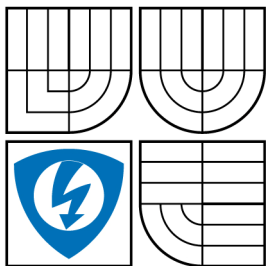


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

NOUZOVÝ ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE S TERMOČLÁNKEM

EMERGENCY BACK-UP POWER SOURCE WITH A THERMOELECTRIC CELL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

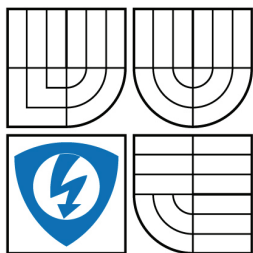
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ROMAN KUBÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. PAVEL VOREL, PH.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Roman Kubík

ID: 85338

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Nouzový zdroj elektrické energie s termočlánkem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Při provozu s malým topným výkonem proveďte orientační měření tepelných odporů a výkonových poměrů v ohřevné a chladicí aparatuře termoelektrického generátoru vyvinutého v SP2.
2. Ověřte funkčnost generátoru s plným topným výkonem (výkon termočlánků, součinnost s DC/DC měničem).
3. Ověřte chování generátoru při kolísajícím topném výkonu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 22.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na prozkoumání možného použití termočlánků jako zdrojů elektrické energie. V první části se pojednává o obecných vlastnostech termočlánků a jejich využití v praxi. Poté je na vybraný typ termočlánku navržena a vyrobena ohřevná a chladicí aparatura, která tvoří nouzový zdroj elektrické energie. V další části je na vybraný typ termočlánku navržen zvyšující neinvertující DC/DC měnič, který vytváří výstupní stejnosměrné napětí 12V. Tento měnič je řízen pomocí PWM, která pracuje s nosnou frekvencí 50kHz.

Abstract

This master's thesis is directed to an research of thermoelectric cells as power sources. It is discoursing about general properities of thermoelectric cells and their using at practical aplications in the first part. Then a heating and cooling system is designed and made for a selected type of thermoelectric cell which represents the emergency back-up power source. In the next part a DC/DC step-up converter is designed for a selected type of thermoelectric cell. This converter generates the DC load voltage 12V. The converter is controlled by PWM with a carrier frequency 50kHz.

Klíčová slova

Chladič
Modul HZ-20
Obnovitelné zdroje energie
Peltierův jev
Seebeckův jev
Tepelný zdroj
Termočlánek
Zdroj elektrické energie
Zvyšující DC/DC měnič

Keywords

Heat sink
Module HZ-20
Renewable resources
Peltier effect
Seebeck effect
Heat source
Thermoelectric cell
Power source
DC/DC convertor (step up)

Bibliografická citace

KUBÍK, R. *Nouzový zdroj elektrické energie s termočlánkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma **Nouzový zdroj elektrické energie s termočlánkem** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

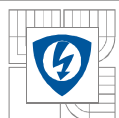
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Pavlu Vorlovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

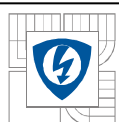
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

1	Úvod.....	12
2	Využití termočlánků v praxi.....	14
2.1	Měřicí účely.....	14
2.2	Radioizotopické termoelektrické generátory.....	14
2.3	Chladicí účely.....	14
3	Měření termočlánku typu M-TEC1-12710.....	15
4	Konstrukce modulu HZ-20 od firmy Hi-Z Technology, Inc.....	21
4.1	Hi-Z Technology, Inc.....	21
4.2	Užití termočlánků HZ-(2-20).....	21
4.3	Modul HZ-20.....	21
4.4	Doporučená aplikace modulu HZ-20.....	24
4.4.1	Montáž modulu podle firmy Hi-Z Technology, Inc.....	25
4.4.2	Izolační materiál sloužící ke spojení styčných ploch.....	28
5	Konstrukční provedení nádoby na ohřev vody s termočlánky	29
5.1	Testování nouzového zdroje energie.....	30
5.1.1	Výpočet a ověření tepelných vlastností modulu HZ-20.....	30
5.1.2	Volba a výpočet tepelné vodivosti styčné teplovodivé podložky.....	31
5.1.3	Měření s termočlánky HZ-20.....	32
5.2	Měření s moduly HZ-20 při použití chladiče s pomocným ventilátorem.....	36
5.3	Měření s moduly po úpravě na vodní chlazení.....	38
5.3.1	Výpočet účinnosti soustavy s termočlánky HZ-20.....	39
6	Návrh zvyšujícího neinvertujícího měniče (step up).....	41
6.1	Popis činnosti zvyšujícího neinvtujícího měniče	41
6.2	Návrh silové části obvodu měniče step up	43
6.3	Návrh řídicí části obvodu měniče step up.....	51
6.3.1	Návrh proudového impulsního transformátoru.....	53
6.3.2	Popis činnosti PWM controlleru UC3843.....	55
6.4	Měření na zvyšujícím měniči.....	56
7	Závěr.....	61



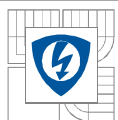
Seznam obrázků

Obr. 1-1 Seebeckův jev - termoelektrický článek (termočlánek).....	12
Obr. 3-1 Termočlánek typu M-TEC1-12710	15
Obr. 3-2 Obvodové schéma zapojení	16
Obr. 3-3 Závislost napětí naprázdno na teplotě.....	17
Obr. 3-4 Závislost vnitřního odporu na teplotě.....	18
Obr. 3-5 Závislost výkonu a výstupního napětí na proudu.....	18
Obr. 3-6 závislost výkonu na teplotě	19
Obr. 3-7 závislost výstupního napětí na teplotě	20
Obr. 4-1 Závislost výkonu, účinnosti a výstupního napětí na proudu	22
Obr. 4-2 Závislost výkonu na teplotě	23
Obr. 4-3 Závislost výstupního napětí na teplotě	23
Obr. 4-4 Závislost účinnosti modulu na teplotě	24
Obr. 4-5 Modul HZ-20, nalevo je horká strana, napravo je studená strana	25
Obr. 4-6 Upevnění modulu k horké straně tepelného zdroje	26
Obr. 4-7 Ohyb u přitlačných ploch	26
Obr. 4-8 Příklad dosedání dvou nepravidelných styčných ploch	27
Obr. 5-1 Konstrukční uspořádání systému s termočládky	30
Obr. 5-2 Závislost napětí termočládku naprázdno na teplotním rozdílu	32
Obr. 5-3 Tepelný obvod nouzového zdroje elektrické energie	33
Obr. 5-4 Růst teploty hliníkové desky a vody, tepelná časová konstanta	34
Obr. 5-5 a,b Nákras uspořádání modulů a chladiče ze dvou pohledů	36
Obr. 5-6 Napětí naprázdno v závislosti na teplotě při použití chladiče	37
Obr. 5-7 Napětí naprázdno v závislosti na teplotě při vodním chlazení	39
Obr. 6-1 Schéma zapojení zvyšujícího měniče	41
Obr. 6-2 Průběhy napětí a proudů zvyšujícího měniče	42
Obr. 6-3 Použité schéma zapojení zvyšujícího měniče	43
Obr. 6-4 Přepínací ztráty tranzistoru	48
Obr. 6-5 Vliv kondenzátoru C_1 na průběh vstupního napětí	49
Obr. 6-6 Schéma zapojení nouzového zdroje napětí	51
Obr. 6-7 Schéma zapojení galvanicky odděleného zdroje napětí	53
Obr. 6-8 Proudový impulsní transformátor	53
Obr. 6-9 Průběh důležitých veličin PIT	54
Obr. 6-10 Blokové schéma UC3843.....	56
Obr. 6-11 Závislost účinnosti na vstupním napětí	57
Obr. 6-12 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 8V$; CH2-tranzistor T_1	58
Obr. 6-13 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 4,5V$; CH2-tranzistor T_1	58
Obr. 6-14 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 8V$ se zátěží $R_z = 13,6\Omega$; CH2-tranzistor T_1	59
Obr. 6-15 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 6V$ se zátěží $R_z = 13,6\Omega$; CH2-tranzistor T_1	59
Obr. 6-16 Průběhy napětí U_{GS} a U_{DS} při $U_1 = 7V$ se zátěží $R_z = 13,6\Omega$ tranzistoru T_1	60
Obr. 6-17 Průběh napětí na tlumivce při $U_1 = 7V$	60



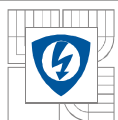
Seznam tabulek

Tab. 1-1 Seznam Seebeckových koeficientů pro různé kovy	13
Tab. 3-1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot	17
Tab. 5-1 Výsledné hodnoty z měření na modulech HZ-20.....	32
Tab. 5-2 Naměřené a vypočtené hodnoty při ustálení	33
Tab. 5-3 Výsledné měření s moduly při použití chladiče	37
Tab. 5-4 Měření s moduly HZ-20 s vodním chlazením	38
Tab. 6-1 Ztráty měniče naprázdno	56
Tab. 6-2 Účinnost zvyšujícího měniče	57



Seznam symbolů a zkratek

a, b	Seebeckovy koeficienty
B	magnetická indukce
C	kapacita
f	nosná frekvence
I	proud
$I_{\max}$	maximální proud
I_{Cef}	efektivní hodnota proudu tranzistoru
I_{C1ef}	efektivní hodnota proudu kondenzátorem
$i_L(t)$	průběh proudu tlumivkou
L	indukčnost
l_v	délka vzduchové mezery
N	počet závitů tlumivky
P	výkon
$P_{\max}$	maximální výkon
$P_{\text{přep}}$	přepínací ztráty
P_T	ztráty vedením
P_{tl}	ztráty tlumivkou
R	odpor
R_i	vnitřní odpor
R_m	magnetický odpor
R_z	zátěžný odpor
S	průřez jádra tlumivky
S_0	průřez vodiče
s	střída
$s_{\max}$	maximální střída
$s_{\min}$	minimální střída
T	perioda spínání
t	teplota
t_c	teplota chladné strany
t_h	teplota horké strany
t_1	doba zapnutí tranzistoru
U	napětí
U_{AB}	elektromotorické napětí
$U_{\max}$	maximální napětí
U_Z	napětí na zátěži
U_0	napětí naprázdno
U_1	vstupní napětí
U_2	výstupní napětí
$u_L(t)$	průběh napětí na tlumivce
W	ztrátová energie přeměněná v teplo
ΔI_L	zvlnění proudu tlumivkou
ΔQ	velikost náboje
ΔU_1	zvlnění vstupního napětí
Δt	teplotní spád
Λ	magnetická vodivost
$\phi(t)$	magnetický tok
$\eta(t)$	účinnost
$\kappa(t)$	tepelná vodivost
$\rho(t)$	elektrická rezistivita

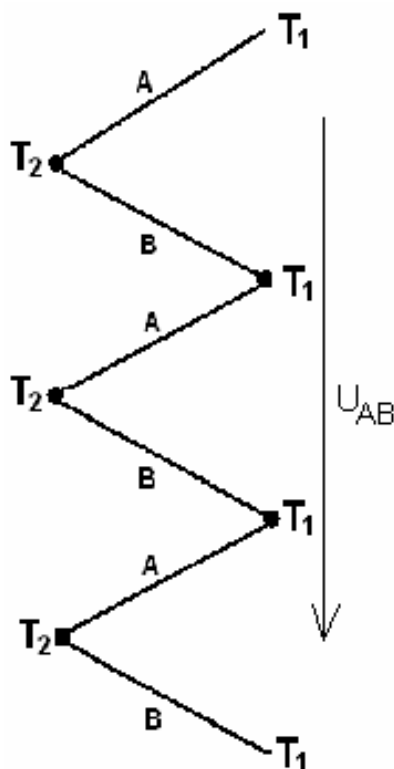


$\psi(t)$	spřažený magnetický tok
P	tepelný výkon tepelného zdroje
P_1	tepelný výkon nabíjející kapacitu hliníkové desky
P_2	tepelný výkon vstupující do modulů
R_t	tepelný odpor modulu HZ-20
R_{WG}	tepelný odpor izolační folie
R_v	tepelný odpor vzduchových bublin
R_{ch}	tepelný odpor chladicí nádoby
R_{celk}	celkový tepelný odpor
C_{Al}	tepelná kapacita hliníkové desky
C_{voda}	tepelná kapacita vody v nádobě
T_{Al}	teplota hliníkové desky
T_{voda}	teplota vody v nádobě
T_0	teplota okolí
ΔT_{WG}	tepelný úbytek na izolační folii
ΔT	tepelný úbytek na modulu
ΔT_v	tepelný úbytek na vzduchových mezerách
ΔT_{ch}	tepelný úbytek na dně chladicí nádoby

1. Úvod

V termočláncu se využívá poznatku, že napětí, které vzniká na spojích dvou různých kovových vodičů (dnes se užívají také polovodičové prvky), závisí na teplotě spojeného místa. Jestliže je zahříváno stykové místo zdrojem tepla a volné konce se udržují na stálé nižší teplotě, ukáže milivoltmetr (voltmetr) výchylku. Mezi volnými konci termočláncu tak vzniklo **termoelektrické napětí**.

U termočlánců je pozorován tzv. **Seebeckův jev**. Ten se projevuje u dvou vodičů A a B, u kterých je udržována teplota jejich spojů na rozdílných teplotách $T_1 > T_2$.



Obr. 1-1 Seebeckův jev - termoelektrický článek (termočlánek)

Takovémuto spojení dvou vodičů se také říká Seebeckův obvod.

V obvodě (viz **Obr. 1-1**) se objeví napětí a začne jím protékat proud. Seebeckův jev se tedy projevívá vznikem termoelektrického napětí. (**Tab. 1-1**) a rovnice jsou použity ze zdroje [1].

Pro elektromotorické napětí U_{AB} a absolutní teploty spojů platí experimentálně zjištěný vztah (1.1.1):

$$U_{AB} = (a_A - a_B) (T_2 - T_1) + 0,5 (b_A - b_B) (T_2 - T_1)^2 \quad (1.1.1)$$

U_{AB} elektromotorické napětí
 a, b Seebeckovy koeficienty
 T teplota



Seebeckovy koeficienty

Seebeckovy koeficienty se udávají vzhledem k olovu v (**Tab. 1-1**):

Tabulka uvádí Seebeckovy koeficienty pro různé kovy:		
Kov	a [$\mu\text{V/K}$]	b [$\mu\text{V/K}^2$]
Antimon	35,6	0,145
Bizmut	-74,4	0,032
Konstantan	-38,1	-0,0888
Měď	2,71	0,0079
Nikl	-19,1	-3,02
Platina	-3,03	-3,25
Železo	16,7	-0,0297

Tab. 1-1 Seznam Seebeckových koeficientů pro různé kovy [1]

Koeficienty **a**, **b** jsou mj. závislé na přesném složení materiálu a jeho struktuře. Hodnoty uvedené v tabulce je z tohoto důvodu třeba brát s rezervou.

Další důležitý jev, který se využívá u termočlánků, se nazývá **Peltierův jev**. Jistý francouzský fyzik Peltier se roku 1834 zamyslel nad již známým Seebeckovým jevem a zjistil, že tento jev je možné využít i opačně. Když se přivede stejnosměrný proud do Seebeckova obvodu, vzniká teplotní rozdíl mezi oběma spoji. Na tomto objevu byl založen Peltierův článek. Teplo pohlcované nebo vytvářené je úměrné elektrickému proudu. V závislosti na směru toku proudu může článek buď zahřívat a nebo chladit – toto využití bývá častější.

Cílem práce je realizovat baterii termočlánků použitou v ohřevné a chladicí aparatuře pro napájení nouzového zdroje napětí, přičemž byly vybrány dva moduly HZ-20, o nichž bude pojednáno dále, které jsou schopny dodávat dostatečné množství energie a mají přijatelnou účinnost. Další výhodou tohoto modulu je, že nemá moc veliký vnitřní odpor, který by bránil dosažení co možná největšího výkonu. Cena tohoto modulu není sice příliš zanedbatelná, nicméně zakoupení dvou kusů tohoto typu termočlánku je podporováno také výzkumnými účely.

Na nouzový zdroj elektrické energie s termočlánkem byl navržen zvyšující DC/DC měnič (step up), který vyrábí konstantní výstupní napětí 12V. Nouzový zdroj napětí by mohl nalézt uplatnění v různých aplikacích, kde není třeba velkého výkonu a také, kde není nutný konstantní výkon. Jeho provoz může a nemusí být neustálý, to záleží na zvolené aplikaci, kde bude provozován. Byla také navržena a vyrobena ohřevná a chladicí aparatura, která byla následně testována.

Aktuální diplomová práce byla zaměřena na dimenzování a realizaci ohřevné a chladicí aparatury se zmíněnými dvěma moduly HZ-20 s provedením jistých úprav. Na vyrobeném prototypu bylo provedeno měření a hodnoty z něj byly zpracovány. Po provedených testech byla provedena některá opatření, která měla zajistit správnou funkčnost systému s moduly spolu s navrženým zvyšujícím měničem.



2. Využití termočlánků v praxi

2.1. Měřicí účely

V praxi se termočlánky využívají velmi často pro měřicí účely, především pro **měření teploty**. Termočlánek bývá obvykle vyroben z tenkého vodiče o průměru 0,1 - 0,5 mm, které jsou na konci svařené a uloženy v keramické dvojkapiláře. Napětí článku se obvykle měří kompenzátozem nebo jiným citlivým přístrojem na jednosměrný proud. K tomuto účelu se používá spojení dvou vodičů – kovů jako např. měď – konstantan, protože mají dobré tepelné vlastnosti.

2.2. RTG

Dále se účinky termoelektrického jevu uplatňují v **radioisotopických termoelektrických generátorech (RTG)**. Využívají přirozeného rozpadu některých radioaktivních prvků. Jsou používány v sondách které se pohybují ve vzdálenostech, kde už sluneční články nestačí. Palivem bývá nejčastěji plutonium. Jejich velkou výhodou je, že jsou schopné provozu po dlouhou dobu (až několik let). Naopak velikou nevýhodou je potřeba ochrany ostatních komponentů zařízení před radiací. Převod z tepelné energie na elektrickou se provádí bez jakýchkoli pohyblivých částí pomocí termočlánku.

Způsob výroby elektrické energie založený na Seebeckovu jevu je velmi výhodný z hlediska vysoké spolehlivosti. Z tepelného výkonu, který je asi 40 - 60 W na 1 kg radioaktivního materiálu se převede na elektrický výkon jen asi 2 - 3 W. Nejčastěji používanou látkou je izotop plutonia Pu 238, který má velkou výhodu v relativně dlouhém poločasu rozpadu, asi 87 let. Dalším používaným izotopem je polonium Po 139, jehož poločas rozpadu je asi 130 dní, takže se neuplatní na dlouhé mise. **Radioizotopické generátory (RTG)** se používají stále více, ale také stále častěji se setkávají s problémy v podobě protestů různých organizací argumentujících možností výbuchu. I tato možnost existuje, ale systémy RTG jsou natolik zabezpečeny, že je uváděna pravděpodobnost úniku radioaktivity na 1:1 000 000.

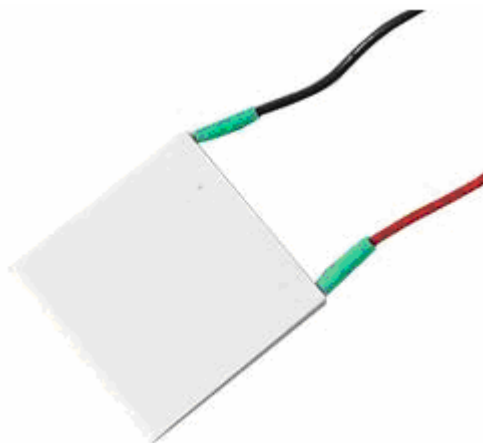
RTG vyvíjené v NASA dosahují výkonu okolo 280W při napětí přibližně 30V. S poločasem rozpadu klesá dosahovaný výkon (za sto dní klesne výkon zhruba o 3W) a tím samozřejmě také účinnost RTG.

2.3. Chladicí účely

Další využití je pro chladicí účely u **chladniček**, kde se využívá Peltierova jevu, blíže popsaného v první kapitole. K těmto aplikacím se používá spojení dvou polovodičových prvků, např. bismut – tellur, které mají vhodné termoelektrické vlastnosti, hlavně nízký měrný odpor. Články jsou uloženy vedle sebe mezi dvěma keramickými deskami. Tyto desky slouží jako elektrická izolace. Po přivedení elektrického proudu na výstupy se jedna keramická deska zahřívá a druhá ochlazuje. Tento způsob se také dá využít jako **chladič** procesoru PC.

3. Měření termočlánu typu M-TEC1-12710

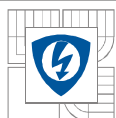
Pro naše účely byl zvolen termočlánek typu **M-TEC1-12710**, zakoupen v GM Electronics, který je, jak bylo řečeno, pro chladicí účely. Využívá tedy Peltierova jevu a používá se na výrobu minichladniček. Jeho rozměry jsou 40x40x3,3mm. Zatěžován může být maximálním proudem $I_{\max} = 10\text{A}$ a napětím $U_{\max} = 15,8\text{V}$, přičemž jeho maximální výkon je $P_{\max} = 89\text{W}$. Na (**Obr. 3-1**) je jeho fotografie.



Obr. 3-1 Termočlánek typu M-TEC1-12710

Avšak záměr byl vyzkoušet jeho možné použití naopak než za jakým účelem byl vyroben, a to jako zdroje elektrické energie. Tento termočlánek je také umístěn mezi dvěma keramickými deskami, které slouží jako elektrická izolace a zároveň mají dobrou tepelnou vodivost. To je důležité zejména pro dobré rozložení tepla na celé ploše pro rovnoměrné zahřívání jednotlivých termočláneků i v případě přívodu tepla z bodového zdroje. Měření nebylo jednoduché zrealizovat, protože bylo v našich podmínkách obtížné udržet konstantní rozdíl teplot horké a chladné strany, Δt . Nakonec se vše uskutečnilo následujícím způsobem.

