

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Katedra fyziky

Konstrukce ventilátoru využívajícího tepelnou energii

Diplomová práce

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

Autor: **Bc. Milan Strachota**

PRAHA 2014

zadání

Prohlášení:

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval zcela samostatně pod vedením prof. Ing. Martina Libry CSc. a použil jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne 3. dubna 2014

.....

Milan Strachota

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce prof. Ing. Martinu Librovi, CSc. za konzultace a cenné rady poskytnuté v průběhu psaní této práce.

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá možností konstrukce zařízení využívajícího energie slunečního záření k výrobě elektřiny pomocí Seebeckova jevu. Úkolem tohoto zdroje je pohon ventilátoru nízkého výkonu. První část práce poskytuje teoretický základ z oblastí termoelektřiny, termodynamiky a optiky důležitý pro praktickou část. Následující kapitoly praktické části poté popisují návrh zařízení z pohledu elektrických veličin a teoretický rozbor konstrukčního řešení zdroje. Na základě návrhu bylo přistoupeno k samotné konstrukci, jejíž průběh je v práci detailně popsán a doplněn názornými fotografiemi. Zařízení bylo následně uvedeno do provozu a podrobena měření za účelem sestavení hlavních charakteristik. Výsledky měření jsem poté vyhodnotil ve vztahu k požadavku na pohon malého ventilátoru. Vzhledem k nedostatečnému dosaženému výkonu se práce zabývá i alternativním řešením a popisuje způsob, jak simulovat provoz zdroje o vyšším výkonu. Stejně charakteristiky jako v případě původního řešení byly sestaveny i pro alternativní řešení a výsledky obou řešení byly porovnány.

Klíčová slova: ventilátor, elektrický zdroj, termoelektřina, Seebeckův jev, Peltierův článek, Fresnelova čočka, sluneční záření

Construction of ventilator power supplied by thermal energy

Summary: This diploma thesis deals with the possibility of using the energy of sunlight in the design of electrical source based on the Seebeck effect. The purpose of this source is to drive a low power fan. The first part summarizes the important theoretical background from the field of thermoelectricity, thermodynamics and optics. The following chapters of the practical part describe the design of the device in terms of electrical quantities and theoretical analysis of the structural design of the source. According to the design we proceed to the description of the actual construction which is accompanied by illustrative photos. Next, the device is put into operation and measurements are carried out in order to establish the main characteristics. Then the results are evaluated in relation to the requirement to a small fan drive. Due to insufficient performance the thesis concerns an alternative solution and describes how to simulate a working source of a higher power. The same characteristics as in the original solution are obtained for the alternative solution and the results of both solutions are compared.

Key words: electric fan, electrical source, thermoelectricity, Seebeck effect, Peltier cell, Fresnel lens, solar radiation

Contents

1	Úvod	1
2	Cíl práce a metodika	3
2.1	Cíl práce	3
2.2	Metodika	3
3	Rešeršní část	4
3.1	Termoelektrický jev	4
3.1.1	Seebeckův jev	5
3.1.2	Termoelektrický generátor	6
3.2	Zdroj stejnosměrného napětí	8
3.3	Fresnelova čočka	9
3.4	Pasivní chlazení	11
4	Návrh řešení	15
4.1	Prvotní koncept	15
4.2	Návrh parametrů	15
4.2.1	Volba součástek	15
4.2.2	Výpočet intenzity slunečního záření	16
4.2.3	Ztráty energie průchodem čočkou a odrazem	18
4.2.4	Problém vyzařování a chlazení	19
4.2.5	Odhadovaný výkon termočláňku	20
5	Návrh konstrukce	22
6	Konstrukce	26
7	Výsledky měření a zhodnocení experimentu	31
7.1	Zatěžovací charakteristika zdroje	31
7.2	Rozdíl teplot	33
7.3	Hodnocení experimentu	35
8	Návrh alternativního řešení	36
9	Výsledky měření na alternativním řešení	38
10	Závěr	41
	Literatura	42
	Seznam obrázků	44

1. Úvod

Efektivita využívání energie dlouhodobě získává větší pozornost mezi odborníky i veřejností na celém světě. Ztenčující se zásoby neobnovitelných zdrojů surovin na jedné straně a současné plýtvání energií na straně druhé se stávají palčivým problémem současnosti. Je zřejmé, že na spotřebě neobnovitelných zdrojů bude současná ekonomika stát i v blízké budoucnosti, avšak snahy zmírnit tuto závislost se projevují stále silněji. Způsoby využití trvale obnovitelných zdrojů se neustále rozvíjejí, v popředí dnes stojí vodní, solární a větrné elektrárny. Další možností je využití přímé přeměny tepla na elektrickou energii fungující na principu Seebeckova jevu. Vhodnými zdroji tepla mohou být jak stálé přírodní zdroje jako sluneční záření či geotermální prameny, tak zatím nevyužívané zbytkové teplo generované lidskou činností, především v oblasti průmyslu.

Právě posledním uvedeným způsobem získávání energie se zabývá tato diplomová práce. Rozhodl jsem se zkonstruovat elektrický zdroj využívající principu Seebeckova jevu. Tento zdroj by měl sloužit k pohonu malého ventilátoru o nízkém výkonu, čímž bude demonstrována jeho funkčnost a možné praktické využití. Mým úmyslem nebylo pouze sestavit funkční termoelektrický zdroj, nýbrž jsem se zabýval i otázkou získání tepelné energie pro jeho provoz a to pokud možno z obnovitelných zdrojů. Zvolil jsem energii slunečního záření. Následně jsem své další kroky směřoval k návrhu a stavbě elektrického zdroje, jehož součástmi jsou Fresnelova čočka sloužící jako kolektor slunečních paprsků, termoelektrický článek a pasivní chladič sloužící k odvodu tepla. Zdroj bude podroben experimentu, který potvrdí či vyloučí jeho schopnost pohánět ventilátor o nízkém výkonu.

První část práce je rešerší z oblasti termoelektřiny, termodynamiky a optiky a obsahuje popis jevu a k nim vázaných vztahů, které jsou následně využity v praktické části. Zabývá se Seebeckovým jevem, na jehož základě dochází vytvořením teplotního gradientu ve vodičích ke vzniku elektrického potenciálu. Na popis jevu navazuje krátké pojednání o termoelektrických generátorech, součástkách, jež na principu Seebeckova jevu pracují. Dále rešerše obsahuje rozbor konstrukce Fresnelovy čočky a uvádí její výhody oproti běžným spojným čočkám stejně jako určitá omezení a vysvětluje vhodnost jejího užití v aplikacích koncentrace slunečních paprsků. Jsou zde uvedeny základní vztahy týkající se zdrojů stejnosměrného napětí. Rešerše je zakončena popisem způsobů šíření tepla v prostředí a několika souvisejícími základními vztahy z termodynamiky. Následně je uvedeno praktické využití těchto zákonitostí při návrhu pasivních chladičů, které se využívají pro zvýšení účinnosti termoelektrických generátorů.

Na teoretický základ navazuje návrh řešení, jenž začíná volbou součástí s ohledem na jejich dostupnost a možnost realizace výsledné konstrukce při nepřekročení rozumných nákladů. Pro zvolenou kombinaci součástí je proveden odhad možné výkonnosti zdroje. Vstupním parametrem pro odhad je v první řadě výpočet intenzity slunečního záření pro roční období, ve kterém bude experiment proveden, dále pak stanovení maximálního tepelného příkonu zdroje a předpoklad jeho účinnosti. Předmětem následující kapitoly je návrh konstrukce samotného zařízení. Návrh definuje tvary a rozměry zařízení tak, aby bylo umožněno jeho praktické použití. Tato část práce je zakončena popisem konstrukce zdroje, který obhazuje důvody pro volbu použitého materiálu a rozebírá konstrukční řešení jednotlivých stavebních prvků.

Po dokončení konstrukce byla na zařízení provedena důležitá měření a výpočty, mezi něž patří zatěžovací charakteristika zdroje, dosahované teploty na termoelektrickém článku spolu se stanovením rozdílu teplot a výpočet teoretického výkonu zdroje. Na konci kapitoly jsou vysloveny závěry týkající se použitelnosti zdroje pro napájení ventilátoru a hodnocení experimentu.

Poslední část vychází ze závěrů předchozích měření. Představuje alternativní řešení, s jehož pomocí lze dosáhnout požadované výkonnosti zdroje potřebné pro splnění cílů této práce, tedy pohonu zvoleného ventilátoru. Původní řešení ovšem není tímto zavrženo, účelem alternativního řešení je pouze suplovat podmínky, za nichž by zdroj podle původního návrhu splňoval výkonové parametry, samozřejmě za použití dostatečně dimenzovaných součástí. Na nově sestaveném zdroji byla provedena obdobná měření jako v případě původního zdroje a výsledky byly porovnány.

2. Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat elektrický zdroj pracující na bázi Seebeckova jevu, při němž je využívána přeměna tepelné energie na elektrickou. Úkolem zdroje je pohánět ventilátor nízkého výkonu. Jako energetický zdroj pro tvorbu tepla by měl být zvolen některý z obnovitelných zdrojů. Následně bude proveden experiment, jehož cílem je naměření všech důležitých charakteristik zdroje za reálných podmínek. Experiment prověří, zda zdroj postačuje k pohonu ventilátoru. Závěr práce by měl obsahovat vlastní pohled autora na hledisko možného využití ventilátoru k určitým aplikacím.

2.2 Metodika

Tato diplomová práce se skládá za dvou částí. První část je vypracována formou rešerše ze zdrojů uvedených v seznamu použité literatury. Rešeršní část tvoří teoretický základ pro řešenou problematiku. Čerpal jsem z tištěných a v omezené míře rovněž elektronických zdrojů publikovaných v českém a anglickém jazyce. Druhá část detailně dokumentuje praktickou část mé práce od návrhu zařízení přes jeho konstrukci po změření charakteristik a jejich vyhodnocení. Známé vztahy a skutečnosti související s praktickou částí jsou uvedeny s patřičnou citací z pramenů uvedených v seznamu zdrojů. Úvod práce detailněji popisuje zvolené téma a shrnuje obsah všech kapitol. Závěr hodnotí výsledky praktické části, poukazuje na její význam a nabízí pohled na možné budoucí změny v projektu vedoucí k jeho vylepšení.

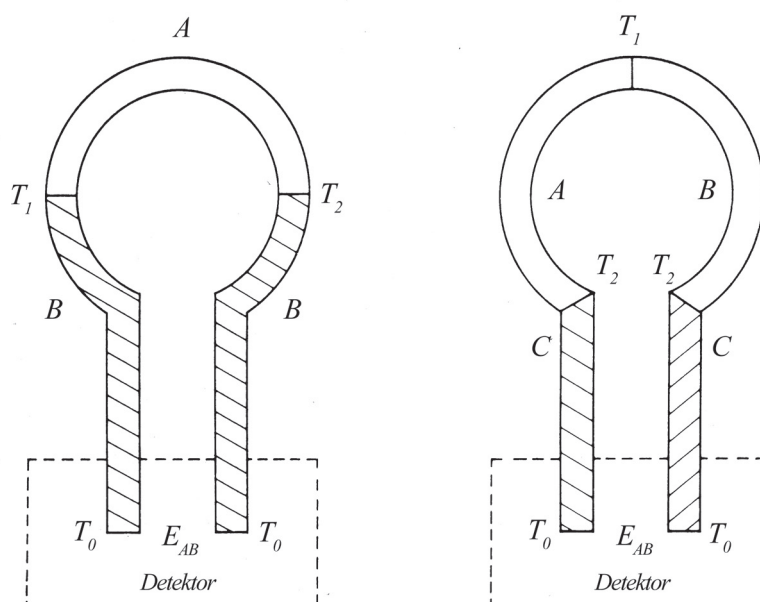
3. Rešeršní část

3.1 Termoelektrický jev

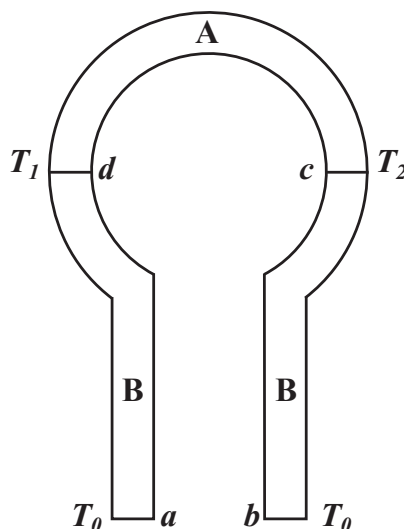
Termoelektrický jev je přímou přeměnou rozdílu teplot elektrického vodiče na elektrický proud a naopak. Z fyzikálního hlediska lze jev vysvětlit na základě zákonitostí pohybu elektronů v materiálech. Zahřátím jednoho konce vodiče je dodána energie částicím materiálu a elektrony jsou vybudeny na vyšší energetickou úroveň. Tyto elektrony mají snahu přejít do stavu s nižší energií, čehož lze dosáhnout jejich pohybem do chladnější části vodiče. Tento pohyb elektronů má za následek vznik elektrického potenciálu mezi konci vodiče s rozdílnými teplotami. Na tomto principu je založena rovněž tepelná vodivost materiálů. Tento termoelektrický jev se nazývá *Thomsonův jev* a má spíše teoretické než praktické využití [2].

Pokud bychom chtěli změřit tento elektrický potenciál, je nutné, aby vodiče měřícího obvodu byly z rozdílného materiálu, než z jakého je vyroben vodič. Je třeba vytvořit tzv. nesymetrický okruh. V případě vodičů ze stejného materiálu nebude rozdíl elektrických potenciálů naměřen [2]. Příklady nesymetrických okruhů jsou na obrázku 3.1.

Tuto závislost objevil roku 1823 německý fyzik Thomas Johann Seebeck, kdy v okruhu složeném ze dvou vodičů rozdílných materiálů zahřátých na rozdílnou teplotu pozoroval v okolí spojení těchto vodičů magnetické pole. Seebeckův objev uvedl na pravou míru dánský fyzik Hans Christian Ørsted, který přišel na to, že kromě magnetického pole vzniká v okruhu popsáném výše také elektromotorické napětí. Teprve díky němu byl zaveden pojem *termoelektrina*. Nedlouho poté, roku 1834, francouzský fyzik Jean C. A. Peltier objevil jev opačný k jevu Seebeckovu. Francouzský vědec poprvé popsal děj, při kterém proud procházející okruhem složeným z vodičů dvou různých materiálů způsobil vytváření tepla na jednom uzlu a jeho pohlcování na druhém. Po svém objeviteli je tento jev pojmenován jako *Peltierův jev* [3]. Pro účely této práce je významný *Seebeckův jev*, který bude blíže popsán dále.



Obrázek 3.1: Možné nesymetrické okruhy (zdroj: [2])



Obrázek 3.2: Otevřený okruh znázorňující Seebeckův jev (zdroj: [2])

3.1.1 Seebeckův jev

Seebeck svůj objev realizoval na uzavřeném okruhu tvořeném dvěma vodiči z různých materiálů, spojenými ve dvou uzlech o různých teplotách. Dnes obvykle mluvíme o Seebeckově jevu v souvislosti s otevřeným okruhem, jehož schéma je na obrázku 3.2.

Napětí $\Delta U = U_b - U_a$ je termoelektrické napětí vyvolané mezi uzly a a b a termoelektrický (též Seebeckův) koeficient okruhu je definován vztahem

$$S_{AB} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U}{\Delta T} \right), \quad (3.1)$$

kde ΔT je rozdíl teplot mezi uzly a a b .

Nyní podrobněji rozebereme okruh na obrázku 3.2. Předpokládejme, že koncové uzly a a b mají stejnou teplotu a uzly c a d jsou zahřáté na teploty T_2 a T_1 . Ačkoli termoelektrický koeficient okruhu zjevně zahrnuje i rozdíly v reakci rozdílných vodičů na teplotní gradient, je možné a také velmi vhodné definovat absolutní termoelektrický koeficient S , který je jedinečnou fyzikální vlastností každého materiálu, která je dána vztahem

$$E = S\nabla T, \quad (3.2)$$

kde E je elektrické pole v materiálu a ∇T je *teplotní gradient*. Absolutní Seebeckův koeficient materiálu není závislý pouze na teplotním gradientu, ale je proměnlivý rovněž v závislosti na termodynamické teplotě materiálu. Ze vztahu (3.2) vyplývá

$$-\nabla U = S\nabla T, \quad (3.3)$$

tedy

$$dU = -SdT. \quad (3.4)$$

Sloučenina	Bi ₂ Te ₃	Sb ₂ Te ₃	PbTe	Sb ₂ Te ₃
Typ polovodiče	P, N	P	P, N	P, N
Rozsah pracovních teplot [K]	200 – 450	200 – 300	400 – 9450	900 – 1300

Tabulka 3.1: Rozsahy pracovních teplot termoelektrických polovodičových materiálů (zdroj: [12])

Z konstrukce otevřeného okruhu na obrázku 3.2 pak vyplývá

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= U_b - U_a = (U_b - U_c) + (U_c - U_d) + (U_d - U_a) \\
 &= \int_b^c du + \int_c^d du + \int_d^a du \\
 &= - \int_b^c S_B dT - \int_c^d S_A dT - \int_d^a S_B dT \\
 &= - \int_d^c S_B dT - \int_c^d S_A dT \\
 &= \int_{T_1}^{T_2} (S_B - S_A) dT.
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Pokud absolutní termoelektrický koeficient materiálu A je roven nule, zakončení okruhu připojené k uzlu s vyšší teplotou bude mít vyšší potenciál vůči chladnějšímu zakončení, pokud S_B je kladné [5]. Termoelektrický potenciál okruhu, definovaný vztahem (3.1), je roven

$$S_{AB} = S_B - S_A. \tag{3.6}$$

3.1.2 Termoelektrický generátor

Seebeckova jevu se využívá k výrobě elektrické energie v *termoelektrických generátorech* (TEG). TEG článek představuje zdroj stejnosměrného napětí. Tyto články využívají termoelektrického jevu v pevných látkách a neobsahují žádné pohyblivé části. Mezi jejich důležité vlastnosti proto patří spolehlivost a vysoká trvanlivost. Na rozdíl od jiných způsobů výroby elektrické energie mají sice nižší účinnost, avšak jejich výhodou je konstrukční jednoduchost a tím pádem nízká pořizovací cena. V minulosti se při výrobě TEG používaly kovy a tyto články trpěly velmi nízkou účinností. Vyšší účinnosti se podařilo dosáhnout použitím polovodičů [10].

