



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VYUŽITÍ TERMoeLEKTRICKÉHO GENERÁTORU PRO ZVÝŠENÍ VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA

USE OF A THERMOELECTRIC GENERATOR FOR INCREASING HEAT RECOVERY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ LAGA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Laga

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

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití termoelektrického generátoru pro zvýšení využití odpadního tepla

v anglickém jazyce:

Use of a thermoelectric generator for increasing heat recovery

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití odpadního tepla je aktuální problém současnosti. K tomuto účelu jsou použity tepelné výměníky, které mohou být pasivní nebo aktivní. V případě aktivních výměníků je tok média zajištěn ventilátorem, který je třeba napájet ze zdroje elektrické energie. Ten však v některých případech může být problém.

Cílem práce je navrhnout napájení ventilátoru zajišťující zvýšení účinnosti výměníku na odpadní teplo. Jako zdroj napájení by měl být využit termoelektrický generátor, který dokáže generovat elektrickou energii na základě na něm vytvořeného tepelného rozdílu. Rovněž by bylo zaručeno spínání ventilátoru pouze v případě přívodu odpadního tepla do výměníku.

Cíle diplomové práce:

1. Rešeršní studie konstrukcí a materiálů TEG
2. Volba parametrů TEG pro zvolenou aplikaci
3. Realizace výměníku tepla s termoelektrickým generátorem
4. Testování na zvoleném výměníku a závěrečné zhodnocení

Seznam odborné literatury:

- [1] M. Li : Thermoelectric-Generator-Based DCDC Conversion Network for Automotive Applications, Master of Science Thesis. Stockholm, Sweden 2011
- [2] Vlach, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.
- [3] Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraw Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.
- [4] Idelčik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá řešením problému odpadního tepla, konkrétně spalin, které nejsou často využívány. Jedná se o návrh soustavy termoelektrických generátorů, elektroniky pro napájení ventilátoru a návrh tepelného výměníku. Celá soustava využívá energii odpadního tepla pro zvýšení účinnosti vytápění.

Abstract

This thesis deals with the problem of waste heat, namely, the exhaust gas which are not frequently used. Specifically, it is a design of thermoelectric generators set, power electronics for fan and heat exchanger proposal. The entire system uses the energy of the waste heat to increase the heating efficiency.

Klíčová slova

Tepelné procesy, Termoelektrické jevy, Termoelektrický generátor, Tepelný výměník, Chladič, Odpadní teplo, DC/DC měnič, Energy harvesting, Matlab, SolidWorks

Keywords

Thermal processes, Thermoelectric phenomena, Thermoelectric generator, Heat exchanger, Heat sink, Waste heat, DC/DC converter, Energy harvesting, Matlab, SolidWorks

Bibliografická citace

LAGA, O. Využití termoelektrického generátoru pro zvýšení využití odpadního tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Využití termoelektrického generátoru pro zvýšení využití odpadního tepla*“ vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedených zdrojů odborné literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

29. května 2015

.....
Bc. Ondřej Laga

Poděkování

Velmi rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Radku Vlachovi, PhD. za vedení, podnětné připomínky a cenné rady při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval všem pracovníkům Fakulty strojního inženýrství za znalosti a praktické rady, které mi předali. V neposlední řadě patří poděkování i těm, kteří mě při studiu podporovali.

Obsah

1	ÚVOD	9
2	CÍL PRÁCE	10
3	REŠERŠNÍ STUDIE	11
3.1	Historie termoelektrických jevů	11
3.2	Termoelektrické jevy	12
3.2.1	Seebeckův jev	12
3.2.2	Peltierův jev	14
3.2.3	Thomsonův jev.....	15
3.2.4	Vztahy mezi termoelektrickými koeficienty	15
3.3	Konstrukce termoelektrických modulů	16
3.4	Termoelektrické materiály	18
3.5	Tepelné výměníky	20
3.5.1	Typy tepelných výměníků	20
3.5.2	Součinitel prostupu tepla.....	21
3.5.3	Metody pro navrhování výměníků.....	22
4	VOLBA PARAMETRŮ GENERÁTORU	24
5	MODEL TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	29
6	NÁVRH ZAŘÍZENÍ	34
6.1	Konstrukce	34
6.2	Technická dokumentace	42
6.3	Elektronika – DC/DC měniče.....	42
6.3.1	LMR61428	45
6.3.2	LM2623.....	47
6.3.3	XL6009	49
6.3.4	MT3608.....	51
6.3.5	Výsledná volba elektroniky.....	52
6.4	Celkové sestavení.....	56
7	ZÁVĚREČNÉ TESTOVÁNÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	58
8	ZÁVĚR	61
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
10	SEZNAM TABULEK	64
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
12	SEZNAM PŘÍLOH	67

1 Úvod

Využití odpadního tepla je v této době pro mnohé aplikace zapomínanou záležitostí. Unikající teplo jak v plynné, tak kapalně či pevně formě lze nazývat obecně jako tepelné ztráty do okolí. Byla by ale škoda toto teplo nevyužít a nepřeměnit ho na energii jinou než tepelnou. Tepelná energie se v současné době přeměňuje většinou na energii elektrickou, která je pak nadále využita, popřípadě se využije na přestup toku této energie do jiného média prostřednictvím tepelných výměníků.

V současnosti se k takovéto přeměně energie používají termoelektrické generátory (TEG) či turbíny spojené s generátory, které jsou známé z většiny elektráren. V menších aplikacích si asi těžko představíme velkou turbínu a generátor, proto se zde využívají generátory termoelektrické. Nevýhodou termoelektrických generátorů je jejich nízká účinnost. Nicméně pro malé aplikace a pro napájení nenáročných zařízení je tento typ generátoru plně postačující.

V našem případě se tedy využije termoelektrického generátoru pro napájení ventilátoru, který bude zajišťovat nucené proudění vzduchu přes tepelný výměník a tím i minimalizovat tepelné ztráty do okolí.

Tato myšlenka bude pak aplikována na reálný model komínu rodinného domu. Cíl spočívá v konstrukci a přichycení termoelektrických generátorů na komínový odvod a následné sestavení efektivního výměníku tepla včetně instalace ventilátoru a k němu i podpůrné elektroniky. Abychom dosáhli nejlepších výsledků, je vhodné si provést matematické výpočty a simulaci v PC a předejít tak reálným problémům. Poté takto zkonstruovaná a sjednocená reálná soustava by měla zvýšit účinnost vytápění v domácnostech.

2 Cíl práce

Využití odpadního tepla je aktuální problém současnosti. K tomuto účelu jsou použity tepelné výměníky, které mohou být pasivní nebo aktivní. V případě aktivních výměníků je tok média zajištěn ventilátorem, který je třeba napájet ze zdroje elektrické energie. Ten však v některých případech může být problém.

Cílem práce je navrhnout napájení ventilátoru zajišťující zvýšení účinnosti výměníku na odpadní teplo. Jako zdroj napájení by měl být využit termoelektrický generátor, který dokáže generovat elektrickou energii na základě na něm vytvořeného tepelného rozdílu. Rovněž by bylo zaručeno spínání ventilátoru pouze v případě přívodu odpadního tepla do výměníku.

Jednotlivé cíle práce, které je potřeba splnit jsou:

- Rešeršní studie konstrukcí a materiálů TEG.
- Volba parametrů TEG pro zvolenou aplikaci.
- Realizace výměníku tepla s termoelektrickým generátorem.
- Testování na zvoleném výměníku a závěrečné zhodnocení.

3 Rešeršní studie

3.1 Historie termoelektrických jevů

Termoelektrické jevy patří k nejstarším pozorovaným jevům v pevných látkách. Jako prvním objevitelem termoelektrického jevu se stal v roce 1821 estonsko-německý fyzik Thomas J. Seebeck (1770 – 1831). Seebeck dokázal, že při ohřívání spoje dvou vodičů různých vodivých nebo polovodivých materiálů vzniká magnetické pole, které je způsobeno indukovaným elektromotorickým napětím [1], [2].

O třináct let později, přesně v roce 1834, přichází francouzský fyzik Charles A. Peltier s objevem komplementárním k jevu Seebeckovu. Peltier zkoumal změnu teplot konců dvou rozdílných materiálů (zapojených v sérii) pokud jimi protéká elektrický proud. Pak v závislosti na směru proudu se konce buďto ohřívají nebo ochlazují. Odtud pak jev dostal název jako Peltierův [1], [2].

Souvislost mezi Seebeckovým a Peltierovým jevem v roce 1854 dokázal William Thomson (Lord Kelvin). Podstatou jeho pozorování bylo uvolňování nebo pohlcování tepla v homogenním vodiči, kterým prochází elektrický proud při teplotním rozdílu. Tento jev se nazývá Thomsonův [3].

„Jako první, kdo začal používat model pro odvození maximální účinnosti a výkonu termoelektrického článku, byl roku 1909 Edmund Altenkirch. Jeho výpočetní vztahy se v pozdější době formulovaly až do dnešní podoby termoelektrické účinnosti (tzv. Meritu) ZT , jenž shrnuje vlastnosti termoelektrického materiálu, který by měl mít vysoký Seebeckův koeficient, vysokou elektrickou vodivost (pro minimalizování Joulova tepla vznikajícího průchodem elektrického proudu vodičem) a nízkou tepelnou vodivost (pro minimalizování tepelných ztrát). Následně po formulaci těchto vztahů se ukázalo, že vývoj termoelektrických materiálů, který se výhradně soustředil pouze na kovové materiály (dosahujících nízkých hodnot Seebeckova koeficientu), by se mohl ubírat směrem k nerostům s vlastnostmi polovodičů“ [2].

Tyto požadavky na vlastnost určitého materiálu byly zahrnuty do veličiny, které se říká koeficient termoelektrické účinnosti Z :

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

kde:

α	[V/K]	Seebeckův koeficient
σ	[S/m, $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]	elektrická vodivost
λ	[W/m.K]	tepelná vodivost.

V níže uvedené kapitole pojednávající o termoelektrických materiálech se často zmiňuje bezrozměrný koeficient ZT . Pro danou absolutní teplotu je tudíž výhodnější zavést tento koeficient ZT , protože koeficient Z (1) je proměnný v závislosti na teplotě.

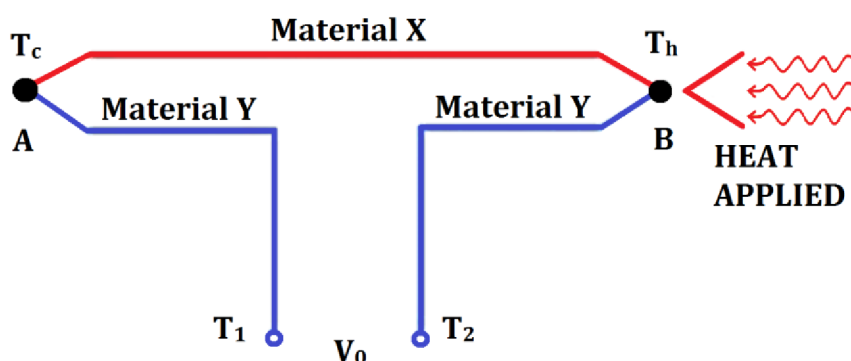
S postupem času se v 20. století vyvíjely a zkoumaly různé směsi materiálů, pro které bude koeficient termoelektrické účinnosti nejvyšší. Zájem o autonomní zdroje elektrické energie byl obrovský z důvodu toho, že jde o spolehlivější a jednodušší řešení oproti jiným efektivnějším zařízením. „V nedávné době byly nalezeny materiály, které mají struktury s prázdnými objemy (klatráty, skutterudity), do kterých lze umístit vhodný atom, který je velmi volně vázán a může drasticky snížit mřížkovou tepelnou vodivost při současném zachování vysoké elektrické vodivosti. Byly vyvinuty nové technologie přípravy materiálů a bylo hlouběji porozuměno fyzikálním procesům, které určují vlastnosti těchto látek“ [1].

3.2 Termoelektrické jevy

S historií termoelektrických jevů jsme byli seznámeni v předchozí kapitole. V této následující části budou podrobněji popsány jednotlivé termoelektrické jevy.

3.2.1 Seebeckův jev

Seebeckův jev lze jednoduše objasnit na příkladu termoelektrické dvojice vodičů, na kterých je založena termoelektrická přeměna.



Obr. 1 Schéma termoelektrické dvojice a Seebeckova jevu, upraveno z [4]

Na obr. 1 uvedeném výše je znázorněný obvod s dvěma různými vodiči X a Y o různých materiálech. Pokud tyto vodiče spojíme do série a pokud udržíme na spojích A a B různé teploty T_h a T_c a současně $T_h > T_c$, vznikne mezi kontakty T_1 a T_2 elektromotorické napětí V_0 , které je dáno vztahem [1]:

$$V_0 = \alpha_{XY} \cdot \Delta T = \alpha_{XY} (T_H - T_C) \quad [\text{V}], \quad (2)$$

kde:

V_0	[V]	generované napětí
α_{XY}	[V/K]	Seebeckův relativní koeficient
ΔT	[K]	teplotní rozdíl teplé a chladné strany.

„Pokud by rozdíl teplot obou rozhraní kovů byl větší než zhruba několik desítek kelvinů, bylo by nutné místo lineárního vztahu použít vztah složitější. Napětí by tak

nebylo již přímo úměrné rozdílu teplot, ale ve výrazu by se objevily i kvadratické členy, kubické členy a další“ [5].

Seebeckův koeficient

Seebeckův koeficient může být absolutní či relativní. Absolutní je označován jako α a je definován pro jeden osamocený vodič, jehož hodnota se mění v závislosti na teplotě a elektromotorickém napětí. Hodnota výsledného koeficientu je závislá na chemických vlastnostech materiálu a na teplotě [6].

$$\alpha = \frac{dU}{dT} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{K}} \right] \quad (3)$$

Relativní Seebeckův koeficient platí pro termoelektrické dvojice vytvořené dvěma vodiči o různých materiálech. S těmito dvojicemi se v praxi setkáváme častěji, proto platí vztah:

$$\alpha_{XY} = \frac{dV_0}{dT} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{K}} \right]. \quad (4)$$

Vztah mezi oběma typy Seebeckových koeficientů lze pak určit jako:

$$\alpha_{XY} = \alpha_X - \alpha_Y \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{K}} \right]. \quad (5)$$

V níže uvedené tabulce (tab. 1) jsou uvedeny hodnoty α nejčastěji používaných materiálů pro teplotu $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. V praxi se jednotky udávají nejčastěji v $\mu\text{V}/\text{K}$.

Tab. 1 Seebeckovy koeficienty nejpoužívanějších materiálů [7]

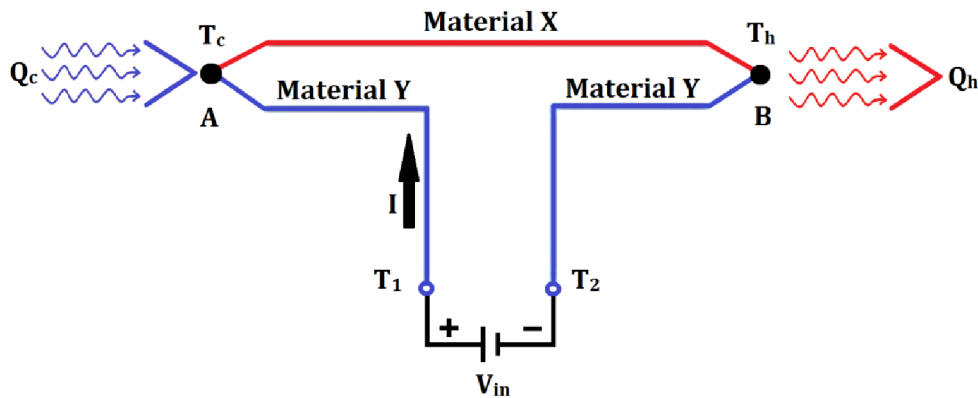
materiál	α	materiál	α	materiál	α
antimon	47	měď	6,5	sodík	-2
bismut	-72	nichrom	25	stříbro	6,5
draslík	-9	nikl	-15	tantal	4,5
germanium	300	olovo	4	telur	500
hliník	3,5	platina	0	uhlík	3
kadmium	7,5	rhodium	6	wolfram	7,5
konstantan	-35	rtuť	0,6	zlato	6,5
křemík	440	selen	900	železo	19

*jednotky: $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$; všechny hodnoty materiálů jsou pro $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

Největšího relativního Seebeckova koeficientu lze dosáhnout tak, že se v termodvojicích zkombinují materiály s nevyšším kladným a záporným Seebeckovým koeficientem. Z tab. 1 bychom pro názornost vybrali například termodvojici ze *Selenu* a z *Bismutu*. Pro vznik Seebeckova napětí musíme však dbát na dosažení teplotního rozdílu na obou vodičích.

3.2.2 Peltierův jev

Inverzní jev k jevu Seebeckovému je jev Peltierův. Pokud na svorky T_1 a T_2 připojíme zdroj elektromotorického napětí V_{in} a obvodem poteče proud I ve směru naznačeném na obr. 2, pak se na spoji A teplo pohlcuje a na spoji B uvolňuje. Při opačném směru proudu by byl tepelný tok opačný [1].



Obr. 2 Peltierův jev, upraveno z [4]

Peltierův koeficient

„Peltierův koeficient definujeme pro totožnou termoelektrickou dvojici složenou z vodičů X a Y (obdobně jako při objasňování Seebeckova koeficientu), kde jeho hodnota je úměrná poměru tepla emitovaného resp. absorbovaného na patřičné straně spoje vodiče k protékajícímu elektrickému proudu.“ [2].

$$\pi_{XY} = \frac{Q}{I} \quad [\text{WA}^{-1}]; [\text{V}], \quad (6)$$

kde:

π_{XY}	[V]	Peltierův relativní koeficient
Q	[W]	teplo prostupující skrze termodvojici
I	[A]	elektrický proud protékající termodvojicí.

Ze vztahu (6) můžeme pak určit vzniklé teplo při známém Peltierově koeficientu:

$$Q = \pi \cdot I \quad [\text{W}]. \quad (7)$$

U Seebeckova koeficientu jsme si zavedli koeficient absolutní. Stejně tomu tak je i u koeficientu Peltierova. Vztah mezi relativním a absolutním koeficientem je dán:

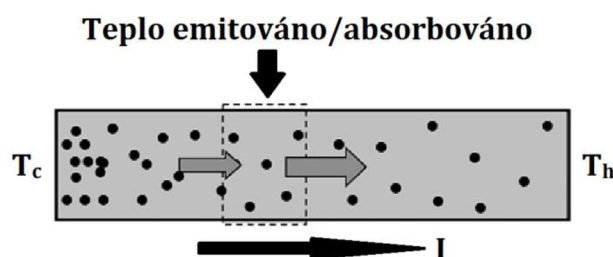
$$\pi_{XY} = \pi_X - \pi_Y \quad [\text{WA}^{-1}]; [\text{V}]. \quad (8)$$

„Peltierův koeficient je velmi obtížně měřitelný, proto se spíše používá Seebeckův koeficient. Přepočtení mezi nimi je možný pomocí střední teploty na termodvojici,“ [8]:

$$\alpha = \frac{\pi}{T} \left[\frac{V}{K} \right]. \quad (9)$$

3.2.3 Thomsonův jev

Popisuje vratnou tepelnou změnu na libovolný vodič z homogenního materiálu, jenž jeho konce jsou vystaveny teplotnímu rozdílu a zároveň jim prochází elektrický proud. Při tomto jevu dochází ke zvyšování či snižování potenciální energie nosičů elektrického náboje vlivem pohlcování nebo uvolňování tepla.



Obr. 3 Thomsonův jev, upraveno z [2]

Thomsonův koeficient

Jelikož Thomsonův jev je analogicky podobný jevu Peltierovu (jednotky ve V), nevytváří však elektrický potenciál. Potom je jeho koeficient vyjádřen v jednotkách V/K, stejně jako u koeficientu Seebeckova [9].

Při malém teplotním gradientu se množství tepla vyjádří vztahem:

$$Q = \beta \cdot I \cdot \Delta T \quad [\text{W}], \quad (10)$$

kde:

β	[V/K]	Thomsonův koeficient
Q	[W]	teplo prostupující skrze homogenní vodič
I	[A]	elektrický proud protékající homogenním vodičem
ΔT	[K]	teplotní rozdíl obou konců vodiče.

Thomsonův koeficient lze pak z (10) vyjádřit:

$$\beta = \frac{Q}{I \cdot \Delta T} \left[\frac{V}{K} \right]. \quad (11)$$

3.2.4 Vztahy mezi termoelektrickými koeficienty

Vzájemnou souvislost mezi třemi výše uvedenými termoelektrickými koeficienty (Seebeckův, Peltierův, Thomsonův) popisují Kelvinovy vztahy [3].

Abychom mohli určit Peltierův koeficient, lze přes Kelvinův vztah a známou hodnotu Seebeckova koeficientu (lze jednodušeji změřit) tento koeficient vyhodnotit:

$$\pi_{XY} = \alpha_{XY} \cdot T \quad [\text{V}], \quad (12)$$

kde:

π_{XY}	[V]	Peltierův koeficient
α_{XY}	[V/K]	Seebeckův relativní koeficient
T	[K]	teplota.

Druhým Kelvinovým vztahem lze popsat souvislost mezi koeficientem Seebeckovým a Thomsonovým, resp. diferenci mezi Thomsonovými koeficienty dvou vodičů:

$$\frac{d \alpha_{XY}}{dT} = \frac{\beta_X - \beta_Y}{T} \quad [-]. \quad (13)$$

3.3 Konstrukce termoelektrických modulů

Termoelektrické moduly (TEM) se skládají ze vzájemně sériově propojených termoelektrických dvojic (obr. 5). Tyto dvojice jsou tvořeny polovodičovými termoelementy typu p a n (vzájemně spojeny tenkými kovovými můstky) a jsou umístěny mezi dvěma keramickými deskami o malých rozměrech (obr. 4) [1], [2].

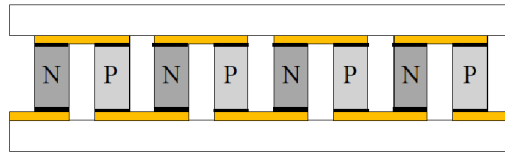


Obr. 4 Thin-film TEG Micropelt MPG-655 3,3 x 2,4 x 1,1 mm (vlevo) [10], TEG/TEC článek 30 x 30 mm (vpravo) [11]

„Termoelektrické články jsou zařízení menších rozměrů. Pro běžné použití se vyrábějí v různých velikostech. Jejich rozměry (čtvercová destička) jsou od MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) článků velikostí kolem 2 x 2 mm a výšky od 0,5 mm (výrobce: Nextreme) po články velikosti kolem 65 x 65 mm o tloušťce asi 3 až 6 mm (výrobce: thermalforce.de)“ [8].

Jak už bylo řečeno, termodvojice jsou u těchto modulů zapojeny z elektrického hlediska sériově, ale z tepelného paralelně. Z tohoto důvodu je

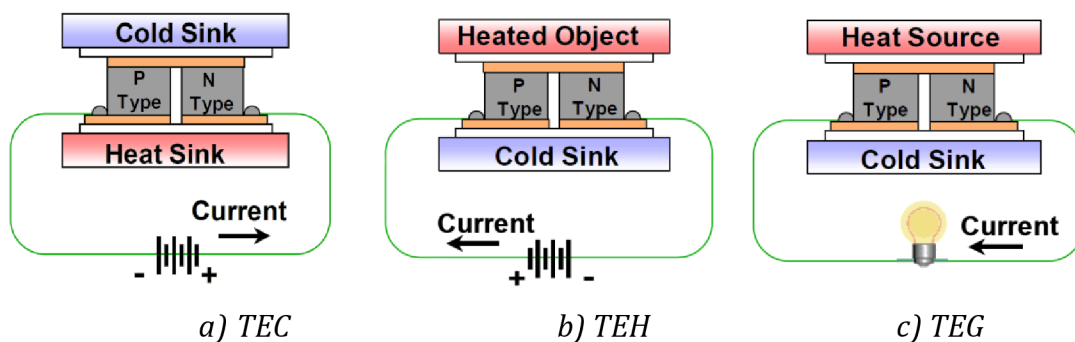
nutno dodržet rovnoměrné chlazení či ohřívání obou keramických desek (obr. 6), jinak dojde ke vzniku problému, který známe např. z různě nabitých baterií uspořádaných v sérii za sebou [8].