Pod spodní stranu termoelektrického článku byl umístěn velký chladič o přibližných rozměrech 30x40x10cm. Takto velký proto, aby se co možná nejlépe udržovala teplota chladné strany t_c na stálé teplotě. Chladič má díky svým rozměrům větší hmotnost, a tudíž také větší měrou tepelnou kapacitu, což způsobuje schopnost absorbovat více tepla. Příznivé jsou jeho rozměry i pro odvod tepla do okolí zářením a vedením. Následně bylo místo, kde byl umístěn termočlánek, namazáno teplovodivou pastou, která zabezpečovala bezztrátový přenos tepla z termočlánu do chladiče. Tou byla poté natřena také horní strana. Na svrchní stranu byl přiložen druhý chladič, avšak podstatně menší. Jeho rozměry jsou přibližně 8x10x3cm. Ten byl naopak zahříván na určitou teplotu a až se v něm teplota ustálila, mohlo se začít měřit. Vystal problém, jakým způsobem by bylo možné vrchní stranu zahřívát. Jako zdroj tepla byl nakonec použit horkovzdušný ohřívač, kterým se foukal horký vzduch na horní chladič. Jelikož maximální teplota horké strany, $t_{h\max}$ termočlánu je 130°C, muselo se tedy dávat pozor, aby tato teplota nebyla překročena, protože by s největší pravděpodobností došlo k jeho zničení. Teplota horní strany se měřila na chladiči a nejprve byl použit teploměr s termočlánekem, avšak toto snímání teploty bylo poměrně nepřesné, protože bylo velice těžké přitlačit přesně styčnou plošku teploměru k chladiči. Z tohoto důvodu byl použit bezdotykový teploměr, což bylo určitě přesnější. K termočlánu byl nejprve připojen voltmetr a měřilo se na něm napětí naprázdno U_0 . Horní strana se zahřívala až na 110°C a následně se nechala chladnout až na 40°C. Vždy po 10°C se odečetla hodnota napětí U_0 . Avšak muselo se docílit co nejtěsnějšího kontaktu vrchního chladiče s termočlánekem, aby měření bylo přesné a napětí co největší. Toho nebylo možné v našich podmínkách trvale docílit, tudíž při dosažení



teplotě chladiče se vždy muselo mechanickou silou co nejvíce přitlačit chladič na termočlánek, aby i vrchní strana termočlánu měla požadovanou teplotu. Spodní strana termočlánu se udržovala na konstantní teplotě 26°C. Poté se k termočlánu připojil odpor R o hodnotě $2,2\Omega$ a měřilo se na něm svorkové napětí U_z . K odporu R byl do série zapojen přepínač pro kontrolu napětí U_0 . Když bylo napětí U_z změřeno, mohl se vypočítat proud I podle vztahu.

$$I = \frac{U_z}{R_z} \quad (3-1)$$

Jakmile se vypočítal proud I , bylo možné spočítat vnitřní odpor R_i podle následující rovnice.

$$R_i = \frac{U_0 - U_z}{I} \quad (3-2)$$

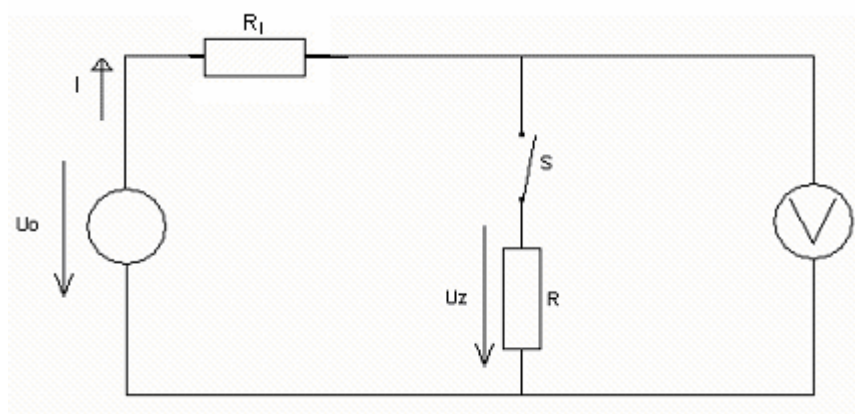
Jelikož u zdroje napětí musí platit výkonové přizpůsobení, je jisté, že maximální výkon termočlánek podává právě při rovnosti odporu zátěže R_z a vnitřního odporu zdroje R_i . Po výpočtu a úpravě je výsledný vztah vyjadřující maximální výkon termočlánu roven.

$$P_{\max} = \frac{U_0^2}{4 \cdot R_i} \quad (3-3)$$

Závislost na zátěžném odporu R_z by se však špatně vynášela do grafu, proto se výkon P vyjádřil jako funkce proudu.

$$P = (U_0 - R_i \cdot I) \cdot I \quad (3-4)$$

Schéma zapojení je uvedeno na (**Obr. 3-2**):



Obr. 3-2 Obvodové schéma zapojení



V následující tabulce (**Tab. 3-1**) jsou naměřené a vypočtené hodnoty:

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot při $t_c=26^\circ\text{C}$ a $R_z=2,2\Omega$

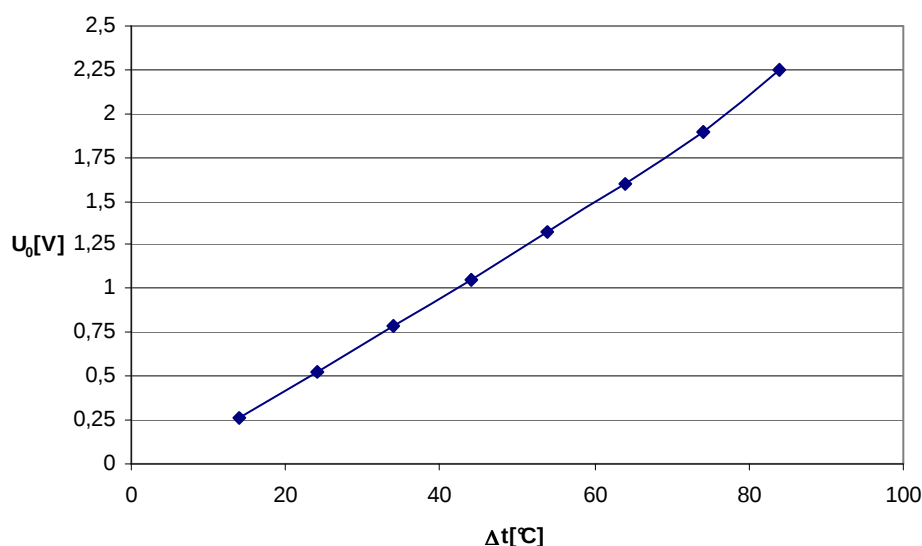
$t_h[^\circ\text{C}]$	$U_o[\text{V}]$	$U_z[\text{V}]$	$I[\text{A}]$	$R_i[\Omega]$	$P_m[\text{W}]$
40	0,266	0,132	0,060	2,233	0,008
50	0,520	0,252	0,115	2,339	0,029
60	0,782	0,375	0,171	2,380	0,064
70	1,050	0,497	0,226	2,447	0,113
80	1,320	0,590	0,268	2,724	0,160
90	1,600	0,698	0,317	2,845	0,225
100	1,900	0,828	0,368	2,825	0,303
110	2,250	1,000	0,455	2,750	0,460

Tab. 3-1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

Jak je z (**Tab. 3-1**) vidět, teplota t_h se nenastavovala až do nejvyšší povolené hodnoty z důvodu možného zničení termočlánku a naopak se nenastavovala méně než 40°C , protože napětí již bylo velice malé. Měření také bylo omezené nastavenou teplotou chladné strany t_c , která měla hodnotu 26°C , což opět nebyla maximální možná teplota t_c . Článek, na kterém se provádělo měření je Peltierův a tudíž by teplota chladné strany mohla být v záporných hodnotách, u tohoto termočlánku přibližně -30°C , čehož nebylo možné v těchto podmínkách dosáhnout. Z těchto důvodů nebyl využit maximální výkon termočlánku $P_{\max}$.

Na (**Obr. 3-3**) je znázorněna závislost napětí U_o termočlánku na rozdílu teplot.

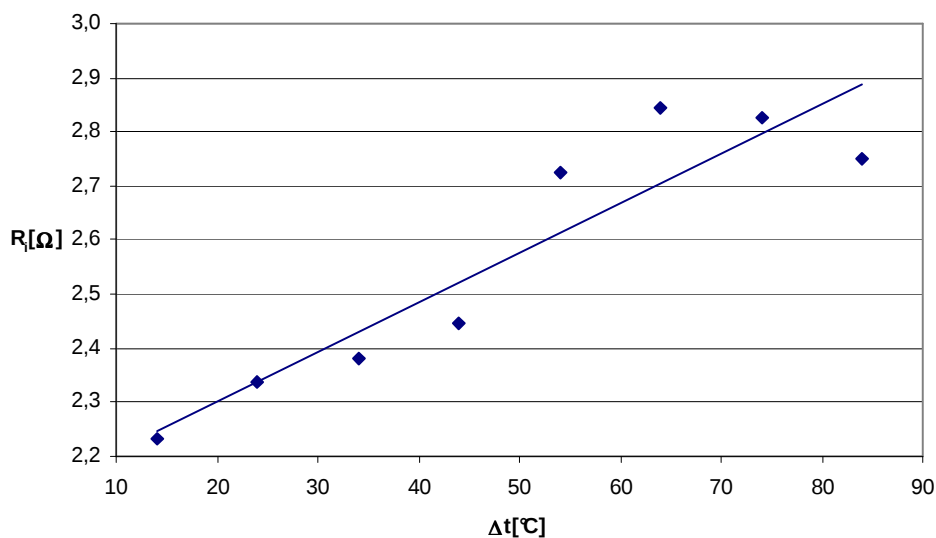
**Závislost napětí naprázdno na rozdílu teplot při
 $t_c=26^\circ\text{C}$**



Obr. 3-3 Závislost napětí naprázdno na teplotě

Jak je vidět, závislost je prakticky lineární, což je v pořádku. Podobně na (**Obr. 3-4**) je znázorněna závislost vnitřního odporu termočlánku R_i na rozdílu teplot:

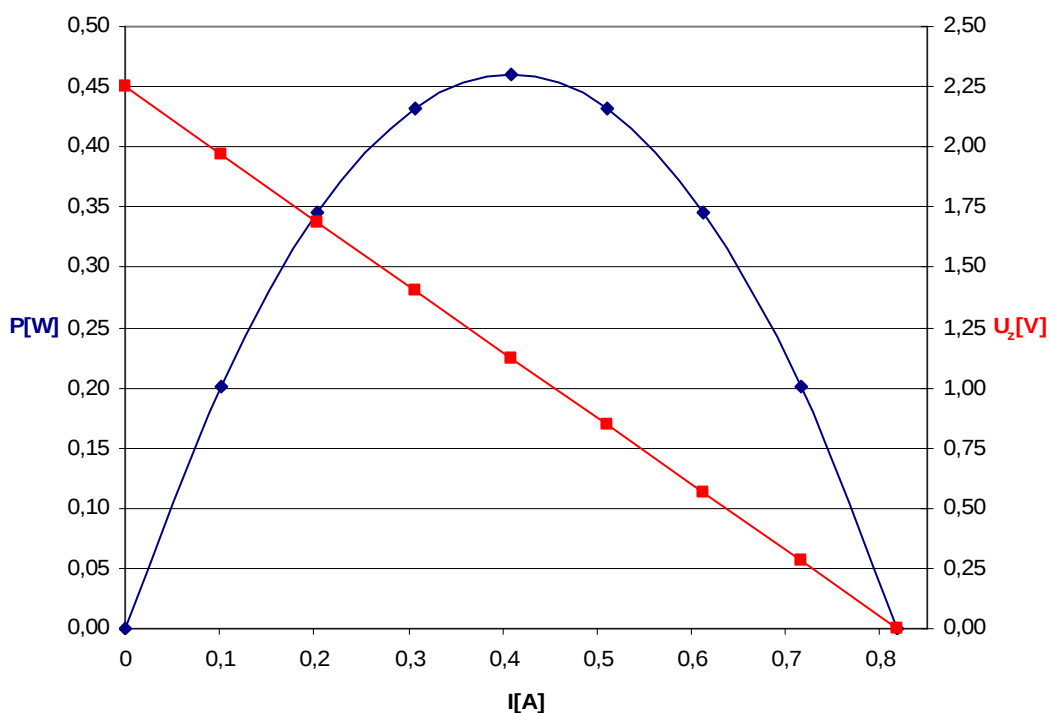
Závislost vnitřního odporu na rozdílú teplot při $t_c = 26^\circ\text{C}$



Obr. 3-4 Závislost vnitřního odporu na teplotě

Vnitřní odpor R_i by měl také lineárně narůstat s teplotou, avšak při měření docházelo k nepřesnostem, především při nestejném mechanickém přitlačení horního chladiče na termočlánek. Na následujícím grafu (**Obr. 3-5**) je znázorněn výkon P jako funkce proudu I při teplotě $t_h = 110^\circ\text{C}$ a také napětí U_z v závislosti na proudu I .

Závislost výkonu termočlánu a napětí na proudu



Obr. 3-5 Závislost výkonu a výstupního napětí na proudu

Nejprve se spočítal proud při maximálním výkonu $P_{\max}$ podle vzorce (3-5)

$$I = \frac{U_0}{2 \cdot R_i} \quad (3-5)$$

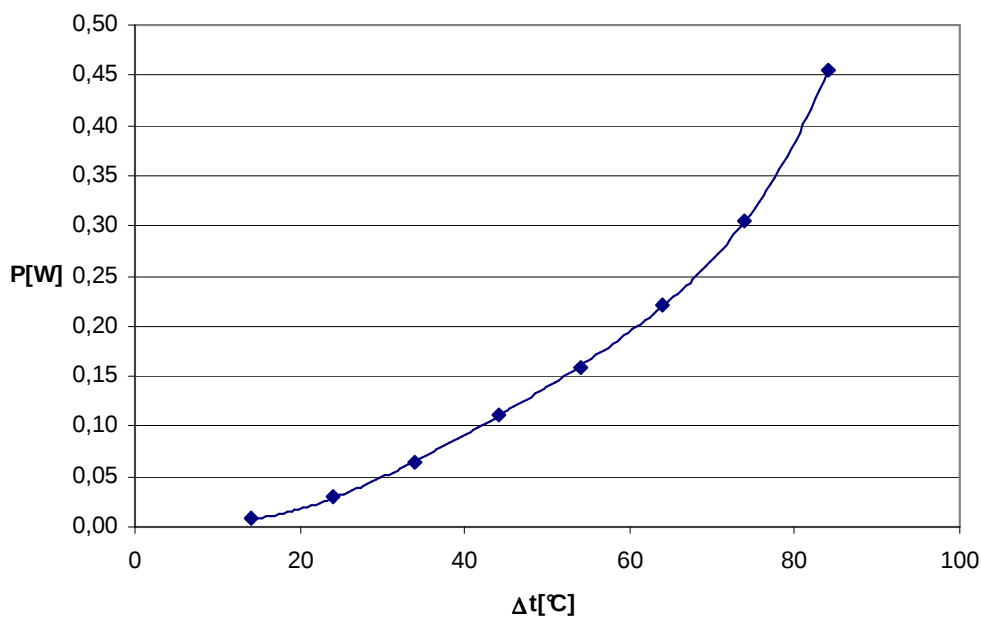
a následně se spočítal proud, při kterém bude výkon roven nule. Ten se spočítá podle rovnice.

$$(U_0 - R_i \cdot I) \cdot I = 0 \quad (3-6)$$

Jak je vidět, výsledkem jsou dva reálné kořeny. První je pro proud $I_1 = 0\text{A}$ a druhý je roven hodnotě $I_2 = (U_0/R_i)A$. Z grafu je rovněž patrné, že napětí U_z lineárně s narůstajícím proudem klesá k nule a právě při poloviční hodnotě U_z dosahuje výkon maxima $P_{\max}$.

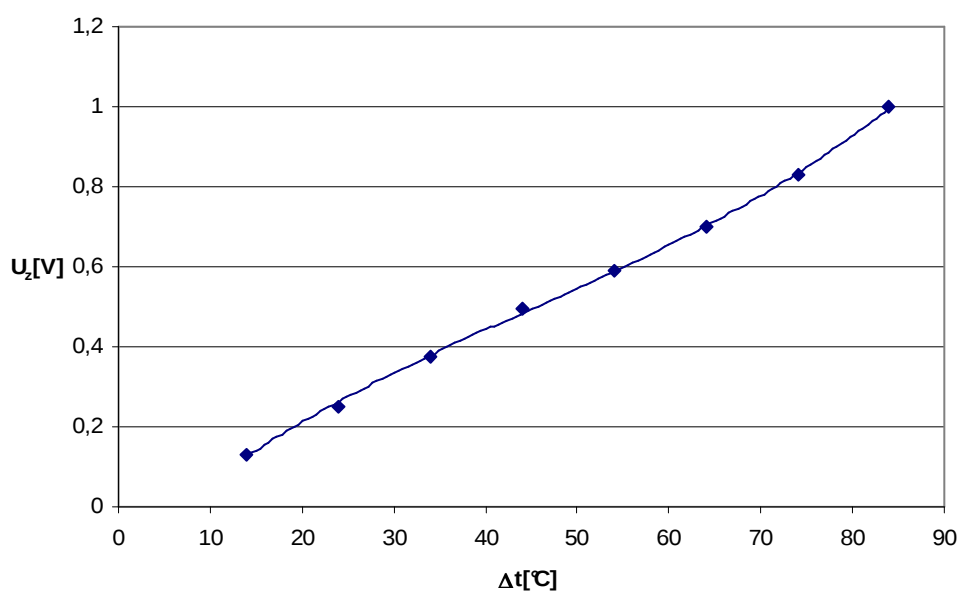
Na následujících dvou grafech (**Obr. 3-6**) a (**Obr. 3-7**) jsou ukázány závislosti výstupního napětí U_z a výkonu P na teplotě, respektive na rozdílu Δt .

Závislost výkonu na rozdílu teplot při $t_c=26^\circ\text{C}$



Obr. 3-6 závislost výkonu na teplotě

**Závislost výstupního napětí na rozdílu teplot při
 $t_c = 26^\circ\text{C}$**



Obr. 3-7 závislost výstupního napětí na teplotě

Výkon s narůstající teplotou roste parabolicky, avšak dalo by se očekávat, že při vyšších teplotách by odpor výrazně nárůst výkonu zpomalil. Nárůst odporu při vyšších teplotách by měl podobný vliv i na výstupní napětí U_z .



4. Konstrukce modulu HZ-20 od firmy Hi-Z Technology, Inc.

4.1. Hi-Z Technology, Inc.

Společnost **Hi-Z Technology, Inc.** ze San Diega v USA vyrábí zdroje elektrické energie s termočlánkem s různými výkony od 2 do 20 W, které již ve Spojených Státech byly použity v mnoha aplikacích. Tyto zdroje mají termočlánky, které sestávají ze dvou polovodičových prvků Bismut a Tellur. Vyznačují se především vysokou spolehlivostí a poměrně dobrou účinností. Údaje včetně grafů a snímků uvedené kapitole 2 jsou použity ze zdroje [2].

4.2. Užití termočlánků HZ-(2-20)

- Slouží k přeměně zdroje tepla (např. odpadního) ke spolehlivé zásobě elektrické energie ve vzdálených lokalitách.
- Zpracovává teplo ze spalování uhlovodíkových paliv pro výrobu elektrické energie ve vzdálených bezobslužných stanicích.
- Používá se jako katodová ochrana.
- Uplatnění nachází také ve sdělovací technice.
- Důležitá funkce je **rekuperace odpadního tepla**. Dokáže využívat odpadního tepla z výfuku vozidla pro výrobu elektrické energie a slouží jako náhrada alternátoru. Dále pak pro průmyslové operace v různých továrnách, rafinériích nebo ve sklenářském průmyslu...
- Také využívají **obnovitelných zdrojů** energie. Tyto termočlánky se např. uplatňují u kamen na dřevo, ve spalovnách odpadů, dále mohou být napájeny geotermální energií nebo solární energií.

Jak je vidět, termočlánky mají široké uplatnění v mnoha oborech, nekončí to pouze měřicími aplikacemi. Nyní trochu více přiblížíme složení a parametry nejvýkonnějšího zdroje elektrické energie firmy HI-Z Technology, Inc., HZ-20, který by byl vhodný pro realizaci nouzového zdroje napětí.

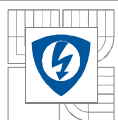
4.3. Modul HZ-20

Tento zdroj je složen ze 71 termočlánků spojených elektricky do série a tepelně paralelně. Termočlánky jsou lisovány za tepla a jsou složeny, jak již bylo řečeno, ze dvou polovodičových prvků Bismut a Tellur, jež dávají vysokou TE účinnost a jsou velice spolehlivé i v trvale náročných aplikacích. Je schopen nepřetržitě pracovat při teplotách dosahujících 250°C a přerušovaně až do 400°C, aniž by došlo k jeho poškození. Je vhodný k použití v aplikacích, kde se využívá rekuperace odpadního tepla, ale pro jeho dobré obousměrné vlastnosti je možno jej použít i při výrobě termoelektrické chladničky či chladiče, zvláště pro vysokoteplotní aplikace, kde citlivá elektronická zařízení musí být chlazená na okolní teplotu.

HZ-20 je čtvercového půdorysu o délce strany 7,5cm a o tloušťce 0,5cm, jeho váha je 115g. Může na něj být vyvíjen tlak 70MPa.

Zdroj HZ-20 se vyznačuje těmito **tepelnými vlastnostmi**:

Teplota horké strany	230°C
Teplota studené strany	30°C
Maximální stálá teplota	250°C
Maximální nestálá teplota	400°C
Tepelná vodivost	0,024 W/cm*K
Měrný tepelný tok	9.54 W/cm ²

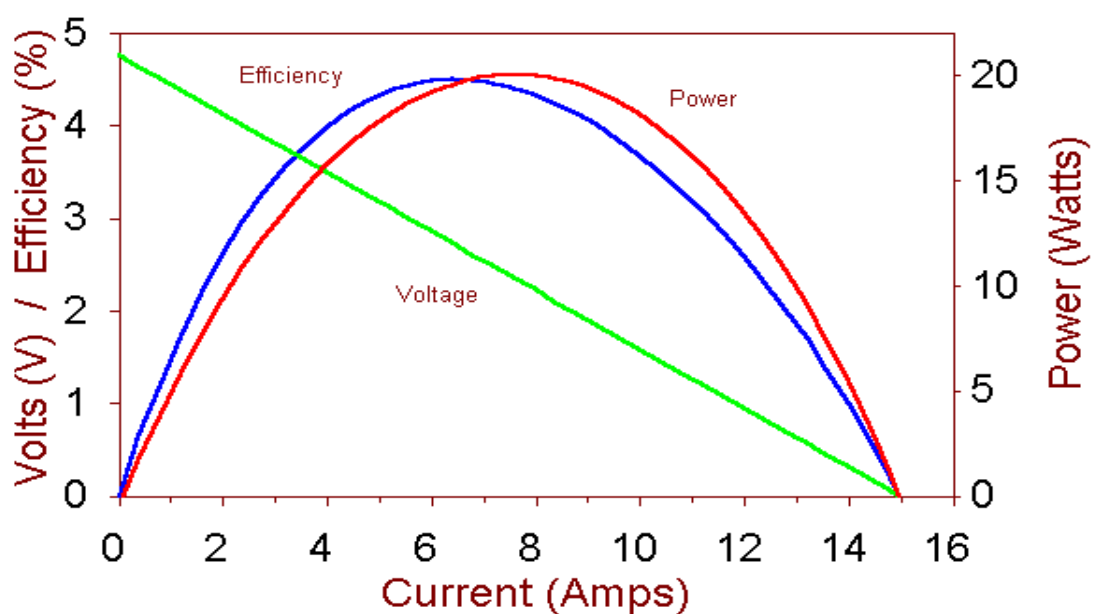


Zajímavé jsou jeho **elektrické vlastnosti**, když pracuje jako generátor:

Výkon	19W
Napětí při zatížení	2,38V
Vnitřní odpor	0,3Ω
Proud	8A
Napětí naprázdno	5V
Účinnost	4,5%

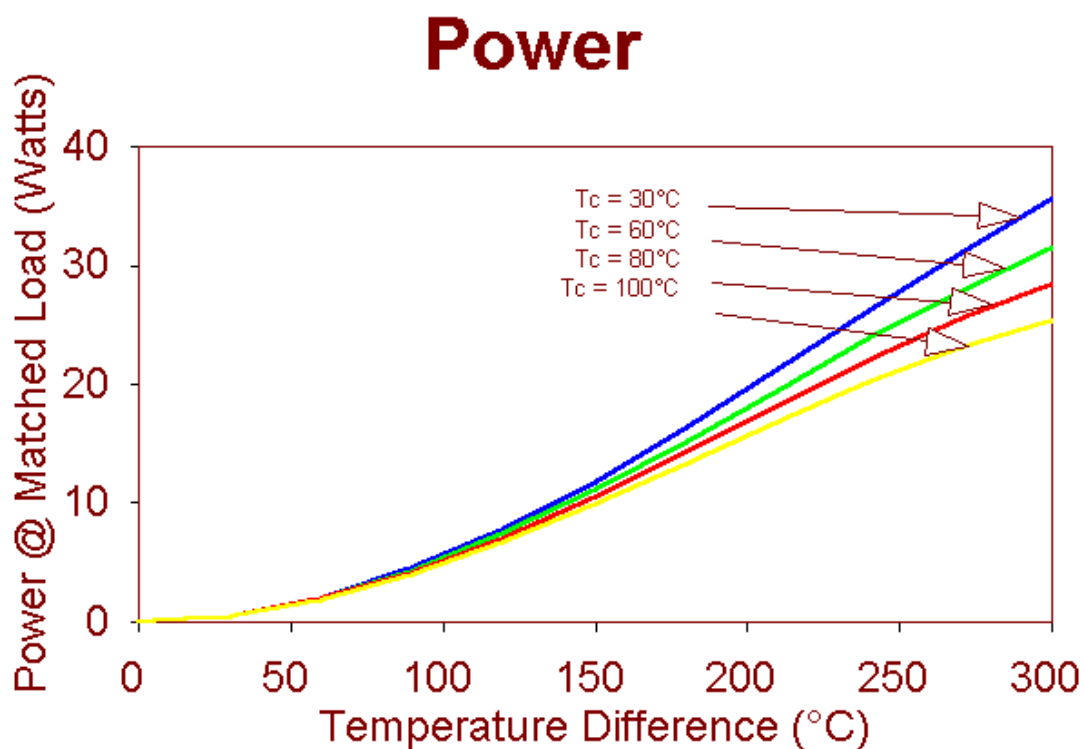
Mnoho elektrických vlastností je závislých na připojené zátěži. Na **(Obr. 4-1)** je ukázána závislost těchto vlastností na proudu:

Current - Voltage Curves



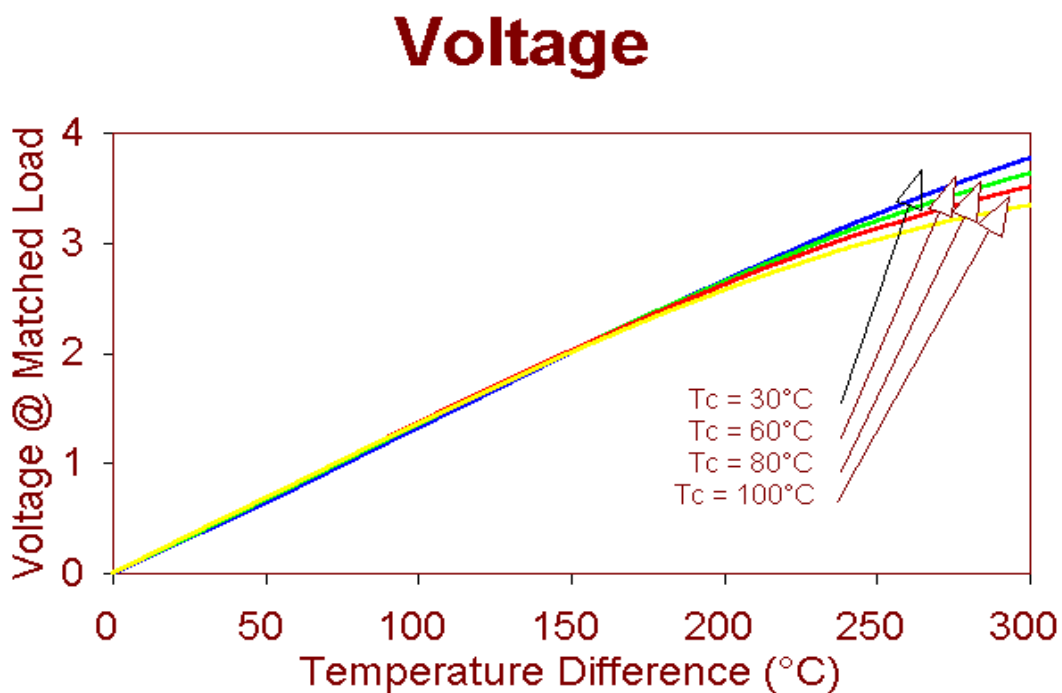
Obr. 4-1 Závislost výkonu, účinnosti a výstupního napětí na proudu [2]

Na (Obr. 4-2) je naopak ukázána závislost výstupního výkonu na teplotě.



