

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

**Konstrukce a testování nabíječky
baterií na bázi termoelektrické
přeměny energie**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Autor diplomové práce: Michal Koblížek

PRAHA 2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Michal Koblížek

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Konstrukce a testování nabíječky baterií na bázi termoelektrické přeměny energie

Název anglicky

Construction and testing of the battery charging based on the thermoelectric energy conversion

Cíle práce

- Návrh a realizace termoelektrické nabíječky baterií s Peltierovým článkem
- Proměření a vyhodnocení důležitých charakteristik
- Ekonomické zhodnocení

Metodika

Návrh konstrukce termoelektrické nabíječky baterií s Peltierovým článkem. Návrh a realizace včetně proměření a vyhodnocení důležitých charakteristik. Ekonomická rozvaha.

Doporučený rozsah práce

cca 45 stran

Klíčová slova

Peltierův článek, akumulace energie, přeměna energie

Doporučené zdroje informací

HALLIDAY, D. – RESNICK, R. – WALKER, J., Fyzika. VUT v Brně, VUTIUM, 2000. <http://www.vanellus.cz/ecofan/>

L. Eckertová a kol., Fyzikální elektronika pevných látek, Karolinum, Praha, (1992), ISBN 80-7066-535-1

Muñoz-García M.A., Moreda G.P., Raga-Arroyo M.P., Marín-González O., Water harvesting for young trees using Peltier modules powered by photovoltaic solar energy. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93, pp.60-67.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra fyziky

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2014

prof. RNDr. Ing. Jiří Blahovec, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 22. 03. 2016

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma: „Konstrukce a testování nabíječky baterií na bázi termoelektrické přeměny energie“ jsem vypracoval samostatně a veškerou použitou literaturu a další prameny jsem řádně označil a uvedl v příloženém seznamu.

V.....dne.....

.....

(podpis autora)

Poděkování:

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Martinovi Librovi, CSc. za velmi užitečnou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Kouřimovi za pomoc při provádění měření.

V.....dne.....

.....

(podpis autora)

Abstrakt

Předkládaná práce se podrobně zabývá termoelektrickými články. První polovina je čistě teoretická a má za úkol uvést čtenáře do problematiky. V této části je čtenář seznámen s polovodiči, následuje popis třech termoelektrických jevů, které stojí za vynálezem termoelektrického článku. V druhé polovině teoretické části práce jsou podrobněji popsány jednotlivé termoelektrické články typu TEG, TEC a termoelektrické články pro měření teplot.

V části praktické nalezneme autorův popis konstrukce termoelektrické nabíječky od prototypu až po finální výrobek. Následuje měření VA charakteristiky nabíječky, její porovnání s ostatními druhy nabíjecích zdrojů a měření účinnosti DC-DC měniče. V závěru praktické části najdeme ekonomické zhodnocení a technické parametry výrobku.

Klíčové slova

Termoelektrický článek, Peltierův článek, TEG, TEC, termobaterie, Seebeckův jev, Peltierův jev, Thomsonův jev

Abstract

This diploma thesis describes theory of thermocouples. The first half is theoretical and aims to introduce readers to the subject. In this part we can find not only introduction of semiconductors, but also a description of three thermoelectric phenomena behind the invention of a thermocouple. In the second half is description more detailed and we follow each type of thermocouples TEG, TEC and thermocouples for temperature measurement.

In the practical part we find the author's description of the construction of thermoelectric charger from prototype to final product. Further measurement VA characteristics of charger, its comparison with other types of charging sources and measurement the effectiveness of DC-DC converter. In conclusion of the practical part, we can find an economic evaluation and technical parameters.

Key words

Thermocouple, Peltier module, TEG, TEC, thermobattery, Seebeck effect, Peltier effect, Thomson effect

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce a metodika	3
2.1	Cíl práce	3
2.2	Metodika	3
3	Stav problematiky	4
3.1	Polovodiče	4
3.1.1	Vlastní vodivost polovodiče	4
3.1.2	Nevlastní vodivost polovodiče	5
3.2	Termoelektrické jevy	8
3.2.1	Seebeckův jev	9
3.2.2	Peltierův jev	11
3.2.3	Thomsonův jev	12
3.3	Termoelektrické články	12
3.3.1	TEG článek	13
3.3.2	TEC článek	22
3.3.3	Termoelektrické články pro měření teplot	28
4	Vlastní výsledek – Konstrukce a testování nabíječky baterií na bázi termoelektrické přeměny energie	32
4.1	Volba typu nabíječky na bázi termoelektrické přeměny energie	32
4.2	Seznámení se s Peltierovým článkem	32
4.3	Konstrukce prototypu	33
4.4	Konstrukce finální nabíječky na bázi termoelektrické přeměny energie	34
4.5	Testování finální nabíječky na bázi termoelektrické přeměny energie	40
4.5.1	Měření VA charakteristiky nabíječky	40
4.5.2	Měření výkonových parametrů při různých teplotách T_h	43
4.5.3	Měření doby nabití baterie	47
4.5.4	Měření účinnosti DC-DC měniče	51
4.5.5	Snímek z termokamery při měření na nabíječce	52
4.6	Ekonomické zhodnocení	52
4.7	Technické parametry	53
5	Diskuse	54
6	Závěr	55
	Seznam použité literatury a jiných zdrojů	56
	Seznam obrázků	60
	Seznam tabulek	62

1 Úvod

Roku 1821 přivedlo experimentování německého fyzika Thomase Johanna Seebecka na stopu termoelektrických jevů. Zpozoroval, že v obvodu, který se skládá ze dvou rozdílných kovů, vzniká při teplotním rozdílu na jejich rozhraní nepatrné napětí. O 13 let později objevil francouzský fyzik Jean Charles Athanase Peltier jev, který je k Seebeckovu jevu inverzní. Pokud prochází proud dvěma rozdílnými v sérii zapojenými vodiči, jedno rozhraní se bude ochlazovat a druhé zahřívat. Pokud polaritu obrátíme a proud bude procházet opačným směrem, rozhraní, které se předtím ochlazovalo, bude zahříváno a to které se ohřívalo, bude ochlazováno.

Právě na těchto jevech jsou založeny termoelektrické články. Jedná se o několik desítek až stovek PN přechodů spojených v sérii, umístěných mezi dvě tenké keramické destičky. Dnes se používají především pro chlazení nebo získávání elektrické energie z teplotního gradientu. Méně často pro ohřev.

Růst cen energií, ztenčující se zásoby fosilních paliv a ekologie jsou hnacími motory pro rozvoj alternativních technologií. Díky tomu se v posledních letech účinnost termoelektrických článků výrazně zvedla a výrobci je využívají v mnohých aplikacích. Díky této technologii si můžeme na stránkách vesmírné agentury NASA prohlédnout detailní snímky planety Neptun nebo Jupiter pořízené sondami Voyager 1 a Voyager 2.

Tato technologie se sice nehodí pro „masovou“ výrobu elektrické energie, ale na dnešním trhu si najde mnohá uplatnění. Časté je využívání odpadního tepla k výrobě elektrické energie především v místech, kde není k dispozici rozvodná elektrická síť. Pro tyto účely je i navržena má termoelektrická nabíječka v podobě ešusu, která se může uplatnit právě v místech bez elektrické sítě.

Téma „Konstrukce a testování nabíječky baterií na bázi termoelektrické přeměny energie“ jsem si vybral z důvodu, že jsem chtěl porozumět funkci termoelektrických článků, ověřit si jejich účinnost a vyzkoušet si konstrukci „komerčního“ výrobku od začátku do konce, byť v amatérských podmínkách. Zajisté termoelektrickou nabíječku využijí i v budoucnu, tam, kde se mi nedostane elektrické energii např. pro můj mobilní telefon.

Práce je rozdělena na dvě části a to na stav problematiky a vlastní výsledky. Stav problematiky se věnuje polovodičům, vysvětluje termoelektrické jevy, popisuje princip funkce termoelektrických článků a jejich strukturu včetně možností jejich použití. Dále definuje jejich výhody a nevýhody.

Vlastní výsledky se zabývají konstrukcí termoelektrické nabíječky spolu s jejím testováním a měřením. V posledních kapitolách je popsáno ekonomické zhodnocení a technické parametry výrobku.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat termoelektrickou nabíječku baterií s Peltierovým článkem. Proměřit a vyhodnotit důležité charakteristiky a provést ekonomické zhodnocení výrobku.

2.2 Metodika

Informace a data k sepsání diplomové práce byly čerpány z tištěných publikací. Využity byly také internetové zdroje a autorovi získané poznatky. Obrázky jsou čerpány z internetových zdrojů, nebo byly pořízeny autorem.

3 Stav problematiky

3.1 Polovodiče

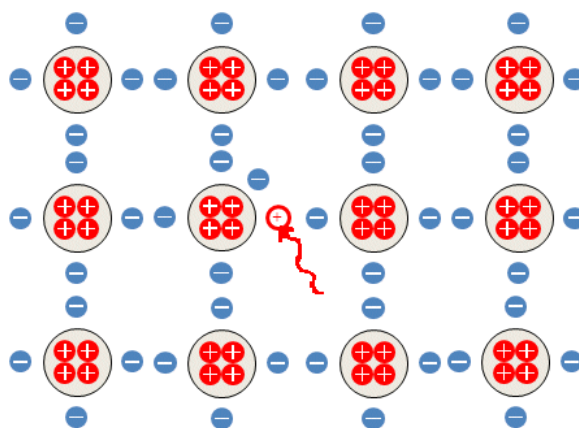
Z hlediska vedení elektrického proudu lze látky rozdělit na vodiče, nevodiče a polovodiče. Polovodiče byly teoreticky předpovězeny objevem křemíku a později i germania již začátkem 19. století. Do 40. let minulého století však neměly většího uplatnění. Převrat nastal s vynálezem radaru během 2. světové války a konstrukcí prvního tranzistoru roku 1947. Dnes patří polovodičové součástky k základním stavebním prvkům veškerých elektronických zařízení.

Polovodič je pevná látka s mnohonásobně menší elektrickou vodivostí nežli vodiče a větší než izolanty. Vodivost polovodičů exponenciálně roste s teplotou. Lze ji také ovlivnit přidáním příměsi (silně potom závisí na koncentraci příměsi), či dodáním světelné, nebo elektrické energie. Polovodiče mají vodivost elektronovou, tj. elektrický proud je v nich přenášen elektrony, děrami nebo oběma druhy nosičů současně v závislosti na charakteru dotování. Mezi polovodiče patří řada pevných látek – křemík (Si), germanium (Ge), telur (Te), selen (Se), fosfor (P) a další. Polovodičový jev však není omezen pouze na pevné a monokrystalické látky, existují i kapalné, sklovité a amorfni polovodiče. [1, 2, 3]

3.1.1 Vlastní vodivost polovodiče

Základním materiálem polovodiče je čtyřmocný prvek, např. křemík (Si). Jeho atomová mřížka neobsahuje žádné volné elektrony, všechny jsou vázány ve valenční vrstvě. Pokud ale obdrží dostatečně velkou energii, rozkmitají se a dojde k jejich uvolnění. Po uvolněním elektronu zůstane místo, které se tváří jako kladné, tzv. díra. Do díry může přeskočit jiný uvolněný elektron. Dochází tak k rekombinaci a vypadá to, jako by se díry pohybovaly v krystalové mřížce. Tento děj je označován jako vlastní vodivost. [2, 3]

Obrázek 1 Vlastní polovodič [4]



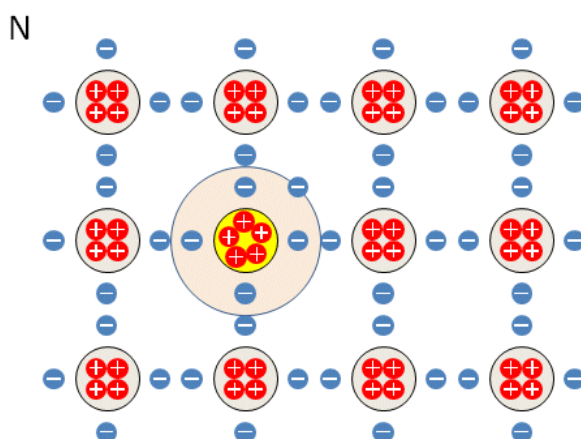
3.1.2 Nevlastní vodivost polovodiče

Nevlastní vodivost dosáhneme přidáním nepatrného množství příměsí (stačí i jeden atom příměsí na 100 milionů atomů křemíku) do krystalové mřížky. Volbou příměsí můžeme ovlivnit, zda má být elektrický proud veden volnými elektrony (vodivost typu N), nebo děrami (vodivost typu P). [2]

Polovodič typu N

Když k čistému čtyřmocnému prvku (např. křemíku) přidáme i velmi malé množství atomů pětimocného prvku (např. antimonu), tedy příměs, čtyři z pěti elektronů se zúčastní vazby s křemíkem a jeden nebude pevně vázán. Stačí velmi malé množství energie (i nízká teplota) a elektron je vytržen, čímž se stane majoritním nosičem schopným vést elektrický proud prostřednictvím nevlastní vodivosti. Křemík obsahující příměs pětimocného prvku (donoru) má nadbytek volných elektronů, které po připojení ke zdroji způsobují jeho elektronovou vodivost typu N. [2, 4]

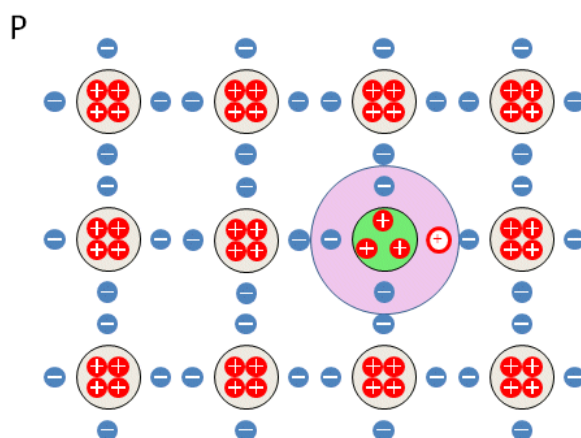
Obrázek 2 Polovodič typu N [4]



Polovodič typu P

Pokud přidáme k čtyřmocnému prvku i velmi malé množství atomů třímocného prvku (např. india) jeden elektron bude ve vazbě chybět. Vznikne tím díra, která se chová jako by měla kladný náboj, takže je schopná přijmout uvolněný elektron sousedního atomu, po kterém vznikne díra nová. Tyto díry po připojení ke zdroji způsobují jeho děrovou vodivost typu P. [2, 4]

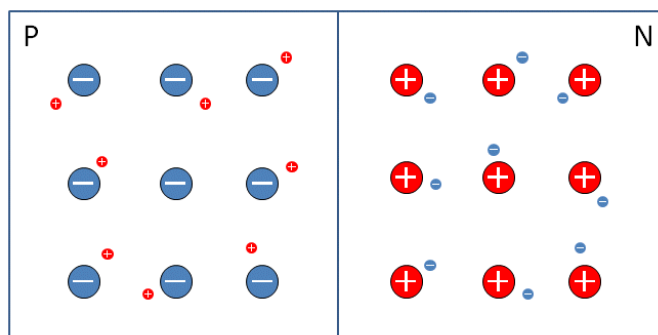
Obrázek 3 Polovodič typu P [4]



PN přechod

Základem většiny polovodičových součástek (diody, tranzistory, tyristory, diaky aj.) je PN přechod (obr. 4). Jedná se o spojení dvou polovodičů s opačným typem vodivosti, tedy polovodičů typu N a P. PN přechod má usměrňovací účinek, tzn., že v jednom směru jím proud procházet může a v opačném nikoliv. [4, 5]

Obrázek 4 PN přechod [4]

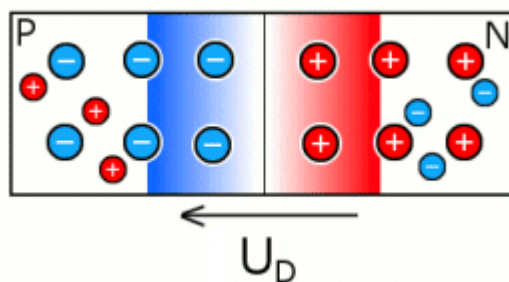


Na PN přechodu mohou nastat tyto tři stavy:

PN přechod bez zdroje napětí

V oblasti styku dvou polovodičů je velká koncentrace děr a elektronů. Volné elektrony z polovodiče N rekombinují v oblasti P a díry zase rekombinují v oblasti N. V tomto prostoru tak vznikne vyprázdněná nevodivá oblast – tzv. hradlová vrstva. [4, 5]

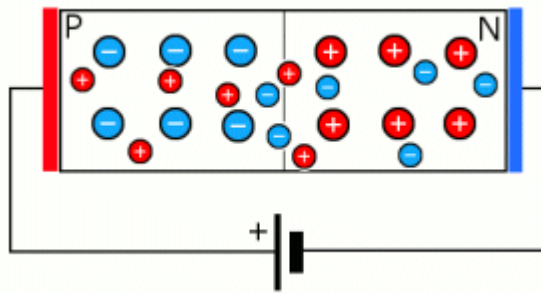
Obrázek 5 PN přechod bez zdroje napětí [4]



