



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

CHLADÍCÍ SYSTÉMY PC COOLING SYSTEMS IN COMPUTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ROMAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ HEJČÍK, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Roman

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Chladicí systémy PC

v anglickém jazyce:

Cooling systems in computers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvořit literární rešerši chladicích systémů pro pracovní stanice a přenosné počítače obsahující přehled principů využívaných při chlazení procesorů a celých stanic. Diskutovat účinnost těchto systémů a možnost dalšího využití odpadního tepla.

Cíle bakalářské práce:

Vytvořit literární rešerši chladicích systémů pro pracovní stanice a přenosné počítače obsahující přehled principů využívaných při chlazení procesorů a celých stanic. Diskutovat účinnost těchto systémů a možnost dalšího využití odpadního tepla.

Seznam odborné literatury:

Incropera, DeWitt: Fundamentals of Heat and Mass Transfer

Marketingové materiály výrobců

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 18.11.2010



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá současnými metodami chlazení komponent PC, popisuje jejich vlastnosti, především pak efektivitu a vhodnost k použití v příslušných úlohách chlazení. K pochopení a kvantifikaci principů jsou uvedeny možnosti přenosu tepla. Dále se práce zabývá problematikou chlazení datových center, ukazuje jejich spotřebu energie a pojednává o možnostech využití jejich odpadního tepla.

Klíčová slova:

chlazení, počítač, odpadní teplo, heatsink, heatpipe, recyklace

Abstract:

Bachelor's thesis deals with present methods of cooling computer components, describe its properties mainly efficiency and suitability for appropriate cooling tasks. For better understanding and quantification of its principles there are given possibilities of heat transfer. Next work deals with problematics of cooling data centres, shows its energy consumption and says about possibilities of waste heat recovery.

Key words:

cooling, computer, waste heat, heatsink, heatpipe, heat recovery

Bibliografická citace:

ROMAN, J. *Chladicí systémy PC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hejčík, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a na základě uvedené literatury

V Brně dne 25.5.2012

.....

Jan Roman

Poděkování

Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D. za cenné rady a podporu při psaní této práce.

Obsah

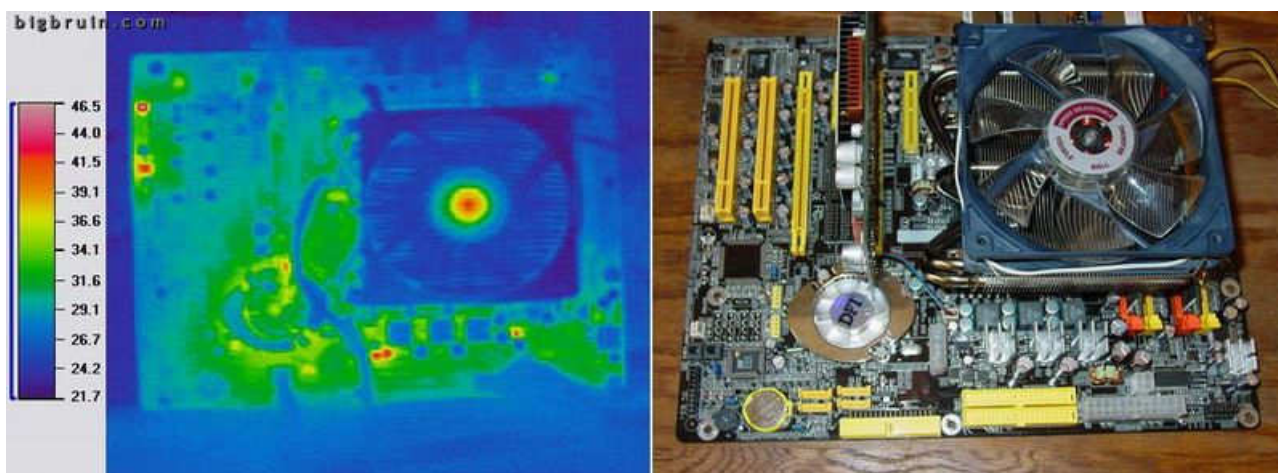
1. Úvod.....	11
2. Přenos tepla.....	12
2.1. Přenos tepla vedením	12
2.2. Přenos tepla prouděním.....	13
2.3. Přenos tepla zářením.....	14
3. Rozdělení systémů chlazení.....	15
4. Chlazení heatsinkem.....	16
5. Chlazení pomocí heatsinku s ventilátorem.....	23
5.1. Konstrukce ventilátorů.....	27
6. Chlazení pomocí technologie heatpipe.....	30
6.1. Konstrukce.....	30
6.2. Tepelný odpor heatpipe.....	34
6.3. Využití heatpipe.....	36
7. Kapalinové chlazení.....	39
7.1. Konstrukce.....	39
7.1.1. Kapalina.....	39
7.1.2. Vodní blok.....	40
7.1.3. Hadice.....	41
7.1.4. Spojovací součásti neboli “fitinky“	41
7.1.5. Expanzní nádoba.....	42
7.1.6. Radiátor.....	42
7.1.7. Čerpadlo.....	43
7.2. Tepelný odpor	43
8. Peltierův článek.....	46
8.1. Vlastnosti peltierova článku.....	46
8.2. Použití.....	47
8.3. Výhody, nevýhody.....	48
9. Kompresorové chlazení.....	49
9.1. Konstrukce.....	49
9.2. Chladicí okruh.....	50
9.3. Chladicí výkon.....	50
9.4. Výhody nevýhody, použití.....	50
10. Chlazení kapalným dusíkem.....	51

11. Proudění vzduchu (air flow) ve skříní počítače.....	52
12. Chlazení datových center.....	53
12.1. Spotřeba elektrické energie.....	53
12.2. Chlazení	54
12.3. Využití odpadního tepla datových center.....	55
13. Závěr.....	57
Seznam použité literatury.....	58
Seznam použitých zkratek.....	65
Příloha.....	65

1. Úvod

Počítače jsou v naší době čím dále častěji integrovány do různých zařízení. Jejich pomoci se využívá v mnoha zařízeních od kalkulaček přes podpůrné elektronické systémy aut až po superpočítače. Jejich výpočetní síla však není bez omezení, s nárůstem výkonu roste i jejich spotřeba a v neposlední řadě i tepelný výkon. Právě na tepelný výkon se spotřebovává téměř veškerá elektrická energie dodaná výpočetnímu zařízení. Vysoká teplota je pro polovodičové součástky značně riziková a mohou být poškozeny. Při teplotě 100 – 120 °C dochází u křemíku ke ztrátě jeho polovodičových vlastností, může dojít ke spontánnímu otevření tranzistoru a při větší energii i k jeho průrazu, tedy jeho zničení. [1] Předchozí generace procesorů integrovala v jádře 1,17 miliardy tranzistorů, z nichž každý produkuje odpadní teplo. Přestože se výrobci integrovaných obvodů snaží snižovat spotřebu, jsou dnes běžné procesory se ztrátovým výkonem 110 až 140 W, který závisí na frekvenci a napětí jádra. [4] Například Intel Core i7 3930k má hodnotu TDP 130 W max. [2]. I jádra grafických karet jsou významnými zdroji odpadního tepla, jako příklad uvedu kartu GeForce GTX 560 Ti, která má maximální výkon 170 W [3]. Tyto komponenty jsou zásobovány elektrickou energií zdroji napětí. Jsou to zařízení, která mění charakteristiky elektrického proudu ze sítě tak, aby jimi bylo možné napájet komponenty v PC. Důsledkem jsou další ztráty jejichž projevem je opět generace odpadního tepla.

Celkově se tedy jedná o stovky wattů odpadního tepla (Obr. 1), které je třeba odebrat ze zdroje a přenést ho do okolního prostředí. Tuto funkci zastávají různé chladicí systémy pasivní, aktivní, využívající chladicí média, atd. V této práci si kladu za cíl vytvořit rešerši možností chlazení PC a datových center, dále navrhnout, jak využít odpadní teplo.



Obr. 1: Fotografie základní desky DFI Lanparty nF4 Ultra-D and SLI-DR pořízená infrakamerou, převzato ze zdroje [6]

2. Přenos tepla

K obecnému nastínění funkce chladičů je nutno nejdříve určit jakým způsobem se teplo přenáší. Existují tři základní způsoby: přenos tepla vedením, prouděním, sáláním (radiace). Chladicí systémy využívají všech způsobů přenosu tepla. Některé systémy jsou specializované a upřednostňují převážně jeden konkrétní způsob transportu tepla.

2.1. Přenos tepla vedením

Úkolem chlazení je účinně odebírat teplo počítačovým čipům a předávat ho okolí. Přenos tepla vedením nastává tehdy, když jedna stěna pevného tělesa má vyšší teplotu než jeho druhá strana. Tepelný tok pak prochází tělesem od teplejší stěny k chladnější. [5] Příkladem je využití teplovodivé pasty k odvedení tepla ze stykové plochy procesoru do chladiče. Množství odvedeného tepla se dá určit pomocí Fourierova zákona:

$$\dot{Q} = S \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (T_2 - T_1) \quad [\text{W}] \quad (1)$$

kde

$\dot{Q}$	- tepelný tok	[W]
S	- plocha	[m ²]
λ	- tepelná vodivost materiálu	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
d	- tloušťka stěny	[m]
T_1, T_2	- teplota stěn tělesa	[K]

Tepelná vodivost λ má zásadní význam při výběru materiálu, budeme-li uvažovat těleso s neměnnými rozměry a neměnnými teplotami stěn, jedinou zbývajícím možností jak regulovat tepelný tok, je zvolit materiál s požadovanou tepelnou vodivostí.

Tab. 1: Hodnota λ pro vybrané materiály [5]

materiál	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Cu	384
Al	201
Si	0,83
vzduch	0,01 - 0,02
pasta Akasa AK-TC5022 [15]	4
pasta Cooler Master NanoFusion [16]	7,8

Pozn.: někdy se využívá k vyjádření tepelné vodivosti měrný tepelný odpor ρ_t

$$\rho_t = \frac{1}{\lambda} \quad [m \cdot K \cdot W^{-1}] \quad (2)$$

Množství tepla prošlého průřezem tělesa je dán:

$$Q = \dot{Q} \cdot t \quad [W \cdot s] \quad (3)$$

kde

Q	- množství tepla prošlého stěnou	[J]
$\dot{Q}$	- tepelný tok	[W]
t	- čas	[s]

2.2. Přenos tepla prouděním

Uplatňuje se především při přechodu tepla z tuhého tělesa do plynného nebo kapalného okolí.

Volné proudění tekutiny kolem tělesa nazýváme konvekce. Nucenou konvekci je myšlena situace, kdy je tekutina kolem tělesa nucena proudit pomocí čerpadla nebo ventilátoru. Naopak přirozenou konvekci je stav kdy konvekce nastane bez jakékoli intervence do přechodu tepla.

Laminární proudění nastává tehdy, kdy částičky proudícího média se pohybují po vzájemně rovnoběžných drahách a tudíž mezi nimi nedochází k promíchávání.

Turbulentní proudění má pro chlazení větší přínos protože vlivem vysoké rychlosti proudu dochází k vzájemnému promíchávání částic chladiwa. Takto se zvyšuje intenzita sdílení tepla. [7]

Množství odvedeného tepla určuje Newtonův zákon:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_w - T_\infty) \quad [W] \quad (4)$$

kde

$\dot{Q}$	- tepelný tok	[W]
α	- součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
S	- plocha	$[m^2]$
T_w	- teplota tělesa	[K]
T_∞	- teplota okolního prostředí	[K]

2.3. Přenos tepla zářením

Tento druh přenosu tepla se uskutečňuje prostřednictvím elektromagnetického vlnění, které se při dopadu na povrch tělesa mění na teplo. Infračervené zářiče, vlnová délka 10^{-4} až 10^{-7} m. Při dopadu tohoto záření na těleso mohou nastat tyto tři stavy: [7]

- a) tepelné záření je tělesem propuštěno. Jeho množství je závislé na materiálu, a na vlnové délce propuštěného záření. Jedná se o průteplivost (transmitanci), značí se t .
- b) tepelné záření je částečně odraženo. Taktéž závisí na druhu látky a vlnové délce dopadajícího záření. Označuje se jako odrazivost (reflektance), r
- c) tepelné záření je tělesem pohlceno. Množství pohlceného záření je závislé na barvě tělesa. Nazývá se pohltivost (absorptance), a . [7]

Pro celkové množství záření dopadnuvšího na těleso platí:

$$r + t + a = 1 \quad (5)$$

Rovnice tepelného toku (Stefan-Boltzmannův zákon):

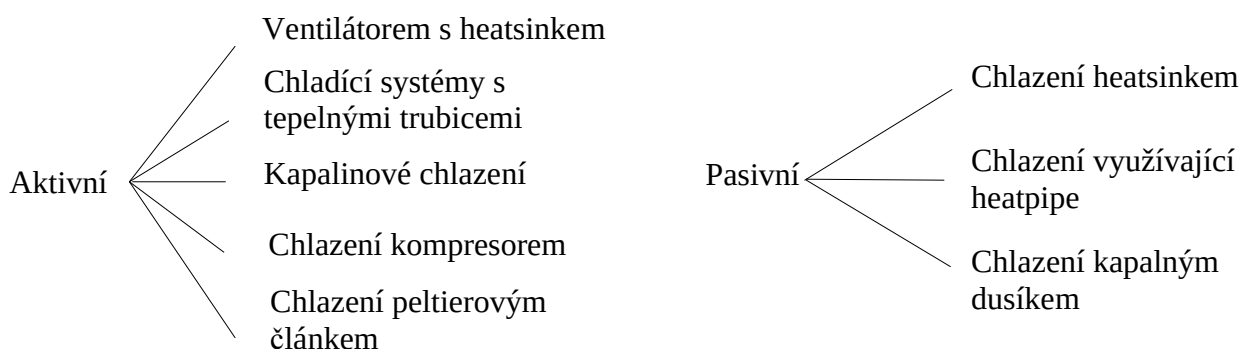
$$\dot{Q} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad [W] \quad (6)$$

kde

$\dot{Q}$	- tepelný tok	[W]
σ	- Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)	
ε	- emisivita	[-]
T_1	- teplota menšího tělesa	[K]
T_2	- teplota obklopujícího tělesa	[K]

3. Rozdělení systémů chlazení

Metody chlazení je možné rozlišovat z různých hledisek. Těmito hledisky může být vývoj hardwarových součástí, konstrukce chlazení, zdali má chlazení aktivní nebo pasivní součásti, nebo jaký způsob přenosu tepla upřednostňuje. Za nejdetailnější hledisko můžeme označit členění podle konstrukce spolu se způsobem přenosu tepla. Toto dělení se používá i v praxi a pod tímto označením nebo podobným, se s ním setkáváme v obchodní sféře. Avšak tomuto předchází dělení spektra chladících systémů na aktivní a pasivní. Aktivní chlazení je takové, které pro svou funkci využívá elektrickou energii na rozdíl od pasivního, které pracuje aniž by spotřebovávalo energii. Takto se rozdělí metody chlazení do dvou základních skupin a jejich dalších podskupin.:



4. Chlazení heatsinkem

Tento druh chlazení je základním typem, jedná se také o nejstarší způsob chlazení počítačových komponent. V doslovném překladu znamená „heat – teplo, sink – potopit, klesat, zanikat“ tedy něco jako odvaděč tepla, což velice dobře vystihuje jeho funkci odvést teplo od zdroje a předat ho dál. Po konstrukční stránce je to těleso obvykle hranatých tvarů vyrobené z materiálu s dobrou tepelnou vodivostí, nejčastěji se používá hliník nebo měď pro své vynikající tepelně vodivé vlastnosti. Jednu stranu tvoří plocha s požadavkem na rovinnost pro co nejlepší dosednutí na plochu zdroje tepla, druhá strana je většinou členitá tak, aby se dosáhlo co největší plochy chladiče k vyzařování a přechodu tepla do okolního prostředí, většinou do vzduchu.



