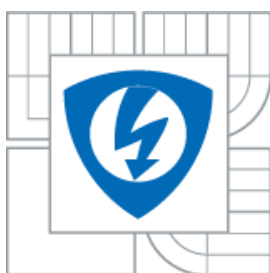




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MĚŘENÍ ÚČINNOSTI CHLADIČŮ CPU A NÁVRH TUNELU S ŘÍZENÝM PROUDĚNÍM

MEASUREMENT OF COOLER EFFICIENCY AND DESIGN OF AERODYNAMIC SPACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL ČÁSTKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Michal Částka
Ročník: 3

ID: 109639
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření účinnosti chladičů CPU a návrh tunelu s řízeným prouděním

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor problematiky měření účinnosti chladičů CPU. Navrhněte měřicí metodu pro zjišťování jejich vlastností a realizujte tunel s řízeným prouděním. Ověřte jeho funkčnost na praktických měřeních s několika komerčními chladiči CPU. Proveďte měření na vybraném typu chladiče a výsledky statisticky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie elektronických obvodů a systémů, VUT IUM, 2006, ISBN 80-214-3292-6

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

doc. Ing. Jiří Háze, 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 česti druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Při měření účinnosti vzduchových chladičů na standardních PC sestavách, dochází ke značným chybám měření. Okolní vzduch, do kterého se převádí tepelná energie z chladiče je nesourodý a nepředvídatelný. V řízeném tunelu lze simulovat různé proudění vzduchu, a tím zajistit optimální a říditelné měřicí podmínky. Lze tak minimalizovat dopad chyby na výslednou hodnotu účinnosti.

Klíčová slova:

Chladič, teplo, energie, procesory, tepelné trubice, účinnost, řízený tunel

Abstract:

When measuring the effectiveness of air coolers on standard PC processors, there is considerable errors. Ambient air in which energy is transferred from the cooler in the form of heat is inconsistent and unpredictable. The aerodynamic space can simulate different air flow and thus ensure optimum measurement conditions and to minimize the impact of errors on the resulting value of efficiency.

Keywords:

Cooler, heat, energy, processors, heatpipes, efficiency, aerodynamic space

Bibliografická citace díla:

ČÁSTKA, M. *Měření účinnosti chladičů CPU a návrh tunelu s řízeným prouděním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma **Měření účinnosti chladičů CPU a návrh tunelu s řízeným prouděním** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány a uvedeny v seznamu literatury.

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 následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne **1.6.2011**

.....

(podpis autora)

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.**, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **1.6.2011**

.....

(podpis autora)

OBSAH

OBSAH.....	5
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM GRAFŮ.....	8
SEZNAM TABULEK.....	8
ÚVOD.....	9
1 ANALÝZA CHYB MĚŘENÍ SOUČASNÉHO STAVU	10
1.1 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI CHLADIČŮ NA STANDARDNÍ PC SESTAVĚ.....	11
1.2 CHYBA MĚŘENÍ NA OBYČEJNÉ PC SESTAVĚ.....	12
1.3 JAK ZLEPŠIT SOUČASNOU SITUACI?	13
2 TEPELNÉ A FYZIKÁLNÍ JEVY	14
2.1 TEPELNÝ ODPOR VZDUCHOVÉHO CHLADIČE	14
2.2 PŘESTUP TEPELNÉ ENERGIE VEDENÍM.....	16
2.2.1 <i>Přestup tepla vedením a vznik mezní vrstvy</i>	<i>17</i>
2.2.2 <i>Porovnání činitele přestupu tepla vedením u různě velkých těles.....</i>	<i>19</i>
2.3 PŘESTUP TEPLA ZÁŘENÍM	19
2.4 PŘESTUP TEPLA S NUCENOU VENTILACÍ (PROUDĚNÍM)	20
3 TECHNOLOGIE V OBLASTI CHLAZENÍ MIKROČIPŮ	21
3.1 TEPELNÉ TRUBICE	21
3.2 RŮZNORODOST KONSTRUKCE CPU CHLADIČŮ A TEPELNÝCH TRUBIC.....	24
4 NÁVRH A REALIZACE VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	26
4.1 MĚDĚNÉ TĚLESO S MOSFET TRANZISTOREM - NÁVRH	26
4.2 PRAKTICKÁ REALIZACE TEPELNÉHO TĚLESA	28
4.3 NÁVRH ŘÍZENÉHO TUNELU	29
4.4 REALIZACE ŘÍZENÉHO TUNELU	31
4.5 REGULACE JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ.....	34
4.6 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A DALŠÍ POUŽITÉ POMŮCKY.....	35
5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI ŘÍZENÉHO TUNELU.....	36
5.1 ZADÁNÍ ÚKOLU A CÍL EXPERIMENTU	36
5.2 OBECNÝ POSTUP PŘI MĚŘENÍ V ŘÍZENÉM TUNELU.....	37
5.3 KONKRÉTNÍ NASTAVENÍ ŘÍZENÉHO TUNELU PRO JEDNOTLIVÉ ČÁSTI MĚŘENÍ	38
5.4 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY	41
5.4.1 <i>Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 1.....</i>	<i>44</i>
5.4.2 <i>Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 2.....</i>	<i>45</i>

5.4.3	<i>Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 3.....</i>	<i>46</i>
5.4.4	<i>Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 4.....</i>	<i>47</i>
5.4.5	<i>Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 5, 6 a č. 7</i>	<i>48</i>
5.5	ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	51
6	ZÁVĚR	52
	POUŽITÁ LITERATURA	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1: UKÁZKA MODERNÍHO CPU CHLADIČE S HEAT-PIPES.....	9
OBR. 2: STANDARDNÍ TESTOVACÍ PC SESTAVA S CHLADIČEM ALPENFÖHN MATTERHORN.	10
OBR. 3: UKÁZKA PROGRAMU OCCT.....	11
OBR. 4: CHLADIČ A100-75. HLINÍKOVÝ TAŽENÝ PROFIL, ŘEZANÝ NA DÉLKU 100MM [3]	15
OBR. 5: ZÁVISLOST OTEPLENÍ NA VYZAŘOVANÉM VÝKONU PRO CHLADIČ A100-75 [3]	15
OBR. 6: PŘESTUP TEPLA ZE STŘEDNĚ VELKÝCH TĚLES DO OKOLNÍHO VZDUCHU [3].....	17
OBR. 7: TEORETICKÝ PRŮBĚH ZÁVISLOSTI Činitele PŘESTUPU TEPLA A_v NA POLOMĚRU KOULE.	19
OBR. 8: ZÁVISLOST CELKOVÉHO TEPELNÉHO ODPORU NA MNOŽSTVÍ PROUDÍCÍHO VZDUCHU.....	20
OBR. 9: PRINCIP TEPELNÉ TRUBICE [4]	21
OBR. 10: TŘI ODLIŠNÉ KONSTRUKCE TEPELNÝCH TRUBIC [4].....	22
OBR. 11: CHLAZENÍ NB ČIPU A MOSFET TRANZISTORŮ PC ZÁKLADNÍ DESKY.	23
OBR. 12: VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ NOTEBOOKU S NĚKOLIKA TEPELNÝMI TRUBICEMI.....	23
OBR. 13: UKÁZKA CPU CHLADIČE ZALMAN CNPS9000 BEZ HDT	24
OBR. 14: CPU CHLADIČ XIGMATEK COBRA S TECHNOLOGIÍ HDT	25
OBR. 15: COOLINK CORATOR DS - CHLADIČ S TECHNOLOGIÍ GDT	25
OBR. 16: POROVNÁNÍ MĚDĚNÉHO TĚLESA S PROCESOREM INTEL CORE 2 DUO.....	26
OBR. 17: POHLED NA TEPELNÉ TĚLESO S MOSFET TRANZISTOREM.....	26
OBR. 18: PRŮSVITNÝ POHLED NA TEPELNÉ TĚLESO A OTVORY PRO SENZORY TEPLoty	27
OBR. 19: UKÁZKA STYKU TESTOVANÉHO CHLADIČE S TEPELNÝM TĚLESEM	27
OBR. 20: REALIZOVANÉ, SKUTEČNÉ TEPELNÉ TĚLESO Z MĚDI.	28
OBR. 21: POHLED ZE SPODNÍ STRANY ZÁKLADNÍ DESKY NA FET TRANZISTOR	29
OBR. 22: MODEL ŘÍZENÉHO TUNELU PRO PŘESNĚJŠÍ MĚŘENÍ CPU CHLADIČŮ	30
OBR. 23: MODEL PODSTAVCE ŘÍZENÉHO TUNELU	30
OBR. 24: HOTOVÝ, REALIZOVANÝ ŘÍZENÝ TUNEL.....	31
OBR. 25: REALIZOVANÝ PODSTAVEC PRO AERODYNAMICKÝ TUNEL	32
OBR. 26: ZÁKLADNÍ PRINCIP PROUDĚNÍ VZDUCHU UVNITŘ TUNELU	32
OBR. 27: ROZMÍSTĚNÍ SENZORŮ NA VSTUPNÍ ČÁSTI TUNELU	33
OBR. 28: POHLED NA VÝSTUPNÍ ČÁST TUNELU S POUŽITÍM PLEXISKLOVÝCH ZÁSLEPEK.....	33
OBR. 29: UKÁZKA REGULAČNÍHO PANELU ZALMAN ZM2	34
OBR. 30: PŘEPÍNAČÍ INDIKAČNÍ PANEL VENTILÁTORŮ A SENZORŮ	34
OBR. 31: NAPÁJECÍ STABILIZOVANÝ ZDROJ	35
OBR. 32: HORIZONTÁLNÍ REŽIM MĚŘENÍ A NASTAVENÍ ŘÍZENÉHO TUNELU.....	38
OBR. 33: VERTIKÁLNÍ POLOHA ŘÍZENÉHO TUNELU	39
OBR. 34: NASTAVENÍ TUNELU PRO PROGRESIVNÍ TEST	39
OBR. 35: MĚŘENÝ TYP CHLADIČE ZNAČKY NOCTUA TYPU NH-U9B	41
OBR. 36: UKÁZKA NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ A POPIS TABULKY	42

SEZNAM GRAFŮ

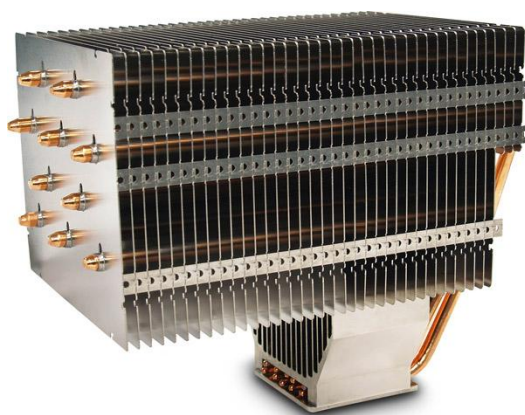
GRAF. 1: ZÁVISLOST ΔT NA OTÁČKÁCH VENTILÁTORU PRO 10 MĚŘENÝCH CHLADIČŮ.....	44
GRAF. 2: ZÁVISLOST R_T NA OTÁČKÁCH VENTILÁTORU S HORIZONTÁLNÍ A VERTIKÁLNÍ POLOHOU.....	45
GRAF. 3: ZÁVISLOST TEPELNÉHO ODPORU R_T NA TYPU SIMULACE (PROUDU VZDUCHU) ŘÍZENÉHO TUNELU ...	46
GRAF. 4: ZÁVISLOST ΔT NA PŘÍKONU TEPELNÉHO TĚLESA PRO CHLADIČ NOCTUA NH-U9B	47
GRAF. 5: RELATIVNÍ CHYBA ŘÍZENÉHO TUNELU V DLOUHODOBÉM HORIZONTU MĚŘENÍ	48
GRAF. 6: KOREKČNÍ KŘIVKY ŘÍZENÉHO TUNELU V DLOUHODOBÉM HORIZONTU MĚŘENÍ	49
GRAF. 7: PRŮBĚH VSTUPNÍCH TEPLŮT ŘÍZENÉHO TUNELU.....	50

SEZNAM TABULEK

TAB. 1: NASTAVENÍ VENTILÁTORU ŘÍZENÉHO TUNELU PRO HORIZONTÁLNÍ REŽIM MĚŘENÍ.....	38
TAB. 2: NASTAVENÍ VENTILÁTORŮ ŘÍZENÉHO TUNELU PRO TŘI REŽIMY "PASIVNÍHO" MĚŘENÍ.....	40
TAB. 3: SEZNAM MĚŘENÝCH CHLADIČŮ A JEJICH ZÁKLADNÍ PARAMETRY	43
TAB. 4: PRŮMĚRNÉ HODNOTY ZE 7 MĚŘENÍ A JEJICH SMĚRODATNÉ ODCHYLKY	49
TAB. 5: UKÁZKA NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S NEJVĚTŠÍ MĚŘENOU CHYBOU	50

ÚVOD

Vývoj elektroniky je nezastavitelný a každým dnem se vyvíjejí a vyrábějí čím dál rychlejší a složitější mikroprocesory. Ty oproti předchozím generacím dosahují vyšších výpočetních rychlostí a disponují řadou různých optimalizací. Jedná se zejména o procesory pro osobní počítače a servery. Procesory za posledních 5 let vývoje zvýšily svůj výpočetní výkon několikanásobně. Bohužel to mělo dopad i na jiné parametry, a tím je zejména spotřeba elektrické energie neboli energetická náročnost samotného čipu. S počtem zvyšujících se tranzistorů a nezávislých výpočetních jader roste vyzařované odpadní teplo, které procesor musí do svého okolí vyzářit. Prostředníkem transportu takové energie je chladič, který udržuje interní teplotu čipu v přijatelných mezích. S rozvojem a výrobou nových procesorů pro osobní počítače se začaly vyvíjet vylepšené vzduchové chladiče, které byly konstruovány tak, aby uspokojovaly výkonové požadavky nových procesorů. Dnes se řádově jedná o stovky wattů tepelné energie, které chladič musí efektivně odvést z čipu a předat do svého okolí. V tak malých prostorech, jako jsou počítačové skříně nebo notebooky to není vůbec snadný úkol.



Obr. 1: Ukázka moderního CPU chladiče s heat-pipes

Na Obr. 1 je ukázka moderního CPU chladiče, využívající několik tepelných trubíc (heat-pipes) pro rychlejší odvod tepelné energie z čipu. V současné době zatím nebyly vzduchové chladiče překonány ve své jednoduchosti, a tak je jejich vývoj neustále pod velkým tlakem. Na to, aby někdo mohl vymyslet a zefektivnit jakýkoliv výrobek, je potřeba zajistit důkladnou studii a na základě určitých poznatků přemýšlet nad dalším zlepšením.

Problematikou chlazení počítačových komponentů se zabývám už několik let, a proto jsem se v rámci této bakalářské práce rozhodl, že vymyslím, navrhnu a zkonstruuji poloautomatické testovací zařízení, které by rozšířilo znalosti v této sofistikované oblasti, jako je chlazení procesorů a polovodičových čipů.

1 ANALÝZA CHYB MĚŘENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Cílem práce bude navrhnout zařízení, které by bylo schopno změřit a definovat účinnost vzduchových chladičů CPU. Před samotným návrhem je potřeba objasnit celou problematiku v oblasti měření účinnosti vzduchových chladičů CPU.



Obr. 2: Standardní testovací PC sestava s chladičem Alpenföhn Matterhorn.

Na internetu je mnoho magazínů, které se zabývají testováním chladičů pro osobní počítače. Bohužel, většina autorů těchto recenzí a testů používá pro jednotlivá měření standardní PC sestavu, která není zrovna ideálním „přípravkem“ na tak složitý měřicí proces. Je potřeba si uvědomit, jaké chyby vznikají při měření na obyčejném procesoru a že naměřené hodnoty nemusí vůbec odpovídat realitě. Na Obr. 2 je testovací sestava s chladičem Scythe Orochi. Jedná se o obyčejnou základní desku, procesor typu Intel Core 2 Duo a grafickou kartu GeForce 9800 GTX.

1.1 Měření účinnosti chladičů na standardní PC sestavě

Měření „chladičího výkonu“ chladiče na obyčejné PC sestavě je velice jednoduché a finančně nenáročné. Uvnitř každého procesoru je spousta interních senzorů pro snímání teploty, a pokud se stanoví stejné podmínky při měření, jako je např. teplota okolního vzduchu ϑ_0 , příkon procesoru P_{in} , tak lze zjistit, který chladič odvádí tepelnou energii rychleji neboli efektivněji. K měření a zatížení procesoru lze použít řadu programů, které jsou schopny odečítat aktuální teplotu uvnitř čipu.

Velice známý je program **OCCT** Obr. 3, který vytíží procesor natolik, že jeho příkon vzroste na svou maximální možnou hodnotu a zároveň dokáže odečítat teploty z jednotlivých senzorů v procesoru. Pohodlně je uloží do logu nebo z nich exportuje graf v podobě obrázku.



Obr. 3: Ukázka programu OCCT

Jak už bylo naznačeno na začátku, měření je velice nenáročné, ale **chyba**, která se při něm může vyskytnout, je **extrémně vysoká**, aniž by se to na první pohled mohlo zdát. Proč? Na tuhle otázku nelze jednoznačně odpovědět několika slovy. Je potřeba udělat analýzu (aspoň „selským“ zamyšlením), kde tyhle chyby můžou vznikat.