PN přechod v propustném směru

Připojíme-li k polovodiči P kladný pól zdroje a k polovodiči N záporný, dochází vlivem působení elektrického pole k přitahování elektronů a děr přes PN přechod směrem ke kladnému a zápornému pólu zdroje. Hradlová vrstva se zúží na minimum a její odpor se výrazně zmenší. Takto zapojeným PN přechodem elektrický proud může procházet. [4, 5]

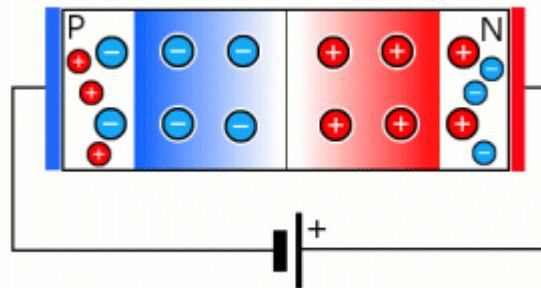
Obrázek 6 PN přechod v propustném směru [4]



PN přechod v závěrném směru

Připojíme-li k polovodiči P záporný pól zdroje a k polovodiči N kladný, dochází vlivem působení elektrického pole k odtahování elektronů a děr od PN přechodu. Tím dojde k rozšíření oblasti bez volných nosičů náboje (hradlová vrstva) a její odpor výrazně vzroste. V tomto zapojení nemůže elektrický proud přes PN přechod procházet. [4, 5]

Obrázek 7 PN přechod v závěrném směru [4]



3.2 Termoelektrické jevy

Termoelektrickým jevem označujeme děj, kdy z rozdílu teplot lze získat elektrickou energii a naopak. Zařízení, které uvádí termoelektrický jev do praxe, se nazývá termočlánek. Pokud je na jeho stranách rozdílná teplota, generuje napětí. Pokud mu napětí dodáváme, získáme na jeho stranách teplotní diferenci. „Termoelektrické jevy bývají podstatně výraznější v polovodičích než v kovech, neboť v polovodičích se více projeví závislost energie nosičů na teplotě a na teplotě závisí i koncentrace nosičů.“³ Existují tři základní termoelektrické jevy: Seebeckův, Peltierův a Thomsonův. [3, 6]

3.2.1 Seebeckův jev

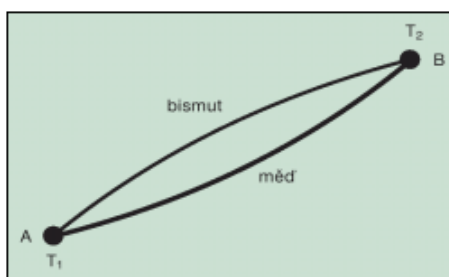
Seebeckův jev se projevuje v nehomogenních vodičích při rozdílných teplotách na rozhraní těchto vodičů. Je-li obvod tvořen dvěma různými materiály a jsou-li na jejich rozhraní rozdílné teploty, vznikne v obvodu napětí úměrné tomuto teplotnímu rozdílu. Roku 1822 jej objevil německý fyzik Thomas Johann Seebeck (1770–1831).

Obrázek 8 Thomas Johann Seebeck [7]



Náhodně ho objevil při experimentování s různými materiály a popsal v publikaci „Magnetische Polarisation der Metalle und Erz durch Temperaturdifferenz“ (Magnetická polarizace kovů a rud rozdílem teplot). Jednoduše spojil dva tvarované dráty z mědi a bismutu (obr. 9) a do středu soustavy umístil magnetickou jehlu. Když pak podržel jeden ze spojů bismut-měď, všiml si, že se jehla vychýlila. Experiment opakoval s cíleným zahříváním spojů, ale vychýlení jehly přisuzoval magnetismu, nikoliv elektromagnetickému účinku elektrického proudu. Zprvu tedy tento jev mylně označil za termomagnetismus, nicméně si posléze uvědomil, že za vychýlení magnetické jehly může elektrický proud, který dle Ampérova zákona indukuje magnetické pole. [3, 7]

Obrázek 9 Schématické uspořádání Seebeckova termoelektrického článku [7]



Napětí vzniklé díky teplotnímu rozdílu na přechodu dvou prvků je úměrné právě tomuto teplotnímu rozdílu. Lze jej vypočítat dle následujícího vzorce.

$$E = \alpha(T_1 - T_2) \text{ kde } \alpha = \alpha_A - \alpha_B$$

E – celková energie (μV)

α – rozdíl Seebeckových koeficientů

T_1 – teplota teplé strany

T_2 – teplota studené strany

Napětí se pohybuje v řádech mikrovoltů na jeden stupeň Kelvina a je závislé na použitých materiálech. To si díky svým experimentům uvědomil i Seebeck, provedl měření s různými materiály, a nechal tak vzniknout Seebeckův koeficient. [7, 8]

Tabulka 1 Seebeckovy koeficienty [9]

Kovy	Seebeckův koeficient [$\mu\text{V/K}$]	Polovodiče	Seebeckův koeficient [$\mu\text{V/K}$]
Antimon	47	Selen	900
Nichrome	25	Telur	500
Molybden	10	Křemík	440
Kadmium	7,5	Germánium	300
Wolfram	7,5	n-type Bi_2Te_3	-230
Zlato	6,5	p-type $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$	300
Stříbro	6,5	p-type Sb_2Te_3	185
Měď	6,5	PbTe	-180
Rhodium	6,0	$\text{Pb}_{03}\text{Ge}_{39}\text{Se}_{58}$	1670
Tantal	4,5	$\text{Pb}_{06}\text{Ge}_{36}\text{Se}_{58}$	1410
Olovo	4,0	$\text{Pb}_{09}\text{Ge}_{33}\text{Se}_{58}$	-1360
Hliník	3,5	$\text{Pb}_{13}\text{Ge}_{29}\text{Se}_{58}$	-1710
Uhlík	3,0	$\text{Pb}_{15}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$	-1990
Rtuť	0,6	SnSb_4Te_7	25
Platina	0	SnBi_4Te_7	12
Sodík	-2,0	$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151
Potassium	-9,0	$\text{SnBi}_{2,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_7$	110
Nikl	-15	$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90
Konstantan	-35	PbBi_4Te_7	-53
Bismut	-72		

3.2.2 Peltierův jev

Peltierův jev je inverzní k jevu Seebeckovu. Bude-li na dvou rozdílných v sérii zapojených vodičích stejná teplota a připojíme-li do obvodu zdroj napětí, poteče obvodem proud. Tím se v obvodu vytvoří tepelný tok závislý na materiálech vodičů. Jelikož musí být na rozhraní tepelný tok spojitý, jedno rozhraní se bude ochlazovat a druhé zahřívát. Vzniká tedy teplotní gradient ΔT . Pokud polaritu obrátíme a proud bude procházet opačným směrem, rozhraní, které se předtím ochlazovalo, bude zahříváno, a to, které se ohřívalo, bude ochlazováno. Tento jev objevil roku 1834 francouzský fyzik Jean Charles Athanase Peltier (1785–1845). [3, 10]

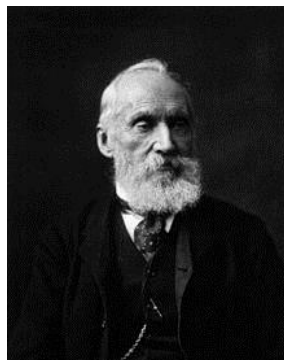
Obrázek 10 Jean Charles Anthanase Peltier [10]



3.2.3 Thomsonův jev

Thomsonův jev nastává za současné přítomnosti tepelného toku a elektrického proudu v homogenním vodiči. Byl objeven roku 1851 skotským fyzikem Williamem Thomsonem (1824–1907), přezdívaným lord Kelvin of Largs. Tento jev zaznamenal při experimentu, kdy na jednom konci zahříval kovovou tyč a měřil vzniklé napětí mezi konci tyče. Protože se na jednom konci zvýší kinetická energie elektronů, které se snaží přemístit k chladnějšímu konci, jsme schopni naměřit nepatrné termoelektrické napětí. Jeden konec tyče je tak nabit kladně, druhý záporně. Jelikož je vznikající napětí velmi malé, má tento jev spíše teoretický než praktický význam. [3, 11]

Obrázek 11 William Thomson [11]



3.3 Termoelektrické články

Termočlánky dělíme dle využití na:

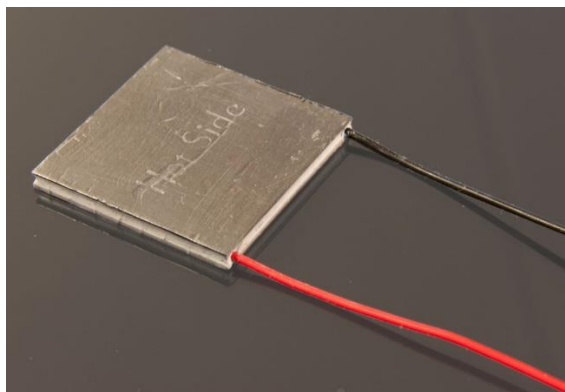
- **TEG (Thermoelectric generator)** – Využívají se k přeměně tepelné energie na elektrickou.

- **TEC (Thermoelectric cooler)** – Využívají se k přeměně elektrické energie na energii tepelnou.
- **Termoelektrické články pro měření teploty**

3.3.1 TEG článek

TEG (thermoelectric generator) článek (obr. 12), někdy nazývaný též Seebeckův generátor, je zařízení, které je primárně určené k získávání elektrické energie z teplotních rozdílů. Získání tepelné energie z elektrické je z principu funkce též možné, ale článek na to není primárně určen. TEG články se od TEC článků liší především možností použití při vyšších teplotách (až stovky stupňů Celsia) a vyšší účinností zapříčiněnou použitými polovodiči.

Obrázek 12 TEG článek (použit při konstrukci termoelektrické nabíječky)



Princip funkce

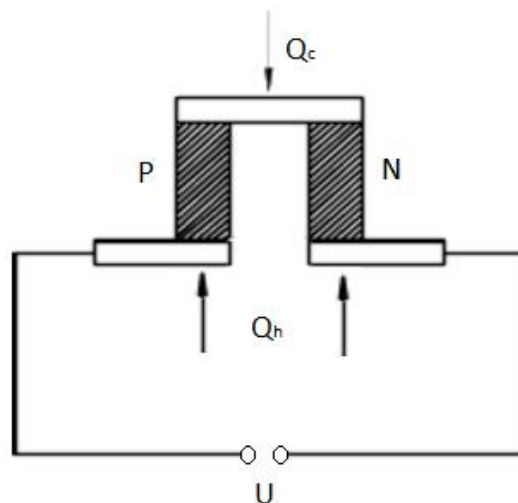
Princip funkce TEG článku je založen na Seebeckovu jevu. Termoelektrický generátor je vyroben z mnoha párů polovodičů typu-p a typu-n. Polovodiče typu-p jsou vyrobeny z materiálů dopovaných tak, že nosiče náboje jsou kladné (díry) a polovodiče typu-n jsou vyrobeny z materiálu dotovaného tak, že nosiče náboje jsou záporné (elektrony). Spojením polovodiče typu P a typu N vzniká PN přechod. V místě jejich styku se vytvoří vyprázdněná nevodivá oblast (hradlová vrstva), která je způsobena rekombinací elektron-děrového páru. Zahříváme-li hradlovou oblast a zároveň chladíme oba konce, dodáme elektronům a děrám v této oblasti energii, čímž dojde k jejich uvolnění a pohybu směrem k chlazené části polovodiče typu P nebo N. Tím vzniká termoelektrické napětí mezi oběma konci PN přechodu. [8, 12]

Struktura článku a požadované vlastnosti polovodičů

TEG je složen z desítek až stovek termoelektrických článků (obr. 13), zapojených do série ve větší celky, tzv. termobaterie (obr. 14). Tyto články jsou zpravidla tvořeny polovodiči o vhodných vlastnostech. (např. Bi_2Te_3 , PbTe). Nejdůležitější vlastnosti pro polovodiče použité v těchto člancích jsou:

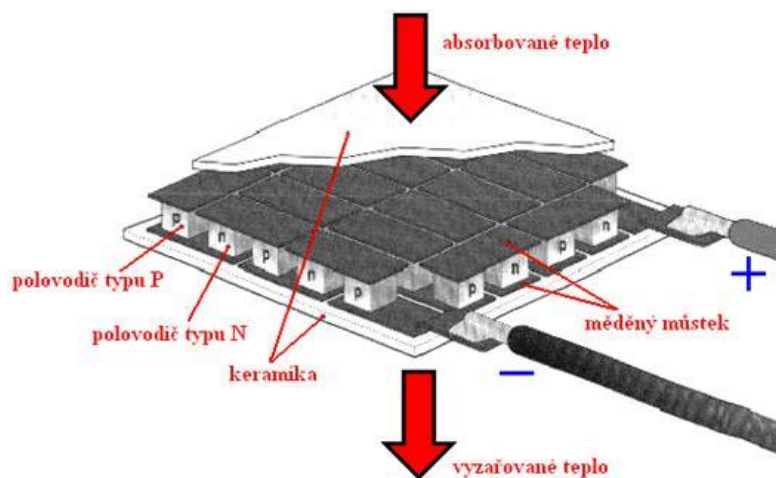
- 1) Vysoká hodnota Seebeckova koeficientu – α
- 2) Vysoká elektrická vodivost – σ
- 3) Nízká tepelná vodivost – κ
- 4) Vysoká tepelná odolnost

Obrázek 13 Termoelektrický článek [22]



Celá soustava je uzavřena v keramickém pouzdře (dvě keramické destičky čtvercového tvaru), které je vyrobeno s vysokými nároky na rovnost povrchu pro dobrý kontakt s chladicí nebo teplo vyzařující soustavou. Modul může mít na obou stranách nalepenou vysoce tepelně vodivou grafitovou fólii, která zajišťuje ještě nižší tepelný kontaktní odpor. Tepelný přenos mezi měděnými můstky a keramickou destičkou může zvyšovat silikonový tuk, který bývá nanášen na vnitřní stranu keramické destičky. Celý modul je po obvodu utěsněn tepelně odolným silikonem, který je díky svým elastickým vlastnostem schopen absorbovat mírný průhyb modulu, který vzniká na základě teplotního gradientu na jeho stranách. TEG články se vyrábí výhradně čtvercového provedení nejrůznějších rozměrů. Nejčastěji 40 x 40 mm nebo 56 x 56 mm. [8, 12]

Obrázek 14 Sériové spojení termoelektrických článků v tzv. termobaterie [13]



Základní parametry

Mezi základní parametry sloužící pro správný výběr TEG modulu patří:

- **T_{hmax} (°C)** – max. teplota horké strany – po překročení této teploty dojde k roztavení pájky uvnitř článku a následné destrukci (nejčastěji okolo 300 °C, ale u speciálních kaskádových modulů dosahuje až 800 °C).
- **Napětí na prázdko (V)** – max. napětí, které je modul schopný produkovat bez zatížení.
- **Účinnost (%)** – poměr elektrické energie vyprodukované článkem k energii, která článkem projde (pohybuje se mezi 4–15 %).
- **Napětí při optimální zátěži (V)** – max. napětí produkované při zatížení ideálním odporem při určitém ΔT teplé a studené strany článku.
- **Proud při optimální zátěži (A)** – max. proud produkovaný při zatížení ideálním odporem při určitém ΔT teplé a studené strany článku.
- **Výkon při optimální zátěži (W)** – max. výkon dosažený při zatížení ideálním odporem při určitém ΔT teplé a studené strany článku (jednotky až desítky Wattů).
- **Optimální zatěžovací odpor (Ω)** – odpor zátěže, při které je článek schopen dosáhnout max. výkonu.
- **Tepelný tok přes modul (W)** – max. teplo, který může projít přes termočlánek.
- **Hustota tepelného toku (W/cm^2)** – max. teplo, která může projít danou plochou.
- **Odpor modulu (Ω)**
- **Rozměr (mm)**

Praktické využití

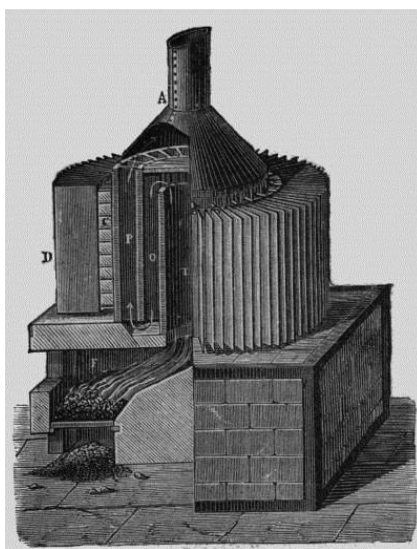
TEG články díky svým pozitivním vlastnostem (dlouhá životnost, nezávislost na okolních vlivech, absence pohyblivých částí atd.) mají v dnešním světě poměrně široké využití. Uvedu zde několik zajímavých příkladů.

Historicky první zdokumentovaný termoelektrický generátor byl vynalezen roku 1840.

V roce 1860 byl zkonstruován plynový termoelektrický generátor s vodou v mosazných tancích, jakožto chladicí médium. Roku 1879 byl vynalezen termoelektrický generátor spalující koks (obr. 15), dosahující výkonu 192 Wattů. První komerční zařízení, které přeměňovalo tepelnou energii na elektrickou, se jmenovalo Thermattaix (obr. 16) a sloužilo pro nabíjení olověných akumulátorů, které posléze napájely rozhlasový přijímač. Na trh bylo uvedeno roku 1925.