Obr. 2: Heatsink Dell 7R766 [8]

Tepelný odpor je nejvýznamnější veličinou při určování efektivity chladiče. S nižším tepelným odporem chladiče je možné odebrat více tepla a přenést ho do okolí. Se stejným teplotním rozdílem je možné odvést větší tepelný výkon [9]

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{d}{\lambda \cdot S} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (7)$$

kde

R_{th}	- tepelný odpor	$[K \cdot W^{-1}]$
ΔT	- rozdíl teplot	$[K]$
$\dot{Q}$	- přenášený výkon	$[W]$
d	- tloušťka stěn	$[m]$
λ	- koeficient tepelné vodivosti materiálu	$[W \cdot m^{-1} \cdot K]$
S	- plocha	$[m^2]$

Rovnice (7) platí pouze v případě ideálního dosednutí heatsinku na čip. V reálném případě heatsink nedoléhá správně na zdroj tepla a často je nutné nerovnosti potlačit. Funkci korekce nerovností má tepelně vodivý materiál mezi heatsinkem a čipem. Vzniká tak prostředí složené z více stěn, kterými teplo prochází. V takovém případě platí:

$$R_c = \frac{T_n - T_1}{\dot{Q}} = \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \right) \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (8)$$

kde

R_c	- celkový tepelný odpor	$[K \cdot W^{-1}]$
T_n	- teplota počáteční stěny soustavy	$[K]$
T_1	- teplota koncové stěny soustavy	$[K]$
$\dot{Q}$	- přenášený výkon	$[W]$
S	- plocha	$[m^2]$
d_i	- tloušťka stěny i	$[m]$
λ_i	- koeficient tepelné vodivosti stěny i	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

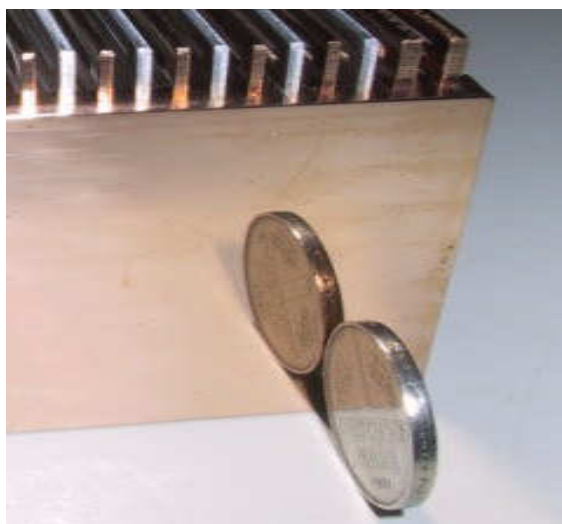
Dle rovnice (8) je zřejmé, že stěna s nízkou tepelnou vodivostí byť i s malou tloušťkou může významně ovlivnit celkový tepelný odpor. Z tohoto důvodu se používá pasta, viz Obr. 3, s dobrými tepelně vodivými vlastnostmi, aby se zamezilo vzduchovým mezerám mezi heatsinkem a zdrojem tepla.

Ze stejného důvodu jsou plochy na sebe doléhajících součástí přenášejících tepelný tok kvalitně opracované s důrazem na rovinnost a nízkou drsnost povrchu viditelné na Obr. 4. V opačném případě hrozí opět vzduchové mezery nebo je potřeba zvětšit na kritických místech tloušťku vrstvy teplovodivé pasty, což se opět negativně projeví na celkovém odporu chladiče. [10]

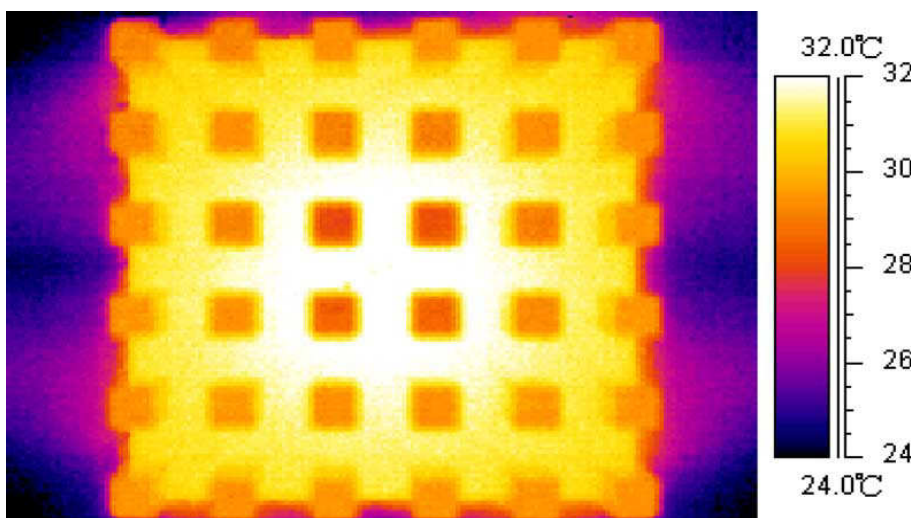
Plocha je další možností jak ovlivňovat tepelný odpor. Obecně platí, že při zvyšování vyzařovací plochy dosáhneme nižšího tepelného odporu. Nicméně zde je potřebné najít nejvhodnější kombinaci rozměrových parametrů chladiče. V souvislosti s nárůstem vyzařovací plochy je potřeba dbát na rozdíl teplot ΔT a tloušťku stěny d , kdy by s nesprávnými parametry mohlo dojít naopak ke zvýšení odporu. [9]



Obr. 3: Nanesená teplovodivá pasta na CPU [11]



Obr. 4: Správně opracovaný povrch styčné plochy heatsinku [10]



Obr. 5: Pohled infrakamerou na heatsink při zátěži [9]

Vedením se teplo dostává až na povrch heatsinku (Obr. 5), odkud je odváděno do prostředí přirozenou konvekcí a zářením (tento způsob přenosu tepla však zanedbáváme). Přirozená konvekce nastává tehdy, kdy je těleso obklopeno tekutinou s rozdílnou teplotou než má těleso. Vzduch se ohřívá nerovnoměrně, vznikají tedy rozdíly teplot jeho vrstev a tedy i hustot - nastává přirozené proudění. Pro přirozené proudění platí rovnice přenosu tepla pro konvekci.

Teplo je přenášeno dle rovnice (4).

V této rovnici vystupuje součinitel přestupu tepla α , který není konstantní a závisí na Nusseltově čísle dle vztahu:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (9)$$

kde

α	- součinitel přestupu tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
Nu	- Nusseltovo číslo	$[-]$
λ	- koeficient tepelné vodivosti	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
L	- charakteristický rozměr	$[\text{m}]$

K vyřešení rovnice (9) je zapotřebí znát vyjádření Nusseltova čísla (rovnice platí pro přirozenou konvekci v neomezeném prostoru) [12]:

$$\begin{aligned}
 Nu &= C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad [-] \\
 Gr &= \frac{g \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \beta}{\nu^2} \quad [-] \\
 Pr &= \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad [-]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

kde

Nu	- Nusseltovo číslo	$[-]$
Gr	- Grashofovo číslo	$[-]$
Pr	- Prandtlovo číslo	$[-]$
g	- gravitační zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
ΔT	- rozdíl teplot	$[\text{K}]$
L	- charakteristický rozměr	$[\text{m}]$
β	- objemová tepelná roztažnost	$[\text{K}^{-1}]$
ν	- kinematická viskozita	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
a	- teplotní vodivost	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
η	- dynamická viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}]$
c_p	- měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
λ	- koeficient tepelné vodivosti	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C_n	- konstanty závislé na součinu $Gr \cdot Pr$, geometrii a orientaci povrchu	

Celkový tepelný odpor je pak možné vyjádřit:

$$R_{celk} = \frac{(T_z - T_o)}{\dot{Q}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (11)$$

$$R_{celk} = R_{ch} + R_{ho} + R_k$$

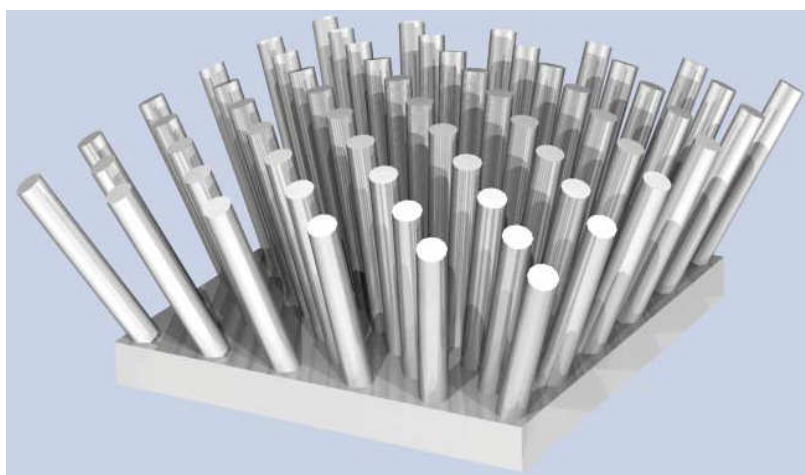
kde

$\dot{Q}$	- tepelný tok	[W]
R_{celk}	- celkový tepelný odpor	[K·W ⁻¹]
R_{ch}	- tepelný odpor rozhraní čip - heatsink	[K·W ⁻¹]
R_{ho}	- tepelný odpor heatsinku	[K·W ⁻¹]
R_k	- tepelný odpor přenosu tepla konvekcí	[K·W ⁻¹]
T_z	- teplota zdroje tepla	[K]
T_o	- teplota prostředí	[K]

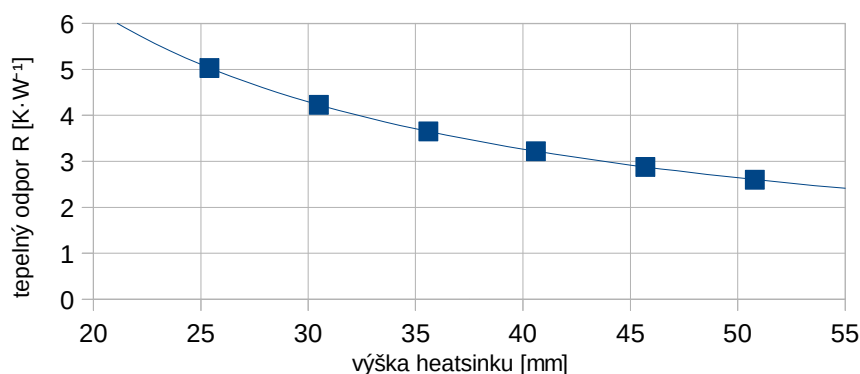
Je také nutné, aby bylo vzduchu umožněno proudit kolem plochy žeber. Řešením jsou dostatečně velké mezery mezi žebrováním chladiče.

Praktický příklad: [13]

jedná se o heatsink *Flared aluminium pin fin heatsink typ G* na Obr. 6 s rozměry základny 2x2 palců a s výškou od 1 do 2 palců, uzpůsobený k chlazení za přispění přirozené konvekce.



Obr. 6: *Flared aluminium pin fin heatsink typ G*



Obr. 7: Grafické znázornění závislosti tepelného odporu na výšce heatsinku

Z těchto parametrů je již možné přibližně určit tepelný tok $\dot{Q}$, který je heatsink schopen odvést:

Uvažujme příklad, kdy max. teplota čipu $t_{max} = 90\text{ °C}$ a nejvyšší dovolená pracovní teplota je $t_{okolí} = 40\text{ °C}$. Rozměr heatsinku je 2x2x1,6 palce (výška heatsinku 40,6mm) čemuž podle specifikací odpovídá tepelný odpor $R = 3,22\text{ K·W}^{-1}$. Z rovnice (7) určíme tepelný tok.

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \rightarrow \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{t_{max} - t_{okolí}}{R} = \frac{90 - 40}{3,22} \approx 15,53\text{ W}$$

Dostaneme se tak na hodnotu tepelného toku 15,5 W. Tato hodnota ve skutečnosti bude nižší ve spojitosti s možnými vadami přestupu tepla mezi heatsinkem a čipem (hrubý povrch dosedajících ploch, špatně nanesená vrstva teplovodivé pasty, bublinky vzduchu na rozhraní, atd. Z tohoto důvodu bych daný chladič zvolil pro součástku generující maximální tepelný tok 13 W. Rozměry analyzovaného heatsinku odpovídají například heatsinkům používaným na čipsetech základních desek.