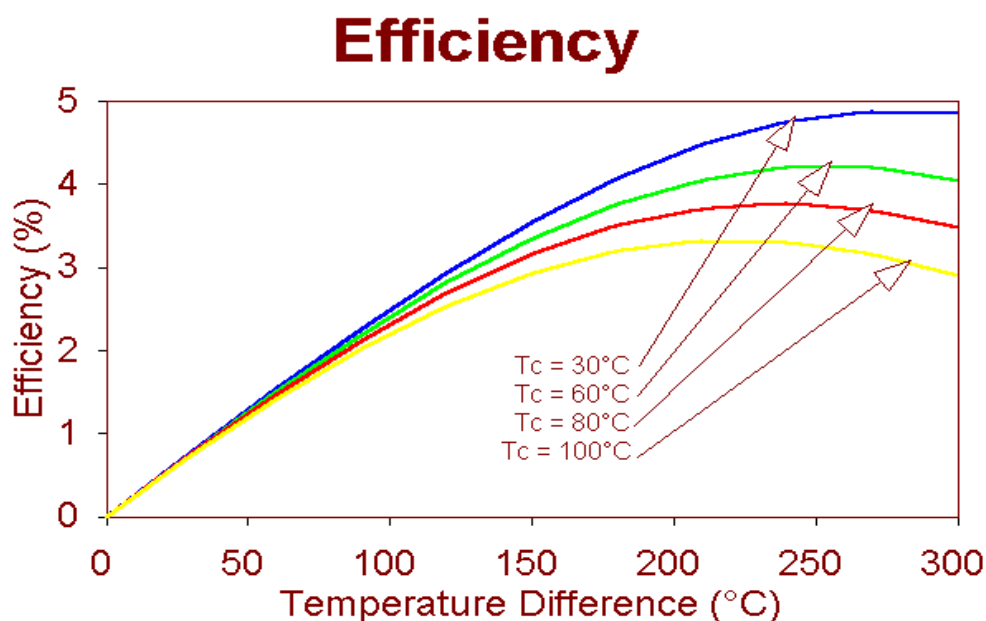
Obr. 4-2 Závislost výkonu na teplotě [2]

Na (Obr. 4-3) je znázorněna závislost výstupního napětí na teplotním rozdílu při rozdílných teplotách chladné strany T_c .



Obr. 4-3 Závislost výstupního napětí na teplotě [2]

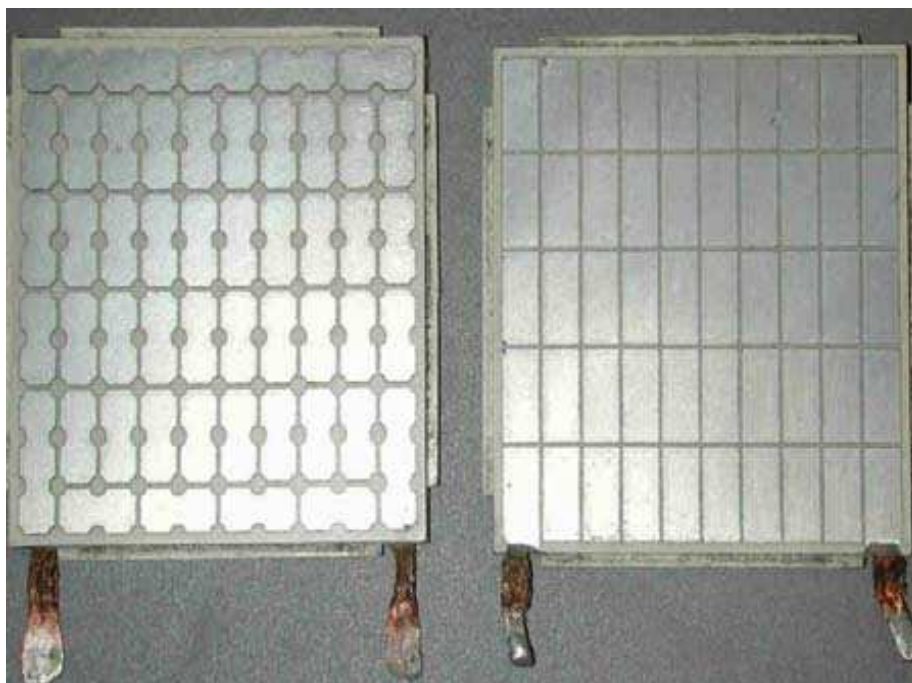
A konečně na **(Obr. 4-4)** je vidět závislost účinnosti modulu HZ-20 na teplotním rozdílu, přičemž se opět různí teplota chladné strany T_c . Ze závislosti si lze povšimnout, že nejlepší účinnosti modul dosahuje při teplotním rozdílu přes 200°C.



Obr. 4-4 Závislost účinnosti modulu na teplotě [2]

4.4. Doporučená aplikace modulu HZ-20

Jak již bylo řečeno, modul HZ-20 a další typy vyráběné firmou Hi-Z Technology, Inc. slouží k přeměně podřadného, odpadního tepla na elektrickou energii. Aby bylo možné dosáhnout optimálního výkonu vybraného modulu, je zapotřebí držet se při jeho aplikaci několika důležitých bodů. Tento modul je tedy složen ze 71 Bismut-Tellurových termočlánků zapojených elektricky do série. Pokud je přiložen tepelný zdroj, modul potřebuje pro svoji správnou funkci tepelný tok zhruba 8 W/cm^2 . Při teplotním spádu asi 200°C modul přemění okolo 5% tepelné energie na energii elektrickou. Pokud je modul správně nainstalován ve svém funkčním zařízení, je jeho životnost desítky tisíc hodin. Na následujícím **(Obr. 4-5)** je tento modul vyfocen a jsou zde dobře vidět teplá a studená strana článku.



Obr. 4-5 Modul HZ-20, nalevo je horká strana, napravo je studená strana [2]

4.4.1. Montáž modulu podle firmy Hi-Z Technology, Inc.

Nejlepší metoda při použití termočlánu HZ-20 je připevnit ho mezi tepelný zdroj a chladič a následně velkým tlakem stáhnout k sobě. Pro dosažení nejlepších výsledků je vyžadován minimální tlak 200 psi, což odpovídá asi tlaku 1,38 MPa. Je velice důležité striktně zajistit přenos tepelného výkonu přes povrch modulu, aby byl výsledný výkon co možná největší, a také aby bylo zabráněno poškození článku. Správně navržený a vyrobený systém pro přeměnu tepelné energie na energii elektrickou pomocí modulu HZ-20 musí splňovat a zajišťovat následující předpoklady:

- Namáhání tlakem
- Rozpínání teplem
- Rovnoměrné rozložení tlaku
- Přesah tepelného zdroje
- Tepelná oddělovací deska
- Plochost povrchu a teplovodivá pasta
- Tepelný most
- Horká strana modulu obsahuje na povrchu tečky

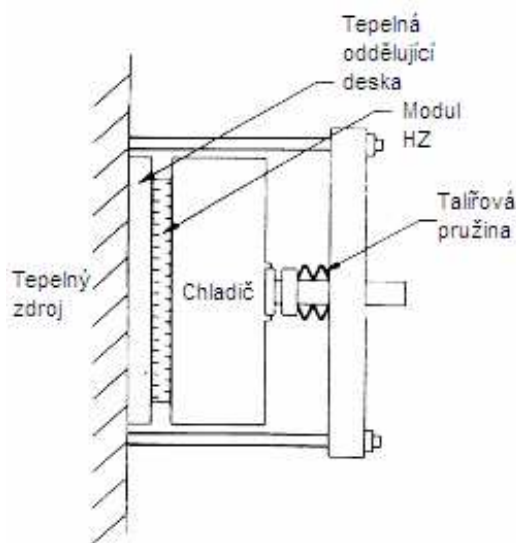
Namáhání tlakem

Pokud je modul dostatečně stlačený, je dobře zajištěno, že co nejlépe přiléhá k povrchu zdroje tepla a chladiče a přenos tepla skrze povrch modulu je poté maximální. Experimentálně bylo zjištěno, že ideální výsledky přestupu tepla jsou dosaženy při tlaku alespoň 1,38 MPa, jak již bylo výše uvedeno.

Rozpínání teplem

Při určování svírajícího tlaku je důležité brát ohled na tepelnou roztažnost modulu, která není zanedbatelná. Pravděpodobně ideálním způsobem, jak umožnit modulu roztažení teplem, je použít pro jeho přitlačení pružinu. Pokud je systém jednoduše spojen, rozpínání termočlánu může

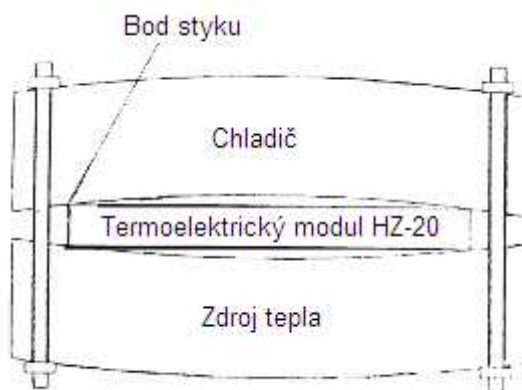
způsobovat příliš velký tlak, a nebo na druhou stranu díky jeho roztažení by mohlo dojít k degradaci spojovacích částí, což by mohlo následně vést naopak k poklesu přitlačného tlaku. Na **(Obr. 4-6)** je dobře vidět možné upevnění modulu k horké straně tepelného zdroje.



Obr. 4-6 Upevnění modulu k horké straně tepelného zdroje [2]

Rovnoměrné rozložení tlaku

Systém, který slouží k dobrému přitlačení tepelného zdroje a chladiče k modulu HZ-20, má důležitý význam pro celkový dosažený výkon z termočlánu. Pokud je modul mezi tepelným zdrojem a chladičem svírán v rozích a po stranách tohoto článku, je možné, že by mohlo dojít k ohybu v přitlačných plochách, což je vidět na následujícím **(Obr. 4-7)**.



Obr. 4-7 Ohyb u přitlačných ploch [2]

Tento ohyb, jak je z obrázku patrné, způsobí nadměrné síly na okrajové hrany modulu a také vznikne mezera nad střední částí modulu. Takovéto upevnění má poté za následek nerovnoměrné teploty procházející přes povrchy termočlánu, což jistě vede k získání nižšího výkonu z tohoto modulu. Takovýto způsob upevnění modulu může ovšem také vést k následnému odštěpování kousků termoelektrického materiálu. Dobrý způsob, jak minimalizovat tento škodlivý ohybový efekt, je použití silnějšího chladiče a části zajišťující zdroj tepla.

Přesah tepelného zdroje

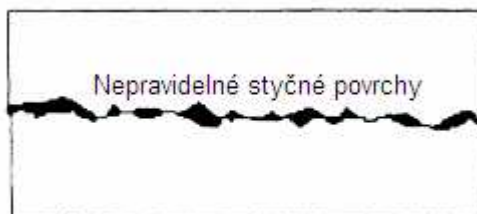
Maximálního výkonu termočlánu je dosaženo, pokud je teplotní rozdíl na ploše povrchu modulu nulový, jinak řečeno, pokud je přiváděné teplo rovnoměrně rozloženo po celé ploše modulu. Pokud by byl tepelný zdroj přiložený k termočlánu HZ-20 plošně menší, mohlo by docházet k tomu, že by byl modul na okrajích chladnější, což by vedlo k nežádoucímu poklesu výkonu odebíranému z modulu. Z tohoto důvodu je vhodné, aby byl zdroj tepla, respektive tepelná oddělovací deska o něco větší, co se týče jeho plošného rozměru, než samotný termočlánek, aby ke zmíněnému poklesu teplot na okrajích nemohlo docházet a tím byl odebíraný výkon z termočlánu co možná největší.

Tepelná oddělovací deska

Jak již bylo naznačeno v předešlém textu, mezi tepelný zdroj a termočlánek je vhodné umístit nějakou teplovodivou oddělovací desku, která slouží k lepšímu rozložení tepelného výkonu, který prochází přes modul. Tato teplovodivá deska by měla být z nějakého vhodného materiálu, kterým je například měď nebo hliník. Pokud si to způsob aplikace žádá, je klidně možné tuto desku umístit i mezi termočlánekový modul a chladič. Výrobce modulu HZ-20 udává, že by takováto teplovodivá deska měla mít tloušťku alespoň 0,25 palců.

Plochosť povrchu a teplovodivá pasta

Aby co největší množství tepla přivedeného tepelným zdrojem prostoupilo přes povrchy termočlánu, je žádoucí, aby byly styčné povrchy tepelného zdroje, modulu HZ-20 a také chladiče co nejvíce ploché bez různých drobných nerovností a nepravidelností. Výrobce tohoto modulu, firma Hi-Z Technology, uvádí, že nezbytná minimální rovnost povrchu je alespoň ± 0.001 palců a zároveň ale uvádí doporučenou rovnost styčného povrchu ± 0.0005 palců. Na následujícím (**Obr. 4-8**) je vidět, jakým způsobem na sebe můžou dosedat dvě plochy, pokud jsou jejich povrchy nerovné



Obr. 4-8 Příklad dosedání dvou nepravidelných styčných ploch [2]

Tyto nerovnosti v každém případě limitují výkon, který je možné z modulu získat. Je proto rozumné tyto nerovnosti pomocí vhodného média zacetit a k tomuto účelu zcela jistě dobře poslouží teplovodivá pasta, která tímto zlepšuje tepelnou vodivost mezi oběma povrchy. Nicméně by nemělo být této teplovodivé pasty nanášeno příliš velké množství, protože se tím může bránit přímému styku kov na kov, což může mít opačný účinek, a tedy tepelný přenos naopak snižovat.

Tepelný most

Významné snížení účinnosti, které bývá často opomíjeno, je tepelný most. Tepelný most je definován jako tepelná energie, která projde z horké strany do chladné strany, avšak neprojde skrz povrch termočlánu. Samozřejmě problém způsobují také kovové spojovací tyče, které odvádějí tepelnou energii z horké strany na chladnou stranu bez užitečného využití přechodem přes povrch modulu.

Horká strana povrchu obsahuje na povrchu tečky

Důležitým upozorněním je také správná instalace modulu do systému, kde horká strana termočlánu má na svém povrchu tečky, jak je vidět na (**Obr. 4-5**).



4.4.2. Izolační materiál sloužící ke spojení styčných ploch

Vrstva mezi modulem a tepelným zdrojem a mezi modulem a chladičem je velice kritický komponent termoelektrického systému. Povrch modulu je složený z kovových, elektrických vodičů, které obsahují N a P prvky modulu. Zásadní je, že tyto vodiče nejsou elektricky spojené. Je tedy nezbytné, aby byl mezi modul a tepelný zdroj a mezi modul a chladič umístěn izolační materiál. Pokud není ovšem tepelný zdroj nebo chladič z kovu, izolační materiál není nutný. Existuje několik možných izolačních materiálů, které přicházejí v úvahu pro použití v této aplikaci. Každý z nich má své výhody a také své nevýhody. Některé možné jsou:

- Impregnovaná silikonová podložka
- Krycí vrstva z tvrdě anodicky oxidovaného Al_2O_3 (korund)
- Izolační vrstva vytvořená katodovým rozprašováním (ve vakuu)
- Keramická destička
- Kapton
- Mica (Slída)

Jak bylo řečeno, každý z uvedených materiálů je v něčem lepší a také horší a záleží na konkrétní aplikaci a dostupnosti oněch materiálů, který je nejvhodnější použít.

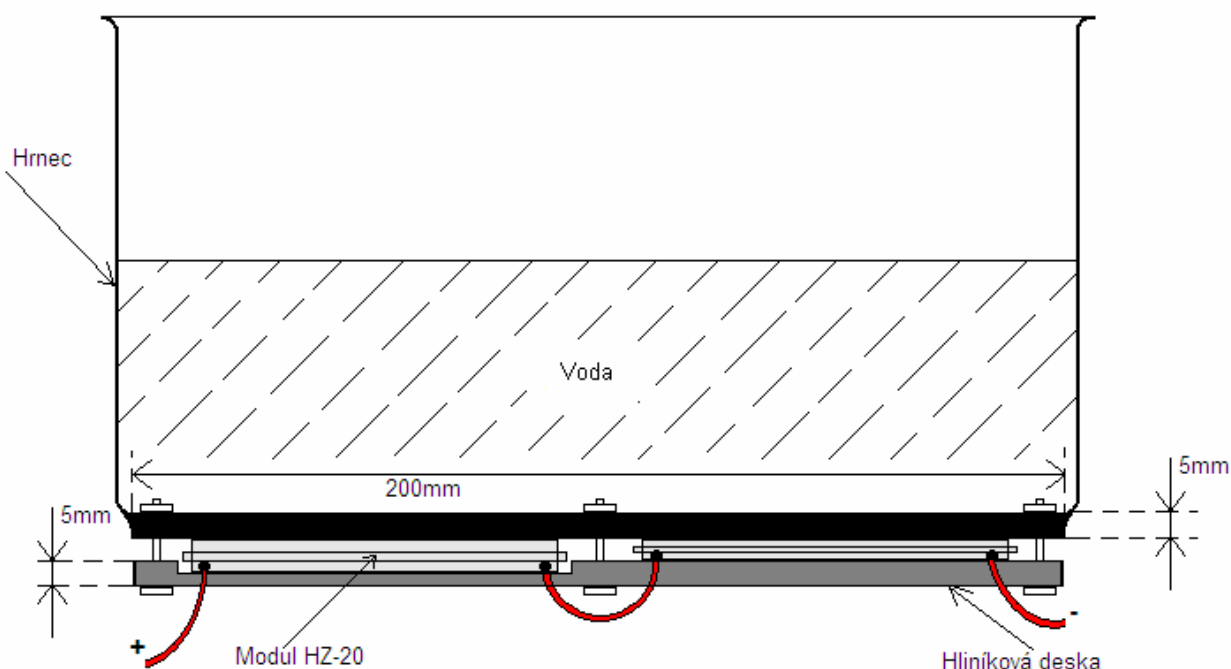


5. Konstrukční provedení nádoby na ohřev vody s termočláanky

V této části diplomové práce bylo úkolem dimenzovat a realizovat mechanické uspořádání ohřevné a chladicí aparatury termoelektrického generátoru s použitím dvou modulů HZ-20. V předešlých kapitolách již bylo naznačeno, že moduly budou využívat tepelnou energii z otevřeného ohně a po průchodu této energie jejich povrchem ho budou dále předávat do chladicího systému, kterým má být voda v nádobě. Tímto způsobem byl systém tudíž realizován a následně otestován.

V kapitole 4.4.1. bylo uvedeno, že mezi tepelný zdroj a samotný modul HZ-20 je vhodné umístit teplovodivou desku, která slouží k lepšímu a rovnoměrnému rozložení tepla na povrchu termočláanky a také někdy nemusí být snadné připevnit termočláanek ke zdroji přímo, ať už z technických důvodů nebo jiných. V našem případě má být zdrojem tepla otevřený oheň, takže použití teplovodivé desky bylo nezbytné. K tomuto účelu dobře poslouží deska z dostatečně tepelně vodivého materiálu, jako je měď nebo hliník. Tato deska by měla být dostatečně silná, aby nedocházelo při stažení k chladiči k nežádoucím ohybům, a také aby se deska nepokroutila při tepelném namáhání od tepelného zdroje. V této práci byla použita hliníková deska o tloušťce 5 mm, což je dostačující pro danou aplikaci, a aby byl zajištěn přesah tepelného zdroje přes povrch modulu, který má čtvercový půdorys o délce hrany 75 mm, byla vybrána deska o dostatečné šířce 120 mm. Jelikož byly ke zdroji umístěny dva moduly HZ-20, byla zvolena délka podkladové desky 205 mm, což současně koresponduje s průměrem dna nádoby s vodou. Tato hliníková deska je slitinou o chemickém složení AlMgSi0,5.

Dalším úkolem bylo zvolit vhodnou nádobu, ve které by se voda vařila a sloužila tak jako chladicí médium. Původní myšlenka byla tuto nádobu na vodu vyrobit například z měděného plechu přímo na rozměry modulů, ale po zvážení možností bylo nakonec rozhodnuto, že nejrozumnější a nejsnadnější řešení je k tomuto účelu použít hrnec. Vybraný hrnec musel splňovat určité požadavky, jako jsou jeho geometrické rozměry a také musel mít dostatečnou tloušťku dna. Důvod je podobný jako u podkladové desky u tepelného zdroje. Větší síla dna je žádoucí, aby nedošlo k ohýbání při upnutí k termočláanky. Materiál dna ovšem musí být dobře vodivý, protože v opačném případě by na dně vznikl příliš velký teplotní spád, což by způsobilo nežádoucí zvýšení teploty studené strany termočláanky. Na následujícím (**Obr. 5-1**) je vidět konstrukční provedení nádoby na ohřev vody, čili chladič s umístěnými termočláanky. Na tomto obrázku je také ukázáno, že moduly HZ-20 nemají stejnou tloušťku, i když mají oba stejný výkon 19W. Tento fakt byl poněkud znepokojující, protože se tím zkomplikovalo upevnění modulů mezi teplou a chladnou stranu systému. Pravděpodobně při výrobě nezáleží na absolutní přesnosti a vyráběné moduly potom mohou mít jisté rozmezí tloušťky, což bylo v našem případě zhruba milimetr. Z tohoto důvodu musela být uzpůsobena teplovodivá deska na teplé straně, a to tím způsobem, že na jedné straně desky byl vyfrézován pás o šířce modulu, což je asi 7,5cm. Nicméně na funkci přenosu tepla to nemá žádný vliv. Spíš se dá říct, že se tím nakonec usnadnilo připevnění obou modulů mezi teplou stranu a chladič, protože díky drážkám držely moduly pevně a neměly tendenci se hýbat. Všechny části byly k sobě připevněny pomocí šesti šroubů, pomocí kterých mohl být na termočláanky vyvinut dostatečný tlak potřebný ke správné funkci modulů, jak již bylo uvedeno v kapitole 4.4.1. Problém však mohl nastat s těsněním ze strany chladicí nádoby s vodou, protože by mohla voda z nádoby protékat. Z tohoto důvodu bylo pod matky přidáno teflonové těsnění, které je dostatečně tepelně odolné.



Obr. 5-1 Konstrukční uspořádání systému s termočlánky

5.1. Testování nouzového zdroje energie

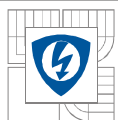
V následujícím textu je uveden postup, jakým byl zkoušen systém na nouzovou výrobu elektrické energie pomocí termoelektrických generátorů, jakých bylo dosaženo výsledků měření a jaké závěry byly z tohoto měření vyvozeny.