Všechny tyto generátory měly termoelektrické prvky vyrobené z kovových materiálů a jejich účinnost byla menší než 1%. Jak se později ukázalo, kovy a jejich slitiny nejsou vhodné pro výrobu elektrické energie z tepelné, jelikož generované napětí je velmi nízké. Nacházejí však uplatnění v měřicí technice, kde díky své chemické, mechanické a teplotní odolnosti mají své místo. [14, 15]

Obrázek 15 Termoelektrický generátor spalující koks [14]



Obrázek 16 První komerční termoelektrický generátor – Thermattaix [15]



Následný vývoj se soustředil v tehdejším Sovětském svazu, kde od 20. let probíhal intenzivní vývoj polovodičů. Koncem druhé světové války měla armáda SSSR první termoelektrické polovodičové generátory, sloužící pro napájení radiostanic. První komerční polovodičový generátor byl uveden roku 1959. Přezdívá se mu Ruská lampa (obr. 17) a využíval tepla petrolejových lamp. Určen byl k napájení rozhlasových přijímačů. Termoelektrický element obsahoval Zinek-antimon ($ZnSb$) a konstantan. Chlazení obstarával vzduch za pomoci masivního chladiče. Články vyráběly napětí 1,5 V a 90 V. Proud odebíraný rádiem byl při 1,5 V 125 mA nebo 250 mA a při 90 V 12 mA. [15]

Obrázek 17 První komerční polovodičový termogenerátor – tzv. Ruská lampa [15]



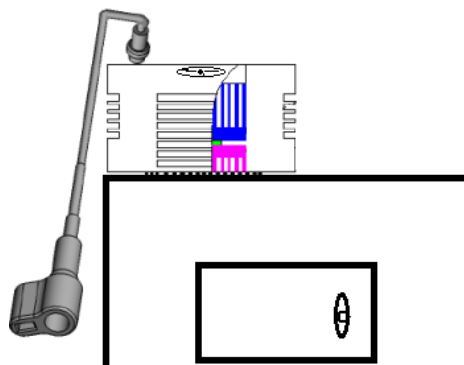
Termoelektrické články se využívají pro získávání elektrické energie z odpadního tepla vznikajícího při spalování tuhých paliv. Používají se zejména tam, kde chybí rozvodná elektrická síť (např. rozvojové země, odlehlé oblasti apod.) Dosahují výkonů od několika Wattů až po desítky, dle kvality a počtu použitých TEG článků. Lze je tedy používat pro napájení méně náročných spotřebičů jako je např. LED osvětlení či nabíjení mobilních telefonů, tabletů apod. Pro tyto účely je navržen např. tento generátor TEG10W (obr. 18, 19), od firmy thermoelectric-generator.com, který se dá pořídit za 240 \$.

Velmi vhodná je instalace TEG článků na křbová kamna plnící funkci záložního zdroje oběhového čerpadla pro vytápění domu. Odpadá tak nutnost po cca 5 letech měnit záložní baterii, jelikož TEG články plně zastanou její funkci. [16]

Obrázek 18 Termoelektrický generátor TEG10W [16]



Obrázek 19 Schéma termoelektrického generátoru TEG10W na kamnech [16]



Účelná je i instalace modulů jako zdroj pro ventilátor (obr. 20), který se jednoduše umístí na kamna a zajišťuje lepší cirkulaci tepelného vzduchu v místnosti. Ventilátor Ecofan 810 od firmy Vanellus je schopen přečerpávat 200 m³ vzduchu za hodinu. Na spodku je vybaven bimetalovým páskem, který chrání článek před přehřátím. Ventilátor lze pořídit za 3680,- Kč.

Stejná firma vyrábí i designovou lampičku (obr. 21), do které se vloží svíčka, která zahřívá článek napájející LED o světelném toku 70 lumenů (odpovídá 18 čajovým svíčkám). [17]

Obrázek 20 Termoelektrický ventilátor Ecofan 810 [17]



Obrázek 21 Termoelektrická lampička [17]



Pro generování elektrické energie lze využít i lidského tepla. Mladá rodačka z Kanady Ann Makosinski ve věku 15 let vyvinula baterku (obr. 22), která na rozsvícení potřebuje pouze lidské teplo. Baterka obsahuje čtyři termoelektrické články a jednoduchý obvod pro stabilizaci napětí. Ochlazování studené strany článku probíhá přes masivní hliníkový chladič (obr. 23). Na to, aby se baterka rozsvítila, stačí pětistupňový teplotní rozdíl, kdy články dosáhnou výkonu 5,4 mW a LED svítivosti 5 cd. [18]

Obrázek 22 Ann Makosinski s termoelektrickou baterkou [18]



Obrázek 23 Termoelektrická baterka na lidské teplo [18]



Praktická je i možnost využít termoelektrické energie v hodinkách, které v limitované edici vyrobila firma Seiko. Stejně jako baterka využívají pro své napájení rozdílné teploty lidského těla a okolí a při běžném nošení produkují výkon okolo 22 μW . S teplotním rozdílem 1,5 $^{\circ}\text{C}$ lze v otevřeném obvodu naměřit 0,3 V a účinnost článku se pohybuje okolo 0,1 %.

[19]

Obrázek 24 Termoelektrické hodinky Seiko [19]



TEG články mají využití i v automobilovém průmyslu. Jak je známo, velká část energie spalovacích motorů se ztrácí v podobě tepla, což má za následek jejich nízkou účinnost. Vznětové motory dosahují účinnosti přibližně 30–45 %, zážehové jen 25–35 %. Nabízí se tedy možnost použití termoelektrických článků pro zvýšení účinnosti motorů. První automobilový termoelektrický generátor byl sestaven již v roce 1963. Mezi v současnosti poslední zkonstruované se řadí generátory od firmy BMW. S návrhem rekuperovat odpadní teplo z výfukového potrubí přišla německá automobilka v roce 2008 a jejich generátor dosahoval výkonu 200 W. V roce 2011 dosahoval generátor instalovaný do vozu BMW X6 (obr. 26) výkonu více než 600 W. Energie vyprodukovaná TEG články může např. dobíjet autobaterii, tudíž články zastávají funkci alternátoru a spotřeba paliva tak klesne o cca 10%. Nabíjet lze i baterii sloužící jako zdroj pro pohon elektromotoru u tzv. hybridů. Zde by byla úspora paliva ještě znatelnější. [14, 19]

Obrázek 25 Využití odpadního tepla u automobilů [19]



Obrázek 26 Termoelektrický generátor instalovaný ve voze BMW X6 [14]



Radioizotopové generátory se používají od roku 1963. Teplo vznikající při rozpadu izotopů přeměňují TEG články na energii elektrickou (desítky až stovky Wattů), kterou využívaly přístroje umístěné na Měsíci při expedici Apollo a přistávací modul sondy Viking při jeho činnosti na povrchu Marsu. Téměř 30 let produkovaly energii radioizotopové generátory kosmických sond Pioneer 10 a 11, vypuštěných v letech 1972 a 1973. S podobnými zdroji byly vyslány sondy Voyager (1977) a jejich životnost se očekává až do roku 2020. Hlavním důvodem využití těchto článků ve vesmíru je jejich spolehlivost a dlouhá životnost. [17]

Výhody a nevýhody TEG článku

Výhody TEG článku:

- Absence mechanických částí
- Absolutně tichý chod
- Dlouhá životnost

- Spolehlivost
- Malé rozměry
- Absence údržby
- Umožňují provoz v libovolné poloze
- Jsou šetrné k životnímu prostředí

Nevýhody TEG článku:

- Nízká účinnost
- Vyšší cena
- Možnost přehřátí

3.3.2 TEC článek

TEC (thermoelectric cooler) články (obr. 27) jsou téměř totožné jako TEG. Liší se zpravidla pouze použitými materiály, z čehož vyplývá i jejich nižší účinnost a max. pracovní teplota. Jejich funkce je založena na základě Peltierova jevu.

TEC články jsou výrazně levnější, takže je lidé občas aplikují i jako generátory elektrické energie. Obvykle se tato záměna nevyplatí kvůli nižší účinnosti a možnosti zničit článek vysokou teplotou. TEC jsou navrženy především pro chlazení. Použití pro ohřev je také možné, ale setkáme se s ním jen zřídka.

Obrázek 27 Peltierův článek TEC1-12710 [20]

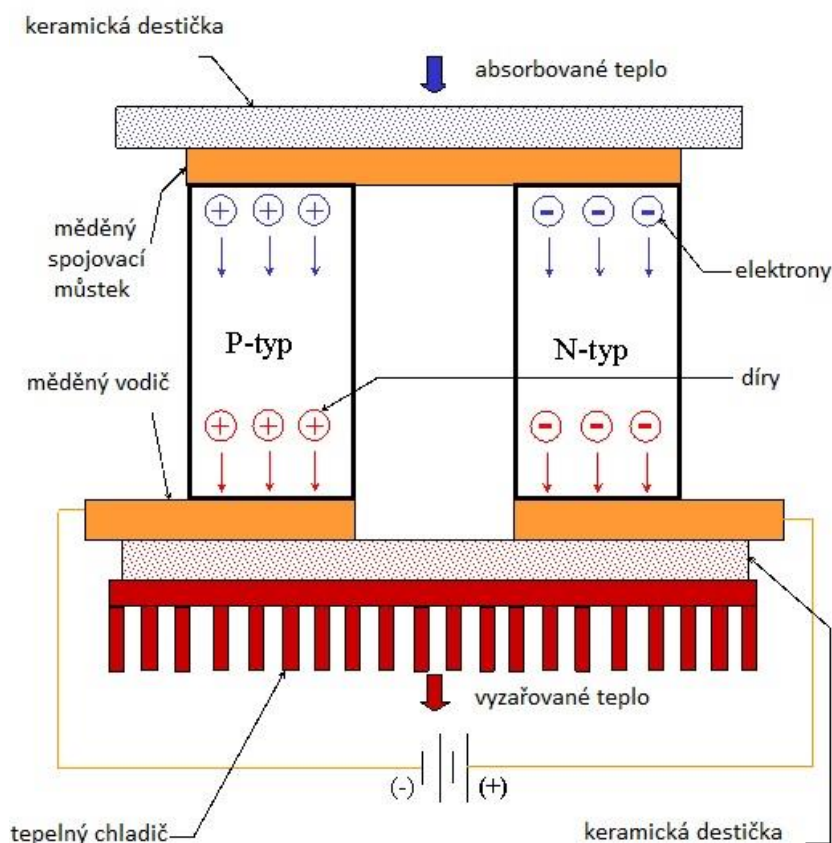


Princip funkce

Princip funkce TEC článku (obr. 28) je založen na Peltierovu jevu. Pokud připojíme napětí na PN přechod v závěrném směru, tedy záporný pól na P a kladný na N, díry jsou v polovodiči typu P odváděny směrem k zápornému pólu a v polovodiči typu N elektrony ke kladnému pólu zdroje. Ve spojovacím můstku tedy klesá počet volných nosičů náboje,

čímž klesá kontaktní napětí mezi spojovacím můstkem a polovodiči. Spojovací můstek se tedy ochlazuje, zatímco druhý spoj se ohřívá. Pokud polaritu zdroje obrátíme, dojde k opačnému pohybu děr a elektronů a tedy i k výměně ohřívané a ochlazované strany článku. [20,21]

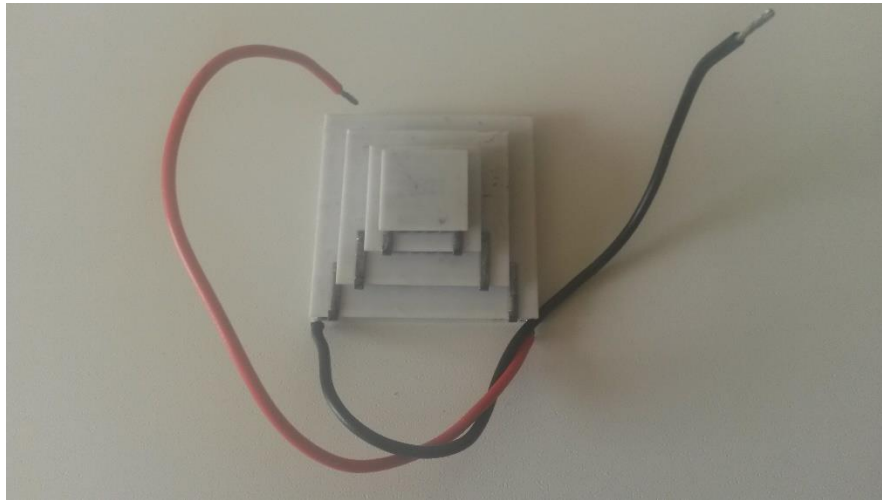
Obrázek 28 Princip funkce TEC článku [20]



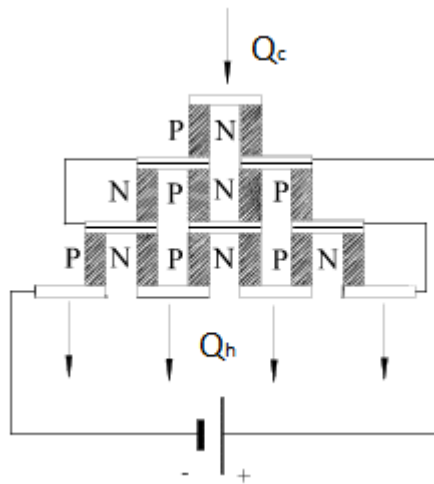
Struktura článku a požadované vlastnosti polovodičů

Základní struktura a požadované vlastnosti u TEC článků jsou totožné jako u článku TEG. TEC články se vyrábí i v tzv. kaskádovém provedení (obr. 29, 30). (TEG články se v kaskádovém provedení vyrábí také, ale jsou konstrukčně odlišné a vyskytují se spíše vzácně). Díky tomu lze dosáhnout větších teplotních rozdílů. Jednotlivé termobaterie jsou u kaskádového provedení také v sériovém zapojení, jsou ale seskupeny v postupně zužujících se kaskádách připomínajících pyramidu. Ty jsou odděleny keramickými destičkami s dobrou tepelnou vodivostí. Na ně může být aplikován silikonový tuk pro zajištění malého tepelného odporu mezi bateriemi. Jednotlivé termobaterie lze také k sobě slepit vhodným lepidlem s dobrou tepelnou vodivostí. Spodní část je vždy větší, takže větší kontaktní plocha zlepšuje odvod vyzařovaného tepla. Nejvyšší termobaterie je určena k chlazení. [20, 21]

Obrázek 29 Kaskádové provedení Peltierova článku

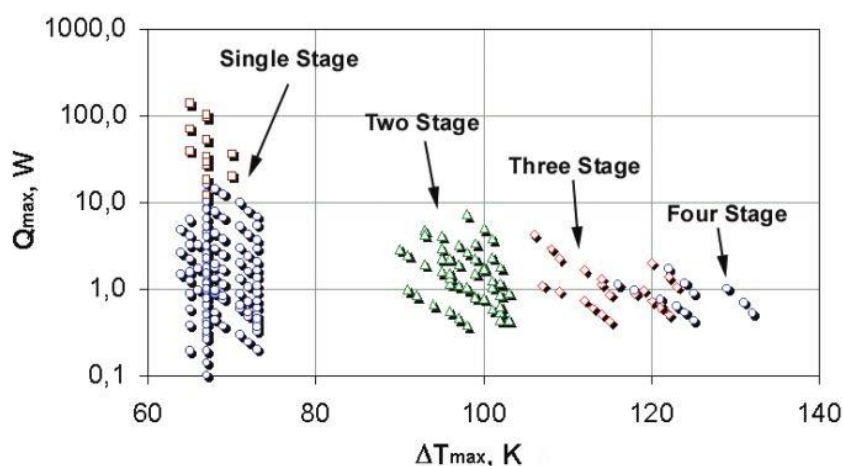


Obrázek 30 Schéma kaskádového Peltierova článku [22]



Max. rozdíl teploty mezi teplou a studenou stranou jednořadého článku se pohybuje okolo 65–75 °C (může se významně lišit v závislosti na použitém článku a pracovní teplotě). Při použití většího počtu článků v kaskádovém zapojení lze dosáhnout výrazně větších teplotních rozdílů a tedy i nižší absolutní teploty (obr. yx). [22, 23]

Obrázek 31 Maximální výkony komerčně dostupných Peltierových článků [23]



Základní parametry

Mezi základní parametry sloužící pro správný výběr TEG modulu patří:

- T_{hmax} (°C) – max. teplota horké strany – po překročení této teploty dojde k roztavení pájky uvnitř článku a následné destrukci (nejčastěji okolo 80 °C, ale u speciálních vysokoteplotních modulů může teplota horké strany přesahovat 200 °C).
- ΔT_{max} (°C) – max. teplotní rozdíl mezi studenou a teplou stranou modulu.
- U_{max} (V) – max. napětí, na které je možné modul připojit.
- I_{max} (A) – max. proud modulem.
- Účinnost (%) – poměr elektrické energie, která článkem projde, k tepelné energii jím vyprodukované (pohybuje se okolo 4 %).
- Q_{max} – tepelný tok přes modul (W) – max. teplo, který může projít přes termočlánek.
- Hustota tepelného toku (W/cm²) – max. teplo, která může projít danou plochou.
- Odpor modulu (Ω)
- Rozměr (mm)

Praktické využití

TEC články se díky svým pozitivním vlastnostem (okamžitý efekt chlazení/topení, snadná regulace výkonu, spolehlivost...) využívají v mnoha aplikacích. Nacházejí se v zařízeních používaných v armádě, vědě, průmyslu, telekomunikacích, zdravotnictví i v běžném životě.