Obr. 5 Uspořádání polovodičových elementů uvnitř TEM [12]

Takto uspořádané moduly mohou pracovat ve dvou různých režimech. První režim je chladič/ohřívač, který využívá Peltierova jevu a druhým zmíněným je režim generátoru, který naopak využívá jevu Seebeckova. Dle využitých jevů a režimů se moduly dělí následovně:

- TEC (Thermoelectric cooling) – termoelektrický chladič
- TEH (Thermoelectric heater) – termoelektrický ohřívač
- TEG (Thermoelectric generator) – termoelektrický generátor

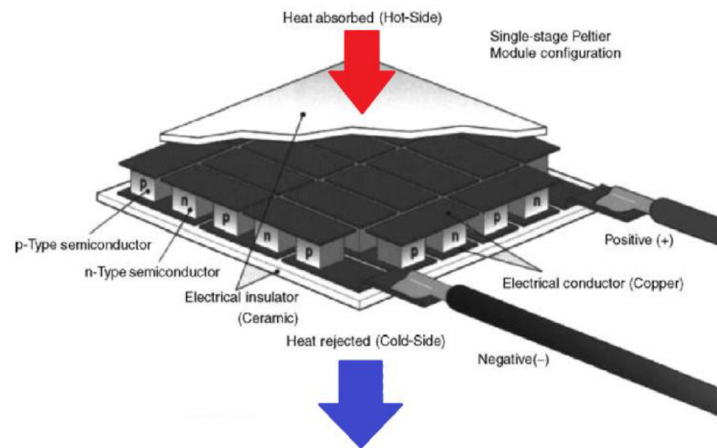


Obr. 6 Princip činnosti jednotlivým režimů TEM [12]

Aby byl termoelektrický modul dostatečně pevný, je pokryt keramickými deskami (rozlišuje se zde teplá a studená strana). Desky také zajišťují dostatečnou izolaci od okolí, zprostředkovávají přívod tepla na teplosměnné plochy termoelementů, přičemž musí dosahovat velmi dobrých tepelných vodivostí. Z tohoto důvodu se desky vyrábí z oxidu hlinitého (Al_2O_3), který je na výrobu levný. Další používané, ale i dražší materiály jsou např. nitrid hlinitý (AlN) či oxid berylnatý (BeO) [8], [13].

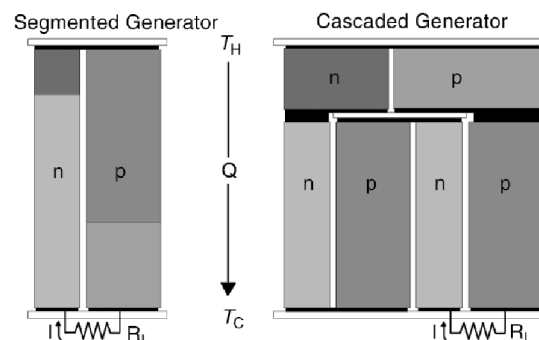
Mezi dvěma keramickými deskami jsou umístěny, jak už bylo výše řečeno, termoelementy p a n . Jsou nejčastěji vzájemně sériově propojeny a elementy se zde střídají (vznikají termoelektrické dvojice). Spojení je většinou realizováno kovovými můstky, které jsou nejčastěji z velmi vodivého materiálu (malý elektrický odpor), resp. z mědi. K můstkům jsou pak termoelementy připájeny. S tím současně souvisí omezení termoelektrických modulů z teplotního hlediska, čili při vysokých teplotách modulů může dojít k odpájení (z příčiny teploty tání pájky) termoelementů od propojovacích můstků. Proto jsou běžné moduly omezeny většinou na maximální teploty až 250 °C.

Řez termoelektrickým modulem je naznačen na obr. 7. Zde je však naznačena struktura TEG článku. U článku TEC se pouze zamění směr tepelného toku, tudíž jde opačným směrem.



Obr. 7 Vnitřní struktura TEG článku, upraveno z [3]

Termoelementy lze uspořádat také i do jiných geometrických konfigurací, např. do uspořádání kaskádního (obr. 8).

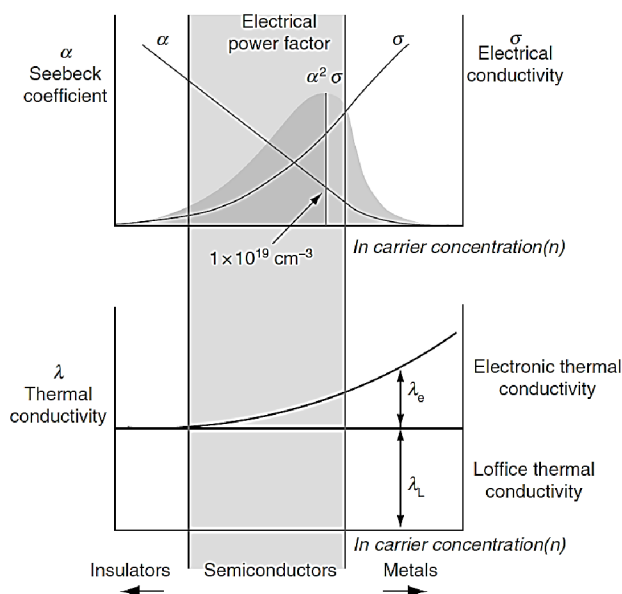


Obr. 8 Různé geometrické uspořádání termoelementů [3]

3.4 Termoelektrické materiály

Pro výběr vhodného materiálu termoelektrického modulu je jedním z důležitých parametrů elektrická vodivost. Velmi dobrou měrnou elektrickou vodivost σ (konduktivita) mají obecně kovy. Vodivost je závislá na počtu nosičů náboje, avšak jejich termoelektrické generované napětí a také Seebeckův koeficient α , který dosahuje většinou nízkých hodnot [3]. „S rostoucím počtem nosičů elektrického náboje navíc také stoupá tepelná vodivost λ daného materiálu, která je pro návrh termoelektrického článku nežádoucí a snižuje tak jeho požadovanou termoelektrickou účinnost. Proto se při výrobě termoelektrických článků volí materiály

polovodičové, které ačkoli nedominují svou elektrickou vodivostí (leží v oblasti mezi kovy a izolátory), dosahují lepších parametrů a nabízejí použitelnější vlastnosti“ [2].



Obr. 9 Schéma závislosti elektrické vodivosti, Seebeckova koeficientu a tepelné vodivosti na koncentraci volných nosičů náboje [3]

Dalším důležitým rozhodujícím faktorem při výběru termoelektrického modulu je interval teplot materiálu, z kterého je modul složen a současně musí být v tomto intervalu schopen provozu. Mezi nejpoužívanější termoelektrické materiály patří slitiny telluridu bismutitého, telluridu olovnatého, antimonu bismutitého nebo slitiny křemíku a germania [9]. Jednotlivé pracovní intervaly teplot pro různé slitiny materiálů jsou uvedeny v tab. 2.

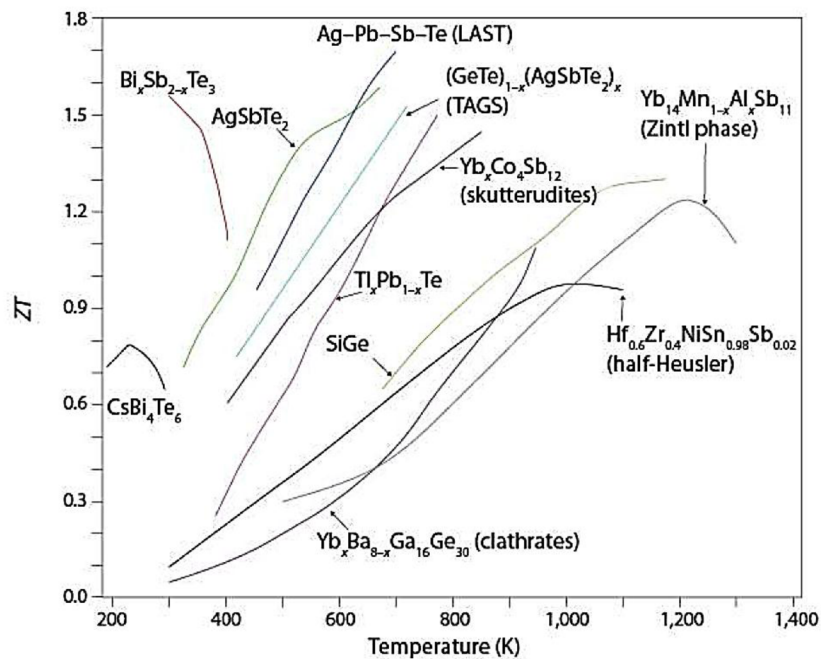
Tab. 2 Pracovní teploty termoelektrických polovodičových materiálů [3]

Materiál	Bi_2Te_3	Bi_2Sb_3	Sb_2Te_3	PbTe	PbTeSe	SiGe
Typ polovodiče	N, P	N, P	P	N, P	P	N, P
Provozní teploty [K]	200–450	300–400	200–300	400–950	650–900	900–1300

V 50. letech minulého století postupně dochází k objevování nových materiálů pro konstrukci termoelektrických modulů, přičemž cílem tohoto výzkumu bylo rapidně zvýšit termoelektrickou účinnost. K tomuto zvýšení avšak došlo až v posledním desetiletí.

„Kupříkladu objev materiálu nazývaného skutterudit, který je popisován jako materiál (často na bázi kobaltu či arsenu) do jehož mezimřížkového prostoru je možno vložit atom určité velikosti. Tento atom zapříčiní útlum vibrací krystalické mřížky a tím sníží výslednou tepelnou vodivost celého materiálu“ [2].

Koeficient termoelektrické účinnosti ZT , jak už bylo zmíněno v kap. 3.1, je funkcí teploty, proto je možné dosáhnout maximální účinnosti jen v malém intervalu pracovních teplot.



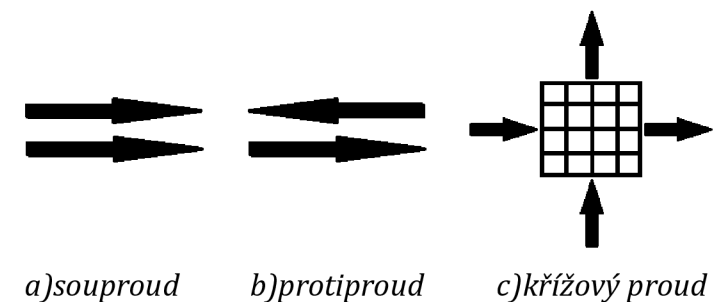
Obr. 10 Termoelektrická účinnost polovodičových materiálů v závislosti na pracovní teplotě [1]

3.5 Tepelné výměníky

Tepelné výměníky jsou zařízení, která obecně slouží k přenosu tepla mezi dvěma, popřípadě i více látkami o různých teplotách a většinou oddělených pevnou stěnou. Tato zařízení se používají v mnoha inženýrských aplikacích jako ohřivače či chladiče různých procesních látek nebo okolního prostředí. Setkáváme se s nimi velmi často, např. v domácích chladničkách, automobilech, elektrárnách, klimatizacích apod. [14], [15].

3.5.1 Typy tepelných výměníků

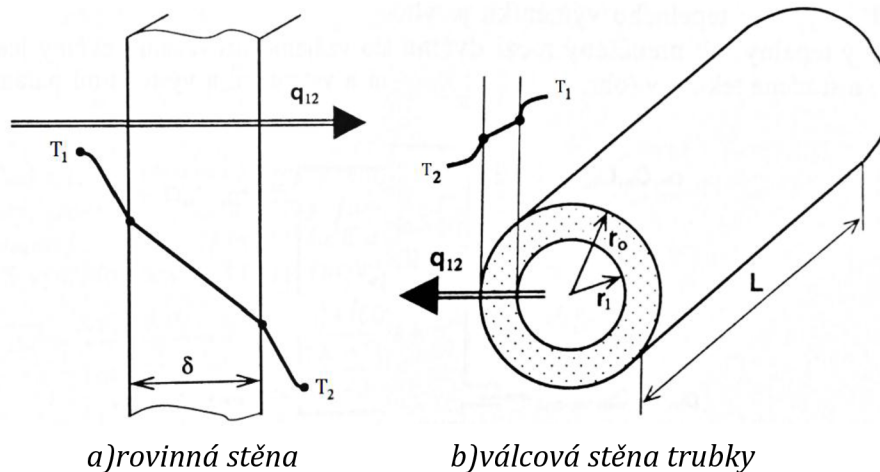
„Tepelné výměníky jsou většinou označovány podle charakteru proudění a typu konstrukce. Nejjednodušším typem je uspořádání, kdy horká a studená tekutina proudí ve stejném (soproud) anebo opačném (protiproud) směru (obr. 11). Někdy mohou tekutiny proudit kolmo na sebe, v takovém případě se jedná o křížový proud. Dále existují i některé další typy konstrukčního uspořádání“ [14].



Obr. 11 Základní typy uspořádání tepelných výměníků

3.5.2 Součinitel prostupu tepla

Prostup tepla nastává při přenosu tepla z jedné tekutiny do druhé přes pevnou přepážku. Tyto tekutiny od sebe mohou být odděleny častěji rovinnou stěnou, popřípadě válcovou stěnou trubky.



Obr. 12 Součinitel prostupu tepla, upraveno z [14]

Pro případ, že tepelný tok jde přes rovinnou stěnu (obr. 12a), je přenášen postupně konvekcí z horké tekutiny o teplotě T_1 do studené tekutiny o teplotě T_2 . Z teorie termomechaniky je nám známo, že pro přenášený tepelný tok s využitím součinitele prostupu tepla platí:

$$q_{12} = k \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W}], \quad (14)$$

kde:

q_{12}	[W]	skutečný přenášený tepelný tok
k	[W/m ² .K]	součinitel prostupu tepla
S	[m ²]	teplosměnná plocha rovinné stěny
T_1	[K]	teplota horké tekutiny
T_2	[K]	teplota studené tekutiny.

Samotný součinitel prostupu tepla k je pak dán vztahem (15) závislým na součtu jednotlivých tepelných odporů proti konvekci na straně horké tekutiny, proti vedení tepla stěnou a proti konvekci na straně studené tekutiny:

$$k = \frac{1}{\sum R_i} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right], \quad (15)$$

kde:

R_i	[K/W]	dílčí tepelný odpor (konvekce, vedení, konvekce)
α_1	[W/m ² .K]	součinitel přestupu tepla proti konvekci
α_2	[W/m ² .K]	součinitel přestupu tepla proti konvekci
δ	[m]	tloušťka rovinné stěny
λ	[W/m.K]	součinitel přestupu tepla proti vedení.

Pokud budeme uvažovat válcovou stěnu trubky (obr. 12b), musí se vztah pro součinitele prostupu tepla poněkud pozměnit. Následující vztah platí pro součinitele prostupu tepla vztaženého k vnějšímu poloměru trubky:

$$k = \frac{1}{\frac{r_0}{r_1} \cdot \frac{1}{\alpha_1} + \frac{r_0}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_0}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right], \quad (16)$$

kde:

r_0	[m]	vnější poloměr válcové trubky
r_1	[m]	vnitřní poloměr válcové trubky.

3.5.3 Metody pro navrhování výměníků

Vývoj metod výpočtu přenosu tepla ve dvoulátkových výměnících se začal systematicky rozvíjet na počátku 20. století. Nejčastěji používaná různá průtoková schémata byla přepracována do formy aplikovatelné v běžné konstrukční praxi. Proto se ve většině literatur hovoří o dvou různých přístupech návrhu.

Metoda LMTD (Logarithmic mean temperature difference)

U této metody je problém v určení teplotního rozdílu, protože se teploty obou tekutin (horké a studené) mění polohou. Tudiž se zavede nějaká střední teplotní diference tj. střední logaritmický teplotní spád [14]:

$$\overline{\Delta T} = \frac{(T_{h-in} - T_{c-out}) - (T_{h-out} - T_{c-in})}{\ln \frac{T_{h-in} - T_{c-out}}{T_{h-out} - T_{c-in}}} \quad [\text{K}], \quad (17)$$

kde:

$\overline{\Delta T}$	[K]	střední logaritmický teplotní spád
T_{h-in}	[K]	teplota vstupující horké tekutiny
T_{h-out}	[K]	teplota vystupující horké tekutiny
T_{c-in}	[K]	teplota vstupující studené tekutiny
T_{c-out}	[K]	teplota vystupující studené tekutiny.

Pak přenesený tepelný tok ve výměníku pro metodu LMTD a pro případ, že obě tekutiny proudí souproudem nebo protiproudem, platí:

$$q_{12} = k \cdot S \cdot \overline{\Delta T} \quad [\text{W}]. \quad (18)$$

Pro úplnost zbývá ještě zmínit střední logaritmický spád pro křížový proud, popřípadě konstrukční a výkonnostní výpočty pro tuto metodu. Jelikož tato metoda v práci nebyla použita, nebude zde rozvedena. Tato metoda je velmi dobře popsána v [14], [15].

Metoda ϵ -NTU

„V případě, že při návrhu tepelného výměníku známe pouze vstupní teploty obou látek, je možné použít výpočet pomocí středního logaritmického spádu, ale byl by nutný iterační postup (řešení nelineární rovnice). Proto je vhodnější použít

metody, která se označuje jako ε -NTU, kde ε je efektivnost výměníku a NTU značí Number od transfer unit“ [14].

Pro určení efektivnosti tepelného výměníku ε musíme nejprve určit maximální možný přenášený tepelný tok přes výměník mezi oběma tekutinami q_{max} . Maximálního přenášeného toku se dosáhne nejlépe v protiproudém, nekonečně dlouhém výměníku, kdy jedna z tekutin dosáhne maximálního teplotního rozdílu [14].

Podrobnosti o této metodě budou uvedeny v kap. 5 pojednávající o modelu tepelného výměníku. Dále bude součástí této kapitoly výpočet výkonnosti tepelného výměníku, z kterého se pak zkonstruuje reálný tepelný výměník (viz kap. 6).

4 Volba parametrů generátoru

Základním parametrem pro volbu termoelektrického modulu je dosažení co nejvyššího teplotního rozdílu mezi studenou a teplou stranou. Z tohoto parametru se pak dále odvíjí výkonnostní parametry celého modulu. Jak už bylo řečeno, cílem je experimentální využití generátoru pro získání tepelné energie z odpadního tepla, resp. ze spalin unikajících z kotle na tuhá paliva prostřednictvím komínového odvodu do okolí. Odpadní teplo přeměněné na elektrickou energii bude využito pro napájení periferního axiálního ventilátoru o výkonu 2,9 W.

Pro danou aplikaci byly dle jednotlivých technických dokumentací určeny 2 vhodné termoelektrické moduly od společnosti *thermalforce.de*, jelikož tyto moduly byly dříve použity v laboratořích školy pro jiné experimentální aplikace a měření. Tyto moduly nesou označení:

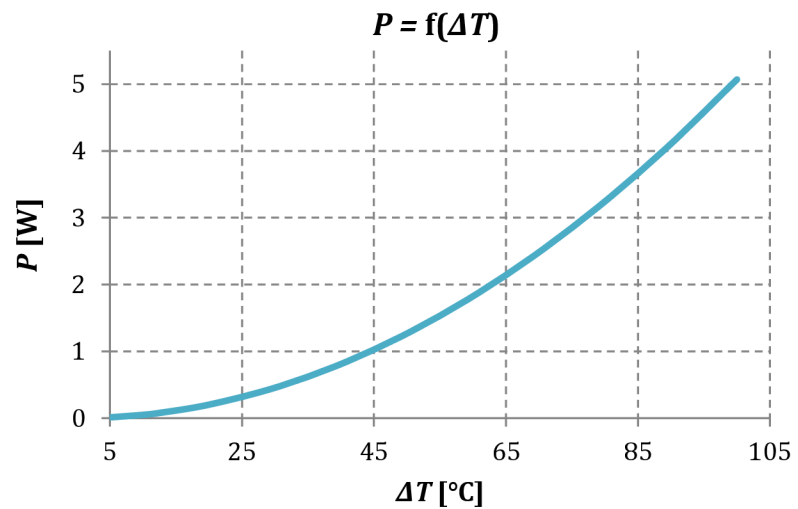
- TEG 127-175-26;
- TEG 127-250-38.

Z těchto námi zvolených modulů se experimentálním měřením (obr. 17) a vyhodnocením výsledků určí modul vhodnější pro tuto aplikaci.

Tab. 3 Parametry termoelektrického modulu TEG 127-175-26 [16]

Parametry TEG 127-175-26		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Délka	30	mm
Šířka	30	mm
Výška	2,8	mm
Maximální teplota modulu	175	°C
Maximální přitlak na modul	195	N/cm ²
Teplota studené strany	150	°C
Teplota teplé strany	50	°C
Teplotní rozdíl	100	°C
Seebeckův koeficient	0,068	V/K
Napětí naprázdno	5,735	V
Proud nakrátko	2,867	A
Maximální výkon modulu	4,107	W
Účinnost modulu	4,266	%
Tepelný odpor modulu	1,429	K/W
Elektrický odpor modulu	1,36	Ω
Tepelná vodivost modulu	0,7	W/mK
Tepelná vodivost keramiky	15	W/mK
Počet termoelektrických dvojic	127	-
Materiál termoelektrických dvojic	Bi ₂ Te ₃	
Materiál keramických desek	Al ₂ O ₃	

ΔT [°C]	P [W]
5	0,013
10	0,051
12,4	0,078
20	0,203
30	0,456
40	0,811
50	1,268
60	1,825
70	2,484
80	3,245
90	4,107
100	5,070



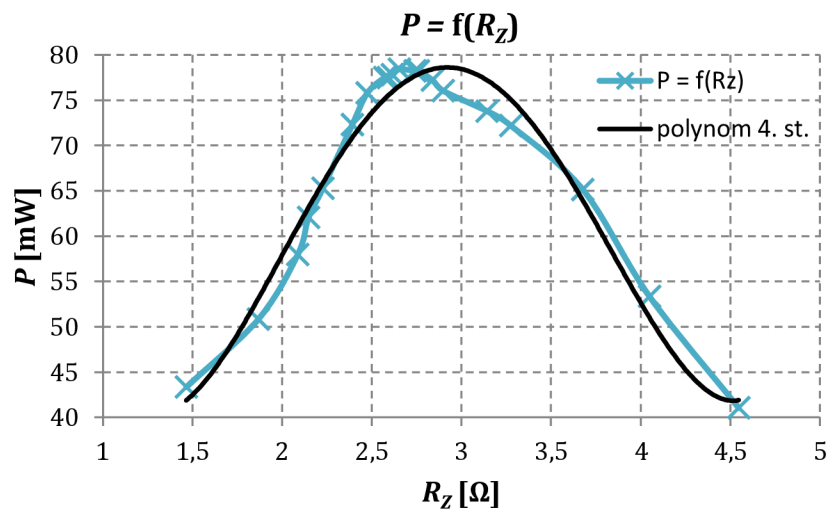
Obr. 13 Závislost výkonu na teplotním rozdílu pro TEG 127-175-26

Jak lze vidět z výše uvedené závislosti, výkon s rostoucím teplotním rozdílem ΔT roste (ale i opačně klesá) kvadraticky. Tato závislost je dána vztahem (19). Experimentálním měřením byla odečtena hodnota teplotního rozdílu 12,4 °C a také odečten výkon 0,078 W. Toto měření probíhalo při zátěži rovna vnitřnímu elektrickému odporu, při níž je účinnost modulu nejvyšší. Elektrický odpor je pak na obr. 14 experimentálně ověřen.