5.1.1. Výpočet a ověření tepelných vlastností modulu HZ-20

Nejprve bylo třeba ověřit výrobcem uváděné tepelné vlastnosti termoelektrického modulu HZ-20, u kterého jsou uváděny následující parametry. Trvalá maximální teplota horké strany modulu smí být $t_h = 230^\circ\text{C}$, krátkodobě však smí být až $t_{h\max} = 400^\circ\text{C}$ a teplota studené strany modulu má být udržována na teplotě $t_c = 30^\circ\text{C}$. Z těchto údajů vyplývá, že nominální tepelný spád na modulu je $\Delta t = 200^\circ\text{C}$, čemuž odpovídají další uvedené elektrické veličiny. Vnitřní odpor tohoto termočlánku je $R_i = 0,3\Omega$, jmenovitý proud modulu je $I = 8\text{A}$, maximální napětí pod zátěží $U_{\max} = 2,38\text{V}$, přičemž napětí naprázdno je $U_0 = 5\text{V}$. Termočlánek přitom pracuje při účinnosti $\eta = 4,5\%$. Výrobce uvádí měrnou tepelnou vodivost $\lambda = 0,024\text{W/cm}\cdot\text{K}$, a to při měrném tepelném toku $dP/dS = 9,54\text{W/cm}^2$. Nyní se dalo spočítat, jaký skutečný tepelný výkon prochází přes moduly. Už se přímo do výpočtu zahrnuly oba termočlánky. Výsledný povrch obou modulů byl tedy dvojnásobný podle $S = 2 \cdot 7^2\text{cm}^2 = \underline{98\text{cm}^2}$ a následně mohlo být dosazeno do vzorce pro výpočet skutečného tepelného výkonu P_1 podle:

$$P_1 = \frac{dP}{dS} \cdot S = 9,54 \cdot 98 = \underline{935\text{W}} \quad (5-1)$$

Když byl spočítán tepelný výkon dodávaný do termočlánků, dal se spočítat elektrický výkon obou modulů pomocí výrobcem udávané účinnosti 4,5%, a to dle následující rovnice:



$$P_2 = P_1 \cdot \eta = 935 \cdot 0,045 = \underline{\underline{42W}} \quad (5-2)$$

Tímto výpočtem bylo ověřeno, že data uváděná firmou Hi-Z Technology, Inc., která tyto moduly vyrábí, jsou v pořádku. Rovnice (5-2) je výsledný elektrický výkon pro oba termočlánky a po vydělení dvěma je tento výkon zhruba 20W, což je očekávaný výsledek. Nyní bylo možné spočítat pomocí měrné tepelné vodivosti skutečnou tepelnou vodivost obou modulů podle jejich skutečných parametrů:

$$\Lambda = \lambda \cdot \frac{S}{l} = 0,024 \cdot \frac{98}{0,4} = \underline{\underline{5,88W / K}} \quad (5-3)$$

Rozměr l je tloušťka modulu, a protože byl každý modul jinak silný, uvažovala se průměrná hodnota 0,4cm. Po spočtené vodivosti termočlánků bylo už snadné vyjádřit tepelný odpor modulů podle rovnice:

$$R_t = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{5,88} = \underline{\underline{0,17K / W}} \quad (5-4)$$

5.1.2. Volba a výpočet tepelné vodivosti styčné teplovodivé podložky

V kapitole 4.4.2. bylo uvedeno, jaké jsou možnosti použití teplovodivé podložky, která má sloužit ke spojení styčných elektricky vodivých ploch. V našem případě přicházely v úvahu buď silikonová podložka s označením WG nebo kaptonová podložka Kap 218, která se používá k připevnění tranzistorů. Silikonová podložka WG má udávanou měrnou tepelnou vodivost $\lambda = 1,13W/m \cdot K$, přičemž jeho tloušťka je 0,2mm. Nyní bylo možné vypočítat přímo tepelný odpor tepelné podložky z tohoto materiálu podle následující rovnice:

$$R_{WG} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{1,13} \cdot \frac{0,0002}{0,07^2} = \underline{\underline{0,036K / W}} \quad (5-5)$$

Druhým možným řešením bylo použít kaptonovou podložku Kap 218, u které je uváděna měrná tepelná vodivost $\lambda = 0,45W/m \cdot K$, avšak síla této podložky je jen 0,077mm. Pomocí stejného vztahu jako u výpočtu s materiálem WG se postupovalo i v tomto případě:

$$R_{KAP} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,45} \cdot \frac{0,000077}{0,07^2} = \underline{\underline{0,035K / W}} \quad (5-6)$$

Je vidět, že pro danou aplikaci je téměř jedno, který materiál bude k tomuto účelu použit, protože celkové tepelné odpory u obou vyšly téměř stejně. Vzhledem k tomu, že silikonová podložka WG měla příhodnější plošné rozměry hodící se k tomuto účelu, byla použita. Tato podložka musela být umístěna mezi modul HZ-20 a hliníkovou desku ze strany tepelného zdroje a také mezi modul a chladič, z čehož vyplývá, že byly potřeba čtyři kusy podložek. Při výsledném sestavení systému byla tedy posloupnost vrstev hliníková deska ze strany tepelného zdroje, tepelná izolační podložka, modul HZ-20, opět tepelná izolační podložka a nakonec chladič. Na každou stykovou plochu bylo ještě třeba nanést teplovodivou pastu, která sloužila k lepšímu přestupu tepla mezi jednotlivými plochami a také vyrovnala mírné nerovnosti mezi nimi.

5.1.3. Měření s termočláanky HZ-20

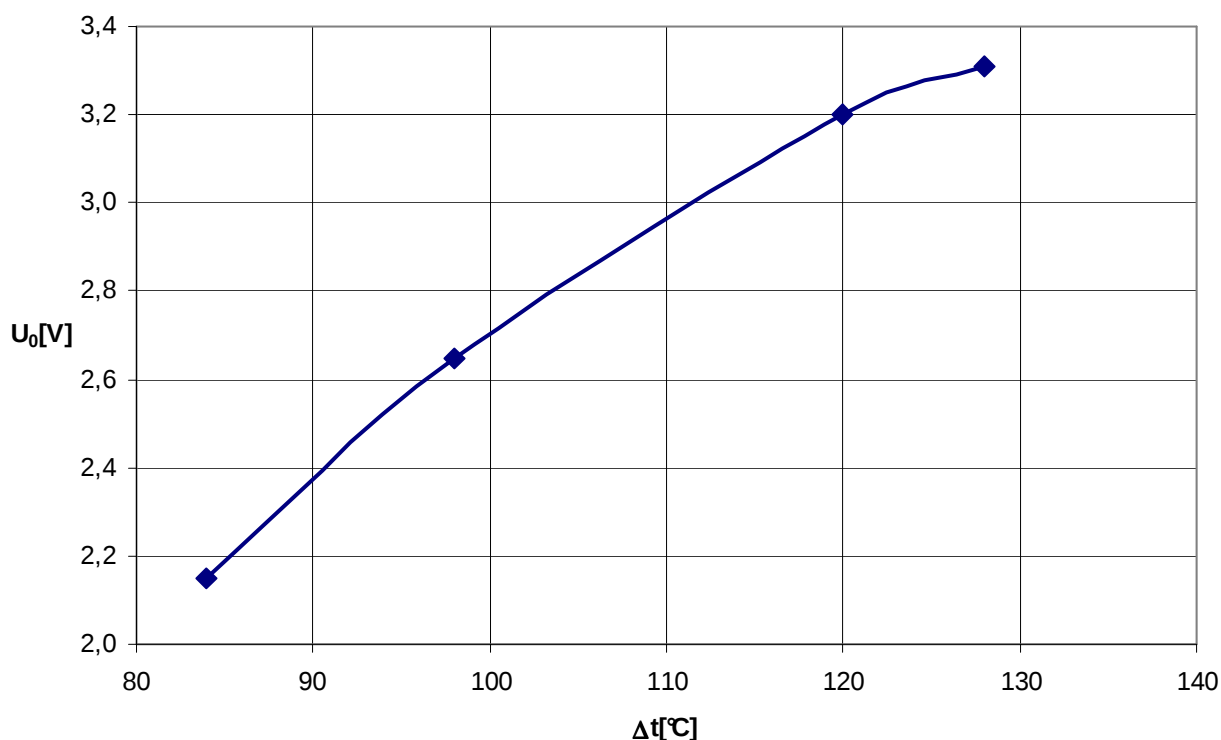
V této kapitole je uveden postup při měření a dosažené výsledky z něj. Jako tepelný zdroj při měření posloužil vaříč s topnou spirálou. Bylo poměrně těžké pomocí tohoto zdroje přivádět do modulů požadovaný tepelný výkon vzhledem k jeho nepřesnému nastavování, protože jednotlivé stupně nastavitelných výkonů nebyly v podstatě uvedeny. Proto musela být pečlivě hlídána teplá strana termočláanky, která by měla být při jmenovitém výkonu asi 230°C. V následující tabulce jsou vidět výsledné hodnoty z tohoto měření.

Tabulka naměřených hodnot na modulech HZ-20		
Teplota studené strany	Teplota horké strany	Napětí naprázdno
t_c [°C]	t_h [°C]	U_o [V]
31	115	2,15
33	131	2,65
35	155	3,20
36	164	3,31

Tab. 5-1 Výsledné hodnoty z měření na dvou sériově zapojených modulech HZ-20

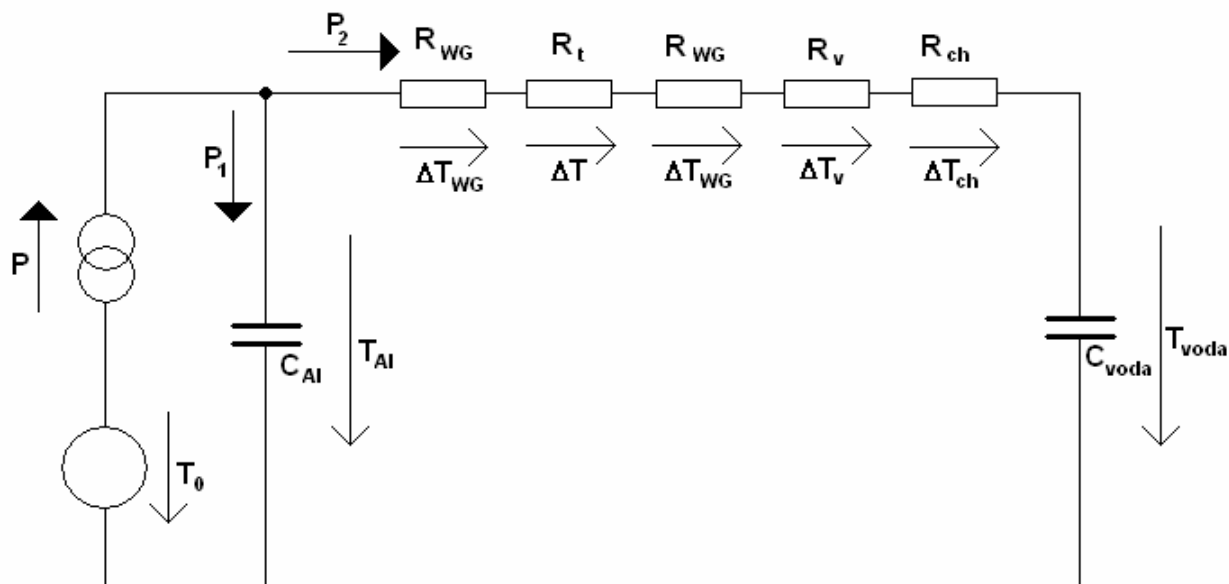
Tyto naměřené hodnoty jsou dále zpracovány do grafu, který je zde uveden.

Závislost napětí naprázdno na teplotním rozdílu



Obr. 5-2 Závislost napětí naprázdno na teplotním rozdílu

Na první pohled je patrné, že dosažené výsledky z tohoto měření, nesplnily očekávání, protože by tyto dva moduly zapojené do série měly naprázdno podávat napětí o hodnotě zhruba $U_0 = 10V$. Nyní bylo tedy třeba zjistit, v čem se udělala chyba. Bylo proto důležité spočítat níže uvedený tepelný obvod z (Obr. 5-3), aby se zjistilo, v jaké části dochází k velikému tepelnému spádu, a tudíž ke ztrátě energie.



Obr. 5-3 Tepelný obvod nouzového zdroje elektrické energie

Na (Obr. 5-3) jsou tyto veličiny: T_0 je teplota okolí, P je celkový tepelný výkon, P_1 je tepelný výkon potřebný k nabití tepelné kapacity hliníkové desky C_{Al} , přičemž je na ní T_{Al} , P_2 je potom tepelný výkon tekoucí přes tepelné odpory silikonových podložek R_{WG} , modulů HZ-20 R_t , vzduchových bublin R_v a dna chladicí nádoby s vodou R_{ch} , na nichž vznikají tepelné úbytky ΔT_{WG} , ΔT , ΔT_v a ΔT_{ch} , a který nakonec teče do tepelné kapacity vody C_{voda} . Ta má teplotu T_{voda} .

a) Nejprve bylo důležité určit tepelný úbytek na modulech HZ-20, z čehož se dá potom vypočítat tepelný výkon, který prochází přes termočlánky. K tomuto účelu bylo za potřeby provést měření, kdy do celého systému vstupuje konstantní tepelný výkon, který nejprve nabíjí tepelnou kapacitu hliníkové desky a poté již vstupuje celý do tepelných odporů a tepelné kapacity vody. Výsledky z tohoto měření jsou patrné z následující tabulky, kdy se již ustálil tepelný výkon P_2 , což platí, když tepelný výkon vstupující do tepelné kapacity hliníkové desky jde k nule ($P_1 \rightarrow 0$).

Tabulka naměřených hodnot po ustálení			
Teplota studené strany	Teplota horké strany	Napětí naprázdno	Přízp. napětí 1čl
t_c [°C]	t_h [°C]	$U_{0,2čl}$ [V]	$U_{matched,1čl}$ [V]
43,0	131,8	1,900	0,475
46,2	135,0	1,914	0,479
48,0	137,0	1,914	0,479

Tab. 5-2 Naměřené a vypočtené hodnoty při ustálení



Naměřené hodnoty napětí termočlánků naprázdno $U_{0,2\ell}$ musely být přepočítány na napětí jednoho článku, a to na přizpůsobené napětí při zatížení $U_{\text{matched},1\ell}$. Napětí jednoho modulu musí být tedy dvakrát menší a navíc výkonově přizpůsobené napětí poloviční oproti napětí naprázdno. Pro toto výsledné napětí proto platí

$$U_{\text{matched},1\ell} = \frac{U_{0,2\ell}}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{U_{0,2\ell}}{4}.$$

Z těchto vypočtených hodnot musela být potom vypočtená průměrná hodnota, která je přibližně rovna $U_{\text{matched},1\ell} = 0,48\text{V}$. Pomocí této vypočtené hodnoty nyní bylo možné odečíst z grafu (**Obr. 4-3**) teplotní rozdíl, který je roven $\Delta T = 40^\circ\text{C}$. Tepelný výkon procházející přes termočlánky je tedy v ustáleném stavu roven celkovému tepelnému výkonu dodávanému zdrojem tepla ($P = P_2$) a jde vypočítat podle vztahu:

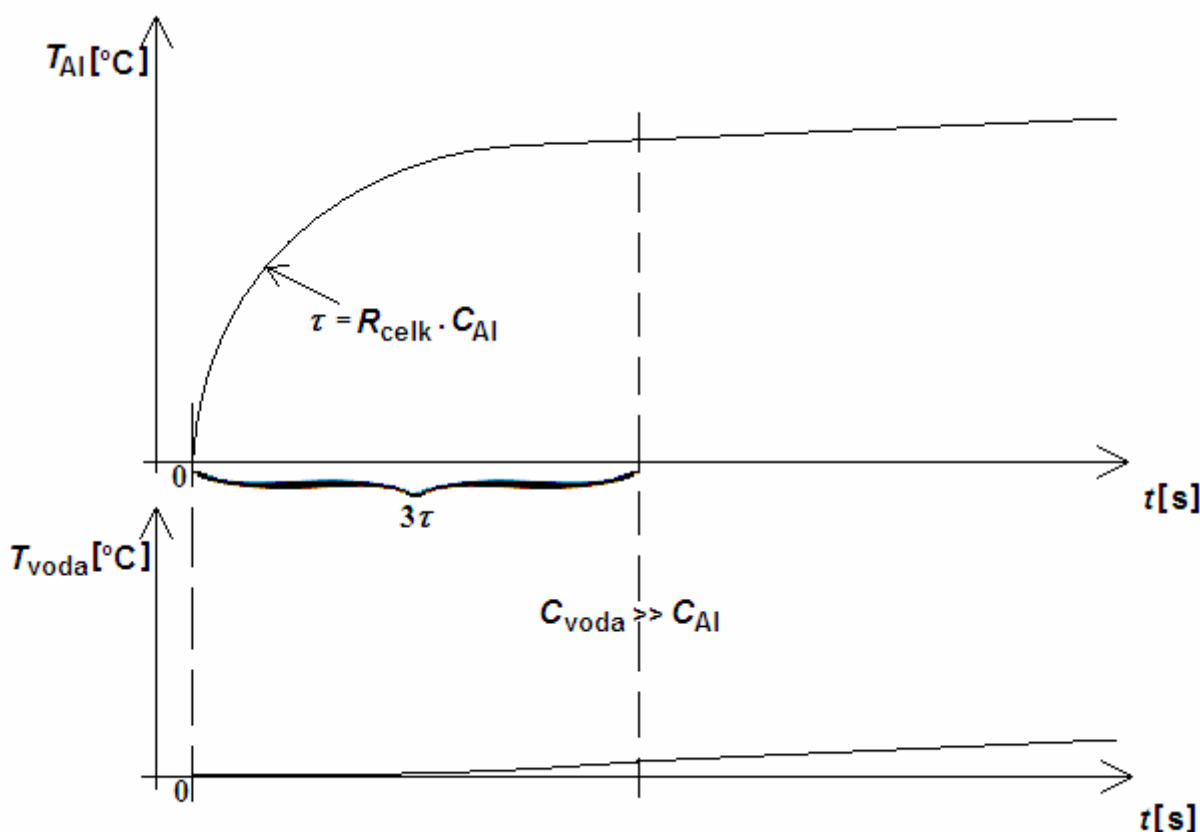
$$P = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{40}{0,17} = \underline{\underline{235\text{W}}} \quad (5-7)$$

Při postupném nabíjení tepelné kapacity hliníkové desky se tepelný výkon vstupující do ní zmenšuje, až nakonec klesne na nulu, což je vidět na následující rovnici,

$$P_1 = C_{Al} \cdot \frac{dT_{Al}}{dt} \rightarrow 0 \quad (5-8)$$

pro kterou platí v ustáleném stavu, že derivace, tedy změna teploty hliníkové desky je nulová.

b) Dále bylo třeba spočítat celkový tepelný odpor R_{celk} , který byl vyjádřený v čase $t > 3\tau$, kdy již celý tepelný výkon P vstupuje do celkového tepelného odporu R_{celk} , protože kapacita hliníkové desky je již nabitá. Tato situace je znázorněná na (**Obr. 5-4**).



Obr. 5-4 Růst teploty hliníkové desky a vody, tepelná časová konstanta



Tato situace platí pro případ, kdy tepelná kapacita vody je mnohem větší než tepelná kapacita hliníkové desky, což platí dobře v případě, že v nádobě je velké množství vody. Z obrázku je vidět, že po ustálení systému, tedy po uplynutí doby $t > 3\tau$, kdy už je nabitá tepelná kapacita hliníkové desky, teplota hliníkové desky a vody souměrně lineárně narůstá, protože dodávaný tepelný výkon je stále stejný $P = \text{konst.}$ Po ustálení totiž platí pro teplotu vody v nádobě vztah

$$T_{\text{voda}} = T_0 + \frac{1}{C_{\text{voda}}} \cdot \int P \cdot dt \quad (5-9)$$

a při konstantním tepelném výkonu je výsledná teplota vody lineárně rostoucí funkce. Pro celkový tepelný odpor potom platí níže uvedená rovnice.

$$R_{\text{celk}} = \frac{T_{\text{Al}} - T_{\text{voda}}}{P} = \frac{137 - 48}{235} = \frac{89}{235} = \underline{\underline{0,379 \text{ K/W}}} \quad (5-10)$$

Tato hodnota tepelného odporu je jistě dost velká vzhledem k tomu, že tepelný odpor modulů je jen 0,17 K/W.

c) Nyní bylo třeba spočítat tepelný úbytek na tepelných silikonových izolačních podložkách WG, který bylo možné určit z následující rovnice, která platí pro jednu fólii paralelně u dvou termočlánků. R_{WG} je tedy 0,018 K/W.

$$\Delta T_{\text{WG}} = P \cdot R_{\text{WG}} = 235 \cdot 0,018 = \underline{\underline{4,2^\circ \text{C}}} \quad (5-11)$$

Tento tepelný spád na fólii se zdá být vcelku zanedbatelný, avšak tyto fólie jsou zde dvě a navíc toto měření nebylo prováděno při maximálním dodávaném výkonu. Při něm by tedy byl výraznější.

d) Dalším úkolem bylo určit tepelný úbytek vznikající na dně nádoby a také na vzduchových bublinách vzniklých mezi jednotlivými vrstvami styčných ploch. Výsledný vztah je níže uvedený.

$$\Delta T_v + \Delta T_{\text{ch}} = T_{\text{Al}} - T_{\text{voda}} - \Delta T - 2\Delta T_{\text{WG}} = 137 - 48 - 40 - 2 \cdot 4,2 = \underline{\underline{40,6^\circ \text{C}}} \quad (5-12)$$

Je tedy vidět, že tento tepelný úbytek tvoří velmi výraznou část z celkového tepelného spádu.

e) Nakonec zbývalo ještě určit společný tepelný odpor dna nádoby a bublin mezi styčnými plochami jednotlivých vrstev, a to podle uvedeného vztahu.

$$R_v + R_{\text{ch}} = \frac{\Delta T_v + \Delta T_{\text{ch}}}{P} = \frac{40,6}{235} = \underline{\underline{0,173 \text{ K/W}}} \quad (5-13)$$

Z výsledné hodnoty je patrné, že tepelný odpor dna nádoby a bublin je velký přibližně jako tepelný odpor modulů HZ-20 a vzniká na nich tedy i podobný teplotní úbytek.

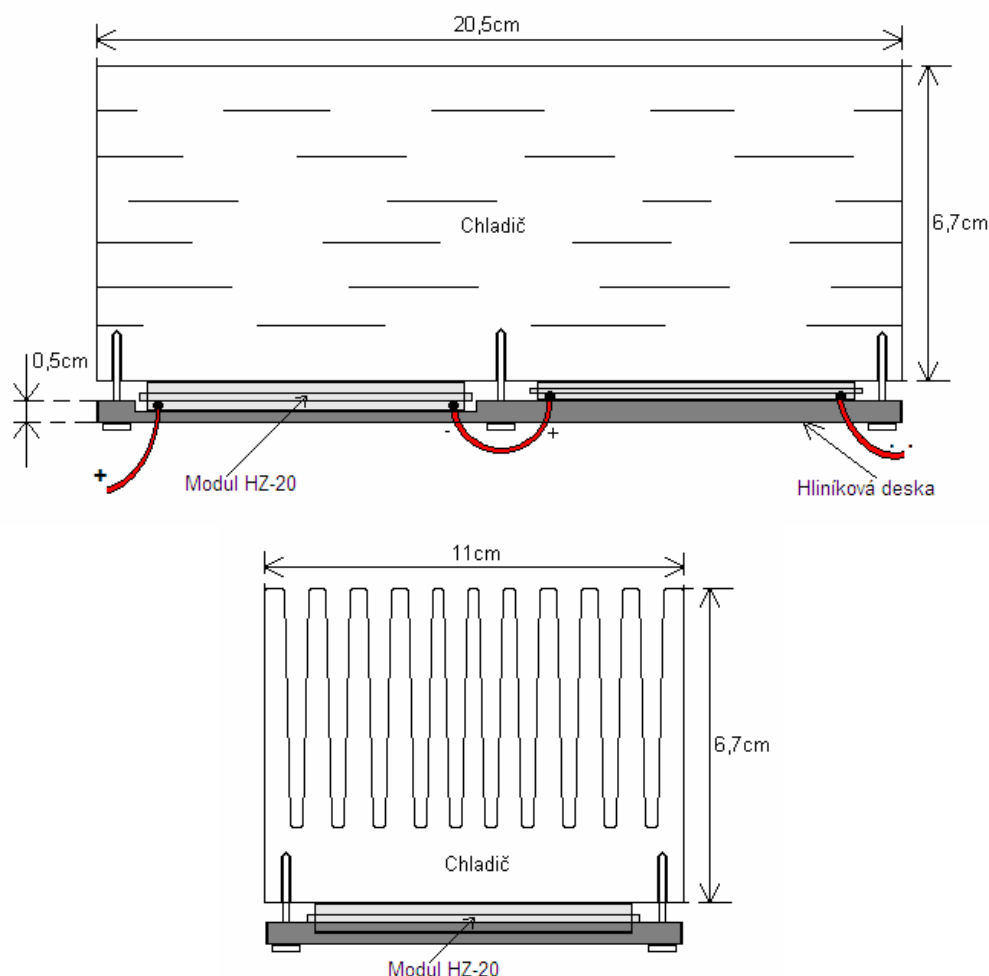
Z tohoto měření je vidět, že dosažené výsledky nejsou vůbec uspokojivé. Bylo zjištěno, že největším problémem zabráňujícím správnému chodu a funkci termočlánků je použitá nádoba, silikonové izolační podložky a vzduchové bubliny mezi styčnými plochami. Dno nádoby je složeno částečně z nerezů a dále z blíže neurčené slitiny kovů a bohužel má dno příliš velký tepelný odpor a vzniká tak na něm větší tepelný úbytek. Nezanedbatelnou částí, na které se ztrácel tepelný výkon, jsou také silikonové izolační podložky ještě ve spojení s teplovodivou pastou. Je nutné konstatovat, že silikonová podložka tohoto typu není pro tuto aplikaci příliš vhodná, a to nejen kvůli svému tepelnému odporu, ale také kvůli tomu, že není dimenzována na takové teploty, kterými byla v této

aplikaci namáhána. Avšak pravděpodobně asi největší překážkou stojící v cestě účinnému využití modulů HZ-20 byly miniaturní vzduchové prostory vzniklé mezi jednotlivými styčnými plochami. Nejhorší situace jistě byla na styku dna nádoby s termočlánky. Dno bohužel nebylo zcela ploché, a tudíž muselo být vyrovnáváno. To však nešlo udělat naprosto dokonale, a tak na něm vznikly určité nerovnosti, které byly hlavní příčinou vzniku vzduchových bublin.