Mezi nejběžnější, i když spíše domácí amatérské aplikace, patří integrace TEC článku do systému chlazení procesorů počítačů (obr. 32). S vzrůstajícím výpočetním výkonem

procesorů stoupají i požadavky na jejich chlazení. Běžné chladicí systémy jsou založeny pouze na výměně tepla, takže v některých případech přestávají stačit. Jako mezičlánek mezi procesor a pasivní chladič lze přidat TEC článek vhodných parametrů. Pasivní chladič musí být kvůli vysokému zahřívání teplé strany článku také obvykle chlazen, a to buďto ventilátorem, nebo v kombinaci s vodním chlazením. Výhodou této aplikace je možnost vyššího taktování procesoru, nevýhodou vyšší nároky na odběr proudu a možnost kondenzace vody při podchlazování procesoru na nižší teplotu, než je teplota okolí. [24]

Obrázek 32 Procesor chlazený Peltierovým článkem [24]



Dále se TEC články používají v zrcadlových senzorech rosného bodu, kde je zrcadlo (obvykle ze zlata) ochlazováno studenou stranou článku. Podchlazením zrcadla při teplotách plynu nad 0 °C dochází k orosení, které je detekováno fotoelektricky, nebo změnou elektrické vodivosti. Pomocí regulačního obvodu je proud protékající Peltierovým článkem řízen tak, aby na zrcadle byla udržována teplota rosného bodu. Teplota zrcadla je snímána miniaturním odporovým nebo polovodičovým teploměrem a výstupním signálem je buď hodnota teploty rosného bodu, nebo jiné vyjádření vlhkosti plynu. [25]

TEC články se také používají v CCD kamerách, což jsou zařízení sloužící ke snímání velmi slabých zdrojů světla uplatňující se v astronomii a mikroskopii. CCD čip je nutné výkonně chladit, aby byl výsledný snímek co nejkvalitnější. Na obr. 33 si můžeme prohlédnout CCD kameru amatérské výroby, která je chlazená dvěma Peltierovými články. [23]

Obrázek 33 CCD kamera chlazená dvěma Peltierovými články [26]



Další typické aplikace TEC článků:

- Preparace a skladování tkání,
- přesná chladicí zařízení,
- chlazení laserových diod a mikroprocesorů,
- krevní a DNA analyzátory,
- kalibrace termostatů,
- vybavení pro noční vidění,
- infračervené detektory,
- vysoušeče,
- kalorimetry,
- letecká elektrotechnika,
- osmometry,
- ledničky v automobilech, letadlech, lodích,
- vinotéky,
- aquamaty.

Výhody a nevýhody TEC článku

Výhody TEC článku:

- Spolehlivost
- Vysoká chladicí účinnost
- Dlouhá životnost
- Absolutně tichý chod

- Přesná regulace teploty
- Okamžitý efekt chlazení/topení
- Možnost usměrnit chlazení na velmi malou plochu
- Malé rozměry
- Rovnoměrnost chlazení/ohřevu

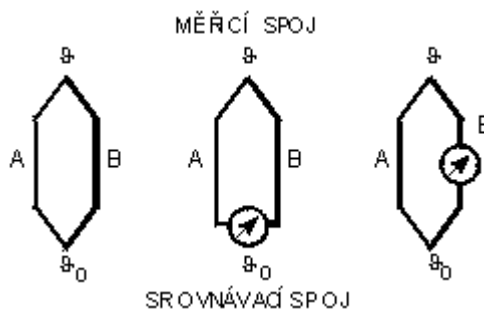
Nevýhody TEC článku:

- Vysoká spotřeba zapříčiněná nízkou účinností
- Možná kondenzace vody
- Možnost přehřátí

3.3.3 Termoelektrické články pro měření teplot

Vzhledem k tomu, že napětí vznikající na termoelektrickém článku je závislé na teplotě, lze jej využívat i pro měření teplot. Nejjednodušší provedení termoelektrického snímače je znázorněno na obr. 34. Obvod je složen ze dvou kovových vodičů A a B vzájemně propojených. Spojené konce termočlánku, nazývané měřicí spoj, se umísťují do oblasti měřené teploty. Na srovnávacím spoji měříme vzniklé termoelektrické napětí. Pro správnou funkci snímače je nutné, aby byla na srovnávacím spoji konstantní teplota \mathcal{G}_0 , nebo aby byl tento vliv kompenzován. Pro vyhodnocení velikosti termoelektrického napětí zapojíme do obvodu měřicí přístroj a to buď tak, že rozpojíme srovnávací spoj, (obr. 34, uprostřed), nebo měřicí přístroj zapojíme do jedné přerušené větve termočlánku (obr. 34, vpravo).

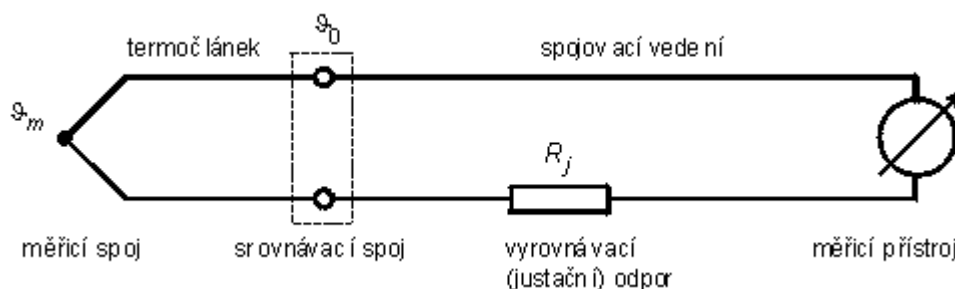
Obrázek 34 Obvod termoelektrického snímače [28]



Obě svorky měřicího přístroje musí mít stejnou teplotu, aby nedošlo k nežádoucí změně termoelektrického napětí. V praxi se setkáváme s tím, že mezi termočlánek a měřicí přístroj je zařazeno spojovací vedení, jehož odpor se upravuje vyrovnávacím (justačním) odporem na stanovenou hodnotu, obvykle 20Ω (obr. 35).

Tyto teplotní snímače jsou určeny k měření teplot $-600\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+2800\text{ }^{\circ}\text{C}$. V různých zemích jsou vytvořeny standardy s přesně stanovenými vlastnostmi. Mezi jejich výhody patří především jejich jednoduchost a vysoká teplotní odolnost. [21, 28]

Obrázek 35 Zapojení termočlánku [28]



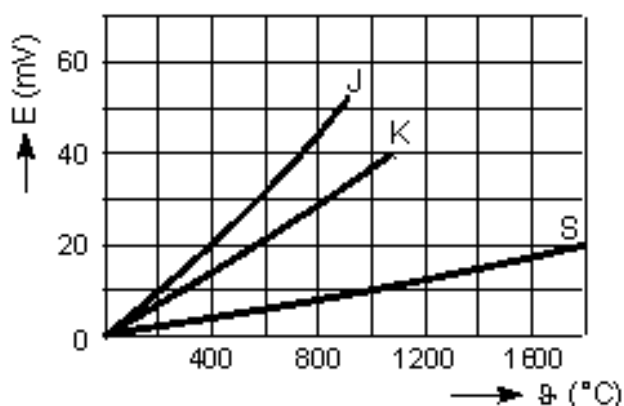
Materiály termoelektrických snímačů

Při výběru materiálu pro termoelektrický snímač jsou důležité tyto základní parametry. Závislost termoelektrického napětí na teplotě se má co nejvíce blížit lineárnímu průběhu a zároveň má být co největší. Čím je hodnota napětí menší, tím musí být měřicí přístroj citlivější a tím pádem i choulostivější. Materiál má vykazovat chemickou, mechanickou a korozní odolnost.

Materiály volíme z hlediska požadovaného rozsahu teplot a požadované přesnosti měření. Páry materiálů pro výrobu termočlánku jsou normalizovány a značeny velkými písmeny. Pro průmyslové použití je nejrozšířenější termočlánek typu J (železo-konstantan), určený pro teploty od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro vyšší teploty lze použít termočlánek typu K (niklchrom-niklhlíník) pro rozsah teplot $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Termočlánek typu S (platinarhodium-platina) lze použít pro teploty od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teploty jsou uváděny pro trvalé použití snímačů. Krátkodobě lze např. termočlánek typu K vystavit teplotě až $+1800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Závislost termoelektrického napětí na teplotě u vybraných termočlánků je znázorněn v grafu (obr. 36). Přehled jejich vlastností v tab. 2. [21, 27, 28]

Obrázek 36 Závislost termoelektrického napětí na teplotě [28]



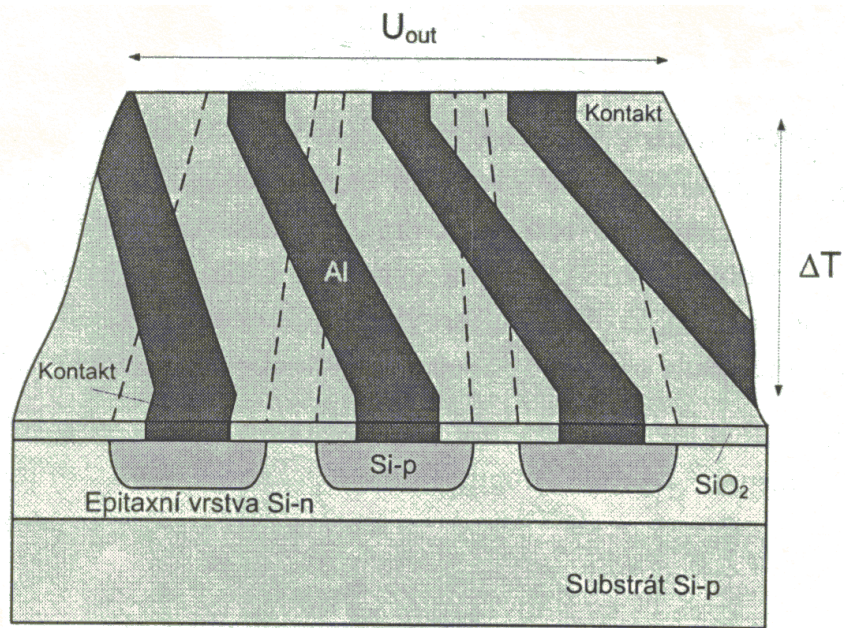
Tabulka 2 Přehled vlastností termočlánků [28]

Označení termočlánku	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>S</i>
materiál termočlánku	železo-konstantan	niklechrom-nikhlhliník	platinarhodium-platina
použitelnost: trvale krátkodobě	-200 °C až +600 °C +900 °C	-50 °C až +1000 °C +1300 °C	0 °C až +1300 °C +1800 °C
termoelektrické napětí (mV/100 °C)	5,37	4,8	0,64
odolnost v oxidačním prostředí	malá	velká	velká
odolnost v redukčním prostředí	velká	malá	malá

Integrované termoelektrické snímače

Technologický rozvoj umožnil konstruovat integrované termoelektrické články za použití úzkých iontově implantovaných proužků s hliníkovými propojkami (obr. 37). Termočlánek tvoří křemíkové proužky typu P v epitaxní vrstvě typu N. Seebeckův koeficient pro křemík je asi 440 $\mu\text{V/K}$ až 1000 $\mu\text{V/K}$ na jeden proužek. Citlivost je možné zvýšit paralelním spojením jednotlivých proužků. Charakter termoelektrického článku je dán tepelným propojením teplé a referenční části senzoru prostřednictvím křemíkového substrátu, na kterém je termoelektrický článek integrován. Integrované články lze využít např. k měření teplotních rozdílů přímo na křemíkovém čipu. Můžeme tak měřit teplotu na různých místech čipu najednou. [29]

Obrázek 37 Integrovaný termočlánek [21]



4 Vlastní výsledky – Konstrukce a testování nabíječky baterií na bázi termoelektrické přeměny energie

4.1 Volba typu nabíječky na bázi termoelektrické přeměny energie

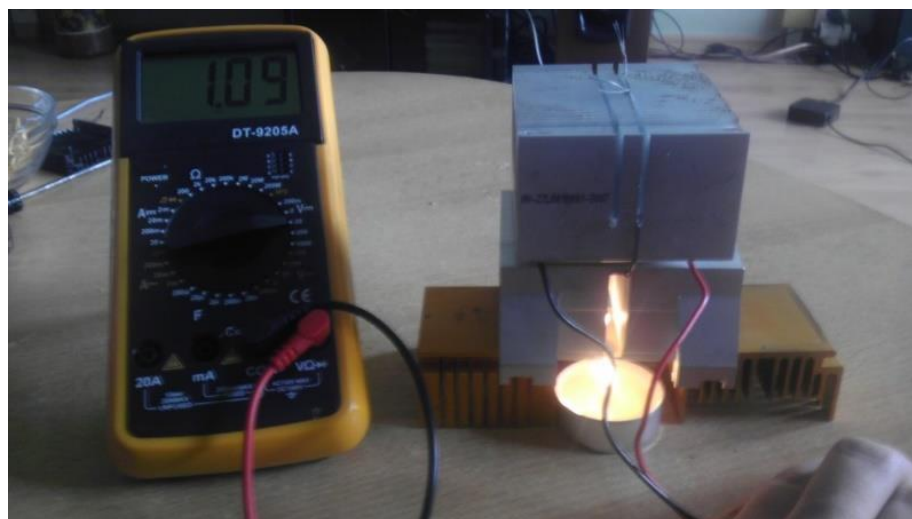
Pro konstrukci byly hlavními kritérii využitelnost a praktičnost. Proto byl zvolen koncept opatřený USB výstupem s požadovaným napětím 5 V. Cílem tedy bylo vytvořit nabíječku na bázi termoelektrické přeměny energie, která zvládá nabíjet běžné spotřebiče uzpůsobené pro nabíjení přes USB konektor.

4.2 Seznámení se s Peltierovým článkem

Pro seznámení s vlastnostmi Peltierova článku a vhodný návrh nabíječky byl zakoupen modul TEC1-12706 a ze starých počítačů demontovány chladiče procesoru. Sestavili jsme jednoduchý model, který se skládal ze dvou chladičů, Peltierova článku, čajové svíčky a drátu. Jeden chladič, který zahřívala svíčka, předával teplo teplé straně článku, druhý chladič teplo z článku odváděl. Pro dobrý styk ploch článku a chladičů byla k sobě soustava pevně stažena drátem. Multimetrem jsme měřili napětí generované Peltierovým článkem.

Na obr. č. 38 můžeme vidět, že napětí se z počátku pohybovalo okolo 1 V. Jak se ale chladič studené strany článku postupně zahříval, napětí klesalo až na cca 1/3. Z tohoto jednoduchého prototypu vyplývá, že pro zdárnou konstrukci termoelektrické nabíječky bude potřeba výkonné chlazení a pravděpodobně i větší počet článků.

Obrázek 38 Měření napětí na Peltierovu článku



4.3 Konstrukce prototypu

Pořízeny byly dva Seebeckovy články TEG1-241-1.4-1.2, které jsou konstruovány na teplotu max. 235 °C a mají větší účinnost (dle výrobce 3%), než články TEC. Spolu s TEG články byl obstarán DC-DC měnič, tzv. booster, který je již opatřen USB konektorem. Při vstupním napětí 0,9–5 V zajišťuje booster stabilních 5 V na výstupu. Jako chladicí médium použijeme vodu, protože za běžných podmínek nepřekročí 100 °C a je široce dostupná. Vodu zadržujeme v hliníkovém ešusu, aby nabíječka nabyla na praktičnosti. Dále jsme nechali vyříznout vodním paprskem hliníkový kruhový výpalek o velikosti dna ešusu (12 cm) a tloušťce 8 mm, který bude oddělovat článek od přímého zdroje tepla a zároveň docílí rovnoměrného rozvodu tepelné energie. Tloušťku 8 mm jsme zvolili s ohledem na fakt, aby nedocházelo k tepelné deformaci, a tloušťka dovolila zhotovit dostatečný počet závitů. Pro zahřívání teplé strany článků budou použity typické zdroje tepelné energie pro ohřev obsahu ešusu. Tedy plynový vařič, sporák či oheň. Pro snížení teploty působící na teplou stranu článků použijeme jako mezivrstvu slídové desky s příměsí silikonu, které jsou tepelně odolné (až do 1000 °C) a mají poměrně dobré izolační vlastnosti (cca $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). TEG články jsme zapojili paralelně, abychom nepřekročili pracovní napětí DC boosteru a získali větší proud.

Po sestavení tohoto byť funkčního prototypu (obr. 39) je patrná nutnost provést několik zásadních změn. Dno tohoto ešusu je velmi tenké a nerovné, tudíž nelze dosáhnout dostatečného styku s plochami TEG článků, zvláště pak po stažení článků mezi hliníkový výpalek a dno ešusu. Důsledkem toho je zhoršené chlazení studené strany článků a značné snížení výkonu. Nevhodné se jeví i použití těchto TEG článků, které při max. ΔT 100 °C dosaženého při ustáleném stavu nabíjení, kdy voda vře, a teplota teplé strany článků se pohybuje okolo 200 °C, dosahují poměrně malého výkonu – okolo 1,2 W (mobilní telefon Samsung Galaxy S4 Active se sice nabíjel, ale velmi pomalu). Další nevýhodou použití těchto TEG článků byla nutnost použít poměrně tlustou (11 mm) slídovou desku pro omezení max. teploty teplé strany článků na 200 °C. Deska se také teplem kroutila, což by v konstrukci mohlo způsobovat problémy.