Důležitou úlohu při volbě materiálu pro TEG článek má měrná elektrická vodivost σ , která je závislá na počtu částic nesoucích náboj, a proto je u kovů vysoká. Velikost Seebeckova čísla S je ovšem u kovů nízká a pro výrobu TEG článků tedy nepříznivá. S vysokou elektrickou vodivostí u kovů také roste měrná tepelná vodivost λ , což snižuje jejich termoelektrickou účinnost. Polovodiče, ačkoli vykazují nižší elektrickou vodivost, dosahují celkově vhodnějších vlastností pro využití v termoelektrických generátorech. Mezi vhodné materiály patří slitiny telluridu bismutitého Bi₂Te₃, telluridu olovnatého PbTe, antimonu bismutitého Sb₂Te₃ nebo slitiny křemíku a germania SiGe [12]. Tabulka 3.1 ukazuje rozsahy vhodných pracovních teplot pro tyto materiály.

Z hlediska provozních teplot je mimo vědecké a průmyslové prostředí nejlépe využitelným materiálem Bi₂Te₃. Vzhledem k velmi dobré hodnotě Seebeckova čísla se tento materiál vyzna-

Veličina	Hodnota	Jednotka
Seebeckovo číslo S	-284	$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$
Elektrická vodivost σ	$1,1 \times 10^5$	$\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-2}$
Tepelná vodivost λ	1,2	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

Tabulka 3.2: Termoelektrické vlastnosti Bi_2Te_3 (zdroj: [13])

čuje i poměrně vysokou elektrickou vodivostí při zachování nízké tepelné vodivosti. Hodnoty těchto veličin shrnuje tabulka 3.2.

Díky tepelné vodivosti materiálů nastává v místě teplotního gradientu k prostupu tepla látkou polovodiče. Nosiče náboje, elektrony a díry, jsou v polovodiči unášeny spolu s prouděním tepla od zahřátého k chladnému konci materiálu. Spojením polovodičů typu N (s elektronovou vodivostí) a typu P (s děrovou vodivostí) do série dojde k vzniku napětí v obvodu. Uzavřením obvodu dojde k pohybu elektronů přes přechod P-N a k průtoku elektrického proudu obvodem. Zjednodušením vztahu (3.1) lze vyčíslit hodnotu napětí v obvodu U jako

$$U = S\Delta T, \quad (3.7)$$

kde S představuje Seebeckovo číslo, termoelektrický potenciál okruhu. Seebeckovo číslo se pro dobré termoelektrické materiály pohybuje v rozmezí $S = 100 \sim 300 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$. Z toho vyplývá, že pro dosažení napětí několika voltů je nutné sériové zapojení mnoha termočlánků v jednom termoelektrickém zdroji [9].

Výsledný TEG článek sestává z množství termoelektrických dvojic z polovodičových materiálů spojených metalickými můstky, přičemž jsou za sebou vždy zapojeny střídavě přechody P-N a N-P. Z hlediska tepelného toku jsou naopak termoelektrické dvojice poskládány paralelně, díky čemuž lze dobře využít plochy ohříváné a ochlazované strany TEG článku. Schema zapojení přibližuje obrázek 3.3. Celkové napětí na tomto sériovém zapojení lze definovat jako

$$U_{\text{TEG}} = N \int_{T_h}^{T_c} (S_P - S_N) dT, \quad (3.8)$$

kde T_h je teplota ohříváné strany článku, T_c teplota ochlazované strany, S_P resp. S_N jsou Seebeckovy koeficienty polovodičových materiálů a N je počet termoelektrických dvojic [12].

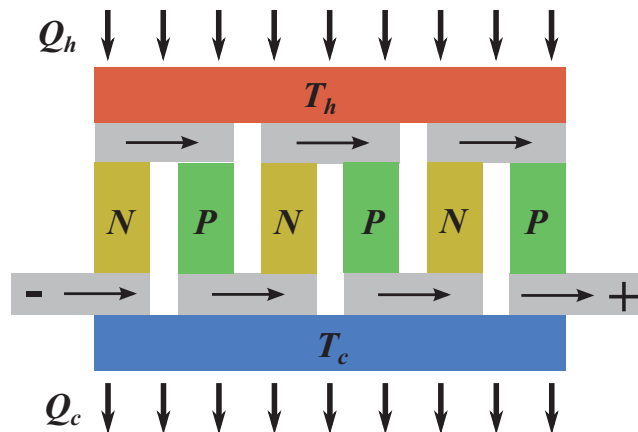
Metalické můstky jsou obvykle vyrobeny z mědi a přispívají také k tepelné výměně v článku. Sestavu termoelektrických dvojic zakrývají z obou stran keramické desky, které slouží k tepelné výměně s okolím a také chrání TEG článek před poškozením a vnějšími vlivy. Jejich úkolem je zajišťovat dobrý přestup tepla z okolí a zároveň elektrickou izolaci. Nejčastěji se pro výrobu těchto keramických desek používá oxid hlinitý Al_2O_3 , jehož tepelná vodivost je přibližně $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Pro speciální účely může být materiál desek nahrazen oxidem berylnatým BeO či oxidem hlinečnatým AlO , jejichž tepelná vodivost dosahuje přibližně $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Výrazně lepší vlastnosti těchto materiálů jsou kompenzovány mnohem vyšší cenou [12].

Termoelektrický generátor převádí tepelný příkon P_Q na elektrický výkon P s účinností η . Pro výkon platí vztah

$$P = \eta P_Q. \quad (3.9)$$

Účinnost termoelektrického generátoru velmi závisí na rozdílu teplot $\Delta T = T_h - T_c$. Účinnost TEG totiž, stejně jako u všech tepelných motorů, nemůže překročit účinnost Carnotova cyklu

$$\eta_C = \frac{\Delta T}{T_h}. \quad (3.10)$$



Obrázek 3.3: Schema zapojení TEG článku (zdroj: [12])

Celková účinnost termoelektrického generátoru je poté dána vztahem

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_C \cdot \eta_{fm} \\ &= \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} + 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}},\end{aligned}\quad (3.11)$$

přičemž veličina ZT definuje účinnost polovodičového materiálu. Jelikož výpočet účinnosti termoelektrického generátoru je velmi komplexní záležitostí, můžeme využít průměrné účinnosti materiálu zT k aproximaci ZT , přičemž průměrnou účinnost popisuje vztah

$$zT = \frac{S^2 T}{\rho \kappa},\quad (3.12)$$

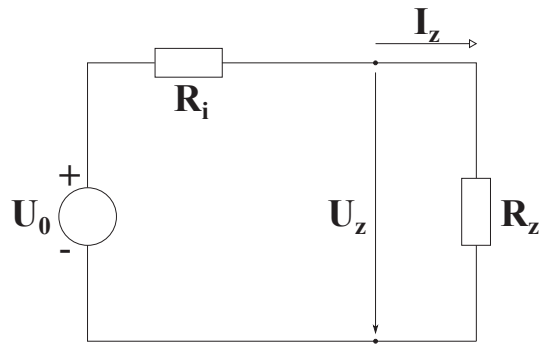
kde rezistivita materiálu ρ , tepelná vodivost materiálu κ a Seebeckovo číslo S jsou veličiny závislé na teplotě T [10].

3.2 Zdroj stejnosměrného napětí

Zdroj stejnosměrného napětí lze charakterizovat tím, že může trvale dodávat do elektrického obvodu výkon. Napětí na svorkách zdroje, ke kterým je připojena zátěž, se nazývá *svorkové napětí*. Napětí naměřené na svorkách bez připojené zátěže nazýváme napětí naprázdno U_0 . Svorkové napětí skutečného zdroje při připojení zátěže a odběru proudu poklesne. Tento jev je způsoben tím, že každý zdroj elektrické energie má tzv. *vnitřní odpor* R_i . Pro řešení obvodů se používá pojem *ideální zdroj napětí*, jehož vnitřní odpor se rovná nule. Na svorkách ideálního zdroje je vždy napětí U_0 bez ohledu na odebíraný proud. Náhradní obvod skutečného zdroje pro řešení úloh se skládá z ideálního zdroje zapojeného do série s rezistorem představujícím vnitřní odpor, viz obrázek 3.4.

Připojením zátěže o odporu R_z poklesne svorkové napětí zdroje na hodnotu U_z . Ze vztahu pro úbytek napětí na vnitřním odporu

$$U_z = U_0 - R_i I_z\quad (3.13)$$



Obrázek 3.4: Náhradní obvod skutečného zdroje napětí (zdroj: [15])

Lze také odvodit vlastnosti ideálního zdroje. Obvodem bude protékat proud

$$I_z = \frac{U_0}{R_i + R_z}. \quad (3.14)$$

Dosazením do vztahu (3.13) můžeme vyjádřit hodnotu napětí na zátěži jako

$$U_z = \frac{R_z}{R_i + R_z} U_0. \quad (3.15)$$

Z uvedených vztahů lze odvodit, jakým způsobem se mění svorkové napětí při změně zatěžovacího odporu R_z . Svorkové napětí zdroje s nízkým vnitřním odporem se v závislosti na připojené zátěži výrazně nemění a takový zdroj se nazývá *zdroj tvrdého napětí*. V případě vysokého vnitřního odporu zdroje se napětí mění značně a pak hovoříme o *zdroji měkkého napětí*.

Závislost svorkového napětí na proudu procházejícím obvodem se nazývá *zatěžovací charakteristika zdroje*. Udává, jak se mění svorkové napětí zdroje při změně odporu zátěže. Její průběh je lineární a je charakterizován dvěma význačnými body. Při odpojení zátěže neprochází odporem žádný proud, jinými slovy odpor zátěže je nekonečně velký a svorkové napětí se rovná napětí naprázdno

$$U_z = U_0. \quad (3.16)$$

Postupným snižováním odporu zátěže R_z získáváme body na grafu přímky, dokud zatěžovací odpor neklesne k nule. Poté se jedná o zkrat obvodu, odpor zátěže je $R_z = 0$ a obvodem prochází zkratový proud

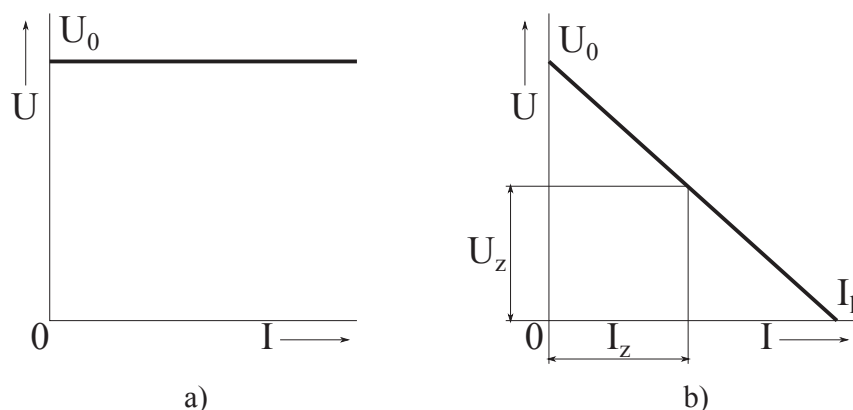
$$I_k = \frac{U_0}{R_i}. \quad (3.17)$$

Zatěžovací charakteristika provedená v osách U a I je na obrázku 3.5 [15].

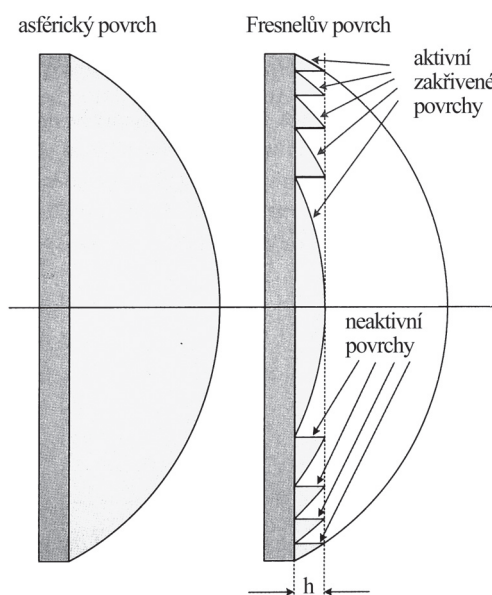
3.3 Fresnelova čočka

Fresnelova čočka je typ kompaktní čočky vynalezené francouzským fyzikem Augustinem-Jeanem Fresnelem. Původně byla vyvinuta pro využití na majácích. Nahradila parabolická zrcadla, jejichž účelem bylo směřovat a koncentrovat světlo k pozorovateli, přičemž účinnost se zvýšila až k 80%. Princip Fresnelovy čočky umožňuje navrhovat čočky velkého průměru o vysoké světelnosti při zachování krátké ohniskové vzdálenosti a nízké hmotnosti.

Fresnelovy čočky jsou čočky s povrchovou strukturou. Cílem čočky je poskytnout stejné geometrické vlastnosti jako u ploskovypuklé čočky standardní konstrukce při významném snížení hmotnosti a tloušťky. Jejich princip spočívá v rozdělení plochy čočky na segmenty, z nichž



Obrázek 3.5: Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje napětí (a) a skutečného zdroje napětí (b) (zdroj: [15])

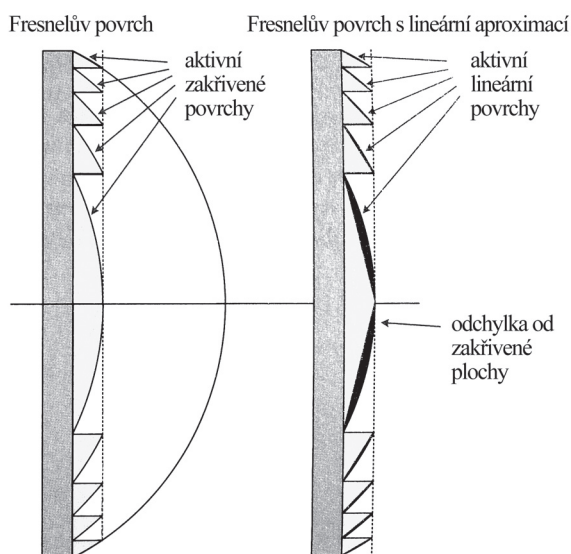


Obrázek 3.6: Porovnání standardní a Fresnelovy čočky (zdroj: [1])

každý zvlášť má stejné optické vlastnosti jako odpovídající oblast na standardní čočce. Ploskovypuklá čočka má pouze jeden aktivní povrch, který láme světlo, zatímco druhým povrchem procházejí paprsky beze změny. Tloušťka čočky je tak dána pouze poloměrem zakřivení aktivní plochy a celkovými rozměry a sama o sobě nemá na geometrické vlastnosti čočky vliv. Cílem Fresnelovy čočky je redukce této tloušťky při zachování správného zakřivení aktivní plochy a to pro každý segment zvlášť. Princip Fresnelovy čočky je znázorněn na obrázku 3.6.

Jednotlivé segmenty představují kruhové výseče, neboť oblasti se stejným zakřivením aktivní plochy mají stejný průměr a mohou tak tvořit jeden segment. Ideální Fresnelova čočka by se skládala z nekonečného množství kruhových segmentů, přičemž šířka každého by se limitně blížila k nule. Šířka segmentů je pro praktické využití limitována z každé strany následujícími faktory. Příliš úzké segmenty by zvýšily nároky na výrobu na neúměrnou výši. Na příliš širokých segmentech by naopak zakřivení aktivní plochy zapříčinilo zachování značné tloušťky a význam její celkové redukce by poklesl.

Konečným rozhodujícím vlivem na šířku segmentů je pak možnost aproximovat zakřivené povrchy segmentů rovnými plochami. Segmenty tvaru kulové výseče jsou tak nahrazeny mno-



Obrázek 3.7: Fresnelova čočka - nahrazení zakřivených ploch rovnými (zdroj: [1])

hem jednodušším tvarem kuželové výseče. viz obrázek 3.7. Do určité šířky segmentu je rozdíl ve tvaru aktivní plochy přijatelný. Jednotlivé segmenty pak vykazují geometrické vlastnosti optického hranolu, avšak jako celek stále suplují ploskovypuklou čočku. Obraz tvořený takto konstrukčně zjednodušenou čočkou vykazuje zesílené vady, ale schopnost koncentrovat světlo je tím ovlivněna v zanedbatelné míře [1].