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}, \quad (19)$$

kde:

ΔT_1	[°C]	zadaný teplotní rozdíl
ΔT_2	[°C]	známý teplotní rozdíl z datasheetu (100 °C)
P_1	[W]	neznámý počítaný výkon modulu
P_2	[W]	známý výkon z datasheetu (5,07 W).



Obr. 14 Závislost výkonu modulu na zátěži pro TEG 127-175-26

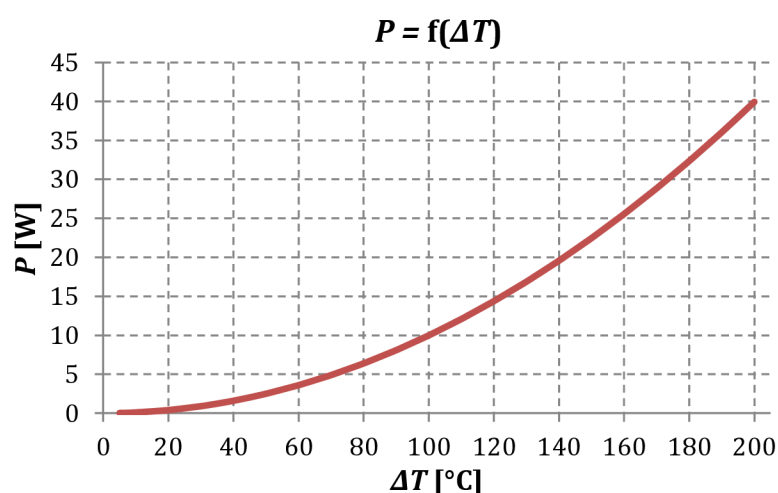
Z obr. 14 je patrné, že nevyššího výkonu modul dosahuje při cca $2,9 \Omega$ a to při teplotním rozdílu $12,44 \text{ }^\circ\text{C}$. Měření probíhalo při teplotě horké strany $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a při teplotě studené strany $37,56 \text{ }^\circ\text{C}$. Dle datasheetu má modul elektrický odpor $R_Z = 1,36 \Omega$, ale při experimentálním ověření dosahuje hodnoty $2,9 \Omega$. Z hlediska přesnosti tohoto technického listu k modulu TEG 127-175-26 [16] nejsou tyto hodnoty příliš věrohodné.

Experimentální měření pro námi vybraný druhý modul probíhalo stejným způsobem.

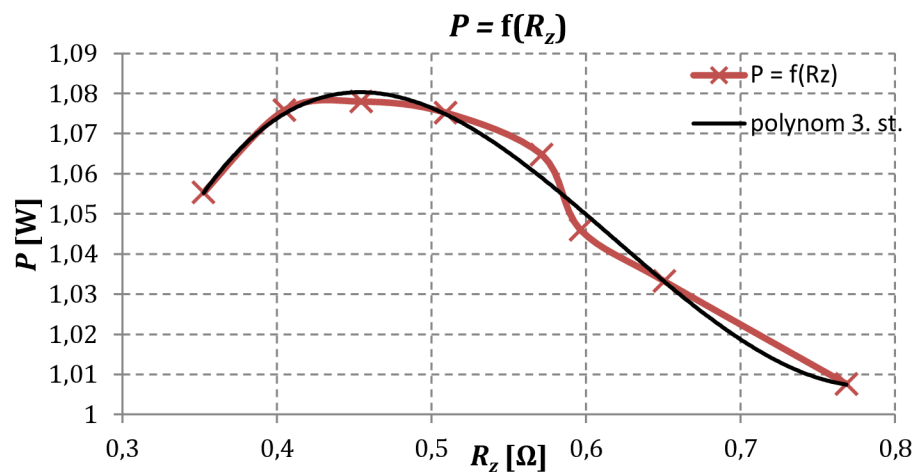
Tab. 4 Parametry termoelektrického modulu TEG 127-250-38 [17]

Parametry TEG 127-250-38		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Délka	62	mm
Šířka	62	mm
Výška	4,3	mm
Maximální teplota modulu	250	$^\circ\text{C}$
Maximální přitlak na modul	195	N/cm^2
Teplota studené strany	220	$^\circ\text{C}$
Teplota teplé strany	20	$^\circ\text{C}$
Teplotní rozdíl	200	$^\circ\text{C}$
Seebeckův koeficient	0,048	V/K
Napětí naprázdno	7,817	V
Proud nakrátko	13,958	A
Maximální výkon modulu	27,276	W
Účinnost modulu	4,356	%
Tepelný odpor modulu	0,345	K/W
Elektrický odpor modulu	0,35	Ω
Tepelná vodivost modulu	2,9	W/mK
Tepelná vodivost keramiky	15	W/mK
Počet termoelektrických dvojic	127	-
Materiál termoelektrických dvojic	Bi_2Te_3	
Materiál keramických desek	Al_2O_3	

ΔT [$^\circ\text{C}$]	P [W]
5	0,025
20	0,400
32,5	1,055
40	1,598
60	3,596
80	6,392
100	9,988
120	14,382
140	19,576
160	25,568
180	32,360
200	39,950



Obr. 15 Závislost výkonu na teplotním rozdílu pro TEG 127-250-38



Obr. 16 Závislost výkonu modulu na zátěži pro TEG 127-250-38

Po ustálení teploty horké strany modulu na hodnotě 83 °C a studené strany 50,5 °C byl udržován tento rozdíl a experimentálně ověřena výkonnostní závislost na zátěžném odporu R_z . Dle technického dokumentu k modulu [17], kde se uvádí hodnota elektrického vnitřního odporu 0,35 Ω, se experimentálním ověřením (obr. 16) získala hodnota přibližně 0,45 Ω. Tento rozdíl se mnoho neliší od technického listu k modulu (datasheetu).

Vzhledem k výkonovým charakteristikám ($P=f(\Delta T)$) obou modulů byl zvolen modul druhý, tudíž TEG 127-250-38 [17]. Pro námi vybraný napájený ventilátor o výkonu 2,9 W a k němu podpůrná elektronika v podobě zvyšujícího napěťového měniče bude potřeba minimálně 3,2 W výkonu.

Předpokládaná teplota studené strany, tudíž i okolí, bude cca 20 °C a teplota spalin v odvodu z kotle ohřeje teplotu teplé strany na předpokládaných cca 60 °C. Tento teplotní rozdíl bude pro jeden modul generovat elektrickou energii o výkonu 1,6 W (tab. 5). Poněvadž jsou nároky na požadovaný výkon vyšší, bude nutno tyto moduly zdvojnásobit, tudíž použít dva moduly zapojené v sérii.

Pro tento vybraný termoelektrický modul (TEG 127-250-38) byla sestavena tabulka pro orientační výpočet parametrů, kterých by se mělo v této aplikaci při daných podmínkách dosáhnout.

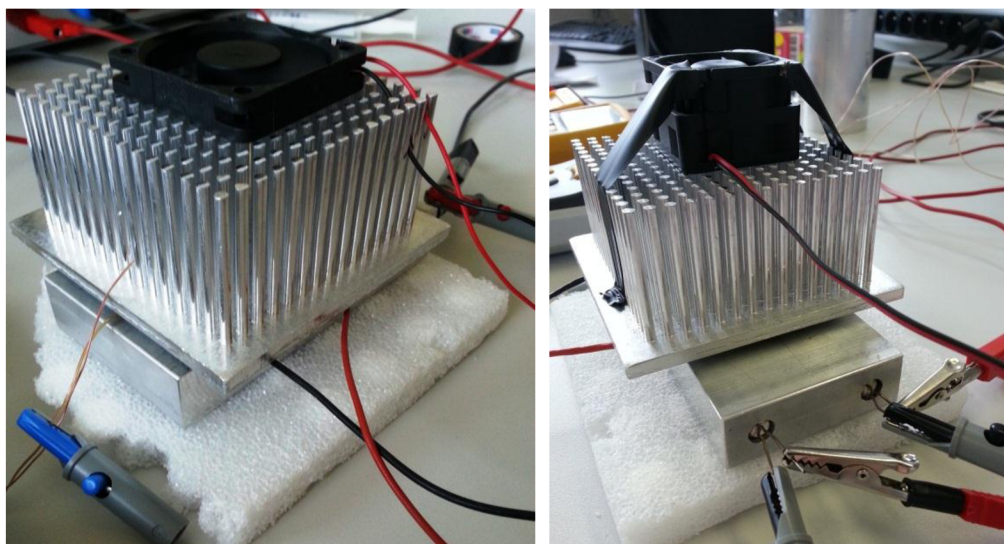
Tab. 5 Výpočet parametrů modulu TEG 127-250-38 ze zadaných hodnot

Předpokládané zadané hodnoty		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplota teplé strany	60	°C
Teplota studené strany	20	°C
Zátěž	0,35	Ω

Vypočtené hodnoty		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplotní rozdíl	40	°C
Tepelný tok přes modul	115,9	W
Tepelný odpor modulu	0,345	K/W
Napětí naprázdno	1,92	V
Napětí se zátěží	0,96	V
Proud se zátěží	1,66	A
Výkon se zátěží	1,60	W
Účinnost se zátěží	1,38	%

Z tab. 5 lze vyčíst, že výkon při námi zmíněné zátěži by byl pro napájení nepostačující. Potvrdila se tudíž výše uvedená myšlenka zapojení dvou modulů do série. Z hlediska sériového zapojení se vypočtené napětí při zátěži zdvojnásobí a proud zůstane na stejné hodnotě. Naopak kdybychom zapojení modulu provedli paralelně, napětí by nabývalo hodnoty stejné a proud by se zdvojnásobil. V našem případě je nutno dosáhnout co nejvyšší napětíové úrovně z důvodu podpůrné elektroniky (zvyšujícího napětíového měniče), proto zapojení volíme sériové (kap. 6).

Pro ukázkou je na obr. 17 znázorněno experimentální měření obou modulů. Horká strana je buzena dvojicí topných patron prostřednictvím laboratorního zdroje a studená strana je nucenou konvekcí ochlazována. Hodnoty všech teplot jsou měřeny termoelektrickými články. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty byly pak zapisovány.

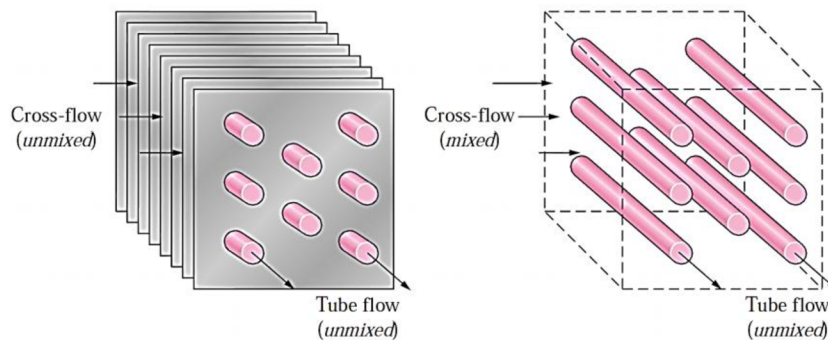


Obr. 17 Pracoviště experimentálního měření termoelektrických generátorů

5 Model tepelného výměníku

Při návrhu modelu tepelného výměníku, jak už bylo řečeno v kap. 3.5.3, byla použita metoda ε - NTU . Tato metoda byla použita z důvodu toho, že jsou nám známy pouze vstupní teploty obou látek. V tomto případě se jedná o vstupní teplotu spalin T_{h-in} (horká strana) odváděných z kotle a vstupní teplotu vzduchu nasávaného ventilátorem T_{c-in} (studená strana). Tyto známé parametry je nutno ještě rozšířit o velikost teplosměnné plochy výměníku a o tepelné kapacity teplé i studené látky. Úkolem tohoto přístupu je určit výstupní teploty obou látek vystupujících z výměníku.

V poslední řadě je také nutno si zvolit určitý typ (uspořádání) tepelného výměníku. V našem případě se jedná o křížový tepelný výměník s jednostranným směřováním na straně teplých spalin (obr. 18). Dle těchto zvolených parametrů lze namodelovat **výpočet výkonnosti tepelného výměníku**, tudíž určit výstupní teploty T_{c-out} a T_{h-out} obou látek.



Obr. 18 Rozdílné konfigurace křížových tepelných výměníků [18]

Abychom mohli definovat výstupní teploty obou látek odcházejících z výměníku, musíme nejprve určit ze vztahu (22) veličinu NTU a poměr tepelných kapacit obou látek R :

$$R = \frac{c_{min}}{c_{max}} \quad [-], \quad (20)$$

kde c_{min} je menší tepelná kapacita jedné z látek c_h , c_s a c_{max} je větší tepelná kapacita.

$$c_h = \rho_h \cdot C_h \cdot Q_h \quad c_s = \rho_s \cdot C_s \cdot Q_s \quad \left[\frac{W}{K} \right], \quad (21)$$

kde:

c_h	[W/K]	tepelná kapacita horké látky
c_s	[W/K]	tepelná kapacita studené látky
ρ_h	[kg/m ³]	hustota horké látky
ρ_s	[kg/m ³]	hustota studené látky
C_h	[J/kg.K]	měrná tepelná kapacita horké látky
C_s	[J/kg.K]	měrná tepelná kapacita studené látky
Q_h	[m ³ /s]	objemový průtok horké látky
Q_s	[m ³ /s]	objemový průtok studené látky.

Pro určení veličiny NTU platí:

$$NTU = \frac{k \cdot S_{tr}}{c_{min}} \quad [-], \quad (22)$$

kde:

NTU	[-]	number of transfer unit
k	[W/m ² .K]	součinitel prostupu tepla (15), (16)
S_{tr}	[m ²]	teplosměnná plocha trubek tepelného výměníku.

Poslední neznámou veličinou je teplosměnná plocha trubek tepelného výměníku S_{tr} . Teplosměnná plocha je část povrchu tepelného výměníku, v níž probíhá přestup nebo výměna tepla mezi pracovní látkou (spaliny) a stěnou výměníku. V našem případě za teplosměnnou plochu považujeme tedy vnější povrchy trubek, ze kterých je výměník sestaven a jimiž proudí ohřívána látka. Suma vnějších povrchů všech trubek je dána vztahem:

$$S_{tr} = \pi \cdot d_{tr} \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \quad [m^2], \quad (23)$$

kde:

d_{tr}	[m]	vnější průměr trubky výměníku
l_{tr}	[m]	délka trubky výměníku
n_{tr}	[-]	počet použitých trubek ve výměníku.

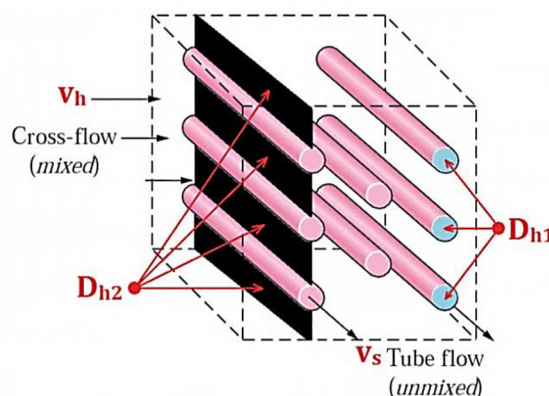
Jak bychom si mohli všimnout, u součinitele prostupu tepla pro válcovou stěnu trubky (16) se objevuje konstanta λ , což je součinitel tepelné vodivosti materiálu, z kterého jsou trubky výměníku vyrobeny. Dalšími konstantami jsou α_1 a α_2 , které jsou závislé především na rychlostech v_s a v_h proudících látek (studené a horké), ale také na hydraulickém průměru D_{h1} všech trubek ve výměníku a na hydraulickém průměru D_{h2} všech mezer mezi trubkami (obr. 19).

Pro výpočet hydraulických průměrů můžeme psát vztah:

$$D_{h1,2} = \frac{4 \cdot S_{k1,2}}{U_{k1,2}} \quad [m], \quad (24)$$

kde:

$S_{k1,2}$	[m ²]	suma průřezů jednotlivých trubek (mezer) v jedné řadě
$U_{k1,2}$	[m]	suma obvodů jednotlivých trubek (obvod obdélníku, který je sestaven z jednotlivých částí mezer) v jedné řadě.



Obr. 19 Výřez tepelného výměníku s naznačenými hydraulickými průměry, upraveno z [18]

Rychlosti studené a horké látky se určí známým vztahem:

$$v_{s,h} = \frac{Q_{s,h}}{S_{k1,2}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right], \quad (25)$$

kde:

$Q_{s,h}$ [m³/s] objemový průtok studené (horké) látky.

Všechny potřebné veličiny pro určení součinitelů přestupu tepla konvekcí (α_1, α_2) byly výše vyjádřeny. Dosazením vztahů (24) a (25) dostáváme:

$$\alpha_1 = k_{stř} \cdot \sqrt[5]{\frac{v_h^4}{D_{h2}}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right], \quad (26)$$

$$\alpha_2 = k_{stř} \cdot \sqrt[5]{\frac{v_s^4}{D_{h1}}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right], \quad (27)$$

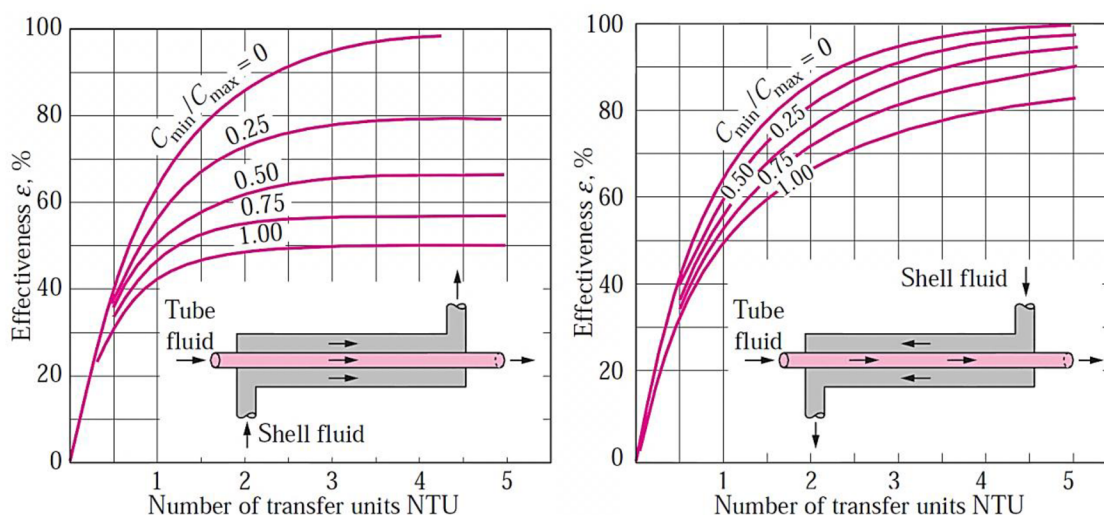
kde:

$k_{stř}$ [-] konstanta pro střední teplotu chladiva (vzduch) – 3,6.

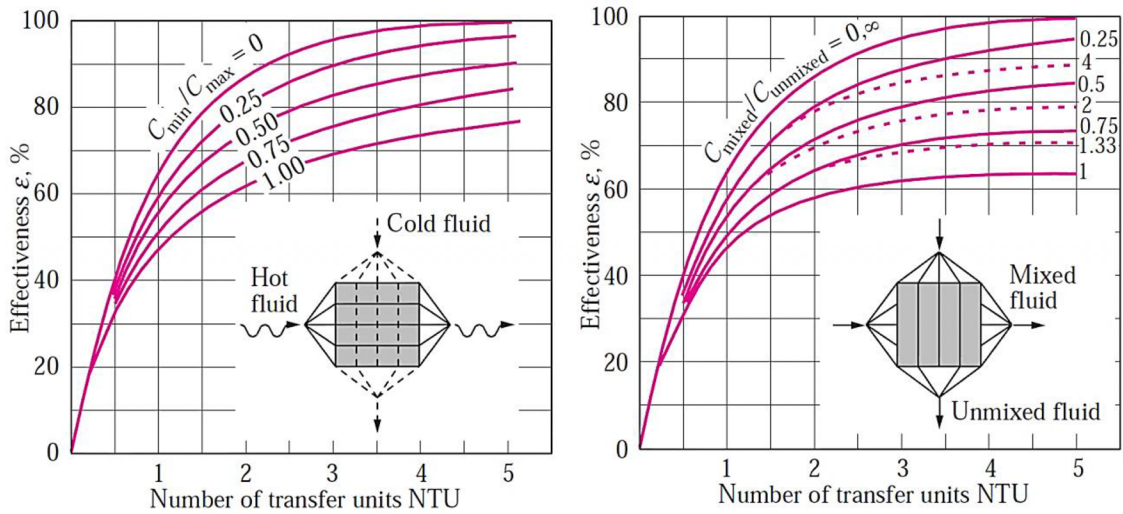
Nyní lze z (22) přesně určit velikost veličiny NTU . Dalším krokem pro výpočet výkonnosti tepelného výměníku je určení efektivnosti (termické účinnosti) ε , která nabývá hodnot v intervalu 0–1 (0–100 %). Nejčastěji se tato efektivnost určuje odečtením z grafů vyjadřující závislost:

$$\varepsilon = f(NTU, R) \quad [-]. \quad (28)$$

Tato závislost je také podle různých konfigurací tepelných výměníků rozdílná. Pro ukázkou je zde vyobrazena čtveřice nejčastějších konfigurací a pro ně výše zmíněné závislosti ε - NTU (obr. 20 a 21). Zbylé konfigurace tepelných výměníků jsou podrobněji rozebrány v [14], [15] a [18].