Obrázek 39 První prototyp termoelektrické nabíječky



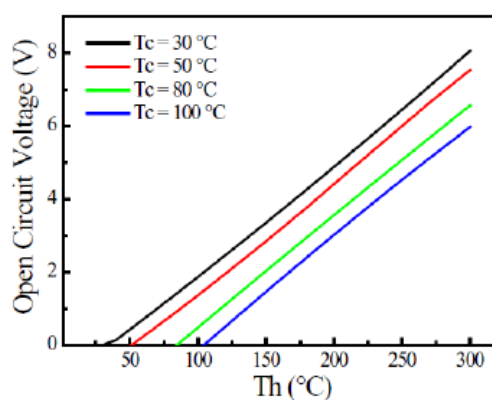
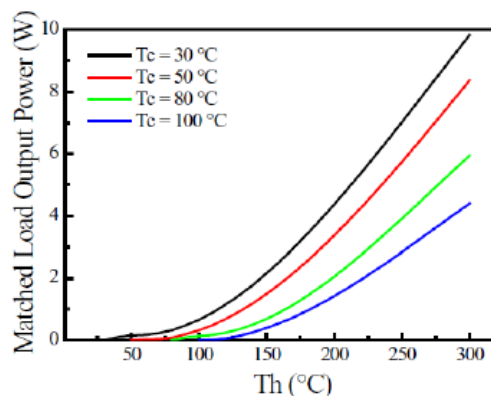
4.4 Konstrukce finální nabíječky na bázi termoelektrické přeměny energie

Nákup nových součástí nabíječky

Použijeme tedy jiný typ ešusu s tloušťkou stěny 1,6 mm. Okem se zdálo dno ešusu rovné, ale při přiložení pravítka jsme zjistili, že dno je ve středu prohnuté směrem dovnitř. Dno bylo tedy zbrušeno hrubším smirkovým papírem položeným na rovné ploše. Jemným pak pod vodou, pro co nejhladší povrch, který je důležitý pro malý kontaktní odpor. Od prodejce www.solfoton.eu byly zakoupeny dva nové termoelektrické články s označením TEG10W o rozměrech 40 x 40 x 4 mm, konstruované na stálou pracovní teplotu 330 °C. Moduly mají na obou stranách nalepenou vysoce tepelně vodivou grafitovou fólii, která zajišťuje nízký tepelný kontaktní odpor. Výrobce má k těmto článkům dokumentaci s přehlednými grafy (tab. 3 a obr. 40, 41), takže jejich koupě byla sázkou na jistotu, co se výkonových parametrů týče. Navíc byl ke dvěma modulům zdarma DC-DC měnič s nastavitelným výstupním napětím 1,25–30 V při vstupním napětí 3–35 V, takže se pro tyto účely jevil jako vhodný.

Tabulka 3 Parametry termočlánku TEG10W [29]

Teplota horké strany	300 °C
Teplota studené strany	30 °C
Napětí naprázdno	8 V
Optimální zatěžovací odpor	1,59 Ω
Optimální výstupní napětí	4 V
Optimální výstupní proud	2,4 A
Optimální výstupní výkon	9,6 W
Tepelný tok přes modul	188 W
Hustota tepelného toku	11,8 W/cm ²

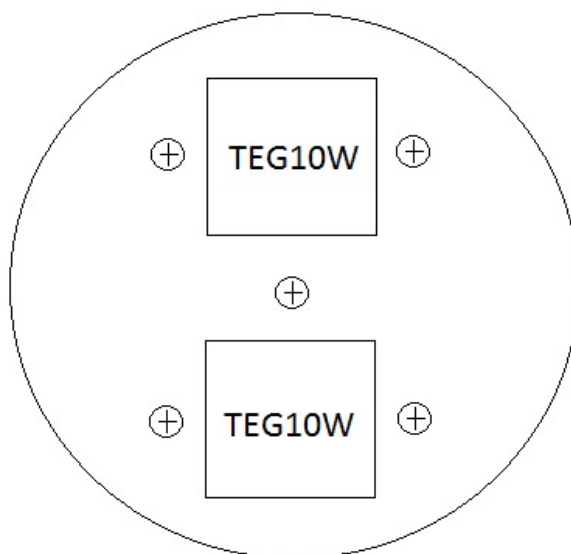
Obrázek 40 Závislost napětí naprázdno na rozdílu teplot u termočlánku TEG10W [29]**Obrázek 41 Závislost výkonu na rozdílu teplot u termočlánku TEG10W [29]**

Sestavení nabíječky

Jako první bylo nutné vhodně zvolit rozmístění termočlánků do prostoru dvojitého dna ešusu. Nejvhodnější se jevílo symetrické rozmístění (obr. 42) s mezerou mezi články. V této mezeře bude umístěn šroub, pro vyrovnání zbývající nerovnosti zakoupeného ešusu. Následně jsme si vytyčili body, kde budou umístěny ostatní čtyři šrouby spojující hliníkový výpalek a dno ešusu. Dle doporučení výrobce byly šrouby umístěny 5 mm od okraje článků. Aby byla

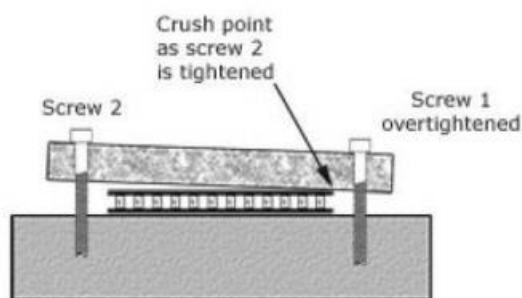
dosažena rovnoběžnost vrtaných děr výpalku a ešusu, stáhli jsme je k sobě tyčovým ztužidlem. Ešus jsme provrtali skrz, zatímco 8 mm výpalek byl navrtán do hloubky pouze 6 mm, aby nedošlo k porušení spodní strany výpalku, což je výhodné z důvodu odizolování termočlánků, zejména od vlhkosti. Výpalek jsme navrtali 4 mm vrtákem, dle pravidla že velký průměr závitu = 80% malého. Poté jsme do vyvrtaných děr výpalku vyřezali závit závitníkem o průměru 5 mm, což odpovídá průměru použitých šroubů M5.

Obrázek 42 Schéma rozmístění termočlánků a šroubů u termoelektrické nabíječky

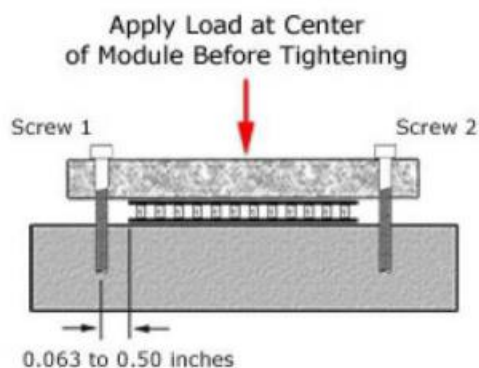


Termočlánky jsme pájením spojili do série, takže výsledné napětí se sčítá. Sériové zapojení se jevílo jako vhodnější, protože při paralelním spojení termočlánků by obvodem protékaly vyrovnávací proudy, i když není pravděpodobné, že by to termočlánkům mohlo nějak uškodit. Články jsme umístili na vytyčené místo výpalku a přiložili ešus. Slídová deska by při použití těchto článků neměla být třeba, protože dle provedeného měření, se teplota na teplé straně článku při max. výkonu sklokeramického sporáku pohybovala okolo 290 °C. Spodní strany hlav šroubů jsme rovnoměrně potřeli silikonem na vysoké teploty (do 320 °C), aby nedocházelo k prosakování vody, a šrouby jsme lehce dotáhli. Při utahování šroubů je ideální zatížit střed modulu závažím nebo svorkou (obr. 44), a utahovat střídavě oba protilehlé šrouby. Tím dojde k rovnoměrnému rozložení sil. Pokud bude jeden šroub utážen více, může dojít k rozdrčení okraje TEG článku (obr. 43). Upínací síla dle výrobce nesmí přesáhnout 230 kg, takže by bylo ideální použít momentový klíč. Ten jsme neměli k dispozici, a tak bylo nutné se spolehnout na vlastní cit v rukou.

Obrázek 43 Nesprávné dotahování šroubů [29]



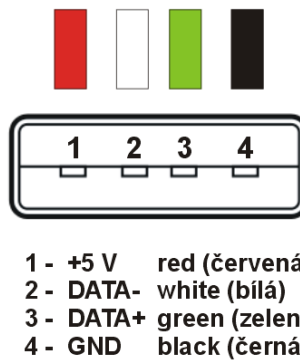
Obrázek 44 Doporučená vzdálenost šroubů od modulu a znázorněný tlak pro dotahování [29]



Následně bylo potřeba vhodně ochránit dráty potažené teflonem a bezpečně je vyvést z dvojitého dna ešusu. Pro tyto účely se jako vhodná jevila hliníková trubička o průměru 8 mm, kterou jsme po zahřátí na plynovém hořáku ohnuli ve dvou bodech. Stejně jsme vyrobili i plíšek fixující trubičku na boční straně ešusu. Ten jsme poté společně s bokem ešusu provrtali a přinýtovali. Hlavičky nýtů jsme opět potřeli tepelně odolným silikonem, aby byl spoj vodotěsný.

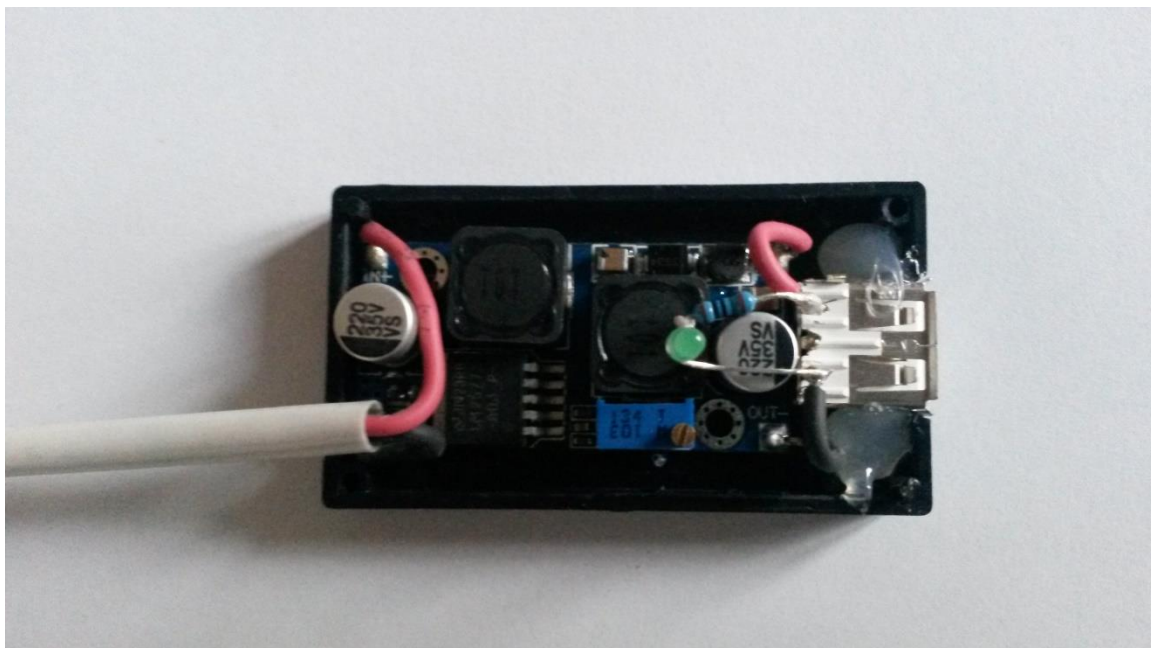
Dráty vyvedené z hliníkové trubičky jsme potáhli silikonovou bužírkou, která odolává teplotám až 200 °C a zakončili kovovým konektorem cinch typu zásuvka, aby nemohlo dojít k nechtěnému zkratu nebo přepólování. Aby byl DC-DC měnič v bezpečné vzdálenosti od zdroje tepelné energie, je s termočláanky propojen 47 cm dlouhými silikonovými vodiči v silikonové bužírce. K propojení opět slouží kovový konektor cinch, typu vidlice. DC-DC měnič jsme umístili do plastové konstrukční krabičky o rozměrech 17 x 35 x 65 mm. Modul s USB konektorem se do ní akorát vešel a navíc byla krabička opatřena otvorem o rozměrech 6 x 13 mm, což odpovídá velikosti USB konektoru. Do boční strany krabičky jsme vyvrtali otvor o průměru 5 mm a přivedli jím vodiče v silikonové bužírce. Měnič společně s USB konektorem jsme pomocí tavného lepidla zafixovali do krabičky. Vodiče v bužírce jsme připojili na vstup měniče a výstup propojili s USB konektorem s pinem č. 1 a č. 2. Piny 2 a 3, sloužící pro datové přenosy, jsme pájením vyzkratovali, protože některé typy telefonů jsou pak schopny tzv. rychlonabíjení, tedy nabíjení větším proudem.

Obrázek 45 Pinout konektoru USB [30]



Pro indikaci, že je na portu USB napětí a je možné nabíjet zařízení, jsme na výstup připájeli zelenou 3 mm LED s předřadným odporem o velikosti 150 Ω . Velikost odporu byla vypočtena ze vzorce $R = \frac{U_Z - U_D}{I_D}$, kde U_Z je napětí zdroje, tedy 5,1 V, U_d napětí na LED, u tohoto typu diody 2,2 V a I_d je max. proud diodou, v tomto případě 20 mA. Výsledkem je 145 Ω , použili jsme tedy rezistor nejbližší v řadě – 150 Ω . Pájením jsme tedy tento odpor připojili do série k LED a pro diodu vyvrtali otvor o průměru 3 mm. Měnič jsme pomocí konektoru cinch připojili k termočlánkům, ešus naplnili vodou, umístili na sporák, a s připojeným multimetrem nastavili hodnotu 5,1 V potenciometrem na výstupu. Posledním krokem bylo sestavení instalační krabičky (obr. 46).

Obrázek 46 DC-DC měnič instalovaný v krabičce



Obrázek 47 Termoelektrická nabíječka v podobě ešusu



Obrázek 48 Termoelektrická nabíječka s DC-DC měničem



4.5 Testování finální nabíječky na bázi termoelektrické přeměny energie

4.5.1 Měření VA charakteristiky nabíječky

Abychom zjistili, jakého výkonu termoelektrická nabíječka (ešus) dosahuje, rozhodli jsme se změřit VA charakteristiku. Měřili jsme VA charakteristiku dvou TEG článků (TEG10W) zapojených do série pomocí analyzátoru solárních článků PROVA 210 (obr. 49). Pro ohřev teplé strany článků jsme použili malý kempingový vaříč s kartuší. Ochlazování studené strany zajišťovala voda. Její teplota byla měřena rtuťovým teploměrem s rozsahem -15 až 100 °C. Teplotu horní strany hliníkového výpalku měřil termočlánek Omega typu K připojený přes adaptér do multimetru UNI-T UT33C. V místě styku termočlánků s výpalkem byla teplota o několik stupňů nižší vlivem ochlazování článku od chladícího média. Tento rozdíl činil přibližně 13%, jak jsme zjistili při jednoduchém měření, kdy jsme porovnali teplotu neměřenou ve vyfrézované drážce výpalku, tedy na styku s TEG článkem, s teplotou horní strany výpalku mimo styčné plochy. Naopak druhá strana článku byla zase o něco teplejší díky prohřívání článku a přenosu tepla od výpalku přes tepelně odolný silikon. Tato diference dosahovala přibližně 23 %. Vhodnější by bylo měřit tepotu dvěma termočlánky na styčných

plochách TEG, bohužel jsme ale neměli k dispozici dva měřící termočlánky a nabíječka byla v době provádění měření plně zkompletovaná.

Obrázek 49 Měření výkonových parametrů termoelektrické nabíječky



VA charakteristiku jsme naměřili pro ustálený stav nabíjení, kdy voda v ešusu vře a plynový vaříč dává plný výkon. Analyzátor solárních článků postupně zatěžuje zdroj různými odpory a vyhodnocuje napětí a protékající proud. Při těchto parametrech lze zařízení nabíjet rychle a zároveň pohodlně, stačí jen jednou za cca 45 min dolít vodu, která se vyvařila.