Z výše uvedených faktů vyplývá, že z hlediska geometrické optiky můžeme vlastnosti Fresnelovy čočky považovat za shodné s vlastnostmi tenké čočky. Z obrázku 3.8 pak vyplývají vztahy pro předmětovou resp. obrazovou ohniskovou vzdálenost f resp. f' , vzdálenost a předmětu od hlavní předmětové roviny, vzdálenost a' obrazu od hlavní obrazové roviny a příčné zvětšení Z . Jelikož příčné zvětšení je definováno jako poměr velikosti obrazu y' k velikosti předmětu y , lze toto zvětšení vyjádřit vztahem

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{a' - f}{f} = -\frac{f}{a - f}. \quad (3.18)$$

Pro Fresnelovu čočku také platí obecná zobrazovací rovnice v Gaussově tvaru

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1, \quad (3.19)$$

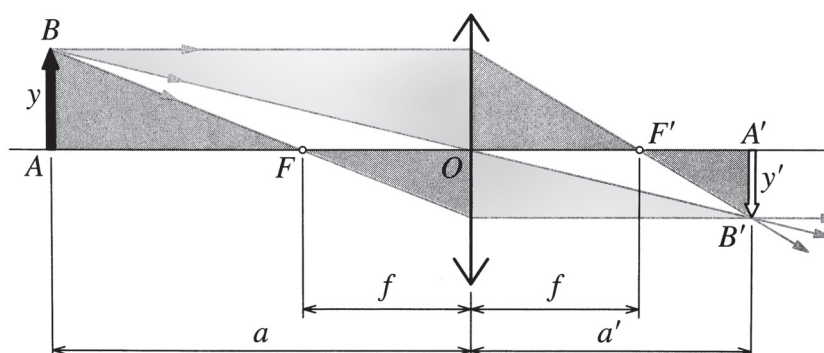
kterou lze zjednodušit na zobrazovací rovnici tenké čočky

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}, \quad (3.20)$$

neboť platí, že předmětová a obrazová ohnisková vzdálenost tenké čočky se navzájem rovnají [11].

3.4 Pasivní chlazení

Pasivní chladič je prvek bez pohyblivých částí, jehož úkolem je odvádět teplo vyráběné součástkou či dodávané součástce, jejíž teplotu je nutné regulovat. Využívá principu šíření tepla látkami a prostředím [18].



Obrázek 3.8: Zvětšení optického zobrazení (zdroj: [11])

Rozlišujeme tři způsoby šíření tepla - vedením, prouděním a vyzařováním (radiací). Vedením a prouděním se teplo šíří pouze v prostředí vyplněném látkou. Příčinou těchto způsobů šíření tepla jsou vzájemné srážky molekul látky, čímž dochází k předávání kinetické energie mezi těmito molekulami a tím i šíření tepla prostředím vyplněným látkou. Radiace představuje elektromagnetické záření a proto se může šířit i prostředím, ve kterém látky chybí, tedy ve vakuu [16].

Vedení tepla probíhá v pevných tělesech. Částice těles s vyšší střední kinetickou energií předávají část své kinetické energie prostřednictvím srážek částicím s nižší kinetickou energií. Přitom se strukturou látky nepohybují, ale pouze kmitají kolem své rovnovážné polohy. Tímto dochází k šíření tepla od teplejší oblasti látky k oblasti chladnější. Pro *ustálený stav*, kdy se teploty T_1 a T_2 ve dvou bodech tělesa vzdálených od sebe o délku d v čase nemění, platí vztah pro *teplotní spád* (gradient)

$$\nabla T = \frac{T_2 - T_1}{d}. \quad (3.21)$$

Množství tepla Q , jež za ustáleného stavu projde kolmým průřezem tělesa S za čas τ je rovno

$$Q = \lambda S \frac{T_2 - T_1}{d} \tau, \quad (3.22)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti materiálu. Množstvím tepla Q je definován tepelný tok. Hustota tepelného toku určuje množství tepla, které projde plochou S za čas τ , a je dána vztahem

$$q = \frac{Q}{\tau S}, \quad (3.23)$$

který lze po dosažení za teplo Q z rovnice (3.22) psát ve tvaru

$$q = \lambda \frac{T_2 - T_1}{d}. \quad (3.24)$$

Materiál pro výrobu chladiče musí mít pro dosažení co nejvyššího tepelného toku vysokou hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Mezi takové materiály patří především kovy a zpravidla platí, že dobré elektrické vodiče jsou i dobrými vodiči tepla. Obvykle se tak k výrobě chladičů používá hliník a měď, přičemž součinitel tepelné vodivosti mědi je vyšší a hliník je naopak dostupnější [18]. Přehled součinitelů tepelné vodivosti některých vybraných tepelných vodičů a izolantů poskytuje tabulka 3.3.

Látka	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Stříbro	418
Měď	395
Hliník	229
Ocel	50
Papír	0,05
Pěnový polystyren	0,033
Vzduch	0,026

Tabulka 3.3: Součinitele měrné tepelné vodivosti vybraných pevných látek a vzduchu při teplotě 20°C (zdroj: [20])

Skládá-li se těleso z n vrstev o různé tepelné vodivosti λ a různých tloušťkách d , je za ustáleného stavu hustota tepelného toku q ve všech vrstvách stejná a platí

$$q = \lambda_1 \frac{T_1 - T_2}{d_1} = \lambda_2 \frac{T_2 - T_3}{d_2} = \dots = \lambda_n \frac{T_n - T_{n+1}}{d_n} \quad (3.25)$$

a celkový rozdíl teplot lze pak vyjádřit jako

$$\Delta T = T_1 - T_{n+1} = (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + \dots + (T_n - T_{n+1}) = q \frac{d_1}{\lambda_1} + q \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + q \frac{d_n}{\lambda_n} = q \sum_{k=0}^n \frac{d_k}{\lambda_k}. \quad (3.26)$$

Podíl $\frac{d_k}{\lambda_k}$ je *měrným tepelným odporem* vrstvy [17].

Rychlost přestupu tepla rozhraním dvou látek závisí na měrném tepelném odporu a velikosti plochy tohoto rozhraní. Plocha rozhraní mezi součástkou a chladičem je dána tvarem součástky. Měrný tepelný odpor tohoto rozhraní lze snížit úpravou povrchu styčných ploch. Teplovodivá pasta, jejíž složení představuje extrémně jemný kovový prášek spojený emulzí dokáže vyplnit mikroskopické nerovnosti povrchů. Její aplikace spolu se stálou přitlačnou silou minimalizují objem prostorů, které po styku povrchů součástky a chladiče zůstanou vyplněny vzduchem a fungují jako tepelná izolace.

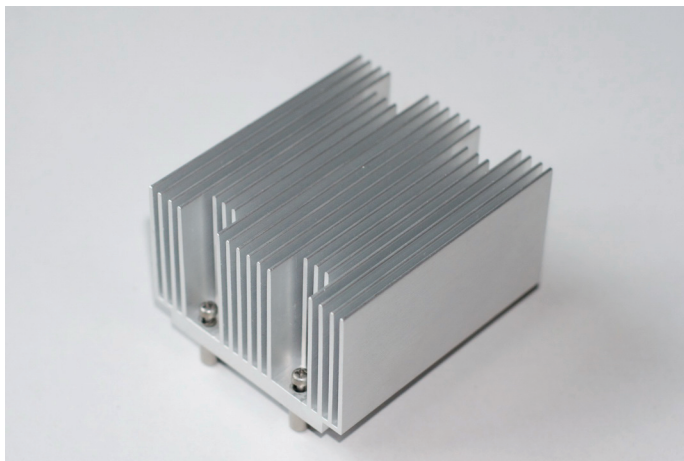
Měrný tepelný odpor na rozhraní chladiče a okolního vzduchu je poměrně značný a oproti předchozí situaci nelze ovlivnit. Zvýšení celkového tepelného toku lze docílit zvětšením plochy rozhraní. Proto jsou chladiče různým způsobem tvarovány, nejčastější metodou zvětšení povrchu při zachování hmotnosti je žebrování. Snímek na obrázku 3.9 zachycuje příklad hliníkového pasivního chladiče s žebrováním.

K šíření tepla prouděním dochází v plynech a kapalinách. Částice těchto látek nejsou vázány ve svých rovnovážných polohách a dochází tak k přesunu částic o rozdílných teplotách. Díky teplotní roztažnosti dochází při zvyšování teploty látek ke snižování jejich hustoty. V přirozeném prostředí pak teplejší částice tekutin stoupají vzhůru a chladnější klesají, což způsobuje jejich cirkulaci.

V blízkosti povrchu chladiče, předávajícího teplo svému okolí, probíhá přirozené proudění a výměna vzduchu. Je třeba klást důraz na takovou volbu polohy a umístění chladiče, která bude toto proudění podporovat. Velký vliv na rychlost přestupu tepla má rovněž vzdušné proudění v daném prostředí [18].

Jakékoli těleso zahřáté na teplotu T rovněž vyzařuje energii do svého okolí. Radiaci tepla zprostředkovává elektromagnetické záření. Míra radiace závisí na teplotě tělesa, barvě jeho povrchu a ploše povrchu. Intenzitu vyzařování absolutně černého tělesa popisuje Stefanův-Boltzmannův zákon

$$I = \sigma T^4 [\text{W.m}^{-2}], \quad (3.27)$$



Obrázek 3.9: Pasivní chladič s žebrováním

kde $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ T}^{-4} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ je Stefanova-Boltzmannova konstanta. Radiační výkon tělesa o daném povrchu S potom činí

$$P_r = S\sigma T^4 [\text{W}]. \quad (3.28)$$

Ze vztahu (3.28) je patrné, že teplo vyzařené tělesem do okolí je přímo úměrné velikosti plochy tělesa. Zvětšování plochy chladiče zmíněné v souvislosti s přestupem tepla na rozhraní se vzduchem přispívá i ke zvýšení výkonu tepelného vyzařování [16].

4. Návrh řešení

4.1 Prvotní koncept

Ideou návrhu je konstrukce zařízení umožňujícího koncentraci sluneční energie na povrch termoelektrického článku. Exponovaná strana článku bude slunečním zářením zahřívána a druhá strana ochlazována pasivním chladičem. Díky rozdílu teplot na jednotlivých deskách vznikne na termočlánku elektrické napětí. Po uzavření obvodu připojením zátěže, tedy ventilátoru, bude obvodem protékat stejnosměrný proud, který bude pohánět motor ventilátoru. Úkolem návrhu je dimenzovat parametry jednotlivých součástí tak, aby s jejich pomocí mohla dle teoretických předpokladů vzniknout funkční sestava. Je třeba brát v úvahu dostupnost součástí na českém trhu. Konstrukce bude navržena tak, aby využívala co nejefektivněji součástí dostupných na trhu a zároveň aby finanční náročnost zůstala přiměřená studentské práci. Současně s těmito podmínkami musí platit možnost realizovat konstrukci v domácích podmínkách bez nutnosti použít nadstandardní technologické postupy.

Pro navrženou konstrukci bude proveden odhad možného poskytovaného výkonu, jenž vyjde ze známých konstant, výpočtů těch hodnot, které lze s dostatečnou přesností stanovit a rovněž z empirických zkušeností popsanych v některých z dříve publikovaných prací na související téma. K získání reálných hodnot však poslouží především a pouze provedení měření na hotovém zařízení. Závěry získané z naměřených hodnot určí, zda-li je navržený zdroj dostačující k pohonu ventilátoru zvoleného na základě dostupné nabídky na trhu, či jestli je třeba zdroj pro takový ventilátor upravit.

4.2 Návrh parametrů

4.2.1 Volba součástek

Prvním krokem je volba součástek. Zvolená Fresnelova čočka představuje v současnosti nejrozměrnější komerčně dostupnou čočku tohoto typu. Jelikož její aktivní povrch bude sloužit jako solární kolektor, rozměry tohoto povrchu určí maximální možnou míru tepelného příkonu zařízení. Tím budou limitovány všechny další související parametry. Volba termoelektrického článku byla do značné míry ovlivněna dostupností těchto prvků. Pro nízkou cenu a dobrou dostupnost jsem se rozhodl použít Peltierův článek. Tento druh článku je díky použitým polovodičovým materiálům vhodný především k chlazení za využití Peltierova jevu, avšak lze jej použít i v reverzním režimu, tedy jako termoelektrický generátor. Je ovšem nutné počítat s nižší dosahovanou účinností oproti TEG článkům, které jsou navrhovány primárně pro práci v generátorovém režimu. Z nabídky dostupných Peltierových článků byl vybrán model, jehož parametry vhodně navazují na rozměry Fresnelovy čočky. Zaměřil jsem se v první řadě na poměr velikostí ploch obou součástí, na němž závisí možná míra koncentrace slunečních paprsků, a také na vyrovnanost elektrických vlastností článku. Předností zvoleného článku oproti ostatním dostupným v dané rozměrové kategorii je nízká hodnota vnitřního odporu. Díky tomu by úbytek napětí na zdroji při zvyšujícím se odběru proudu měl být co nejnižší. V tabulce 4.1 jsou parametry zvolené Fresnelovy čočky. Parametry zvoleného Peltierova článku uvádí tabulka 4.2.

Při rozhodování o volbě Peltierova článku připadal v úvahu také některý z teoreticky výkonnějších typů o rozměrech $40 \times 40 \text{ mm}^2$. V takovém případě by ovšem stejný tepelný tok dopadal na plochu velikosti $S_{P_2} = 1600 \text{ mm}^2$. Hustota tepelného toku v této variantě by poté

Parametr	Hodnota	Jedn.
Rozměry	213 × 277	mm ²
Rozměry aktivního Fresnelova povrchu	200 × 265	mm ²
d_F	0,265	m
S_F	53000	mm ²
Cena	315	Kč

Tabulka 4.1: Fresnelova čočka - Carson DM-21 Page Magnifier (zdroj: [23])

Parametr	Veličina	Hodnota	Jedn.
Maximální proud	I_{max}	8,5	A
Maximální napětí	U_{max}	8,6	V
Max. tepelný tok	ϕ_{max}	38,5	W
Max. rozdíl teplot	ΔT_{max}	68	K
Max. pracovní teplota	T_{max}	138	°C
Počet termoelektrických dvojic	n	71	-
Výška	h	3,5	mm
Rozměry	S_P	30 × 30	mm ²
Délka strany	d_P	0,03	m
Plocha	S_P	900	mm ²
Cena	-	159	Kč

Tabulka 4.2: Peltierův článek M-TEC1-12708 (zdroj: [22])

oproti zvolené variantě dosahovala

$$q_2 = \frac{S_P}{S_{P_2}} q = 0,5625q. \quad (4.1)$$

Díky možnosti dosáhnout téměř dvojnásobné hustoty tepelného toku jsem dal přednost variantě článku s menší plochou S_P .

4.2.2 Výpočet intenzity slunečního záření

Spolu se znalostí rozměrů a plochy Fresnelovy čočky S_F lze stanovit, jaké množství tepelné energie může tato čočka ze slunečního záření přijmout a koncentrovat jej na Peltierův článek. Budeme vycházet z tzv. *sluneční konstanty*, jež definuje intenzitu slunečního záření na hranici zemské atmosféry a dosahuje průměrné hodnoty

$$I_0 = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (4.2)$$

V zemské atmosféře dochází k rozptylu paprsků o molekuly plynů a rovněž k absorpci záření víceatomovými molekulami. Proto se průchodem atmosférou intenzita slunečního záření snižuje. Míru zeslabení intenzity udává tzv. součinitel znečištění atmosféry Z , který závisí na obsahu příměsí ve vzduchu a na nadmořské výšce. Hodnota součinitele Z není na stejném místě v průběhu roku konstantní, ale mění se periodicky s denní a roční dobou. Tyto pravidelné změny souvisí s obsahem vodní páry v atmosféře, který se mění s teplotou. Vlivem počasí a díky výskytu exhalací způsobených lidskou činností se může součinitel Z krátkodobě výrazněji měnit [5]. V podmínkách střední Evropy lze vycházet z naměřených průměrných měsíčních hodnot

Měsíc	Průměrné hodnoty součinitele Z pro oblasti s rozdílnou čistotou ovzduší			
	horské oblasti	venkov	města	průmyslové oblasti
I.	1,5	2,1	3,1	4,1
II.	1,6	2,2	3,2	4,3
III.	1,8	2,5	3,5	4,7
IV.	1,9	2,9	4,0	5,3
V.	2,0	3,2	4,2	5,5
VI.	2,3	3,4	4,3	5,7
VII.	2,3	3,5	4,4	5,8
VIII.	2,3	3,3	4,3	5,7
IX.	2,1	2,9	4,0	5,3
X.	1,8	2,6	3,6	4,9
XI.	1,6	2,3	3,3	4,5
XII.	1,5	2,2	3,1	4,2
Roční průměr	1,9	2,75	3,75	5,0

Tabulka 4.3: Průměrné měsíční hodnoty součinitele znečištění atmosféry (zdroj: [5])

Z , které uvádí tabulka 4.3. Určení správné hodnoty součinitele je důležité vzhledem k tomu, v jaké roční době a v jakém prostředí bude probíhat měření skutečných hodnot.

Snížení intenzity slunečního záření je závislé nejen na součiniteli znečištění atmosféry, ale rovněž na mocnosti vzduchové vrstvy, kterou paprsky pronikají. Druhý zmíněný činitel pak závisí na poloze Slunce nad obzorem, jež je proměnlivá v čase. V každém okamžiku je poloha slunce dána jeho výškou nad obzorem h a jeho azimutem a [5]. Jelikož úkolem konstruovaného zařízení je koncentrovat sluneční paprsky na plochu Peltierova článku v místě na optické ose Fresnelovy čočky a je tedy nutné dopadovou plochu orientovat kolmo na sluneční paprsky, můžeme některé vlivy polohových veličin zanedbat. Zcela lze zanedbat vliv azimutu a , ovšem výška nad obzorem h určuje kromě polohy slunce na obloze také mocnost vrstvy vzduchu, kterou pronikají paprsky, a proto je třeba s ní dále počítat. Výšku slunce nad obzorem lze vypočítat ze vztahu

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \tau, \quad (4.3)$$

kde δ je sluneční deklinace, φ zeměpisná šířka a τ časový úhel v obloukových stupních, měřený od 12. h v poledne (13. h odpovídá úhel 15°). Sluneční deklinaci vypočítáme ze vztahu

$$\delta = 23,45^\circ \sin(0,98^\circ D + 29,7^\circ M - 109^\circ), \quad (4.4)$$

kde D je den v měsíci a M měsíc [5]. Intenzita *přímého slunečního záření* I_p dopadajícího na plochu kolmo ke směru paprsků potom získáme ze vztahu

$$I_{ph} = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right), \quad (4.5)$$

kde ε je součinitel závisící na výšce slunce nad obzorem a nadmořské výšce a lze vyjádřit empirickým vztahem

$$\varepsilon = \frac{9,38076 \left[\sin h + (0,003 + \sin^2 h)^{0,5} \right]}{2,0015 (1 - 0,0001H)} + 0,91018, \quad (4.6)$$

kde H je nadmořská výška sledovaného místa [5].

