



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VYUŽITÍ PŘÍPOJNICE JAKO ZDROJE TEPLA

USAGE OF BUSBAR AS A SOURCE OF HEAT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Svoboda

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Ondřej Svoboda

ID: 164409

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Využití přípojnice jako zdroje tepla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provést teplotní analýzu dané přípojnice.
2. Uvést možnosti využití tepla s cílem navrhnout konkrétní metodu využití tepla.
3. Provést reálné změření přípojnice.
4. Provést výpočty nutné k reálnému využití tepla v přípojnici.
5. Pokusit se vyčíslit náklady na realizaci.
6. Interpretovat získané poznatky v závěru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Jiří Šita, Siemens, s.r.o., Mohelnice

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce je věnována problematice využití ztrátového tepla z přípojnice a jejího chlazení. Zabýváme se zde teplotní analýzou přípojnice, jak pomocí numerických simulací v programu SolidWorks, tak praktickou zkouškou oteplení přípojnice. Správnost simulací tedy můžeme verifikovat z reálných naměřených hodnot. Pro určení teplotního profilu přípojnice je nutné provést měření teplot v různých místech přípojnice, a to buď kontaktní metodou pomocí termočlánků, nebo bezkontaktní metodou pomocí termokamery. Měření jsou prováděna na přípojnici LI1600A zhotovené firmou Siemens Busbar Trunking System Mohelnice. Cílem práce je zanalyzovat teplotu přípojnice, navrhnou nejúčinnější metodu využití odpadního tepla a provést ekonomickou kalkulaci.

Abstract

This study is dedicated to the use of heat energy from the busbar and its cooling system. The study deals with thermal analysis of the busbar, both using numerical simulations in SolidWorks and practical examination – warming of the busbar. We can verify the correctness of the simulation from the measured values. To determine the temperature profile of the busbar, it is necessary to measure the temperature at various points of the busbar by contact method using thermocouple or contactless method using a thermal imager. Measurements are performed at the busbar LI1600A made by Siemens Busbar Trunking System Mohelnice. The aim of the study is to analyze temperature busbar, to suggest the most efficient method of heat recovery, and to make economic calculation

Klíčová slova

Přípojnice; absorpční chlazení; ORC; Kalinův cyklus; termoelektrický generátor; TEG; Stirlingův motor; tepelný oběh ; cirkulace; SolidWorks; Flow Simulation; simulace; oteplení; teplota; výměník; přenos; ustálená teplota.

Keywords

Busbars; absorption cooling; ORC; Kalina cycle; TEG; Stirling engine; thermal cycle; circulation; SolidWorks; Flow Simulation; simulation; thaw; temperature; heat transfer; transmission; settled temperature.

Bibliografická citace

SVOBODA, O. *Využití přípojnice jako zdroje tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016.64s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Radil, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Využití přípojnice jako zdroje tepla jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Radilovi, Ph.D., konzultantům Ing. Petru Vyroubalovi Ph.D. a Ing. Štěpánovi Foralovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	10
2 TEPLLO	11
2.1 JOULOVO TEPLLO	11
2.2 PŘENOS TEPLA	11
3 PŘÍPOJNICE LI1600A	14
PARAMETRY PŘÍPOJNICE LI1600A	15
4 METODY VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA.....	16
4.1 ABSORPČNÍ CHLAZENÍ.....	16
4.2 ORGANICKÝ RANKINŮV CYKLUS (ORC).....	18
4.3 KALINŮV CYKLUS	22
4.4 TERMoeLEKTRICKÝ GENERÁTOR (TEG)	25
4.5 STIRLINGŮV MOTOR	28
5 ZKOUŠKA OTEPLENÍ PŘÍPOJNICE LI1600A.....	32
6 SOLIDWORKS	36
7 SIMULACE OTEPLENÍ PŘÍPOJNICE LI1600A	38
8 SIMULACE OTEPLENÍ KRYTU PŘÍPOJNICE LI1600A.....	45
9 SIMULACE A NÁVRH VÝMĚNÍKU	46
10 KOMPONENTY	53
11 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ TEG.....	55
12 CELKOVÁ KALKULACE	57
13 ZÁVĚR.....	58
LITERATURA	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Přenos tepla kondukcí [1]	12
Obr. 2-2 Přenos tepla konvekcí [1]	12
Obr. 3-1 Přípojnice LII600A	14
Obr. 3-2 Průřez přípojnici LII600A.....	15
Obr. 4-1 Schéma absorpčního cyklu [2]	16
Obr. 4-2 Pracovní části ORC	18
Obr. 4-3 p-V diagram ORC	19
Obr. 4-4 T-S diagram ORC cyklu pro reálný (isopentan) a ideální oběh [15].....	20
Obr. 4-5 Kalinův cyklus.....	22
Obr. 4-6 Rozdíl mezi Rankinovým (vlevo) a Kalinovým cyklem, (vpravo) [7]	23
Obr. 4-7 Závislost vysokotlaké části na maximální teplotě při konstantní nízkotlaké části a minimální teplotě 22°C [8].....	23
Obr. 4-8 Závislost účinnosti na maximální teplotě při konstantní nízkotlaké části a minimální teplotě 22°C [8].....	24
Obr. 4-9 Seebeckův jev.....	25
Obr. 4-10 Termoelektrická dvojice [10]	26
Obr. 4-11 Termoelektrický modul [10]	26
Obr. 4-12 Porovnání termoelektrické účinnosti a teoretické maximální účinnosti [10]	27
Obr. 4-13 p-V a T-S diagram ideálního Stirlingova cyklu [14]	28
Obr. 4-14 Stirlingův motor – konfigurace Alfa [13]	30
Obr. 4-15 Stirlingův motor – konfigurace Beta [13]	30
Obr. 4-16 Stirlingův motor – konfigurace dvojčinná alfa [15]	30
Obr. 5-1 Model sériového propojení vodičů	32
Obr. 5-2 Model sériového propojení vodičů	32
Obr. 5-3 Reálné připojení sériového připojení vodičů.....	32
Obr. 5-4 Připevněné termočlánky na vodičích přípojnici LII600A	33
Obr. 5-5 Zkouška oteplení vodičů přípojnici LII600A	34
Obr. 5-6 Zkouška oteplení krytu přípojnici LII600A	34
Obr. 5-7 Zkouška oteplení krytu přípojnici LII600A - termokamera.....	35
Obr. 5-8 Snímek oteplení přípojnici LII600A termokamerou	35
Obr. 6-1 Příklad simulace proudění tepelného toku přípojnici.....	37
Obr. 7-1 Popis simulovaného modelu - detail.....	39

Obr. 7-2 Popis simulovaného modelu	39
Obr. 7-3 Úprava analyzovaného modelu	40
Obr. 7-4 Nastavení použitých materiálů	41
Obr. 7-5 Nastavení podmínek modelu	41
Obr. 7-6 Nastavení podmínky OuterWall	42
Obr. 7-7 Nastavení elektrických podmínek	42
Obr. 7-8 Nastavení Point Goals	42
Obr. 7-9 Nastavení radiace tělesa	43
Obr. 7-10 Nastavení konstantního zdroje tepla - model	43
Obr. 7-11 Nastavení konstantního zdroje tepla	43
Obr. 7-12 Zasiťování (mesh) modelu	44
Obr. 8-1 Výsledek simulace oteplení přípojnice LI1600A	45
Obr. 9-1 Profil Cu trubky – výměník 1	46
Obr. 9-2 Popis výměníku č. 1	46
Obr. 9-3 Výsledek simulace tlakových ztrát potrubí výměníku č. 1	47
Obr. 9-4 Výsledek simulace oteplení teplotnosného média při rychlosti proudění $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	47
Obr. 9-5 Výsledek simulace oteplení teplotnosného média při rychlosti proudění $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	48
Obr. 9-6 Profil Cu trubky – výměník č. 2	48
Obr. 9-7 Výměník č. 2	49
Obr. 9-8 Výsledek simulace tlakových ztrát potrubí výměníku č. 2	49
Obr. 9-9 Výsledek simulace oteplení teplotnosného média při rychlosti proudění $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	50
Obr. 9-10 Profil Cu trubky – výměník č. 3	50
Obr. 9-11 Popis modelu výměníku č. 3	51
Obr. 9-12 Výsledek simulace tlakových ztrát potrubí výměníku č. 3	51
Obr. 9-13 Výsledek simulace oteplení teplotnosného média při rychlosti proudění $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	52
Obr. 9-14 Teplotní stupnice	52
Obr. 10-1 Parametry axiálního ventilátoru [19]	53
Obr. 10-2 Charakteristika axiálního ventilátoru [19]	54
Obr. 10-3 Model deskového výměníku - průřez	54
Obr. 10-4 Průhledný model deskového výměníku	55
Obr. 11-1 TEG	55
Obr. 11-2 $P=f(I)$ TEG článku	56

Obr. 11-3 $P=f(U)$ TEG článku	56
-------------------------------------	----

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Konfigurace systému	40
Tabulka 2 - Počet buněk výpočtové sítě	44
Tabulka 3 - Vyhodnocení simulací	53
Tabulka 4 - Naměřené hodnoty TEG článku	56
Tabulka 5 - Kalkulace výměníku č.3	57
Tabulka 6 - Kalkulace TEG článků	57

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ A SYMBOLŮ

I_n	Jmenovitý proud	A
Q_0	Chladicí výkon	W
Q_{ab}	Tepelný výkon absorbéru	W
Q_d	Tepelný příkon potřebný k desorpci	W
Q_k	Tepelný výkon kondenzátoru	W
T	Teplota	°C
U_e	Jmenovité provozní napětí	V
U_i	Jmenovité izolační napětí	V
U_T	Termoeletrické napětí	V
V	Objem	m ³
f	Frekvence	Hz
p	Tlak	Pa, Bar
s	Entropie	J · kg ⁻¹ · K ⁻¹

1 ÚVOD

Při průchodu elektrického proudu vodičem vzniká Joulovo teplo, tedy tepelné ztráty na vodiči. Zahřívání vodiče lze vysvětlit předáním části kinetické energie částic způsobujících elektrický proud částicím, které se elektrického proudu neúčastní. Tím se zvyšuje tepelný pohyb těchto částic, tedy vodič se zahřívá. Ztráty ve vodiči nám tedy snižují účinnost přenosu elektrické energie. Tento tepelný výkon je závislý na odporu vodiče a protékajícím proudem vodičem. Důležitou vlastností je zvyšující se rezistivita rostoucí s teplotou vodiče. V praxi si snižování ztrát můžeme představit u přenosových sítí, kde se využívá velmi vysokého napětí, tedy vodičem přenosové soustavy protéká malý elektrický proud a ztráty jsou mnohonásobně nižší.

Téma bakalářské práce je navrženo firmou Siemens Busbar Trunking System Mohelnice, jež se zabývá výrobou a distribucí přípojniových systémů. Dalším výrobním produktem firmy Siemens jsou mimo jiné modulární rozvaděče nízkého napětí.

Prvním krokem bakalářské práce je navrhnout několik metod využití ztrátového tepla přípojnice LI1600A. Poté provést teplotní analýzu dané přípojnice pomocí simulací oteplení přípojnice při průchodu maximálního jmenovitého proudu a praktického měření oteplení ve Vědecko-technickém parku profesora Lista Brně. Praktické měření i simulace probíhá až do ustálení teploty, praktická měření jsou z časového hlediska velice náročné, proto lze pomocí simulací dosáhnout zkrácení doby měření a úspory času. K simulacím je firmou Siemens zvolen program SolidWorks, který je používám k modelování konstrukčních prvků přípojníc a rozvaděčů. Dalším bodem práce je navrhnutí primárního výměníků pro co nejefektivnější využití ztrátového tepla a provést výpočty. Posledním bodem je hrubá ekonomická kalkulace využitých a simulovaných metod.

2 TEPLLO

Prvním krokem v bakalářské práci je simulace oteplení přípojnice a proudění tepla v přípojnici. Teplota je jedna z nejdůležitějších stavová termoelektrická veličina, která nám charakterizuje zařízení a jeho stav. Teplo je energie vyměněná mezi systémy.

Teplota se určuje pomocí termodynamické teplotní stupnice, počátek této stupnice je dán absolutní nulou. Základní jednotka stupnice je Kelvin (K), který byl definován podle rovnovážného stavu tří skupenství vody (sytá pára, voda a led). Další používaná stupnice je Celsiova, která je odvozená od Kelvinovy termodynamické stupnice, tedy $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$.

2.1 Joulovo teplo

Joulovo teplo je teplo, které vzniká ve vodiči důsledkem průchodu elektrického proudu. Joule tento jev zkoumal kolem roku 1840.

Zahřívání vodiče způsobuje předávání kinetické energie částic způsobujících elektrický proud částicím, které se elektrického proudu neúčastní, tyto částice jsou nejčastěji ionty.

Joulovo teplo lze vyjádřit vztahem:

$$Q = U \cdot I \cdot t \text{ (J)}. \quad (2.1)$$

Vztah vyjadřuje závislost Joulova tepla Q na protékajícím proudu I (A), při napětí U (V) po dobu danou dobu t (s). Dále můžeme znát daný odpor vodiče R (Ω), tedy rovnici upraví na tvar:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ (J)}. \quad (2.2)$$

2.2 Přenos tepla

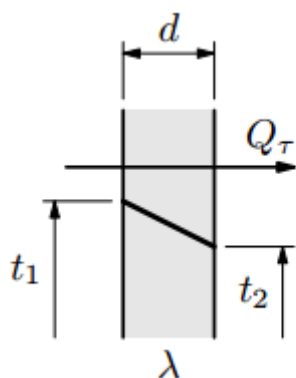
Přenos tepla je složitý děj, při kterém zavádíme řadu zjednodušení, které nám pak usnadní tvorbu modelů pro matematický popis sledovaných dějů. Sdíleno tepla tedy můžeme rozčlenit do čtyř kategorií: tepelný výměna vedením (kondukcí) tepelná výměna prouděním (konvekci) a tepelná výměna sáláním (radiací).

2.2.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Tento princip sdílení tepla spočívá v přenosu tepla ve směru klesající teploty, tedy ději způsobených interakcí mezi bezprostředně sousedícími částicemi v daném tělese. V kapalinách a plynech se k tomuto sdílení tepla připojuje také sdílení tepla prouděním a u látek, které částečně propouštějí záření (např. sklo), sdílení tepla sáláním. Při početním řešení sdílení tepla je třeba použít dva zákony:

1. zákon vedení tepla,
2. zákon zachování energie.

Budeme uvažovat rovinnou desku o stálé tloušťce d , jejíž konce jsou udržovány na konstantních teplotách t_1, t_2 ($t_1 > t_2$) (Obr. 2.2-1).



Předpokládejme, že deska je homogenní a izotropní, a proto proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám. Tedy velikost tepelného toku Q_τ procházejícího plochou S povrchu desky, je dána vztahem:

$$Q_\tau = \frac{\lambda}{d} (t_1 - t_2) \cdot S = \frac{\lambda \cdot S \cdot \Delta t}{d} \quad (\text{W}), \quad (3.1)$$

kde λ označuje součinitel tepelné vodivosti materiálu desky. Jednotka λ je $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

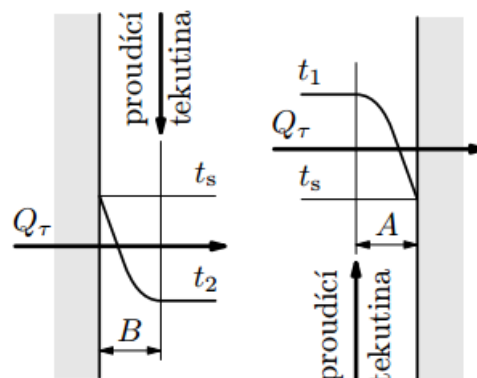
Obr. 2-1 Přenos tepla kondukcí [1]

2.2.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)

Ke sdílení tepla prouděním dochází například při styku kapaliny nebo plynu s pevnou stěnou. Při tom dochází k ochlazování nebo ohřívání tenké vrstvy tekutiny při stěně (podle toho, je-li teplota stěny vůči tekutině vyšší nebo nižší). Vzniklý rozdíl teplot vrstev pak způsobuje přirozené proudění (Obr.2-2) Na obr. 2-2 značí A oblast sdílení tepla prouděním z tekutiny do stěny, B značí oblast sdílení tepla prouděním ze stěny do tekutiny.

Rovnice, která vyjadřuje tepelný tok při sdílení tepla prouděním, je dána vztahem:

$$Q_\tau = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \quad (\text{W}),$$



Obr. 2-2 Přenos tepla konvekci [1]

Kde Q_τ označuje tepelný tok ve wattech, S označuje plochu stěny v m^2 , Δt označuje rozdíl teplot ohřívané tekutiny v kelvinech, α je součinitelem přestupu tepla ve $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Součinitel α udává tepelný tok přestupující z jednoho prostředí do druhého.

2.2.3 Sdílení tepla sáláním (radiací)

Sálání souvisí se změnami vnitřní energie tělesa a následně těleso vydává záření. Toto záření je pak vysíláno ve formě elektromagnetických vln do prostoru, který těleso obklopuje. Dopadne-li toto záření na nějaké jiné těleso a dojde-li k pohlcení tohoto záření, zvýší se vnitřní energie tohoto tělesa. Souhrnně se vzájemné sálání a pohlcování při dvou nebo i více tělesech s různými teplotami nazývá sdílení tepla sáláním.

Sálání je přirozená vlastnost těles a můžeme říci, že při něm každé těleso vysílá záření. Dopadne-li toto záření na jiné těleso, je částečně pohlceno, část se odráží a část prochází tělesem.

Pohlčené záření způsobuje zvýšení vnitřní energie tělesa, odražené záření dopadá na jiná tělesa a procházející záření přechází na jiná tělesa.

Pohltivost a odrazivost záření u tělesa závisí především na jakosti povrchu a také na barvě povrchu. Důležité je, že pro přenos tepla sáláním není potřeba žádné hmotné prostředí, protože jde o elektromagnetické vlnění.

Označíme-li P_r výkon vyzařující předmět ve wattech, S obsah plochy povrchu tohoto předmětu v m^2 a T teplotu v předmětu v kelvinech, platí:

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (\text{W}), \quad (2.5)$$

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je *Stefanova-Boltzmannova konstanta*, ε označuje emisivitu předmětu. Hodnota ε závisí na materiálu tělesa a platí $0 \leq \varepsilon \leq 1$, je-li emisivita rovna 1, pak hovoříme o absolutně černém tělese nebo dokonalém zářiči.

Kromě vyzařování může předmět také pohlcovat záření z jiného tepelného zdroje, které má teplotu T_0 , platí:

$$P_a = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T_0^4 \quad (\text{W}). \quad (2.6)$$

V reálných situacích často nastává obojí: předmět o teplotě T vyzařuje energii do svého okolí a současně energii z okolí přijímá z jiného předmětu o teplotě T_0 . Celkový výkon P odevzdaný tepelným zářením je pak dán vztahem:

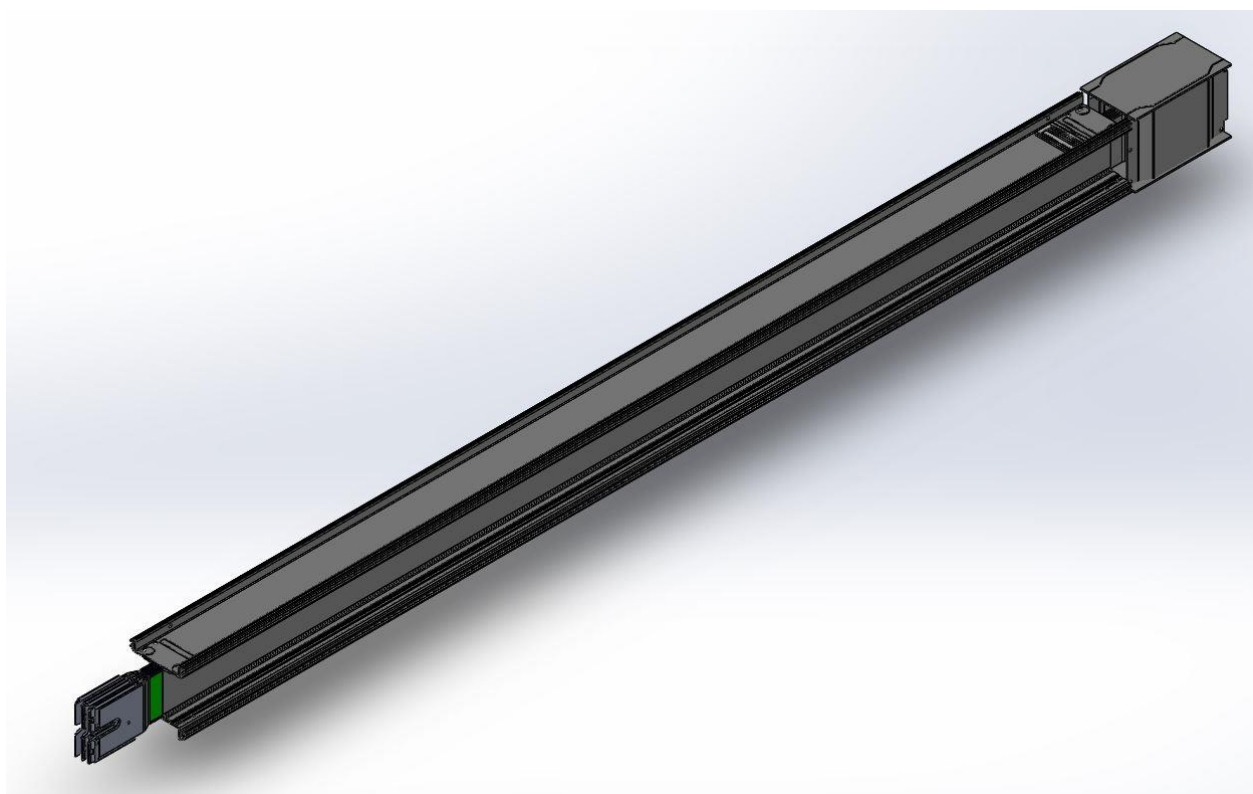
$$P = P_r - P_a = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S (T^4 - T_0^4) \quad (\text{W}). \quad (2.5)$$

..

