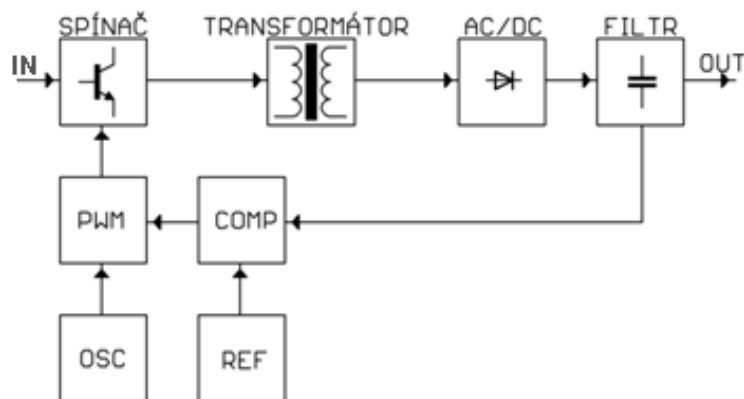
3.2. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY

Tepelný výměník je zařízení, které slouží k přenosu tepelné energie mezi dvěma látkami, přičemž hlavním požadavkem je co možná nejintenzivnější předání tepla, při co možná nejmenších nákladech. V případě termoelektrického generátoru, se jedná o přenos tepla z pracovního média na povrch horké strany TE modulu a odvod tepla ze studené strany do dalšího pracovního média. V praxi se používají různé druhy výměníků. Jejich volba spočívá především na druhu pracovního média použitého pro přívod nebo odvod tepla. V mé bakalářské práci tepelný výměník představuje hliníkový chladič na straně spalin, jež přivádí teplo na horkou stranu TE modulu a vodní blok odvádějící teplo ze studené.

3.3. MĚNIČE DC/DC

Většina spotřebičů ke své činnosti vyžaduje konstantní, v čase neproměnné napětí. Napětí generované termoelektrickým generátorem je však v čase proměnné, protože tepelný tok přiváděný do generátoru kolísá a tím se mění gradient teploty. V praxi tento problém řešíme použitím DC/DC měniče.

V praxi se setkáváme s mnoha varianty zapojení DC/DC měniče, všechna vychází ze základního zapojení spínaného zdroje (obr. 8). Princip spínaného stejnosměrného měniče je následující: Vstupní napětí přivedeme na spínací tranzistor, který vytvoří ze stejnosměrného napětí střídavé obdélníkové napětí, vhodné pro transformaci na transformačním prvku (obvykle cívka nebo transformátor). Výstupní napětí z transformačního prvku je nutné stabilizovat na stejnosměrné a vyfiltrout pomocí diod a filtračních kondenzátorů. Zapojení dále obsahuje pulzně - šířkovou modulaci (PWM), oscilátor (OSC), komparátor (COMP) a referenční zdroj (REF). Tyto součástky určují rychlost spínání tranzistoru na základě hodnoty výstupního napětí.[23]



Obr. 8 Základní schéma zapojení spínaného zdroje[23]

Z hlediska konstrukce můžeme dělit DC/DC měniče do dvou skupin:

- Měniče s galvanickým oddělením
- Měniče bez galvanického oddělení

Měniče s galvanickým oddělením

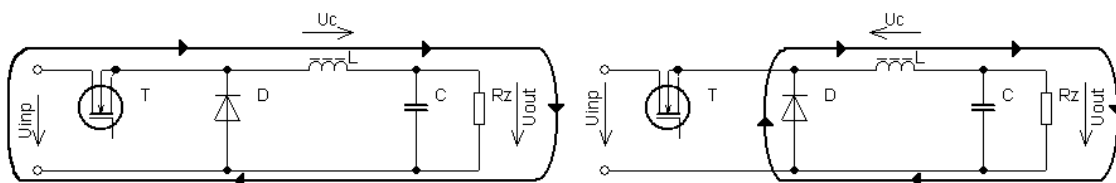
Obvody DC/DC měničů jsou rozděleny na dvě nebo více části pomocí galvanického oddělení. To znamená, že části obvodu nejsou propojeny vodičem, ale elektrická energie se přenáší prostřednictvím transformátorů, jež jsou zároveň transformačními prvky tohoto typu měničů. Mezi základní typy měničů s galvanickým oddělením patří:

- Akumulující (blokující) měnič (FLYBACK)
- Push - Pull

Měniče bez galvanického oddělení

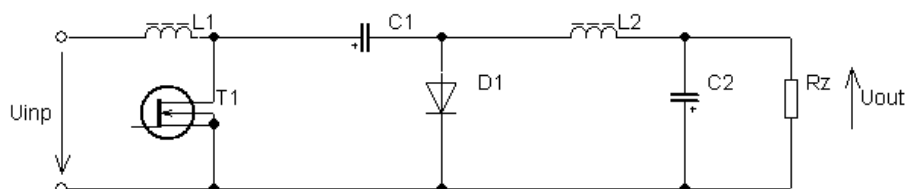
Jedná se o měniče, které nejsou galvanicky odděleny. To znamená, že všechny prvky obvodu jsou spojeny vodičem, prostřednictvím něhož dochází k přenosu elektrické energie. U těchto typů měničů jsou jako transformační prvky použity především cívky. Do skupiny DC/DC měničů bez galvanického oddělení patří:

- Nábojová pumpa (Charge pump)
- Snižující měnič (Buck, Step - Down)



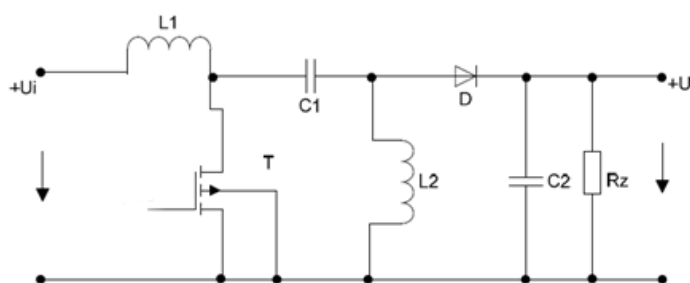
Obr. 9 Schéma snižujícího měniče[24]

- Čukův měnič (Buck – Boost)



Obr. 10 Schéma snižujícího i zvyšující měniče (Buck – Boost)[24]

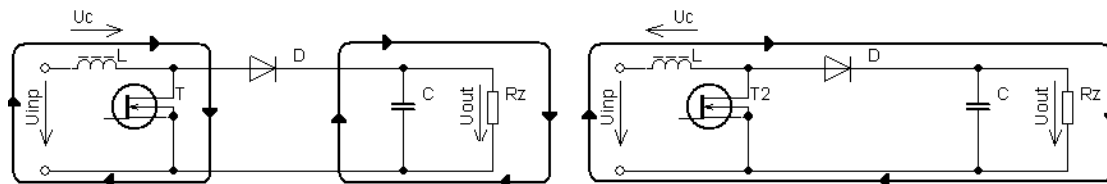
- SEPIC



Obr. 11 Schéma měniče typu SEPIC[26]

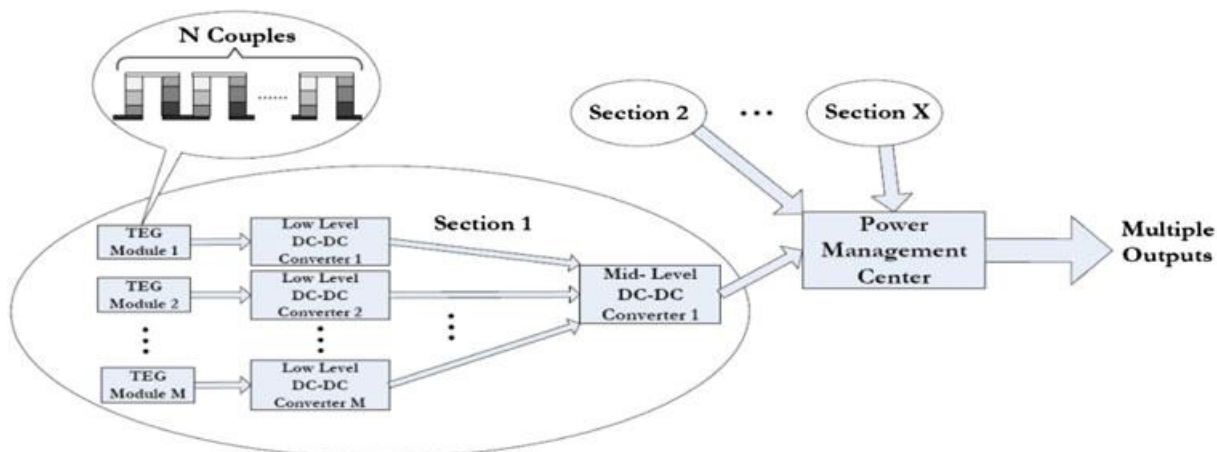
- Zvyšující měnič (Boost, Step - Up)

Výstupní napětí je vyšší než vstupní. Princip zvyšujícího měniče lze popsat pomocí obr. 12. Měnič pracuje ve dvou cyklech. V prvním cyklu je tranzistor sepnutý a proud teče pouze jím a cívkou. V druhé fázi se tranzistor rozezne. Cívka se tak stává zdrojem energie zapojeným do série spolu s napájecím zdrojem. Proud teče ze vstupního zdroje přes cívku, na které se zánikem jejího magnetického pole obrátila polarita, napětí o vyšší hodnotě než vstupní teče přes diodu do zátěže.[24]



Obr. 12 Schéma zvyšujícího měniče popisující princip činnosti [24]

Většina termoelektrických generátorů obsahuje více termoelektrických modulů. Z praktického hlediska je nevýhodné zapojení sériově spojených modulů k jednomu měnič. Výhodnější je zapojení s více DC/DC měniči na více úrovních, což znázorňuje topologie zobrazená na obr. 13. Topologie rozděluje měniče do tří úrovní: nízké, střední a vysoké. Na nízké úrovni je nejrozšířenějším typem zvyšující (boost) měnič, případně lze v některých případech použít i nábojovou pumpu. Pro střední úroveň konverze se používá Čukův měnič a kritéria pro vysokou úroveň nejlépe splňuje měnič s galvanickým oddělením typu push – pull. Sestava měničů je řízena elektronicky.[47]



Obr. 13 Obecná topologie DC/DC měničů v aplikacích s TEG [47]

4. APLIKACE TERMoeLEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ

V praxi nalezneme mnoho druhů termoelektrických generátorů s různorodou konstrukcí, volenou podle pracovních podmínek. Obecně nevýhodou TEG je jeho malá účinnost, naopak výhodou je vysoká životnost a spolehlivost, protože neobsahuje žádné pohyblivé části. TEG dnes slouží v mnoha aplikacích, jako jsou zdroje energie pro vesmírné sondy nebo využití odpadního tepla spalovacích zařízení. Termoelektrické generátory můžeme rozdělit podobně jako termoelektrické materiály a to podle pracovních teplot:[8]

- Nízkoteplotní – pracující do teploty 200°C
- Středněteplotní – pracují v rozmezí teplot 200°C až 700°C
- Vysokoteplotní - pracují nad teplotu 700°C

4.1. KOGENERACE

Jednou z možných využití termoelektrického generátoru jsou kogenerační aplikace. Pojmeme kogenerace rozumíme kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie. Kogenerace využívá k výrobě tepelné a elektrické energie pouze jednoho primárního zdroje vstupujícího do transformačního řetězce, což vede k výraznému zvýšení využití zdroje paliva. Celé energetické zařízení, v němž probíhá společná výroba obou energií, pak nazýváme kogenerační jednotky. Technologii kogenerace můžeme rozdělit podle počtu transformací energie do dvou základních skupin:[30]

- Transformaci nepřímým způsobem
- Transformaci přímým způsobem

Při transformaci nepřímým způsobem energie paliva prodělává obvykle tři způsoby transformace. Nejprve se uvolní tepelná energie obsažená v palivu. Ta se následně transformuje prostřednictvím tepelného stroje (spalovací motor, plynová turbína) na energii mechanickou a posléze se prostřednictvím generátoru mechanická energie přemění na elektrickou. Při transformaci přímou metodou se provádí přeměna paliva přímo na elektrickou energii, přičemž vzniká tepelná energie. Příkladem přímé transformace je palivový článek. Termoelektrický generátor můžeme zařadit do skupiny nepřímé transformace, protože nejprve se energie paliva transformuje na teplo a následně na elektřinu.[30]

Poměr elektrického a tepelného výkonu σ se v teplotě nazývá modul teplotní výroby elektrické energie. Můžeme jej vyjádřit pomocí rovnice:

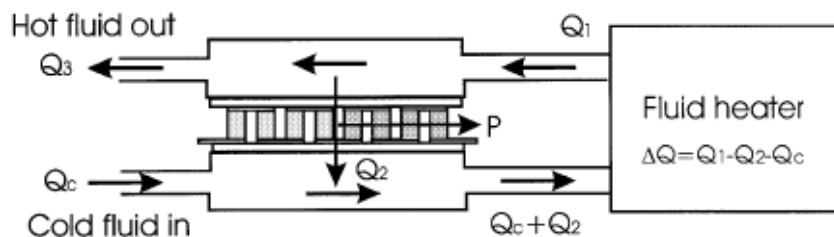
$$\sigma_k = \frac{P_E}{P_T} = \frac{P_{E,\%}}{P_{T,\%}} \quad [-] \quad (4.1)$$

kde $P_{E,\%}$ je procentní elektrický výkon a $P_{T,\%}$ procentuální tepelný výkon, jejichž součet musí být 100%. U kogenerační jednotky, která by využívala TEG, jako prostředek na výrobu elektrické energie se předpokládá, že σ_k bude dosahovat malých hodnot, neboť účinnost TE se pohybuje okolo 5%. [30]