Předpokládejme, že měření proběhne v areálu České zemědělské univerzity v pražském Suchdole v polovině února 2014. Měření by měla být prováděna v denní době, kdy výška slunce dosahuje maxima, tedy v poledne. Určením zeměpisné polohy a času získáme následující hodnoty veličin, které vstupují do výše uvedených vztahů:

- den $D = 15$,
- měsíc $M = 2$,
- časový úhel $\tau = 0^\circ$,
- zeměpisná šířka $\varphi = 50^\circ$,
- nadmořská výška $H = 280$ m.

Hodnotu součinitele znečištění atmosféry Z jsem zvolil z tabulky 4.3, v měsíci únoru a v městské oblasti tato hodnota činí $Z = 3,2$.

Dosazením do vzorce (4.4) získáme hodnotu sluneční deklinace $\delta = -13,417^\circ$ a následným dosazením této hodnoty do vztahu (4.3) dostaneme výšku slunce nad obzorem $h = 26,583^\circ$. Pro vypočtenou výšku slunce a známou nadmořskou výšku činí hodnota koeficientu dle vzorce (4.6) $\varepsilon = 6,13$. Finálním dosazením do vztahu (4.5) získáme hodnotu intenzity přímého slunečního záření za daných podmínek

$$I_{ph} = 0,593I_0 = 807 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}. \quad (4.7)$$

Kromě přímého slunečního záření dopadá na povrch Země rovněž tzv. *difuzní záření*. Tento druh záření vzniká rozptýlením paprsků o molekuly plynů ve vzduchu, částičky prachu a mraky. Do difuzního záření se počítá rovněž část přímého záření odraženého od okolních ploch. Průměrná tabulková hodnota intenzity difuzního záření pro měsíc únor ve městě (součinitel znečištění atmosféry $Z = 3$) činí

$$I_d = 93 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \quad (4.8)$$

během poledne, kdy jsou denní hodnoty intenzity slunečního záření nejvyšší [5]. Ovšem vzhledem k tomu, že Fresnelova čočka koncentruje do svého ohniska pouze přímé paprsky dopadající rovnoběžně s její optickou osou, nelze příspěvek difuzního záření, tedy rozptýlených paprsků o různých směrech, do celkové intenzity slunečního záření zahrnout. Jisté množství difuzního záření dopadne přímo na povrch Peltierova článku, ovšem jeho plocha je oproti sběrné ploše čočky mnohonásobně menší. Proto lze vliv difuzního záření zanedbat a tepelný příkon Peltierova článku stanovit pouze s pomocí přímého slunečního záření.

Tepelný příkon sbíraný plochou čočky tedy činí

$$P_{Q_0} = I_{ph} \frac{S_F}{1 \times 10^6} = 807 \cdot \frac{53000}{1 \times 10^6} = 42,8 \text{ W}. \quad (4.9)$$

Dále je třeba počítat se snížením tepelného příkonu vlivem ztrát způsobených odrazem od ploch čočky a Peltierova článku a rovněž rozptylem v čočce. Takto snížený tepelný příkon bude vstupním parametrem pro odhad výkonu navrhovaného zdroje.

4.2.3 Ztráty energie průchodem čočkou a odrazem

Světelné paprsky o výkonu P_{Q_0} dopadající na povrch Fresnelovy čočky budou částečně odraženy a pohlceny materiálem čočky, zbytek bude koncentrován na povrch termočlánku. Po odečtení ztrát odrazem P_{F_0} a ztrát absorpcí P_{F_a} dopadne na povrch termočlánku výkon

$$P_F = P_{Q_0} - P_{F_0} - P_{F_a}. \quad (4.10)$$

Ztráty tepelného příkonu způsobené odrazem od povrchu článku nazveme P_{P_0} a tepelný příkon článku tedy bude roven

$$P_P = P_F - P_{P_0}. \quad (4.11)$$

Skla běžného typu odrazí přibližně 8% kolmo dopadajícího záření [6]. Ztráty odrazem od povrchu čočky tedy budou rovny $P_{F_0} = 0,08Q_0$. Absorpci světla zjistíme na základě Lambertova-Beerova zákona. Ten říká, že světlo je při průchodu materiálem tlumeno exponenciálně. Dopadá-li na povrch materiálu světlo intenzity I_0 , bude jeho intenzita po průchodu vrstvou materiálu o tloušťce δ rovna

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta\delta}, \quad (4.12)$$

kde β je absorpční koeficient [7]. Pro čiré sklo je hodnota koeficientu přibližně $\beta \approx 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$. Po dosazení P_{Q_0} a P_{F_0} do vztahu (4.12) při maximální předpokládané tloušťce Fresnelovy čočky $\delta = 3 \text{ mm}$ dostáváme

$$\begin{aligned} P_{Fa} &= P_{Q_0} \left(1 - e^{-\beta\delta}\right) \\ &= P_{Q_0} \left(1 - e^{10^{-6} \cdot 0,3}\right) \\ &= 3 \cdot 10^{-7} P_{Q_0}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Ze vztahu (4.13) je zřejmé, že absorpční složku ztrát lze zanedbat. Rovnici (4.10) pak můžeme upravit na tvar

$$P_F = P_{Q_0} - P_{F_0}. \quad (4.14)$$

Pro dosažení co nejvyššího příjmu tepla Peltierovým článkem bude jeho zahříváná strana opatřena černým povrchem. Dle norem ČSN lze odhadnout koeficient odrazu světla v závislosti na materiálu. Pro černý povrch je hodnota koeficientu odrazu $\rho = 0,01 \sim 0,03$ [8]. Pro výpočet použijeme nejméně příznivou hodnotu, článek tedy bude mít povrch s koeficientem $\rho_P = 0,03$. Ztráty tepelného příkonu způsobené odrazem záření od povrchu článku poté budou

$$P_{P_0} = \rho_P \cdot P_F \quad (4.15)$$

a po dosazení do vztahu (4.11) bude celkový tepelný příkon Peltierova článku

$$P_P = (P_{Q_0} - P_{F_0})(1 - \rho_P). \quad (4.16)$$

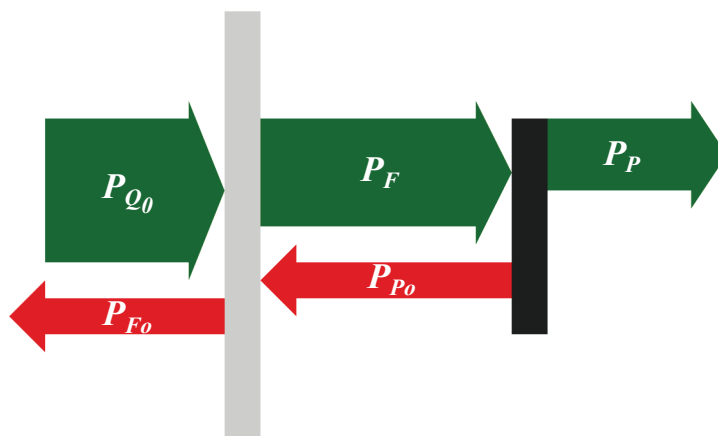
Dosadíme-li hodnoty veličin, dostáváme

$$P_P = (P_{Q_0} - 0,08P_{Q_0})(1 - 0,03) = 0,92P_{Q_0} \cdot 0,97 = 0,892P_{Q_0} = 38,2 \text{ W}. \quad (4.17)$$

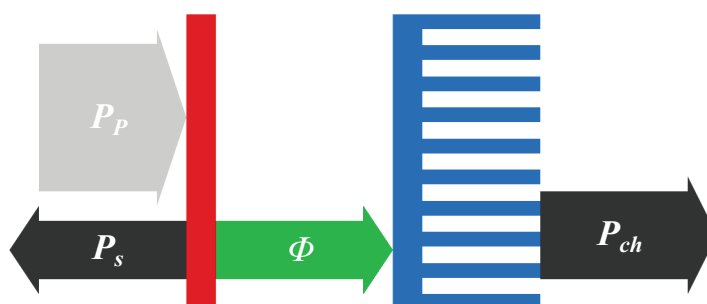
Schematicky je tepelný příkon článku a ztráty na něm znázorněny na obrázku 4.1.

4.2.4 Problém vyzařování a chlazení

Problém šíření tepla v soustavě skládající se z Peltierova článku a chladiče je velmi komplexní záležitostí. V případě teoretického návrhu neznáme skutečné tepelné vlastnosti materiálů ani jejich přesné rozměry, proto tyto hodnoty nemohou posloužit k získání dostatečně spolehlivého odhadu. Schema načrtnuté na obrázku 4.2 je pouze velmi zjednodušeným modelem reálné situace a neposkytuje žádné informace o množství vlivů podílejících se na vzniku konečné tepelné rovnováhy v soustavě zahříváné koncentrovanými slunečními paprsky.



Obrázek 4.1: Ztráty energie průchodem čočkou a odrazem na sběrné ploše



Obrázek 4.2: Vyzařování a chlazení

Legenda: P_P - tepelný příkon přijatý Peltierovým článkem, P_s - tepelný výkon vyzařený zahřívavým povrchem článku zpět do okolí, ϕ - tepelný tok procházející sestavou, P_{ch} - tepelný výkon vyzařený chladičem do okolí.

4.2.5 Odhadovaný výkon termočlánku

Na základě nespolehlivosti modelu tepelné rovnováhy na obrázku 4.2 jsem se rozhodl pro sestavení pouze hrubého odhadu vycházejícího z vypočítaného tepelného příkonu dle vztahu (4.17) a závěrů několika publikovaných prací na podobné téma. Publikace [19] uvádí míru maximální dosažené účinnosti na Peltierově článku podobného typu přibližně 2%. Závěry publikace [12] poukazují na maximální dosaženou účinnost pouze lehce nad 1%.

Z výsledků dosažených v uvedených publikacích vyplývá, že průměrná účinnost dosahovaná na Peltierových člácích v režimu generátoru dosahuje maximálně

$$\eta_o \approx 1 \div 2\%. \quad (4.18)$$

Budeme-li se držet spodní hranice této hodnoty, získáme prostým vynásobením tepelného příkonu P_P odhadovanou účinností $\eta_o = 1\%$ odhadovaný maximální výkon zdroje

$$P_o = \eta_o P_P = 0,382 \text{ W}. \quad (4.19)$$

Vzhledem k odhadovanému výkonu zdroje se výběr vhodného ventilátoru již v této fázi zúžil na nízkovýkonné typy s jmenovitým příkonem pod 0,5 W. Z ventilátorů dostupných na trhu jsem zvolil model SUNON MC30060V2-A99 (obrázek 4.3). Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 4.4.



Obrázek 4.3: Ventilátor SUNON MC30060V2-A99 (zdroj: [21])

Parametr	Veličina	Hodnota	Jednotka
Jmenovité napětí	U_{jm}	5	V
Jmenovitý proud	I_{jm}	72	mA
Jmenovitý příkon	P_{jm}	0,36	W
Rozsah pracovních napětí	U_p	2,5 – 6	V
Maximální otáčky	n_{max}	7500	min^{-1}
Průtok vzduchu	h	6,29	$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
Rozměry	S_v	30×30	mm^2

Tabulka 4.4: Parametry ventilátoru SUNON MC30060V2-A99 (zdroj: [21])

Pouze provedení experimentu za použití skutečných součástek v reálných podmínkách však může dát odpověď na otázku reálně dosažitelného výkonu. Za tímto účelem jsem navrhl a realizoval konstrukci zařízení popsanou v následujících kapitolách. Na tomto zařízení poté budou provedena potřebná měření. Z jejich závěrů vyplyne, zda-li je navržený zdroj dostačující pro zvolený ventilátor nízkého výkonu.

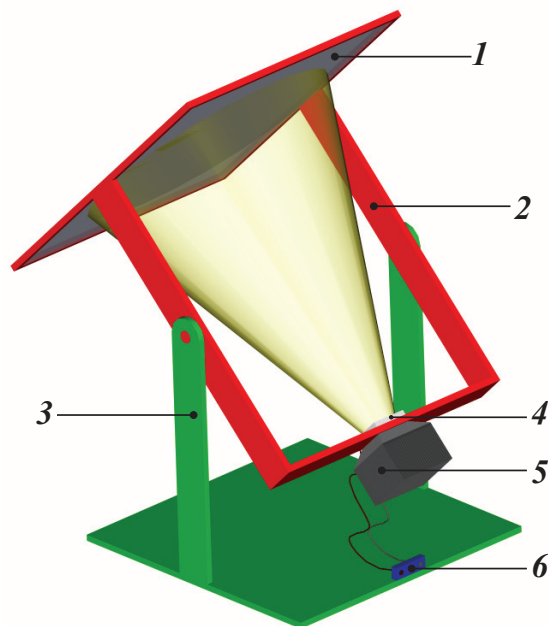
5. Návrh konstrukce

Základním požadavkem na konstrukci je dosažení neměnné vzdálenosti kolektoru slunečního záření (Fresnelovy čočky) od zahříváné plochy Peltierova článku a zároveň uložení těchto dvou prvků v rovnoběžných rovinách. Tím bude dosaženo požadovaného stupně koncentrace slunečních paprsků a jejich správného směřování na zahřívanou plochu. Dále je nutné dosáhnout toho, aby sluneční paprsky dopadaly kolmo na kolektor.

Čočka a Peltierův článek tedy budou pevně spojeny v jeden konstrukční celek, který však musí být vůči podstavci pohyblivý. Pro splnění požadavků bude postačující, když tento celek bude otočný kolem horizontální osy. Na základě těchto požadavků jsem navrhl schema konstrukce, z něhož vychází počítačový model na obrázku 5.1.

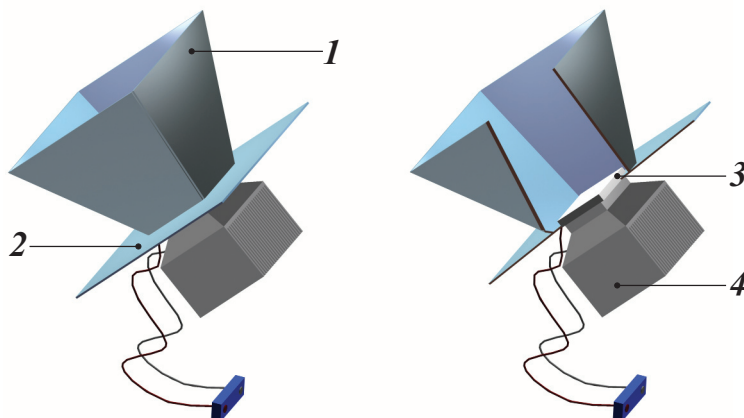
Peltierův článek bude z jedné strany zahříván koncentrovaným slunečním zářením a druhá strana bude ochlazována pasivním žebrovaným chladičem. Oba tyto požadované vlivy však mohou být zeslabovány působením vlivů z okolního prostředí. Horká strana článku bude neustále ochlazována prouděním okolního vzduchu, zatímco chladič bude naopak ohříván jak koncentrovaným světlem, které nezachytí plocha Peltierova článku, tak odraženým světlem od okolí.

Tyto problémy by měla zmírnit dvě přídatná stínítka. První z nich bude sestávat ze čtyř rovných stěn navzájem spojených do tvaru useknutého jehlanu a bude chránit Peltierův článek před chladným vzduchem proudícím z okolí. Navržený tvar zároveň nebude bránit dopadání koncentrovaných slunečních paprsků na článek. Druhé stínítko bude jednoduchá rovná deska s otvorem uprostřed, který zajistí, že koncentrované světlo bude dopadat pouze na Peltierův článek. Deska zabráni dopadání jakéhokoli světla shora na chladič. Směrem dolů nebude nijak tvarována, aby bylo umožněno proudění chladného vzduchu skrze žebrování chladiče. Detail Peltierova článku s chlazením a navrženým stíněním se nachází na obrázku 5.2.



Obrázek 5.1: Model navrhované konstrukce

Legenda: 1 - Fresnelova čočka, 2 - otočný spojovací rám, 3 - podstavec, 4 - Peltierův článek, 5 - chladič, 6 - připojení měřicího obvodu.



Obrázek 5.2: Detail termoelektrického generátoru

Legenda: 1 - stínítko chránící Peltierův článek před ochlazováním větrem, 2 - stínítko chránící chladič před slunečními paprsky, 3 - Peltierův článek, 4 - chladič.