3 PŘÍPOJNICE LI1600A

Přípojnice LI1600A patří do přípojnicového systému LI konstruovaného firmou Siemens Busbar Trunking Systém. Tento systém přípojníc slouží k přenosu elektrické energie na dlouhých trasách v průmyslových objektech.

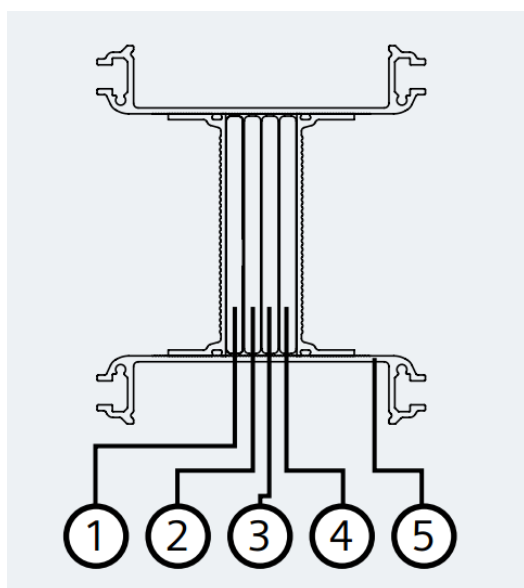
Výhodou tohoto systému je především kompatibilita, velice snadné připojení rozvaděčů v místě potřeby. Měřicí trasy lze doplnit měřicími a spínacími přístroji, se kterými je možné komunikovat pomocí sběrnice. Dále se přípojnice LI vyznačují vysokou zkratovou odolností a zaručují vysokou bezpečnost při poruchách. Díky použitému materiálu (Al) na provedení vodičů a pouzdra je předpoklad malá hmotnost a velmi dobrá mechanická pevnost. Hospodárnost rozvodu jde ruku v ruce s vysokou provozní spolehlivostí. Promyšlená kompaktní sendvičová konstrukce systému LI zaručuje velmi malé napěťové úbytky. Systém je možné provozovat při plném zatížení až do teploty okolí 40 °C. Dalším důležitým parametrem je systém propojení dílů pomocí háku a svorníku. Ten zaručuje spolehlivé spojení s minimálním přechodovým odporem.



Obr. 3-1 Přípojnice LI1600A

Parametry přípojnice LI1600A

Jmenovitý proud I_n (A)	1600
Jmenovité provozní napětí U_e (V)	690 AC
Jmenovité izolační napětí U_i (V)	1000 AC
Stupeň krytí	IP55
Provozní teplota okolí (°C)	-5 až 40
Materiál vodičů	Al
Materiál krytí	Al
Izolace	Mylar
Frekvence (Hz)	50/60
Krátkodobá zkratová odolnost (1s)(kA)	65
Odolnost proti špičkovému zkratu (kA)	143



Výška (mm)	182
Šířka (mm)	155
Konfigurace vodičů	PEN-L1-L2-L3

PEN	-	1
L1	-	2
L2	-	3
L3	-	4
PE _{plášť}	-	5

Obr. 3-2 Průřez přípojnicí LI1600A

Obr. 4-1 Schéma absorpčního cyklu [2]

Na vypuzení absorbátu se roztok z absorbéru přečerpá do generátoru, kde se mu dodá potřebné teplo k jeho vypaření. Z generátoru proudí chladivo do kondenzátoru a odtud zpět do výparníku. Roztok absorbentu ochuzený o chladivo se po ochlazení vrátí do absorbéru. Na desorpci je třeba přivést tepelný tok s relativně vysokou teplotní úrovní, tedy kolem 90 °C.

Při zanedbání příkonu čerpadla na dopravu bohatého roztoku absorbentu a chladiva do generátoru můžeme základní energetickou bilanci jednostupňového absorpčního oběhu napsat ve tvaru [4] :

$$Q_0 + Q_d = Q_{ab} + Q_k \quad (4.1)$$

kde Q_0 chladičí výkon
 Q_d tepelný příkon potřebný k desorpci
 Q_{ab} tepelný výkon absorbéru
 Q_k tepelný výkon kondenzátoru

Energetická efektivnost (COP) absorpčního systému je potom dána jeho výkonovým číslem, které se určí z poměru chladičího výkonu a tepelného příkonu potřebného k desorpci.

Výhody absorpčního chlazení

- nízké náklady na údržbu a obsluhu
- absorpční chladiče používají jako hlavní zdroj energie – teplou vodu, páru, spaliny výfukových plynů, odpadní plyn, nebo odpadní teplo
- snadná regulace
- vysoká životnost
- spolehlivý a čistý provoz
- splňuje všechny požadavky na ochranu životního prostředí
- provoz je téměř bezhlučný a bez vibrací
- oproti kompresorovému chlazení o 10 až 15 % nižší spotřeba elektrické energie
- pro instalaci stačí jednofázový elektrický rozvod

Nevýhody absorpčního chlazení

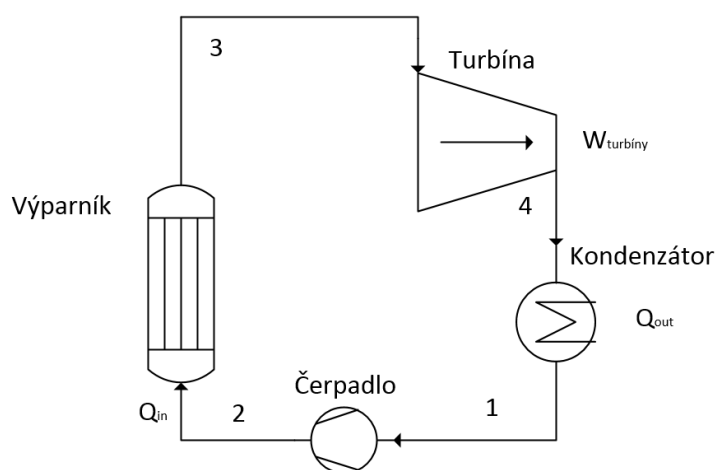
- oproti jiným systémům vyšší pořizovací náklady
- větší rozměry
- vyšší hmotnost oproti kompresorovým systémům

4.2 Organický Rankinův cyklus (ORC)

Organický Rankinův cyklus (dále ORC) pracuje na stejném termodynamickém principu jako parní turbíny, které mají podobný tepelný cyklus, ale liší se v použití teplotně nosného média – to se odpařuje při nižších teplotách, 80 °C až 300 °C. V tomto cyklu používáme jako medium organické sloučeniny, nejčastěji silikonový olej, který má vhodné termodynamické vlastnosti pro použití v ORC.

ORC umožňuje kogeneraci nízkopotenciálního tepla, což nám umožňuje použít jiné pracovní medium, než vodu, které má lepší vlastnosti, zejména nižší bod varu.

Pracovní části ORC



Obr. 4-2 Pracovní části ORC

- 1 – nízkotlaká kapalina
- 2 – vysokotlaká kapalina
- 3 – vysokotlaký plyn
- 4 – nízkotlaký plyn

Hlavní pracovní části ORC

Pracovní látka

Jak již bylo výše zmíněno, pracovní látka je charakteristickým znakem ORC. Konkrétní druh pracovní látky používaný pro ORC je volen s ohledem na technické požadavky.

Výparník

Ve výparníku se kapalná pracovní látka vlivem dodávané tepelné energie mění na plynné skupenství, páru.

Turbína

Do turbíny je přiváděna pára z výparníku. Horká pára se zde rozpíná, vykonává práci a turbínu roztáčí. Mechanická práce turbíny je pak přes generátor převáděna na elektrickou energii.

Kondenzátor

V kondenzátoru je ze soustavy odváděno teplo. Pracovní látka opouští stav syté páry a mění se přes mokrou páru na sytou kapalinu. Teplo může být likvidováno, nebo využito k dalším účelům, s ohledem na technické požadavky.

Čerpadlo

Po kondenzaci je kapalina za pomoci čerpadla dopravena do výparníku [5].

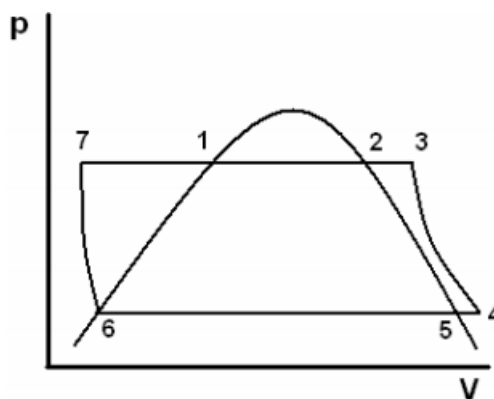
Přídavné pracovní části ORC

Rekuperátor

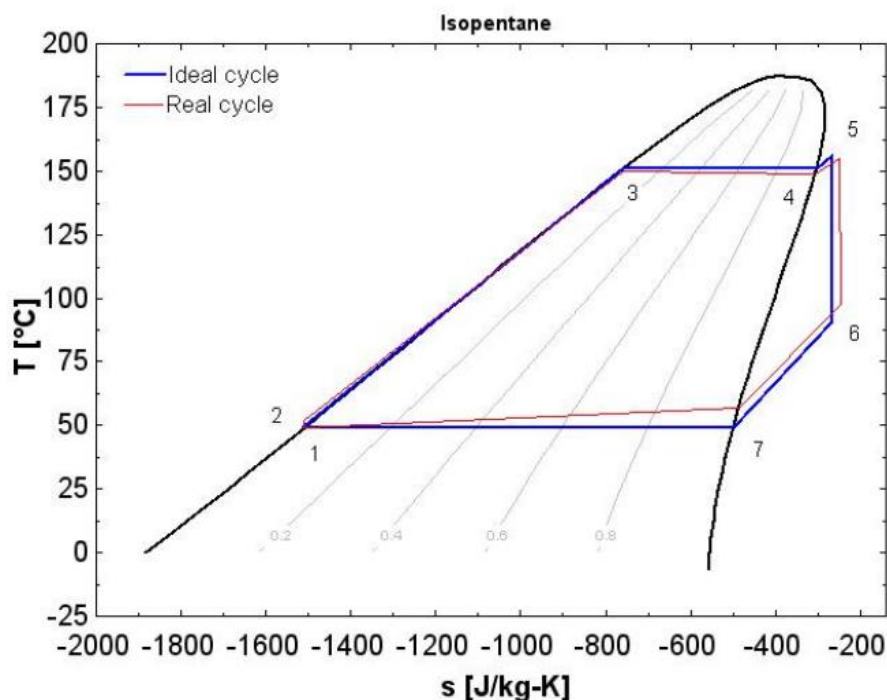
Pokud systém ORC využíváme u vysokoteplotního odpadního tepla, je možné využít rekuperátor, který nám z přebytků tepelné energie přehřívá pracovní látku v oběhu. Tímto zařízením lze zvýšit účinnost celého oběhu.

Princip Organického Rankinova cyklu

Počet termodynamických dějů v ORC určuje složitost systému. Do systému lze zapojit regenerátory (rekuperátory), přehříváky, které používáme mezi jednotlivými stupni turbíny. Díky těmto součástem je systém schopen udržet páru mimo sytý stav, aby nedocházelo k poškození lopatek turbíny kapkami a také zvyšují termickou účinnost cyklu.



Obr. 4-3 p-V diagram ORC



Obr. 4-4 T-S diagram ORC cyklu pro reálný (isopentan) a ideální oběh [15]

Děj 1-2:

V bodě 1 je pracovní látka ve stavu syté kapaliny. V parním generátoru je jí dodáváno teplo a začíná se odpařovat. Přechází do stavu mokré páry a její vlhkost postupně klesá, až dosáhne stavu syté páry v bodě 2. Tento děj probíhá za konstantní teploty i tlaku, je tedy izotermicko-izobarický.

Děj 2-3:

Mezi body 2 a 3 se pracovní látce stále dodává teplo. Její teplota se zvyšuje za stálého tlaku (izobarický děj) a látka se dostává do stavu přehřáté páry.

Děj 3-4:

Pracovní látka se dostává do turbíny a prochází adiabatickou expanzí. Kolo turbíny se roztáčí a její výstupní práce se přes generátor přeměňuje na elektrickou energii.

Děj 4-5:

Po opuštění turbíny prochází pracovní látka regenerátorem, kde se využívá její zbytková tepelná energie. Ta je dodávána přes tepelný výměník ochlazené pracovní látce v kapalném stavu po průchodu kondenzátorem a čerpadlem. Děj probíhá za stálého tlaku, je tedy izobarický. Pracovní látka přechází ze stavu přehřátého vzduchu na sytou páru.

Děj 5-6:

Pracovní látka vstupuje do kondenzátoru. Zde probíhá izobarický a izotermický odběr tepla. Vlhkost roste a látka přechází přes oblast mokré páry až do bodu 6, kde se stává sytou kapalinou

Děj 6-7:

Pracovní látka prochází čerpadlem, výrazně roste její tlak, její entropie se nemění. Probíhající děj se nazývá adiabatická komprese.

Děj 7-1:

Kapalná pracovní látka je po kompresi ohřívána nejdříve za pomoci regenerátoru. Poté vstupuje do parního generátoru, kde se dále ohřívá, až dostane na křivku syté kapaliny v bodě 1.

Výhody ORC

- lze využívat nízkopotenciální zdroje tepla
- k dosažení dobré účinnosti nejsou třeba přehříváky
- vyšší životnost, která plyne z nižších teplot, tlaků, namáhání
- jedno stupňová konstrukce turbíny
- pracovní látka nezpůsobuje korozi zařízení
- vyšší účinnost oproti parní turbíně
- minimální nároky na prostory

Nevýhody ORC

- některé pracovní látky jsou jedovaté a hořlavé, mohou způsobit ekologickou havarii
- organická látka degeneruje
- vyšší hmotnostní průtok, tedy větší namáhání čerpadla
- je třeba přídavný olejový systém
- systém musí být perfektně těsný

4.3 Kalinův cyklus

Kalinův cyklus je nejvhodnější pro zdroje s teplotním rozmezím mezi 100 °C-200 °C. Tento cyklus je vhodný pro využití odpadních teplot, např. z geotermálních zdrojů.

Kalinův cyklus funguje stejně jako organický Rankinův cyklus na principu Rankin-Clausiova cyklu, avšak jako pracovní medium využívá směs vody, amoniaku a koncentrace není ve všech částech cyklu stejná, ale mění se.

Pracovní části Kalinova cyklu

Kalinův cyklus obsahuje stejně jako ORC parní generátor, regenerátor, turbínu, čerpadlo a kondenzátor (viz kapitola 4.2). Jak bylo řečeno, pracuje na jiném typu pracovního media.

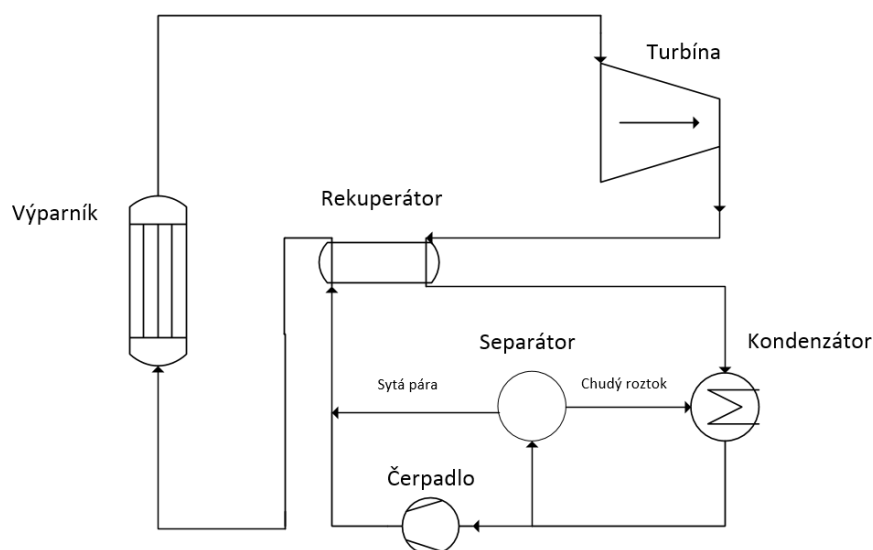
Pracovní medium

Využitím jiné koncentrace látky v určitých částech oběhu dosahujeme lepších vlastností pro děj. Při nízkém tlaku nám kapalina kondenzuje a má malý obsah amoniaku (45 %), při odpařování a expanzi v turbíně už má látka obsah amoniaku větší (70 %). Koncentrace látky má vliv na teplotu, odpařování může probíhat při nižších teplotách a vyšší koncentraci amoniaku v pracovní látce a kondenzace při vyšších teplotách a menší koncentraci amoniaku.

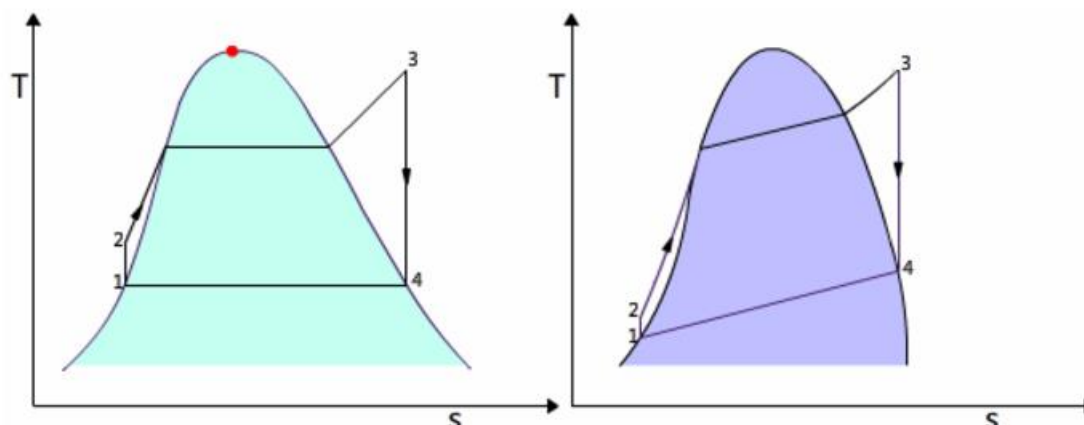
Separátor

Separátor je zařízení, které nám slouží k rozdělení pracovních látek do dvou odvětví o různé koncentraci amoniaku ve vodě.

Princip Kalinova cyklu

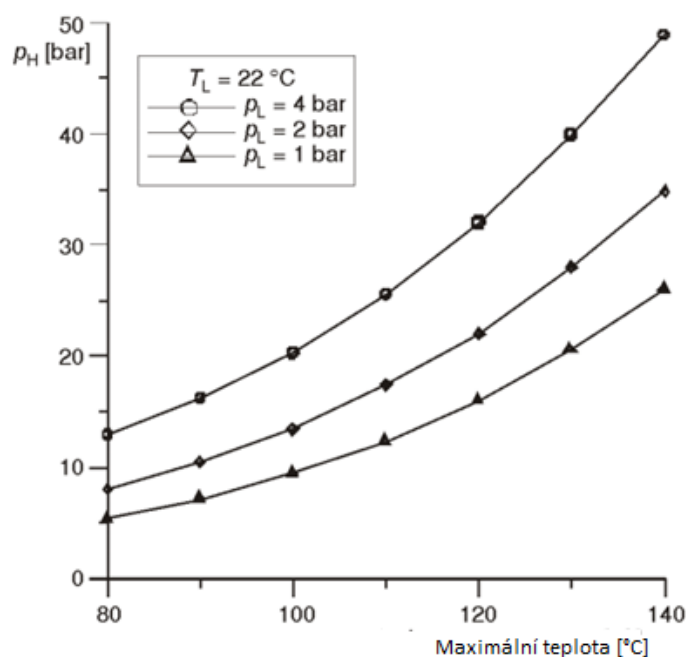


Obr. 4-5 Kalinův cyklus

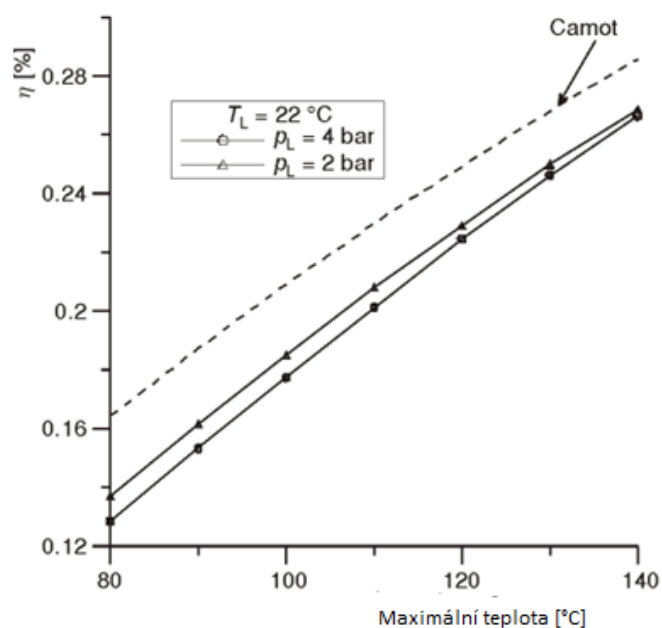


Obr. 4-6 Rozdíl mezi Rankinovým (vlevo) a Kalinovým cyklem, (vpravo) [7]

Kalinův cyklus začíná v absorbéru, při nízkém tlaku, poté se zvyšuje tlak kapaliny čerpadlem. Dále je kapalina předehřátá v nízkotlakém a vysokotlakém rekuperátoru, dříve než se dostane do výparníku. Ve výparníku je kapalina zahřátá a dojde k částečnému vypaření, poté kapalina s párou putují do separátoru, kde se separují na výpary a kapalinu. Vysokotlaká nasycená pára poté koná práci v turbíně, expanduje a snižuje svoji teplotu. Kapalina ze separátoru odevzdá teplo ve vysokoteplotním výměníku a přes škrťací ventil snižuje tlak. V posledním kroku je pára a kapalina přivedena do absorbéru, kde se smísí a pára zkondenzuje.



