

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PELTIEROVY ČLÁNKY PRO VÝROBU ELEKTRICKÉ ENERGIE

THERMOELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARIAN BRÁZDIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Marian Brázdil

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

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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 diplomové práce:

Peltierovy články pro výrobu elektrické energie

v anglickém jazyce:

Thermoelectric Power Generation System

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku produkce elektrické energie s využitím Peltierových článků. Vlastní náplň práce zahrnuje zpracování teoretického přehledu, návrh el. generátoru tvořeného Peltierovými články a jeho experimentální ověření.

Cíle diplomové práce:

1. Popište princip Peltierova článku
2. Uveďte typy zapojení a charakteristiky systémů pro produkci el. energie z Peltierových článků.
3. Navrhněte segment pro produkci elektrické energie využívající tepla spalin za kotlem malého výkonu.
4. Návrh experimentálně realizujte a stanovte skutečné provozní charakteristiky.

Seznam odborné literatury:

Dvorský Emil, Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, 2005

Firemní literatura a technické listy výrobců Peltierových článků

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 15.11.2010



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

V posledním desetiletí došlo k vzestupu zájmu o termoelektrické aplikace. Termoelektrické generátory, které umožňují přímou přeměnu tepla na elektřinu, se v souvislosti s požadavky na ekologický provoz a úspory primárních zdrojů stávají atraktivními. Vědci intenzivně zkoumají a vyvíjí nové materiály a struktury vhodné pro tyto aplikace. Dochází k postupnému zvyšování účinnosti. Přestože nemáme k dispozici materiály s velmi výraznými termoelektrickými vlastnostmi, které by umožnily cenově srovnatelnou výrobu elektřiny, může být použití termoelektrických generátorů přínosem. Například v případech, kdy vzniká velké množství nevyužitého odpadního tepla, může použitím termoelektrického generátoru vzrůst celková účinnost zařízení i přes nízkou účinnost samotného generátoru.

Předkládaná práce obsahuje popis Peltierových článků, které tvoří stěžejní část termoelektrických generátorů. Zabývá se jejich principy, konstrukcí a možnostmi produkce elektrické energie. V praktické části je navržena konstrukce generátoru malého výkonu, využívajícího nízkopotenciální odpadní teplo spalín automatického teplovodního kotle Verner A251.1.

KLÍČOVÁ SLOVA

Peltierovy články, termoelektrické moduly, termobaterie, termoelektrický generátor, Seebeckův jev, Peltierův jev, termoelektrické jevy, odpadní teplo, DC/DC měnič, kogenerace, elektřina

ABSTRACT

In the last decade there is a rising interest in thermoelectric applications. Thermoelectric generators enabling the direct conversion of the heat into the electricity become attractive. This fact is caused by the demands of environmental operation and saving primary resources. Scientists intensively investigate and develop new materials and structures suitable for these applications. The efficiency of the thermoelectric conversion progressively increases. Unfortunately we have no available materials with sufficient thermoelectric properties which could provide cost-competitive price. Thermoelectric generators seem to be useable devices. For example, in case of the unused waste heat using of the thermoelectric generator can increase the overall effectiveness of the unit despite the low efficiency of the generator.

This master thesis deals with the issue of the Peltier modules representing the main part of the thermoelectric generators. The physical principles and structures of the thermoelectric modules and the possibility of thermoelectric power production are described here. In the practical part of this thesis the design of the low power generator utilizing waste heat from biomass boiler Verner A 251.1 is proposed.

KEYWORDS

Peltier Modules, Thermoelectric Modules, Thermopile, Thermoelectric Generator, Seebeck Effect, Peltier Effect, Thermoelectric Phenomena, Waste Heat, DC/DC Converter, Combined Heat and Power, Electric Power

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Peltierovy články pro výrobu elektrické energie vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 27. 5. 2011

.....

Marian Brázdil

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za vstřícný přístup, připomínky a rady při vypracování diplomové práce a mé rodině s nejbližšími přáteli za podporu, které se mi v průběhu celého studia dostalo.

OBSAH

ÚVOD	11
1 TERMoeLEKTRINA	12
1.1 HISTORIE A BUDOUCNOST	12
1.2 TERMoeLEKTRICKÉ JEVY	14
1.2.1 Seebeckův jev	14
1.2.2 Peltierův jev.....	15
1.2.3 Thomsonův jev	16
1.2.4 Kelvinovy vztahy.....	16
2 PELTIEROVY ČLÁNKY	17
2.1 KONSTRUKCE PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	17
2.2 VÝKON PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	18
2.3 ÚČINNOST PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	20
2.4 ZPŮSOBY MONTÁŽE PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	23
2.5 ŽIVOTNOST PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	23
2.6 VÝROBCI PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	24
3 TERMoeLEKTRICKÉ MATERIÁLY	25
3.1 MATERIÁLY PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	25
4 TERMoeLEKTRICKÉ GENERÁTORY	28
4.1 TERMoeLEKTRICKÁ VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE	28
4.2 KONSTRUKCE TERMoeLEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ	29
5 PŘÍKLADY APLIKACÍ TERMoeLEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ	30
5.1 MINIATURNÍ TERMOGENERÁTORY	30
5.2 ENERGY HARVESTING ZAŘÍZENÍ	30
5.3 TERMoeLEKTRICKÉ GENERÁTORY V AUTOMOBILECH.....	32
5.4 RADIOIZOTOPOVÉ TERMoeLEKTRICKÉ GENERÁTORY	39
6 DRUHOTNÉ ENERGETICKÉ ZDROJE	40
6.1 CHARAKTERISTIKA ODPADNÍHO TEPLA JAKO ZDROJE ENERGIE.....	40
7 KOGENERACE	43
7.1 KOMBINOVANÁ VÝROBA ELEKTRICKÉ A TEPELNÉ ENERGIE.....	43
7.2 KOGENERAČNÍ JEDNOTKA S TERMoeLEKTRICKÝM GENERÁTOREM	44
7.3 ÚČINNOST KOMBINOVANÉ VÝROBY TEPLA A ELEKTRICKÉ ENERGIE	44
8 TRANSFORMACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	46
8.1 CHARAKTERISTIKA TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU JAKO ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	46
8.2 DC-DC MĚNIČE.....	48
8.3 TEPELNÉ ZÓNY	48
8.4 MPPT A MOŽNÉ ZPŮSOBY SPOJENÍ PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ.....	49

9 NÁVRH TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU PRO TEPLOVODNÍ KOTEL .	52
.....	
9.1 PARAMETRY TEPLOVODNÍHO KOTLE.....	52
9.2 PARAMETRY PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ	53
9.3 KONSTRUKCE TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU	54
ZÁVĚR	57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	64
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....	66
SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Peltierovy články jsou zařízení malých rozměrů tvořené tuhými nepohyblivými částmi, jejichž činnost je založena na existenci termoelektrických jevů. Tento úvod není vzhledem k cíli práce zcela přesný a je vhodné ho objasnit. Označení „Peltierovy“ články, je do značné míry zavádějící. V České republice se běžně označují jako Peltierovy články všechny termoelektrické moduly. Výrobci samotní rozlišují termoelektrické moduly na moduly chladicí a moduly pro výrobu elektrické energie. Chladicí moduly (Thermoelectric Cooling Modules, Thermoelectric Cooler Modules, Peltier Cooler, TEC) využívají Peltierova jevu, kdy průchodem elektrického proudu dochází k odebrání tepla na studené straně modulu a jeho transportu ke straně teplé. Tímto způsobem je realizováno termoelektrické chlazení, anebo změnou polarity termoelektrický ohřev. Naproti tomu, moduly pro výrobu elektrické energie (Thermoelectric Modules, Thermoelectric Generators, Seebeck Modules, TEG) využívají jevu Seebeckova. Průchodem tepelného toku modulem vzniká na jeho vodičích napětí a je-li modul připojen k odporové zátěži, může generovat malý elektrický výkon [33]. Jevy Seebeckův a Peltierův jsou jevy komplementární. Bylo by možné namítnout, že mezi moduly nejsou rozdíly. Výrobci optimalizují moduly pro práci v konkrétní aplikaci. Výsledkem je, že chladicí moduly nejsou příliš vhodné pro výrobu elektrické energie a naopak, moduly pro výrobu elektrické energie se nehodí pro termoelektrické chlazení nebo ohřev. Výrobci deklarují, o který typ modulu se jedná, protože se mnohdy moduly svým vzhledem neliší. Protože je u nás vžitě označení všech termoelektrických modulů jako „Peltierových článků“, budou moduly určené pro výrobu elektrické energie v práci takto označovány.

1 TERMOELEKTRINA

Termoelektrické jevy jsou jedny z nejstarších jevů pozorovaných v pevných látkách. V následující stati je shrnut vývoj, jímž termoelektrina prošla v průběhu dvou minulých století.

1.1 Historie a budoucnost

První z termoelektrických jevů byl objeven v roce 1821 Thomasem J. Seebeckem. Seebeck zjistil, že ohříváním spoje (přechodu) dvou různých elektrických vodičů může vzniknout elektromotorická síla [13]. Prozkoumal celou řadu materiálů, včetně těch, které dnes nazýváme polovodiče, a sestavil rozsáhlou termoelektrickou řadu. Materiály v ní seřadil podle pořadí součinu $\alpha\sigma$, kde α je Seebeckův koeficient a σ elektrická vodivost. Takto sestavená řada je velmi podobná dnešní termoelektrické řadě. Pokud by Seebeck v roce 1821 vzal první a poslední člen své řady a sestavil z nich termočlánek, mohl s ním přeměnit teplo na elektřinu s účinností přibližně 3 %, což by vycházelo velmi příznivě ve srovnání s neefektivnějším parním strojem té doby [32].

O 12 let později (v některé literatuře se uvádí 13 let), Charles A. Peltier objevil jev komplementární k jevu Seebeckovu. Zpozoroval změny teploty v blízkosti spoje dvou různých vodičů při průchodu proudem. Podstatu toho jevu objasnil v roce 1838 Heinrich Lenz. Došel k závěru, že teplo je na přechodu mezi dvěma vodiči absorbováno nebo uvolňováno v závislosti na směru proudu [32].

V roce 1851 William Thomson (Lord Kelvin) objasnil vztah mezi Seebeckovým a Peltierovým jevem a předpověděl existenci dalšího - Thomsonova jevu, který následně experimentálně pozoroval. Podstatou Thomsonova jevu je uvolňování nebo pohlcování tepla v homogenním vodiči, kterým prochází proud při teplotním gradientu [32].

John W. Rayleigh v roce 1885 zvažoval možnosti využít termoelektrických jevů pro výrobu elektřiny a jako první, i když chybně, spočítal účinnost termoelektrického generátoru. V letech 1909 a 1911 předložil Edmund Altenkirch teorii termoelektrické výroby elektřiny a termoelektrického chlazení. Ukázal, že dobré termoelektrické materiály by měly mít velký Seebeckův koeficient α , malou tepelnou vodivost λ a vysokou elektrickou vodivost σ . Malá tepelná vodivost pomáhá udržet teplo v oblasti přechodu a vysoká elektrická vodivost minimalizuje Joulovy ztráty (ohřev vodičů průchodem elektrického proudu). Tyto požadavky na vlastnosti materiálů byly vtěleny do veličiny nazývané koeficient termoelektrické účinnosti Z [18], [32].

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (1.1)$$

Protože koeficient Z se mění s teplotou, je výhodnější při dané absolutní teplotě zavést bezrozměrný koeficient ZT [32].

Vlastnosti dobrých termoelektrických materiálů, které popisovala již Seebeckova řada, byly dobře známy. Zájem výzkumníků se přesto soustředil na kovy a kovové slitiny a přehlížel výhody nerostů s vlastnostmi polovodičových materiálů. Většina kovů má Seebeckův koeficient malý, typicky desítky μVK^{-1} . Je to proto, že v kovech a kovových slitinách je poměr mezi tepelnou a elektrickou vodivostí konstantní (Franz-Wiedemann-Lorenzův zákon). Snižování tepelné vodivosti a zároveň zvyšování vodivosti elektrické není v kovech možné a účinnost termoelektrické přeměny je proto jen zlomkem procenta. Využití těchto materiálů pro zdroj elektrické energie by bylo neekonomické. Nacházejí ale uplatnění v podobě termoelektrických článků pro měření teploty a jako senzory regulačních systémů v klimatizačních zařízeních, ledničkách, jednotkách centrálního vytápění a podobně [18], [32], [33].

Syntetické polovodiče vyvinuté koncem 30. let minulého století měly Seebeckův koeficient větší než $100 \mu\text{VK}^{-1}$ a vzbudily nový zájem o termoelektřinu. V roce 1947 zkonstruovala Mária Telkes generátor s účinností přibližně 5 % a o dva roky později rozvinul Abram Ioffe teorii polovodičových termoelementů. Naneštěstí, v polovodičích je poměr mezi tepelnou a elektrickou vodivostí větší než u kovů kvůli jejich horší elektrické vodivosti. Výsadní postavení polovodičů nebylo tedy zdaleka zřejmé. Výzkum směsných polovodičů pro tranzistorové aplikace v 50. letech dal vzniknout novým materiálům s podstatně lepšími termoelektrickými vlastnostmi. Ioffe se svými spolupracovníky v roce 1956 poukázal na to, že poměr mezi tepelnou a elektrickou vodivostí může být snížen (resp. elektrická vodivost zvýšena) legováním termoelektrického materiálu izomorfním prvkem nebo sloučeninou [32].

Potenciální možnost vojenského využití vedla k dalšímu výzkumu a objevení několika polovodičů s koeficientem termoelektrické účinnosti ZT blížící se 1,5. Pro představu, podle [33] odpovídá velikosti koeficientu $ZT = 1,5$ při teplotách 400 K přibližně 5% účinnost přeměny, při 600 K zhruba 11% účinnost a při teplotě 800 K téměř 14% účinnost přeměny (odečteno z grafu). Na počátku 60. let v souvislostech s dobýváním vesmíru, pokusy v medicínské fyzice a těžbou nerostného bohatství v nehostinném nebo nepřístupném prostředí, vyvstaly požadavky na autonomní zdroje elektrické energie. V roce 1974 prudce vzrostla cena ropy a zesílil zájem o produkci elektrické energie na základě termoelektrického jevu. Bylo zřejmé, že pro hromadnou a efektivní přeměnu bude zapotřebí levnějších a účinnějších polovodičových materiálů. Vývoj na konci 80. let tento trend podpořil. Úbytek ozónové vrstvy a zájem o technologie šetrné k životnímu prostředí vyústily ve snahu využívat odpadního tepla a termoelektřiny jako zdroje elektrické energie [18], [32].

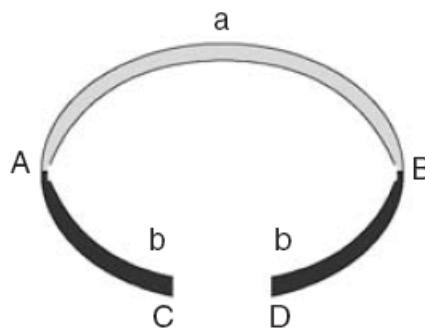
Potřeba elektrické energie a snahy o minimalizaci poškozování přírody při její výrobě jsou v současnosti stejně palčivé jako na konci minulého tisíciletí. Oblastí, ve které by se mohla v blízké době termoelektřina prosadit, je automobilový průmysl. První pokusy byly uskutečněny již v roce 1963, následované dalšími, ale až v posledních letech došlo k výraznému posunu. Výzkumné ústavy v USA ve spolupráci s automobilovými výrobci a výrobci termoelektrických modulů zkoumají možnosti reálného nasazení termoelektrických generátorů. Cílem výzkumníků je snížení spotřeby paliva, emise a výhledově zcela nahradit alternátor [9]. Další progresivní oblastí jsou miniaturní bezdrátové detektory a senzory.

Potřeba účinnějších termoelektrických materiálů umožňujících využití termoelektriny v širším měřítku stále přetrvává. Mnozí si kladou otázku, zdali vůbec budou vyvinuty dostatečně efektivní termoelektrické materiály. Budou takové materiály šetrné k přírodě a termoelektrická přeměna energie ekonomická? Existují důvody k optimismu očekávat příchod materiálů s ještě lepšími vlastnostmi. V nedávné době byly nalezeny materiály, které mají struktury s prázdnými objemy (klathráty, skutterudity), do kterých lze umístit vhodný atom, který je velmi volně vázán a může drasticky snížit mřížkovou tepelnou vodivost při současném zachování vysoké elektrické vodivosti. Byly vyvinuty nové technologie přípravy materiálů a bylo hlouběji porozuměno fyzikálním procesům, které určují vlastnosti těchto látek [18], [32].

1.2 Termoelektrické jevy

1.2.1 Seebeckův jev

Seebeckův jev, na kterém je založena termoelektrická přeměna, lze objasnit na příkladu termoelektrické dvojice (Obr. 1).



Obr. 1 Vznik termoelektrické dvojice [32]

Obvod je složený ze dvou různých vodičů, a a b (někdy uváděných jako termoelementy), které jsou elektricky spojeny do série. Pokud budou spoje vodičů A a B udržovány na různých teplotách T_1 a T_2 a současně $T_1 > T_2$, vznikne mezi kontakty C a D elektromotorické napětí V dané vztahem:

$$V_{ab} = \alpha_{ab}(T_1 - T_2) \quad [\text{V}] \quad (1.2)$$

kde α_{ab} je Seebeckův relativní koeficient. Pro malé teplotní rozdíly je tento vztah lineární. Seebeckův relativní koeficient je definován jako:

$$\alpha_{ab} = \left. \frac{dV_{ab}}{dT} \right|_T \quad [\text{VK}^{-1}] \quad (1.3)$$

Koeficient je vyjadřován ve voltech na stupeň teplotního rozdílu VK^{-1} nebo častěji v mikrovoltech na stupeň teplotního rozdílu μVK^{-1} . Je považován za kladný, pokud vzniklé elektromotorické napětí způsobí průchod elektrického proudu skrze vodič „a“ ve směru od teplejšího konce k chladnějšímu [13]. Seebeckův jev je možné sledovat i na osamoceném vodiči. Hovoříme pak o absolutním Seebeckově jevu. Ten je definován jako okamžitý poměr Seebeckova napětí V_s vznikajícího na osamoceném vodiči ke změně teploty T při dané teplotě:

$$\alpha_s = \left. \frac{dV_s}{dT} \right|_T \quad [VK^{-1}] \quad (1.4)$$

Mezi absolutním a relativním Seebeckovým koeficientem platí následující vztah:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad [VK^{-1}] \quad (1.5)$$

Pro dosažení většího relativního Seebeckova koeficientu se v termoelektrických dvojicích kombinují materiály s co největším kladným a záporným Seebeckovým koeficientem. Seebeckovo napětí nevzniká v důsledku existence přechodu dvou nestejných vodičů, nemá souvislost s kontaktním potenciálem. Je dáno pouze teplotním rozdílem na obou vodičích [13], [18], [32].

1.2.2 Peltierův jev

Opačná situace nastane, přiděláme-li na svorky C a D zdroj elektromotorického napětí a obvodem poteče proud. Na spojích A a B se teplo uvolňuje nebo pohlcuje, v závislosti na směru proudu. Tento jev je výsledkem změny entropie nosičů náboje při průchodu spojem. Relativní Peltierův koeficient je dán poměrem absorbovaného tepla a elektrického proudu:

$$\pi_{ab} = \frac{Q}{I} \quad [WA^{-1}, V] \quad (1.6)$$

Podobně jako u Seebeckova koeficientu je možné zavést absolutní Peltierův koeficient. Vztah mezi absolutním a relativním Peltierovým koeficientem je:

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B \quad [WA^{-1}, V] \quad (1.7)$$

Koeficient je považován za kladný, když do vodiče „a“ vstupuje elektrický proud v místě teplejšího spoje a vystupuje spojem chladnějším [18], [32], [33].

1.2.3 Thomsonův jev

Thomsonův jev vyjadřuje reverzibilní výměnu tepla při průchodu proudu homogenním vodičem umístěným v teplotním gradientu. Pokud se budou nosiče náboje pohybovat proti teplotnímu gradientu, budou pohlcovat energii (teplo) a jejich potenciální energie vzroste. Jestliže se budou pohybovat ve směru teplotního gradientu, budou snižovat svou potenciální energii a teplo uvolňovat. Za předpokladu, že rozdíl teplot je malý, se množství tepla spočítá podle vztahu:

$$Q = \beta I \Delta T \quad [\text{W}] \quad (1.8)$$

kde β je Thomsonův koeficient. Jev se může projevit v jakémkoliv neizotermálním segmentu vodiče. Tento jev není u termoelektrických zařízení primárně důležitý, ale v detailních výpočtech by neměl být zanedbáván [18], [32].