Č. měření	a [m]	a' [m]	f [m]
1	0,5	0,88	0,3188
2	0,75	0,555	0,3190
3	1,	0,456	0,3174
4	1,25	0,425	0,3172
$\varnothing f$	-	-	0,3181

Tabulka 5.1: Výpočet ohniskové vzdálenosti Fresnelovy čočky

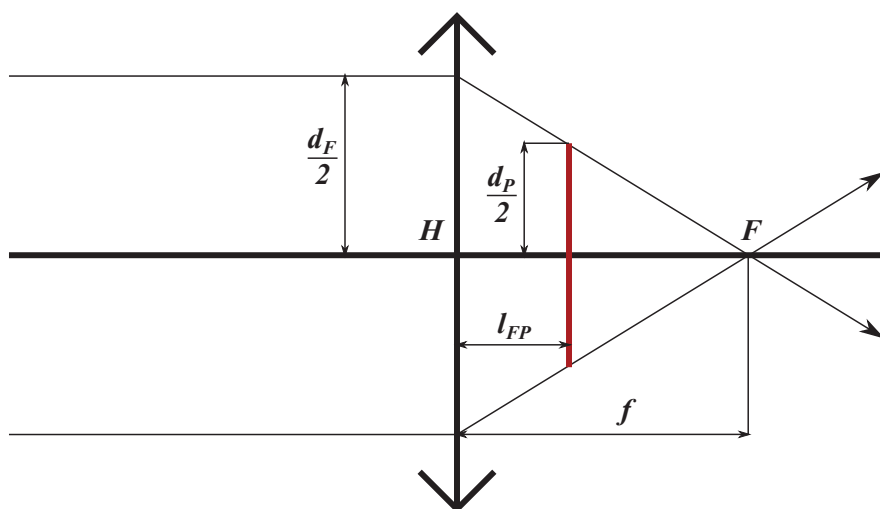
V následující fázi je třeba věnovat pozornost rozměrům zařízení. Rozměry konstrukce budou v první řadě odvislé od plošných rozměrů součástí. Klíčovým rozměrem je ovšem vzdálenost Fresnelovy čočky od Peltierova článku. Pro její zjištění je třeba vypočítat ohniskovou vzdálenost čočky. Vyjdeme ze vztahu (3.20) a provedeme následující měření.

Předmět (žárovku) postupně umístíme do vhodné zvolené vzdálenosti a . Poté čočkou vytvoříme na stínítku jeho ostrý obraz ve vzdálenosti a' . Dosazením do vztahu (3.20) zjistíme ohniskovou vzdálenost Fresnelovy čočky

$$f = \frac{a \cdot a'}{a + a'}. \quad (5.1)$$

Měření jsem opakoval $4 \times$ pro různé hodnoty předmětové vzdálenosti a . Výsledky těchto měření jsou shrnuty v tabulce 5.1. Ohnisková vzdálenost čočky je tedy $f = 0,3181 \sim 0,318$ m.

Do ohniska F v ohniskové vzdálenosti f se sbíhají všechny paprsky dopadající na čočku rovnoběžně s optickou osou, jinými slovy se zde koncentrují všechny sluneční paprsky procházející čočkou. V rámci této konstrukce ovšem máme v úmyslu koncentrovat paprsky na plochu Peltierova článku a nikoli do bodu F . Proto je třeba umístit dopadovou plochu Peltierova článku do kratší vzdálenosti, tj. mezi ohnisko F a optický střed čočky H . Ve skutečnosti nebudou paprsky koncentrovány přímo na keramický povrch Peltierova článku, ale na povrch předřazené kovové destičky, která zajistí rovnoměrné rozvedení tepla na celou zahřívanou stranu Peltierova článku.



Obrázek 5.3: Výpočet vzdálenosti Peltierova článku od hlavní roviny Fresnelovy čočky

Vyjdeme z podobnosti trojúhelníků a pro vzdálenost Peltierova článku od hlavní roviny Fresnelovy čočky l_{FP} získáme vztah

$$l_{FP} = f \cdot \left(1 - \frac{d_P}{d_F}\right), \quad (5.2)$$

kde d_P je délka zahřívané strany Peltierova článku a d_F je délka delší strany Fresnelovy čočky a zároveň průměr její využitelné plochy. Vztah (5.2) byl stanoven na základě obrázku 5.3. Dosazením do tohoto vztahu dostáváme

$$l_{FP} = f \cdot \left(1 - \frac{d_P}{d_F}\right) = 0,318 \cdot \left(1 - \frac{0,03}{0,265}\right) = 0,282 \text{ m}. \quad (5.3)$$

Z rozměrů Fresnelovy čočky, Peltierova článku a jejich vzájemné vzdálenosti je možné odvodit rozměry konstrukce, jež je bude pevně spojovat a udržovat ve vzájemné konstantní poloze. Dále můžeme přistoupit k návrhu stínítek. Rozměry stínítka č.1 na obrázku 5.2 lze odvodit ze schematu na obrázku 5.4, které znázorňuje bokorys celé soustavy. Ze schematu je dobře patrné, že stínítko se bude směrem od Peltierova článku rozšiřovat pod stejným úhlem α , jaký svírají krajní paprsky dopadající na Peltierův článek s optickou osou Fresnelovy čočky. Tento tvar zajistí co nejužší průměr stínítka a zároveň zabrání kolizi paprsků s ním. S ohledem na délku strany $d_P = 30 \text{ mm}$ zvoleného Peltierova článku jsem zvolil délku strany menší základny stínítka $d_{s1} = 50 \text{ mm}$. Tato rezerva umožní případnou výměnu článku za typ jiných rozměrů a zároveň vytvoří podmínky pro stále dostatečně úzký chráněný prostor kolem zahřívané strany článku. Výška stínítka by měla přesahovat jeho průměr, její zvolená hodnota činí $h_s = 80 \text{ mm}$. Z daných rozměrů již můžeme vypočítat délku strany větší základny stínítka podle vztahu

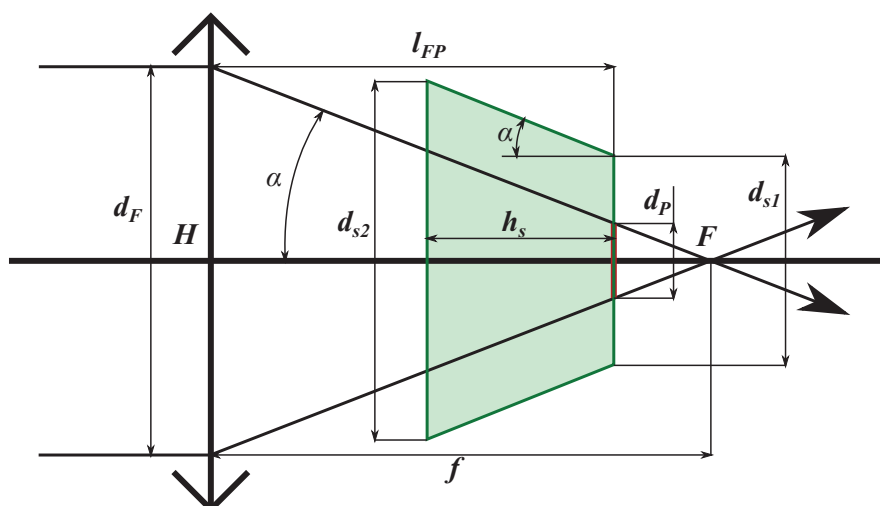
$$d_{s2} = d_{s1} + 2 \cdot h_s \tan \alpha, \quad (5.4)$$

kde

$$\tan \alpha = \frac{d_F}{2f}. \quad (5.5)$$

Po dosazení dostáváme výsledek

$$d_{s2} = 50 + 2 \cdot 80 \cdot \frac{265}{2 \cdot 318} = 116,7 \text{ mm}. \quad (5.6)$$



Obrázek 5.4: Návrh rozměrů stínítka bránícího proudění vzduchu okolo Peltierova článku

6. Konstrukce

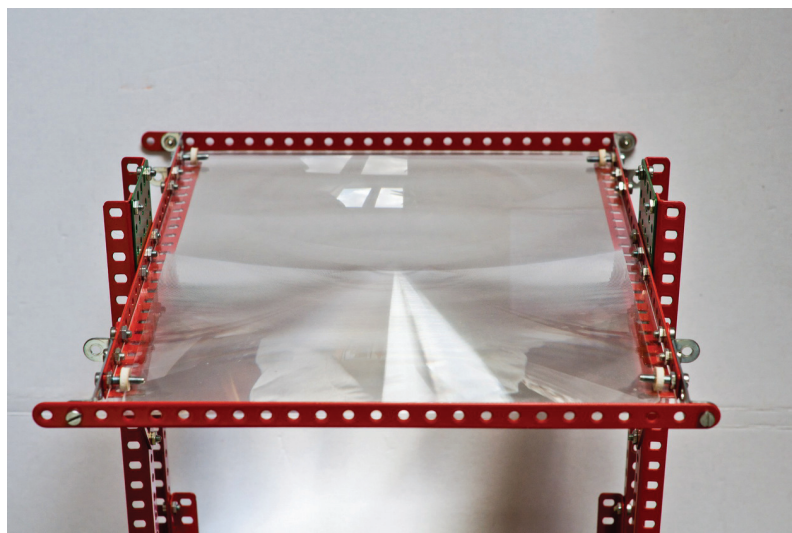
Pro konstrukci zařízení jsem se rozhodl v maximální míře využít díly stavebnice Merkur. Systém stavebnice poskytuje velmi dobrou variabilitu konstrukčních řešení a díky snadné rozebíratelnosti rovněž umožňuje bez větších problémů provádět změny v konstrukci. Kovové díly zajišťují její dostatečnou robustnost a odolnost.

Konstrukce začíná u Fresnelovy čočky. Kolem obvodu čočky byl postaven rám ze součástek stavebnice Merkur tak, aby se o něj opírala svými okraji, jež přesahují Fresnelův povrch přibližně o 5 mm a nejsou tedy součástí aktivní plochy. Z druhé strany je čočka k rohům rámu přitlačována pryžovými podložkami. Přítlačná a třecí síla zajišťuje pevné uložení v rámu. Tvar čočky tedy není nijak upravován a pro případ nutných úprav konstrukce je možné ji snadno demontovat. Uložení Fresnelovy čočky zachycuje obrázek 6.1.

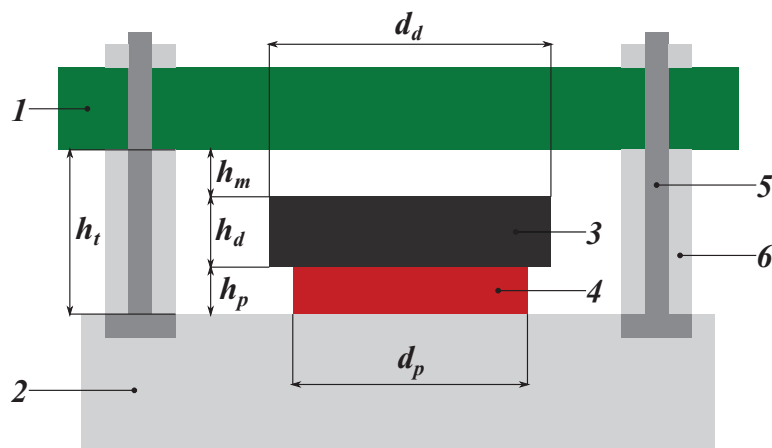
Na rám navazují spojovací ramena rovnoběžná s osou čočky, na jejichž konci se je umístěna deska pro montáž Peltierova článku a chladiče, rovnoběžná s plochou Fresnelovy čočky. Při konstrukci se ukázaly nepřesnosti ve výpočtu vzdálenosti Fresnelovy čočky od kovové destičky předřazené Peltierovu článku l_{FP} . V reálných podmínkách musela být tato vzdálenost snížena na přibližnou hodnotu $l_{FP_s} = 0,26$ m. Do této vzdálenosti je navíc započteno snížení průměru dopadového terče z $d_p = 30$ mm na přibližnou hodnotu $d_{p_s} = 20$ mm. Důvodem ke snížení této hodnoty je pohyb slunce po obloze a s tím související průběžná změna směru paprsků procházejících čočkou. Pokud by se délka strany zahříváné destičky rovnala průměru dopadového terče, bylo by nutné zajistit plynulé otáčení čočky ke slunci, aby byly všechny paprsky neustále koncentrovány do požadované oblasti. Při ruční manipulaci se zařízením by toto bylo nemožné. Zmenšení plochy paprskového terče při zachování rozměrů destičky umožní provádět korekci polohy zařízení v dostatečných časových intervalech. Dostatečná tloušťka kovové destičky zajišťí rozvedení tepla na celou plochu Peltierova článku.

Délku bočních ramen je možné měnit po rozmontování několika šroubových spojů a tím dosáhnout jiné vzdálenosti pro koncentraci paprsků, bude-li to třeba.

V této fázi konstrukce jsem řešil problém uchycení Peltierova článku a chladiče s ohledem na minimalizaci vzniku tepelných mostů mezi součástkami a nosnou konstrukcí. Tuto kom-



Obrázek 6.1: Uchycení Fresnelovy čočky do rámu



Obrázek 6.2: Schema uchycení součástek mezi chladičem a konstrukcí

Legenda: 1 - nosná konstrukce, 2 - chladič, 3 - teplovodivá destička, 4 - Peltierův článek, 5 - spojovací šroub, 6 - distanční tubus.

plikaci nejlépe vyřešil typ chladiče montovaného k podložce šroubovými spoji, přičemž rozteč šroubů souhlasila s roztečí děr na dílech stavebnice Merkur. Hliníkový chladič pocházející z vyřazeného stolního počítače o rozměrech $d \times \text{š} \times v = 85 \times 80 \times 50$ mm a hmotnosti 480 g je v porovnání s plochou Peltierova článku dostatečně masivní, aby odvedl teplo procházející na druhou stranu článku. Chladič je připevněn k podložce čtyřmi šrouby vedenými v úzkých tubusech o délce $h_t = 10$ mm, jejichž konce doléhají k podložce.

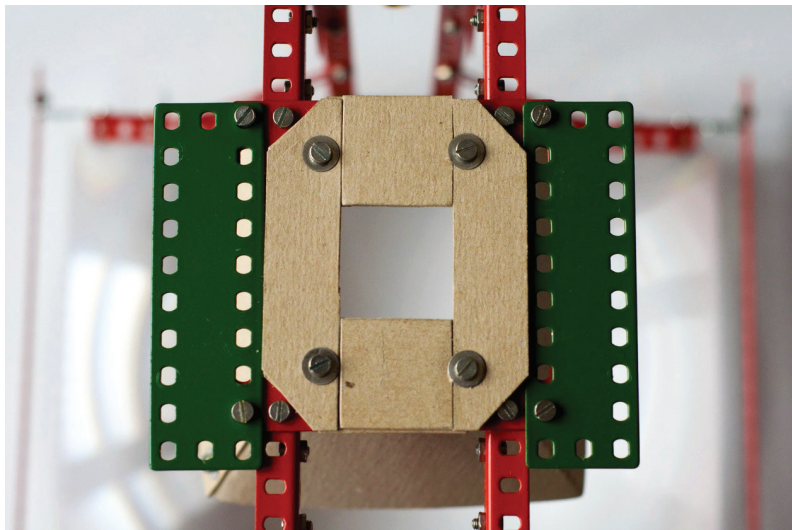
Mezi deskou s otvorem pro Peltierův článek (krytý teplovodivou destičkou) a chladičem tedy vznikla mezera o šířce h_t . Umístění jednotlivých prvků lépe znázorňuje schema na obrázku 6.2.

Jako základ pro teplovodivou destičku posloužil jiný hliníkový chladič s černě eloxovaným povrchem. Z tohoto chladiče jsem vyřízl čtvercovou destičku o délce strany $d_d = 36$ mm a tloušťce $h_d = 4$ mm. Spolu s Peltierovým článkem o tloušťce $h_p = 3$ mm tvoří výstupek z chladiče, mezi nímž a deskou zůstává mezera šířky $h_m = 3$ mm. Větší délka strany destičky vytváří přesah zahřívané plochy. Přes tento přesah bude destička spolu s Peltierovým článkem přitlačována ke chladiči, jak je znázorněno na obrázku 6.2. Černě eloxovaný povrch destičky pohltí maximální množství koncentrovaných paprsků a zároveň odolá vysokým teplotám.

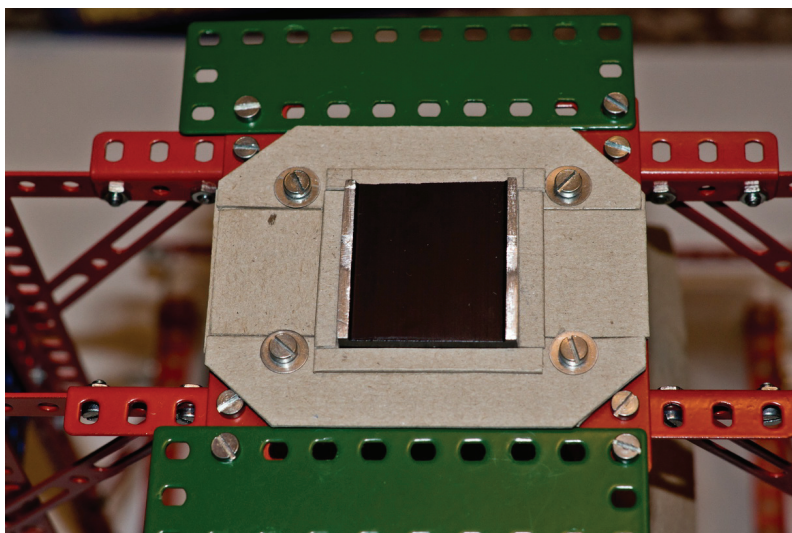
Pro výplň mezery jsem v průběhu konstrukce navrhl obdélníkovou podložku z vrstveného tvrdého papíru o tloušťce nepatrně vyšší, než je h_m . Díky pružnosti tvrdého papíru při nepatrném ohybu tak vznikne tlak mezi podložkou a chladičem. Uprostřed podložky se nachází čtvercový otvor o délce strany shodné s $d_p = 30$ mm. O jeho okraje se opírá hliníková destička o zmíněném větším rozměru d_d . Prostřednictvím této papírové podložky tedy konstrukce přitlačuje destičku a Peltierův článek na chladič a zároveň vytváří dobrou tepelnou izolaci mezi zahřívanou plochou a konstrukcí. Podložka je ke konstrukci připojena šrouby. Její umístění je dobře patrné z obrázku 6.3.