1.2 Chyba měření na obyčejné PC sestavě

Lze si představit podobnou sestavu jako na Obr. 2, která obsahuje např. dnes už standardní čtyř-jádrový procesor řady Intel Q6600 se základní deskou Gigabyte X48, grafickou kartou ATI HD 5800 apod. Zde se bude testovat v otevřeném prostoru, např. v místnosti 2x3 m, kde je celá sestava upevněna na podstavci pro volné testování PC komponentů (benchtable). Tímto způsobem testuje 95 % autorů různých magazínů na internetu - někdo pro zvýšení věrohodnosti zakomponuje sestavu do PC skříně, a tak se snaží simulovat skutečné podmínky, které mohou v reálné situaci nastat. Kromě těchto základních údajů uvede každý autor teplotu v místnosti, při které onen chladič testuje např. 22,0 °C a další jiné parametry (použité programy, operační systém, nastavení biosu apod.). Tímto je určený základní popis testovací sestavy a podmínky při měření. Bližší analýzou lze spočítat (odhadnout) chybu při takto naměřených hodnotách. V následujících odstavcích je shrnuto několik nejzávažnějších chyb při měření:

- Základní chyba senzorů uvnitř procesoru - žádný sériově vyráběný CPU nedosahuje vyšší přesnosti měření teploty, než je $\pm 1,0$ °C (spíše $\pm 2,0$ °C) – toto všechno vystihuje poměrně rozsáhlá dokumentace k procesorům Core 2 Duo od společnosti Intel [10].
- Příkon procesoru je silně závislý na provozní teplotě čipu. Čím vyšší teploty procesor dosahuje, tím jeho spotřeba elektrické energie roste – vše vychází z proudových ztrát uvnitř tranzistorů, které jsou silně závislé na teplotě. Tyto rozdíly mohou být v řádech desítek wattů! Příkladem může být procesor s provozní teplotou 40,0 °C a spotřebou cca 40 W. Stejný procesor při teplotě čipu kolem 90,0 °C dosahuje cca 55 W. Tento příkonový rozdíl má značný vliv na **definici stejných podmínek** při měření jednotlivých chladičů. Jednoduše řečeno, aby naměřená teplota uvnitř čipu byla porovnatelná s jinou měřenou hodnotou, je nutné zajistit stejný příkon procesoru neboli stejné počáteční podmínky při měření. Ve skutečnosti je to tak velký rozdíl, jako kdyby byl jeden chladič změřený na dvou-jádrovém procesoru a druhý na čtyř-jádrovém (řečeno s nadsázkou). Každý chladič bude do svého okolí (resp. chladiče) odvádět jinou hodnotu tepelné energie, protože procesor (čip) disponuje jinou tepelnou ztrátou, a tak i naměřené výsledky budou naprosto odlišné (zkreslené). Tuto chybu nelze tak jednoduše určit, ale lze ji experimentálně stanovit na $\pm 2,0$ - 5,0 °C. V dalších kapitolách je několik těchto experimentů, které potvrdí stanové hodnoty.

- Dalším problémem je stanovení okolní teploty vzduchu ∂_0 , která je v různých částech testovací místnosti odlišná. Experimentem s laboratorním teploměrem GMH-175 a kalibrovaným čidlem PT 1000 (chyba přístroje je při správné kalibraci $0,1\text{ °C} + 1\text{dig.}$) se dá zjistit, že ∂_0 je v různých koutech místnosti skutečně jiná. U podlahy je teplota např. $19,5\text{ °C}$ a u stropu cca $23,5\text{ °C}$. Tyto rozdíly mohou platit i ve stejné výškové hladině, ale v různých koutech místnosti. Pokud autor měření napíše, že okolní teplota vzduchu byla $\partial_0 = 22,0\text{ °C}$, tak vlastně říká, že okolní teplota, při které měřil jednotlivé chladiče, se mohla pohybovat v rozmezí $\pm 2,0\text{ °C}$ (chyba nehomogenity teploty vzduchu uvnitř místnosti + chyba měřicího přístroje). A to vše za předpokladu, že okolní teplota byla zaznamenána při každém měření a při rozdílných hodnotách započítána korekce, vztahovaná k referenční $\partial_0 = 22,0\text{ °C}$.
- Nehomogenní nanášení teplovodivé pasty mezi čipem procesoru a chladičem může mít za následek, že naměřená hodnota teploty uvnitř čipu procesoru bude při opakované sérii měření odlišná, a to např. v rozsahu $\pm 1,0\text{ °C}$. Aby se této chybě zabránilo, tak to vyžaduje dobře promyšlenou a propracovanou metodu nanášení teplovodivé pasty na obě styčné plochy. Optimální je použití sítotiskové metody.

Pokud se jednotlivé dílčí chyby sečtou, tak lze dostat výslednou chybu měření v rozsahu $\pm 6,0\text{ °C}$ až $\pm 9,0\text{ °C}$. Jedná se sice o maximální teoretický rozsah, který byl víceméně odhadnut, ale jak je vidět, je hodně vysoký. Spousta dalších, méně významných dílčích chyb by mohla být zjištěna experimentováním a praktickým testováním. Tento slovní průvodce jednotlivými chybami je dobrý pouze k navození určité představy o celkovém rozsahu měřených chyb.

Uvedená čísla měřených chyb vycházejí ze zkušeností autora a jeho poznatků z mnoha měření a experimentů. V dalších kapitolách jsou uvedeny a zdokumentovány některé typy testů, které potvrdí tyto údaje.

1.3 Jak zlepšit současnou situaci?

Zlepšit současnou situaci není vůbec lehký úkol. Je zde mnoho parametrů ovlivňujících měřenou teplotu uvnitř čipu procesoru. Systematickým postupováním lze jednotlivé dílčí chyby omezit např. lepší konstrukcí a návrhem testovacího zařízení, kde nebude použitý příkonově závislý a neregulovatelný prvek, jako je polovodičový čip procesoru složený z mnoha tisíc tranzistorů.

2 TEPELNÉ A FYZIKÁLNÍ JEVY

2.1 Tepelný odpor vzduchového chladiče

Teplota na povrchu chladičů není nikdy ve všech místech konstantní, podél žebroví vzniká nežádoucí teplotní spád ΔT . Čím je tento teplotní spád menší, tím je chladič účinnější a s nadsázkou řečeno i lepší. Pokud je teplotní spád příliš velký, tzn. konce žeber jsou studené, znamená to, že v tomto místě chladič nepřenáší tepelnou energii do svého okolí. Z tohoto důvodu musí být žebra tlustá, což je ale hmotnostně a finančně nevýhodné. Tloušťka žeber a volba materiálu je tedy výsledkem určitého kompromisu ceny a hmotnosti. Za naprosto ideálních podmínek by měla být teplota chladiče ve všech místech žebroví stejná a chladič by pak představoval v tepelně elektrických analogiích bod o konstantním elektrickém potenciálu.

Pokud má být změřen tepelný odpor chladiče, musí se postupovat tak, že se upevní výkonová součástka (např. FET tranzistor) na chladič a tento tranzistor se bude budit tak, aby jeho příkon P byl zcela konstantní.

Zároveň měříme okolní teplotu vzduchu ϑ_0 okolo chladiče, a teplotu ϑ_H v těsné blízkosti tranzistoru. Tímto získáme rozdíl teplot, tzv. ΔT . Tepelný odpor chladiče pak určíme podle vztahu (1), jako poměr změřeného oteplení a elektrického příkonu součástky:

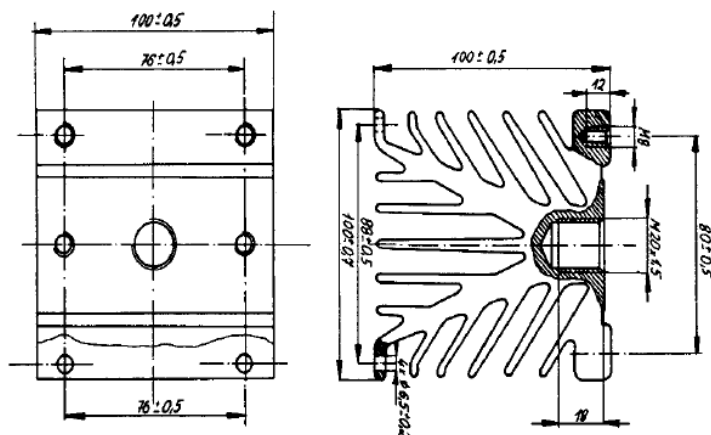
$$R_{\vartheta,H} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{T_H - T_0}{P} = \frac{\vartheta_H - \vartheta_0}{P}, \quad (1)$$

kde ϑ_H je teplota chladiče, ϑ_0 je teplota okolního vzduchu, P je příkon tranzistoru [3]. Tepelný odpor $R_{\vartheta,H}$ se většinou udává v jednotkách K/W, ale i v °C/W.

Je potřeba si uvědomit, že rovnice (1) pro výpočet tepelného odporu chladiče, udává součinitel tepelného odporu tranzistoru a rozhraní mezi tranzistorem s měřeným chladičem, které je ve většině případů vyplněno teplovodivou pastou. Pokud bychom chtěli zjistit skutečný tepelný odpor chladiče, tak bychom museli tyto dvě hodnoty od $R_{\vartheta,H}$ odečíst. Většina výrobců standardně uvádí hodnoty tepelného odporu tranzistoru a teplovodivých past, ale tyto hodnoty jsou spíše orientační a pro stanovení pravdivých údajů je nutné provést řadu experimentů.

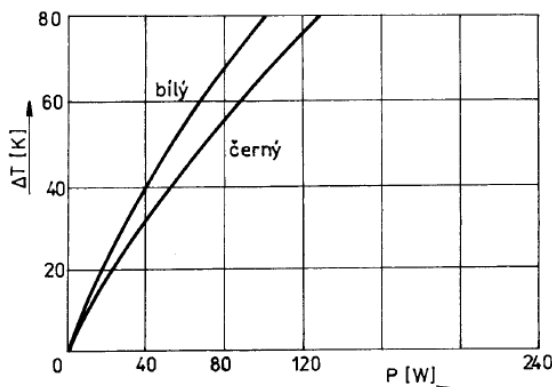
Měrná tepelná vodivost teplovodivých past se ve většině případů pohybuje mezi 2 - 10 W/K.m – samozřejmě záleží na přesném typu a složení pasty. Na trhu jsou sice teplovodivé pasty na bázi tekutého kovu, který dosahuje tepelné vodivosti cca 80 - 90 W/K.m, ale to se v běžné praxi moc nevyužívá.

Na Obr. 4 je ukázán typ chladiče A100-75 jako příklad výpočtu tepelného odporu, který se běžně používá pro chlazení výkonových součástek, jako jsou FET tranzistory koncových zesilovačů [3].



Obr. 4: Chladič A100-75. Hliníkový tažený profil, řezaný na délku 100 mm [3]

Na Obr. 5 je uvedena změřená závislost oteplení chlazené součástky na vyzařovaném výkonu, a to pro chladič A100-75 s neupravovaným (bílým) a černěným povrchem. Závislost je mírně nelineární.



Obr. 5: Závislost oteplení na vyzařovaném výkonu pro chladič A100-75 [3]

Pro černěný chladič A100-75 při oteplení 80 K, vychází tepelný odpor 0,62 K/W. Dosazením do vztahu (1) získáme tepelný odpor chladiče:

$$R_{\theta,H} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{80\text{K}}{130\text{W}} = 0,62 \text{ K/W}, \quad (2)$$

Z příkladu je vidět, že tepelný odpor chladiče je závislý na mnoha faktorech, a to především na schopnosti vyzařovat danou tepelnou energii do svého okolí. Přestup

(předávání, sdílení) tepla mezi dvěma různě teplými tělesy, může probíhat třemi základními způsoby [3]:

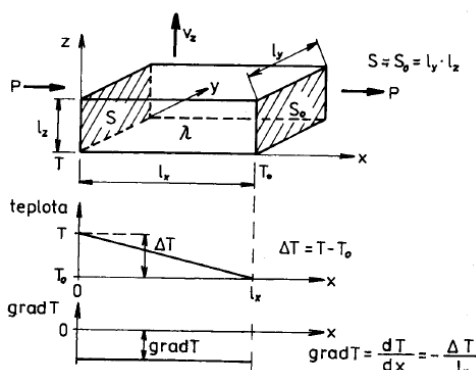
- *Vedením*; v nehybném i pohyblivém prostředí. Pevném, kapalném i plynném.
- *Zářením*; ve vakuu, v plynném prostředí, ve vzduchu.
- *Prouděním*; v pohyblivém kapalném, či plynném prostředí.

Přičemž přestup tepla prouděním je složitý děj, v němž hraje výraznou úlohu vedení samotného tepla. Teplo, lépe řečeno tepelná energie, musí totiž nejdříve vstoupit do chladicího média, a teprve pak může být unášena prouděním (tak je tomu např. v kapalinovém chladiči výkonových součástek). V následujících kapitolách budou všechny tři mechanismy analyzovány.

2.2 Přestup tepelné energie vedením

Přenos tepla vedením spočívá v přenosu tepla ve směru klesající teploty. Tedy děj způsobující interakci 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), také sdílení tepla sáláním.

Předpokládejme dvě tělesa podle Obr. 6. Jedno s povrchem, který označíme S a povrchovou teplotou T , druhé s povrchem S_0 a povrchovou teplotou T_0 , přičemž $T > T_0$. Oba povrchy budeme nazývat „tepelnými elektrodami“.



Obr. 6: Přestup tepla vedením ve hmotném prostředí [3]

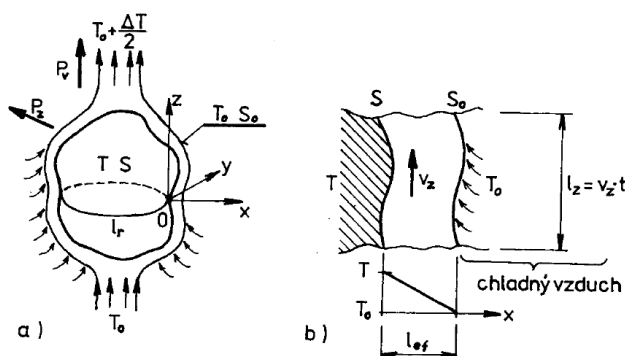
Mezi elektrodami je hmotné prostředí s danou tepelnou vodivostí λ – ta je určena např. použitým materiálem. Konkrétní situaci si lze představit tak, že se chladí čip procesoru s plochou označenou S , hmotné prostředí je vyplněno teplovodivou pastou a S_0 představuje styčnou plochu chladiče. Už zde vzniká nezanedbatelný tepelný spád ΔT .

Funkcionalita a mechanismus přestupu tepelné energie *vedením* je značně závislý na geometrické velikosti tělesa (chladiče), a to za předpokladu, že chladicí proces bude přirozený (bez použití ventilátorů nebo jiných aktivních prvků). V následující podkapitole bude popsáno, proč dochází k přirozenému procesoru chlazení.

2.2.1 Přestup tepla vedením a vznik mezní vrstvy

V této kapitole se bude předpokládat, že kolem zahřátého tělesa (chladiče) vzniká přirozené proudění okolního vzduchu a není použitý žádný aktivní prvek, např. ventilátor. Samotný proces chlazení je totiž závislý na tzv. *mezní vrstvě*, která vzniká kolem každého zahřátého tělesa. Je to tenká vrstva vzduchu o určité efektivní tloušťce l_{ef} - ukázka je na Obr. 6. Abychom mohli porovnávat tloušťku mezní vrstvy, rychlost proudění tepla a tím pádem efektivitu přirozeného chlazení, tak musíme situaci trochu zjednodušit podle následujících bodů [3]:

- Těleso má konstantní teplotu na celém svém povrchu S , tj. má velkou vlastní vnitřní tepelnou vodivost.
- Vzduch v mezní vrstvě proudí laminárně (bez turbulencí), a to vzhůru rychlostí v_z . Samotná rychlost nezávisí na souřadnici x ve směru tloušťky vrstvy l_{ef} .
- Rozložení teploty ve vrstvě je lineární podle Obr. 6 b).
- Zanedbáme nehomogenitu na „severním a jižním pólu“ tělesa a předpokládáme, že mezní vrstva má konstantní průměrnou tloušťku l_{ef} na celém povrchu tělesa.



Obr. 6: Přestup tepla ze středně velkých těles do okolního vzduchu [3]

Za těchto několika podmínek je děj totožný s předchozí situací znázorněnou na Obr. 5. Tepelné elektrodě s povrchem S odpovídá povrch tělesa S z Obr. 6 a virtuální elektrodě S_0 odpovídá rozhraní mezi proudící vrstvou a okolním chladným vzduchem. Elektroda S_0 je

jakoby plovoucí a na konstantní teplotě T_0 je udržována přísunem chladného vzduchu z okolí. Tloušťka mezní vrstvy musí být podle rovnice (3) velikost:

$$l_{ef} = \frac{\lambda}{\alpha_v}, \quad (3)$$

kde λ je měrná tepelná vodivost vzduchu [3]. Z experimentů bylo ověřeno, že v intervalu od 20 °C do 120 °C je číselník přestupu tepla α_v téměř konstantní a pohybuje se přibližně v rozmezí 5 až 8 W/Km². Střední hodnota $\alpha_v = 6,5$ W/Km² [3].

Tloušťku mezní vrstvy je dobré znát z toho důvodu, že u těles, jejichž rozměry jsou menší než l_{ef} , se začíná uplatňovat jiný mechanismus šíření tepla, než samotným vedením. Děj je popsán jako „proudění“ *nehybné vzduchové masy*, a to právě z toho důvodu, že rychlost proudění v_z mezní vrstvy klesá limitně k nule [3]. U velkých těles naopak rychlost v_z značně roste a dochází k narušení laminárního proudění vzduchu. Dá se říci, že rychlost proudění se mění z laminárního na turbulentní a důsledkem turbulencí dojde k rozšíření *mezní vrstvy*.

