Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace

Bakalářská práce

Termoelektrický jev a možnost jeho využití v automobilovém průmyslu a dopravě

Vojtěch Marvánek

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vojtěch Marvánek

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Termoelektrický jev a možnost jeho využití v automobilovém průmyslu a dopravě

Název anglicky

Thermoelectric effect and the possibility of its application in the automotive industry and transportation

---

Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je popis základních termoelektrických jevů (Seebeckův jev, Peltiérův jev, Thomsonův jev), aktuální přehled termoelektrických materiálů a jejich vlastností (z hlediska energetické účinnosti termoelektrické přeměny). Zpracování přehledu současných technologii, které termoelektrické jevy využívají. Dalším cílem práce je popis materiálů a konstrukcí termoelektrických čidel a termoelektrických generátorů v automobilovém průmyslu a dopravě včetně rozboru jejich předností a nedostatků. Následně zhodnocení dalšího potenciálního využití těchto jevů v automobilovém průmyslu a dopravě, včetně návrhu konkrétního zařízení s využitím jmenovaných jevů.

Metodika

Na základě studia dostupných materiálů vypracovat bakalářskou práci dle předložené osnovy.

1. Úvodní kapitola – seznámení s řešenou problematikou termoelektrických jevů, zdůvodnění volby tématu a vymezení cílů bakalářské práce.

2. Zpracování současného stavu problematiky základních termoelektrických jevů s využitím odborných informačních zdrojů. Popis rozdělení termoelektrických článků dle vlastního použití, včetně využití samého, zejména v automobilovém průmyslu a dopravě.

3. Zhodnocení dalšího potenciálního využití termoelektrických jevů v automobilovém průmyslu a dopravě, včetně návrhu konkrétního zařízení s jejich využitím.

4. Závěrečná kapitola – zhodnocení svých výsledků vzhledem k vytyčeným cílům, zhodnocení jejich praktického přínosu a případně naznačení podnětů pro další zkoumání.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Termoelektrický jev, Seebeckův jev, Peltierův jev, Thomsonův jev

---

Doporučené zdroje informací

GOLAB, F. KAMENČÁK, F.: Termoelektrické jevy a jejich užití. SPNKL, Praha, 1975, ISBN 14-655-75.
HALLIDAY, D. et. al.: Fyzika. VUTIUM, Brno 2003, 1198 s. ISBN 80-214-1868-0
http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/909-termoelektricke-clanky
https://www.fzu.cz/oddeleni/oddeleni-magnetik-a-supravodicu/vyzkumna-temata/termoelektricky-jev
http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/termoelektricke-jevy-v-polovodicich-a-rostlinnych-produktech–10069
SHARP, J. GOLDSMID, H. J. NOLAS, G. S.: Thermoelectrics Basic Principles and New Materials Development. Springer Verlag, August 2001

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

Vladimír Ryženko, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2022

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Termoelektrický jev a možnost jeho využití v automobilovém průmyslu a dopravě" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31. 3. 2023 Marvánek Vojtěch

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Vladimíru Ryženkovi, Ph. D. za doporučení odborné literatury, za pomocné konzultace a ostatní významné rady, které pomohly zpracování této bakalářské práce.

Termoelektrický jev a možnost jeho využití v automobilovém průmyslu a dopravě

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou termoelektrických jevů a jejich využití v automobilovém průmyslu a dopravě. Popisuje základní typy těchto jevů a vysvětluje jejich nalezení a princip. Dále popisuje využití těchto jevů v termoelektrických článcích a jednotlivé skupiny článků dle jejich hlavního využití. Následně zhodnocuje praktické využití v dnešní době v automobilovém průmyslu a dopravě. Na závěr shrnuje jednotlivé poznatky a navrhuje další teoretické využití.

Klíčová slova: Peltierův jev, termoelektrický článek, termoelektrický jev, Thomsonův jev, Seebeckův jev

Thermoelectric effect and the possibility of its application in the automotive industry and transportation

Abstract

The bachelor thesis looks into problematics of thermoelectric effect and its application in the automotive industry and transportation. Describes the main types of the effect, explains how they were found and their principle. The thesis further describes application of those effects in thermoelectric devices and individual groups by their main usage. Then the thesis evaluates their practical application in automotive industry and transportation in this day and age. At the end the thesis summarizes individual findings and comes up with other theoretical applications.

Keywords: Peltier's effect, thermoelectric device, thermoelectric effect, Thomson's effect, Seebeck's effect

Obsah

1 Úvod **1**

2 Cíl práce **2**

3 Metodika práce **2**

4 Popis termoelektrických jevů v kovech **3**

4.1 Kontaktní napětí 3

4.2 Seebeckův jev 5

4.3 Peltierův jev 8

4.4 Thomsonův jev 10

5 Popis termoelektrických jevů v polovodičích **13**

5.1 Kontaktní a objemové termoelektrické napětí v polovodičích 13

5.2 Seebeckův jev 14

5.3 Peltierův jev 15

5.4 Thomsonův jev 16

5.5 Benedicksův jev 16

6 Termoelektrický článek a jeho využití v praxi **18**

6.1 Termoelektrické články na přeměnu energie 18

6.1.1 Termoelektrický generátor TEG 19

6.1.2 Příklady využití termoelektrických generátorů 21

6.1.3 Termoelektrický chladič 31

6.1.4 Příklady využití termoelektrických chladičů 32

6.2 Termoelektrické články pro měření teploty 35

6.2.1 Rozdělení termočlánků podle velikosti měřené teploty 36

6.2.2 Příklady použití termoelektrických snímačů 38

7 Závěr **41**

8 Seznam použitých zdrojů **43**

Seznam obrázků

Obrázek 1 Výstupní napětí vybraných kovů [1] 5
Obrázek 2 Seebeckovy konstanty vybraných kovů vztažených k olovu [1] 6
Obrázek 3 Graf průběhu termoelektrického napětí při změně teploty [1] 7
Obrázek 4 Schéma termočlánku se dvěma spoji [1] 9
Obrázek 5 Závislost polarity na směru gradientu [1] 11
Obrázek 6 Seebeckův součinitel termoelektrického napětí pro vybrané prvky [1] 14
Obrázek 7 Schéma termoelektrického článku [1] 14
Obrázek 8 Schéma termočlánku připojeného ke zdroji SS napětí [1] 15
Obrázek 9 Rozdělení termočlánků podle použití [2] 18
Obrázek 10 Vyobrazení způsobů konstrukce termočlánku [2] 19
Obrázek 11 Polovodičový TEG [24] 19
Obrázek 12 Způsob umístění výměníků uvnitř výfuku [5] 21
Obrázek 13 Fotografie umístění termočlánků do výfukového ústrojí [20] 23
Obrázek 14 Schéma uspořádání TEG ve výfukovém ústrojí [5] 24
Obrázek 15 Rozložený model s termočlánkem YGPX024 [29] 24
Obrázek 16 Schéma systému s generátorem vodíku [26] 25
Obrázek 17 Výměník s termočlánky vozu s pohonem pomocí palivových článků [28] 26
Obrázek 18 Proces přípravy a aplikace termoelektrického nátěru z ústavu UNIST [22] 27
Obrázek 19 Schéma systému motorem s vnějším spalováním ve spojení s TEG [26] 28
Obrázek 20 Schéma nejefektivnějšího uspořádání [26] 29
Obrázek 21 Graf závislosti měrné práce na efektivitě [26] 30
Obrázek 22 Graf pro porovnání průměrných spotřeb [26] 30
Obrázek 23 Uspořádání termočlánků do termobaterie [1] 31
Obrázek 24 Chladicí termočlánek [18] 32
Obrázek 25 Přenosná termoelektrická chladnička [32] 33
Obrázek 26 Spojení termočlánků a fotovoltaických panelů [14] 34
Obrázek 27 Schéma zapojení termoelektrického snímače teploty [2] 35
Obrázek 28 Graf stability napětí v závislosti na měřené teplotě [2] 36
Obrázek 29 Snímač na bázi PtRh [13] 37
Obrázek 30 Tabulka označení jednotlivých termočlánkových snímačů [13] 38
Obrázek 31 Laboratorní termočlánkový teploměr [23] 39
Obrázek 32 Termočlánkový snímač teploty výfukových plynů [16] 39

1 Úvod

Termoelektrický jev často bývá opomíjeným odvětvím elektrotechniky. Je to přímá přeměna elektrické energie na tepelnou nebo naopak. Tato fakta a skutečnosti vysvětluje první kapitola a popisuje jednotlivé druhy tohoto jevu.

V praxi je tento jev obvykle využit jen ve specializovaných přístrojích a zařízení. Stav ovzduší, biosféry a zdraví lidí na Zemi tlačí vědce a techniky ke tvorbě zařízení pro výrobu energie co nejčistší formou. Tato skutečnost zvyšuje atraktivitu zefektivnění nakládání s energiemi. Právě v posledních letech je směřován pohled vlád států i nadnárodních organizací na snižování emisí automobilů s konvenčními spalovacími motory. V tomto odvětví průmyslu dochází k rychlému vývoji v oblasti snižování emisí. Zvyšování ekologičnosti provozu spalovacího motoru snižováním jeho emisí lze pouze do určité míry, aniž by došlo ke značnému zdražení anebo zmenšení spolehlivosti automobilu se spalovacím motorem. Proto lze, zejména v zemích Evropské unie, zaznamenat rychlý přechod automobilek k výrobě automobilů s elektrickým pohonem. I přesto ale bývají automobily nabízená automobilkami většině potenciálním kupcům nedostupná, protože výroba akumulátorů pro tyto elektromobily je značně ekonomicky náročná a tím se navyšuje samotná cena vozidla.

Pro využití termočlánku v automobilu to může znamenat dvě věci: při použití v automobilu se spalovacím motorem by hlavním užitím těchto článků byla přeměna odpadního tepla na elektrickou energii pro dobíjení akumulátoru vozu nebo přímo napájení elektrického vybavení ve voze. V případě automobilu s elektrickým pohonem by jejich využití mohlo spočívat například pro výhřev prostoru posádky vozidla anebo jako předehřev části pro vlastní pohon vozidla jako například hlavní akumulátor nebo částí, která jsou mazaná olejem. Tato vlastnost termočlánků fungujících jako ohřívač se dá samozřejmě využít i v automobilu se spalovacím motorem.

2 Cíl práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je podrobné popsání problematiky termoelektrického jevu a jeho využití v termoelektrických článcích a dále v konkrétních odvětvích automobilového průmyslu a dopravě. Důležitým bodem je základní popis jednotlivých jevů. Konec bakalářské práce bude přibližovat jednotlivá praktická využití tohoto jevu, vyznačovat klady a zápory, a poukazovat na potenciál, pro který v dnešní době jejich vývoj pokračuje.

3 Metodika práce

Tato bakalářská práce je zpracována na základě dostupných materiálů, doporučených zdrojů předložených se zadáním práce, různé technické literatury a vědeckých článků. První částí je teoretický rozbor problematiky termoelektrického jevu. Je zde vysvětlen popis jednotlivých termoelektrických jevů v kovech a v polovodičích. Druhá polovina práce obsahuje souhrn aplikací v praxi a zaměřuje se zejména na automobilový průmysl.

4 Popis termoelektrických jevů v kovech

Tato kapitola pojednává o typech termoelektrických jevů v kovech. Hlavním viditelným rozdělením těchto jevů je to, jakým způsobem je daný jev vyvolán. U první skupiny, kde je zařazen jev Seebeckův, dochází k projevu onoho jevu při rozdílných teplotách spojů vodičů a projeví se jako termoelektrické napětí měřitelné v tomto spoji. Druhá skupina se projevuje víceméně opačně a to tak, že při průchodu proudu spojem dochází k přenosu tepla ze spoje či do něj, a to v závislosti na polarizaci oněch vodičů. Do této skupiny se řadí jev Thomsonův s Peltierovým. Projevují se ochlazováním nebo ohříváním připojených vodičů. Toto dělení se dále projevuje v praktickém využití jednotlivých jevů v termoelektrických zařízeních.

4.1 Kontaktní napětí

Téma kontaktního napětí je důležité k pochopení celé problematiky termoelektrického jevu. K jeho vzniku dochází kvůli základním vlastnostem atomů kovů. Každý kov má alespoň jeden valenční elektron, který je s jádrem svázán malými silami. Tento elektron se později stává součástí takzvaného elektronového plynu. Ten vznikne postupným spojováním atomů kovu v polykrystal a volné valenční elektrony se postupně shlukují do plynu, ve kterém se stejně jako molekuly skutečných plynů, pohybují neustálým neuspořádaným pohybem. Působením Coulombových sil se elektrony udržují uvnitř polykrystalu kovu. Na povrchu kovu vzniká elektronová bariéra, která brání dalším elektronům, aby se přesunuly na povrch polykrystalu. Kinetická energie jejich pohybu není při pokojových teplotách schopná uvolnit elektrony z kovu. Aby toho schopná byla, je nutné ji zvýšit, a to přivedením do polykrystalu kovu teplo. Tato energie, nazývaná výstupní práce elektronu z kovu **A** [eV], je závislá na velikosti náboje elektronu **e** [C] a výstupním napětí **U** [V], kde součin náboje elektronu (**q** = **e** = -1,602.10^{-19} C) s výstupním napětím **U** = 1 V vytváří výstupní práci **A** = 1,602.10^{-19} J = 1 eV:

$$A = e \cdot U \quad [eV] \tag{1}$$

Protože velikost náboje elektronu je neměnná, určuje velikost výstupní práce elektronu právě výstupní napětí **U**. Alessandro Volta prováděl pokusy se spojováním různých kovů a dokázal je seřadit tak, aby každý z následujících kovů v řadě nabíjel ten další kladně:

Voltova řada kovů - Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd

Z toho vyplývá, že různé kovy musí mít různá výstupní napětí (obrázek 1), aby docházelo ke vzniku potenciálu na přechodu dvou kovů, čímž je jiná i výstupní práce elektronů. Jakmile tedy dojde k dotyku dvou rozdílných kovů, vznikne v bodě styku rozdílný potenciál a elektrony se začnou mezi kovy přesouvat. Směr přesunu závisí na výstupní energii elektronů, a tedy i přímo na výstupním napětí. Do kovu, který má větší výstupní napětí (a tedy i větší nutnou výstupní práci), budou lépe elektrony vstupovat. Přesunem těchto elektronů dojde k polarizaci obou kovů, $\mathbf{U_1}$ a $\mathbf{U_2}$, a vznikne onen rozdíl potenciálů $\mathbf{U_{12}}$, jehož velikost je závislá na dynamické rovnováze přechodu elektronů mezi oběma kovy:

$$U_{12} = U_2 - U_1 \quad [V] \tag{2}$$

K tomuto napětí se ještě přidává dodatečný rozdíl potenciálu **U'**, který vzniká v důsledku různé koncentrace volných elektronů uvnitř kovů. Jelikož se ale koncentrace volných elektronů uvnitř kovů liší od ostatních jen nepatrně, obvykle se v praxi hodnota tohoto rozdílu potenciálů zanedbává, pakliže se pracuje s polovodiči, musí se brát v potaz, což bude rozebráno v kapitole s polovodiči. Vzorec pro výpočet tohoto napětí $\mathbf{U'}$ má tvar:

$$U' = \frac{k \cdot \theta}{e} ln \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad [V] \tag{3}$$

kde **k** je Boltzmanova konstanta (rovna podílu universální plynové konstanty **R** a Avogadrovy konstanty N), **θ** je absolutní teplota [K], **e** je náboj elektronu a η_1 a η_2 jsou koncentrace volných elektronů ve zkušebních kovech.