Z grafu na Obr. 7 je dobře viditelná silná závislost tepelného odporu na výšce heatsinku. S většími rozměry klesá tepelný odpor, tedy pro chlazení vyšších výkonů je zapotřebí vyššího heatsinku. Z toho plyne omezení váhou, rozměry a nízkým tepelným tokem. Úplná absence aktivních prvků (ventilátor, heatpipe, vodní okruh, atp.) zajišťuje stabilní bezporuchový, bezúdržbový, cenově nenáročný životní cyklus.

Tento způsob chlazení je možné doporučit tam, kde nejsou velké nároky na odváděné teplo, je prostor pro fungování přirozené konvekce nebo je kladen důraz na dostupnost a bezporuchový chod.

Využívá se zejména jako základní stavební prvek pro další druhy chladících systémů, také k chlazení operačních pamětí, pamětí grafických karet a chlazení čipsetů základních desek.

V současnosti jsou vyvíjena zařízení tzv. SOC system on chip, neboli vše v jednom, kde se ve velké míře uplatňují pasivní chladiče. Toto odvětví má značný potenciál růstu proto se dá očekávat, že i chlazení zasáhnou inovace.

K dalšímu zlepšování můžou přispět technologie tváření heatsinků, které zajistí optimální rozvod tepla od čipu a zároveň zajistí velkou plochu k přenosu tepla konvekcí. To vše při dodržení minimálních rozměrů a hmotnosti.

Nabízí se také nové materiály, jako například nově objevené uspořádání uhlíku grafen. Grafen má dosti podivuhodné vlastnosti, pro oblast chlazení je zajímavá jeho tepelná vodivost která se pohybuje v rozmezí od $(4,84 \pm 0,44) \times 10^3$ do $(5,30 \pm 0,48) \times 10^3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [14].

5. Chlazení pomocí heatsinku s ventilátorem

Z názvu je dobře patrná konstrukce systému chlazení zobrazená na Obr. 8 a Obr. 9. Jedná se tedy o heatsink, který je ovíván proudem vzduchu z ventilátoru, dochází tedy k nucené konvekci. Fakt, že je chlazení založeno na ventilátoru tedy prvku spotřebovávajícím elektrickou energii, označuje se systém jako aktivní chlazení. Takto je možné další snížení tepelného odporu celé soustavy chladiče. Dále je možné kontrolovat směr odvodu tepla z chladiče. Tento způsob chlazení je využíván i k chlazení výkonnějších komponent jako procesory a grafické karty.



Obr. 8: Chladič procesorů Intel pro patici 775 verze pro čipy vyrobené 65nm procesem (jádro Conroe), pohled na stykovou plochu



Obr. 9: Pohled na ventilátor chladiče

Celkový odpor závisí na parametrech heatsinku a jeho upevnění ke zdroji tepla, v případě užití ventilátoru k ochlazování heatsinku také na vlastnostech proudu tekutiny vháněného mezi žebra heatsinku. Celkový odpor lze spočítat z rovnice (11). Odpor přenosu tepla nucenou konvekcí bude rozdílný ve srovnání k odporu vytvořeném přirozenou konvekcí. Změna se týká Nusseltova čísla, které bude řešeno dle rovnice:

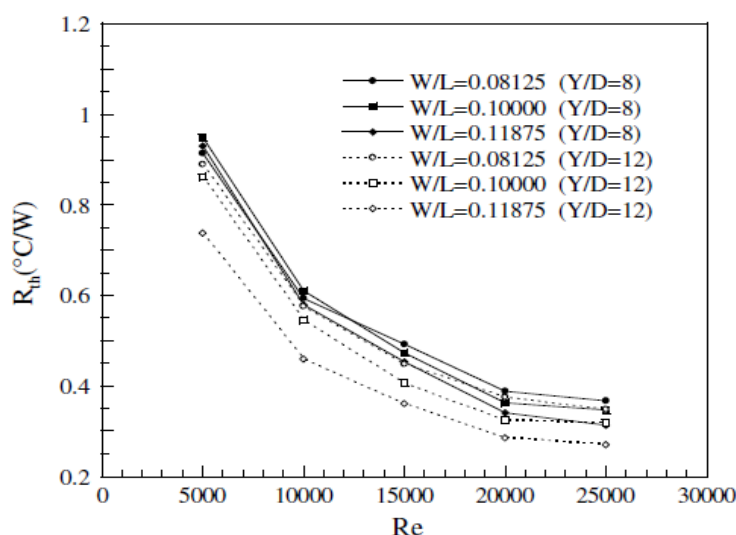
$$\begin{aligned} Nu &= C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad [-] \\ Re &= \frac{w \cdot L}{\nu} \quad [-] \end{aligned} \tag{12}$$

kde

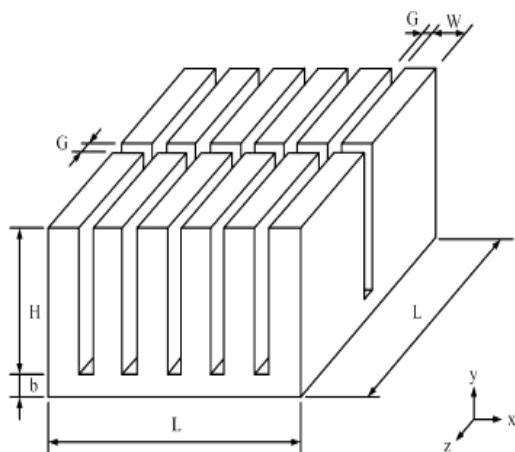
Pr	- Prandtlovo číslo	[-]
Re	- Reynoldsovo číslo	[-]

C, m, n	- konstanty závislé na prostoru kde dochází k přenosu tepla	[-]
w	- rychlost tekutiny	[m·s ⁻¹]
L	- charakteristický rozměr	[m]
ν	- kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]

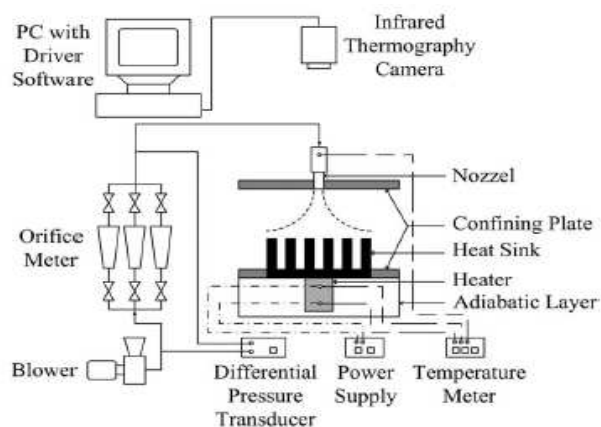
Z uvedených rovnic plyne závislost Reynoldsova čísla na rychlosti toku tekutiny. V případě jednotných podmínek (jeden druh tekutiny, stejné parametry heatsinku) je rychlost proudění jediná veličina schopná celkový přenos tepla ovlivnit. Velikost rychlosti se promítá do Reynoldsova čísla dle rovnice (12) Závislost celkového odporu soustavy na Reynoldsově číslu je znázorněna na Obr. 10, tekutina je vzduch při pokojové teplotě. Uvedené hodnoty platí pro heatsink znázorněný na Obr. 11, jehož rozměry jsou $L = 80$ mm, šířka žebra W je 6,5 mm, 8 mm a 9.5 mm. Dále byla měněna vzdálenost dýzy o průměru $D = 8$ mm (charakteristický rozměr při určování Reynoldsova čísla) od heatsinku $Y = 64$ mm a 96 mm. Schéma pokusu je znázorněno na Obr. 12 [9]



Obr. 10: Závislost celkového odporu na Reynoldsově číslu [9]



Obr. 11: Heatsink použitý při měření [9]



Obr. 12: schéma měření [9]

Při experimentu [9] byla použita dýza s malým průměrem otvoru, z tohoto důvodu byla již při $Re = 5000$ dosažena rychlost proudění kolem $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (kinematická viskozita ν je závislá na teplotě).

Takových rychlostí proudění je těžké dosáhnout s dostupnými prostředky. K dosažení podobného rozsahu Reynoldsova čísla je nutné použít dýzu s větším průměrem a ekvivalentně nižší rychlostí proudění. Tímto zařízením jsou právě ventilátory (Obr. 13).



Obr. 13: Blade Master 80mm (R4-BM8S-30PK-R0) [16]

K určení přibližného chladicího výkonu použijí výsledky experimentu [9], konkrétně graf na Obr. 10 a ventilátoru Blade Master 80 mm, na Obr. 13. V jeho specifikacích najdeme údaj air flow (průtok vzduchu) a určíme rychlost proudění vzduchu.:

$$w = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{40,8 \cdot 0,3048^3}{\pi \cdot 0,04^2 \cdot 60} \approx 3,83 \text{ ms}^{-1}$$

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} = \frac{3,83 \cdot 0,08}{1,806 \cdot 10^{-5}} \approx 17000$$

Z grafu (Obr. 10) určíme, že pro $Re = 17000$ je tepelný odpor $0,4 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ (heatsink s šířkou žebra 9 mm a vzdáleností dýzy od heatsinku 64 mm).

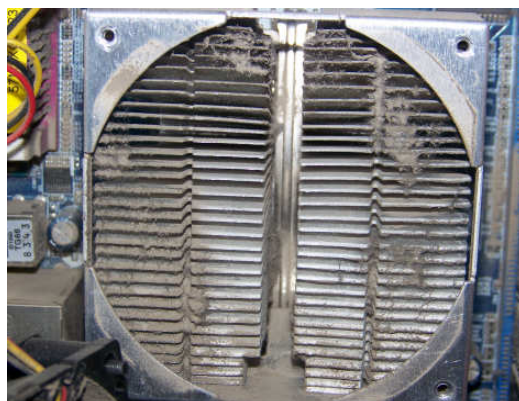
Pro ilustraci např. Intel Core 2 Duo E6850 má nejvyšší dovolenou teplotu $72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2], výše zmíněný systém chlazení má $R_{th} = 0,4 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$. Bereme v úvahu nejhorší možné podmínky fungování chladiče, proto za teplotu okolí zvolíme $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z rovnice 12 vychází, že takto jsme schopni chladit až 80 W ztrátového tepla, což je o 15 W více než je maximální ztrátový výkon daný výrobcem. Je ovšem důležité poznamenat, že se jedná o experimentální výsledky. V praxi jistě bude dostatečná rezerva chladicího výkonu vítaná díky možným negativním vlivům na účinnost chlazení jako

mezery mezi procesorem a heatsinkem, špatně nanesená teplovodivá pasta, extrémní podmínky atd. Dnešním trendem je používání větších ventilátorů s jasným cílem zvýšit průtok vzduchu a snížit otáčky i hladinu vydávaného hluku viz Tab. 2. Míra mezní hlučnosti doporučené Světovou zdravotní organizací je 35 dBA [17]. V počítači je více komponent vydávající hluk, většinou pevný disk spolu s ventilátory a jejich vibracemi, proto je každé snížení hlučnosti vítané.

Velkou a častou nevýhodou je provoz zařízení v prašném prostředí. Prach může zanášet mezery mezi žebry a působit zde jako izolační vrstva znemožňující vzduchu dostat se až k povrchu heatsinku Obr. 14. Vzhledem k tomu, že běžné prostředí není bezprašné je nutná základní údržba formou profukování mezer mezi žebry heatsinku stlačeným vzduchem a doporučuji počítačovou skříň opatřit prachovými filtry.

Ventilátory jsou poruchové z důvodu jejich konstrukce. Obsahují totiž ložiska, která mají omezenou životnost. Jsou tak ve specifikacích ventilátorů udávány jejich předpokládané životnosti (Tab. 2).

Větší množství výrobců však tvoří velkou konkurenci, která tlačí ceny níž, díky čemuž je chlazení pomocí heatsinku a ventilátoru účinnou, dostupnou a levnou metodou chlazení. Se základní údržbou jsou schopny několikaletého provozu, více viz kapitola 5.1.



Obr. 14: Heatsink zanesený prachem

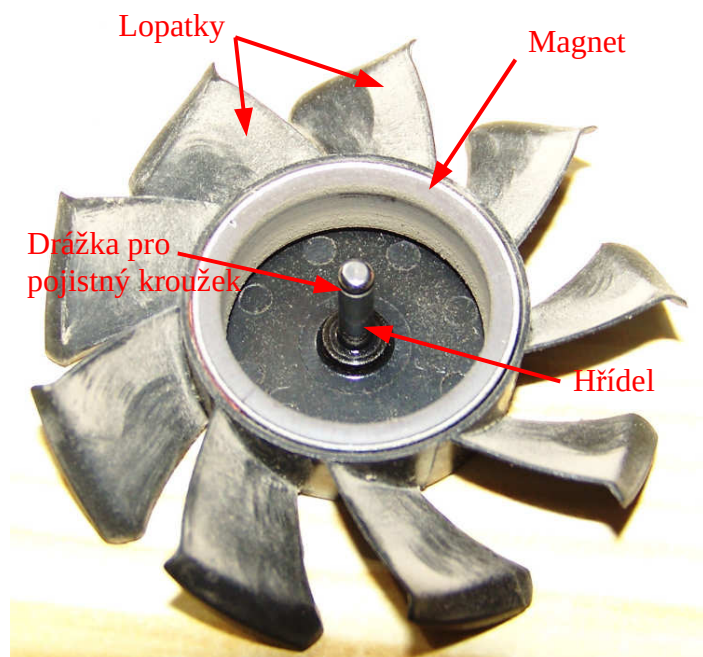
Tab. 2: Specifikace vybraných ventilátorů

typ ventilátoru	Blade Master 80 mm [16]	ISGC Fan 8 [18]	ZM-F3-FDB [19]	NF – P14 FLX [20]
otáčky [min^{-1}]	800 - 3000	800 - 1600	1000 -1500	750 - 1200
průtok [CFM^*]	10,9 – 40,8	24,4	57,54	69,92
hluk [dBA]	13 - 28	18,2	23	19,6
očekávaná životnost [hod]	40000	50000	150000	150000
velikost [mm]	80 x 80 x 25	80 x 80 x 25	120 x 120 x 25	140 x 140 x 25

* cubic foot per minute česky kubická stopa za minutu, $1 \text{ CFM} = 0,028317 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

5.1. Konstrukce ventilátorů

Základními díly jsou rotor (Obr. 15) a stator (Obr. 17). Jedná se o starší ventilátor k procesoru AMD Duron 1100, TDP 57 W pro patici 462 (socket A), rám má velikost 60 x 60 x 15 mm, průměr rotoru přes lopatky činí 55 mm. Rotor Obr. 15, pohybující se část ventilátoru je jednodušší, základ tvoří plastový výlisek, který nese lopatky, magnet k umožnění rotačního pohybu a poslední součástí je hřídel, na které se rotor otáčí. Je nezbytná přesná výroba těchto součástí aby se zamezilo jejich nevyvážení a s tím spojenými vibracemi. Vibrace jsou příčinou častých defektů ventilátorů.