Tuhle zákonitost velice dobře popsal a matematicky ověřil M. Patočka [3], kde u různých velikých těles (chladičů) dochází ke změně rychlosti proudění *mezní vrstvy* vzduchu.

Pro lepší představu o rozměrech a klasifikaci jednotlivých těles je můžeme rozdělit podle velikosti [3]:

- malá tělesa, jejichž alespoň dva lineární rozměry jsou $l_x, l_y, l_z < 4$ mm.
- středně velká tělesa $4 \text{ mm} < l_x, l_y, l_z < 300$ mm.
- velká tělesa $l_x, l_y, l_z > 300$ mm.

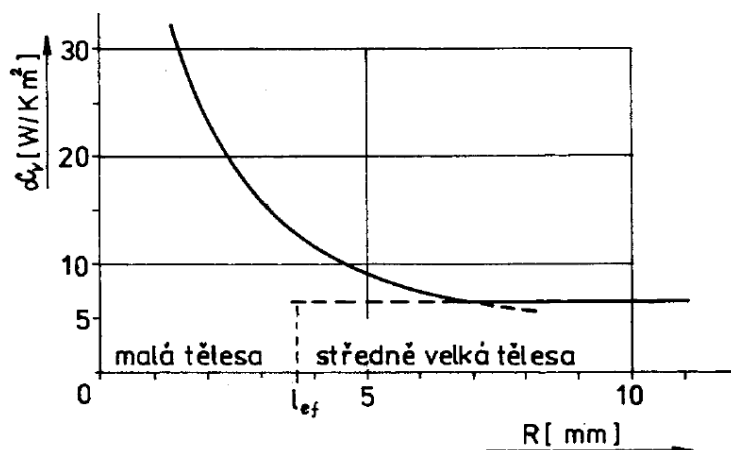
Mezi velká tělesa patří většina energetických zařízení, jako jsou transformátory, velké cívky, nádoby transformátorů, rozvaděče apod.

Středně velká tělesa lze považovat např. za součástky typu elektrolytické kondenzátory, výkonové tranzistory, tlumivky, diody, tyristory apod.

Jako malá tělesa si můžeme představit např. SMD výkonové tranzistory, odpory, diody, tyristory, ale i menší elektrolytické SMD kondenzátory a samozřejmě mnoho dalších SMD součástek těchto rozměrů < 4 mm.

2.2.2 Porovnání činitele přestupu tepla vedením u různě velkých těles

U malých těles $l_x < 4$ mm je rychlost proudění v *mezni vrstvě* hodně malá. Podle analýzy M. Patočky [3] je vedení tepla (tepelné energie) z koule obklopené *nehybnou masou* efektivnější, než u těles středně velkých a velkých.



Obr. 7: Teoretický průběh závislosti činitele přestupu tepla α_v na poloměru koule.

Na Obr. 7 je demonstrativní ukázka průběhu činitele přestupu tepla α_v pro poloměr malé koule. Jedná se o vypočtený teoretický průběh ke zvýraznění skutečnosti, že s rostoucí l_{ef} klesá hodnota součinitele přestupu tepla α_v .

2.3 Přestup tepla zářením

Dalším typem přestupu tepla z tělesa (v našem případě chladiče) je zářením. Přenos tepla zářením spočívá ve vyzařování a jeho následném pohlcování, jež vede ke zvýšení vnitřní energie v látce, která záření absorbuje. Záření souvisí se změnami vnitřní energie tělesa a je vysíláno v podobě elektromagnetických vln do prostoru, který těleso (v našem případě chladič) obklopuje. Záření je přirozená vlastnost všech těles. Pohltivost či odrazivost záření závisí především na jakosti povrchu a barvě povrchu.

V kapitole 2.1 je příklad rozdílu tepelné vodivosti mezi černěným a bílým chladičem a jak je z tohoto průběhu patrné, tak černěný povrch je lepší při přenosu (odvodu) tepelné energie, než povrch bílý. Samotná radiodistribuce je velmi složitý děj kvantové mechaniky a pro tuhle práci by nebylo vhodné zacházet do větších detailů. Důležité je však si uvědomit, že pro přenos tepla zářením není potřeba žádné hmotné prostředí, protože jde o elektromagnetické vlnění.

Označíme-li P_r výkon vyzařujícího tělesa ve wattech, S obsah plochy povrchu předmětu v m^2 a T teplotu předmětu v kelvinech, tak platí, že:

$$P_r = \sigma \varepsilon S T^4, \quad (4)$$

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je tzv. Stefanova-Boltzmannova konstanta, parametr ε označuje emisivitu předmětu. Hodnota ε závisí totiž na materiálu tělesa a platí, že $0 < \varepsilon < 1$. Jestliže se $\varepsilon = 1$, tak hovoříme o tělese s černým povrchem, nebo o „dokonalém“ zářiči.

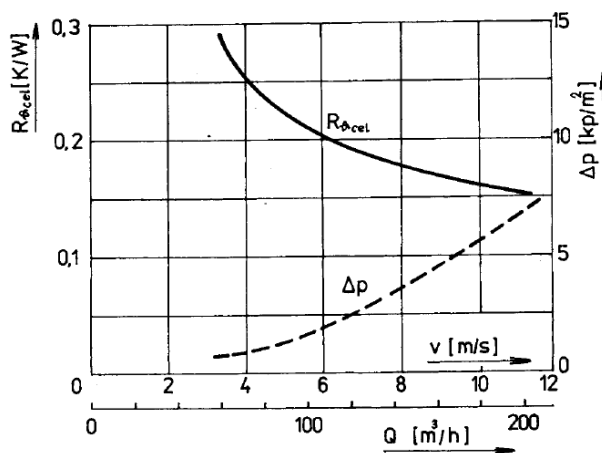
Předmět (v našem případě chladič) může energii vyzařovat, ale také ji může pohlcovat z jiného tepelného zdroje s teplotou T_0 . Samozřejmě platí analogický vztah:

$$P_a = \sigma \varepsilon S T_0^4 \quad (5)$$

Velice často však nastávají oba jevy, jak pohlcování, tak vyzařování např. v uzavřené počítačové skřini, kde je několik elementů vyzařujících různou hodnotu tepelné energie (procesor, grafický čip, severní můstek základní desky, napájecí kaskáda FET tranzistorů procesoru apod.).

2.4 Přestup tepla s nucenou ventilací (prouděním)

Poslední podkapitolou bude přestup tepla z tělesa (chladiče) do okolního vzduchu za pomoci nucené ventilace Obr. 8, např. v podobě ventilátoru. „Snížení tepelného odporu chladiče s nucenou ventilací lze vysvětlit tím, že ofukováním stlačujeme plovoucí vizuální tepelnou elektrodu blíže k povrchu chladiče, zmenší se tloušťka „pružné“ mezní vrstvy a tudíž klesne vodivá složka tepelného odporu“ [3]. Tento mechanismus lze potvrdit několika experimenty, např. v [3] nebo v praktických měřeních v této bakalářské práci.

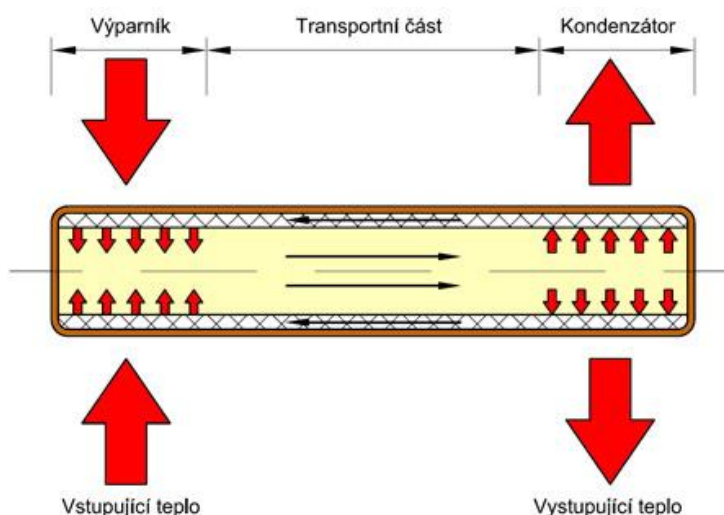


Obr. 8: Závislost celkového tepelného odporu na množství proudícího vzduchu.

3 TECHNOLOGIE V OBLASTI CHLAZENÍ MIKROČIPŮ

3.1 Tepelné trubice

V roce 1942 si R. S. Gaugler nechal patentovat technologii nazývanou heat-pipe Obr. 9 (tepelné trubice) k chlazení ledových boxů. V roce 1945 patent vylepšil za použití porézního materiálu na vnitřním obvodu tepelných trubic pro zefektivnění tepelných přenosů. Tyhle póry byly velké na straně kondenzátoru a malé na straně výparníku. Tepelné trubice mají v dnešní době řadu využití. Především se uplatňují v průmyslu, kde se vzhledem ke své obrovské tepelné vodivosti, která je až 1000x větší než u měděné tyče stejných rozměrů, používají k chlazení výkonných elektrických motorů, plynových turbín, laserů, nukleárních reaktorů a v poslední době především ke chlazení procesorů pro osobní počítače a notebooky.

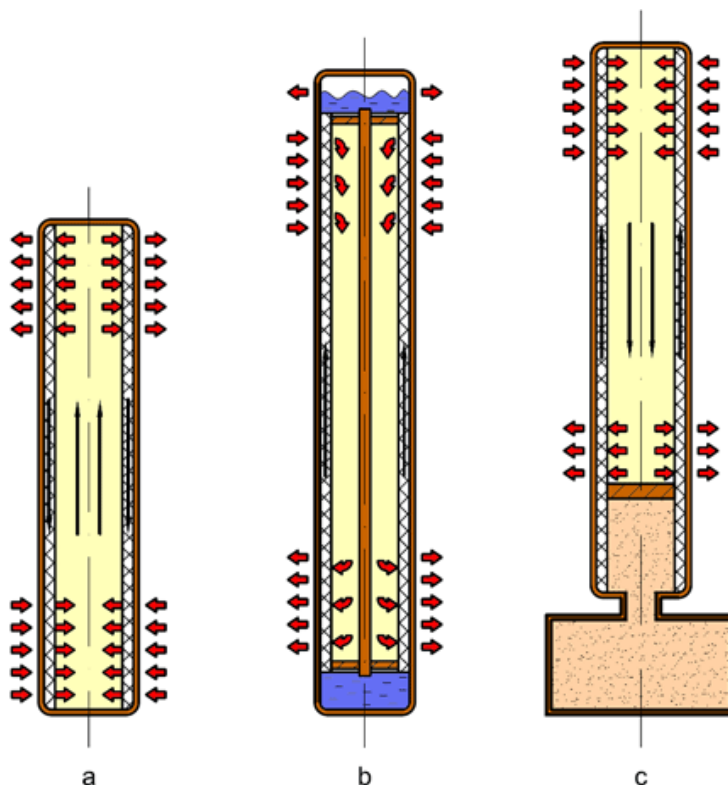


Obr. 9: Princip tepelné trubice [4]

Tepelné trubice slouží k přenosu tepla z jednoho místa na druhé, a to na základě kapaliny, která je umístěna v tepelných trubicích a odebírá při bodu varu intenzivně okolní skupenské teplo. V podstatě udržuje svoji teplotu, a tedy i teplotu okolí na konstantní hodnotě, která odpovídá teplotě varu. Jakmile dojde k teplotě varu, resp. pracovní teplotě, na kterou je tepelná trubice nastavena (např. typem použité kapaliny), začne se látka odpařovat a proudí směrem k ochlazovanému místu, kde zpětně kondenzuje. Proud par se dává do pohybu na základě rozdílných tlaků v místě výparníku a v místě kondenzátoru. Pomocí zmiňovaného porézního materiálu se vypařovaná látka dostává rychleji zpět ke zdroji tepla, a to především díky kapilárním silám. Tyto síly v podstatě „nasávají“ kondenzát zpět k výparníku.

Pórovitý materiál umožňuje, aby tepelná trubice mohla pracovat v jakékoliv poloze, kdy je např. kondenzát níže než samotný výparník. Dnešní porézní materiály zvládnou nasát kondenzát zpět k výparníku až z hloubky 40 centimetrů.

Konstrukce tepelných trubic se liší především v použitém typu, konstrukci pórovitého materiálu a látce (kondenzátu), která přenáší skupenské teplo. Existují samozřejmě různé a velice zajímavé konstrukce, např. trubice s proměnlivou tepelnou vodivostí.



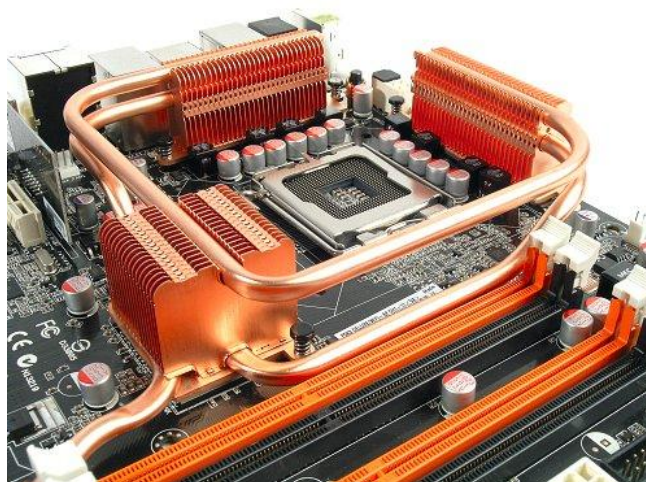
Obr. 10: Tři odlišné konstrukce tepelných trubic [4]

Na Obr. 10 jsou tři typy tepelných trubic: a) obyčejná základní heat-pipe, b) heat-pipe s hlavou a systémem artérií, c) plynem kontrolovaná heat-pipe s proměnlivou vodivostí, kde při vzrůstu teploty dojde ke zvětšení objemu plynu, který dá do pohybu píst, jenž zmenší přestupnou plochu z kondenzátoru do chladiče.

„Tepelné trubice mívají průměr 10 až 30 mm, délku 200 až 800 mm, pracovní teplotu 30 až 150 °C. Přenášený výkon bývá v rozmezí 500 až 1500 W v poloze svislé (gravitační) i vodorovné. V poloze antigravitační se výkon redukuje typicky na polovinu. Vlastnosti jsou závislé na objemu trubice, objemu kapaliny, podtlaku zastudena apod.

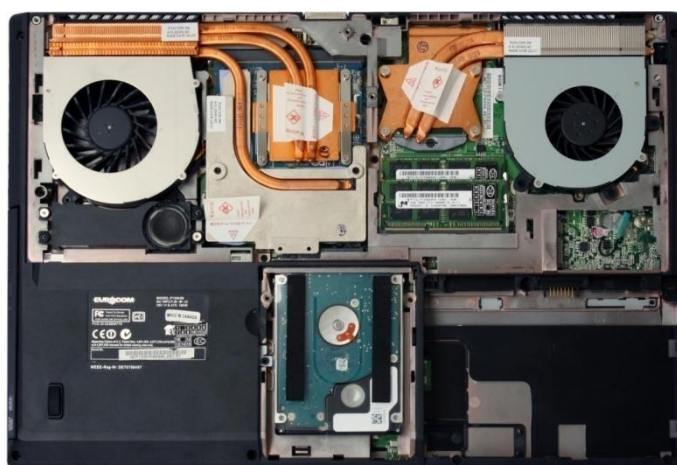
Z užitého hlediska vyniká následující vlastnost: na celé své délce l se trubice jeví, jako by měla téměř „nulový“ tepelný odpor.“ [3]

V kapitole s praktickou částí měření, bude experimentálně změřena účinnost, resp. rozdílnost tepelných přenosů heat-pipes v závislosti na jejich poloze vůči zemské přitažlivosti (gravitaci). Na Obr. 11 a Obr. 12 jsou praktické příklady použití heat-pipes v osobních počítačích a notebookech při chlazení procesorových a grafických čipů nebo napájecí kaskády složené z mnoha MOSFET tranzistorů.



Obr. 11: Chlazení NB čipu a MOSFET tranzistorů PC základní desky

Žádný moderní notebook se bez této technologie neobejde a v každém z nich je vtěsnáno vedle sebe několik tepelných trubíc, přenášejících energii do měděného žebroví, které je většinou umístěno mimo základní desku, aby neohřívalo jiné polovodičové součástky v notebooku.



Obr. 12: Vnitřní uspořádání notebooku s několika tepelnými trubicemi

3.2 Různorodost konstrukce CPU chladičů a tepelných trubic

Heat-pipes jako takové se staly velkým fenoménem poslední doby. Každý výrobce přicházející na trh s novým typem chlazení se snaží vylepšit účinnost tepelných trubic na jejich maximum. Při chlazení mikročipů, a to zejména procesorů pro osobní počítače, se objevilo několik zajímavých vylepšení s názvem „*Heat-pipe Direct Touch*“, dále už jen **HDT**. Toto technologické vylepšení snižuje tepelný odpor mezi povrchem čipu a samotnou styčnou plochou chladiče.