Obr. 4-7 Závislost vysokotlaké části na maximální teplotě při konstantní nízkotlaké části a minimální teplotě 22°C [8]



Obr. 4-8 Závislost účinnosti na maximální teplotě při konstantní nízkotlaké části a minimální teplotě 22°C [8]

Výhody Kalinova cyklu

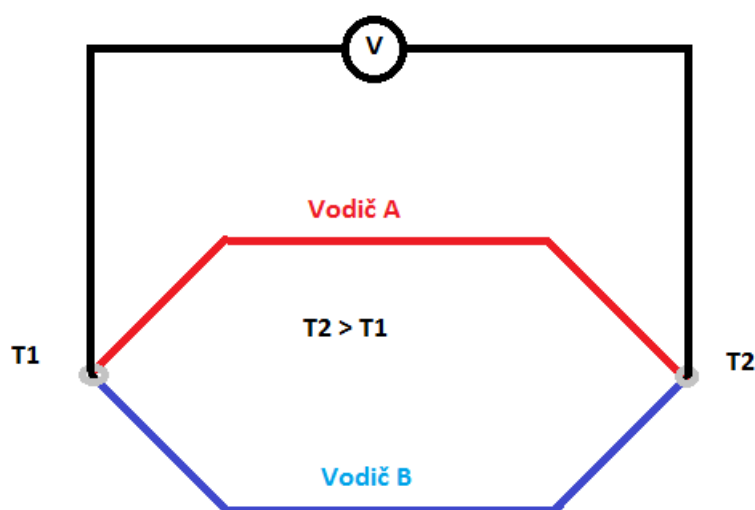
- dosahuje vyšších účinností pro určité teploty než ORC
- amoniak nemá potenciální globální oteplování
- velký rozsah vypařování a kondenzace díky nastavitelné koncentraci amoniaku

Nevýhody Kalinova cyklu

- drahá technologie na koncentraci správného množství amoniaku do vody
- amoniak je toxický
- použité materiály musí být odolné vůči velkým tlakům
- vysokotlaká turbína musí mít vysoké otáčky kvůli vhodným adiabatickým účinnostem

4.4 Termoelektrický generátor (TEG)

Mají-li dva spoje dvou kovů, které tvoří termočlánek, rozdílnou teplotu, jsou i kontaktní napětí obou rozhraní různá. Proto výsledné napětí měřené mezi těmito rozhraními je nenulové a termočlánek lze využít jako zdroj elektrického napětí. Obvodem prochází elektrický proud a nastává tzv. Seebeckův jev [9].



Obr. 4-9 Seebeckův jev

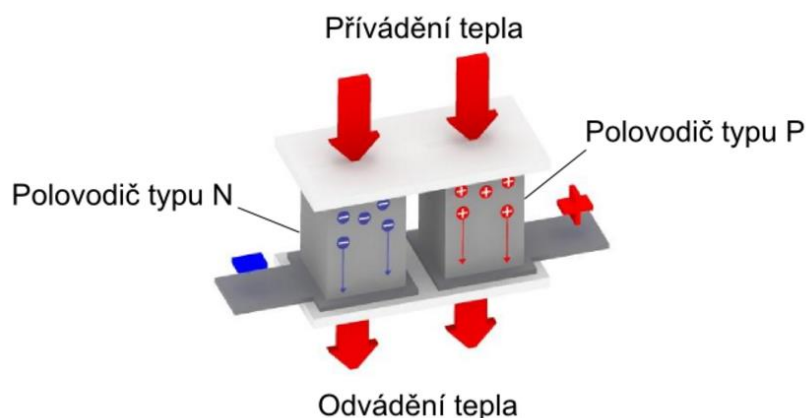
V neuzavřeném obvodu lze mezi oběma spoji dvou kovů naměřit termoelektrické napětí U , které je dáno rozdílem kontaktních napětí vznikajících na obou spojkách daných kovů [9].

S_A a S_B jsou *Seebeckovy koeficienty* kovů A a B , T_1 a T_2 jsou teploty spojů. Seebeckovy koeficienty jsou nelineární a závisí na teplotě vodičů, použitém materiálu a jeho molekulární struktuře. Pokud jsou Seebeckovy koeficienty v daném rozsahu teplot přibližně konstantní, může být výše uvedená rovnice linearizována :

$$U = (S_A - S_B) \cdot (T_2 - T_1) \text{ (V)}. \quad (4.2)$$

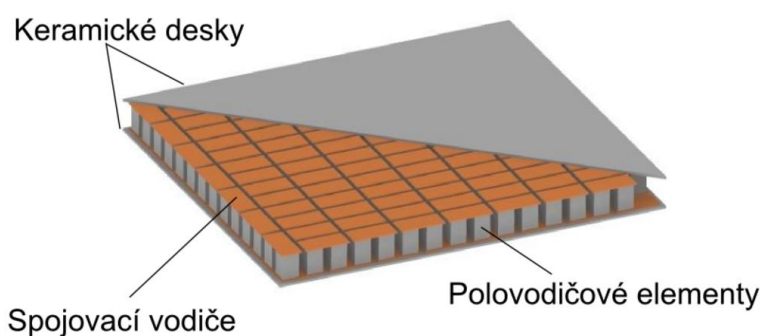
Princip výroby termoelektrické energie

Termoelektrická zařízení jsou dvojice tvořené P-N přechodem. Princip funkce je založen na přechodu tepla mezi P-N přechodem, díky tomu dochází v polovodiči k přerozdělení majoritních nosičů náboje. V polovodiči typu N dochází k pohybu elektronů a v polovodiči typu P k pohybu kladných děr, poté se tyto náboje koncentrují na chladnějším konci polovodiče a dochází k rozdílu potenciálů. Uzavřením obvodu dojde k pohybu elektronů přes P-N přechod a k průtoku elektrického proudu.



Obr. 4-10 Termoelektrická dvojice [10]

Abychom dosáhli vyšších napětí, jsou dvojice spojovány elektricky do série, tedy z hlediska přestupu tepla paralelně a tvoří termoelektrický modul (Obr. 4-11).



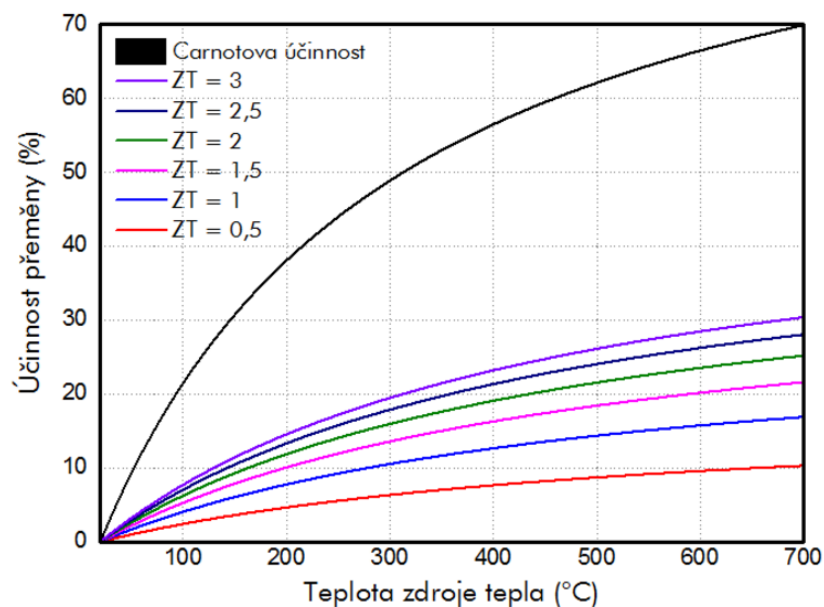
Obr. 4-11 Termoelektrický modul [10]

Moduly nemohou pracovat samostatně. Přívod a odvod tepla zajišťují výměníky. V závislosti na typu aplikace může být zdrojem tepla pevná látka, kapalina nebo plyn, dominantní složkou přenosu je tepla kondukce, konvekce nebo radiace. Průchodem tepla skrze termoelektrický modul je generováno napětí a po připojení na zátěž elektrický výkon. Vzhledem k účinnosti termoelektrické přeměny prochází větší část tepla skrze modul bez užitku. Termoelektrický systém se proto často používá v tzv. parazitní konfiguraci jako tepelný výměník/generátor. Část absorbovaného tepla se přemění na elektrickou energii a zbylá část, vyjma tepla uvolněného do okolí, je použita na předehřev. Relativně nízká účinnost termoelektrické přeměny není již tak významná. Můžeme produkovat teplo i elektřinu současně, s malým vlivem nebo zcela bez vlivu na výslednou účinnost systému. Použití je výhodou zejména v nízkovýkonových aplikacích, ve kterých není k dispozici zdroj elektrické energie nebo je dodávka elektřiny nestabilní [11],[12].

Účinnost přeměny

Termoelektrická účinnost je definována použitým materiálem, k tomu se využívá bezrozměrný koeficient ZT , který nám definuje vlastnosti použitého materiálu a vliv pracovních teplot.

Běžné termoelektrické materiály mají přibližně koeficient $ZT \leq 1$, nízkoteplotní aplikace dosahují účinnosti maximálně 5%, u složitějších modulů můžeme dosáhnout účinnosti až 10%.



Obr. 4-12 Porovnání termoelektrické účinnosti a teoretické maximální účinnosti [10]

Výhody termoelektrických článků

- velmi malá plocha využití
- spolehlivost zařízení
- rychlost odezvy

Nevýhody termoelektrických článků

- nedosahují velkých účinností

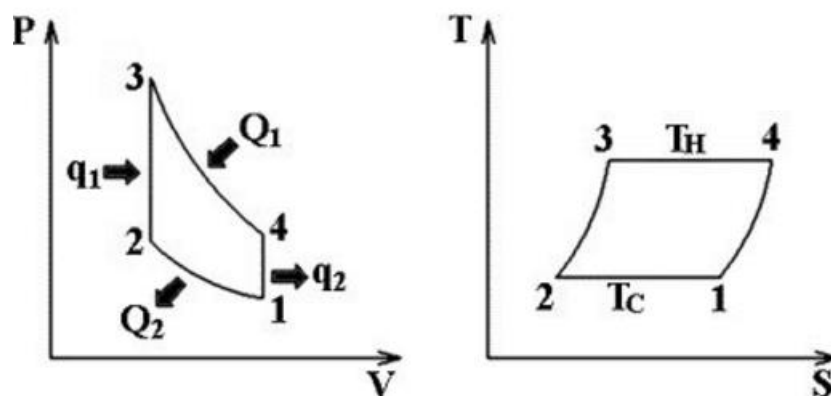
4.5 Stirlingův motor

Stirlingův cyklus lze použít jako tepelný motor, dále ale také můžeme tento cyklus využít jako nepřímý, tedy při dodávce mechanické práce může ochlazovat různé látky a nebo získávat tepelnou energii o vyšší teplotě. Můžeme ho tedy použít jako chladicí zařízení nebo tepelné čerpadlo.

Tento cyklus je zcela uzavřený a jako pracovní medium obvykle využívá plynnou látku. Teplo do tohoto cyklu dodáváme přes vnější výměníky, což nám umožňuje využít jakýkoliv vnější zdroj tepelné energie a můžeme ho zařadit do oběhu s vnějším příívodem tepla.

Stroje v využitím Stirlingova cyklu dosahují vysoké efektivity (15 až 35 %), ideální Stirlingův cyklus má stejnou efektivitu jako Carnotův cyklus.

Princip Stirlingova cyklu



Obr. 4-13 p-V a T-S diagram ideálního Stirlingova cyklu [14]

Izotermická expanze (1-2) - probíhá při konstantní teplotě. Expanzní prostor a připojený výměník tepla (ohřívač) je udržován na konstantní vysoké teplotě. V pracovním plynu probíhá téměř izotermická expanze a plyn přijímá teplo z tepelného zdroje.

Izochorický ohřev (2-3) - probíhá při konstantním objemu. Pracovní plyn protéká přes regenerátor z chladného prostoru do teplého. V regenerátoru je plyn ohříván a odebírá teplo z jeho hmoty. Toto teplo tam bylo odevzdáno v předcházejícím cyklu chlazení.

Izotermická komprese (3-4) - probíhá při konstantní teplotě. Kompresní prostor a výměník tepla (chladič) je udržován na konstantní nízké teplotě. V pracovním plynu probíhá téměř izotermická komprese a plyn odevzdává teplo do chladicího media.

Izochorické chlazení (4-1) - probíhá při konstantním objemu. Pracovní plyn protéká přes regenerátor z teplého prostoru do studeného. V regenerátoru je plyn ochlazován a odevzdává teplo do jeho hmoty. Toto teplo bude využito v dalším cyklu ohřevu.

Pracovní části Stirlingova cyklu

Ohříváč

V malých, málo výkonných motorech, může být ohříváč jednoduše zastoupen stěnou teplého prostoru. Stroje s větším výkonem vyžadují velkou plochu výměníků pro zajištění dostatečného přenosu tepla do pracovního plynu. Obvykle se používají vnitřní a vnější žebra, nebo mnoho malých trubic.

Návrh tepelného výměníku Stirlingova stroje vyžaduje nalezení kompromisu mezi velkou plochou pro zajištění vysokého tepelného přenosu s malými tlakovými ztrátami a malým mrtvým prostorem (vnitřní prostor nevyužitý pro zdvih pístů). Ve strojích pracujících při vysokých výkonech a tlacích, musí být tepelný výměník vyroben z materiálu, který dostatečně odolává mechanickému napětí, teplotě, korozi a deformaci.

Regenerátor

Regenerátor ve Stirlingově motoru je vnitřní tepelný výměník a dočasný zásobník tepla umístěný mezi teplým a studeným prostorem tak, že pracovní plyn přes něj prochází střídavě v jednom a druhém směru. Jeho funkcí je uchování toho tepla v systému, které by jinak bylo vyměněno s okolím na teplotě mezi maximální a minimální teplotou oběhu.

Hlavní dopad regenerátoru ve Stirlingově stroji je zvětšení tepelné účinnosti 'recyklací' vnitřního tepla, které by jinak prošlo přes stroj nevratně. Dalším efektem zvýšené účinnosti je zvýšení výkonu motoru při stejné konstrukci chladiče a ohříváče, která nejčastěji omezuje průchod tepla strojem.

Přeháněč

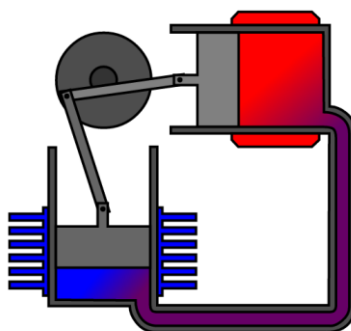
V Beta konfiguraci Stirlingova stroje je použit speciální píst, zvaný přeháněč, který přesunuje pracovní plyn z teplého prostoru do studeného a naopak. V závislosti na konfiguraci stroje může být přeháněč umístěn ve stejném válci jako pracovní píst, nebo může mít vlastní válec. Přeháněč může být ve válci s vůlí a umožňovat tak pracovnímu plynu proudit kolem sebe, nebo může být utěsněn a přesunovat plyn přes výměníky a regenerátor [13].

Konfigurace Stirlingova stroje

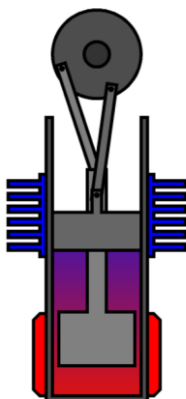
Existují čtyři hlavní typy Stirlingových strojů, liší se způsobem, kterým přesunují pracovní plyn mezi teplou a studenou stranou stroje :

- S dvěma pracovními písty je znám jako alfa konfigurace. Má teplý a studený válec, každý se svým pístem. Pracovní plyn je přesunován z teplého válce do studeného a naopak.
- S přeháněčem je znám jako beta konfigurace. Používá oddělený mechanický přeháněč pro přesunování pracovního plynu z teplého prostoru do studeného a naopak. Přeháněč musí být dostatečně velký, aby zajistil účinnou izolaci teplého a studeného prostoru a přesunul dostatek pracovního plynu.
- Gama modifikace Stirlingova motoru je v principu stejná jako Beta s tím rozdílem, že pracovní válec je umístěn ve svém vlastním válci. Plyn může volně procházet mezi oběma válci. Tato modifikace má menší kompresní poměr, ale je mechanicky jednodušší. Často se používá při víceválcovém provedení stroje.

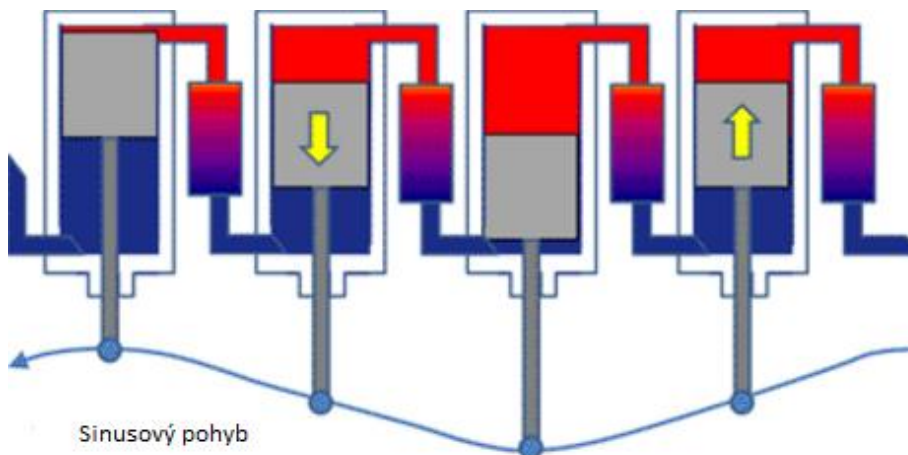
- Dvojčinná alfa konfigurace je provedená tak, že prostor nad pístem jednoho válce je propojen skrz regenerátor s prostorem pod pístem vedlejšího válce (Obr.4.-16). Každý píst zde pracuje dvojčinně. Toto uspořádání bývá označováno jako Riniovo a je velmi vhodné obzvláště pro tři až šest válců seřazených do kruhu s řídicím mechanismem šikmé desky. Řadový víceválcový motor není vhodný, neboť je potřeba dlouhý kanál pro vedení plynu mezi krajními válci [12].