Bylo tedy nutné udělat jisté kroky, které situaci zlepší. Místo silikonových izolačních podložek musely být použity podložky s menším tepelným odporem a použitelné do vyšších teplot. K tomuto účelu dobře posloužily keramické podložky, které disponují mnohem lepšími tepelnými vlastnostmi. Namísto nádoby s vodou, kterou byl hrnec, bylo nutné požit hliníkový chladič, který má dostatečnou tloušťku a je zcela plochý, čímž se zabrání vzniku zmíněných bublin. Pro lepší odvod tepla z chladiče posloužil zpočátku přídatný ventilátor a na tomto systému bylo opět provedeno příslušné měření.

5.2. Měření s moduly HZ-20 při použití chladiče s pomocným ventilátorem

Jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, při použití chladicí nádoby s vodou nebylo dosaženo očekávaných a dostatečných výsledků především z důvodu nedokonalé rovného dna nádoby. Z tohoto důvodu byl použitý chladič, u kterého byl tento problém prakticky odstraněn. Druhá změna, byla provedena u izolačních podložek. Namísto prvotně použitých silikonových podložek s označením WG byly použity keramické izolační podložky na bázi Al_2O_3 , které se vyznačují výrazně vyšší měrnou tepelnou vodivostí a mohou být namáhány také podstatně vyššími teplotami. Na následujícím obrázku (**Obr. 5-5**) je vidět uspořádání modulů a chladiče.



Obr. 5-5 a,b Náčrty uspořádání modulů a chladiče ze dvou pohledů

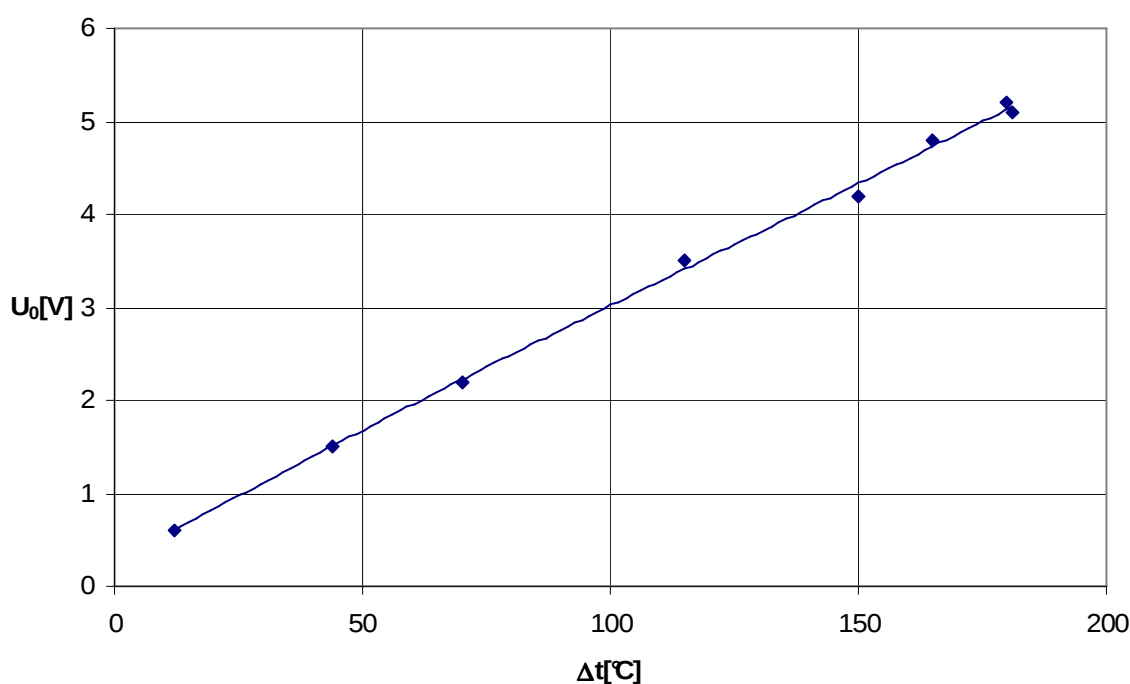
K chladiči byl ještě přidán pomocný ventilátor pro lepší odvod tepla z chladiče, aby byla udržována studená strana termočlánků na co možná nejnižší teplotě a s tímto uspořádáním bylo následně provedeno měření, jehož výsledky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka naměřených hodnot na modulech HZ-20		
Teplota studené strany	Teplota horké strany	Napětí naprázdno
t_c [°C]	t_h [°C]	U_o [V]
23	35	0,6
26	70	1,5
30	100	2,2
40	155	3,5
50	200	4,2
60	225	4,8
70	250	5,2
74	255	5,1

Tab. 5-3 Výsledné měření s moduly při použití chladiče s ventilátorem

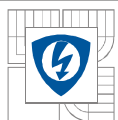
V níže uvedeném grafu jsou zpracovány výsledky z tohoto měření.

Závislost napětí naprázdno na rozdílu teplot



Obr. 5-6 Napětí naprázdno v závislosti na teplotě při použití chladiče s ventilátorem

Jak je patrné z tohoto grafu a naměřených výsledků, bylo při použití chladiče s přidavným ventilátorem dosaženo lepších výsledků, než v původní verzi s chladičí nádobou, nicméně výstupní napětí naprázdno ze dvou do série zapojených modulů HZ-20 by mělo být v ideálním případě při maximálním tepelném spádu až 10V, jak uvádí výrobce těchto termočlánků. Nejvyšší naměřená hodnota však byla zhruba poloviční, a to 5,2V. Napětí, které odpovídá jednomu termočlánku a



přizpůsobené při zatížení bylo podle vztahu $U_{matched,1\ell l} = \frac{U_{0,2\ell l}}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{U_{0,2\ell l}}{4}$ vypočteno na hodnotu 1,3V, čemuž podle grafu na **(Obr. 4-3)** odpovídá teplotní rozdíl přibližně $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$. Jak je ovšem vidět z tabulky naměřených hodnot, změřený tepelný spád celého systému byl 180°C , což znamená, že využitý tepelný výkon připadající na moduly je pouze o něco více než polovina z celkového tepelného výkonu dodávaného do systému. Je ovšem jisté, že měření bylo zatěžkáno do značné míry chybami, nicméně k porovnání je to dostačující.

5.3. Měření s moduly po úpravě na vodní chlazení

Je jisté zřejmé, že jisté zlepšení přineslo použití keramických izolačních destiček s podstatně lepší měrnou tepelnou vodivostí $\lambda = 25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Celkový tepelný odpor těchto destiček se vypočítal podle následující rovnice,

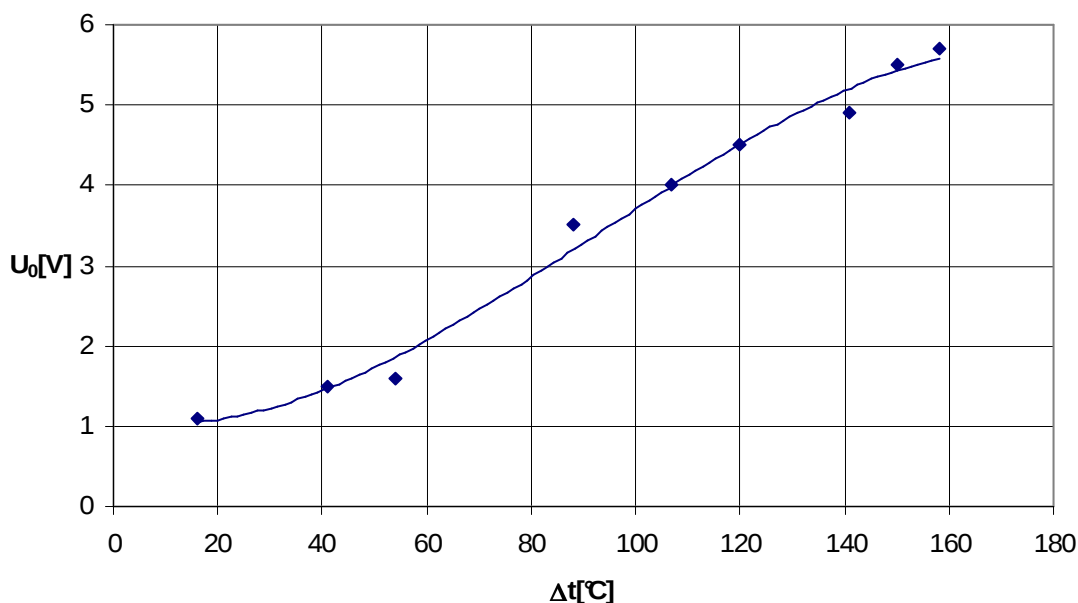
$$R_{KER} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{25} \cdot \frac{0,001016}{0,07^2} = \underline{\underline{0,0083\text{K} / \text{W}}} \quad (5-14)$$

čímž se celkový tepelný odpor izolačních podložek snížil asi čtyřnásobně. I tak ale byly tepelné úbytky příliš velké na to, aby bylo možné z modulů získat vyšší napětí. Problémem bylo udržet chladnou stranu termočlánků na dostatečně nízké teplotě, čímž by se zajistil o dost lepší výsledek při stejném dodávaném tepelném výkonu. Podle charakteristik uváděných výrobcem je nejlepší varianta udržovat teplotu chladné strany asi na hodnotě $T_c = 30^{\circ}\text{C}$. Z předešlého měření je vidět, že teplota chladné strany zde poměrně značně stoupá až na hodnoty okolo $T_c = 70^{\circ}\text{C}$ a tato hodnota by nadále stoupala, jelikož hliníkový chladič v kombinaci s pomocným ventilátorem nebyl schopný odvádět tento tepelný výkon dále do okolí a stále více se ohříval. Z předešlých měření bylo zjištěno, že lepší variantou chlazení studené strany je vodní chlazení, a to v ideálním případě s cirkulací, avšak pro dané měření posloužila nádoba se stojící vodou, ale s dostatečným množstvím, aby byla tepelná kapacita vody v nádobě co možná největší. K tomuto účelu posloužil již použitý hliníkový chladič, kolem kterého byla připevněna plechová ohrádka pomocí silikonu, který spoje také dostatečně utěsnil. Po této finální úpravě bylo opět provedeno základní měření, jehož výsledné hodnoty jsou uvedeny níže v tabulce **(Tab. 5-4)** a také v grafické podobě na **(Obr. 5-7)**.

Tabulka naměřených hodnot při vodním chlazení		
Teplota studené strany	Teplota horké strany	Napětí naprázdno
$t_c [^{\circ}\text{C}]$	$t_h [^{\circ}\text{C}]$	$U_0 [\text{V}]$
24	40	1,1
24	65	1,5
26	80	1,6
27	115	3,5
28	135	4,0
30	150	4,5
34	175	4,9
40	190	5,5
42	200	5,7

Tab. 5-4 Měření s moduly HZ-20 s vodním chlazením

Závislost napětí naprázdno na rozdílu teplot



Obr. 5-7 Napětí naprázdno v závislosti na teplotě při vodním chlazení

Z uvedených naměřených výsledků je vidět, že k mírnému vylepšení stavu došlo. Toto opatření bylo provedeno především z toho důvodu, že navržený zvyšující měnič začíná fungovat až od dosažení vstupního napětí minimálně 5V a s tímto uspořádáním systému s termočlánky je toho dosaženo.

5.3.1. Výpočet účinnosti soustavy s termočlánky HZ-20

Pro výpočet celkové účinnosti soustavy s moduly HZ-20 bylo potřeba nejprve zjistit celkový tepelný výkon, který je dodáván pomocí elektrického vaříče do systému. Naměřené hodnoty napětí termočlánků naprázdno $U_{0,2\text{čl}}$ musely být přepočítány na napětí jednoho článku, a to na přizpůsobené napětí při zatížení $U_{\text{matched},1\text{čl}}$. Takto byla přepočtena maximální hodnota napětí naprázdno $U_{0,2\text{čl}} = 5,7\text{V}$. Napětí jednoho modulu musí být tedy dvakrát menší a navíc výkonově přizpůsobené napětí poloviční oproti napětí naprázdno. Pro toto výsledné napětí proto platí

$$U_{\text{matched},1\text{čl}} = \frac{U_{0,2\text{čl}}}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{U_{0,2\text{čl}}}{4}. \quad (5-15)$$

Z této rovnice byla poté vypočtena hodnota napětí, která je rovna $U_{\text{matched},1\text{čl}} = 1,425\text{V}$. Pomocí této vypočtené hodnoty nyní bylo možné odečíst z grafu (**Obr. 4-3**) teplotní rozdíl připadající na modul HZ-20, který je roven $\Delta T = 110^\circ\text{C}$. Tepelný výkon procházející přes termočlánky je tedy v ustáleném stavu roven celkovému tepelnému výkonu dodávanému zdrojem tepla a jde určit podle vztahu

$$P_1 = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{110}{0,17} = 647\text{W} \quad (5-16)$$

Tato hodnota se dá považovat za celkový tepelný výkon vstupující do soustavy v případě, že se jedná o ustálený stav, což je poměrně dobře splněno.



Dále bylo nutné určit maximální elektrický výkon odebíraný ze soustavy s termočláanky podle naměřených hodnot. Maximální napětí naprázdno ze dvou modulů v sérii muselo být přepočteno na přizpůsobené napětí při zatížení a platí proto rovnice

$$U_{matched,2\ell} = \frac{U_{0,2\ell}}{2} = \frac{5,7}{2} = \underline{\underline{2,85V}} \quad (5-17)$$

Vnitřní odpor dvou modulů zapojených elektricky do série má tedy dvojnásobnou velikost a je roven $R_{i,2\ell} = 2 \cdot R_i = 2 \cdot 0,3 = \underline{\underline{0,6\Omega}}$. Je také jisté, že maximální možný odebíraný elektrický výkon z modulů musí být při platnosti výkonového přizpůsobení zajištěn při rovnosti zátěžného odporu a vnitřního odporu tohoto napěťového zdroje s termočláanky, tedy $R_z = R_i = \underline{\underline{0,6\Omega}}$ a potom je tedy výstupní výkon P_2 roven vztahu

$$P_2 = \frac{U_{matched,2\ell}^2}{R_z} = \frac{2,85^2}{0,6} = \underline{\underline{13,54W}} \quad (5-18)$$

Nyní už bylo snadné vypočítat celkovou účinnost systému s termočláanky podle rovnice,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{13,54}{647} \cdot 100 = \underline{\underline{2,1\%}} \quad (5-19)$$

což je opravdu velmi malá hodnota účinnosti, avšak do jisté míry očekávaná. S využitím vypočteného celkového výkonu P_1 bylo možné také určit celkový tepelný odpor soustavy podle následující rovnice

$$R_{celk} = \frac{\Delta T_{celk}}{P_1} = \frac{t_h - t_c}{P_1} = \frac{200 - 42}{647} = \underline{\underline{0,244K/W}} \quad (5-20)$$

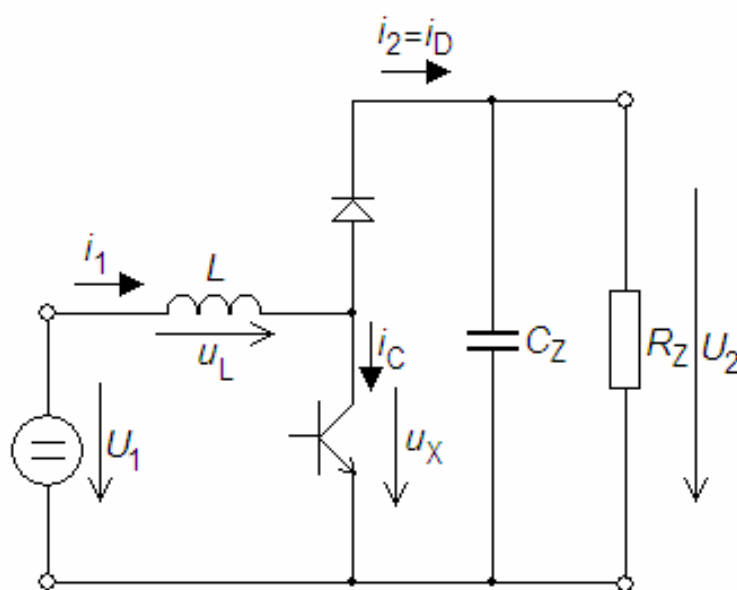
Tato hodnota tepelného odporu je dost velká, protože tepelný odpor modulů je $R_t = 0,17K/W$, tepelný odpor dvou vrstev keramických destiček je $R_{KER} = 0,017K/W$ a zůstává tedy ještě hodnota tepelného odporu $R_x = 0,057K/W$, která je na zbylých částech soustavy. Nicméně hodnoty zde uvedené jsou pouze přibližné především vlivem chyb při měření.

6. Návrh zvyšujícího neinvertujícího měniče (step up)

Pro realizaci nouzového zdroje napětí bylo rozhodnuto, že se použijí dva moduly od firmy Hi-Z Technology, Inc., a to konkrétně moduly HZ-20. Na tyto termočlánky byl následně navržen měnič, jenž bude vyrábět výstupní stejnosměrné napětí 12V. Byl zvolen zvyšující neinvertující měnič (step up), který bude pracovat s výstupním napětím termočlánků 5 až 10V. Poté byly navrženy řídicí obvody, kde je použita PWM modulace pro udržování konstantního výstupního napětí 12V.

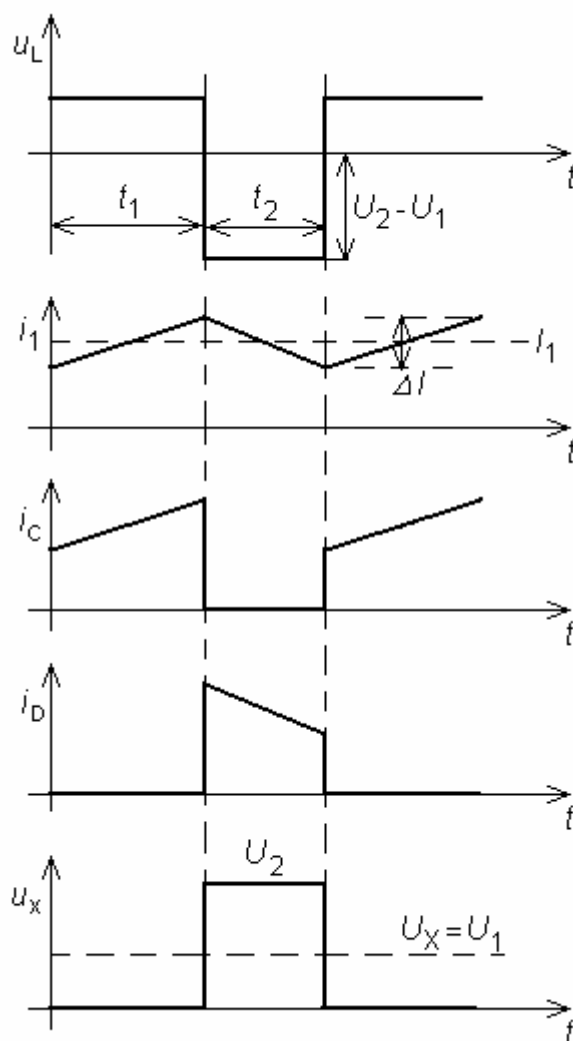
6.1. Popis činnosti zvyšujícího neinvertujícího měniče

Zvyšující měnič step up je v podstatě stejný jako snižující měnič step down, jenom se zaměníla zátěž se zdrojem. Jinak řečeno, měnič step up pracující v 1. kvadrantu je stejný jako měnič step down pracující v 2. kvadrantu. Základní schéma zapojení tohoto měniče je na (**Obr. 6-1**).



Obr. 6-1 Schéma zapojení zvyšujícího měniče

Na (**Obr. 6-2**) jsou znázorněny průběhy důležitých veličin. Průběhy proudů jsou zde aproximovány šikmými přímkami, což je možné udělat za předpokladu nulového odporu ve smyčce tlumivky. Ve skutečnosti jsou však průběhy exponenciální.



Obr. 6-2 Průběhy napětí a proudů zvyšujícího měniče [3]

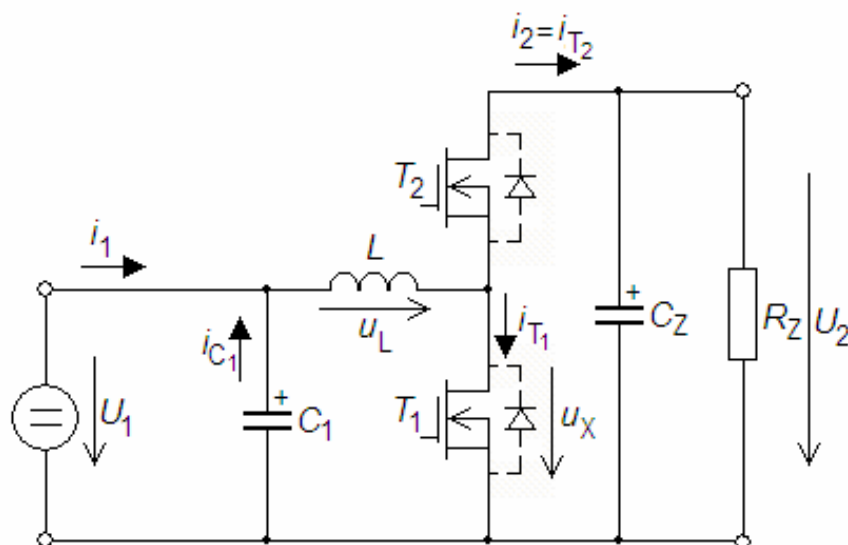
Má-li být výstupní napětí U_2 konstantní, je nutno použít filtrační sběrný kondenzátor C . Zátěž měniče nemá induktivní charakter. Indukčnost L zapojená v sérii se vstupním napětíovým zdrojem je nezbytná.

Popis se týká spojitých proudů tlumivkou. Pokud je tranzistor T ve vypnutém stavu, tak tlumivkou teče proud ze zdroje U_1 přes diodu D do zátěže U_2 . Dioda D je otevřená. Toto nastává v ustáleném stavu po několika spínacích periodách. Na tlumivce L se objevuje záporné napětí u_L , které je rovno rozdílu napětí $U_1 - U_2$. Napětí u_L je záporné, protože U_2 je větší než U_1 , a tudíž proud tlumivkou L klesá.

Jakmile se sepne tranzistor T , objeví se na tlumivce kladné napětí U_1 , protože úbytek napětí na tranzistoru T v sepnutém stavu se dá považovat za nulový. Tlumivka L si zachovává směr proudu a ten se uzavírá přes transistor T do zdroje U_1 . Tento proud tlumivkou L nyní roste. Dioda D je přitom polarizovaná v závěrném směru a je tedy uzavřená. Poté se celý děj opakuje.

6.2. Návrh silové části obvodu měniče step up

Konkrétní zapojení silového obvodu zvyšujícího měniče je znázorněno na (Obr. 6-3).