Kov	U [V]	Kov	U [V]
Na	2,33	Sn	4,51
K	2,26	Pb	4,15
Cs	1,93	Sb	4,02
Cu	4,29	Bi	4,62
Ag	4,73	Co	3,99
Au	4,76	Fe	4,76
Mg	3,69	Ni	5,01
Zn	4,25	Rh	4,75
Al	4,25	Pt	5,91
Ge	4,55	Se	4,89

Obrázek 1 Výstupní napětí vybraných kovů [1]

Toto napětí samotné nicméně nelze využit jako zdroj elektrické energie. Při seřazení kovů podle Voltovy řady vznikne mezi prvním a posledním stejný rozdíl potenciálů jak při spojení, při kterém se oba kovy navzájem dotýkají, tak i při vložení jiného kovu mezi tyto dva. Celkový rozdíl potenciálu se řídí podle 2. Kirchhoffova zákona. Pokud se kovy spojí do uzavřeného obvodu, je algebraický součet všech rozdílných potenciálů na všech přechodech roven nule. [1]

4.2 Seebeckův jev

O termoelektrickém jevu se poprvé zmínil ruský akademik Epinus v roce 1758. Zjistil, že v obvodě složeném ze dvou vodičů o různých materiálech, vzniká elektrické napětí tehdy, když mají spoje obou vodičů různé teploty.

Dále se touto problematikou zabýval německý fyzik Thomas Johann Seebeck. Při svých pokusech v roce 1922 ale zjistil, že při různých teplotách v místech styku prochází vodiči malý elektrický proud. Tento proud lze považovat za využitelný zdroj elektrické energie. Seebeck poté vytvořil řadu kovů, která tyto kovy seřazuje podle toho, jak vysokou hodnotu bude mít vzniklé termoelektrické napětí:

Sb, Fe, Zn, Ag, Au, Sn, Pb, Hg, Cu, Pt, Bi.

Tato řada pracuje s předpokladem, že proud prochází od prvního zvoleného kovu, který je dále v řadě (například Cu), ke kovu, který je blíže k začátku řady (například Fe). Čím větší je rozestup dvou kovů použitých ve spoji mezi sebou v řadě, tím větší je i vzniklé termoelektrické napětí, nazývané Seebeckovo napětí **U_S**, které obvykle dosahuje hodnot v řádu několika μV. Pro výpočet existuje vzorec:

$$U_S = \alpha \cdot \Delta\theta \quad [V] \tag{4}$$

kde **α** [V.K^{-1}] je Seebeckův termoelektrický součinitel a **$\Delta\theta$** [K] je rozdíl teplot. Seebeckův teplotní součinitel je teplotně závislý, a proto není úměrnost napětí k teplotnímu rozdílu pro všechny teploty stejná. Vztah pro výpočet tohoto koeficientu:

$$\alpha = \frac{k}{e} ln \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad [V.K^{-1}] \tag{5}$$

kde **k** je Boltzmannova konstanta, **e** je náboj jednoho elektronu a **η_1**, **η_2** jsou koncentrace volných elektronů ve zkušebních kovech. Tento vztah (5) nebere v úvahu koncentrace volných elektronů ve zkušebních kovech, které jsou nutné k výpočtu. Proto byl na základě mnoha pokusů a měření vytvořen jiný, který dokáže s dostatečným teplotním rozsahem a přijatelnou přesností zjistit velikost tohoto napětí. Výsledkem toho vzorce je parabola, udávající průběh změny termoelektrického napětí v závislosti na teplotním rozdílu:

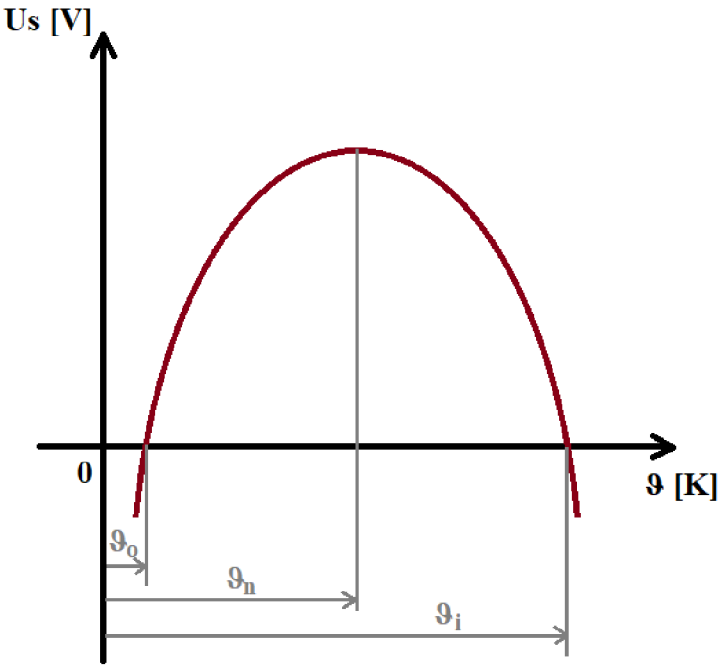
$$U_S = a(\vartheta - \vartheta_0) + \frac{1}{2} b(\vartheta - \vartheta_0)^2 \quad [V] \tag{6}$$

kde **a**, **b** [V.K^{-1}] jsou Seebeckovy konstanty, respektive jsou to rozdíly konstant použitých kovů, **ϑ_0** [K] je teplota jednoho ze spojů a je neměnná a **ϑ** [K] je teplota druhého ze spojů a mění se. Hodnoty Seebeckových konstant byly pro některé kovy zjištěny a zpracovány do tabulky (obrázek 2):

Kov	a [μV/K]	b [μV/K]
Sb	35,6	0,145
Bi	-74,4	0,032
Fe	16	-0,0297
Cu	2,7	0,0079
Ni	-19,1	3,02
Pt	3	-3,25
konstantan	-38,1	-0,0888
Pb	0	0

Obrázek 2 Seebeckovy konstanty vybraných kovů vztažených k olovu [1]

Z grafu (obrázek 3) lze vypozorovat, že při zvyšujícím se teplotním rozdílu **Δϑ** [K] zpomaluje zvyšování velikosti termoelektrického napětí **U**s. Při teplotě vztažné ϑ_0 je hodnota termoelektrického napětí rovna nule. Při dosažení takzvané teploty neutrální ϑ_n je hodnota tohoto napětí maximální. Dále lze vypozorovat, že při překročení teploty inversní ϑ_i dojde k převrácení polarity napětí a tím i směr proudu. Tato inversní teplota je dvojnásobkem rozdílu teplot, při které vzniká maximální termoelektrické napětí. Nicméně ani tento vztah (6) nelze uplatnit ve všech případech a závislost Seebeckova napětí **U**s na teplotě může mít i opačných průběh.



Obrázek 3 Graf průběhu termoelektrického napětí při změně teploty [1]

S postupným zlepšováním znalostí a poznatků v problematice termodynamiky se pozornost fyziků začala obracet ke všem druhům energetických přeměn, nevyjímaje termoelektrickou přeměnou. V roce 1885 se britský matematik a fyzik lord Rayleigh zabýval výpočty účinnosti termoelektrického generátoru, při kterých mu ale vyšla jen velmi malá až zanedbatelná. Proto tato přeměna ztrácela postupně pozornost, protože z praktického hlediska měla ve své době jen velmi malé využití. [1]

4.3 Peltierův jev

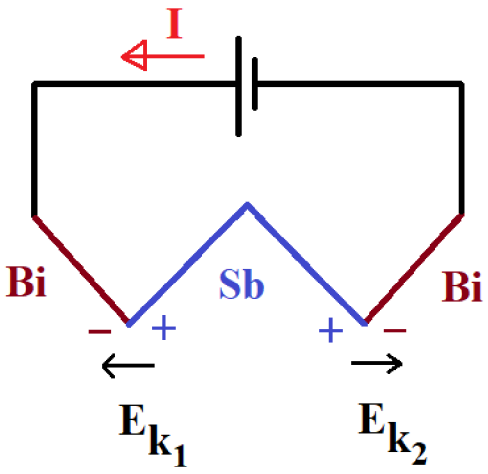
V roce 1834 popsal francouzský hodinář Jean Charles Athanase Peltier jev úzce spjatý s jevem Seebeckovým. Vysvětlil, že v místě styku dvou vodičů o různých materiálech dochází k uvolňování či pohlcování tepla, pokud jimi protéká elektrický proud. Tento jev byl nazván jako Peltierův jev a je svojí podstatou k Seebeckovu jevu opačný, tzn. pro vyvolání Peltierova jevu je potřeba průchodu elektrického proudu spojem, čehož následek je změna teplot vodičů, zatímco pro vznik Seebeckova jevu je potřeba rozdílná teplota vodičů, což vede ke vzniku elektrického potenciálu.

Směr proudu procházejícího spojem udává, zda bude docházet k pohlcování nebo vyzařování tepla. V důsledku elektrického pole o intenzitě $\mathbf{E_k}$ vyvolaném kontaktním napětím ve spoji dvou různých kovů jsou elektrony stejnosměrného proudu buď urychlovány či zpomalovány. Pokud jsou elektrony při průchodu spojem urychlovány, znamená to, že elektrické pole vyvolané kontaktním napětím je orientováno proti směru procházejícího proudu, vzrůstá jejich kinetická energie, tím i výsledný proud a spoj se začne zahřívat. Analogicky, brzdí-li elektrické pole elektrony procházející přes spoj tím, že je orientované ve směru procházejícího proudu, svůj úbytek energie nahrazují pohlcováním tepelné energie ze spoje kovů, čímž dochází k jeho ochlazování (obrázek 4).

Při tomto procesu vzniká přebytek či úbytek tepla ve spoji těchto kovů. Toto teplo se nazývá teplem Peltierovým $\mathbf{Q_P}$ [J]**.** Ve spoji těchto kovů se samozřejmě bude vyskytovat i Jouleovo teplo $\mathbf{Q_J}$ [J] v důsledku průchodu proudu vodičem. Peltierovo teplo se označuje buď kladně (v případě, že je spoj zahříván) anebo záporně (pokud je spoj ochlazován). Celkové teplo **Q**, které vznikne průchodem stejnosměrného proudu přes pokusný spoj dvou různých kovů, je vyjádřeno vztahem:

$$Q = Q_J \pm Q_P \quad [J] \tag{7}$$

kde znaménko mezi jednotlivými teply určuje, zda je spoj ochlazován či ohříván. V obvodu, který se skládá ze dvou různých kovů spojených na dvou místech a prochází ním stejnosměrný proud, dojde k ohřevu jednoho ze spojů a k ochlazení druhého (obrázek 4). Vzniklá kontaktní napětí vytváří elektrická pole, která jsou vůči sobě opačně orientovaná. Procházející stejnosměrný proud je v jednom z nich urychlován a ve druhém zpomalován, což se projeví jako ohřev jednoho spoje a ochlazení druhého.



Obrázek 4 Schéma termočlánku se dvěma spoji [1]

Z principu fungování tohoto jevu je zřejmé, že topný efekt bude poněkud větší než chladivý, a to v důsledku vzniku Jouleova tepla. Dále je také zřejmé, že absolutní velikost Peltierova tepla, které vznikne, bude v obou spojích stejné.

$$Q_1 = Q_J + Q_P \quad [J] \tag{8}$$

kde uvažujeme, že je tento první spoj Peltierovým teplem ohříván

$$Q_2 = Q_J - Q_P \quad [J] \tag{9}$$

a druhý spoj je jím ochlazován. Po úpravě rovnic dostaneme vztah:

$$Q_P = \frac{Q_1 - Q_2}{2} \quad [J] \tag{10}$$

Pro přesnější hodnotu Peltierova tepla vznikl empirický vztah (11), který používá Peltierův součinitel ve vztahu s velikostí procházejícího proudu za jednotku času. Ten se určí jako

velikost vzniklého Peltierova tepla ve spoji, kterým prochází proud o velikosti 1 A za jednu sekundu:

$$Q_P = \Pi \cdot I \cdot t \quad [J] \tag{11}$$

kde $\mathbf{\Pi}$ [V] je Peltierův součinitel, $\mathbf{I}$ [A] velikost proudu a $\mathbf{t}$ [s] čas, po který proud procházel daným spojem. Z tohoto vztahu lze odvodit i ten pro výpočet Peltierova výkonu P_P:

$$P_P = \Pi \cdot I \quad [W] \tag{12}$$

Až později při svém bádání v této problematice zjistil fyzik William Thomson souvislost mezi Seebeckovým a Peltierovým jevem a na základě toho dokázal odvodit vztah pro výpočet Peltierova součinitele:

$$\Pi = \alpha \cdot \theta \quad [V] \tag{13}$$

kde $\boldsymbol{\alpha}$ [$V.K^{-1}$] je Seebeckův součinitel a $\boldsymbol{\theta}$ [K] je absolutní teplota spoje. Z této skutečnosti lze říci, že pokud dojde ke vzniku Peltierova jevu, je doprovázen i jevem Seebeckovým.

V roce 1909 se německý fyzik E. Altenkirch snažil využít Peltierova jevu k ochlazování. Při jeho pokusech přišel na skutečnost, že klasické kovy, využívané při jeho pokusech, nebyly k těmto účelům vhodné. [1]

4.4 Thomsonův jev

Tento jev byl již dříve objeven Thomasem Seebeckem, nicméně on mu nevěnoval takovou pozornost, jako skotský fyzik William Thomson, který potvrdil jejich vzájemnou souvislost. Ten popsal další jev, kde při průchodu elektrického proudu homogenním vodičem, ve kterém je teplotní spád, dochází k pohlcování či uvolňování dalšího tepla. Pokud bude mít vodič na obou koncích jinou teplotu, vznikne mezi těmito body rozdíl potenciálů. Tento rozdíl se označuje jako Thomsonovo termoelektrické napětí. K objevu tohoto jevu Thomsona vedla skutečnost, že se teoretické výsledky Seebeckova napětí často lišily od skutečného měření.