1.2.4 Kelvinovy vztahy

Kelvinovy vztahy udávají vzájemnou souvislost mezi třemi uvedenými termoelektrickými koeficienty. Mezi relativním Peltierovým koeficientem a relativním Seebeckovým koeficientem platí vztah:

$$\alpha_{ab} = \frac{\pi_{ab}}{T} \quad [\text{VK}^{-1}] \quad (1.9)$$

Je mnohem snazší změřit Seebeckův koeficient než koeficient Peltierův. S pomocí Kelvinova vztahu je možné Peltierův koeficient snadno vyjádřit. Druhý Kelvinův vztah popisuje souvislost mezi Seebeckovým koeficientem a Thomsonovým koeficientem, nebo spíše diferencí mezi Thomsonovými koeficienty dvou vodičů:

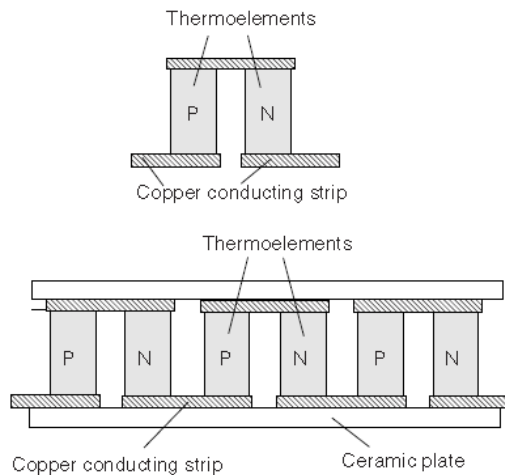
$$\frac{d\alpha_{ab}}{dT} = \frac{\beta_a - \beta_b}{T} \quad [-] \quad (1.10)$$

Všechny termoelektrické jevy jsou obecně závislé na magnetickém poli, což vyjadřuje Nernstův a Ettinghausenův jev. Mezi další termoelektrické jevy patří Benedicksův a Bridgmanův jev. Popis termoelektrických jevů je mnohem složitější. Jejich ucelený výklad podává fyzika pevných látek [13], [18], [32], [33].

2 PELTIEROVY ČLÁNKY

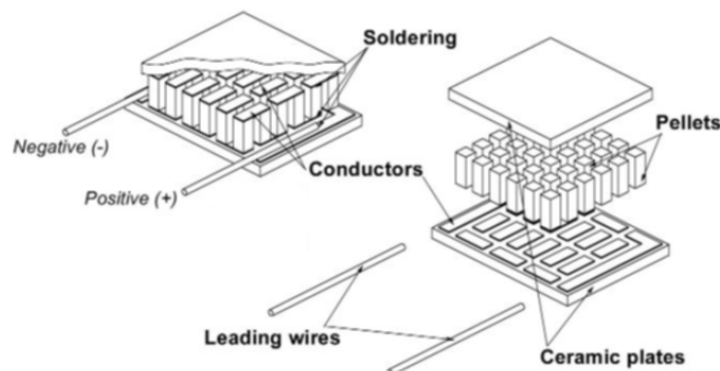
2.1 Konstrukce Peltierových článků

Peltierovy články jsou zařízení malých rozměrů. Skládají se z množství termoelektrických dvojic (Obr. 2) tvořených polovodičovými termoelementy typu p a n , umístěných mezi dvěma keramickými deskami. Polovodičové dvojice se pravidelně střídají a jsou vzájemně spojeny do série tenkými kovovými můstky.



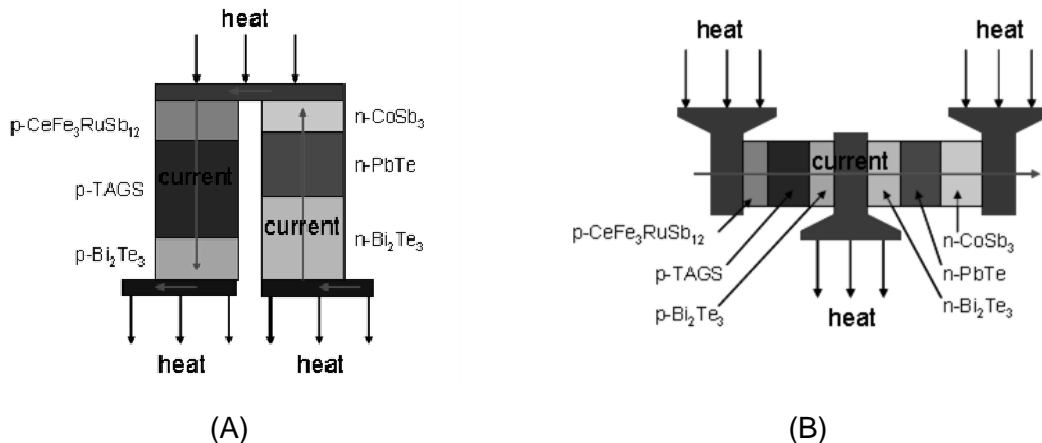
Obr. 2 Termoelektrické dvojice tvořící Peltierův článek [32]

Keramické desky zprostředkovávají přívod tepla, zajišťují elektrickou izolaci od okolí a poskytují článku potřebnou pevnost. Bývají vyrobeny z oxidu hlinitého (Al_2O_3). Polovodičové termoelementy jsou k můstkům připájeny. Můstky zprostředkovávají elektrický kontakt a přenos tepla. V místě styku polovodičů s můstkem mohou při špatném výrobním postupu vznikat nežádoucí přechodové odpory, které výkon celého modulu degradují. U běžných článků mají termoelementy tvar ingotů, sloupků (Obr. 3). Jejich rozměry jsou zvoleny tak, aby Seebeckův koeficient dosahoval hodnoty v řádu stovek μVK^{-1} [33].



Obr. 3 Konstrukce klasického termoelektrického modulu [14]

Existují i jiné geometrie a odlišná uspořádání termoelementů (Obr. 4).



Obr. 4 Uspořádání termoelementů (A) tradiční, (B) alternativní [21]

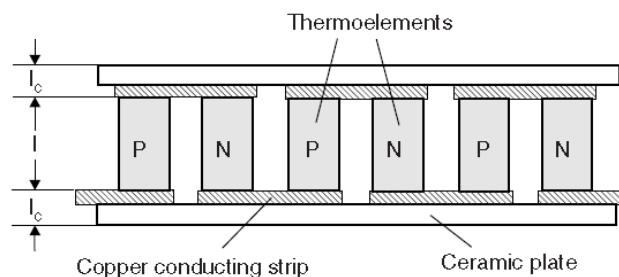
2.2 Výkon Peltierových článků

Pokud bude Peltierovým článkem procházet tepelný tok, do externí zátěže může být dodáván elektrický výkon a článek bude pracovat jako elektrický zdroj. Výkon generovaný jedním článkem je závislý na počtu termoelektrických dvojic, na provedení termoelementů, vlastnostech termoelektrického materiálu, přechodových odporech a teplotním rozdílu [33].

Výkon článku pracujícího do zátěže se počítá podle vztahu:

$$P = \frac{\alpha^2}{2\rho} \frac{NA (T_H - T_C)^2}{(l + n)(1 + 2r \frac{l_c}{l})^2} \quad [\text{W}] \quad (2.1)$$

kde je N počet termoelektrických dvojic, α Seebeckův koeficient a ρ elektrický odpor použitého termoelektrického materiálu, T_H a T_C teplota teplé a studené strany článku, A a l plocha příčného řezu a délka termoelementu, l_c tloušťka kontaktní vrstvy (Obr. 5), n a r elektrický a tepelný kontaktní parametr.



Obr. 5 Detail tloušťky přechodové vrstvy [33]

Parametry n a r se spočítají podle vztahů:

$$n = \frac{2\rho_c}{\rho} \quad [-] \quad (2.2)$$

$$r = \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad [-] \quad (2.3)$$

kde ρ_c je přechodový odpor, λ tepelná vodivost termoelementů a λ_c tepelná vodivost kontaktní vrstvy. Komerčně dostupné články mají hodnoty parametrů n a r obvykle $n \sim 0,1$ a $r \sim 0,2$. Vzorec 2.1 je užitečný pro spočítání výsledného výkonu článku. Někdy je ale obtížné získat všechny potřebné hodnoty od výrobce modulu. Typické hodnoty pro některé z potřebných veličin mohou být nalezeny v literatuře. Pro ideální článek, při zanedbání kontaktních odporů, může být pro zjištění výkonu užitečný následující vztah:

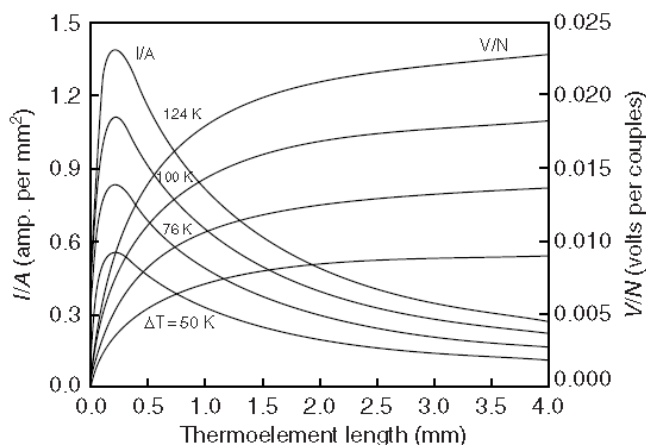
$$P = \frac{\alpha NA(T_H - T_C)^2}{\rho \cdot 2l} \quad [\text{W}] \quad (2.4)$$

Z této rovnice je patrné, že výkon článku je úměrný druhé mocnině teplotní difference. Tato vlastnost je užitečná pro přepočet výkonu při jiných provozních teplotách, uvádí-li výrobce článku předpokládaný výkon při definovaném rozdílu teplot. Výkon při jiných teplotách pak lze odhadnout podle vzorce:

$$P = \frac{P_{ref}}{\Delta T_{ref}^2} \Delta T^2 \quad [\text{W}] \quad (2.5)$$

Z rovnice 2.1 také vyplývá, že výkon článku se zvětšuje se snižující se délkou termoelementů. V některých případech je pro výrobu výkonnějších modulů použito menší množství termoelektrického materiálu než v případě méně výkonnějších článků¹. Obr. 6 ukazuje velikost proudu vztáženého na plochu termoelektrického materiálu a velikost napětí vzhledem k počtu termoelektrických dvojic jako funkci délky termoelementů pro různé teplotní rozdíly.

¹ Pro termoelektrické články k chlazení jsou charakteristické delší polovodičové termoelementy, zatímco články pro výrobu elektrické energie mají termoelementy krátké.



Obr. 6 Závislost geometrických parametrů článku při různých rozdílech teplot [33]

Výstupní napětí a proud článku je možné spočítat podle vztahů:

$$V = \frac{N\alpha(T_H - T_C)}{1 + 2r \frac{l_c}{l}} \quad [\text{V}] \quad (2.6)$$

$$I = \frac{\alpha A(T_H - T_C)}{2\rho(l + n)(1 + 2r \frac{l_c}{l})} \quad [\text{A}] \quad (2.7)$$

Při uvažování ideálního modulu by bylo možné v rovnici pro napětí jmenovatele vynechat. Z této rovnice je zřejmé, že napětí článku je úměrné teplotnímu rozdílu. Tato vlastnost je důležitá pro měniče napětí. Při napájení zařízení budeme pravděpodobně požadovat větší napětí, než které článek poskytuje. Články, které mají větší výstupní napětí, budou mít při konverzi v měničích menší ztráty než články s nižším výstupním napětím. Toto je dalším důvodem, proč jsou vysokoteplotní termoelektrické články upřednostňovány před levnými články používanými v chlazení [28], [33].

Závislost napětí a výkonu článku na teplotě je nevýhodná také z jiného důvodu. V rozsáhlých termoelektrických celcích znesnadňuje propojování modulů a vytváří nezanedbatelné ztráty výstupního výkonu.

2.3 Účinnost Peltierových článků

Účinnost konverze v termoelektrických generátorech je závislá na teplotním rozdílu ΔT , na průměrné teplotě, při které zařízení pracuje a na výkonnosti použitého materiálu, která je vyjádřena koeficientem termoelektrické účinnosti Z . Analyticky může být účinnost zařízení spočítána pouze ve zjednodušených případech, například budeme-li uvažovat termoelektrické vlastnosti jako teplotně nezávislé [14], [32].

Termoelektrické generátory jsou tepelné stroje a jako všechny tepelné stroje se řídí termodynamickými zákony. Pokud bychom uvažovali termoelektrický generátor jako ideální stroj pracující bez tepelných ztrát, bude účinnost definována jako poměr elektrického výkonu dodaného do zátěže a tepla absorbovaného na teplé straně:

$$\eta = \frac{\text{elektrická energie dodaná do zátěže}}{\text{tepelná energie absorbovaná na teplé straně generátoru}} \quad [-] \quad (2.8)$$

Většina tepla je skrze článek přenášena vedením v termoelementech. Část tohoto přenášeného tepla kompenzuje Peltierův jev, který vzniká při průtoku proudu obvodem. Polovina Jouleova tepla se vrací zpátky ke zdroji. Budeme-li předpokládat, že elektrické vodivosti, tepelné vodivosti a Seebeckovy koeficienty termoelementů jsou konstantní a že přechodové odpory na teplém a studeném spoji jsou zanedbatelné v porovnání s odporem termoelementů, je možné účinnost vyjádřit jako:

$$\eta = \frac{I^2 R}{\alpha_{ab} I T_H + \lambda(T_H - T_C) - \frac{1}{2} I^2 R} \quad [-] \quad (2.9)$$

kde λ je tepelná vodivost termoelementů a R jejich sériový odpor. Zjednodušené vyjádření účinnosti může být použito s dostatečnou přesností, pouze když střední hodnoty parametrů v daném teplotním rozsahu budou ještě v přijatelných mezích. U jednotlivých termoelektrických materiálů se elektrická i tepelná vodivost a Seebeckův koeficient mohou s teplotou výrazněji lišit.

Účinnost je funkcí poměru odporu zátěže a sumy odporů termoelementů. Účinnost při maximálním výkonu generátoru se spočítá podle vztahu:

$$\eta_P = \frac{T_H - T_C}{\frac{3T_H}{2} + \frac{T_C}{2} + \frac{4}{Z_c}} \quad [-] \quad (2.10)$$

zatímco maximální účinnost generátoru je dána vztahem:

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad [-] \quad (2.11)$$

Tato účinnost je součinem Carnotovy účinnosti a členu vyjadřujícího parametry materiálu. Součin $Z_c \bar{T}$ je modifikovaný bezrozměrný koeficient termoelektrické účinnosti. Člen Z_c je koeficient termoelektrické účinnosti pro jednu termoelektrickou dvojici a \bar{T} vyjadřuje střední teplotu, při které je generátor provozován:

$$\bar{T} = \frac{T_H + T_C}{2} \quad [\text{K}] \quad (2.12)$$

$$Z_c = \frac{\alpha_{ab}^2}{R\lambda} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (2.13)$$

Koeficient Z_c je možné rozepsat jako:

$$Z_c = \frac{\alpha_{ab}^2}{\left[\left(\frac{\lambda_a}{\sigma_a} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\lambda_b}{\sigma_b} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (2.14)$$

V praxi mívají oba termoelementy podobné materiálové konstanty a koeficient termoelektrické účinnosti se pak zjednoduší do tvaru:

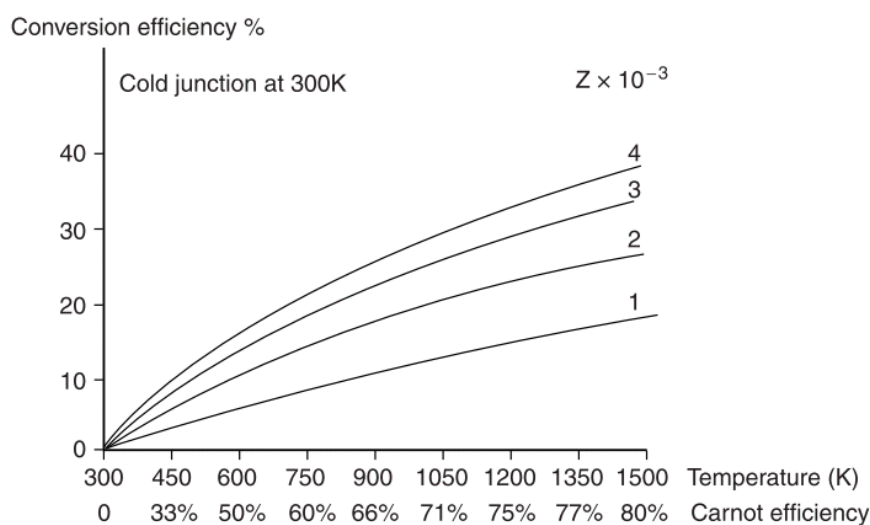
$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (2.15)$$

kde $\alpha^2 \sigma$ je označován jako faktor elektrického výkonu [33], [34].

Při optimálním elektrickém proudu stanovují účinnost pouze materiálové vlastnosti, resp. koeficient Z . Zatěžovací odpor R_L potřebný k dosažení největší účinnosti článku [34]:

$$R_L = R\sqrt{1 + Z \cdot T} \quad [\Omega] \quad (2.16)$$

Na Obr. 7 je zobrazeno porovnání koeficientu termoelektrické účinnosti a účinnosti konverze v závislosti na pracovní teplotě.



Obr. 7 Účinnost celkové přeměny v závislosti na použitém termoelektrickém materiálu a pracovní teplotě [33]

2.4 Způsoby montáže Peltierových článků

Výkonnost termoelektrického generátoru závisí na kvalitě spojení termoelektrických modulů se zdrojem tepla a chladiči. Nevhodný způsob instalace se může negativně projevit na životnosti modulu a spolehlivosti celého zařízení.

Obecně je možné termoelektrické moduly spojovat s okolními součástmi pájením, lepením nebo mechanicky. Nevýhodou lepení jsou nízké maximální pracovní teploty, které se mohou v závislosti na použitém lepidle pohybovat pouze v rozmezí 150 °C – 160 °C. Pájené spoje jsou použitelné pro vyšší teploty. Teplota tavení pájky musí být nižší než teplota tavení pájky použité pro spojování termoelementů uvnitř modulu. Výhodou pájení je dobrý tepelný kontakt a lepší přenos tepla. Nejběžnějším způsobem montáže článků jsou mechanické spoje. Článek je umístěn mezi dvěma výměníky a přichycen šrouby. Pro lepší tepelnou vodivost se mezery mezi stěnami vyplňují teplovodivou pastou nebo, v případě velké drsnosti styčných ploch, teplovodivými podložkami [31].

Výhodou mechanického spoje je rozebíratelnost, a tedy i možná údržba. Styčné plochy by měly být zbaveny vměstků, nerovností a cizích částic. Rovinatost ploch by neměla přesáhnout 0,02 mm, protože působením tlaku může dojít k prasknutí modulu. Doporučená drsnost styčných ploch je $Ra = 2,5 \mu\text{m}$ a menší. Šroubové spoje vytváří tepelné mosty, ztráty eliminujeme použitím vhodných těsnících podložek (např. keramických) a výběrem šroubů s nízkou tepelnou vodivostí (např. šrouby z nerezové oceli). Za provozu dochází vlivem tepelné roztažnosti k prodloužení nebo zkrácení šroubového spoje. Aby nedocházelo k nadměrnému nebo nedostatečnému tlaku na modul a zhoršení tepelného kontaktu, používají se pod šrouby pružné podložky [14], [40].

Nerovnoměrné stlačení šroubových spojů při montáži, vzniklé rozdílným krouticím momentem jednotlivých šroubových spojů modul poškozuje. Články špatně odolávají namáhání na stříh. Hrubé styčné plochy a nerovnoměrný krouticí moment mohou vyvolat velké stříhové síly. Výrobci doporučují při montáži článků použití momentových klíčů [31], [40].