Obr. 4-14 Stirlingův motor – konfigurace Alfa [13]



Obr. 4-15 Stirlingův motor – konfigurace Beta [13]



Obr. 4-16 Stirlingův motor – konfigurace dvojčinná alfa [15]

Výhody Stirlingova cyklu

- možnost použít jakékoliv zdroj tepelné energie
- minimální poruchovost
- tichý běh
- minimální znečišťování prostředí
- vysoká životnost
- minimum pohyblivých částí

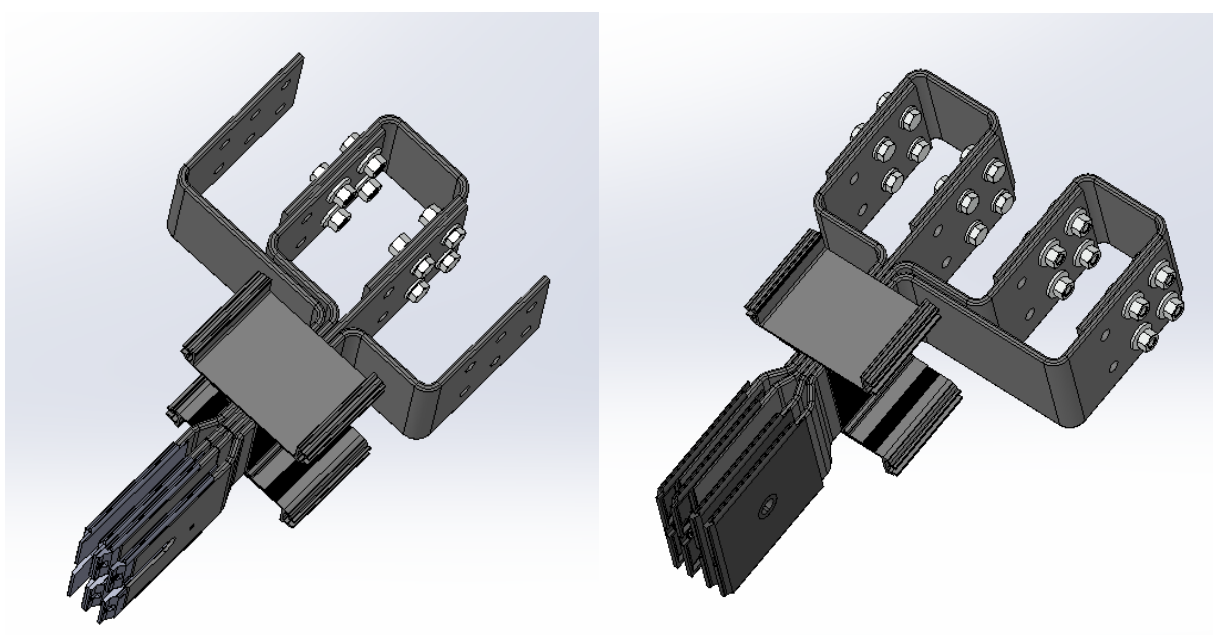
Nevýhody Stirlingova motoru

- vysoká pracovní teplota ohříváku
- vysoký tlak plynu
- těsnění motoru musí být dokonalé
- obtížná regulace výkonu
- momentálně vysoké výrobní náklady

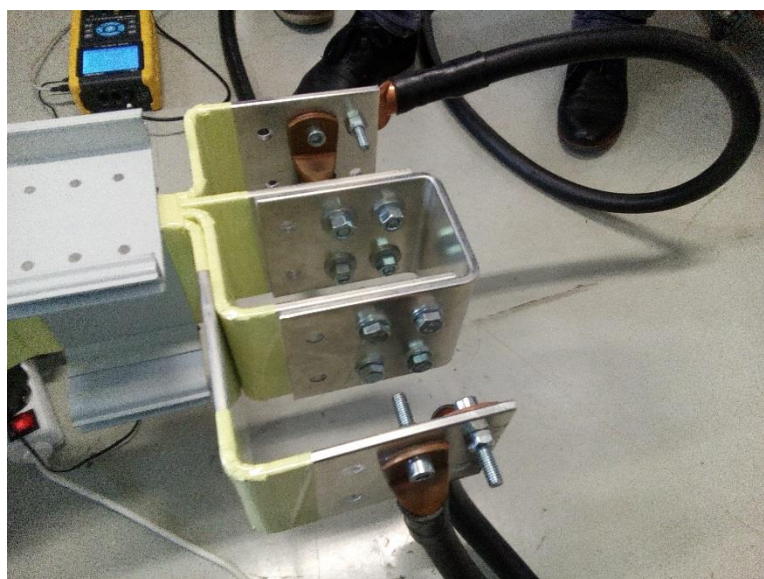
5 ZKOUŠKA OTEPLENÍ PŘÍPOJNICE LI1600A

5.1 Příprava přípojnice LI1600A

Pro připojení 3 m dlouhé přípojnice LI1600A k jednofázovému zdroji konstantního proudu bylo zhotoveno sériové propojení vodičů přípojnice (Obr. 5-1) firmou Siemens Busbar Trunking Systems. Propojení jednofázového vedení bylo zhotoveno pomocí měděných kabelových vodičů s připojovacími oky (Obr. 5-3). Propojení vodičů přípojnice bylo zhotoveno z elektrovedného hliníku.



Obr. 5-1 Model sériového propojení vodičů



Obr. 5-3 Reálné připojení sériového připojení vodičů

Na jedné straně přípojnice byly umístěny tři termočlánky pro měření oteplení krytu přípojnice. Termočlánky byly přichyceny pomocí teplovodného cementu pro dosažení co nejmenší chyby měření. Pro měření silových vodičů uvnitř přípojnice byly do krytu přípojnice navrtány otvory, do kterých byly umístěny termočlánky (Obr. 5-4). **Více fotografií v příloze.**



Obr. 5-4 Připevněné termočlánky na vodičích přípojnici LI1600A

5.2 Postup a výsledky zkoušky oteplení přípojnice LI1600A

Na hliníkovou konstrukci propojení vodičů přípojnice byl pomocí měděných kabelových vodičů přiveden konstantní střídavý proud 1613 A ze zdroje proudu, který byl měřen pomocí klešťového ampérmetru Fluke 381. Napětí na přípojnici činilo 2,2 V a napěťová ztráta na přípojných kabelech 0,5 V. Zdánlivý výkon dodávaný do přípojnice byl 3548 W.

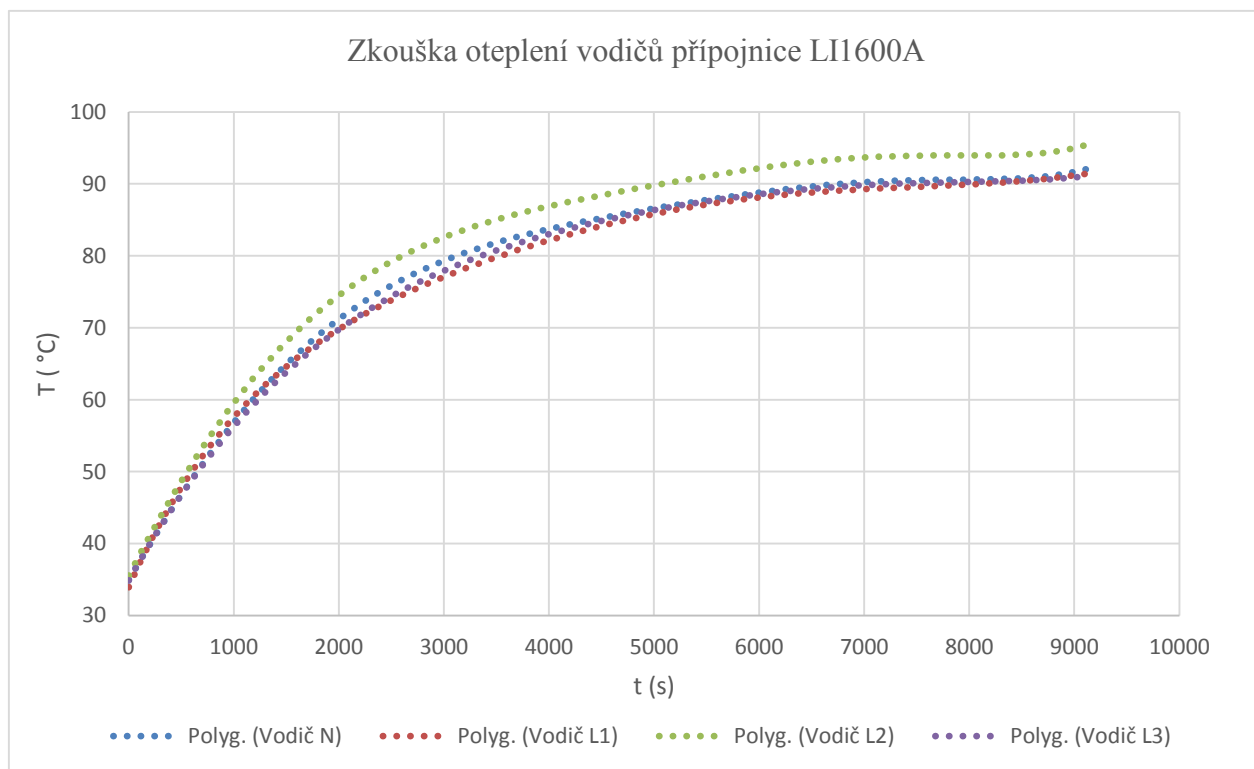
Oteplení přípojnice LI1600A bylo provedeno pomocí termočlánků a dále pomocí termokamery.

5.2.1 Výsledky měření pomocí termočlánků

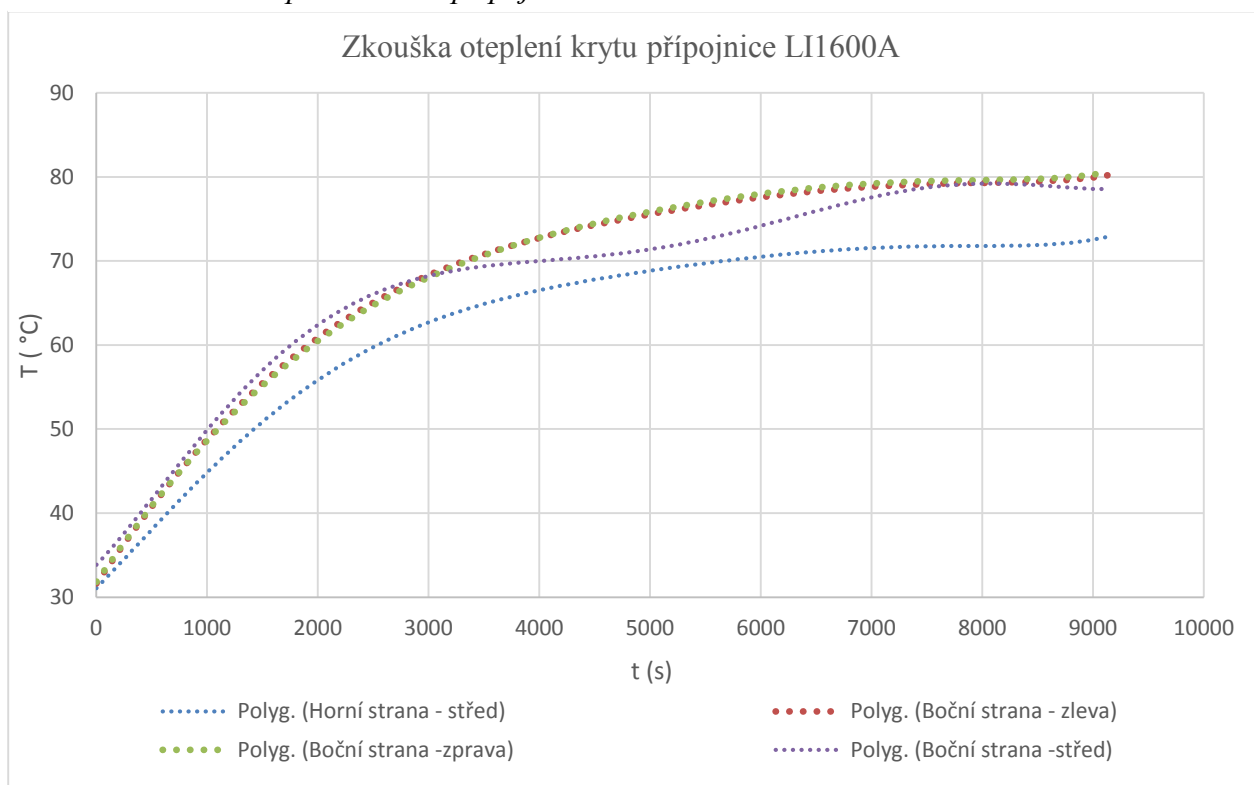
Pomocí termočlánků byla snímána teplota silových vodičů, tak teplota krytu přípojnice.

Teplota silových vodičů ve středu přípojnice se při průchodu proud 1600 A po dobu třech hodin ustálila na hodnotě 90,1 °C až 94,5 °C (viz. Obr. 5-5). Průměrná teplota byla tedy 91,6 °C.

Teplota horního krytu ve středu přípojnice se ustálila na 72,4 °C, teplota středu boční strany přípojnice se ustálila na 78,9 °C (viz. Obr. 5-6), průměrná teplota boční strany přípojnice byla 79,6 °C.



Obr. 5-5 Zkouška oteplení vodičů přípojnice LI1600A

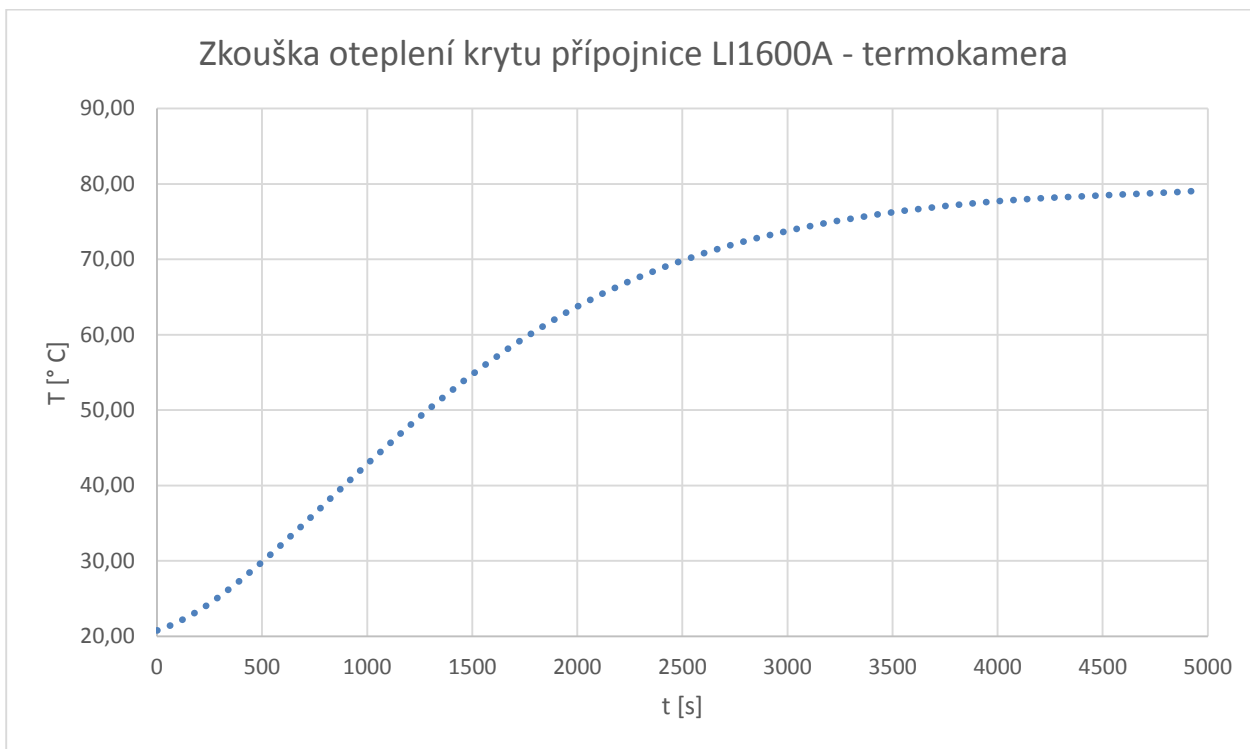


Obr. 5-6 Zkouška oteplení krytu přípojnice LI1600A

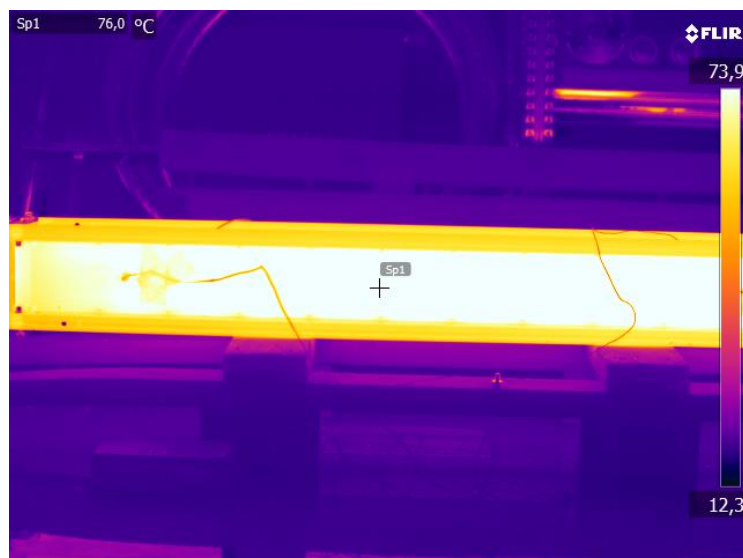
5.2.2 Výsledky měření pomocí termokamery

Pomocí termokamery, která byla umístěna 2 metry od přípojnice, byla snímána teplota středu boku krytu přípojnice. Emisivita snímaného krytu přípojnice byla 0,9599. Termokamera snímala výsledky měření sekvenčně po 8 vteřinách.

Hodnoty měření termokamerou byly snímány po stejnou dobu jako termočlánky. Maximální teplota středu krytu přípojnice dosáhla hodnoty 79,1 °C (viz. Obr. 5-7). Nejvyšší teplota krytu přípojnice byla zaznamenána ve středu (Obr. 5-8).



Obr. 5-7 Zkouška oteplení krytu přípojnice LI1600A - termokamera



Obr. 5-8 Snímek oteplení přípojnice LI1600A termokamerou

6 SOLIDWORKS

SolidWorks je v současné době nejúspěšnější strojírenský 3D CAD systém na českém trhu, což dokazuje také každoroční nárůst počtu prodaných licencí. Zároveň je SolidWorks jediný CAD systém na českém trhu, který je kompletně lokalizován přímo výrobcem, tedy společností Dassault Systèmes SolidWorks. Jako parametrický 3D modelář vám SolidWorks nabízí výkonné objemové i plošné modelování, vertikální nástroje pro plechové díly, svařence a formy, práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.

Uživatelské rozhraní SolidWorks je velmi intuitivní a nabízí pohotové pracovní postupy, rapidně snižuje nutné pohyby myši a umožňuje okamžitou, kontextově závislou interakci s uživatelem. Ovládání je založené na technologii SWIFT, která redukuje potřebu opakujeících se úkonů, manuálních zásahů i takových operací, kde si ani zkušený uživatel není dopředu jist postupem a často sahá po metodě pokus omyl. SWIFT dokáže ušetřit významné množství času a umožní se více věnovat samotnému procesu navrhování a ne ovládání systému [18].

Pomocí programu SolidWorks Flow Simulation, resp. v nastavbě Electronic cooling, která umožňuje simulovat vznik tepla průchodem elektrického proudu, byla provedena numerická simulace vodičů přípojnice na kryt přípojníc metodou konečných objemů. Tento modul umožňuje modelovat proudění a přestup tepla v modelu tak, aby bylo možno stanovit teplotu na povrchu přípojnice.

6.1 SolidWorks – nastavba Flow Simulation

Pro komplexní simulace dynamiky tekutin a sdílení tepla je určen integrovaný nástroj SolidWorks Flow Simulation. Jeho praktické nasazení se týká nejrůznějších oblastí, jako je například proudění plynů ve vzduchotechnice, kapalin v potrubí, analýza chlazení uzavřených prostorů či exponovaných součástí nebo externí aerodynamika[18].