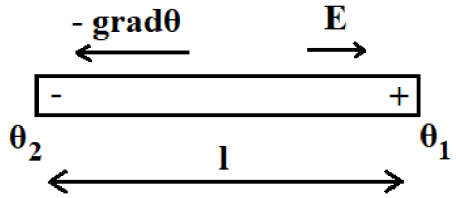
Ve vodiči, jehož konce mají různé teploty, vzniká teplotní spád vyjádřený vztahem:

$$grad\theta = \frac{\Delta\theta}{l} \quad [K.m^{-1}] \tag{14}$$

kde **gradθ** [K.m^{-1}] je teplotní spád (gradient), **Δθ** [K] je teplotní rozdíl mezi oběma konci vodiče a **l** [m] je délka vodiče. Důležité je ujasnění, jakým způsobem byl teplotní spád měřen – je-li měřeno od teplejšího konce ke chladnějšího a zároveň dochází ke vzrůstu teploty dostává gradient kladné znaménko. Existence teplotního spádu má za následek vzniku Thomsonova napětí $\mathbf{U_T}$ [V], který je dán vztahem:

$$U_T = \tau \cdot \Delta\theta \quad [V] \tag{15}$$

kde **τ** [V.K^{-1}] je Thomsonův teplotní součinitel, který je závislý na teplotě a díky tomu není stejný pro všechny teploty (stejně tak jako Seebeckův součinitel). Je také vyjádřen jako Thomsonovo napětí mezi dvěma místy vodiče vzdálených 1 m s rozdílem jejich teplot 1 K. [1]



Obrázek 5 Závislost polarity na směru gradientu [1]

Tento jev se projevuje také jako vznik či úbytek tepla. Při vzniku Thomsonova napětí dochází samozřejmě i ke vzniku elektrického pole s určitou intenzitou $\mathbf{E_T}$ [V.m^{-1}]. Pokud přes tento samý vodič prochází určitým směrem stejnosměrný proud, tak, stejně tak jako v případě Peltierova jevu, dochází ke zrychlování či zpomalování proudících elektronů. Peltierovo teplo se uvažuje v případě pozorování spojů kovů, zatímco toto teplo (elektrony do okolí odevzdané nebo z okolí pohlcené) se nazývá teplem Thomsonovým $\mathbf{Q_T}$. Na venek se to opět projevuje jako zahřátí či ochlazení daného vodiče. [1]

$$Q_T = U_T \cdot I \cdot t \quad [J] \tag{16}$$

Se vznikem elektrického pole také souvisí velikost Thomsonova součinitele. Pro kovy, ve kterých je elektrické pole orientováno stejným směrem, ve kterém vzrůstá teplota vodiče, nabývá kladných hodnot. V těchto kovech také dojde k jejich ohřevu, pokud proud prochází stejným směrem, jako je smysl zmenšování teploty. Tento jev se přesněji nazývá pozitivní

Thomsonův jev. U kovů, kde je jejich elektrické pole orientováno opačným směrem než směr vzrůstu teploty, nabývá záporných hodnot. Pokud ale bude proud procházet opět směrem od teplejšího konce ke chladnějšímu, bude docházet k pohlcování tepla vodičem a tím i k jeho ochlazování. Tento jev se nazývá negativní Thomsonův jev. Pro praktické využití se používá vyjádření Thomsonova tepelného výkonu **P**T: [1]

$$P_T = U_T \cdot I \quad [W] \tag{17}$$

5 Popis termoelektrických jevů v polovodičích

Na rozdíl od kovů lze v polovodičích pozorovat 4 typy termoelektrických jevů. Navíc termoelektrický jev v polovodičích často nabývá mnohem větších měřítek. Proto, co se týče praktického využití, se k výrobě termoelektrických článků používají zejména právě polovodiče, nebo kombinace s kovy.

5.1 Kontaktní a objemové termoelektrické napětí v polovodičích

Polovodič typu N vznikne příměsí pětimocného prvku (donor) mezi atomy křemíku. Vzniká tak přebytek elektronů, které se již při nižších teplotách stávají volnými, čímž polovodič získává elektronovou vodivost typu N. Obdobným způsobem vzniká polovodič typu P, u kterého je ale příměsí prvek trímocný (akceptor). Objeví se tak nedostatek elektronů, respektive vznikají díry ve vazbách, což je místo s kladným potenciálem. Díry mohou být zaplněny přeskokem elektronů ze sousedících vazeb, čímž dojde k jejich přesunu. Přesun děr tímto způsobem je nazýván děrovou vodivostí typu P. Při zahřátí jednoho konce polovodiče typu N dojde k uvolnění volných elektronů a jejich přesun ke chladnějšímu konci, nabíjejícího záporně. Druhý konec je následně nabíjen kladně. U polovodiče typu P je tento proces obrácený, tj. ke chladnému konci se přesouvají díry, nabíjející ho kladně a tím je teplý konec polovodiče nabíjen záporně.

V obvodě s polovodiči je závislost vzniklého napětí na teplotním rozdílu poněkud složitější než v kovech. V polovodičích je ještě nutné brát v úvahu i objemové termoelektrické napětí. Toto napětí je velmi závislé na koncentraci volných elektronů v daném kovu či polovodiči. U kovů je koncentrace volných elektronů prakticky neměnná při změně teploty, dochází zde pouze ke změně jejich kinetické energie a přesunu z jedné části vodiče do druhé. V polovodičích ale s rostoucí teplotou vzrůstá i jejich koncentrace. V důsledku toho je difuze elektronů mnohem agresivnější, čímž se zvyšuje výsledné napětí mezi konci polovodiče, které mnohonásobně převyšuje napětí vzniklé v obvodech s kovy. [1, 2, 34]

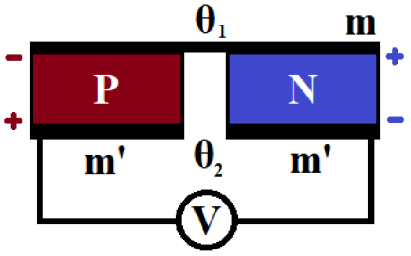
5.2 Seebeckův jev

Principiálně dochází k Seebeckovu jevu obdobně jako u kovů. Pro vznik tohoto jevu je potřeba teplotní rozdíl mezi konci polovodičů. Výsledkem tohoto jevu je Seebeckovo napětí, které je ale v porovnání s napětím, vzniklým projevem tohoto jevu v termočlánku pouze z kovů, mnohem vyšší a tím i z praktického hlediska využitelnější. Další rozdíl od kovů je v tom, že Seebeckovy součinitele pro dané materiály polovodičů mají větší závislost na teplotě a dosahují v porovnání s kovy větších hodnot, jak lze vidět v tabulce (obrázek 6):

Kov	α [μV/K]	Polovodič	α [μV/K]
Sb	35	MoS	-770
Fe	15	ZnO	-714
Mo	7,6	CuO	-696
W	3,6	FeO	-500
Cu	3,2	Fe3O4	-430
Zn	3,1	SnO	-139
Au	2,9	CdO (n)	-41
Pb	0	CuS	-7
Al	-0,4	FeS	26
Hg	-4,4	CdO (p)	30
Na	-6,5	NiO	240
Ni	-20,8	Mn2O3	385
konstantan	-3,9	Cu2O	1000
Bi	-68		

Obrázek 6 Seebeckův součinitel termoelektrického napětí pro vybrané prvky [1]

Zapojení polovodičů do termočlánku využívá důležité vlastnosti polovodičů. Jak již bylo zmíněno, tak se teplejší konec polovodiče typu N nabíjí kladně a typu P záporně. To znamená, že při střídavém zapojení za sebou (obrázek 7) je velikost výsledného termoelektrického napětí rovna součtu napětí vzniklých na obou polovodičích. Podle čistoty polovodičů může napětí dosáhnout až dvojnásobku. Velmi zde záleží na tom, zda se v polovodičích nevyskytují nosiče opačného typu (polovodič typu N může obsahovat i nosiče typu P), které jejich výsledné vlastnosti zhoršují. Výsledné napětí tak bude o trochu menší než teoretické. Početně se zjistí



Obrázek 7 Schéma termoelektrického článku [1]

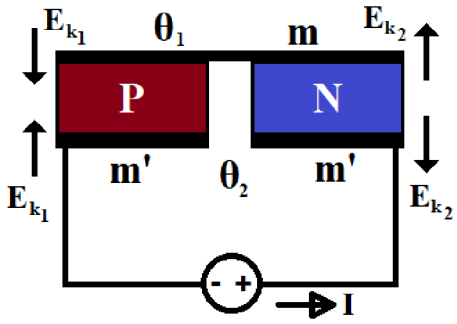
velmi podobně, jako tomu bylo u zjišťování v kovech s tím rozdílem, že Seebeckovy součinitele každého z polovodičů α_p, α_n se od sebe odečtou:

$$U_S = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta\theta \quad [V] \tag{18}$$

kde U_S je výsledné Seebeckovo napětí a $\Delta\theta$ je rozdíl teplot mezi oběma spoji. Z porovnání hodnot Seebeckova součinitele pro polovodiče a kovy je zřejmé, že výsledné napětí po dosazení těchto součinitelů do vzorce bude mnohonásobně vyšší v porovnání s kovy. [1, 10]

5.3 Peltierův jev

Stejně tak jako u Seebeckova jevu je Peltierův principem stejným tomu, který probíhá v kovech. Mluví tedy o vzniku teplotního rozdílu při průchodu stejnosměrného proudu. Při stejném zapojení, jako bylo použito při vysvětlování Seebeckova jevu v polovodičích, dojde ke vzniku kontaktního napětí mezi spojovacím kovem **m** a polovodiči. Výstupní práce polovodiče typu N je menší než ta spojovacího kovu a tím se volné elektrony přesouvají z polovodiče do kovu, polarizující ho záporně a polovodič kladně. To vede ke vzniku elektrického pole, směřujícího z polovodiče do kovu. Stejný proces probíhá ve spojení kovu a polovodiče typu P. Nicméně zde je výstupní práce elektronu kovu oproti výstupní práci nosiče polovodiče menší, takže dojde k přesunu volných elektronů do polovodiče, což má za následek kladné nabití kovu vůči polovodiči typu P. Výsledné vzniklé pole má pak polaritu směřující do polovodiče typu P.



Obrázek 8 Schéma termočlánku připojeného ke zdroji SS napětí [1]

Jakmile je do tímto způsobem zapojeného obvodu přiveden stejnosměrný proud, tak nastává samotný Peltierův jev. Na přechodech, kde elektrické pole zpomaluje volný proud elektronů, tyto elektrony odjímají teplo spoji, aby toto zpomalení kompenzovaly, čímž

ochlazují daný přechod. Na schématu (obrázek 8) je uvažován směr proudu od zdroje elektrické energie k pravému spodnímu přechodu kovu **m'** a polovodiče typu N. V tomto spoji elektrické pole naopak elektrony urychluje, čímž se daný spoj ohřívá. Toto samé platí i pro přechod kov **m'** – polovodič typu P. V horním spoji **m** naopak dochází ke zpomalení elektronů opačně orientovanými poli a tím i ve výsledku k jeho ochlazení. Uvolněná tepla se ovšem, stejně tak jako u kovů, svojí absolutní hodnotou nerovnají a část vyzářená do prostoru je větší než pohlcená.

Příchod a rozvoj polovodičů na začátku 20. století sebou přinesl i lepší poznatky o jejich vlastnostech a možnosti využití právě v oboru termoelektrické přeměny energie. Sovětský fyzik a akademik A. F. Ioffe byl v roce 1925 první, kdo navrhl a zkonstruoval polovodičové chladicí zařízení. Jeho účinnost se nicméně pohybovala pouze v okolí 4 %. Po druhé světové válce, v roce 1958, se podílel na zkonstruování první chladničky, založené na využití právě Peltierova jevu. [1]

5.4 Thomsonův jev

I pro tento jev platí skutečnosti uvedeny v kapitole termoelektrického napětí v kovech. Protože se ale na rozdíl od kovů mění se zvyšující se teplotou i koncentrace nosičů, má na vznik tohoto napětí větší vliv objemové termoelektrické napětí. Pokud je v daném polovodiči teplotní spád, dochází k přesunu nosičů. A jelikož se v polovodičích mění koncentrace těchto nosičů, dochází k mohutnějšímu přesunu a tím se i na venek jev jeví ve větším měřítku, než tomu bylo u kovů. Pokud polovodičem v takovémto stavu prochází proud stejným směrem, jako je směr teplotního spádu, dojde k dalšímu přesunu volných elektronů do míst o menší teplotě. V tomto místě mají přebytečnou energii, kterou následně předají polovodiči a tím dochází k jeho ohřevu. Analogicky v případě že proud má směr opačný směru teplotního spádu, elektrony odebírají teplo z okolí, aby se jejich energie vyrovnala s okolní, což vede k ochlazování polovodiče. [1]

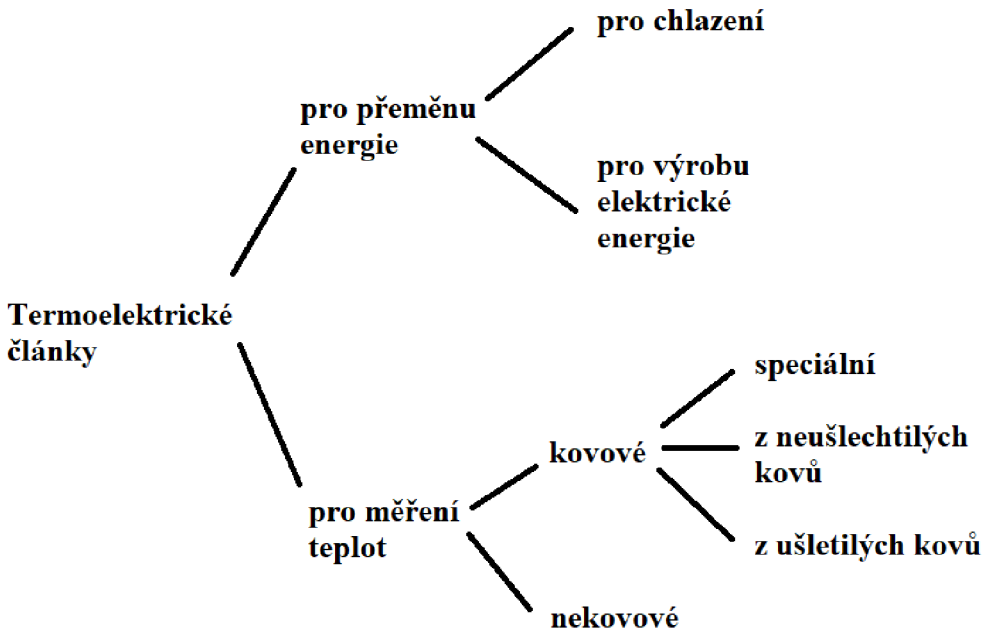
5.5 Benedicksův jev

I přesto, že bylo v úvodu kapitoly zmíněno, že na rozdíl od kovů lze v polovodičích sledovat 4 typy termoelektrických jevů, byl tento jev, který byl nazván podle švédského profesora Carla Benedickse, teoreticky určen i pro kovy. Nicméně tento jev se právě v kovech jen velmi těžko dokazuje, v polovodičích je to stále obtížné, ale již dokazatelné.

Jeho existence spočívá na přítomnosti velkých teplotních spádů. I přesto je ale jeho měření velmi obtížné. Toto napětí $\mathbf{U_B}$, nazývané Benedicksovo, vzniká společně s napětím Seebeckovým, má ovšem opačnou polaritu, takže celkové vzniklé napětí tím oslabuje. Navíc při velkých hodnotách teplotního rozdílu se přestává zvětšovat na rozdíl od Seebeckova, které dále roste. S tím nastává to, že velikost konečného napětí se zmenšuje a nemá praktický význam. Celková velikost tohoto malého oslabujícího napětí je ovšem velmi malá a v praxi bývá zanedbávána. [1]

6 Termoelektrický článek a jeho využití v praxi

Termoelektrický článek je vodivé spojení buď dvou různých kovů nebo dvou různých typů polovodičů. V předchozích kapitolách se tak mluvilo o pokusech na termoelektrických článcích. Dále lze podle způsobu vzniku jednotlivých termoelektrických jevu rozdělit články podle jejich použití na dvě hlavní skupiny: na měřidla teplot a na přeměnu tepla (obrázek 9).