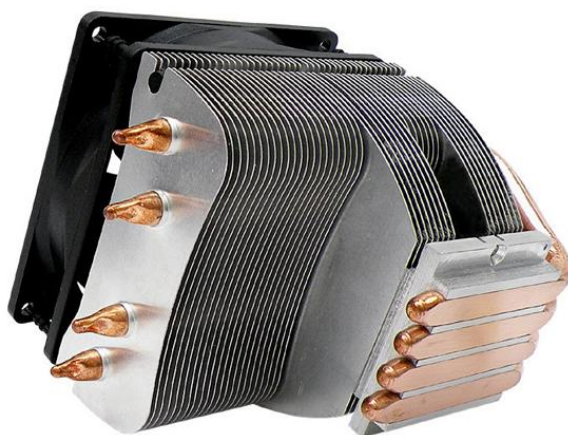
V dřívějších dobách vypadaly první CPU chladiče jako na Obr. 13, kde byly protnuty 1 - 2 heat-pipes měděnou styčnou základnou, která dosedala na povrch čipu CPU. V průběhu doby se zjistilo, že poměrně významný tepelný odpor vzniká mezi styčnou plochou chladiče a samotnými heat-pipes, a proto výrobci přišli s nápadem nazývaným **HDT**, který se snažil tento „tepelný most“ eliminovat.



Obr. 13: Ukázka CPU chladiče Zalman CNPS9000 bez HDT

Vznikly první chladiče s technologií HDT od společnosti Xigmatek. Jestli byla tato společnost skutečně první na celosvětovém trhu, o tom se vedou dlouhé dohady, ale fakt je ten, že jako jedna z prvních začala prodávat takto vylepšené a účinnější chladiče CPU.

Na Obr. 14 je ukázka jednoho z prvních chladičů CPU s názvem Xigmatek Cobra s technologií HDT. Je viditelné, že heat-pipes jsou nalisovány do hliníkového bloku.

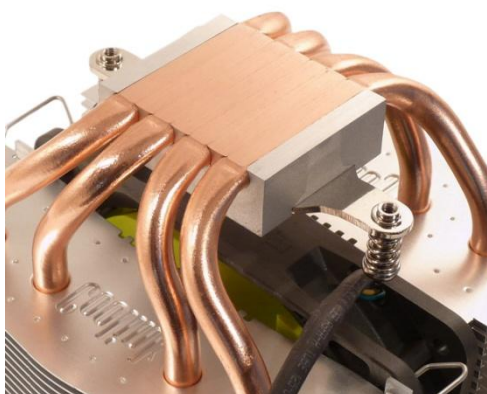


Obr. 14: CPU chladič Xigmatek Cobra s technologií HDT

Nevýhodou technologie HDT jsou tzv. „mrtvé“ výplně z hliníku mezi jednotlivými trubicemi. Ty představují neefektivní zónu při styku s čipem procesoru.

Uživatelé a nadšenci v oblasti přetaktování udávají, že chladiče s HDT nejsou vhodné pro dvou-jádrové procesory, protože jsou pod IHS („*Integrated Heat Spreader*“, česky rozšiřovač tepla) umístěné dva samostatné čipy procesoru. Z geometrického rozložení heat-pipes a čipů v pouzdře procesoru vychází nad oblastí obou čipů právě tzv. mrtvá a neefektivní zóna v podobě hliníkového pásku Obr. 14.

Poslední a nejvýznamnější technologický krok ve vývoji chladičů CPU s tepelnými trubicemi vykonala společnost Coolink s chladičem nesoucí název Corator DS, a to právě reakcí na nedokonalou technologii HDT. Nový nápad, jak vyplnit prostor mezi heat-pipes a zároveň zachovat přímý styk s IHS procesoru, byl v použití speciální směsi mědi místo méně tepelně vodivého hliníku. Tato technologie se označuje, jako **Gapless Direct Touch (GDT)**.

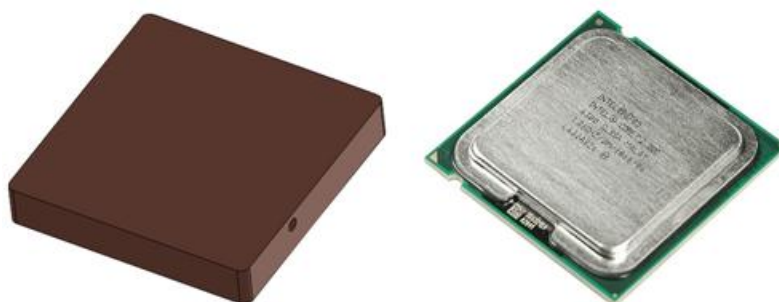


Obr. 15: Coolink Corator DS - chladič s technologií GDT

4 NÁVRH A REALIZACE VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

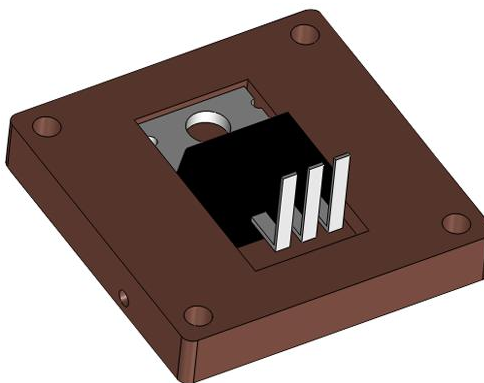
4.1 Měděné těleso s MOSFET tranzistorem - návrh

První dvě velké chyby, které byly analyzovány v první kapitole, vznikaly přímo v procesoru. Jednak to byl nekontrolovatelný a měnící se příkon procesorového čipu, který je silně závislý na provozní teplotě, a také měření teploty, při kterém senzory nedosahovaly požadované třídy přesnosti. Tento problém lze vyřešit za pomoci přípravku, který můžete vidět na Obr. 16 a Obr. 17.



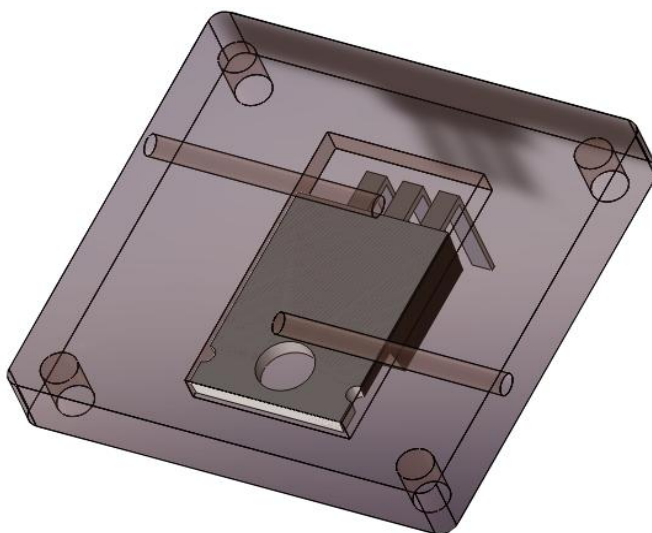
Obr. 16: Porovnání měděného tělesa s procesorem Intel Core 2 Duo

Na pravé straně Obr. 16 je vidět skutečný procesor (Intel Core 2 Duo) a na levé straně je tepelné těleso, které svými rozměry a plochou odpovídá skutečnému procesoru (obrázky jsou v nepoměrech zvětšené a slouží jenom pro ilustraci). Tepelné těleso je vyrobeno z mědi a má svůj vlastní zdroj tepelné energie – MOSFET tranzistor (Obr. 17). Ten bude generovat tepelnou energii jako procesorový čip. Většina moderních procesorů pro osobní počítače jsou zapouzdřeny do tzv. IHS (Integrate Heat Spreader). Ten chrání samotný čip procesoru před mechanickým poškozením, ale také rozvádí tepelnou energii do větší plochy. IHS má rozměry u patice LGA 775 30x30 mm a i tepelné těleso bude těchto rozměrů dosahovat.



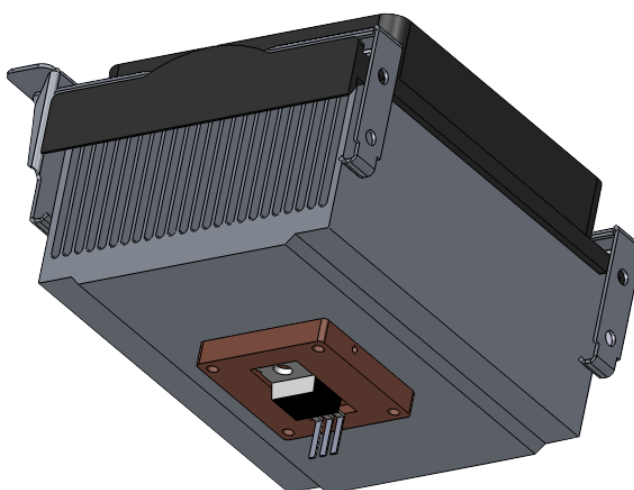
Obr. 17: Pohled na tepelné těleso s MOSFET tranzistorem

Na Obr. 17 jsou vidět po stranách malé podlouhlé otvory. Zde se umístí odporové teplotní senzory, konkrétně z řady PT 1000 o rozměrech 1x3 mm. Otvory jsou lépe vidět na Obr. 18.



Obr. 18: Průsvitný pohled na tepelné těleso a otvory pro senzory teploty

Díry pro senzory jsou o průměru 2 mm s hloubkou vrtání 16 mm. Čtyři postraní slepé díry o průměru 2,4 mm budou sloužit jako montážní otvory pro šrouby M3 – díky nim se celé těleso přichytí k základní desce. Odporové senzory PT 1000 se do jednotlivých otvorů zataví pomocí tepelně vodivého silikonového elastomeru, který dosahuje tepelné vodivosti 2 W/Km. Elastomer má sloužit jako výplň, ale především zlepšit tepelné přenosy z tělesa do snímačů teploty v blízkosti MOSFET tranzistoru a naopak.

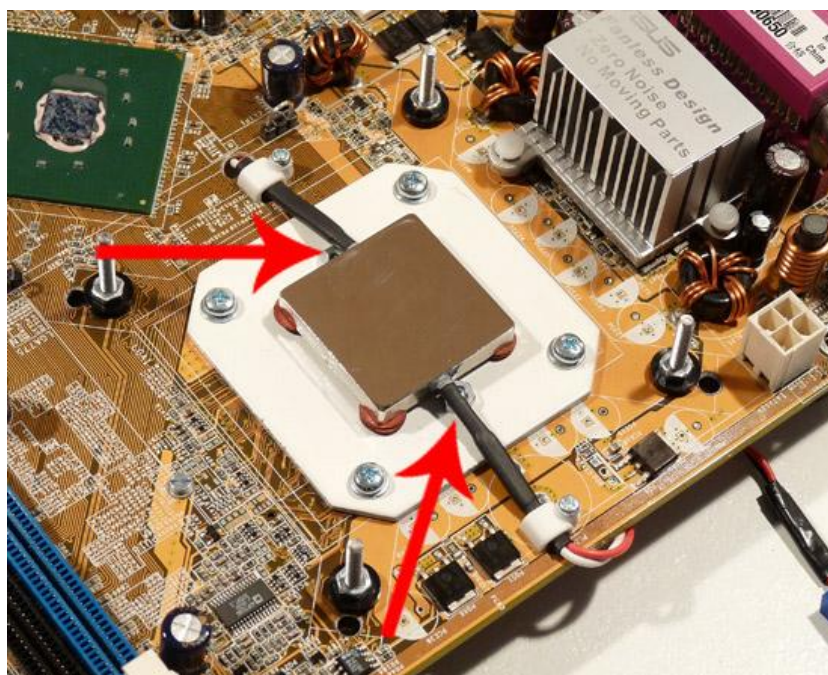


Obr. 19: Ukázka styku testovaného chladiče s tepelným tělesem

Na Obr. 19 je vidět, jakým způsobem bude těleso orientované vůči chladiči. Vrchní částí dosedá na jeho styčnou plochu jako u skutečného procesoru osobního počítače. Je to pouze ilustrativní pohled. Ve skutečnosti bude těleso přimontované na starou základní desku počítače a pomocí montážních otvorů v základní desce bude chladič přitažen k tělesu tak, jak to je ve standardním osobním počítači.

4.2 Praktická realizace tepelného tělesa

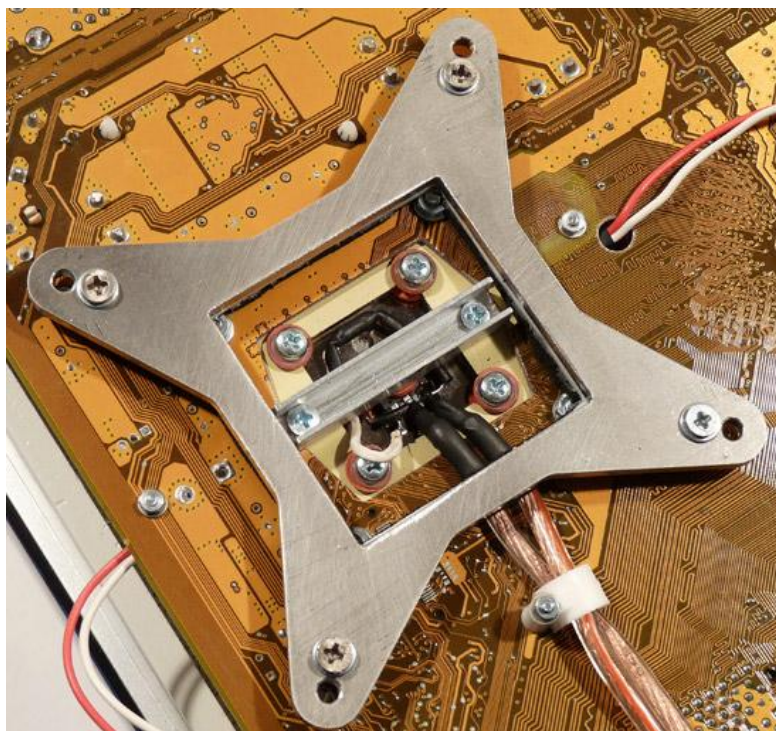
V této podkapitole je ukázka vyrobeného tepelného tělesa. Jak jsem naznačil na začátku této kapitoly, tak těleso je vyrobeno z mědi o tloušťce 5 mm za pomoci automatizované CNC frézy. Povrch je upraven galvanickým niklem, aby nedocházelo k oxidaci měděného povrchu, a tak ke znehodnocení měřených výsledků v průběhu delšího časového horizontu. Šipky na Obr. 20 naznačují umístění odporové senzory typu PT 1000, které jsou zapečené v hloubce 16 mm.



Obr. 20: Realizované skutečné tepelné těleso z mědi.

Aby docházelo k co nejmenším tepelným ztrátám a veškerá energie se výhradně přenášela z tělesa do měřeného chladiče, je těleso přišroubováno přes papírové tepelně izolační podložky k ocelové přírubě (bílý plech na Obr. 20). Tyto podložky tepelně izolují těleso od jeho okolí a vytváří tak účelný tepelný most. Na Obr. 20 je vidět finální provedení.

Ocelová příruba tak tvoří rozhraní mezi základní deskou a tělesem. Je to konstrukční prvek, který zajišťuje pevnost v ohybu a tlaku. Při dotahování měřených chladičů mohou na těleso působit značné síly, které by měly destruktivní charakter, např. v podobě prohnutí základní desky. Aby se působící síly ještě více kompenzovaly, je ze spodní strany použita 3 mm nerezová spona, která je vyřezána pomocí vodního paprsku do přesného tvaru pro montážní otvory chladiče, vše je znázorněno na Obr. 21. Lze si všimnout i napájecího MOSFET tranzistoru **IRF 4905**, kolem kterého je sada rezistorů pro nastavení pracovního bodu s přívodními napájecími kabely.



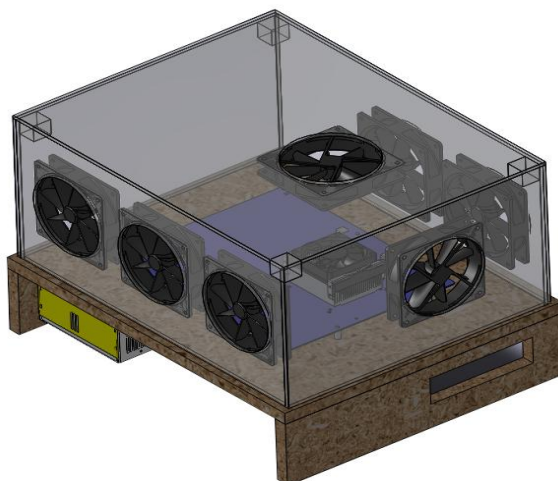
Obr. 21: Pohled ze spodní strany základní desky na FET tranzistor

Nerezová spona a její montážní otvory jsou kompatibilní se standardem patic procesorů typu LGA 775 a LGA 1366, což jsou nejmodernější patice od společnosti Intel pro procesory Core i7. Nejedná se tedy o žádné zastaralé typy.

4.3 Návrh řízeného tunelu

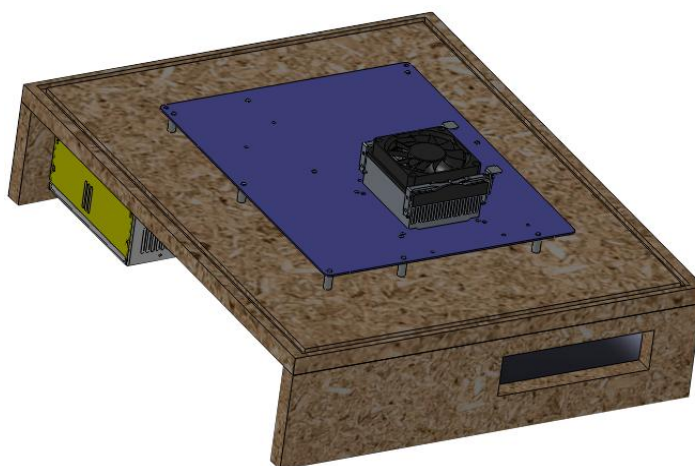
Další velkou chybou při měření na obyčejné počítačové sestavě byla nehomogenita okolního vzduchu, který proudil kolem měřeného chladiče. Tento problém lze řešit tak, že se tepelné těleso a chladič uzavře do prostoru, u kterého se bude kontrolovat vstupní teplota vzduchu a rychlost proudění. Tím pádem se vytvoří řízený tunel. Návrh 3D modelu řízeného

tunelu lze vidět na Obr. 22. Jeho rozměry 480x380x230 mm jsou podobné, jako jsou standardní rozměry počítačové skříně typu „big tower“. Tunel má několik vstupních a výstupních otvorů, ve kterých jsou umístěny ventilátory pro simulaci proudění vzduchu. Rozložení jednotlivých ventilátorů je velice podobné standardu ATX, který upřesňuje, jak by měly být rozloženy komponenty uvnitř PC skříně. Tento standard zavedla společnost Intel v roce 1995 a ve své podstatě se stále dodržuje.