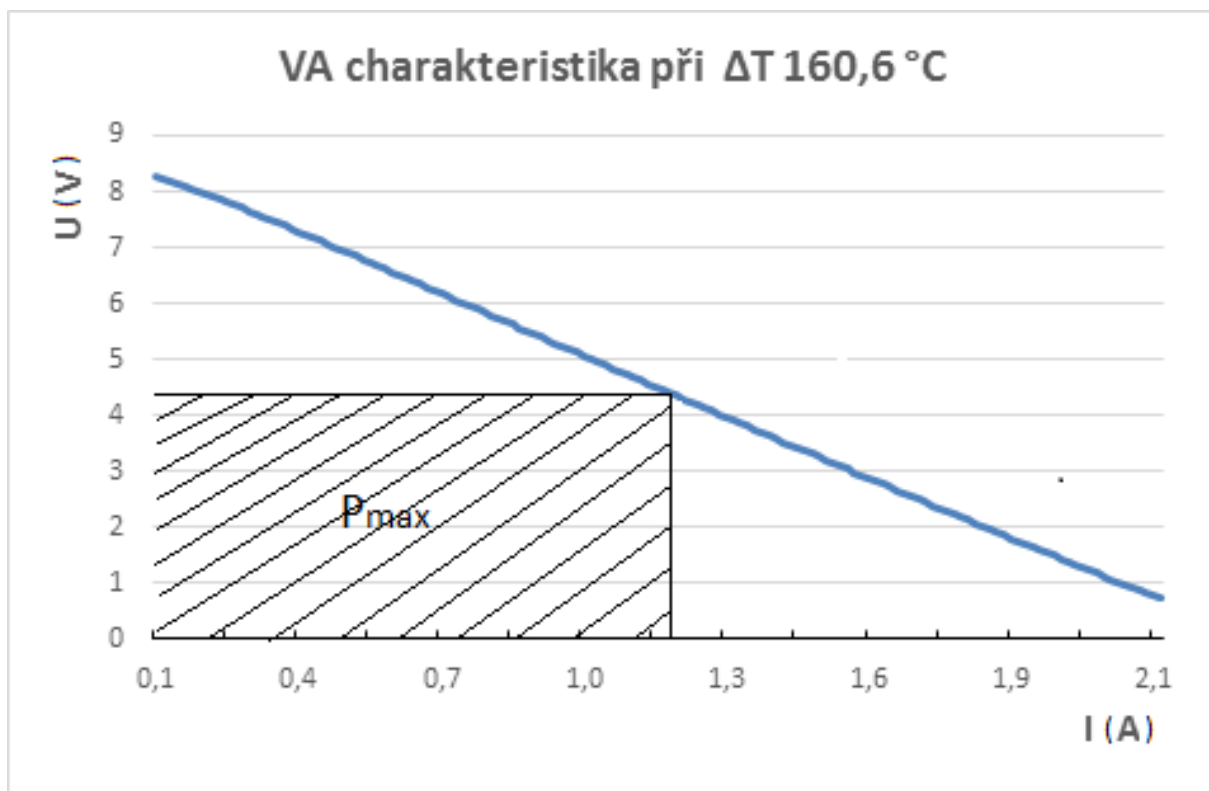
V následující tabulce si můžeme prohlédnout rovnoměrně vybrané hodnoty naměřené analyzátozem PROVA 210, který poskytl vždy sto padesát hodnot měření. Nabíječku zatěžoval od 0 do 564,7 Ω . T_1 označuje teplotu chladicího média, vody, která byla po celou dobu měření konstantní. T_2 značí teplotu výpalku snímanou termočlánkem typu K a odečítanou přes multimetr. Obě tyto teploty upravuje tabulka na přesnější hodnoty T_c – teplota chlazené strany článku a T_h – teplota ohřívání článku, aby bylo co nejvíce eliminováno prohřívání článku a další vlivy. Maximální výkon 5,122 W TEG články poskytovaly zatíženy 3,7 Ω při teplotní diferenci teplé a studené strany článku 160,6 $^{\circ}\text{C}$.

Tabulka 4 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 160,6 °C

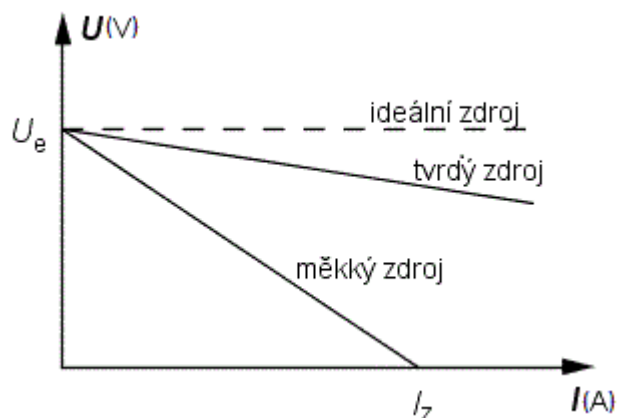
Měřená hodnota č.	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_c (°C)	T_h (°C)	ΔT (°C)	U (V)	I (A)	P (W)	R (Ω)
1	100	326	123	283,6	160,6	8,131	0,014	0,117	564,653
2	100	326	123	283,6	160,6	7,967	0,218	1,734	36,613
3	100	326	123	283,6	160,6	7,171	0,435	3,121	16,477
4	100	326	123	283,6	160,6	6,350	0,653	4,145	9,727
5	100	326	123	283,6	160,6	5,514	0,870	4,799	6,335
6	100	326	123	283,6	160,6	4,358	1,175	5,122	3,708
7	100	326	123	283,6	160,6	3,867	1,306	5,049	2,962
8	100	326	123	283,6	160,6	3,038	1,523	4,628	1,994
9	100	326	123	283,6	160,6	2,236	1,741	3,893	1,284
10	100	326	123	283,6	160,6	1,443	1,959	2,826	0,737

Naměřené hodnoty si můžeme prohlédnout i v následujícím grafu, VA charakteristice nabíječky, v podstatě zdroje. Z naměřených hodnot je patrné, že nabíječka dosahuje výrazně vyšších výkonů při nízké zátěži. Největšího výkonu dosáhne při zátěži 3,7 Ω s napětím na svorkách 4,36 V a protékajícím proudem 1,18 A. V grafu jsou tyto hodnoty vytyčeny a výsledný obdélník má největší možný obsah. Jak si můžeme povšimnout, křivka VA charakteristiky je velmi strmá. To je charakteristické pro měkké zdroje, což Peltierův článek zajisté je. Čím je křivka vodorovnější, tím je zdroj tvrdší. Pokud je křivka zcela vodorovná, jedná se o tzv. ideální zdroj napětí, kdy na jeho svorkách naměříme konstantní napětí nehlédě na velikost zátěže. Takový zdroj ale ve skutečnosti neexistuje a jeho význam je tedy pouze teoretický.

Obrázek 50 VA charakteristika termoelektrické nabíječky při $\Delta T 160,6\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 51 VA charakteristika zdrojů



4.5.2 Měření výkonových parametrů při různých teplotách T_h

Provedli jsme i další měření výkonových parametrů v ustáleném pracovním režimu nabíječky, kdy voda v esusu měla stálých $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a teplotu hliníkového výpalku jsme regulovali intenzitou plamene plynového vaříče. Použité měřicí zařízení byly totožné jako při měření VA charakteristiky. Naměřené teploty byly přepočítány na hodnoty T_h a T_c , přesnější vzhledem k reálné teplotě teplé a studené strany TEG článku. ΔT je jejich rozdíl,

od kterého se odvíjí výkonové parametry U , I a P , odečtené ze solárního analyzátoru. Hodnota zátěže R (Ω) byla dopočítána dle vzorce $R = \frac{U}{I}$. V následujících pěti tabulkách jsou uvedeny rovnoměrně vybrané hodnoty naměřené analyzátozem PROVA 210.

Tabulka 5 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 138 °C

Měřená hodnota č.	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_c (°C)	T_h (°C)	ΔT (°C)	U (V)	I (A)	P (W)	R (Ω)
1	100	300	123	261	138	7,453	0,0136	0,101	548,015
2	100	300	123	261	138	7,223	0,2332	1,684	30,973
3	100	300	123	261	138	6,476	0,439	2,843	14,752
4	100	300	123	261	138	5,714	0,6448	3,684	8,862
5	100	300	123	261	138	5,003	0,837	4,188	5,977
6	100	300	123	261	138	3,992	1,1114	4,437	3,592
7	100	300	123	261	138	3,441	1,2624	4,344	2,726
8	100	300	123	261	138	2,703	1,4682	3,969	1,841
9	100	300	123	261	138	1,958	1,674	3,278	1,170
10	100	300	123	261	138	1,23	1,8798	2,312	0,654

Tabulka 6 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 120,6 °C

Měřená hodnota č.	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_c (°C)	T_h (°C)	ΔT (°C)	U (V)	I (A)	P (W)	R (Ω)
1	100	280	123	243,6	120,6	6,852	0,013	0,088	535,313
2	100	280	123	243,6	120,6	6,696	0,220	1,474	30,409
3	100	280	123	243,6	120,6	6,016	0,414	2,493	14,517
4	100	280	123	243,6	120,6	5,321	0,609	3,239	8,740
5	100	280	123	243,6	120,6	4,630	0,803	3,719	5,764
6	100	280	123	243,6	120,6	3,943	0,998	3,934	3,952
7	100	280	123	243,6	120,6	3,259	1,192	3,884	2,735
8	100	280	123	243,6	120,6	2,573	1,386	3,567	1,856
9	100	280	123	243,6	120,6	1,899	1,581	3,002	1,201
10	100	280	123	243,6	120,6	1,234	1,775	2,190	0,695

Tabulka 7 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 103,2 °C

Měřená hodnota č.	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_c (°C)	T_h (°C)	ΔT (°C)	U (V)	I (A)	P (W)	R (Ω)
1	100	260	123	226,2	103,2	6,241	0,012	0,075	520,083
2	100	260	123	226,2	103,2	6,074	0,205	1,243	29,687
3	100	260	123	226,2	103,2	5,453	0,385	2,099	14,164
4	100	260	123	226,2	103,2	4,821	0,566	2,727	8,524
5	100	260	123	226,2	103,2	4,180	0,746	3,119	5,602
6	100	260	123	226,2	103,2	3,545	0,927	3,285	3,826
7	100	260	123	226,2	103,2	2,918	1,107	3,231	2,635
8	100	260	123	226,2	103,2	2,304	1,288	2,967	1,789
9	100	260	123	226,2	103,2	1,690	1,468	2,481	1,151
10	100	260	123	226,2	103,2	1,077	1,649	1,776	0,653

Tabulka 8 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 68,4 °C

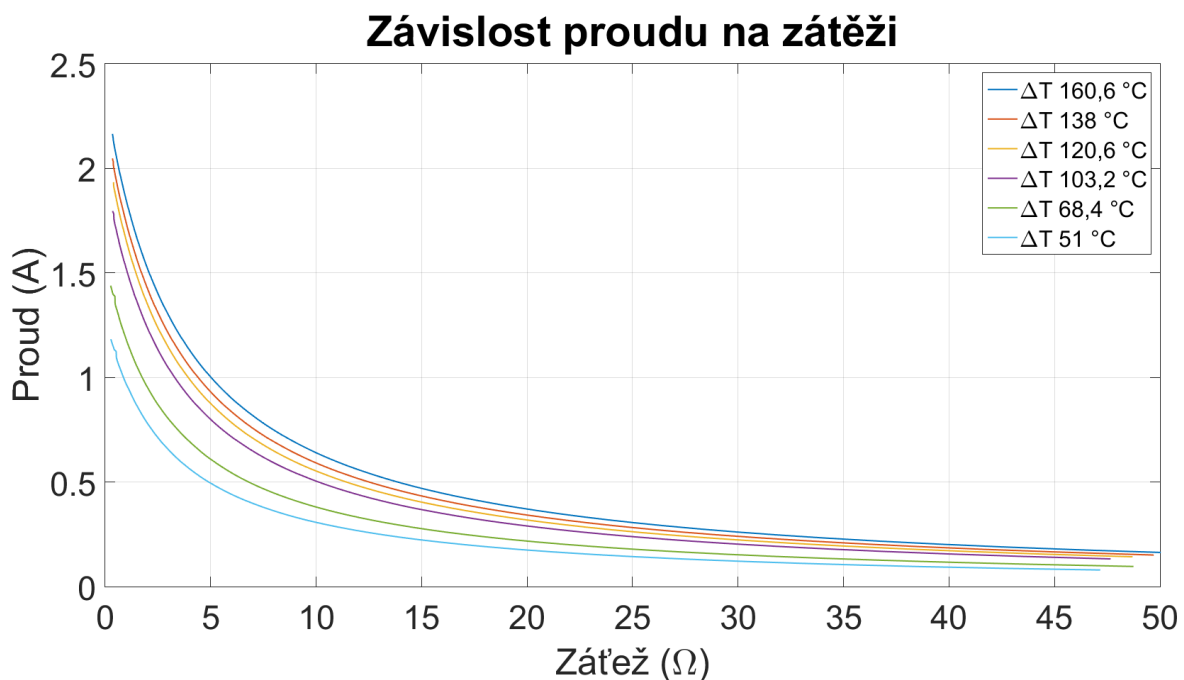
Měřená hodnota č.	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_c (°C)	T_h (°C)	ΔT (°C)	U (V)	I (A)	P (W)	R (Ω)
1	100	220	123	191,4	68,4	4,632	0,010	0,044	482,500
2	100	220	123	191,4	68,4	4,520	0,164	0,740	27,595
3	100	220	123	191,4	68,4	4,046	0,308	1,248	13,119
4	100	220	123	191,4	68,4	3,556	0,453	1,611	7,850
5	100	220	123	191,4	68,4	3,084	0,598	1,843	5,161
6	100	220	123	191,4	68,4	2,606	0,742	1,934	3,511
7	100	220	123	191,4	68,4	2,118	0,887	1,878	2,388
8	100	220	123	191,4	68,4	1,653	1,031	1,705	1,603
9	100	220	123	191,4	68,4	1,195	1,176	1,405	1,016
10	100	220	123	191,4	68,4	0,746	1,320	0,985	0,565

Tabulka 9 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 51 °C

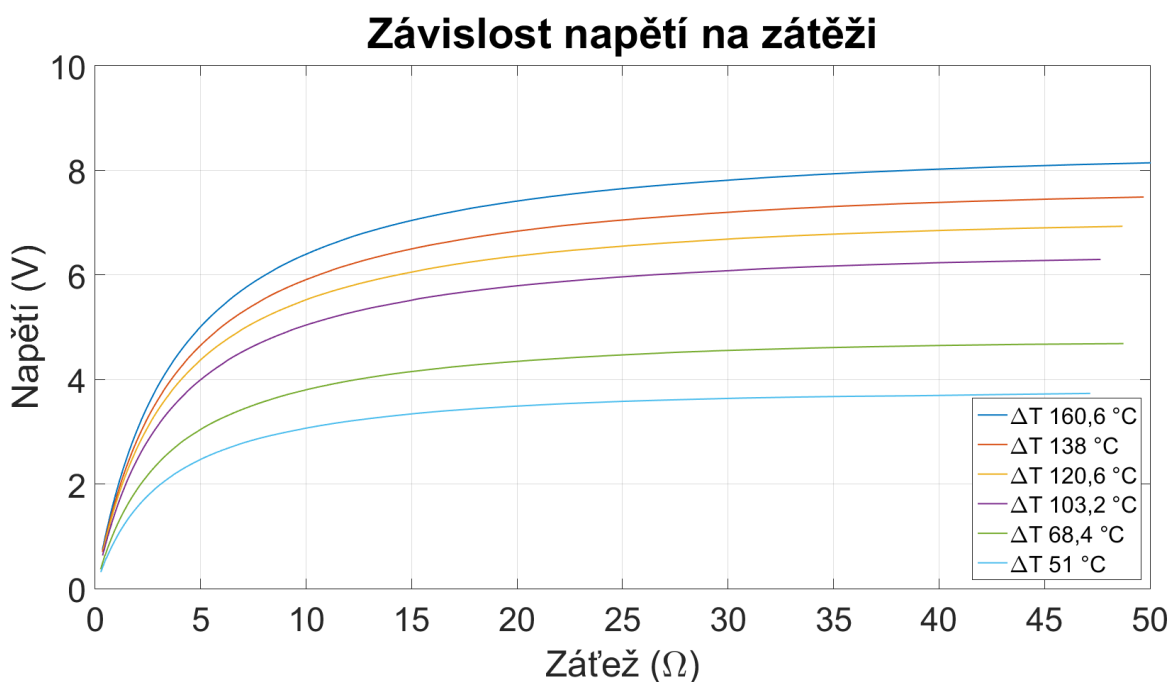
Měřená hodnota č.	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_c (°C)	T_h (°C)	ΔT (°C)	U (V)	I (A)	P (W)	R (Ω)
1	100	200	123	174	51	3,683	0,008	0,029	472,179
2	100	200	123	174	51	3,603	0,135	0,485	26,768
3	100	200	123	174	51	3,241	0,253	0,821	12,790
4	100	200	123	174	51	2,864	0,372	1,066	7,695
5	100	200	123	174	51	2,484	0,491	1,220	5,059
6	100	200	123	174	51	2,101	0,610	1,281	3,445
7	100	200	123	174	51	1,727	0,729	1,258	2,370
8	100	200	123	174	51	1,356	0,847	1,149	1,600
9	100	200	123	174	51	0,971	0,966	0,938	1,005
10	100	200	123	174	51	0,605	1,085	0,656	0,558

Následující grafy znázorňují závislost veličin (proud, napětí, výkon) na zátěži při jednotlivých rozdílech teplot teplé a studené strany TEG článků. Jak je vidět, proud se zátěží výrazně klesá, což je charakteristické pro měkké zdroje. U závislosti napětí na zátěži můžeme pozorovat, že při nižším teplotním rozdílu je přírůstek napětí poměrově menší, než u většího teplotního rozdílu. U výkonových křivek je patrný poměrně velký výkon při nízké zátěži (přes 5 W při 3,7 Ω). S rostoucí zátěží výkon prudce klesá, což je opět charakteristické pro měkké zdroje, kterým TEG článek je.