Obrázek 9 Rozdělení termočlánků podle použití [2]

6.1 Termoelektrické články na přeměnu energie

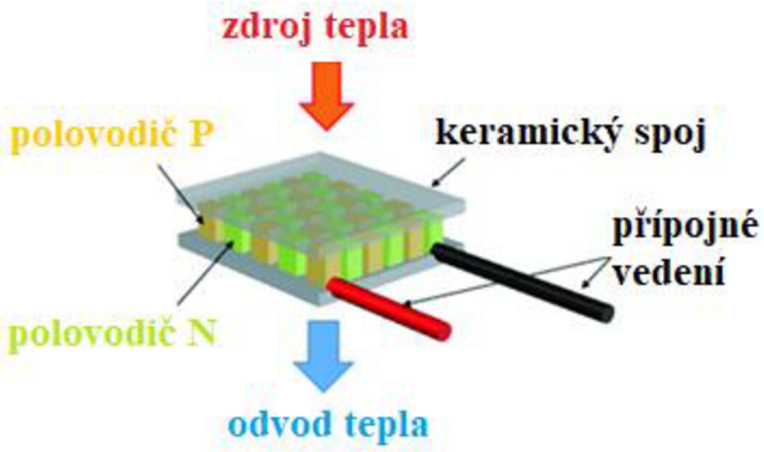
Hlavním cílem této skupiny termočlánků je přeměna tepelné energie vzniklé působením termoelektrických jevů na energii elektrickou. Základním materiálem těchto článků jsou polovodiče. Ty se používají zejména kvůli jejich mnohonásobně lepší přeměně energie. Jejich následné spojení se liší od spojení v čistě kovových termoelektrických článků. Jednotlivé hranolky střídajících se typů polovodiče se spojují vodivými můstky. V těchto místech vzniká přechodový odpor zmenšující jejich efektivitu přeměny. Můstky se k polovodičům připevňují různými metodami: pájením, pokovováním, ultrazvukem nebo chemickou úpravou. Způsob se odvíjí od vlastností daného polovodiče a od toho, zda je vůbec možné danou metodou polovodič spojit s můstkem. Konečné sestavení článků je buď do bloků, nebo meandrů (obrázek 10), kde

meandrovité uspořádání má větší ztráty přes izolaci, kterou prochází jednotlivé vodivé spoje. Proto se v dnešní době využívá převážně blokové uspořádání. [2]

Obrázek 10 Vyobrazení způsobů konstrukce termočlánku [2]

6.1.1 Termoelektrický generátor TEG

V praxi se pro tento typ termočlánků, využívající právě Seebeckův jev v kombinaci s polovodičovými materiály, vybral pojem termoelektrický generátor (zkráceně TEG) (obrázek 11). Z praktického hlediska při přeměně tepelné energie na elektrickou energii nemají termočlánky s využitím pouze kovových materiálů význam.



Obrázek 11 Polovodičový TEG [24]

U tohoto typu přeměny je několik zásadních faktorů, které při jejich výrobě a využití hrají zásadní roli. Hlavním z nich je efektivita přeměny energie termočlánku. Díky konstrukčnímu řešení termočlánku vzniká ve spojení polovodiče s vodivým můstkem přechodový odpor, který by měl být pod hranicí 3.10^{-5} Ω/cm^2, zvyšuje se s počtem těchto přechodů v obvodu článku a velmi závisí na kvalitě zpracování jednotlivých spojů. Dalším

faktorem je vlastní odpor termočlánku. Ten závisí na kvalitě vybraných materiálů polovodiče a můstku. Celkový odpor článků je dán vztahem:

$$R = R_p + R_n = l \cdot \left(\frac{\rho_p}{S_p} + \frac{\rho_n}{S_n} \right) \ [\Omega] \tag{19}$$

kde **R** je výsledný odpor článku, $\mathbf{R_p}$, $\mathbf{R_n}$ jsou odpory jednotlivých polovodičů, **l** je délka jednotlivých hranolků polovodičů a $\boldsymbol{\rho_p}$, $\boldsymbol{\rho_n}$ jsou hodnoty rezistivit pro jednotlivé materiály polovodičů. Dále se bere v potaz tepelná vodivost obou polovodičů. Ta způsobuje přenos tepla ke studenému konci a naopak, což má za následek zmenšování rozdílu teplot a tím zmenšování výsledného termoelektrického napětí. Vliv zmenšování teplotního rozdílu na výsledné napětí je zřejmý ze vztahu:

$$U_S = \alpha(\theta_1 - \theta_2) \ \ [V] \tag{20}$$

kde $\mathbf{U_S}$ je výsledné Seebeckovo napětí, $\boldsymbol{\theta_1}$, $\boldsymbol{\theta_2}$ jsou teploty můstků na ohřáté a chladné straně a α je součinitel termoelektrického napětí článků. Tento součinitel má hlavní dopad na velikost teoretické hodnoty výsledného napětí článku, takže materiál polovodiče se vybírá také podle toho, aby vznikl co největší rozdíl a tím i co největší hodnota tohoto součinitele. Součinitel termoelektrického napětí je dán vztahem:

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \ \ [V.K^{-1}] \tag{21}$$

kde **α** je výsledný součinitel a $\boldsymbol{\alpha_p}$, $\boldsymbol{\alpha_n}$ jsou jednotlivé součinitele polovodičů podle jejich typu. Výběr musí být proveden s předpokladem nízkého vnitřního odporu materiálů polovodiče. Všechny tyto faktory a vlivy se později konsolidovali do parametru **Z** nazývaného termoelektrickou efektivitou článku daného vztahem (22):

$$Z = \frac{\alpha^2}{\Lambda \cdot R} \ \ [K^{-1}] \tag{22}$$

kde **Λ** je tepelná vodivost a **Z** je termoelektrická efektivita článku. Tento vztah lze také vyjádřit pomocí materiálových konstant, čímž vzniká vztah nový (23):

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \ \ [K^{-1}] \tag{23}$$

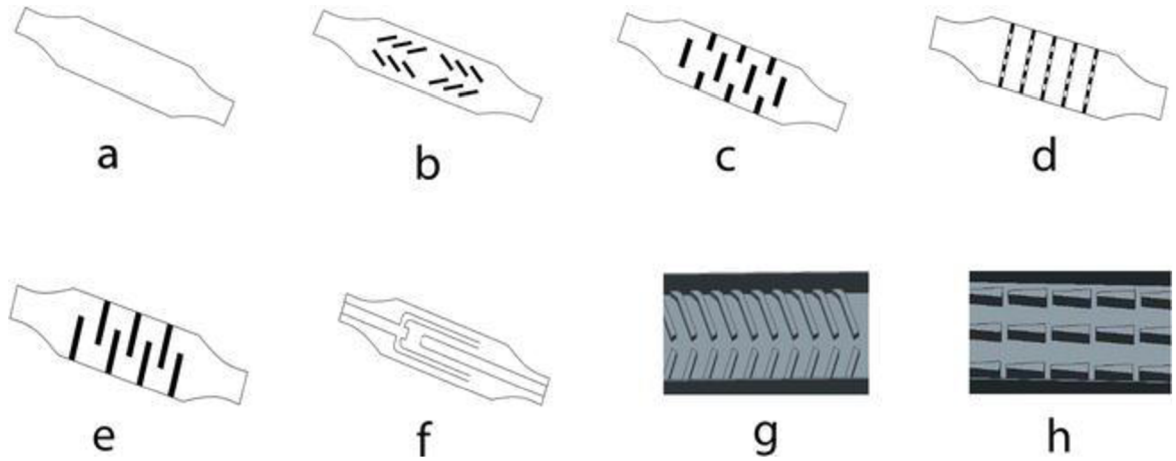
kde **σ** je konduktivita a **λ** je měrná tepelná vodivost. Tímto vztahem se tedy dále posuzuje vhodnost článku pro daný typ aplikace. Účinnost termočlánku lze vyjádřit vztahem (24):

$$\eta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} \cdot \frac{\sqrt{1 + 0.5Z(\theta_1 - \theta_2)} - 1}{\sqrt{1 + 0.5Z(\theta_1 - \theta_2)} + \frac{\theta_2}{\theta_1}} \tag{24}$$

kde první člen součinu vyjadřuje termodynamickou účinnost a druhý bere v úvahu a odečítá od ní nevratné ztráty, vznikající během přeměny. Nicméně účinnost termočlánků převyšuje účinnost přeměny energie parních strojů, takže se dá říci, že jsou pro praktické využití vhodné. [1, 2]

6.1.2 Příklady využití termoelektrických generátorů

Při spalování fosilních paliv ve spalovacím prostoru se 30 % vzniklého tepla ztrácí přímo v motorovém bloku a dalších 30 % jako součást výfukových plynů. Toto odpadní teplo ohřívá právě blok společně se svody a výfukovým potrubím, kde dochází k nárůstu teplot až k hodnotě 700 °C, čímž vzniká velký teplotní rozdíl mezi ním a chladícím okruhem. Na tomto místě lze tento teplotní rozdíl využít instalací Seebeckova termočlánku. Nicméně při instalaci těchto článků je nutno vzít v úvahu ovlivnění charakteristiky samotného motoru. Ochlazování těchto míst odvodem tepla do termočlánku může mít negativní dopad, takže při použití těchto článků musí být dbáno na to, aby tato charakteristika nebyla ovlivněna tak, že by výsledné parametry motoru vedly ke zhoršení energetické i ekologické stránky daného vozu. [4]



Obrázek 12 Způsob umístění výměníků uvnitř výfuku [5]

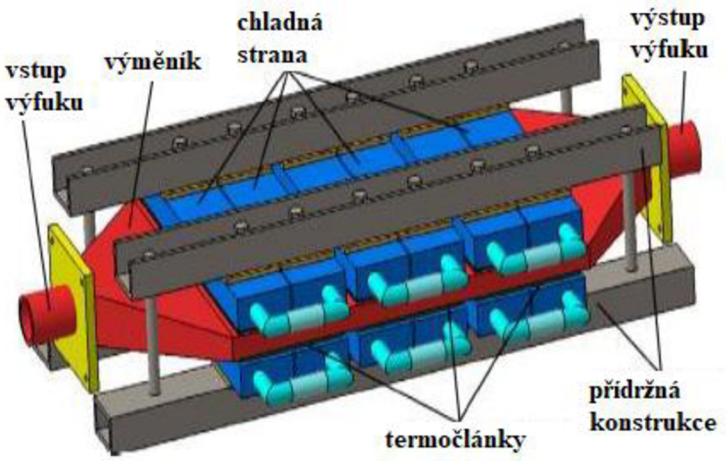
Konstrukce zařízení pro využití odpadního tepla ve výfuku vozidla obvyklé mývá 3 části. Hlavní částí jsou samotné termoelektrické generátory. Druhá část, výměník tepla, pohltí část vzniklého odpadního tepla z výfukových plynů a přesune ji k horké straně termočlánku. Samozřejmé bohužel je, že se z výměníků část tepla vyzáří zpět do okolí, takže výsledné množství přivedeného tepla je menší. Rozestavení jednotlivých funkčních částí výměníku se tvoří různými způsoby (obrázek 12).

Na druhé straně termočlánku se nachází chladič, který má tuto druhou stranu naopak udržovat co nejchladnější, aby teplotní rozdíl mezi oběma stranami byl co největší. Takovýto chladič může být pasivní a jeho funkce být stejná té u výměníků tepla, kdy teplo odvádí od termočlánku do okolního prostředí, nebo může na toto místo být přiveden vývod od již existující chladící soustavy automobilu. U druhé možnosti se zmenšuje komplexita výfukového ústrojí s tímto systémem, protože dojde k využití již existujícího systému, nicméně teplota chladícího média může dosahovat mnohem vyšších teplot, než by tomu bylo u chlazení pasivního a tím se i zmenšuje efektivita přeměny energie v termočlánku v důsledku poklesu teplotního rozdílu mezi stranami článku. S efektivitou článku také souvisí typ spalovacího motoru. U motoru spalujícího benzín mají výfukové plyny zhruba o 300 °C větší teplotu, než u motoru vznětového. Z toho vyplývá, že tento systém bude lépe využit u automobilů se zážehovým motorem. Podobný systém by mohl být využit i pro samotné chladící ústrojí vozidla, nicméně množství tepla tímto systémem generované je ve srovnání s tím ve výfukových plynech velmi malé a musela by být použita lepší technika pro zachytávání tepla.

Instalace tohoto systému do výfukového ústrojí vozidla (obrázek 13, 14) ale přináší i negativa. Zvýšením hmotnosti vozidla se zvětšuje i jeho valivý odpor, čímž narůstá spotřeba paliva. Tepelný výměník vložený do výfukového potrubí zvětšuje odpor proti proudění výfukových plynů od spalovacího prostoru, čímž se narušuje charakteristika průběhu motoru. Při použití systému, kde chladná strana termočlánku je chlazena existujícím chladícím oběhem automobilu, je také namáháno více čerpadlo, které tím pádem spotřebuje více elektrické energie. S těmito negativy je nutno počítat při použití tohoto systému, aby v konečném stavu energetické, ekologické a ekonomické hlediska nebyla horší než bez tohoto systému. [5]

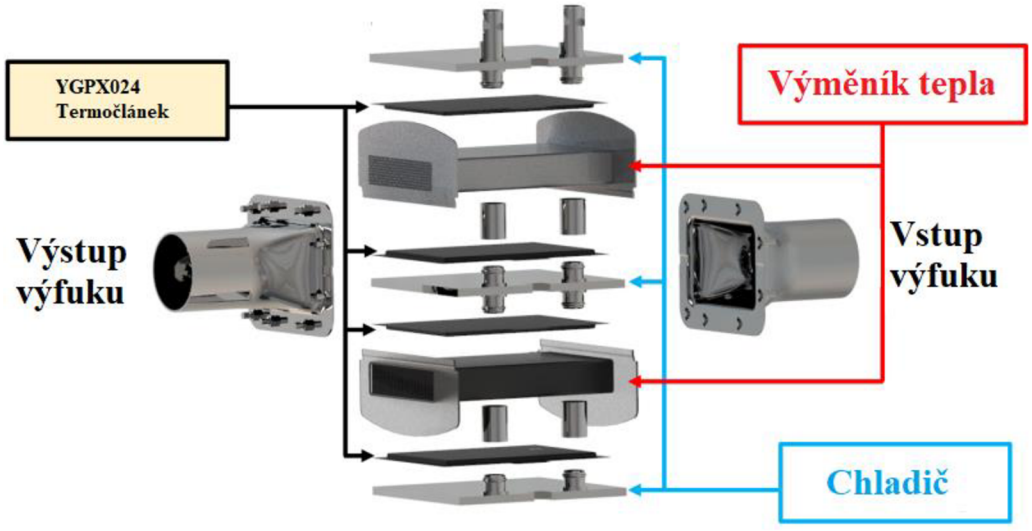
Obrázek 13 Fotografie umístění termočlánků do výfukového ústrojí [20]

Odborníci v ústavu IPM ve Freiburgu odhadují, že při použití termoelektrického generátoru o výkonu 1 kW by mohla být elektronika automobilu napájena pouze z něho, což by vedlo ke snížení spotřeby automobilu. Na takto výkonný termočlánek je ale potřeba takového materiálu, který dokáže tento výkon udržet při stálé teplotě chladné strany. Materiály termočlánku bývají i dobrými vodiči teploty, takže jejich struktura musela být modifikována tak, aby při zachování jejich elektrické vodivosti byla snížena jejich vodivost tepelná. Německé středisko DLR využívá materiál na bázi teluridu vizmutitého Bi_2Te_3 a článek jimi zkonstruovaný má výkon pohybující se okolo 200 W. Článek o podobném výkonu 270 W použila i americká automobilka General Motors. V automobilce Nissan vytvořili termočlánek na bázi SiGe pomocí 72 článků, který ale generoval pouze do 36 W. Německá firma BMW se také připojila a pracovala na začlenění termoelektrických generátorů na výfukové potrubí jejich automobilů. V jejich případě mají termočlánky fungovat jako rekuperátory při brždění nebo jízdy na vyřazený převod a energii vracet zpět do akumulátoru vozu. Termoelektrický generátor byl využit i ve výfukovém potrubí od firmy Caterpillar na dieselovém motoru, jehož materiálem byla Heuslerova sloučenina. Ve Spojených státech amerických s podporou ministerstva energetiky vznikl v roce 2004 pokusný generátor s výkonem 255 W. Ve stejném roce byl vytvořen generátor schopný výkonu až 1 kW a byl využit v obrněném transportéru Stryker. [4, 5, 20].