Obr. 22: Model řízeného tunelu pro přesnější měření CPU chladičů

Vrchní část tunelu nebo spíše jednotlivé segmenty jsou vyrobeny z plexiskla (acrylic) tloušťky 5 mm a jsou k sobě slepeny pomocí speciální epoxidové pryskyřice – jednotlivé díly, tak tvoří uzavřenou komoru. Spodní část je vyrobena z dřevotřísky, ve které je vyfrézovaná drážka o šířce 6 mm, takže plexisklový box do ní pohodlně zapadne. Zároveň drážka tvoří prostor pro umístění pěnového těsnění.



Obr. 23: Model podstavce řízeného tunelu

Spodní část tvoří hlavně nosnou konstrukci, ve které je uložena veškerá elektronika, napájecí zdroj, regulátor otáček pro ventilátory a také rozvod kabelů pro jednotlivé senzory.

4.4 Realizace řízeného tunelu

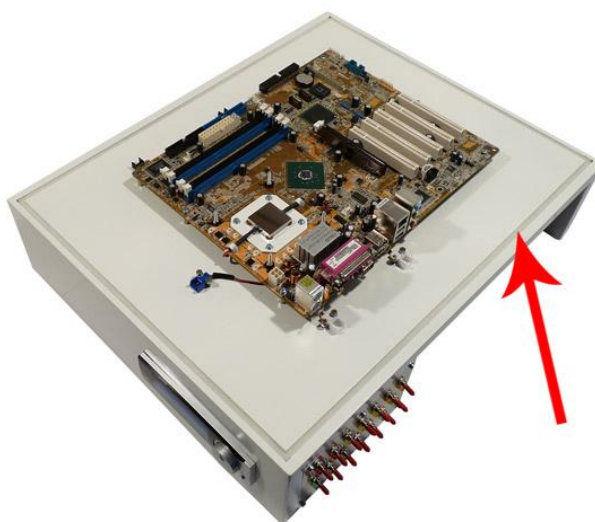
Po nakreslení 3D modelu řízeného tunelu se provedla samotná realizace, a to pomocí CNC frézy a laseru. Funkce celého zařízení se vysvětluje lépe na hotovém modelu. Díky jemnému frézování je celá součást vyrobena s přesností na desetiny milimetru.



Obr. 24: Hotový a realizovaný řízený tunel

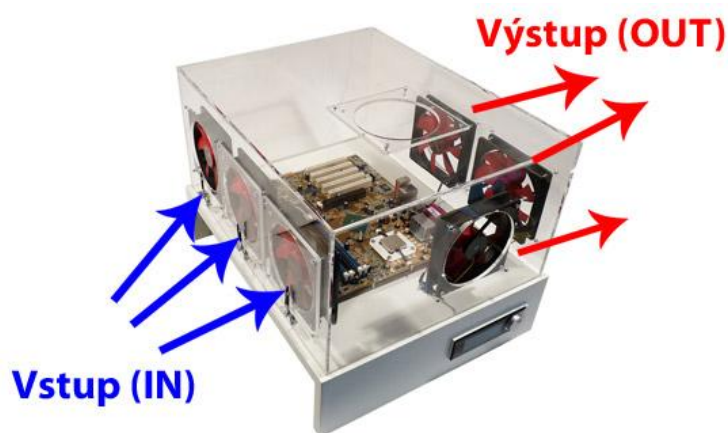
Samotný návrh byl nejvíce obtížný a jeho realizace byla provedena v programu Solidworks 2009. Bylo nutné přemýšlet nad každou desetinou milimetru, kterou mohlo vytvořit např. epoxidové lepidlo v jednotlivých spojích. Na Obr. 24 je skrz plexisklový box vidět základní deska, na které je umístěno tepelné těleso. Jedná se o starou nefunkční základní desku z osobního počítače – sama o sobě není zapojená a slouží pouze jako nosný prvek pro měřený chladič a těleso. Zároveň do ní lze osadit několik dalších komponentů, jako grafickou kartu, PCI I/O přídavné karty, operační paměti apod., a tím simulovat složitější mechanismus proudění, jako je ve standardní PC skříni.

Uvnitř tunelu je nainstalovaných sedm ventilátorů o průměru 120 mm, přičemž každý je schopen rozsahu 300 – 1100 ot./min. Horní otvor, který je zakrytý plexisklovou záslepkou, slouží především ke snadné manipulaci uvnitř tunelu a zapojení jednotlivých konektorů. Zároveň může být použit pro vstupní nebo výstupní ventilátor, jako je u některých nestandardních PC skříní typu BTX.



Obr. 25: Realizovaný podstavec pro aerodynamický tunel

Šipka na Obr. 25 naznačuje 6 mm drážku, ve které je umístěné těsnění a celý box z plexiskla do ní snadno zapadne. Princip proudění vzduchu v tunelu je naznačen na Obr. 26. Výstupní ventilátory simulují odvod teplého vzduchu tak, jak je to u standardních PC skříní. Před vstupními ventilátory jsou umístěná odporová čidla typu PT 1000 Obr. 26, která snímají vstupní teplotu vzduchu pro následnou kompenzaci výsledné měřené teploty tělesa.



Obr. 26: Základní princip proudění vzduchu uvnitř tunelu

Každé čidlo má svůj vlastní kalibrovací potenciometr, a lze tak všechny samostatně nastavit podle potřebných požadavků. Jak si lze všimnout, tak před některými ventilátory jsou umístěné plexisklové zasklepky o rozměrech 200x200 mm Obr. 27. Tyto plexisklové čtverce slouží pro zakrytí vstupní nebo výstupní části, a tím tak lze simulovat různou rychlost a směr proudění vzduchu uvnitř tunelu. Má to velkou výhodu ve své univerzálnosti, protože tak lze nastavit různé podmínky.



Obr. 27: Rozmístění senzorů na vstupní části tunelu

Plexisklové zasklepky jsou přitaženy pomocí šroubů M3 díky vyříznutému závitu, takže odstranění nebo nasazení je velice snadné a rychlé. Je to důležité tehdy, když je potřeba velmi rychle změnit proudění vzduchu uvnitř tunelu. Stejný způsob je na výstupní části tunelu – Obr. 28.



Obr. 28: Pohled na výstupní část tunelu s použitím plexisklových zasklepek

4.5 Regulace jednotlivých prvků

Aby bylo možné jednotlivé ventilátory a čidla ovládat (regulovat) zcela nezávisle, musí být někde zapojené. Tím je regulační panel Zalman ZM2 Obr. 29, který má osm nezávislých výstupů pro ventilátory. Pomocí indikačního LCD panelu nastavíme požadované otáčky pro každý ventilátor s přesností 20 ot./min. Panel je konstrukčně zabudovaný v podstavci tunelu, a je napájen z +12 V stabilizovaného zdroje.



Obr. 29: Ukázka regulačního panelu Zalman ZM2

Pro vypínání jednotlivých ventilátorů a přepínání mezi několika senzory slouží tento jednoduchý indikační panel Obr. 30. Spodní část se zelenými LED diodami je pro ovládání ventilátorů a vrchní část pro přepínání mezi teplotními senzory.



Obr. 30: Přepínací indikační panel ventilátorů a senzorů

Uvnitř spodní části tunelu je umístěn obyčejný počítačový spínaný zdroj, který slouží k napájení regulačního panelu a dalších budoucích elektrických zařízení. Tento zdroj je univerzální díky svým výstupním napětím +5 V, +12 V a +3,3 V.



Obr. 31: Napájecí stabilizovaný zdroj

4.6 Měřicí přístroje a další použité pomůcky

Aby bylo možné získávat měřené hodnoty z jednotlivých senzorů, bylo nutné použít kvalitní digitální teploměr od společnosti **Greissinger** typu **GMH-175**. Jedná se o laboratorní teploměr, který má pouze jeden vstupní kanál. Pro přepínání mezi jednotlivými senzory slouží právě indikační panel, aby nebylo nutné používat dalších několik stejných přístrojů.

Příkon je daný proudem a napětím mezi drain-source MOSFET tranzistoru. Pro jeho měření a kontrolu byly použity ověřené digitální multimetry **UNI-T UT70D**. Tyto přístroje měří stejnosměrné napětí s relativní přesností $\pm 0,05 \%$ + 10 dig. a proud $\pm 0,2 \%$ + 40 dig. Pro dodatečné změření otáček ventilátorů a kontrolu těchto hodnot byl použit **F-AT-6**. Otáčkoměr měří s přesností $\pm 0,05 \%$ + 1 dig. a je zcela univerzální, takže se dá použít prakticky kdekoliv.

No a nakonec o napájení MOSFET tranzistoru a celého tepelného tělesa se postará regulovatelný a vlastnoručně upravený zdroj **Matrix MPS-3010L-1** o výstupním maximálním napětí + 30 V/10 A = 300 W s digitální regulací výstupního výkonu.

5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI ŘÍZENÉHO TUNELU

V předchozí kapitole byl představený a navržený řízený tunel pro měření účinnosti chladičů CPU. V této kapitole se provedou praktické zkoušky s několika komerčními chladiči, a metodické experimenty pro stanovení výsledné chyby měření. Záznam z několika nadcházejících měření připomíná formu standardního protokolu.

5.1 Zadání úkolu a cíl experimentu

Ověřit funkčnost navrženého tunelu s řízeným prouděním na 10 komerčních chladičích CPU a zhodnotit výslednou chybu měření.

1. Změřit tepelný odpor a ΔT 10 chladičů CPU různých typů při elektrickém příkonu tepelného tělesa $P_{\text{Tin}} = 75 \text{ W}$, 147 W a 220 W , a to v horizontálním režimu řízeného tunelu. Při měření zaznamenávat vstupní teplotu média (vzduchu) a teploty uvnitř tepelného tělesa. Z naměřených hodnot vypočítat teplotní rozdíl ΔT a vynést do grafické závislosti.
2. Změřit tepelný odpor na 10 vybraných chladičích CPU v závislosti polohy heat-pipes při příkonu tepelného tělesa $P_{\text{tin}} = 147 \text{ W}$ ve vertikální poloze, a porovnat výsledky s bodem č. 1.
3. Změřit tepelný odpor 10 chladičů CPU bez nucené ventilace (měřit bez použití interního ventilátoru měřeného chladiče) a zhodnotit vliv konstrukčních parametrů na účinnosti tohoto typu chlazení, a to ve třech režimech proudění řízeného tunelu.
4. S jedním typem chladiče CPU provést měření závislosti příkonu tepelného tělesa na teplotě s konstantní nucenou ventilací ve třech režimech rychlosti otáčení ventilátoru chladiče.
5. Změřit tepelný odpor a ΔT libovolně zvoleného typu chladiče CPU z bodu č. 4 při příkonu $P_{\text{Tin}} = 100 \text{ W}$.
6. Bod 5 opakovat pod dobu 1 týdne, a to v intervalu 7 po sobě jdoucích dní pro zjištění objektivitu naměřených výsledků v delším časovém horizontu.
7. Naměřené výsledky v bodu 5 a 6 statisticky zhodnotit a stanovit výslednou chybu měření navrženého zařízení, včetně korekčních křivek v dlouhodobém horizontu měření.

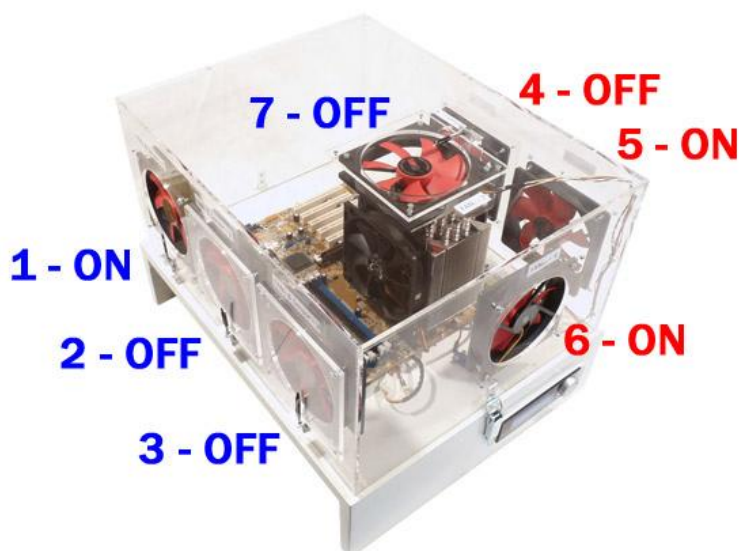
5.2 Obecný postup při měření v řízeném tunelu

1. Očištění a odmaštění styčné plochy tělesa a chladiče isopropyl alkoholem, nanesení tenké vrstvy teplovodivé pasty, rozetření po celé ploše prstem v mikrotenovém sáčku, aby nedošlo ke kontaminaci očištěných ploch. Při každém měření je nutné použít stejný typ teplovodivé pasty.
2. Měřený chladič se nasadí na těleso a rovnoměrně se dotáhne ke konstrukci základní desky pomocí šroubů a montážních pružinek, aby správně seděl po celé ploše tepelného tělesa.
3. Nasazení vrchní plexisklové části řízeného tunelu, zapojení všech konektorů, kabelů a následné spuštění napájecího zdroje se všemi přístroji.
4. Napájecí zdroj tělesa se nastaví na výstupní výkon 75 W (+ 29,5 V/2,54 A), 147 W (+ 29,5 V/4,98 A), anebo 220 W (+ 28,5 V/7,71 A). K měření je použit zdroj s automatickou regulací výstupního proudu (autoregulací výstupního výkonu) ke kompenzaci změny odporu R_{DS} napájecího FET tranzistoru v závislosti na jeho teplotě.
5. Pokud je tunel spuštěný a na regulovatelném zdroji je nastaveno správné výstupní napětí a proud (výstupní výkon), nastaví se na testovaném chladiči minimální otáčky interního ventilátoru. To jsou takové otáčky, při kterých se ventilátor samovolně rozběhne. Celý systém se nechá 20 minut temperovat pro ustálení teploty uvnitř tepelného tělesa, a po této době se začíná měřit. Odečítají se teploty uvnitř tepelného tělesa a vstupní teploty vzduchu.
6. V intervalu cca 10 - 15 minut se zvyšují otáčky ventilátoru na měřeném chladiči a odečítají se příslušné teploty. Otáčky se zvyšují s krokem 120 ot./min. Veškeré hodnoty jsou zapisovány do tabulek v excelu a následně graficky vyhodnoceny.
7. Celé měření se opakuje celkem 3x od bodu 1 po bod 8. Do tabulek se zapisuje průměrná hodnota všech tří měření.

Tento obecný postup představuje několik základních kroků při všech měřeních, které jsou standardně dodrženy. Konkrétní nastavení řízeného tunelu, jako je např. rychlost otáčení ventilátorů apod., je vysvětleno v další podkapitole.

5.3 Konkrétní nastavení řízeného tunelu pro jednotlivé části měření

ad 1) Prvním experimentem je horizontální režim měření, kdy je chladič umístěný v řízeném tunelu v horizontální poloze vůči zemské gravitaci, a to z toho důvodu, že mnoho PC skříní je postaveno právě v této poloze – tyhle typy skříní se nazývají „desktop case“ a jsou nejvíce využívané v kancelářích.



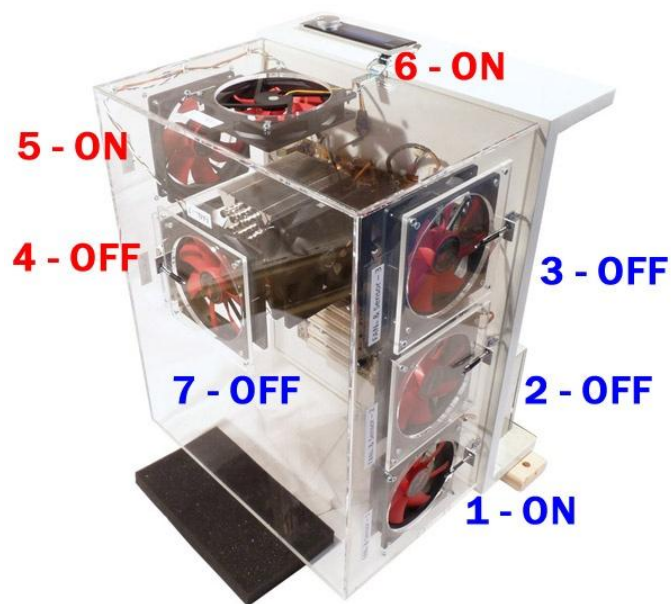
Obr. 32: Horizontální režim měření a nastavení řízeného tunelu

Nastavení jednotlivých ventilátorů je znázorněno na Obr. 32 a popsáno v Tab. 1. Při všech měřeních je vždy použitý originálně dodávaný ventilátor od výrobce.