Obr. 20 Závislost ε - NTU souproutého (vlevo) a protiproutého tepelného výměníku (vpravo) [18]



Obr. 21 Závislost ε -NTU křížového tepelného výměníku bez směšování (vlevo) a křížového s jednostranným směšováním (vpravo) [18]

Druhou možností, poněkud přesnější, pro určení efektivity tepelného výměníku je jednoduché vypočtení dle vztahů pro různé konfigurace. V našem případě, jak už bylo zmíněno, se zde uvede jen vztah (29) pro křížový tepelný výměník s jednostranným směšováním. Zbylé vztahy jsou podrobně uvedeny v [15].

$$\varepsilon = \frac{2}{1 + \cotgh \left[\left(1 + \cotgh \frac{NTU}{2} \right)^{-1} \cdot R \right]} \cdot \frac{1}{R} \quad [-]. \quad (29)$$

S využitím vstupních parametrů při výpočtu výkonnosti výměníku je nutno určit maximálně možný přenášený tepelný tok:

$$q_{max} = c_{min} \cdot (T_{h-in} - T_{s-in}) = c_{min} \cdot \Delta T_{in} \quad [W], \quad (30)$$

kde:

$$\begin{array}{ll} q_{max} & [W] \quad \text{maximálně možný přenášený tepelný tok} \\ \Delta T_{in} & [K] \quad \text{vstupní teplotní rozdíl.} \end{array}$$

Maximálně možný přenášený tepelný tok se však udává při efektivity tepelného výměníku rovné 1. Uvažujeme-li v potaz i efektivity výměníku, určí se skutečný přenášený tepelný tok vztahem:

$$q_{12} = q_{max} \cdot \varepsilon \quad [W]. \quad (31)$$

Posledním krokem pro určení výstupních teplot obou látek je jejich vyjádření z bilančních rovnic pro horkou a studenou část výměníku:

$$q_{12} = c_h \cdot (T_{h-in} - T_{h-out}) \gg T_{h-out} = \frac{c_h \cdot T_{h-in} - q_{12}}{c_h} \quad [W] \quad (32)$$

$$q_{12} = c_s \cdot (T_{s-out} - T_{s-in}) \gg T_{s-out} = \frac{c_s \cdot T_{s-in} + q_{12}}{c_s} \quad [W]. \quad (33)$$

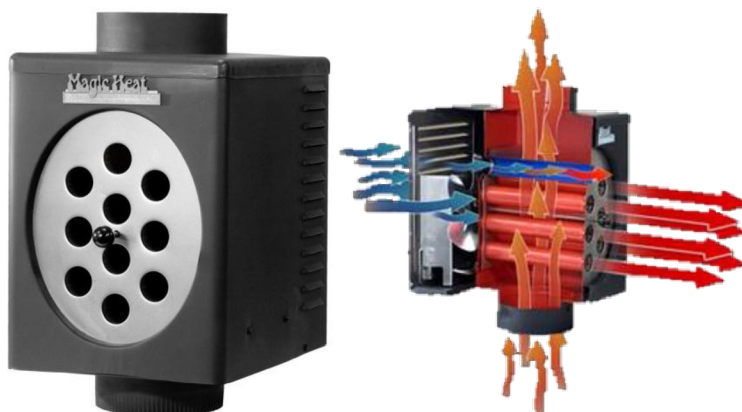
Tab. 6 Výpočet výkonnosti tepelného výměníku dle zadaných hodnot

Zadané hodnoty			
Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Vstupní teplota horké látky	T_{h-in}	160	°C
Vstupní teplota studené látky	T_{c-in}	20	°C
Měrná tepelná kapacita horké látky	C_h	1030	J/kg.K
Měrná tepelná kapacita studené látky	C_s	1010	J/kg.K
Hustota horké látky	ρ_h	0,8	kg/m ³
Hustota studené látky	ρ_s	1,2	kg/m ³
Objemový průtok horké látky	Q_h	0,019	m ³ /s
Objemový průtok studené látky	Q_s	0,016	m ³ /s
Konstanta pro střední teplotu chladiva	k	3,6	-
Součinitel přestupu tepla vedením trubek	λ	70	W/m.K
Šířka tepelného výměníku	a	0,2	m
Hloubka tepelného výměníku	b	0,2	m
Výška tepelného výměníku	c	0,45	m
Vnější průměr trubek výměníku	d_{tr}	0,03	m
Tloušťka stěny trubek	t_{tr}	0,0015	m
Délka trubek	l_{tr}	0,2	m
Počet trubek ve výměníku	n_{tr}	24	-
Vypočtené hodnoty			
Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Tepelná kapacita horké látky	c_h	15,73	W/K
Tepelná kapacita studené látky	c_s	18,85	W/K
Poměr tepelných kapacit obou látek	R	0,834	-
Součinitel přestupu tepla konvekcí na horké straně	α_1	6,397	W/m ² .K
Součinitel přestupu tepla konvekcí na studené straně	α_2	8,187	W/m ² .K
Součinitel prostupu tepla pro válcovou stěnu trubky	k	3,38	W/m ² .K
Teplosměnná plocha všech trubek	S_{tr}	0,452	m ²
Suma průřezů jednotlivých trubek v jedné řadě	S_{k1}	0,014	m ²
Suma průřezů jednotlivých mezer v jedné řadě	S_{k2}	0,016	m ²
Suma obvodů jednotlivých trubek v jedné řadě	U_{k1}	0,036	m
Obvod obdélníku, který je sestaven z mezer mezi trubkami	U_{k2}	0,56	m
Hydraulický průměr všech trubek	D_{h1}	0,027	m
Hydraulický průměr všech mezer mezi trubkami	D_{h2}	0,114	m
Rychlost proudění horké látky	v_h	1,193	m/s
Rychlost proudění studené látky	v_s	1,132	m/s
Number of transfer unit	NTU	0,097	-
Efektivita tepelného výměníku	ε	0,089	-
Maximálně možný přenášený tepelný tok	q_{max}	2201,7	W
Skutečný přenášený tepelný tok	q_{12}	192,3	W
Výstupní teplota horké látky	T_{h-out}	147,5	°C
Výstupní teplota studené látky	T_{c-out}	30,4	°C

Dle zadaných hodnot při výkonnostním výpočtu modelu tepelného výměníku v tab. 6 bude v kap. 6 popsána konstrukce reálného výměníku. Výpočet hodnot probíhal v programu *MATLAB*. Skript tohoto výpočtu je uveden v přílohách.

6 Návrh zařízení

Při návrhu zařízení, které přispěje k větší elektivnosti vytápění v domácnostech bylo vycházeno z konceptu komerčně dostupného zařízení zvaného *Magic Heat Reclaimer*, viz [19]. Toto zařízení není avšak tak autonomní (pro svůj stálý provoz ventilátoru je nutno dodávat elektrickou energii ze sítě) jak zařízení, o kterém pojednává tato práce. Reálná podoba a funkčnost tohoto komerčně dostupného zařízení je zobrazena na obr. 22.



Obr. 22 *Magic Heat Reclaimer* [19]

Toto komerční zařízení bude proto předěláno na systém autonomní, tudíž nebude potřeba externího zdroje napájení. Zařízení, o kterém pojednává tato práce (jako celek takový), se bude skládat z jednotlivých dílčích částí:

- termoelektrický modul – v tomto případě se bude jednat o provoz v režimu generátoru (TEG),
- mezikus horké strany modulu;
- chladič studené strany modulu,
- tepelný výměník – slouží k přenosu tepla z horké látky (spaliny) do studené látky (okolní vzduch),
- ventilátor – zajišťuje nucenou konvekci přes chladič studené strany modulu a zároveň i přes tepelný výměník.

6.1 Konstrukce

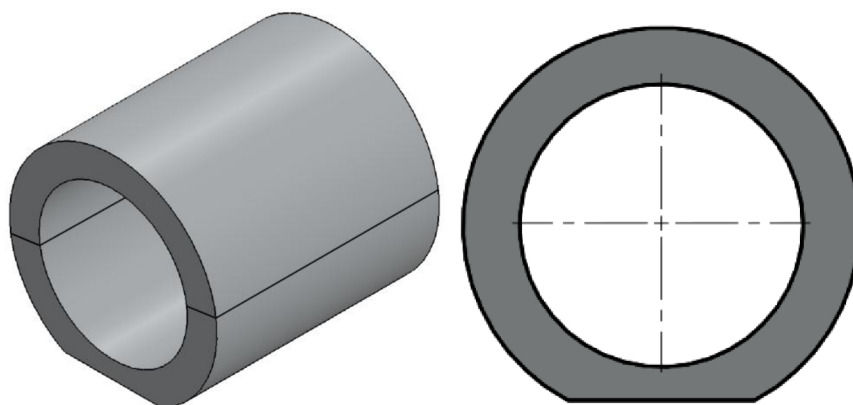
Aby byl tento systém autonomní, je nutno tedy použít výše zmíněný (kap. 4) termoelektrický modul *TEG 127-250-38* v režimu generátoru. Už zde bylo zmíněno, že pro dostatečné napájení ventilátoru budou použity dva termoelektrické generátory a to v zapojení sériovém. Volba zdroje elektrické energie je proto považována za hotovou.

Další důležitou dílčí částí celé soustavy je mezikus horké strany termoelektrického generátoru. Tento mezikus by měl být ideálně umístěn na takovém místě, na kterém se soustřeďuje největší tepelná energie (tepelný tok),

v našem případě by jej bylo ideální umístit přímo do kouřovodu pro odvod spalin. Poté by však horká strana termoelektrického generátoru téměř splývala s povrchem kouřovodu.

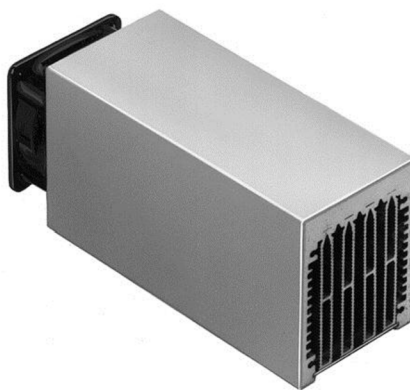
Jedním z hlavních požadavků této práce byla nemožnost vrtání jakéhokoliv otvoru do kouřovodu komínu z důvodu možného úniku spalin do místnosti. Proto zde vznikl problém jakým způsobem tomuto požadavku vyhovět. Jako náhrada mezikusu horké strany generátoru byla poté navržena a zhotovena určitá hliníková redukce (mezikus) mezi kouřovodem a touto horkou stranou (obr. 23).

Tento hliníkový mezikus zajišťuje přenos tepelné energie ze spalin a ze stěn kouřovodu k termoelektrickému generátoru. Technická dokumentace a parametry mezikusu budou zmíněny v kap. 6.2.



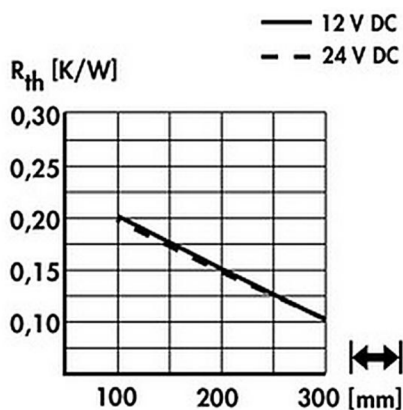
Obr. 23 Hliníkový mezikus na kouřovod – horká strana modulů

Pro udržení největšího teplotního rozdílu (čím větší, tím se bude generovat větší množství elektrické energie, viz obr. 13) mezi horkou a studenou stranou modulu bude nutno na studenou stranu generátoru umístit poněkud co neúčinnější chladič. V podstatě vybrat chladič, který bude mít co nejmenší tepelný odpor R_{th} , tudíž co největší tepelnou vodivost. V našem případě byl vybrán chladič od výrobce *fisherelektronik.de*. Jedná se přesněji o typ LA 6, který je dodáván včetně axiálního ventilátoru. Parametry dodávaného ventilátoru budou uvedeny níže. Na obr. 24 je názorná ukázka použitého chladiče (agregátu) studené strany termoelektrického generátoru s axiálním ventilátorem.



Obr. 24 Ventilátorový agregát s axiálním ventilátorem LA 6 [20]

Jednotlivé parametry tohoto chladiče jsou uvedeny v tab. 7. Délka tohoto chladiče byla zvolena záměrně z důvodu zmenšení tepelného odporu, ale také z důvodu větší plochy pro umístění dvou termoelektrických generátorů. Z toho vyplývá, že tepelný odpor chladiče je závislý na délce a také na použitém ventilátoru (obr. 25).



Obr. 25 Závislost tepelného odporu chladiče LA 6 na délce a použitém ventilátoru [20]

Tab. 7 Technické parametry hliníkového chladiče fisherelektronik LA 6 [20]

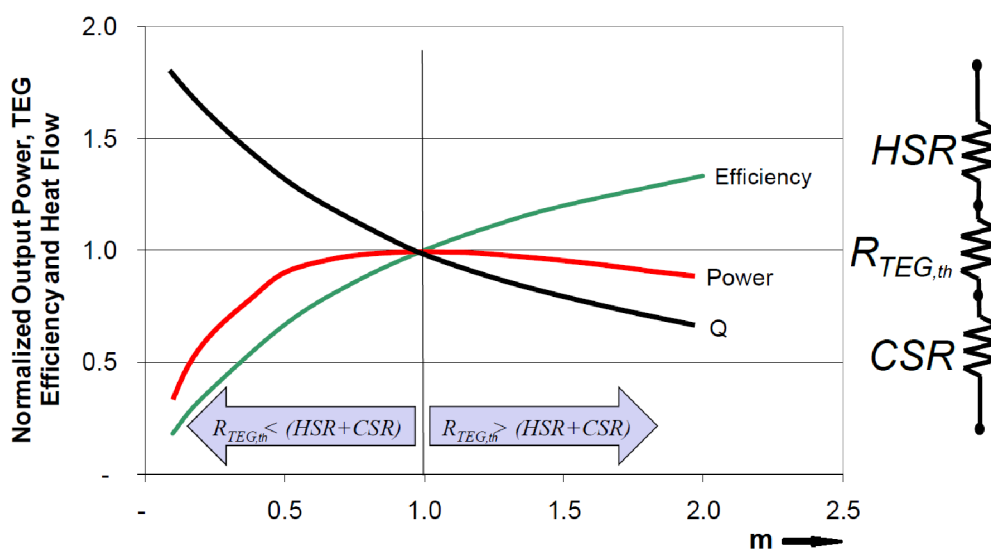
Parametry chladiče LA 6 studené strany modulu		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Délka	150	mm
Šířka	62	mm
Výška	74	mm
Tepelný odpor	0,175	K/W
Materiál	Al	

Pro úplnost je zde nutno popsat vztah mezi tepelným odporem mezikusu horké strany generátoru, tepelným odporem chladiče studené strany generátoru a tepelným odporem samotného generátoru. Tyto všechny jmenované odpory se dosadí do vztahu uvedeného níže (34), ze kterého se určí bezrozměrná veličina m (tepelný koeficient). Tato bezrozměrná veličina je však závislá na výstupním generovaném elektrickém výkonu, na tepelném toku ale také i na výsledné účinnosti modulu. Z obr. 26 je patrné, že by se tento koeficient měl ideálně rovnat nebo být větší než hodnota 1:

$$m = \frac{R_{TEG,th}}{HSR + CSR} \quad [\geq 1], \quad (34)$$

kde:

m	$[\geq 1]$	tepelný koeficient
$R_{TEG,th}$	$[K/W]$	tepelný odpor termoelektrického modulu
HSR	$[K/W]$	tepelný odpor mezikusu horké strany modulu
CSR	$[K/W]$	tepelný odpor chladiče studené strany modulu.

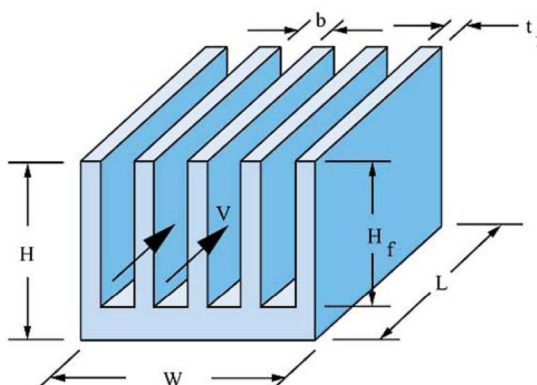


Obr. 26 Závislost tepelného koeficientu na výkonu, účinnosti a tepelném toku, upraveno z [12]

Kdybychom měli možnost vytvoření jakéhokoliv otvoru do kouřovodu, mohli bychom si vyrobit popřípadě pořídit takový mezikus teplé strany generátoru, který by po dosazení do vztahu (34) odpovídal tepelnému koeficientu $m = 1$ při známém tepelném odporu termoelektrického generátoru a známém tepelném odporu chladiče studené strany generátoru (obr. 25). Vyjádříme si tedy ze vztahu (34) tepelný odpor HSR , při kterém bude dle obr. 26 dosaženo největšího výkonu:

$$HSR = \frac{R_{TEG,th}}{m} - CSR = \frac{0,345}{1} - 0,175 = 0,17 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (35)$$

Na takto vypočtený tepelný odpor je možno navrhnout ideální chladič, přes který proudí médium určitým objemovým průtokem G [21]. Postup takového návrhu bude ve zkratce uveden níže (obecně, ne konkrétně). Pro ukázkou je na obr. 27 znázorněna nejčastější konfigurace žebér chladiče včetně popsání rozměrů (jednotky v m), které budou použity v následných výpočtech.



Obr. 27 Paralelní konfigurace žebér chladiče [21]

Prvním krokem návrhu ideálního chladiče je určení vodorovné plochy mezi žebry chladiče (jednotlivé veličiny jsou vztaženy k obr. 27):

$$A_{base} = (N_{fin} - 1) \cdot b \cdot L \quad [\text{m}^2], \quad (36)$$

kde:

N_{fin} [-] počet žebek chladiče.

Plochu jednoho žebra určíme pak vztahem:

$$A_{fin} = 2 \cdot L \cdot \left(H_f + \frac{t_f}{2} \right) \quad [\text{m}^2]. \quad (37)$$

Při známém vstupním objemovém průtoku média se dále tento objem přepočte na rychlost proudění, která je přímo mezi jednotlivými žebry chladiče:

$$V = \frac{G}{N_{fin} \cdot b \cdot H_f} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right], \quad (38)$$

kde:

G [m^3/s] objemový průtok média.

Jednotlivé vlastnosti proudícího média přes chladič vyjadřuje *Prandtlovo*, *Reynoldsovo*, popřípadě *Nusseltovo* číslo:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_{fluid}} \quad [-], \quad (39)$$

kde:

μ [Pa.s] dynamická viskozita média
 C_p [J/kg.K] měrná tepelná kapacita média při konstantním tlaku
 k_{fluid} [W/m.K] tepelná vodivost média,

$$Re = \frac{\rho_{fluid} \cdot V \cdot b}{\mu} \cdot \frac{b}{L} \quad [-], \quad (40)$$

kde:

ρ_{fluid} [kg/m^3] hustota média,

$$Nu = \left[\frac{1}{\left[\frac{Re \cdot Pr}{2} \right]^3} + \frac{1}{\left[0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot Pr^{0,33} \sqrt{1 + \frac{3,65}{\sqrt{Re}}} \right]^3} \right]^{-0,33} \quad [-]. \quad (41)$$

Po určení výše uvedených třech vlastností média se přejde k samotné tepelné části včetně konečného výpočtu tepelného odporu chladiče. Dále je nutno si určit koeficient přestupu tepla:

$$h = Nu \cdot \frac{k_{fluid}}{b} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]. \quad (42)$$

Účinnost všech žebek chladiče je pak dána vztahem:

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh(m \cdot (H_f + t_f/2))}{m \cdot (H_f + t_f/2)} \quad [-], \quad (43)$$

kde m je koeficient, který je dán:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{k_{fin} \cdot t_f}} \quad [-], \quad (44)$$

kde:

k_{fin} [W/m.K] tepelná vodivost materiálu žebér chladiče.

Samotný tepelný odpor pouze všech žebér pak lze určit:

$$R_{fin} = \frac{1}{h \cdot (A_{base} + N_{fin} \cdot \eta_{fin} \cdot A_{fin})} \quad \left[\frac{K}{W} \right]. \quad (45)$$

K tomuto výsledku R_{fin} je nutno ještě dořešit tepelný odpor základny chladiče a tyto dva tepelné odpory sečíst. Dostáváme tedy výsledný celkový tepelný odpor chladiče R_{tot} .

$$R_{tot} = R_{fin} + \frac{H - H_f}{k_{base} \cdot W \cdot L} = HSR \quad \left[\frac{K}{W} \right], \quad (46)$$

kde:

k_{base} [W/m.K] tepelná vodivost materiálu základny.

Z těchto výše uvedených vztahů můžeme přesně určit tepelný odpor chladiče. Příklad tohoto určení odporu je uveden v přílohách. Vztah (43) a (44) vyhovuje pouze obdélníkovému průřezu žebér chladiče. Pro modifikovaná žebra typu trojúhelník, lichoběžník atp. se tyto vztahy upraví. Podrobnosti o těchto vztazích lze přesněji vyčíst z [18].

Další nedílnou součástí chladiče studené strany generátoru, jak už bylo řečeno výše, je axiální ventilátor (obr. 28). Tento axiální ventilátor je od výrobce *Ebm-papst* a nuceně vhání do celé soustavy studené médium (vzduch). Celou soustavou je na mysli jak chladič studené strany generátoru, tak samotný tepelný výměník, kde je médiu částečně předána tepelná energie spalin. Parametry ventilátoru jsou uvedeny v tab. 7.

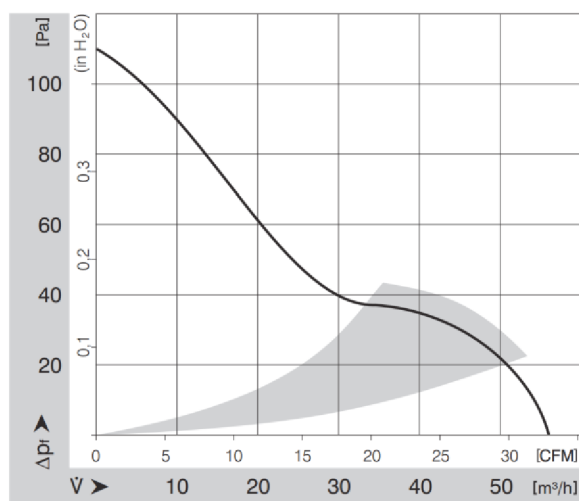


Obr. 28 Ventilátor Emb-papst 612 NHH-118 [22]

Tab. 8 Technické parametry axiálního ventilátoru Emb-papst 612 NHH-118 [22]

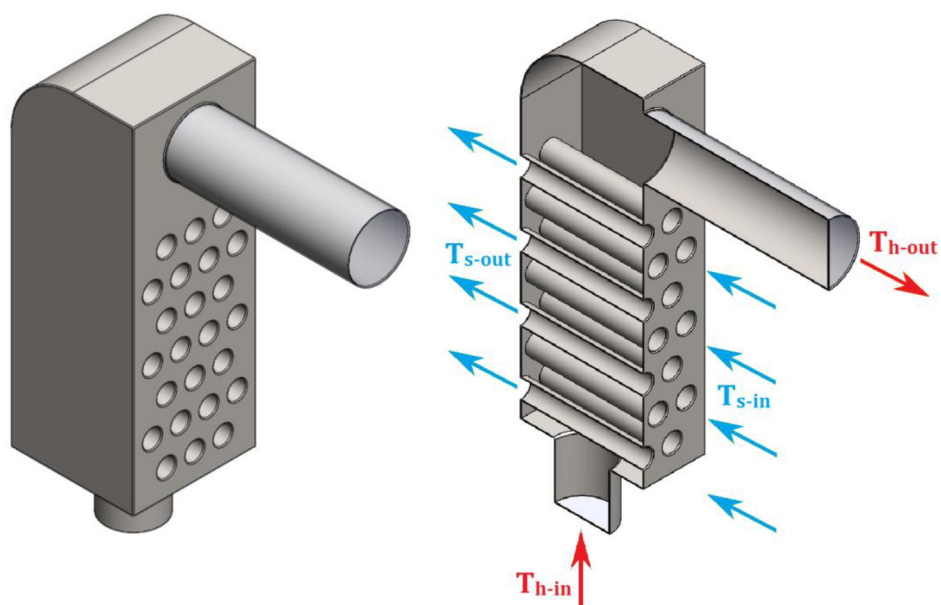
Parametry ventilátoru 612 NHH-118		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Výška x šířka	60 x 60	mm
Hloubka	25	mm
Typ napětí	DC	
Jmenovité napětí	12	V
Napěťový provozní rozsah	6–15	V
Otáčky	6800	min ⁻¹
Příkon	2,9	W
Rozsah provozních teplot	-20–70	°C
Objemový průtok vzduchu	56	m ³ /h
Hlučnost	41	dB

Na obr. 29 je znázorněna tlaková charakteristika. Z této závislosti lze vyčíst hodnotu tlaku naprázdno při nulovém objemovém průtoku vzduchu. Dosahuje hodnoty 110 Pa, která je pro provoz plně postačující. Pro případné zvýšení tlaku ventilátoru bychom museli použít zřejmě ventilátor radiální, který je znám většími tlaky, ale naopak i menším průtokem. Z důvodu toho, že byl výše uvedený axiální ventilátor součástí hliníkového chladiče studené strany generátoru, bude použit právě on.