Z tohoto hlediska teplo dělíme na vysokopotenciální, nalézající uplatnění ve vysoušecích procesech, tepelném zpracování apod. a nízkopotenciální, jenž se převážně akumuluje do vody pro teplotní účely. TE je schopen využívat jak vysokopotenciální, tak nízkopotenciální teplo, ovšem efektivní využití by našel spíše pouze u nízkopotenciálního tepla. [30]

Jeden z možných způsobů, jak využít termoelektrický generátor v kogeneraci naznačuje obr. 14. Termoelektrický generátor v tomto případě slouží jako generátor elektrické energie a

zároveň jako tepelný výměník, sloužící k předehřevu teplonosného média. Hlavním účelem tohoto systému je produkce tepla. Tento systém může být použit také na předehřev paliva, čímž zlepší jeho spalování.[41]



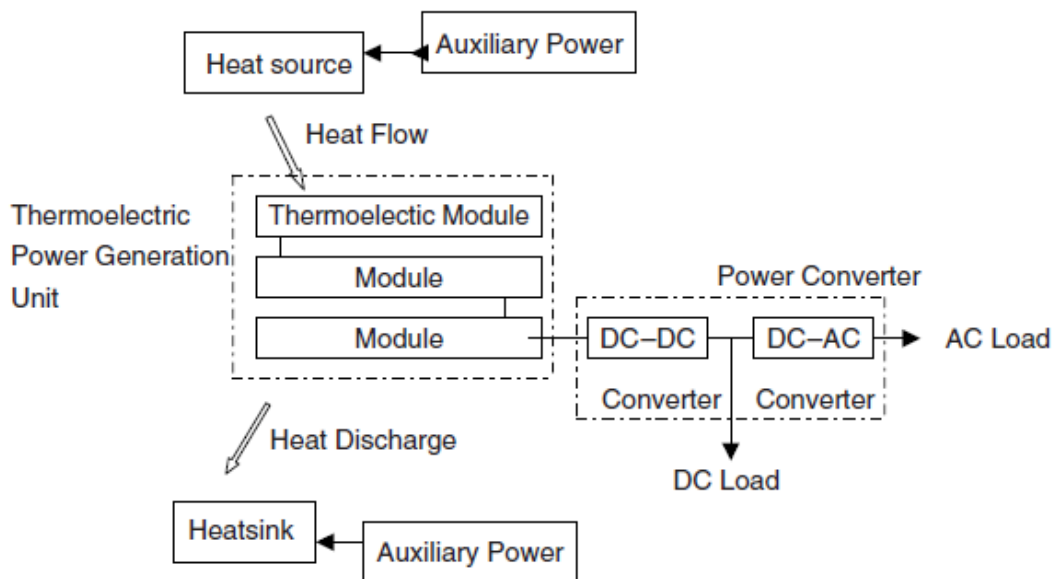
Obr. 14 Schéma termoelektrického generátoru použitého pro předehřev média [41]

Využití termoelektrického generátoru v kogeneračních jednotkách má potenciál zejména u menších, lokálních aplikací. Velkou předností těchto aplikací jsou dobré rozměrové parametry a možnost aplikovat TEG do již používaných zařízení na výrobu tepla. Zajímavým řešením je umístění generátoru do kotle malého výkonu, nebo jeho spalínového traktu. O tomto způsobu využití bude více pojednáno níže.

4.2. VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA POMOCÍ TERMOELEKTRICKÉHO GENERÁTORU

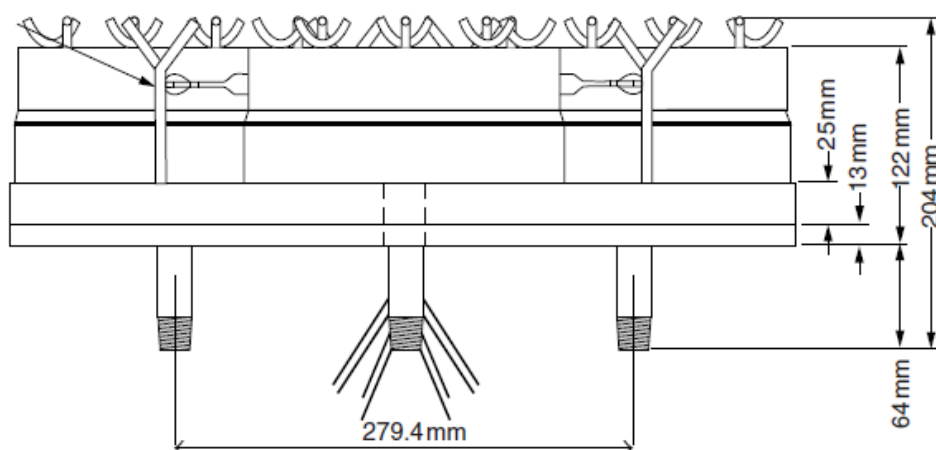
Velká část globálních energetických zdrojů je přeměněna v teplo, z něhož se efektivně využije pouze 30 až 35%. Zbylé teplo odchází jako odpadní do atmosféry, řek, či oceánů a je považováno jako významný příspěvek ke globálnímu oteplování naší planety. Problémem odpadního tepla je fakt, že nespĺňuje buď kvalitativní, nebo kvantitativní požadavky k tomu aby mohlo být využito v dalším technologickém procesu, nebo přeměněno konvenčními způsoby na elektrickou energii. Tuto problematiku nalezneme v mnoha odvětvích, jako průmysl, energetika a doprava. Například v Japonsku byl proveden výzkum zaměřený na množství odpadního tepla produkovaného průmyslem. Ukázalo se, že japonský průmysl vyprodukuje za rok kolem $1,14 \cdot 10^{12}$ MJ. Velký potenciál mají také tuhé průmyslové a komunální odpady. Ty dělíme do dvou skupin podle průměrné hodnoty jejich výhřevnosti na vysoko – kvalitní, s výhřevností 12,5MJ/Kg a nízko – kvalitní s výhřevností 7,1MJ/Kg.[8]

Termoelektrický generátor využívající odpadní teplo má podobnou konstrukci, jako byla popsána v kapitole 3. Generátor se skládá z mnoha TE modulů a tepelných výměníků. Ve velké většině případů bývá doplněn měniči. Jednoduché schéma generátoru můžeme vidět na obr. 15. U vysokoteplotních generátorů rozlišujeme různé metody přestupu tepla ze zdroje (obvykle spalín) do termoelektrického modulu. Jestliže teplo přechází ze spalín přímo do TE modulů, nazýváme tuto metodu jako přímou. Pokud spaliny předávají své teplo jinému teplonosnému médiu (vzduch, voda, směs organických sloučenin) a až to předá teplo TE modulu, nazýváme tuto metodu nepřímou. Výhoda nepřímé metody spočívá především v setrvačnosti sekundárního okruhu s jiným teplonosným médiem (změna tepelného toku spalín se neprojeví tak razantně).[8]



Obr. 15 Schéma hlavních komponent TEG pro odpadní teplo[8]

Jedním z možných provedení představuje generátor typu Wall-Embedded - generátor vestavěný do stěny. U tohoto typu generátoru se termoelektrický modul umístí mezi dvě kovové desky. Prostor mezi jednotlivými termoelementy je vyplněn tepelným izolantem. Tento typ generátoru lze umístit například do horní části pece, potrubí výfukových plynů, nebo do fluidního lože spalovny. Experimentálně byl sestaven TEG se jmenovitým výkonem 500W. Základem generátor čtyři vysokoteplotní termoelektrické moduly z Pb – Te – Sn materiálů. Každý z modulů je schopen dodávat výkon 125 W. Jednoduchý náčrt i s rozměry můžeme vidět na obr. 16. Generátor je navržen, aby pracovat za vysokých teplot v rozmezí 1073 až 1223K. Z tohoto důvodu je jeho horní část pokryta tenkou vrstvou SiC. Naměřené experimentální hodnoty jsou však nižší než předpokládané. Nejvyšší výkon byl naměřen při teplotě 785K a činil pouze 139,6W. Důvodem byla nízká účinnost přenosu tepla na horkou stranu TEG. Účinnost konverze tepelné energie na elektrickou činila pouze 2,4%. [8]

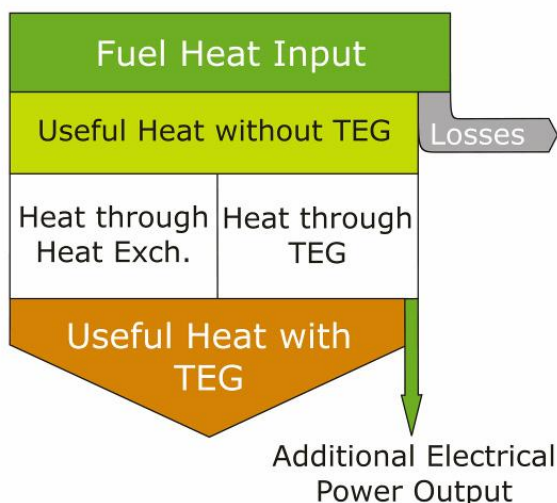


Obr. 16 Náčrt 500W termoelektrického generátoru typu Wall-Embedded [8]

4.3. KOTLE MALÝCH VÝKONŮ

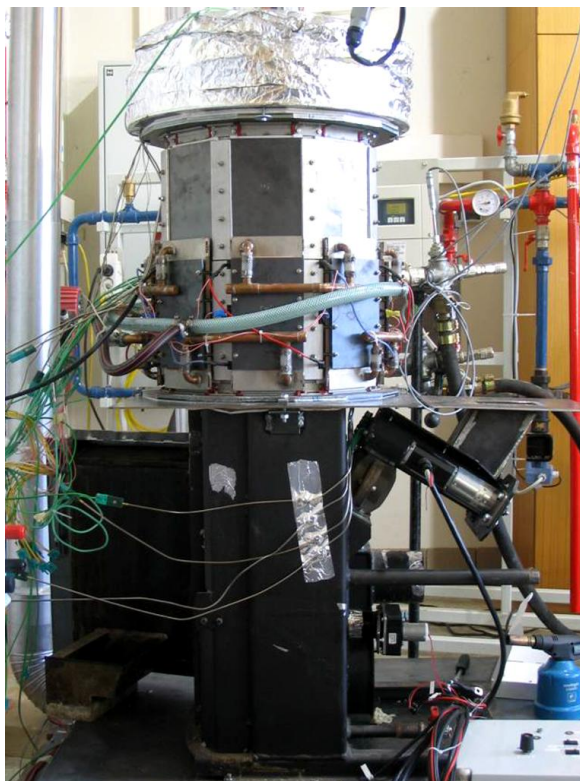
Moderní, automatické kotle vhodné pro vytápění rodinného domu, horské chaty, či podobných objektů jsou vybaveny elektrickým zapalováním, čerpadly, automatickými podavači, různými ovládacími elektronickými prvky a mnoha dalšími součástmi, které ke své činnosti potřebují neustálý přísun elektrického proudu. Při přerušení jeho dodávky tedy kotel ztrácí svou funkčnost. Zejména odlehlé horské oblasti proto musí být mnohdy vybaveny záložními zdroji energie, jako je například diesel agregát. Z těchto kotlů však odchází část energie nevyužitá v podobě odpadního tepla, které můžeme pomocí termoelektrického generátoru, přeměnit na elektrickou energii, čímž se zvýší využití primárního zdroje energie. V optimálním případě se kotel stane nezávislý na elektrické síti, tím tak odpadnou ztráty spojené s přenosem elektrifikační soustavou. Kotel používající TEG lze tedy označit jako kogenerační jednotku.

Výkon dodávaný generátorem značně závisí na jeho umístění. Nejvyšší výkon dosáhneme, pokud umístíme TE moduly do spalovací komory kotle, kde jsou vysoké teploty. Malá část tepelné energie se přemění na elektrickou, zbylé teplo se využije na vytápění. Energetická bilance je znázorněna na obr. 17.