2.5 Životnost Peltierových článků

Peltierovy články obecně mají velmi dlouhou životnost díky absenci chemických látek a pohyblivých částí. Výrobci u komerčně dostupných článků udávají provozní životnost 10 a více let [32]. Životnost je výrazně snížena nevhodným provozem. Negativně se na chodu článku podílejí zejména okolní vlivy (vibrace, vlhkost), špatná kvalita spojení s dalšími součástmi (špatný odvod tepla) a rychlé změny teploty. Vlivem rozdílných koeficientů tepelné roztažnosti vznikají mechanické tlaky a náhlé změny teploty tak články mohou poškodit. Přestože se předpokládá kolísání teplot, výrobce Tellurex doporučuje minimalizovat teplotní dynamiku a nevystavovat články v čase změnám teploty větším než je 1 °C/s [39].

Pájené spoje jsou funkčním omezením. Teplota tavení pájky je současně maximální pracovní teplotou článku. Selhání termoelektrického článku je většinou způsobeno buď náhlým poničením, anebo postupným narušováním.

U nízkoteplotních termoelektrických článků poškozuje článek především difúze pájky (cínu) do polovodičového materiálu, které v průběhu času vede k destrukci polovodičového materiálu a zničení článku [44]. Z důvodu životnosti je maximální pracovní teplota modulu tedy nižší než teplota tavení pájky. Např. u nízkoteplotních modulů TEG1-12610-5.1 se pro pájení termoelementů na studené straně modulu používají slitiny na bázi cín-antimon s teplotou tavení 240 °C, zatímco na teplé straně je použita hliníková pájka. Studená strana modulu by pak neměla přesáhnout teplotu 190 °C [38].

Podnětem pro posouzení spolehlivosti by mělo být:

- snížení elektrického výkonu;
- zvýšení odporu termoelektrického článku.

K měření parametrů termoelektrických článků do teploty < 700 °C se používají tzv. Z-metry [32].

2.6 Výrobci Peltierových článků

Zde uvedený seznam zahrnuje výrobce Peltierových článků určených pro termoelektrické generátory:

Tellurex	www.tellurex.com
Nextreme	www.nextreme.com
Marlow Industries, Inc.	www.marlow.com
Thermonamic Electronics Corp.,Ltd.	www.thermonamic.com
Hi-Z Technology, Inc.	www.hi-z.com
Hicooltec	www.hicooltec.com
EVERREDtronics Ltd.	www.everredtronics.com/
Kryotherm	www.kryotherm.ru
Perpetua Power Source Technologies	www.perpetuapower.com
greenTEG GmbH	www.greenteg.com
Crystal Ltd.	www.crystalltherm.com
Micropelt GmbH	www.micropelt.com
a další.	

Samostatní výrobci termoelektrických generátorů:

Global Thermoelectric	www.globalte.com
Termo-Gen AB	http://termo-gen.se
Tellurex	www.tellurex.com
PGI International, Ltd.	www.pgiint.com
a další.	

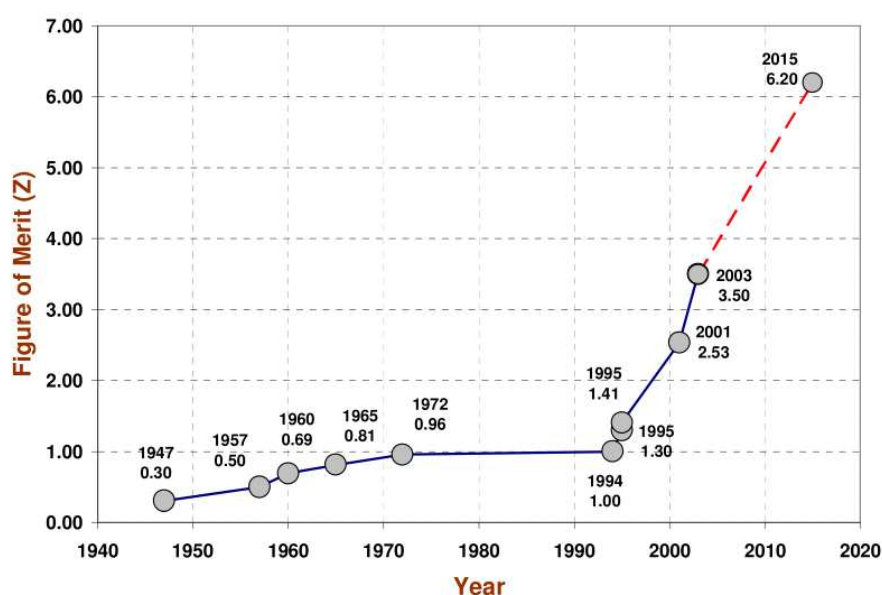
3 TERMOELEKTRICKÉ MATERIÁLY

3.1 Materiály Peltierových článků

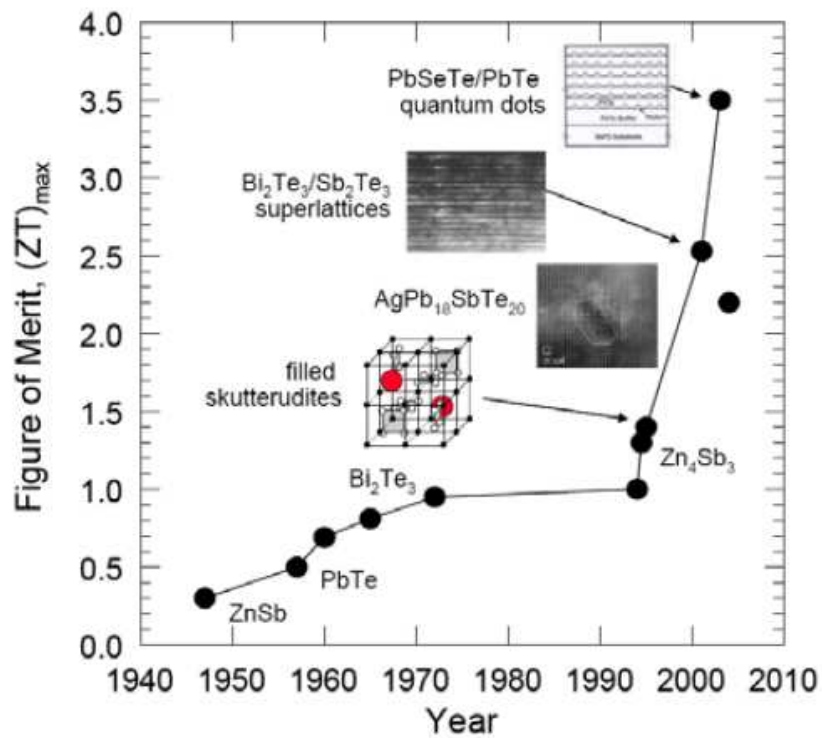
Použitý termoelektrický materiál spolurozhoduje o intervalu teplot, ve kterém bude termoelektrický modul schopný provozu. Mezi tradiční termoelektrické materiály vhodné pro termoelektrické generátory patří telurid bismutitý, slitiny teluridu olovnatého a slitiny křemíku s germaniem. Je možné je rozdělit do kategorií podle rozsahu jejich pracovních teplot [32]:

- telurid bismutitý a jeho slitiny mají nejvyšší koeficient Z , maximální pracovní teplotu přibližně 450 K;
- slitiny založené na teluridu olovnatém mají druhou nejvyšší účinnost a maximální pracovní teplotu okolo 1000 K;
- slitiny křemíku a germania mají z těchto materiálů nejhorší účinnost, ale mohou pracovat při teplotách až 1300 K.

V průběhu posledních šedesáti let došlo k postupnému zvyšování termoelektrické účinnosti, jak je vidět na Obr. 8. Zatímco v 50. letech dosahoval koeficient termoelektrické účinnosti přibližně hodnoty $Z = 0,5$, v roce 2003 to bylo již $Z = 3,5$. V 90. letech byly objeveny skutterudity, materiály vhodné pro termoelektrickou přeměnu v oblastech teplot 230 °C až 670 °C. Výkonnost termoelektrických materiálů může být podstatně zvýšena použitím nanostruktur, jako jsou kvantové jámy, supermřížky, nanovlákná nebo nanozrna [33]. Americké ministerstvo energetiky (US Department of Energy) předpokládá, že implementace technologie kvantových teček do termoelektrických materiálů by mohla do roku 2030 přinést zvýšení účinnosti přeměny až na 35 % (obr. 9). Současně s tím je předpokládán prudký pokles ceny za watt výkonu termoelektrického generátoru. Nové obzory a nové aplikace otevírá výzkum zkoumající možnosti využití organických polymerů jako termoelektrických materiálů v nano-hybridních materiálech [34].

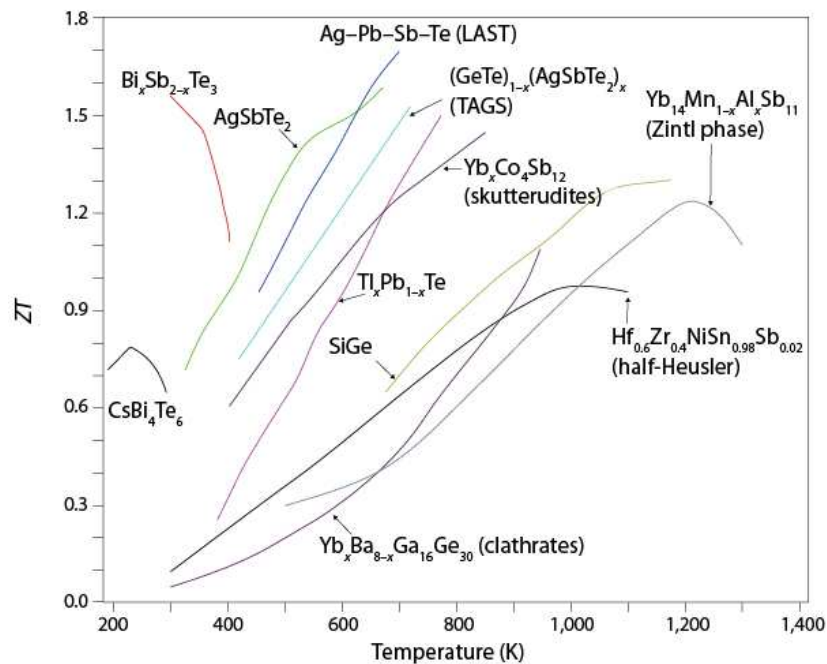


Obr. 8 Vývoj termoelektrické účinnosti v průběhu posledních 60 let [34]



Obr. 9 Termoelektrické materiály a jejich maximální účinnosti [9]

Účinnost materiálů je funkcí teploty. Ve většině případů je možné maximální účinnosti dosáhnout jen v malém pásmu pracovních teplot (Obr. 10).



Obr. 10 Termoelektrická účinnost polovodičových materiálů v závislosti na pracovní teplotě [16]

Začátek nového tisíciletí je spojený s rozmachem tenkovrstvých termoelektrických komponent, založených na polovodičových výrobních procesech. Tzv. mikromoduly jsou vyráběné planární technologií a využívají jako substrátů křemíkových waferů [1].

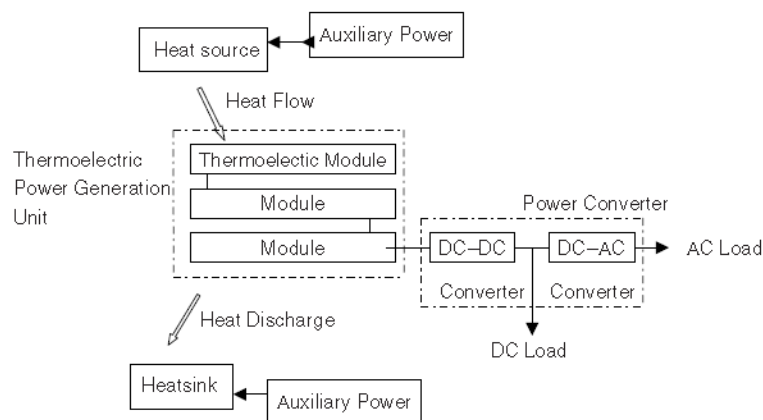
Mezi slibné objevy poslední doby se řadí zvýšení účinnosti materiálu TAGS (tellur-antimon-germanium-stříbro) při legování procentem ceru nebo ytterbia [22].

4 TERMOELEKTRICKÉ GENERÁTORY

4.1 Termoelektrická výroba elektrické energie

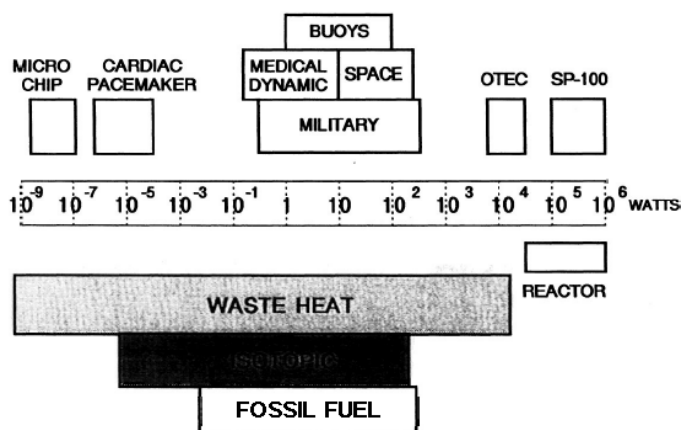
Jako termoelektrické generátory (termogenerátory) jsou označována zařízení, která obsahují Peltierův článek nebo skupinu článků a slouží k výrobě elektrické energie. Zdrojem energie pro generátor může být například teplo spalin vzniklých spalováním fosilních paliv nebo spalováním odpadů, odpadní teplo chladících vod v technologických zařízeních, teplo vznikající při radioaktivní přeměně, teplo lidského těla nebo jakékoliv jiné zdroje tepla o potřebných parametrech. Podmínkou provozu je udržování dostatečně velkého teplotního spádu.

Součástí termoelektrického generátoru jsou tepelné výměníky na teplé a studené straně článků, Peltierovy články (určené pro výrobu elektrické energie) a měnič napětí. Schéma takového systému je na Obr. 11 [33].



Obr. 11 Hlavní součásti termoelektrického systému [33]

V některých případech, u malých výkonů, odpadá potřeba dodatečně vynaložené práce pro přívod a odvod pracovních látek. Výkonové rozpětí termoelektrických generátorů je značné (Obr. 12). Nejmenší mikrogenerátory tvořené miniaturními termoelektrickými poli integrovanými do polovodičových čipů mohou mít výkon v řádu μW . S výkony v řádu desítek kW a více se mezi největší generátory řadí termogenerátory poháněné jaderným reaktorem zkonstruované v projektu SP-100 [32].



Obr. 12 Výkonový rozsah termoelektrických generátorů [1]

Termoelektrické systémy je možné rozčlenit do skupin v závislosti na teplotách, při kterých budou přibližně provozovány [33]:

- vysokoteplotní systémy – pracující při teplotách 900 °C až 700 °C;
- středněteplotní systémy - pracující při teplotách 700 °C až 200 °C;
- nízkoteplotní systémy - pracující při teplotách nižších než 200 °C.

4.2 Konstrukce termoelektrických generátorů

Teplu může být přenášeno do soustavy dvěma způsoby [33]:

- přímou výměnou;
- nepřímou výměnou.

V případě přímé výměny tepla k přenosu tepla dochází vedením, radiací nebo nucenou konvekcí [1]. Typickým příkladem jsou termoelektrické generátory malého výkonu (např. v měřicí technice), které získávají energii vedením tepla ze stálých tepelných zdrojů a pracují při konstantních teplotách [2].

V případě nepřímé výměny tepla – v systému je vřazený další okruh – teplo, například z odpadních plynů, je předáváno dalšímu médiu, plynu nebo organickému oleji. V tomto případě může být termoelektrický systém umístěn zvlášť. Výhodou je potlačení nežádoucích skokových změn na výkon termoelektrického generátoru, protože vřazená větev má setrvačný vliv. Pokud je pracovním médiem vzduch nebo organický olej, údržba tohoto typu systému je snazší. Nevýhodou je potřeba dodatečné energie pro pohon čerpadla nebo kompresoru [33]. Tento systém se používá u velkých generátorů (např. v automobilech), kde zdroji tepla jsou tekutiny, jejichž teplota je stejná nebo větší než maximální pracovní teplota termoelektrických článků [2].

Odcházející teplo je u malých termoelektrických systémů rozptýleno přirozenou nebo nucenou konvekcí do okolního prostředí. U velkých systémů je teplo zpravidla předáváno pracovní kapalině cirkulující v uzavřeném okruhu.

5 PŘÍKLADY APLIKACÍ TERMOELEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ

5.1 Miniaturní termogenerátory

Jsou to tenkovrstvé mikrogenerátory pracující v rozsahu výkonů od μW do mW . Mohou být použity jako zdroje autonomních systémů nebo jako detektory a senzory, například v samonapájecích výstražných systémech hlídající teplotu, v pyrometrech, v prvcích používaných k indikaci magnetických sil, chemických látek nebo radiace. Jednou z možných aplikací jsou systémy pro získávání energie z tepla lidského těla. Společnosti Seiko a Citizen vyrábějí termoelektrické hodinky, využívající takových miniaturních generátorů. Množství tepla odcházející kůží je přibližně 5 mW/cm^2 . Hodinky s průměrem 3 cm tak mohou získat 30 mW až 40 mW, což je množství energie dostatečné pro zajištění provozu [32], [33]. Představují zajímavou alternativu k bateriím.

5.2 Energy Harvesting zařízení

Energy Harvesting nebo také Energy Scavenging je označení způsobu získávání elektrické energie z okolních dostupných zdrojů energie. Těmito zdroji jsou: sluneční záření, chemické a teplotní gradienty, barometrické výkyvy, proudění tekutiny, okolní vibrace, elektromagnetické záření, lidská činnost, biologická energie, atd. Tato technologie může výrazně ovlivnit nebo eliminovat použití chemických zdrojů energie a nachází uplatnění především u nízkoenergetických bezdrátových zařízení, v dopravě, správě budov nebo autonomních aplikacích [15],[18].

O vývoj bezdrátových zařízení a současně řešení jejich napájení se v poslední době výrazně zvyšuje zájem. Bezdrátové senzory nacházejí uplatnění v širokém spektru aplikací, například při monitorování rozsáhlých technických soustav. Problémem těchto senzorů je však jejich napájení. Baterie se ne vždy jeví jako vhodný zdroj elektrické energie, protože jejich životnost je většinou limitujícím faktorem. Řešením problému může být zvýšení energetické hustoty akumulčních prvků nebo použití některého druhu přítomné okolní energie. Zařízení nebo senzory pak mohou být umístěny i v nebezpečném nebo citlivém prostředí, kde by umístění chemických zdrojů bylo jinak nepřijatelné. Získají časově neomezený zdroj energie, protože životnost napájecího zařízení je omezena pouze životností jednotlivých komponent. Tento princip získávání energie lze využít i pro napájení zařízení jako jsou lékařské pomůcky, přístroje a mnoho dalších. Určujícím faktorem pro takový způsob napájení je požadavek dané aplikace na množství dodávané elektrické energie, případně maximální velikost nebo hmotnost takového generátoru [18].

Termoelektrické napájení je jednou z možností jak získávat potřebnou energii. Využívá se rozdílné teploty povrchu zařízení, přístrojů nebo látek a teploty okolního prostředí. Existuje-li takový teplotní gradient, dochází k přestupu tepla. Zařízení jsou vybavena žebrovanými chladiči. Přivedený tepelný tok prochází skrze termoelektrický modul a je dále konvekcí rozptýlen do okolního prostředí. V souvislosti s textem v předchozím odstavci, jsou tato zařízení schopna dodávat energii pouze po dobu trvání teplotního gradientu nebo do doby vyčerpání energie superkapacitoru [3] nebo

záložní baterie, které mohou být součástí zařízení a které se mohou za normálního provozu dobíjet.

Zdrojem tepla může být [23]:

- výrobní zařízení;
- parní potrubí;
- teplo vznikající třením;
- elektrická rozvodná síť;
- ústřední vytápění;
- klimatizace;
- horké/studené kapaliny nebo plyny;
- motory;
- ložiska.

Komerčně dostupné generátory jsou schopné pracovat přibližně od teplotního rozdílu $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ a většího. Výkony generátorů se pohybují v řádu mW.

