



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

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

UPLATNĚNÍ PROGRAMU SOLIDWORKS FLOW SIMULATION PRO CHLAZENÍ VÝKONOVÉHO MĚNIČE

APPLYING SOLIDWORKS FLOW SIMULATION FOR COOLING SYSTEM OF THE POWER
CONVERTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PATRIK MATOUŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ DOSTÁL

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Patrik Matoušek

ID: 154803

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Uplatnění programu SOLIDWORKS Flow Simulation pro chlazení výkonového měniče

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s aktuálními možnostmi a problematikou chlazení výkonových měničů.
2. V 3D CAD systému vytvořte model výkonového měniče.
3. Vytvořte teplotní simulaci pro různé provozní stavy chlazení modulu výkonového měniče v programu Solidworks Flow Simulation
4. Navrhněte optimalizaci chladicího systému
5. Vlastní výpočty ověřte pomocí oteplovací zkoušky a získané poznatky zhodnoťte

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 2.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál

Konzultanti bakalářské práce:

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

Práce se zabývá problematikou chlazení výkonových měničů, popisuje dispozici, rozložení a původ tepelných ztrát v měniči M50, výrobce ELCOM a.s. Dále popisuje postup při modelování 3D CAD modelu měniče v programu Solidworks. Dále je popsán postup při provedení tepelné simulace měniče v základním stavu a ve všech poruchových stavech ventilátorů pomocí aplikace Solidworks Flow Simulation. Práce dále hodnotí výsledky těchto simulací, na základě tohoto hodnocení navrhuje možná zlepšení chladicího systému měniče. Tato zlepšení jsou prověřena v dalších simulacích. Práce poté popisuje ověření provedených simulací srovnáním s oteplovací zkouškou.

Abstract

Thesis deals with the issue of cooling power converters. It describes the disposition of power converter M50, produced by ELCOM, a.s., and the distribution and origin of heat losses in the converter. The thesis then describes the process of creating a 3D CAD model of the converter in Solidworks and the procedure for heat simulation of the converter in default state and with cooling fan failures using Solidworks Flow Simulation. The thesis then evaluates the results of these simulations, and on their basis it suggests possible improvements in the design of converter's cooling system. These improvements are then evaluated in further simulations. The thesis then describes the verification of performed simulations by comparison with a temperature-rise test.

Klíčová slova

sdílení tepla; chlazení; výkonový měnič; střídač; výkonová elektronika; simulace; Solidworks; Flow Simulation; ELCOM

Keywords

Heat transmission; cooling; power converter; inverter; power electronics; simulation; Solidworks; Flow Simulation; ELCOM

Bibliografická citace

MATOUŠEK, P. *Uplatnění programu SOLIDWORKS Flow Simulation pro chlazení výkonového měniče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Dostál.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Uplatnění programu SOLIDWORKS Flow Simulation pro chlazení výkonového měniče 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 bakalářské 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

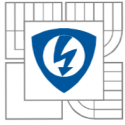
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukášovi Dostálovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

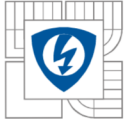
V Brně dne

Podpis autora

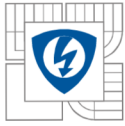


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	6
SEZNAM TABULEK	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD	10
1 CHLAZENÍ VÝKONOVÝCH MĚNIČŮ	11
1.1 TEPLOTA.....	11
1.2 TEPLA	11
1.3 ZPŮSOBY SDÍLENÍ TEPLA	11
1.3.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM	12
1.3.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM.....	13
1.3.3 SDÍLENÍ TEPLA ZÁŘENÍM	14
1.4 ZPŮSOBY CHLAZENÍ VÝKONOVÝCH SOUČÁSTEK.....	15
1.4.1 PŘIROZENÉ CHLAZENÍ.....	16
1.4.2 CHLAZENÍ NUCENOU VENTILACÍ	17
1.4.3 KAPALINOVÉ CHLAZENÍ.....	18
1.4.4 CHLAZENÍ BUBLINOVÝM VAREM	19
1.4.5 TEPELNÉ TRUBICE.....	20
2 STRÍDAČ M50	21
2.1 POPIS FUNKCE MĚNIČE	21
2.2 DISPOZICE MĚNIČE	22
2.3 ROZLOŽENÍ TEPELNÝCH ZTRÁT V MĚNIČI.....	24
2.3.1 ZTRÁTY NA VÝKONOVÉM TRANZISTOROVÉM MODULU	24
2.3.2 ZTRÁTY NA TLUMIVCE SINUSOVÉHO FILTRU	25
3 3D MODEL MĚNIČE M50.....	26
3.1 PŘIJATÁ ZJEDNODUŠENÍ	26
3.2 VÝSLEDNÝ MODEL	26
4 TEPLOTNÍ SIMULACE MĚNIČE M50.....	29
4.1 VSTUPNÍ PODMÍNKY.....	29
4.2 VÝPOČETNÍ SÍŤ A VÝPOČET.....	31
4.3 VÝSLEDKY SIMULACE PŮVODNÍHO STAVU.....	31
4.4 VÝSLEDKY SIMULACE PORUCHOVÝCH STAVŮ	35
5 OPTIMALIZACE CHLADICÍHO SYSTÉMU	38
5.1 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU	38
5.1.1 USMĚRŇOVAČE POD TLUMIVKOU	38
5.1.2 ZMENŠENÍ DÍRY VEDLE TLUMIVKY SINUSOVÉHO FILTRU	38
5.1.3 OPTIMALIZACE PROUDĚNÍ V OBLASTI BUDIČŮ	39

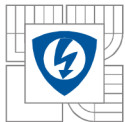


5.1.4 USMĚRŇOVAČ NAD KONDENZÁTORY SINUSOVÉHO FILTRU	39
5.2 ZMENŠENÍ VENTILAČNÍHO VÝKONU	40
5.3 VÝSLEDKY SIMULACE VARIANT SE ZLEPŠENÍMI.....	40
5.3.1 USMĚRŇOVAČE POD TLUMIVKOU A ZMENŠENÍ DÍRY VEDLE TLUMIVKY	40
5.3.2 OPTIMALIZACE PROUDĚNÍ V OBLASTI BUDIČŮ	41
5.3.3 USMĚRŇOVAČ NAD KONDENZÁTORY SINUSOVÉHO FILTRU	41
5.3.4 SNÍŽENÍ VENTILAČNÍHO VÝKONU	42
6 POROVNÁNÍ S OTEPLOVACÍ ZKOUŠKOU	43
7 ZÁVĚR.....	44
LITERATURA	45



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1-1 Ke sdílení tepla vedením [8].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 1-2 Nerovnosti na přechodu pouzdro-chladič. Upraveno z [3].....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 1-3 Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa. Upraveno z [2].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 1-4 Příklad žebrovaného chladiče [3].</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 1-5 Rozdíl mezi chladičem pro přirozené a nucené chlazení [9].</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 1-6 Příklad nepřímého kapalinového chlazení [3].</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 1-7 Princip funkce tepelné trubice [2].</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2-1 Blokové schéma měniče M50 spolu se síťovým transformátorem [11].</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2-2 Zapojení měniče M50. Upraveno z [11].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2-3 Dispozice měniče M50.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2-4 Odhad směru proudění vzduchu v měniči.</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 2-5 Odhad směru proudění vzduchu ve ventilačním tunelu (podélný řez tunelem).</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 2-6 Rozložení ztrát na součástech v měniči</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 3-1 Model šuplíku měniče M50.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 3-2 Ventilační tunel měniče M50</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3-3 Zjednodušený model výkonového modulu, kryt je zprůhledněný.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3-4 Rozložený pohled na tlumivku sinusového filtru</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 4-1 Zachycení části chladiče výpočetní sítí</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4-2 Proudnice vzduchu uvnitř měniče</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4-3 Rozložení rychlosti vzduchu v příčném řezu tlumivkou.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4-4 Proudnice při pohledu zprava.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4-5 Rozložení rychlosti chladicího vzduchu v chladiči</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4-6 Teplota měniče v řezu prostředním žebrem chladiče</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4-7 Teplota na povrchu chladiče, základny výkonového modulu a čipů</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4-8 Graf1 Teplota podél výšky chladiče</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 5-1 Usměrňovače pod tlumivkou sinusového filtru.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 5-2 Díra vedle tlumivky před a po zmenšení.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 5-3 Usměrňovač vložený pro zlepšení proudění v oblasti budičů</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 5-4 Usměrňovač pro kondenzátory sinusového filtru.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 5-5 Vliv přidaného usměrňovače na proudění v oblasti kondenzátorů sinusového filtru41</i>	

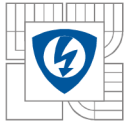


SEZNAM TABULEK

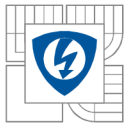
<i>Tabulka 1-1 Porovnání chladicích médií [2,10]</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 2-1 Ztráty na jednotlivých součástech ve výkonovém modulu [11].</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 4-1 Hodnoty pro přepočet tepelných odporů</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4-2 Číselný výstup ze simulace při 45 °C</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 4-3 Srovnání poruchových stavů se stavem bez poruchy</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 5-1 Srovnání výsledků variant se zlepšeními a základního stavu.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 5-2 Srovnání teplot u variant se sníženým ventilačním výkonem.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6-1 Srovnání hodnot z oteplovací zkoušky a simulace</i>	<i>43</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a.s.	akciová společnost
CAD	Computer assisted design, design s využitím počítače
T	Termodynamická teplota, vyjádřená ve stupních Kevlina [K]. Ve starší literatuře také Θ .
t	Teplota, vyjádřená ve stupních Celsia, popř. Fahrenheita [$^{\circ}\text{C}$],[$^{\circ}\text{F}$]
Q	Tepelná energie, [J]
α	Součinitel přestupu tepla, [W/Km^2]
λ	Tepelná vodivost, [J/Kms]
s	sekunda, jednotka času
m	metr, jednotka délky
S	plocha, může mít význam plochy pláště tělesa nebo plochy průřezu tělesa, i jiné významy [m^2]
Φ	Tepelný tok, [W]
q	hustota tepelného toku, [W/m^2]
Gr	Grashoffovo číslo.
Pr	Prandtlovo číslo
Re	Reynoldsovo číslo.
Jz	plošná hustota zářivého toku [W/m^2]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W}/\text{K}^4\text{m}^2$
A	poměrná pohltivost zářiče [-]
c	Měrná tepelná kapacita, [J/kgK]
ρ	hustota [kg/m^3]
c_{ob}	měrná objemová tepelná kapacita [$\text{J}/\text{m}^3\text{K}$]
TN-S	Síť s uzemněným uzlem.
V	Volt, jednotka napětí
VA	VoltAmpér, jednotka zdánlivého výkonu
IT	Síť s izolovaným uzlem.
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
m n. m.	metry nad mořem
EMI	elektromagnetická interference
PWM	Pulse-width modulation, pulzně šířková modulace.
IGBT	Insulated gate bipolar transistor – Bipolární transistor s izolovaným hradlem



ΔP	výkonové ztráty na elektrickém prvku, určují výsledný tepelný tok Φ , který je nutné odvést z prvku ven. [W]
DPS	deska plošných spojů
MKO	Metoda konečných objemů
CFD	Computational fluid dynamics, výpočty dynamiky tekutin
R_{th}	tepelný odpor (Km^2/W)
$R_{th,S}$	tepelný odpor (K/W)
j-c	junction-case, přechod mezi polovodičovým čipem a základnou modulu
c-h	case-heatsink, přechod mezi základnou modulu a chladičem
FWDi	Forward diode, dioda ve větvi střídače
ϑ	teplota ve stupních Celsia ($^{\circ}C$)
$\Delta\vartheta$	rozdíl teplot ($^{\circ}C$)



ÚVOD

Již v článku uveřejněném v roce 1942 uvádí Mouromtseff [1], že „při vývoji elektronek často narážíme na větší potíže z hlediska mechaniky, metalurgie a šíření tepla než na problémy čistě elektrického rázu“ [1].

Tento postřeh platí i v současnosti, vzhledem ke stále se zvyšujícím nárokům na miniaturizaci elektronických zařízení, a zároveň nepolevujícím nárokům na jejich výkon, spolehlivost a především cenu je otázka efektivního odvodu tepla z elektronických zařízení i po šesti dekadách stále aktuální [2].

Práce se zabývá simulací chlazení výkonového měniče. Motivací firmy pro zadání práce byla možnost získání podkladů pro rozhodnutí o případné investici do softwaru Flow Simulation, a také možnost optimalizace chlazení jejich výkonového měniče M50.

První část práce se zabývá problematikou sdílení tepla a chlazení elektronických zařízení. Druhá část se zabývá samotným měničem M50, jeho funkcí, dispozicí, množstvím a rozmístěním tepelných ztrát v modulu měniče. Třetí část popisuje postup při modelování měniče v programu Solidworks, a čtvrtá část popisuje teplotní simulaci měniče, a to v základním stavu, v poruchových stavech chladicího systému měniče a po optimalizaci chlazení měniče. Poslední část práce srovnává provedenou simulaci s oteplovací zkouškou.

1 CHLAZENÍ VÝKONOVÝCH MĚNIČŮ

Chlazení výkonových měničů je jedním ze základních problémů při jejich návrhu a jeho řešení jde ruku v ruce s návrhem měniče po stránce elektrické a konstrukční. Správnost řešení chlazení má podstatný vliv na účinnost měniče, jeho životnost i parametry jako jsou měrný výkon na jednotku hmotnosti a měrný výkon na jednotku objemu [3].

Než budou nastíněny jednotlivé způsoby chlazení výkonových měničů, je třeba vysvětlit základní pojmy, tedy teplotu a tepelnou energii. Poté budou probrány způsoby sdílení tepla.

1.1 Teplota

Teplota patří mezi základní fyzikální veličiny. Pokud existuje termicky homogenní systém, tj. systém bez adiabatických přepážek, ve kterém se může volně šířit teplo, a pokud je tento systém v termické rovnováze, pak když takový systém rozdělíme na libovolný počet podsystémů, jakákoli kombinace těchto podsystémů je také v termické rovnováze. Teplota je pak definována jako intenzivní stavová veličina, která je ve všech těchto podsystémech stejná [4].

Věta o transitivnosti teploty: Jestliže $T_A = T_B$ a zároveň $T_B = T_C$, pak platí $T_A = T_C$ [4].

Jednotkou teploty v soustavě SI je Kelvin [K]. Je definován jako 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody. Tedy v Kelvinově stupnici je teplota trojného bodu vody přesně 273,16 K. Teplota 0 K, tedy tzv. teplota absolutní nuly, je teplota reálně nedosažitelná, jak plyne z třetího termodynamického zákona. Nejnižší zatím dosažená teplota byla v tzv. Bose-Einsteinově kondenzátu, dosahovala pouze 450 pK. V běžném životě je používána stupnice Celsiova, kromě USA, kde je používána stupnice Fahrenheitova [4,5,6].

Přepočty mezi těmito stupnicemi mohou být provedeny pomocí těchto vztahů [4]:

$$t(^{\circ}C) = T(K) - 273,15 \quad (1.1)$$

$$t(^{\circ}F) = \frac{9}{5}t(^{\circ}C) + 32 \quad (1.2)$$

1.2 Teplo

Fyzikální veličinu tepelná energie definuje [7] takto:

„Teplo je mikroskopickým způsobem předávaná část vnitřní energie látky“ [7].

Tepelná energie (teplo) vyjadřuje energii tělesa uloženou jako kinetickou energii volných částic, v případě pevných látek energii uloženou ve chvění částic v krystalické mřížce. Když jsou v kontaktu dvě tělesa o různých teplotách, z mikroskopického hlediska to znamená, že jednotlivé částice v těchto tělesech se pohybují/kmitají s různou rychlostí. Při vzájemných srážkách si částice navzájem předávají svou tepelnou energii, a tímto mechanismem se šíří teplo mezi různými tělesy, i v tělesech samotných. Jednotlivé způsoby sdílení tepla budou rozvedeny v následující kapitole [2].

Tepelná energie se značí písmenem Q a jednotkou tepla je jeden Joule [J] [3].