Hlavní funkce Flow Simulation

- analýza sdílení tepla - vedením, prouděním a zářením
- analýza vnitřního a vnějšího proudění
- analýza rotačních oblastí (ventilátory, čerpadla,...)
- analýza přechodových dějů, tj. časově proměnné děje

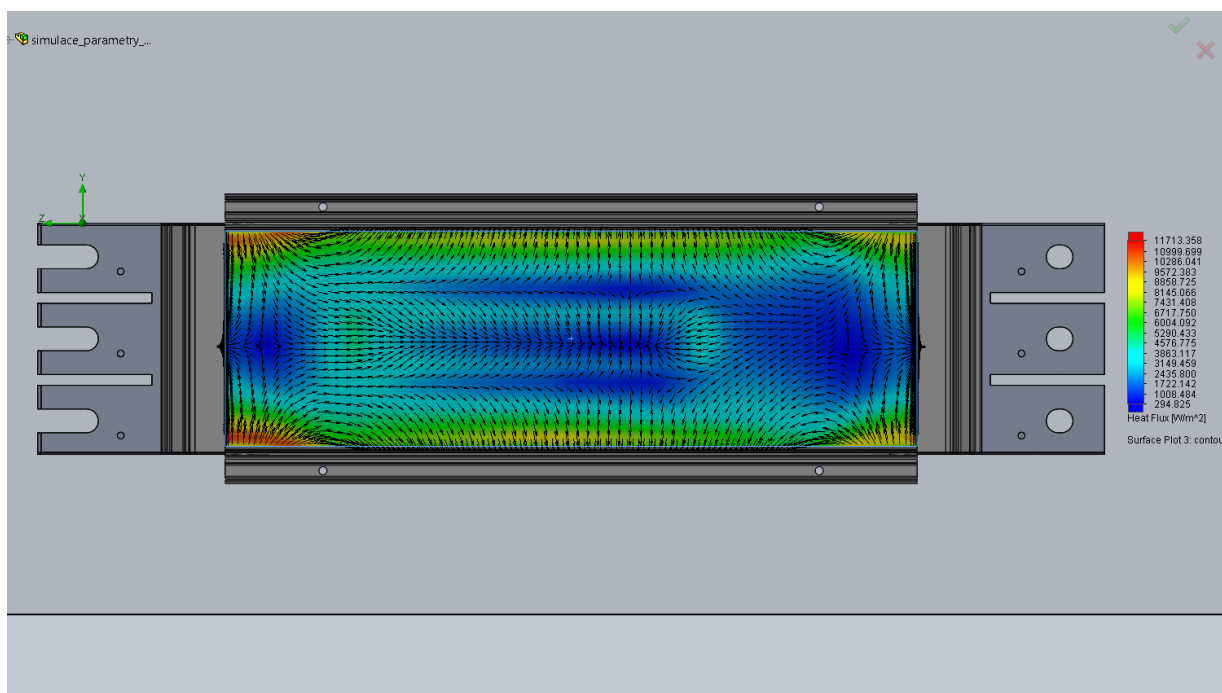
Další funkce Flow Simulation

- analýza vnějšího proudění kapalin a plynů kolem objemových těles (například obtékání vzduchu nad křídlem letadla nebo proudění vody kolem ponorky)
- analýza turbulentního proudění pomocí modelů K-epsilon pro výpočet turbulentního proudění (například proudění plynů z motorové trysky letadla)
- simulace skutečného plynu pro přesné řešení aplikací plynu o vysokém tlaku nebo nízké teplotě

- analýza stlačitelného proudění plynu v podzvukových, transsonických a nadzvukových rychlostech
 - výpočet poklesu tlaku v trubkách se započtením vlivu nerovnosti povrchu
 - optimalizace návrhu pomocí proudění na základě parametrů simulace proudění a rozměrových parametrů
 - analýza proudění nelineárních kapalin (krev, zubní pasta a roztavený plast)
-
- analýza vlhkosti pro výpočet relativní vlhkosti uvnitř uzavřených prostor pro aplikace kontroly klimatu
 - analýza kavitace a identifikaci oblastí, kde k ní dochází

Možnosti rozšíření Electronics Cooling

- průchod proudu materiálem - Joulovo teplo
- použití tepelných trubic
- výpočet tepelných parametrů tištěných spojů



Obr. 6-1 Příklad simulace proudění tepelného toku přípojnice

7 SIMULACE OTEPLENÍ PŘÍPOJNICE LI1600A

V odborné a vědecké praxi se v dnešní době čím dál více využívá analýz prvků pomocí simulací. Nejdůležitějším aspektem pro správnost a reálnost simulace je dobrá analýza pozorovaných jevů a simulace reálného prostředí pro analyzovaný objekt. Dále je si třeba uvědomit, že napodobenina reálného systému může být ve skutečnosti složitější. Postup pro vytvoření reálné simulace by měl obsahovat tyto čtyři základní kroky:

1. Návrh analyzovaného modelu
2. Uskutečnění simulace
3. Vyhodnocení získaných dat

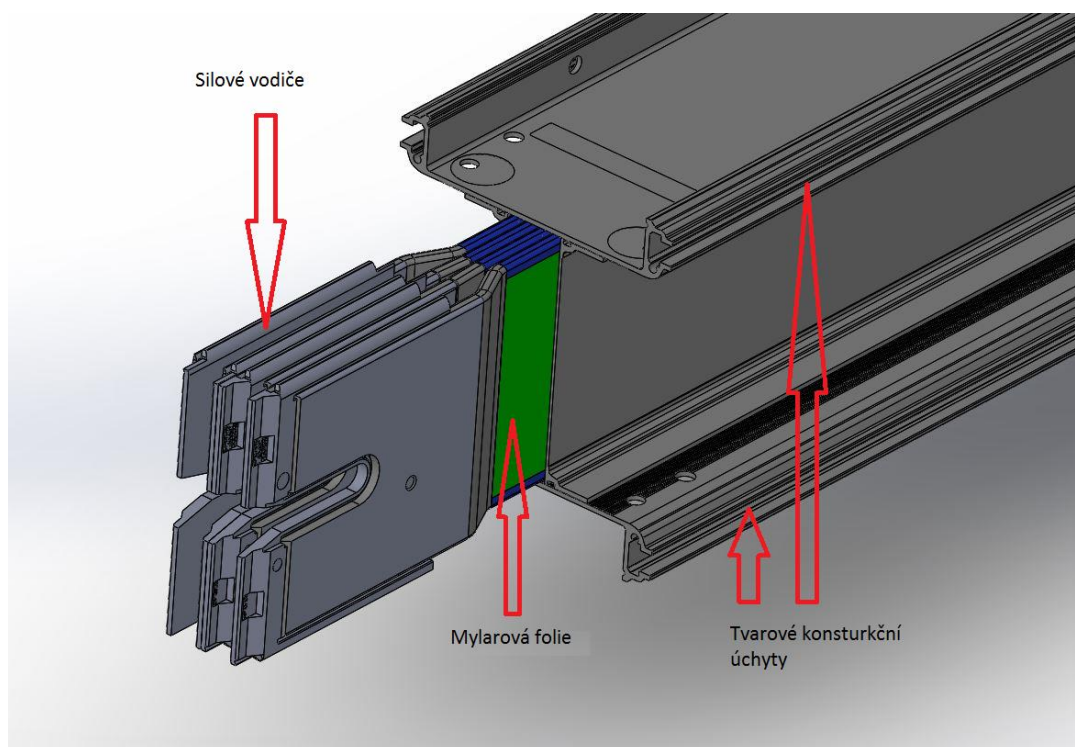
Prvním krokem při počítačovém modelování bývá sestavení matematického modelu zkoumaného systému. Model může být získán buďto teoreticky ze základních fyzikálních vlastností systému, nebo empiricky z naměřených hodnot. Určování parametrů teoreticky vytvořeného modelu z empirických hodnot se nazývá identifikace systémů.

Matematický model musí vhodně charakterizovat závislost výstupů systému na jeho vstupech. Modely fyzikálních soustav jsou obvykle sestaveny jako soustavy několika diferenciálních rovnic. V kybernetice nebo elektrotechnice jsou to obvykle obyčejné diferenciální rovnice, jiné obory pracují také s parciálními diferenciálními rovnicemi [17].

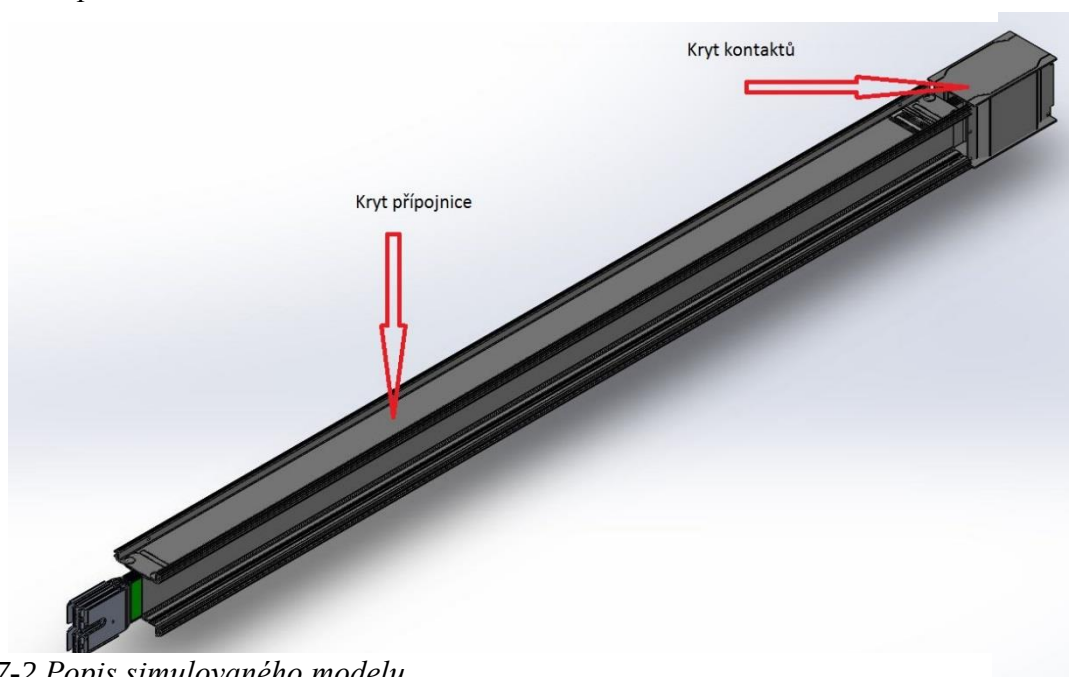
7.1 Popis simulované modelu

Pro analýzu je zvolena již zmíněná přípojnice LI1600A, na které byla provedena zkouška oteplení. Cílem je porovnání reálných změřených hodnot se simulací.

Přípojnice LI1600A se skládá z čtyř pásových vodičů z elektrovedného hliníku, hliníkového krytu přípojnice, který je tvarovaný pro úchyt konstrukčních komponentů jako jsou rozvaděče, a krytu kontaktů. Každý vodič je izolován pomocí mylarové folie (Obr. 7-1 , 7-2).



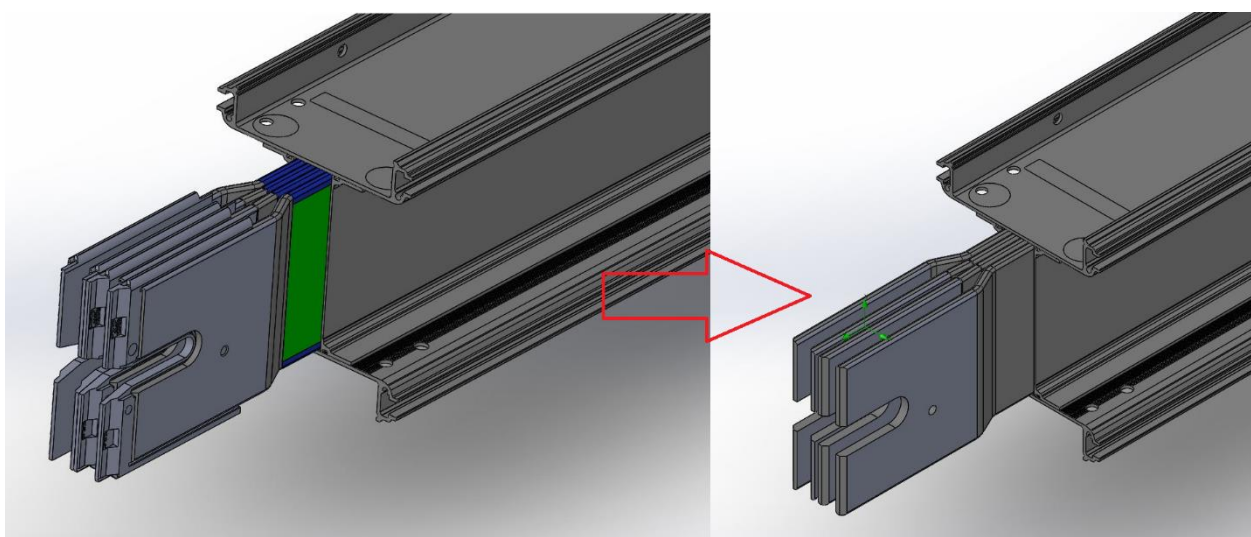
Obr. 7-1 Popis simulovaného modelu - detail



Obr. 7-2 Popis simulovaného modelu

7.2 Přípravy pro simulaci

Prvním krokem při přípravě výpočtu simulace je sestavení matematického modelu na základě analýzy geometrického modelu, který je poskytnut firmou Busbar Trunking Systems Siemens Mohelnice. Vytvořený model sloužící výhradně pro simulace musí obsahovat veškeré komponenty, které ve skutečnosti přípojnice obsahuje. Je však vhodné, z důvodu nedostatečné výpočetní kapacity, 3D model přípojnice LI1600A zjednodušit odebráním určitých komponent, jako jsou např. šrouby a matice, které nemají výraznější vliv na tepelné pochody v přípojnici. Zdrsněný povrch krytu přípojnic bylo nutné tvarově zjednodušit, kvůli generaci výpočtové sítě, která by pro dané rozměry byla nepřiměřeně složitá (Obr. 7-3).



Obr. 7-3 Úprava analyzovaného modelu

7.3 Konfigurace simulace

Pomocí programu SolidWorks Flow Simulation, resp. v nastavbě Electronic cooling, která umožňuje simulovat vznik tepla průchodem elektrického proudu, byla provedena numerická simulace vodičů přípojnice na kryt přípojnic metodou konečných objemů. Tento modul umožňuje modelovat proudění a přestup tepla v modelu tak, aby bylo možno stanovit teplotu na povrchu přípojnice.

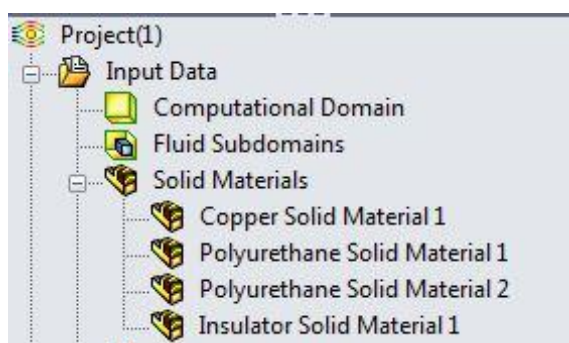
SolidWorks Flow Simulation obsahuje průvodce simulací, kde se nastavují základní parametry simulace a vlastnosti sestavy (Tabulka 1).

Tabulka 1-Konfigurace systému

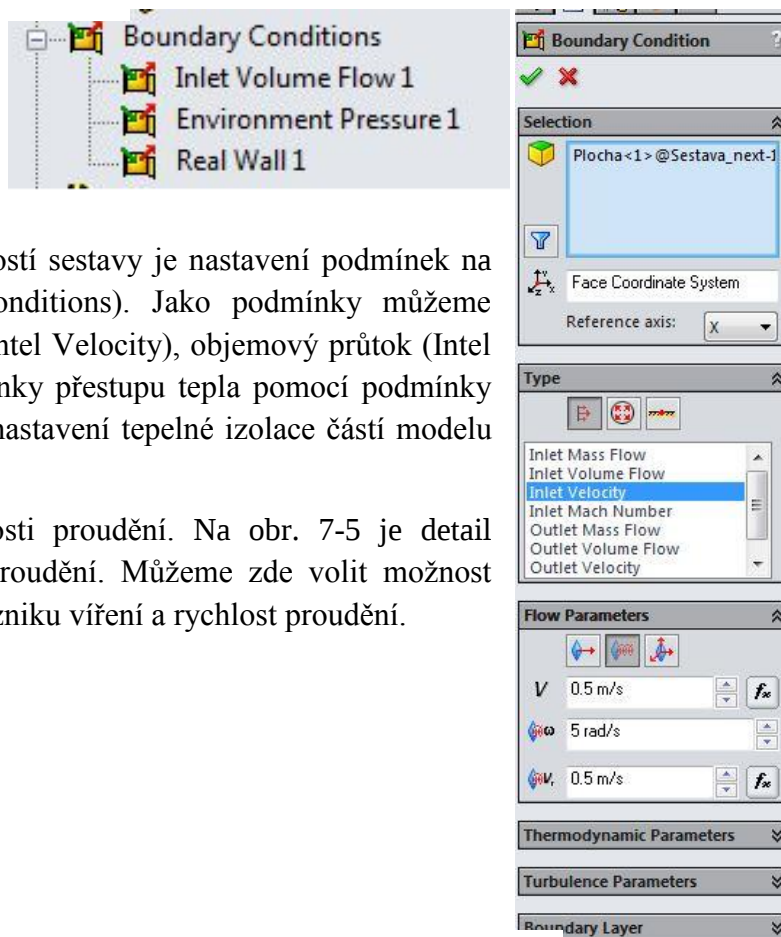
Project name:	Např. Simulace oteplení přípojnice
Unit system	SI Přepnout „Temperature“ z K na ° C
Analysys type	Internal Exclude cavities without flow conditions
Physical features	Heat conduction in solids Gravity Y = -9,81 m·s ⁻²

Default Fluid	Air (Gases)
Default Solid	Metals - Aluminium
Wall Conditions	Default outer wall thermal condition - Heat transfer coefficient $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ - Temperature of external fluid
Initial and ambient condition	Ponecháno beze změny
Results and geometry Resolution	3

Po dokončení základního nastavení v průvodci nastavení simulací je dalším krokem nadefinování všech materiálů zařízení, které sestava obsahuje (Obr. 7-4).



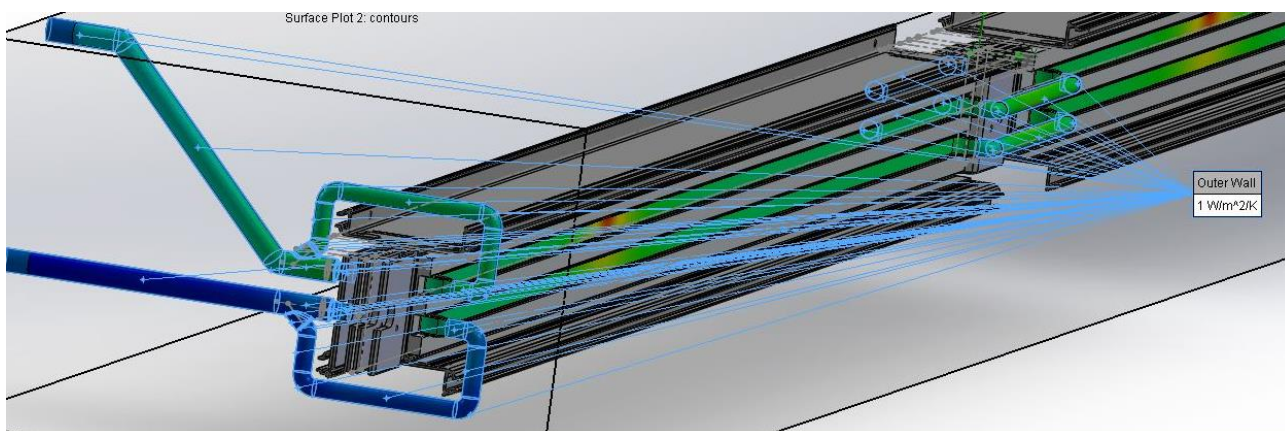
Obr. 7-4 Nastavení použitých materiálů



Jedna z důležitých vlastností sestavy je nastavení podmínek na stěně modelu (Boundary Conditions). Jako podmínky můžeme nastavovat vstupní rychlost (Inlet Velocity), objemový průtok (Inlet Volume Flow) a další podmínky přestupu tepla pomocí podmínky Wall, která byla využita pro nastavení tepelné izolace částí modelu (Obr. 7-6).

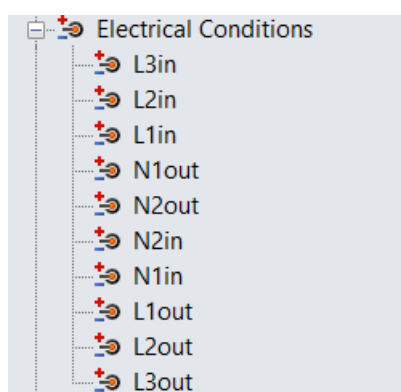
Příklad nastavení rychlosti proudění. Na obr. 7-5 je detail nastavení vstupní rychlosti proudění. Můžeme zde volit možnost vstupu proudění při určitém vzniku víření a rychlost proudění.

Obr. 7-5 Nastavení podmínek modelu



Obr. 7-6 Nastavení podmínky OuterWall

Po nastavení okrajových podmínek je nutné nastavit i podmínky elektrické. V tomto konkrétním případě jde o přípojnice s třemi fázovým vedením. Na jednotlivé fázové vodiče se připojí odpovídající hodnoty protékaného proudu, zde konkrétně cca 1600A (Obr. 7-7). Toto nastavení bylo využito pouze pro simulaci oteplení krytu přípojnice, pro simulaci oteplení kapaliny (plynu) navrhnutého výměníku jsme jako zdroj konstantního tepla nastavili silové vodiče.



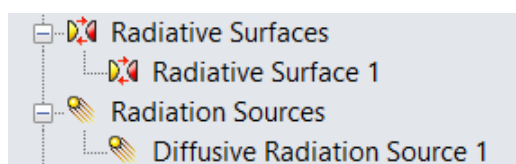
Obr. 7-7 Nastavení elektrických podmínek

Dalším krokem je nastavení cílů výpočtu. Úkolem projektu je analýza teplotního pole přípojnice. Tato místa, se nadefinují jako „Point Goals“ podle obrázku obr. 7-8. Definovali jsme si pět cílů: statický tlak, teplota kapaliny (plynu), rychlost proudění, tepelný tok a teplotu solidu.



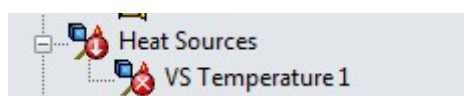
Obr. 7-8 Nastavení Point Goals

Pro samotný přestup tepla pomocí sálání bylo nutné využít numerickou metodu Discrete ordinates, která řeší spektrální vlastnosti materiálů a jejich povrchovou úpravu. Zde je nutné definovat těleso zářící a těleso, které záření přijímá (Obr. 7-9). Přípojnice je difuzním zdrojem tepla. Jako zdroj tepla byly definovány přípojnice, kterými protéká elektrický proud 1600 A. Za využití mechanismu Jouleova tepla byly numericky řešeny ohmické ztráty v modelu a tyto přepočítány na tepelné. Zatím nebyly uvažovány přechodové odpory mezi přípojnými body, kde se předpokládá navýšení teploty.