Obr. 17 Energetická bilance kotle na pelety s TE moduly[32]

Příkladem tohoto řešení je prototyp kotle na dřevěné pelety, zhotovený na Vídeňské technické univerzitě, s cílem vytvořit cenově dostupný prototyp, který by se stal zcela nezávislý na dodávce elektrické energie z rozvodné sítě (generátor by svým výkonem pokryl i podavač paliva a cirkulační čerpadla topné vody). Základem prototypu je kotel SHT Vision Comfort EKA 12 s jmenovitým výkonem 10kW. Ten byl v horní části horizontálně rozříznut s cílem začlenit termoelektrický generátor co nejbližže hořákům, kde se teplota plamene pohybuje okolo 1200°C.[32]



Obr. 18 Sestavený prototyp na Vídeňské technické univerzitě[32]

Samotný termoelektrický generátor s předpokládaným výkonem 200W je složen z 16 bismut – telluridových komerčně dostupných termoelektrických modulů, umístěnými do osmiboké trubice (obr. 19), ve dvou řadách nad sebou, přičemž spodní řada má větší poloměr než horní, z důvodu dosažení konstantního tepelného toku skrz všechny TE moduly, což vede i k přibližně konstantním napětím na všech modulech. Horká strana se nachází na vnitřní straně trubice ohříváné plamenem a horkými plyny. Vnější strana je pak chlazená vodou. Optimální teplota horké strany TE modulů činí 250°C, studené 60°C. [32]

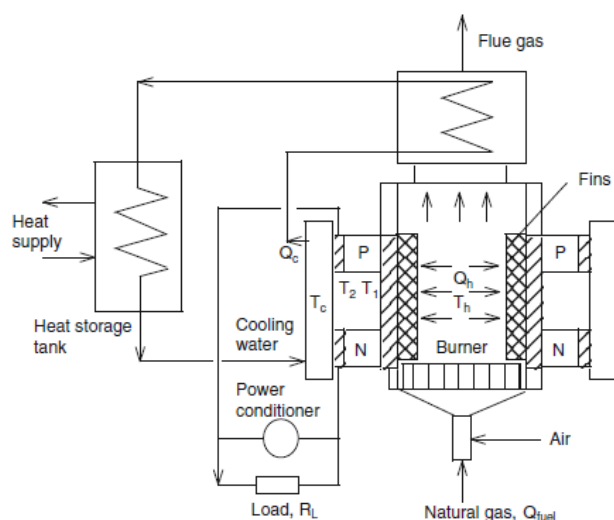


Obr. 19 Osmiboká trubice s TEG[32]

Projekt předpokládal dosažení, elektrické účinnosti generátoru 2%, po realizaci se optimální účinnost činila 1,7%, proto se předpokládaný elektrický výkon generátoru snížil

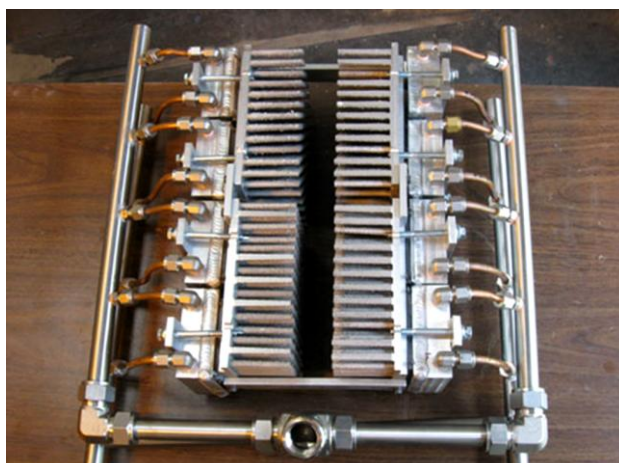
z 200W na 170W. Přesto bylo dosaženo nezávislého provozu na elektrické síti. Později bylo dosaženo téměř dvojnásobného výkonu. Velkou nevýhodou tohoto řešení je masivní zásah do původní konstrukce kotle.[32]

Podobně řešený je i TEG zkonstruovaný odborníky v kanadské Ottawě. Základem celého zařízení je komerčně dostupný, závěsný plynový kotel s tepelným výkonem 32 kW a spotřebou elektrické energie 155 W. Schéma celého zařízení můžeme vidět na obr. 20. Skládá z plynového hořáku, spalovací komory, osmi termoelektrických modulů, chladicího zařízení, žebrovaných hliníkových chladičů pro odvod tepla ze spalovací komory a akumulační nádrže pro vodu. Termoelektrický generátor je umístěn do spalovací komory, kde je pomocí hliníkových žebrovaných chladičů přiváděno teplo na horkou stranu TE modulu. Vodní chlazení modulů je využito jako přehřev vody. Nevyužité teplo ze spalovací komory pak odchází do tepelného výměníku, kde ohřívá přehřátou vodu z vodního chlazení modulů. Ta vyhřívá vodu v akumulační nádrži, která slouží k vytápění.[39]



Obr. 20 Schéma plynového kotle s vlastním termoelektrickým napájením[39]

Obr. 21 ukazuje samotný termoelektrický generátor. Základem generátoru jsou termoelektrické moduly na bázi klasického termoelektrického materiálu Bi_2Te_3 od firmy Hi – Z Tech Inc. TE moduly jsou schopny dlouhodobě pracovat do teploty 250°C a krátkodobě vydrží teplotu i 400°C bez poškození. Jmenovitý výkon každého modulu je 20 W. Jednotlivé TE moduly jsou mezi sebou zapojeny sériově.



Obr. 21 Termoelektrický generátor plynového kotle[39]

Generátor dodává maximální výkon 161 W, což je dostatečné pro pokrytí veškeré elektrické spotřeby kotle, včetně čerpadel a ventilátoru. Kotel je tak zcela nezávislý na elektrické energii z rozvodné sítě. Oproti předchozímu řešení nebyl zásah do původního kotle tak razantní. [39]

Další možností uplatnění TEG u kotlů je umístění do spalinového tahu. TEG tak odebírá část energie jinak nevyužitému odpadního tepla. Nevýhodou tohoto řešení je relativně malý výkon, neboť moderní kotle dosahují vysoké účinnosti (až 90%), většina primární energie paliva tak byla využita na vytápění. Naopak výhodou je relativně snadná instalace do spalinového tahu, bez nutnosti zásahu do samotného kotle.

Generátor tohoto typu byl sestaven i na Energetickém ústavu VUT. Jako zdroj tepla byl použit kotel VERNER A251.1 o výkonu 25 kW spalující dřevěné peletky. Skládá se ze dvou přírub a segmentu generátoru. Výkon lze zvyšovat přidáním dalších segmentů. Segment obsahuje čtyři termoelektrické moduly. Maximální výkon generátoru tvořeného jedním segmentem byl naměřen 8,5W.[43]

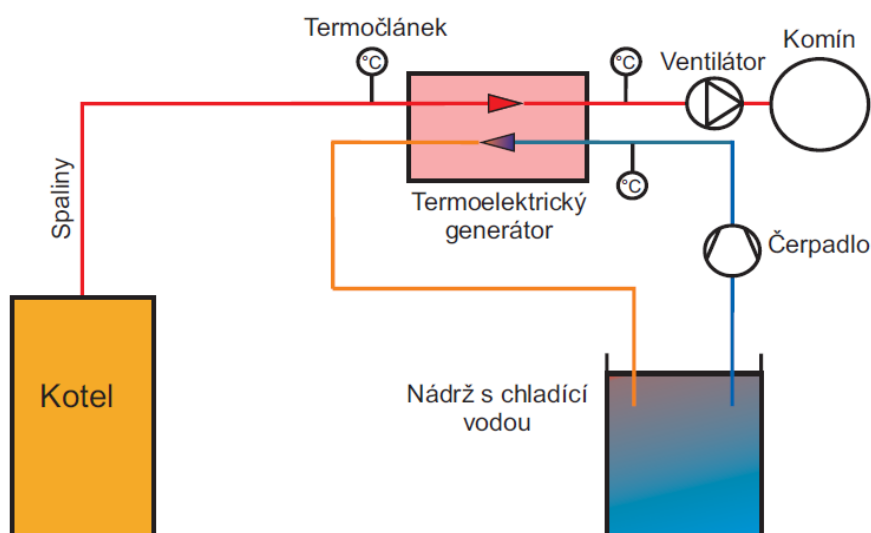
4.4. UPLATNĚNÍ TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU V DALŠÍCH APLIKACÍCH

Termoelektrické generátory dnes pronikají do řady odvětví. Jednou z prvních aplikací, v kterých termoelektrické generátory našli uplatnění byly vesmírné sondy a to díky své vysoké spolehlivosti a životnosti. Důkazem spolehlivosti jsou generátory pro vesmírné sondy Voager, které pracují nepřetržitě více než 30 let. Velký vývoj v oblasti termoelektrické přeměny probíhá i u řady automobilových společností. Jejich snahou je vyvinout TEG, které by nahradily alternátory. Automobilový TEG se svou konstrukcí blíží generátorům, které byly popsány v kapitole využití odpadního tepla pomocí TEG. Více informací o automobilních TEG nalezneme například ve zdroji. [16]

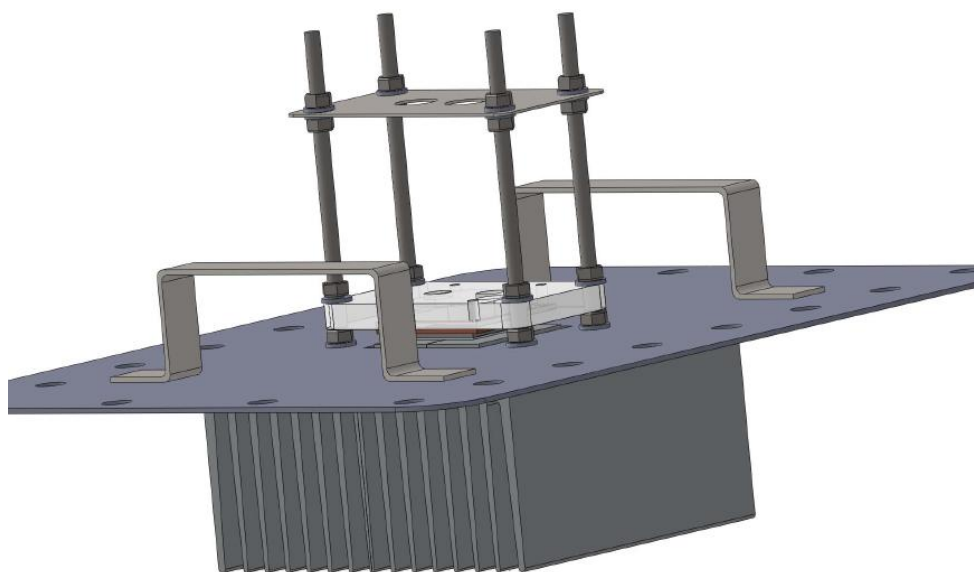
NÁVRH A REALIZACE TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU

5. NÁVRH TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU PRO SPALINOVÝ TAH KOTLE

Experimentální generátor byl navrhován pro spalinový tah kotle Gemos KWH tak. Samotný generátor se skládá z hliníkového chladiče, upraveného spalinového potrubí, termoelektrického modulu TG 12 – 6 – 01 L, vodního bloku STIXION B -400 a DC/DC měniče LT 1308. Soudržnost jednotlivých částí zajišťují čtyři závitové tyče průměru M6.. Pro lepší manipulaci jsou na nerezové desce spalinového potrubí navařeny držáky z nerezové oceli. Před hliníkovým chladičem a za ním jsou umístěny termočlánky pro měření teploty spalin. Vodní blok je chlazen vodou z vodní nádrže. Cirkulaci uzavřeného vodního okruhu zajišťuje čerpadlo. Teplotu vody uvažujeme konstantní, k jejímu určení slouží termočlánkem. Blokové schéma zařízení můžeme vidět na obr. 22.



Obr. 22 Blokové schéma kotle s termoelektrickým generátorem



Obr. 23 Model termoelektrického generátoru v programu Solidworks

5.1. KOTEL GEMOS KWH

Tří tahový kotel Gemos KWH je určený pro spalování dřevěných paliv (dřevěné pelety). Nejedná se o komerčně dostupnou verzi, kotel byl upraven pro potřeby školy, jmenovitý výkon komerční verze činí 110 kW, ale díky úpravám lze jeho výkon zvýšit a regulovat. Ve spalinovém traktu proudí tak spaliny v rozmezí teplot 120 až 170°C.



Obr. 24 Kotel Gemos KWH [46]

5.2. PARAMETRY TERMOELEKTRICKÉHO MODULU TG 12 – 6 – 01L

Termoelektrický modul TG 12 – 6 – 01L je vyroben ze slitiny Bi_2Te_3 a určen pro nízko nebo středně teplotní aplikace pracující při teplotách nepřesahující 250°C. Maximální povolené napětí udávané výrobcem by nemělo překročit 200 psi, což odpovídá zhruba 1,379 MPa. Základní parametry modulu pro teploty $T_H = 230^\circ\text{C}$ a $T_C = 50^\circ\text{C}$ udává tabulka 2. Více informací lze nalézt na stránkách společnosti Marlow. [31]

Tab. 2 Parametry TG 12 – 6 – 01L[31]

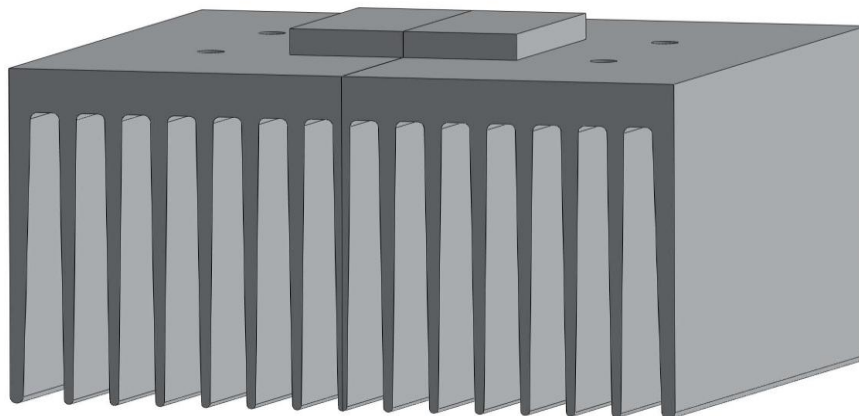
Šířka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]	T_{\max} [°C]	η [%]	P [W]	V_{oc} [A]	R [Ω]	I_{sc} [A]	Λ [°C/W]
40,132	44,704	3,912	230	4,2	6,16	9,51	4,56	2,59	1,47

5.3. PARAMETRY HLINÍKOVÉHO CHLADIČE

Chladič je svařen ze dvou komerčně dostupných chladičů KA 200 ze slitiny AW 6060. Z důvodů uchycení byly do chladiče vyvrtány čtyři vnitřní závity M6. Základní fyzikální parametry zobrazuje tabulka 3.