Obr. 15: Rotor ventilátoru

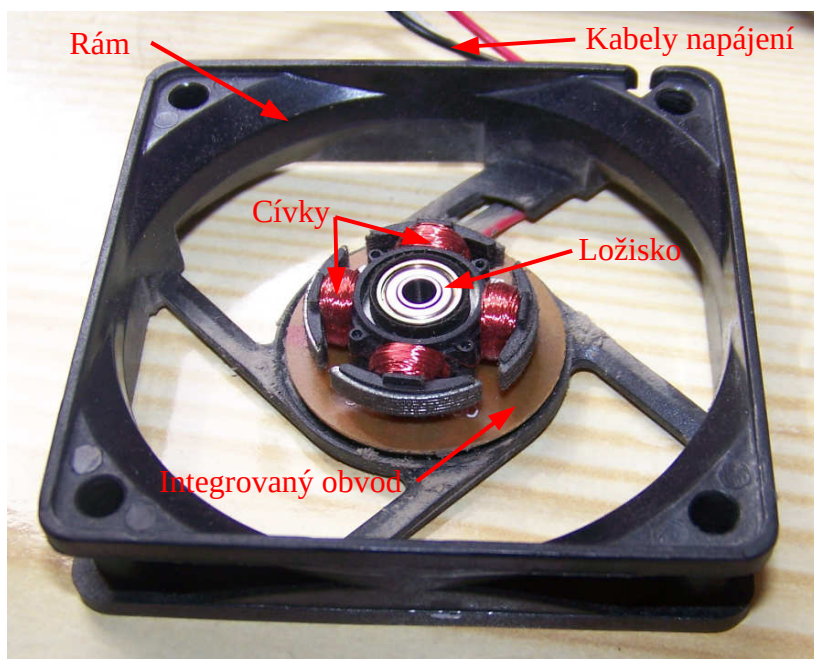


Obr. 16: Pojistný kroužek zajišťující rotor ve statoru

Na hřídeli rotoru není žádné vinutí běžné z normálních elektromotorů. Jedná se totiž o pohon bez kartáčků pro přenos elektrické energie na rotor známých z klasických motorů. Pohyb je zajištěn integrovaným obvodem na statoru který mění magnetické pole v cívkách. Jištění rotoru ve statoru je provedeno malým plastovým kroužkem Obr. 16. [21]

Rotor většinou defektní není, mohou se však vzácně polámat lopatky. Případně se může porušit pojistný kroužek, v tom případě rotor není jištěn a hrozí vypadnutí ze statoru.

Stator je nepohyblivá část ventilátoru zajišťující jeho funkci. Skládá se z rámu, cívek, ložisek a integrovaného obvodu.



Obr. 17: Stator ventilátoru



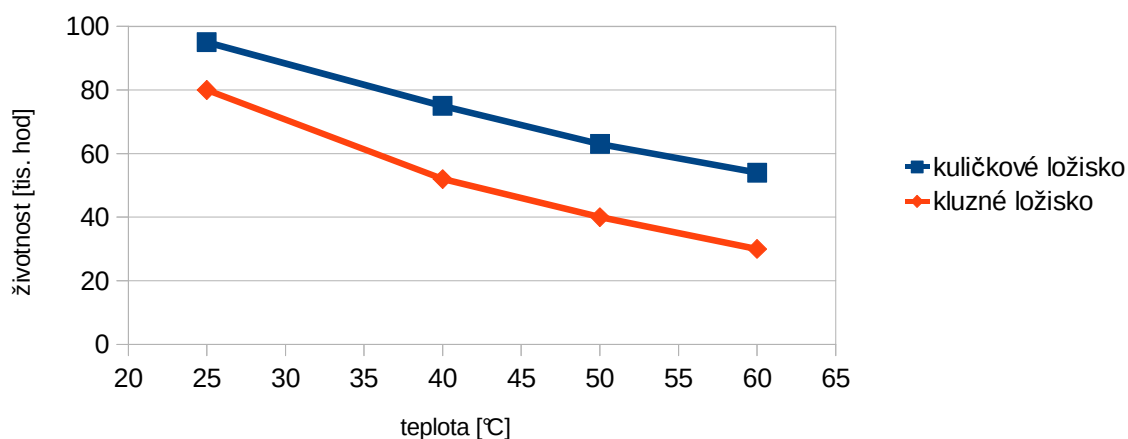
Obr. 18: Kuličkové ložisko ventilátoru

Poruchovostí nejvíce trpí ložiska (Obr. 18). Nejčastěji se setkáváme ve ventilátorech se dvěma druhy ložisek kuličkovými a kluznými. Oba druhy mají své přednosti a své nevýhody. Porovnání obou druhů ložisek je v Tab. 3 , jejich životnost je srovnána v grafu na Obr. 19.

Tab. 3: Srovnání kuličkových a kluzných ložisek [22]

kritérium	kuličkové ložisko	kluzné ložisko
životnost	vyšší	nižší
odolnost vůči vyšší teplotě	vyšší	nižší
pracovní poloha hřídele	jakkoli	svisle
hlučnost	nižší při vysokých otáčkách	nižší při nízkých otáčkách
kontaktní plochy	bod	úsečka
cena	vyšší	nižší

porovnání životnosti kuličkového a kluzného ložiska [22]



Obr. 19: Srovnání životností kuličkového a kluzného ložiska [22]

Životnost kluzného ložiska závisí zejména na vůli mezi hřídelí a ložiskem. Za rotace i při mírné nerovnováze nastávají kmity a dochází k eliptickému opotřebení ložiska, což má za následek vibrace a s nimi spojenou vyšší hlučnost. Je závislé na neustálé přítomnosti maziva a také na jeho kvalitě, zejména je důležité, aby nevysychalo.

Kvůli svým omezením se kluzná ložiska nepoužívají na chlazení drahých a tepelně náročných součástek, kterým by hrozilo trvalé poškození vlivem nefunkčnosti chlazení. Limituje je i nižší životnost při jiné orientaci než vertikální. [23] Za to však dostatečně splňují nároky na chlazení součástek s menším ztrátovým výkonem, jako například při chlazení pevných disků, či jako systémový ventilátor k přívodu nebo odvodu vzduchu ze skříně počítače.

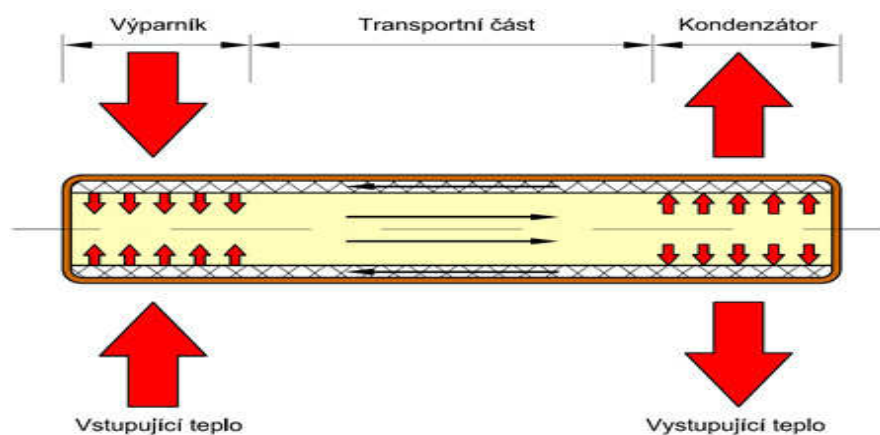
Ložisko kuličkové pro svou vyšší spolehlivost a odolnost vůči vyšší teplotě je použito ve ventilátorech, které jsou určeny k chlazení součástek s vyšším tepelným výkonem.

Dalším typem je ložisko hydrodynamické, je to v podstatě vylepšené kluzné ložisko, kdy přenos sil mezi hřídelí a ložiskem je uskutečněn prostřednictvím maziva. Nedochozí tak ke kontaktu obou těles čímž se životnost ložiska zvyšuje. Dle [24] je životnost hydrodynamického ložiska při 40 °C a 65 % relativní vlhkosti vzduchu 60000 hodin. Tyto vlastnosti ho určují k použití v nejnáročnějších podmínkách chlazení.

Posledním typem je ložisko založené na principu magnetické levitace. Jde také o ložisko bez kontaktu, jehož výhodou je nulové tření, minimalizují se tak vibrace a hluk. K opotřebení hřídele a ložiska dochází pouze za rozběhu nebo při zastavení rotace. Disponují vysokou odolností proti vysokým teplotám. Životnost tohoto ložiska při 40 °C je 130000 hod (pro ventilátor 40 x 40 x 20 mm. [25])

6. Chlazení pomocí technologie heatpipe

Heatpipe je definována jako hermeticky uzavřené dvoufázové tepelně přenosné zařízení, pracující na principu uzavřeného výparně – kondenzačního cyklu, s využitím kapilárních sil k cirkulaci pracovní kapaliny. [26] Nespotebouvají elektrickou energii, jsou tedy pasivními prvky chlazení.



Obr. 20: Řez heatpipe [27]

Skládá se ze tří hlavních částí, Obr. 20. Výparník je část, kde teplo přechází do trubice a zde způsobuje její var. Vzniklé páry vytváří tlakový gradient který žene páry ke kondenzátoru. Dále pára proudí transportní částí (tzv. adiabatickou částí), když je pokles tlaku nízký i pokles teploty par je nízký. Teplo opouští heatpipe v části zvané kondenzátor, kde páry kondenzují v kapalinu při tom uvolňují své skupenské teplo. Transportní částí heatpipe odvádějící zkondenzovanou tekutinu je “wick“ neboli knot. Transport je založen na účinku kapilárního tlaku nutícího tekutinu vrátit se k výparníku, kde začíná další cyklus. [31]

6.1. Konstrukce

Po konstrukční stránce jsou to trubice vyrobené z materiálů jako je nerezová ocel, titan, hliník avšak v elektronice se nejčastěji používá měď. Obsahují pracovní kapalinu která musí být kompatibilní s materiálem stěny trubice, nesmí totiž docházet ke korozi a také kapalina nesmí chemicky reagovat s materiálem trubice, mohlo by dojít ke vzniku nekondenzujících plynů [29]. Trubice jsou dále opatřeny systémem transportu zkondenzované kapaliny zpět k výparníku, kterými jsou nejčastěji porézní materiál Obr. 23, vroubkování vnitřní stěny Obr. 21, použití kovových sítí Obr. 22, nebo systém tzv. “artérií“ Obr. 24. Také se mohou objevit i jejich kombinace Obr. 25. [28]



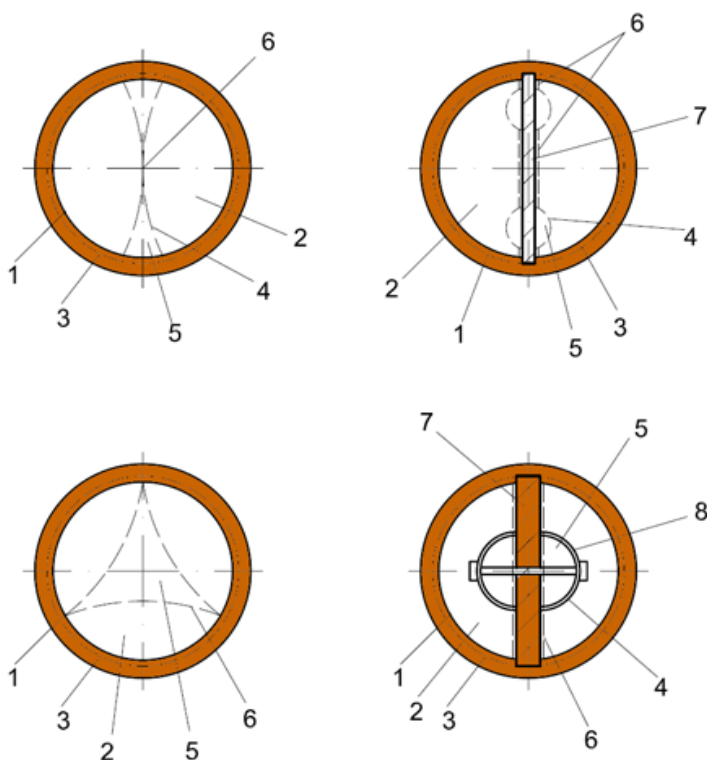
Obr. 23: Porézní materiál ze slinutého měděného prášku [30]



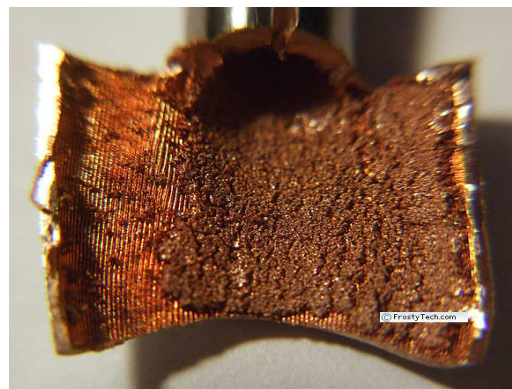
Obr. 22: vroubkování vnitřní strany [30]



Obr. 21: kovová síť [30]



Obr. 24: heatpipe s artériemi, konstrukční uspořádání [27]



Obr. 25: Kombinace vroubkování a slinutého měděného prášku [30]

Legenda k Obr. 24 [27]:

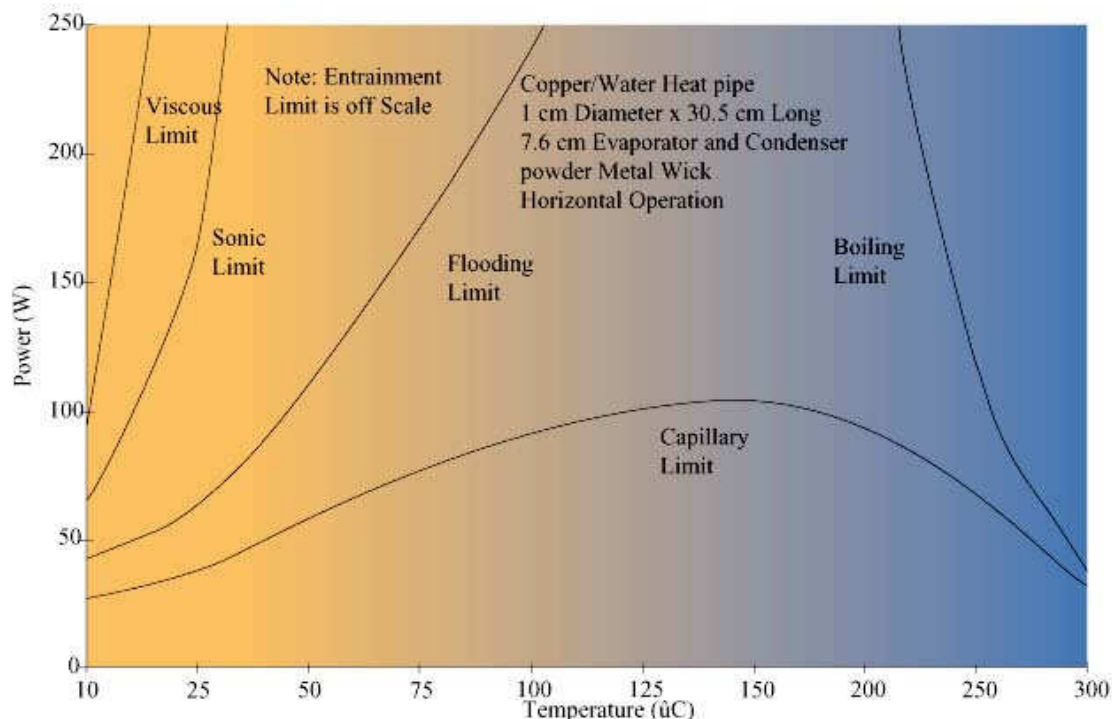
1) Vnitřní povrch artérie, 2) Oblast par pracovní látky, 3) Drážkování, 4) Síť, 5) Oblast zaplněná kapalinou, 6) Síť (překřížená nebo dvojitá), 7) Podpurná konstrukce, 8) Rozříznutá trubice (bez kapiláří)

Knoty nejsou po funkční stránce shodné. Jsou ovlivněny vnějšími podmínkami proto hodnota přenášeného tepla je závislá na úhlu náklonu trubice vůči vodorovné rovině Obr. 27 , na vlastnostech vnitřního uspořádání (zejména pak na jeho kapilaritě), provozní kapalině a také na geometrických dispozicích trubice (průměr, délka, ohnutí). Tyto závislosti byly experimentálně

popisovány a jejich výsledky ukazují jaký typ heatpipe u konkrétního systému zvolit. Dalšími omezeními jsou limity, kterými je omezen tok pracovní kapaliny nebo jejich par viz Tab. 4 a Obr. 26.

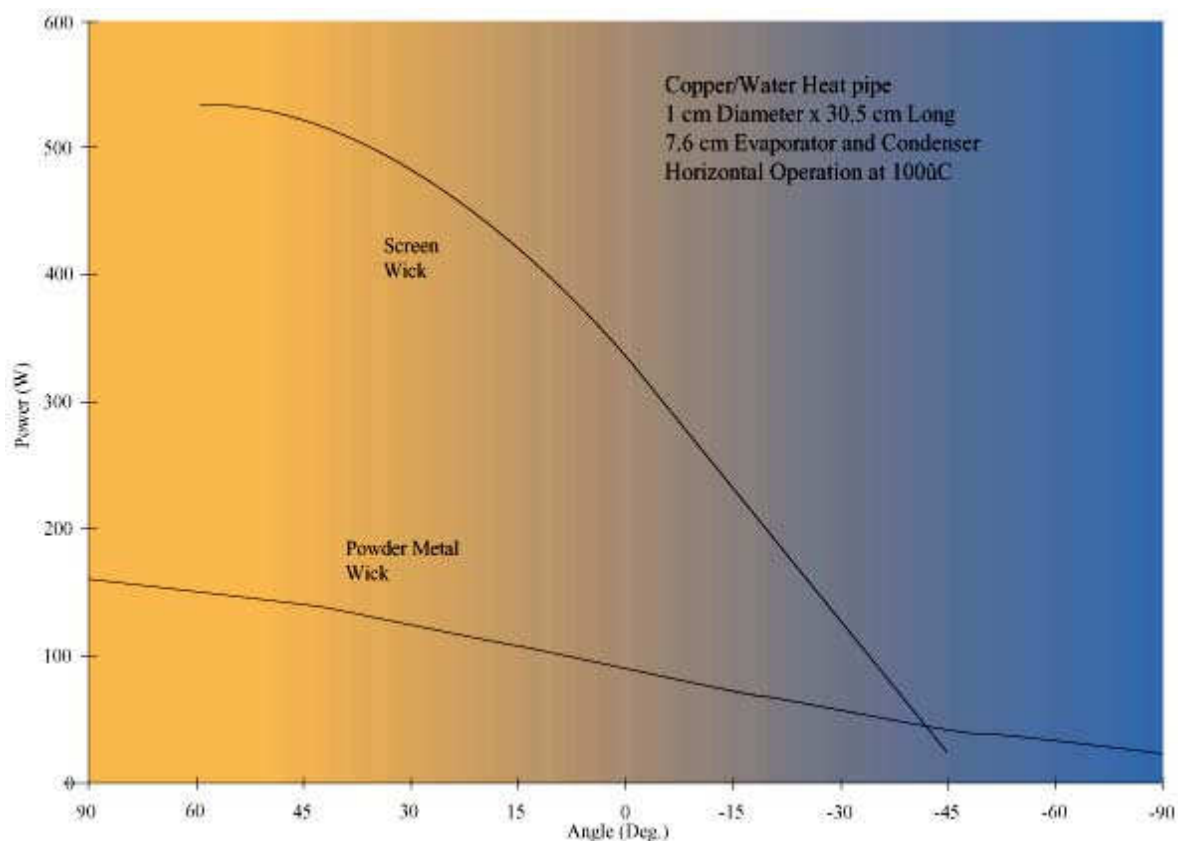
Tab. 4: Popis limitací heatpipe [31]

Limit tepelného toku	Popis	Příčina	Řešení
Viskózní (viscous)	Viskózní síly zabraňují parám proudit skrz heatpipe	heatpipe pracuje pod doporučenou provozní teplotou	Zvýšení provozní teploty heatpipe, změna kapaliny
Sonický (sonic)	Tok par dosahuje rychlosti šíření zvuku když opouští výparník. To vede ke konstantnímu tepelnému toku a velkým rozdílům teplot výparníku a kondenzátoru	Špatně zvolený tepelný tok při určité teplotě (příliš vysoký tepelný tok v kombinaci s nízkou provozní teplotou	Typický problém heatpipe při uvedení v činnost, Heatpipe bude odvádět omezené množství tepla než se zahřeje na provozní teplotu
Unášecí , záplavový (entrainment, flooding)	Velká rychlost proudících par neumožňuje kondenzátu dostat se zpět do výparníku	Heatpipe přenáší vyšší tepelný tok než dimenzovaný, nebo pracuje na příliš malé teplotě	Zvýšení průměru výparníku, nebo zvýšení provozní teploty
Kapilární (capillary)	Nastává když kapilární tlak je příliš malý k dopravení dostatečného množství kapaliny k výparníku	Vstupní výkon heatpipe je vyšší než dimenzovaná transportní kapacita	Modifikace vnitřní struktury heatpipe nebo snížení množství přenášeného tepla
Varem (boiling)	Var kondenzátu na vnitřní stěně heatpipe	Vysoký radiální tepelný tok způsobí vypařování kondenzátu ve stěně vnitřní struktury, způsobí vyschnutí pracovní kapaliny	Použití jiného vnitřního uspořádání heatpipe s vyšší tepelnou vodivostí, nebo odvést tepelnou zátěž z plochy mezi kondenzátorem a výparníkem na výparník



Obr. 26: Zobrazení limitů pro trubici s vnitřní strukturou ze slinutého měděného prášku o průměru 10 mm, dlouhé 305 mm a 76 mm dlouhým výparníkem a kondenzátorem [31];

Graf závislosti tepelného toku (power) [W] na teplotě (temperature) [°C]



Obr. 27: Graf závislosti tepelného toku (power) [W] na úhlu náklonu trubice (angle) [°]; rozměry heatpipe stejné jako na Obr. 26, pracovní teplota 100 °C,

Screen wick – vnitřní struktura tvořená sítí; powder metal – vnitřní struktura tvořena slinutým kovovým práškem

6.2. Tepelný odpor heatpipe

Tepelný odpor heatpipe není konstantní, ale je funkcí mnoha proměnných: geometrie heatpipe, délka výparníku a kondenzátoru, struktura vnitřní výplně trubice, a fyzikálních vlastností provozní kapaliny. Proto se při návrzích používá přibližný výpočet rozdílu teplot konců heatpipe. [32]

Rovnice pro rozdíl teplot heatpipe: [32]

$$\Delta T = q_v \cdot R_v + q_a \cdot R_a + q_k \cdot R_k \quad (13)$$

kde

ΔT - rozdíl teplot na koncích heatpipe [K]

q - tepelný tok [W·m⁻²]

R - tepelný odpor [K·m²·W⁻¹]

indexy v - výparník

a - osa (transportní část heatpipe)

k - kondenzátor

$$q_v = \frac{\dot{Q}}{S_v} \quad q_a = \frac{\dot{Q}}{S_a} \quad q_k = \frac{\dot{Q}}{S_k} \quad (14)$$

Se spočteným předpokládaným ΔT jsme již schopni určit předpokládaný tepelný odpor z rovnice (12). V případě více použitých heatpipe v jednom chladícím systému se přenášené teplo dělí počtem heatpipe a celkový tepelný odpor odpovídá:

$$\frac{1}{R_{celk}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (15)$$

kde

R_{celk} - celkový tepelný odpor [K·W⁻¹]

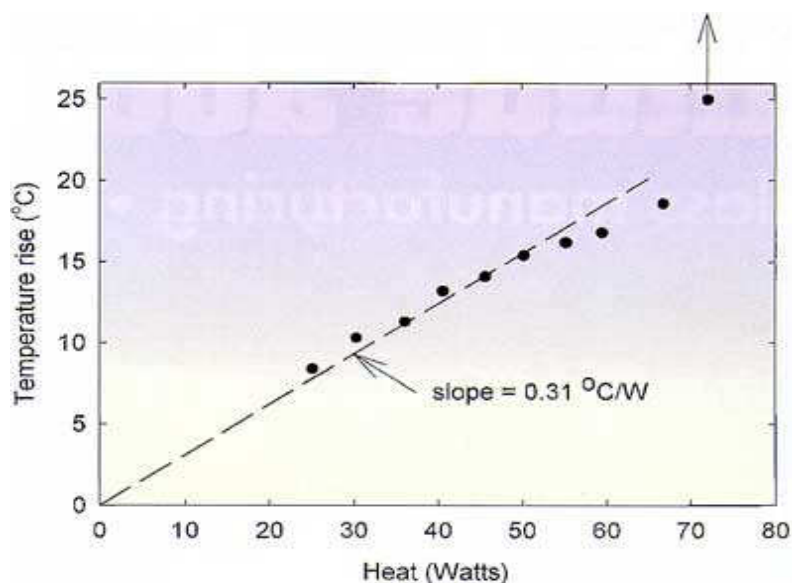
R_1 až R_n - odpor heatpipe 1 až n [K·W⁻¹]

Často se setkáváme se systémy složenými ze stejných trubic, pak pro celkový odpor platí:

$$R_{celk} = \frac{R_{hp}}{n} \quad (16)$$

kde R_{hp} - odpor heatpipe

n - počet heatpipe



Obr. 28: Graf závislosti rozdílu teploty výparníku a kondenzátoru na přenášeném tepelném výkonu [32]

Na Obr. 28 je znázorněná charakteristika heatpipe o průměru 6,35 mm, délky 300 mm, při teplotě 95 °C, knotem vyrobeným ze slinutého měděného prášku, pracovní kapalina voda. Její tepelný odpor činí 0,31 K·W⁻¹ až do 70 W přenášeného tepla.

Heatpipe takových rozměrů jsou často používány v chladičích ať už na procesor, grafickou kartu a podobně. Pro demonstraci chladičského výkonu chladičů využívajících heatpipe je uvedena Tab. 5 srovnávající více chladičů. Testování proběhlo při teplotě okolí 33 °C, na procesoru AMD Athlon 64 3700+ CPU (postaveném na jádru Clawhammer) [34].