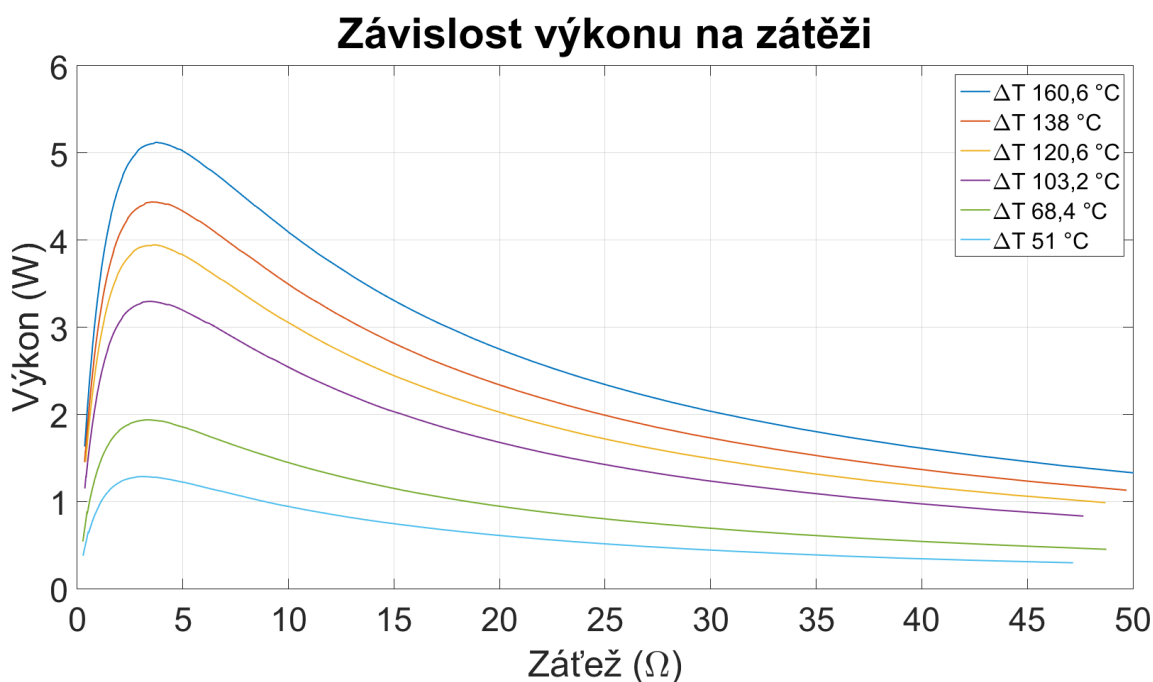
Obrázek 52 Graf závislosti proudu na zátěži při různých ΔT



Obrázek 53 Graf závislosti napětí na zátěži při různých ΔT



Obrázek 54 Graf závislosti výkonu na zátěži při různých ΔT



4.5.3 Měření doby nabití baterie

Pro srovnání doby nabíjení termoelektrické nabíječky s běžně dostupnými zdroji elektrické energie (napájecí adaptér připojen do elektrické sítě, USB notebooku) jsme se rozhodli provést srovnávací měření. Vždy jsme nabíjeli novou baterii B600BE o napětí 3,8 V a kapacitě 2600 mAh, sloužící jako zdroj pro mobilní telefon Samsung Galaxy

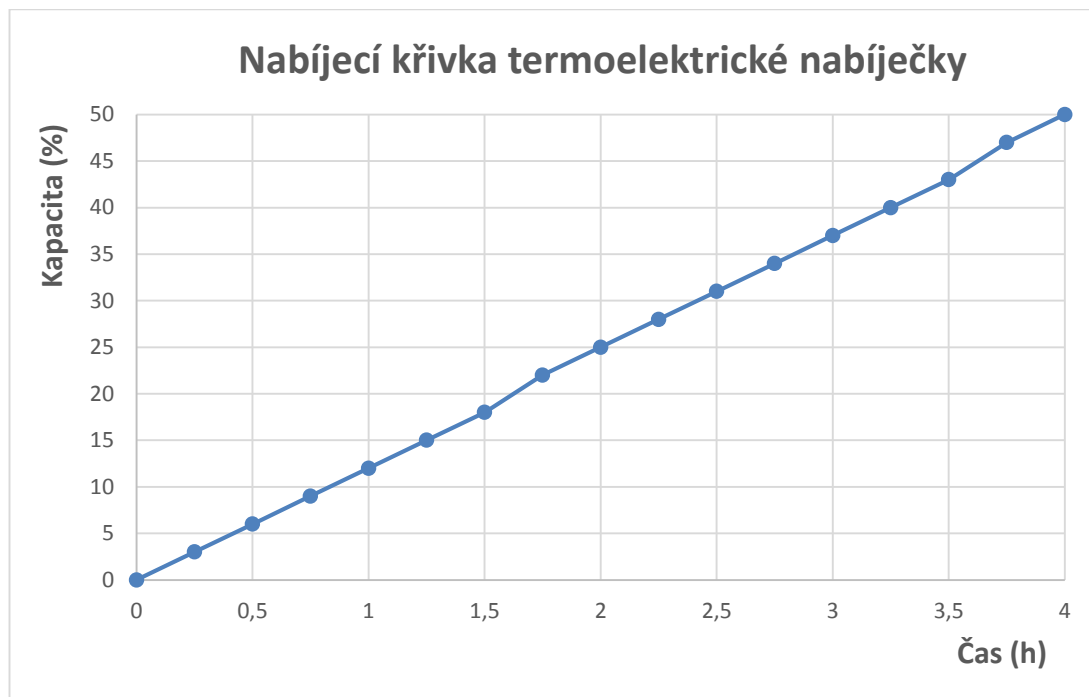
S4 Active I9295. Ešus byl naplněn 750 ml vody o teplotě 17 °C a sklokeramický sporák spuštěn na plný výkon. Baterii jsme nabíjeli při vypnutém telefonu, kvůli eliminaci proudu odebíraného samotným přístrojem. Interval pro odečet aktuálního stavu kapacity baterie byl zvolen záměrně delší (1/4 h), pro minimalizaci odebíraného proudu potřebného na rozsvícení displeje telefonu. Jako cílovou kapacitu baterie jsme zvolili 50 %, jednak pro ušetření času a spotřebované energie při měření, ale také je jistota, že se baterie bude nabíjet maximálním možným proudem, který určuje nabíjecí obvod telefonu. U konce nabíjení totiž zpravidla tyto řídicí obvody nabíjecí proud výrazně snižují. Jako výchozí hodnotu kapacity baterie jsme zvolili 0 %. Voda, která se postupně vyvářela, byla dolívána vždy, jakmile bylo v ešusu cca 250 ml vody.

V následujících tabulkách a grafech si můžeme prohlédnout naměřené hodnoty při nabíjení baterie termoelektrickou nabíječkou, USB 2.0 výstupem notebooku a adaptérem (5 V, 1 A) připojeným do elektrické sítě.

Tabulka 10 Doba nabíjení baterie termoelektrickou nabíječkou

Čas (h)	Kapacita baterie (%)	Dolítá voda
0	0	
0,25	3	
0,5	6	
0,75	9	x
1	12	
1,25	15	
1,5	18	x
1,75	22	
2	25	
2,25	28	x
2,5	31	
2,75	34	
3	37	x
3,25	40	
3,5	43	
3,75	47	x
4	50	

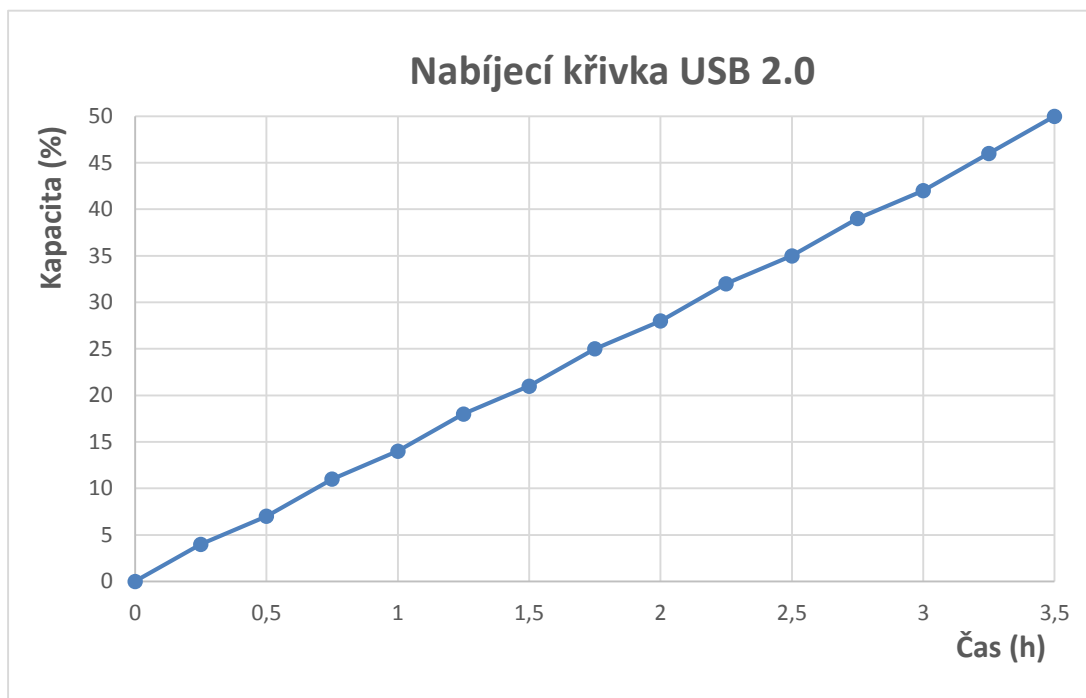
Obrázek 55 Nabíjecí křivka termoelektrické nabíječky



Tabulka 11 Doba nabíjení baterie USB 2.0 portem

Čas (h)	Kapacita baterie (%)
0	0
0,25	4
0,5	7
0,75	11
1	14
1,25	18
1,5	21
1,75	25
2	28
2,25	32
2,5	35
2,75	39
3	42
3,25	46
3,5	50

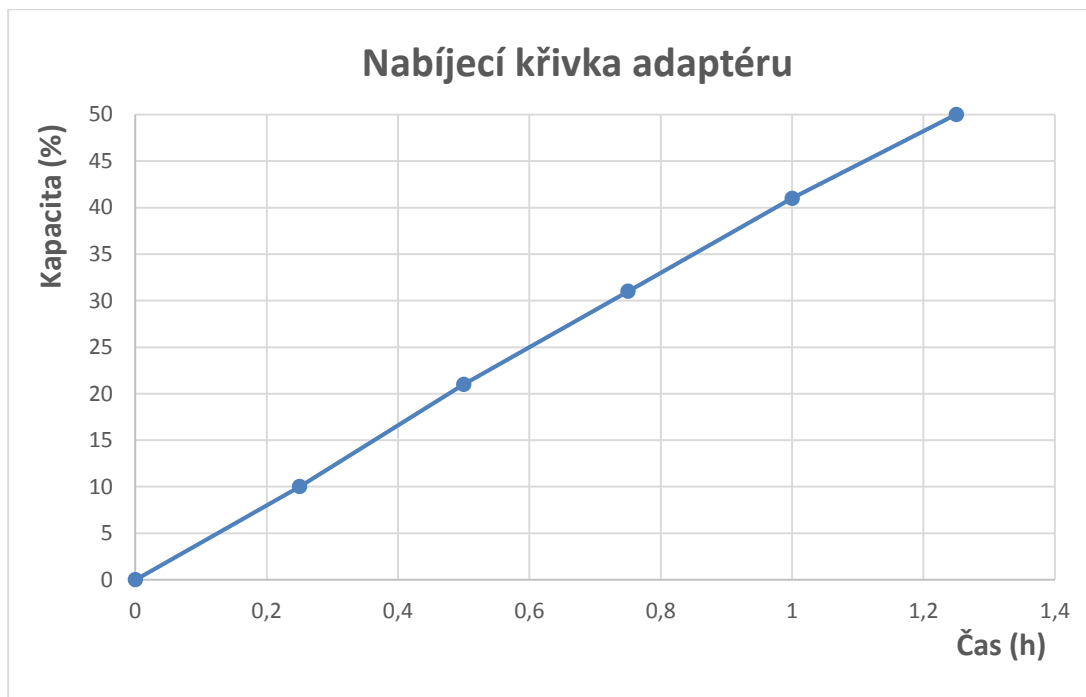
Obrázek 56 Nabíjecí křivka USB 2.0 portu



Tabulka 12 Doba nabíjení baterie adaptérem (5V, 1A)

Čas (h)	Kapacita baterie (%)
0	0
0,25	10
0,5	21
0,75	31
1	41
1,25	50

Obrázek 57 Nabíjecí křivka adaptéru



Jak je z tabulek a grafů patrné, nerychlejší je nabíjení adaptérem ze sítě. Baterie se na 50 % kapacity (1300 mAh) nabije za hodinu a čtvrt. Při nabíjení z USB portu se nabije za tři a půl hodiny a pomocí termoelektrické nabíječky za čtyři hodiny. Rychlost nabíjení termoelektrickou nabíječkou je sice srovnatelná s USB portem počítače, ale při naměřeném max. výkonu přes 5 W při optimální zátěži lze očekávat o něco větší nabíjecí proud. Při nabíjení termoelektrickou nabíječkou se měnič značně zahřívá, bylo tedy namísto změřit jeho účinnost.

4.5.4 Měření účinnosti DC-DC měniče

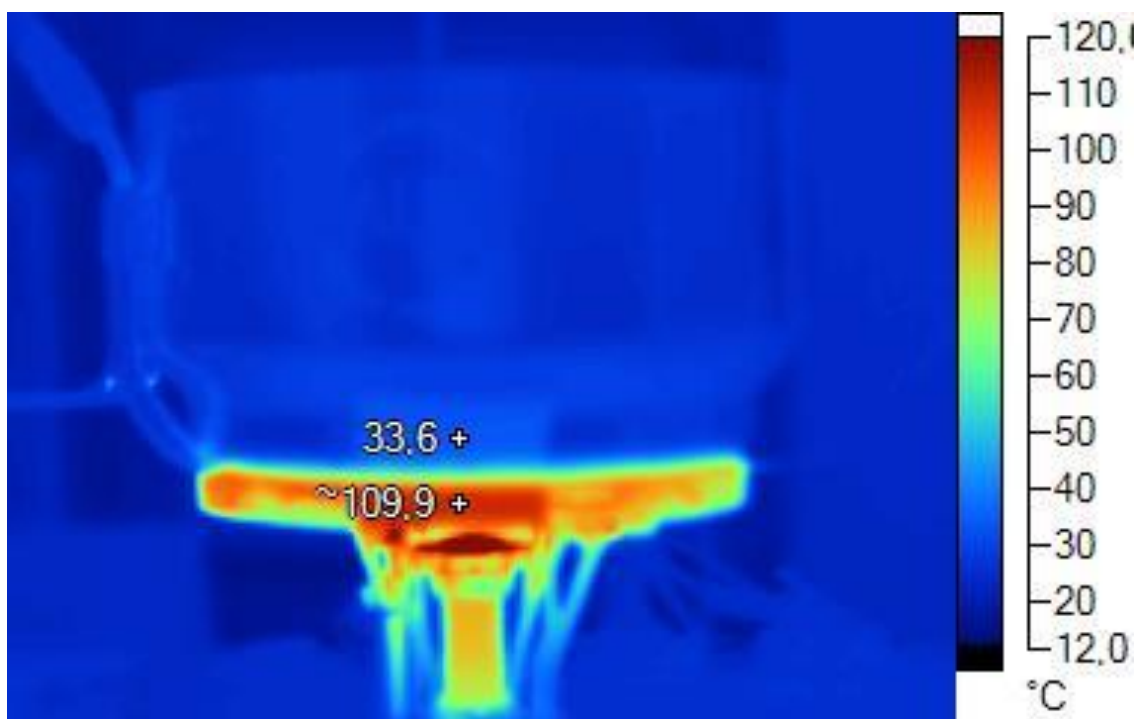
Pro změření účinnosti DC-DC měniče jsme použili dva multimetry (UNI-T UT33C a DT-9205A). Jako zátěž jsme připojili na nabíjení baterii telefonu Samsung Galaxy S4 Active I9295. Termoelektrickou nabíječku jsme uvedli do chodu a měřili napětí a proud před měničem a za ním. Před měničem jsme naměřili napětí 2,72 V a proud 1,04 A, což odpovídá výkonu 2,83 W. Za měničem jsme naměřili napětí 4,65 V a proud 0,3 A, což odpovídá výkonu 1,4 W. Při porovnání těchto výkonů zjistíme, že měnič pracuje s účinností cca 50 %.

Pokud bychom chtěli účinnost zvýšit, bylo by namísto použít jiný typ DC-DC měniče, nebo navrhnout vlastní, přizpůsobený na použití se dvěma TEG10W články.