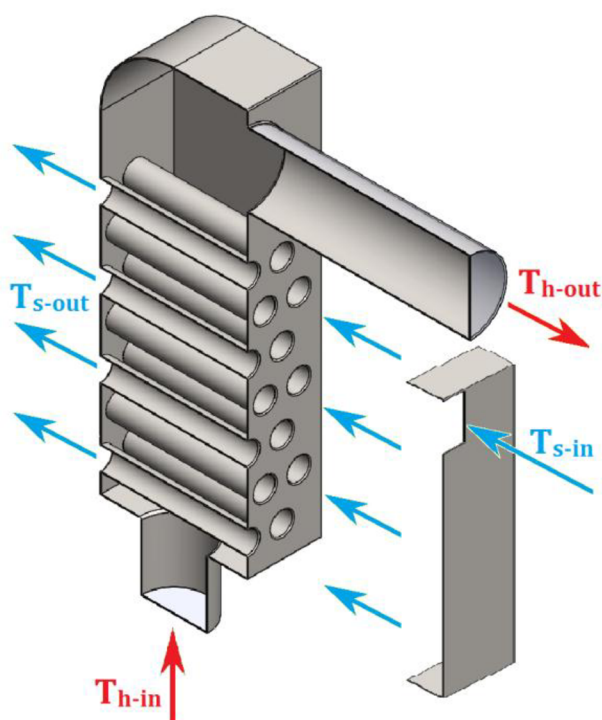
Obr. 29 Tlaková charakteristika ventilátoru 612 NHH-118 s vyznačeným pracovním bodem [22]

Předposlední konstrukční dílčí částí celkové soustavy je křížový tepelný výměník. Dle všech zadaných a vypočtených hodnot v kap. 5 byla sestrojena grafická podoba reálného tepelného výměníku v programu *SolidWorks* včetně vyznačení proudění jednotlivých médií (obr. 30). Hlavním požadavkem při výrobě je zhotovit tuto část z nerezové oceli, aby nedocházelo k případné korozi materiálu vlivem působení spalin a okolních podmínek.



Obr. 30 Grafická podoba navrhovaného křížového tepelného výměníku

Poslední částí je vstupní kryt z nerezové oceli. Podobně jak bylo uvedeno výše, na obr. 31 je vyobrazena grafická podoba s tímto zlepšením. Kryt byl do soustavy přidán z důvodu toho, aby vstupní médium (studený vzduch) rovnoměrně procházel všemi trubkami. Vstupní otvor tohoto krytu je přímo určen rozměry chladiče studené strany termoelektrického generátoru. Studené médium bude v podstatě proudit přes chladič studené strany generátoru a zároveň i přes tepelný výměník prostřednictvím rozšiřujícího se vstupního krytu.



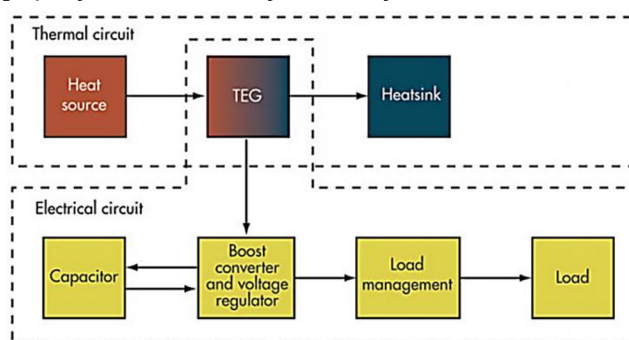
Obr. 31 Grafické podoba tepelného výměníku včetně vstupního krytu v řezu

6.2 Technická dokumentace

Kvůli značnému rozsahu bude v této práci veškerá technická dokumentace k jednotlivým dílčím částem celé soustavy uvedena v příloze A.

6.3 Elektronika – DC/DC měniče

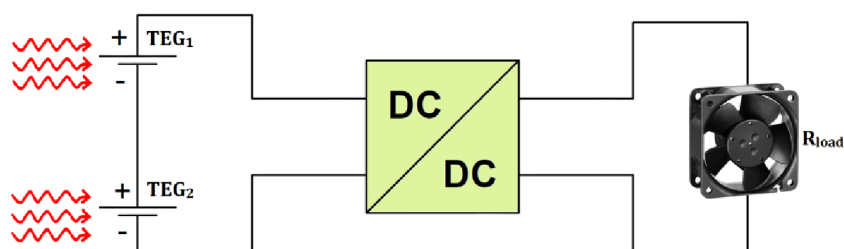
Jak už je známo, u většiny zdrojů elektrické energie je ke každému takovému zdroji připojena určitá elektronika. Jde především o různé regulátory, konvertory, řízení atp. V případě této práce se jedná o zdroj elektrické energie prostřednictvím termoelektrického generátoru, který tuto energii generuje z tepla. Musíme si proto dát do souvislosti samotný tepelný a samotný elektrický okruh. Tyto okruhy jsou pak vzájemně propojeny a znázorněny blokovým schématem, viz obr. 32.



Obr. 32 Blokové schéma tepelného a elektrického okruhu, upraveno z [23]

Při volbě elektroniky pro spolehlivý chod axiálního ventilátoru (cílového spotřebiče) musíme dbát na hodnotu napětí, kterou dodává samotný termoelektrický generátor. Z tab. 5 lze vyčíst hodnotu stejnosměrného napětí při zátěži (teplotní rozdíl 40 °C), přičemž hodnota tohoto napětí je ale poněkud nízká. Proto jak už bylo řečeno výše, se do série spojí dvojice termoelektrických generátorů.

Takto sériově zapojená dvojice bude při připojené zátěži dodávat napětí rovno dvojnásobku napětí na jednom modulu (cca 2 V). Jelikož námi instalovaný ventilátor požaduje napětí 12 V, nastává zde problém v napěťové úrovni. U střídavého proudu (*AC – alternative current*) by se tato hodnota transformovala, ale u stejnosměrného (*DC – direct current*) je potřeba změnit velikost jiným způsobem. Tuto nízkou stejnosměrnou napěťovou úroveň lze změnit na úroveň vyšší s využitím DC/DC měniče. Jednoduché blokové schéma včetně elektroniky je znázorněno na obr. 33.



Obr. 33 Celkové schéma zapojení

V případě spotřebičů, které by pro svůj chod využívaly střídavý proud je nutno použít DC/AC střídač, který ze stejnosměrného proudu vytvoří proud střídavý. V této kapitole budou popisovány jen DC/DC měniče.

Při návrhu DC/DC měniče se berou v úvahu dvě hlediska, účinnost a regulace. Problémem účinnosti je třeba se velmi zabývat, poněvadž každý samotný elektrický okruh má určité odporové složky, popřípadě parazitní odpory, které jsou pro chod měniče po stránce účinnosti náročné. Pro dosažení maximální účinnosti, tudíž i maximálního výstupního výkonu, je zapotřebí také volit shodnou odporovou zátěž, která je shodná s vnitřním odporem termoelektrického článku. V praxi se spíše můžeme setkat se spotřebiči rozdílných vnitřních odporů. Při rozdílu vnitřních odporů je tento odpor vyrovnáván tzv. *load managementem*, který je součástí DC/DC měničů (měniče zmíněné níže v této práci tento management nepodporují). Tato funkce se ve zkratce nazývá MPPT (*maximum power point tracking*) a má za úkol dosáhnout co nejvyšší účinnosti při nerovnosti vnitřních odporů generátoru a spotřebiče. V případě přímého spojení termoelektrického generátoru se spotřebičem by docházelo ke ztrátám výkonu. Tento poměr mezi vnitřním odporem spotřebiče a vnitřním odporem generátoru je dán vztahem (47). Ideální poměrový koeficient by měl dle teorie dosáhnout hodnoty 1.

$$n = \frac{R_{load}}{R_{TEG,el}} \quad [0 - 1], \quad (47)$$

kde:

n	[-]	koeficient poměru elektrických odporů
R_{load}	[Ω]	vnitřní elektrický odpor spotřebiče
$R_{TEG,el}$	[Ω]	vnitřní elektrický odpor termoelektrického modulu.

Problém regulace je způsoben nekonstantními elektrickými zdroji, přičemž samotná elektronika vyžaduje určitou stabilitu napájení. Tuto nestabilitu napájení lze kompenzovat ukládáním energie do součástek, např. do kondenzátorů a cívek, a následně pak tuto energii při nedostatku stability uvolňovat. Střídání těchto stavů je zabezpečeno spínacími prvky (tranzistory) uvnitř DC/DC měniče. Pro řízení spínání se v téměř všech stejnosměrných měničích používá signál pulsní šířkové modulace (PWM). Vypovídajícím parametrem řízení PWM je střída.

$$s = \frac{t_{on}}{t} \quad [0 - 1], \quad (48)$$

kde:

s	[0-1]	střída
t_{on}	[s]	doba zapnutí signálu (logická 1)
t	[s]	perioda.

„Existuje několik druhů stejnosměrných měničů. Každý typ je optimalizován z několika hledisek podle požadavků cílové aplikace a neohrožení výkonu a účinnosti měniče. DC/DC měniče mohou být klasifikovány mnoha způsoby. Nejzákladnější rozdělení měničů je na základě použití transformátoru. Transformátory bývají zapracovány do DC/DC měničů, aby zaručili odizolování vstupu a výstupu ze stejnosměrného hlediska. Měniče s transformátory se nazývají oddělovacími resp.

izolujícími měniči, bez transformátorů jsou označovány jako neizolující měniče. Pronaši problematiku není potřeba oddělovat výstup měniče od jeho vstupu“ [8].

Typy jednotlivých neizolujících stejnosměrných (DC/DC) měničů se dělí na:

- buck nebo step-down (snižovač napětí),
- boost nebo step-up (zvyšovač napětí),
- buck-boost (zvyšuje i snižuje napětí),
- neinvertující buck-boost,
- Ćuk (zvyšuje i snižuje napětí),
- SEPIC (zvyšuje i snižuje napětí).

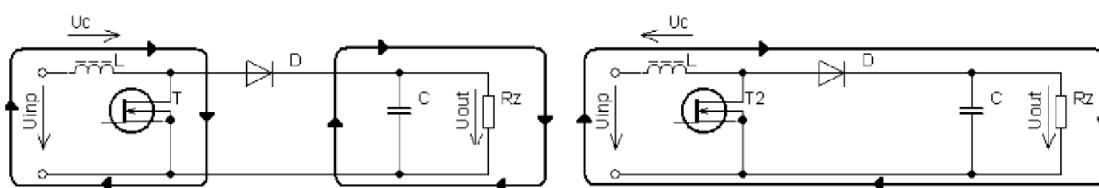
Dalším známým typem stejnosměrného měniče může být také H-můstek apod. Vodícím parametrem pro volbu typu měniče je také přenosová funkce, tj. poměr konverze. Přenos u jednotlivých zapojení závisí na hodnotě střídy.

Tab. 9 Přenosové funkce vybraných neizolujících stejnosměrných měničů [7]

Typ měniče	Přenosová funkce
buck	s
boost	$\frac{1}{1-s}$
buck - boost	$-\frac{s}{1-s}$
neinvertující buck - boost	$\frac{s}{1-s}$
Ćuk	$-\frac{s}{1-s}$
SEPIC	$\frac{s}{1-s}$

Protože požadujeme, aby bylo výstupní napětí vyšší než vstupní, je nutno vybrat pro správnou funkci ventilátoru zvyšující (boost) stejnosměrný měnič napětí. V této práci bude sestrojena dvojice zvyšujících měničů (kap. 6.3.1, 6.3.2) a dále pořízena další dvojice z komerčně dostupných zvyšujících měničů jako celek (kap. 6.3.3, 6.3.4). Celá čtveřice těchto převodníků bude podrobena zatěžovací zkoušce a výsledkem z tohoto experimentálního měření (obr. 45) budou zatěžovací charakteristiky. Dle těchto charakteristik se poté vyhodnotí nejhodnější zvyšující stejnosměrný měnič napětí, který se pro danou aplikaci použije.

„Princip zvyšujícího měniče lze popsat pomocí obr. 34. Měnič pracuje ve dvou cyklech. V prvním cyklu je tranzistor sepnutý a proud teče pouze jím a cívkou. V druhé fázi se tranzistor rozezne. Cívka se tak stává zdrojem energie zapojeným do série spolu s napájecím zdrojem. Proud teče ze vstupního zdroje přes cívku, na které se zánikem jejího magnetického pole obrátila polarita, napětí o vyšší hodnotě než vstupní teče přes diodu do zátěže“ [24].



Obr. 34 Zapojení zvyšujícího měniče popisující princip činnosti [24]

V následujících čtyřech kapitolách se zde uvedou různé varianty stejnosměrných zvyšujících měničů daných pro tuto aplikaci. Poté se zvolí optimální varianta.

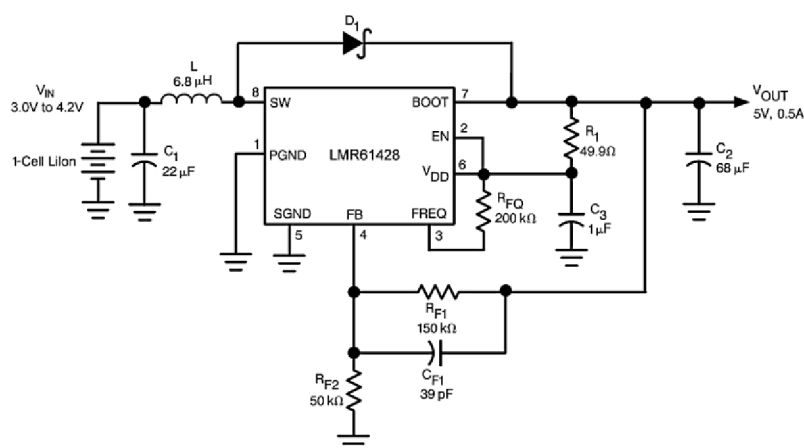
6.3.1 LMR61428

První volbou stejnosměrného měniče napětí byl typ *LMR2623* od výrobce *Texas Instruments*. Jedná se o zvyšující měnič, který byl nalezen dle parametrů především vstupních a výstupních napětí, které bude dodávat termoelektrický generátor popřípadě potřebovat axiální ventilátor ke svému stálému provozu. Dalším důležitým parametrem byl také maximální spínací proud, který při nízkém vstupním napětí a vysokém požadavku na výkon bude vysoký. Parametr neboli informace, která je při této aplikaci velmi důležitá se nazývá dle výrobce *Special Features: Enable*, tj. že tento zvyšující měnič napětí obsahuje interní speciální funkce. Nejdůležitější parametry tohoto obvodu jsou vypsány v tab. 10, přičemž zbylé parametry včetně různých závislostí účinnosti lze vyčíst z datasheetu, viz [25].

Tab. 10 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče LMR61428 [25]

Parametry LMR61428		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Vstupní napětí	1,2-14	V
Výstupní napětí (nastavitelné) max.	14	V
Spínací proud max.	2,85	A
Spínací frekvence tranzistoru max.	2	MHz
Účinnost max.	90	%
Pouzdro	8VSSOP	

Nedílnou součástí každého takového obvodu stejnosměrného měniče musí být základní schéma zapojení periferních elektronických součástek. Proto nestačí pořídit samotný obvod jako takový, ale pro plnou funkčnost je potřeba tyto periferní součástky vhodně spojit s obvodem. Na obr. 35 je znázorněno typické zapojení obvodu *LMR61428*. Toto zapojení obsahuje čtyři hlavní součásti zvyšujícího měniče. Jedná se o vstupní cívku, o diodu, o výstupní kondenzátor a poslední částí je spínací prvek, který je v tomto případě obsažen přímo v integrovaném obvodu.



Obr. 35 Typické zapojení obvodu LMR61428 [25]

Na výše uvedeném obrázku si lze však všimnout, že se výstupní napětí nerovná našemu požadavku, který je 12 V. Toto napětí lze podle tab. 10 upravit až na hodnotu 14 V. Úprava spočívá v nastavení zpětnovazebních rezistorů R_{F1} a R_{F2} , respektive ve změně těchto hodnot. Doporučená hodnota pro rezistor R_{F1} je dle technického listu výrobce 150 kΩ. Pro určení rezistoru R_{F2} je nutno dosadit do vztahu (49) hodnotu požadovaného výstupního napětí a hodnotu rezistoru R_{F1} . Hodnota 130 kΩ pro rezistor R_{F1} byla úmyslně zvolena tak, aby rezistor R_{F2} zapadal do odporové řady E24. Výpočet je tedy dán vztahem:

$$R_{F2} = \frac{R_{F1}}{\left(\frac{V_{OUT}}{1,24} - 1\right)} = \frac{130000}{\left(\frac{12}{1,24} - 1\right)} \approx \mathbf{15 \text{ k}\Omega}, \quad (49)$$

kde:

R_{F1}	[Ω]	zpětnovazební rezistor
R_{F2}	[Ω]	zpětnovazební rezistor
V_{OUT}	[V]	žádané výstupní napětí.

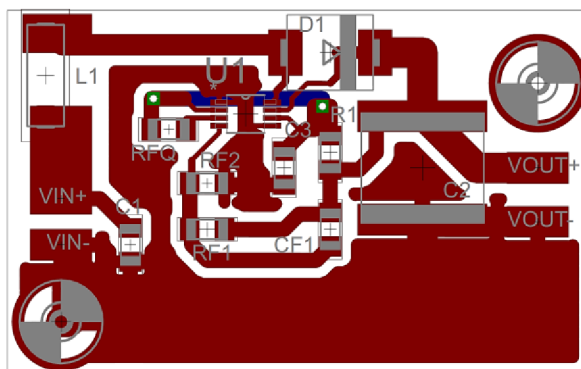
Dalším důležitým faktorem pro tento obvod je maximální možný poměr mezi vstupním a výstupním napětím. Tento zvyšující poměr je dán vnitřním oscilátorem a přesněji vztahem:

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{1}{0,3'} \quad (50)$$

kde:

V_{IN}	[V]	vstupní napětí.
----------	-----	-----------------

Všechny tyto elektronické prvky (typ SMD) byly dle typického zapojení vloženy a poskládány do programu Eagle, ve kterém byla vygenerována deska plošných spojů (obr. 36). Celá samotná deska má poněkud malé rozměry, přesněji cca 48 x 30 mm.



Obr. 36 LMR61428 - Pohled ze strany součástek desky plošného spoje

Následně bylo nutno z této vygenerované desky vytvořit fotocestou desku reálnou (obr. 37). Zde si lze všimnout rozdílné hodnoty vstupní cívky typického zapojení obvodu a reálného zapojení.



Obr. 37 LMR61428 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek

Takto zkonstruovaná deska plošného spoje je schopna provozu a při přivedení vstupního napětí by měla generovat napětí výstupní. Samozřejmě musíme brát v úvahu zvyšující poměr mezi vstupem a výstupem (50). Při vstupním napětí, v našem případě 2 V, by výstupní napětí mělo dosáhnout hodnoty 6 V, tudíž pak ventilátor dosahuje polovičních jmenovitých otáček. Pro dosažení otáček jmenovitých je nutno dodat na vstup zvyšujícího měniče napětí alespoň napětí o hodnotě 4 V (při zachování zvyšujícího poměru), které by bylo vygenerováno větším rozdílem teplot horké a studené strany termoelektrického generátoru.

Poslední dílčí částí této desky se zvyšujícím měničem napětí je chladič samotného spínacího prvku, tudíž obvodu *LMR61428*. Ten byl dodatečně zkonstruován z hliníkového materiálu a pevně přichycen. Na obr. 37 nebyl tento chladič úmyslně znázorněn z důvodu znázornění samotného obvodu.

6.3.2 LM2623

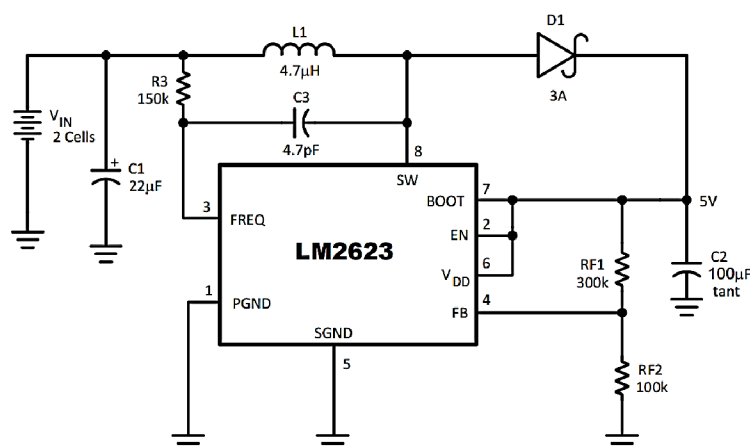
Druhým zvoleným testovacím obvodem stejnosměrného zvyšujícího měniče napětí byl také typ od výrobce *Texas Instruments*, přesněji *LM2623*. Oproti předchozímu výše uvedenému obvodu má lepší vlastnosti v hodnotách vstupního

napětí, ale naopak menší spínací proud, což může způsobovat přehřívání samotného obvodu. *LM2623* se dodává ve dvou různých pouzdrech, tudíž je možno vybrat mezi dvěma, v našem případě byla vybrána jednodušší varianta pouzdra *8VSSOP*. V tab. 11 jsou vybrány ty nejdůležitější parametry, detailnější jsou uvedeny v technickém listu k obvodu, viz [26].

Tab. 11 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče *LM2623* [26]

Parametry LM2623		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Vstupní napětí	0,8–14	V
Výstupní napětí (nastavitelné) max.	14	V
Spínací proud max.	2	A
Spínací frekvence tranzistoru max.	2	MHz
Účinnost max.	90	%
Pouzdro	8VSSOP, 14WSON	

Stejně jako u obvodu *LMR61428* je i zde potřeba určitých periferních elektronických prvků. Tyto prvky budou v každém stejnosměrném měniči napětí podobné, protože vycházíme vždy ze základního zapojení zvyšujícího měniče (obr. 34).



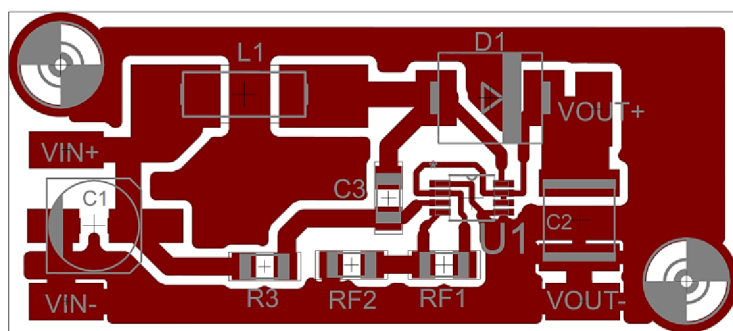
Obr. 38 Typické zapojení obvodu *LM2623* [26]

V typickém zapojení si opět lze všimnout výstupního napětí 5 V. Tato hodnota byla upravena rezistory R_{F1} a R_{F2} . V technickém listu k tomuto obvodu je dána doporučená hodnota rezistoru R_{F2} v intervalu 50 k Ω až 100 k Ω . Proto byl zvolen rezistoru o hodnotě 51 k Ω a poté přepočítána hodnota rezistoru R_{F1} tak, aby výstupní napětí odpovídalo požadovanému napájecímu pro axiální ventilátor, tj. 12 V. Výpočet je dán vztahem:

$$R_{F1} = R_{F2} \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{1,24} - 1 \right) = 51000 \cdot \left(\frac{12}{1,24} - 1 \right) \approx 430 \text{ k}\Omega. \quad (51)$$

Dle návrhu výše byla navržena deska plošných spojů. Zde jde o princip stejný jako u předchozího popisovaného obvodu. Na obr. 40 je pak znázorněna reálná

podoba desky plošného spoje už včetně implementovaného chladiče samotného obvodu měniče. Celou tuto desku lze implementovat do velmi malého prostoru, její samotné rozměry jsou cca 50 x 22 mm.