Tab. 1: Nastavení ventilátoru řízeného tunelu pro horizontální režim měření

Číslo ventilátoru	Zapnuto/vypnuto – utěsněno	Nastavení otáčení rotoru
vstupní č.1	Zapnuto (ON)	600 ot./min
vstupní č.2	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
vstupní č.3	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
výstupní č.4	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
výstupní č.5	Zapnuto (ON)	600 ot./min
výstupní č.6	Zapnuto (ON)	600 ot./min
vstupní č.7	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	

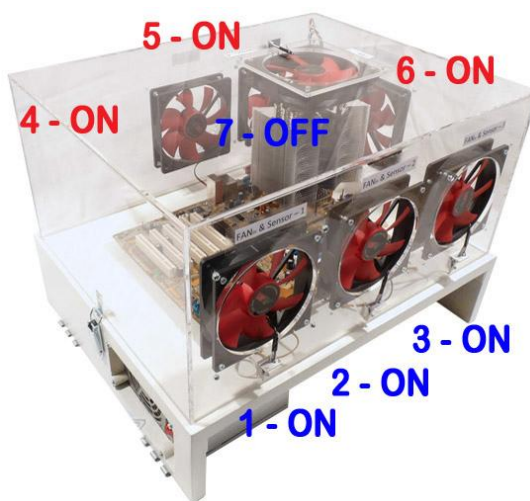
ad 2) Vertikální režim měření prověří rozdílnou vodivost heat-pipes v závislosti na jejich poloze vůči zemské gravitaci, a to z toho důvodu, že dalším typem standardních PC skříní jsou tzv. „middle tower“, ve kterých je chladič orientován vertikálně.



Obr. 33: Vertikální poloha řízeného tunelu

Na Obr. 33 je řízený tunel ve vertikální poloze. Ventilátory jsou nastaveny podle Tab. 1.

ad 3) Při tomto režimu měření se odstraní interní ventilátor z heatsinku a ponechá se pouze samotná „pasivní“ část uvnitř tunelu. Měření probíhá v horizontální poloze vůči zemské gravitaci, a je rozděleno do tří odlišných režimů, které jsou označeny jako standardní test, střední test a progresivní test. Jednotlivá nastavení jsou popsána a ukázána na Obr. 34 a Tab.2.



Obr. 34: Nastavení tunelu pro progresivní test

Tato odlišná měření slouží k porovnání účinnosti chladičů při různém směru a množství vstupního a výstupního řízeného média (vzduchu). Simuluje se tak různá konstrukce umístěných ventilátorů v PC skříní.

Tab. 2: Nastavení ventilátorů řízeného tunelu pro tři režimy "pasivního" měření

Typ testu	Číslo ventilátoru	Zapnuto/vypnuto - utěsněno	Nastavení otáčení rotoru
Standardní pasivní test	vstupní č.1	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.2	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
	vstupní č.3	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
	výstupní č.4	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
	výstupní č.5	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	výstupní č.6	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.7	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
Střední pasivní test	vstupní č.1	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.2	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.3	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
	výstupní č.4	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
	výstupní č.5	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	výstupní č.6	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.7	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	
Progresivní pasivní test	vstupní č.1	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.2	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.3	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	výstupní č.4	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	výstupní č.5	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	výstupní č.6	Zapnuto (ON)	600 ot./min
	vstupní č.7	Vypnuto (OFF) a utěsněno záslepkou	

ad 4) Vybraný chladič je typu Noctua NH-U9B. Interní ventilátor heatsinku se nastaví na 540, 1020 a 1500 ot./min. Příkon tepelného tělesa se bude zvyšovat od 20 W po 140 W v kroku 20 W. Všechny naměřené výsledky jsou zaznamenávány do tabulky a vytvoří se odpovídající grafické průběhy.

ad 5, 6) Vybraný chladič je opět typu Noctua NH-U9B Obr. 35. Nastavení řízeného tunelu je shodné s bodem ad 1), příkon tepelného tělesa je vždy nastaven na hodnotu $P_{T_{in}} = 100 \text{ W}$, což představuje nejtypičtější příkon procesorů osobních počítačů.



Obr. 35: Měřený typ chladiče značky Noctua typu NH-U9B

K vyšší objektivitě naměřených výsledků a stanovení skutečné chyby měření se provede dlouhodobé měření v řízeném tunelu, a to v 7 po sobě jdoucích dnech. Měření musí probíhat za podobné okolní teploty a relativní vlhkosti – tím je myšleno, že teplota v místnosti se musí pohybovat v maximálním rozsahu 19 - 23 °C a relativní vlhkosti 25 - 35 %. Stabilní hodnota teploty a relativní vlhkosti v místnosti s řízeným tunelem, je udržována klimatizační jednotkou.

ad 7) U všech 7 měření vypočítat teoretickou hodnotu průběhu (např. interpolačním polynomem) a stanovit absolutní a relativní chybu měření. Z absolutní chyby vytvořit korekční křivky a jejich maximální hodnoty. Stanovit aritmetický průměr všech naměřených hodnot a největší zaznamenanou odchylku. Vyhodnotit i směrodatnou odchylku.

5.4 Naměřené výsledky

ad 1 - 3) Protože tabulka s 10 naměřenými chladiči je velice obsáhlá, tak v Obr. 35 jsou uvedeny hodnoty pouze pro první měřený chladič a jsou zde také veškeré vysvětlivky v podobě barevného schématu, ostatní naměřené výsledky lze najít v příloze této práce.

- modrá oblast představuje nastavený příkon tepelného tělesa od 75 W po 220 W.
- fialová oblast je typ měřené teploty. Označení $T_{1\text{těleso}}$ a $T_{2\text{těleso}}$ je interní teplota uvnitř tepelného tělesa. Jak bylo napsáno v předchozí kapitole, tak v tepelném tělese jsou dva senzory typu PT 1000. Hodnoty s označením $avg. T_{1,2}$ je aritmetický průměr z hodnot $T_{1\text{těleso}}$ a $T_{2\text{těleso}}$.

Pod označením T_{1in} , T_{2in} a T_{3in} jsou senzory před vstupními ventilátory řízeného tunelu, viz. Obr. 27. Hodnoty $avg. T_{in}$ jsou opět aritmetický průměr z T_{1in} , T_{2in} a T_{3in} . Označení

ΔT je rozdíl mezi avg. $T_{1,2}$ a avg. T_{in} . Hodnota R_t je vypočítaný tepelný odpor chladiče podle vztahu (1) a R_{tavg} je aritmetický průměr tepelného odporu chladiče daný z naměřených hodnot při příkonu tepelného tělesa při 75 W, 147 W a 220 W.

- červená oblast představuje tři režimy měření bez použití ventilátoru umístěného na heatsinku měřeného chladiče. Nastavení řízeného tunelu a popis těchto režimů měření je v Tab. 2.
- zelená oblast jsou naměřené hodnoty pro horizontální režim měření s interním ventilátorem chladiče, a to v rozsahu od 300 ot./min po 2340 ot./min.
- oranžová oblast jsou hodnoty pouze pro vertikální režim měření.
- žlutá oblast představuje pouze osu X při nastavovaných otáčkách rotoru ventilátoru na měřeném chladiči.

Buňky v tabulce na Obr. 35, které nejsou označené nebo ukazují znaky: „####“, „#DIV/0!“ jsou pouze nevyužité, protože je tabulka univerzálně navržena pro jakékoliv měření chladičů při různé rychlosti otáčení ventilátoru.

Test v řízeném tunelu pro chladič: Coolink Corator DS																									
Typ měření	Příkon tělesa [W]	Typ měřené teploty [°C]	Otáčky rotoru ventilátoru připevněném na měřeném chladiči																						
			Standardní test	Střední test	Progresivní test	ot./min																			
						300	420	540	660	780	900	1020	1140	1260	1380	1500	1620	1740	1860	1980	2100	2220	2340		
Horizontální test	75	T1 těleso	69,5	49,7	48,2		49,4	45,0		40,0		37,9		36,4		35,6		35,6							
		T2 těleso	69,2	48,9	47,6		48,8	44,3		39,2		37,1		35,4		34,8		34,8							
		avg. T1,2	69,4	49,3	47,9	####	49,1	44,7	####	39,6	####	37,5	####	35,9	####	35,2	####	35,2	####	####	####	####	####	####	
		T1 in	20,2	20,4	20,3		19,6	19,8		19,9		20,0		19,5		19,7		20,2							
		T2 in		20,2	20,2																				
		T3 in			20,4																				
		avg. T _{in}	20,2	20,3	20,3	####	19,6	19,8	####	19,9	####	20,0	####	19,5	####	19,7	####	20,2	####	####	####	####	####	####	
		delta T	49,2	29,0	27,6	####	29,5	24,9	####	19,7	####	17,5	####	16,4	####	15,5	####	15,0	####	####	####	####	####	####	
		R _t [°C/W]	0,655	0,387	0,368	####	0,393	0,331	####	0,283	####	0,233	####	0,219	####	0,207	####	0,200	####	####	####	####	####	####	
		T1 těleso	n/a	n/a	n/a		81,9	70,8		58,8		54,0		51,1		49,5		48,8							
	T2 těleso	n/a	n/a	n/a		85,4	74,3		61,9		57,0		54,0		52,4		51,8								
	avg. T1,2	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	83,7	72,6	####	60,4	####	55,5	####	52,6	####	51,0	####	50,3	####	####	####	####	####	####		
	T1 in	n/a	n/a	n/a																					
	T2 in	n/a	n/a	n/a		20,5	20,5		20,7		20,8		20,8		20,9		21,0								
	T3 in	n/a	n/a	n/a																					
	avg. T _{in}	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	20,5	20,5	####	20,7	####	20,8	####	20,8	####	20,9	####	21,0	####	####	####	####	####	####		
	delta T	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	63,2	52,1	####	39,7	####	34,7	####	31,8	####	30,1	####	29,3	####	####	####	####	####	####		
	R _t [°C/W]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	0,430	0,354	####	0,270	####	0,238	####	0,216	####	0,204	####	0,199	####	####	####	####	####	####		
	220	T1 těleso	n/a	n/a	n/a						77,5	75,1		70,9		68,8		68,0							
		T2 těleso	n/a	n/a	n/a						76,6	74,0		69,8		67,5		66,7							
		avg. T1,2	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	####	####	####	####	77,1	74,6	####	70,4	####	68,2	####	67,4	####	####	####	####	####	####	
		T1 in	n/a	n/a	n/a						20,9	21,6		21,8		21,8		22,1							
		T2 in	n/a	n/a	n/a																				
		T3 in	n/a	n/a	n/a																				
		avg. T _{in}	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	####	####	####	####	20,9	21,6	####	21,8	####	21,8	####	22,1	####	####	####	####	####	####	
		delta T	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	####	####	####	####	56,2	53,0	####	48,6	####	46,4	####	45,3	####	####	####	####	####	####	
		R _t [°C/W]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	####	####	####	####	0,255	0,241	####	0,221	####	0,211	####	0,205	####	####	####	####	####	####	
		R _{tavg} [°C/W]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	####	####	####	####	####	0,237	####	0,218	####	0,207	####	0,202	####	####	####	####	####	####	
T1 těleso		n/a	n/a	n/a		80,1	70,1		61,1		57,6		55,3		53,7		53,3								
T2 těleso		n/a	n/a	n/a		79,7	69,5		61,0		57,3		54,9		53,2		52,8								
avg. T1,2		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	79,9	69,8	####	61,1	####	57,5	####	55,1	####	53,5	####	53,1	####	####	####	####	####	####		
T1 in		n/a	n/a	n/a		19,5	19,8		19,9		20,1		20,3		20,4		20,9								
T2 in		n/a	n/a	n/a																					
T3 in		n/a	n/a	n/a																					
avg. T _{in}		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	19,5	19,8	####	19,9	####	20,1	####	20,3	####	20,4	####	20,9	####	####	####	####	####	####		
delta T		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	60,4	50,0	####	41,2	####	37,4	####	34,8	####	33,1	####	32,2	####	####	####	####	####	####		
R _t [°C/W]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	0,411	0,340	####	0,280	####	0,254	####	0,237	####	0,225	####	0,219	####	####	####	####	####	####			
Vertikální test	147	T1 těleso	n/a	n/a	n/a		80,1	70,1		61,1		57,6		55,3		53,7		53,3							
		T2 těleso	n/a	n/a	n/a		79,7	69,5		61,0		57,3		54,9		53,2		52,8							
		avg. T1,2	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	79,9	69,8	####	61,1	####	57,5	####	55,1	####	53,5	####	53,1	####	####	####	####	####		
		T1 in	n/a	n/a	n/a		19,5	19,8		19,9		20,1		20,3		20,4		20,9							
		T2 in	n/a	n/a	n/a																				
		T3 in	n/a	n/a	n/a																				
		avg. T _{in}	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	19,5	19,8	####	19,9	####	20,1	####	20,3	####	20,4	####	20,9	####	####	####	####	####		
		delta T	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	60,4	50,0	####	41,2	####	37,4	####	34,8	####	33,1	####	32,2	####	####	####	####	####		
		R _t [°C/W]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	####	0,411	0,340	####	0,280	####	0,254	####	0,237	####	0,225	####	0,219	####	####	####	####	####		

Obr. 36: Ukázka naměřených výsledků a popis tabulky

V Tab. 4 je seznam deseti chladičů a jejich základních naměřených parametrů, a to především rozměry pevné části (heatsinku), celkový počet hliníkových žebírek, jejich rozteč,

tloušťka žebroví, vnější průměr heat-pipes, jejich počet a použítá technologie styčné plochy. V příloze této práce jsou veškeré fotografie měřených chladičů.

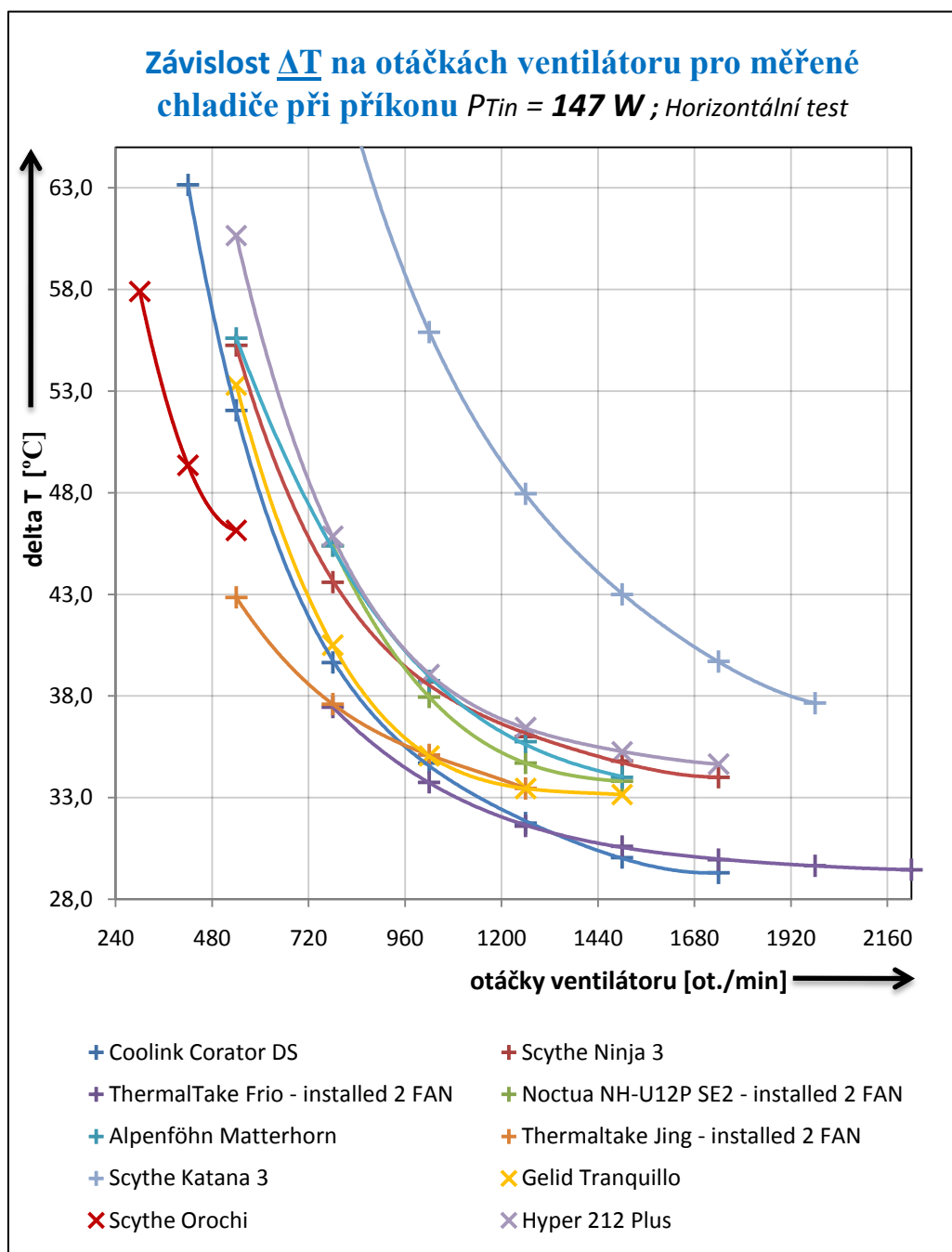
Tab. 3: Seznam měřených chladičů a jejich základní parametry

Název/typ chladiče	Základní rozměry heatsinku	Celkový počet žebroví	Tloušťka žebroví	Rozteč mezi žebrovím	Vnější průměr jedné HP	Celkový počet HP	Použitá technologie styčné plochy
Coolink Corator DS	155x140x121 mm	70	0,45 mm	2,15 mm	8 mm	4	GDT
Scythe Ninja 3	120x120x158 mm	38	0,40 mm	2,40 mm	6 mm	8	noHDT
Thermaltake Frio	132x62x120 mm	48	0,60 mm	1,80 mm	8 mm	5	noHDT
Noctua NH-U12P SE2	158x126x71 mm	36	0,50 mm	2,40 mm	6 mm	4	noHDT
Alpenföhn Matterhorn	134x115x158 mm	48	0,55 mm	2,00 mm	6 mm	6	noHDT
Thermaltake Jing	131x123x162 mm	41	0,55 mm	2,20 mm	6 mm	5	noHDT
Gelid Tranquillo	125x74x153 mm	40	0,40 mm	2,20 mm	6 mm	4	noHDT
Scythe Orochi	120x194x155 mm	35	0,55 mm	3,90 mm	6 mm	9	noHDT
Scythe Katana 3	94x108x143 mm	47	0,30 mm	1,60 mm	6 mm	6	noHDT
CM Hyper 212 Plus	120x78x158 mm	57	0,40 mm	1,50 mm	6 mm	4	HDT

Jak je z Tab. 3 patrné, tak vybrané chladiče se od sebe značně liší, jak počtem tepelných trubic, tak svými základními rozměry pevné části (heatsinku), tloušťkou použitých hliníkových žebroví, či jejich počtem. Některé disponují technologií HDT či GDT, obě byly představeny v kapitole č. 3.