Tab. 3 Parametry hliníkového chladiče

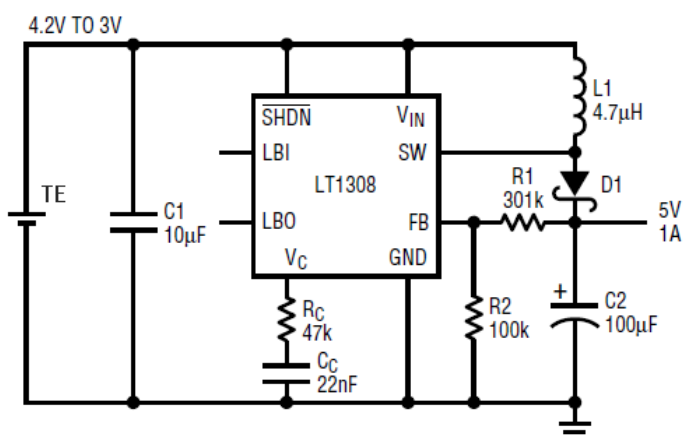
Šířka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]	Počet žebřer [-]	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
145	152,4	82,7	15	220



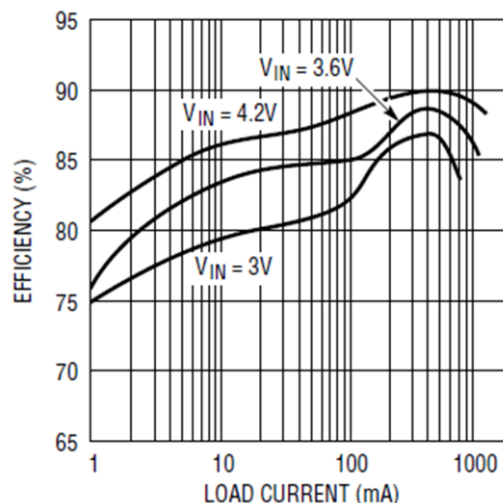
Obr. 25 Hliníkový chladič

5.4. DC/DC MĚNIČ LT 1308

Zvyšující měnič LT 1308 byl zvolen z důvodu nízkého napětí produkovaného modulem a vysoké účinnosti konverze. Schéma zapojení znázorňuje obr. 26, účinnost měniče ukazuje graf 7.



Obr. 26 Schéma zapojení měniče LT 13 08 [42]



Graf 7 Účinnost měniče LT 13 08 v rozmezí 3 až 4,2V[42]

5.5. PARAMETRY VODNÍHO BLOKU STIXION B – 400

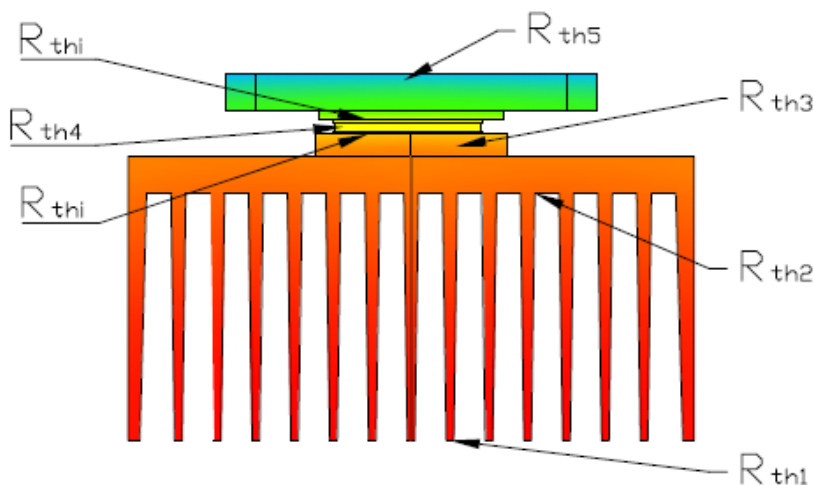
Vodní blok je tvořen dvěma částmi, měděnou základnou a polykarbonátovým topem. Parametry vodního bloku Stixion B - 400 udávané prodejcem znázorňuje tabulka 4.[40]

Tab. 4 Parametry vodního bloku STIXION B -400 udávané výrobcem [40]

Sířka základny [mm]	Délka základny [mm]	Výška základny [mm]	Výška topu [mm]	Tepelný odpor [W.°C ⁻¹]
54	52	5	230	0,087

6. VÝSLEDKY MATEMATICKÉHO MODELU

Matematický model popisuje prostup tepla termoelektrickým generátorem, pomocí kterého určíme teploty horké a studené strany TE, nutné pro dopočítání výkonu generátoru. Teplo ze strany spalin přestupuje nejprve do žebér hliníkového chladiče (R_{th1}), dále putuje do nezúžené základny chladiče (R_{th2}), zúžené části chladiče (R_{th3}), poté do samotného



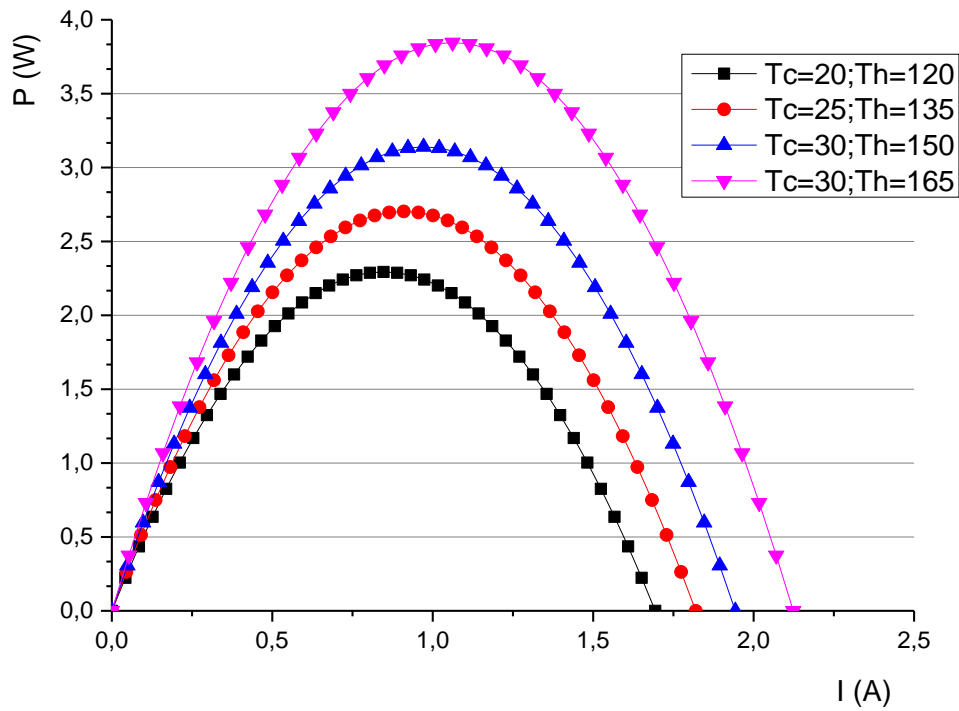
Obr. 27 Jednorozměrný model tepelného odporu generátoru

termoelektrického modulu (R_{th4}) a nakonec do vodního bloku (R_{th5}). Na styku dvou těles (hliníkový chladič – termoelektrický modul a termoelektrický modul – základna vodního bloku) je nanášena malá vrstva teplovodivé pasty Artic Colling MX - 4 (R_{thi}). Jednotlivé tepelné odpory jsou mezi sebou zapojeny sériově. Je třeba poznamenat, že tento model je značně zjednodušený. Výsledky zobrazené v tabulce 5 ukazují vypočtené hodnoty pro střední teplotu spalin 200°C a vody 23°C . Celý výpočet je uvede v příloze P 1.

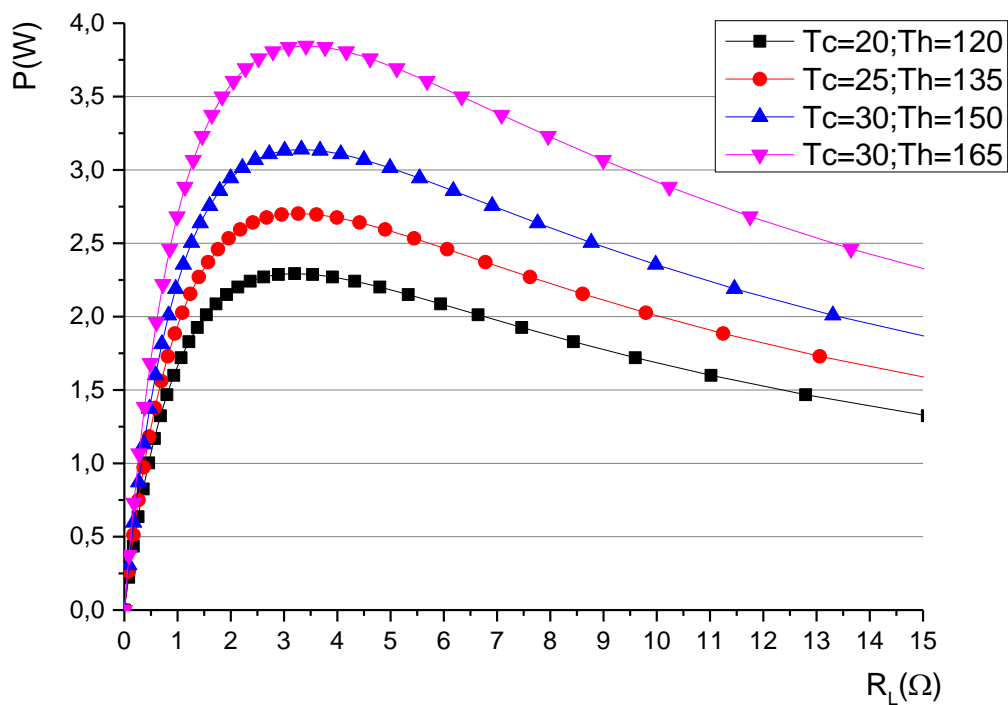
Tab. 5 Výsledky matematického modelu

Veličina	Jednotka	Hodnota
$R_{th\ total}$	$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	1,805
T_H	$^{\circ}\text{C}$	175,5
T_C	$^{\circ}\text{C}$	31,4
P_{\max}	W	4,208
I_{opt}	A	1,1
U_{opt}	V	3,83
R_i	Ω	3,46
R_L	Ω	3,46
U_{OC}	V	7,6
I_{SH}	A	2,2
Q	W	98,068
η_{TE}	%	4,2

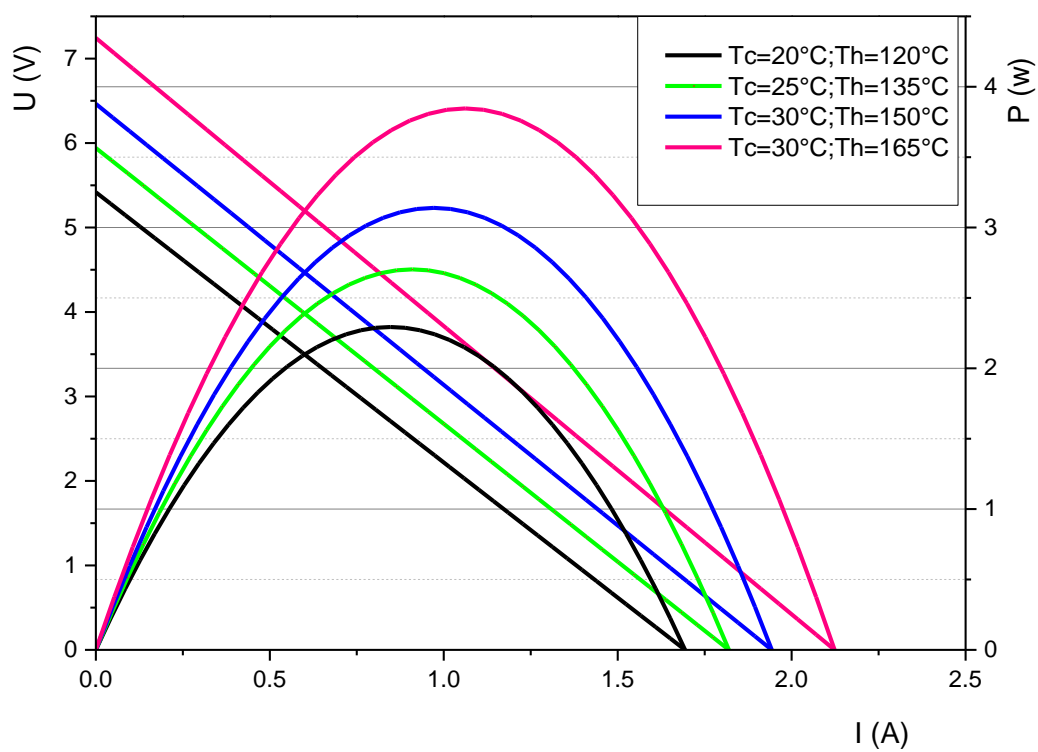
Střední teplota spalin a vody však není konstantní a v čase kolísá. S kolísáním těchto teplot se mění i teploty horké a studené strany TE modulu. Grafy 8, 9 a 10 znázorňují výkon v závislosti na proudu, napětí a odporu pro různé teploty T_c a T_h .



Graf 8 Předpokládaný výkon v závislosti na proudu



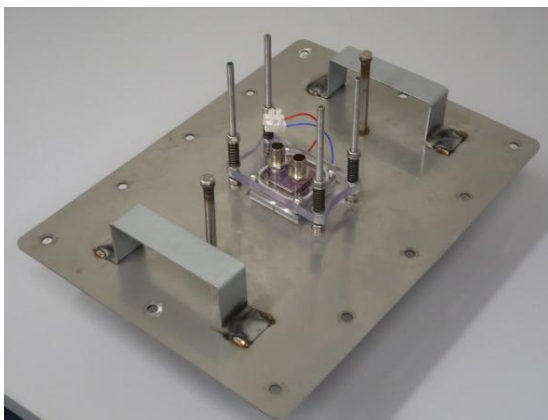
Graf 9 Předpokládaný výkon v závislosti na odporu zátěže



Graf 10 Předpokládaná výkonová a voltampérová charakteristika

7. MONTÁŽ TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU

Experimentální termoelektrický generátor pro spalinový tah kotle byl sestaven v laboratořích Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství, nacházející se v budově D5 a instalován na horní stranu kouřovodu kotle Gemos KWH. Místo umístění generátoru před samotnou instalací můžeme vidět na obr. 29.