Obr. 39 LM2623 - Pohled ze strany součástek desky plošného spoje



Obr. 40 LM2623 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek

K tomuto i k výše uvedenému stejnosměrnému zvyšujícímu měničů napětí LMR61428 budou zveřejněny veškeré datové soubory návrhu těchto desek v programu Eagle. Zmíněné soubory budou přidány do příloh.

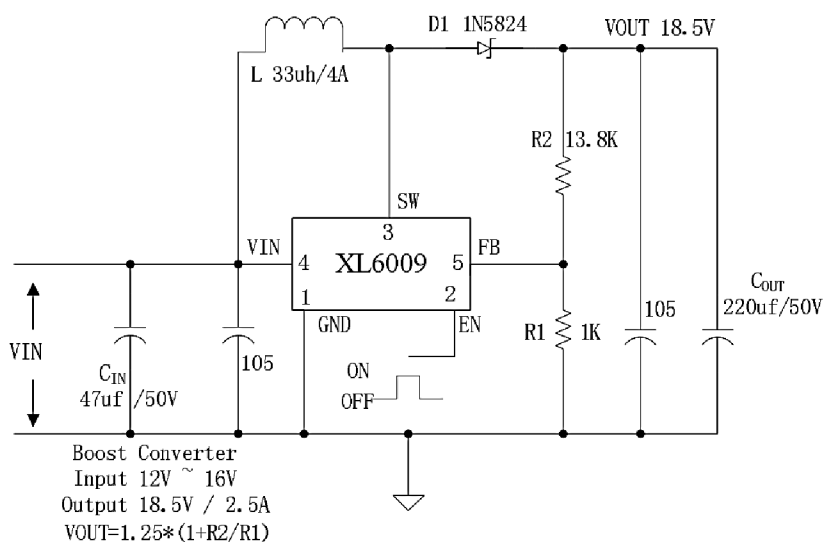
6.3.3 XL6009

Třetím v pořadí vybraných DC/DC měničů je komerčně dostupný, zejména v čínských obchodech, obvod nesoucí označení XL6009, který vyrábí výrobce XLSEMI. Tento obvod je rozměrově mnohokrát větší než dva obvody uvedené výše. Jde o pouzdro TO263-5L, které bude patrně lépe odvádět ztrátovou tepelnou energii, tudíž nebude potřeba chladiče. Jak už si můžeme všimnout v tab. 12 všech parametrů obvodu, maximální spínací proud je 4 A, ale minimální vstupní napětí 3 V, což může být v našem případě nevýhodné. Čím menší minimální vstupní napětí pro start obvodu budou parametry vykazovat, tím dříve se ventilátor uvede do chodu (potřeba i menšího rozdílu teplot na termoelektrickém generátoru).

Tab. 12 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče XL6009 [27]

Parametry XL6009		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Vstupní napětí	3-32	V
Výstupní napětí (nastavitelné) max.	60	V
Spínací proud max.	4	A
Spínací frekvence tranzistoru max.	400	kHz
Účinnost max.	94	%
Pouzdro	TO263-5L	

U obvodu *XL6009* se hodnota výstupního napětí nastavuje interním odporovým trimrem, který v typickém zapojení (obr. 41) nahrazuje rezistor R_1 a R_2 . Plynule lze takto jednoduše nastavit požadované výstupní napětí.



Obr. 41 Typické zapojení obvodu XL6009 [27]



Obr. 42 XL6009 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek

Reálná deska plošného spoje (43 x 21 mm) tohoto typu měniče byla pořízena na serveru *eBay*. Jde tedy o poněkud velmi levnou záležitost z hlediska finanční náročnosti na pořízení. Kdyby tento konkrétní měnič vykazoval dobré experimentální výsledky měření, byl by zřejmě nejlepší volbou po stránce tzv. poměr cena/výkon. Je tu ale omezení, jak už bylo řečeno výše, ve vyšší minimální hodnotě vstupního napětí pro start obvodu.

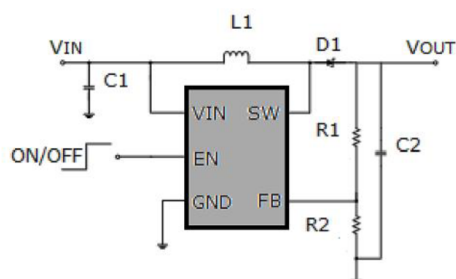
6.3.4 MT3608

Posledním typem obvodu vhodným pro tuto aplikaci je obvod *MT3608* od výrobce *AEROSEMI*. V tomto případě jde o další komerčně dostupnou kompletní desku z čínského trhu. Když bychom porovnali maximální spínací proud 2 A a rozměry samotného obvodu, bude nejspíš docházet k přehřívání. Na druhou stranu dle tab. 13 dosahuje obvod velmi velké účinnosti. Závislosti účinnosti na výstupním proudu a jiné detailnější parametry jsou podrobněji uvedeny v [28].

Tab. 13 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče *MT3608* [28]

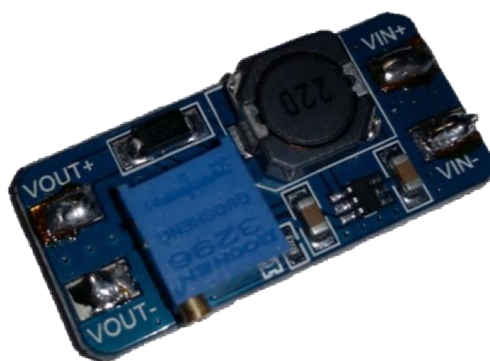
Parametry MT3608		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Vstupní napětí	2–24	V
Výstupní napětí (nastavitelné) max.	28	V
Spínací proud max.	2	A
Spínací frekvence tranzistoru max.	1,2	MHz
Účinnost max.	97	%
Pouzdro	SOT23-6	

Na obr. 43 je znázorněno typické zapojení obvodu *MT3608*. Výrobce zde však neudává jednotlivé hodnoty k samotným elektronickým prvkům okolo obvodu. Víme naopak, že rezistory R_1 a R_2 jsou nahrazeny odporovým trimrem pro regulaci výstupního napětí 2–24 V.



Obr. 43 Typické zapojení obvodu *MT3608* [28]

Ke všem třem výše uvedeným obvodům byla znázorněna deska plošných spojů, tudíž nebude chybět i k tomuto obvodu. Deska jako celek byla nejmenší ze všech zde uvedených. Přesné rozměry proto jsou 36 x 17 mm.



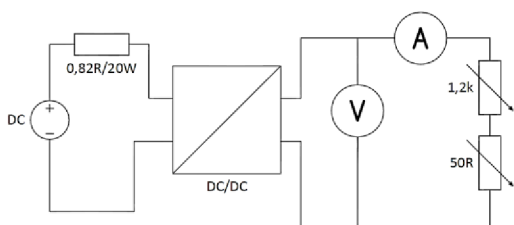
Obr. 44 MT3608 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek

6.3.5 Výsledná volba elektroniky

Celá čtveřice výše uvedených DC/DC zvyšujících měničů byla podrobena experimentálnímu měření. Jednalo se o měření výstupního napětí a proudu při konstantním vstupním napětí s předřadným rezistorem. Samozřejmě bylo také odečítáno napětí a proud na vstupu pro případné určení účinnosti měniče. Měření probíhalo v laboratoři s použitím laboratorního zdroje napájení, vstupního odporu (simuluje vnitřní elektrický odpor dvou sériově zapojených termoelektrických generátorů), samotného měniče a na výstupu voltmetru, ampérmetru a proměnné drátové zátěže (rezistoru). Z takto změřených dat byly později vykresleny zatěžovací charakteristiky jak s použitím vstupního odporu, tak i bez něj. Na obr. 45 je znázorněna ukázka pracoviště experimentálního měření měničů včetně schématu zapojení.

Použité měřicí přístroje a vybavení:

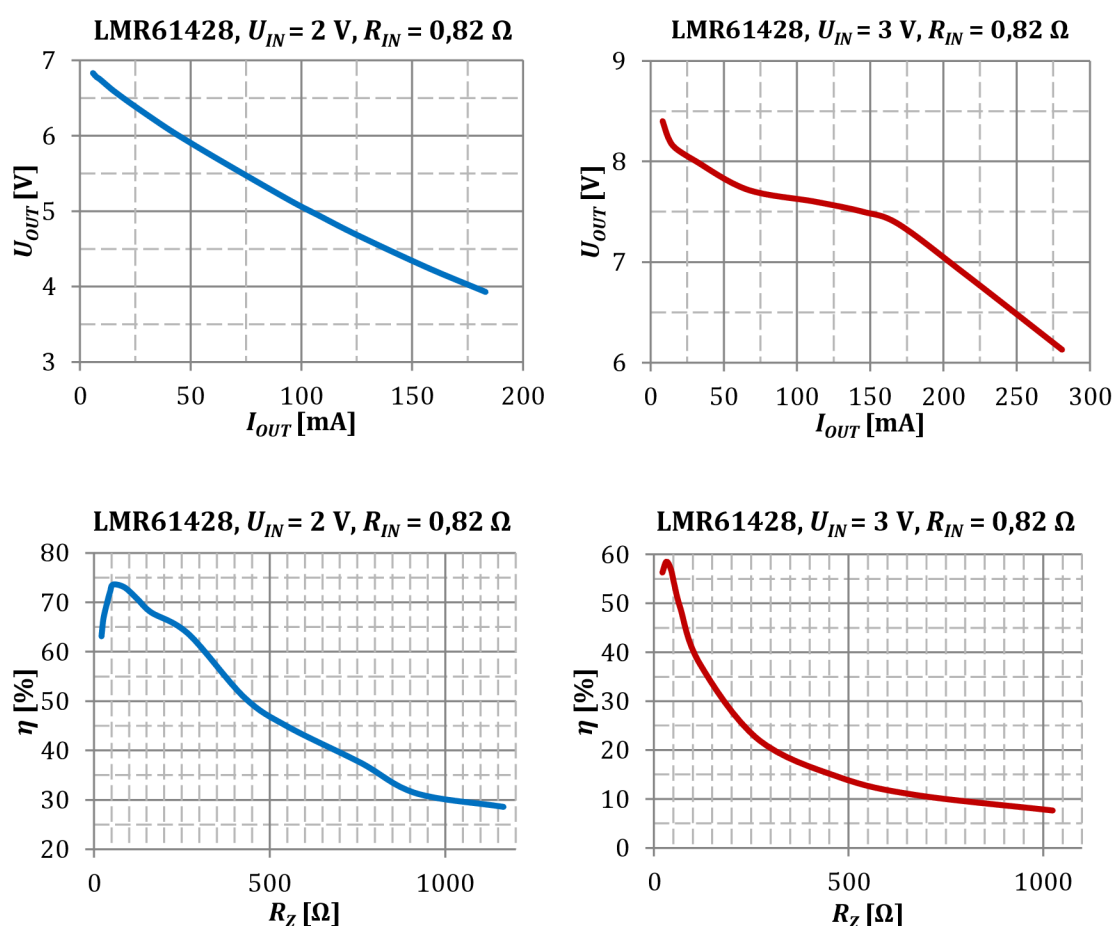
- napájecí zdroj: STATRON 3225.71, v.č. 0805009;
- vstupní drátový rezistor: 0,82 Ω /20 W;
- voltmetr: FLUKE 175, v.č. 90440437;
- ampérmetr: UNI-T UT33A, v.č. 810005876;
- výstupní proměnný rezistor: Metra Blansko, 1200 Ω , 0,83 A;
- výstupní proměnný rezistor: Krompachy PR60, 50 Ω , 5A.



Obr. 45 Ukázka pracoviště experimentálního měření stejnosměrného měniče napětí

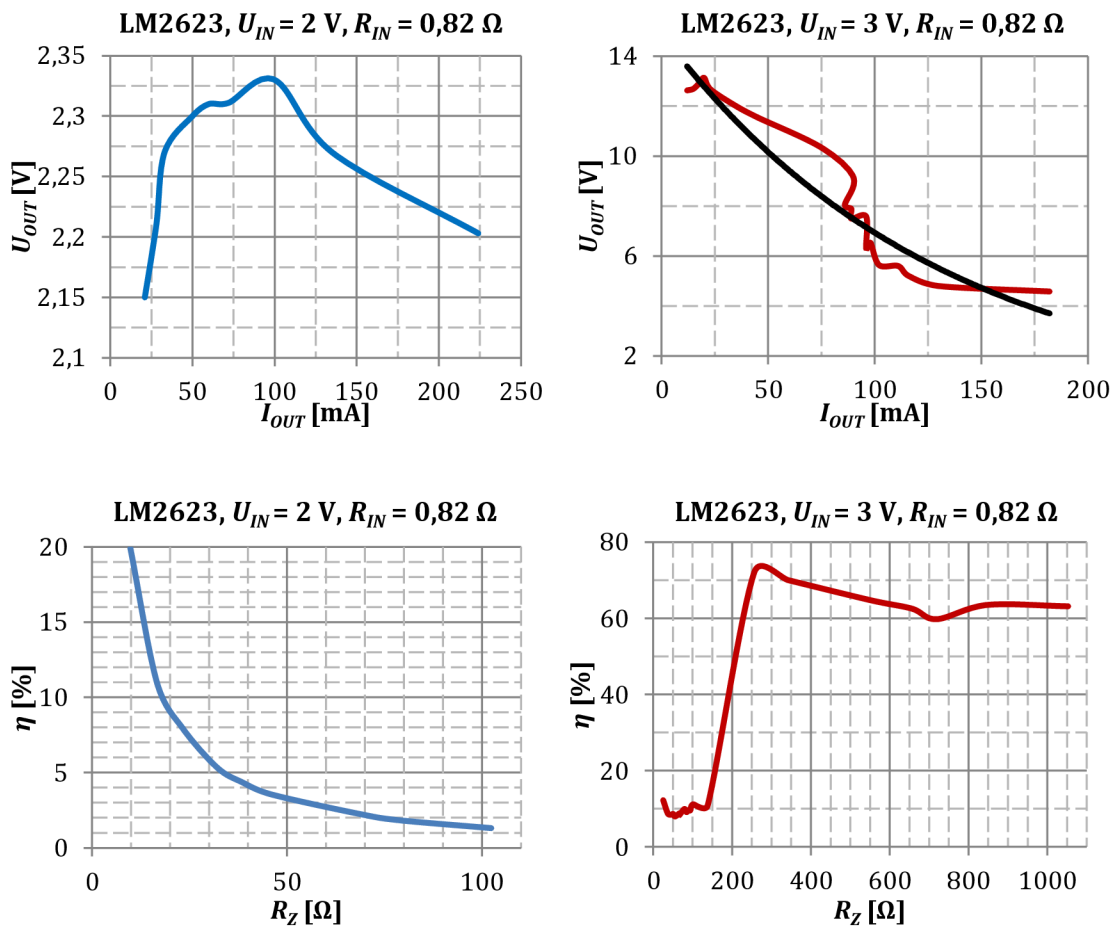
Zatěžovací charakteristiky všech jmenovaných DC/DC měničů jsou uvedeny níže. U každého měniče je vykreslena tato charakteristika pro vstupní napětí 2 a 3 V. Pouze pro obvod *XL6009* je vstupní hodnota 3 a 4 V z důvodu nefunkčnosti při vstupním napětí 2 V. Z těchto charakteristik je zřejmé, jestli je tento zdroj napětí (měnič) tvrdý, popřípadě měkký. Dalším zkoumaným parametrem při experimentálním měření byla také teplota samotného obvodu při vysoké zátěži (nízký zátěžný odpor), která dosahovala u některých obvodů k opravdu vysokým hodnotám. Dle těchto kritérií bude pak na konci této kapitoly zvolen jeden měnič, který bude vyhovovat jak teplotnímu parametru, tak tvrdosti zdroje, popřípadě hodnotě výstupního napětí a celkové stability.

Prvním z testovaných obvodů byl *LMR61428*, který potvrzuje zvyšující poměr daný vztahem (50). Z charakteristik uvedených níže lze vidět, že je tento obvod poněkud měkkým zdrojem. Velmi dobrých výsledků dosahovala hodnota teploty tohoto obvodu, která byla poněkud nízká až průměrná.



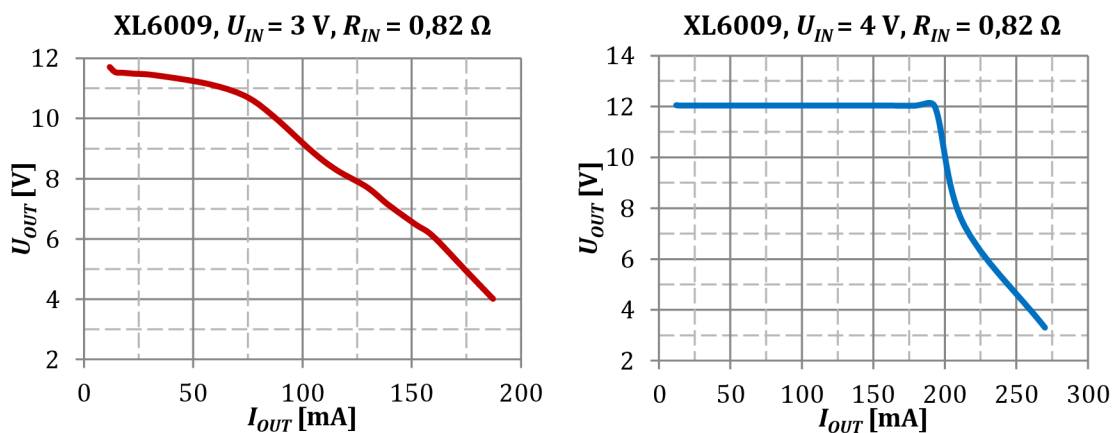
Obr. 46 Zatěžovací charakteristiky obvodu *LMR61428*

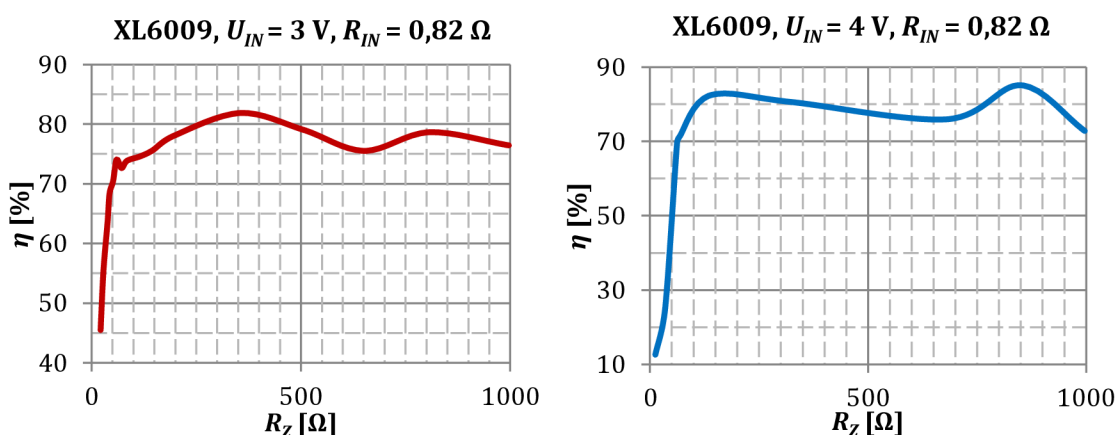
Obvod *LM2623* by měl dle technického listu [26] zvyšovat napětí už od 0,8 V vstupních. Při experimentu však vstupní napětí dosahuje hodnoty 2 V, ale výstupní je max. 2,3 V. Naopak při zvýšení hodnoty vstupní je výstupní hodnota poněkud nestabilní a navíc zde dochází k poměrnému přehřívání. Zatěžovací charakteristiky k tomuto obvodu jsou znázorněny na obr. níže.



Obr. 47 Zatěžovací charakteristiky obvodu LM2623

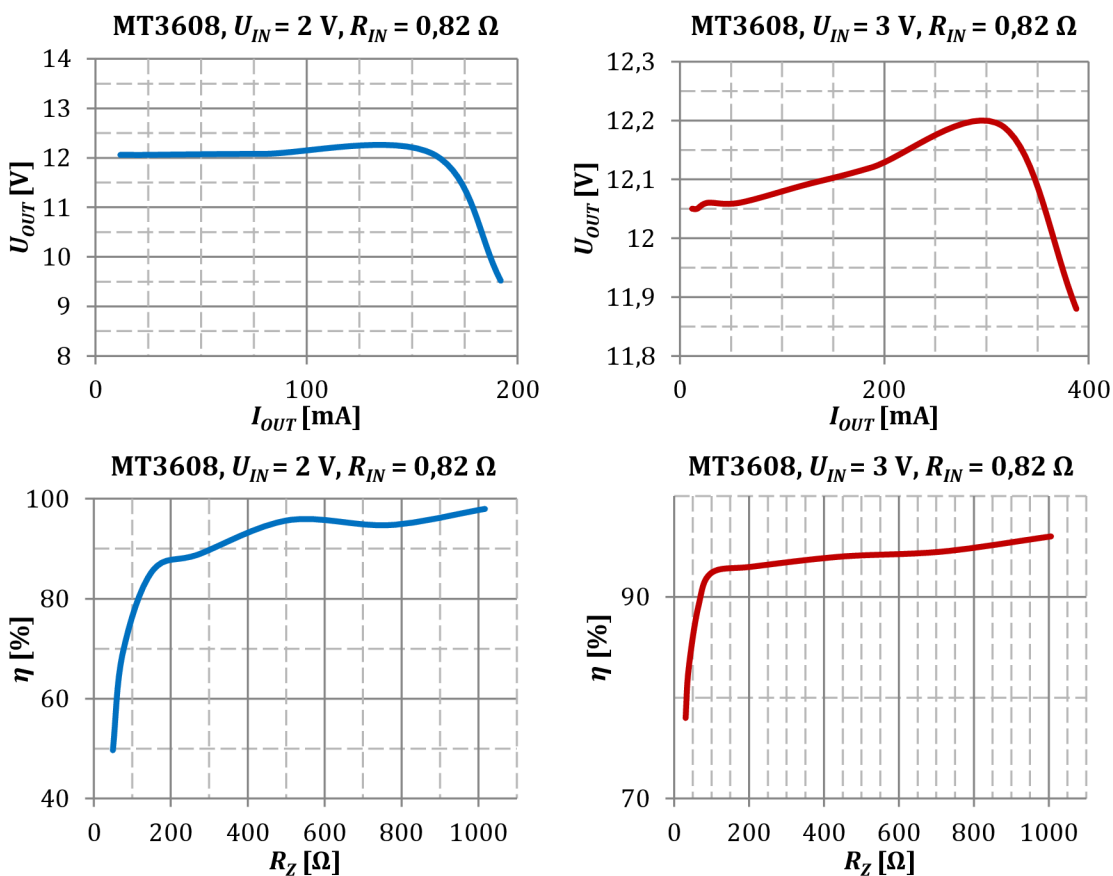
Komerčně dostupný obvod *XL6009* startuje při vstupním napětí 3 V, což je pro naši aplikaci problém. Experimentální měření ukázalo, že je měnič při vstupním napětí 4 V poměrně tvrdý. Výborným výsledkem je také teplota obvodu, která byla nejnižší ze všech měřených měničů.