1.3 Způsoby sdílení tepla

Teplo se může šířit třemi způsoby, které se v různé míře uplatňují v různých technických aplikacích, a to je sdílení tepla vedením, prouděním a zářením. Pro popis a srovnání všech těchto

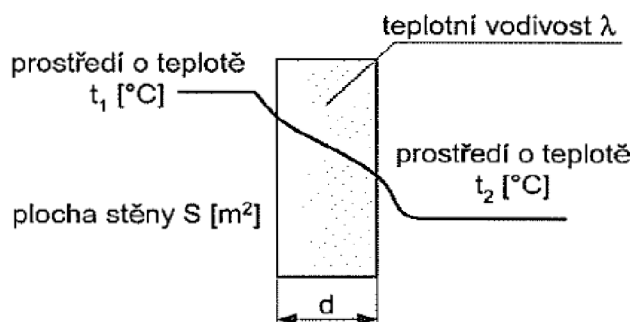
mechanismů je příhodná veličina součinitel přestupu tepla α [$\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}^2$], někdy též nazývaný měrná chladiivost. Je to veličina, která udává velikost tepelného výkonu, který projde danou plochou o velikosti 1 m^2 při rozdílu teplot 1 K [2,3].

1.3.1 Sdílení tepla vedením

Tímto způsobem se sdílí teplo v pevných látkách a na styčných plochách tuhých těles. V omezené míře se uplatňuje také v kapalinách a plynech. K přenosu tepla dochází vzájemným kontaktem jednotlivých molekul látky. Při přestupu tepla vedením nedochází k přesunu hmoty [2].

To, do jaké míry umožňuje dané prostředí přestup tepla vedením, určuje veličina zvaná teplotní vodivost λ [$\text{J}/\text{K}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$]. Určuje, kolik J tepla projde za 1 s látkou o vodivosti λ a délce 1 m , pokud rozdíl teplot na jejích koncích činí 1 K [3]. Tabulku měrných vodivostí pro materiály vyskytující se v technické praxi uvádí literatura [2].

Existují-li dvě tělesa s tepelně aktivními povrchy S_1 a S_2 o rozdílných teplotách T_1 a T_2 , mezi kterými se nachází hmotné tepelně vodivé prostředí o tepelné vodivosti λ , jak ukazuje obr. 1-1 [8]. Povrchy těchto těles můžeme dle [3] považovat za „tepelné elektrody“.



Obrázek 1-1 Ke sdílení tepla vedením [8].

Teplo dQ , které projde plochou S za dobu dt , určuje teplený tok Φ , který prostupuje touto plochou [2,3].

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{W}; \text{J}, \text{s}) \quad (1.3)$$

Po vydělení hodnoty tepelného toku velikostí plochy, kterou prochází, získáme hustotu tepelného toku q . Tuto hustotu toku určuje pro plochu dS Fourierova rovnice [2]:

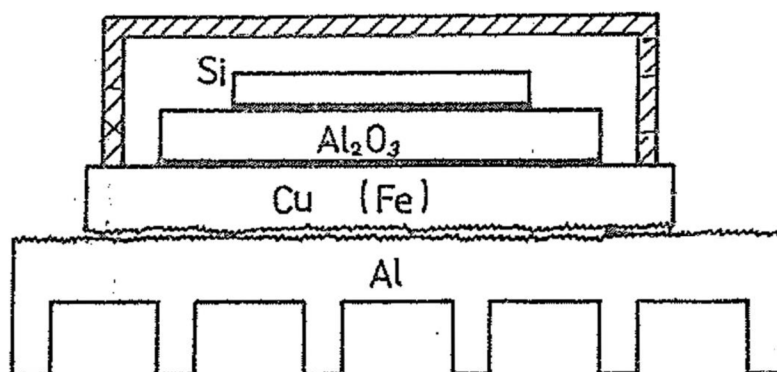
$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (\text{W}/\text{m}^2; \text{J}/\text{K}\cdot\text{m}, \text{K}, \text{m}) \quad (1.4)$$

Kde $\partial T / \partial n$ je gradient teploty ve směru kolmém k ploše dS [2].

V praxi mají největší teplený odpor nikoli samotná tělesa využívaná v chlazení, ale především styčné plochy mezi nimi, případně styčné plochy mezi tělesem a okolním vzduchem. [2,3]

V případě styčných ploch (např. mezi pouzdrům výkonového tranzistoru a chladičem) jsou hlavním problémem mikroskopické nerovnosti na obou plochách. Jak ukazuje obr. 1-2 [3], tyto plochy se pak přímo dotýkají jen na malé části z celé styčné plochy S , ve zbytku plochy se mezi oběma plochami nachází ještě tenká nepohyblivá vrstvička vzduchu. Vzduch má asi 10^4 x menší

tepelnou vodivost oproti pevným látkám používaným v chladicí technice (měď, hliník, litina), a proto i tato tenká vrstvička zásadně zvyšuje velikost tepelného odporu této styčné plochy [2,3].



Obrázek 1-2 Nerovnosti na přechodu pouzdro-chladič. Upraveno z [3].

Tento problém se v praxi řeší vyvinutím přitlačné síly, která částečně vyhladí nerovnosti na styčných plochách, zvětší velikost plochy, ve které se plochy skutečně dotýkají, vytlačí část vzduchu ze styčného prostoru a celkově tak sníží celkový tepelný odpor styčné plochy [2].

Dalším opatřením je aplikace teplovodivé pasty mezi obě plochy. Pasta vyplní mikroskopické nerovnosti na obou plochách, nahradí v nich vzduch a dále tak sníží celkový tepelný odpor přibližně na polovinu [8].

Při přestupu tepla z tuhého tělesa do okolního prostředí (nejčastěji tedy vzduchu) se nejprve uplatňuje vedení, až po něm je teplo unášeno mechanismem proudění, který bude popsán v následující kapitole. V praxi je opět vyvíjena snaha minimalizovat tento přestupný tepelný odpor, a to minimalizací tloušťky mezní vrstvy, ve které se teplo šíří vedením. Jak toho bývá dosaženo, bude řešeno v následující kapitole [3].

1.3.2 Sdílení tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním je převažujícím způsobem sdílení tepla v tekutinách. Pokud se část tekutiny ohřeje na vyšší teplotu, než má její okolí, například kontaktem s horkým tělesem, rozepne se na větší objem, zpravidla tím sníží svou hustotu a začne tak stoupat vzhůru. Okolní chladnější tekutina vyplní vzniklé místo, ohřeje se atd. Tekutina se začne pohybovat a teplo je sdíleno prouděním [2].

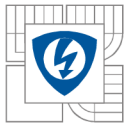
Proudění tekutin může být děleno následovně:

Proudění samovolné bylo popsáno v předchozím odstavci, jedná se o proudění vyvolané přirozenými tlakovými rozdíly, které v tekutině vznikají například v důsledku kontaktu s okolními horkými předměty [2].

Proudění nucené je vyvoláno uměle pomocí ventilátorů nebo čerpadel, které způsobují umělé rozdíly tlaku v tekutině [2].

Dále dělíme proudění v kapalině na laminární a turbulentní.

Při laminárním proudění se částice tekutiny pohybují po navzájem se neprotínajících proudnicích, které sledují tvar obtékaného tělesa. Ve směru kolmém na směr proudění tekutiny se teplo šíří především vedením [2,8].



Při turbulentním proudění se proudnice navzájem protínají, tekutina víří, navzájem se promíchává a výrazně se tak usnadňuje přestup tepla kolmo na směr proudění kapaliny. Turbulence s sebou také strhávají tekutinu v blízkosti stěn obtékaného tělesa a ztenčují tak mezní vrstvu, a tím dále usnadňují chlazení obtékaného tělesa. Nevýhodou turbulentního proudění je, že podstatně zvyšuje tlakové ztráty v chladicí soustavě, s čímž se musí počítat při výběru vhodného ventilátoru nebo čerpadla [2,8].

To, jestli je dané proudění laminární nebo turbulentní, se zjišťuje zvlášť pro volnou a nucenou konvekci (proudění) [2].

Pro volnou konvekci bylo na základě experimentů přibližně určeno, že [2]:

Pokud $Gr * Pr < 10^9$, proudění je laminární.

Pokud $Gr * Pr > 10^9$, proudění je turbulentní.

Kde Gr je Grashoffovo číslo.

Pr je Prandtlovo číslo.

Pro nucenou konvekci podél stěny se usuzuje na typ proudění pomocí velikosti Reynoldsova čísla Re [2]:

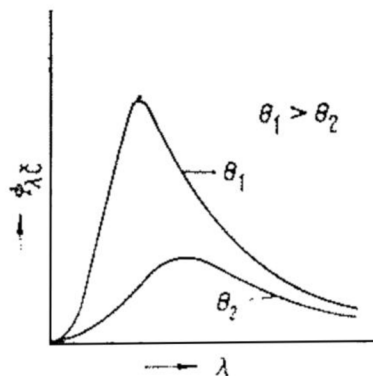
Pokud $Re < 5 * 10^5$, proudění je laminární.

Pokud $Re > 5 * 10^5$, proudění je turbulentní.

1.3.3 Sdílení tepla zářením

Sdílení tepla zářením je spolu s prouděním hlavním mechanismem sdílením tepla v plynech. To, který z těchto mechanismů se v dané situaci uplatní více, záleží na tvaru chlazeného tělesa, jeho teplotě, na materiálu a úpravě jeho povrchu, tlaku prostředí, i na tom jestli je ofukováno. Při volném proudění vzduchu je vliv obou mechanismů přibližně stejně důležitý (a musíme je tak oba brát v potaz), zatímco při chlazení nuceným prouděním je vliv záření zanedbatelný. Naopak pro zařízení pracující za sníženého tlaku nebo ve vakuu je sdílení tepla zářením hlavní, respektive jediný možný mechanismus chlazení elektronických komponent [2].

Všechna tělesa vyzařují do okolí svou tepelnou energii jako tepelné elektromagnetické záření. Těleso, které takto vyzařuje maximum možné tepelné energie, je dokonale černým tělesem. Dokonale černým, protože zároveň absorbuje všechno tepelné záření, které na něj dopadne. Na obr. 1-3 [2] je možné vidět spektrální hustotu zářivého toku dokonale černého tělesa při dvou různých teplotách (značených Θ), přičemž $\Theta_1 > \Theta_2$ [2].



Obrázek 1-3 Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa. Upraveno z [2].

Je možné si všimnout, že s rostoucí teplotou se spektrální hustota záření dokonale černého tělesa zvyšuje, a její maximum se posouvá do kratších vlnových délek [2].

Celkovou úhrnnou energií vyzařovanou tělesem v závislosti na jeho povrchové teplotě popisuje s vysokou přesností Stefan-Boltzmannův zákon. Pro těleso vyzařující ve vakuu platí [3]

$$j_{zt} = \frac{dP}{dS} = A\sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2; \text{W/m}^2; -, \text{W/K}^4 \text{m}^2, \text{K}) \quad (1.5)$$

Kde j_z je plošná hustota zářivého toku (W/m^2)

σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/K}^4 \text{m}^2$

T je termodynamická teplota (K)

A je poměrná pohltivost zářiče, $A \in \langle 0; 1 \rangle$, $A = 1$ pro absolutně černé těleso, pro některé další povrchy nabízí literatura [2] i [3] tabulku hodnot A . (-)

Poměrná pohltivost zářiče A je určena jako podíl pohlceného zářivého toku a celkového na těleso dopadajícího zářivého toku. Je to tedy veličina bezrozměrná. Stejný vztah platí pro vyzařování i pohlcování záření, pro oba děje zůstává stejná i konstanta A [3].

Pro ilustraci, mechanicky leštěný hliník má pohltivost A rovnu přibližně 0,35, zatímco chladič ze stejného hliníku, ale černěného, má pohltivost A rovnu přibližně 0,79-0,94. Prostě černění chladiče zvýší jeho emisivitu až trojnásobně.

Když je těleso obklopeno prostředím o teplotě T_0 , toto prostředí září na těleso teplotním zářením o teplotě T_0 a plošné hustotě [3]:

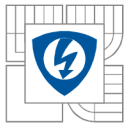
$$j_{vz} = A\sigma T_0^4 \quad (\text{W/m}^2; -, \text{W/K}^4 \text{m}^2, \text{K}) \quad (1.6)$$

Celková plošná hustota zářivého toku, která opustí těleso, je pak rozdíl těchto dílčích veličin [3]:

$$j_z = j_{zt} - j_{vz} = A\sigma T^4 - A\sigma T_0^4 = A\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (\text{W/m}^2; \text{W/m}^2, \text{W/m}^2; -, \text{W/K}^4 \text{m}^2, \text{K}, -, \text{W/K}^4 \text{m}^2, \text{K}; -, \text{W/K}^4 \text{m}^2, \text{K}, \text{K}) \quad (1.7)$$

1.4 Způsoby chlazení výkonových součástek

Tato kapitola porovná možné způsoby chlazení výkonových součástek a jejich schopnosti.



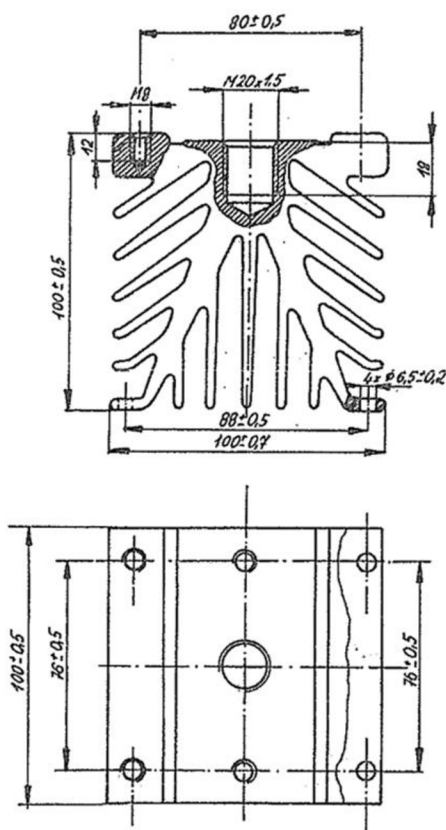
1.4.1 Přirozené chlazení

Na přirozené chlazení se lze spolehnout, pokud je hustota tepelného toku dostatečně nízká, například u napájecích zdrojů pro řídicí desky výkonových měničů apod. Uplatňují se všechny mechanismy sdílení tepla: vedením, zářením i sáláním. Velkou výhodou tohoto řešení je jeho vysoká spolehlivost a nepatrné finanční náklady [2].

I když se součásti chladí přirozeně za každých okolností, při konstrukci zařízení je možné s výhodou využít znalosti o šíření tepla a toto přirozené chlazení zefektivnit. Doporučuje se umisťovat zařízení/součásti tak, aby kolem nich mohl volně proudit okolní vzduch, tedy pokud možno svisle. Dále je žádoucí od sebe co nejlépe tepelně oddělit zařízení s velkým ztrátovým výkonem a zařízení citlivá na změnu své teploty (např. elektrolytické kondenzátory, řídicí procesory). To je provedeno pokud možno co největším oddálením těchto komponent. Pokud to nejde, je možné k jejich tepelnému oddělení použít tepelně izolující materiály. Přílišná aplikace tepelně izolujících materiálů ale může zamezovat efektivnímu chlazení zařízení [2].

V případě, že povrch některých součástí nestačí k odvedení jejich ztrátového výkonu, lze na tyto součásti připevnit chladiče, které zvětší jejich povrch využitelný pro chlazení pomocí proudění a záření [2].

Velikost takového chladiče je však omezena. Důsledkem tepelného odporu materiálu chladiče klesá po délce chladiče jeho oteplení, a tak části chladiče příliš vzdálené od zdroje tepla mají zanedbatelný vliv na chlazení součástí. K dalšímu zvýšení tepelně aktivního povrchu při zachování rozumných vzdáleností, přes které se teplo musí v chladiči šířit, slouží žebrované chladiče, jako ten na obr 1-4 [3], ale i jejich velikost je omezena. U dobře navrženého chladiče pak lze tepelný odpor samotného materiálu chladiče zanedbat, protože je oproti tepelnému odporu na přestupu do vzduchu velice malý [2,3].



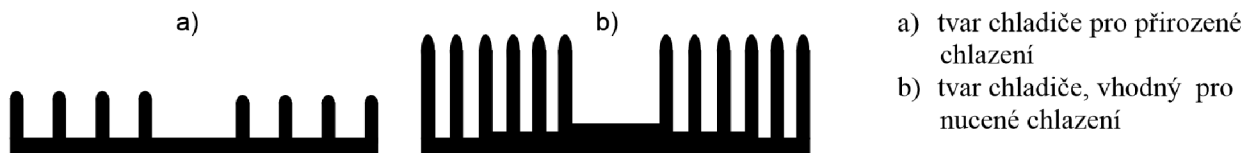
Obrázek 1-4 Příklad žebrovaného chladiče [3].