Obr. 6-3 Použité schéma zapojení zvyšujícího měniče

Jak je z (Obr. 6-3) vidět, namísto nulové diody byl do obvodu zapojen ještě jeden tranzistor T_2 . Jelikož je celý měnič navrhován na malé napětí, tak by ztráta vzniklá na diodě D z (Obr. 6-1) byla poměrně velká (napětí diody v propustném směru). Z tohoto důvodu byl použit ještě tranzistor T_2 , a to oba tranzistory MOS-FET s kanálem typu N (možnost použití dvou stejných tranzistorů je objasněno níže), u kterých tento úbytek napětí odpadá. Navíc jsou tranzistory MOS-FET rychlejší než klasické bipolární tranzistory, mají malou hodnotu R_{DSon} .

a) Rozsah střídý

Nejprve bylo zapotřebí zjistit rozsah střídý, ve kterém bude měnič pracovat. Výchozím vztahem pro výpočet byl vztah pro výstupní napětí U_2 .

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{t_1 + t_2}{t_2} \quad (6-1)$$

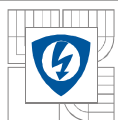
Tento vzorec ukazuje, že výstupní napětí U_2 musí být větší než vstupní napětí U_1 . Kdyby toto neplatilo, napětí u_L by nebylo při vypnutí tranzistoru T_1 záporné a to by znamenalo, že proud tlumivkou by v této fázi rostl. Rostl by tedy v obou fázích (sepnutý a vypnutý tranzistor T_1) a mohl by tak růst do nekonečna.

Vzorec pro střídý, coby poměr doby zapnutí t_1 tranzistoru T_1 a periody spínání T je vyjádřen ve vztahu.

$$s = \frac{t_1}{T} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad s \in (0;1) \quad (6-2)$$

Když vztah (6-2) dosadíme do rovnice (6-1), lze potom vyjádřit vztah pro výpočet potřebného rozsahu střídý rovnicí.

$$s = 1 - \frac{U_1}{U_2} \quad (6-3)$$



Nyní už lze rozsah střídý vypočítat pomocí vztahu (6-3). V našem případě bylo uvažováno výstupní napětí z termočládku U_1 v rozsahu 10V až 5V.

$$s = 1 - \frac{10 \div 5}{12} = \underline{\underline{0,167 \div 0,583}} \quad (6-4)$$

Při konstantním napětí U_2 pak vychází rozsah střídý 0,167 až 0,583. Rovnice (6-1 a 6-2) jsou z literatury [3].

b) Volba zvlnění proudu tlumivkou ΔI_L

Dále se muselo zvolit zvlnění proudu I_L tlumivkou ΔI_L , přičemž nosná frekvence f obvodu byla zvolena 50kHz. V době t_1 , kdy je tranzistor T_1 sepnut, se proud $i_L(t)$ zvýší o ΔI_L a v době t_2 se opět sníží o tutéž velikost. Během doby t_1 je na tlumivce L napětí U_1 a proto platí rovnice (6-5). Rovnice (6-5 a 6-6) jsou z literatury [3].

$$U_1 = L \cdot \frac{\Delta I_L}{t_1} \quad (6-5)$$

Tento vztah se může pomocí střídý přepsat na rovnici.

$$U_1 = L \cdot \frac{\Delta I_L}{s \cdot T} = L \cdot \frac{f \cdot \Delta I_L}{s} \quad (6-6)$$

Z rovnice (6-3) se vyjádří napětí U_1 a to se následně dosadí do vztahu (6-6). Nyní se musí z takto vzniklé rovnice vyjádřit zvlnění proudu ΔI_L a výsledkem je rovnice.

$$\Delta I_L = \frac{U_2 \cdot (1-s) \cdot s \cdot T}{L} = \frac{U_2 \cdot (s-s^2) \cdot T}{L} \quad (6-7)$$

Největší zvlnění ΔI_L lze zjistit, pokud se rovnice (6-7) zderivuje podle střídý s a rovnice (6-8) se položí rovna 0, tedy lze psát.

$$\frac{d\Delta I_L}{ds} = \frac{U_2 \cdot T}{L} \cdot (1-2s) = 0 \quad (6-8)$$

Výsledkem tedy je, že maximální zvlnění proudu tlumivkou ΔI_L nastane při střídě $s = 0,5$. K dispozici nám byla tlumivka o hodnotě indukčnosti $L = 80\mu\text{H}$, a tak se velikost zvlnění mohla spočítat podle vztahu (6-7) a tím také zjistit, zda takto vypočtené zvlnění bude dostatečně malé. Po dosazení a vyčíslení bylo zjištěno zvlnění na tlumivce 0,75A, což je přijatelná hodnota.

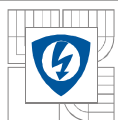
$$\Delta I_L = \frac{U_2 \cdot (s-s^2)}{L \cdot f} = \frac{12 \cdot (0,5-0,5^2)}{80 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^3} = \underline{\underline{0,75\text{A}}} \quad (6-9)$$

c) Návrh tlumivky

Jak již bylo uvedeno, tak u tlumivky, která byla k dispozici, byla naměřena hodnota indukčnosti $L = 80\mu\text{H}$ a při jejím návrhu se postupovalo následujícím způsobem.

Rovnice (6-10 až 6-17) jsou z literatury [3]. Pro napětí $u_L(t)$ na cívce platí rovnice,

$$u_L(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (6-10)$$



kde $\phi(t)$ je magnetický tok v jádře cívky. Tato rovnice se zintegruje a vyjde rovnice,

$$\psi(t) = N \cdot \phi(t) = L \cdot i(t) \quad (6-11)$$

kde $\psi(t)$ je spřažený magnetický tok v jádře. Za předpokladu homogenního magnetického pole dále platí vztah mezi magnetickou indukcí B a magnetickým tokem ϕ .

$$\phi(t) = B(t) \cdot S \quad (6-12)$$

Pokud již známe indukčnost L a také maximální proud $I_{1\max}$, můžeme pomocí vztahů (6-11) a (6-12) psát rovnici pro počet závitů N tak, aby nedocházelo k přesycování, tedy s dosazením maximální hodnoty syčení $B_{\max}$.

$$N = \frac{L \cdot I_{1\max}}{\phi_{\max}} = \frac{L \cdot I_{1\max}}{B_{\max} \cdot S} \quad (6-13)$$

Cívka s indukčností L tedy musí mít N závitů, aby při maximálním proudu $I_{1\max}$ byla v jádře o průřezu S magnetická indukce $B_{\max}$. Současně také platí vztah pro výpočet magnetické vodivosti magnetického obvodu cívky Λ . Je tedy požadována velikost této vodivosti, aby při počtu závitů N měla cívka skutečně žádanou indukčnost L .

$$\Lambda = \frac{L}{N^2} \quad (6-14)$$

Volí se magnetický odpor tvořený feromagnetickým jádrem se vzduchovou mezerou a poté je celkový magnetický odpor dán vztahem,

$$R_m = \frac{1}{\Lambda} = R_{Fe} + R_v \quad (6-15)$$

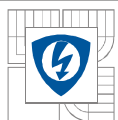
kde R_{Fe} je magnetický odpor feromagnetické části a R_v je magnetický odpor vzduchové mezery. U zvoleného jádra již nelze ovlivnit velikost magnetického odporu feromagnetické části R_{Fe} , ale lze měnit hodnotu magnetického odporu vzduchové mezery R_v tím, že se mění délka vzduchové mezery l_v . Tím je následně ovlivněna celá magnetická vodivost Λ . Délka vzduchové mezery se dá vypočítat podle rovnice.

$$l_v = \left(\frac{L \cdot I_{1\max}^2}{B^2 \cdot S} - \frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot l_{Fe} \right) \cdot \mu_0 \quad (6-16)$$

Takto by bylo možné velikost vzduchové mezery l_v spočítat, pokud by byla známá relativní permeabilita materiálu μ_r . Avšak pokud platí $R_{Fe} \ll R_v$, což vcelku dobře platí, tak je možné R_{Fe} zcela zanedbat a vztah (6-16) se dále zjednoduší na rovnici.

$$l_v = \frac{N^2}{L} \cdot \mu_0 \cdot S \quad (6-17)$$

V našem případě bylo zvoleno feritové jádro hrníček H12 s vodivostí $AL = 5000 \mu\text{H/z}^2$. Jeho rozměry jsou $d = 16\text{mm}$ a $d_{\text{otvor}} = 5\text{mm}$. Pomocí vztahu (6-18) se vypočítá průřez jádra



$$S = \pi \cdot \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_{\text{otvor}}^2}{4} \right) = \pi \cdot \left(\frac{16^2}{4} - \frac{5^2}{4} \right) = \underline{\underline{181,4 \text{ mm}^2}} \quad (6-18)$$

a ten vyšel $S=181,4 \text{ mm}^2$ a dále se zvolilo maximální sycení jádra $B_{\text{max}} = 0,25 \text{ T}$. Nyní bylo dosazeno do rovnice pro výpočet počtu závitů a bylo zjištěno, že by bylo zapotřebí $N = 14$ závitů.

$$N = \frac{L \cdot I_{1\text{max}}}{B_{\text{max}} \cdot S} = \frac{80 \cdot 10^{-6} \cdot 8}{0,25 \cdot 181,4 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{14 \text{ závitů}}} \quad (6-19)$$

Do tohoto jádra se však vejde pouze 10 závitů vodičem o tloušťce 2mm. Toho je možné dosáhnout tím, že se minimalizuje vzduchová mezera a požadovaná indukčnost tak zůstane zachována.

Následně se muselo zjistit, jaký bude použit průměr vodiče. Byla tedy zvolena proudová hustota vodiče $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$ a ta se musela dosadit do vzorce pro výpočet průřezu vodiče S_0 .

$$S_0 = \frac{I_{1\text{max}}}{J} = \frac{8}{2,5} = 3,2 \text{ mm}^2 \quad (6-20)$$

Po vyčíslení bylo zjištěno, že průřez vodiče $S_0 = 3,2 \text{ mm}^2$. Současně také platí vztah pro výpočet průřezu vodiče S_0 ,

$$S_0 = \pi \cdot \frac{d_0^2}{4} \quad (6-21)$$
$$d_0 = \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,2}{\pi}} = \underline{\underline{2 \text{ mm}}}$$

ze kterého se musel vyjádřit průměr vodiče d_0 a poté vyčíslit. Po dosazení vyšla hodnota $d_0 = 2 \text{ mm CuL}$.

Nyní se vypočetla délka vzduchové mezery l_v podle vzorce (6-22), kde μ_0 je permeabilita vakua a její hodnota $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Po dosazení byla zjištěna délka vzduchové mezery $l_v = 0,28 \text{ mm}$. Bylo však použito jádro H12 – hrníček, které má v podstatě dvě vzduchové mezery, a tak se výsledek musel vydělit dvěma. Tedy $l_v = 0,14 \text{ mm}$.

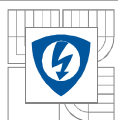
$$l_v = \frac{N^2}{L} \cdot \mu_0 \cdot S = \frac{10^2}{80 \cdot 10^{-6}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 181,4 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{0,28 \text{ mm}}} \quad (6-22)$$

Poté bylo možné vypočítat maximální ztráty tlumivkou P_{tl} , kde bylo třeba nejprve vypočítat odpor použitého vodiče podle vztahu,

$$R = \rho_{\text{Cu}} \cdot \frac{l_{\text{záv}}}{S_0} \cdot N \quad (6-23)$$
$$R = 0,0178 \cdot \frac{0,052}{3,2} \cdot 10 = \underline{\underline{2,9 \text{ m}\Omega}}$$

kde ρ_{Cu} je měrný odpor mědi a je roven $0,0178 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, $l_{\text{záv}}$ je délka závitu a po změření vyšla $5,2 \text{ cm}$. Po dosazení do vztahu (6-23) vyšel odpor vinutí $2,9 \text{ m}\Omega$. Pro ztráty tlumivkou platí rovnice

$$P_{tl} = R \cdot I_{1\text{max}}^2 \quad (6-24)$$
$$P_{tl} = 2,9 \cdot 8^2 = \underline{\underline{185,5 \text{ mW}}}$$



Když se dosadilo do zmíněné rovnice, bylo zjištěno, že ztráty tlumivkou P_{tl} jsou 185,5mW, což je přijatelná hodnota.

d) Napěťové dimenzování tranzistorů

Musí se vyjít z faktu, že tranzistor T_1 je namáhán ve vypnutém stavu výstupním napětím měniče U_2 , což je 12V a naopak je tomu, když je sepnut tranzistor T_1 a tranzistor T_2 je ve vypnutém stavu. Problém by také mohly způsobit přepětíové špičky na parazitních indukčnostech. Je tedy nutné, aby byly oba tranzistory dimenzovány alespoň na dvojnásobek výstupního napětí U_2 .

e) Proudové dimenzování tranzistorů

Proud oběma tranzistory je sice pilovitý, avšak pokud se tento fakt zanedbá, je možné určit jejich špičkovou, střední a efektivní hodnotu proudu. Slouží k tomu následující vztahy,

$$I_{T1max} = I_{1max, stř} \quad (6-25)$$

$$I_{T1stř} = I_{1max, stř} \cdot s \quad (6-26)$$

$$I_{T1ef} = I_{1max, stř} \cdot \sqrt{s} \quad (6-27)$$

kde hodnota $I_{1max, stř}$ je maximální střední hodnota proudu I_1 . Obdobné vztahy platí i pro druhý tranzistor T_2 , které se počítají podle základních vzorců platících pro výpočet proudů nulovou diodou podle obrázku (6-1) a dále potom na obrázku (6-3) je již nulová dioda nahrazena druhým tranzistorem T_2 .

$$I_{T2max} = I_{1max, stř} \quad (6-28)$$

$$I_{T2stř} = I_{1max, stř} \cdot (1 - s) \quad (6-29)$$

$$I_{T2ef} = I_{1max, stř} \cdot \sqrt{(1 - s)} \quad (6-30)$$

Rovnice (6-24 až 6-30) jsou z literatury [3].

V zapojení tohoto měniče byly použity dva stejné tranzistory MOS-FET s kanálem typu N IPN0603, jelikož mají malý odpor R_{DSon} , čímž se značně omezí ztráty vedením. Jak je možné, že mohly být použity oba tranzistory s kanálem typu N, je objasněno dále na zapojení měniče i s řídicími obvody. Tyto proudy byly počítány pro krajní případ, kdy je dosahováno maximálního výkonu termočlánků pro napětí $U_1 = 5V$.

$$\begin{aligned} I_{T1max} &= \underline{\underline{8A}} & I_{T2max} &= \underline{\underline{8A}} \\ I_{T1stř} &= 8 \cdot 0,583 = \underline{\underline{4,66A}} & I_{T2stř} &= 8 \cdot (1 - 0,583) = \underline{\underline{3,34A}} \\ I_{T1ef} &= 8 \cdot \sqrt{0,583} = \underline{\underline{6,11A}} & I_{T2ef} &= 8 \cdot \sqrt{(1 - 0,583)} = \underline{\underline{5,17A}} \end{aligned}$$

Za předpokladu, že z termočlánků nebude brán plný výkon, bude měnič pracovat spíše s větším vstupním napětím U_1 a tedy s menší střídou. Dá se tedy říct, že proudově bude podstatně více namáhán tranzistor T_2 . Nicméně při dosažení nižších hodnot napětí tomu bude právě naopak.

f) Ztráty tranzistorů vedením

Ztrátový výkon u unipolárních tranzistorů MOS-FET je přímo úměrný druhé mocnině efektivního proudu tranzistorem. Hodnota odporu R_{DSon} bývá uváděna v katalogích. Ztráty vedením se tedy spočítají podle vztahu

$$P_T = R_{DSon} \cdot I_{Cef}^2 \quad (6-31)$$

Transistor IPN0603 má v datasheetu uvedený odpor $R_{DSon} = 3m\Omega$. Hodnoty ztrát vedením byly následně spočteny opět jako v předchozí kapitole pro krajní případy minimálního a maximálního výkonu, aby bylo vidět srovnání obou možností.

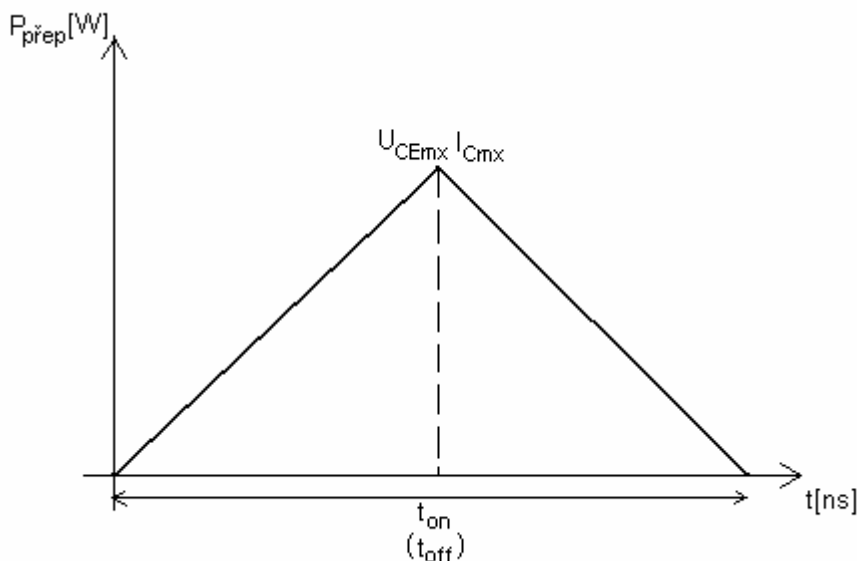
Po dosazení do vztahu (6-31) vyšly ztráty vedením tranzistoru T_1 112mW a tranzistoru T_2 80mW pro maximální výkon termočlánků, což odpovídá vstupnímu napětí 5V.

$$P_{T1} = 0,003 \cdot 6,11^2 = \underline{\underline{112mW}}$$

$$P_{T2} = 0,003 \cdot 5,17^2 = \underline{\underline{80mW}}$$

g) Přepínací ztráty tranzistorů

Je evidentní, že proces spínání a vypínání tranzistoru není nekonečně rychlý, což znamená, že určitou dobu je tranzistor v aktivní oblasti a vzniká na něm veliký okamžitý ztrátový výkon. Při jednom zapnutí se promění v teplo energie W_{on} a při jednom vypnutí zase energie W_{off} . Na (Obr. 6-4) je popsán průběh přepínacích ztrát.



Obr. 6-4 Přepínací ztráty tranzistoru

Jak je z (Obr. 6-4) vidět, ztrátová energie proměněná v teplo je plocha pod křivkou. Jelikož je tato křivka trojúhelník, lze ji jednoduše vypočítat podle vztahu,

$$W = \frac{U_{CEmx} \cdot I_{Cmx} \cdot (t_{on} + t_{off})}{2} \quad (6-32)$$

$$W = \frac{12 \cdot 8 \cdot (111 \cdot 10^{-9} + 137 \cdot 10^{-9})}{2} = \underline{\underline{11,9\mu J}}$$

kde t_{on} a t_{off} jsou doba zapnutí a doba vypnutí. Ve vzorci jsou tedy počítány obě energie W_{on} a W_{off} současně. Výsledné přepínací ztráty P_{prep} jsou pak dány rovnicí,

$$P_{prep} = W \cdot f$$

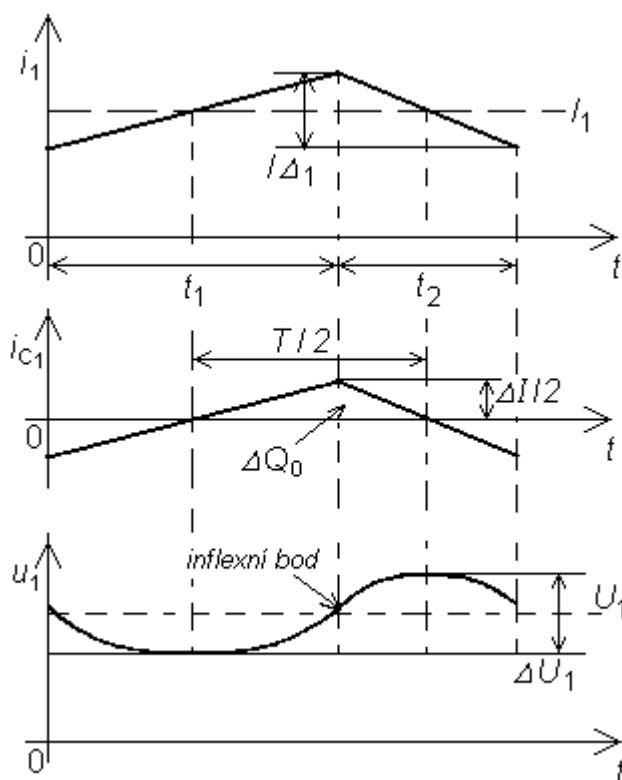
$$P_{prep} = 11,9 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^3 = \underline{\underline{595,2mW}} \quad (6-33)$$

kde f je nosná frekvence měniče.

Po dosažení a vyčíslení vyšly přepínací ztráty P_{prep} obou tranzistorů (ne ale v součtu) 595,2mW, což není až tak zanedbatelná hodnota.

h) Návrh filtračního kondenzátoru C_1

Kondenzátor C_1 má zaručit, aby zvlnění vstupního napětí ΔU_1 bylo co nejmenší. K objasnění jeho návrhu slouží (Obr. 6-5). Za předpokladu velmi malé konečné velikosti zvlnění vstupního napětí $\Delta U_1 \ll U_1$ (při použití C_1) lze tvrdit, že ze zdroje teče téměř konstantní proud o velikosti I_1 , což znamená, že odvozené zvlnění proudu ΔI_1 , čili jistá „střídavá složka“ proudu $i_1(t)$, teče celá přes kondenzátor C_1 . Když má proud I_1 kondenzátorem C_1 kladné znaménko, vzrůstá na něm napětí a naopak. Situace je znázorněna na obrázku níže. Obr. 6-5 a vztahy (6-34 a 6-35) jsou z literatury [3].

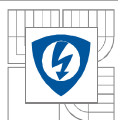


Obr. 6-5 Vliv kondenzátoru C_1 na průběh vstupního napětí [3]

Z tohoto obrázku je vidět, že náboj ΔQ lze spočítat jako plochu pod křivkou podle vztahu.

$$\Delta Q = \frac{t_1 + t_2}{2} \cdot \frac{\Delta I_1}{2} = \frac{\Delta I_1}{8} \cdot T$$

$$\Delta Q = \frac{0,75}{8 \cdot 50 \cdot 10^3} = \underline{\underline{1,875\mu C}} \quad (6-34)$$



Je to tedy vzorec pro výpočet obsahu trojúhelníku. Když se do něj dosadilo, bylo zjištěno, že tento náboj je roven $1,875\mu\text{C}$. Poté bylo rozhodnuto, že se velikost kondenzátoru bude stanovovat pro velikost zvlnění vstupního napětí $\Delta U_1 = 0,2\text{V}$. Přičemž pro velikost zvlnění vstupního napětí platí následující rovnice.

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta Q}{C_1} = \frac{\Delta I_1}{8 \cdot C_1} \cdot T \quad (6-35)$$
$$C_1 = \frac{\Delta I_1}{8 \cdot \Delta U_1 \cdot f} = \frac{0,75}{8 \cdot 0,2 \cdot 50 \cdot 10^3} = \underline{\underline{9,375\mu\text{F}}}$$

Z této rovnice byla poté vyjádřena veličina C_1 a po vyčíslení vyšlo, že velikost filtračního kondenzátoru C_1 musí být rovna $9,375\mu\text{F}$. Poté bylo ještě třeba určit velikost efektivní hodnoty proudu kondenzátorem C_1 a ta se spočítá podle vzorce.

$$I_{C1ef} = \frac{\Delta I_1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (6-36)$$
$$I_{C1ef} = \frac{0,75}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{0,217\text{A}}}$$

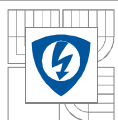
Velikost efektivní hodnoty proudu I_{C1ef} vyšla přibližně $0,217\text{A}$.

Nakonec se ještě musí zkontrolovat, jestli vlastní rezonanční kmitočet obvodu LC leží dostatečně nízko pod pracovním kmitočtem měniče f . Musí tedy platit nerovnost.

$$C_1 \gg \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot L} \quad (6-37)$$

Po provedení kontrolního výpočtu bylo zjištěno, že tato nerovnost platí dobře.