Obr. 48 Zatěžovací charakteristiky obvodu XL6009

Posledním zkoušeným obvodem byl druhý komerčně dostupný obvod *MT3608*, který si po tzv. tvrdé zatěžovací charakteristice napěťového měniče vedl nejlépe. Charakteristiky můžeme vidět níže. Výše bylo uvedeno, že tento obvod je, co se týká velikosti, velmi malý. Proto docházelo k velkému přehřívání, což byla největší nevýhoda. Přehřívání bylo částečně kompenzováno chladičem samotného obvodu, ale z důvodu malé stykové plochy mezi obvodem a chladičem se i přes tuto snahu nepodařilo obvod dostatečně chladit. Tudíž po tepelné stránce je *MT3608* velmi ztrátový.



Obr. 49 Zatěžovací charakteristiky obvodu MT3608

Ze čtveřice uvedených obvodů DC/DC zvyšujících měničů bylo nutno především dle teplotního a stabilního hlediska určit nejvhodnější obvod pro tuto aplikaci. V tab. 14 níže jsou uvedeny hlavní výhody, či nevýhody. Dle těchto uvedených kladů a záporů byl vybrán obvod **LMR41628**. Obvod dosahuje především optimálních teplot a je poměrně tvrdým zdrojem. Jediná nevýhoda spočívá v omezení zvyšujícího poměru měniče, avšak námi instalovaný ventilátor se bez problému rozběhne. Při vyšším vstupním napětí toto omezení lze zanedbat.

Tab. 14 Porovnání uvedených DC/DC měničů – výhody, nevýhody

	+	-
LMR61428	optimální teplota v zátěži, tvrdší zdroj	omezeno zvyšujícím poměrem
LM2623	-	nestabilita, potřeba většího U_{IN} , vysoká teplota v zátěži
XL6009	nízká teplota v zátěži, tvrdý zdroj	minimální $U_{IN} = 3\text{ V}$
MT3608	tvrdý zdroj	příliš vysoká teplota v zátěži

6.4 Celkové sestavení

Na základě návrhu (obr. 31) a modelu samotného tepelného výměníku v kap. 5 byl zkonstruován reálný tepelný výměník (obr. 50). Jak už bylo řečeno výše, použitým materiálem pro tuto realizaci byla nerezová ocel. Jednotlivé dílčí části byly dle technické dokumentace vyřezány laserovým paprskem a to z důvodu dosažení velmi vysoké přesnosti. Spojení částí pak probíhalo v domácím prostředí technologií svařování TIG.



Obr. 50 Reálná podoba navrženého tepelného výměníku

Na obr. 50 (vlevo) si můžeme všimnout přidaného materiálu nad vyústěním trubek studené strany. Tento materiál (výztuž) se nenachází v žádné technické dokumentaci, ale byl přidán z důvodu velkého pnutí a následného ohýbání materiálu při svařování. Další otázka může být ohledně chybějícího vstupního otvoru pro přívod studeného vzduchu do výměníku. Tento nedostatek bude vyřešen dodatečným výřezem až po aplikaci na kotel tuhých paliv. V obrazové příloze A, přesněji na obr. A6, je výřez naznačen. Rozměry tohoto výřezu by se měly rovnat rozměrům chladiče studené strany termoelektrických generátorů v řezu.

V kap. 4 byly zmíněny výsledné parametry termoelektrického generátoru a v kap. 6.1 byly popsány jednotlivé konstrukční prvky včetně axiálního ventilátoru. Všechny tyto díly byly dány dohromady a spojeny prostřednictvím čtveřicí tažných pružin s obyčejnými oky pro konstantní přítlačnou sílu. Takto se aplikoval samotný mezikus teplé strany generátoru na kouřovod, přiložena dvojice tepelných generátorů a v neposlední řadě i chladič studené strany generátorů včetně ventilátoru. Výsledná reálná soustava (obr. 51) bude připojena na výstup spalin z výměníku, kde bude současně ventilátor plnit funkci ochlazování studené strany TEG, tak i nuceně vhánět vzduch na vstup studené strany výměníku.



Obr. 51 Reálná podoba soustavy TEG, chladiče a mezikusu na kouřovodu

Poslední částí návrhu celého zařízení pro zlepšení využití odpadního tepla byla samozřejmě elektronika. V předchozí kapitole této práce byla zvolena výsledná volba elektroniky, která byla umístěna do kovové konstrukční krabičky (obr. 52) a pro jednoduché připojení vybavena vstupním a výstupním konektorem.



Obr. 52 Reálná podoba DC/DC měniče napětí v konstrukční krabičce

7 Závěrečné testování a zhodnocení výsledků

Funkčnost zařízení a závěrečné testování bylo ověřeno v domácím prostředí s využitím kotle na tuhá paliva, přesněji kamna *Club 11* dřívějšího výrobce *Kovosmalt Filakovo*, současného *THORMA*.

Nejprve byl sestaven kouřovod, neboli přívod spalin k samotné testované soustavě mezikus – termoelektrický generátor – chladič (použita byla teplovodivá pasta *ELCHEMCO EXTRÉM* – $\lambda = 0,4 \text{ W/m.K}$) a následně zapojeny všechny měřicí přístroje pro měření tepelných a elektrických veličin. Jednalo se konkrétně o měření teplot spalin v kouřovodu, teploty na studené a na teplé straně termoelektrických generátorů, napětí a proud vstupující do DC/DC měniče (vystupující z TEG) a v neposlední řadě i výstupní napětí z DC/DC měniče pro napájení axiálního ventilátoru.

Použité měřicí přístroje:

- teploměr digitální: CEM DT-613, v.č. 013902;
- voltmetr: METEX M-3800, v.č. 906061;
- ampérmetr: METEX M-3270D, v.č. B232001788.

Na obr. 53 je znázorněna ukázka pracoviště experimentálního měření. Všechny hodnoty byly po cca 2 minutách zapisovány do předem připravené tabulky (tab. 15).



Obr. 53 Ukázka pracoviště experimentálního měření

Do samotného experimentálního měření nebyl však zahrnut samotný tepelný výměník z důvodu chybějícího vstupního otvoru studené strany. Kvůli tomuto nedostatku nebylo proto možné změřit výstupní (ohřátý) vzduch, tudíž v měřeném experimentu nebyl tepelný výměník použit.

Výsledky experimentálního měření jsou zapsány do tab. 15 uvedené níže. Celá soustava byla měřena 70 minut, a to od počátečního zatopení, až po ukončení topení v kamnech, viz poznámky v posledním sloupci tabulky. Tato soustava mezikusu – termoelektrických generátorů – chladiče – ventilátoru byla navržena na zcela autonomní provoz bez potřeby externího zdroje napájení. Hodnocením naměřených a vypočtených výsledků ale lze říct, že externí zdroj napájení potřebný byl, alespoň částečně.

Při prvních dvaceti minutách experimentu kamna nedodají tak vysokou hodnotu energie do mezikusu teplé strany generátorů, tudíž se do něj energie akumuluje pomaleji. Tato pomalá akumulace energie má za následek rychlé prohřívání chladiče studené strany generátoru a tím pádem vzniká tak malý tepelný rozdíl ΔT obou stran, že je generované napětí nedostačující. Abychom ale docílili alespoň chvilkového autonomního provozu, bylo nutno ventilátor připojit nejprve na externí napájecí zdroj s hodnotou napětí 12 V a poté změněna hodnota na úroveň 6 V, kdy nedocházelo k příliš velkému ochlazení horké strany generátoru. Následným sledováním výstupní hodnoty napětí, která také souvisí s rozdílem teplot obou stran generátoru, byl ventilátor odpojen od externího napájecího zdroje a připojen na DC/DC měnič napětí. Touto fází se dospělo k autonomnímu provozu ventilátoru bez použití napájecího zdroje a k udržování průměrnému rozdílu teplot cca $\Delta T = 20$ °C. Tento průměrný rozdíl teplot byl také podporován teplotou spalin T_{spalin} , která se v našem případě pohybovala v průměrné hodnotě 233 °C.

Tímto hodnocením měření se dospívá k závěru, že předpokládaná teplota spalin při návrhu tepelného výměníku v tab. 6 se liší poměrně o velkou hodnotu, proto lze předpokládat, že teplota studeného vzduchu se ještě více ohřeje, než bylo spočteno (lze znovu přepočítat s použitím přiloženého modelu). Také se liší námi odhadovaný tepelný rozdíl při volbě parametrů generátoru v tab. 5, předběžným výpočtem byl odhadován tepelný rozdíl 40 °C a při experimentálním měření však dosahuje 20 °C, což představuje dvojnásobný rozdíl. Závěrečným hodnocením je, že by se ventilátor alespoň bez chvilkové pomoci externího napájení nevedl do funkčnosti. Proto budou vytvořeny jednotlivé body úpravy, které je nutno změnit tak, aby nemuselo být potřeba externího zdroje. Touto problematikou se ale už tato práce zabývat nebude a bude předmětem dalšího zkoumání a vývoje.

Jednotlivé body úpravy, které je třeba změnit:

- výměna ventilátoru na nižší jmenovité napětí – 5 V,
- optimalizace elektroniky po výměně ventilátoru,
- horní část hliníkového mezikusu teplé strany generátorů nahradit jen objímkami – nebude docházet k odebírání tep. energie,
- hlavní část hliníkového mezikusu teplé strany generátorů zhotovit z tenčího materiálu – menší tep. odpor => rychlejší ohřev,
- použití vhodnější teplovodivé pasty, zmenšení kontaktního tep.odporu

Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty experimentálního měření

T_{spalin} [°C]	T_{h-TEG} [°C]	T_{c-TEG} [°C]	ΔT_{TEG} [°C]	U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	t [min]	POZN.	
13	13,7	13,7	0,0	0,005	0	0	-	0	$T_{AMB} = 13\text{ °C}$	
55	14,2	13,7	0,5	0,018	0,001	0	-	2		
-	16,4	14,4	2,0	0,225	0,002	0	-	4		
180	19,5	16,0	3,5	0,413	0,008	0,003	-	6		
-	22,4	17,5	4,9	0,551	0,012	0,007	0,45	8		
187	26,0	20,0	6,0	0,680	0,022	0,015	-	10		
-	30,6	23,9	6,7	0,760	0,024	0,018	-	12		
203	35,5	28,6	6,9	0,787	0,024	0,019	0,68	14		
238	41,3	34,3	7,0	0,814	0,024	0,020	-	16		
249	47,0	40,0	7,0	0,798	0,026	0,021	-	18		
-	57,0	50,0	7,0	0,836	0,028	0,023	-	20		
-	65,0	53,0	12,0	1,350	0,031	0,042	-	22		Ventilátor odpojen a připojen na ext. zdroj 12V
-	64,1	50,2	13,9	1,560	0	0	-	24		
-	62,2	46,5	15,7	1,770	0	0	-	26		
247	60,3	43,8	16,5	1,850	0	0	-	28		
-	55,5	39,1	16,4	1,840	0	0	-	30		Úprava ext. zdroje - 6V
272	56,0	41,6	14,4	1,640	0	0	-	32		
246,2	60,4	45,0	15,4	1,740	0	0	-	34		
313	65,8	48,3	17,5	2,010	0	0	-	36		
-	67,9	49,7	18,2	2,110	0	0	-	38		Vent. připojen na DC/DC
-	78,5	59,5	19,0	1,920	0,350	0,672	5,47	40		
-	79,9	60,5	19,4	1,890	0,340	0,643	5,36	42		
280	78,5	60,7	17,8	1,790	0,310	0,555	5,00	44		
-	80,5	61,4	19,1	1,890	0,350	0,662	5,49	46		
264,6	83,3	62,7	20,6	2,040	0,400	0,816	5,99	48		
256,9	81,7	62,5	19,2	1,860	0,330	0,614	5,25	50		
263,1	82,3	63,3	19,0	1,840	0,320	0,589	5,13	52	$T_{kouřovod} = 237\text{ °C}$	
-	85,0	65,5	19,5	1,860	0,330	0,614	5,25	54	Nucené provzdušňování ohně v kotli	
325	89,4	67,8	21,6	2,120	0,430	0,912	6,39	56		
313	91,1	68,3	22,8	2,190	0,460	1,007	6,69	58		
310	90,6	66,9	23,7	2,220	0,480	1,066	6,74	60	Ukončení experimentu	
256	89,8	66,0	23,8	2,160	0,450	0,972	6,45	62		
-	86,1	65,1	21,0	2,040	0,400	0,816	5,99	64		
231	81,4	63,3	18,1	1,780	0,300	0,534	4,87	66		
222	76,9	61,0	15,9	1,590	0,220	0,350	4,20	68		
222	77,3	63,4	13,9	1,460	0,040	0,058	4,10	70		

Experiment byl ukončen přesně po jedné hodině od počátečního zatopení v kamnech. Pokud si ale všimneme rozdílné průměrné teploty spalin T_{spalin} a maximální teploty teplé strany modulů T_{h-TEG} , došlo přinejmenším k předčasnému ukončení před kompletním prohřátím mezikusy (velká tepelná kapacita), přičemž časová konstanta ohřevu τ byla spočtena až dodatečně po měření, s výsledkem cca $\tau = 1900$ s. Z tohoto výpočtu a experimentálního měření je nutno dodat, že měření mělo být podrobena alespoň dvojnásobnému času kustálení všech teplot. Dalším možným nedostatkem měření byl velký kontaktní tepelný odpor mezi kouřovodem a mezikusem.

8 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvořit funkční model (i vzorek) tepelného výměníku a volbu termoelektrického generátoru implementovaného na kouřovodu, který generuje dostatečný výkon pro axiální ventilátor. Samotný ventilátor pak vytváří nucené proudění studeného vzduchu přes chladič studené strany generátoru a zároveň i přes studenou stranu tepelného výměníku, čímž je zajištěno částečné využití odpadního tepla.

První část této práce pojednává především o rešeršních studiích termoelektrických jevů, o různých konstrukcích a materiálech termoelektrických modulů, ale i o tepelných výměnících.

Další část práce se zabývá volbou parametrů generátoru. Byly vybrány dva termoelektrické generátory, přičemž z experimentálního měření a z technických listů generátorů byl zvolen vhodnější z nich, a to TEG 127-250-38. Poté se s tímto zvoleným generátorem dále pracovalo a byl použit pro výslednou aplikaci.

Model tepelného výměníku byl předmětem třetí částí této práce. Jednalo se konkrétně o výkonnostní návrh, tudíž o určení výstupních teplot obou látek metodou ε - NTU . Výsledné hodnoty výpočtu dle zadaných hodnot jsou pak v této kapitole sjednoceny do tabulky. Podstatou tohoto výpočtu bylo získání všech hodnot pro realizaci výroby tepelného výměníku.

Předposlední kapitola pojednává o návrhu celého zařízení. Jednalo se o jednotlivé dílčí části, jako jsou mezikus, chladič (včetně ukázky výpočtu tepelného odporu u žebrovaného profilu), tepelný výměník, ale v neposlední řadě i elektronika pro zvýšení napětí pro axiální ventilátor. V části elektroniky se posuzovaly čtyři různé varianty, přičemž výslednou volbou byl obvod *LMR61428*. Pro tento obvod byla samozřejmě vytvořena deska plošných spojů a implementována do konstrukční krabice, která je součástí celkového sestavení. Celkové sestavení zahrnovalo také výslednou reálnou podobu tepelného výměníku, či soustavu termoelektrických generátorů a všech periférií.

V páté a také poslední části je soustava bez tepelného výměníku podrobena závěrečnému testování na reálném kotli tuhých paliv *Club 11*, dřívějšího výrobce *Kovosmalt Filakovo*, současného *THORMA*. Jak už bylo v této kapitole řečeno, ventilátor se samočinně do svého chodu neuvede, tudíž bylo v tomto testování použito externího zdroje napájení alespoň na krátký čas. Po opětovném připojení na vlastní zdroj z termoelektrických generátorů byl celý systém zcela autonomní. Jak už bylo řečeno v této kapitole, při dlouhodobém provozu by se celý systém zřejmě prohřál a tak by byl systém autonomní. Kvůli tomuto nedostatku byly navrženy jednotlivé dílčí úpravy, které budou předmětem dalšího zkoumání a vývoje.

Všechny cíle této práce byly splněny. Na závěr je ještě třeba vzít v úvahu pořizovací ceny jednotlivých dílčích částí celé soustavy (mezikus, termoelektrické generátory, chladič, elektronika) a také cenu výroby vzhledem k pořízení samotného síťového transformátoru s nízkým elektrickým příkonem pro pohon ventilátoru. Proto je aplikace v této práci velice neekonomická.

9 Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma termoelektrické dvojice a Seebeckova jevu, upraveno z [4]	12
Obr. 2 Peltierův jev, upraveno z [4]	14
Obr. 3 Thomsonův jev, upraveno z [2]	15
Obr. 4 Thin-film TEG Micropelt MPG-655 3,3 x 2,4 x 1,1 mm (vlevo) [10], TEG/TEC článek 30 x 30 mm (vpravo) [11]	16
Obr. 5 Uspořádání polovodičových elementů uvnitř TEM [12]	17
Obr. 6 Princip činnosti jednotlivým režimů TEM [12]	17
Obr. 7 Vnitřní struktura TEG článku, upraveno z [3]	18
Obr. 8 Různé geometrické uspořádání termoelementů [3]	18
Obr. 9 Schéma závislosti elektrické vodivosti, Seebeckova koeficientu a tepelné vodivosti na koncentraci volných nosičů náboje [3]	19
Obr. 10 Termoelektrická účinnost polovodičových materiálů v závislosti na pracovní teplotě [1]	20
Obr. 11 Základní typy uspořádání tepelných výměníků	20
Obr. 12 Součinitel prostupu tepla, upraveno z [14]	21
Obr. 13 Závislost výkonu na teplotním rozdílu pro TEG 127-175-26	25
Obr. 14 Závislost výkonu modulu na zátěži pro TEG 127-175-26	25
Obr. 15 Závislost výkonu na teplotním rozdílu pro TEG 127-250-38	26
Obr. 16 Závislost výkonu modulu na zátěži pro TEG 127-250-38	27
Obr. 17 Pracoviště experimentálního měření termoelektrických generátorů	28
Obr. 18 Rozdílné konfigurace křížových tepelných výměníků [18]	29
Obr. 19 Výřez tepelného výměníku s naznačenými hydraulickými průměry, upraveno z [18]	30
Obr. 20 Závislost ε -NTU souproutého (vlevo) a protiproudého tepelného výměníku (vpravo) [18]	31
Obr. 21 Závislost ε -NTU křížového tepelného výměníku bez směšování (vlevo) a křížového s jednostranným směšováním (vpravo) [18]	32
Obr. 22 Magic Heat Reclaimer [19]	34
Obr. 23 Hliníkový mezikus na kouřovod – horká strana modulů	35
Obr. 24 Ventilátorový agregát s axiálním ventilátorem LA 6 [20]	35
Obr. 25 Závislost tepelného odporu chladiče LA 6 na délce a použitém ventilátoru [20]	36
Obr. 26 Závislost tepelného koeficientu na výkonu, účinnosti a tepelném toku, upraveno z [12]	37
Obr. 27 Paralelní konfigurace žebér chladiče [21]	37
Obr. 28 Ventilátor Emb-papst 612 NHH-118 [22]	39

Obr. 29 Tlaková charakteristika ventilátoru 612 NHH-118 s vyznačeným pracovním bodem [22]	40
Obr. 30 Grafická podoba navrhovaného křížového tepelného výměníku	41
Obr. 31 Grafická podoba tepelného výměníku včetně vstupního krytu v řezu.....	41
Obr. 32 Blokové schéma tepelného a elektrického okruhu, upraveno z [23].....	42
Obr. 33 Celkové schéma zapojení	42
Obr. 34 Zapojení zvyšujícího měniče popisující princip činnosti [24]	45
Obr. 35 Typické zapojení obvodu LMR61428 [25]	46
Obr. 36 LMR61428 - Pohled ze strany součástek desky plošného spoje	47
Obr. 37 LMR61428 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek.....	47
Obr. 38 Typické zapojení obvodu LM2623 [26].....	48
Obr. 39 LM2623 - Pohled ze strany součástek desky plošného spoje	49
Obr. 40 LM2623 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek.....	49
Obr. 41 Typické zapojení obvodu XL6009 [27].....	50
Obr. 42 XL6009 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek.....	50
Obr. 43 Typické zapojení obvodu MT3608 [28]	51
Obr. 44 MT3608 - Reálná deska plošného spoje včetně součástek	52
Obr. 45 Ukázka pracoviště experimentálního měření stejnosměrného měniče napětí	52
Obr. 46 Zatěžovací charakteristiky obvodu LMR61428	53
Obr. 47 Zatěžovací charakteristiky obvodu LM2623	54
Obr. 48 Zatěžovací charakteristiky obvodu XL6009	55
Obr. 49 Zatěžovací charakteristiky obvodu MT3608.....	55
Obr. 50 Reálná podoba navrženého tepelného výměníku	56
Obr. 51 Reálná podoba soustavy TEG, chladiče a mezikusu na kouřovodu	57
Obr. 52 Reálná podoba DC/DC měniče napětí v konstrukční krabici.....	57
Obr. 53 Ukázka pracoviště experimentálního měření	58
Obr. A1 Výkres včetně rozměrů chladiče studené strany generátoru, upraveno z [20].....	A1
Obr. A2 Technický výkres hliníkového mezikusu na kouřovod – horká strana modulů	A2
Obr. A3 Výkres rozloženého tvaru tepelného výměníku přední a boční části	A3
Obr. A4 Rozměry horního víka tepelného výměníku	A3
Obr. A5 Výkres rozloženého tvaru tepelného výměníku dolní a zadní části	A4
Obr. A6 Výkres rozloženého tvaru vstupního víka pro tepelný výměník s naznačeným vstupním otvorem.....	A5

10 Seznam tabulek

Tab. 1 Seebeckovy koeficienty nejpoužívanějších materiálů [7].....	13
Tab. 2 Pracovní teploty termoelektrických polovodičových materiálů [3].....	19
Tab. 3 Parametry termoelektrického modulu TEG 127-175-26 [16].....	24
Tab. 4 Parametry termoelektrického modulu TEG 127-250-38 [17].....	26
Tab. 5 Výpočet parametrů modulu TEG 127-250-38 ze zadaných hodnot.....	27
Tab. 6 Výpočet výkonnosti tepelného výměníku dle zadaných hodnot.....	33
Tab. 7 Technické parametry hliníkového chladiče fisherelektronik LA 6 [20].....	36
Tab. 8 Technické parametry axiálního ventilátoru Emb-papst 612 NHH-118 [22]	40
Tab. 9 Přenosové funkce vybraných neizolujících stejnosměrných měničů [7].....	44
Tab. 10 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče LMR61428 [25].....	45
Tab. 11 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče LM2623 [26].....	48
Tab. 12 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče XL6009 [27].....	50
Tab. 13 Parametry zvyšujícího DC/DC měniče MT3608 [28].....	51
Tab. 14 Porovnání uvedených DC/DC měničů – výhody, nevýhody.....	56
Tab. 15 Naměřené a vypočtené hodnoty experimentálního měření.....	60

11 Seznam použitých zdrojů

- [1] BRÁZDIL, M. *Peltierovy články pro výrobu elektrické energie*. Brno, 2011, 69 s. . Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [2] LOKAJ, J. *Termoelektrický generátor malého výkonu*. Brno, 2013, 73 s. . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Marian Brázdil.
- [3] ROWE, D.M. *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. Boca Raton: CRC/Taylor, 2006, 1014 s. ISBN 08-493-2264-2.
- [4] Ferrotec. In: *Thermoelectric Technical Reference - Introduction to Thermoelectric Cooling* [online]. c2001-2015 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <https://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef01/>
- [5] REICHL, J. a M. VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. In: *Seebeckův jev* [online]. 2009 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [6] GOLDSMID, H. *Introduction to thermoelectricity*. New York: Springer, 2010, 242 s. ISBN 9783642007156.
- [7] MOLAN, Li. *Thermoelectric-Generator-Based DC DC Conversion Network for Automotive Applications: Master of Science Thesis*. Stockholm, Sweden, 2011.
- [8] ŠTĚTINA, J. *Termoelektrický generátor*. Brno, 2012, 50 s. . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [9] ROWE, D.M. *CRC handbook of thermoelectrics*. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995, 701 s. ISBN 978-0849301469.
- [10] Micropelt. In: *Thermogenerators* [online]. c2006-2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.micropelt.com/>
- [11] thermalforce.de. In: *Thermogeneratoren* [online]. c2006-2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://thermalforce.de/>
- [12] MCCARTY, R. In: *Optimized, Low ΔT Thermoelectric Energy Harvesters for Water, Air or Solid Heat Sources and Sinks: sensor expo & conference* [online]. Rosemont IL, 2011 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.sensorsmag.com/sensors-expo/symposium2optimizedlowthermoelectricenergyharvesters>
- [13] BRÁZDIL, M. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů*. Brno, 2009, 57 s. . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [14] VLACH, R. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 94 s. ISBN 9788021439764.