Styčné plochy teplovodivé destičky a Peltierova článku stejně jako druhá strana článku a chladiče jsou natřeny teplovodivou pastou, která společně s přitlačnou silou zvyšuje tepelnou vodivost těchto spojů. Polohu teplovodivé destičky proti otvoru v podložce a následné připojení Peltierova článku přes vrstvu teplovodivé pasty popisují obrázky 6.4 a 6.5.

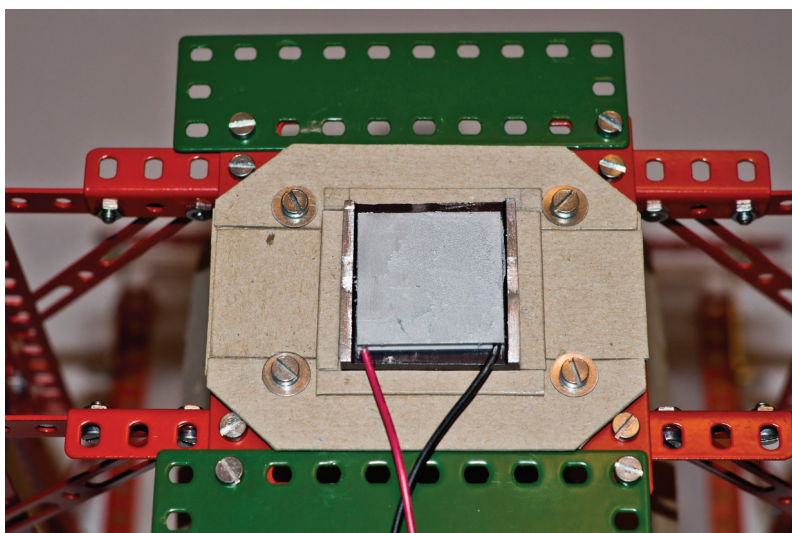
Stínítko proti větru podle návrhu na obrázku 5.4 je vyrobeno opět z tvrdého papíru. Výhodou je jednoduchost výroby a snadná tvarovatelnost, stejně jako nízká hmotnost. Ke konstrukci je připojeno šrouby a brání chladnému okolnímu vzduchu v proudění okolo horní zahřívané strany černě eloxované destičky. Rovněž zachycuje nežádoucí paprsky, které nejsou Fresnelo-



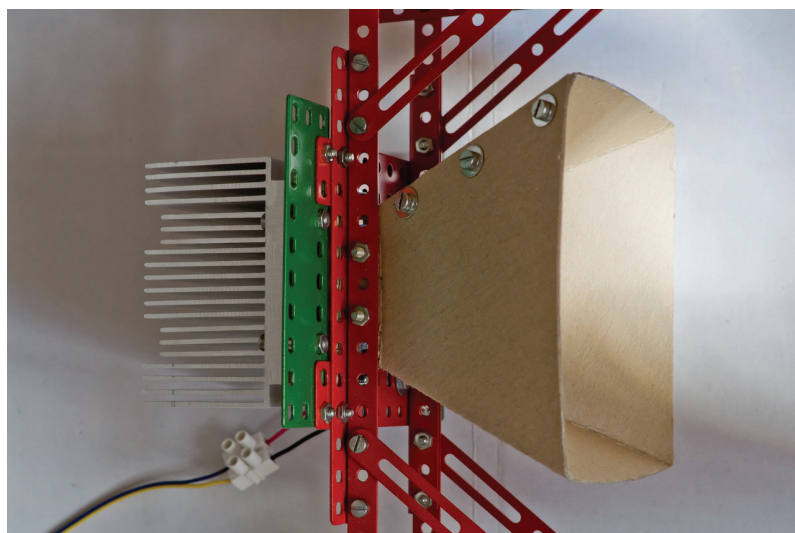
Obrázek 6.3: Podložka z tvrdého papíru přitlačující součástky k chladiči



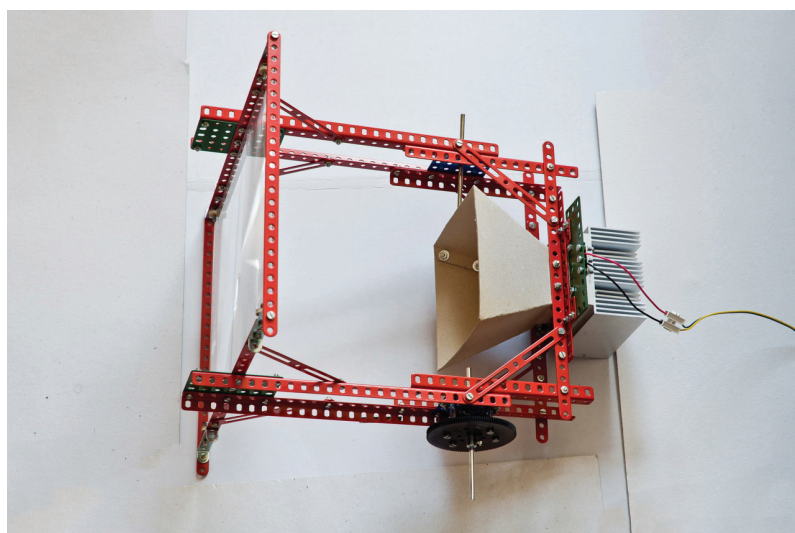
Obrázek 6.4: Teplovodivá destička umístěná proti otvoru v podložce



Obrázek 6.5: Peltierův článek a jeho chladná strana pokrytá teplovodivou pastou



Obrázek 6.6: Stínítko proti větru uchycené ke konstrukci pomocí šroubů

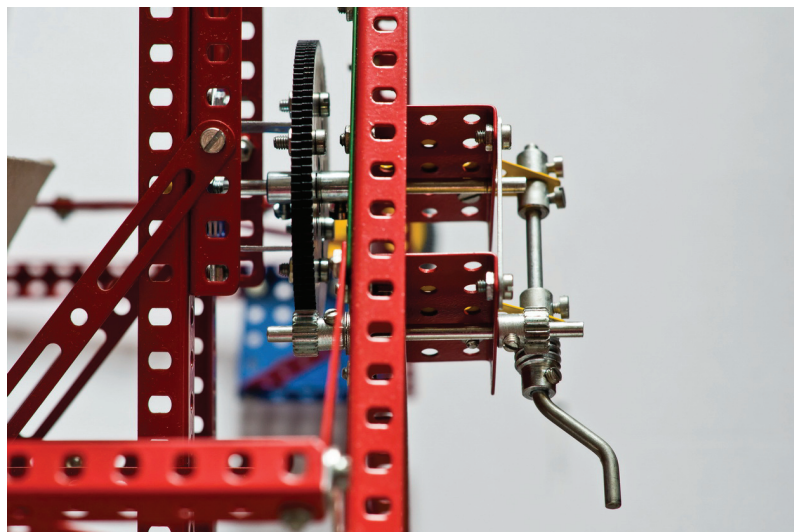


Obrázek 6.7: Funkční část sestavy a její osa otáčení

vou čočkou koncentrovány do požadované oblasti a dopadají pouze do jejího okolí. Díky průměru stínítka, přesahujícího rozměry chladiče, je chladič zcela chráněn před dopadem těchto rozptýlených paprsků. Nutnost výroby dalšího stínítka určeného speciálně pro chladič tedy odpadá. Zakomponování stínítka do konstrukce znázorňuje obrázek 6.6.

Konstrukční celek pevně spojující Fresnelovu čočku, Peltierův článek a chladič je možné otáčet kolem osy kolmé na optickou osu čočky. Osa otáčení prochází spojovacími rameny a její poloha se nachází blízko těžiště tohoto celku, což zajistí co nejmenší namáhání otáčecího mechanismu. Oběma spojovacími rameny jsou v ose otáčení vedeny krátké hřídele tak, aby nezasahovaly do prostoru sbíhajících se paprsků a zároveň mohly nést celý konstrukční celek. Smontovaný celek spolu s polohou hřídelů zobrazuje fotografie na obrázku 6.7.

Hřídele jsou na obou stranách uchyceny v pilířích, které spolu s podstavcem zajišťují stabilitu a snadnou polohovatelnost celého zařízení. Otáčecí mechanismus umístěný na jednom z pilířů sestává ze šnekového převodu a z něj vyvedeného ozubeného převodu, jenž zajišťuje dostatečnou jemnost ovládní. Šnekový převod brání samovolnému rozpořívání otočného celku. Detail zřevodování otočného mechanismu je možné si prohlédnout na obrázku 6.8. Kompletně sestavené zařízení v pracovní poloze zachycuje fotografie na obrázku 6.9.



Obrázek 6.8: Zpřevodování otočného mechanismu



Obrázek 6.9: Zařízení v pracovní poloze s připojeným měřícím obvodem

7. Výsledky měření a zhodnocení experimentu

7.1 Zatěžovací charakteristika zdroje

Zatěžovací charakteristika zdroje napětí udává závislost naměřeného svorkového napětí na proudu protékajícím zatěžovacím rezistorem. Zatěžovací rezistor je součástka s nastavitelnou proměnlivou hodnotou odporu, tedy reostat či potenciometr. Zatěžovací charakteristika poslouží ke stanovení pracovního bodu stejnosměrného zdroje, tedy takové hodnoty odporu zátěže, při níž zdroj dosahuje maximálního výkonu.

Měření zatěžovací charakteristiky zkonstruovaného zdroje proběhlo dne 14.2.2014 mezi 11. a 13. hodinou za jasné oblohy. Teoretická intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na kolmý povrch pro tento den činí dle vztahu (4.5) v kapitole 4.2 $I_{ph} = 807 \text{ W.m}^{-2}$. Přepočteme-li tuto hodnotu na intenzitu slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch podle vzorce

$$I_p = I_{ph} \sin h, \quad (7.1)$$

kde h je výška slunce nad obzorem pro daný den, dostáváme hodnotu $I_p = 344 \text{ W.m}^{-2}$. Tento výsledek porovnáme se skutečnou intenzitou slunečního záření naměřenou ve stejný den v poledne meteorologickou stanicí v Praze - Libuši, která činila přibližně $I_s = 468 \text{ W.m}^{-2}$. Od této hodnoty musíme odečíst průměrnou intenzitu difuzního záření pro měsíc únor udávanou vztahem (4.8), tedy $I_d = 93 \text{ W.m}^{-2}$. Intenzita skutečně naměřeného přímého záření na vodorovnou plochu tedy činila přibližně $I_{ps} = I_s - I_d = 375 \text{ W.m}^{-2}$. Porovnáním hodnot I_p a I_{ps} lze potvrdit správnost teoretického výpočtu. Jedna z těchto hodnot může být použita pro výpočet účinnosti zdroje.

Za výše uvedených podmínek proběhla celkem 3 opakovaná měření s minimálními časovými odstupy, přičemž každé z nich trvalo 20 – 30 minut. Během celé doby měření zůstaly podmínky na obloze stálé. Rozdíly mezi výsledky jednotlivých měření byly minimální a lze je považovat za bezvýznamné. Dále uváděné výsledky jsou vždy průměrem z těchto tří měření.

Po ustálení teplot na Peltierově článku byla odečtena první měřená veličina - napětí na prázdko, která činí

$$U_0 = 1,007 \text{ V}. \quad (7.2)$$

Poté byl zdroj napětí připojen k měřicímu obvodu sestavenému podle schématu na obrázku 7.1. Na základě odporu změřeného na Peltierově článku v nepracovním režimu při teplotě 20°C $R_T = 5,5 \Omega$ byl zvolen maximální odpor proměnlivého rezistoru v řádu jednotek ohmů. Použitou součástkou byl potenciometr P6M – LIN100R s maximálním jmenovitým odporem $R_{max} = 100 \Omega$. Postupným snižováním odporu na zátěži až k nule byla proměřena zatěžovací charakteristika zdroje. Naměřené hodnoty zpracovává tabulka 7.1.

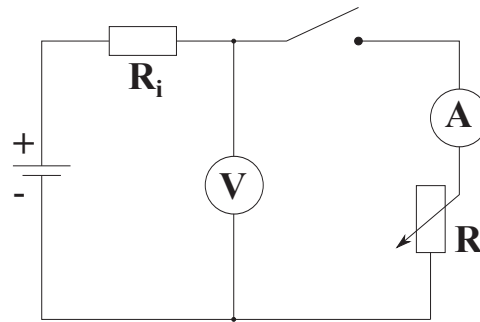
Z naměřeného svorkového napětí U a proudu protékajícího zátěží I lze vypočítat výkon zdroje

$$P = UI \quad (7.3)$$

a rovněž odpor zátěže

$$R = \frac{U}{I}, \quad (7.4)$$

přičemž proud protékající voltmetrem a úbytek napětí na ampérmetru zanedbáme [15].



Obrázek 7.1: Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky zdroje

I [mA]	U [mV]	P [mW]	R [Ω]	I [mA]	U [mV]	P [mW]	R [Ω]
10	995	9,95	99,5	160	743	118,88	4,64
20	973	19,46	48,65	170	721	122,51	4,24
30	960	28,8	32	180	704	126,78	3,91
40	942	37,68	23,55	200	668	133,67	3,34
50	929	46,47	18,59	220	641	140,95	2,91
60	910	54,58	15,16	240	612	146,8	2,55
70	898	62,88	12,83	260	567	147,42	2,18
80	879	70,29	10,98	280	529	148,03	1,89
90	863	77,67	9,59	300	503	150,8	1,68
100	845	84,5	8,45	320	471	150,72	1,47
110	831	91,41	7,55	340	438	148,81	1,29
120	815	97,76	6,79	360	398	143,4	1,11
130	798	103,78	6,14	380	373	141,87	0,98
140	781	109,39	5,58	400	346	138,27	0,86
150	765	114,8	5,1	420	307	128,8	0,73

Tabulka 7.1: Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky s vyznačeným maximálním výkonem

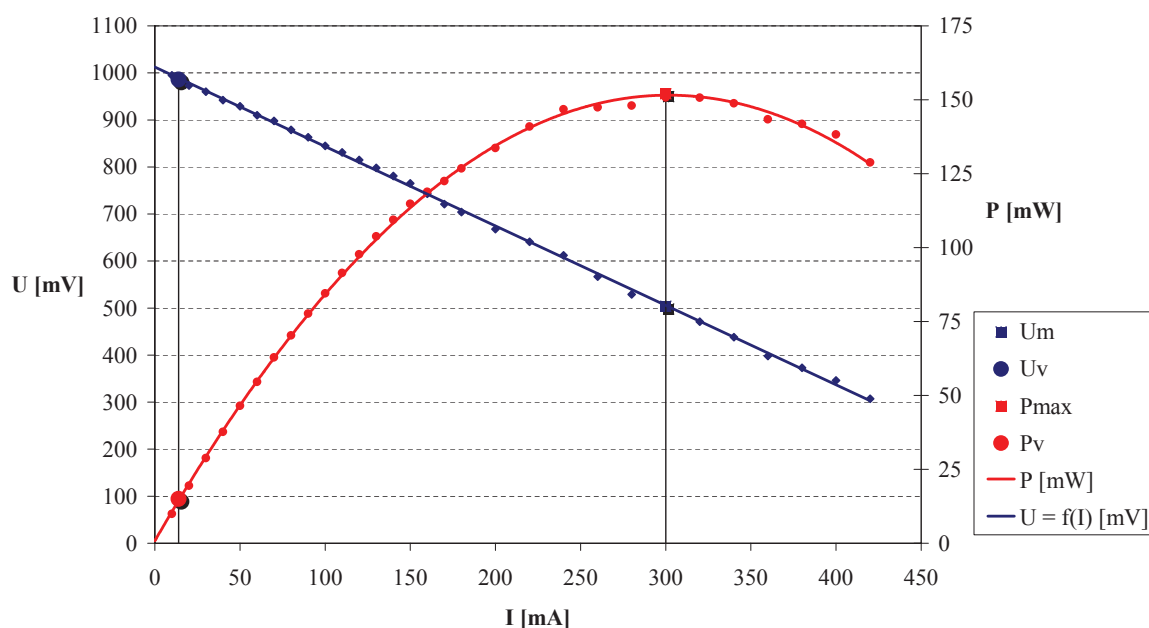
Z naměřených hodnot charakteristiky vyplývá, že zdroj dosahuje maximálního výkonu $P_{max} = 150,8$ mW při odporu zátěže $R_m = 1,68$ Ω . Zatěžovací charakteristiku zdroje a závislost výkonu na proudu protékajícím zátěží s vyznačeným maximem znázorňuje graf 7.2.

Vypočteme-li hodnotu vnitřního odporu zdroje podle vztahu

$$R_i = \frac{U_0 - U}{I} \quad (7.5)$$

pro různě zvolené dvojice U a I , získáme jeho průměrnou hodnotu $R_i = 1,62$ Ω [14]. Tím je potvrzen předpoklad, že maximálního výkonu v obvodu je dosaženo, když se odpor zátěže rovná vnitřnímu odporu zdroje. Vyjdeme-li ze vztahů (7.3) a (7.5), můžeme vyjádřit výkon P jako kvadratickou funkci proudu I

$$P = UI = (U_0 - R_i I)I = U_0 I - R_i I^2. \quad (7.6)$$



Obrázek 7.2: Zatěžovací charakteristika zdroje

Položením derivace této funkce rovné nule najdeme maximum funkce:

$$\begin{aligned} P' &= 0 \\ U_0 - 2R_i I &= 0 \\ I &= \frac{U_0}{2R_i}. \end{aligned} \quad (7.7)$$

Pak musí platit

$$\frac{U_0}{2R_i} = \frac{U_0}{R_m + R_i}; R_m = R_i. \quad (7.8)$$

Maximální výkon na zátěži činí

$$P_{max} = UI = RI^2 = R_i \left(\frac{U_0}{2R_i} \right)^2 = \frac{U_0^2}{4R_i}. \quad (7.9)$$

Maximální výkon zdroje však není současně nejvyšším využitelným příkonem pro zvolený ventilátor. Využitelný výkon P_v závisí na jmenovitém odporu ventilátoru, který vypočteme ze vztahu

$$R_{jm} = \frac{U_{jm}}{I_{jm}} = \frac{5}{0,072} = 69,4 \Omega, \quad (7.10)$$

přičemž vycházíme z jmenovitých hodnot udávaných výrobcem v tabulce 4.4. Na zatěžovacím potenciometru poté nastavíme odpor na hodnotu R_{jm} a změříme svorkové napětí a protékající proud. Naměřené hodnoty a vypočtený využitelný výkon jsou v tabulce 7.2.