Obr. 6-6 Schéma zapojení nouzového zdroje napětí

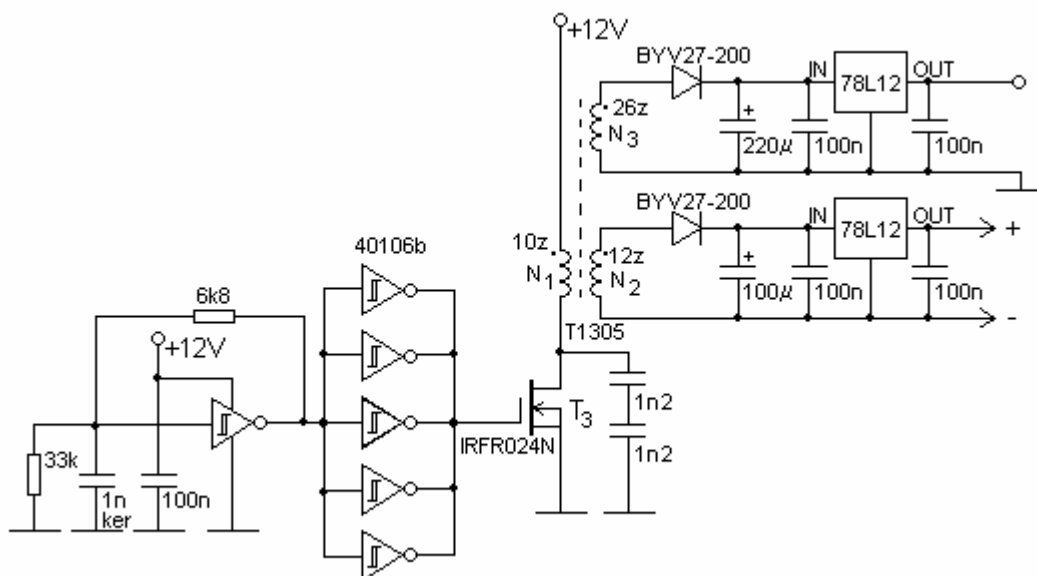


Na (**Obr. 6-6**) je celkové schéma zapojení i s řídicí částí obvodu. Navržený zvyšující měnič má za úkol produkovat konstantní výstupní napětí U_2 z proměnného vstupního napětí U_1 , které by se mělo pohybovat, jak již bylo řečeno, mezi hodnotami 10 – 5V při maximálním výkonu modulů. Z tohoto důvodu je nutná regulace, která bude změnou střídavy řídit výstupní napětí. Regulace je prováděna pomocí PWM controlleru UC3843.

Jak je vidět na (**Obr. 6-6**), v zapojení silové části jsou použity dva tranzistory MOS-FET s kanálem typu N, což je zde z důvodu, aby se co nejvíce snížily ztráty tranzistorů vedením. Jedná se o určitou formu synchronního usměrňovače. Jelikož bude proudově namáhán převážně horní tranzistor T_2 (za předpokladu maximálního výkonu modulů HZ-20), který má funkci nulové diody, tak bude mít tudíž větší ztráty vedením. Tranzistor s kanálem typu P však mívá horší vlastnosti než typ N, má větší také odpor R_{DSon} a ztráty by byly tak ještě o to větší. Byl tedy použit tranzistor typu N, který má $R_{DSon} = 3m\Omega$, což je nízká hodnota. Pro buzení horního tranzistoru posloužilo zapojení podle (**Obr. 6-6**) s optočlenem kvůli galvanickému oddělení a k tomuto účelu původně posloužila tzv. „nábojová pumpa“, což se však příliš neosvědčilo. Pro malé intervaly spínání dolního tranzistoru se totiž nestihl nabíjet kondenzátor, jenž slouží k napájení horního tranzistoru T_2 a tudíž byl poté spínán s nižším napětím a ještě k tomu naprosto chybně. Aby se tomuto předešlo, tak byl použit galvanicky oddělený zdroj napětí pro horní tranzistor, kdy je již kondenzátor stabilně nabit na požadované napětí a tranzistor T_2 je správně spínán. Tento zdroj také slouží k napájení sekundární strany optočlenu 6N137, avšak přes stabilizátor napětí na 5V, jenž napájení tohoto obvodu vyžaduje. Funkci pomocného zdroje napětí sloužícímu k napájení obvodů určených pro spínání horního tranzistoru T_2 zastává sekundární strana s dvanácti závity N_2 . Schéma zmíněného pomocného zdroje napětí je uvedeno na (**Obr. 6-7**). Tento pomocný zdroj je v podstatě jednočinný propustný měnič, avšak na sekundární straně chybí tlumivka pro tento typ měniče typická. Na sekundáru je proto kondenzátor nabíjen na špičkovou hodnotu transformovaných pulsů, nelze tedy výstupní napětí měnit střídou, což ovšem není v tomto případě využití zdroje potřebné. Pro výkonové aplikace by bylo zapojení bez tlumivky destruktivní pro tranzistor či sekundární diodu, protože při prvotnímu sepnutí tranzistoru je kondenzátor na výstupu vybitý a tvoří zkrat, avšak v nevýkonových aplikacích je to možné. Netypický je tento napěťový zdroj také kvůli svému způsobu demagnetizace, ke které jsou využívány kondenzátory připojené paralelně k tranzistoru, jenž jsou paralelně připojeny ze střídavého hlediska i k primáru, a proto zde při demagnetizaci dochází k rezonančnímu LC ději. Navíc tyto kondenzátory napomáhají k měkčímu vypínání tranzistoru, čímž se také zmenší ztráty. Tento pomocný zdroj pracuje s kmitočtem přibližně 250kHz.

Při měření s termočládky HZ-20 bylo zjištěno, že nebude dosaženo předpokládaného napětí 10 až 5V, ale nižších hodnot, a tudíž vyvstal problém, protože řídicí obvod UC3843 z důvodu své podpěťové ochrany začíná generovat řídicí impulsy až po dosažení napájecího napětí zhruba 8,5V. Takové napětí ovšem moduly nebyly schopny vygenerovat, tak byl k pomocnému napěťovému zdroji navinut ještě druhý sekundár se šestadvaceti závity N_3 , který zajišťuje dostatečně velké napájecí napětí pro obvod UC3843, avšak při ještě malém napětí na vstupu. Současně také slouží k napájení obvodů, které zpracovávají řídicí obvody pro spínání dolního tranzistoru T_1 . Nicméně při startu měniče po dosažení vstupního napětí U_1 asi 4V až po napětí 6V docházelo k chybným spínáním obou tranzistorů, které se spínaly „do sebe“. Důvodem bylo, že obvody CMOS4049 neměly v této fázi dostatečně velké napájecí napětí V_{cc} a generovaly proto chybné výstupní pulsy pro spínání tranzistorů. Napájení obvodu CMOS4049 pro spínání dolního tranzistoru T_1 bylo proto připojeno na druhý sekundár S_2 pomocného zdroje se šestadvaceti závity. Na výstup obvodu CMOS4049 pro horní tranzistor T_2 byla přidána Zenerova dioda ZD o hodnotě 5,6V, která zabraňuje, aby byly přiváděny chybné pulsy na horní tranzistor v době, kdy ještě měnič negeneruje výstupní napětí 12V (dokud se nerozběhne). V této fázi je využívána u horního tranzistoru T_2 pouze jeho antiparalelní dioda. Po dosažení dostatečně velkého napájecího napětí u horního CMOS4049 se již na řídicí elektrodu horního tranzistoru T_2 dostávají řídicí impulsy, avšak jsou sníženy právě o hodnotu napětí na Zenerově diodě ZD 5,6V, což ovšem nevadí, protože pro spínání tohoto tranzistoru je dostačující i spínací napětí U_{GE} 6,4V. Tímto opatřením bylo dosaženo, že se

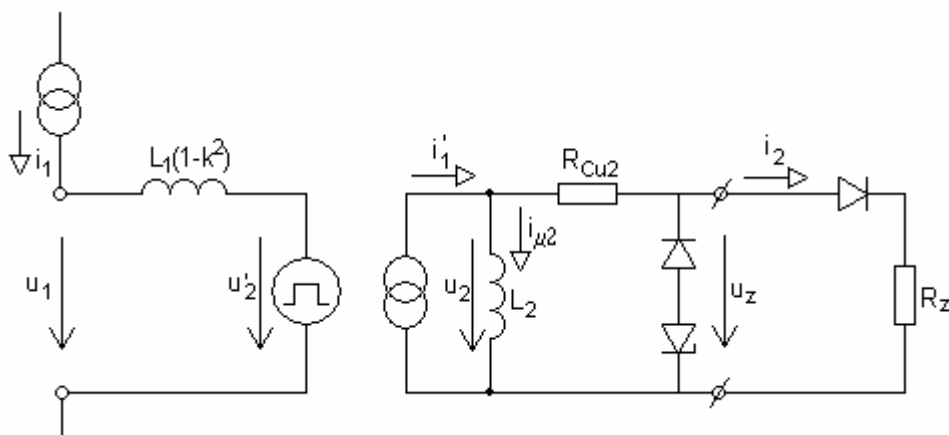
měníč rozbíhá po dosažení vstupního napětí 5V. Pro realizaci odskoku při střídavém zapínání dolního a horního tranzistoru byly použity RCD členy, které dostatečně zajišťují opoždění povelu pro zapnutí dolního tranzistoru za povelu pro vypnutí horního tranzistoru a naopak.



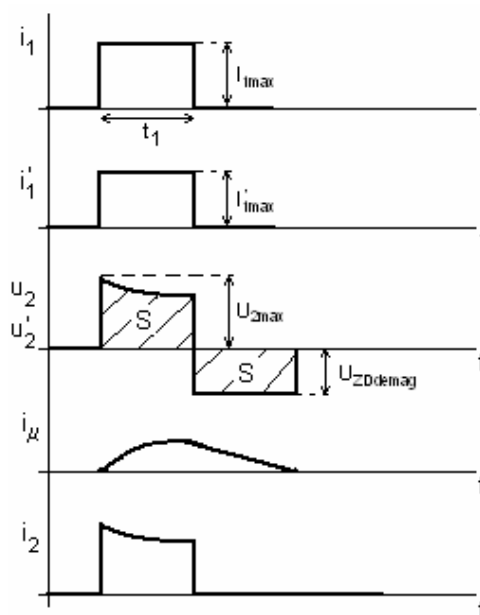
Obr. 6-7 Schéma zapojení galvanicky odděleného zdroje napětí

6.3.1. Návrh proudového impulsního transformátoru

Na (Obr. 6-8) je znázorněno náhradní schéma proudového impulsního transformátoru a na (Obr. 6-9) jsou průběhy některých důležitých veličin.



Obr. 6-8 Proudový impulsní transformátor



Obr. 6-9 Průběh důležitých veličin PIT

Vychází se z požadavku pro maximální hodnotu napětí $U_{2\max} = 1,6\text{V}$, maximálního proudu $I_{1\max} = 8,5\text{A}$, dále pro dobu t_1 a periodu T , přičemž tato doba vychází $11,6\mu\text{s}$. Mezi požadavky patří $I_{\mu\max} \ll I'_{1\max}$, což zaručuje malou chybu transformátoru a také maximální sycení $\leq B_{\max}$.

Pro naše účely bylo zvoleno toroidní jádro T1306 s $Al = 1250\text{nH/z}^2$, $S = 17,4\text{mm}^2$.

Pro zjednodušení se předpokládá $R_{Cu2} = 0$ a vzhledem k podmínce $I_{\mu\max} \ll I'_{1\max}$ se považuje průběh u_2 za obdélníkový s výškou $U_{2\max}$. Pro návrh jsou třeba vztahy.

$$U_{2\max} = I_{1\max} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot R_z \quad (6-38)$$

kde R_z a počty závitů N_1 a N_2 jsou neznámé.

$$I_{\mu\max} = \frac{U_{2\max} \cdot t_1}{L_2} \ll I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (6-39)$$

$$N_2 \cdot B \cdot S = I_2 \cdot I_{\mu\max} = U_{2\max} \cdot t_1 \quad (6-40)$$

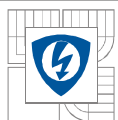
Ze vztahu (6-39) plyne rovnice (6-41)

$$x = N_1 \cdot N_2 \gg \frac{U_{2\max} \cdot t_1}{\Lambda \cdot I_{1\max}} \quad (6-41)$$

Počet závitů primárního vinutí je $N_1 = 1$, a tak po vypočtení počtu závitů sekundárního vinutí podle (6-41) vyšlo $N_2 \gg 1,7\text{z}$. Počet závitů N_2 se pak určil pro proud diodou 150mA . Po vyčíslení bylo zjištěno, že počet závitů sekundárního vinutí N_2 je cca. 60z. Podle rovnice (6-42) se vypočetl proud i'_1

$$i'_1 = i_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (6-42)$$

Bylo zjištěno, že tento proud je $0,14\text{A}$. Pro výpočet R_z byl použit vztah.



$$R_z = \frac{U_{2\max}}{I_{1\max}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (6-43)$$

Tento zátěžný odpor vyšel $7,14\Omega$ a tak byl zvolen odpor $6,8\Omega$.

Dále se muselo zjistit, jaký vodič bude použit. Proudová hustota J_2 byla zvolena 2A/mm^2 a proud I_2 přibližně 140mA . Poté se mohl vypočítat průřez vodiče podle vztahu

$$S_2 = \frac{I_2}{J_2} \quad (6-44)$$

a tento průřez po dosazení vyšel $0,07\text{mm}^2$. Z rovnice (6-45) se získal potřebný průměr vodiče.

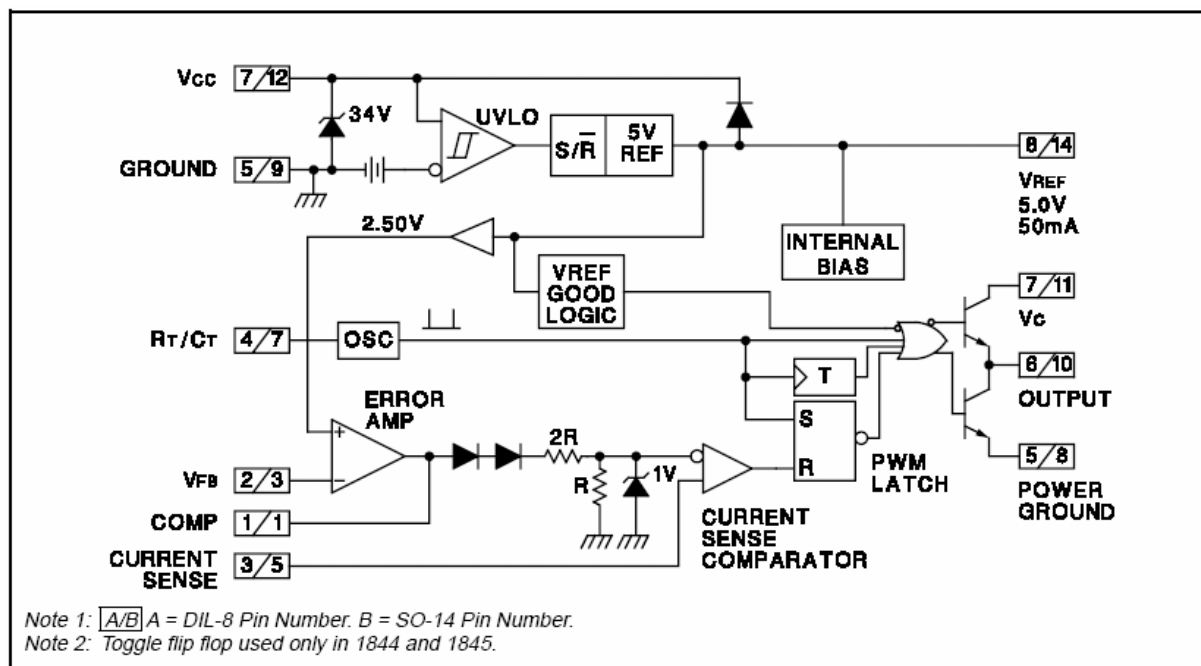
$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi}} \quad (6-45)$$

Průměr vodiče vyšel $0,3\text{mm}$. Byl tedy zvolen vodič $0,355\text{CuL}$.

Jako poslední bylo ještě zkontrolováno sycení. K tomu posloužil vztah (6-40). Po vyčíslení se zjistilo, že $B = 0,007\text{T}$, což je vyhovující.

6.3.2. Popis činnosti PWM controlleru UC3843

Uvnitř obvodu UC3843 je PI regulátor. Na jeho vstup (+) je přivedeno napětí $2,5\text{V}$, které je generováno z referenčního napětí obvodu $U_{\text{ref}} = 5\text{V}$. Na vstup (-) tohoto PI regulátoru je přivedeno skutečné napětí (12V) přes vnější odporový dělič, který z něj dělá též $2,5\text{V}$ [PIN 2]. Tento PI regulátor je nastaven vně přiřazeným odporem a kondenzátorem [PIN 1]. Výstupem PI regulátoru je hodnota napětí, která vstupuje do komparátoru a mění se v rozsahu $0 \div 1\text{V}$. Tato aktuální hodnota napětí je komparována s pilovitým průběhem proudu přivedeným pomocí proudového impulsního transformátoru [PIN 3]. Tímto je prováděna pulsní šířková modulace PWM a takto vzniklým průběhem je řízeno spínání obou tranzistorů T_1 a T_2 [PIN 6]. Nosná frekvence celého obvodu je nastavena pomocí členů R_T a C_T [PIN 4] a v našem případě byla nastavena na 50kHz , jak již bylo zmíněno výše. Blokové schéma PWM controlleru UC3843 je znázorněno na (**Obr. 6-10**).



Obr. 6-10 Blokové schéma UC3843

6.4. Měření na zvyšujícím měniči

Po vyladění obvodu bylo provedeno měření ztrát naprázdno. Výsledky jsou zobrazeny v následující tabulce (Tab. 6-1)

$U_o[V]$	$I_o[A]$	$\Delta P_o[W]$
11	0,04	0,44
10	0,06	0,60
9	0,07	0,63
8	0,08	0,64
7	0,15	1,05
6	0,23	1,38
5	0,26	1,30
4	0,32	1,28
3	0,35	1,05
2	0,37	0,74

Tab. 6-1 Ztráty měniče naprázdno

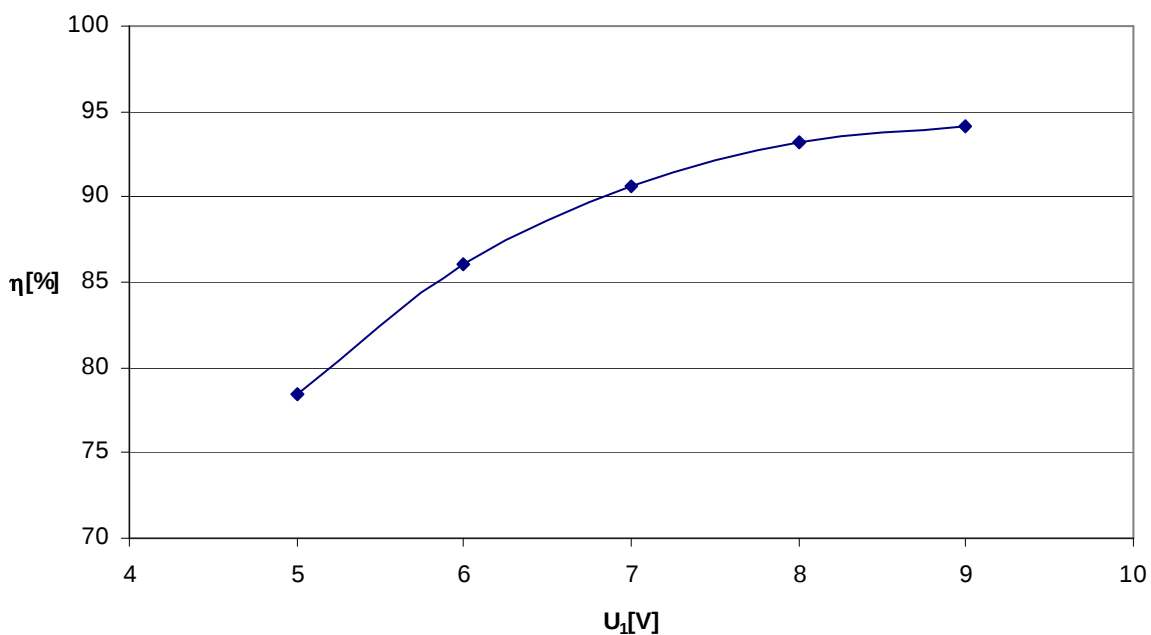
Poté byla měřena účinnost tohoto měniče při napětí $U_1 = 5-9V$. Měření bylo provedeno se zátěží $13,6\Omega$. Výsledky měření a vypočtené hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 6-2).

$U_1[\text{V}]$	$P_1[\text{W}]$	$P_2[\text{W}]$	$\eta[\%]$
5	13,50	10,59	78,4
6	12,30	10,59	86,1
7	11,69	10,59	90,6
8	11,36	10,59	93,2
9	11,25	10,59	94,1

Tab. 6-2 Účinnost zvyšujícího měniče

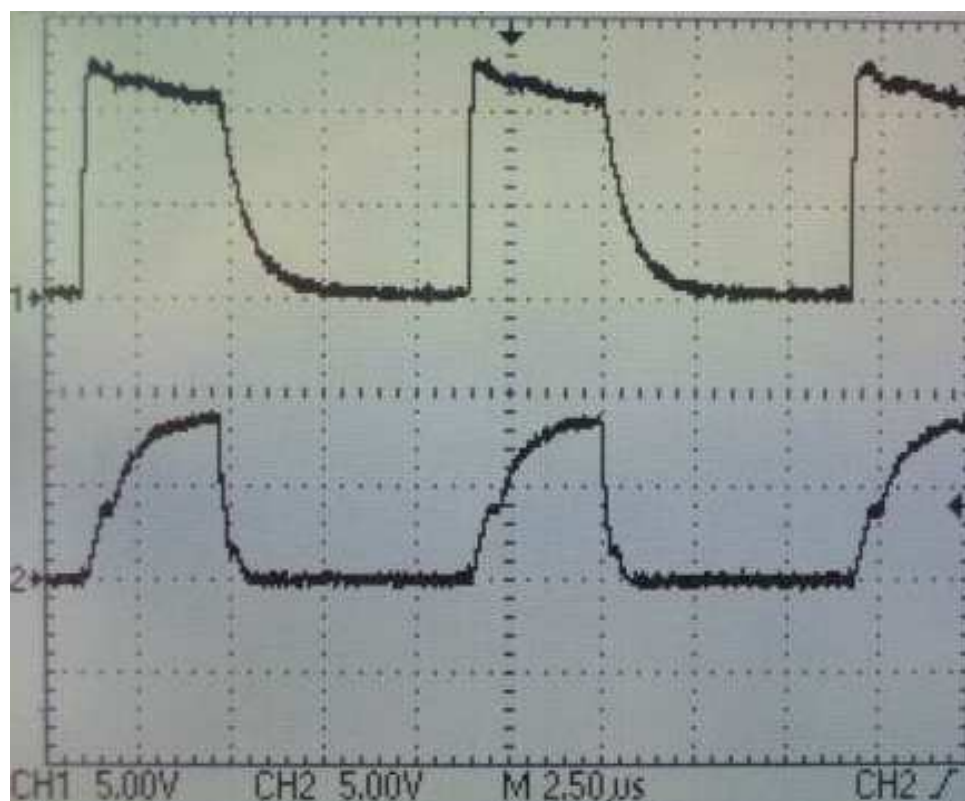
Průběh účinnosti v závislosti na vstupním napětí je též vidět na následujícím grafu (**Obr. 6-11**)