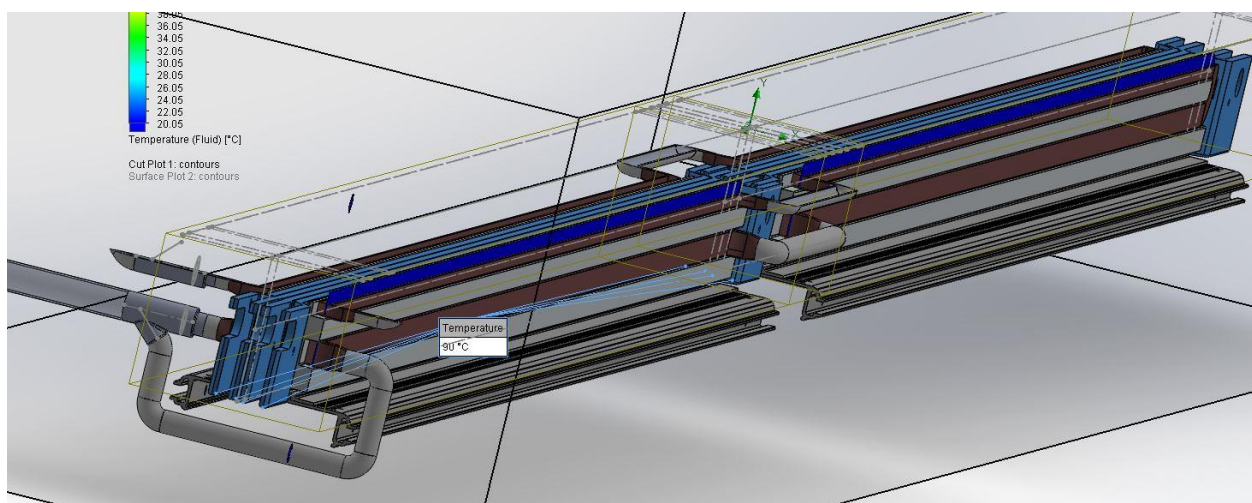


Obr. 7-9 Nastavení radiace tělesa

Pro simulaci výměníku, abychom snížili výpočetní výkon programu jsme jako zdroj tepla nepoužili průchod proudu vodiči, ale nastavili vodiče jako zdroj konstantního tepla (Obr.7-11). Teplotu jsme nastavili 90° C, které odpovídají naměřeným reálným hodnotám (viz. kapitola 5.2). Pro nastavení teploty jsme použili funkci Heat Source, která nám umožňuje nastavit jakoukoliv součást sestavy jako zdroj tepla (Obr.7-10).



Obr. 7-11 Nastavení konstantního zdroje tepla

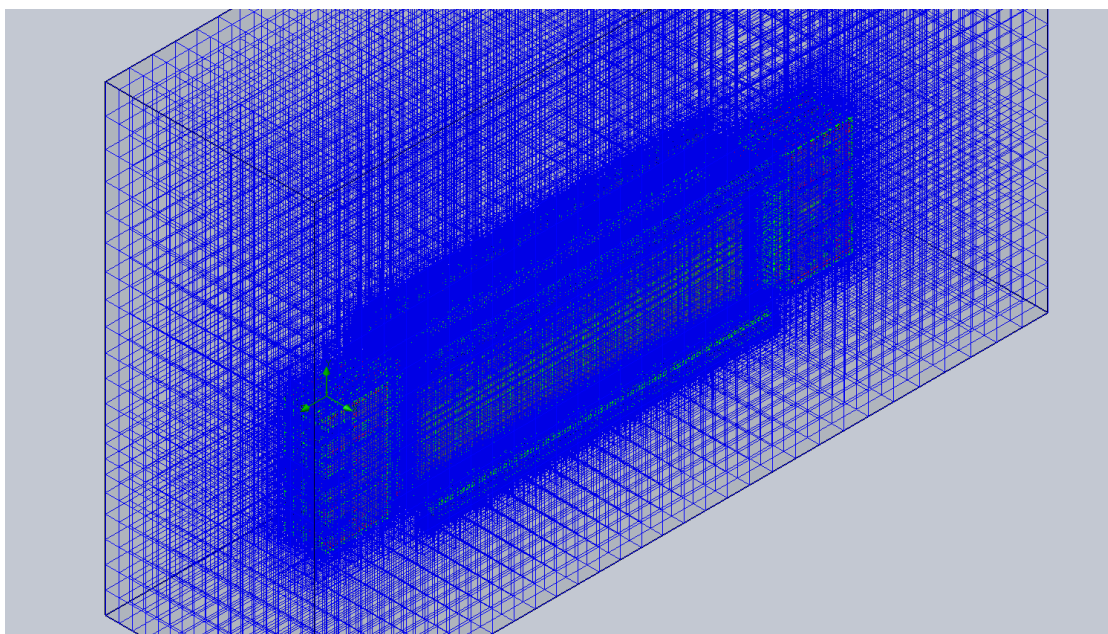


Obr. 7-10 Nastavení konstantního zdroje tepla - model

Dále bylo využito několika meshovacích technik, jako je lokální zjemnění výpočtové sítě ve složitěji tvarovaných částech modelu a zakřiveních modelu. Toto zjemnění bylo vytvořeno na několika úrovních.

Tabulka 2- Počet buněk výpočtové sítě

Typ buněk	Množství
Fluid cells	100346
Solid cells	62146
Partial cells	203650
Suma cells	366142

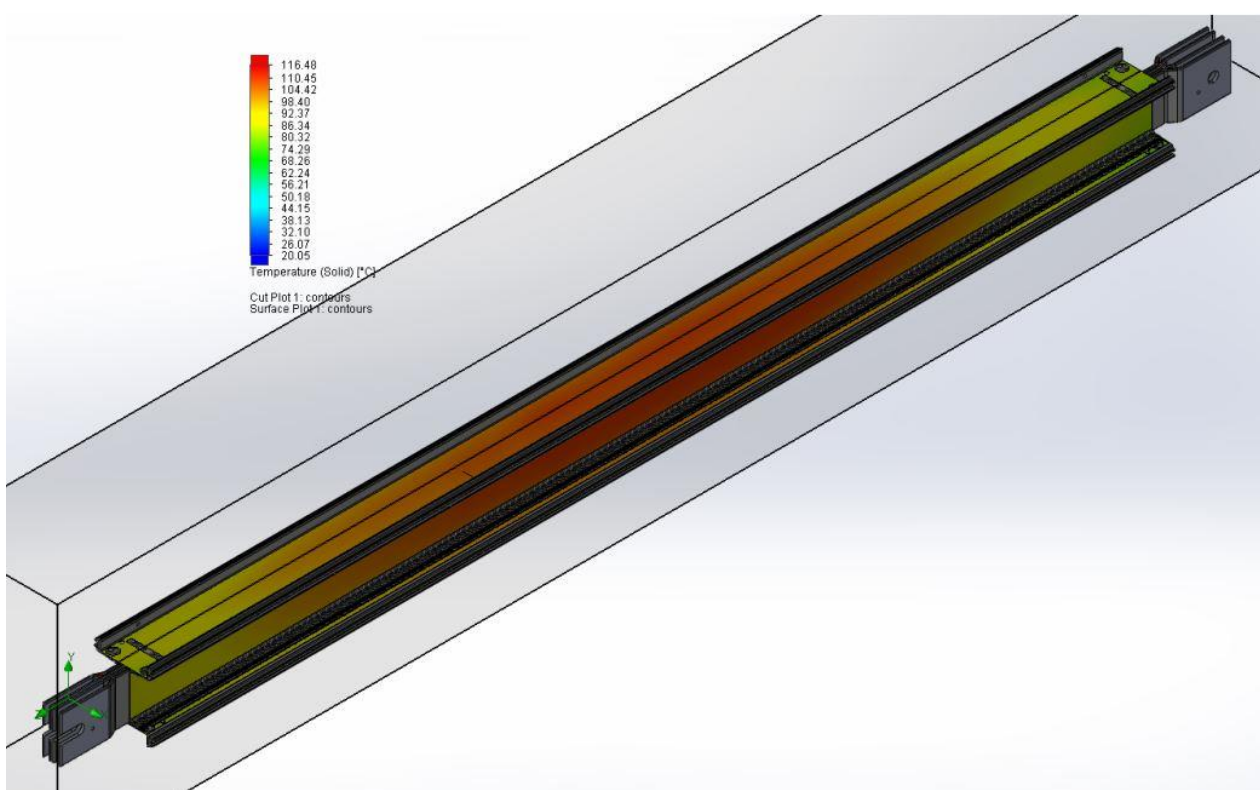


Obr. 7-12 Zasíťování (mesh) modelu

8 SIMULACE OTEPLENÍ KRYTU PŘÍPOJNICE LI1600A

Simulace oteplení krytu přípojnice LI1600A byla provedena jako základní. Výsledky této simulace byly brány jako orientační a sloužili pro ověření známých hodnot, které byly porovnány s naměřenými reálnými hodnotami (viz. kapitola 5.2).

Jako vstupní parametry simulace jsme zvolili střídavý proud 1600 A, který procházel fázovými vodiči L1, L2 a L3. Pro zjištění teploty v určitém místě krytu přípojnice byl nastaven Point Goals – Temperature (Solid). V ustáleném stavu se teplota krytu přípojnice pohybovala od 80 °C do 116 °C. Nejvyšší teploty přípojnice dosahovala ve středu krytu (8-1).



Obr. 8-1 Výsledek simulace oteplení přípojnice LI1600A

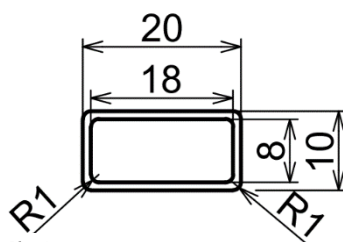
9 SIMULACE A NÁVRH VÝMĚNÍKU

V této kapitole jsou vyhodnoceny výsledky simulací a návrhy několika variant výměníků. Při návrhu systému využití a transportu se uvažuje o využití dvou přípojníc LI1600A na jeden výměník, tedy 6 metrů. Z primárního výměníku, který jako teplotnosné medium využívá vzduch, bude přenos tepla do sekundárního okruhu zajištěn deskovým výměníkem. Sekundární okruh slouží jako sběrnice z libovolného počtu deskových výměníků.

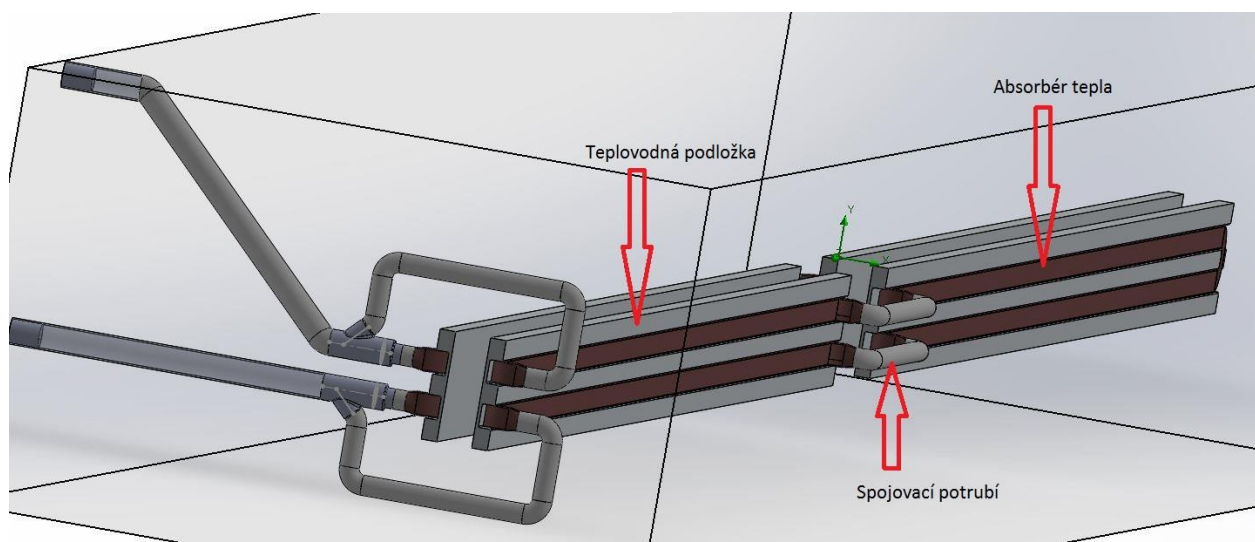
Při návrhu výměníku musíme uvažovat dilataci přípojníc, která je 10 cm na 30m vedení.

9.1 Varianta č. 1

Při návrhu výměníku č. 1 byl kladen důraz na využití dostupných profilů a konstrukcí pro návrh výměníku. Ke konstrukci výměníku byla zvolena měděná trubka obdélníkového profilu s rozměry 20x10 mm a šířkou stěny 1 mm (Obr. 9-1). Měď byla zvolena pro svoji dobrou tepelnou vodivost. Pro spojení měděných profilů mezi přípojnícemi byly navrženy PVC trubky z důvodu odizolování přípojníc, dilataci a dostupnosti (Obr. 9-2). Při návrhu použitých trubek byl zachován stejný průřez jako u měděných profilů. Konstrukce měděných profilů a PVC trubek byla usazena na teplo vodivou profilovanou hliníkovou podložku z důvodu uchycení na přípojnici a větší ploše přestupu tepla.

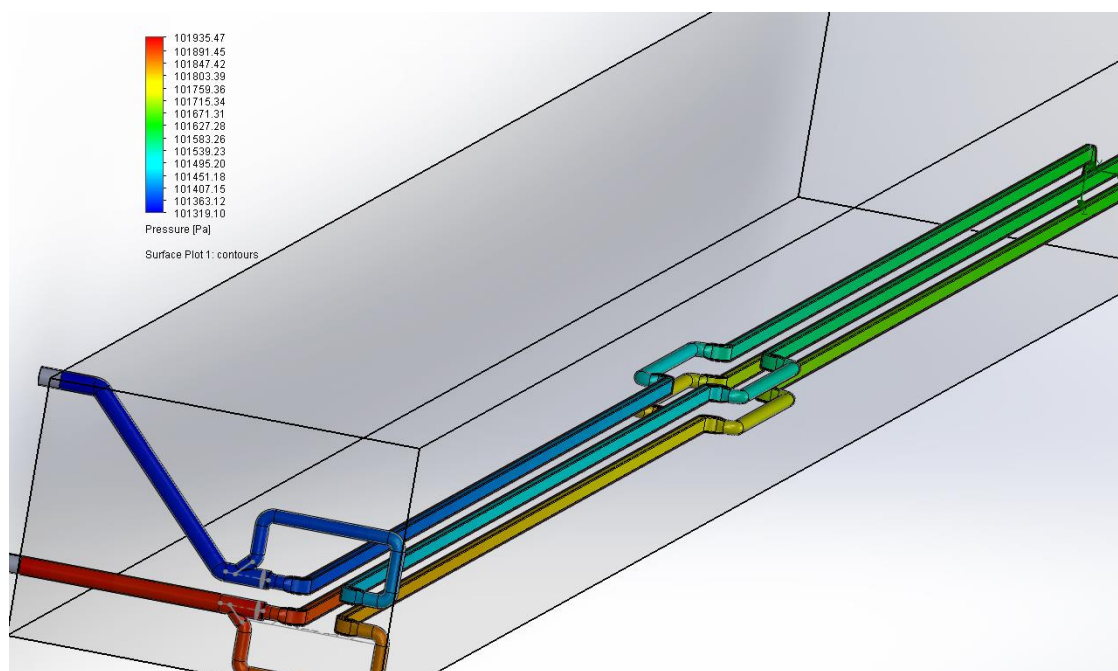


Obr. 9-2 Profil Cu trubky – výměník 1



Obr. 9-1 Popis výměníku č. 1

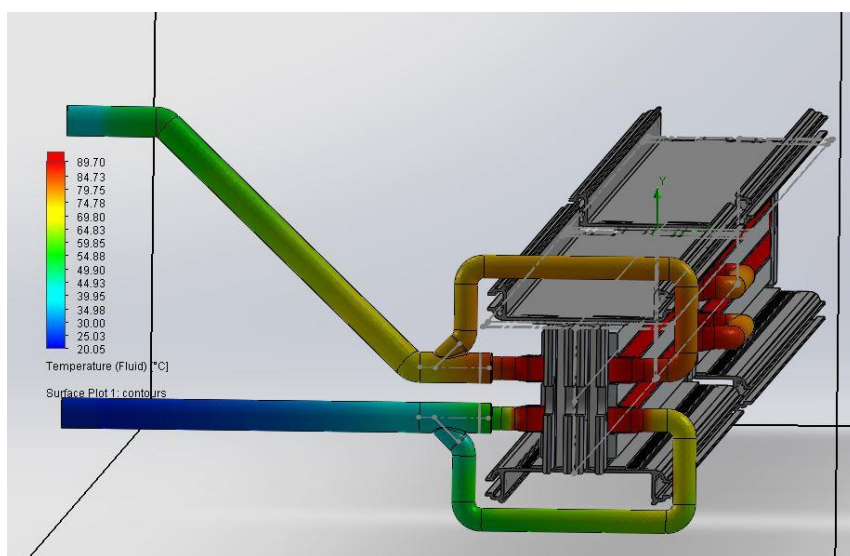
U uvedeného výměníku byla nasimulována tlaková ztráta. Jako vstupní parametr byla zvolena rychlost proudění 5 m/s. Tlaková ztráta na celém navrhnutém potrubí činí 616 Pa. Tato tlaková ztráta pro byla důležitá z hlediska návrhu vhodného větráku nebo dmýhadla (Obr.9-3).



Obr. 9-3 Výsledek simulace tlakových ztrát potrubí výměníku č. 1

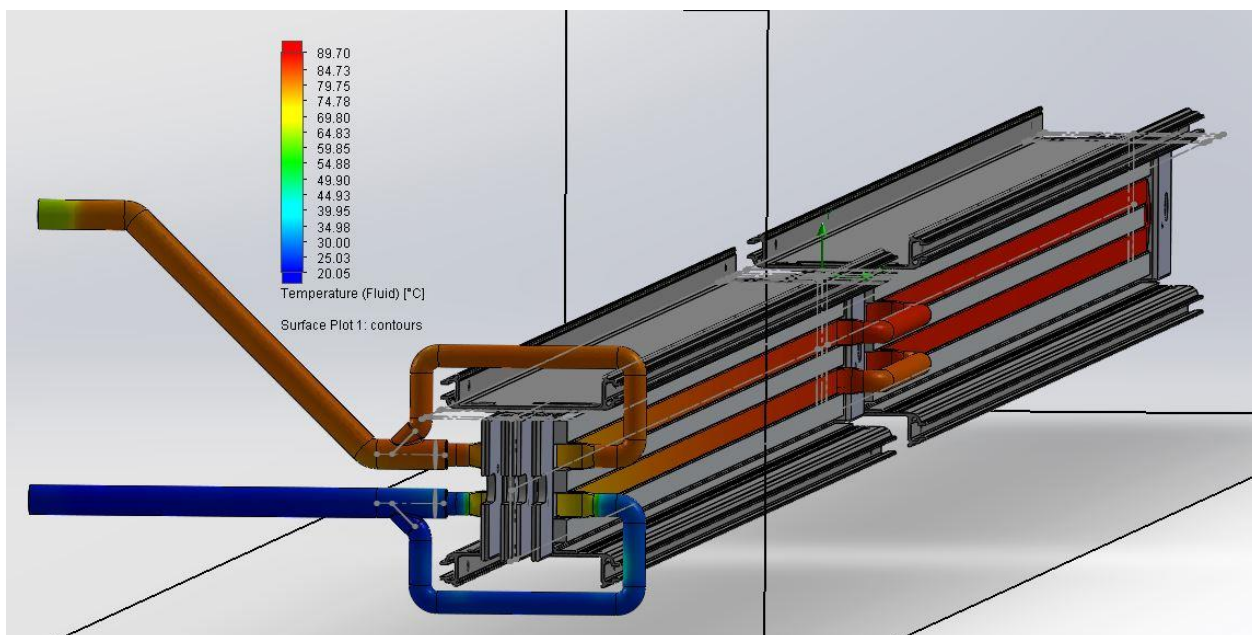
Simulace oteplení pracovního média (vzduchu) ve výměníku č. 1 byla provedena pro rychlost proudění $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Při rychlosti proudění vzduchu $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se vzduch na počátku výměníku okamžitě ohřál na $89,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tato hodnota je ovšem zkreslená nedostatečným zameshováním přípojnice v základním nastavení a z důvodu snížení výpočetního výkonu. Z tohoto můžeme usoudit že tyto rychlosti nejsou dostačující pro chlazení přípojnice a transport ztrátového tepla (Obr. 9-4).



Obr. 9-4 Výsledek simulace oteplení teplotnosného média při rychlosti proudění $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Při rychlosti proudění vzduchu 5 m/s (Obr. 9-5) můžeme pozorovat z výsledku simulace ochlazování výstupní části výměníku vstupní stranou výměníku. Vzduch v 90 % výměníku měl teplotu 89,7 °C a je taktéž zřejmé že tato varianta není vhodná pro chlazení přípojnice a transport tepla.