Obrázek 14 Schéma uspořádání TEG ve výfukovém ústrojí [5]

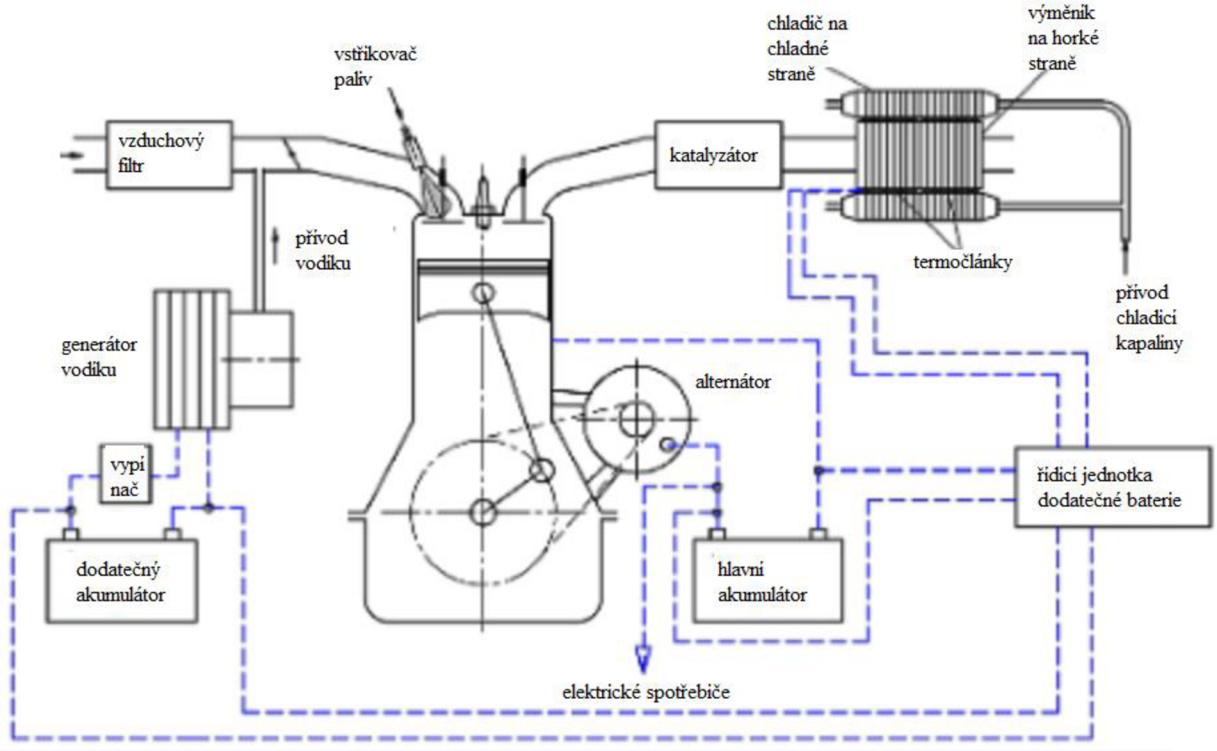
Technici ve společnostech Yamaha a Sumitomo v roce 2021 demonstrovali svůj termočlánkový generátor YGPX024 jako součást výfukového ústrojí za cílem snížení tvorby oxidu uhličitého (obrázek 15). Ve spolupráci s FEV Europe GmbH poté tento generátor ve spojení s výměníky tepla otestovali pomocí cyklů WLTP a US06. Během testování bylo dosaženo snížení produkce oxidu uhličitého o 1,9 %. Společnosti nicméně konstatovali, že do budoucna předpokládají zlepšení této technologie a tím i snížení produkce CO2 až o 3,1 %. [29]



Obrázek 15 Rozložený model s termočlánkem YGPX024 [29]

Instalace termočlánků do výfuku je logickým krokem při zefektivnění provozu vozidla se spalovacím motorem. Obvykle je tento výkon využit přímo pro dobíjení akumulátoru, popřípadě přímo k napájení běžných elektrických spotřebičů vozidla. Netradičním spotřebičem by mohl být generátor vodíku. Studie, která proběhla ve společnosti SAE International, rozebírá možnost přidávání vodíku do směsi vzduch-palivo spalovacích motorů. Souhlasí s mnoha experimenty, které potvrzují využití vodíku (popřípadě směsí plynů obsahující vodík) jako

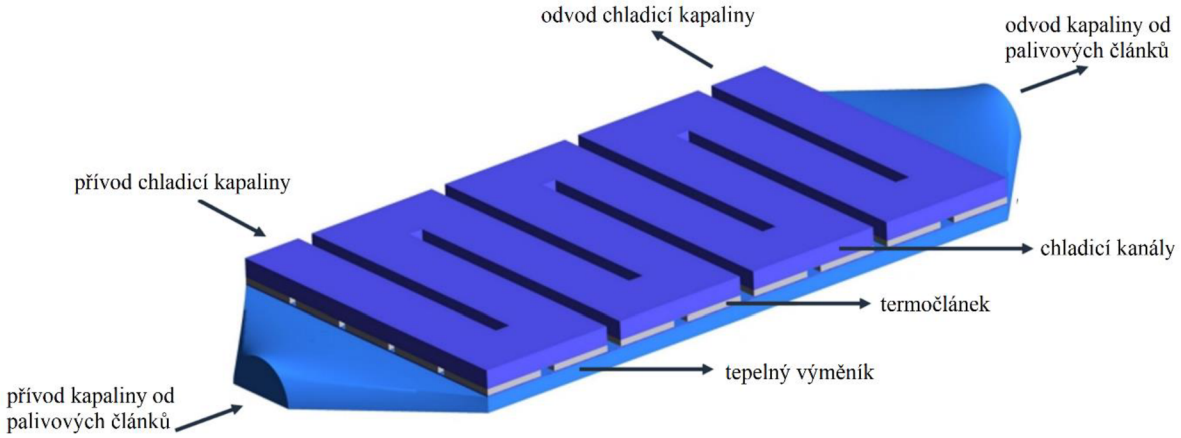
náhradu za tradiční dnes využívaná fosilní paliva. Nicméně využití vodíku namísto těchto paliv je výrazně limitováno. Čistý vodík nelze dostatečně bezpečně nebo kompaktně skladovat a jeho energetická hustota je značně nízká. Studie tedy poukazuje na využití směsí obsahující vodík, které lze vytvořit elektrolýzou alkalických vodných roztoků. Elektrolýza je avšak značně energeticky náročná a při testování onoho systému byla celková efektivita motoru nižší kvůli zatížení motoru elektrolyzérem. Proto byla k tomuto systému přidána instalace termočlánku do výfukového ústrojí vozidla (obrázek 16).



Obrázek 16 Schéma systému s generátorem vodíku [26]

Termočlánek dobíjí dodatečný akumulátor, který napájí generátor vodíku. Součástí dodatečného akumulátoru je i řídicí jednotka, která zajišťuje monitorování hladiny nabití akumulátoru. Zajišťuje také přepnutí napájení generátoru k hlavnímu akumulátoru vozu při úplném vybití akumulátoru dodatečného pro zajištění neustálého přívodu energie. Pro zefektivnění přeměny teplené energie v elektrickou je chladná strana termočlánků připojena ke chladicímu ústrojí vozidla. Na tomto principu pracuje například systém od společností Hi-Z Technology a Dynamic Fuel Systems. Tento systém využívá termočlánkového generátoru o výkonu 1 kW pro napájení generátoru vodíku Jetstar. [26, 27]

Další možné použití termočlánku naznačuje studie, která popisuje zabudování termočlánků přímo do palivových článků vodíkové baterie. Vedlejší produkt reakce probíhající v palivovém článku je odpadní teplo a voda, která teplo odvádí od článků pryč. Na modelu (obrázek 17) je znázorněna implementace tepelného výměníku, kterým protéká kapalina přivedená od palivových článků. Výměník předává teplo horkým stranám čtyřiceti termočlánků. Chladné strany termočlánků jsou chlazeny chladicí kapalinou pro udržení co největšího teplotního rozdílu.

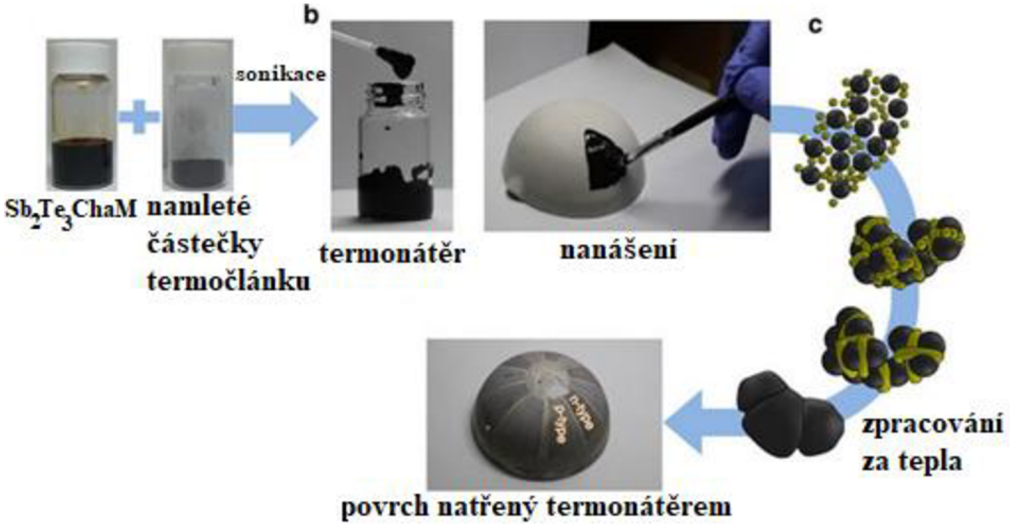


Obrázek 17 Výměník s termočlánky vozu s pohonem pomocí palivových článků [28]

Systém, se kterým byl prováděn experiment, nicméně potřebuje dále vylepšovat. Design výměníku velmi ovlivňuje napětí vytvořené termočlánkem a bývá velmi proměnné, od 0,77 do 1,36 V. Výsledný výkon termočlánků byl také velmi nízký a pohyboval se pouze v okolí 40 W. Z jiné studie lze také vypozorovat postupné snižování efektivity jednotlivých článků při jejich použití ve větším počtu. Tato studie testovala obdobným způsobem svoji variantu a při návrhu byl zjištěn výkon jednoho termočlánku, který se pohyboval v oblasti 200 mW. Termočlánky zmíněné v předchozí studii odebíraly kapalině již příliš mnoho tepelné energie, a proto klesl průměrný výkon tvořící jeden článek na hodnotu pohybující se okolo 100 mW. Postupné ochlazování kapaliny také způsobovalo to, že termočlánky, které se nacházely na konci průtokového kanálu, přispívaly významně méně k celkové hodnotě výsledného výkonu než články, ke kterým kapalina dorazila nejdříve. Z toho vyplívá, že bylo vhodné vytvořit lepší design průtokového kanálu s výměníkem, který by lépe rozděloval proud kapaliny. [28, 30]

Kuriózní aplikací byl termočlánek vyvinutý jihokorejskými vědci z národního výzkumného ústavu UNIST. Ti vyvinuli speciálním postupem termočlánek, který je ale ve formě nátěru (obrázek 18). Ten se nanáší na plochu, ze které je poté teplo přeměňováno na elektrickou energii. Na rozdíl od ostatních nátěrů či barev je tento svojí efektivitou

26,3 $^{mW}/_{cm^2}$ srovnatelný s běžnými termočlánky v konvenční formě. A právě jeho forma mu dodává značnou flexibilitu, protože se dá nanést na mnoho různých povrchů, například na blok motoru, povrch výfukového ústrojí nebo na samotnou karoserii vozidla. U bloku motoru a výfukového ústrojí by bylo přeměňováno odpadní teplo vzniklé spalováním, nátěr na karoserii by přeměňoval teplo, které karoserie pojme od slunečního záření. U tmavších barev by tato přeměna byla nejefektivnější, protože tmavé barvy, například černá, pohltí více tepla než barvy světlé. [22]



Obrázek 18 Proces přípravy a aplikace termoelektrického nátěru z ústavu UNIST [22]

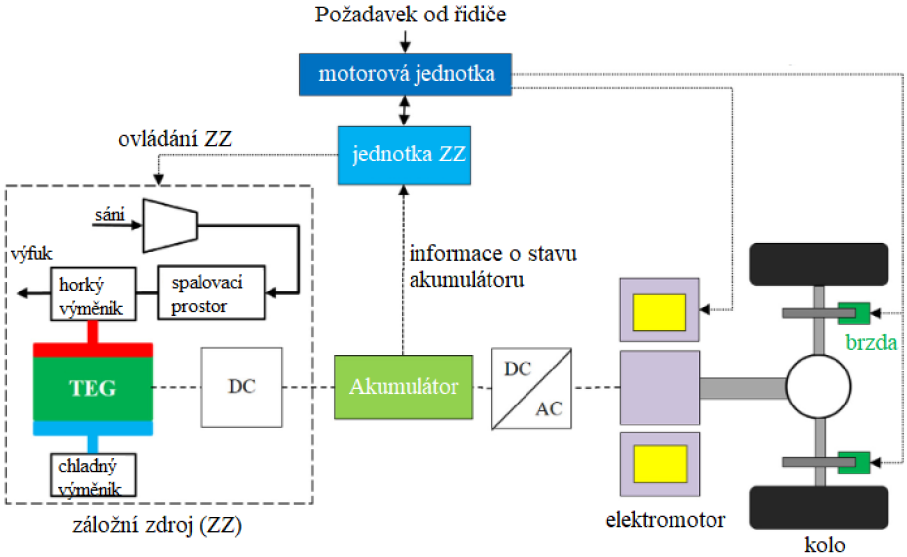
Na chemicko-technologické fakultě na Univerzitě v Pardubických probíhá studium často využívaných termoelektrických materiálů na bázi bismutu nebo antimonu. Zaměřením výzkumného týmu je jejich vylepšení různými přídavky a další prohlubování znalostí o vlastnostech daného materiálu v závislosti na jeho vnitřních bodových poruchách. Dále se tým zaměřuje na hledání nových potenciálních termoelektrických materiálů. Jejich pozornost dostávají zejména materiály se skutteruditovou strukturou, protože právě tato struktura se jeví jako jedna z vhodnějších svojí možností integrovat různé přídavky pro zlepšení termoelektrických vlastností. [12]

Dalším celkem praktickým využitím je americký patent od norských techniků, který má plnit funkci přenosného zdroje elektrické energie. Základem tohoto patentu je termočlánkový generátor, jehož horká strana má být vystavena teplému prostředí a jeho druhá strana je spojena se zásobníkem, který je od okolního prostředí velmi pečlivě odizolován a udržuje v sobě chladicí médium, vytvářející v termočlánku teplotní gradient. Hlavní využití tohoto zařízení má

být právě jako přenosný zdroj elektrické energie například při pohybu v přírodě daleko od možných zdrojů elektrické energie. Horká část má být vystavena například slunečnímu svitu nebo tepelnému záření ohniště, které bývá často rozděláváno pro přípravu jídla a ohřev. Spousta tepelné energie uniká do okolního prostoru a je nevyužita. Část této energie lze využít tímto zařízením. Termočlánek, připojený k řídicí jednotce se stabilizátorem napětí, je schopen napájet zařízení s minimálním příkonem do 10 W. Pro zvýšení versatility je součástí jednotky také volič velikosti výstupního napětí. [31]