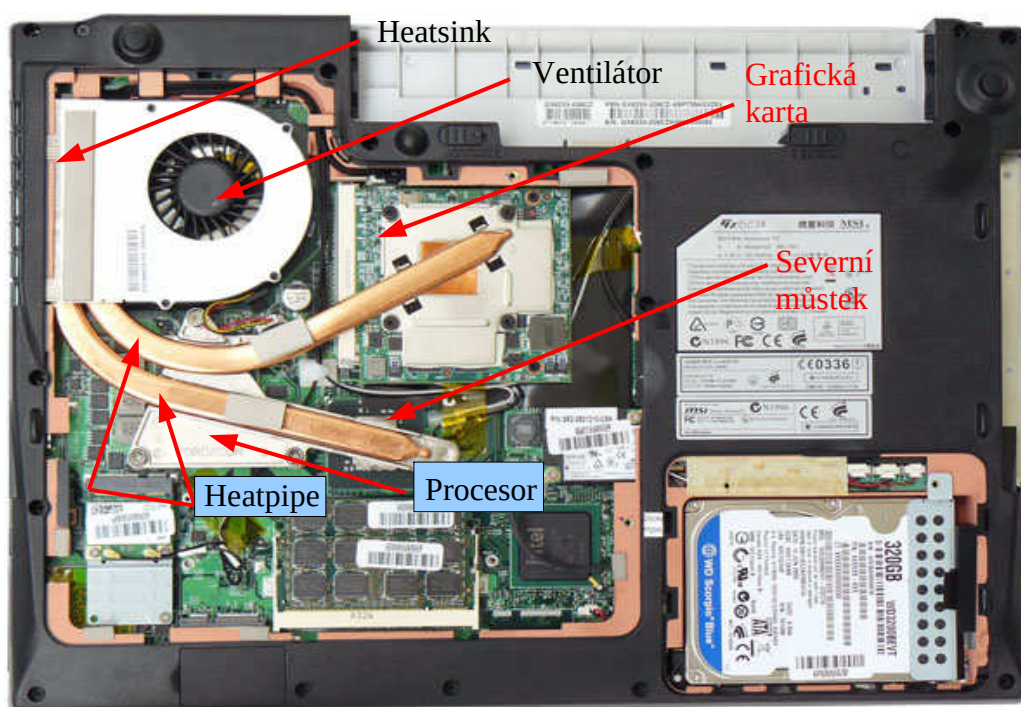
Tab. 5: Srovnání chladičů využívajících heatpipe s originálním AMD chladičem [34]

Typ chladiče	AMD Box (původní) (3300 min ⁻¹)	Arctic Cooling Freezer 64 Pro (2200 min ⁻¹)	Arctic Cooling Freezer 64 Pro (1000 min ⁻¹)	Scythe Mugen (1300 min ⁻¹)
Teplota procesoru při zátěži [°C]	78	58	70	58
Tepelný odpor [K/W ⁻¹]	0,56	0,31	0,46	0,31

Z Tab. 5 je zřejmé snížení tepelného odporu použitím heatpipe. V tomto případě se jedná o snížení odporu o 0,1 až 0,25 K·W⁻¹.

6.3. Využití heatpipe

Efektivita chlazení využívající heatpipe je v porovnání k heatsinku s ventilátorem vyšší a dovoluje odebrat větší množství odpadního tepla. Vzhledem k tomu, že heatpipe s nízkým odporem vede teplo na poměrně velké vzdálenosti využívá se této vlastnosti k chlazení v geometricky omezených prostorech Obr. 29 , nebo se používá ke zvětšení plochy žebér pro konvekci ať už nucenou nebo přirozenou.



Obr. 29: Chlazení notebooku MSI GX632 [35]

Moderní notebooky mají vysoké nároky na rozměry a je snaha je zmenšovat, tak vzniká problém s chlazením. Účinné řešení však nabízejí heatpipe které efektivně odvedou ztrátové teplo. Jsou zde výhradně aplikovány široké a ploché měděné heatpipe s průřezem tvaru oválu a jako pracovní kapalinu využívají vodu. Tyto heatpipe mají knot vyrobený ze spleteného drátu, z přímého drátu skrze celou heatpipe nebo jejich kombinací. Nejnižší tepelný odpor má právě kombinace těchto knotů. Nejvyšší efektivitu dosahují, když úhel mezi heatpipe a vodorovnou rovinou je 5° a je-li kondenzátor výš než výparník. Další limitací jsou rozměry heatpipe, není vhodné aby heatpipe měla menší tloušťku než 2 mm a tloušťku stěny větší než 0,4 mm. [36]

Jedním z dalších možných využití vynikající tepelné vodivosti heatpipe je aplikace k chlazení desktopových grafických karet. Prostor vymezený pro její chlazení je omezen malou vzdáleností k dalším kartám, často tak zabírá nejbližší volný slot. Heatpipe v tomto použití umožní rozšíření heatsinku a lepší proudění vzduchu mezi žebry, které je pak schopné dosáhnout na malé heatsinky

přípevněné na pamětech napájecí soustavě karty. Grafické karty jsou zařízení s velkým rozpětím TDP. Ty nejvýkonnější dosahují ztrátového tepla až k 375 W pro dvoučipovou AMD Radeon 6990 [37], v těchto případech je nutné použití masivních a výkonných chladičů. Příkladem je Arctic Accelero Twin Turbo 6990 (Obr. 30) , který je schopen odvést 400 W odpadního tepla, obsahuje 10 heatpipe trubic, 86 hliníkových žebér a dva ventilátory [38].



Obr. 30: Arctic Accelero Twin Turbo 6990 aplikovaný na grafické kartě AMD Radeon 6990 [39]

I chladiče procesorů využívají tepelných trubic a i zde je jejich úkolem odvést teplo od zdroje a předávat ho na co největší ploše žebřům chladiče kde dochází k odvodu tepla konvekcí. Tím přispívají k nižšímu tepelnému odporu viz Tab. 5. Avšak nemají tolik prostoru k přenosu tepla čímž není možné jimi odvádět tak velké množství tepla jako s chladiči grafických karet. Povětšinou jsou to chladiče věžovité konstrukce, s žebrováním rovnoběžným se základní deskou PC. Běžné věžovité chladiče dokáží uchlazení kolem 150 W odpadního tepla např. Freezer 64 PRO (Obr. 31) [38], avšak pro vyšší výkony existují chladiče masivnější, které odvedou až 220 W ztrátového tepla. Příkladem takového chladiče je ThermalTake Frio (Obr. 32), který dokáže odvést 240 W přebytečného tepla [40].



Obr. 32: Chladič ThermalTake Frio [18]



Obr. 31: Chladič Freezer 64 Pro [38]

Použití heatpipe snižuje celkový tepelný odpor chladiče, umožňuje rovnoměrné rozložení tepla v žebrování a dokáže odvést teplo tam, kde je již možné předat ho okolnímu prostředí.

Dle [40] jsou dva základní typy poruch. Prvním je nedostatečné hermetické utěsnění, kdy se chyba projeví hned v prvních hodinách provozu. Druhou je na konci životnosti porucha vlivem opotřebení. V případě použití k chlazení PC nedochází k vystavování heatpipe koroznímu prostředí což ještě zvyšuje životnost. V období provozu se již poruchy nevyskytují. Životnost heatpipe se pohybuje kolem 15 let a více.

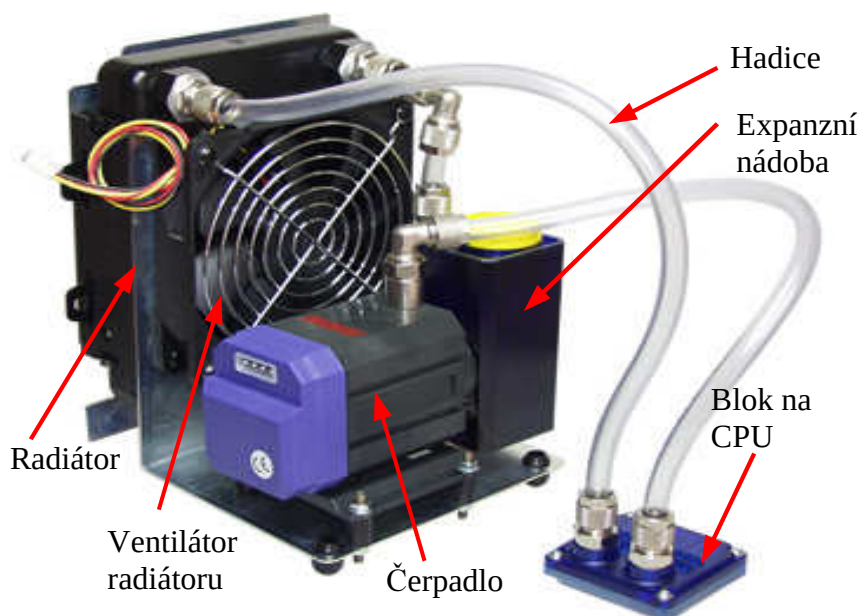
Jsou tedy efektivní a spolehlivou součástí chlazení. Uplynula také dlouhá doba od jejich první produkce, což vede k rozvoji technologie výroby a v druhé řadě i k jejímu zlevnění. Jsou proto dobře dostupné.

7. Kapalinové chlazení

V případech, kdy je zapotřebí vysokého výkonu dosažitelného pouze přetaktováním, nebo jsou kladeny vysoké nároky na hladinu hluku, v těchto případech je vhodné použít kapalinové chlazení. Pracovní látkou je kapalina, která má na rozdíl od vzduchu vyšší tepelnou kapacitu, což jí umožňuje odebrat větší množství tepla v malém objemu. Primárně se skládá ze dvou tepelných výměníků, aktivního prvku (čerpadla), expanzní nádoby a hadic k uzavření okruhu.

7.1. Konstrukce

Obvyklý systém vodního chlazení se základními součástmi je zobrazen na Obr. 33.



Obr. 33: Systém vodního chlazení [41]

7.1.1. Kapalina

Jedinou součástí, která není vidět je pracovní kapalina. Pracovní kapalinu si vybíráme podle vlastností kterými musí disponovat, aby byla vhodná k chlazení PC.

A právě její klíčovou vlastností je měrná tepelná kapacita, která určuje jaké množství tepla je potřebné k jejímu ohřátí o 1 °C. Pro praktické využití je důležitá také viskozita chladicí kapaliny, která významně ovlivňuje zatížení čerpadla. Elektrická vodivost je důležitá v případě poruchy systému a vylití kapaliny do prostoru počítače. V případě elektricky nevodivé kapaliny se snižuje riziko zničení komponentů zkratem.

Nejčastěji se používá destilovaná voda s příměsí k zajištění vlastností, které požadujeme. Příměsí může být líh, který se přidává k odstranění řas z okruhu. Při použití součástí z mědi a hliníku v okruhu se přidává glykol, který zabrání vzniku galvanického článku a vyloučí tak poškození na základě elektrochemické koroze. Dále je třeba dávat pozor na rozpouštědla, která poškozují gumová těsnění nebo plastové komponenty oběhu.[42]

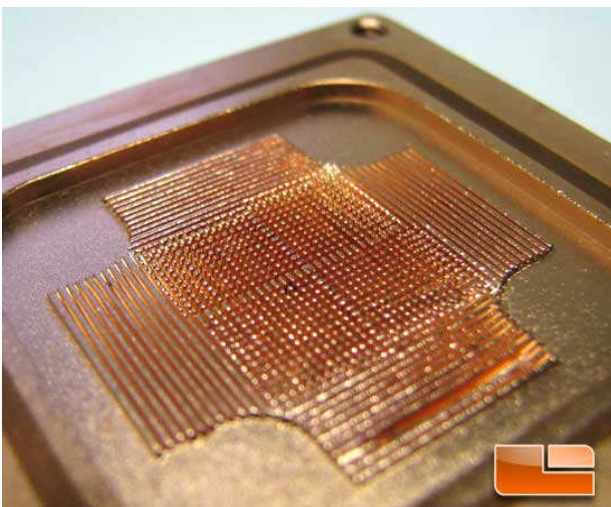
7.1.2. Vodní blok

Vodním blokem je zařízení (Obr. 35) jehož úkolem je za pomoci proudícího média odebírat tepelnou energii od procesoru, případně jiné komponenty a umožnit její transport dále. Stěny přiléhající k chlazenému čipu jsou vyrobeny z materiálu s vynikající tepelnou vodivostí, zpravidla mědi. Mají za úkol odebrat teplo z čipu a přenést ho do kapaliny, k tomu slouží žebrování ze strany kapaliny viz Obr. 34. Zde dochází ke konvekci nucené nebo přirozené v závislosti na použití čerpadla či nikoli. Popis konvekce viz kap. 4 a kap. 5. Žebrování se přizpůsobuje optimálnímu toku kapaliny, zohledňuje se její viskozita, vliv turbulencí kolem žeber. [43] Pro kvantifikaci tepla předaného kapalině lze použít rovnici pro tepelný tok:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (17)$$

kde

$\dot{Q}$	- tepelný tok	[W]
$\dot{m}$	- hmotnostní tok kapaliny	[kgs ⁻¹]
c_p	- měrná tepelná kapacita kapaliny	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
ΔT	- rozdíl teplot kapaliny na vstupu a výstupu	[K]



Obr. 34: Apogee GTZ Core i7 [44] vnitřní strana měděné základny s drážkováním pro lepší přestup tepla



Obr. 35: vodní blok na CPU Apogee GTZ Core i7 [44]

7.1.3. Hadice

K rozvodu chladicí kapaliny v okruhu slouží hadice Obr. 37. Největším úskalím je výběr materiálu k jejich výrobě. Standardní jsou PVC a silikon. Oba druhy mají své výhody a nevýhody. Silikon časem netvrdne, je dobře ohebný, avšak je pórovitý proto je třeba kapalinu v okruhu doplňovat. PVC naopak neobsahuje póry, zato časem tvrdne je hůř ohebný a může se tak snadno zlomit, kdy se výrazně omezí průtok kapaliny. Lánavost se dá omezit použitím pružinek, které se navléknou na hadici do kriticky ohnutých míst Obr. 36. Používají se také hadice z různých směsí plastů, jsou to Tygon, Clearflex. [45]



Obr. 36: Pružiny k omezení lámavosti hadic [43]



Obr. 37: Hadice používané v sestavách vodního chlazení [45]

7.1.4. Spojovací součásti neboli “fitinky”

Nutnost propojení hadice s dalšími komponentami okruhu je řešena tzv. fitinky. Jedná se o rotační součást, která je na straně komponenty vybavena trubkovým závitem nejčastěji G 1/4“ a těsnícím kroužkem, na druhém konci systémem uchycení k hadici. Způsobů uchycení je několik, nejčastějším je nástrčný Obr. 38 spolu s se stahovací svorkou Obr. 39, používají se i s převlečnou maticí Obr. 40. [45]



Obr. 38: Fitinka s nástrčným uchycením [45]



Obr. 39: Svorka [45]



Obr. 40: Převlečná matice [45]

Spojení součástí je vždy problematickým místem, kde nejčastěji dochází k poruchám. Porušení podléhají zpravidla hadice které jsou vlivem stárnutí náchylnější k praskání a právě v místě fitinky, kde je nejvíce namáhaná může prasknout. Může také vlivem vysokého tlaku „vyklouznout“ z trnu fitinky. Chybou jsou také málo utažené svorky, v opačném případě hrozí ustrížení hadice. Ustrížení z důvodu přílišného utažení hrozí i v případě převlečné matice. [45]