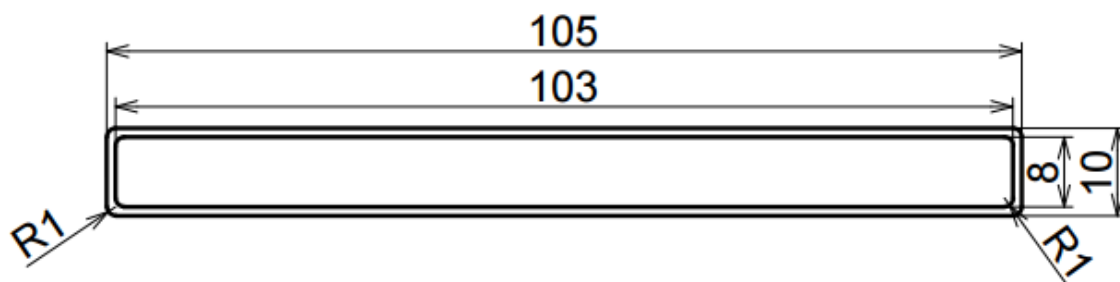


Obr. 9-5 Výsledek simulace oteplení teplotonosného média při rychlosti proudění $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

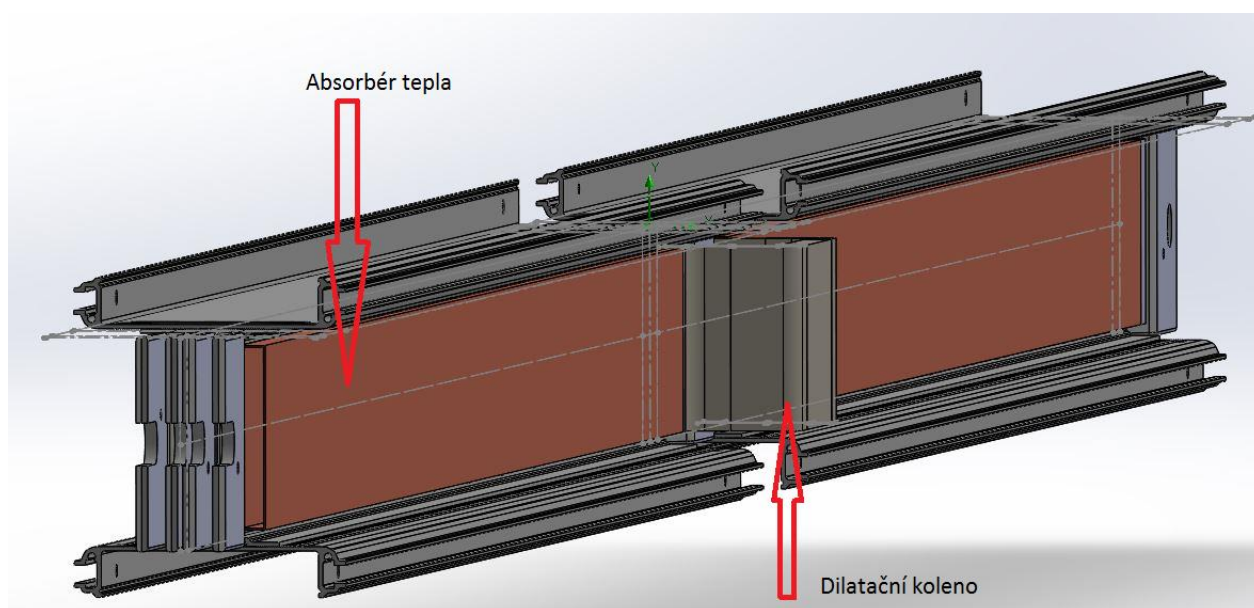
Z výsledků simulací výměníku č. 1 můžeme vyvodit, že tento návrh výměníku navrhnutý z dostupných prvků není vhodný pro chlazení přípojnice LI1600A a využití její ztrátové energie.

9.2 Varianta č. 2

Při návrhu výměníku č. 2 bylo základním aspektem využití celé boční plochy přípojnice. Byl navrhnut měděný profil 105x10 mm s tloušťkou stěny 1 mm (Obr. 9-6). Jako u výměníku č. 1 bylo pro spojení měděných profilů mezi přípojnícemi použito PVC, z kterého byl vymodelován dilatační oblouk (Obr. 9-7). Výměník je přiložen přímo na stěně přípojnice. V obou variantách návrhu výměníku č. 1 a č. 2 jsme nepoužili tepelnou izolaci výměníku z možného důvodu zvýšení teploty uvnitř přípojnice a snížení bezpečnosti.

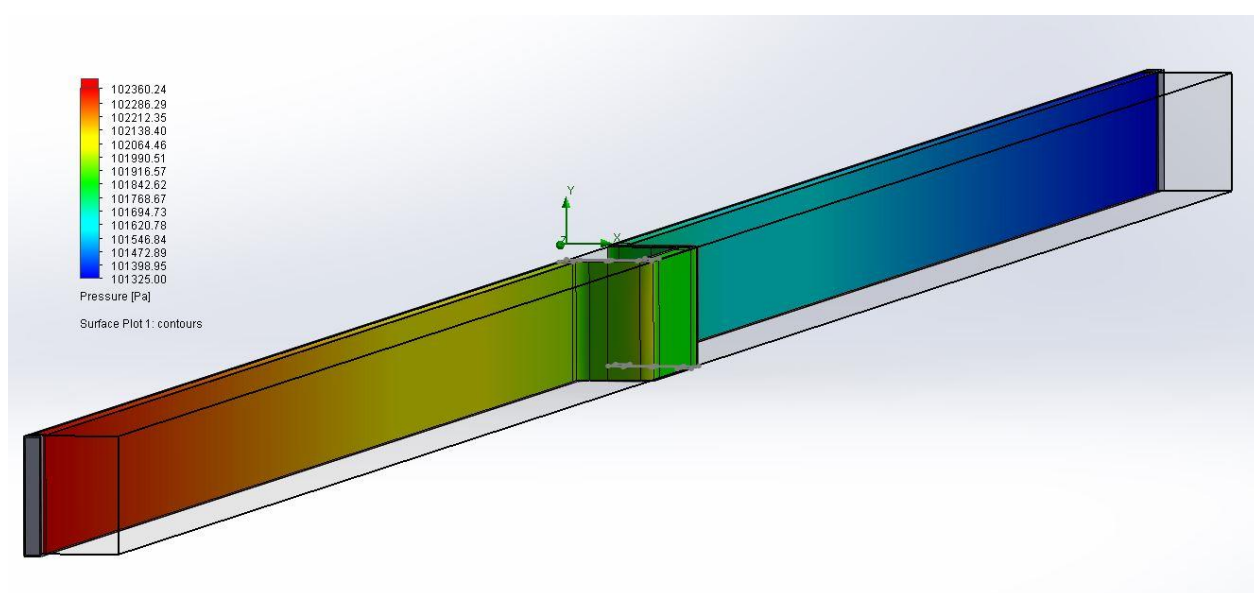


Obr. 9-6 Profil Cu trubky – výměník č. 2



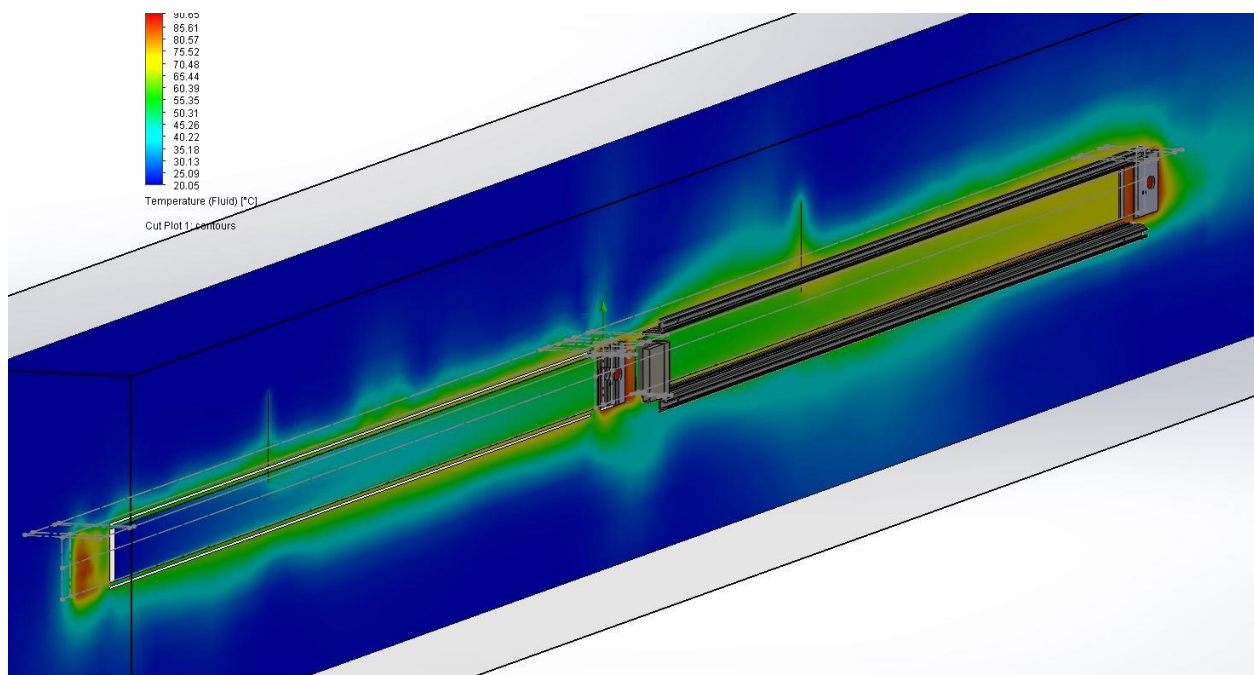
Obr. 9-7 Výměník č. 2

Tlaková ztráta při rychlosti proudění $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byla 1035 Pa (Obr. 9-8). Běžně dostupné ventilátory a dmýchadla pracují maximálně do tlaku 1 kPa , z toho je patrné že pro tento návrh výměníku by bylo třeba navrhnout vlastní ventilátor nebo dmýchadlo.



Obr. 9-8 Výsledek simulace tlakových ztrát potrubí výměníku č. 2

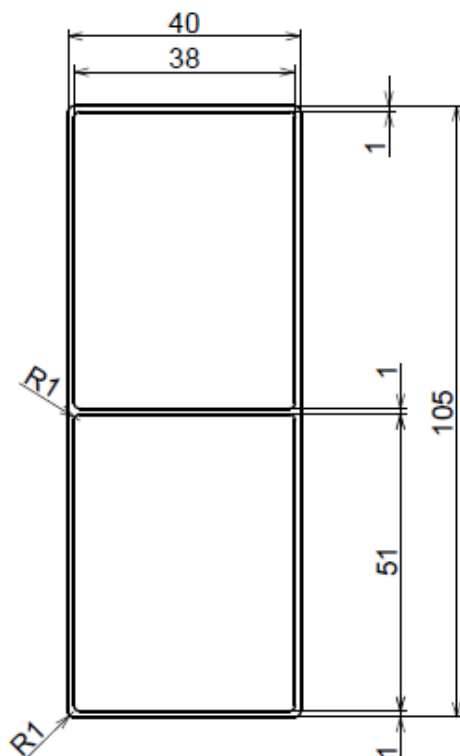
Při rychlosti proudění vzduchu $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se vzduch postupně ohřívá až na teplotu $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z obrázku 9-9 je patrné, jak proudící vzduch postupně ochlazuje přípojnicí a zvyšuje svoji teplotu. Teplota proudícího vzduchu je zobrazená v podélném řezu výměníku.



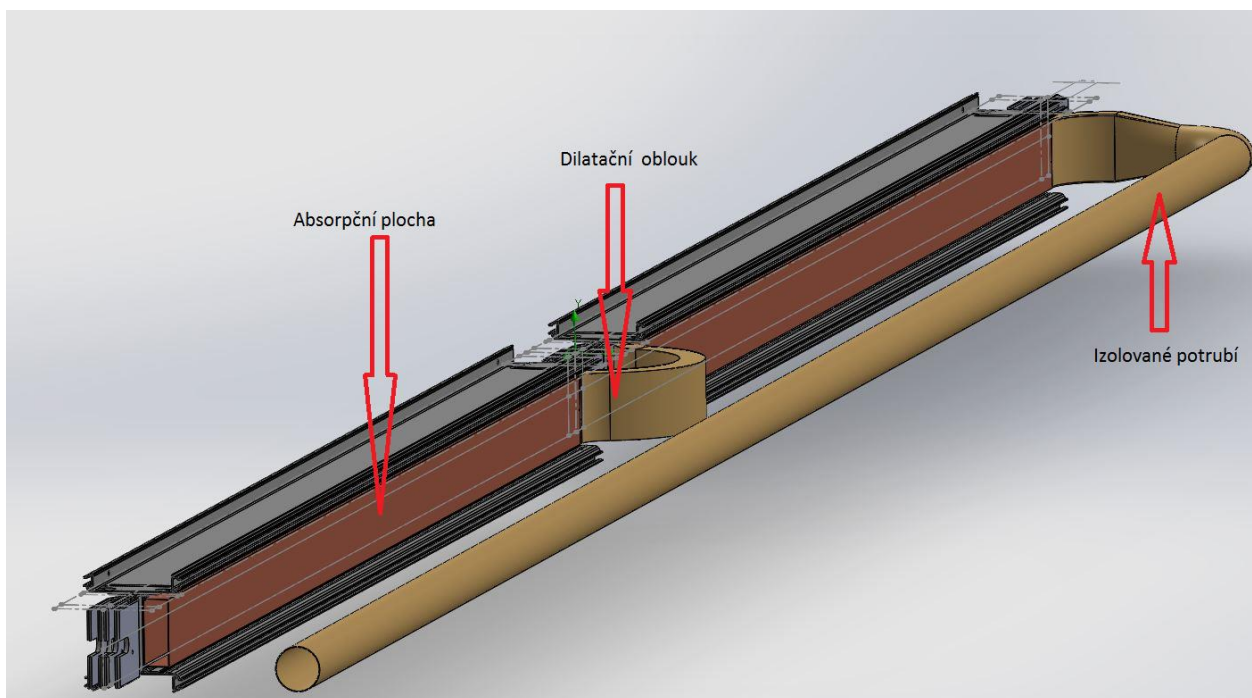
Obr. 9-9 Výsledek simulace oteplení teplotonosného média při rychlosti proudění $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

9.3 Varianta č. 3

Při návrhu výměníku č. 3 byl taktéž, jako u výměníku č. 2, základním aspektem využití celé boční plochy přípojnice, byl navrhnout měděný profil 105x40 mm, který byl uprostřed profilu vyztužen přepážkou, díky tomu bylo dosaženo větší konstrukční pevnosti a efektivnějšího přestupu tepla (Obr. 9-10). Propojení absorbérů tepla dilatačním obloukem bylo opět navrženo z PVC. Abychom dosáhli co nejmenších tlakových ztrát, bylo propojení mezi absorbéry více plynulé a bez hran. V tomto návrhu bylo uvažováno dostatečné chlazení přípojnice, byl tedy výměník doplněn o tepelnou izolaci absorbérů tepla. Jako vhodný materiál, z důvodu nehořlavosti, byla zvolena skelná vata Rockwool.

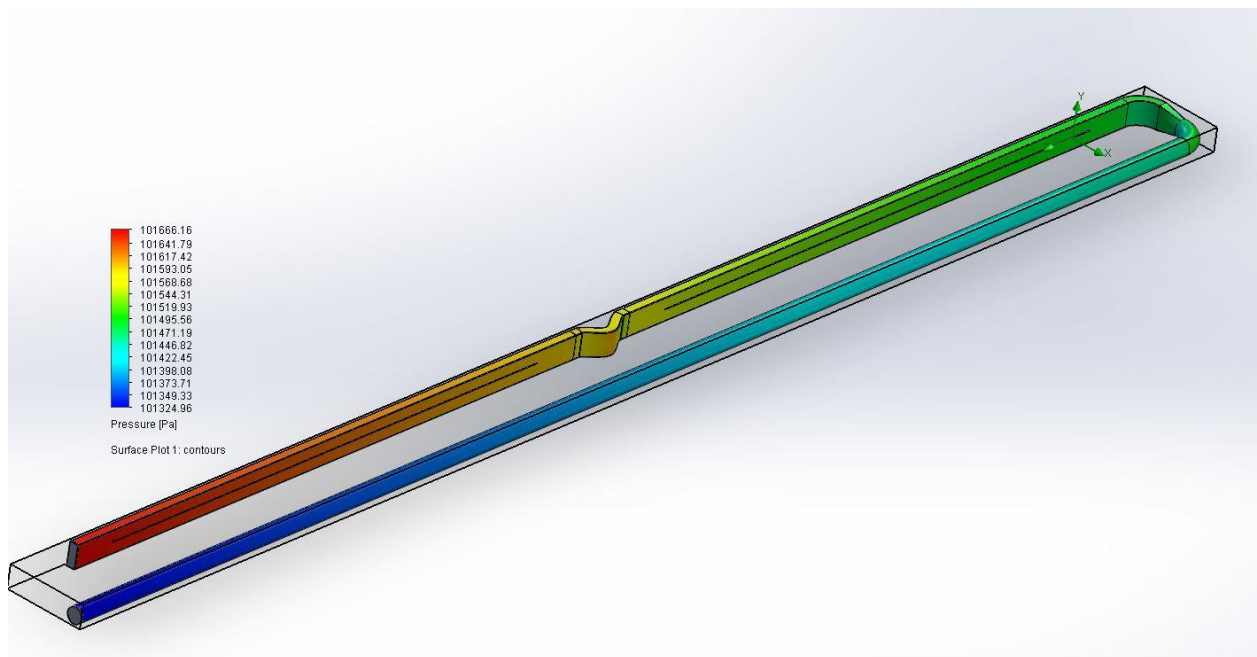


Obr. 9-10 Profil Cu trubky – výměník č. 3



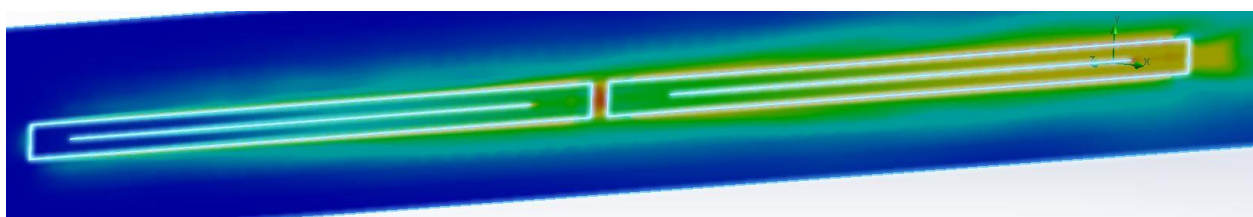
Obr. 9-11 Popis modelu výměníku č. 3

Simulace tlakové ztráty při rychlosti $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ činila 341 Pa (Obr. 9-12). Snížení tlakových ztrát bylo dosaženo díky zvýšení průřezu, snížení rychlosti proudění a optimalizaci tvaru výměníku.

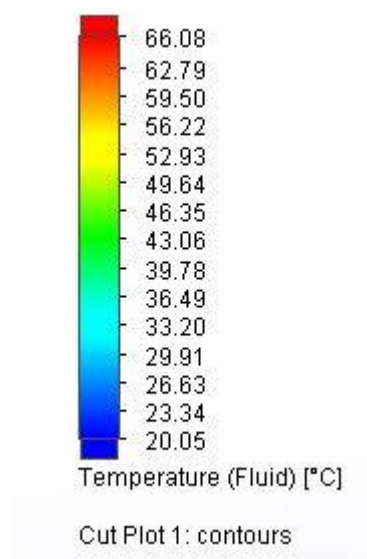


Obr. 9-12 Výsledek simulace tlakových ztrát potrubí výměníku č. 3

Při rychlosti proudění vzduchu 10 m/s se vzduch postupně ohřívá až na teplotu 60 °C. Z obrázku 9-13,9-14 je patrné, jak proudící vzduch postupně také ochlazuje přípojnice a zvyšuje svoji teplotu. Teplota proudícího vzduchu je zobrazená v podélném řezu výměníku. U tohoto návrhu výměníku konečná teplota je nižší, ovšem tepelný výkon je vyšší.



Obr. 9-13 Výsledek simulace oteplení teplotonosného média při rychlosti proudění 10 m·s⁻¹



Obr. 9-14 Teplotní stupnice

9.4 Vyhodnocení simulací

Výsledky můžeme zhodnotit dle výstupního výkonu výměníku. Využijeme základních rovnic pro výpočet hmotnostního průtoku a tepelného výkonu:

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v \quad (kg \cdot s^{-1}), \quad (9.1)$$

kde $\dot{m}$ představuje hmotnostní tok, ρ je hustota v $kg \cdot m^{-3}$, S průřez průtočné plochy v m^2 a v je rychlost proudění plynu nebo tekutiny v $m \cdot s^{-1}$,

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (W) \quad (6)$$

kde Q je tepelný výkon, c představuje měrnou tepelnou kapacitu s základní jednotkou

$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ a ΔT je teplotní rozdíl počáteční teploty T_1 a koncové teploty T_2 .