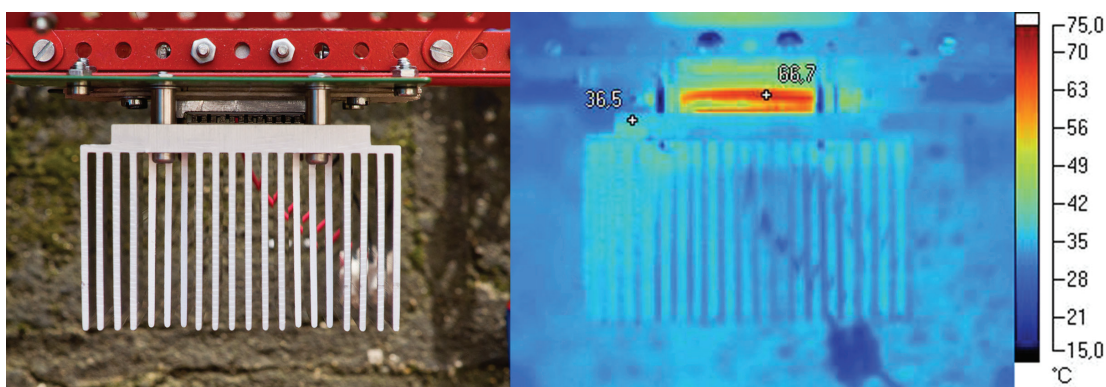
7.2 Rozdíl teplot

Pomocí měřicího přístroje CIE Test Instruments 307P a termočlánků typu K (NiCR-Ni) jsem za podmínek přibližně shodných s těmi, při nichž jsem měřil zatěžovací charakteristiku, provedl měření teplot na Peltierově článku. Shodnost podmínek byla ověřena měřením napětí

Parametr	Veličina	Hodnota	Jedn.
Jmenovitý odpor	R_{jm}	69,4	Ω
Využitelné napětí	U_v	0,983	V
Využitelný proud	I_v	14,2	mA
Využitelný výkon	P_v	13,9	mW

Tabulka 7.2: Využitelný výkon zdroje při zapojení ventilátoru SUNON MC30060V2-A99

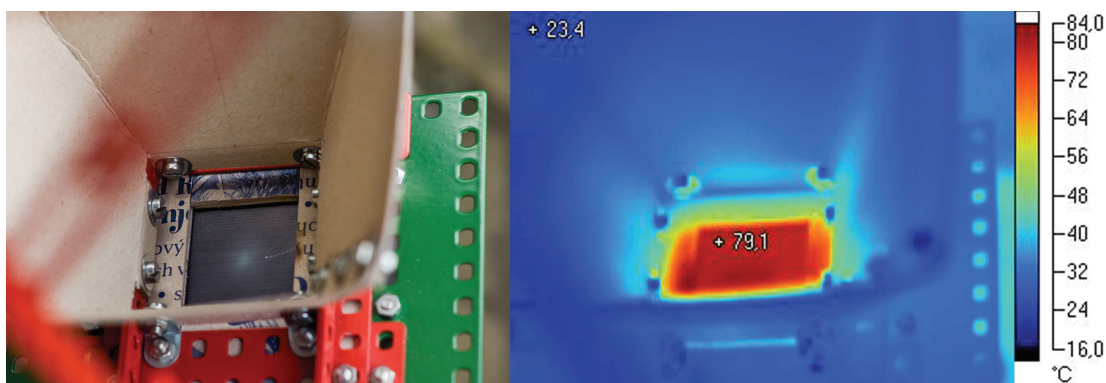
Parametr	Veličina	Hodnota	Jedn.
Teplota zahříváné strany	T_h	67	$^{\circ}\text{C}$
		340	K
Teplota ochlazované strany	T_c	37	$^{\circ}\text{C}$
		310	K
Rozdíl teplot	ΔT	30	K

Tabulka 7.3: Naměřené teploty a výsledný rozdíl teplot na Peltierově článku zahříváném Fresne-
lovou čočkou

Obrázek 7.3: Peltierův článek s chladičem v bokorysném pohledu zachycený ve viditelném a infračerveném spektru

naprázdno. Teplota zahříváné strany byla změřena nepřímo přiložením termočlánu k eloxované teplovodivé destičce co nejbližší k rozhraní destičky a keramické desky článku. Teplotu ochlazované strany jsem měřil obdobným způsobem na chladiči. Změny teplot při průchodu tenkou keramickou deskou Peltierova článku lze zanedbat. Naměřené hodnoty a výsledný rozdíl teplot jsou shrnuty v tabulce 7.3.

Následně jsem pořídil několik snímků zahříváného Peltierova článku a chladiče pomocí termokamery Fluke TiS. Jejich úkolem bylo vyhodnotit rovnoměrnost vedení tepla a míru vyzařování do okolí. Na obrázku 7.3 je dobře patrné, že teplo bylo Peltierovým článkem rozváděno rovnoměrně a všechny termoelektrické dvojice mohly pracovat v podobném rozsahu teplot. Teploty naměřené ve zvolených bodech zahříváné teplovodivé destičky a chladiče přibližně odpovídají teplotám naměřeným termočlánu. Na obrázku 7.4 je termokamerou zachycena zahříváná strana teplovodivé destičky. Zobrazená intenzita infračerveného záření zjevně neodpovídá skutečné teplotě destičky. Odchylna vznikla pravděpodobně zásluhou vysoké intenzity odraženého tepelného záření od povrchu destičky. Doplnkové snímky ve viditelném spektru byly pořízeny dodatečně běžným fotoaparát, když zařízení nepracovalo.



Obrázek 7.4: Teplovodivá destička zahřívána koncentrovanými paprsky zachycená ve viditelném a infračerveném spektru

7.3 Hodnocení experimentu

Jedním ze zásadních závěrů experimentu je, že navržený a zkonstruovaný zdroj elektrické energie není dostačující pro pohon ventilátoru nízkého výkonu. Zvolený ventilátor přitom patří mezi modely s nejnižším jmenovitým příkonem na trhu. Vyjádříme-li celkovou účinnost zařízení v procentech jako poměr maximálního výkonu zdroje a tepelného příkonu zachycovaného Fresnelovou čočkou, dostaneme

$$\eta_c = \frac{P_{max}}{P_{Q_0}} \cdot 100 = \frac{0,158}{42,8} \cdot 100 = 0,369 \%, \quad (7.11)$$

což je velmi nízká hodnota. Jedná se ovšem stále o celkovou hrubou účinnost, nikoli účinnost samotného Peltierova článku. Tu můžeme získat pouze teoreticky, pokud vyjdeme z výpočtů tepelných ztrát uvedených v kapitole 4.2.3. Tato účinnost je potom poměrem maximálního výkonu zdroje a tepelného příkonu po odečtení ztrát, tedy

$$\eta_p = \frac{P_{max}}{P_{P_0}} \cdot 100 = \frac{0,158}{38,2} \cdot 100 = 0,414 \%. \quad (7.12)$$

Tato hodnota výrazně zaostává za předpoklady vyslovenými v kapitole 4.2.5. Lze se domnívat, že ztráty tepelného příkonu vypočtené v návrhu řešení nejsou konečné a celková suma tepelných ztrát je ve skutečnosti mnohem vyšší. V důsledku toho vzniklý tepelný tok nestačí na vytvoření dostatečného rozdílu teplot.

Na druhou stranu experiment dokázal principiální funkčnost navrženého zdroje. V aplikacích, kde nevýhoda nízké účinnosti nepředstavuje zásadní problém a kde je naopak kladen důraz na vlastnosti jako jednoduchost konstrukce a nízké náklady, může zdroj pracující na navrženém principu najít své uplatnění. Rovněž je třeba vyzdvihnout nízké pořizovací náklady součástek, jejichž suma při započtení nákladů na sestavení měřícího obvodu dosáhla částky přibližně 600 Kč.

8. Návrh alternativního řešení

Ze závěrů předchozí kapitoly vyplývá, že pro splnění stanovených cílů práce je třeba sestavit výkonnější zdroj elektrického napětí dimenzovaný tak, aby postačoval k pohonu ventilátoru. I nadále je požadováno využití Peltierových článků. Ve směru, kterým jsem se se svým experimentem vydal, tedy koncentrace slunečních paprsků, byly vyčerpány dostupné prostředky a bylo dosaženo limitů, které však pro pohon ventilátorového motoru nízkého výkonu nedostačují. Dostatečný výkon by dokázal podávat zdroj, ve kterém by počet mnou zkonstruovaných zařízení byl několikrát znásoben, případně by jedno zařízení pracující na stejném principu muselo být dimenzováno pro vyšší výkon za pomoci výkonnějších komponent. V prvním případě by se nepříjemným způsobem zvýšily náklady a náročnost práce, ve druhém případě neexistuje běžně dostupná Fresnelova čočka poskytující dostatečný tepelný příkon. Alternativní řešení tedy bude pouze suplovat tepelné podmínky, kterých by bylo třeba dosáhnout na zařízení vyššího výkonu, založeném na principu z původního návrhu.

Rozhodl jsem se proto zvolit náhradní zdroj tepla, u kterého není maximální tepelný příkon zdaleka tolik omezen. Tímto zdrojem bude lihový plamen. Tepelný příkon z tohoto zdroje tak bude záviset pouze na množství současné hořícího paliva. Použitý Peltierův článek bude shodný s článkem použitým v původním návrhu, čímž zůstane zachována možnost srovnání výkonnosti obou řešení.

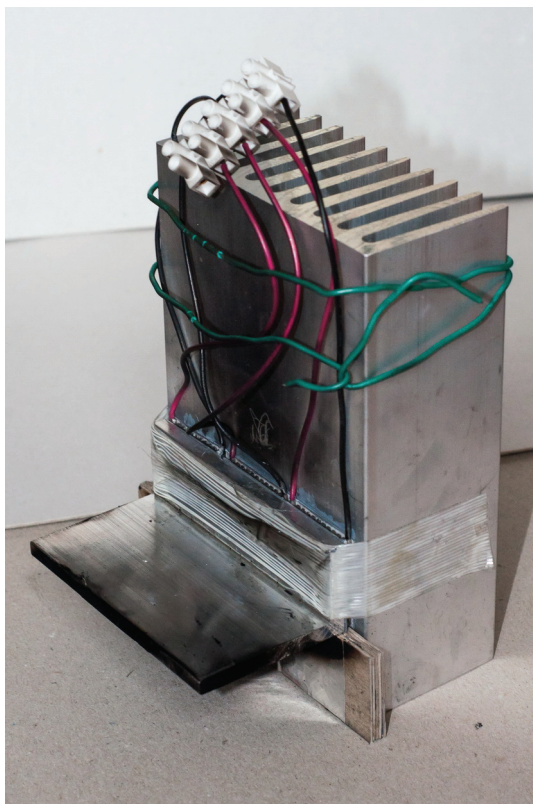
Předpokládá se dosažení celkově vyšších teplot na rozhraní horké a chladné strany Peltierova článku a vyššího rozdílu teplot, ovšem nelze očekávat, že nárůst bude tak vysoký, aby jediný Peltierův článek dokázal generovat napětí v rozsahu pracovních napětí ventilátoru SUNON MC30060V2-A99 (viz tabulka 4.4). Proto budou v alternativním zdroji zapojeny 3 shodné články do série. Dosáhne-li s připojeným ventilátorem svorkové napětí na jednom článku minimálně hodnoty využitelného napětí z původního návrhu $U_v = 0,983 \text{ V}$, poté celkové svorkové napětí na zdroji bude

$$U_c = 3U_v = 2,949 \text{ V}, \quad (8.1)$$

což je hodnota nacházející se uvnitř rozsahu pracovních napětí ventilátoru. Tento odhad platí pro zapojení článků do série z pohledu elektrického obvodu, avšak z pohledu tepelného toku budou zapojeny paralelně, tedy stejným způsobem jako jednotlivé termoelektrické dvojice v jediném Peltierově článku.

Peltierovy články budou umístěny ve vertikální poloze a připojeny teplovodivou pastou ke stěně chladiče. Žebrovaný hliníkový chladič o rozměrech $v \times š \times h = 150 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ a hmotnosti 991 g, s žebry orientovanými vertikálně, bude umístěn na podložce a poslouží zároveň jako nosný prvek zařízení. K zahřívání straně Peltierových článků bude přes teplovodivou pastu připojen hliníkový profil tvaru L o rozměrech $v \times š \times h = 30 \times 90 \times 50 \text{ mm}^3$ a tloušťce materiálu $d = 5 \text{ mm}$. Úkolem tohoto profilu, jehož vodorovná plocha bude zahřívána lihovým plamenem, je vést teplo k Peltierovým článkům. Fotografie kompletního zařízení je na obrázku 8.1.

Cílem alternativního řešení je sestavit funkční pohon ventilátoru a provést na něm stejná měření jako v případě experimentu se slunečním zářením. Z porovnání zatěžovacích charakteristik a zjištěných rozdílů teplot by měly vyplynout důvody, proč výsledky původního řešení zaostávají za odhady.



Obrázek 8.1: Alternativní zdroj napětí v pracovní poloze

9. Výsledky měření na alternativním řešení

Měření zatěžovací charakteristiky probíhalo v domácích podmínkách. Jako poměrně značný problém se ukázala volba vhodného zdroje plamene. Řešil jsem převážně otázku celkové výhřevnosti, která musela vytvořit podmínky pro dosažení požadovaného svorkového napětí a zároveň nepřekročit bezpečnou mez. To vše při zachování alespoň přibližně stabilní hustoty tepelného toku. V průběhu zkoušek jsem používal shodný měřicí obvod jako v případě zařízení podle původního návrhu. Teplotu jsem kontroloval pomocí měřicího přístroje a termočlánků použitých pro měření teplot na původním řešení. Termočlánky byly umístěny na hliníkovém profilu a na chladiči, vždy co nejbližší rozhraní mezi hliníkovou plochou a stranou Peltierova článku.

Jako vhodný zdroj plamene se po sérii pokusů ukázal být hliníkový kalíšek naplněný lihem, jehož otvor byl deformován pro regulaci množství současně hořícího paliva. Při použití tohoto zdroje tepla bylo po dosažení tepelné rovnováhy na zdroji napětí naměřeno napětí naprázdno

$$U_0 = 4,73 \text{ V.} \quad (9.1)$$

Naměřené teploty a rozdíl teplot dosažený za ustáleného stavu jsou zobrazeny v tabulce 9.1. Kvůli nízké zásobě paliva bylo možné udržet ustálený stav po dobu pouze necelých 5 minut. Během této krátké doby jsem provedl měření zatěžovací charakteristiky, přičemž právě z časových důvodů jsem musel volit větší rozestupy mezi jednotlivými hodnotami. Naměřené hodnoty uvádí tabulka 9.2. Vzhledem k menšímu počtu naměřených hodnot a tedy možnosti výskytu výraznějších odchylek jsou zatěžovací, resp. výkonová charakteristika výsledkem proložení vynesných hodnot lineární, resp. polynomiální funkcí třetího stupně. Grafy těchto charakteristik jsou na obrázku 9.1.

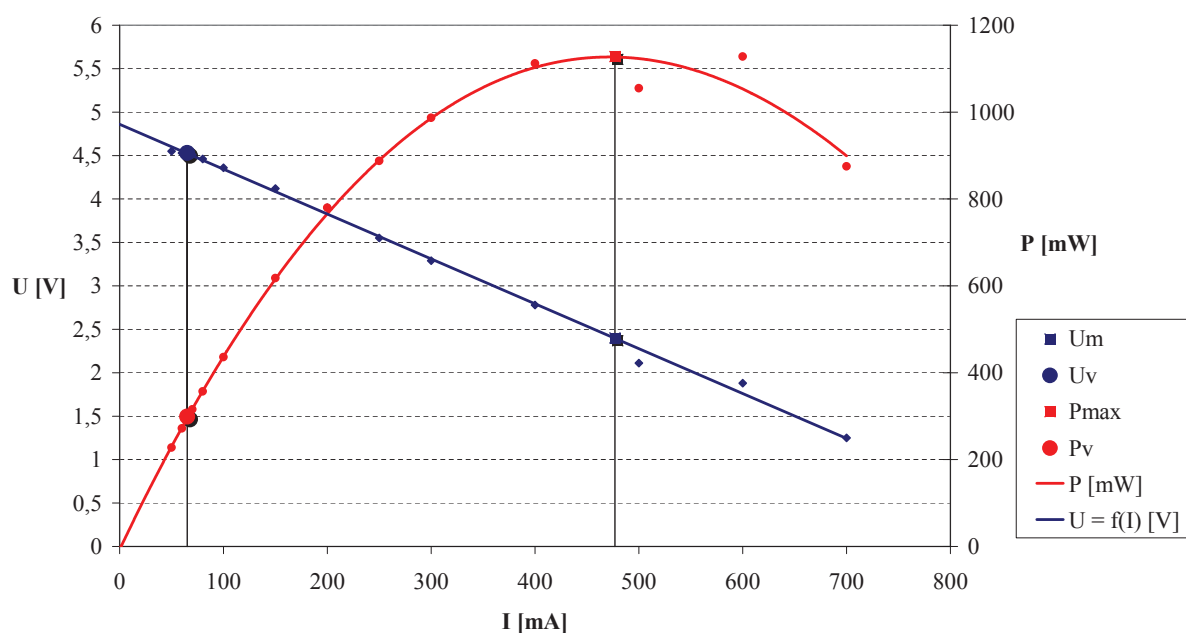
Stejně jako v případě původního řešení jsem pomocí infrakamery pořídil snímek zdroje v infračerveném spektru (obrázek 9.2). Vzhledem k četnému použití hliníku, jehož lesklý stříbrný povrch vyzařuje výrazně méně tepelného záření než jiné použité materiály, nemá snímek příliš vysokou vypovídací hodnotu. Hliníkové plochy se na něm jeví jako mnohem chladnější, než ve skutečnosti jsou. Na snímku lze dokonce pozorovat zrcadlový odraz tepelného záření na hliníkové ploše, jenž je dobře patrný na zdvojeném infračerveném obraze elektrických vodičů. Nicméně z nekovových ploch lze odečíst teploty, které se velmi přibližují teplotám naměřeným termočlánky.