Příklady aplikací:

TE-power ring (Obr. 13) je bezbateriové a bezdrátové zařízení, které využívá tepla vznikajícího za provozu v ložiscích. Základna zařízení je v přímém kontaktu s ložiskem. O přeměnu se starají čtyři mikrogenerátory MPG-D751. Součástí zařízení je měnič napětí, mikrokontrolér a bezdrátový modul vysílající v pásmu 2,4 GHz:



Obr. 13 Bezdrátový monitorovací systém hlídající teplotu ložisek [8]

TE-qNode (viz Obr. 14) je obdobné bezdrátové zařízení. Využívá tepla vznikající v rozvodných vodičích. Zařízení monitoruje teplotu a prostřednictvím bezdrátového modulu informuje o stavu pásových vodičů. K provozu mikrogenerátoru stačí $5 \text{ }^\circ\text{C}$ rozdílu teploty mezi vodičem a okolní vzduchem. Výrobce udává životnost je 20 let [23].

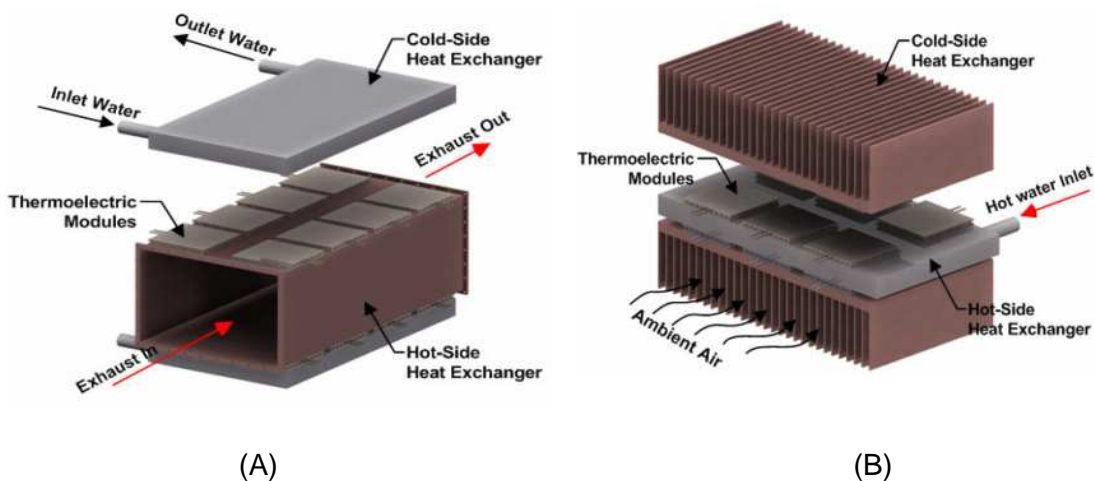


Obr. 14 Bezdrátový monitorovací systém sledující teplotu rozvodných vodičů [41]

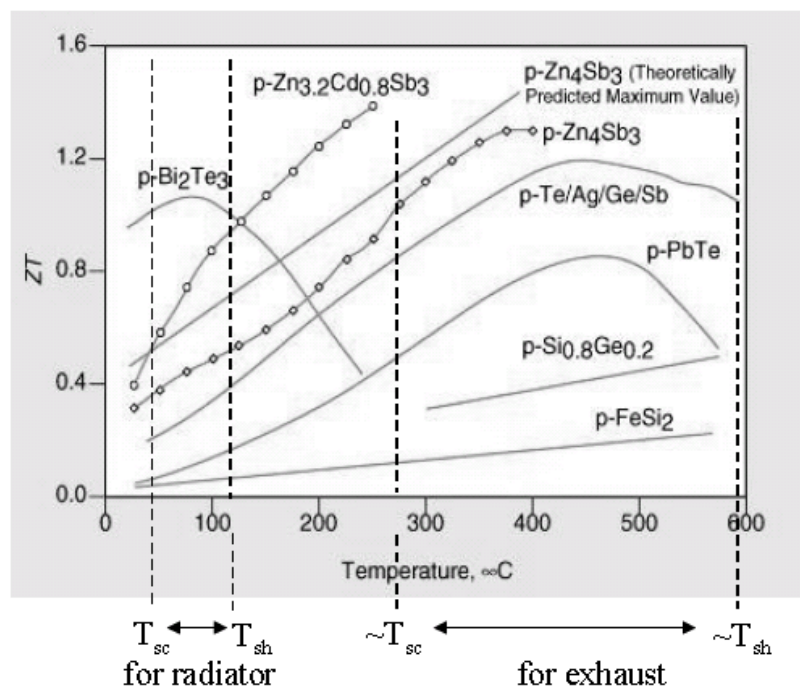
5.3 Termoelektrické generátory v automobilech

Rychlý nástup moderní elektroniky v osobních automobilech má za následek potřebu velkého množství elektrické energie. Asistenční systémy sledující dopravní situaci, stav vozidla nebo řidiče, navigační systémy, elektronika pro pohon vozidla a mnoho dalších jsou zařízení, která se nepřímou formou podílí na celkové spotřebě paliva [34], [47].

Bez užítku z paliva odchází u benzínových spalovacích motorů zhruba 40 % energie výfukovými plyny a dalších přibližně 30 % energie chladicí soustavou. U naftových motorů je to přibližně 25 % výfukovými plyny a 35 % chladicí soustavou. Přeměna takto odvedené energie pomocí termoelektrického generátoru by mohla pomoci pokrýt spotřebu elektrické energie, snížit spotřebu paliva, zlepšit ekonomiku provozu a zvýšit uživatelský komfort [4], [34]. Jak z výše uvedeného vyplývá, snahou výzkumníků je vyžít termoelektrických generátorů ve výfukovém potrubí nebo/a v chladicím systému. Na Obr. 15 je vyobrazena jedna z možných konstrukcí takových termoelektrických generátorů. Na Obr. 16 jsou vyobrazeny odpovídající termoelektrické materiály a jejich účinnost. K dispozici máme materiály, jejichž teplotní rozsah v okolí maximální účinnosti koresponduje s pásmem teplot, při nichž jsou generátory v automobilech provozovány.



Obr. 15 Termoelektrický generátor využívající (A) tepla výfukových plynů, (B) tepla chladicí kapaliny [34]



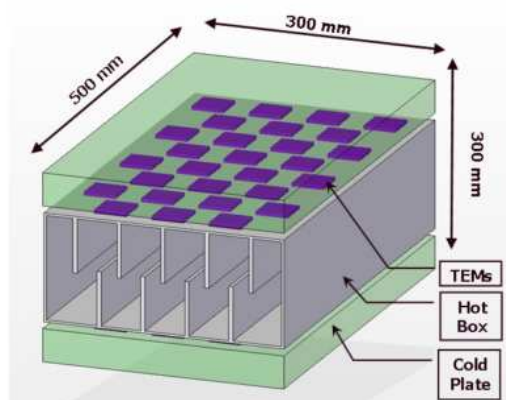
Obr. 16 Účinnost a typy jednotlivých termoelektrických materiálů používaných v automobilových generátorech [4]

První automobilový termoelektrický generátor byl sestaven již v roce 1963. Zájem o tuto technologii vzrostl ale až s objevením účinnějších a levnějších materiálů [34]. Skoro až do konce století měl nejlepší termoelektrický materiál koeficient účinnosti pouze $ZT \cong 1$, čemuž odpovídala celková účinnost přibližně 5 % až 10 % a tato účinnost rychle klesala při teplotách vyšších než 230 °C [9].

Nyní následuje přehled zkonstruovaných pokusných automobilových generátorů a jejich krátký popis.

Univerzita Karlsruhe

V roce 1988 byl v Německu na Univerzitě v Karlsruhe sestaven termoelektrický generátor pro automobil Porsche 944. Použitým termoelektrickým materiálem byl FeSi_2 dopovaný hliníkem a kobaltem. Výměník tepla na straně spalin byl vyroben ze slitiny Hastelloy X². Výměník na studené straně článků byl vyrobený z hliníku a udržoval studenou stranu článků na teplotě přibližně 95 °C. Plocha volného kanálu byla 23 cm². Celkové rozměry generátoru byly 500 mm x 300 mm x 300 mm. Volný prostor mezi články byl zaizolován. Jako elektrická izolace mezi termoelektrickými články a výměníkem byla použita slídová podložka o tloušťce 0,1 mm. Maximálního výkonu 58 W bylo dosaženo při plném zatížení motoru a teplotním rozdílu $\Delta t = 490$ °C.

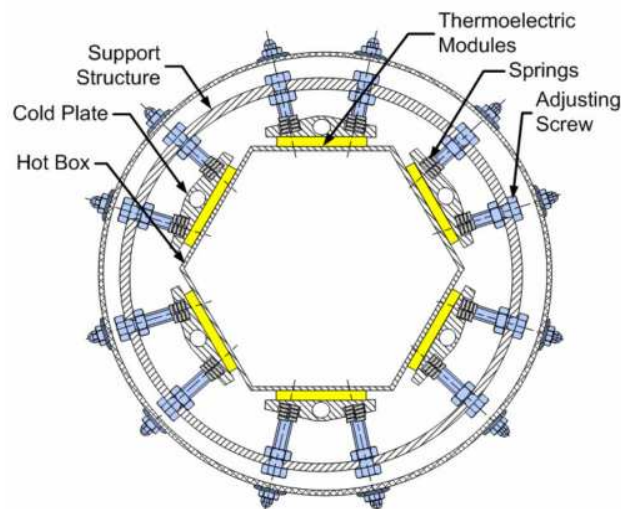


Obr. 17 Termoelektrický generátor testovaný Univerzitou v Karlsruhe [34]

Hi-Z Inc.

V roce 1992 společnost Hi-Z Inc., výrobce Peltierových článků, představila termoelektrický generátor instalovaný v naftovém nákladním automobilu. Generátor se skládal ze 72 článků HZ-13, které byly vyrobeny ze slitin teluridu bismutitého. Výměník na straně spalin byl vyroben z uhlíkové oceli s tepelnou vodivostí 50 W/mK. Teplota na stěně výměníku byla 230 °C. Výměník na studené straně článků byl vyrobený z hliníku a teplota jeho stěny byla udržována na 30 °C. Délka generátoru byla 48,26 cm, průměr generátoru 22,86 cm a celková hmotnost 13,6 kg. Jak jde vidět na Obr. 18, teplá strana generátoru vznikla svařením šesti ocelových plechů. Uvnitř tohoto šestiúhelníku se nacházelo celkem 90 podélných žeber. Generátor byl projektován na výkon 1 kW elektrické energie, ale po sestavení a následném testování byl naměřen výkon pouze 400 W.

² Pozn.: Cr = 22 %, Fe = 18 %, Mo = 9 %, W = 0,6 %, Co = 1,5 %, C = 0,1 %, Ni = 47 %

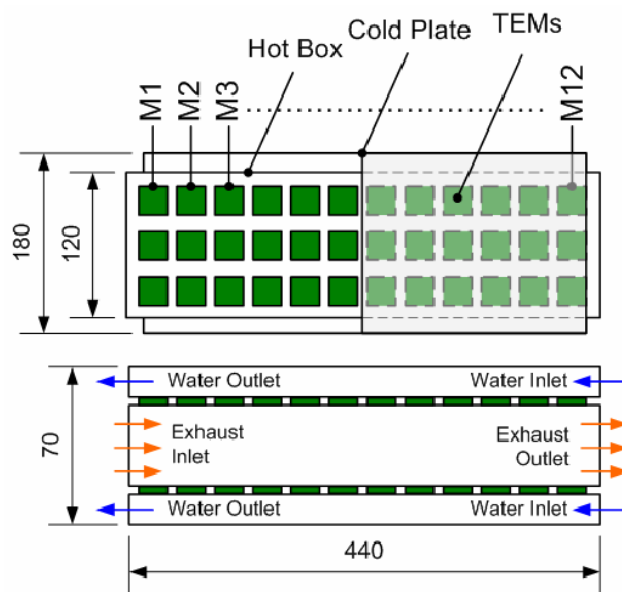


Obr. 18 Termoelektrický generátor sestavený společností Hi-Z Inc. [34]

Nissan Motors Inc.

V roce 1998 publikoval výsledky z testování svého generátoru výrobce vozů Nissan. Jeho generátor byl složen ze 72 modulů. Použitým termoelektrickým materiálem byl SiGe. Při dosaženém teplotním rozdílu 563 °C dosahoval výkon každého článku 1,2 W. Rozměry generátoru byly 440 mm x 180 mm x 70 mm, vážil 14,5 kg. Články byly umístěny mezi slitinu SUS304³ s tepelnou vodivostí 21,5 W/mK a dva vodou chlazené hliníkové chladiče. Stejně jako generátor od společnosti Hi-Z Inc., měl tento generátor pro lepší přenos tepla k článkům uvnitř spalinového kanálu žebra. Články byly seřazeny ve dvanácti řadách, kdy každá řada sestávala ze tří článků (Obr. 19).

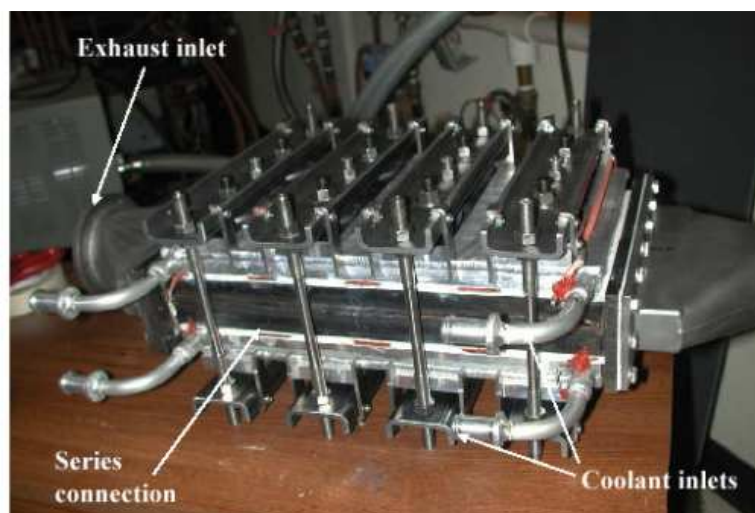
³ Pozn.: C<0,08 %, Cr=17,5 %-20 %, Ni=8 %-11 %, Mn<2 %, Si<1 %, P<0.045 %, S<0,03 %



Obr. 19 Termoelektrický generátor sestavený společností Nissan Motors Inc. [34]

Clarksonova univerzita/Delphi Systems

V roce 2004 byly zveřejněny výsledky pokusného 300W termoelektrického generátoru vzniklého ze spolupráce Clarksonovy univerzity a společnosti Delphi Systems. Práce byly financované americkým Ministerstvem energetiky a NYSERDA⁴. Generátor byl složen z 16 článků HZ-20 vyrobených ze slitin teluridu bismutitého. Výměník na straně spalín byl vyroben z uhlíkové oceli, na studené straně byl hliníkový vodou chlazený výměník. Rozměry generátoru byly 330 mm x 273 mm x 216 mm s celkovou hmotností 39,1 kg.



Obr. 20 Pokusný 300W termoelektrický generátor sestavený Clarksonovou univerzitou [34]

⁴ New York State Energy Research & Development Authority

Články byly pravidelně rozloženy na obou stranách generátoru a spojeny elektricky do série. Oproti předchozím modelům byl již tento vybavený elektrickým měničem. Ten upravoval výstupní napětí z generátoru na požadovaných 12 V a 24 V, ale v průběhu zkoušek byl poškozen. Generátor byl testován při různých rychlostech automobilu. Nejvyšší naměřená hodnota výkonu byla 255,1 W.

BMW

Americké ministerstvo energetiky v rámci svých výzkumů získávání energie z odpadního tepla podporuje vývoj vysoce účinných termoelektrických generátorů. Vzniklo několik pracovních týmů, které byly složeny z výrobců Peltierových článků (Marlow, Hi-Z Technology, Tellurex), automobilových výrobců (General Motor Corporation, BMW, Caterpillar Inc), dalších společností a univerzit. V rámci svého zkoumání vyvinula společnost BMW termoelektrický generátor (Obr. 21), který propaguje ve svém programu Vision EfficientDynamics. Generátor byl složený z 30 článků, z nichž 12 bylo vysokoteplotních. Výkon při rychlostech 130 km/h dosahoval více, než 200 W. Později se ho podařilo navýšit až na 500W. Vizí společnosti je dosáhnout výkonu 1kW [6].

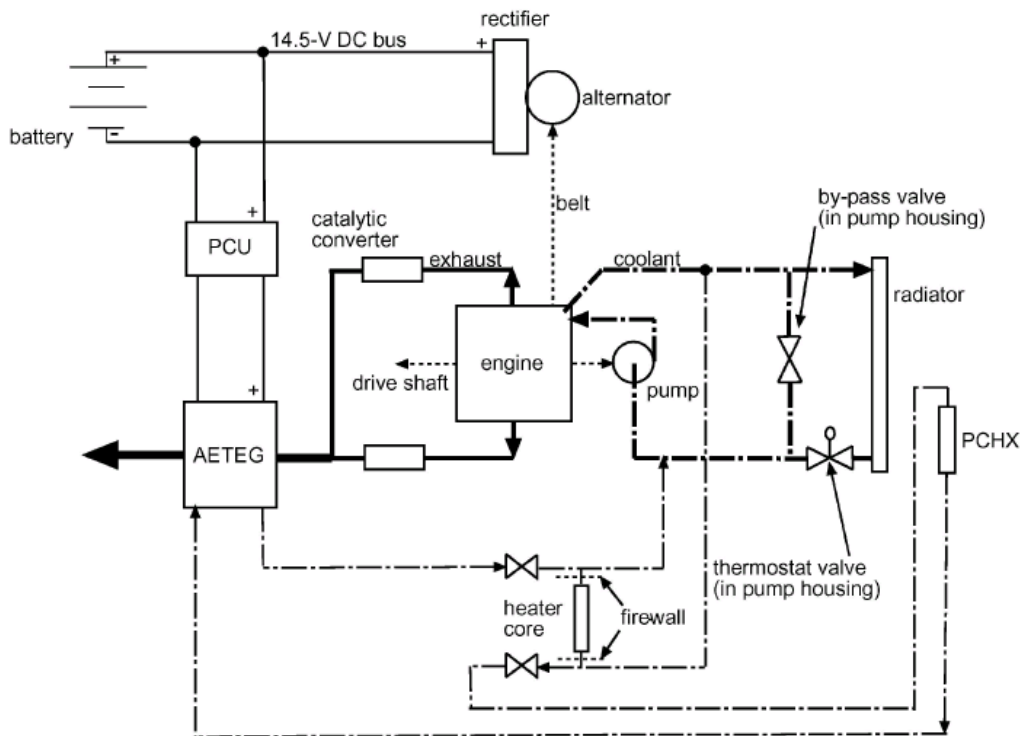


Obr. 21 Pohled na prototyp termoelektrického generátoru zkonstruovaného společností BMW [48]

Specifickou vlastností termoelektrických generátorů je schopnost dodávat velké výstupní proudy (5 A až 10 A), což je výhodné pro dobíjení baterií v automobilech [33]. Výkon generátoru roste se zatížením motoru vozidla [43]. Vliv generátoru na vozidlo není pouze pozitivní. Nezanedbatelný je zpětný tlak na motor, který generátor vytváří a potřeba dodatečného příkonu čerpadla v chladicím systému [43]. Při správném provedení převažují výhody. Podle [48] může úspora paliva dosahovat 5 % celkové spotřeby vozidla, což je více než při současném použití systémů Start-stop (vypínání motoru vozidla při stání) a rekuperace energie při brzdění.

Zatímco první generace termoelektrických generátorů má za následek zmenšení alternátoru a/nebo zkrácení doby jeho provozu, druhá generace generátorů by podle představ výzkumníků měla alternátor zcela nahradit. Generátory by měly být nejen ve výfukovém potrubí, ale i v chladicí soustavě. Nyní se zvažuje využití termoelektrických generátorů jako zdrojů energie v autobusech, terénních vozidlech, těžkých nákladních automobilech a lokomotivách. V okamžiku, kdy budou běžně dostupné termoelektrické materiály s koeficientem $ZT > 3$, je možné začít uvažovat o náhradě spalovacího motoru za termoelektrický hybrid s oddělenou spalovací komorou. Navíc, při teplotách nižších než $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ by ve spalovací komoře mohla být potlačena tvorba oxidů dusíku [9].