Každý přidaný chladič také zvyšuje váhu celého zařízení a může zvětšovat jeho rozměry, což je třeba mít na mysli.

Přirozené chlazení je možné využít pro hustotu tepelného výkonu do asi 400 W/m², pro vyšší ztrátové výkony je třeba použít nucené ventilace [2,3].

1.4.2 Chlazení nucenou ventilací

Pro vyšší výkony slouží hluboce žebrovaný chladič spolu s jedním nebo více ventilátory. Uplatňuje se přestup tepla vedením z výkonové součásti do těla chladiče, a pak přestup tepla prouděním z chladiče do jím proudícího vzduchu. Vliv přestupu tepla zářením je zanedbatelný. Chladiče používané pro chlazení nucenou ventilací mají jiný profil než chladiče používané pro chlazení přirozené. Mají více žeber, která jsou delší a umístěná blíže k sobě, jak ukazuje obr. 1-5 [9] [2,3].



Obrázek 1-5 Rozdíl mezi chladičem pro přirozené a nucené chlazení [9].

Chlazení nucenou ventilací dokáže odvést ztrátový výkon až 1500 W [3].

K vytvoření nuceného proudění se používají ventilátory nebo čerpadla. Tyto pohyblivé součásti se mohou porouchat, a také snižují účinnost celého zařízení, což je podstatný faktor

zejména u zařízení v energetice. Dalším omezujícím faktorem při použití ventilátorů může být hlučnost, protože se zvyšováním rychlosti proudícího vzduchu rychle roste hlučnost celého chladicího systému [2].

1.4.3 Kapalinové chlazení

V případech, kdy ztrátové teplo překročí asi 1,5 kW, lze zvýšit množství odvedeného tepla změnou chladicího média [2,3].

Tabulka 1-1 Porovnání chladicích médií [2, 10]

Materiál	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	c_{ob} [kJ/m ³ K]
Vzduch (na hladině moře, 20°C)	1013	1,28	1,3
Voda (destilovaná)	4180	1000	4180
Freon typ E-2	1030	1700	1751

Kde:

$$c_{ob} = c * \rho \quad (\text{J/m}^3\text{K}; \text{J/kgK}, \text{kg/m}^3) \quad (1.8)$$

Kde: c je měrná tepelná kapacita [J/kgK]

ρ je hustota [kg/m³]

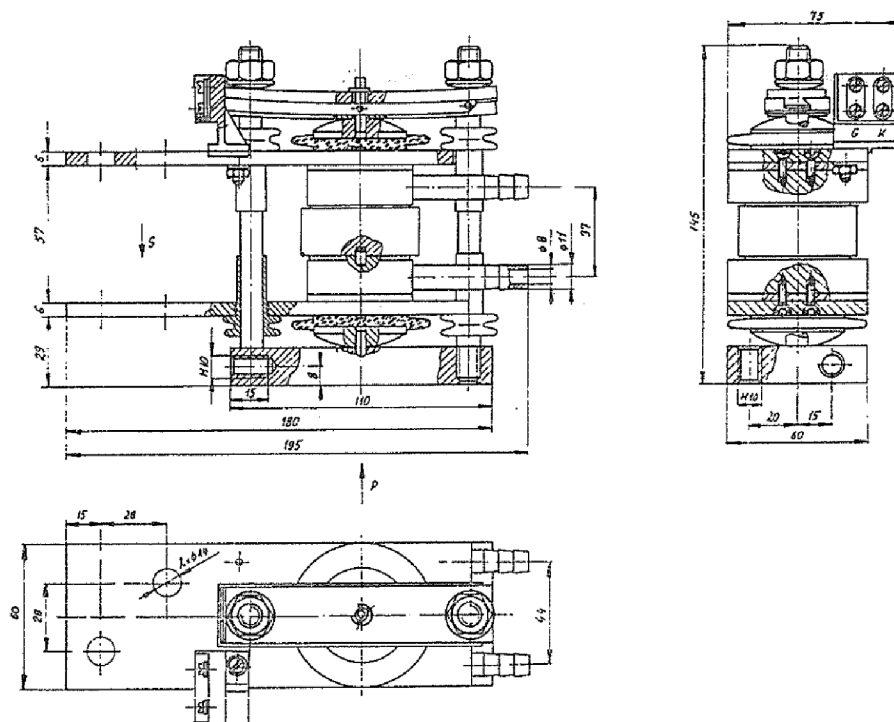
c_{ob} je měrná objemová tepelná kapacita [J/m³K]

Pro výběr vhodného chladicího média je třeba vzít v úvahu mnoho různých vlastností, pro ilustraci postačí porovnat objemovou tepelnou kapacitu vzduchu, vody a freonu. Je zřejmé, že při chlazení nucenou konvekcí jsou kapaliny s vhodnými vlastnostmi mnohem příhodnější než vzduch. Systémy kapalinového chlazení pracují zpravidla jako uzavřené systémy, kdy kapalina u zdroje tepla přijme teplo, pak ho v chladiči odevzdá okolnímu vzduchu a znovu se vrací ke zdroji tepla [2,3,8].

Kapalinové chlazení se dělí na přímé a nepřímé [2].

Při přímém chlazení jsou chlazené součásti přímo ponořené v chladicí kapalině, teplo přestupuje ze součástí přímo do chladicí kapaliny a ta jej prouděním odvádí do tepelného výměníku a ven ze soustavy. Systém může pracovat s přirozeným i nuceným prouděním. Tento způsob chlazení klade extrémní nároky na kvality chladicí kapaliny. Ta musí mít výborné vlastnosti elektrické (velká elektrická pevnost, velký odpor, malé dielektrické ztráty, malá dielektrická konstanta), tepelné (velký součinitel tepelné roztažnosti, malá viskozita a malé povrchové napětí), i chemické (nereaguje s kovy, neslučuje s nimi, nerozpouští materiály na bázi polymerů). Tento způsob také zásadně znesnadňuje demontáž chlazeného zařízení či jakýkoliv přístup k němu. Využití kapaliny s dobrými dielektrickými vlastnosti, jako je freon, ale umožňuje zkrátit izolační vzdálenosti a dále miniaturizovat zařízení. V případě většího chlazeného objemu může chlazení vyžadovat poměrně velké množství chladicí kapaliny, což zvětšuje hmotnost celého řešení a může podstatně zvýšit i jeho cenu. Tento způsob chlazení se u výkonových měničů neuplatňuje. [2,8].

Nepřímé chlazení využívá kovový chladič, na který je chlazená součást připevněna, a ve kterém proudí chladicí kapalina, jak ukazuje obr. 1-6 [3]. Jedná se zpravidla o systém s nuceným prouděním. Umožňuje používat i chladicí kapaliny s nepříliš dobrými elektrickými vlastnostmi, jako je například voda. Je však vždy třeba volit vhodnou kombinaci materiálu chladiče a chladicí kapaliny, aby nedocházelo k jejich vzájemným chemickým reakcím. V případě poruchy chlazené součásti ji můžeme vyměnit, aniž by bylo třeba rozebrat chladicí systém. Přidání kovového chladiče ale zvyšuje celkový tepelný odpor celé soustavy. Pokud bylo v případě chlazení nucenou ventilací možné tepelný odpor materiálu chladiče zanedbat, v tomto případě tomu tak není. Díky výborným tepelným vlastnostem použitých chladicích kapalin bývá tepelný odpor vlastní masy chladiče (a styčné plochy mezi výkonovou součástí a chladičem) větší než tepelný odpor při samotném přechodu tepla do chladicí kapaliny [2,3].



Obrázek 1-6 Příklad nepřímého kapalinového chlazení [3].

Nevýhodou kapalinového chlazení je poměrně velká složitost celého systému, počet komponent a prostorové nároky na chladič pro ochlazování chladicí kapaliny. Je zde také hrozba úniků chladicí kapaliny, která může ohrozit provozované zařízení (voda) nebo životní prostředí (freony). Chladicí kapaliny také mají tepelnou roztažnost, což vyžaduje kompenzátor objemu, který bude zároveň pokrývat možné úniky chladiva. Celkově se tedy jedná o složitý systém sestávající se z mnoha komponent. Platí pravidlo, že chladicí systém musí pracovat alespoň s takovou spolehlivostí jako součást, kterou chladí. To klade poměrně velké nároky na spolehlivost všech použitých komponent, zejména pak na čerpadlo [2].

1.4.4 Chlazení bublinovým varem

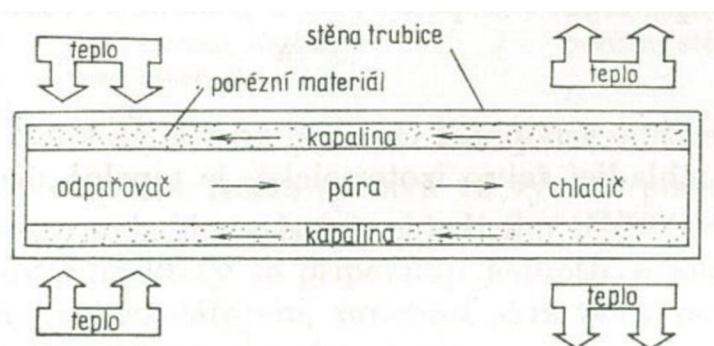
Chlazení bublinovým varem využívá skutečnosti, že při změně skupenství dochází k absorpci, případně uvolnění energie. Chladicí systém je poměrně podobný systému pro běžné kapalinové chlazení. Jako chladicí médium se používá látka s vhodně zvolenou teplotou varu a co největším skupenským teplem varu. Tato kapalina přejímá od chlazené součásti ztrátové teplo,

vypařuje se a produkuje bublinky. Tyto bublinky pak v chladiči předávají teplo okolnímu vzduchu (nebo sekundární kapalině), kondenzují a vrací se zpět do oběhu [2,8].

Výhodou tohoto způsobu chlazení je, že dokáže i při poměrně velkých změnách ztrátového výkonu udržet chlazenou součást na konstantní teplotě, která je určena výběrem chladicího média. Může tak sloužit ke chlazení součástek, které jsou velmi citlivé na změnu své teploty. Chlazení bublinovým varem se opět dělí na přímé, s přirozeným prouděním, a nepřímé, s nuceným prouděním. Výhody a nevýhody, respektive rozdíly mezi těmito řešeními zůstávají stejné jako u kapalinového chlazení.

1.4.5 Tepelné trubice

Tepelná trubice je tvořena dutou, na obou koncích uzavřenou trubicí, která obsahuje těkavou látku. Stěny trubice jsou pokryty porézní látkou. Princip funkce tepelné trubice ukazuje obr. 1-7 [8].



Obrázek 1-7 Princip funkce tepelné trubice [2].

Na horkém konci trubice se kapalina vypařuje, putuje středem trubice na její studený konec, kde kondenzuje, a pak se prostřednictvím porézní látky vrací po stěnách trubice. Trubice díky kapilární vztlakovosti v porézním materiálu pracuje ve všech polohách. Nejlépe pracuje v tzv. gravitační poloze, kdy je umístěna svisle, s horkým koncem dole a studeným nahoře. V této poloze působí gravitační a kapilární síly ve stejném směru a trubice tak pracuje nejefektivněji. Naopak nejméně efektivní je práce trubice v antigravitační poloze, tj. ve svislé poloze, kde horký konec je nahoře a chladný konec je dole.

Další kapitola se bude zabývat samotným měničem M50, popíše jeho dispozici, systém chlazení a rozložení ztrát v měniči.

2 STRÍDAČ M50

Měnič M50, výrobce ELCOM, a.s. je třífázový střídač pro síť TN-S 230 V, 50 Hz se jmenovitým výkonem 10 kVA [11].

Vstupní napětí:

- Stejnoseměrný meziobvod 220 V (síť IT) [11].
- Stejnoseměrné pomocné napětí 24 V [11].

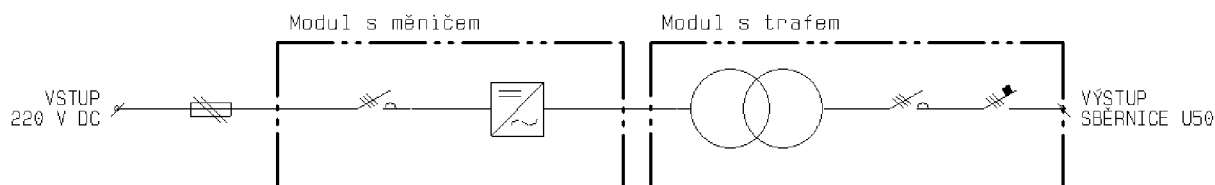
Je požadována EMC na úrovni měniče, což klade zvláštní nároky na systém chlazení, protože je třeba omezit velikost děr, aby bylo minimalizováno rušení vyzářené skrze chladicí otvory [11].

Prostředí, ve kterém bude střídač pracovat, lze charakterizovat takto [11]:

Teplota v rozmezí klimatické třídy T1	0 až 45 °C
Nadmořská výška – provoz ve třídě A1	do 1000 m n. m.
Provoz s redukováným výkonem ve třídě A2	do 1400 m n. m.
Relativní vlhkost	15 až 85 %
Absolutní vlhkost	0,55 až 18,4 g/m ³

2.1 Popis funkce měniče

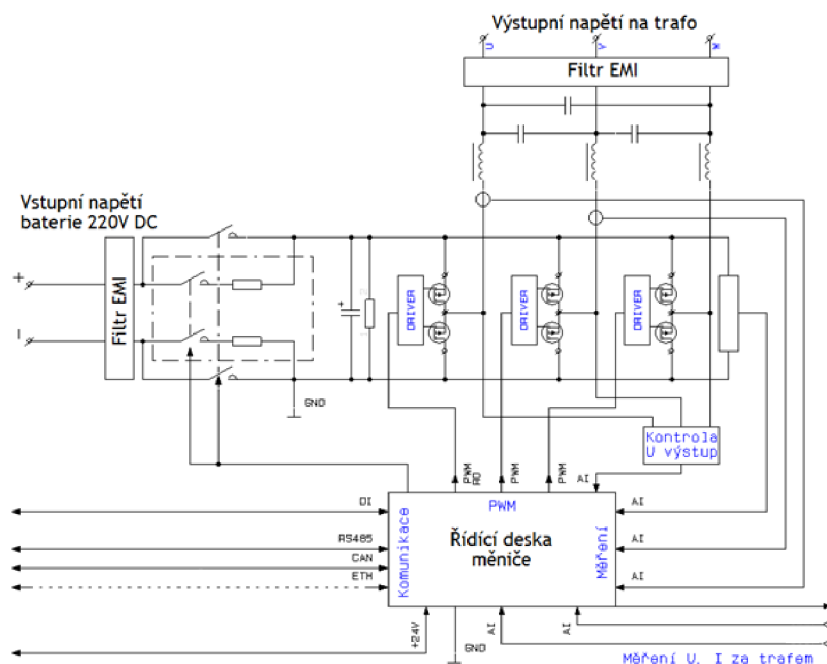
Princip funkce měniče M50 je zřejmý z obr. 2-1 [11]:



Obrázek 2-1 Blokové schéma měniče M50 spolu se síťovým transformátorem [11].

Měnič je napájen ze stejnosměrného meziobvodu a pracuje do výstupní sběrnice přes síťový transformátor. Síťový transformátor je umístěn v samostatném modulu, a tak se jím tato práce nebude zabývat [11].

Schéma zapojení měniče lze vidět obr. 2-2 [11]. Za vstupním konektorem je zapojen EMI filtr, který zabraňuje šíření rušení do meziobvodu. Za filtrem je stykač spolu s nabíjecím odporem a jeho stykačem. Za nimi jsou kondenzátory meziobvodu a za nimi je šestimůstkový, třífázový, čtyřkvadrantový měnič. Na výstupu z měniče je sinusový filtr, složený z třífázové tlumivky a kondenzátorů, který vyhlazuje napětí a proud z PWM o frekvenci 18 kHz na sinusový průběh. Před výstupním konektorem je zapojen výstupní EMI filtr, který chrání výstupní síť před šířením rušení [11].