-
- [15] HLAVAČKA, V. *Termická účinnost výměníků tepla*. 1. vyd. Praha: SNTL / Publikace St. výzkum. ústavu pro stavbu strojů, 1988, 132 s.
- [16] Thermalforce.de. In: *Thermo electric power generator TEG 127-175-26: datasheet* [online]. c2014 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://thermalforce.de/de/product/thermogenerator/TG127-175-26c.pdf>
- [17] Thermalforce.de. In: *Thermo electric power generator TEG 127-250-38: datasheet* [online]. c2014 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://thermalforce.de/de/product/thermogenerator/TG127-250-38h.pdf>
- [18] ÇENGEL, Yunus A, Robert H TURNER a John M CIMBALA. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*. 3rd edition. Boston: McGraw-Hill, 2008, 1055 s. ISBN 9780071266314.
- [19] Magic Heat Reclaimer. In: [online]. c2015 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.magicheatreclaimer.com/magic-heat-reclaimers/>
- [20] Fischerelektronik. In: *Ventilátorový agregát s axiálním ventilátorem LA 6* [online]. c2015 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/cs/heatsinks/index.xhtml
- [21] E SIMONS, R. Electronics Cooling. In: *Estimating Parallel Plate-Fin Heat Sink Thermal Resistance* [online]. 2003 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.electronics-cooling.com/2003/02/estimating-parallel-plate-fin-heat-sink-thermal-resistance/>
- [22] Ebm-papst. In: *DC axial compact fan 612 NHH-118: datasheet* [online]. c2015 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/DC-axial-fan-612NHH118-ENG.pdf>
- [23] KOESTER, D. Electronic design. In: *Use Thermal Energy Harvesting To Supply Your Sensor's Power* [online]. 2011 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://electronicdesign.com/energy/use-thermal-energy-harvesting-supply-your-sensor-s-power>
- [24] TŘINÁCTÝ, J. *Termoelektrický generátor pro spalínový tah kotle*. Brno, 2013. . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Marian Brázdil.
- [25] Texas Instruments. In: *LMR61428: datasheet* [online]. 2013 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr61428.pdf>
- [26] Texas Instruments. In: *LM2623: datasheet* [online]. 2014 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2623.pdf>
- [27] XLSEMI. In: *XL6009: datasheet* [online]. c2015 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.xlsemi.com/datasheet/XL6009%20datasheet.pdf>
- [28] Aerosemi. In: *MT3608: datasheet* [online]. c2015 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.mikrocontroller.net/attachment/212877/MT3608.pdf>
-

12 Seznam příloh

Příloha A

Obrazová příloha – technická dokumentace k jednotlivým dílčím částem soustavy

Příloha B

CD s následujícími soubory:

model_vykonnostni_navrh_tepelneho_vymeniku_krizovy.m

výpočtový model tepelného výměníku v programu Matlab

priklad_vypoctu_odporu_chladice_paralelni_zebra.m

příklad výpočtu tepelného odporu chladiče s paralelními žebry v programu Matlab

Eagle_LMR61428.brd

návrh desky plošného spoje pro obvod LMR61428 v programu Eagle

Eagle_LM2623.brd

návrh desky plošného spoje pro obvod LM2623 v programu Eagle

Tepelny vymenik - technicka dokumentace.pdf

kompletní technická dokumentace jednotlivých částí navrženého tep. výměníku

Datasheet - TEG127-250-38.pdf

datasheet k použitému termoelektrickému generátoru TEG 127-250-38

Datasheet - DC axial fan 612NHH118.pdf

datasheet axiálního ventilátoru Emb-papst 612 NHH-118

Datasheet - DCDC LMR61428.pdf

datasheet k obvodu LMR61428

Datasheet - DCDC LM2623.pdf

datasheet k obvodu LM2623

Datasheet - DCDC XL6009.pdf

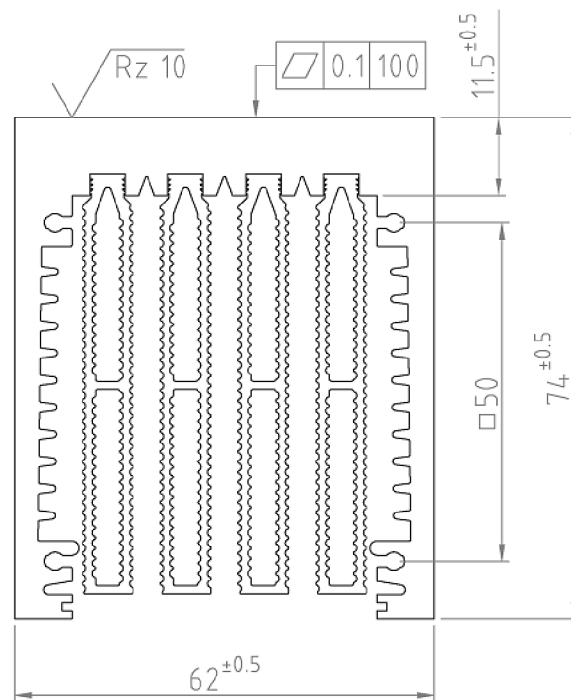
datasheet k obvodu XL6009

Datasheet - DCDC MT3608.pdf

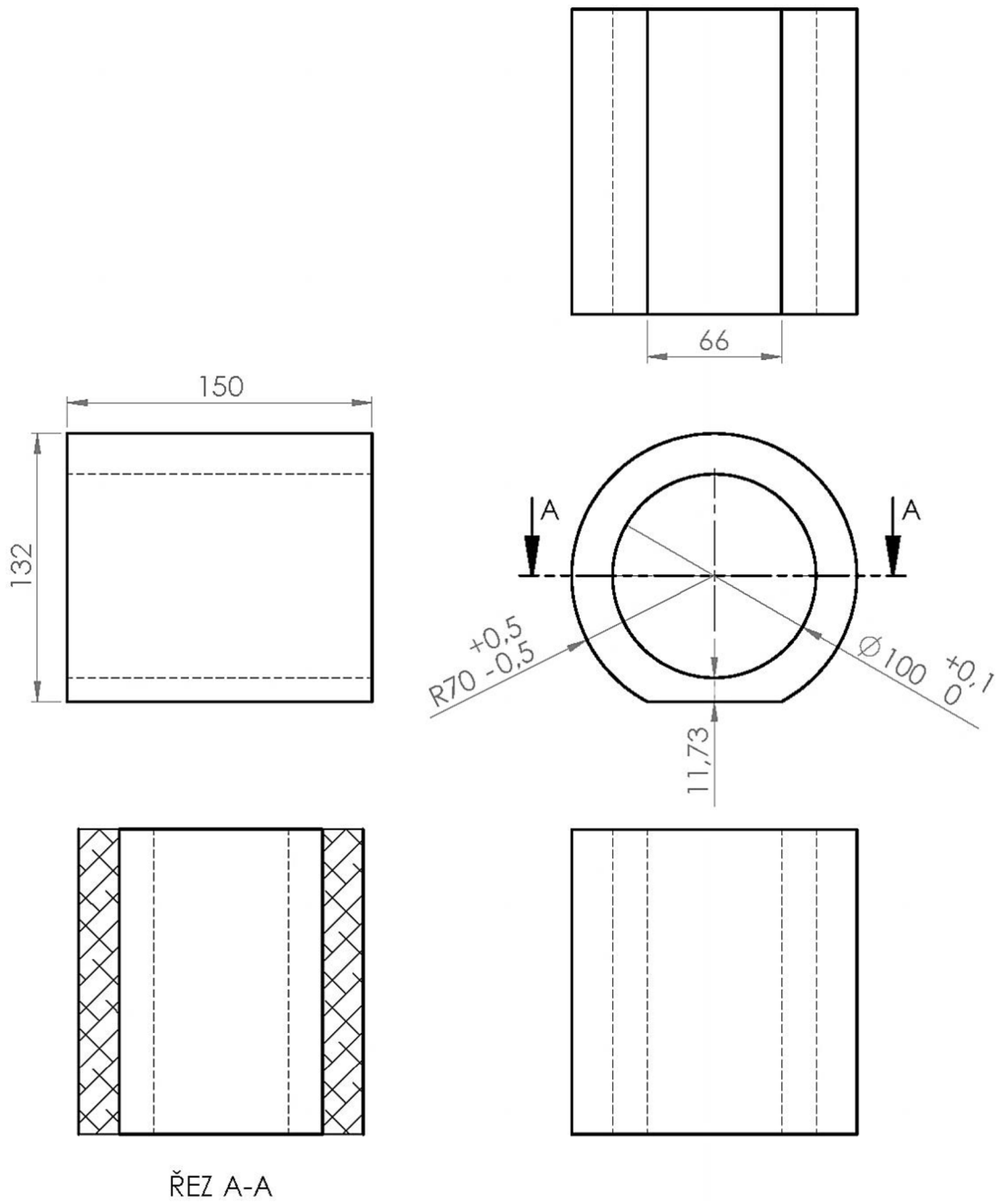
datasheet k obvodu MT3608

Příloha A

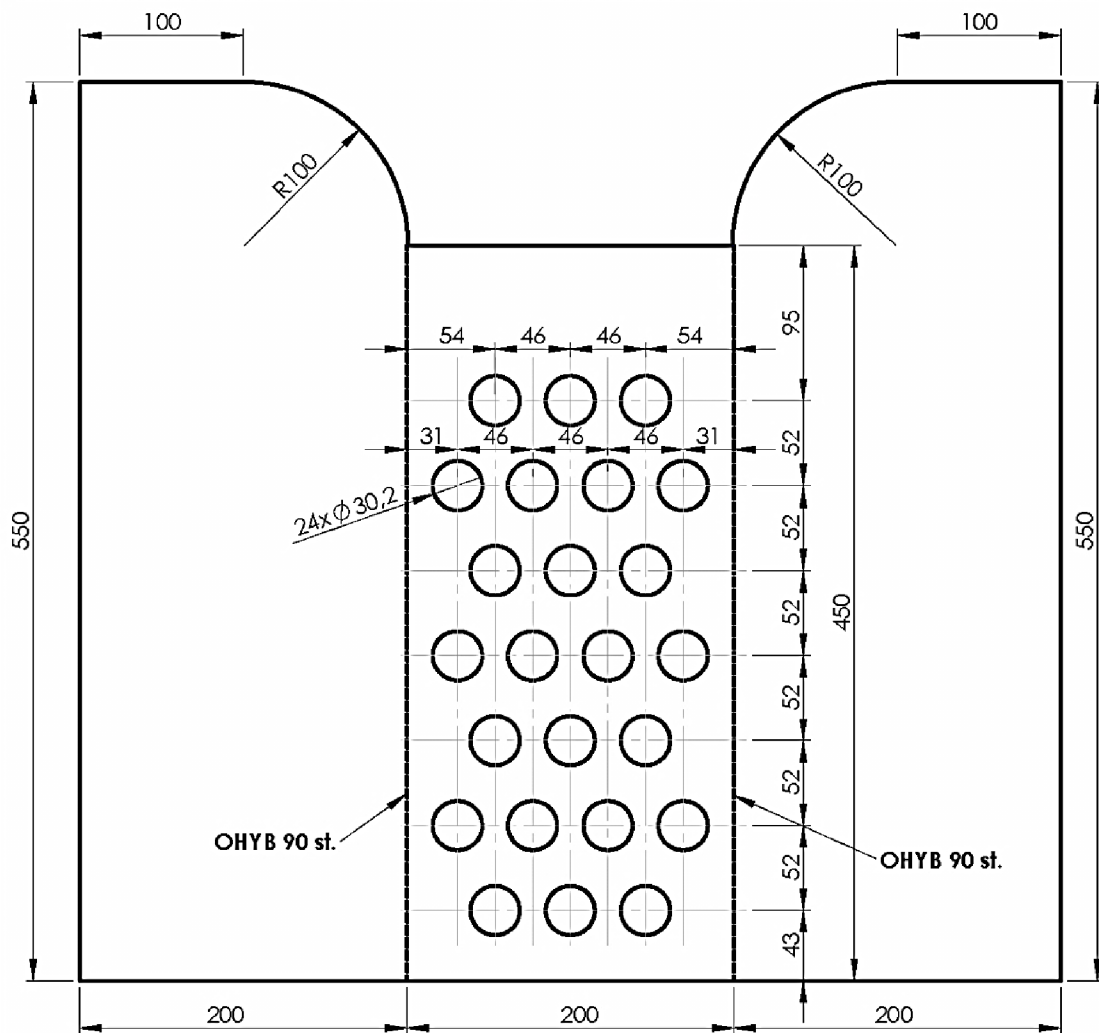
Obrazová příloha – technická dokumentace k jednotlivým dílům částem soustavy



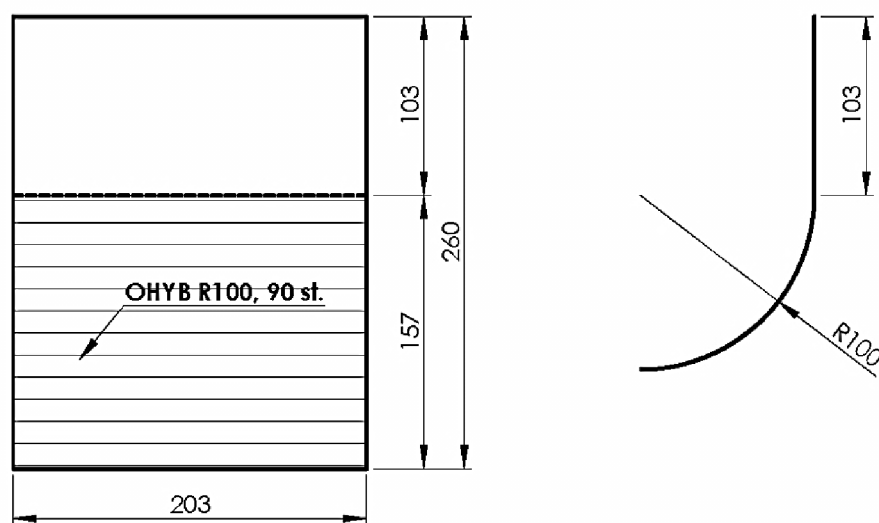
Obr. A1 Výkres včetně rozměrů chladiče studené strany generátoru, upraveno z [20]



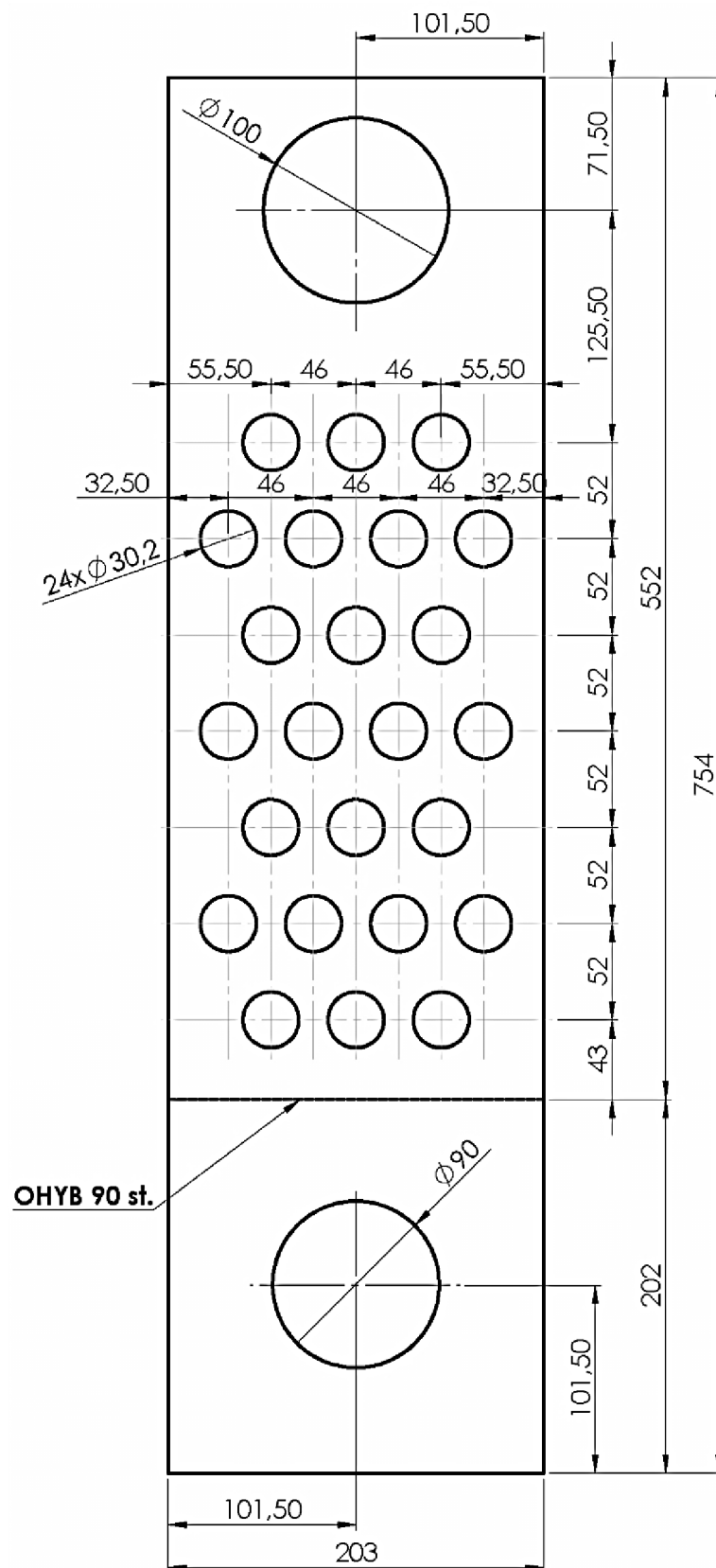
Obr. A2 Technický výkres hliníkového mezikusu na kouřovod – horká strana modulů



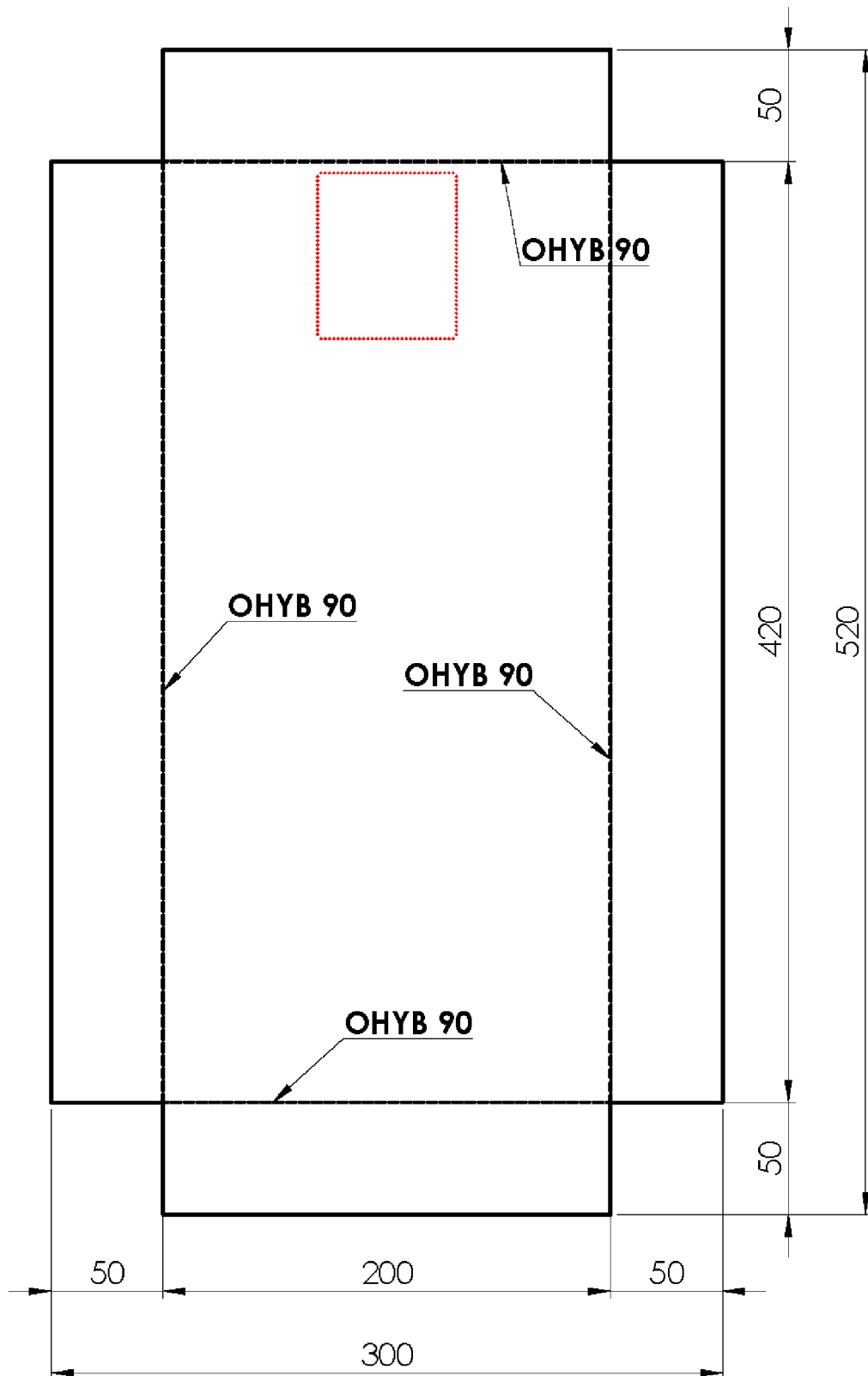
Obr. A3 Výkres rozloženého tvaru tepelného výměníku přední a boční části



Obr. A4 Rozměry horního víka tepelného výměníku



Obr. A5 Výkres rozloženého tvaru tepelného výměníku dolní a zadní části



Obr. A6 Výkres rozloženého tvaru vstupního víka pro tepelný výměník s naznačeným vstupním otvorem