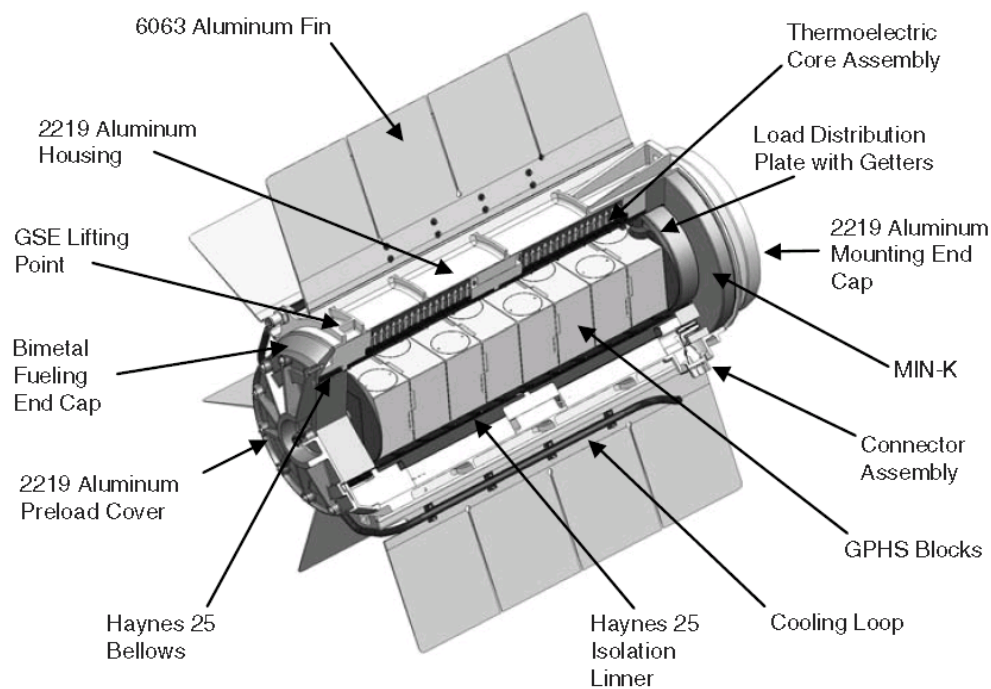
Automobilové termoelektrické generátory bývají často v literatuře označovány zkratkou ATEG nebo AETEG. Na Obr. 22 je zobrazeno funkční schéma automobilového systému využívajícího termoelektrického generátoru.



Obr. 22 Blokové schéma automobilového systému s termoelektrickým generátorem [43]

5.4 Radioizotopové termoelektrické generátory

Kde lze spalovat fosilní paliva za přítomnosti kyslíku, bývá zdrojem tepla pro generátory spalování. Kde nelze tuto možnost využít, mohou být zdrojem tepla radioaktivní izotopy. Tyto zdroje umožňují bezúdržbový provoz po dlouhou dobu. Příkladem může být sonda Voyager vypuštěná v roce 1977 a pracující po dobu více než 17 let [32]. Na Obr. 23 je přibližena konstrukce takového radioizotopového generátoru. Tyto generátory bývají označovány zkratkami RTEG, RITEG nebo MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator).



Obr. 23 Radioizotopový termoelektrický generátor [33]

6 DRUHOTNÉ ENERGETICKÉ ZDROJE

Je snahou využívat termoelektrických systémů jako zdrojů elektrické energie tak, aby se aktivně podílely na snižování negativních vlivů průmyslové výroby na životní prostředí [19]. Možnosti využití těchto systémů jsou ale do jisté míry omezené.

6.1 Charakteristika odpadního tepla jako zdroje energie

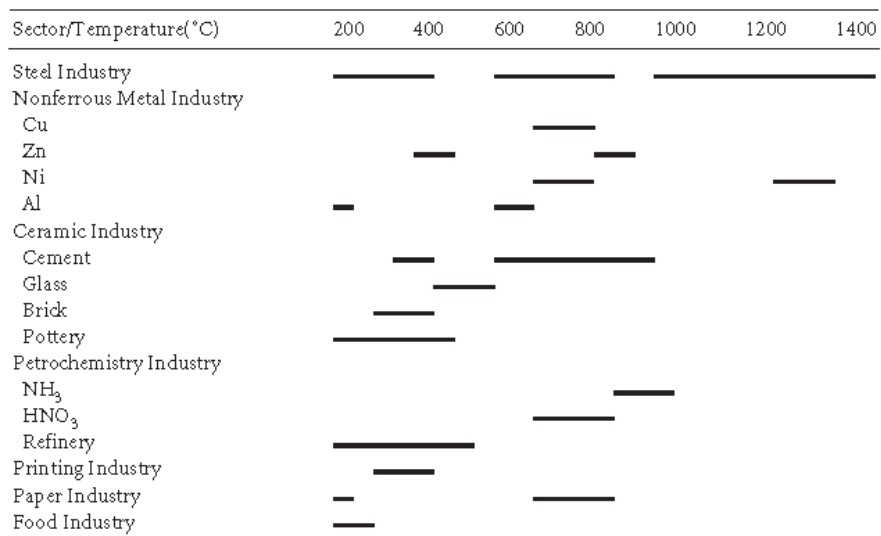
Druhotné energetické zdroje (DEZ) nebo také druhotné zdroje energie vznikají jako vedlejší produkt technologie výroby nebo jiné lidské činnosti. Jejich následné využití, byť i částečné, zvyšuje celkovou efektivnost a úroveň technologie výroby, snižuje spotřebu primárních energetických zdrojů a často představuje ekonomické úspory. Podle druhu nositele energie je možné DEZ rozdělit na [20]:

- chemicky vázanou energii v odpadních palivech a odpadech z technologických procesů;
- citelné teplo (fyzické teplo) odpadních látek;
- potenciální energii plyných, případně kapalných látek.

Z hlediska poměru mezi kvalitativním a kvantitativním ukazatelem DEZ rozlišujeme:

- nízkopotenciální energie – odpadní teplo chladicí vody technologických zařízení, chladicí vody parních turbín, apod.;
- energie středního potenciálu – citelné odpadní teplo spalin průmyslových pecí (teplota spalin 500 °C – 1000 °C), apod.;
- energie s vysokým potenciálem – chemicky vázané teplo odpadních plynů z technologických procesů (vysokopecní plyn, koksárenský plyn, degazační plyn, apod.).

Mezi producenty DEZ patří především hutní, chemický a energetický průmysl, dřevozpracující průmysl, zemědělský průmysl, sklářský a keramický průmysl, potravinářství, čistírny a sušárny. Na Obr. 24 jsou zobrazeny přibližné rozsahy teplot jednotlivých průmyslových sektorů.



Obr. 24 Rozsah teplot odpadního tepla vznikajícího v průmyslu [33]

Jak vyplývá z výčtu, termoelektrické systémy jsou schopné využívat přímo citelného tepla odpadních látek, resp. energií středně- nebo nízkopotenciálních. Komerčně dostupné vysokoteplotní články umožňují přeměnu tepla spalin o teplotách až 1000 °C. Takový způsob využití DEZ, na rozdíl od konvenčních způsobů, ale nemusí mít vzhledem k nízké účinnosti termoelektrické přeměny prokazatelný ekonomický přínos.

Obecně je technické řešení využívání druhotných zdrojů ve většině případů možné, při praktickém řešení však využívání často brání právě ekonomická efektivnost. Provozní náklady využívaného zdroje musí být nižší než při využívání jiných zdrojů energie, které pochází z primárních energetických zdrojů [20].

Chemicky vázanou energii v pevných, kapalných nebo plyných odpadních látkách je možné přeměnit na tepelnou energii. Buď přímo, jako v případě spalování minerálních a organických odpadů nebo s mezikrokem, biologickým nebo tepelným rozkladem odpadů. Poté následuje spalování vzniklých plynů. Uvolněné teplo může sloužit pro technologické účely nebo pro výrobu páry v parním kotli a výrobě elektrické energie. Citelného tepla pevných látek je možné rovněž využít v odpadních kotlích. Citelného tepla plyných látek (např. z rotačních cementářských pecí, spaloven odpadů, a dalších) je možné využít pro ohřev spalovacího vzduchu v rekuperátorech a regenerátorech nebo pro výrobu tepla k vytápění, ohřevu teplé užitkové vody, případně pro technologické účely. Využití citelného tepla kapalných látek běžnými způsoby je komplikovanější. Vesměs se jedná o nízkopotenciální teplo a možnosti jeho využití jsou z důvodu malé koncentrace energie v nositeli energie omezené. Získané teplo se dá použít například pro ohřev TUV, pro předeřev napájecí vody kotlů, případně pro částečný ohřev spalovacího vzduchu. Potenciální energii plyných látek je možné využít expanzí v turbínách k výrobě elektrické energie [20].

Využitelnost DEZ v provozech je podmíněna technickými možnostmi, ekonomickými podmínkami, v některých případech podmínkami životního prostředí a často je důležitá také podmínka využitelnosti v daném místě. Možnosti využití odpadního tepla, například k ohřevu vody nebo výrobě páry a následnému vytápění objektů, jsou pro letní měsíce nepříznivé. Protože v tomto období lze toto teplo využívat jen pro ohřev teplé užitkové vody, snižuje se celoroční využití zdrojů a ekonomická efektivnost takových investic [20].

Ideální případem by bylo získat elektrickou energii, která je vysoce jakostní a její využitelnost je mnohem větší. Výroba elektřiny je v mnohých případech, s použitím konvenčních způsobů přeměny, velmi obtížně realizovatelná. Jednotlivé zdroje se od sebe mohou výrazně lišit, stejně tak parametry tepla. Jak je uvedeno výše, nositelem energie může být plyn, kapalina nebo pevná látka. Manipulace s ní nemusí být snadná. Může docházet ke kolísání hmotnostního toku a teploty. Některé zdroje produkují jen nízkopotenciální energii, typický je i velký počet malých a současně rozptýlených zdrojů. Mnohdy ani není možné zajistit stabilní přísun energie o požadovaných parametrech. V některých případech by použití termoelektrických systémů mohlo přicházet v úvahu. Mohou se přizpůsobit požadovanému rozsahu teplot, jsou škálovatelné v rozsahu mW až po stovky kW, neobsahují pohyblivé části a jsou schopné bezúdržbového provozu po dobu tisíců hodin. Výzkum a vývoj termoelektrických zařízení se uskutečnil v mnoha zemích, jako jsou USA, Británie, Ukrajina, Korea, Austrálie a Japonsko [33].

7 KOGENERACE

Samostatně termoelektrické generátory pracují jako zdroje elektrické energie ve specifických případech, kde vyniknou jejich přednosti. Možnost použití v odlehlých, těžko přístupných nebo nebezpečných oblastech ospravedlňuje vysoké provozní náklady i nutnost spalování drahých primárních paliv. Na druhou stranu, bude-li generátor využívat jako zdroje odpadní energie, účinnost systému jako celku může vzrůst i přes nízkou účinnost samotného generátoru. Jednou z možných a ve světě zkoumaných aplikací je kombinace společné výroby tepla a elektřiny ve spojení s termoelektrickými generátory.

7.1 Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie

Kombinovaná výroba je společná postupná nebo současná produkce konečných forem energií, nejčastěji elektrické a tepelné energie, přeměněných z primární formy v tradičních řetězcích. Kombinovanou výrobou můžeme vzhledem k využívání jednoho primárního zdroje vstupujícího do transformačního řetězce výrazně přispět ke zvýšení účinnosti. Při vhodně navržené konfiguraci a provozu mohou být i náklady na provoz kogeneračního systému menší než u oddělených systémů [5].

Základní členění kogeneračních systémů (KS) je podle pořadí využívání produkovaných energií. Kogenerační systémy lze charakterizovat jako [5]:

- horní kogenerační systémy;
- dolní kogenerační systémy.

U horních KS dochází v energetickém zařízení nejprve k získání tepelné energie. Teplo o vysokých parametrech je využíváno pro potřeby technologie a poté je zaváděno do energetického zařízení (tepelný motor), kde se získává technická práce (mechanická energie), která se transformuje na elektrickou energii. Odvedené teplo z tepelného oběhu je možné využít pro další tepelné účely nebo představuje ztráty vzniklé při transformaci. U tohoto typu systému jsou vyžadovány vyšší teploty, protože pro efektivní získání technické práce a tím i výrobu elektrické energie, je nutná poměrně vysoká vstupní teplota [5].

U dolního KS se provádí nejdříve výroba elektrické energie, a užitečná tepelná energie se získává z odváděného tepla z tepelného oběhu [5].

Z fyzikálního hlediska lze kogenerační technologie rozčleňovat podle počtu transformací do dvou základních skupin, kdy se přeměna energií provádí [5]:

- nepřímým způsobem;
- přímým způsobem.

Při nepřímém způsobu transformace se přeměna energií provádí prostřednictvím více energetických transformací. Nejprve je provedeno uvolnění tepelné energie obsažené v palivu nebo regenerace tepelné energie z primárního zdroje, a poté je získávána technická práce, kterou lze využívat pro mechanický pohon spotřebičů. Mechanická energie se transformuje na elektrickou a v případě potřeby se upravují její parametry [5].

U přímého způsobu přeměny se energie paliva mění přímo na elektrickou. Podle potřeby se elektrická energie může rovněž upravovat na požadované parametry (napětí, proud) [5].

7.2 Kogenerační jednotka s termoelektrickým generátorem

U horního KS by mohl termoelektrický generátor využívat tepla odvedeného z oběhu a snížit tak ztráty vzniklé při transformaci. Podobně u dolního KS by mohlo být využito teplo, které nelze využít na výrobu elektrické energie. V případě kombinace termoelektrického generátoru s teplovodním kotlem, řešené v předkládané práci, nespĺňuje taková kombinace kritéria horního ani dolního KS. Na rozdíl od horního KS není potřeba mechanické práce pro pohon alternátoru. Od dolního KS se liší pořadím vyráběných energií. Z fyzikálního hlediska se jedná o nepřímý způsob transformace energie⁵. V kotli dochází k uvolňování tepelné energie paliva, které je využíváno pro ohřev vody, a tepla odcházejícího z oběhu je využíváno pro výrobu elektrické energie.

7.3 Účinnost kombinované výroby tepla a elektrické energie

Hodnocení kogenerační výroby je možné provádět pomocí mnoha ukazatelů. Jedním z hlavních rysů výrobních řetězců je účinnost transformace primárního paliva [5].

Účinnost přeměny energie přivedené v palivu na elektrickou energii se spočítá podle vztahu [5]:

$$\eta_E^{KVET} = \frac{E}{Q_{pal}} = \frac{E}{m_{pal} \cdot Q_p} = \frac{P_E}{M_{pal} \cdot Q_p} \quad [-] \quad (7.1)$$

kde m_{pal} je hmotnost nebo objem paliva, Q_p výhřevnost v objemové nebo hmotnostní jednotce, M_{pal} hmotnostní nebo objemový tok paliva a P_E hodnota elektrického výkonu. Tepelná účinnost přeměny energie přivedené v palivu je definována vztahem

$$\eta_T^{KVET} = \frac{Q_{uv}}{Q_{pal}} = \frac{Q_{uv}}{m_{pal} \cdot Q_p} = \frac{P_T}{M_{pal} \cdot Q_p} \quad [-] \quad (7.2)$$

kde P_T je hodnota tepelného výkonu. Celková účinnost přeměny přivedené energie na užitečnou energii je součtem jednotlivých účinností [5]:

$$\eta_C^{KVET} = \eta_E^{KVET} + \eta_T^{KVET} = \frac{P_E + P_T}{M_{pal} \cdot Q_p} \quad [-] \quad (7.3)$$

⁵ Samotná termoelektrická přeměna tepla v elektřinu je označována jako přímá přeměna.

Protože při vzájemném porovnávání tepla a elektřiny je kvalita tepelné energie menší než elektrické, není úplně správné sloučovat dohromady elektrickou a tepelnou energii. Z tohoto důvodu je definována exergetická účinnost. Exergetická tepelná účinnost se spočítá podle vztahu [5]:

$$\zeta_T^{KVET} = \frac{E_{uv}}{E_{pal}} = \frac{E_{uv}}{m_{pal} \cdot \varepsilon_i} \quad [-] \quad (7.4)$$

kde E_{uv} je energetický tok odpovídající Q_{uv} , E_{pal} je exergetický tok paliva a ε_i měrná exergie (vztažená na hmotnostní jednotku) paliva. Pak celková exergetická účinnost kogenerační jednotky se spočítá jako [5]:

$$\zeta_C^{KVET} = \eta_E^{KVET} + \zeta_T^{KVET} = \frac{E + E_{uv}}{E_{pal}} \quad [-] \quad (7.5)$$

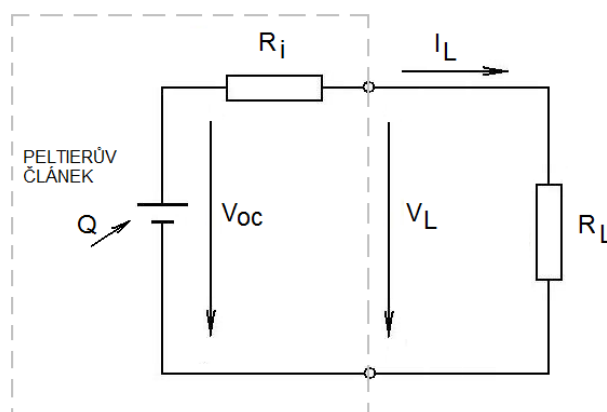
8 TRANSFORMACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

8.1 Charakteristika termoelektrického generátoru jako zdroje elektrické energie

Peltierův článek je možné charakterizovat jako zdroj napětí s vnitřním odporem R_i , který je vyjádřen jako:

$$R_i = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad [\Omega] \quad (8.1)$$

kde V_{oc} je svorkové napětí článku úměrné teplotnímu rozdílu ΔT a Seebeckově koeficientu α a I_{sc} je zkratový proud [35]. Protože článek má nezanedbatelný vnitřní odpor, se vzrůstajícím odběrem proudu bude i větší část dostupného výkonu ztracena v článku [39].



Obr. 25 Náhradní schéma Peltierova článku

Napětí na článku pracujícího do zátěže se spočítá podle vzorce [39]:

$$V_L = V_{oc} \frac{R_L}{R_i + R_L} \quad [V] \quad (8.2)$$

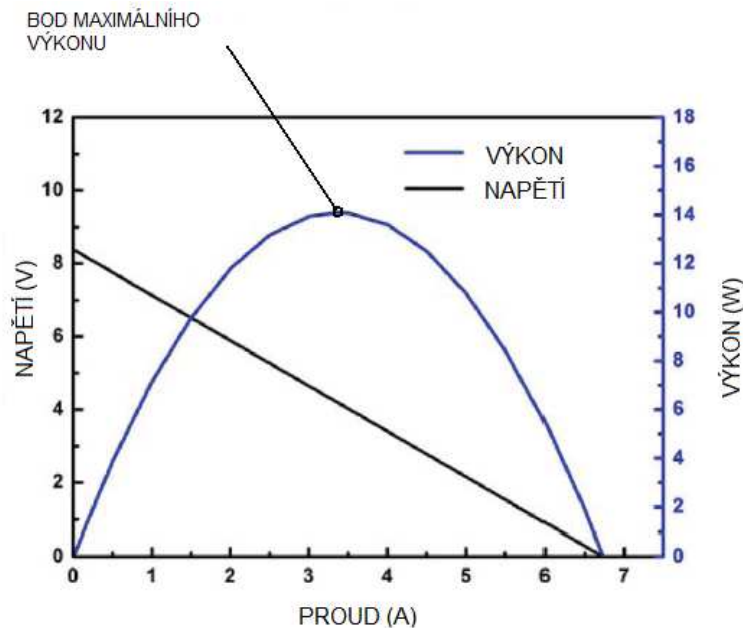
kde R_L je odpor zátěže. Výsledné napětí V_L se mění úměrně zatěžovacímu odporu. Největšího výkonu článku bude dosaženo v případě, kdy odpor zátěže se bude rovnat vnitřnímu odporu článku [39]. Pak, v tomto konkrétním případě, bude podle vzorce 8.2 napětí při zátěži rovno polovině svorkového napětí:

$$V_{Lmax} = \frac{V_{oc}}{2} \quad [V] \quad (8.3)$$

a tomu odpovídající maximální možný výkon článku bude roven:

$$P_{max} = \frac{V_{oc}^2}{4R_i} = \frac{(R_i \cdot I_{sc})^2}{4} \quad [W] \quad (8.4)$$

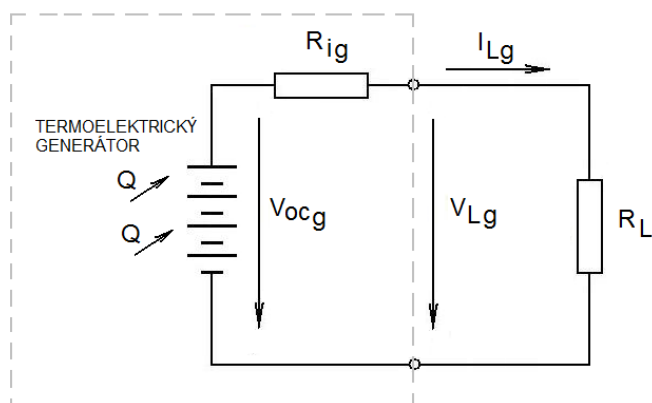
Na Obr. 26 je zobrazena výkonová charakteristika komerčně dostupného článku. Bod, ve kterém je výkon článku maximální, je tzv. bodem maximálního výkonu a v literatuře bývá označován jako MPP (Maximum Power Point).