4.5.5 Snímek z termokamery při měření na nabíječce

Na následujícím snímku je zachycena nabíječka na vypnutém plynovém vařiči termokamerou Fluke TiR1 při provádění měření. Na pořízeném snímku krásně vidíme teplotní diferenci, kterou tato konstrukce zajišťuje. Protože termokamera nemá větší teplotní rozsah než +120 °C, snímek je pořízen při teplotách výpalku 109,9 °C, a ešusu plném vody o teplotě 33,6 °C. Kovy, zvláště ty s lesklým povrchem, silně odrážejí dlouhovlnné infračervené záření. Na ešus a hliníkový výpalek jsme pro eliminaci tohoto jevu nalepili obdélníkové teplovodivé polštářky, jak je vidět na snímku v okolí odečítané teploty. Po porovnání teplot odečtených ze snímku a naměřených rtuťovým teploměrem uvnitř ešusu a termočlánkem typu K na povrchu výpalku lze konstatovat, že měření teplot bylo poměrně přesné (teploty se nelišily o více jak ± 3 °C), což je pro účely tohoto měření plně dostačující.

Obrázek 58 Snímek z termokamery při provádění měření



4.6 Ekonomické zhodnocení

Náklady na výrobu termoelektrické nabíječky byly cca 2435 Kč (tab. 13). Pokud vezmeme v úvahu dnešní cenu elektřiny (cca 4 Kč za kWh), musela by termoelektrická nabíječka generovat elektrickou energii po dobu asi 14 let, pokud neuvažujeme zdražování cen elektrické energie, aby se nám náklady vrátily. Tato nabíječka ale na masovou výrobu elektrické energie není určena. Je navržena, aby pokryla potřebu elektrické energie malých

spotřebičů v místech, kde není rozvodná elektrická síť, takže zalíbení v ní mohou najít např. horolezci, táborníci či lidé z rozvojových zemí.

Nabíječka se dá vyrobit za cenu 2435 Kč bez jakýchkoliv velkoobchodních slev, takže pokud by se dala do velkovýroby, cena by samozřejmě mnohonásobně klesla.

Alternativou pro termoelektrickou nabíječku může být solární nabíječka o rozměrech 131 x 78 x 15 mm, kterou lze zakoupit na stránce www.powerguy.cz za 995 Kč. Výkon udávaný výrobcem je 5 W (5 V, 1 A), kterého dosáhneme samozřejmě jen za ideálních podmínek. Nevýhodou oproti termoelektrické nabíječce je závislost na světelných podmínkách.

Tabulka 13 Náklady na konstrukci termoelektrické nabíječky

Předmět	Cena
2 x Termočlánek TEG10W	1 789 Kč
DC-DC měnič	0 Kč (cena zahrnuta v termočláncích)
Ešus hliníkový	169 Kč
Hliníkový výpalek	309 Kč
Krabička plastová	28 Kč
USB konektor	9 Kč
2 x Konektor CINCH (kovový)	69 Kč
Silikonová bužírka	16 Kč
Silikonové vodiče	cca 11 Kč
Tepelně odolný silikon	cca 15 Kč
LED zelená	3 Kč
Rezistor 150 Ω	3 Kč
Pájka	cca 2 Kč
4 x Šrouby M5	12 Kč
Celkem	cca 2435 Kč

4.7 Technické parametry

Hmotnost: 597 g

Objem: 1,2 L

Průměr: 153 mm

Výška: 90 mm

Výkon: 5 W (při vroucí vodě a vysokém výkonu tepelného zdroje)

Výstupní napětí: 5,1 V

Materiál: hliník

Použitelnost: Otevřený oheň, plynový sporák, elektrický sporák (vždy pouze s vodou uvnitř ešusu, jinak dojde k destrukci TEG článků!)

5 Diskuse

Byla zkonstruována termoelektrická nabíječka v podobě ešusu sloužící pro napájení/nabíjení menších spotřebičů. Při sériovém spojení dvou TEG článků dosahuje výkonu přes 5 W při ustáleném stavu (voda uvnitř ešusu vře), což je plně dostačující pro její účely. Pokud porovnáme výkon nabíječky s výkonem dodávaným v podobě tepla, jedná se pouze o zlomek, což svědčí o velmi nízké účinnosti TEG článků, jak je o nich obecně známo. Zpravidla se dostaneme na účinnost mnohem menší, než uvádí výrobci, protože provozování nabíječky není prováděno v laboratorních podmínkách. Při měření byla také zjištěna poměrně nízká účinnost DC-DC měniče (okolo 50%). Namísto by tedy bylo použít měnič navržený pro použití s termočládky s vyšší účinností, a tím i zkrátit dobu nabíjení.

Nepřesnosti do měření teplot, pro porovnání určitého teplotního gradientu s výkonovými parametry, mohla zanést především metoda přepočtu odečítané teploty vody a kruhového výpalku na teplotu na teplé a studené straně článku. Měřit teplotu přímo na protilehlých stranách TEG článku nebylo možné z důvodu měření na již sestavené termoelektrické nabíječce a také z důvodu absence dalšího termočládku pro měření vysokých teplot.

Výsledky této diplomové práce mohou výrazně usnadnit konstrukci termoelektrické nabíječky, ať už se jedná o použité materiály či jejich správné dimenzování, navržení účinného chlazení, použití správného typu termočládku nebo použití vhodného DC-DC měniče.

6 Závěr

Současná celosvětová spotřeba energie se pohybuje okolo 400 000 Petajoulů za rok. Dvacet pět procent spotřebují Spojené státy americké. Osmdesát pět procent je produkováno z fosilních paliv. To vede k vyprodukování 7 Gigatun CO₂ ročně. Odhaduje se, že celosvětová spotřeba energie bude do roku 2050 více jak dvojnásobná. Protože zásoby fosilních paliv nejsou nekonečné a jejich přeměna na energii má negativní vliv na naši planetu, je na místě využívat alternativních zdrojů, mezi které se řadí i termoelektrické články.

Historie termočlánků je téměř 200 let stará. Přestože se většina lidí s termočlánky již setkala, není pojem termočlánek či Peltierův článek širší veřejnosti znám. Termoelektrické články lze využívat pro chlazení a ohřev s možností velmi přesné regulace teploty, jako generátory elektrické energie z rozdílu teplot, nebo jako čidla pro měření teplot.

Stavbou termoelektrické nabíječky bylo ověřeno, že lze využít TEG článků integrovaných do ešusu pro napájení/nabíjení menších elektronických zařízení. Pro tuto konstrukci bylo především důležité správně navrhnout chladicí soustavu, aby bylo dosaženo co nevyššího a zároveň stabilního teplotního gradientu. Voda tento účel perfektně splňovala a navíc je široce dostupná. Integrací nabíječky do podoby ešusu nabyla navíc na praktičnosti. Dále bylo nutné pro konstrukci zvolit vhodné materiály o vhodných tloušťkách, aby odolávaly vysokým teplotám, při kterých nabíječka pracuje, a nedocházelo k výrazným tvarovým změnám vlivem teplotní roztažnosti. Termoelektrická nabíječka dosahuje dle měření výkonu cca 5 W při ustáleném stavu (voda uvnitř ešusu vře), což je pro její účely dostatečné. DC-DC měnič, který zajišťuje stabilních 5,1 V na výstupu, pracuje v tomto zapojení s účinností kolem 50 %, což není zrovna vysoká hodnota. Pro vylepšení konstrukce by bylo ideální DC-DC měnič navrhnout „na míru“, čímž by se dalo dosáhnout vyšší účinnosti (přes 90 %) a tím i rychlejšího nabíjení. Také by bylo na místě použít tepelně odolný silikon určený pro ještě větší teploty (cca 360 °C namísto 320 °C) v oblasti mezi dnem ešusu a výpalkem. Během testování bylo patrné, že mírně degraduje, protože může být vystaven teplotám na hranici jeho použitelnosti. Během měření, ale i mimo něj, prošla termoelektrická nabíječka vysokou zátěží, takže ji lze označit za spolehlivou. Termoelektrickou nabíječku lze v amatérských podmínkách vyrobit za cenu cca 2435 Kč, což není částka nejnižší, ale pokud ji člověk vyloženě potřebuje, bude to pro něj žádoucí investice. Samozřejmě při velkovýrobě by náklady na výrobu klesly na zlomek této ceny. Využitelná je pro napájení/nabíjení menších spotřebičů v místech bez rozvodné elektrické sítě, takže zalíbení v ní mohou najít především horolezci, táborníci či lidé v rozvojových zemích.

Seznam použité literatury a jiných zdrojů

1. Polovodiče. ČEZ [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k31.htm>.
2. Frank, H. a Šnejdar, V. *Principy a vlastnosti polovodičových součástek*. Praha : SNTL, 1976.
3. ECKERTOVÁ, Ludmila. *Fyzikální elektronika pevných látek*. 1. vyd. Praha: Univerzita Karlova, 1992, 344 s. ISBN 80-7066-535-1.
4. Polovodiče. SPŠE Mohelnice [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/pn.htm>.
5. VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1241-5.
6. Thermoelectric effect. *Wikipedia* [online]. 2016 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect.
7. Vývoj názorů na podstatu elektřiny. *Odborné časopisy* [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyvoj-nazoru-na-podstatu-elektriny-39--14152>.
8. WOLFGANG R. FAHRNER AND STEFAN SCHWERTHEIM. *Semiconductor thermoelectric generators*. Stafa-Zuerich: Trans Tech, 2009. ISBN 087849152x.
9. The Seebeck Coefficient. *Electronic coolings* [online]. 2016 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>.
10. Jean Charles Athanase Peltier. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: http://www.termopares.com.br/teoria_temperatura_jean_charles_athanase_peltier/.

11. William Thomson, 1st Baron Kelvin. *Wikipedia* [online]. 2016 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Thomson,_1st_Baron_Kelvin.
12. HOW DO THERMOELECTRIC GENERATORS (TEGS) WORK? *Marlow* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.marlow.com/resources/general-faq/7-how-do-thermoelectric-generators-tegs-work.html>.
13. Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>.
14. Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla. *Tzb-info* [online]. 2013 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektricky-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>.
15. Thermo-Electric Generators. *Douglas-self* [online]. 2014 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/thermoelectric/thermoelectric.htm#th>.
16. TEG10W-5VDC-12V. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://thermoelectric-generator.com/product/teg10w-5vdc-12v-2/>.
17. *Vanellus Canadians products* [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.vanellus.cz/>.
18. Školačka vyvinula revoluční svítilnu. *AC24* [online]. 2013 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.ac24.cz/zpravy-ze-sveta/2382-video-skolacka-vyvinula-revolucni-svitilnu-kterou-napaji-teplo-rukou>.
19. Snyder, G. Jeffrey. Small Thermoelectric Generators. *electrochem.* [Online] 2008. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: http://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal08/fal08_p54-56.pdf.

20. How does a thermoelectric module work? *Tetechnology* [online]. [cit. 2016-03-25].
Dostupné z: <http://tetech.com/faqs/>.
21. HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008.
Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.
22. Peltierovy termobaterie. *Vyvoj.hw.cz* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z:
<http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>.
23. Using Peltier Cells in Cascade. *Thermoelectric Cooling Solutions* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z:
<http://www.rmtltd.ru/articles/Thermoelectric%20Cooling%20Modules.pdf>.
24. The Ars Guide to Advanced Cooling: Peltier Edition. *Ars Technica* [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://archive.arstechnica.com/guide/cooling/peltier-1.html>.
25. CHEMICKÉ SENZORY A BIOSENZORY. *ČVUT* [online]. [cit. 2016-03-25].
Dostupné z:
http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/11_chemicke%20senzory%20text.pdf.
26. CCD kamera. *ASTROFOTOGRAFIE* [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z:
http://foto.astronomy.cz/CCD_cam.htm.
27. Termoelektrické snímače teploty. *Technotrend* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z:
<http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie2.htm>.
28. Měření teploty. *VŠCHT* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z:
<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>.
29. Termoelektrický generátor TEG10W. *Solfoton* [online]. [cit. 2016-03-24]. Dostupné z:
<http://www.solfoton.eu/products/termoelektricky-generator-teg10w/>.

- 30.** Universal Serial Bus. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus

Seznam obrázků

Obrázek 1 Vlastní polovodič [4]	5
Obrázek 2 Polovodič typu N [4].....	6
Obrázek 3 Polovodič typu P [4]	6
Obrázek 4 PN přechod [4]	7
Obrázek 5 PN přechod bez zdroje napětí [4].....	7
Obrázek 6 PN přechod v propustném směru [4]	8
Obrázek 7 PN přechod v závěrném směru [4].....	8
Obrázek 8 Thomas Johann Seebeck [7]	9
Obrázek 9 Schématické uspořádání Seebeckova termoelektrického článku [7]	9
Obrázek 10 Jean Charles Anthanase Peltier [10]	12
Obrázek 11 William Thomson [11].....	12
Obrázek 12 TEG článek (použit při konstrukci termoelektrické nabíječky).....	13
Obrázek 13 Termoelektrický článek [22].....	14
Obrázek 14 Sériové spojení termoelektrických článků v tzv. termobaterie [13]	15
Obrázek 15 Termoelektrický generátor spalující koks [14]	16
Obrázek 16 První komerční termoelektrický generátor – Thermattaix [15]	17
Obrázek 17 První komerční polovodičový termogenerátor – tzv. Ruská lampa [15]	17
Obrázek 18 Termoelektrický generátor TEG10W [16].....	18
Obrázek 19 Schéma termoelektrického generátoru TEG10W na kamnech [16]	18
Obrázek 20 Termoelektrický ventilátor Ecofan 810 [17].....	19
Obrázek 21 Termoelektrická lampička [17].....	19
Obrázek 22 Ann Makosinski s termoelektrickou baterkou [18].....	19
Obrázek 23 Termoelektrická baterka na lidské teplo [18]	19
Obrázek 24 Termoelektrické hodinky Seiko [19]	20
Obrázek 25 Využití odpadního tepla u automobilů [19]	21
Obrázek 26 Termoelektrický generátor instalovaný ve voze BMW X6 [14].....	21
Obrázek 27 Peltierův článek TEC1-12710 [20]	22
Obrázek 28 Princip funkce TEC článku [20]	23
Obrázek 29 Kaskádové provedení Peltierova článku	24
Obrázek 30 Schéma kaskádového Peltierova článku [22]	24
Obrázek 31 Maximální výkony komerčně dostupných Peltierových článků [23]	25
Obrázek 32 Procesor chlazený Peltierovým článkem [24].....	26

Obrázek 33 CCD kamera chlazená dvěma Peltierovými články [26]	27
Obrázek 34 Obvod termoelektrického snímače [28]	28
Obrázek 35 Zapojení termočlánku [28]	29
Obrázek 36 Závislost termoelektrického napětí na teplotě [28]	30
Obrázek 37 Integrovaný termočlánek [21]	31
Obrázek 38 Měření napětí na Peltierovu článek	32
Obrázek 39 První prototyp termoelektrické nabíječky	34
Obrázek 40 Závislost napětí naprázdno na rozdílu teplot u termočlánku TEG10W [29]	35
Obrázek 41 Závislost výkonu na rozdílu teplot u termočlánku TEG10W [29]	35
Obrázek 42 Schéma rozmístění termočlánků a šroubů u termoelektrické nabíječky	36
Obrázek 43 Nesprávné dotahování šroubů [29]	37
Obrázek 44 Doporučená vzdálenost šroubů od modulu a znázorněný tlak pro dotahování [29]	37
Obrázek 45 Pinout konektoru USB [30]	38
Obrázek 46 DC-DC měnič instalovaný v krabici	38
Obrázek 47 Termoelektrická nabíječka v podobě ešusu	39
Obrázek 48 Termoelektrická nabíječka s DC-DC měničem	40
Obrázek 49 Měření výkonových parametrů termoelektrické nabíječky	41
Obrázek 50 VA charakteristika termoelektrické nabíječky při ΔT 160,6 °C	43
Obrázek 51 VA charakteristika zdrojů	43
Obrázek 52 Graf závislosti proudu na zátěži při různých ΔT	46
Obrázek 53 Graf závislosti napětí na zátěži při různých ΔT	46
Obrázek 54 Graf závislosti výkonu na zátěži při různých ΔT	47
Obrázek 55 Nabíjecí křivka termoelektrické nabíječky	49
Obrázek 56 Nabíjecí křivka USB 2.0 portu	50
Obrázek 57 Nabíjecí křivka adaptéru	51
Obrázek 58 Snímek z termokamery při provádění měření	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 Seebeckovy koeficienty [9]	11
Tabulka 2 Přehled vlastností termočlánků [28].....	30
Tabulka 3 Parametry termočlánku TEG10W [29]	35
Tabulka 4 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 160,6 °C	42
Tabulka 5 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 138 °C	44
Tabulka 6 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 120,6 °C	44
Tabulka 7 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 103,2 °C	45
Tabulka 8 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 68,4 °C	45
Tabulka 9 Hodnoty termoelektrické nabíječky naměřené při ΔT 51 °C	46
Tabulka 10 Doba nabíjení baterie termoelektrickou nabíječkou.....	48
Tabulka 11 Doba nabíjení baterie USB 2.0 portem	49
Tabulka 12 Doba nabíjení baterie adaptérem (5V, 1A)	50
Tabulka 13 Náklady na konstrukci termoelektrické nabíječky	53