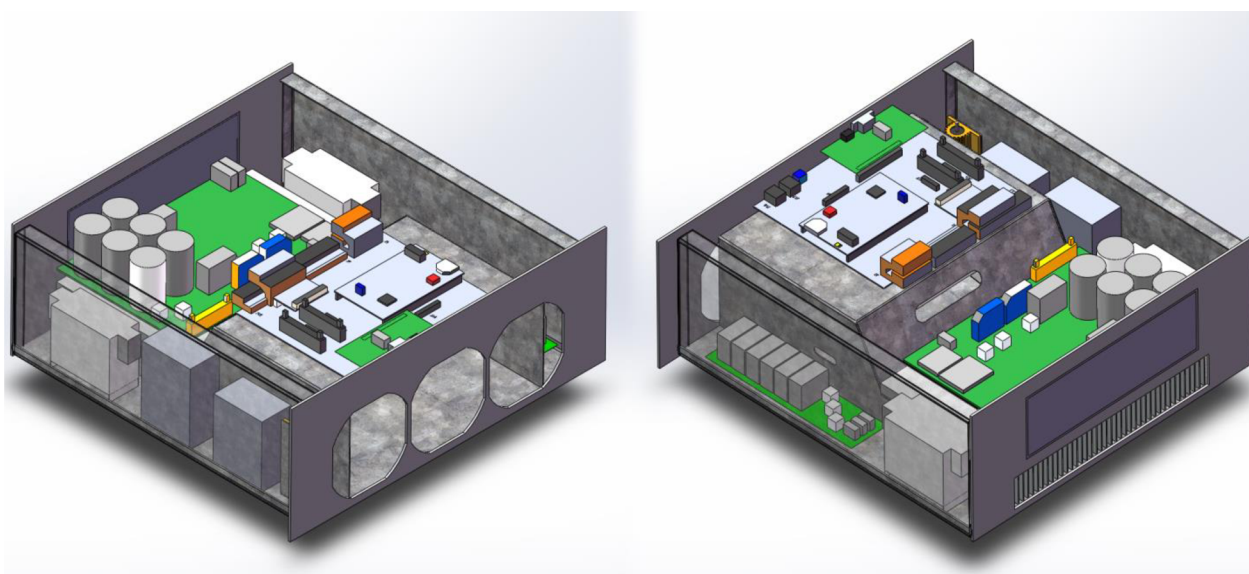
Obrázek 2-2 Zapojení měniče M50. Upraveno z [11].

2.2 Dispozice měniče

Vnější rozměry modulu měniče jsou 496 x 482,6 x 177 mm

Vnitřní využitelné rozměry jsou 450 x 425 x 169,19 mm

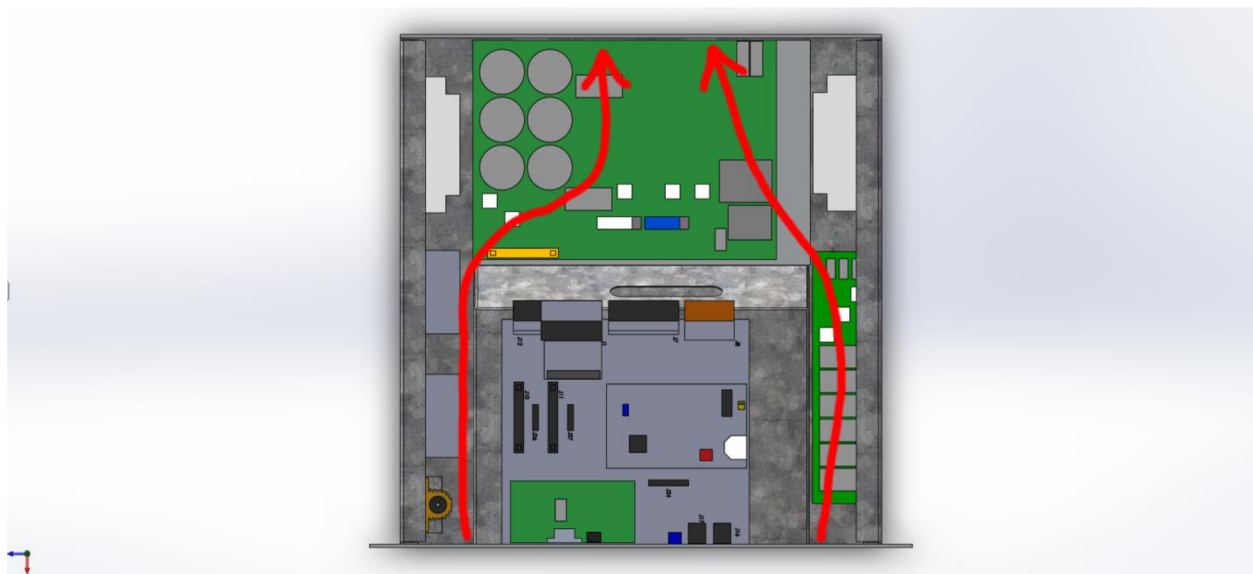
Měnič je koncipován jako samostatný modul, který se jako celek zasouvá a vysouvá z rozváděče. Používá chlazení nucenou ventilací, kterou zajišťují tři axiální ventilátory na přední straně měniče (ventilátory nejsou v modelu pro simulaci vymodelovány). Výkonový tranzistorový modul je umístěn na chladiči, který je profukován vzduchem z těchto ventilátorů, zbytek součástí se chladí svým vlastním povrchem. Celkový pohled na měnič (bez horního krytu) ukazuje obr. 2-3.



Obrázek 2-3 Dispozice měniče M50.

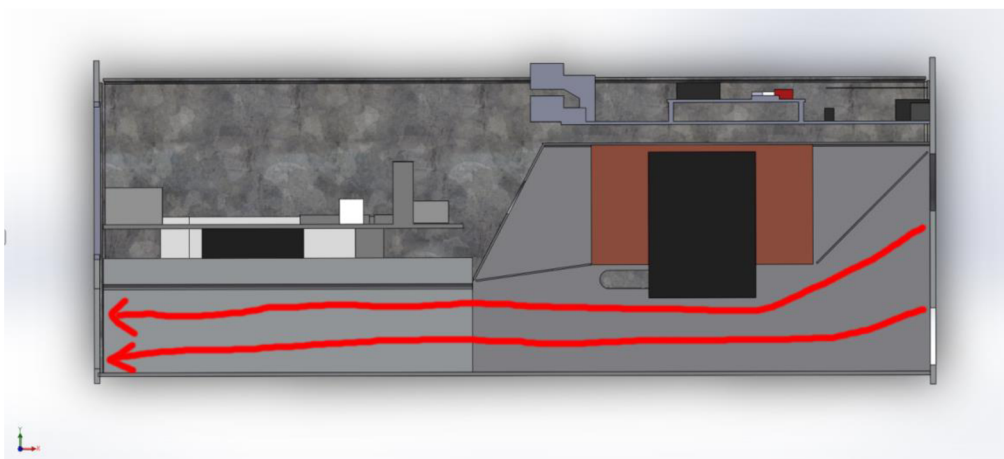
Z hlediska chlazení lze měnič dispozičně rozdělit na dvě části. První část, ventilační tunel prochází přibližně prostředkem měniče, jeho první polovina se sestává z konstrukčních plechů, ve kterých je upevněna tlumivka třífázového filtru, a druhá polovina je tvořena samotným chladičem výkonového modulu. Zbytek měniče tvoří druhou část.

Chladicí vzduch ze tří ventilátorů je rozdělen tak, aby malá část vzduchu z krajních ventilátorů mījela ventilační tunel, procházela měničem, chladila součásti ve zbytku měniče (včetně stykačů, kondenzátorů meziobvodu a kondenzátorů sinusového filtru), a poté vycházela perforovanými zády modulu ven. Odhad směru proudění vzduchu naznačuje obr. 2-4.



Obrázek 2-4 Odhad směru proudění vzduchu v měniči.

Většina ventilačního vzduchu ale vstupuje do ventilačního tunelu, jehož světlá výška se okamžitě začne pod úhlem 45° snižovat ze 120 mm na 60 mm. Vzduch poté mījí tlumivku sinusového filtru a ochlazuje ji. V okolí tlumivky jsou v tunelu dvě díry pro vstupní a výstupní vodiče tlumivky. Těmito dírami část vzduchu uniká. Ztráty vzduchu boční stěnou jsou nežádoucí a měly by být co nejmenší. Zato vzduch, který opustí tunel v části mezi tlumivkou a chladičem, je třeba využít pro dodatečné ofukování desky měniče včetně budičů a kondenzátorů meziobvodu. Vzduch ve ventilačním tunelu pak prochází chladičem výkonového modulu a opouští modul. Odhad směru proudění vzduchu uvnitř ventilačního tunelu naznačuje obr. 2-5



Obrázek 2-5 Odhad směru proudění vzduchu ve ventilačním tunelu (podélný řez tunelem).

2.3 Rozložení tepelných ztrát v měniči

Ztráty v modulu měniče jsou rozloženy následovně, jak ukazuje obr. 2-6:



Obrázek 2-6 Rozložení ztrát na součástech v měniči

1. Ztráty na výkonovém tranzistorovém modulu (modul je skrytý pod deskou měniče).
2. Ztráty na tlumivce sinusového filtru (tlumivka je skrytá pod řídicím systémem a plechem ventilačního tunelu).

Ostatní ztráty byly zanedbány.

2.3.1 Ztráty na výkonovém tranzistorovém modulu

Ztráty na výkonovém modulu jsou tvořeny ztrátami vedením a ztrátami spínacími. Každá větev se sestává ze spínacího tranzistoru IGBT a nulové diody. Každý z těchto prvků vykazuje oba druhy ztrát. Celkové ztráty pak jsou tvořeny sumou obou druhů ztrát na všech výkonových součástkách v modulu.

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{T,sp} + \Delta P_{T,ved} + \Delta P_{D,sp} + \Delta P_{D,ved} \quad (W;W,W,W,W) \quad (2.1)$$

Kde: ΔP_{celk} jsou celkové ztráty na výkonovém modulu.

$\Delta P_{T,sp}$ jsou spínací ztráty na tranzistorech.

$\Delta P_{T,ved}$ jsou ztráty vedením na tranzistorech.

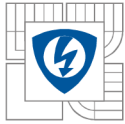
$\Delta P_{D,sp}$ jsou spínací ztráty na nulových diodách.

$\Delta P_{D,ved}$ jsou ztráty vedením na nulových diodách.

K výpočtu jednotlivých druhů ztrát slouží výpočetní software dodaný výrobcem modulu. Ten určil pro dané napětí meziobvodu, proud tranzistorem, spínací kmitočet PWM a účinník následující ztráty [11]:

Tabulka 2-1 Ztráty na jednotlivých součástech ve výkonovém modulu [11].

$\Delta P_{T,sp}$ [W]	$\Delta P_{T,ved}$ [W]	$\Delta P_{D,sp}$ [W]	$\Delta P_{D,ved}$ [W]	ΔP_{celkem} [W]
195,48	138,66	76,2	29,1	439,38



2.3.2 Ztráty na tlumivce sinusového filtru

Ztráty na tlumivce sinusového filtru jsou dvojího druhu, jsou to Joulovy ztráty ve vinutí a ztráty v jádru. U použité tlumivky činí při nominálním zatížení ztráty v jádru asi 54 W, zatímco ztráty ve vinutí činí asi 78 W. Celkové ztráty činí 132 W [11].

3 3D MODEL MĚNIČE M50

V 3D CAD systému Solidworks byl vytvořen 3D model měniče M50. Při tvorbě modelu nebyla prioritou dokonalá věrnost realitě. Model byl naopak zjednodušen, aby se zjednodušily potřebné výpočty při simulaci oteplení. Součásti nacházející se ve ventilačním tunelu byly však zjednodušeny co nejméně, aby se minimalizovala chyba výpočtu v oblastech, které mají na výsledek největší vliv.

3.1 Přijatá zjednodušení

V modelu nejsou žádné montážní otvory, žádné šrouby ani nýty. Montážní plechy mají lemy, pouze pokud zasahují do proudění vzduchu v měniči. Součásti jsou modelovány jako jednoduché pravoúhlé tvary bez zaoblení, pokud se nenachází přímo ve ventilačním tunelu. Složité tvary, jako např. svorkovnice na EMI filtrech a stykače jsou vymodelovány jako jednoduché kvádry.

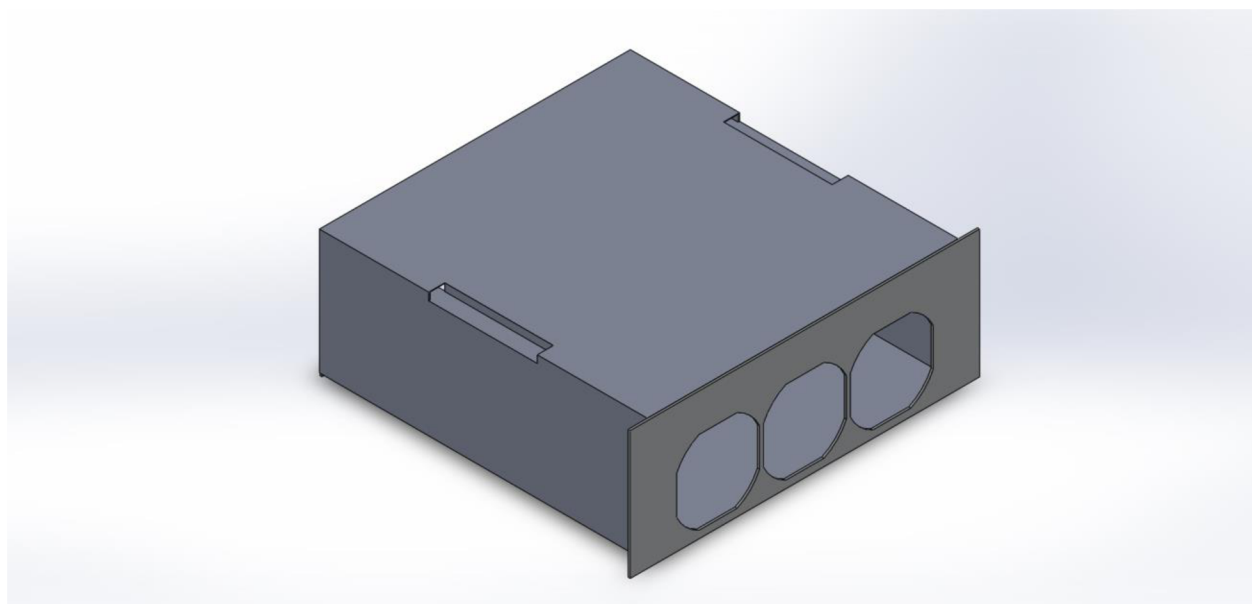
Nejvíce jsou zjednodušeny desky plošných spojů (DPS) měniče (na chladiči, nad výkonovým modulem) a řídicí systém (na ventilačním tunelu). Vymodelovány jsou pouze součástky větších rozměrů, které mají nezanedbatelný vliv na proudění vzduchu v měniči.

Tato zjednodušení umožnila provedení výpočtů simulace proudění vzduchu v měniči za přijatelný strojní čas. Zároveň však byla dodržena dostatečná přesnost simulace.

3.2 Výsledný model

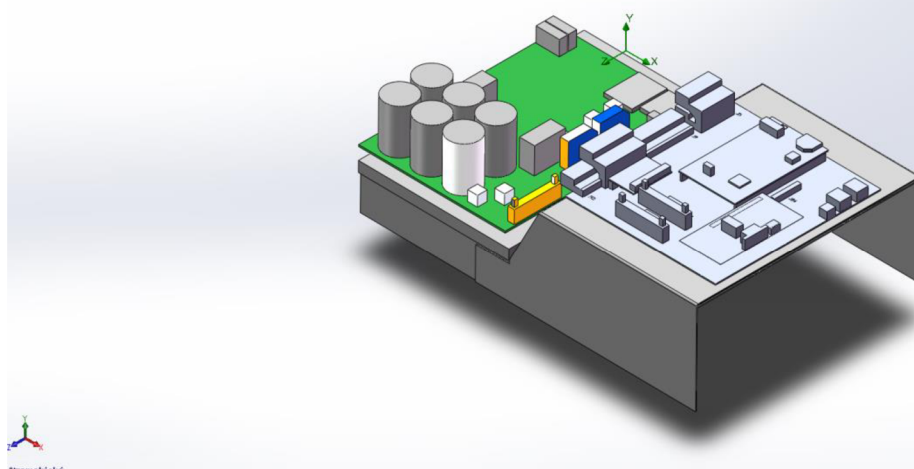
Výsledná sestava je tvořena dvěma podsestavami a volně vloženými součástmi.