Obr. 26 Výkonová charakteristika Peltierova článku [12]⁶

Termoelektrický generátor se skládá z řady Peltierových článků. Náhradní schéma generátoru se liší v závislosti na použité topologii. Na Obr. 27 je náhradní schéma pro generátor složený ze série Peltierových článků. Vnitřní odpor generátoru je pak roven součtu vnitřních odporů článků.

⁶ obrázek byl upraven pro účely DP



Obr. 27 Náhradní schéma termoelektrického

Výkon generátoru se spočítá v závislosti na použité topologii: sériové, paralelní nebo sérioparalelní. Vnitřní odpor jednoho článku souvisí s termoelektrickými vlastnostmi použitého polovodičového materiálu a mění se s teplotou.

8.2 DC-DC měniče

Z předchozí podkapitoly vyplývá, že maximálního výkonu článku je dosaženo při spojení se zátěží o stejném odporu, jako je vnitřní odpor Peltierova článku⁷. Přímé spojení článku, resp. generátoru k zátěži by nebylo účelné. Při připojení zátěže s jiným vnitřním odporem bude docházet ke ztrátám. Pro napájení spotřebičů navíc požadujeme stálé napětí.

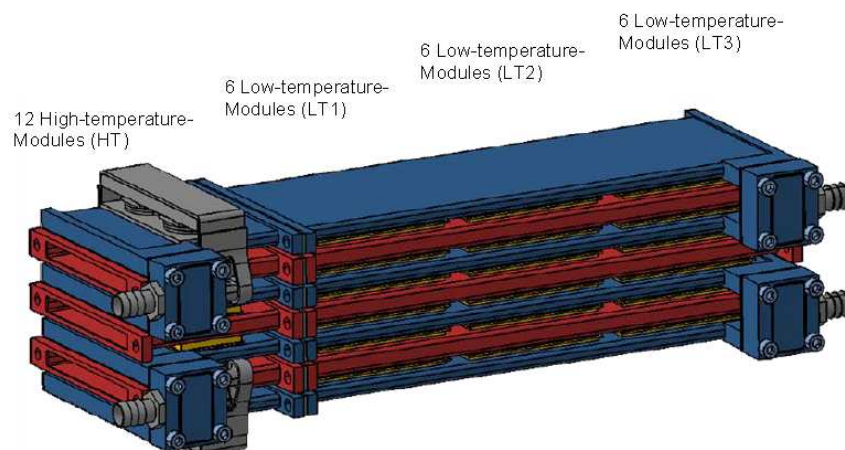
K přeměně elektrické energie se používají měniče. U menších generátorů jsou používány stejnosměrné měniče (DC/DC), rozsáhlé termoelektrické generátory pak mohou pracovat se střídači (DC/AC) a dodávat energii do rozvodné sítě. Účelem měničů je transformovat vstupní stejnosměrné napětí na jiné výstupní napětí a při tom získávat z generátoru maximální výkon. Princip měničů je založen na pulzně šířkové modulaci PWM [30]. Funkce měničů v termoelektrických generátorech úzce souvisí s další kapitolou.

8.3 Tepelné zóny

Účelem termoelektrických generátorů je přeměna tepelné energie na elektrickou. V případech, kdy se termoelektrický generátor skládá z jednoho Peltierova článku, stabilního tepelného zdroje a zátěže, je návrh termoelektrického systému snadný. Většina tepelných zdrojů ovšem stabilních není, dochází ke kolísání teploty. Výkon termoelektrických článků je úměrný teplotě. Její kolísání a prostorové rozložení má na výkon nežádoucí vliv a je třeba ho potlačit. U velkých termoelektrických systémů jsou články pro dosažení požadovaného napětí řazené do sérií a tyto série paralelně

⁷ Výrobci jsou schopni optimalizovat termoelementy článků tak, aby články vyhovovaly konkrétní aplikaci [39].

spojovány pro získání požadovaného výkonu. Není možné zabránit vzniku ztrát vlivem rozdílných výkonů jednotlivých článků jejich spojováním v případech, kdy teplotní rozdíly mezi jednotlivými moduly jsou velké. Ztráty rostou se zvětšující se teplotní diferencí a úzce souvisí s topologií článků. Mohou být zmírněny vhodnou volbou měniče se systémem hlídání maximálního výkonu (MPPT) a rozložením článků podél izotermálních oblastí [25],[26].



Obr. 28 Pohled na automobilový termoelektrický generátor BMW a jednotlivé skupiny Peltierových článků [6]

Na Obr. 28 je zobrazen automobilový termoelektrický generátor BMW. Jednotlivé Peltierovy články jsou seřazeny vždy ve skupinách ve směru klesající teploty spalin.

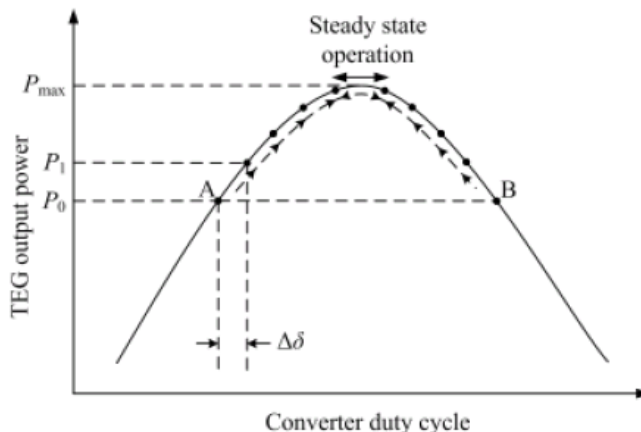
8.4 MPPT a možné způsoby spojení Peltierových článků

Podobně jako u fotovoltaických systémů se i pro maximalizování výsledné účinnosti termoelektrických systémů implementují techniky Maximum Power Point Tracking (MPPT) [29].

MPPT neboli sledování bodu maximálního výkonu úzce souvisí s výkonovou charakteristikou. Článek má svoji voltampérovou charakteristiku, která určuje jeho elektrické vlastnosti. Připojením zátěže vzniká zatěžovací charakteristika, která voltampérovou křivku protne v pracovním bodě. Hodnota okamžitého výkonu odpovídá součinu okamžitého napětí a proudu. Pokud bychom mohli měnit vstupní napětí a posouvat pracovní bod, bylo by dosaženo vyšších hodnot výkonu [37]. Bod, ve kterém bude součin proudu a napětí největší, je bodem maximálního výkonu.

Vhodnou volbou rozhodovacích algoritmů MPPT aplikovaných pro řízení elektronických regulačních prvků (DC-DC měničů) můžeme dosáhnout značného zvýšení účinnosti. Pro nalezení bodu maximálního výkonu je možné použít algoritmy: perturbation and observation, incremental conductance, parasitic capacitances, constant voltage, constant current, ripple correlation nebo jiné [37], [50]. Nicméně, podle autorů [26], [35], mnohé ve fotovoltaických aplikacích úspěšně využívané

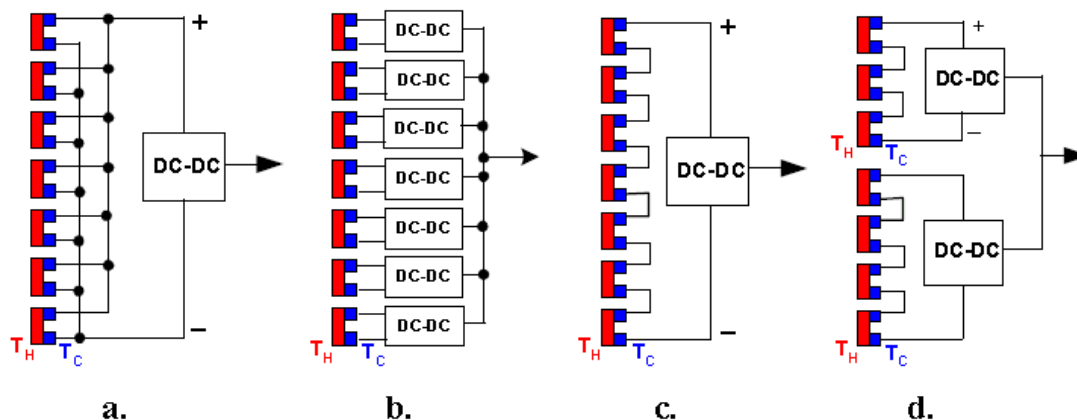
metody MPPT nejsou optimalizované pro použití s termoelektrickými generátory⁸. Přestože dané metody nemusí být ideální, jsou výkony při použití měniče s MPPT vyšší než při aplikaci měniče bez MPPT [24].



Obr. 29 Hledání bodu maximálního výkonu Peltierova článku [51]

Z pohledu koncepce spojení Peltierových článků a měničů se lze setkat s následujícími systémy [25]:

- centrální systém;
- řetězový systém;
- modulový systém.



Obr. 30 Možné způsoby zapojení Peltierových článků a měničů [49]

Centrální systém (Obr. 30 a., c.) je systém s jedním společným měničem. Efektivně redukuje ztráty nevhodným připojením zátěže v případě, že všechny

⁸ Pro experimentální část práce je zvolen komerční měnič pracující s některou z metod MPPT.

moduly pracují při stejné teplotě. Tímto systémem nemohou být minimalizovány ztráty, které vznikají při nerovnoměrném rozložení teplot. Při sériovém zapojení poškození jednoho článku zapříčiní nefunkčnost celé série. Měníč musí být schopen přenést výkon všech článků.

V řetězovém systému (Obr. 30 d.) má každá série modulů vlastní měnič, jednotlivé měniče jsou spojeny paralelně. Ztráty způsobené rozdílným teplotním rozložením jsou závislé na zvolené topologii článků. Pokud bude série článků na izotermě, ztráty mohou být použitím měniče minimalizovány. V opačném případě ztráty vznikají, protože každý článek bude mít jiný optimální proud. Výkonový rozsah měniče není závislý na celkovém výkonu termoelektrického generátoru jako v případě centrálního systému, ale jen na výkonu příslušné série. Z hlediska nákladů a flexibility je pro velké termoelektrické systémy toto uspořádání nejvýhodnější.

V případě modulového systému (Obr. 30 b.) je každý termoelektrický modul vybaven vlastním měničem. Ten redukuje ztráty při různých provozních podmínkách. Poškození jednoho modulu nemá vliv na práci ostatních. Vliv teplotních polí na celkový výkon generátoru je omezen, ale vzhledem k velkému počtu měničů je takový systém velmi nákladný [25], [36].

Při sériovém řazení Peltierových článků způsobí poškození jednoho modulu v sérii výpadek celého řetězce. Podle [25] je možným řešením připojení bypassev diody ke každému modulu. Za normálních podmínek budou diody v závěrném směru. Pokud dojde k poškození modulu, proud může procházet bypassevou diodou.

9 NÁVRH TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU PRO TEPLOVODNÍ KOTEL

Cílem pokusného termoelektrického generátoru je maximálně využít tepla spalin odcházejících z automatického teplovodního kotle Verner A 251.1. Spojením kotle s termoelektrickým generátorem se v principu z kotle stane kogenerační jednotka. V ideálním případě by se měla zvýšit účinnost kotle a lépe využít palivo. Elektrický výkon navrženého generátoru je ale v porovnání s tepelným výkonem kotle velmi malý. Proto i zvýšení účinnosti bude v ideálním případě malé. Z hlediska tepelné účinnosti kotle by mělo dojít ke zmenšení ztráty fyzickým teplem spalin.

Konstrukce termoelektrického generátoru byla navržena s přihlédnutím k normám ČSN 73 4201: 2010 (Komíny a kouřovody – Navrhování, provádění a připojování spotřebičů paliv) a ČSN EN 1443 (Komíny – všeobecné požadavky). Z hlediska dlouhodobého provozu je ale zařízení nevyhovující, protože nespĺňuje některé požadavky normy.

9.1 Parametry teplovodního kotle

Jmenovitý výkon (standardní paliva)	25kW
Regulovatelnost:	
kontinuálním provozem	7,5 – 30 kW
el. řízeným odstávkovým režimem	0 – 7,5 kW
Účinnost (s použitím turbulátorů)	92 %
Spotřeba paliva (při jmenovitém výkonu):	
pelety dřevní (17,5 MJ/kg)	5,8 kg/h
pelety rostlinné (15,5 MJ/kg)	6,3 kg/h
obilniny (14,5 MJ/kg)	6,8 kg/h
Teplota spalin na výstupu při jmen. výkonu (s použitím turbulátorů)	120 °C
Hmotnostní tok spalin (při jmen. výkonu)	0,016 kg/s
Minimální teplota vratné vody v provozu	60 °C



Obr. 31 Pohled na automatický teplovodní kotel Verner A251.1 umístěný v budově laboratoří

Maximální účinnosti dosahuje kotel při použití turbulátorů. Turbulátory slouží k lepšímu vychlazení spalin a umísťují se do výstupního tahu spalinového výměníku. Nejsou součástí základního vybavení kotle, vmontovávají se dodatečně. Na měřeném kotli se v současnosti nenachází, proto maximální účinnost kotle bude nižší než výrobcem deklarovaná⁹. Během provozu kotle také dochází k zanášení teplosměnných ploch a vzrůstu teploty spalin [27].

9.2 Parametry Peltierových článků

Parametry jednoho Peltierova článku TEG-127-230-32

Rozměry článku	40 mm x 40 mm x 3,4 mm
Počet termoelektrických dvojic	127
Materiál termočlánků	Bi_2Te_3
Hmotnost	24 g
Maximální přípustná teplota	230 °C
Maximální stříhová síla	125 N/cm ²
Maximální vibrace	až 55 Hz, 2 m/s ²
Materiál keramických desek	BK-96, Al ₂ O ₃ , 96 %
Tepelná vodivost keramických desek	15 W/mK
Tloušťka desek	1 mm

⁹ Výrobce kotle uvádí, že při provozu bez turbulátorů je teplota spalin o 40 °C – 80°C vyšší.

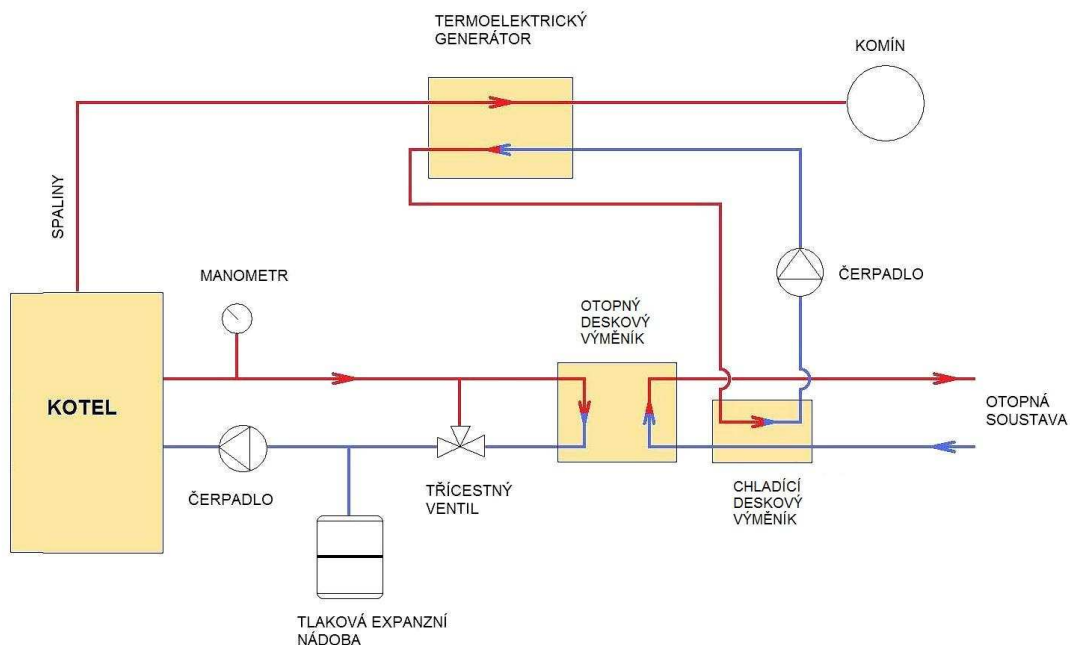
Parametry jednoho Peltierova článku TEG-127-230-32

Tolerance tepelných a elektrických parametrů	$\pm 5 \%$
Doporučený chladič studené strany článku	$R_{th} = 0,067 \text{ K/W}$
Svorkové napětí	11,4 V
Proud nakrátko	4,61 A
Seebeckův koeficient α	$0,052 \text{ VK}^{-1}$
Výkon při $T_h = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ a $T_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	13,28 W

Po úvaze byl ze seznamu komerčně dostupných Peltierových článků (viz Příloha P. IV) vybrán typ TEG-127-230-32. Hodnota výrobcem udávaného výkonu článku $P_{max} = 13,28 \text{ W}$ platí pro optimální podmínky. Při uvažování tepelných odporů keramických desek je možné při jmenovitých teplotách dosáhnout výkonu $P = 9,60 \text{ W}$. Pro účely měření bylo zvoleno 8 článků.

9.3 Konstrukce termoelektrického generátoru

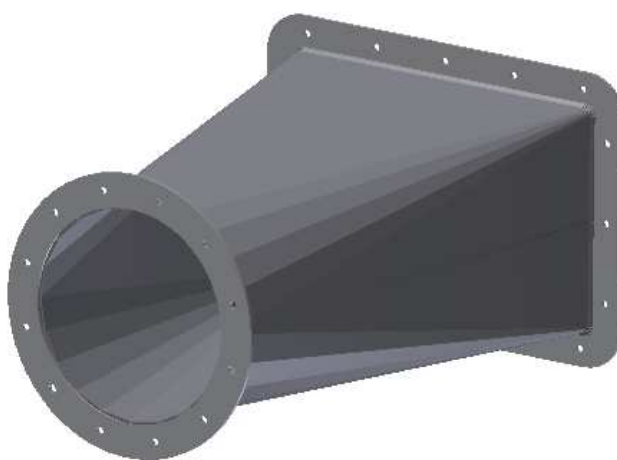
Spaliny odcházející výstupním hrdlem kotle do spalinovodu, předávají teplo termoelektrickému generátoru a postupují k ústí komínu. Chlazení generátoru zajišťuje vodní okruh s čerpadlem. Ten přes deskový výměník předává teplo vodě v otopné soustavě (Obr. 32).