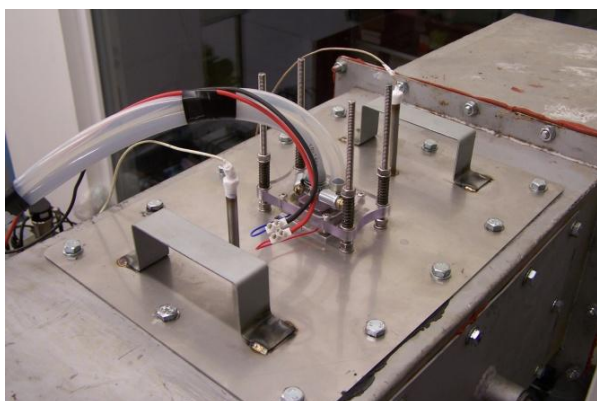
Obr. 28 Sestavený generátor



Obr. 29 Otvor v kouřovodu pro TEG

Generátor je z důvodu lepšího přenosu tepla vybaven čtyřmi tlačnými pružinami na horní straně závitových tyčí. Ze stejného důvodu jsou také obě strany modulu pokryty teplovodivou pastou MX – 2. Aby se zabránilo přisávání vzduchu do kouřovodu, je mezi nerezovou desku a hliníkový chladič umístěna teflonová páska, která slouží jako těsnění a zároveň jako tepelná izolace.

Součástí chladicího okruhu mimo vodního bloku můžeme vidět na obr. 31. Tvoří jej 20 litrová plastová nádrž, hadice z PVC, pomocný chladicí ventilátor a oběhové čerpadlo EHEIM typ 1250 21 9. Při montáži je třeba hadice z PVC upevnit tak aby se nedotýkaly kouřovodu, čímž zabráníme jejich poškození.



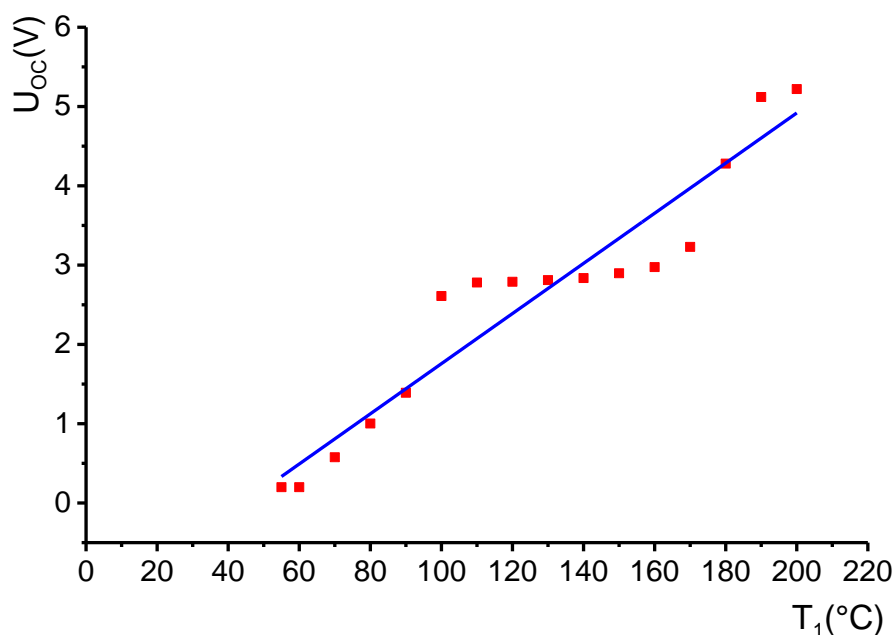
Obr. 30 Generátor umístěný na kouřovodu



Obr. 31 Plastová nádrž, čerpadlo, pomocný ventilátor

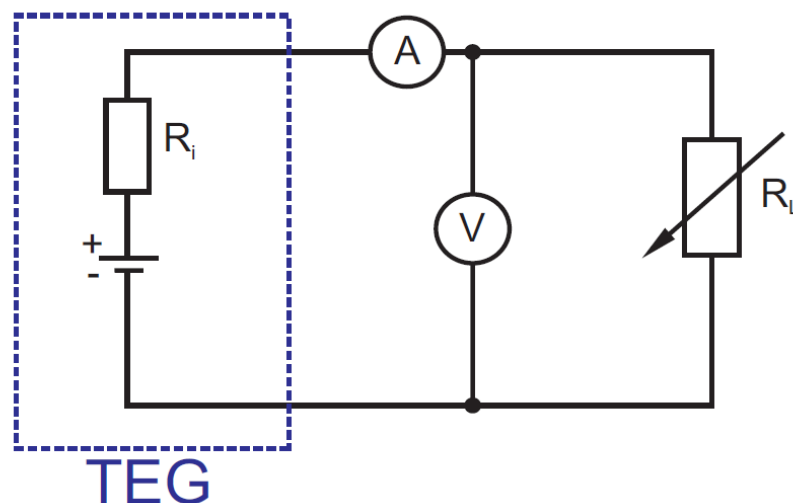
8. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Nejprve byl sledován nárůst svorkového napětí v závislosti na teplotě spalin. Napětí z multimetru Metex M3890D USB bylo pomocí USB kabelu snímáno do měřicího počítače. Teplota spalin a také chladicí vody byla zaznamenána pomocí termočlánků typu K a snímána do počítače přes 8 – kanálový převodník ADAM4018. Teplotu spalin zaznamenávaly dva termočlánky umístěné před i za hliníkovým chladičem, teplotu vody jeden termočlánek umístěn v plastové nádrži. Maximální rozdíl teplot naměřený mezi termočlánky ve spalinách činil přibližně 12°C. Teplota chladicí vody měla po dobu měření přibližně konstantní teplotu 23°C. Datové soubory z měření svorkového napětí a měření teplot lze nalézt na přiloženém CD. Graf 11 znázorňuje výše zmíněné měření. Kolísání hodnot zapříčinila tepelná setrvačnost TEG a prudké kolísání teplot spalin.



Graf 11 Svorkové napětí v závislosti na teplotě spalin

Pro měření výkonu TEG byl sestaven elektrický obvod podle obr. 32. Obvod byl složen z termoelektrického generátoru, ampérmetru, voltmetru a potenciometru. Termoelektrický generátor je v obvodu charakterizován jako sériově zapojený monočlánek a odpor R_i . K měření proudu a napětí byly použity multimetry Metex M3890D USB a Uni-t UT55 MULTIMETER. Jako odporová zátěž slouží reostat s posuvným jezdcem s rozsahem odporu 0 – 6,7 Ω o maximálním přípustném proudu 10 A. Teplotu spalin nebylo možné během měření přesně regulovat, aby bylo dosaženo konstantního svorkového napětí po delší dobu. Z tohoto důvodu nelze přímo sestrojit přesnou výkonovou charakteristiku, z níž by šel vyčíst maximální výkon generátoru. Výsledky měření výkonu TEG jsou v tabulce 7. Dupočítané hodnoty jsou v tabulce barevně označeny. Maximální hodnotu 3,562W dosáhl generátor při teplotě spalin 200°C.

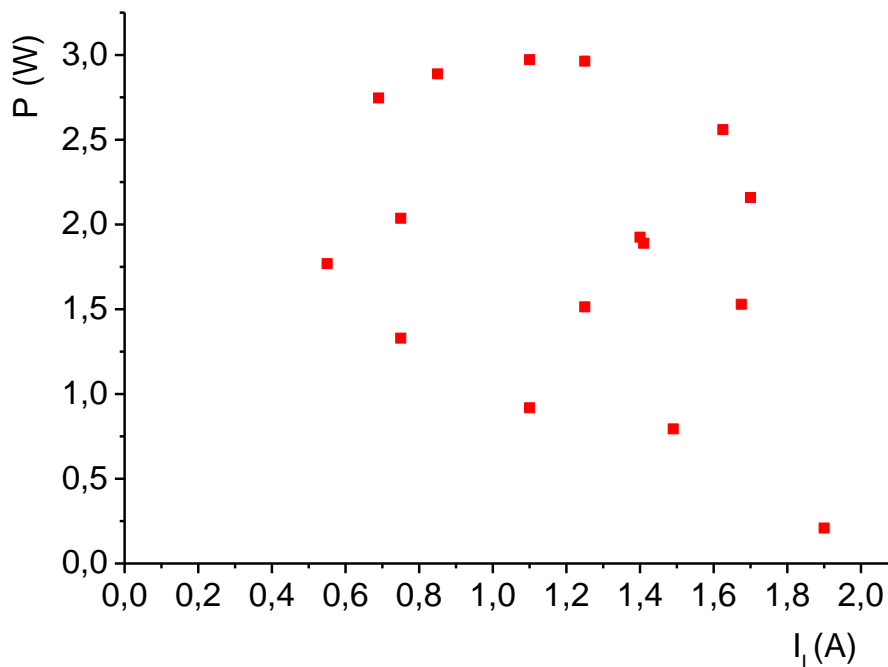


Obr. 32 Blokové schéma elektrického zapojení generátoru se zátěží

Tab. 6 Výsledky měření výkonové charakteristiky TEG

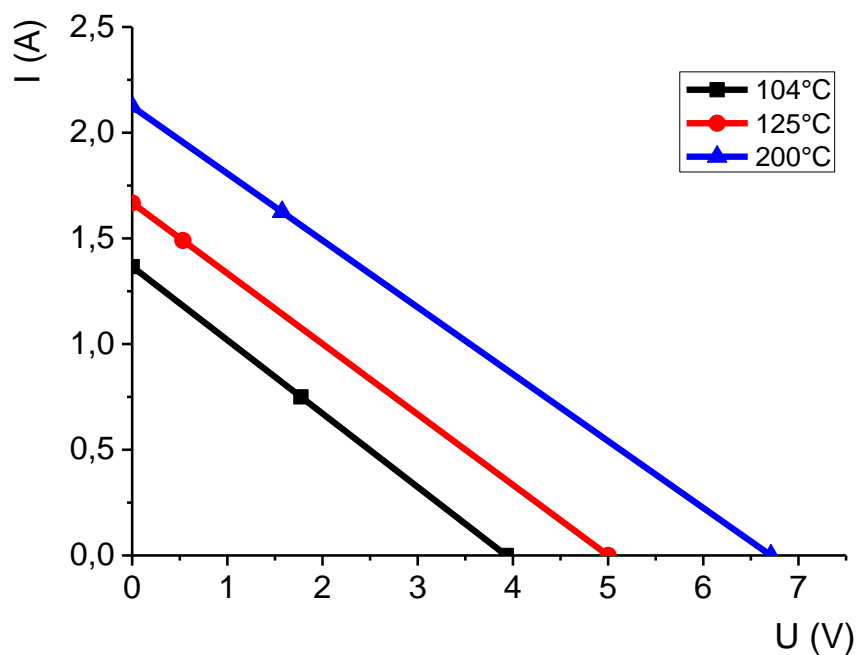
Veličina	T_1	T_2	U_{oc}	U_L	I_L	R_L	P	I_{SH}	P_{max}	R_i
Jednotka	[°C]	[°C]	[V]	[V]	[A]	[Ω]	[W]	[A]	[W]	[Ω]
1	103	23	3,93	1,773	0,75	3	1,329	1,366	1,342	2,876
2	108	23	4	0,835	1,1	1,4	0,918	1,390	1,390	2,877
3	104	23	4	0,921	1,1	1,4	1,013	1,429	1,429	2,799
4	116	23	4,85	3,216	0,55	6,5	1,768	1,632	1,979	2,970
5	125	23	4,91	2,716	0,75	4,3	2,037	1,678	2,060	2,925
6	125	23	5	0,533	1,49	0,8	0,794	1,667	2,084	2,997
7	125	23	5	1,211	1,25	1,3	1,513	1,649	2,061	3,03
8	130	23	5,73	1,375	1,4	1,3	1,925	1,842	2,638	3,110
9	160	23	5,73	1,34	1,41	1,3	1,889	1,840	2,636	3,113
10	170	23	5,9	3,398	0,85	4,4	2,888	2,004	2,956	2,943
11	172	23	6,08	3,98	0,69	6,3	2,746	1,994	3,036	3,043
12	175	23	6,09	0,11	1,9	0,5	0,209	1,93	2,945	3,147
13	187	23,1	6,22	0,913	1,675	0,9	1,529	1,963	3,052	3,168
14	195	23,1	6,25	2,371	1,25	2,4	2,963	2,01	3,146	3,103
15	200	23,1	6,7	1,27	1,7	1,2	2,159	2,097	3,513	3,194
16	200	23,2	6,71	1,575	1,625	1,4	2,559	2,123	3,562	3,16

Na základě experimentálního měření výkonu TEG byly sestrojeny grafy 12 až 14. Graf 12 znázorňuje hodnoty výkonu v závislosti na proudu. Kvůli podmínkám měření je graf 12 nekorektní a nelze z něj vyjádřit výkonovou charakteristiku, tudíž ani maximální hodnotu výkonu.



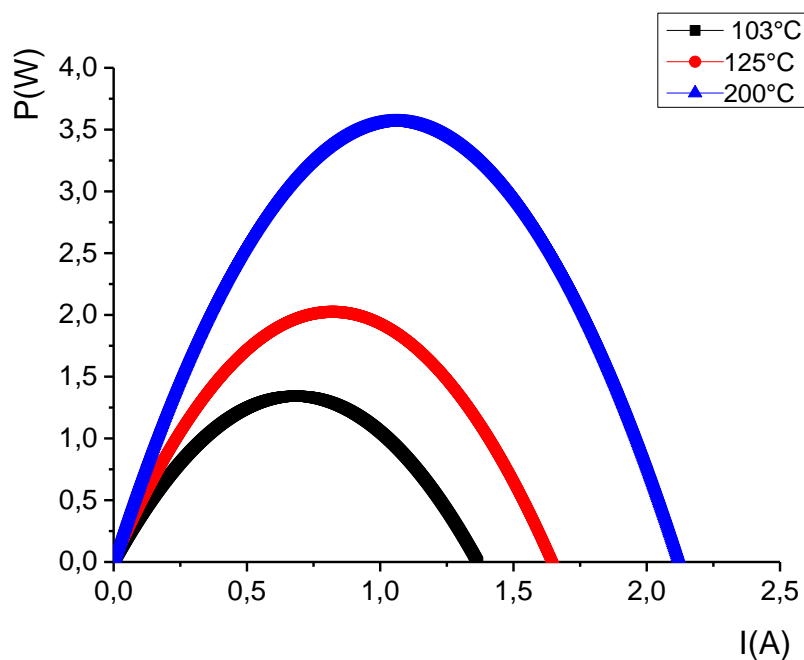
Graf 12 Naměřené hodnoty výkonové charakteristiky

K určení výkonové charakteristiky bylo potřeba nejdříve sestavit volt – ampérovou charakteristiku měření. Z ní lze vyjádřit optimální hodnotu proudu a napětí. Tyto hodnoty jsou rovny polovině svorkového napětí a polovině zkratového proudu.