Tabulka 3- Vyhodnocení simulací

	Výměník č. 1	Výměník č. 2	Výměník č. 3
S (m ²)	0,000144	0,000824	0,003914
c (J*kg ⁻¹ *K ⁻¹)	1010	1010	1010
$\dot{m}$ (kg*s ⁻¹)	0,00241488	0,01381848	0,04375852
ρ (kg*m ⁻³)	1,118	1,118	1,118
v (m*s ⁻¹)	15	15	10
T1 (°C)	20,05	20,05	20,05
T2 (°C)	89,7	70	60
ΔT (°C)	69,65	49,95	39,95
Q (W)	169,88	697,14	1765,63

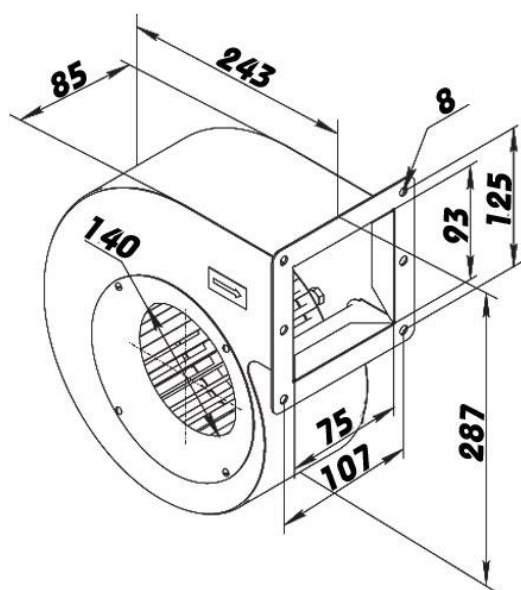
Q představuje tepelný výkon z 3 m přípojnice LI1600A, výkon dodávaný při reálném měření byl 3548 W. Tedy u výměníku č. 1 bychom využili 4,79 % vyzařeného tepla, u výměníku č. 2 19,65 % a u výměníku č. 3 49,76 % ztrátového tepla. Nejvyššího využití ztrátového tepla by tedy bylo u výměníku č. 3.

10 KOMPONENTY

10.1 Ventilátor

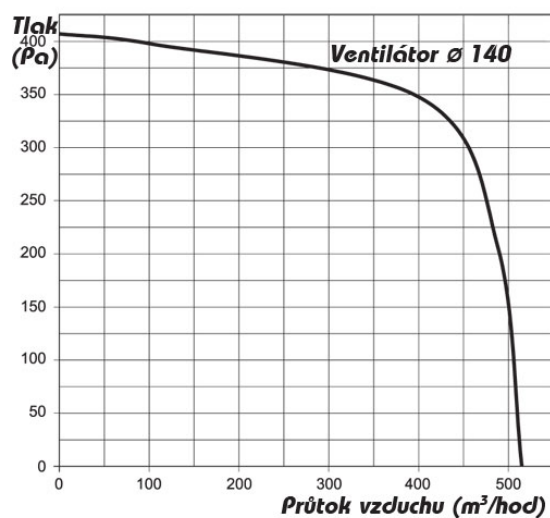
Pro zmíněný koncept výměníku je třeba zvolit dostatečný ventilátor, musí dosahovat požadovaného objemového průtoku vzduchu při určité tlakové ztrátě. Větrák je navrhnut pro výměník č. 3 s tlakovou ztrátou 341 Pa a objemovém průtoku 134,6 m³h⁻¹.

Byl zvolen průmyslový axiální ventilátor 140. Tento větrák byl, pro představu rychlosti proudění vzduchu, testován v laboratořích VUT FEKT.



Průtok vzduchu [m ³ /hod]	515
Statický tlak [Pa]	405
Příkon [W]	148
Otáčky [min]	2820
Jmenovitý proud [A]	0,64
Akustický hluk [dB/3m]	68
Krytí [IP]	X4
Napájení [V/Hz]	230/50
Teplota max [°C]	-25 až +45
Barva	Šedá
Materiál	Kov

Obr. 10-1 Parametry axiálního ventilátoru [19]

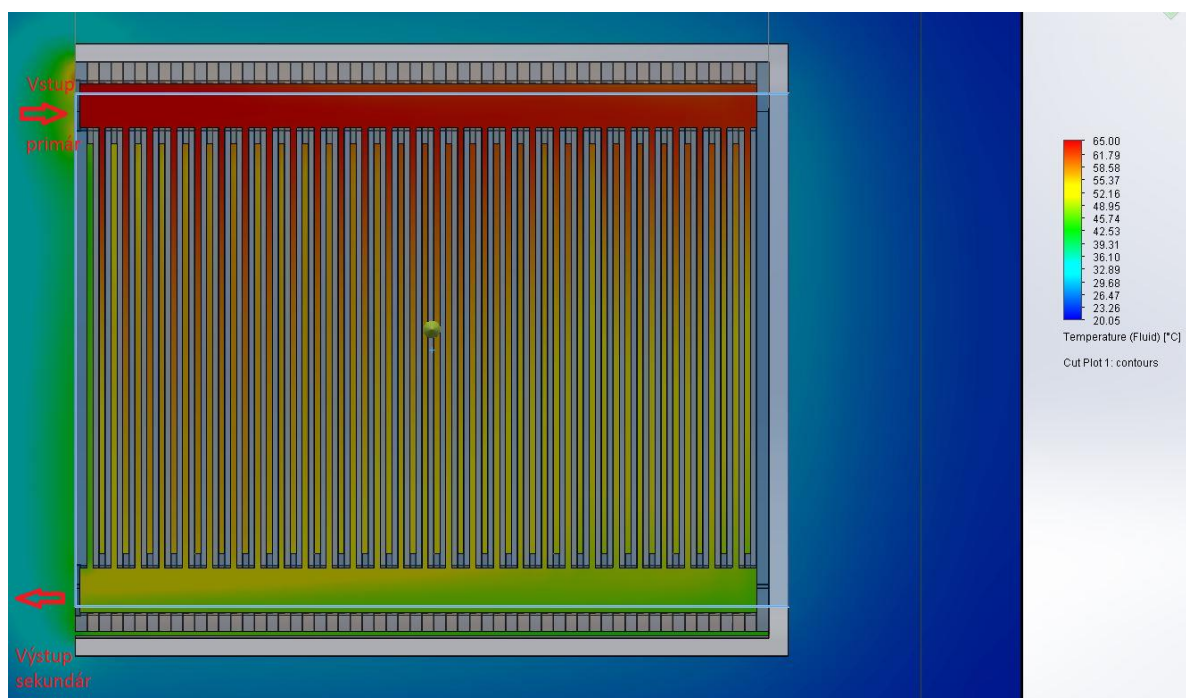


Obr. 10-2 Charakteristika axiálního ventilátoru [19]

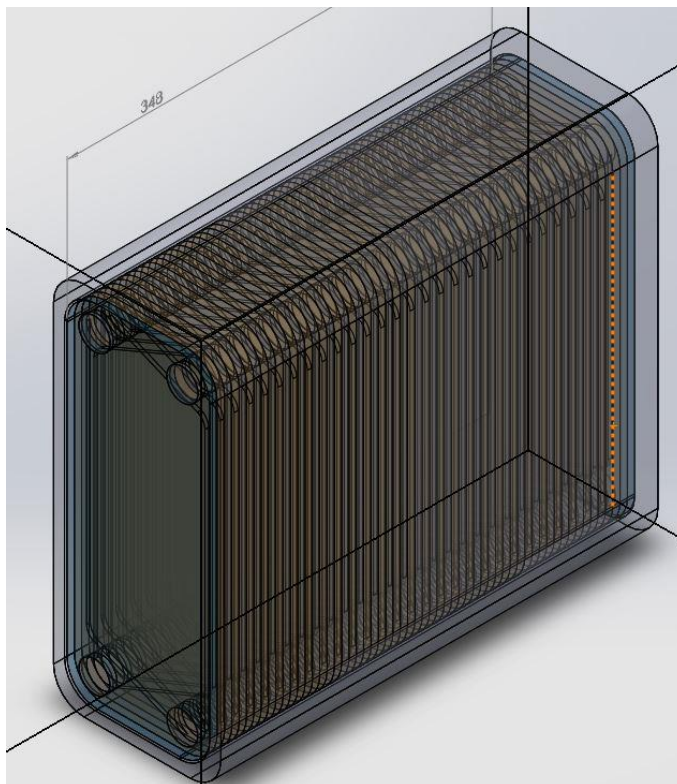
10.2 Deskový výměník

Pro výměnu tepla mezi primárním výměníkem a sekundární sběrnici byl zvolen deskový výměník SWEP o chladícím výkonu 10 kW. Deskové výměníky mají při protiproudém křížovém zapojení účinnost až 0,8.

Výměník byl namodelován v programu SolidWorks a jeho účinnost ověřena (Obr.10-3). Vstupní teplota primárního okruhu do výměníku byla 65 °C a výstupní teplota sekundárního okruhu 49 °C. Z toho určíme účinnost 0,75.



Obr. 10-3 Model deskového výměníku - průřez



Obr. 10-4 Průhledný model deskového výměníku

11 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ TEG

Pro další využití ztrátového tepla přípojnice LI1600A bylo provedeno měření termoelektrického generátoru Hebei TEC1-12708.

Provedení	Silikonová izolace
Maximální teplota (°C)	138
Maximální napětí (V)	15,4
Maximální proud (A)	10,5
Odpor [Ω]	1,08
Maximální příkon [W]	100
Maximální rozdíl teplot [°C]	67
Počet P/N přechodů	127
Materiál	Al_2O_3
Délka vodičů [mm]	150
Rozměry [mm]	40x40x3,3

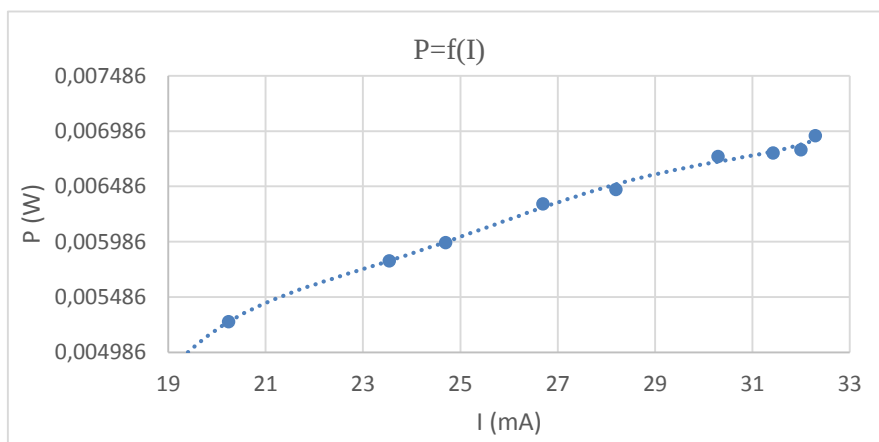


Obr. 11-1 TEG

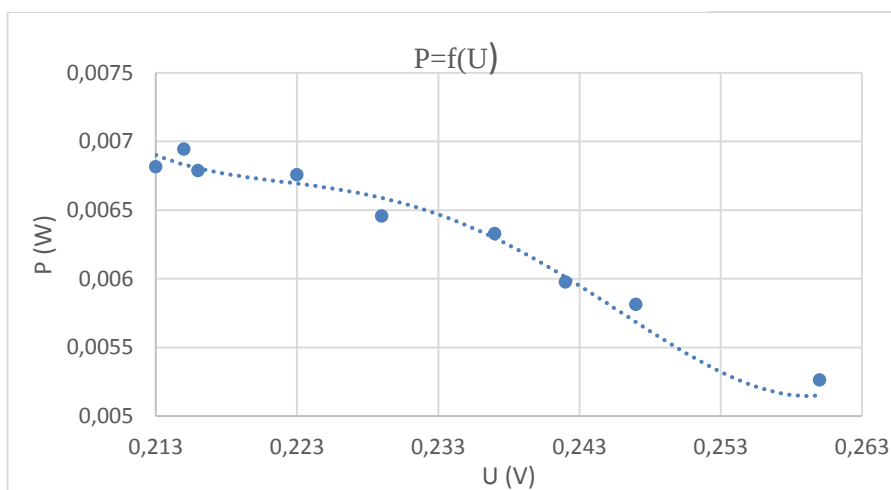
Termoelektrický generátor byl přiložen na ploše o konstantní teplotě 70 °C, protější strana byla chlazená pomocí kovové nádoby naplněné vodou o teplotě 15 °C. TEG článek byl změřen při dané teplotě naprázdno, nakrátko a poté při zapojení proměnného zátěže R. Maximální výkon jednoho TEG článku při teplotě 70 °C byl 6,495 mW. Výkon tedy ze dvou 3 m dlouhých přípojníc je 4,6 W.

Tabulka 4- Naměřené hodnoty TEG článku

	I [mA]	U [V]	P [W]
Naprázdno	-	0,316	-
Nakrátko	20,24	0,26	0,005262
Při zátěži			
	19,4	0,257	0,004986
	23,54	0,247	0,005814
	24,7	0,242	0,005977
	26,7	0,237	0,006328
	28,2	0,229	0,006458
	30,3	0,223	0,006757
	32,3	0,215	0,006945
	31,43	0,216	0,006789
	32	0,213	0,006816



Obr. 11-2 $P=f(I)$ TEG článku



Obr. 11-3 $P=f(U)$ TEG článku

12 CELKOVÁ KALKULACE

V této kapitole nalezneme hrubou ekonomickou kalkulaci pro systém s využitím TEG článků a navrhnutého výměníku č. 3. Kalkulace bude provedena na horizontálně ukotvenou přípojnici LI1600A o délce 30 m.

12.1 Kalkulace systému výměník č. 3

V kalkulaci je uvažována pouze cena materiálů a komponentů.

Tabulka 5- Kalkulace výměníku č.3

Materiál/Komponent	Počet kusů	Cena bez DPH [Kč]	Cena s DPH [Kč]
Měď	-	17 538	22 200
PVC trubky	-	1 251	1 584
Deskový výměník 10 kW	5	45 523	57 625
Šnekový ventilátor	5	12 008	15 200
Celkem		76 320	96 609

12.2 Kalkulace systému TEG článků

Tabulka 6 - Kalkulace TEG článků

Materiál/Komponent	Počet kusů	Cena bez DPH [Kč]	Cena s DPH [Kč]
TEG články	10 662	1 684 596	2 132 400
Chladič	60	71 100	90 000
Celkem		1 755 696	2 222 400

13 ZÁVĚR

Předkládaný bakalářský projekt se zabývá tematikou využití elektrické přípojnice jako zdroje tepla. V úvodních částech byla provedena rešerše dané problematiky. Byly popsány čtyři tepelné oběhy a jeden termoelektrický jev. Využití tepelné energie bude realizováno na systému přípojnic LI od firmy Siemens Mohelnice, za jejíž spolupráce byla vypracována tato semestrální práce.

Pro pochopení tepelných dějů byla nastudována problematika vedení a přestupu tepla, na jejichž základech byla vytvořena numerická simulace vedení a vzniku tepla v přípojnících. Numerický model byl vytvořen a odladěn v programu SolidWorks, nástavbě Flow Simulation, který umožňuje simulovat proudění a přestup tepla v tekutinách a pevných částech. Výsledky této simulace a jsou nezbytné pro určení vzniku a šíření tepla v přípojnici.

Společnost Siemens Mohelnice poskytla tři metry dlouhou přípojnicí LI1600A, na které byla provedena oteplovací zkouška a pohled termokamerou ve Vědecko-technickém parku profesora Lista a tato data byly dále využita pro konkrétní řešení odpadního tepla. Přípojnicové vodiče mají dle normy maximální dovolené oteplení 90 °C při jmenovitém zatížení, díky zkoušce oteplení jsme si tyto data ověřily a také zjistili reálnou teplotu na krytu přípojnice, která sloužila jako orientační teplota pro návrh výměníku.

Jako nejvýkonnější tepelný výměník je dle simulací návrh varianty č. 3. Při použití tohoto jsme schopni využít až 49 % ztrátového tepla přípojnice. Ovšem výkon toho nestačí pro využití ani jednoho technologického postupu, tedy teplo získané z výměníku lze zatím použít pro ohřev TUV. Při hodnocení výstupního výkonu z výměníku nesmíme zapomenout na příkon šnekového větráku, který činí 148 W a účinnost deskového výměníku, tedy celková účinnost systému klesne.

Z konceptu využití TEG článků pro přeměnu tepelné energie na elektrickou jsme zjistili, že tento projekt je velice nevýhodný. Účinnost TEG článků je velice malá a proto se nevyplatí nad touto variantou uvažovat.

Technologie	Výhody	Nevýhody
Absorpční chlazení	- absorpční chladiče používají jako hlavní zdroj energie – teplotu vody, páru, spaliny, výfukových plynů, odpadní plyn, nebo odpadní teplo - snadná regulace - vysoká životnost - spolehlivý a čistý provoz - provoz je téměř bezhlučný a bez vibrací - oproti kompresorovému chlazení o 10 až 15 % nižší spotřeba elektrické energie	- oproti jiným systémům vyšší pořizovací náklady - větší rozměry - vyšší hmotnost oproti kompresorovým systémům
Organický Rankinův cyklus	- lze využívat nízkopotenciální zdroje tepla - k dosažení dobré účinnosti nejsou třeba přehříváky - vyšší životnost, která plyne z nižších teplot, tlaků, namáhání - jedno stupňová konstrukce turbíny - pracovní látka nezpůsobuje korozi zařízení - vyšší účinnost oproti parní turbíně - minimální nároky na prostory	- některé pracovní látky jsou jedovaté a hořlavé, mohou způsobit ekologickou havarii - organická látka degeneruje - vyšší hmotnostní průtok, tedy větší namáhání čerpadla - je třeba přidavný olejový systém - systém musí být perfektně těsný

Kalinův cyklus	- dosahuje vyšších účinností pro určité teploty než ORC - amoniak nemá potenciální globální oteplování - velký rozsah vypařování a kondenzace díky nastavitelné koncentraci amoniaku	- drahá technologie na koncentraci správného množství amoniaku do vody - amoniak je toxický - použité materiály musí být odolné vůči velkým tlakům
Seebeckův jev	- velmi malá plocha využití - spolehlivost zařízení - rychlost odezvy	- nedosahují velkých účinností
Stirlingův motor	- možnost použít jakékoliv zdroj tepelné energie - minimální poruchovost - tichý běh - minimální znečišťování prostředí - vysoká životnost - minimum pohyblivých částí	- vysoká pracovní teplota ohříváku - vysoký tlak plynu - těsnění motoru musí být dokonalé - obtížná regulace výkonu - momentálně vysoké výrobní náklady

LITERATURA

- [1] VO VOLF – MIROSLAVA JAREŠOVÁ – MIROSLAV OUHRABKA. *Přenos tepla* [online]. [cit. 26.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [2] TZB-INFO. *Větrání a klimatizace* [online]. [cit. 26.11.2015]. Dostupný na WWW: <http://vetrani.tzb-info.cz/12758-pripadova-studie-systemu-absorpcniho-solarniho-chlazení>
- [3] KRACÍK, POSPÍŠIL, ŠNAJDÁREK. *Energetický ústav* [online]. [cit. 26.11.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/search.php?action=results&query=absorb%C4%8Dn%C3%AD+ob%C4%9Bhy>
- [4] DOJČANSKÝ, J. a J. LONGAUER. *Chemické inženýrstvo II*. Malé Centrum, 2000.
- [5] Pavelek M. a kolektiv, Termomechanika, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003.
- [6] TRANCPACIFIC ENERGY. *TrancPacific Energy, Inc* [online]. [cit. 28.11.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.transpacenergy.com/>
- [7] LEARNENGINEERING. *Kalina cycle power plant* [online]. [cit. 30.11.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.learnengineering.org/2013/01/kalina-cycle-power-plant.html>
- [8] PERIKLIS A. LOLOS AND EMANUIL D. ROGDAKIS. *THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A KALINA POWER UNIT DRIVEN BY LOW TEMPERATURE HEAT SOURCES* [online]. [cit. 2.12.2015]. Dostupný na WWW: <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/2009-4/periklis.pdf>
- [9] J. REICH. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 3.12.2015]. Dostupný na WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [10] TZB-INFO. *TZB* [online]. [cit. 6.12.2015]. Dostupný na WWW: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektrickych-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>
- [11] SCIENCEDIRECT. *Thermoelectrics: a review of present and potential applications* [online]. [cit. 6.12.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431103000127>
- [12] SCIENCEDIRECT. *“Symbiotic” application of thermoelectric conversion for fluid preheating/power generation* [online]. [cit. 6.12.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890401000243>
- [13] WIKIPEDIE. Stirlingův motor [online]. [cit. 7.12.2015]. Dostupný na WWW: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv_motor#Hlavn.C3.AD_.C4.8D.C3.A1sti
- [14] CIESLAR JIŘÍ. Stirlingovy motory [online]. [cit. 7.12.2015]. Dostupný na WWW: http://www.plarmy.org/cadwiki/index.php?title=CIESLAR_Ji%C5%99%C3%AD_-_Stirlingovy_motory

-
- [15] JAMAL NOUMAN. *Comparative studies and analzsas of working fluids for Organic Rankine Cykles - ORC* [online]. [cit. 7.12.2015]. Dostupný na WWW: www.aidic.it/cet/13/35/037.pdf
- [16] WOODBANK COMMUNICATIONS LTD 2005, Electropaedia. *Electropaedia* [online]. [cit. 11.1.2016]. Dostupný na WWW: http://www.mpoweruk.com/stirling_engine.htm
- [17] ANALÝZA. *Wikipedie* [online]. [cit. 26.5.2016]. Dostupný na WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Analýzai>
- [18] SOLIDWORKS. *Flow Simulation* [online]. [cit. 26.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.solidworks.cz/>
- [19] VENTILATORY. *Ventilatory.cz* [online]. [cit. 26.5.2016]. Dostupný na WWW: http://www.ventilatory.cz/prumyslovy-ventilator-snek-_ventilator_-618.html