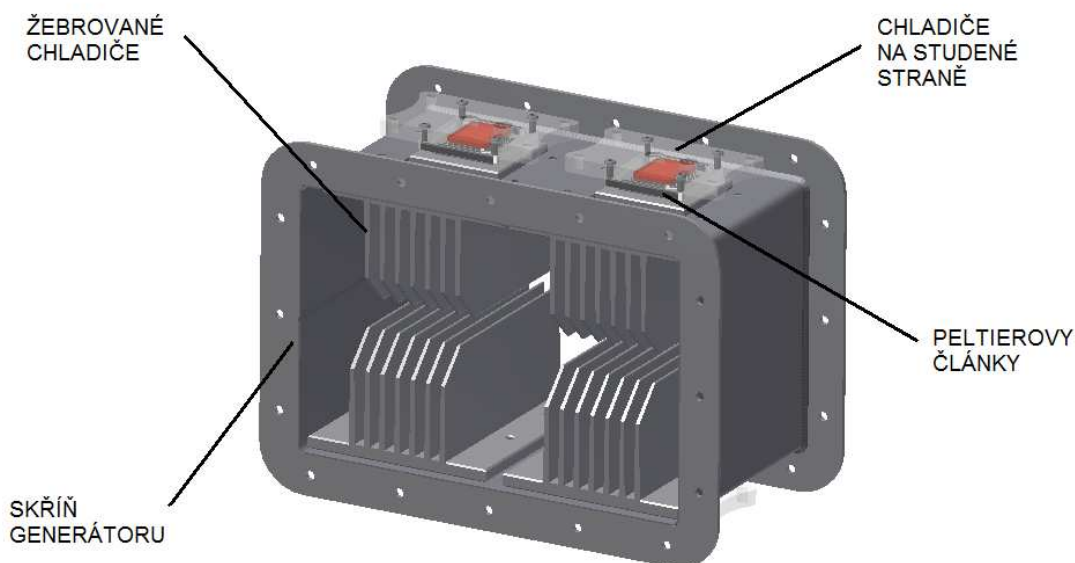
Obr. 32 Blokové schéma uspořádání kotle s termoelektrickým generátorem

Termoelektrický generátor se skládá ze 4 částí. Difuzoru, konfuzoru a dvou segmentů s Peltierovými články. Pro lepší přestup tepla na straně spalin jsou články opatřeny hliníkovými bloky s podélnými žebry. Chladiče Peltierových článků mají měděnou základnu opatřenou jemným drážkováním, které zajišťuje lepší přestup tepla do chladicího média. Aby nedocházelo ke korozi chladiče, je měď galvanicky poniklována. Svrchní část chladiče je vyrobena z polykarbonátu a opatřena montážními otvory pro fitinky.

Příruby (Obr. 33) i skříň generátoru (Obr. 34) jsou svařence. Jsou vyrobeny a svařeny z ohýbaného nerezového plechu tloušťky 1 mm a přírubových desek tloušťky 3 mm. V deskách jsou otvory pro šroubové spoje. Těsnosti přírubových spojů bude dosaženo použitím vhodného těsnícího materiálu.



Obr. 33 Příruba pro spojení spalínovodu a termoelektrického generátoru



Obr. 34 Skříň generátoru

Hliníkové bloky jsou vyrobené z polotovaru, průmyslového chladiče KA 200. Tento chladič je vyráběn ze slitiny AW6060¹⁰ [11]. Nevýhodou tohoto řešení je možné korozní napadení při spalování alternativních paliv v kotli. Aby nedocházelo k poškození chladičů, měly by být v kotli spalovány pouze dřevní peletky. Chladiče na studené straně Peltierových článků jsou komerčně dostupné chladiče Stixion b-400.

V každém segmentu jsou umístěny čtyři Peltierovy články, které jsou spojeny do série. Každá série má vlastní měnič napětí.

Výkresová dokumentace termoelektrického generátoru se nachází v příloze.

¹⁰ Al Mg 0,7 Si

ZÁVĚR

Termoelektrické moduly jsou polovodičové prvky, které pro svou funkci využívají existence termoelektrických jevů. V češtině se nepřesně označují všechny termoelektrické moduly jako Peltierovy články. Podstatou Peltierových článků, kterými se zabývá předkládaná práce, je přeměna tepelné energie na energii elektrickou. Tyto články využívají tzv. Seebeckova jevu, kdy při průchodu tepelného toku článkem vzniká na jeho vodičích napětí a je-li článek připojen k odporové zátěži, může generovat malý elektrický výkon.

Systematické snahy o využití termoelektrických systémů jako zdroje elektrické energie trvají už více než století. Zřejmou nevýhodou a hlavním faktorem, který brání většímu rozšíření těchto systémů, je jejich malá účinnost. Přestože dochází k postupnému zvyšování účinnosti a objevům nových termoelektrických materiálů, nemáme stále k dispozici materiály s takovými parametry, které by umožnily účinnou a cenově srovnatelnou výrobu elektřiny. Je pravděpodobné, že v budoucnu dojde k dalšímu zvyšování účinnosti. V současnosti, při teplotách okolo 600K, dosahujeme s použitím dobrého termoelektrického materiálu přibližně 11% účinnosti přeměny. Se zvyšující se teplotou účinnost narůstá.

Výkon a účinnost Peltierových článků jsou závislé na konstrukci článků, použitých materiálech a pracovních teplotách. Vypočítat výkon článků analyticky je značně složité, v některých případech nemožné. Je proto nutné použít mnohá zjednodušení a skutečné hodnoty se mohou výrazně lišit. Teplotní závislost článků je vlastnost, která značně komplikuje jejich využití. Výkon článku se mění s druhou mocninou rozdílu teplot mezi studenou a teplou stranou článků.

Výhodou Peltierových článků je jejich dlouhá životnost, provoz bez chemických látek nebo pohyblivých zařízení, jednoduchost, spolehlivost a škálovatelnost v celém rozsahu výkonů. Nevhodným provozem a špatnou konstrukcí zařízení může dojít k výraznému snížení jejich životnosti nebo trvalému poškození. Články by neměly být vystavovány vibracím, vlhkosti, rychlým změnám teploty nebo teplotám blízkým tavení pájky použité v člancích. U nízkoteplotních článků bývají teploty tavení pájky mnohem nižší než výrobci deklarovanými maximálními teplotami článků.

Vzrůstající zájem o životní prostředí, snaha využít odpadního tepla jako zdroje elektrické energie nebo potřeba nezávislých energetických zdrojů dala vzniknout mnoha termoelektrických aplikacím. Peltierovy články jsou za tímto účelem spojovány ve složitější celky, termoelektrické generátory. Generátory se skládají z jednoho nebo více Peltierových článků, výměníků nebo chladičů pro lepší přívod nebo odvod tepla z/do pracovních médií. V oblasti malých výkonů mohou generátory výrazně eliminovat chemické zdroje energie. Možnosti termoelektrických generátorů jako prostředků měřicí a regulační techniky jsou naprosto unikátní. Zařízení nebo senzory vybavené těmito generátory získávají časově neomezený zdroj energie, jehož životnost je dána životností použitých součástí.

Potřeba velkého množství elektrické energie v osobních automobilech způsobená rychlým nástupem moderní elektroniky a snaha lépe využít energie paliva vedla ke konstrukci mnoha automobilových termoelektrických generátorů. Snahou je

využívat tepla spalin odcházejících výfukovým potrubím i tepla chladicího systému. Výrazného pokroku v této oblasti dosáhla automobilka BMW. Přestože se mnozí výrobci chlubí výsledky svého zkoumání, informace o těchto systémech jsou neúplné nebo téměř žádné. Důvodem je potenciální možnost komerčního nasazení a z toho plynoucí ekonomický přínos. Současná generace termoelektrických generátorů má za cíl zmenšení alternátoru nebo zkrácení doby jeho provozu. Následující generace termoelektrických generátorů by měla alternátor zcela nahradit.

Termoelektrické generátory pracují samostatně jako zdroje elektrické energie pouze ve specifických případech. Jejich použití je řešením provozu zařízení, která leží mimo dosah rozvodné sítě, v těžko přístupných nebo nebezpečných oblastech. V těchto případech je nutnost spalování drahých primárních paliv opodstatněná. Zdrojem energie pro termoelektrické generátory mohou být i druhotné energetické zdroje. Generátory jsou schopné využívat citelného tepla odpadních látek, resp. energií nízko- nebo středněpotenciálních. V některých z těchto případů může využití odpadní energie bránit ekonomická efektivnost řešení a konvenční způsoby přeměny budou přijatelnější. V případech, kdy je množství odpadní energie malé, dochází ke kolísání hmotnostního toku pracovního média a teploty nebo se jedná o velký počet rozptýlených zdrojů, může být použití termoelektrického systému jediným možným způsobem jak energii přeměnit a využít. U kombinované výroby elektrické a tepelné energie je možné použitím termoelektrického generátoru snížit ztráty vzniklé při transformaci primárních energií.

Peltierovy články se chovají jako zdroje napětí s vnitřním odporem. Největšího výkonu jsou schopny dodat v případě, kdy odpor zátěže je roven vnitřnímu odporu článku. Analogické tvrzení platí pro termoelektrické generátory. V ostatních případech bude výkon článků nižší a bude docházet ke ztrátám. Současně s tím bývá potřeba úpravy výstupního napětí na požadovanou úroveň. Použitím stejnosměrného měniče a aplikováním vhodného algoritmu pro jeho řízení je možné udržovat výkon Peltierova článku v oblasti maximálního výkonu a dodat do zátěže požadovaný výkon.

Většina tepelných zdrojů není stabilní, dochází ke kolísání teploty. Vnitřní odpor, výkon, účinnost a další vlastnosti Peltierových článků se mění s teplotou. V případě velkých teplotních diferencí vznikají značné výkonové ztráty. Samotným použitím měničů s algoritmy pro udržení maximálního výkonu není možné těmto ztrátám zabránit. Řešením je volba vhodné topologie Peltierových článků a jejich umístění do izotermálních oblastí. Na vhodnost volby jednotlivých algoritmů hlídání maximálního výkonu v tomto případě není jednotný názor.

Cílem práce bylo navrhnout pokusný termoelektrický generátor, který by využíval odpadního tepla spalin automatického teplovodního kotle. Po úvaze byl ze seznamu komerčně dostupných Peltierových článků (Příloha P. IV) vybrán konkrétní typ článků a navržen termoelektrický generátor. Generátor se skládá ze segmentů, svařenců, které se umísťují mezi výstupní hrdlo kotle a kouřovod. Pro lepší přestup tepla jsou články opatřeny hliníkovými bloky s podélnými žebry. Teplo spalin procházející články je odvedeno do chladicího okruhu, dokumentace termoelektrického generátoru se nachází v příloze.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *About us Micropelt GmbH* [online]. c2006-2011 [cit. 2011-01-12]. About Micropelt. Dostupné z WWW: <<http://www.micropelt.com/aboutus/aboutus.php>>.
- [2] BELL, L. E. Alternate thermoelectric thermodynamic cycles with improved power generation efficiencies. In *Proceedings of the 22nd international conference on thermoelectrics, Hérault, France, August 2003*. [online]. 2003 [cit. 2010-10-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.bsst.com/pdfs/Improved-Power-Generation.pdf>>.
- [3] *Energy harvesting - TI.com* [online]. c1995-2011 [cit. 2011-01-10]. Application notes. Dostupné z WWW: <http://focus.ti.com/docs/solution/folders/print/517.html#Application_Notes>.
- [4] CRANE, D. T. Potential thermoelectric applications in diesel vehicles. In *Proceedings of the 9th diesel engine emissions reduction (DEER) conference: August 24-28, 2003, Newport, Rhode Island* [online]. 2003 [cit. 2009-10-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.amerigon.com/pdfs/TE-Apps-In-Diesel-Vehicles.pdf>>.
- [5] DVORSKÝ, E.; HEJTMÁNKOVÁ, P. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha : BEN-technická literatura, 2005. 287 s. ISBN 80-7300-118-7.
- [6] EDER, A.; LINDE, M. *Efficient and dynamic – the BMW Group roadmap for the application of thermoelectric generators*. San Diego : BMW Group, 2011. 23 s. Dostupný z WWW: <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2011/monday/eder.pdf>.
- [7] *Energy harvesting - linear technology* [online]. c2010 [cit. 2011-04-20]. Energy harvesting. Dostupné z WWW: <http://www.linear.com/products/energy_harvesting>.
- [8] *Energy harvesting with Micropelt thermogenerators* [online]. c2006-2011 [cit. 2011-01-12]. Micropelt energy harvesting. Dostupné z WWW: <http://www.micropelt.com/applications/energy_harvesting.php>.
- [9] FAIRBANKS, J. W. Thermoelectric applications in vehicles status 2008. In *6th European conference on thermoelectrics : July 2 - 4, 2008, Paris, France* [online]. 2008 [cit. 2010-01-16]. Dostupné z WWW: <<http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/0-PL-00-Fairbanks.pdf>>.
- [10] FAIRBANKS, J. W. *Vehicular thermoelectric applications session DEER 2009* [online]. U.S. Department of Energy, 2009 [cit. 2010-10-03]. Dostupný z WWW: <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2009/session7/deer09_fairbanks.pdf>.

- [11] GAMAaluminium : hliníkové chladiče. Žiar nad Hronom : GAMAaluminium, 2011. 51 s. Dostupné z WWW: <http://www.gamaaluminium.sk/letaky/katalog%202011_small.pdf>.
- [12] G2-56-0375 *thermoelectric module specifications*. Tellurex, 2010. 2 s. Dostupné z WWW: <<http://www.tellurex.com/pdf/G2-56-0375-Specifications.pdf>>.
- [13] GOLDSMID, H. J. *Introduction to thermoelectricity*. Heidelberg : Springer, 2009. xvi, 242 s. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-3-642-00715-6.
- [14] GROMOV, G. Thermoelectric cooling modules [online]. *Business briefing : global photonics applications & technology*. [cit. 2010-10-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.rmtltd.ru/articles/Thermoelectric%20Cooling%20Modules.pdf>>.
- [15] HADAŠ, M. *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Vysoké učení technické v Brně. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, c2007. 30 s. ISBN 978-80-214-3435-6.
- [16] *High-performance nanostructured thermoelectric materials : reviews : NPG Asia materials* [online]. c2010 [cit. 2011-04-20]. Figure 2. Dostupné z WWW: <<http://www.natureasia.com/asia-materials/figure.php?id=956>>.
- [17] JIŘÍK, F. *Komíny*. 3. přeprac. vyd. Praha : Grada, 2009. 128 s. ISBN 978-80-247-2823-0.
- [18] KARAMAZOV, S. *Interakce bodových poruch ve vybraných krystalech tetradymitové struktury*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, Ústav elektrotechniky a informatiky, 2007. 56 s. ISBN 978-80-7395-012-5.
- [19] KAWAMOTO, H. R&D trends in high efficiency thermoelectric conversion materials for waste heat recovery. *Quarterly review* [online]. 2009, 30, [cit. 2010-01-16]. s. 54-69. Dostupný z WWW: <<http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/eng/stfc/stt030e/qr30pdf/STTqr3004.pdf>>.
- [20] KYSELA, L. *Využití druhotných zdrojů energie : poznámky k přednáškám*. 1. dopl. a oprav. vyd. Ostrava : Katedra energetiky Fakulty strojní VŠB – TU Ostrava, 2007. 45 s.
- [21] LaGRANDEUR, J., et al. Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. In *25th International conference on thermoelectrics : Proceedings ICT '06, August 6-10, 2006, Vienna, Austria* [online]. Vienna : [s.n.], 2006 [cit. 2011-05-26]. s. 343 – 348. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4133301>. ISBN 1-4244-0811-3. doi: 10.1109/ICT.2006.331220.
- [22] LEVIN, E. M., et al. Analysis of Ce- and Yb-Doped TAGS-85 materials with enhanced thermoelectric figure of merit. *Advanced functional materials* [online]. 2010, roč. 21, č. 3, [cit. 2011-01-10]. s. 441-447. Dostupný z WWW: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.201001307/pdf>>.

- [23] Micropelt. *Thermoharvesting : infinite power for wireless senzors*. [Freiburg]. 22 s. Dostupné z WWW: <http://www.micropelt.com/down/energy_harvesting.pdf>.
- [24] NAGAYOSHI, H., et al. Development of 100-W high-efficiency MPPT power conditioner and evaluation of TEG system with battery load. *Journal of electronic materials* [online]. 2011, roč. 40, č. 5, s. 657-661. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/q865p38v43170l0t/fulltext.pdf>>. doi: 10.1007/s11664-010-1499-3.
- [25] NAGAYOSHI, H., et al. High efficiency maximum power point tracking power conditioner for TEG systems. In *6th European conference on thermoelectrics : July 2 - 4, 2008, Paris, France* [online]. 2008 [cit. 2011-02-21]. Dostupné z WWW: <<http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/P2-23-Nagayoshi.pdf>>.
- [26] NAGAYOSHI, H.; TOKUMISU, K.; KAJIKAWA, T. Novel maximum power point tracking control system for thermoelectric generator and evaluation of mismatch power loss reduction. In *5th European conference on thermoelectrics : September 10-12, 2007 - Odessa (Ukraine)* [online]. 2007 [cit. 2011-02-21]. Dostupné z WWW: <<http://ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/19.pdf>>.
- [27] *Návod k obsluze a instalaci automatického kotle Verner A 251.1*. Červený Kostelec : Verner, 2008. 38 s. Dostupné z WWW: <<http://www.vytapeni-malotherm.cz/soubor/navod-automaticky-kotel-a251-1/>>.
- [28] MASTBERGEN, D.; WILLSON, B. Generating light from stoves using a thermoelectric generator. Engines and Energy Conversion Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Colorado State University. Dostupné z WWW: <http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/ethos/mastbergen/Mastbergen_ETHO_S_2005.pdf>.
- [29] MOLINA, M. G., et al. Design of improved cotroller for thermoelectric generator used in distributed generation. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2010, roč. 35, č. 11, [cit. 2011-01-12]. s. 5968-5973. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909020266>>. ISSN 0360-3199, doi:10.1016/j.ijhydene.2009.12.098.
- [30] PATOČKA, M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek 2 : měniče bez impulsního transformátoru*. 3. vyd. Brno : Zdeněk Novotný, 2004. 175 s. ISBN 80-214-2743-4.
- [31] *Power generator (Seebeck) module installation : application notes* [online]. [cit. 2009-10-20]. Dostupný z WWW: <http://www.customthermoelectric.com/app_notes/app_note_TEG%20Install.pdf>.
- [32] ROWE, D. M. *CRC handbook of thermoelectrics*. 1st ed. CRC Press, 1995. 701 s. ISBN 978-0849301469.
- [33] ROWE, D. M. (ed.). *Thermoelectrics handbook : macro to nano*. 1st ed. [Boca Raton] : CRC Press, 2006. 1014 s. ISBN 978-0849322648.

- [34] SAQR, K. M. *Design and simulation of an exhaust based thermoelectric generator (TEG) for waste heat recovery in passenger vehicles* [online]. Faculty of Mechanical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 2008. 128 s. Diplomová práce. Dostupné z WWW: <<http://eprints.utm.my/10048/1/KhalidMohammedMohieeMFKM2008.pdf>>.
- [35] SHIHO, K., et al. A maximum power point tracking circuit of thermoelectric generators without digital controllers. *IEICE Electronics Express* [online]. 2010, roč. 7, č. 20, [cit. 2011-05-26]. s. 1539-1545. Dostupný z WWW: <http://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/7/20/7_1539/article>. ISSN 1349-2543, doi:10.1587/elex.7.1539.
- [36] SCHOCK, H. Thermoelectric conversion of waste heat to electricity in an IC engine powered vehicle [online]. [cit. 2009-10-20]. Dostupné z WWW: <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2007/session6/deer07_schock.pdf>.
- [37] SLEZÁK, P. *Regulace provozu autonomních solárních systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [38] *TEG power generator & thermoelectric generator* [online]. Revised 02/2009 [cit. 2010-05-17]. Dostupné z WWW: <http://www.espressomilkcooler.com/thermoelectric_generator_stationary_generator_teg.htm>.
- [39] *Tellurex - Seebeck FAQ* [online]. c 2010 Tellurex [cit. 2011-03-05]. Frequently asked questions about our power generation technology. Dostupné z WWW: <<http://www.tellurex.com/technology/seebeck-faq.php>>.
- [40] *TE modules datasheets: thermoelectric cooling* [online]. RMT, c2003-2008 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.rmtltd.ru/catalogues/TEC2005_DS.pdf>.
- [41] *TE-qNODE for ultra-low temperature gradient harvesting by Micropelt* [online]. c2006-2011 [cit. 2011-02-15]. TE-qNODE. Dostupné z WWW: <http://www.micropelt.com/images/im_applications/qnode_schneider.jpg>.
- [42] Termoelektrický generátor BMW [online]. *Automotorevue*, [cit. 2009-10-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.automotorevue.cz/images/stories/auto/bmw/teplo/24259.jpg>>.
- [43] *Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck* [online]. [cit. 2009-12-18]. Dostupný z WWW: <<http://balrog.camp.clarkson.edu/~helenbrk/pubs/automobile.pdf>>.
- [44] *Thermoelectric cooling modules. Technology. Crystal Ltd.* [online]. c2011 [cit. 2011-01-10]. Technology: thermoelectric modules reliability improvement methods. Dostupné z WWW: <<http://www.crystalltherm.com/technology.html>>.