7.1.5. Expanzní nádoba

Průhledná vysoká nádoba, Obr. 41 sloužící k vizuální kontrole stavu kapaliny, slouží také jako součást k doplnění kapaliny a odvzdušnění respektive zavodnění systému. Další důležitou úlohou je zabránit přetlaku popřípadě podtlaku vlivem objemové tepelné roztažnosti kapaliny. Není nutnou součástí okruhu. [1]



Obr. 41: Expanzní nádoba [1]

7.1.6. Radiátor

Teplu odebrané PC je nutné předat do okolí. Tento přenos se uskutečňuje prostřednictvím radiátoru. Zjednodušeně se jedná o systém trubic, na kterých je napájeno mnoho žebér ke zvýšení plochy ke konvekci. Trubice jsou zpravidla vyrobeny z mědi, žebrování z hliníku. Radiátory mohou být opatřeny ventilátory ke zvýšení součinitele přestupu tepla. Rovnice k výpočtu odvedeného tepla jsou stejné jako u vodního bloku (kap. 7.1.2.). [1] Radiátory se dále dělí podle potrubí na sériové Obr. 42 a paralelní Obr. 43. Paralelní používá především trubky obdélníkového průřezu, kdy na koncích jsou sběrné nádoby umožňující rovnoměrné rozdělení toku kapaliny v potrubí. Výhodou paralelního potrubí je vyšší chladicí výkon a nižší hydraulický odpor, na druhou stranu jsou dražší, hůř se čistí a častěji se zavzdušňují. [42]



Obr. 42: Sériový radiátor Airplex Evo 240 [42]



Obr. 43: Paralelní radiátor Black Ice Pro Extreme III [46]

7.1.7. Čerpadlo

Čerpadlo je srdcem celého vodního okruhu neboť zajišťuje proudění chladicí kapaliny. Je to aktivní prvek, obsahuje rotační součásti a ložiska, proto má omezenou dobu životnosti. Dělí se do dvou základních typů na čerpadla průtoková Obr. 44 a ponorná Obr. 45. Ponorná čerpadla pracují celá ponořená, nasávají kapalinu a vývodem ji tlačí dál – jedná se o otevřený okruh. Průtoková čerpadla pracují vně okruhu a voda jimi jen prochází. Ponorná čerpadla bývají levnější a tišší, nevýhodou jim jsou velké nároky na prostor. Nejdůležitějšími parametry jsou průtok za hodinu, výtlak, příkon, hlučnost a vyústění.

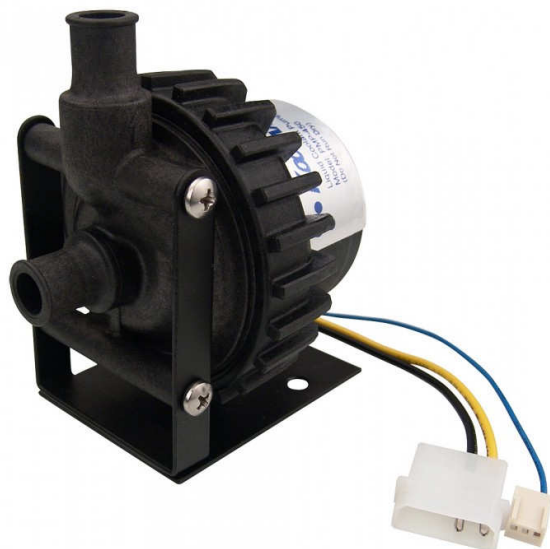
Průtok je důležitý pro celkový výkon vodního chlazení, čerpadlo by mělo disponovat průtokem od 300 do 800 litrů za hodinu. Takový průtok nastává v ideálních podmínkách, ve vodním okruhu je však díky tlakovým ztrátám nižší.

Výtlak určuje hodnotu maximálního dosažitelného tlaku ve formě výšky vodního sloupce. Optimálním rozsahem pro vodní chlazení je výtlak 0,5 až 1,5 m.

Příkon nám udává výkon a ztráty. Ztráty se projeví ohříváním kapaliny v okruhu. Optimální příkon čerpadla je kolem 10 W, kdy je zajištěn dostatečný výkon a malé tepelné ztráty.

Hlučnost je důležitá zejména v souvislosti s pohodlím při práci. Hlučnost by neměla překročit hranici 35 dBA, viz kap. 5.

Dostatečně široké vyústění je důležité, aby se zbytečně nezabraňovalo toku kapaliny. Z důvodu omezení tlakových ztrát ve vedení. Platí pro celý okruh. [43]



Obr. 44: Průtokové čerpadlo PMP – 450 [47]



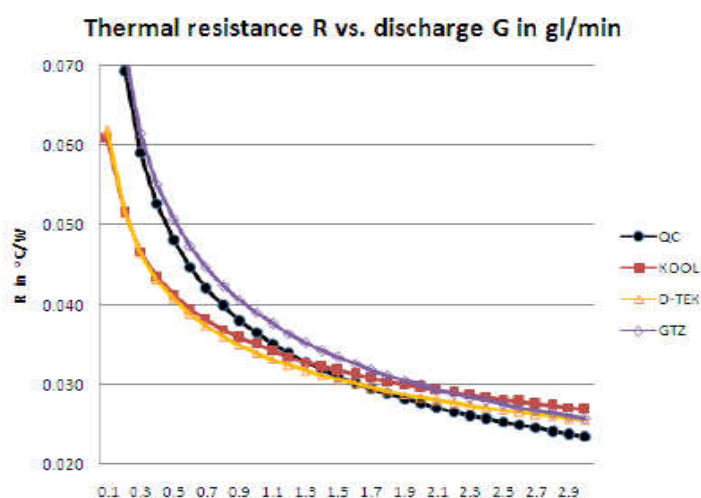
Obr. 45: Ponorné vodní čerpadlo Compact 600 [48]

7.2. Tepelný odpor

Tepelný odpor je klíčová veličina k určení chladicího výkonu vodního chlazení. V okruhu vodního chlazení dochází k přestupu tepla převážně dvěma formami: vedením a konvekcí. V okruhu jsou

dvě části kterých se to týká a to vodní blok spolu s radiátorem. Celkový odpor soustavy vodního chlazení je dán součtem odporů bloku a radiátoru.

Vodní bloky mají za úkol odvést teplo vedením od procesoru a konvekcí do chladicí kapaliny. Ke konvekci slouží dutina kde se stýká kapalina s měděnou základnou. Právě tato komora je klíčová pro tepelný tok. Zde hraje roli především geometrie povrchu stýkajícího se s vodou. Z rovnice (4) je patrná závislost tepelného toku na styčné ploše, a na koeficientu přestupu tepla závislého na vlastnostech kapaliny a také na geometrii podle rovnice (12), Nusseltovo číslo pro nucenou konvekci. Pro konkrétní bloky byl tepelný odpor bloků zkoumán a byla sestavena závislost tepelného odporu na průtoku blokem, viz Obr. 46.



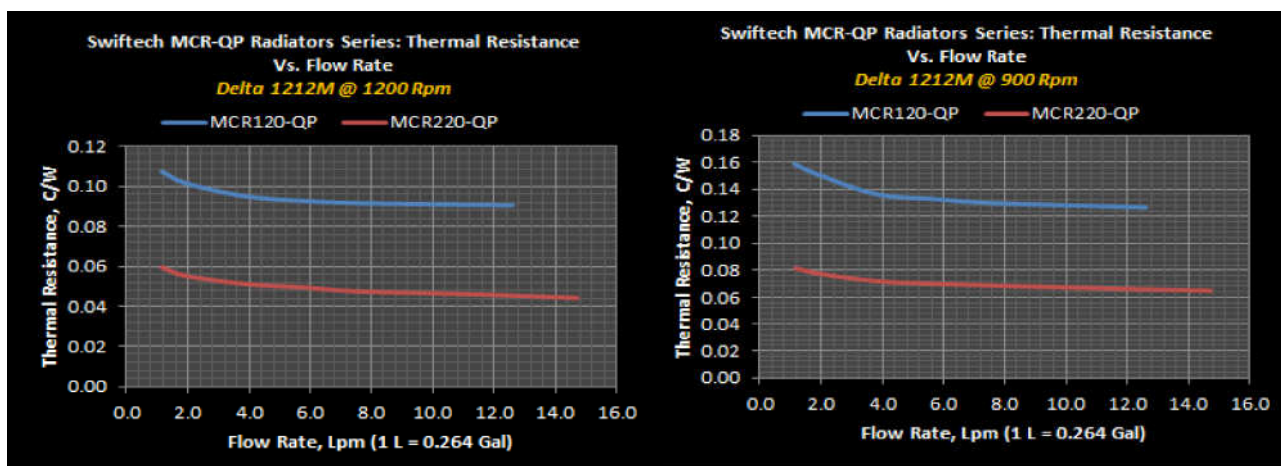
Obr. 46: Graf závislosti tepelného odporu R na průtoku G chladicí kapaliny [49]
bloky:

QC – QualiCell; KOOL - Koolance; D-TEK – D-TEK Fuzion; GTZ – Swiftech Apogee GTZ

1gl = 3,7854 l

Z grafu je vidět, že při průtoku kolem 7 litrů za minutu ($2 \text{ gl} \cdot \text{min}^{-1}$) se pohybuje průměrný tepelný odpor kolem $0,030 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$. V porovnání s ostatními způsoby chlazení se jedná o velice nízkou hodnotu.

Tepelný odpor radiátorů je řešen stejně jako v případě vodních bloků s rozdílem, že teplo předává voda konvekcí samotnému radiátoru, vedením se přechází do žeber a následně z žeber konvekcí do vzduchu. Pro zjištění odporů použijí graf závislosti tepelného odporu na průtoku na Obr. 47.



Obr. 47: Graf závislosti tepelného odporu na průtoku [50]

V grafu Obr. 47 je vyobrazen tepelný odpor dvou radiátorů MCR120-QP a MCR220-QP v závislosti na průtoku a za konkrétních otáček ventilátoru na radiátoru. Jsou to radiátory stejné konstrukce, rozdílem je jejich velikost, kdy MCR120-QP je zkonstruována na rozměr jednoho 120 mm ventilátoru a MCR220-QP na rozměr dvou.

Pro průtok $2 \text{ gl} \cdot \text{min}^{-1}$ a otáčkách ventilátoru 1200 min^{-1} je odpor $0,055 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ pro větší výměník, a $0,1 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ pro menší.

Pro celkový odpor platí součet odporů bloku a výměníku. Při použití malého radiátoru se tedy dostaneme na hodnotu $0,13 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. Při použití většího na hodnotu $0,085 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$, vzhledem k použití v reálných podmínkách bude odpor ještě vyšší, kolem $0,15 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ a $0,1 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

S takovou hodnotou odporu je možné uchladiť za nejhorších podmínek (teplota okolí $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$, maximální teplota čipu $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a při očekávaných odporech $0,1 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ a $0,15 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$) 233 respektive 350 W odpadního tepla.

Systém vodního chlazení je velice efektivní způsob jak chladit vysoce výkonná PC i za přetaktovaného stavu (zvýšení tepelných ztrát). S rezervou systém s radiátorem rozměru jednoho 120 mm ventilátoru je schopen uchladiť procesor se 130 W TDP. Vodní chlazení také umožňuje odvést teplo na místo, kde není problém předat ho do okolí. V případě použití komponent emitujících nízkou míru hlučnosti je velice tichým způsobem chlazení.

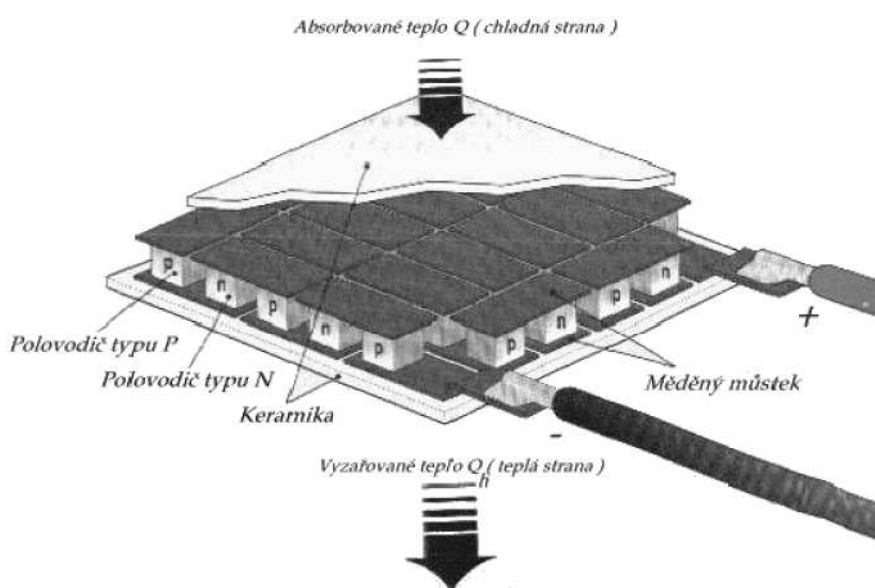
Systém však integruje spoje okruhu, které mohou stárnout a praskat nebo mohou být nesprávnou instalací poškozeny, proto zde hrozí možnost vylití chladicí kapaliny mimo okruh. Správnou manipulací a údržbou je však možné kapalinové chlazení považovat za bezpečné. Nevýhodou jsou také vysoké pořizovací náklady na sestavu kapalinového chlazení. Dnešní vzduchové chladiče na principu heatpipe již umožňují chladit i výkonné komponenty viz kap. 6.3. a vytlačují tak kapalinové chlazení z trhu.

Možnost odvést teplo tam, kde je lepší možnost předat ho do okolí se využívá např. ve větších výpočetních centrech, kde je možné použít jeden velký radiátor pro více výpočetních jednotek.

8. Peltierův článek

Zařízení založené na principu inverze Seebeckova jevu, kdy dva různé kovy jsou vodivě spojeny ve dvou různých místech, pak vyvíjejí elektrické napětí když jsou udržovány na rozdílné teplotě. Na tomto principu pracují termočláňkové teploměry. Peltierův efekt je opačný, když přivedeme napětí na dva vodiče z různých kovů, vodivě spojené ve dvou různých místech, zjistíme, že mezi spojeními je teplotní rozdíl. Takto se vytvoří malé tepelné čerpadlo, jedná se o termoelektrické chlazení.