První podsestava je tzv. šuplík měniče, což jsou konstrukční plechy, které tvoří samotný „obal“ modulu měniče, tj. čelní panel, zadní panel, boční panely, panel dna a kryt měniče, jak ukazuje obr. 3-1.



Obrázek 3-1 Model šuplíku měniče M50.

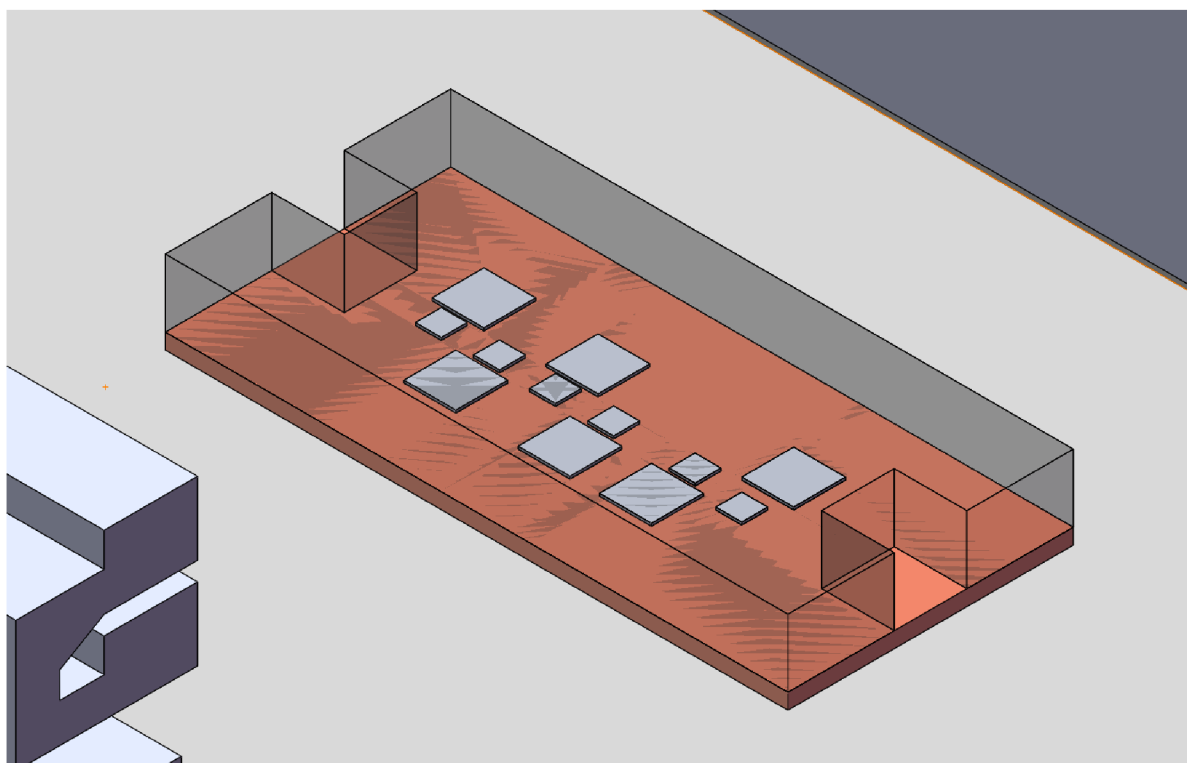
Druhá podsestava obsahuje ventilační tunel spolu s výkonovým modulem, jeho DPS a chladičem, sinusovou tlumivkou ukrytou ve ventilačním tunelu a řídicím systémem umístěným na ventilačním tunelu, jak ukazuje obr. 3-2.



Obrázek 3-2 Ventilační tunel měniče M50

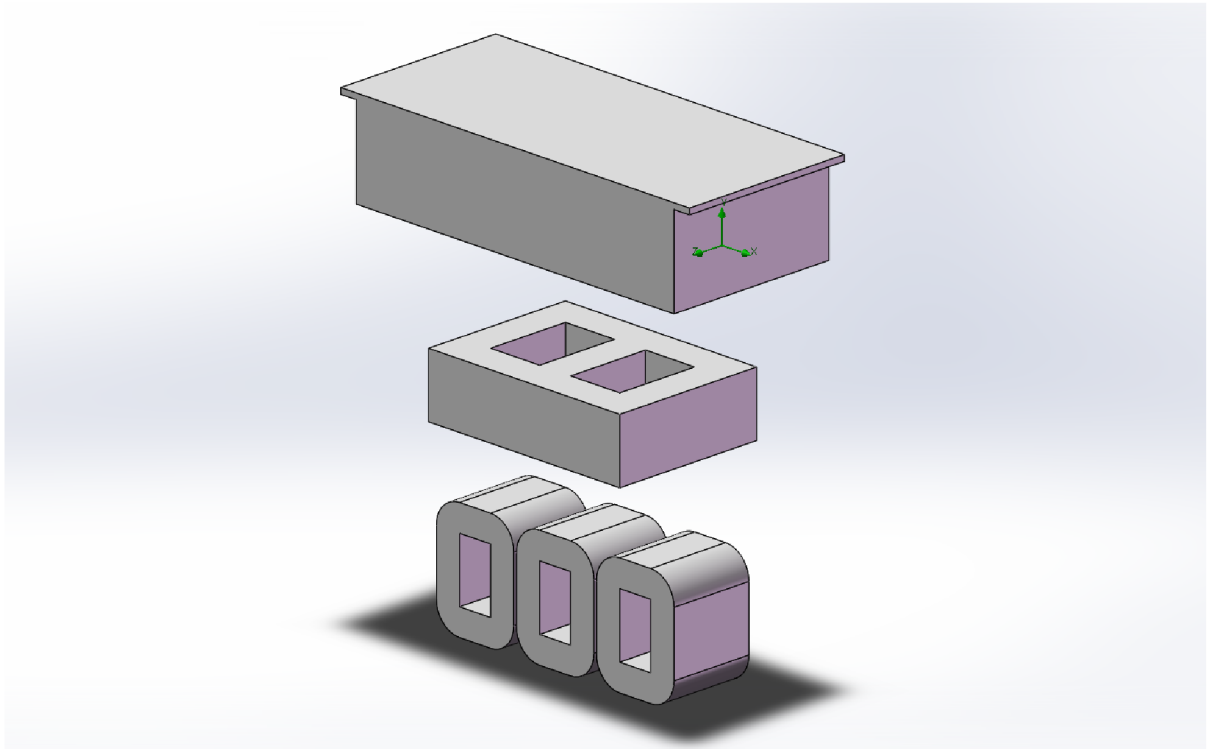
Kromě těchto podsestav se v sestavě nachází ještě vstupní a výstupní EMI filtry (po každé straně chladiče jeden), stykače, nabíjecí odpor a deska s kondenzátory sinusového filtru. Výsledný model sestavy měniče i s těmito součástmi lze vidět na obr. 2-3 a 2-6.

Naopak do detailů byl vymodelován použitý výkonový modul a tlumivka sinusového filtru. Z podkladů výrobce výkonového modulu bylo zjištěno umístění jednotlivých čipů na základně pouzdra výkonového modulu. Plocha každého čipu tranzistoru byla odhadnuta na 100 mm^2 , plocha každé diody byla odhadnuta na 25 mm^2 . Modul byl vymodelován jako měděná základna, na které jsou umístěny jednotlivé křemíkové čipy o tloušťce 0,5 mm. Modul uzavírá plastový kryt. Výsledný model výkonového modulu je na obr. 3-3.



Obrázek 3-3 Zjednodušený model výkonového modulu, kryt je zprůhledněný.

Tlumivka v modelu se skládá ze tří částí. Je to vinutí, železné jádro a pouzdro s epoxidovým vylitím. Rozložený pohled na tlumivku je na obr. 3-4.



Obrázek 3-4 Rozložený pohled na tlumivku sinusového filtru

4 TEPLOTNÍ SIMULACE MĚNIČE M50

Solidworks Flow simulation používá k simulaci proudění vzduchu a tepelné energie metodu konečných objemů (MKO), která používá kartézský systém souřadnic, ve kterém je prostor rozdělen na množství kvádrů (buněk), pro které se řeší systém Navierových-Stokesových rovnic. Je to metoda konzervativní, kdy tok vystupující z jedné buňky jednou její stěnou musí být roven toku, který touto stěnou vstupuje do buňky sousední [12,13].

Flow simulation nejdříve rozdělí zkoumaný prostor na základní síť buněk, kterou pak podle vlastních obrysů daného zkoumaného tělesa zjemňuje, aby zajistil dostatečnou přesnost výpočtu. Rozdělením prostoru modelu na 3D síť na sebe navazujících buněk dostáváme tři druhy buněk, a to buňky vyplněné tekutinou, buňky vyplněné pevnou látkou a buňky rozdělené. Pro ty poslední přijímá Flow simulation speciální opatření, která zajistí přesnost výpočtu i v těchto buňkách [12].

MKO se hodí pro zkoumání toků látek a energií, a proto se využívá ve většině systémů CFD (computational fluid dynamics, výpočty dynamiky tekutin), včetně Solidworks Flow Simulation [12,13].

Tato kapitola popisuje provedení teplotní simulace měniče M50.

4.1 Vstupní podmínky

Pro analýzu měniče byla použita analýza vnitřního proudění. Ta vyžaduje kompletně uzavřenou geometrii, ale model měniče M50, jak lze vidět z předchozích obrázků, uzavřený nebyl. Bylo tedy třeba vyplnit otvory v geometrii. Flow Simulation nabízí nástroj pro zakrytí rovinných otvorů, který byl použit pro vyplnění otvorů v čelním panelu a zadním panelu. Otvory v krytu měniče nejsou rovinné, a proto bylo potřeba pro ně vymodelovat zvláštní ucpávky. Tímto je geometrie měniče uzavřena.

V dalším kroku byly nadefinovány okrajové podmínky, tj. podmínky na vstupech a výstupech vzduchu do a z měniče. Výstupům byl přiřazen atmosférický tlak, do kterého měnič chladicí vzduch vyfukuje. Každému vstupu byl přiřazen ventilátor značky NMB typu, který je v měniči použit. Tento typ ale není obsažen v databázi ventilátorů Flow Simulation, a musel tedy být do této databáze přidán podle datového listu od výrobce. Ventilátorová křivka z datového listu byla převedena do tabulky použitelné pro Flow Simulation pomocí freeware Plot Digitizer. Flow simulation najde pro každý ventilátor pracovní bod na jeho křivce, a bude simulovat také rotaci vystupujícího vzduchu danou principem funkce axiálního ventilátoru [11,14,15].

Dále byl potřeba vyřešit problém perforace zad měniče. Měnič má v zadním plechu velkou obdélníkovou díru, která navazuje na ventilační tunel, a která je vymodelována. Kromě ní je v zádech měniče 15 vodorovných drážek o rozměrech 50x4 mm, kterými z měniče odchází vzduch, který při vstupu mine ventilační tunel a chladí zbytek měniče. Pro popsání těchto drážek pro účely simulace byla do zad měniče vyříznuta větší díra, která zabírá celou plochu obsazenou dírami. Na ucpávku, která tuto díru zakrývá, byla použita funkce Perforovaný plech. Tato funkce umožňuje simulovat složité perforovaný plech, aniž by musel být vymodelován a pokryt složitou výpočetní sítí.

Tímto byly okrajové podmínky nadefinovány. Poté byly do modelu umístěny zdroje ztrátového tepla, zjištěné v kapitole 2.3. Ztráty na výkonovém modulu byly umístěny do samotných čipů, ztráty na tlumivce byly umístěny do vinutí, respektive železného jádra.

Dále bylo třeba nadefinovat tepelné odpory mezi jednotlivými součástmi uvnitř výkonového modulu a mezi modulem a jeho chladičem. Hodnoty těchto odporů získané od výrobce modulu jsou udány v jednotkách $K * W^{-1}$, tedy už berou v úvahu velikost styčné plochy. Solidworks Flow Simulation umožňuje zadat tepelný odpor na styčné ploše v jednotce $K * m^2 * W^{-1}$, tedy ještě bez vlivu velikosti styčné plochy. Pro zadání do Flow Simulation tedy bylo třeba hodnoty odporů přepočítat:

$$R_{th} = R_{th,S} * S_{th} \quad (Km^2/W; K/W, m^2) \quad (4.1)$$

Kde R_{th} je tepelný odpor pro zadání do Flow simulation, který neuvažuje velikost styčné plochy.

$R_{th,S}$ je hodnota tepelného odporu získaná od výrobce, vztažená na danou styčnou plochu.

S_{th} je velikost styčné plochy, tedy plochy použité pro sdílení tepla.

Hodnoty odporů od výrobce a velikosti styčných ploch v modelu udává tabulka 4-1 [11]:

Tabulka 4-1 Hodnoty pro přepočet tepelných odporů

Význam	Značení	Hodnota
Odpor čip-pouzdro pro čip IGBT	$R_{th,j-c,IGBT,S} [K/W]$	0,25
Odpor čip-pouzdro pro čip diody	$R_{th,j-c,FWDi,S} [K/W]$	0,41
Odpor pouzdro-chladič	$R_{th,c-h,S} [K/W]$	0,038
Plocha čipu IGBT	$S_{th,IGBT} [mm^2]$	100
Plocha čipu diody	$S_{th,FWDi} [mm^2]$	25
Plocha základny modulu	$S_{th,modul} [mm^2]$	6600

Dosazení do vzorce pro přepočet tepelného odporu pro čip IGBT, čip diody a základnu modulu:

$$R_{th,j-c,IGBT} = R_{th,j-c,IGBT,S} * S_{th,IGBT} = 0,25 * 100 * 10^{-6} = \underline{2,5 * 10^{-5} Km^2W^{-1}} \quad (4.2)$$

$$R_{th,j-c,FWDi} = R_{th,j-c,FWDi,S} * S_{th,FWDi} = 0,41 * 25 * 10^{-6} = \underline{1,025 * 10^{-5} Km^2W^{-1}} \quad (4.3)$$

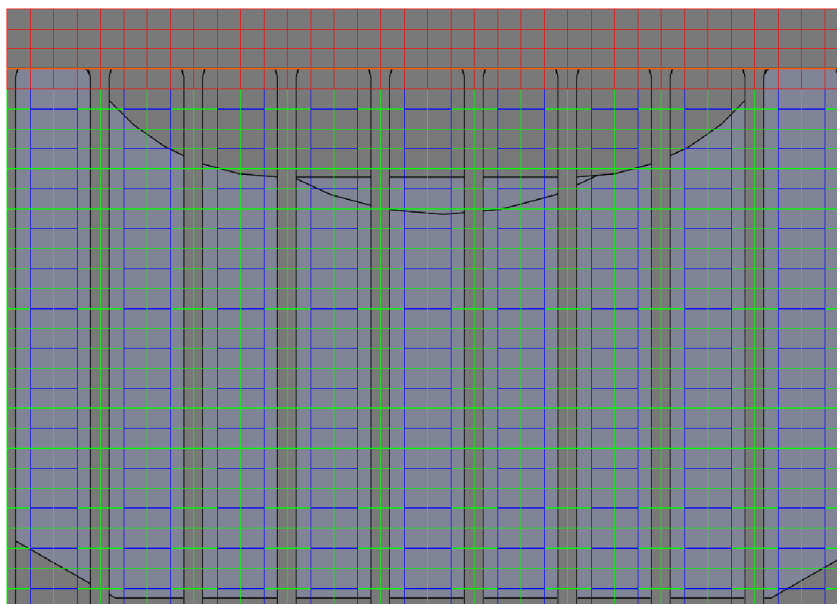
$$R_{th,c-h} = R_{th,c-h} * S_{th,modul} = 0,038 * 6600 * 10^{-6} = \underline{2,508 * 10^{-4} Km^2W^{-1}} \quad (4.4)$$

Vypočtené velikosti tepelných odporů byly zadány do Flow Simulation a přiděleny jednotlivým styčným plochám. Dále byl povrchu tlumivky, který je ofukován vzduchem ve ventilačním tunelu, přidělen tepelný odpor 1 mm epoxidu, kterým je tlumivka ve skutečnosti potažena.