5.4.1 Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 1

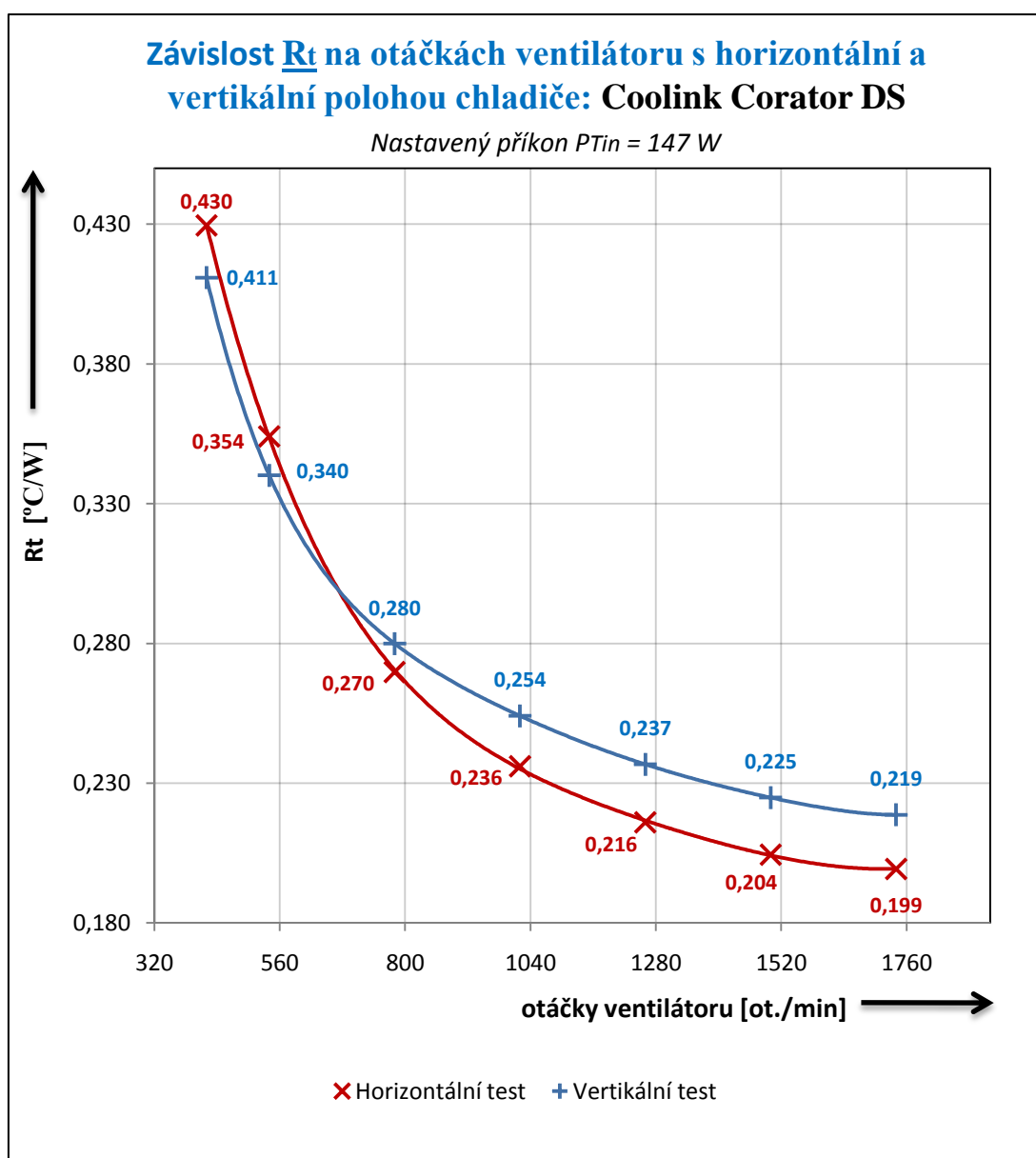
Průběh tepelného odporu 10 vybraných chladičů CPU při příkonu tepelného tělesa $P_{Tin} = 75 \text{ W}$, 147 W a 220 W je v Grafu 1. Další grafické znázornění průběhů devíti měřených chladičů při příkonu $P_{Tin} = 75 \text{ W}$, 147 W a 220 W je v příloze této práce.



Graf. 1: Závislost ΔT na otáčkách ventilátoru pro 10 měřených chladičů

5.4.2 Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 2

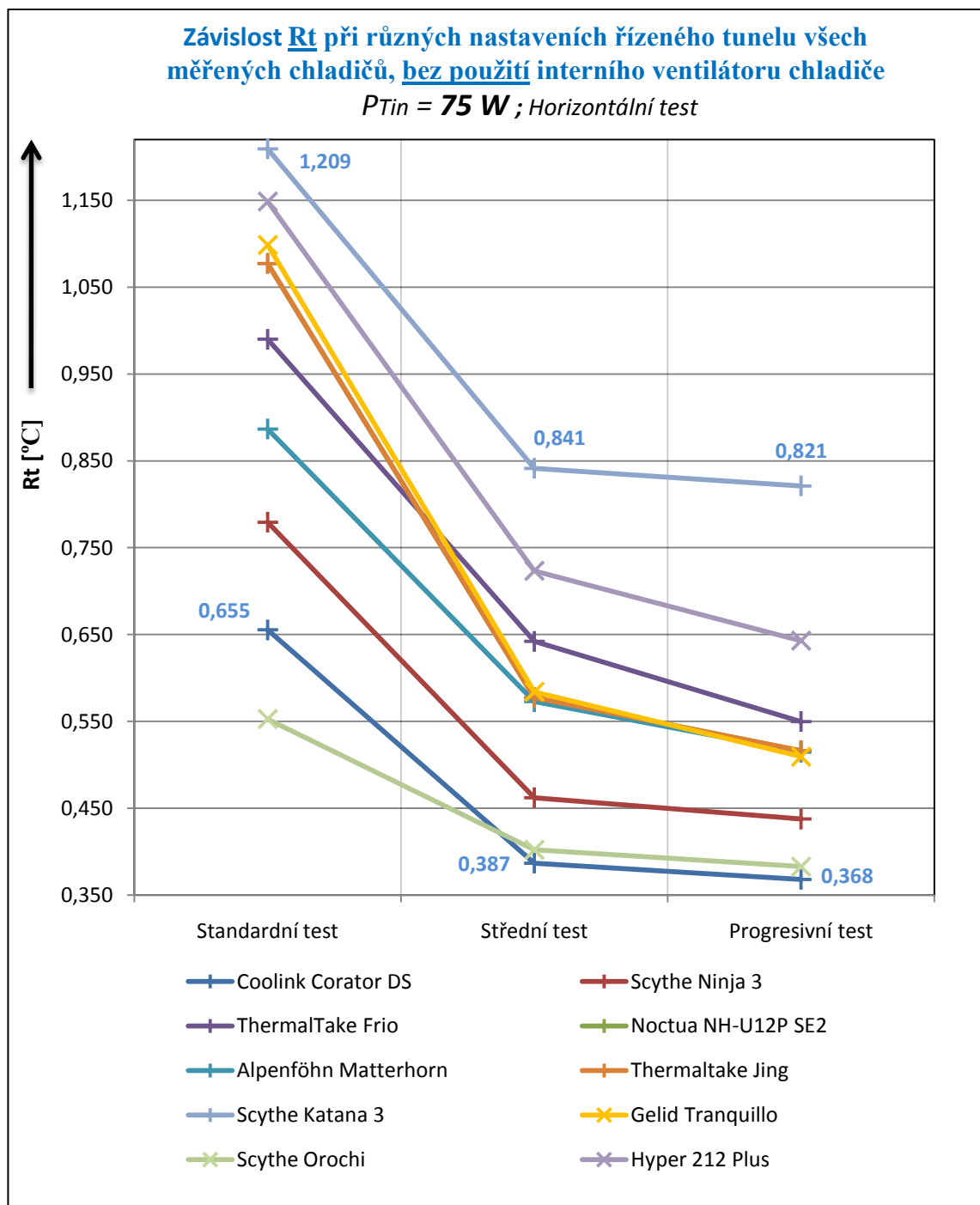
V úkolu č. 2 je porovnání horizontální a vertikální polohy chladiče, a to ke zjištění různé vodivosti heat-pipes na jejich poloze vůči zemské gravitaci. V Grafu 2 je znázorněn průběh tepelného odporu při příkonu tepelného tělesa $P_{Tin} = 147 \text{ W}$ pro chladič Coolink Corator DS. Z průběhů je patrné, že při vertikálním režimu je tepelný odpor vyšší, a to řádově o 10 % při maximálních otáčkách ventilátoru. Další naměřené hodnoty a grafické zobrazení jsou v příloze této práce.



Graf. 2: Závislost R_t na otáčkách ventilátoru s horizontální a vertikální polohou

5.4.3 Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 3

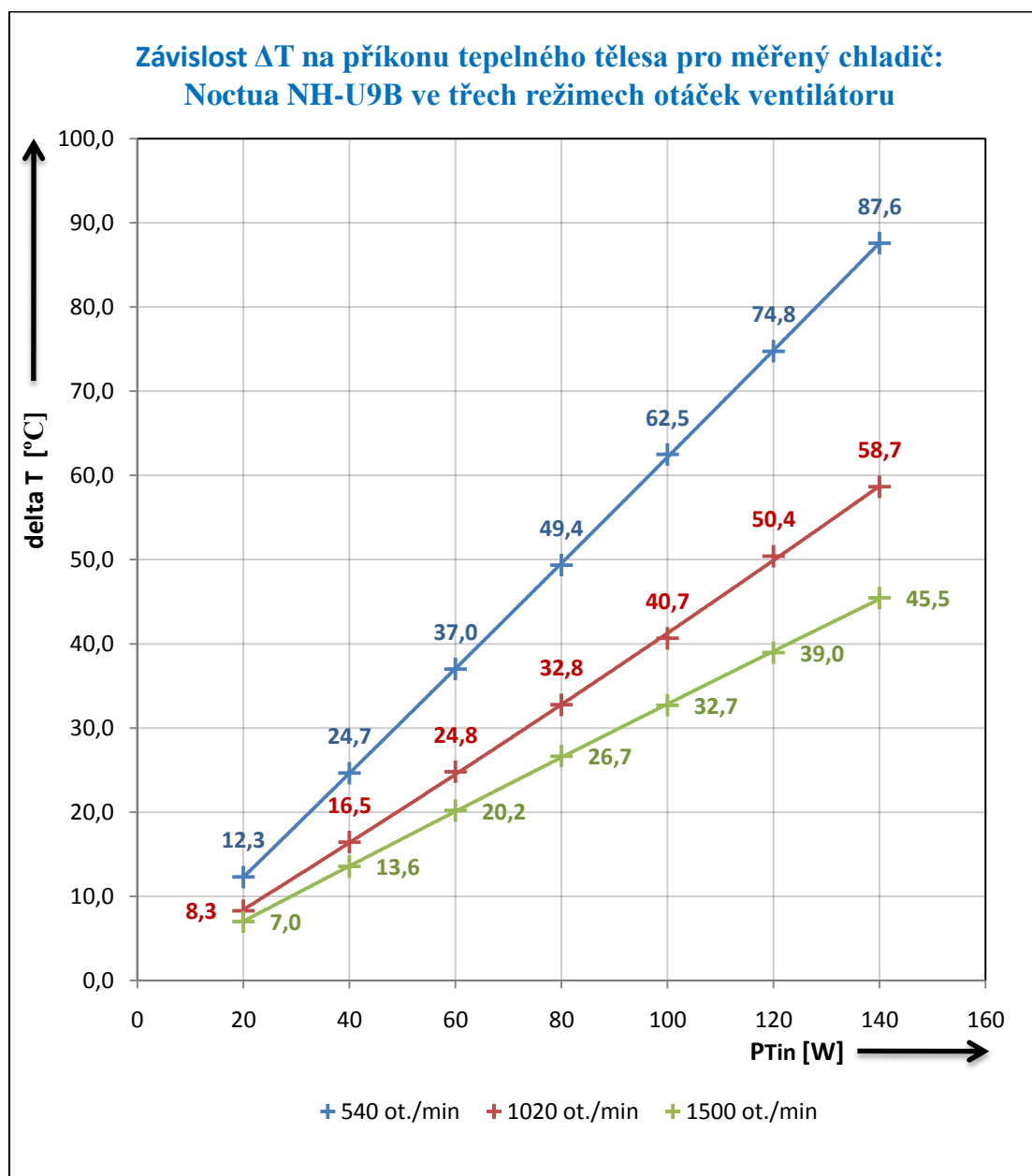
V úkolu č. 3 jsou tři režimy měření 10 chladičů, bez použití interního (vlastního) ventilátoru. Jednotlivé parametry a nastavení řízeného tunelu jsou popsány v kapitole 5.3. Závislost tepelného odporu R_t na typu simulace řízeného tunelu je znázorněna v Grafu 3.



Graf. 3: Závislost tepelného odporu R_t na typu simulace (proudu vzduchu) řízeného tunelu

5.4.4 Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 4

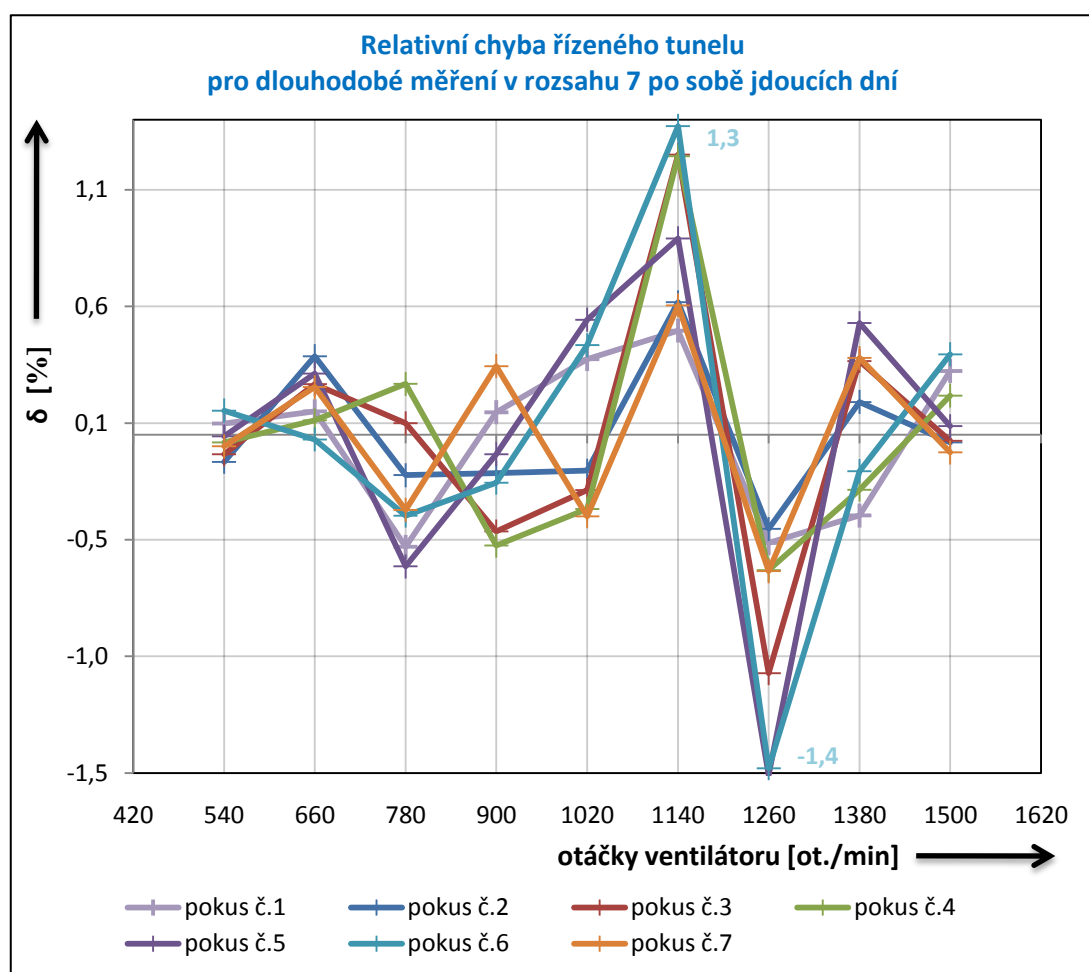
V Grafu 4 je změřená závislost ΔT při třech režimech otáčení ventilátoru, který je umístěný na heatsinku chladiče Noctua NH-U9B. Grafická závislost představuje jiný typ měření chladicího výkonu, než u předchozího úkolu č. 1. Naměřené průběhy odpovídají teoretickým předpokladům z kap. 2.1. Tabulka se všemi naměřenými hodnotami je v příloze této práce.