- [45] *Thermogeneratoren* [online]. [cit. 2009-10-20]. Thermogeneratoren/Seebeckelemente. Dostupné z WWW: <<http://thermalforce.de/de/product/thermogenerator/index.php?uid=76c56c04f9a7951a25c3f864b53e3a77&ref=>>>.
- [46] TSE, Y. H. Classification of parallel DC/DC converters part I: circuit theory. In *18th European Conference on Circuit Theory and Design, 27-30 Aug. 2007, Seville* [online]. 2007 [cit. 2010-10-21]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4520033%2F4529518%2F04529770.pdf%3Farnumber%3D4529770&authDecision=-203>>.
- [47] VYSOKÝ, P. Současné trendy v řízení automobilových systémů. *Automatizace* [online]. 2006, 49, 4, [cit. 2010-10-21]. s. 252-255. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1183>>. ISSN 0005-125X.
- [48] WHITWORTH, B. BMW reveals plans for Efficient Dynamics Mk2. *Car* [online]. 9. 3. 2009, [cit. 2011-06-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.carmagazine.co.uk/News/Search-Results/Industry-News/BMW-reveals-plans-for-Efficient-Dynamics-Mk2/>>.
- [49] YANG, J. *Develop thermoelectric technology for automotive waste heat recovery* [online]. GM Research & Development Center, 2009 [cit. 2010-10-03]. Dostupný z WWW: <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2009/session7/deer09_yang_2.pdf>.
- [50] ZHANG, X.; CHAU, K. T.; CHAN, C. C. Design and implementation of a thermoelectric-photovoltaic hybrid energy source for hybrid electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal* [online]. 2009, roč. 3. 11 s. Dostupný z WWW: <<http://www.ev24.org/wevajournal/php/download.php?f=vol3/WEVJ3-2130104.pdf>>. ISSN 2032-6653.
- [51] ZHANG, X.; CHAU, K. T.; CHAN, C. C. Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles. *Journal of Asian electric vehicles* [online]. 2008, roč. 6, č. 2, s. 11919-1124. Dostupný z WWW: <<http://www.elec.eng.osaka-cu.ac.jp/~aevc/1119-1124.pdf>>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1	VZNIK TERMOELEKTRICKÉ DVOJICE	14
OBR. 2	TERMOELEKTRICKÉ DVOJICE TVOŘÍCÍ PELTIERŮV ČLÁNEK	17
OBR. 3	KONSTRUKCE KLASICKÉHO TERMOELEKTRICKÉHO MODULU	17
OBR. 4	USPOŘÁDÁNÍ TERMOELEMENTŮ (A) TRADIČNÍ, (B) ALTERNATIVNÍ	18
OBR. 5	DETAIL TLOUŠŤKY PŘECHODOVÉ VRSTVY	18
OBR. 6	ZÁVISLOST GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ ČLÁNKU PŘI RŮZNÝCH ROZDÍLECH TEPLOT	20
OBR. 7	ÚČINNOST CELKOVÉ PŘEMĚNY V ZÁVISLOSTI NA POUŽITÉM TERMOELEKTRICKÉM MATERIÁLU A PRACOVNÍ TEPLOTĚ	22
OBR. 8	VÝVOJ TERMOELEKTRICKÉ ÚČINNOSTI V PRŮBĚHU POSLEDNÍCH 60 LET	25
OBR. 9	TERMOELEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH MAXIMÁLNÍ ÚČINNOSTI	26
OBR. 10	TERMOELEKTRICKÁ ÚČINNOST POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLŮ V ZÁVISLOSTI NA PRACOVNÍ TEPLOTĚ	26
OBR. 11	Hlavní součásti termoelektrického systému	28
OBR. 12	Výkonový rozsah termoelektrických generátorů	29
OBR. 13	Bezdrátový monitorovací systém hlídající teplotu ložisek	31
OBR. 14	Bezdrátový monitorovací systém sledující teplotu rozvodných vodičů	32
OBR. 15	Termoelektrický generátor využívající (A) tepla výfukových plynů, (B) tepla chladicí kapaliny	33
OBR. 16	Účinnost a typy jednotlivých termoelektrických materiálů používaných v automobilových generátorech	33
OBR. 17	Termoelektrický generátor testovaný univerzitou v Karlsruhe	34
OBR. 18	Termoelektrický generátor sestrojený společností Hi-Z Inc.	35
OBR. 19	Termoelektrický generátor sestrojený společností Nissan Motors Inc.	36
OBR. 20	Pokusný 300W termoelektrický generátor sestrojený Clarksonovou univerzitou	36
OBR. 21	Pohled na prototyp termoelektrického generátoru zkonstruovaného společností BMW	37
OBR. 22	Blokové schéma automobilového systému s termoelektrickým generátorem	38
OBR. 23	Radioizotopový termoelektrický generátor	39
OBR. 24	Rozsah teplot odpadního tepla vznikajícího v průmyslu	41
OBR. 25	Náhradní schéma Peltierova článku	46
OBR. 26	Výkonová charakteristika Peltierova článku	47
OBR. 27	Náhradní schéma termoelektrického.....	48
OBR. 28	Pohled na automobilový termoelektrický generátor BMW a jednotlivé skupiny Peltierových článků	49
OBR. 29	Hledání bodu maximálního výkonu Peltierova článku	50

OBR. 30	MOŽNÉ ZPŮSOBY ZAPOJENÍ PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ A MĚNIČŮ	50
OBR. 31	POHLED NA AUTOMATICKÝ TEPLOVODNÍ KOTEL VERNER A251.1 UMÍSTĚNÝ V BUDOVĚ LABORATOŘÍ.....	53
OBR. 32	BLOKOVÉ SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ KOTLE S TERMoeLEKTRICKÝM GENERÁTOREM .	54
OBR. 33	PŘÍRUBA PRO SPOJENÍ SPALINOVDU A TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU	55
OBR. 34	SKŘÍŇ GENERÁTORU	55

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Veličina	Symbol	Jednotka
Seebeckův koeficient	α	VK^{-1}
relativní Seebeckův koeficient	α_{AB}	VK^{-1}
plocha příčného řezu termoelementu	A	m^2
Thomsonův koeficient	β	VK^{-1}
užitečně využitý energetický tok	E_{uv}	J
exergetický tok paliva	E_{pal}	J
měrná exergie (vztažená na hmotnostní jednotku paliva)	ε_i	[J/kg]
proud	I	A
zkratový proud	I_{sc}	A
délka termoelementu	l	m
tloušťka kontaktní vrstvy	l_c	m
tepelná vodivost	λ	$Wm^{-1}K^{-1}$
tepelná vodivost kontaktní vrstvy	λ_c	$Wm^{-1}K^{-1}$
hmotnost nebo objem paliva	m_{pal}	kg, m^3
hmotnostní nebo objemový tok paliva	M_{pal}	kg/s, m^3/s
počet	N	-
elektrický kontaktní parametr	n	-
maximální výkon peltierova článku	P_{max}	W
elektrický výkon	P_E	W
tepelný výkon	P_T	W
Peltierův koeficient	π	WA^{-1} , V
relativní Peltierův koeficient	π_{AB}	WA^{-1} , V

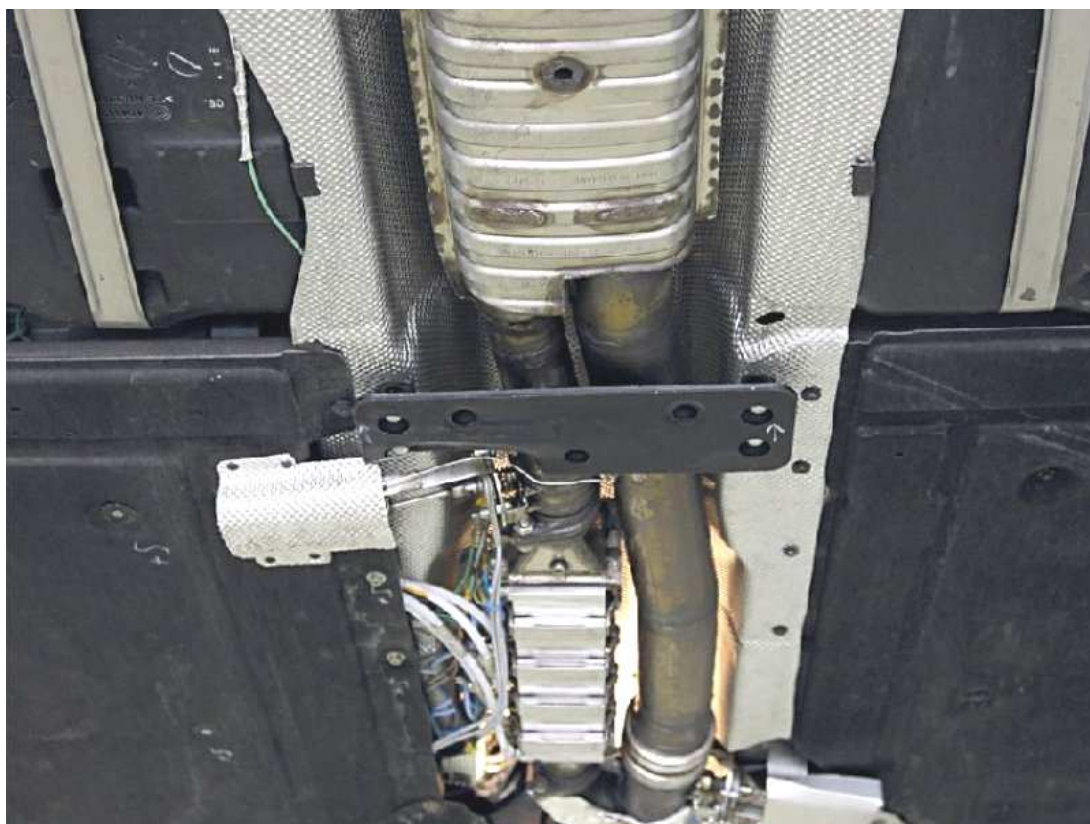
Veličina	Symbol	Jednotka
výkon	P	W
teplo	Q	W
teplo přivedené v palivu	Q_{pal}	W
užitečně využitě teplo	Q_{uv}	W
výhřevnost pelet v objemové nebo hmotnostní jednotce	Q_p	J/kg, J/m ³
sériový odpor	R	Ω
vnitřní odpor	R_i	Ω
zatěžovací odpor	R_L	Ω
tepelný kontaktní parametr	r	-
drsnost	Ra	μm
měrný elektrický odpor	ρ	Ωm
přechodový měrný elektrický odpor	ρ_c	Ωm
elektrická vodivost	σ	$\text{Sm}^{-1}, \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
teplota	T	K (°C)
střední teplota	\bar{T}	K
rozdíl teplot	ΔT	K (°C)
teplota teplé strany Peltierova článku	T_h	K
teplota studené strany Peltierova článku	T_c	K
napětí	V	V
napětí při zatížení	V_L	V
svorkové napětí	V_{oc}	V
napětí bodu maximálního výkonu	$V_{L_{max}}$	V
Seebeckovo napětí	V_s	V
koeficient termoelektrické účinnosti	Z, Z_c	K ⁻¹
koeficient termoelektrické účinnosti	ZT	-

Veličina	Symbol	Jednotka
účinnost	η	-
elektrická účinnost	η_E^{KVET}	-
tepelná účinnost	η_T^{KVET}	-
celková účinnost	η_C^{KVET}	-
celková exergetická účinnost	ζ_C^{KVET}	-

SEZNAM PŘÍLOH

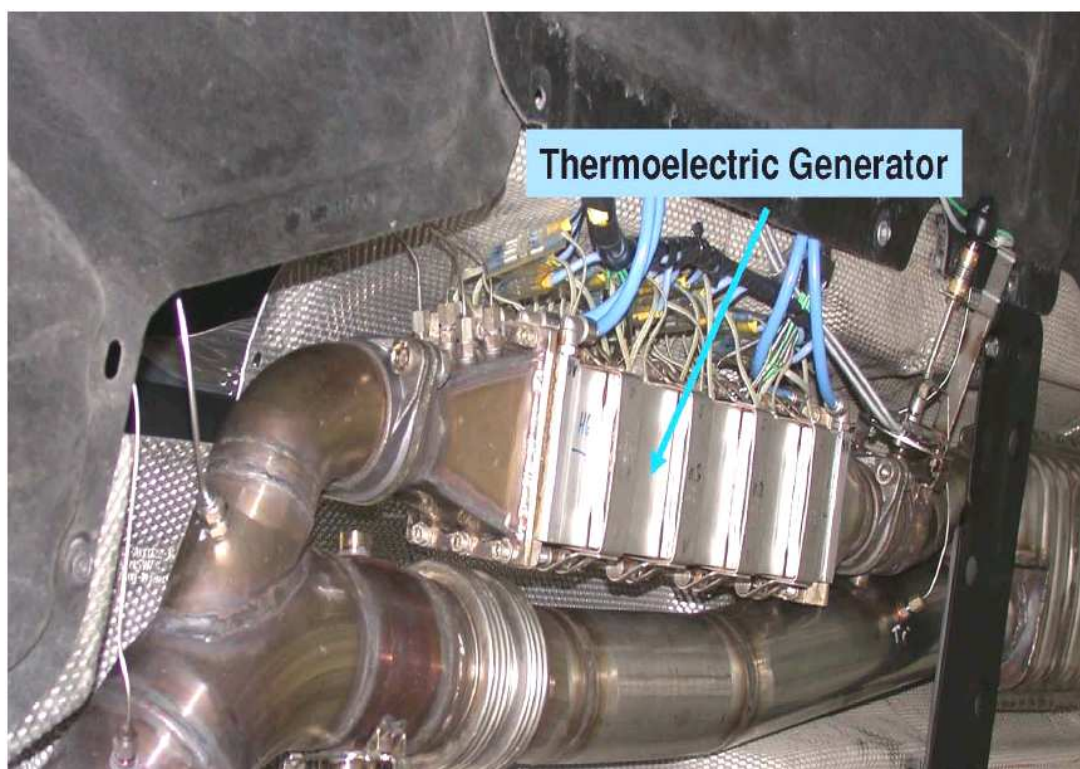
PŘÍLOHA P. I	TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR BMW – POHLED 1
PŘÍLOHA P. II	TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR BMW – POHLED 2
PŘÍLOHA P. III	TE-POWER
PŘÍLOHA P. IV	SEZNAM DOSTUPNÝCH PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ
PŘÍLOHA P. V	SESTAVA
PŘÍLOHA P. VI	CHLADIČ
PŘÍLOHA P. VII	SKŘÍŇ
PŘÍLOHA P. VIII	PŘÍRUBA
PŘÍLOHA P. IX	PŘÍRUBOVÁ DESKA 1
PŘÍLOHA P. X	PŘÍRUBOVÁ DESKA 2

PŘÍLOHA P. I TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR BMW – POHLED 1



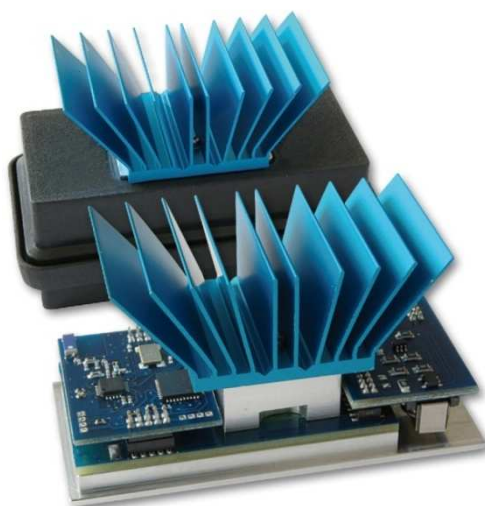
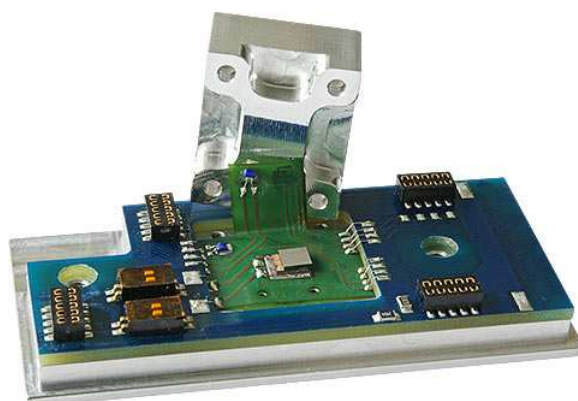
[42]

PŘÍLOHA P. II TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR BMW – POHLED 2



[10]

PŘÍLOHA P. III TE-POWER



PŘÍLOHA P. IV SEZNAM DOSTUPNÝCH PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ

Články 40mm x40mm	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK ⁻¹)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 241-200-1	11.2	1.1	0.104	0.7	3.1	200	92	36.6	909	293
TEG 199-150-2	8.86	3.6	0.082	1.56	8	150	214	64.6	1605	201
TEG 199-200-5	8.64	3.45	0.08	1.69	7.5	200	223	69.4	1724	230
TEG 199-200-6	8.85	2.31	0.082	1.13	5.12	200	151	52.2	1297	253
TEG 254-200-7	11.2	1.08	0.102	0.66	2.99	200	88	48	1192	399
TEG 127-200-9	5.6	1.2	0.052	0.34	1.67	200	45	38.5	956	573
TEG 199-200-11	8.74	1.86	0.081	0.9	4.06	200	119	59	1465	361
TEG 254-200-12	11.12	0.58	0.103	0.357	1.62	200	47	52.8	1311	810
TEG 287-200-14	12.09	0.91	0.112	0.518	2.76	200	72	52.6	1306	473
TEG 241-120-15	10.15	0.98	0.094	0.56	2.5	120	74	34.6	859	344
Články s 2 el. obvody	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK-1)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 254-150-19	11.23	1.14	0.104	0.611	3.2	150	84	74.6	1853	579
Nízkonákladové články	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK-1)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 127-150-21	5.29	0.93	0.049	0.35	1.23	150	44	12.6	313	254
TEG 071-150-22	2.8	1.12	0.026	0.35	1.57	150	46	12.6	313	199
TEG-071-200-22	3.45	1.21	0.032	0.23	1.04	150	33	9.9	246	236
TEG-127-150-23	5.5	1.72	0.052	0.56	1.79	150	69	18.2	452	253
TEG-127-200-24	5.29	3.33	0.049	1	4.4	200	132	19.2	477	108

Články 30mm x30mm	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK-1)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 127-150-26	5.38	1.16	0.054	0.313	1.7	150	43	28.6	710	418
TEG 127-200-27	6.05	0.75	0.056	0.3	1.13	200	36	27.6	686	607
TEG 127-200-28	5.1	0.77	0.051	0.178	1	200	25	29.9	743	743
Miniaturní články	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK-1)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 017-150-29	5.43	1.39	0.004	0.07	0.15	150	4.5	9.9	246	1639
TEG 049-150-30	1.27	2.05	0.016	0.19	0.89	150	25	12.6	313	352
Vysokoteplotní články	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK-1)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 127-230-31	11.4	10.67	0.052	2	30.5	230	521	55.9	1388	46
TEG 127-230-32	11.2	4.61	0.053	0.7	13	230	193	36.6	909	70
TEG 097-300-33	5.5	0.17	0.025	0.02	0.25	1000	9	46	1143	4570
TEG 126-260-34	9.4	6.5	0.044	1.4	15.5	260	343	59.6	1480	96
TEG 241-260-35	15.48	4.2	0.072	1.4	16.2	260	346	69.6	1729	107
TEG 263-250-36	17.2	6.7	0.08	2.3	28.9	250	578	52.4	1302	45
TEG 127-250-37	9.7	7.5	0.052	1.9	18.3	250	454	47	1167	64
TEG 127-250-38	9.4	16.9	0.043	3.4	39.9	225	743	58	1441	36
TEG 069-340-39	5.8	8	0.03	1.12	11.5	350	206	160	3974	346
Obdélníkové články	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK-1)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 254-150-36	11.3	0.94	0.104	0.6	2.65	150	200	59.9	1488	561

Články 50mm x 50 mm a větší	Svorkové napětí (V)	Proud nakrátko (A)	Seebeckův koeficient α (VK-1)	Tepelná vodivost κ (W/mK)	Výkon při jm. podmínkách (W)	Max. teplota článku (°C)	Potřebný tep. tok (W)	Cena (EUR)	Cena (Kč)	Cena za výkon (Kč/W)
TEG 127-200-47	4	5	0.04	1.5	5	200	187	57.5	1428	286
TEG 199-200-48	7	2.15	0.07	0.85	3.77	200	113	57.8	1436	381
TEG 450-200-45	23.7	1.09	0.22	1.4	6.5	200	187	79.2	1967	303

[45]