Společnost European Thermodynamics Limited se zabývá vývojem termoelektrických generátorů vhodných v použití ve vlhkých prostředích. Tyto moduly dosahují výkonu až 35 $^{mW}/_{cm^2}$. Tato společnost je dále součástí mnoha projektů, které se zabývají zlepšením efektivnosti provozu vozidel se spalovacími motory, jedním z jejich projektů je využití termočlánků ve výfukovém ústrojí. Dále se podílejí také na tvorbě lepších polovodičových materiálů pro použití v termočláncích. [19]

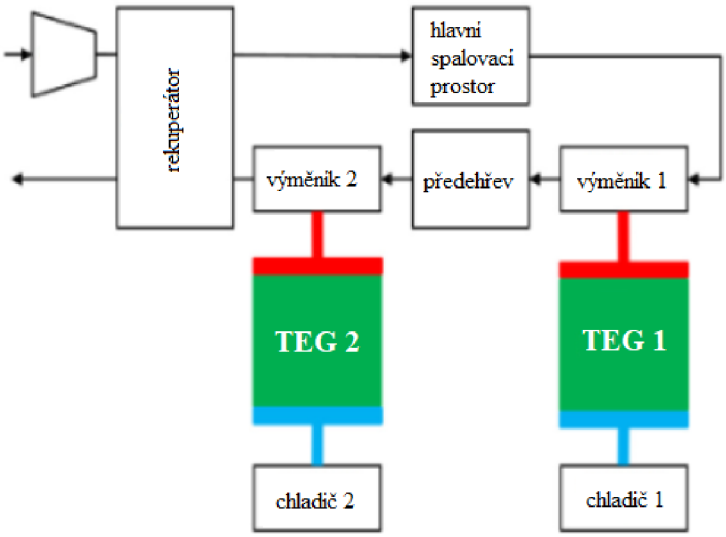
Studie z Centre Technique de Vélizy popisuje možné využití termoelektrických generátorů ve spojení s motory s vnějším spalováním. Vysvětluje možné nahrazení tradičního motoru s vnitřním spalováním za motor se spalováním vnějším, který by vytvářel ohřívací médium pro horkou stranu termočlánkového generátoru. Chladná strana termočlánku by byla ochlazována okolním proudícím vzduchem, popřípadě by mohlo teplo vzniklé na chladné straně využito pro výhřev prostoru posádky v chladném období. Vzniklá energie je poté předána přes



Obrázek 19 Schéma systému motorem s vnějším spalováním ve spojení s TEG [26]

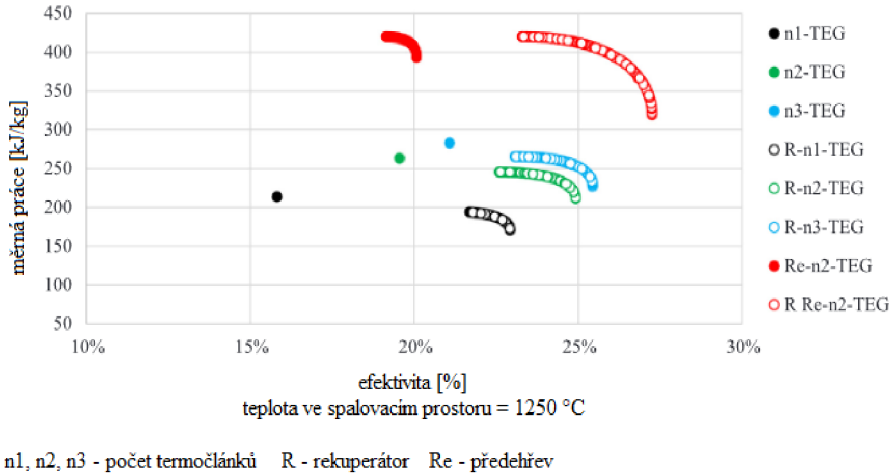
stabilizátor přímo akumulátoru vozu. TEG by v tomto uspořádání plnil roli hlavního dobíječe akumulátoru vozu. Spalování a přeměna v generátoru by byla zcela nezávislá na provozních podmínkách vozidla a mohla tak pracovat co nejefektivněji. Tento systém by byl uzavřen v bloku záložního zdroje (ZZ). Jednotka ZZ by pak v závislosti na informaci o stavu nabití akumulátoru a příkazů od motorové jednotky vozidla ovládala ZZ. Výhodou tohoto systému je jeho jednoduchost, provoz bez hluku a vibrací, a možnost použití různých paliv pro vnější spalování. Nevýhodou tohoto systému je opět vysoká cena a nízká efektivita. Na schématu (obrázek 19) lze vidět příklad možného uspořádání jednotlivých částí hybridního vozu.

Studie dopodrobna rozebírá nedostatky tohoto systému pomocí experimentálních měření a výpočtů a poukazuje na možná místa zlepšení. V části spalovacího prostoru doporučuje zvyšovat teplotu uvnitř například samotným zvýšením teploty spalování, rekuperátory ve výfuku nebo předhřev spalovacího prostoru pro každý jednotlivý termočlánek. Ve výfukovém ústrojí doporučuje použít více za sebou zapojených modulů pro zvýšení množství zachyceného tepla, popřípadě zvětšení teplosměnných ploch výměníků na horké straně termočlánků. Zvyšováním teploty ve spalovacím prostoru z 950 °C na 1250 °C bylo dosaženo snížení ztrát v tomto místě až o 36 %, při přidání rekuperátoru klesnou ztráty až o 53 %. Při zapojení třech za sebou termočlánků dojde ke snížení ztrát ve výfuku až o 39 %. Při experimentu bylo zjištěno, že přidáním dalších termočlánků (více než 3) se ztráty sníží oproti předchozímu počtu termočlánků jen velmi málo a také se sníží účinek rekuperátoru, nýbrž se větší část tepla zachytí přímo na výměnících termočlánků.



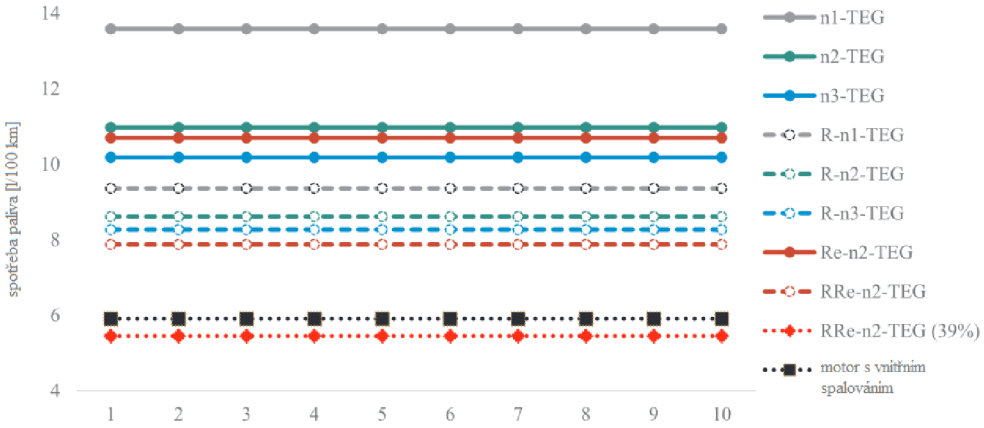
Obrázek 20 Schéma nejefektivnějšího uspořádání [26]

Následující tabulky sumarizují výsledky experimentu, kde první graf (obrázek 21) vyjadřuje závislost měrné práce na efektivitě a druhý (obrázek 22) průměrnou spotřebu paliva (benzín):



Obrázek 21 Graf závislosti měrné práce na efektivitě [26]

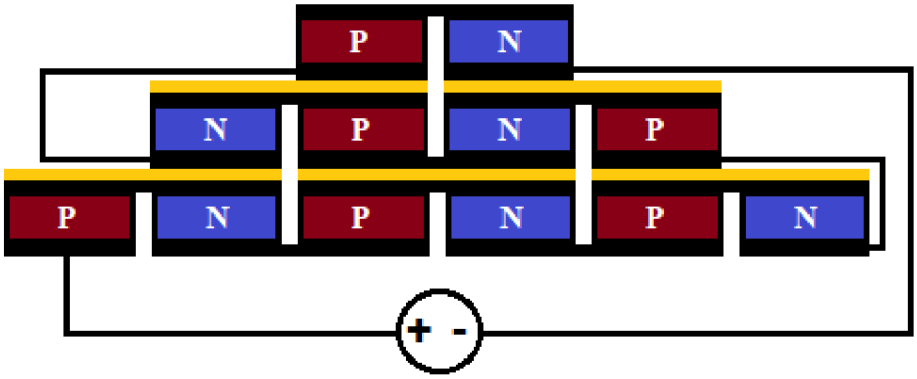
Nejlepších výsledků bylo dosahováno při nejvyšší teplotě ve spalovacím prostoru, se dvěma termočlánky, rekuperátorem a předehřevem (obrázek 20). Nicméně celková efektivita vyšla vždy menší, než je efektivita spalování v motorech s vnitřním spalováním (efektivita spalování ve tomto typu motoru je 36 %). Průměrná spotřeba paliva rovněž vycházela hůře pro hybridní motor. Při zlepšení efektivity rekuperátoru o 7 % a zlepšení termoelektrických vlastností termočlánků lze dosáhnout efektivity vyšší než ve spalovacím motoru a tím nižší spotřeby paliva, která byla až o 8 % lepší. Celková efektivita by tak dosáhla hodnoty 39 %. Pokud by tedy bylo možné zlepšit vlastnosti rekuperátoru a termočlánků, bylo by možné sestrojit hybridní pohon, který bude mít lepší energetické vlastnosti než motor s vnitřním spalováním. [26]



Obrázek 22 Graf pro porovnání průměrných spotřeb [26]

6.1.3 Termoelektrický chladič

Termoelektrický chladič je termočlánek, u něhož se využívá Peltierova jevu. Hlavním cílem praktického provedení konstrukce je zvýšení počtu přechodových bodů článku. To se dosáhne spojením několika dvojic článků sériově nebo sérioparalelně, čemuž se říká kaskádní chladicí termobaterie (obrázek 23). Následným připojením ke zdroji elektrické energie dojde k ochlazení jedné skupiny přechodů a k ohřátí druhé. Rozdíl teplot bude dán velikostí proudu procházejícího termočlánkem, materiálem polovodičů a teplotou okolí přechodů.



Obrázek 23 Uspořádání termočlánků do termobaterie [1]

Základním parametrem chladícího článku je chladící činitel **ε**, který je dán vztahem:

$$\varepsilon = \frac{P_O}{P} \quad [-] \tag{25}$$

kde P_O je chladicí výkon článku a P je celkový příkon článku a je součtem poloviny Jouleova tepla uvolněné v článku a příkonu pro překonání napěťového rozdílu mezi oběma konci. Derivací tohoto vztahu dostaneme závislost pro optimální velikost proudu, při kterém je možné získat co největší teplotní rozdíl mezi oběma stranami článku. Chladicí výkon termočlánku závisí zejména na materiálu. Hlavními parametry jsou součinitel termoelektrického napětí, tepelná a elektrická vodivost a rozměry jednotlivých částí. [1]

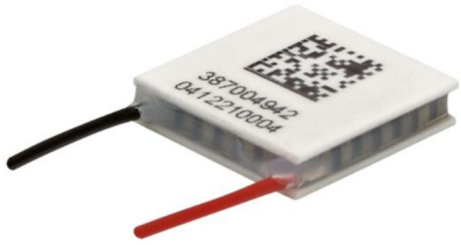
Chladicí článek by měl mít nízkou tepelnou vodivost pro zmenšení přenosu tepla z teplé strany na stranu chladnou a tím k postupnému zmenšování chladicího efektu. Tuto vlastnost lze omezovat výrazným ochlazováním teplé strany článku například proudícím vzduchem nebo jiným médiem, čímž se zmenší množství přeneseného tepla na chladnou stranu. Dále by měl

také mít naopak vysokou elektrickou vodivost. Pokud by byla nízká, znamenalo by to při určitém napětí nižší procházející proud a tím i nižší chladicí účinek a dorovnání této ztráty by znamenalo zvýšení napětí, což v některých aplikacích není přijatelné. Zároveň by to vedlo ke zvýšení Jouleova tepla a docházelo by tak k rychlejšímu ohřevu celého článku. Rozměry jednotlivých částí termočlánku, například průřezy nebo délky, mají značný vliv na výslednou elektrickou vodivost. [1, 7]

6.1.4 Příklady využití termoelektrických chladičů

Kvůli nízké efektivitě a tím i vyšší energetické náročnosti se chladicí články obvykle nacházejí ve specializovaných zařízeních využívající kompaktnost těchto článků, nebo v zařízeních, které nepotřebují výkonné chlazení, anebo v prostorech, ve kterých je dbáno na udržení minimálního hluku.

V běžném životě se s tímto chlazením nejčastěji lze setkat v podobě chladičů výkonových elektronických součástek, obvykle v malých či přenosných přístrojích či zařízeních. Výpočetní jednotky, tranzistory nebo tyristory využívané ke spínání vyšších proudů nebo jinak intenzivně namáhané často využívají právě termoelektrické chlazení. Nicméně pokud je to možné, tak se spíše využívá chlazení konvenční – chlazení proudícím vzduchem přes přidělaný žebrovaný chladič. Velkou výhodou je právě pak řešení kompaktních konstrukcí při zachování chladicí schopnosti. Například v prašném prostředí by mohlo docházet k zanášení ventilátorů či plochy chladičů, čímž se značně snižuje jejich chladicí schopnost.



Obrázek 24 Chladicí termočlánek [18]

Využití v automobilovém průmyslu je nicméně stále užší. V dnešní době se lze setkat obvykle pouze jako s chladičem ve stísněném nebo v prostoru, kde nelze využít jiného způsobu chlazení. Dnešní moderní automobily disponují mnoha senzory a řídicími jednotkami, které zpracovávají velké množství vstupů, a tím může docházet k jejich ohřevu. Pro tyto zařízení je ideální využít právě chladicí termočlánky. Firma Laird Thermal Systems dodává tyto termočlánky s označením HiTemp ETX právě pro provoz v automobilech (obrázek 16). [18]

Chladicí články by mohli najít uplatnění pro ochlazování prostoru posádky s označením TEAC (thermoelectric air conditioner) jako náhrada za klasické chlazení pomocí odpařovací či absorpční klimatizace. Kvůli své nízké efektivitě a stále ještě vysoké ceně není použití v automobilech obvyklé. Může se ale objevovat jako chlazení energeticky nenáročných prostor či zařízení. K tomu jim napomáhá jejich malá uhlíková stopa, kompaktnost, spolehlivost a jednoduchost. Zajímavým a nenáročným použitím je jako chladič v různých laboratořích, například pro chlazení vzorků při měření nebo jejich úplné zmrazení. [2, 8, 14]

Stejného využití dostávají termočlánky například v přenosných nádobách pro skladování zkazitelných potravin a nápojů. Termoelektrické chladničky jsou celkem rozšířeným přenosným zařízením. Obvykle bývají naprosto nehlučné, lehce přenosné, nejsou příliš těžké, ale k zachování přenosnosti bývají objemy těchto chladniček menší, pohybující se v okolí 20 l (obrázek 25).