Dále bylo třeba přiřadit všem prvkům v modelu materiál. Přednímu a zadnímu panelu šasi, chladiči a vybíjecímu odporu byl přiřazen materiál hliník. Plechům ventilačního tunelu, jádru tlumivky a ostatním plechům šasi byl přiřazen materiál ocel. Vinutí tlumivky, základně výkonového modulu a EMI filtrům byl přiřazen materiál měď. Výplň tlumivky, pouzdrů výkonového modulu a řídicím deskám byl přiřazen materiál epoxid.

4.2 Výpočetní síť a výpočet

Obecně platí, že čím jemnější je výpočetní síť, tím přesnější je simulace a zároveň o to déle trvá výpočet. Kvůli optimalizaci doby výpočtu a přesnosti řešení byla výpočetní síť určena manuálně. V oblasti chladiče byla síť nadefinována tak, aby bylo každé žebro chladiče uprostřed rozděleno mezi dvě buňky výpočetní sítě. Každá drážka mezi dvěma žebry chladiče je tak řešena se stejnou přesností. Zachycení části chladiče výpočetní ukazuje obr. 4-1. Dále byla oblast výkonového modulu a těla chladiče pod ním řešena s větší přesností než zbytek modelu, aby byly dobře zachyceny velké změny teploty v této oblasti.



Obrázek 4-1 Zachycení části chladiče výpočetní sítí

Výpočetní síť pro základní variantu se skládá z 139142 buněk vyplněných pevným materiálem, 87083 buněk vyplněných vzduchem a 201559 buněk na rozhraní pevného tělesa a vzduchu. Celkem má výpočetní síť 427784 buněk.

4.3 Výsledky simulace původního stavu

První byla vytvořena simulace v základním stavu při teplotě okolí 45 °C. Tato teplota odpovídá maximální provozní teplotě uvedené v dokumentaci měniče M50 [11].

Tabulka 4-2 uvádí některé z výsledných sledovaných hodnot. Teploty čipů tranzistorů a diod nepřesahují povolenou hodnotu 125 °C, teplota vinutí tlumivky nepřesahuje povolenou hodnotu 155 °C. Jednotlivé ventilátory pracují s lehce odlišným průtokem. Chladicí vzduch se rozděluje mezi chladič a zbytek měniče přibližně v poměru 3:1. Rozdíl mezi nejvyššími a nejnižšími teplotami na čipech výkonového modulu je poměrně velký, asi 25 °C, zato rozdíl mezi nejvyššími a nejnižšími teplotami na vinutí tlumivky je pouze 4 °C [11].

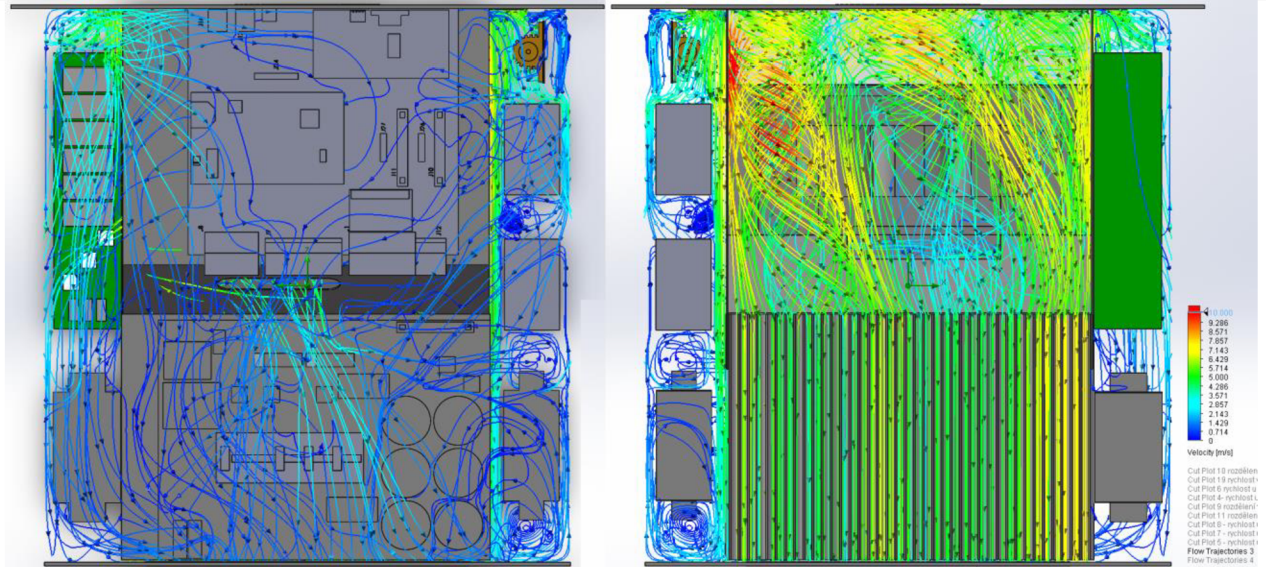
Tabulka 4-2 Číselný výstup ze simulace při 45 °C

Význam	Jednotka	Hodnota
Minimální teplota čipů tranzistorů	[°C]	90,88
Průměrná teplota čipů tranzistorů	[°C]	100,28
Maximální teplota čipů tranzistorů	[°C]	111,73
Minimální teplota čipů diod	[°C]	86,38
Průměrná teplota čipů diod	[°C]	95,32
Maximální teplota čipů diod	[°C]	111,73
Minimální teplota vinutí tlumivky	[°C]	142,71
Průměrná teplota vinutí tlumivky	[°C]	144,99
Maximální teplota vinutí tlumivky	[°C]	146,77
Průtok pravým ventilátorem	[m ³ /s]	0,02929
Průtok prostředním ventilátorem	[m ³ /s]	0,02503
Průtok levým ventilátorem	[m ³ /s]	0,02648
Průtok chladičem	[m ³ /s]	-0,06046
Průtok horními větracími drážkami	[m ³ /s]	-0,01891

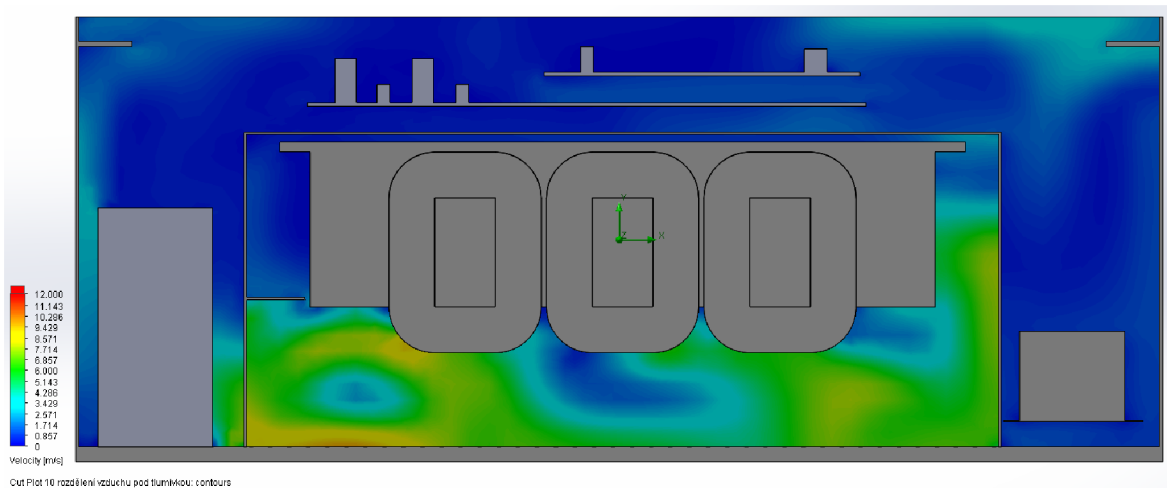
Obrázek 4-2 ukazuje pohled na měnič shora a zespodu se zobrazenými proudnicemi chladicího vzduchu. Proudění v prostoru pod tlumivkou je značně nehomogenní, navíc část vzduchu odchází otvorem vedle tlumivky. Tlumivka je ofukována nerovnoměrně, kdy vnější vinutí jsou ofukována více než vinutí vnitřní, jak ukazuje obrázek 4-3. Z těchto obrázků a obrázku 4-4 si lze povšimnout, že v prostoru mimo ventilační tunel jsou brzdny odpor a stykače ofukovány dostatečně, zatímco na druhé straně nejsou kondenzátory sinusového filtru ofukovány skoro vůbec. Na obrázku 4-5 je zobrazeno rozložení rychlosti vzduchu v chladiči, kde se střídají oblasti s vyšší rychlostí vzduchu s oblastmi s nižší rychlostí vzduchu.

Na obrázku 4-6 vidíme teplotu měniče v řezu prostředkem žebra chladiče. Můžeme si povšimnout, tenká vrstva vzduchu nad tlumivkou, zapříčiněna způsobem montáže tlumivky, od ní účinně tepelně izoluje desku řízení. Dále si na tomto a obrázku 4-7 lze všimnout, že chladič není zcela využit, a to ve všech třech rozměrech. Konce žeber chladiče i celá žebra na okraji plochy chladiče mají teplotu blízkou teplotě okolí. Jejich příspěvek k odvedenému teplu je tedy minimální.

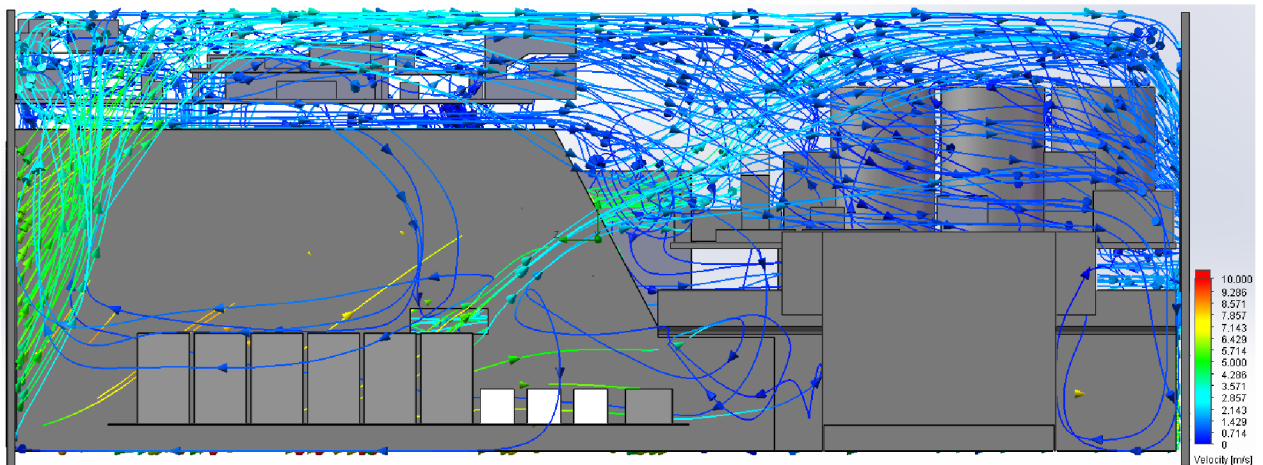
Na obrázku 4-8 vidíme graf závislosti teploty na vzdálenosti od čipu ke konci žebra chladiče. Teploty byly změřeny po přímce vedoucí prostředkem tloušťky žebra a začínající uprostřed čipu tranzistoru. Můžeme si všimnout dvou teplotních skoků odpovídajících přechodu mezi čipem a základnou modulu a přechodu mezi modulem a chladičem. Dále je možné si všimnout změny teplotního spádu při přechodu z plného těla chladiče do tenkého žebra.



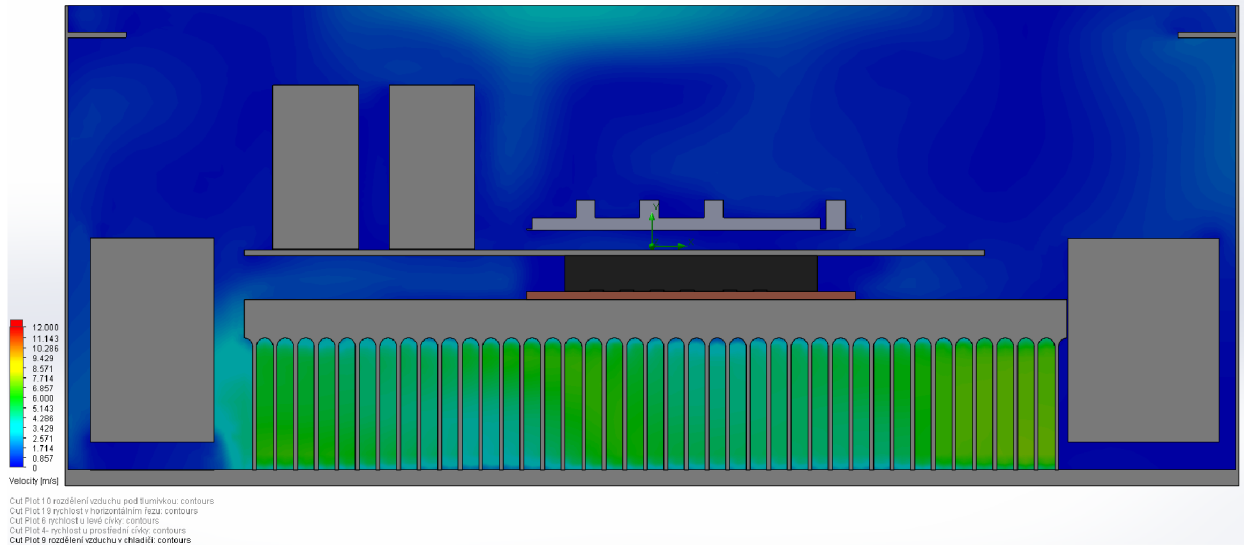
Obrázek 4-2 Proudnic vzduchu uvnitř měniče. Barva odpovídá rychlosti.



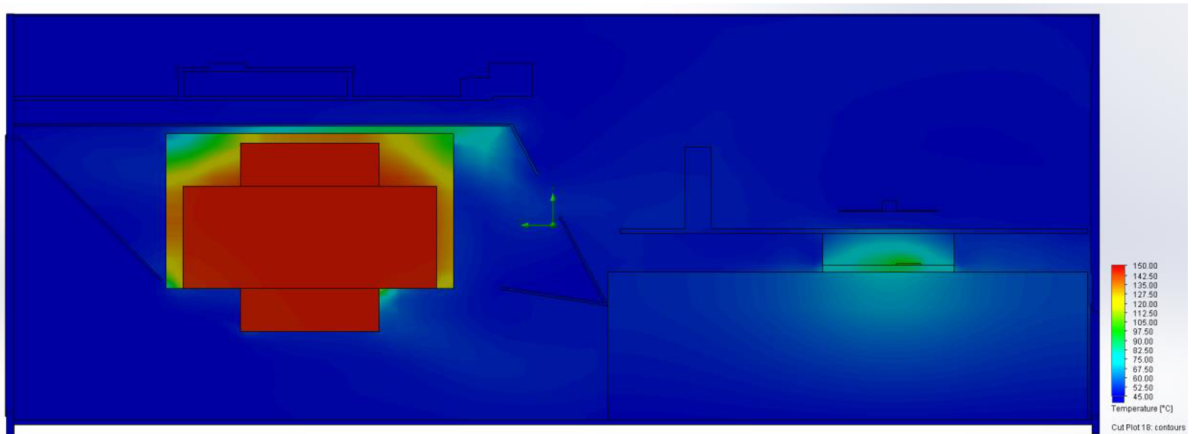
Obrázek 4-3 Rozložení rychlosti vzduchu v příčném řezu tlumivkou. Barva odpovídá rychlosti.