Graf 13 Volt – ampérová charakteristika měření

Po získání optimálních hodnot proudu a napětí byla vytvořena výkonová charakteristika termoelektrického generátoru. Jednotlivé charakteristiky vznikly proložением polynomické křivky druhého řádu čtyřmi známými body.



Graf 14 Dopočítaná výkonová charakteristika měření

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo, navrhnout, sestavit a experimentálně ověřit termoelektrický generátor pro spalínový tah kotle. Nutnou podmínkou bylo seznámení se základními fyzikálními principy termoelektrické přeměny, používanými materiály, základními konstrukcemi a získat přehled v termoelektrických aplikacích. K návrhu posloužil počítačový 3D model termoelektrického generátoru v programu Solidworks, který byl pomocí matematického modelu prostupu tepla a cenných rad vedoucího práce postupně optimalizován. Na základě 3D modelu byla vygenerována výkresová dokumentace a následně vyroben a sestaven samotný generátor.

Po sestavení byl generátor připojen do kouřovodu kotle na biomasu, byla zapojena chladicí smyčka a sestaven elektrický okruh pro měření výkonu. Generátor dosáhl maximálního svorkového napětí 6,71V a maximálního výkonu 3,562W, při teplotě spalin 200°C, chladicí vody 23°C a ideálním ohmickém odporu 3,16 Ω. Výsledek byl porovnán s matematickým modelem pro stejné podmínky. Rozdíl mezi reálnými hodnotami a předpokládanými byl přibližně 18%. Jako nejpravděpodobnější příčinou neshody se jeví zjednodušení matematického modelu. Další možným důvodem je chyba měření, neboť spaliny nebyly schopny udržet konstantní teplotu ani na krátký časový interval, což mělo za následek neustálé kolísání napětí a výkonu.

Navrhovaný generátor je jednoduché experimentální zařízení, které není určeno pro dlouhodobý provoz. K zvýšení výkonu by bylo vhodné instalovat další termoelektrické moduly, či umístit generátor do kotle, kde se nachází vyšší teploty spalin. Toto řešení obvykle vyžaduje velký zásah do samotného kotle.

Termoelektrický generátor pro spalínový tah kotle by mohl nalézt uplatnění jako zdroj elektrické energie pro napájení ovládacích prvků kotle, nebo příslušenství k potrubním trasám, průmyslových nebo chemických podniků, kde odchází velká část energie v podobě nevyužitého odpadního tepla. Širšího použití by se termoelektrická přeměna mohla dočkat po vývoji nových materiálů pro termoelektrické účely, který by měly koeficient termoelektrické účinnosti vyšší než současně dostupné materiály. Velkou překážkou rozšíření nadále zůstává vysoká pořizovací cena termoelektrických modulů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY:

- [1] ROWE, David Michael. CRC handbook of thermoelectrics. Boca Raton, FL: CRC Press, c1995, 701 s. ISBN 08-493-0146-7.
- [2] GOLDSMID, H. *Introduction to thermoelectricity*. New York: Springer, 2010, xvi, 242 s. ISBN 978-3-642-00715-6
- [3] Thermoelectric effect. *Wikipedia* [online]. 2008, 5. 5. 2013 [cit. 12.12 2012]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect>
- [4] BRÁZDIL, Marian. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [5] KOZÁK, J. *Termoelektrický generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 33 s. Vedoucí práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [6] Wiedemann–Franz law. *Wikipedia* [online]. 2005, 2. 5. 2013 [cit. 9.10.2012]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wiedemann%E2%80%93Franz_law>
- [7] The Seebeck Coefficient. *Electronics cooling Magazine* [online]. 2006 [cit. 12.9. 2012]. Dostupné z: <<http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>>
- [8] ROWE, David Michael. *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. Boca Raton: CRC/Taylor, 2006, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-2264-2
- [9] ANATYCHUK, L.I. Current Status and Some Prospects of Thermoelectricity. In: *The 5th European Conference on Thermoelectrics* [online]. 2007 [cit. 5.11.2012]. Dostupné z: <<http://ect2007.its.org/ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/04.pdf>>
- [10] KOČVÁREK, O. *Termoelektrický solární generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Gregor, CSc.
- [11] KUS, V. *Měniče pro mikroprocesorová zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Václav Michálek, CSc.
- [12] FAQ & Technical Information. *TE Technology* [online]. 2010 [cit. 26.4.2013]. Dostupné z: <<http://www.tetech.com/FAQ-Technical-Information.html>>
- [13] BRÁZDIL, M. *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.
- [14] Tellurex Frequently Asked Questions About Our Power Generation Technology. *Tellurex* [online]. 2009 [cit. 28.1.2013]. Dostupné z: <<http://www.tellurex.com/technology/seebeck-faq.php>>
- [15] FAIRBANKS, John. THERMOELECTRIC APPLICATIONS IN VEHICLES STATUS 2008. In: *6th European Conference on Thermoelectrics* [online]. 2008 [cit. 6.12.2012]. Dostupné z: <<http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/0-PL-00-Fairbanks.pdf>>
- [16] KŘIVÁK, P. Možnosti využití odpadního tepla výfukových plynů spalovacích motorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marian Brázdil.
- [17] Thermoelectric Technical Reference — Basic Principles of Thermoelectric Materials. *Ferrotec* [online]. 2006 [cit. 16.1.2013]. Dostupné z: <<http://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef02/>>

-
- [18] SKUTTERUDITES: A Phonon-Glass-Electron Crystal Approach to Advanced Thermoelectric Energy Conversion Applications. In: *Annual Review of Materials Science* [online]. 1999, s. 89-116 [cit. 21.3.2013]. DOI: 10.1146/annurev.matsci.29.1.89. Dostupné z: <http://virtual.clemson.edu/TMRL/publications/pdfs/s2_sapgec.pdf>
- [19] HORÁK, Jaromír a Petr LOŠŤÁK. KRYSTAL Y TETRADYMITOVÉHO TYPU S VÝRAZNÝMI TERMOELEKTRICKÝMI VLASTNOSTMI. In: *Chemické listy* [online]. 1998 [cit. 3.2.2013]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1998_05_382-389.pdf>
- [20] DUGHAISH, Z. H. Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation. In: *Physica B: Condensed Matter* [online]. 2002 [cit. 10.10.2012]. DOI: 10.1016/S0921-4526(02)01187-0. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921452602011870>>
- [21] PÁSOVÉ DIAGRAMY. *Fyzika polovodičů* [online]. 1999 [cit. 18.4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.trunky.cz/bp/fypolo/>>
- [22] VLASTNÍ A NELASTNÍ POLOVODIČE. *Fyzika polovodičů* [online]. 1999 [cit. 18.4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.trunky.cz/bp/fypolo/>>
- [23] ŽUREK, J. *DC/DC měnič 12V/300V: bakalářská práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 40 s., příloh 1. Vedoucí práce Ing. David Kubátek, Ph.D.
- [24] POCHOBRADSKÝ, J. *Laboratorní přípravky do předmětu Napájení elektronických zařízení: bakalářská práce*. Brno: FEKT VUT v Brně 2011. 69 s. Vedoucí práce Ing. Michal Kubíček, Ph.D.
- [25] Termoelektrické materiály. *Fakulta chemicko-technologická - Univerzita Pardubice* [online]. 2010 [cit. 6.3.2013]. Dostupné z: <<http://www.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html>>
- [26] DIVÍLEK, Petr. *Spínaný laboratorní zdroj napětí-bakalářská práce*. Brno, 2010. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Pavlík, Ph.D. FEKT VUT v Brně.
- [27] LALONDE, Aaron D., Yanzhong PEI, Heng WANG a G. JEFFREY SNYDER. Lead telluride alloy thermoelectrics. In: *Materials Today* [online]. 2011, s. 526-532 [cit. 4.4.2013]. ISSN 13697021. DOI: 10.1016/S1369-7021(11)70278-4. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702111702784>>
- [28] LISÝ, M., M. BALÁŠ, Z. SKÁLA a P. KOHOUT. ENERGETICKÉ PARAMETRY BIOMASY PŘI FLUIDNÍM ZPLYŇOVÁNÍ. *Energetický ústav* [online]. 2005 [cit. 15.5.2013]. Dostupné z: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iv/papers/lisy.pdf>
- [29] NOUDEM, J.G., S. LEMONNIER, M. PREVEL, E.S. REDDY, E. GUILMEAU a C. GOUPIL. Thermoelectric ceramics for generators. In: *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2008, s. 41-48 [cit. 24.3.2013]. ISSN 09552219. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.012. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221907003706>>
- [30] DVORSKÝ, Emil. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 281 s. ISBN 80-730-0118-7.
- [31] Marlow Industries - TG 12-6-01L - Standard Generators - Power Generators - Products. *Marlow Industries* [online]. 2012 [cit. 4.5.2013]. Dostupné z: <<http://www.marlow.com/products/power-generators/standard-generators/tg12-6-01l.html>>
-

-
- [32] MOSER, W., AIGENBAUER a G FRIEDL. Micro-scale CHP based on biomass – Intelligent heat transfer whig thermoelectric generators. In *Bioenergy2020+* [online]. 2007 [cit. 5.1.2013]. Dostupné z: <<http://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/l1-761.pdf>>
- [33] ÇENGEL, Yunus A a Afshin J GHAJAR. *Heat and mass transfer: fundamentals*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2011, xix, 924 p. ISBN 00-773-6664-6.
- [34] Thermoelectrics. *California Institute of Technology* [online]. 2013 [cit. 24.1.2013]. Dostupné z: <<http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/>>
- [35] SANO, S, H MIZUKAMI a H KAIBE. Development of High-Efficiency Thermoelectric Power Generation System. In: *Komatsu Technical Report* [online]. 2003 [cit. 27.4.2013]. Dostupné z: <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/152-05_E.pdf>
- [36] MOCZYGEMBA, Josh. Turning waste heat into electrical energy. In: *EE Times* [online]. 2012 [cit. 1.5.2012]. Dostupné z: <<http://www.eetimes.com/design/smart-energy-design/4396534/Turning-waste-heat-from-industrial-piping-into-electrical-energy>>
- [37] HSIAO, Y.Y., W.C. CHANG a S.L. CHEN. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. In: *Energy* [online]. 2010, s. 1447-1454 [cit. 18.2.2013]. ISSN 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2009.11.030. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544209005192>>
- [38] PAUL, D.J. Thermoelectrics. In: *University of Glasgow* [online]. 2009 [cit. 5.2.2013]. Dostupné z: <<http://userweb.eng.gla.ac.uk/douglas.paul/thermoelectrics.html>>
- [39] QIU, K. a A. C. S. HAYDEN. Development of Thermoelectric Self-Powered Heating Equipment. In: *Journal of Electronic Materials* [online]. 2011, s. 606-610 [cit. 14.5.2013]. ISSN 0361-5235. DOI: 10.1007/s11664-010-1473-0. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s11664-010-1473-0>>
- [40] Stixion B-400. *AQUACOOOL - Vodní chlazení pro výpočetní techniku* [online]. 2011 [cit. 28.4.2013]. Dostupné z: <<http://www.aquacool.cz/stixionb400.php>>
- [41] MIN, G. a D.M. ROWE. “Symbiotic” application of thermoelectric conversion for fluid preheating/power generation. In: *Energy Conversion and Management* [online]. 2002, s. 221-228 [cit. 5.5.2013]. DOI: 10.1016/S0196-8904(01)00024-3. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890401000243>>
- [42] LT 13 08. *Linear Technology* [online]. 1998 [cit. 26.4.2013]. Dostupné z: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1308i.pdf>>
- [43] BRÁZDIL, Marian a Jiří POSPÍŠIL. Termoelektrický generátor pro využití tepelné energie spalin kotlů malých výkonů. In: *Energetický ústav, obor Energetického inženýrství, FSI, VUT* [online]. 2013 [cit. 4.5.2013]. Dostupné z: <<http://oei.fme.vutbr.cz/vysledky-vyzkumu/2012-RIV-Termoelektricky-generator-na-spalinach-maleho-kotle.pdf>>
- [44] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky: Určeno pro posl. fak. strojní*. 2. vyd. Brno: VUT, 1989, 183 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1062-0.
- [45] Alloy datasheeten AW - 6060[Al Mg Si]. *Nedal Aluminium* [online]. 2005 [cit. 4.3.2013]. Dostupné z: <http://www.nedalextrusion.com/files/4013/0678/5548/Data_6060.pdf>
-

- [46] KOTEL KWH. *Gemos CZ* [online]. 2012 [cit. 5.5.2013]. Dostupné z: <<http://www.gemos.estranky.cz/clanky/kwh.html>>
- [47] LI, Molan, Shaohui XU, Qiang CHEN a Li-Rong ZHENG. Thermoelectric-Generator-Based DC–DC Conversion Networks for Automotive Applications. In: *Journal of Electronic Materials* [online]. 2011, s. 1136-1143 [cit. 5.4.2013]. ISSN 0361-5235. DOI: 10.1007/s11664-011-1557-5. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s11664-011-1557-5>>