Závislost účinnosti měniče na vstupním napětí U_1

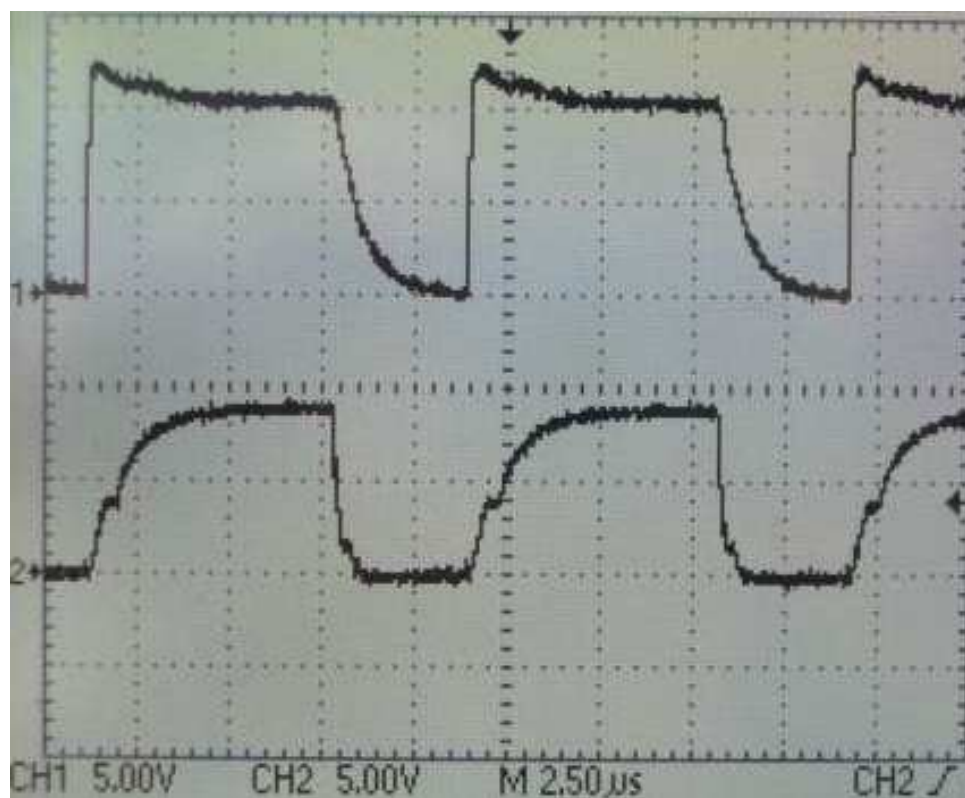


Obr. 6-11 Závislost účinnosti na vstupním napětí

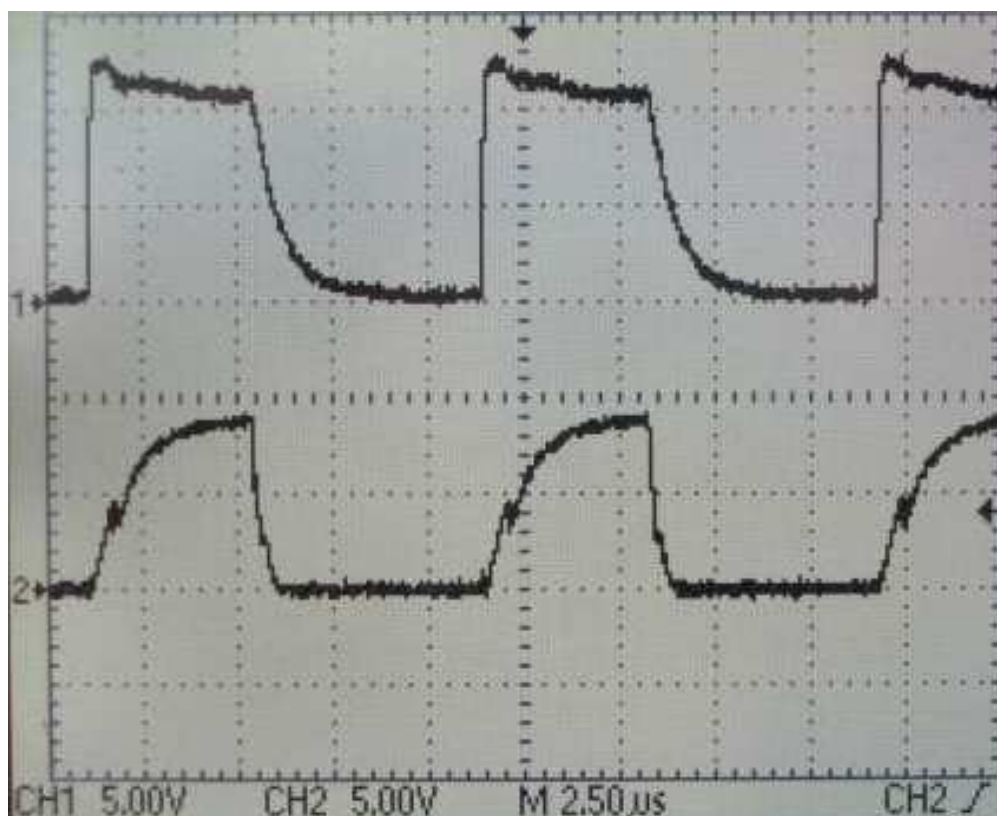
Jak je vidět z grafu, podle očekávání účinnost roste se vzrůstajícím vstupním napětí U_1 . Na následujících snímcích jsou vyobrazeny některé průběhy důležitých veličin.



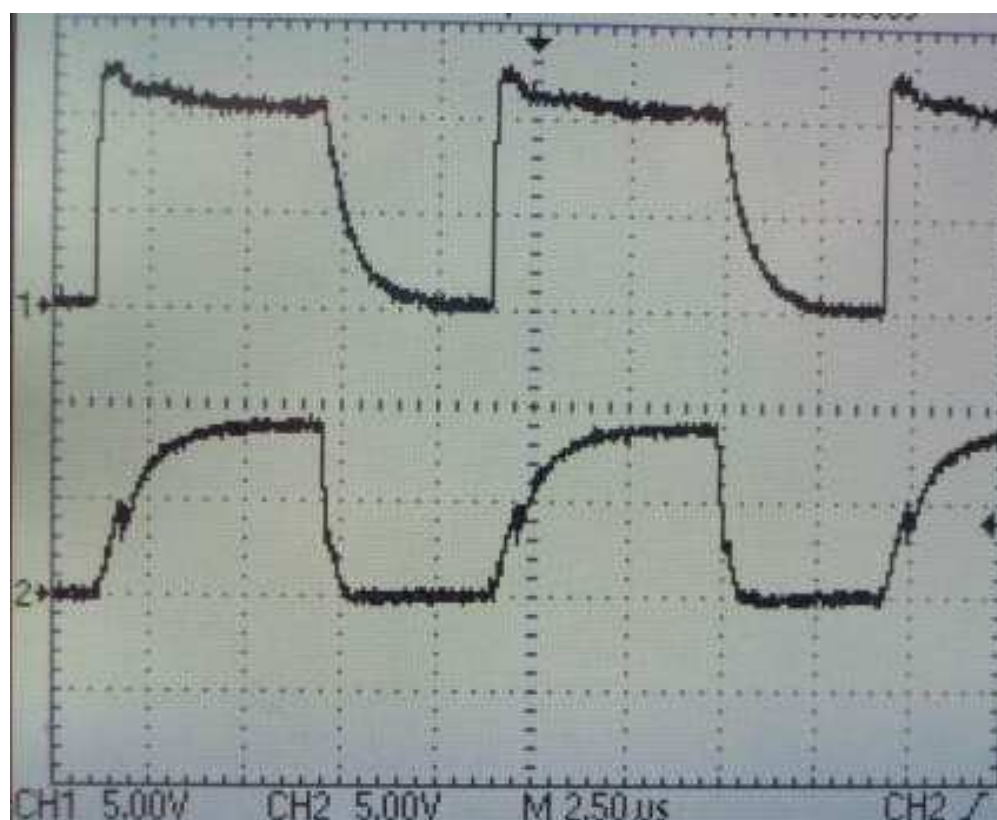
Obr. 6-12 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 8V$; CH2-tranzistor T_1



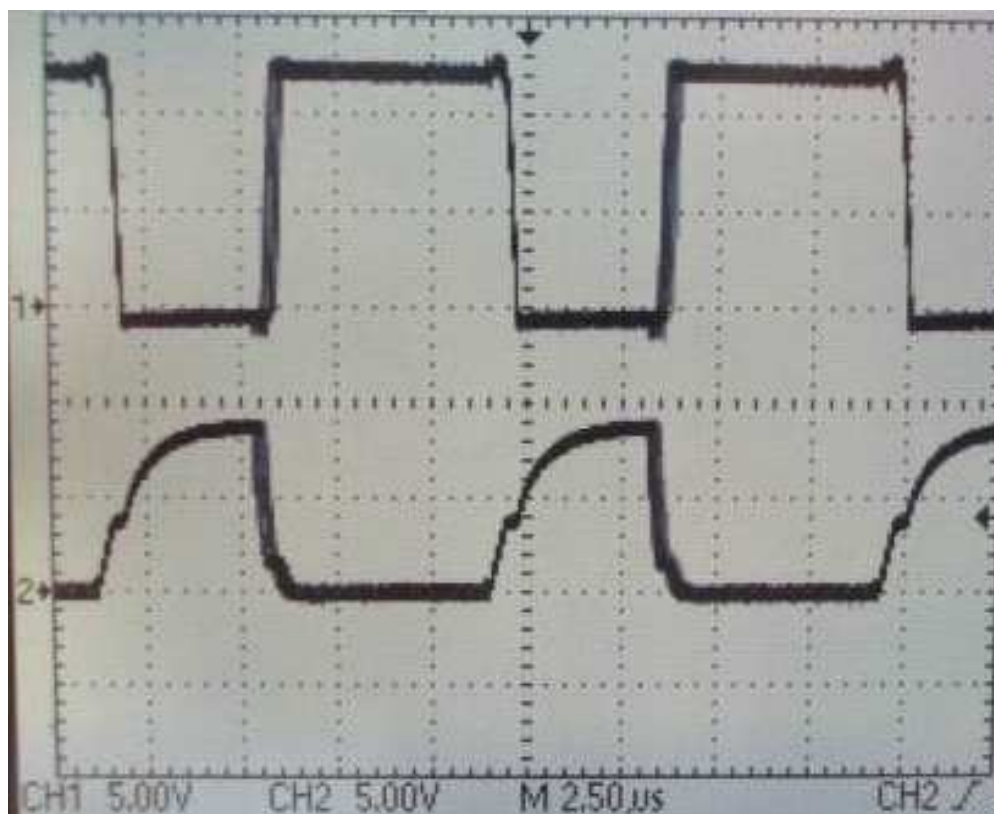
Obr. 6-13 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 4,5V$; CH2-tranzistor T_1



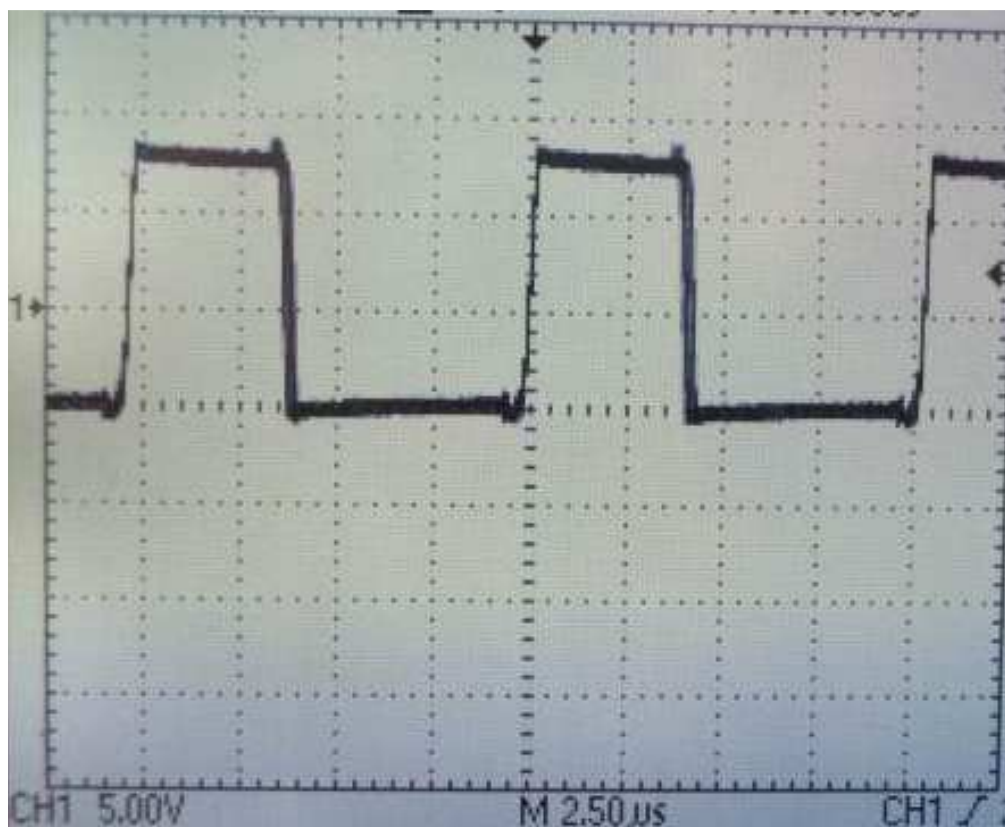
Obr. 6-14 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 8V$ se zátěží $R_z = 13,6\Omega$; CH2-tranzistor T_1



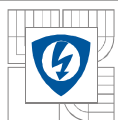
Obr. 6-15 Průběhy napětí U_{GS} při $U_1 = 6V$ se zátěží $R_z = 13,6\Omega$; CH2-tranzistor T_1



Obr. 6-16 Průběhy napětí U_{GS} a U_{DS} při $U_1 = 7V$ se zátěží $R_z = 13,6\Omega$ tranzistoru T_1



Obr. 6-17 Průběh napětí na tlumivce při $U_1 = 7V$



7. Závěr

Termočlánky přinášejí zajímavou variantu výroby elektrické energie do budoucna, především při využití odpadního tepla a také tam, kde není možná zásoba elektrickou energií jiným způsobem. Širší využití je zaznamenáváno především v měřicí technice především pro měření teploty a větší rozšíření v použití termočlánků jako zdrojů se v nejbližší době nedá očekávat, protože dosahované výkony termoelektrických zdrojů nejsou příliš velké, avšak jejich cena úměrná k výkonům je docela vysoká. Nicméně jejich velikou výhodou je značně vysoká spolehlivost a trvanlivost.

V této práci byly pro realizaci nouzového zdroje napětí vybrány dva devatenátiwattové moduly HZ-20 od firmy Hi-Z Technology, Inc., které byly zapojeny do série, na jejichž parametry byl navržen DC/DC zvyšující měnič na vstupní proměnné napětí 10 – 5V a s výstupním napětím 12V. Měnič je řízen PWM modulací pomocí controlleru UC3843.

Aktuální práce spočívala v návrhu a výrobě systému, který využívá nádoby s vodou jako chladiče studené strany modulů a zespod svého dna má připevněny dva moduly HZ-20 zapojené, jak už bylo řečeno, elektricky do série. Moduly byly ke dnu chladiče upevněny pomocí hliníkové desky ze strany tepelného zdroje. Termočlánky byly sevřeny mezi tuto desku a chladič nádobu (nádobu s ohřívanou vodou) pomocí šesti šroubů, díky kterým byl vyvinut na články dostatečný tlak, aby byla zajištěna správná funkce.

Z provedených měření však vyplynulo, že termočlánky nepodávají očekávaný výkon a byla tedy prováděna některá opatření, která měla zajistit lepší chlazení a přestup tepla přes celý systém. Namísto silikonových izolačních podložek byly použity keramické destičky, které mají řádově lepší měrnou tepelnou vodivost. Také byla zkoušena varianta se vzduchovým chlazením, ale ukázalo se, že vodní chlazení je účinnější pro zajištění dostatečně nízké teploty chladné strany modulů. Poté byl systém testován spolu s navrženým měničem a také zatěžován. Bylo ovšem výpočty zjištěno, že účinnost systému s termočlánky je velice nízká a ve spojení s měničem celková účinnost ještě více klesá, což zabraňuje tento nouzový zdroj elektrické energie příliš zatěžovat. Účinnost systému s termočlánky je zhruba 2% a maximální možný odebíraný výkon z tohoto zdroje se pohybuje okolo 13W. Je tedy vidět, že očekávání byla příliš velká a využití termočlánků coby zdrojů energie je zatěžkáno mnoha překážkami, které brání většímu rozšíření a výzkumu.



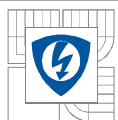
Seznam použité literatury

- [1] BUREŠ , Jiří. *Converter* [online]. c2002 [cit. 2008-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/>>. ISSN 1214-7591.
- [2] *Hi-Z* [online]. [cit. 2008-12-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.hi-z.com/>>.
- [3] Doc. Ing. Vlastislav Novotný, Ing. Pavel Vorel, Ph.D., Doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka: *Napájení elektronických zařízení*. Vydání 2., VUT FEI v Brně, Brno, 2000.
- [4] Dr. Ing. Miroslav Patočka: *Vybrané stati z výkonové elektroniky*, Svazek I. Vydání 3., VUT FEI v Brně.
- [5] Dr. Ing. Miroslav Patočka: *Vybrané stati z výkonové elektroniky*, Svazek II. Vydání 3., VUT FEI v Brně.
- [6] Doc. Ing. Pavel VOREL, Ph.D. , Doc. Dr. Ing. Miroslav PATOČKA. *Průmyslová elektronika*. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 2007. 151 s.
- [7] Doc. Ing. Pavel VOREL, Ph.D., Ing. Petr PROCHÁZKA, *Řídicí členy v elektrických pohonech*. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 2009. 101 s.

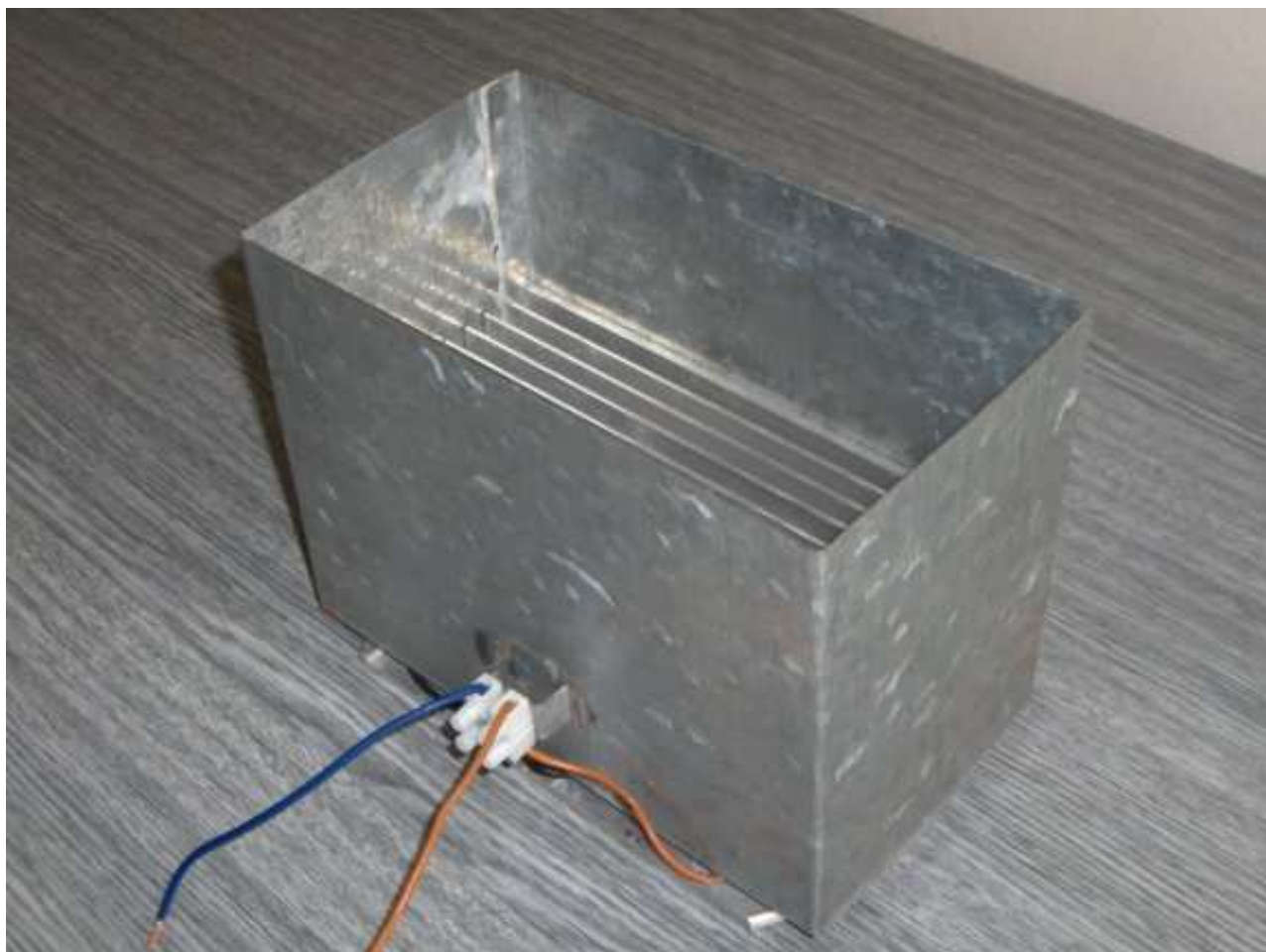


Seznam příloh

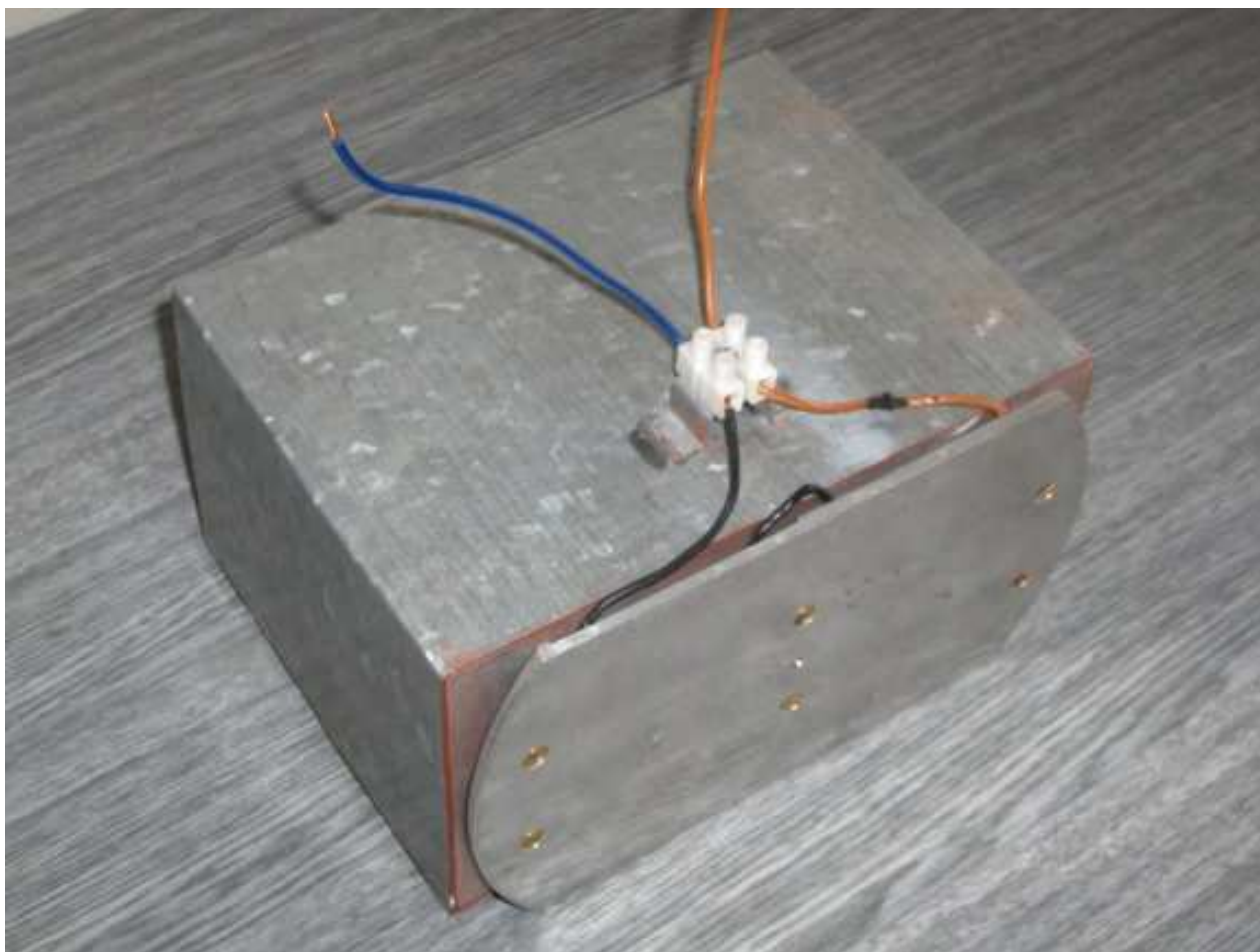
Příloha 1	Pohled na systém s moduly HZ-20 seshora	64
Příloha 2	Pohled na systém s moduly HZ-20 zespod	65
Příloha 3	Celkový pohled na systém s moduly HZ-20 spolu se zvyšujícím DC/DC měničem a se žárovkou na zátěži v provozu	66



Přílohy



Příloha 1 Pohled na systém s moduly HZ-20 seshora



Příloha 2 Pohled na systém s moduly HZ-20 zespod



Příloha 3 Celkový pohled na systém s moduly HZ-20 spolu se zvyšujícím DC/DC měničem a se žárovkou na zátěži v provozu