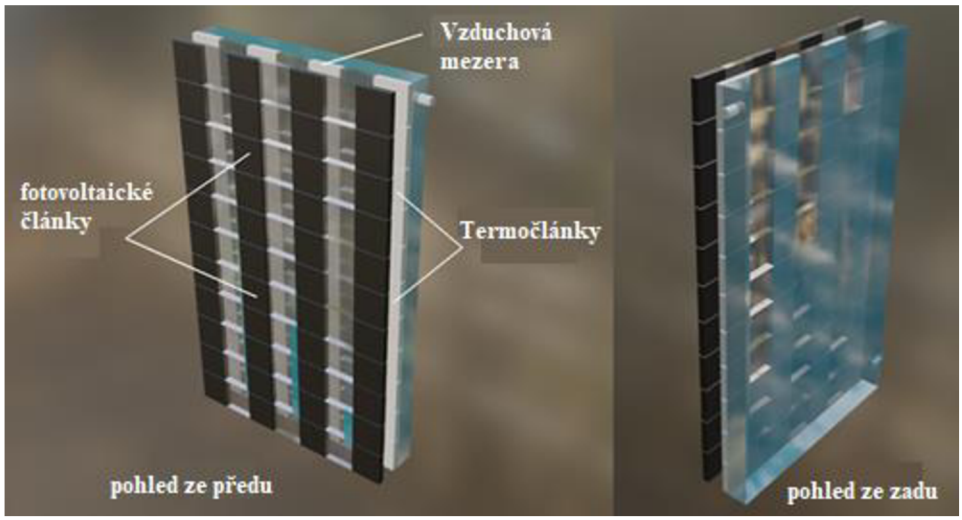
Obrázek 25 Přenosná termoelektrická chladnička [32]

Většina z nich dokáže bez problémů udržet teplotu uvnitř pod bodem mrazu při okolní teplotě okolo 25 °C. Samozřejmě lze najít typy, které pouze prostor uvnitř chladí a nejsou schopny mrazit, bývají ale také o dost cenově dostupnější. Konstrukce těchto ledniček je specializována na dokonalou izolaci vnitřního prostoru od okolního prostředí, což napomáhá ke snížení potřebného chladicího výkonu. Některé modely nabízí udržení chladného prostředí až 12 h po odpojení chladničky od napájení. Chladicím výkonem se bohužel nevyrovnají kompresorovým chladničkám, které dokáží s podobnými rozměry schladit vnitřní prostor až o 50 °C oproti okolnímu prostředí. Bývají ale dost hlučné a mnohem méně přenosné kvůli svým větším rozměrům a hmotnosti a tím je jejich použití odlišné od chladniček termoelektrických. Jejich napájení bývá pro uživatele přívětivé. Vedle možnosti napájení z elektrické sítě 230 V mívají chladničky často možnost napájení z autozásuvek na 12 V a 24 V osobních automobilů. Proto jsou často využívány uživateli při cestování na delší vzdálenosti, jsou

uloženy v zavazadlovém prostoru a udržují potraviny v chladu. Některé automobilky dodávají přenosné termoelektrické chladničky jako příplatkovou výbavu k vozu, nicméně co se týče chladniček přímo integrovaných do interiéru vozu (často s přístupem přes sklopné prostřední opěradlo zadních sedaček), tak bývají pouze kompresorové. [32]

I přesto ale, že bývají termoelektrické chladničky poměrně kompaktní a přenosné, v některých částech Země je zapotřebí ještě menšího konstrukčního řešení. Projekt z malajské university Tun Hussein Onn popisuje návrh kompaktní mini-chladničky za použití Peltierových článků ve spojení s mikrokontrolerem Arduino. Popisuje zde problém s životními podmínkami, které se zásadně liší od těch panujících ve vyspělých státech západního světa. Jeden z příkladů mluví o přenosu nakoupených potravin na venkovních trzích během panování vysokých teplot. Často zde může dojít ke znehodnocení potraviny, než je schopna být dopravena zpět do chladného prostředí. Mluví se zde také o žití v prostorech s menší užitnou plochou, popřípadě s přísunem nedostatečného množství elektrické energie. Součástí mini-chladničky je také vysílač a přijímač pro dálkový bezdrátový monitoring stavu. [33]

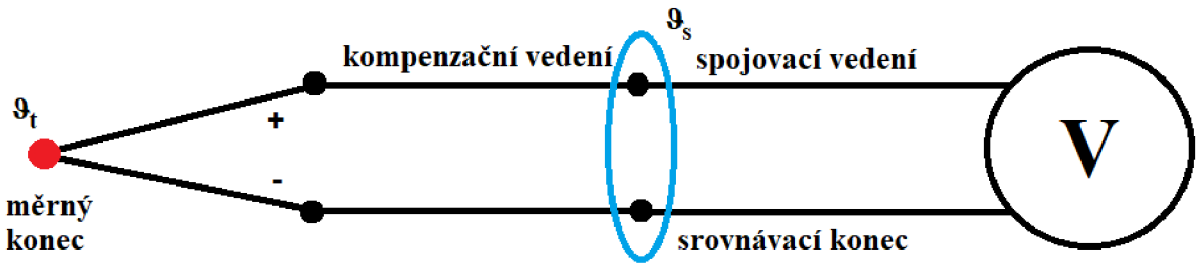
Výzkumná skupina složená z indických výzkumníků z Shoolini University v Indii a jejich australských protějšků z University of New South Wales v Austrálii prezentovaly svoje výsledky z pokusů spojení fotovoltaických systémů a termoelektrických článků pro zajištění vytápění a chlazení v budovách (obrázek 26). Vyzdvihují zde spolehlivost, nenáročnost údržby, provoz s nízkou hlučností a menší ekologickou náročností při použití takového systému. Poukazují ale na nízkou efektivitu a značný kapitálový výdaj, který sebou systém přináší. [14]



Obrázek 26 Spojení termočlánků a fotovoltaických panelů [14]

6.2 Termoelektrické články pro měření teploty

Základními součástmi termoelektrického měřidla jsou dva různé kovy, popřípadě nekovy, tvořící kladnou a zápornou větev, a jejich spoj, který se nazývá měřicí spoj. Princip měření spočívá v různých teplotách konců vůči teplotě měřicího spoje. Měřidlo zde pracuje se Seebeckovým jevem. Jakmile dojde k teplotnímu rozdílu mezi konci a měřícím spojem, vznikne v měřicím termočlánku termoelektrické napětí. [2]



Obrázek 27 Schéma zapojení termoelektrického snímače teploty [2]

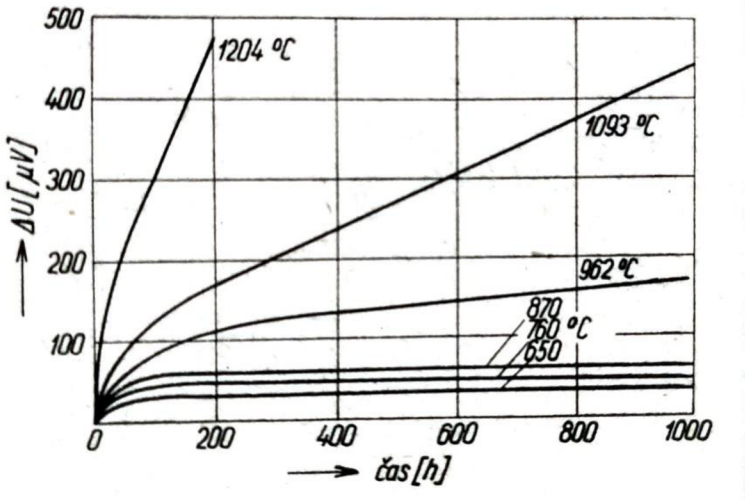
Ke koncům termočlánku je dále připojeno kompenzační vedení (obrázek 27), které bere v úvahu úbytek napětí kvůli vlastnímu odporu termočlánku. Kompenzační vedení je z materiálu, který má do teploty kolem 200 °C stejné vlastnosti jako samotný měrný konec. Mezi oběma konci je srovnávací konec, který pro správné výstupní hodnoty musí mít stejnou teplotu na obou vývodech. Rozdíl teplot se kompenzuje pasivně teplotně závislým rezistorem, nebo aktivně, a to napájením pomocným zdrojem, jehož velikost přivedeného napětí závisí na teplotě spojů.

Termoelektrické snímače mají 4 různé typy zapojení: paralelní, sériové, rozdílové a se společným vodičem. Paralelní zapojení umožňuje přímé stanovení průměrné hodnoty teploty několika měřených míst. Výhodou sériového zapojení je zvýšení velikosti výstupní hodnoty ze snímačů. Rozdílové zapojení se využívá k porovnání teplot mezi měřicím a srovnávacím místem. Zapojení se společným vodičem spojuje vývody všech snímačů na jeden vodič, čímž se uspoří za přípojné vedení. [15]

Označení daného měřicího termočlánku je dáno materiály jeho kladné a záporné větve. Obvykle se od sebe jednotlivé větve liší barevným označením nebo symbolem přímo na daném článku. Pro zápis se užívá způsobu, kdy první část zkratky je materiál kladné větve a po oddělení pomlčkou následuje materiál záporné větve, například NiCr-Ni.

6.2.1 Rozdělení termočlánků podle velikosti měřené teploty

Materiály měřicích termočlánků jsou rozděleny do čtyřech skupin. Dělení bylo vytvořeno kvůli zvyšující se odchylce od počáteční hodnoty termoelektrického napětí při dlouhodobém měření. Vhodnost daného materiálu k měření daného spektra teploty určuje jeho stálost při vystavení korozivnímu prostřední. Obvykle se u všech typů materiálu vyskytuje jen malá počáteční odchylka, nicméně pokud je materiál vhodný pro danou teplotu, tato odchylka se ustálí na určité hodnotě nebo je její zvyšování předvídatelné, obvykle je vhodný například lineární průběh (obrázek 28). Dále chceme, aby měl materiál vysokou citlivost na změnu teploty vyjádřenou v mV/°C a byl odolný vůči korozivnímu prostředí.



Obrázek 28 Graf stability napětí v závislosti na měřené teplotě [2]

Pro měření nižších teplot do 500 °C se užívá obvykle neušlechtilých kovů. Častá dvojice kovů je měď pro užší spektrum teplot nebo železo ve spojení s konstantanem v záporné větvi pro širší spektrum teplot. U mědi velmi závisí na její čistotě, neboť jakékoliv znečištění cizími prvky snižuje vhodné termoelektrické vlastnosti. Železo společně s konstantanem je zase náchylné na korozi a rychle degraduje v korozivním prostředí, například při měření teploty plynných spalin. Proto bývá životnost těchto termočlánků značně omezena a závislá na prostředí, ve kterém jsou využívány. [2]

Pro měření teplot do 1250 °C se využívá zejména NiCr-Ni, také nazývaný Hoskinsonův článek. Opět je důležité dodržet správné složení obou větví: kladná větev 85 % Ni, 10 % Cr a zbylá část dezoxidační přísady, záporná větev 95 % Ni a zbytek opět dezoxidační přísady. Podle mezinárodních norem by ale chrom měl tvořit pouze 8 % pro lepší termoelektrické vlastnosti, nicméně jeho snížením se také snižuje odolnost kladné větve. Tento typ termočlánku

je vhodný pro měření do 900 °C. Byla také vyvinuta slitina termokantal, což je nikl s přísadou křemíku a dalších přísad, která se vyznačuje vyšší odolností proti oxidaci. [2, 13]

Obrázek 29 Snímač na bázi PtRh [13]

Pro měření teplot ještě vyšších, do 1600 °C, se užívá zejména slitin platiny nebo iridia s rhodiem (obrázek 20). Termočlánek PtRh-Pt, také nazývaný LeChatelierův, je nejrozšířenějším termočlánkem v této skupině. Je rozšířen zejména kvůli své snadnější výrobě a také pro svoji odolnost proti vyšším teplotám. Nicméně dlouhodobé vystavení vysokým teplotám vede k difuzi rhodia do větve obsahující pouze platinu, čímž se mění struktura článku a jeho termoelektrické vlastnosti. Pro tyto účely byl vyvinut termočlánek PtRh 18, který má v obou větvích rhodium o různé koncentraci, což snižuje difuzi mezi větvemi. Do této skupiny se také řadí spojení s nekovovými prvky, například spojení wolframu uhlíku, karbidu křemíku a boru, popřípadě keramiky. Termočlánek z karbidu křemíku a uhlíku generuje vyšší termoelektrické napětí, ale při měření v neinertním prostředí rychle degraduje. Bývá proto vytvořen jako trubka s tyčí uvnitř a povrchy jsou chráněny sazemi, vrstvou oxidu hlinitého nebo inertním plynem.

Pro měření nad 2000 °C se obvykle využívá spojení wolframu s tantalem, rheniem, iridiem nebo molybdenem. W-Re se vyznačuje velkou změnou termoelektrického napětí, ale jeho nevýhodou je jeho vysoká křehkost. W-Ta je specifický svým nejednoznačným průběhem, kdy při překročení teploty 2100 °C mění průběh svůj tvar. Pro měření v inertním prostředí se využívá termočlánku W-Ir kvůli své vysoké citlivosti.