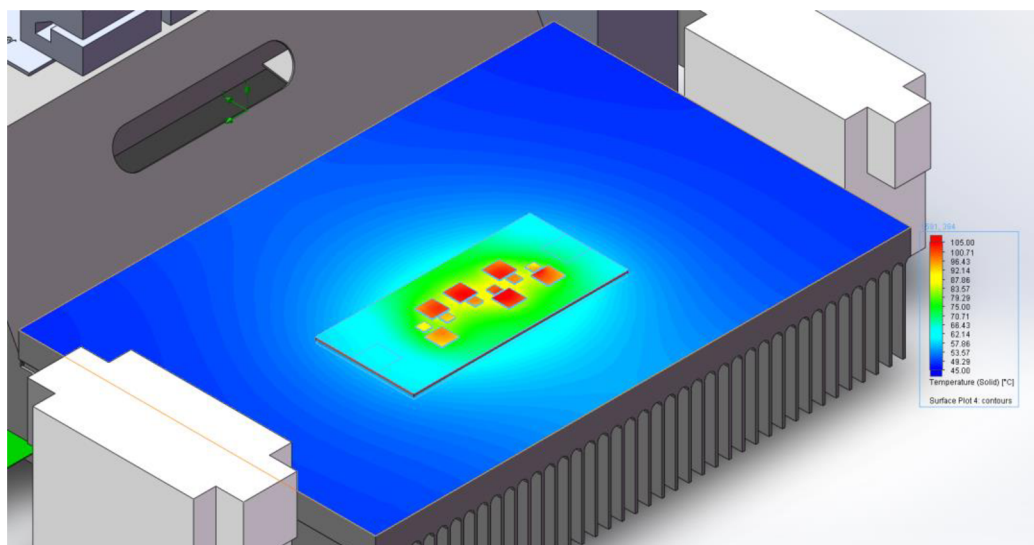
Obrázek 4-4 Proudnic při pohledu zprava. Barva odpovídá rychlosti.



Obrázek 4-5 Rozložení rychlosti chladicího vzduchu v chladiči. Barva odpovídá rychlosti.

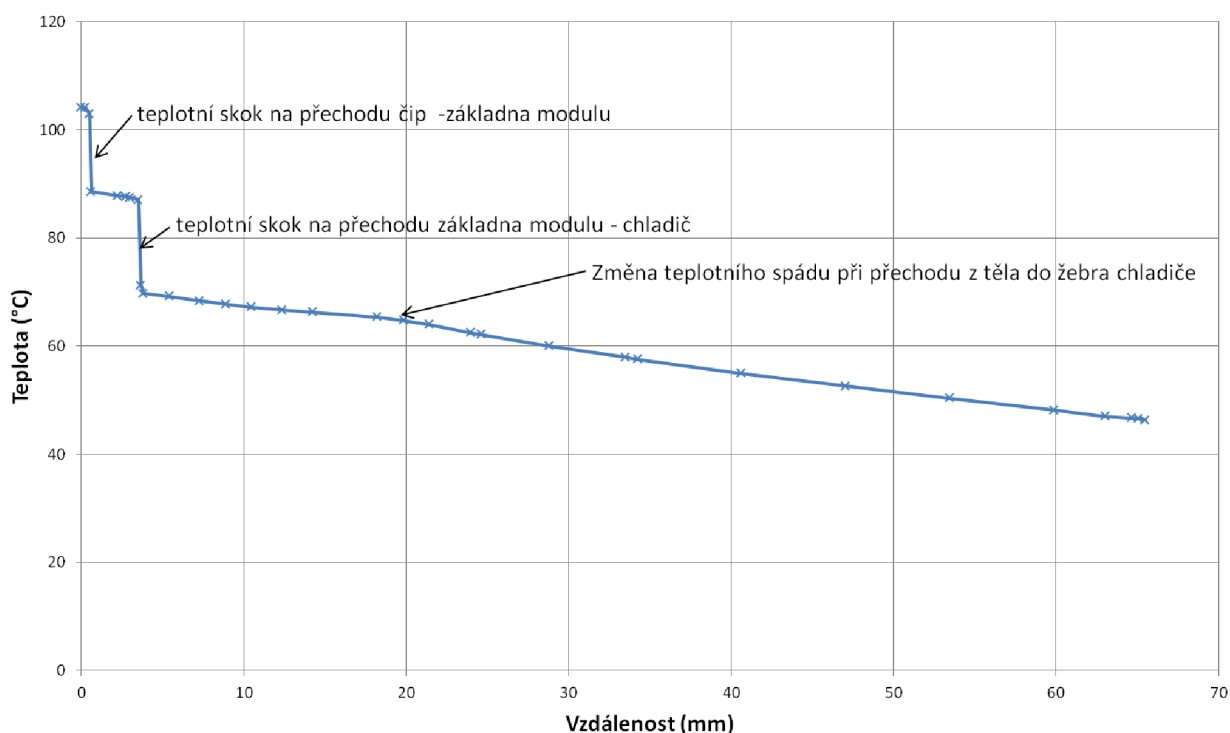


Obrázek 4-6 Teplota měniče v řezu prostředním žebrem chladiče. Barva odpovídá teplotě.



Obrázek 4-7 Teplota na povrchu chladiče, základny výkonového modulu a čipů. Barva odpovídá teplotě.

Graf1: teplota podél výšky chladiče



Obrázek 4-8 Graf1 Teplota podél výšky chladiče

4.4 Výsledky simulace poruchových stavů

Zbylé provozní stavy jsou stavy při poruše ventilátorů. Byly vytvořeny varianty, ve kterých jeden nebo dva z ventilátorů jsou vypnuté, a místo nich je díra s atmosférickým tlakem. Jsou to tři varianty, kde je vadný pravý, střední, nebo levý ventilátor, a tři varianty, kde běží pouze pravý, střední nebo levý ventilátor.

Bylo nutné simulovat všechny varianty poruch, protože při poruchách ventilátorů v různých umístěních se v měniči vyvíjí dramaticky jiné proudění vzduchu. Výsledky simulací srovnává tabulka 4-3.

Při výpadcích ventilátorů se teplota na čípech výkonového modulu zvyšuje pouze velmi málo, a nikdy nepřesáhne maximální hodnotu 125 °C. Je to dáno tím, že chlazení výkonového modulu je silně předimenzované. Chladičem v původním stavu proudí mnohem více vzduchu, než je nutné. Chladič tak i při značném snížení rychlosti vzduchu výrazně nemění svůj tepelný odpor, a tím se výrazně nemění ani teplotní spád na něm.

Teplota tlumivky sinusového filtru se oproti tomu při výpadcích zvyšuje výrazně, a při jakémkoliv poruše přesahuje dovolenou mez 155 °C. Děje se tak hlavně proto, že tlumivka se chladí mnohem menší plochou než výkonový modul a proto je citlivá na změny rychlosti vzduchu i při těchto rychlostech. Dále je tlumivka ofukovaná jenom částí vzduchu, který pod ní protéká, a účinnost jejího chlazení závisí do velké míry na tom, jaké proudění se ve ventilačním tunelu vyvine.



Důležité je, že oproti předpokladům není poruchou ventilátorů nejvíce ohrožen výkonový modul, ale právě tlumivka. Dosud je před tepelným selháním chráněn pouze výkonový modul čidlem na chladiči. Bylo by vhodné před touto poruchou chránit i tlumivku, například takto:

- Hlášení teploty na tlumivce, například tepelným čidlem zalitým do tlumivky.
- Hlášení samotné poruchy ventilátorů, například měřením proudu ventilátorů. Nevýhodou je zvýšení složitosti elektrického schématu, proud do ventilátorů se může měnit s časem, degradací oleje v ložiscích, zvýšením tlakové ztráty v chladicím systému po jeho zaprášení, apod.
- Zvýšení teplotní třídy tlumivky. Tlumivka vyšší teplotní třídy, s maximální teplotou vinutí 180°, by odolala většině simulovaných poruch. Nevýhodou je vyšší cena tlumivky.
- Předimenzování tlumivky, což sníží ztráty v tlumivce a zvětší její plochu pro chlazení. Efektivita tohoto řešení by byla omezena skin efektem. Další nevýhodou je vyšší cena tlumivky.
- Lepší řešení chlazení tlumivky, například s použitím chladiče, tlumivka nezalita v epoxidu nebo jinak řešené proudění kolem odhaleného vinutí tlumivky. Pokud by toto řešení bylo tak dobré, že je tlumivka odolnější vůči poruše ventilátorů než výkonový modul, mohlo by se zůstat u ochrany pomocí teplotního čidla na chladiči výkonového modulu. Nevýhodou tohoto řešení je nutný konstrukční zásah do měniče



Tabulka 4-3 Srovnání poruchových stavů se stavem bez poruchy

Význam	Jednotka	Základní stav	Porucha pravého ventilátoru	Porucha středního ventilátoru	Porucha levého ventilátoru	Porucha pravého a středního ventilátoru	Porucha pravého a levého ventilátoru	Porucha středního a levého ventilátoru
Minimální teplota čipů tranzistorů	[°C]	90,88	90,99	90,93	91,03	91,33	91,31	90,96
Průměrná teplota čipů tranzistorů	[°C]	100,28	100,31	100,35	100,45	100,80	100,74	100,50
Maximální teplota čipů tranzistorů	[°C]	111,73	111,74	111,80	111,91	112,28	112,21	111,98
Minimální teplota čipů diod	[°C]	86,38	86,48	86,44	86,54	86,84	86,82	86,47
Průměrná teplota čipů diod	[°C]	95,32	95,35	95,39	95,50	95,85	95,78	95,54
Maximální teplota čipů diod	[°C]	111,73	111,74	111,80	111,91	112,28	112,21	111,98
Minimální teplota vinutí tlumivky	[°C]	142,71	159,15	163,07	153,37	172,65	165,39	199,59
Průměrná teplota vinutí tlumivky	[°C]	144,99	167,09	164,19	156,74	177,82	170,93	203,88
Maximální teplota vinutí tlumivky	[°C]	146,77	171,50	164,97	158,96	180,79	174,41	206,19

5 OPTIMALIZACE CHLADICÍHO SYSTÉMU

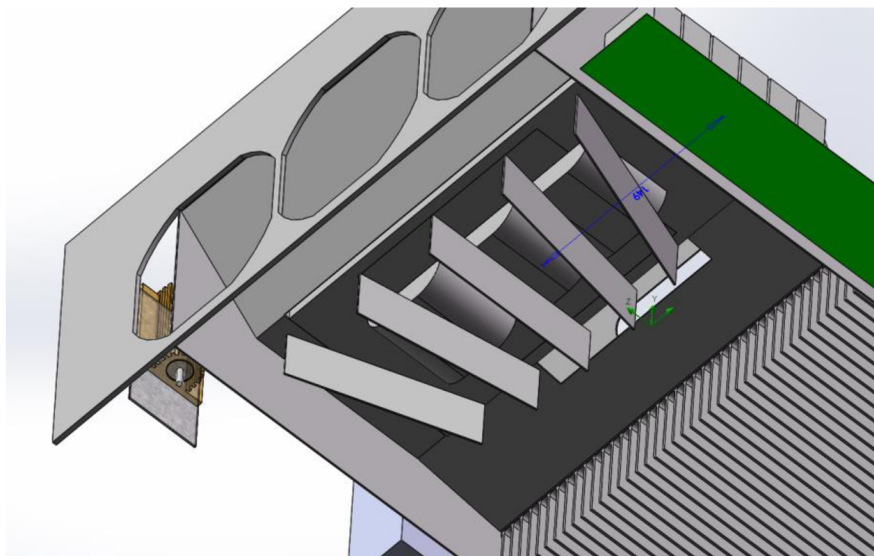
Chladicí systém měniče M50 je možné optimalizovat ve dvou směrech. Prvním jsou dílčí úpravy proudění v jistých oblastech vnitřku měniče pomocí usměrňovacích lamel. Druhým směrem je snížení ventilačního výkonu.

5.1 Možnosti zlepšení proudění vzduchu

Dále budou předestřeny možné varianty optimalizace proudění vzduchu v měniči. Tyto úpravy mají za cíl snížit teplotu určitých částí měniče, aniž by bylo třeba zvýšit výkon nebo počet ventilátorů. Další možností, která není rozvedena, by bylo zmenšení chladiče, který je v současné podobě silně nevyužitý. To by ale vyžadovalo podstatné konstrukční zásahy a přesahuje rámec této práce.

5.1.1 Usměrňovače pod tlumivkou

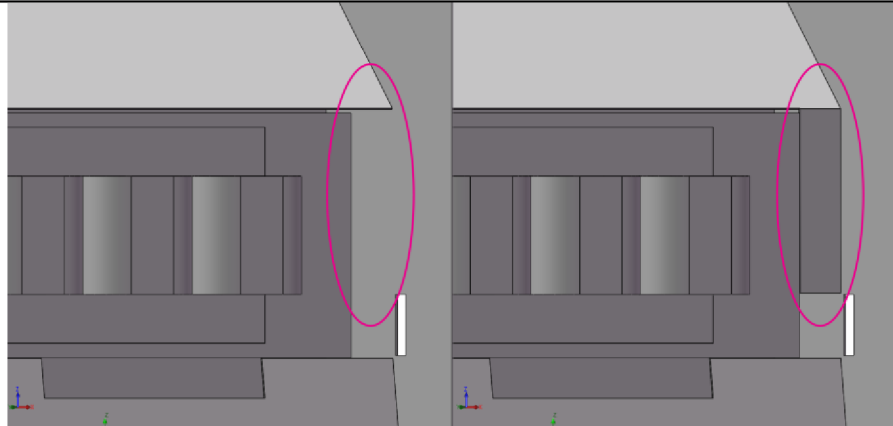
Dovnitř ventilačního tunelu, pod vinutí tlumivky, byly vloženy svislé plechy, jejichž cílem je rozrušit turbulenci proudění vstupujícího do chladiče a nasměrovat vzduch do střední části chladiče, pod výkonový modul. Cílem je snížit teplotu na čípech výkonového modulu a na vinutí tlumivky. Obrázek 5-1 ukazuje přidání usměrňovače.



Obrázek 5-1 Usměrňovače pod tlumivkou sinusového filtru

5.1.2 Zmenšení díry vedle tlumivky sinusového filtru

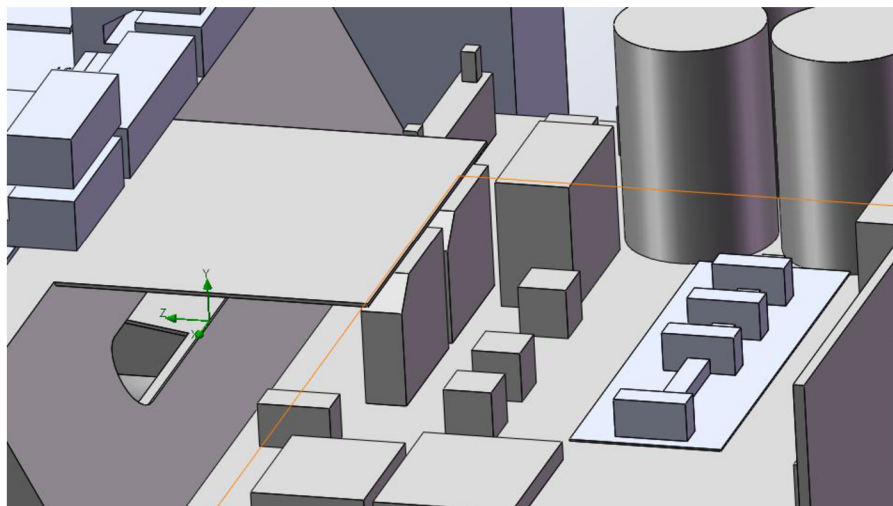
Do plechu zakrývajícího tlumivku byla po jedné její straně z konstrukčních důvodů vyříznuta díra. Obrázek 5-2 ukazuje stav před a po zmenšení díry. Touto dírou odchází část vzduchu z ventilačního tunelu, proudí v prostoru tlumivky a poté odchází dírou pro přívod vodičů k tlumivce do prostoru nad výkonový modul a pak zády ven z měniče. Tato díra je konstrukčně nutná, ale může být zmenšena. Cílem tohoto zmenšení je snížení teploty na čípech výkonového modulu, a to i za cenu malého zvýšení teploty vinutí tlumivky.