Parametr	Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplota zahřívání strany	T_h	130	°C
		403	K
Teplota ochlazení strany	T_c	90	°C
		363	K
Rozdíl teplot	ΔT	40	K

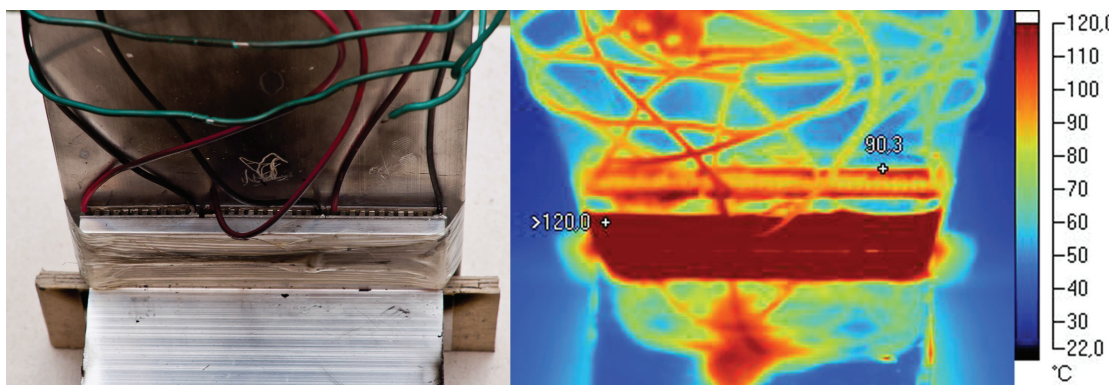
Tabulka 9.1: Naměřené teploty a výsledný rozdíl teplot na Peltierově článku zahříváném lihovým plamenem

I [mA]	U [mV]	P [mW]	R [Ω]	I [mA]	U [mV]	P [mW]	R [Ω]
50	4,55	227,5	91	250	3,55	887,5	14,2
60	4,53	271,8	75,5	300	3,29	987	11
70	4,51	315,7	64,4	400	2,78	1112	7
80	4,46	356,8	55,8	500	2,11	1055	4,2
100	4,36	436	43,6	600	1,88	1128	3,1
150	4,12	618	27,5	700	1,25	875	1,8
200	3,9	780	19,5				

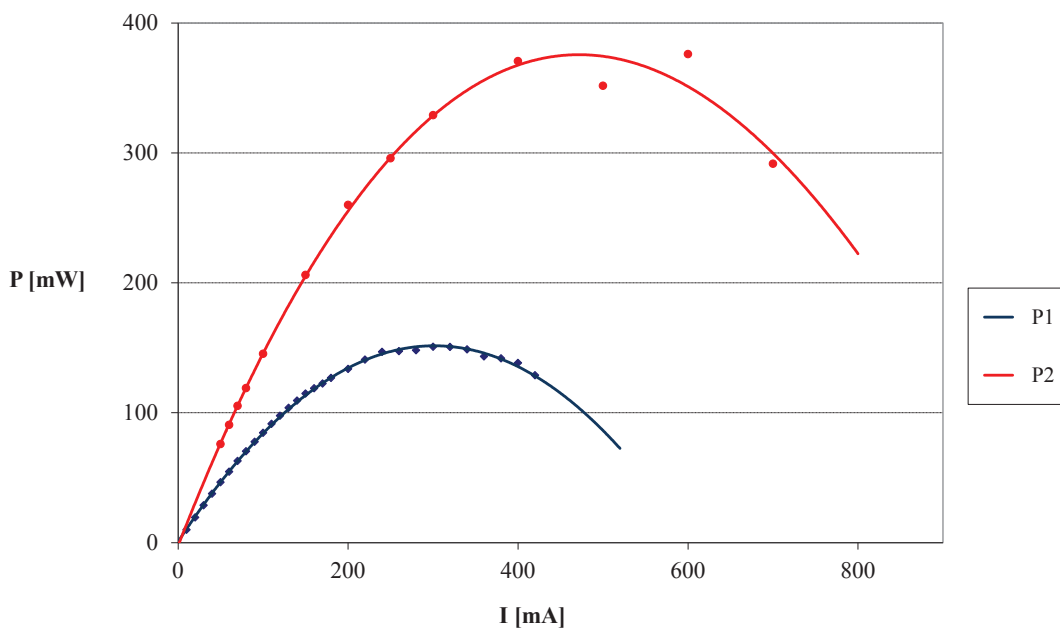
Tabulka 9.2: Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky alternativního zdroje napětí



Obrázek 9.1: Zatěžovací charakteristika alternativního zdroje napětí



Obrázek 9.2: Alternativní zdroj elektrického napětí zachycený ve viditelném a infračerveném spektru



Obrázek 9.3: Porovnání výkonových charakteristik Peltierova článku M-TEC1-12708 při různých podmínkách

Legenda: P1 - $\nabla T = 30\text{K}$; $T_h = 67^\circ\text{C}$; $T_c = 37^\circ\text{C}$, P2 - $\nabla T = 40\text{K}$; $T_h = 130^\circ\text{C}$; $T_c = 90^\circ\text{C}$.

Při zapojení samotného ventilátoru do obvodu na místo zatěžovacího rezistoru byla na zdroji naměřena hodnota svorkového napětí

$$U = 4,65\text{ V} \quad (9.2)$$

a obvodem protékal proud

$$I = 65\text{ mA} \quad (9.3)$$

Ventilátor tedy pracoval v téměř ideálních otáčkách při napětí blízkém jmenovitému.

Přepočteme-li výsledky naměřené na alternativním zdroji na jediný Peltierův článek, můžeme porovnat výkonové charakteristiky tohoto článku získané při podmínkách dosažených v původním a alternativním řešení. Z grafu 9.3 je zřejmé, o kolik narostl maximální výkon článku při výrazném zvýšení teplot obou jeho stran. Rozdíl teplot změřený za ustáleného stavu přitom narostl pouze o 33%. Vzhledem k tomu, že závislost svorkového napětí termoelektrického zdroje na teplotním gradientu je lineární, podílel se nárůst rozdílu teplot na nárůstu výkonu pouze malou měrou. Zcela jednoznačně se zde projevil vliv absolutní velikosti teploty na výkon Peltierova článku.

10. Závěr

V rámci této práce jsem navrhl a následně zkonstruoval zdroj stejnosměrného napětí využívající přeměny tepelné energie v elektrickou v Peltierově článku. Úkolem bylo pomocí měření prověřit schopnost tohoto experimentálního zdroje poskytovat dostatečný výkon pro pohon ventilátoru o nízkém příkonu při zachování konstrukční jednoduchosti a nízkých pořizovacích nákladů. Použití stovebnice Merkur pro konstrukci zdroje se ukázalo jako velmi přínosné, neboť variabilita systému umožnila bez větších potíží propojit jednotlivé komponenty do funkčního celku. S ohledem na fakt, že se jedná o zkušební prototyp elektrického zdroje, lze i hmotnost a přenositelnost zařízení považovat za velmi přijatelnou.

Završením experimentu se stala měření zatěžovací charakteristiky zdroje a výpočet rozdílu teplot. Využitelný výkon zdroje vypočtený v pracovním bodě zatěžovací charakteristiky pro zvolený ventilátor se ukázal být nedostačujícím pro pohon tohoto ventilátoru. Příčinou je nízká účinnost zdroje vypočtená z jeho maximálního výkonu. Hodnota celkové účinnosti zdroje pod 0,4% zdaleka neodpovídá odhadům vysloveným během návrhu, přičemž tyto odhady počítaly s účinností pohybující se mezi jedním a dvěma procenty. Uvedené účinnosti dosahoval zdroj při rozdílu teplot na stranách Peltierova článku přibližně 30 K. Použitím účinnější metody chlazení, jako je např. chlazení vodou, by bylo možné dosáhnout výrazně vyššího rozdílu, ovšem za cenu ztráty energetické soběstačnosti zdroje. Při použití pasivního chladiče lze dosažený rozdíl teplot považovat za odpovídající. Problém představují poměrně nízké absolutní teploty naměřené na Peltierově článku vzhledem k tepelnému příkonu dodávanému Fresnelovou čočkou. Tato skutečnost poukazuje na přítomnost značných tepelných ztrát v zařízení. I přes nesplnění požadavku na výkon navržený a zkonstruovaný zdroj prokázal principiální funkčnost a provozuschopnost v běžných podmínkách. Zvolenou koncepci má dle mého názoru smysl rozvíjet, komplikací pro praktické zkoušky je ovšem nedostupnost Fresnelovy čočky větších rozměrů na trhu.

Na základě dosažených výsledků jsem se zabýval možností konstrukce alternativního zdroje napětí, jehož úkolem nebylo nahradit původní koncepci, ale provést simulaci dosažení vyššího výkonu za pomoci zvýšeného tepelného příkonu dodávaného Peltierovu článku. Jako zdroj tepla posloužil lihový plamen. Další změnou bylo zvýšení počtu shodných Peltierových článků na tři zapojené do série. Kombinací vyšších provozních teplot a sériového zapojení Peltierových článků vznikl zdroj, jehož svorkové napětí a poskytovaný výkon plně dostačoval k pohonu zvoleného ventilátoru. Teplotní rozdíl se přitom oproti původnímu řešení výrazně nezměnil. Pokud by jako zdroj tepelného záření pro alternativní zdroj byla opět použita Fresnelova čočka, bylo by nutné její plochu dimenzovat s ohledem na zvětšenou dopadovou plochu paprsků v důsledku použití více Peltierových článků a zároveň započítat vyšší míru koncentrace těchto paprsků nutnou pro dosažení vyšších provozních teplot.

Použitý ventilátor by mohl nalézt uplatnění při úpravě proudění vzduchu v malých uzavřených prostorech, jako jsou například skříně výpočetní techniky, či pro podporu cirkulace vzduchu v okolí topných zařízení. Případně lze uvažovat o využití samotného zdroje. V takovém případě by mohl sloužit k nabíjení akumulátorů určitých typů přenosných zařízení.

Vzhledem k rezervám v efektivitě využití tepelného příkonu Fresnelovy čočky zbývá v navržené koncepci elektrického zdroje prostor ke zlepšení. Ta vidím v omezení tepelných ztrát během přenosu tepla slunečních paprsků do Peltierova článku a omezení jeho zpětného tepelného záření. Rovněž stojí za to se zabývat zvýšením efektivity pasivního chlazení. Tato opatření by vedla ke snížení nároků na plochu Fresnelovy čočky při zachování stávajícího výkonu.

Literatura

- [1] GROSS, Herbert. *Handbook of Optical Systems: Volume 1 - Fundamentals of Technical Optics*. 1. vydání. Weinheim: WILEY-VCH GmbH & Co., 2005. 826 s. ISBN 3-527-40377-9.
- [2] BARNARD, R.D. *Thermoelectricity in metals and alloys*. 1. vydání. London: Taylor & Francis Ltd., 1972. 259 s. ISBN 0-85066-059-9.
- [3] CADOFF, Irvnig. MILLER, Edward. *Thermoelectric materials and devices*. 1. vydání. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1960. 344 s.
- [5] BLATT, Frank. J. SCHROEDER, Peter. A. FOILES Carl. L. GREIG Denis. *Thermoelectric power of metals*. 1. vydání. New York: Plenum Press, 1976. 264 s. ISBN 0-306-30907-6.
- [5] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. 1. vydání. Praha: T. Malina, 1994. 203 s. ISBN 80-900759-5-9.
- [6] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. vydání. Praha: Jaga Group s.r.o., 2007. 950 s. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [7] MALÝ Petr. *Optika*. 1. vydání. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2008. 362 s. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [8] ČSN 73 0580-1 *Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky*. Český normalizační institut, 2007.
- [9] RIFFAT, S. B. XIAOLI, MA. *Thermoelectrics: a review of present and potential applications*. *Applied Thermal Engineering*. 2003, vol. 23, issue 8, s. 913–935. doi: 10.1016/S1359 – 4311(03)00012 – 7.
- [10] MIN, G. ROWE, D. M. “Symbiotic” application of thermoelectric conversion for fluid preheating/power generation. *Energy Conversion and Management*. 2002, vol. 43, issue 2, s. 221–228. doi: 10.1016/S0196 – 8904(01)00024 – 3.
- [11] STRACHOTA, Milan. *Optické zobrazování, jeho vady a zpracování obrazu*. Praha, 2011. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra fyziky.
- [12] LOKAJ, Jakub. *Termoelektrický generátor malého výkonu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [13] *Bismuth Telluride* [online]. 2014 – 03 – 01. [cit. 2014 – 03 – 08]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth_telluride>.
- [14] LEPIL, Oldřich. ŠEDIVÝ, Přemysl. *Fyzika pro gymnázia - Elektřina a magnetismus*. 5. vydání. Praha: Prometheus, 2003. 342 s. ISBN 80-7196-202-3.
- [15] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I*. 4. vydání. Praha: Informatorium, 2002. 191 s. ISBN 80-86073-90-4.

- [16] BARTUŠKA, Karel. SVOBODA, Emanuel. *Fyzika pro gymnázia - Molekulová fyzika a termika*. 4. vydání. Praha: Prometheus, 2005. 244 s. ISBN 80-7196-200-7.
- [17] KAPIČKOVÁ, Olga. VODÁK, František. *Fyzika 20 - Termodynamika*. 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 110 s. ISBN 80-01-01728-1.
- [18] LEE, Ho Sung. *Thermal design : heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells*. 1. vydání. Hoboken: Willey, 2010. 630 s. ISBN 978-0-470-49662-6.
- [19] KOZÁK, JAN. *Termoelektrický generátor*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [20] MIKULČÁK, J. KRKAVEC, L. KLIMEŠ, B. BARTŮNĚK, J. ŠIROKÝ, J. PAUKOVÁ, M. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 13. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1983. 352 s. ISBN 54-09-11/13.
- [21] *Ventilátor SUNON MC30060V2-A99* [online]. 2014. [cit. 2014 – 03 – 11]. Dostupné z: <<http://www.gme.cz/ventilator-sunon-mc30060v2-a99-p625-310>>.
- [22] *M-TEC1-07108* [online]. 2014. [cit. 2014 – 01 – 05]. Dostupné z: <<http://www.gme.cz/m-tec1-07108-p601-006>>.
- [23] *PageMagnifier 2x Carson DM-21* [online]. 2012. [cit. 2013 – 12 – 19]. Dostupné z: <<http://www.carsonoptical.cz/magnifiers/reading-magnifiers/pagemagnifier-2x-carson-dm-21.html>>.

Seznam obrázků

3.1	Možné nesymetrické okruhy	4
3.2	Otevřený okruh znázorňující Seebeckův jev	5
3.3	Schema zapojení TEG článku	8
3.4	Náhradní obvod skutečného zdroje napětí	9
3.5	Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje napětí (a) a skutečného zdroje napětí (b)	10
3.6	Porovnání standardní a Fresnelovy čočky	10
3.7	Fresnelova čočka - nahrazení zakřivených ploch rovnými	11
3.8	Zvětšení optického zobrazení	12
3.9	Pasivní chladič s žebrováním	14
4.1	Ztráty energie průchodem čočkou a odrazem na sběrné ploše	20
4.2	Vyzařování a chlazení	20
4.3	Ventilátor SUNON MC30060V2-A99	21
5.1	Model navrhované konstrukce	22
5.2	Detail termoelektrického generátoru	23
5.3	Výpočet vzdálenosti Peltierova článku od hlavní roviny Fresnelovy čočky	24
5.4	Návrh rozměrů stínítka bránícího proudění vzduchu okolo Peltierova článku	25
6.1	Uchycení Fresnelovy čočky do rámu	26
6.2	Schema uchycení součástek mezi chladičem a konstrukcí	27
6.3	Podložka z tvrdého papíru přitlačující součástky k chladiči	28
6.4	Teplovodivá destička umístěná proti otvoru v podložce	28
6.5	Peltierův článek a jeho chladná strana pokrytá teplovodivou pastou	28
6.6	Stínítko proti větru uchycené ke konstrukci pomocí šroubů	29
6.7	Funkční část sestavy a její osa otáčení	29
6.8	Zpřevodování otočného mechanismu	30
6.9	Zařízení v pracovní poloze s připojeným měřicím obvodem	30
7.1	Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky zdroje	32
7.2	Zatěžovací charakteristika zdroje	33
7.3	Peltierův článek s chladičem v bokorysném pohledu zachycený ve viditelném a infračerveném spektru	34
7.4	Teplovodivá destička zahřívána koncentrovanými paprsky zachycená ve viditelném a infračerveném spektru	35
8.1	Alternativní zdroj napětí v pracovní poloze	37
9.1	Zatěžovací charakteristika alternativního zdroje napětí	39
9.2	Alternativní zdroj elektrického napětí zachycený ve viditelném a infračerveném spektru	39
9.3	Porovnání výkonových charakteristik Peltierova článku M-TEC1-12708 při různých podmínkách	40