Souhrnně se termočlánky neoznačují pouze jeho stavebními prvky, ale přímo jednotlivými písmeny. Tabulka (obrázek 30) popisuje několik nejpoužívanějších termočlánků pro měření teploty. [2]

typ	měřicí rozsah [°C]	kombinace materiálů	popis
B	0 - 1700	Pt, 30%Rh - Pt, 6%Rh	pro měření vyšších teplot, nevyžaduje kompenzační vedení
C	0 - 2300	W, 5%Re - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
D	0 - 2300	W, 3%Re - W, 25%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
E	-200 - 950	Ni, 10%Cr - Cu, 45%Ni	meření nízkých a středních teplot, všeobecné použití
G	0 - 2300	W - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
J	-210 - 1200	Fe - Cu, 45%Ni	pro měření vyšších teplot v redukční atmosféře
K	-200 - 1250	Ni, 10%Cr - Ni, 2%Al, 2%Mn, 1%Si	všeobecné použití v oxidační atmosféře
L	0 - 900	Fe - Cu, 45%Ni	zastaralý typ, již se nepoužívá
M	-50 - 1400	Ni - Ni, 18%Mo	
N	-270 - 1300	Ni, 14%Cr, 1,5%Si - Ni, 4,5%Si, 0,1%Mg	nový typ, náhrada typu K
P	0 - 1395	Platinel - Platinel	stabilnější než typy K,L; dražší
R	-50 - 1750	Pt, 13%Rh - Pt	pro měření vyšších teplot, vysoká přesnost
S	-50 - 1750	Pt, 10%Rh - Pt	pro měření vyšších teplot, vysoká přesnost
T	-270 - 400	Cu - Cu, 45%Ni	pro měření nižších teplot ,všeobecné použití ve vlhkém prostředí
U	0 - 600	Cu - Cu, 45%Ni	zastaralý typ, podobný typu T

Obrázek 30 Tabulka označení jednotlivých termočlánkových snímačů [13]

6.2.2 Příklady použití termoelektrických snímačů

Pro snímání teploty lze použít nejen termoelektrických snímačů, například i odporových, které jsou velmi rozšířené, dilatačních anebo speciálních, mezi které se můžou řadit optické, frekvenční, kapacitní aj. Důvodem pro použití právě termočlánkových snímačů mohou být jeho velmi malé rozměry a hmotnost, což umožňuje umístění přímo i k těžko přístupnému měřenému místu, dokonce je možné integrovat snímač přímo do zařízení, a to vše při velmi malém zvýšení hmotnosti. Zároveň je možnost použít tento typ snímačů v agresivním prostředí. Stejně tak jako tomu je u odporového nemá snímač žádné pohyblivé části, může být

umístěn daleko od jednotky, zpracovávající výstupní hodnotu a také patří mezi senzory, které dokáží měřit velmi vysoké teploty. Nicméně jejich prozatímní nedokonalost, jako je nelineární charakteristika výstupní hodnoty, časová závislost vlastností termočlánku, samotná nízká výstupní hodnota termoelektrického napětí a celkově vyšší pořizovací cena, která se odvíjí od technologie výroby těchto snímačů, často odrazuje od využití tohoto článku. [15]

Termočlánkový snímač teploty právě proto není v automobilovém průmyslu oproti odporovému snímači tolik rozšířen. Odporový snímač svoji nižší cenou i přes jeho menší teplotní rozsah a přesnost při měření vyšších teplot bývá častěji použit. Často ale bývá ten termočlánkový využit pro přesná laboratorní měření (obrázek 22) anebo pro měření velmi vysokých teplot. [16, 23]

Obrázek 31 Laboratorní termočlánkový teploměr [23]

Jedním místem, kde ale může být v automobile využit, je jako vysokoteplotní senzor pro snímání teploty spalin v turbodmychadle nebo v celém výfukovém ústrojí vozidla. Kvůli vysokým teplotám v těchto prostorech je použití termočlánku odolnému vůči těmto teplotám vhodnou volbou (obrázek 23). [16]

Obrázek 32 Termočlánkový snímač teploty výfukových plynů [16]

Netradičním použitím termočlánkového snímače bylo snímání obsahu vodíku v určitém systému. Vědci z Japonska sestavili prototyp snímače vodíku v určitém systému nebo prostředí, například ve vodíkových nádržích a stanicích. Jejich prototyp vykazoval dobré výsledky pro různý rozsah obsahu vodíku ve vzduchu. Tento typ snímače by se mohl později rozšířit v případě rozvoje a pokroku v problematice motorů poháněných právě vodíkem. Pokud by se o ně zájem zvětšil a vedlo by to k rozšíření infrastruktury, tím i čerpacích stanic na čerpání vodíku, mohl by tento senzor být použit právě na těchto stanicích. [21]

Podobnou aplikací je katalyzátor ve spojení s termočlánkem. Principem funkce této aplikace je snímání teploty katalytické reakce mezi snímaným plynem a vlastním katalyzátorem (obrázek 24). Součástí systému je i porovnávací část, která kompenzuje parazitní vliv teploty okolí na měření. Tento typ snímače dokáže popsat množství vodíku a kyslíku v daném plynu. [34]

Mimo snímání teploty výfukových plynů byl termočlánkový snímač využit také ke snímání infračerveného záření. Konstrukce snímače je spojení filtru, který dovolí průchodu pouze infračerveného záření a termoelektrického snímače s absorbérem záření. Absorbér je zde použit pro zvýšení plochy, na kterou bude infračervené záření dopadat. Tento typ snímače byl využit již například automoblikou Nissan pro snímání mrtvého úhlu zpětných zrcátek modelu ASV-2. Funkcí skupiny čtyřech snímačů nebylo zaznamenání přítomnosti vozidla nebo překážky, nýbrž detekce, zda se v mrtvém úhlu nenachází člověk. Lidské tělo produkuje určité množství infračerveného záření, které snímače s přídavným absorbérem dokázaly zaznamenat a předat tak informaci řidiči. [35, 36]

7 Závěr

Termoelektrické články v dnešní době dostávají čím dál více pozornosti. Zejména kvůli klimatickým změnám na Zemi se pohled energetiků a výzkumníků přesouvá k co nejefektivnějším způsobům využívání jakékoliv energie, a také k využití veškerých odpadních médií. Zároveň je čím dál více kladen důraz na co nejekologičtější provoz. Vliv na rozvoj tohoto oboru má taky rozvoj ostatních. Některá specializovaná odvětví průmyslu pomohla k urychlení rozvoje termočlánků, protože jejich pozitivní přínosy jsou pro daný obor nutné či nepostradatelné. Mezi tyto přínosy lze zahrnout kompaktnost, nízkou hmotnost a jednoduchost. Díky těmto vlastnostem bývá snadné jej integrovat do již fungujících systémů, aniž by musely být zavedeny zásadní změny v původním zařízení. Rozvoji termočlánků také pomohl rozvoj odvětví, která se zabývají například stavbou a vlastnostmi různých materiálů anebo také rozkvět odvětví, které při spojení s termočlánky mohou poskytovat větší benefity, například ve spojení s fotovoltaikou. Nicméně ekologické hledisko má na rozvoj dopad největší. Využití odpadních energií, které vznikají při provozu nejrůznějších zařízení, například od provozu spalovacích motorů, je hlavním bodem při aplikaci termočlánků.

Hlavními nedostatky termočlánků užívaných v dnešní době jako generátorů je jejich stále nízká efektivita přeměny a vysoká cena. Materiály, ze kterých jsou termočlánky vyrobeny, nejsou dostatečně přizpůsobeny a vyvinuty, aby dokázaly efektivněji provádět daný typ přeměny. Důležitým cílem výzkumu oblasti termoelektrické přeměny by tedy mělo být zdokonalení těchto materiálů, zlepšení jejich pozitivních vlastností s postupným zmenšováním jejich ceny, čímž by se staly dostupnější a atraktivnější. To by mohlo vést ke zvýšení počtu aplikací na nejrůznějších zařízeních, což by celkově vedlo k zefektivnění v oblasti využití energie, a tím by zmenšil dopad na životní prostředí.

Popis principu termoelektrického jevu a materiálů k němu užívaných poukazuje na jeho nedostatky pro použití v praxi, nicméně lze z tohoto popisu také cítit jeho potenciál a možnosti dalšího rozvoje, ne-li dokonce nutného. Pro nejpodrobnější popis a ukázku bohužel ale nebylo možné sestavit experiment, kde by jednotlivé vlastnosti termočlánků mohli být názorně prezentovány. Jak již bylo zmíněno v úvodních kapitolách práce, nebylo možné obstarat testovací exemplář, na kterém by mohl být proveden vlastní experiment.

Na úplný závěr by bylo vhodné konstatovat hlavní a nejdůležitější důvod pro použití termočlánků. Lidstvo jako takové je svojí technologií a znalostmi na svém vrcholu a je si vědomo svým dopadem, který má na Zemi. Každá technologie, která vyzařuje potenciál lidský dopad postupně zpomalovat nebo i zastavit, je vhodným kandidátem pro její pozornost. Termoelektrický jev, byť zatím stále dost nedokonalý, tento potenciál má a rozhodně stojí za další pozornost a vývoj. Pokud se postupem času zdokonalí do takové úrovně, kdy svojí schopností produkovat energii bude moci konkurovat tradičním zdrojům energie, bude to znamenat obrovské zefektivnění využívání energie a prodlouží se tak doba, po kterou bude mít lidstvo čas pro vývoj nových, čistých zdrojů energie.

8 Seznam použitých zdrojů

[1] GOLAB, František a František KAMENČÁK. *Termoelektrické jevy a jejich užití*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1975, 86 s. 14-644-75.

[2] MIKYŠKA, Ladislav. Termoelektrické články. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 152 s. Malá elektrotechnická knihovna; sv. 24., ISBN 04-572-63.

[3] TEPLIČKA, Ivan. Fyzika. Engima. 2015. 392 s. ISBN 978 808 133 0384

[4] KABEŠ, Karel. Význam termoelektrických generátorů rychle roste. *ELEKTRO* [online]. Praha: FCC Public, 2011, **2011**(04) [cit. 2023-02-01]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyznam-termoelektrickych-generatoru-rychle-roste--984763

[5] HARISH, Subramaniam, Raghavan GOPALAN a Govindhan SUNDARARAJAN, SIVAPRAHASAM, Duraisamy, ed. Automotive Waste Heat Recovery by Thermoelectric Generator Technology. In: ARANGUREN, Patricia. UNIVERSITY OF NAVARRA. *Bringing Thermoelectricity into Reality*. 2018. ISBN 978-1-78923-441-1. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.75443

[6] YANG, Jihui a Francis R. STABLER. Automotive Applications of Thermoelectric Materials. *Journal of Eletronic Materials* [online]. 2009, February 13, 2009, **2009**(38), 1 [cit. 2023-02-01]. ISSN 0361-5235. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-009-0680-z

[7] ZHAO, Dongliang a Gang TAN. Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2014, **2014**(66) [cit. 2023-02-01]. ISSN 1873-5606. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.02.010

[8] RIFFAT, Saffa a Guoquan QIU. Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2004, **2004**(24) [cit. 2023-02-01]. ISSN 1873-5606. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.02.010

[9] MA, Ke, Zhengxing ZUO a Wei WANG. Design and experimental study of an outdoor portable thermoelectric air-conditioning system. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2023, **2023**(219) [cit. 2023-02-01]. ISSN 1873-5606. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.119471

[10] Thomsonův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-homsonuv-jev#

[11] Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev

[12] Termoelektrické materiály. In: *Univerzita Pradubice fakulta chemicko-technologická* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://fcht.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html

[13] Snímače do vysokých teplot. *Meratex* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://www.meratex.cz/snimace-do-vysokych-teplot/

[14] FV termoelektrické chlazení pro klimatizaci budov. *VT-Auta* [online]. 7. listopadu 2022 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://vt-auta.cz/fv-termoelektricke-chlazeni-pro-klimatizaci-budov/

[15] Snímače teploty: Přehled trhu snímačů teploty do průmyslového prostředí. *Automa - časopis pro automatizační techniku* [online]. 2006-, **2009**(6), 5 [cit. 2023-02-01]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39160.pdf

[16] HERCÍK, Radim a Miroslav KVÍČALA. *SENZORY PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL*. Ostrava, 2019. ISBN 978-80-248-4318-6. Dostupné z: https://www.fei.vsb.cz/export/sites/fei/480/.content/galerie-souboru/Senzory_pro_automobilovy_prumysl.pdf

[17] Termočlánky: konstrukce, využití a účinnost. *E-konstruktér* [online]. 5. července 2014 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost

[18] High-Temp Thermoelectric Coolers Cool Optical Sensors in ADAS. *Power Systems Design* [online]. March 18 2021 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://www.powersystemsdesign.com/articles/high-temp-thermoelectric-coolers-cool-optical-sensors-in-adas/35/17611

[19] Efficient energy harvesting for low power automotive devices. *European Thermodynamics* [online]. 28 January 2020 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://www.europeanthermodynamics.com/news/energy-harvesting-automotive-IoT

[20] BRÁZDIL, Marian. Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla. *Tzbinfo* [online]. 12. 8. 2013 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektrickych-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla

[21] NISHIBORI, M., W. SHIN, N. IZU, T. ITOH, I. MATSUBARA, S. YASUDA a S. OHTANI. Robust hydrogen detection system with a thermoelectric hydrogen sensor for hydrogen station application. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, **2009**(34), 8 [cit. 2023-02-01]. ISSN 1879-3487. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2009.01.027

[22] Korejští vědci představili termoelektrický nátěr, který přemění teplo na elektřinu. *Hybrid.cz* [online]. 22. 12. 2016 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://www.hybrid.cz/budoucnost-obnovitelnych-zdroju-vyuziti-odpadniho-tepla/

[23] Průmyslový termočlánkový teploměr přesné měření teploty. In: *Termoprodukt.cz* [online]. [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: https://termoprodukt.cz/prumyslovy-termolankovy-teplomer-pro-presne-mereni-teploty-k-typu

[24] New Concept of Power Generation Using TEGs: Thermal Modeling, Parametric Analysis, and Case Study. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-thermoelectric-generator-TEG_fig2_340975

[25] NADER, Wissam Bou. Thermoelectric generator optimization for hybrid electric vehicles. Applied Thermal Engineering [online]. Francie, 2020, 2020(167), 15 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114761

[26] The System for Adding Hydrogen-containing Gas to the Air Charge of the Spark Ignition Engine Using a Thermoelectric Generator. *SAE technical paper series* [online]. Spojené státy americké, 2020, September 15, 2020, **2020**(2142) [cit. 2023-02-19]. ISSN 2688-3627. Dostupné z: doi:10.4271/2020-01-2142

[27] Thermoelectric-Powered Hydrogen Injection System. In: *Green Car Congress* [online]. 2006 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: https://www.greencarcongress.com/2006/08/thermoelectricp.html

[28] POURRAHMANI, Hossein, Hamed SHAKERI a Jan Van HERLE. Thermoelectric Generator as the Waste Heat Recovery Unit of Proton Exchange Membrane Fuel Cell: A Numerical Study. *Energies* [online]. 2022, 20 April 2022, **15**(9) [cit. 2023-02-19]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15093018

[29] Yamaha and Sumitomo demo on-board thermoelectric generator for CO2 reduction. In: *Green Car Congress* [online]. 3 June 2022 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: https://www.greencarcongress.com/2022/06/20220603-teg.html

[30] SULAIMAN, M. Saufi, B. SINGH a Wan Ahmad Najmi Wan MOHAMED. Experimental and theoretical study of thermoelectric generator waste heat recovery model for an ultra-low temperature PEM fuel cell powered vehicle. Energy [online]. Elsevier, 2019, 179(5) [cit. 2023-02-20]. ISSN 0360-6785. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.05.022

[31] BIRKELAND, Bjorn Erik, Finn Erik SAGHUS a Rosness. *THERMOELECTRIC GENERATOR FOR BATTERY CHARGING AND POWER SUPPLY*. Spojené státy americké. US 8,404,962 B2. Uděleno March 26, 2013.

[32] Test autochladniček 2023. *Co vybrat.cz* [online]. 2023 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://www.covybrat.cz/nejlepsi-autochladnicky/

[33] GHAZALI, Noor Zuhairah, Nor Shahida Mohd SHAH, Nor Elisya KUAMTHAB a Mahathir MOHAMAD. Thermoelectric Mini Portable Fridge with Wireless Temperature

Monitoring. *PEAT* [online]. Universiti Tun Hussein On Malaysia, 2021, **2**(2) [cit. 2023-02-20]. ISSN 2773-5303. Dostupné z: doi:10.30880/peat.2021.02.02.049

[34] PARK, Se-Chul, Seung-il YOON, Chung-il LEE, Yong-Jun KIM a Soonho SONG. A micro-thermoelectric gas sensor for detection of hydrogen and atomic oxygen. *Analyst* [online]. 2008, October 22,2008, **2008**(134), 7 [cit. 2023-02-01]. ISSN 1364-5528. Dostupné z: doi:10.1039/B807882C

[35] HIROTA, Masaki, Yasushi NAKAJIMA, Masanori SAITO a Fuminori SATOU. Thermoelectric infrared imaging sensors for automotive applications. *Proceedings* [online]. 2004, 6 July 2004, (5359) [cit. 2023-02-23]. ISSN 2504-3900. Dostupné z: doi:10.1117/12.543149

[36] XU, Dehui, Yuelin WANG, Bin XIONG a Tie LI. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering* [online]. 2017, **12**(4) [cit. 2023-02-23]. ISSN 2095-0241. Dostupné z: doi:10.1007/s11465-017-0441-2