SEZNAM OBRAZKŮ

Obr. 1 Schéma Seebeckova jevu	11
Obr. 2 Schéma Peltierova obvodu	12
Obr. 3 Thomas Johann Seebeck	13
Obr. 4 Jean Charles A. Peltier	13
Obr. 5 Energetické pásy krystalických látek	16
Obr. 6 Termoelektrická dvojice	20
Obr. 7 Schéma termoelektrického modulu	21
Obr. 8 Základní schéma zapojení spínacího zdroje[23]	24
Obr. 9 Schéma snižujícího měniče[24]	25
Obr. 10 Schéma snižujícího i zvyšující měniče (Buck – Boost)[24]	25
Obr. 11 Schéma měnič typu SEPIC[26]	25
Obr. 12 Schéma zvyšujícího měniče popisující princip činnosti [24]	26
Obr. 13 Obecná topologie DC/DC měničů v aplikacích s TEG [47]	26
Obr. 14 Schéma termoelektrického generátoru použitého pro přehřev média [41]	28
Obr. 15 Schéma hlavních komponent TEG pro odpadní teplo[8]	29
Obr. 16 Návrh 500W termoelektrického generátoru typu Wall-Embedded [8]	29
Obr. 17 Energetická bilance kotle na pelety s TE moduly[32]	30
Obr. 18 Sestavený prototyp na Vídeňské technické univerzitě[32]	31
Obr. 19 Osmiboká trubice s TEG[32]	31
Obr. 20 Schéma plynového kotle s vlastním termoelektrickým napájením[39]	32
Obr. 21 Termoelektrický generátor plynového kotle[39]	32
Obr. 22 Blokové schéma kotle s termoelektrickým generátorem	34
Obr. 23 Model termoelektrického generátoru v programu Solidworks	34
Obr. 24 Kotel Gemos KWH [46]	35
Obr. 25 Hliníkový chladič	36
Obr. 26 Schéma zapojení měniče LT 13 08 [42]	36
Obr. 27 Jednorozměrný model tepelného odporu generátoru	37
Obr. 28 Sestavený generátor	40
Obr. 29 Otvor v kouřovodu pro TEG	40
Obr. 30 Generátor umístěný na kouřovodu	40
Obr. 31 Plastová nádrž, čerpadlo, pomocný ventilátor	40
Obr. 32 Blokové schéma elektrického zapojení generátoru se zátěží	42

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vybrané termoelektrické materiály [35]	19
Tab. 2 Parametry TG 12 – 6 – 01L[31]	35
Tab. 3 Parametry hliníkového chladiče	35
Tab. 4 Parametry vodního bloku STIXION B -400 udávané výrobcem [40].....	36
Tab. 5 Výsledky matematického modelu	37
Tab. 6 Výsledky měření výkonové charakteristiky TEG	42

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost Z na Teplotě[17].....	14
Graf 2 Závislost parametrů α , λ , σ a Z na koncentraci nosičů náboje[34]	15
Graf 3 Přehled vývoje termoelektrických materiálů [15]	18
Graf 4 Závislost ZT na teplotě – p typ	18
Graf 5 Závislost ZT na teplotě – n typ	18
Graf 6 Porovnání Carnotovy účinnosti s účinností TE pro různé hodnoty ZT[38]	23
Graf 7 Účinnost měniče LT 13 08 v rozmezí 3 až 4,2V[42]	36
Graf 8 Předpokládaný výkonu v závislosti na proudu	38
Graf 9 Předpokládaný výkonu v závislosti na odporu zátěže	38
Graf 10 Předpokládaná výkonová a voltampérová charakteristika	39
Graf 11 Svorkové napětí v závislosti na teplotě spalin	41
Graf 12 Naměřené hodnoty výkonové charakteristiky	43
Graf 13 Volt – ampérová charakteristika měření	43
Graf 14 Dopočítaná výkonová charakteristika měření	44

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Veličina	Symbol	Jednotka
Absolutní Seebeckův koeficient	α	$V.K^{-1}$
Relativní Seebeckův koeficient	α_{AB}	$V.K^{-1}$
Seebeckův koeficient	α_S	$V.K^{-1}$
Napětí	U	V
Rozdíl teplot	ΔT	$K, ^\circ C$
Střední teplota	T_S	$K, ^\circ C$
Teplota horké strany termoelektrického modulu	T_H	$K, ^\circ C$
Teplota studené strany termoelektrického modulu	T_C	$K, ^\circ C$
Teplo	Q	W
Teplo přivedené na horkou stranu TE	Q_H	W
Teplo odvedené ze studené strany TE	Q_C	W
Relativní Peltierův koeficient	π_{AB}	$V, W.A^{-1}$
Proud	I	A
Koeficient termoelektrické účinnosti	Z	K^{-1}
Bezrozměrný koeficient termoelektrické účinnosti	ZT, ZT_S	-
Elektrický vodivost	σ	$S.m^{-1}, \Omega^{-1}.m^{-1}$
Tepelná vodivost	λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Šířka zakázaného pásma	E_g	eV
Aktivační energie	E_A	eV
Výkon	P	W
Elektrický výkon	P_E	W
Tepelný výkon	P_T	W
Elektrický odpor termoelektrického modulu	R_i	Ω
Elektrický odpor zátěže	R_L	Ω
Plocha příčného řezu termoelementu	A_{TM}	m^2, mm^2
Měrný elektrický odpor termoelektrického materiálu	ρ_{TM}	$\Omega.m$
Délka termoelementu	l_{TM}	m, mm
Účinnost	η	-
Carnotova účinnost	η_{Tc}	-
Účinnost termoelektrického materiálu	η_{Mat}	-
Poměr elektrického a tepelného výkonu	σ_k	-

Veličina	Symbol	Jednotka
Počet termoelementů	N	-
Tepelný kontaktní parametr	r	-
Tloušťka kontaktní vrstvy	l_c	m, mm
Elektrický kontaktní parametr	n	-
Procentuální elektrický výkon	$P_{E, \%}$	-
Procentuální tepelný výkon	$P_{T, \%}$	-
Výkon termoelektrického generátoru	P_{TE}	W
Střední teplota spalin	T_1	K, °C
Střední teplota vody	T_2	K, °C
Minimální spotřeba kyslíku	V_{O_2min}	$m^3 \cdot kg^{-1}$
Objem oxidu uhličitého	V_{CO_2}	$m^3 \cdot kg^{-1}$
Objem dusíku	V_{N_2}	$m^3 \cdot kg^{-1}$
Minimální spotřeba suchého vzduchu	V_{vmin}^S	$m^3 \cdot kg^{-1}$
Objem vodní páry	V_{H_2O}	$m^3 \cdot kg^{-1}$
Celkový objem spalin	V_{Celk}	$m^3 \cdot kg^{-1}$
Objemový faktor vzduchu	f	-
Objemový zlomek oxidu uhličitého	ω_{CO_2}	-
Objemový zlomek dusíku	ω_{N_2}	-
Objem vlhkého vzduchu	V_{vmin}	$m^3 \cdot kg^{-1}$
Objemový zlomek vodní páry	ω_{H_2O}	-
Měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého	c_{pCO_2}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Měrná tepelná kapacita dusíku	c_{pN_2}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Měrná tepelná kapacita vodní páry	c_{pH_2O}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Měrná tepelná kapacita spalin	c_{pSP}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Tepelná vodivost oxidu uhličitého	λ_{CO_2}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Tepelná vodivost dusíku	λ_{N_2}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Tepelná vodivost vodní páry	λ_{H_2O}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Tepelná vodivost spalin	λ_{SP}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Kinematická viskozita oxidu uhličitého	ν_{CO_2}	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita dusíku	ν_{N_2}	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita vodní páry	ν_{H_2O}	$m^2 \cdot s^{-1}$
Kinematická viskozita spalin	ν_{SP}	$m^2 \cdot s^{-1}$

Veličina	Symbol	Jednotka
Hustota oxidu uhličitého	ρ_{CO_2}	$kg.m^{-3}$
Hustota dusíku	ρ_{N_2}	$kg.m^{-3}$
Hustota vodní páry	ρ_{H_2O}	$kg.m^{-3}$
Hustota spalin	ρ_{SP}	$kg.m^{-3}$
Prandlovo číslo	Pr	-
Střední rychlost spalin	\bar{w}_{sp}	$m.s^{-1}$
Reynoldsovo číslo	Re	-
Nuseltovo číslo	Nu	-
Součinitel přestupu tepla	α_1	$W.m^{-2}.K^{-1}$
Parametr žebra	m_o	m^{-1}
Účinnost žebra	η_z	-
Počet	N	-
Ekvivalentní poloměr	a, b	m, mm
Ludolfovo číslo	π	-
Poměr ekvivalentních poloměrů	ε	-
Pomocná bezrozměrná veličina (Převzato z [37])	k	-
Pomocná bezrozměrná veličina (Převzato z [37])	ϕ	-
Biotovo číslo	Bi	-
Tepelný tok	\dot{Q}	W
Maximální výkon zahrnující účinnost měniče	$P_{max DC/DC}$	W
Účinnost měniče	$\eta_{DC/DC}$	-
Maximální výkon	P_{max}	W
Šířka žebra	W_z	m, mm
Korigovaná výška žebra hliníkového chladiče	H_K	m, mm
Tepelná vodivost slitiny AW 6060	λ_{CH}	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Počet žeber	N_z	-
Délka chladiče	L_{CH}	m, mm
Efektivní plocha chladiče	A_{ef}	m^2, mm^2
Výška nezúžené části chladiče	H_{CH2}	m, mm
Šířka nezúžené části chladiče	W_{CH2}	m, mm
Plocha nezúžené části hliníkového chladiče	A_{CH2}	m^2, mm^2
Výška zúžené části chladiče	H_{CH3}	m, mm

Veličina	Symbol	Jednotka
Šířka zúžené části chladiče	W_{CH3}	m, mm
Plocha zúžené části hliníkového chladiče	A_{CH3}	m^2 , mm^2
Délka zúžené části chladiče	L_{CH3}	m, mm
Výška vrstvy teplovodivé pasty	H_{pasta}	m, mm
Šířka vrstvy teplovodivé pasty	W_{pasta}	m, mm
Plocha pokrytá teplovodivou pastou	A_{pasta}	m^2 , mm^2
Délka vrstvy teplovodivé pasty	L_{pasta}	m, mm
Tepelná vodivost teplovodivé pasty MX - 2	λ_{pasta}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Celkový tepelný odpor	$R_{th\ total}$	$^{\circ}C \cdot W^{-1}$; $K \cdot W^{-1}$
Tepelný odpor spaliny – žebra	R_{th1}	$^{\circ}C \cdot W^{-1}$; $K \cdot W^{-1}$
Tepelný odpor nezúžená část chladiče	R_{th2}	$^{\circ}C \cdot W^{-1}$; $K \cdot W^{-1}$
Tepelný odpor zúžená část chladiče	R_{th3}	$^{\circ}C \cdot W^{-1}$; $K \cdot W^{-1}$
Tepelný odpor TE	R_{th4}	$^{\circ}C \cdot W^{-1}$; $K \cdot W^{-1}$
Tepelný odpor vodní blok	R_{th5}	$^{\circ}C \cdot W^{-1}$; $K \cdot W^{-1}$
Tepelný odpor teplovodivé pasty	R_{thi}	$^{\circ}C \cdot W^{-1}$; $K \cdot W^{-1}$
Účinnost TE	η_{TE}	-

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P 1 – Výpočet – Matematický model

Příloha P 2 – Výkresová dokumentace

PŘÍLOHA P 1 VÝPOČET - MATEMATICKÝ MODEL

MATEMATICKÝ MODEL - PROSTUPU TEPLA

TEPELNÝ ODPOR RTH1 (SPALINY – ŽEBRA)

Střední teplota spalin: $T_1 = 473,15 \text{ [K]} = 200 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Prvkový rozbor paliva (Smrk):[28]

Prvek	% hm
C	44,56
H	5,46
O	38,38
N	0,11

Minimální spotřeba kyslíku:

$$V_{O2min} = \frac{22,39}{12,01} C + \frac{22,39}{4,063} H - \frac{22,39}{4,063} O \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (1)$$

$$V_{O2min} = 3,566 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální spotřeba suchého vzduchu:

$$V_{vmin}^S = \frac{100}{21} V_{O2min} \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

$$V_{vmin}^S = 16,98 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Faktor poměrného zvýšení objemu suchého vzduchu:

$$f = 1,15$$

Minimální objem vlhkého vzduchu:

$$V_{vmin} = f \cdot V_{vmin}^S \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3)$$

$$V_{vmin} = 19,528 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Výpočty jednotlivých složek spalin¹:

$$V_{CO2} = \frac{22,26}{12,01} C + \frac{1}{100} 0,03 V_{vmin}^S \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4)$$

$$V_{CO2} = 0,867 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{N2} = \frac{22,26}{28,013} N_2 + \frac{1}{100} 78,05 V_{vmin}^S \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5)$$

$$V_{N2} = 13,5237 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$V_{H2O} = \frac{44,8}{4,032} H_2 + \frac{22,4}{18,015} W^r + (f + 1) V_{vmin}^S \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6)$$

$$V_{H2O} = 8,7747 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Celkový objem spalin:

$$V_{Celk} = V_{CO2} + V_{N2} + V_{H2O} \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (7)$$

$$V_{Celk} = 23,067 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

¹ Výpočet je pouze orientační, některé složky vzduchu zanedbáváme

Objemové (hmotnostní) zlomky jednotlivých složek spalín:

$$\omega_i = \frac{V_i}{V_{\text{celk}}} \quad [\text{m}^3] \quad (8)$$

$$\omega_{\text{CO}_2} = 0,038 \quad [-]$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = 0,377 \quad [-]$$

$$\omega_{\text{N}_2} = 0,585 \quad [-]$$

Tabulka měrných tepelných kapacit jednotlivých složek spalín: [44]:

Veličina	T	c_{CO_2}	$c_{\text{H}_2\text{O}}$	c_{N_2}
Jednotka	K	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
1	400	942	2014	1055
2	500	1013	1985	1096

Obecný vzorec pro interpolaci souřadnic:

$$y(x) = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (9)$$

Interpolované hodnoty měrné tepelné kapacity jednotlivých složek pro teplotu T_1 :

$$c_{\text{CO}_2} = 951 [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 1988 [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$c_{\text{N}_2} = 1073 [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$c_{\text{sp}} = \sum \omega_i \cdot c_i \quad [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}] \quad (10)$$

$$c_{\text{sp}} = 1413 \quad [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

Tabulka tepelné vodivosti jednotlivých složek spalín: [44]:

Veličina	T	λ_{CO_2}	$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$	λ_{N_2}
Jednotka	K	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
1	400	0,025	0,026	0,033
2	500	0,029	0,034	0,039

Interpolované hodnoty tepelné vodivosti jednotlivých složek pro teplotu T_1 :

$$\lambda_{\text{CO}_2} = 0,019 [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 0,03 [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_{\text{N}_2} = 0,034 [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_{\text{sp}} = \sum \omega_i \cdot \lambda_i \quad [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}] \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{sp}} = 0,032 \quad [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

Tabulka kinematické viskozity jednotlivých složek spalín: [44]:

Veličina	T	ν_{CO_2}	$\nu_{\text{H}_2\text{O}}$	ν_{N_2}
Jednotka	K	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
1	400	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$
2	500	$2,16 \cdot 10^{-5}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$	$3,77 \cdot 10^{-5}$

Interpolované hodnoty kinematické viskozity jednotlivých složek pro teplotu T_1 :

$$\nu_{\text{CO}_2} = 1,65 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$$

$$\nu_{\text{H}_2\text{O}} = 2,903 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$$

$$\nu_{\text{N}_2} = 2,95 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$$

$$\nu_{\text{sp}} = \sum \omega_i \cdot \nu_i \quad [\text{m}^2.\text{s}^{-1}] \quad (12)$$

$$\nu_{\text{sp}} = 2,88 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2.\text{s}^{-1}] \quad [\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$$

Tabulka hustoty jednotlivých složek spalin: [44]:

Veličina	T	ρ_{CO_2}	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	ρ_{N_2}
Jednotka	K	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1	400	1,34	0,542	0,853
2	500	1,07	0,44	0,682

Interpolované hodnoty hustoty jednotlivých složek pro teplotu T_1 :

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{CO}_2} &= 1,12 [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \\
 \rho_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,521 [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] & \rho_{\text{N}_2} &= 0,814 [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \\
 \rho_{\text{sp}} &= \sum \omega_i \cdot \rho_i \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \\
 \rho_{\text{sp}} &= 0,715 [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]
 \end{aligned} \tag{13}$$

Prandlovo číslo pro spaliny:

$$\begin{aligned}
 \text{Pr} &= \frac{\rho_{\text{sp}} \cdot v_{\text{sp}} \cdot c_{\text{sp}}}{\lambda_{\text{sp}}} \quad [-] \\
 \text{Pr} &= 0,906 \quad [-]
 \end{aligned} \tag{14}$$

Střední rychlost spalin:

$$\bar{w}_{\text{sp}} = 6,477 \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

Charakteristický rozměr hliníkového žebrovaného chladiče (zde výška žebra):

$$H_z = 0,065 \quad [\text{m}]$$

Reynoldsovo číslo spalin:

$$\begin{aligned}
 \text{Re} &= \frac{H_z \cdot \bar{w}_{\text{sp}}}{\nu_{\text{sp}}} \quad [-] \\
 \text{Re} &= 14\,442 \quad [-]
 \end{aligned} \tag{15}$$

Kriteriální rovnice pro výpočet Nuseltova čísla pro nucenou konvekci převzatá z [33]:

$$\begin{aligned}
 \text{Nu} &= 0,228 \cdot \text{Re}^{0,732} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad [-] \\
 \text{Nu} &= 226,51 \quad [-]
 \end{aligned} \tag{16}$$

Součinitel přestupu tepla:

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{sp}}}{H_z} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}] \\
 \alpha_1 &= 111,897 \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}]
 \end{aligned} \tag{17}$$

Šířka žebra hliníkového chladiče:

$$W_z = 0,004 \quad [\text{m}]$$

Korigovaná výška žebra chladiče:

$$\begin{aligned}
 H_K &= H_z + \frac{W_z}{2} \quad [\text{m}] \\
 H_K &= 0,067 [\text{m}]
 \end{aligned} \tag{18}$$

Tepelná vodivost hliníkového chladiče převzatá z [45]:

$$\lambda_{Ch} = 220 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

Parametr žebra:

$$m_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_1}{\lambda_{Ch} \cdot W_{Ch}}} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (19)$$

$$m_0 = 15,947 \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

Účinnost žebra:

$$\eta_{\dot{z}} = \frac{\tanh(m_0 \cdot H_K)}{m_0 \cdot H_K} \text{ [-]} \quad (20)$$

$$\eta_{\dot{z}} = 0,738 \text{ [-]}$$

Počet žeber:

$$N_{\dot{z}} = 15 \text{ [-]}$$

Délka chladiče:

$$L_{Ch} = 0,145 \text{ [m]}$$

Výpočet efektivní plochy žeber:

$$A_{ef} = 2 \eta_{\dot{z}} \cdot L_{Ch} \cdot H_K \cdot N_{\dot{z}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (21)$$

$$A_{ef} = 0,215 \text{ [m}^2\text{]}$$

Tepelný odpor spaliny – žebra:

$$R_{th1} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A_{ef}} \text{ [K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]} \quad (22)$$

$$R_{th1} = 0,042 \text{ [K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$$

TEPELNÝ ODPOR R_{TH2} (NEZÚŽENÁ ZÁKLADNA CHLADIČE)

Výška nezúžené základny hliníkového chladiče:

$$H_{Ch2} = 0,01 \text{ [m]}$$

Šířka nezúžené základny hliníkového chladiče:

$$W_{Ch2} = 0,1524 \text{ [m]}$$

Plocha nezúžené základny:

$$A_{Ch2} = W_{Ch2} \cdot L_{Ch} \text{ [m}^2\text{]} \quad (23)$$

$$A_{Ch2} = 0,022 \text{ [m}^2\text{]}$$

Tepelný odpor nezúžené základny:

$$R_{th2} = \frac{H_{Ch2}}{\lambda_{Ch} \cdot A_{Ch2}} \text{ [K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]} \quad (24)$$

$$R_{th2} = 2,057 \cdot 10^{-3} \text{ [K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$$

TEPELNÝ ODPOR R_{TH3} (ZÚŽUJÍCÍ SE ČÁST CHLADIČE)

Výška zúžené části hliníkového chladiče:

$$H_{Ch3} = 0,006 \text{ [m]}$$

Šířka zúžené části hliníkového chladiče:

$$W_{Ch3} = 0,052 \text{ [m]}$$

Délka zúžené části hliníkového chladiče:

$$L_{Ch3} = 0,052 \text{ [m]}$$

Plocha zúžené části hliníkového chladiče:

$$A_{Ch3} = W_{Ch3} \cdot L_{Ch3} \text{ [m}^2\text{]} \quad (25)$$

$$A_{Ch3} = 2,704 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

Následující výpočet je převzat z [37], jsou pouze změněny rozměry:

$$a = \sqrt{\frac{A_{Ch2}}{\pi}} \text{ [m]} \quad (26)$$

$$a = 0,084 \text{ [m]}$$

$$b = \sqrt{\frac{A_{Ch3}}{\pi}} \text{ [m]} \quad (27)$$

$$b = 0,029 \text{ [m]}$$

$$\varepsilon = \frac{b}{a} \text{ [-]} \quad (28)$$

$$\varepsilon = 0,35 \text{ [-]}$$

$$k = \pi + \frac{1}{\varepsilon\sqrt{\pi}} \text{ [-]} \quad (29)$$

$$k = 4,754 \text{ [-]}$$

$$Bi = \frac{1}{\pi \lambda_{Ch} a (R_1 + R_2)} \text{ [-]} \quad (30)$$

$$Bi = 0,396 \text{ [-]}$$

$$\phi = \frac{\tanh(k \cdot H_{ChU}) + \frac{k}{Bi}}{1 + \frac{k}{Bi} \tanh(k \cdot H_{ChU})} \text{ [-]} \quad (31)$$

$$\phi = 8,969 \text{ [-]}$$

Tepelný odpor zúžené základny, převzato [37]:

$$R_{th3} = \frac{\varepsilon \cdot H_{ChU} + 0,5\sqrt{\pi}(1-\varepsilon)^{3/2}\phi}{\lambda_{Ch}\pi b} \text{ [K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]} \quad (32)$$

$$R_{th3} = 0,206 \text{ [K} \cdot \text{W}^{-1}\text{]}$$

TEPELNÝ ODPOR R_{TH4} (TERMOELEKTRICKÝ MODUL) A R_{TH5} (VODNÍ BLOK)

Tepelný odpor TE modulu určený podle údajů výrobce [31]:

$$R_{th4} = 1,525 \text{ [K. W}^{-1}\text{]}$$

Tepelný odpor vodního bloku, udávaný prodejcem [40]:

$$R_{th5} = 0,082 \text{ [K. W}^{-1}\text{]}$$

TEPELNÝ ODPOR R_{THI} (TEPLOVODIVÁ PASTA)

Výška vrstvy teplovodivé pasty:

$$H_{pasta} = 0,000003 \text{ [m]}$$

Šířka vrstvy teplovodivé pasty:

$$W_{pasta} = 0,04013 \text{ [m]}$$

Délka vrstvy teplovodivé pasty:

$$L_{pasta} = 0,04013 \text{ [m]}$$

Tepelná vodivost teplovodivé pasty:

$$\lambda_{pasta} = 5,6 \text{ [W. m}^{-1}\text{. K}^{-1}\text{]}$$

Plocha, kterou pokrývá pasta:

$$A_{pasta} = W_{pasta} \cdot L_{pasta} \text{ [m}^2\text{]} \quad (23)$$

$$A_{pasta} = 0,00161 \text{ [m}^2\text{]}$$

Tepelný odpor pasty:

$$R_{thi} = \frac{H_{pasta}}{\lambda_{pasta} \cdot A_{pasta}} \text{ [K. W}^{-1}\text{]} \quad (34)$$

$$R_{thi} = 3,327 \cdot 10^{-4} \text{ [K. W}^{-1}\text{]}$$

VÝSLEDNÝ TEPELNÝ TOK A TEPLoty NA HORKÉ A STUDENÉ STRANĚ TE

Střední teplota spalin:

$$T_1 = 200 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední teplota vody:

$$T_2 = 23 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Celkový tepelný odpor:

$$R_{th \text{ Tot}} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3} + R_{th4} + R_{th5} + 2R_{thi} \text{ [K. W}^{-1}\text{]} \quad (35)$$

$$R_{th \text{ Tot}} = 1,805 \text{ [K. W}^{-1}\text{]}$$

Tepelný tok spaliny – hliníkový chladič – TE modul – vodní blok – voda lze vyjádřit rovnicí:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th \text{ Tot}}} \text{ [W]} \quad (36)$$

$$\dot{Q} = 98,068[\text{W}]$$

Teplotu studené strany termoelektrického modulu:

$$T_C = \dot{Q} \cdot R_{th5} + T_2 \quad [^\circ\text{C}] \quad (37)$$

$$T_C = 31,3 \quad [^\circ\text{C}]$$

Teplotu horké strany termoelektrického modulu:

$$T_H = \dot{Q} \cdot R_{th4} + T_{cold} \quad [^\circ\text{C}] \quad (38)$$

$$T_H = 175,5 \quad [^\circ\text{C}]$$

VÝPOČET MAXIMÁLNÍHO VÝKONU A ÚČINNOSTI TE MODULU

Hodnota Seebeckova koeficientu²:

$$\alpha_s = 0,053 \quad [\text{V} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Výpočet napětí naprázdno:

$$U_{OC} = \alpha_s \cdot (T_H - T_C) \quad [\text{V}] \quad (39)$$

$$U_{OC} = 7,6[\text{V}]$$

Vnitřní odpor termoelektrického modulu³:

$$R_i = 3,46 \quad [\Omega]$$

Výpočet optimálního odporu zátěže:

$$R_L = R_i \quad [\Omega] \quad (40)$$

$$R_L = 3,46[\Omega]$$

Výpočet maximálního výkonu:

$$P_{max} = \frac{U_{OC}^2}{4R_i} \quad [\text{W}] \quad (41)$$

$$P_{max} = 4,208[\text{W}]$$

Výpočet optimálního proudu:

$$I_{opt} = \sqrt{\frac{P_{max}}{R_i}} \quad [\text{A}] \quad (42)$$

$$I_{opt} = 1,1 \quad [\text{A}]$$

Výpočet optimálního napětí:

$$U_{opt} = \frac{P_{max}}{I_{opt}} \quad [\text{V}] \quad (43)$$

$$U_{opt} = 3,81[\text{V}]$$

² Dopočítáno pomocí hodnot udávaných výrobcem [31]

³ Dopočítáno pomocí hodnot udávaných výrobcem [31]

Účinnost měniče:

$$\eta_{DC/DC} = 0,80[-]$$

Výkon zahrnující účinnost měniče:

$$P_{\max DC/DC} = \eta_m \cdot P_{\max} \text{ [W]} \quad (44)$$

$$P_{\max DC/DC} = 3,3664 \text{ [W]}$$

Účinnost TE:

$$\eta_{TE} = \frac{P_{\max}}{\dot{Q}} \text{ [-]} \quad (45)$$

$$\eta_{TE} = 0,0426 \text{ [-]}$$