Graf. 4: Závislost ΔT na příkonu tepelného tělesa pro chladič Noctua NH-U9B

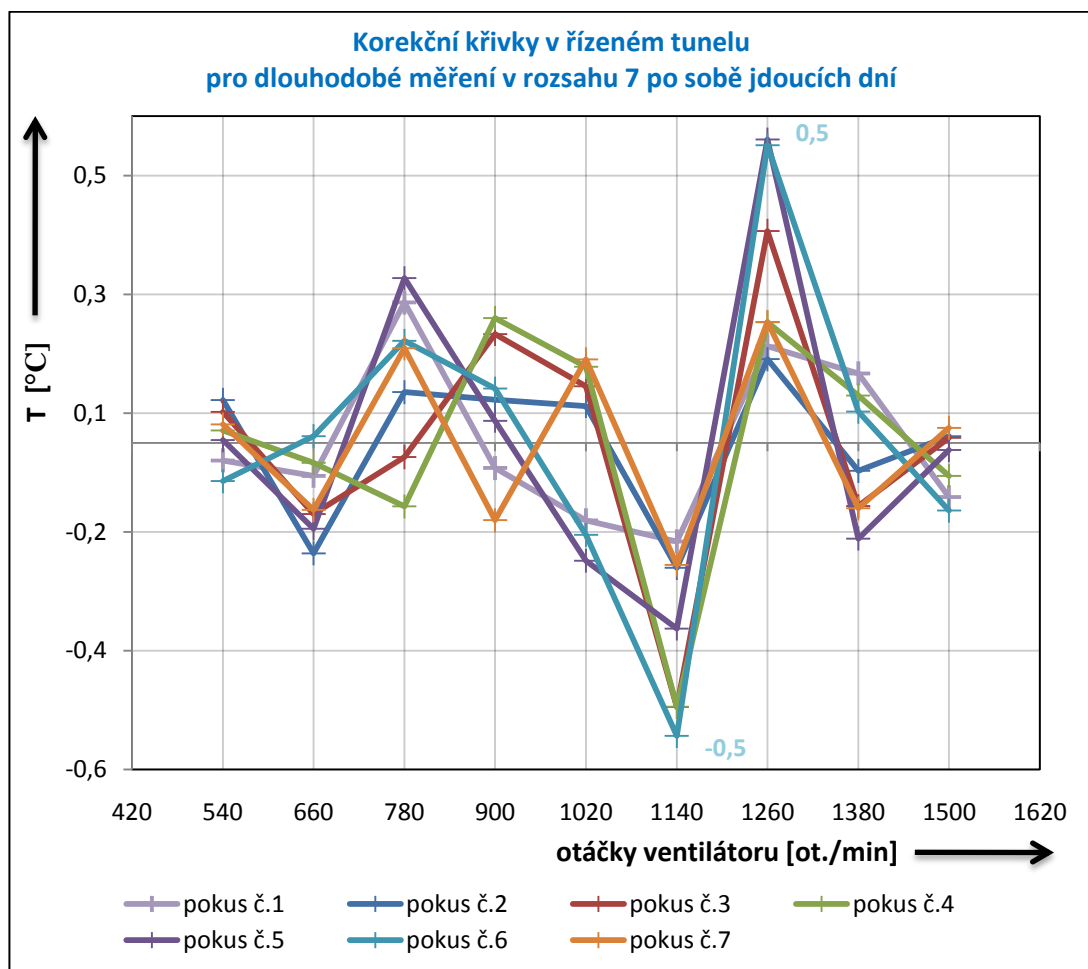
5.4.5 Grafické zobrazení naměřených hodnot pro úkol č. 5, 6 a č. 7

Protože kvalita měření se nehodnotí pouze podle absolutní chyby, tak byla zaznamenána i relativní chyba s korekčními křivkami. Maximální hodnota relativní chyby během 7 denního cyklu měření chladiče Noctua NH-U9B byla $\pm 1,4$ %. V příloze jsou také uvedeny vypočtené hodnoty podle interpolačního polynomu a jejich absolutní odchylka.



Graf. 5: Relativní chyba řízeného tunelu v dlouhodobém horizontu měření

V korekční křivce je naznačena maximální dosažená absolutní odchylka, která činila $\pm 0,5$ °C. V Tab. 4 byly pro lepší statistický přehled vypočítané průměrné hodnoty všech 7 měření a jejich směrodatné odchylky. Dalo by se předpokládat, že maximální dosažená odchylka 0,5 °C mohla být způsobena nepozorností při měření, protože v žádném jiném dni nebyla tahle hodnota zaznamenána.



Graf. 6: Korekční křivky řízeného tunelu v dlouhodobém horizontu měření

Zkratka **Sa** = směrodatná odchylka, **avg. Sa** = průměrná směrodatná odchylka.

Tab. 4: Průměrné hodnoty ze 7 měření a jejich směrodatné odchylky

číslo pokusu	540	660	780	900	1020	1140	1260	1380	1500
-	ot./min								
1	62,3	55,3	49,0	44,3	40,4	37,4	34,9	33,7	33,5
2	62,2	55,5	49,2	44,2	40,2	37,3	34,8	33,7	33,2
3	62,0	55,3	49,2	44,0	40,1	37,5	34,6	33,8	33,4
4	62,1	55,2	49,3	44,1	40,2	37,7	34,8	33,6	33,1
5	62,1	55,3	48,9	44,2	40,5	37,5	34,5	33,9	33,2
6	62,4	55,4	49,3	44,4	40,6	37,8	34,6	33,6	33,2
7	62,1	55,5	49,3	44,5	40,1	37,3	34,6	33,7	33,3
avg. [°C]	62,2	55,3	49,2	44,2	40,3	37,5	34,7	33,7	33,3
Sa [°C]	0,14	0,11	0,15	0,16	0,19	0,18	0,14	0,10	0,13
avg. Sa [°C]	0,14								

Protože by byla Tab. 5 příliš obsáhlá, je zde uvedena jenom její část s největší zaznamenanou chybou při měření, ostatní hodnoty jsou v příloze této práce. Zkratky v Tab. 5 znamenají:

vyp. delta T – je vypočítaná hodnota podle interpolačního polynomu třetího řádu, pomocí programu Excel.

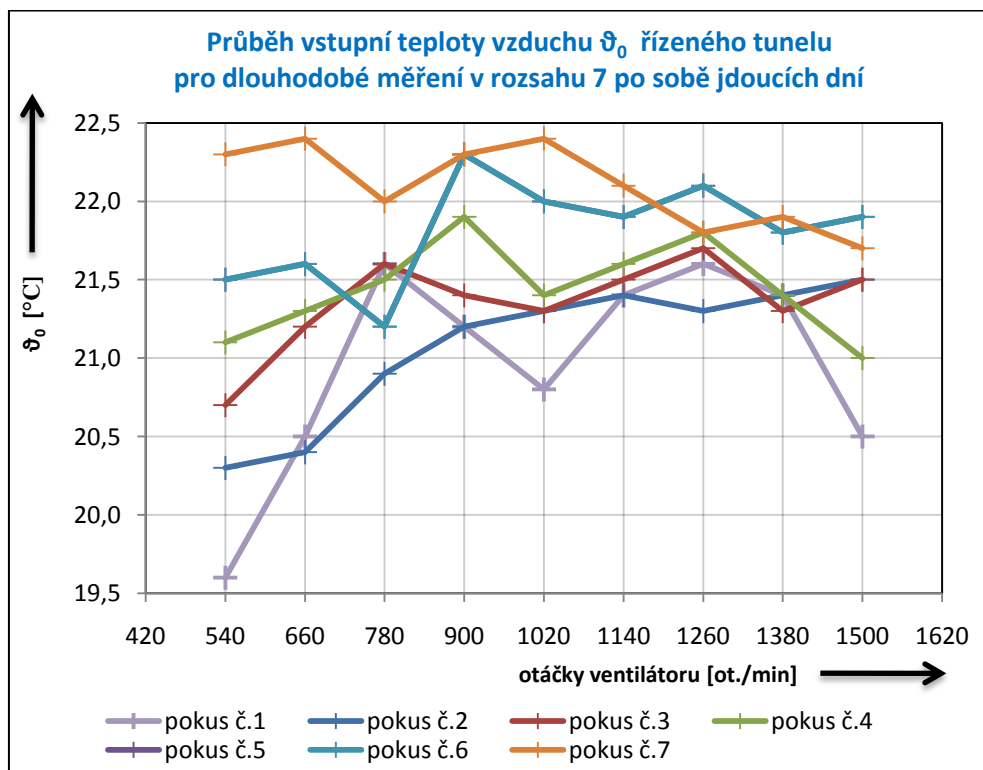
Δy – představuje absolutní chybu.

δ – relativní chybu.

K – korekční koeficient.

Tab. 5: Ukázka naměřených výsledků s největší měřenou chybou

Statistický test chyb měření v řízeném tunelu pro chladič: Noctua NH-U9B												
Číslo pokusu	Příkon tělesa	Typ měřené teploty	Otáčky rotoru ventilátoru měřeného chladiče [ot./min]									
	[W]	[°C]	540	660	780	900	1020	1140	1260	1380	1500	
pokus č.5	100	T1těleso	82,4	76,3	69,8	65,9	61,3	58,1	55,7	54,1	53,5	
		T2těleso	83,9	76,8	71,0	66,3	62,4	60,1	56,9	56,4	54,9	
		avg. T1,5	83,2	76,6	70,4	66,1	61,9	59,1	56,3	55,3	54,2	
		T1in	21,1	21,3	21,5	21,9	21,4	21,6	21,8	21,4	21,0	
		delta T	62,1	55,3	48,9	44,2	40,5	37,5	34,5	33,9	33,2	
		Rt [°C/W]	0,621	0,553	0,489	0,442	0,405	0,375	0,345	0,339	0,332	
		vyp. delta T	62,1	55,1	49,2	44,2	40,3	37,2	35,0	33,7	33,2	
		Δy [°C]	0,0	0,1	-0,3	0,0	0,2	0,3	-0,5	0,2	0,0	
		δ [%]	0,0	0,3	-0,6	-0,1	0,5	0,8	-1,5	0,5	0,0	
		k [°C]	0,0	-0,1	0,3	0,0	-0,2	-0,3	0,5	-0,2	0,0	



Graf. 7: Průběh vstupních teplot řízeného tunelu

V Grafu 7 si lze všimnout průběhů naměřených teplot okolního vzduchu u vstupní části řízeného tunelu. V kapitole 1.2 byla právě zmíněna tato chyba při měření účinnosti chladičů na obyčejné PC sestavě, kde byl její rozsah stanoven na ± 2 °C. Jak je vidět, tak i v klimatizované řízené místnosti se teplota v průběhu několika měření značně mění, a to v rozsahu od 19,5 °C do 22,5 °C. U měření v řízeném tunelu to není žádný problém, protože se tato proměnlivá hodnota zaznamenává a na základě kompenzační metody koriguje měřenou hodnotu teploty uvnitř tepelného tělesa. Graf 7 je jenom malé potvrzení odhadnutých chyb při měření na obyčejné PC sestavě v kapitole 1.2.

5.5 Zhodnocení naměřených výsledků

Hodnotit lze naměřené výsledky a funkci řízeného tunelu v několika bodech:

- Navržený řízený tunel ukázal, že je schopný měřit tepelný odpor chladičů a hodnotu ΔT v dlouhodobém horizontu se stabilní relativní chybou měření, a to v maximálním rozsahu $\delta = \pm 1,4$ %.
- MOSFET tranzistor, který je umístěný v tepelném tělese lze snadno regulovat a jeho příkon není téměř závislý na jeho teplotě tak, jako běžný procesor osobního počítače. Samozřejmě je potřeba drobné odchylky kompenzovat např. inteligentním napájecím zdrojem nebo teplotně stabilizačním obvodem.
- Vypočítaný tepelný odpor chladiče R_t na základě naměřené hodnoty ΔT není skutečný odpor chladiče (jak bylo zmíněno v kapitole 2.1), ale je to součinitel tepelného odporu MOSFET tranzistoru, rozhraní mezi MOSFET tranzistorem a tepelným tělesem, a samozřejmě rozhraní mezi tepelným tělesem a měřeným chladičem, které je vyplněno teplovodivou pastou. Pro zjištění skutečné hodnoty R_t by bylo nutné experimentálně zjistit všechny zmiňované parametry tepelných odporů.

6 ZÁVĚR

V úvodní teoretické části byla probrána problematika při měření tepelných parametrů chladičů CPU a představeny hlavní chyby měření na klasické PC sestavě, které by měly být odstraněny vylepšenou a cílenou měřicí metodou. Zároveň byly nastíněny fyzikální procesy při šíření tepelné energie v pevných, kapalných či plynných látkách pro jejich bližší pochopení a k samotné realizaci nové měřicí metody.

V praktické části byl vytvořen 3D model řízeného tunelu s tepelným tělesem a na jeho základě byl vyroben skutečný prototyp k ověření požadovaných vlastností. Uskutečněním několika měření v řízeném tunelu se ověřila jeho správná funkčnost, ale také se stanovila výsledná chyba měření, která je jasně definována. Při měření v delším časovém horizontu se zjistilo, že kompenzační metoda řízeného tunelu funguje zcela správně a že měřená hodnota teploty ΔT tepelného tělesa se pohybuje s relativní maximální chybou $\pm 1,4 \%$ ($\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Tato přesnost celé měřicí soustavy by měla být dostatečná i pro vývojové experimenty a laboratorní zkoušky nových chladičích systémů pro mikroprocesorovou techniku.

Měřením v řízeném tunelu se také zjistila zajímavá závislost proměnné tepelné vodivosti heat-pipes na jejich poloze vůči zemské gravitaci. Tato proměnlivost se potvrdila u všech měřených chladičů a může tak pomoci ke zlepšení a vývoji vnitřní konstrukce tepelných trubic, které se používají v široké oblasti výpočetní techniky.

Tato bakalářská práce by měla přispět ke zlepšení návrhů při vývoji a výrobě chladičů, jak pro osobní počítače či servery, tak v oblasti miniaturizace notebooků a tabletů. Pro mnoho konstruktérů se může především jednat o inspirativní nápad, jak jednoduše a efektivně zjistit účinnost navrženého systému chlazení a optimalizovat jeho parametry, ať už za účelem snížení výrobních nákladů či samotných rozměrů, hmotnosti apod.

Na druhou stranu má řízený tunel i určité nedostatky, a to především v oblasti automatizace. Pro rychlejší měřicí proces je potřeba všechny kroky optimalizovat tak, aby obsluha tohoto zařízení nemusela měřené hodnoty odečítat ručně a měřicí proces trval co nejkratší dobu. Ideálně by měl vše ovládat jeden mikrokontrolér a příslušný software. To je ovšem otázka budoucího vývoje celého zařízení, ale nikoli tohoto prototypu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Szendiuch, I.: *Základy technologie elektronických obvodů a systémů*, VUTUM, 2006, ISBN 80-214-3292-6.
- [2] Částka, M. *Měření účinnosti chladičů a návrh aerodynamického tunelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 26 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..
- [3] Patočka M.: *Vybrané statě z výkonové elektroniky*, sv. 1, skriptum FEKT, VUT Brno
- [4] Kotlík V.: *Heat Pipe: princip a konstrukce* [online]. [cit. 2011-05-11]. Dostupné z WWW: http://www.svethardware.cz/art_doc-65D63DE45D7F238AC125726C0070D361.html
- [5] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., *Fyzika*, Vutium Brno, 2000, část 4, kap. 34, ISBN 80-214-1868-0.
- [6] OTA, J. - SÝKORA, V. - MELICHAR, J.: *Power Economy in Heating and Cooling Systems (measuring of the coefficient of heat transfer)*. In: CTU Seminar 94. Part A. ses.: J. Vrba. Prague : Czech Techn ical University. 1994. p. 195-196.
- [7] PETRÁK, J.: *Ekologické aspekty chladicí techniky*. In: *Zavádění ekologicky vhodných chladičů*; v. ses.: A. Poredoš. Dobruška : Slovinská společnost chlazení a klimatizační techniky. 1994. s. 94-101. - ISBN.
- [8] J. - SÝKORA, V. - MELICHAR, J.: *Power Economy in Heating and Cooling Systems (measuring of the coefficient of heat transfer)*. In: CTU Seminar 94. Part A. ses.: J. Vrba. Prague : Czech Technical University. 1994. p. 195-196.
- [9] PETRÁK, J.: *Tepelné oběhy a využití odpadního tepla z chladičů zařízení*. In: *Nové trendy v technice chlazení*. Praha : Společnost pro techniku prostředí. 1994. s. 47-56 . - ISBN.
- [10] *Thermal Management for Intel® Core™2 Family Desktop Processors* [online]. [cit. 2011-05-11]. Dostupné z WWW: <http://www.intel.com/support/processors/sb/CS-030615.htm>