Obrázek 5-2 Díra vedle tlumivky před a po zmenšení

5.1.3 Optimalizace proudění v oblasti budičů

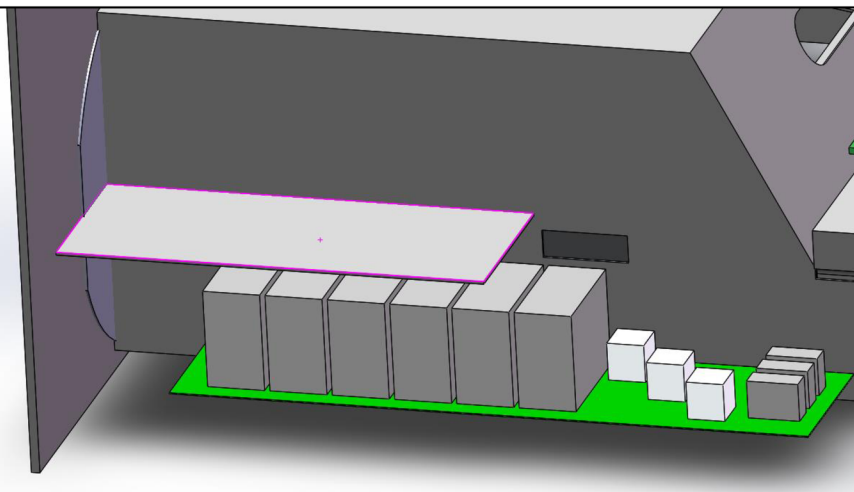
Otvor ve ventilačním tunelu, viditelný na obr. 4-4 uprostřed obrázku, je třeba řešit jinak, a to tak, aby byl vzduch více naveden směrem na budiče a kondenzátory. Možným řešením je přidat nad otvor lem, jako ten na obrázku 5-3, který vzduch vhodně usměrní.



Obrázek 5-3 Usměrňovač vložený pro zlepšení proudění v oblasti budičů

5.1.4 Usměrňovač nad kondenzátory sinusového filtru

Nad kondenzátory sinusového filtru je třeba umístit kryt, který by zamezil tomu, že všechen vzduch z ventilátoru okamžitě vystoupá nad ventilační tunel a dál do měniče, jak lze vidět na obr. 4-4, aniž by ochladil tyto kondenzátory. Navržený kryt ukazuje obrázek 5-4.



Obrázek 5-4 Usměrňovač pro kondenzátory sinusového filtru

5.2 Zmenšení ventilačního výkonu

Ze simulace v základním stavu vyplývá, že chladicí systém je značně předimenzovaný. Snížení ventilačního výkonu by snížilo náklady na výrobu měniče a zvýšilo jeho celkovou účinnost. Teploty všech součástí musí samozřejmě i po snížení ventilačního výkonu zůstat v dovolených mezích.

První možností je výměna použitých ventilátorů za typ s nižším výkonem. Z nabídky výrobce ventilátorů NMB byl vybrán typ s o stupeň nižším průtokem vzduchu. Do databáze Flow Simulation byl tento typ přidán, data byla zjištěna od výrobce. Byla vytvořena varianta simulace, ve které byly ventilátory nahrazeny tímto slabším typem. Pokud teploty součástí nevzrostou nad přípustné hodnoty, ventilační ztráty v měniči se sníží asi o 9 %.

Druhou možností je snížení počtu ventilátorů. Byly vytvořeny varianty měniče se dvěma i pouze s jedním ventilátorem, z nichž všechen vzduch proudí do ventilačního tunelu. I pokud teploty sledovaných částí měniče nepřesáhnou dovolené meze, tyto varianty riskují snížení životnosti pomocných prvků v měniči absencí jejich dodatečného ofukování. Jejich výhodou je snížení ventilačních ztrát o 33, resp. 66 %.

5.3 Výsledky simulace variant se zlepšeními

Tato podkapitola zhodnotí výsledky variant simulace s možnými optimalizacemi chladicího systému měniče.

5.3.1 Usměrňovače pod tlumivkou a zmenšení díry vedle tlumivky

Pro posouzení dopadů navržených zlepšení je třeba porovnat teploty na sledovaných součástech, jež obsahuje tabulka 5-1. Z tabulky vidíme, že u varianty s menší dírou teploty výkonového modulu zůstaly stejné, zato teploty tlumivky vzrostly. Tato varianta nemá zlepšující vliv na proudění v měniči. Únik vzduchu dírou vedle tlumivky, i když nechtěný, má na její chlazení pozitivní vliv, a je tedy nežádoucí jej odstranit. Možná by stálo za to vytvořit stejnou díru i na druhé straně tlumivky.

Varianta s usměrňovači snižuje teploty na výkonovém modulu asi o desetinu stupně Celsia, což je zanedbatelné zlepšení. Tlumivka se chladí rovnoměrněji, minimální a průměrná teplota

rostou, ale maximální teplota klesá. Opět se jedná o změny v řádu desetin stupňů. Usměrňovače mají na oteplení měniče vliv pozitivní, ale zanedbatelný.

Tabulka 5-1 Srovnání výsledků variant se zlepšeními a základního stavu

Význam	Jednotka	Základní stav	S menší dírou	S usměrňovači pod tlumivkou
Minimální teplota čipů tranzistorů	[°C]	90,88	90,84	90,80
Průměrná teplota čipů tranzistorů	[°C]	100,28	100,27	100,20
Maximální teplota čipů tranzistorů	[°C]	111,73	111,73	111,64
Minimální teplota čipů diod	[°C]	86,38	86,35	86,30
Průměrná teplota čipů diod	[°C]	95,32	95,31	95,24
Maximální teplota čipů diod	[°C]	111,73	111,73	111,64
Minimální teplota vinutí tlumivky	[°C]	142,71	147,14	142,94
Průměrná teplota vinutí tlumivky	[°C]	144,99	149,16	145,13
Maximální teplota vinutí tlumivky	[°C]	146,77	151,11	146,61

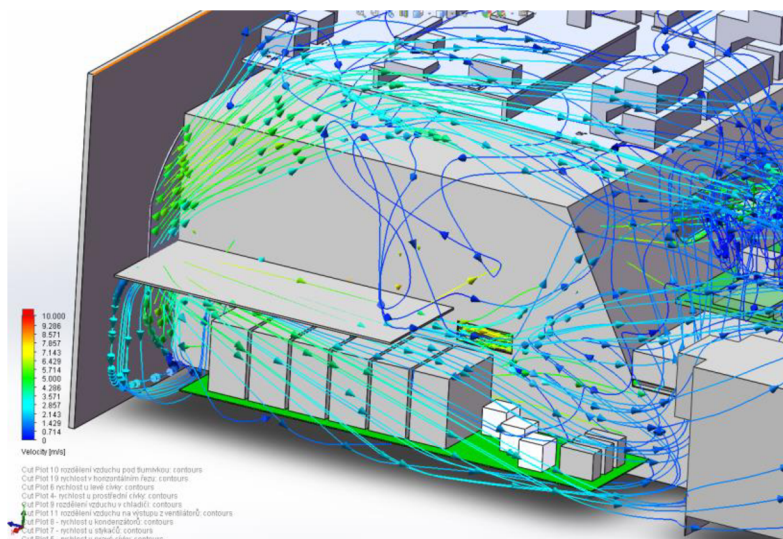
5.3.2 Optimalizace proudění v oblasti budičů

Přidání usměrňovače vzduchu nad proudová čidla nasměrovalo vzduch vystupující z tunelu správným směrem, teplota v prostředí budičů a kondenzátorů ss. meziobvodu ale oproti očekávání vzrostla. Je to způsobeno tím, že vzduch vystupující z tunelu je ohřátý po průchodu tlumivky, a tak je lepší, když měnič opustí, aniž by přišel do styku s dalšími součástmi.

Z tohoto hlediska bude lepší od této optimalizace upustit a nechat proudění v tomto úseku v původním stavu.

5.3.3 Usměrňovač nad kondenzátory sinusového filtru

Jak ukazuje obrázek 5-5, takto řešený usměrňovač nad kondenzátory sinusového filtru zadrží polovinu vzduchu vystupujícího z této části ventilátoru, a přinutí ho proudit kolem kondenzátorů sinusového filtru a ochlazovat je. Tím bude zvýšena jejich životnost. Zbytek vzduchu stoupá vzhůru a chladí řídicí desku měniče. Tato optimalizace má vliv velice pozitivní.



Obrázek 5-5 Vliv přidání usměrňovače na proudění v oblasti kondenzátorů sinusového filtru

5.3.4 Snížení ventilačního výkonu

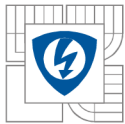
Varianty budou hodnoceny na základě srovnání teplot na sledovaných částech dosažených při simulaci těchto variant a simulaci základního stavu. Tyto teploty uvádí tabulka 5-2.

Tabulka 5-2 Srovnání teplot u variant se sníženým ventilačním výkonem

Význam	Jednotka	Základní stav	Se dvěma ventilátory	S jedním ventilátorem	Se slabšími ventilátory
Minimální teplota čipů tranzistorů	[°C]	90,88	90,93	91,10	90,94
Průměrná teplota čipů tranzistorů	[°C]	100,28	100,29	100,59	100,34
Maximální teplota čipů tranzistorů	[°C]	111,73	111,73	112,07	111,8
Minimální teplota čipů diod	[°C]	86,38	86,43	86,61	86,45
Průměrná teplota čipů diod	[°C]	95,32	95,33	95,64	95,39
Maximální teplota čipů diod	[°C]	111,73	111,73	112,07	111,8
Minimální teplota vinutí tlumivky	[°C]	142,71	149,12	156,75	147,60
Průměrná teplota vinutí tlumivky	[°C]	144,99	150,94	159,92	150,11
Maximální teplota vinutí tlumivky	[°C]	146,77	152,25	161,87	151,98

Stejně jako v simulacích poruchových stavů se teploty výkonového modulu výrazně nemění, mění se hlavně teploty vinutí tlumivky. Varianty se dvěma ventilátory a se slabšími ventilátory obě vyhovují. Z nich ta první uspoří více energie a tím více zvýší celkovou účinnost měniče, ale oproti původnímu stavu nezachová ofukování ostatních součástí měniče (kondenzátorů, řídicí desky, budičů, EMI filtrů), a tak může negativně ovlivnit životnost těchto součástí. Také vyžaduje konstrukční zásahy do měniče, zato varianta se slabšími ventilátory se obejde bez nich.

Varianta s jedním ventilátorem nevyhověla, protože teplota tlumivky přesáhne dovolenou mez 155 °C. Tuto variantu by bylo možné dále vylepšit, například navržením lepšího tunelu s větším zaměřením na chlazení tlumivky.



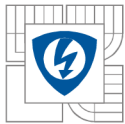
6 POROVNÁNÍ S OTEPLOVACÍ ZKOUŠKOU

Na měniči M50 byla provedena oteplovací zkouška, kdy byl měnič zatížen jmenovitým proudem. Poté byla vytvořena varianta simulace s teplotou okolí shodnou s teplotou okolí při oteplovací zkoušce měniče. Teplota okolí byla 24,3 °C.

Výsledné hodnoty pro hlavní zdroje ztrát jsou zaneseny do tabulky 6-1. Tyto teploty spolu souhlasí, teplotní simulace Flow Simulation je tedy realitě poměrně blízko.

Tabulka 6-1 Srovnání hodnot z oteplovací zkoušky a simulace

	$\vartheta_{změřeno}$ [°C]	$\vartheta_{simulace}$ [°C]	$\Delta\vartheta$ [°C]
Vrchní strana tlumivky sinusového filtru	44,3	43,4	1
Teplota chladiče u výkonového modulu	40,7	37,4	3,3



7 ZÁVĚR

Hlavním záměrem práce je ukázat schopnosti softwaru Flow Simulation při zkoumání a optimalizaci chladicího systému výkonového měniče, práce se může stát podkladem pro rozhodování o investici do tohoto softwaru.

Na začátku práce jsou popsány základní mechanismy sdílení tepla, poté jsou na základě těchto informací popsány způsoby chlazení využívané ve výkonové elektronice.

Dále je popsán měnič M50 výrobce ELCOM, a.s., a to z hlediska jeho funkce a dispozice. Zvláštní pozornost je věnována systému chlazení a místě a způsobu vzniku tepelných ztrát v měniči.

V další části práce byl v programu Solidworks vymodelován 3D CAD model měniče M50, který byl poté využit pro simulaci oteplení pomocí programu Solidworks Flow Simulation. Z toho důvodu byla při modelování měniče zvolena některá zjednodušení, která jsou popsána v kapitole 3. Tato opatření zjednodušila simulaci a tím snížila nároky na výpočetní výkon a strojový čas potřebný k simulaci. Zároveň však podstatně nezvýšila chybu simulace. Do detailů byl vymodelován výkonový modul včetně samotných čipů a tlumivka sinusového filtru. Simulace uvažovala rotaci ventilátorů, materiály jednotlivých součástí i přechodné tepelné odpory ve výkonovém modulu. Ze simulace bylo zjištěno rozložení teplot a charakter proudění v měniči. Dále byly simulovány všechny poruchy ventilátorů, kdy bylo zjištěno, že oproti očekávání je výkonový modul velice odolný proti poruchám ventilátorů, zato tlumivka sinusového filtru přesahuje povolenou teplotu při jakékoliv poruše. Byla navržena možná řešení tohoto problému.

V páté kapitole byly navrženy možné optimalizace chlazení měniče M50. Bylo to jednak přidáním usměrňovacích plechů do různých míst za účelem snížení teploty sledovaných částí měniče, jednak snížením ventilačního výkonu za účelem úspory energie. Všechny navržené optimalizace byly simulovány a byl zhodnocen jejich vliv na chlazení měniče. Ze sedmi navržených zlepšení se v simulaci osvědčily přidání usměrňovacího plechu nad kondenzátory sinusového filtru, použití ventilátorů o menším výkonu a použití dvou ventilátorů místo tří.

V šesté kapitole byla provedena oteplovací zkouška měniče a byla provedena simulace měniče při teplotě okolí odpovídající oteplovací zkoušce, tedy 24,3 °C. Výsledné teploty u výkonového modulu a u tlumivky se přibližně shodovaly.

LITERATURA

- [1] MOUROMTSEFF, I.E. Water and Forced-Air Cooling of Vacuum Tubes: Nonelectronic Problems in Electronic Tubes. *Proceedings of the IRE*. 1942, č. 4, s. 190-205. DOI: 10.1109/JRPROC.1942.234654. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1694467&isnumber=35682>
- [2] ELBERG, S. a P. MATHONNET. *Odvod tepla z elektronických zařízení*. 1. vyd. Přeložil Vladimír Suchánek. Praha: SNTL, 1983, 143 s.
- [3] PATOČKA, M. *Vybrané stati z výkonové elektroniky: Tepelné jevy, činný výkon*. 3. vyd. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., Brno, Ondráčkova 105, 2000. ISBN 80-214-1736-6.
- [4] CIBULKA, I., L. HNĚDKOVSKÝ a V. HYNEK. VŠCHT. *Základní fyzikálně-chemické veličiny a jejich měření* [online]. Praha, 2006 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/FCHV_all_7.pdf
- [5] MAREŠ, L. Teplota a její měření. MAREŠ, Luděk. TOPINFO S.R.O. *Tzbinfo: stovebnictví, úspory energií* [online]. 2006, 6.3.2006 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>
- [6] KAPOUN, J. Dosud nejnižší dosažená teplota: Boseův-Einsteinův kondenzát. KAPUN, J. F SOLUTIONS. *Science World* [online]. 2003, 17. 09. 2003 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/dosud-nejnizsi-dosazena-teplota-boseuv-einsteinuv-kondenzat-2846/>
- [7] RUŠŇÁK, K. ZČU. *Teplo, práce a 1. věta termodynamiky* [online]. 2005, 2005 [cit. 1.12.2014]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYI1/teplo.pr.1.veta.pdf>
- [8] FUKÁTKO, T. a J. FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektronice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 118 s. ISBN 80-730-0199-3.
- [9] SOU CHOTĚBOŘ. *Výpočty chlazení elektronických součástí: s řešenými příklady* [online]. [cit. 3.12.2014]. Dostupné z: <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [10] Objemová tepelná kapacita. VŠCHT. *ECHO* [online]. Praha [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/echo/analytika/jednotky/objemova_tepelna_kapacita.html
- [11] Interní materiály firmy ELCOM, a.s.
- [12] DASSAULT SYSTÈMES. *Solidworks Flow Simulation 2012 Technical Reference*. 2012.
- [13] EYMARD, R., GALLOUËT a R. HERBIN. *Finite Volume Methods*. Marseille, 2003. Dostupné z: <http://www.cmi.univ-mrs.fr/~herbin/PUBLI/bookevol.pdf>
- [14] NMB-MAT. *4712KL*. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2942.pdf>
- [15] HUDWALDT, J.A. Plot Digitizer. DICE. *Sourceforge* [online]. 2001, 15.4.2014 [cit. 2014-12-10]. – software - Dostupné z: <http://sourceforge.net/projects/plotdigitizer/>
- [16] Solidworks, Flow Simulation – software – Studentská licence, VUT Brno