V praxi se využívá více termočláňků zapojených v sérii což umožňuje větší přenos tepla. Používá se kombinace polovodičů bismutu a teluru v provedeních typu N a typu P viz Obr. 48.[10]



Obr. 48: Schéma peltierova článku [51]

8.1. Vlastnosti peltierova článku

Základními specifikacemi peltierova článku jsou jeho maximální tepelný tok, maximální teplotní rozdíl teplé a chladné strany, maximální napěťové a proudové charakteristiky a jeho rozměry. Podle tepelného toku, který je třeba chladit a podle teploty, kterou chceme získat je třeba volit článek. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v grafu na Obr. 48, který platí pro teplotu teplé strany článku 50 °C.

První charakteristikou (horní graf na Obr. 48) peltierova článku je graf závislosti napětí na ΔT (rozdílu teplot teplé a studené strany) při daném proudu. Základní fakt, který graf určuje je, že nejvyššího teplotního rozdílu dosáhne článek při nejvyšším výkonu (křivka nejvyššího proudu a napětí). V tomto grafu pro požadovaný ΔT odečteme proud a vynásobením proudu a napětí získáme příkon samotného článku.

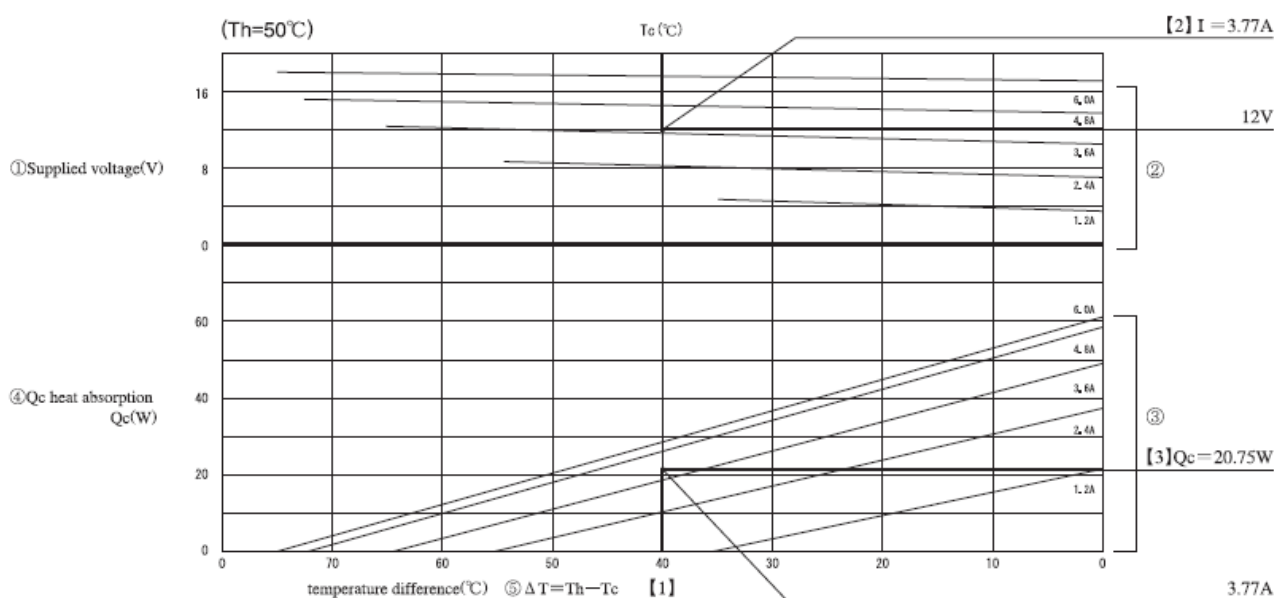
Druhou charakteristikou je graf přenášeného tepla v závislosti na rozdílu teplot (spodní graf na Obr. 48). Zjištěnému proudu z první charakteristiky a rozdílu teplot odpovídá maximální tepelný tok článkem, neboli teplo absorbované chladnou stranou. V případě nedostatečnosti tepelného toku je potřeba zvýšit výkon článku, nebo zvážit použití výkonnějšího článku s vhodnějšími parametry.

Tepelný tok, který je emitován teplou stranou článku je nutné odebírat, aby nedošlo k přehřátí. Teplo emitované teplou stranou článku je součtem tepelného toku článkem a jeho příkonu.

Na Obr. 48 je také příklad určení charakteristik při požadavku $\Delta T = 40^\circ\text{C}$, napájecí napětí $U = 12\text{ V}$ pro článek CP60440. Z grafu je odečten proud $3,77\text{ A}$ a tepelný tok článkem $20,75\text{ W}$, pak tepelný tok procházející teplou stranou článku je:

$$\dot{Q} = P + Q_c = U \cdot I + Q_c = 3,77 \cdot 12 + 20,75 = 66\text{ W}$$

Z tohoto plyne, že při použití článku CP60440 a chlazení součástky s tepelným výkonem $20,75\text{ W}$ je nutné z teplé strany odebírat 66 W ztrátového tepla.



Obr. 49: Graficky znázorněné charakteristiky peltierova článku se znázorněným postupem při výběru [52]

8.2. Použití

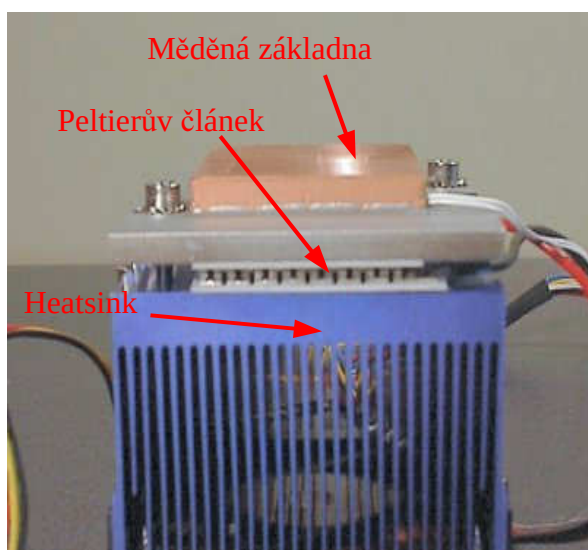
Peltierův článek se využívá nejvíce k přetaktování čipů, kdy se využívá jeho schopnosti udržovat chladnou stranu na nízké teplotě, která může být nižší než teplota okolí. Je nutné ho dostatečně chladit a proto se používá výhradně s výkonným chlazením jako je vodní, či dostatečně výkonné vzduchové chlazení např. založené na principu heatpipe.

Ke své činnosti vyžaduje napájení a jeho spotřeba převyšuje 2x až 3x odváděné teplo. Právě spotřeba jej činí nevýhodným chlazením, kdy zvyšuje nároky na výkon zdroje počítače, a nutností chladit ztrátové teplo čipu a článku.

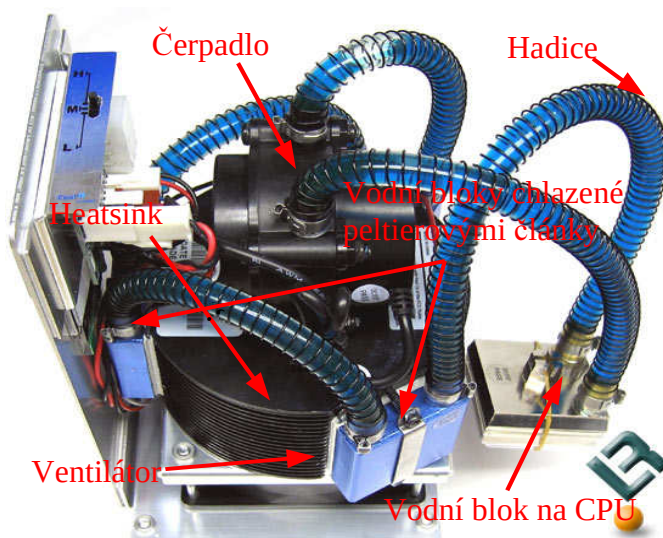
Doporučit ho lze pro přetaktování procesorů a grafických karet s nízkou hodnotou TDP, aby nebyla nutnost odvádět velké množství odpadního tepla a zároveň bylo dosaženo nízkých teplot výhodných k přetaktování.

Při používání je nutné dbát na izolaci proti vodě v případě dosažení nízkých teplot pod teplotou kondenzace vodních par, kdy by mohlo dojít k poškození elektroniky zkratem. I články jsou náchylné k poškození zkondenzovanou vodou proto se vyrábí i modely izolované přímo výrobcem. [10]

Základní instalace článku je zobrazena na Obr. 50, kdy je článek využit k chlazení CPU. Avšak je možné termoelektrické chlazení zkombinovat s vodním Obr. 51.



Obr. 50: Ilustrace 2: Instalovaný peltierův článek. [53] jedná se o chladič SubZero 4G firmy ThermalTake



Obr. 51: Hybridní vodní chlazení, vodní okruh chlazen peltierovými články. [54]

8.3. Výhody, nevýhody

Největším přínosem peltierova článku je možnost ochlazení studené strany pod teplotu okolí. Má snadno regulovatelný výkon pomocí změny vstupního proudu a napětí. Vzhledem k tomu, že neobsahuje pohyblivé součásti je hlučnost nulová, životnost není omezena ložisky a nevytváří vibrace. Životnost článků se pohybuje nad hranicí 100 000 hodin. Díky svým malým rozměrům jsou vhodné do stísněných prostor. Dalším přínosem je absence nebezpečných chladících kapalin. [55]

Na druhou stranu spotřebovává značné množství energie a proměňuje ji v tepelnou energii, která zatěžuje elektrický zdroj a chladicí systém. Navíc v případě poruchy chlazení se začne ohřívat i studená strana článku, což může poškodit čip i článek samotný.

9. Kompresorové chlazení

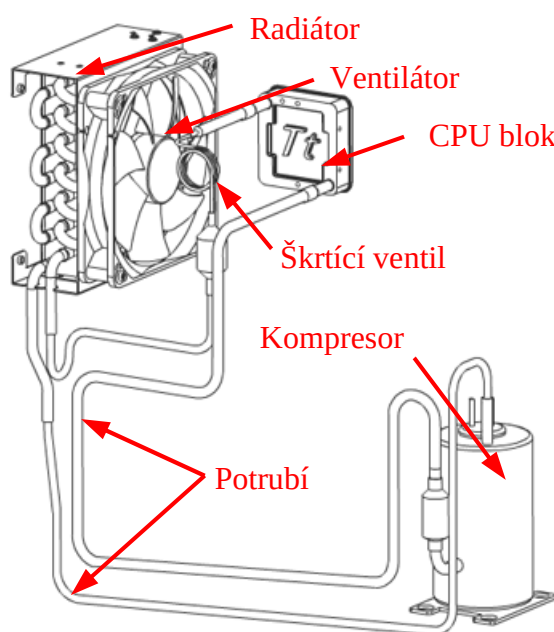
Kompresorové chlazení je jedním ze způsobů, se kterým je možné dosáhnout nižších teplot než je teplota okolí. Tohoto efektu je docíleno fázovou přeměnou kapaliny s nízkou teplotou varu na její páru. Při jejím vypařování tak dochází k odběru tepla z okolí a následnému podchlazení pod okolní teplotu. Vytvoření těchto podmínek je dosaženo použitím uzavřeného cyklu s kompresorem. Je to stejný způsob dosažení nízkých teplot jako se využívá např. v chladničkách, jen je uzpůsoben k chlazení PC. [56]

9.1. Konstrukce

Obdobně jako vodní chlazení je i kompresorové tvořené uzavřenou smyčkou sestávající se ze čtyř hlavních částí. Tyto části jsou nezbytnou součástí tohoto způsobu chlazení a každá má specifickou funkci k zajištění funkčního oběhu kapaliny viz kap 9.2. Schématické znázornění je na Obr. 53, nainstalovaný systém je na Obr. 52. Veškeré součásti jsou propojeny kovovým potrubím (nejčastěji měděným) z důvodu namáhání potrubí na přetlak a podtlak. Spoje jsou utěsněné pájením, a tepelně zaizolovány ke snížení tepelných ztrát a k zamezení kondenzace vody. Izolovat proti kondenzaci je nutné i základní desku PC, aby nedošlo ke zkratu zkondenzovanou vodou.



Obr. 52: Nainstalovaný systém kompresorového chlazení [57]



Obr. 53: Schéma kompresorového chlazení Xpressar RCS 100 firmy ThermalTake [57]

9.2. Chladicí okruh

Cyklus začíná v kompresoru, kde jsou páry chladicí kapaliny stlačeny. Při tomto kroku se zvyšuje jejich teplota a tlak, což způsobí oběh chladiva uvnitř systému. Teplo přenášené parami je odebíráno tepelným výměníkem (radiátorem), kde páry kondenzují za vysokého tlaku. Průtok kapaliny do bloku CPU je regulován škrtícím ventilem, který je tvořen trubicí s nižším průměrem. Průměr trubice musí být dimenzovaný na dostatečný průtok, avšak nesmí být příliš velký, aby v oběhové soustavě zůstaly rozděleny části vysokotlaké a nízkotlaké. Kapalina za škrtícím ventilem je vystavena nízkému tlaku a vypařuje se. Místem kde se vypařuje je CPU blok. Kapalina za nízkého tlaku vře při nízké teplotě a odebírá tak chlazené součásti teplo. Vzniklé páry pak potrubím putují zpět ke kompresoru, kde se cyklus opakuje. [56]

Prostory chladicího okruhu vyplňuje chladicí kapalina - chladivo, na které je kladeno mnoho požadavků, především jsou to rozsah operačních tlaků, tepelná kapacita, vliv na ozonovou vrstvu, potenciální výbušnost a nesmí způsobovat korozi. Těmto nárokům vyhovují speciální kapaliny, nejběžnějšími v elektronice jsou chladiva *R-134a* spolu s *R-404a*. [58]

9.3. Chladicí výkon

U každého způsobu chlazení je faktorem k určení efektivity chlazení jeho tepelný odpor. Pro Xpressar RCS 100 výrobce uvádí hodnotu $0,02 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ [57]. S touto hodnotou je možné uchladit nejvýkonnější komponenty i v přetaktovaném stavu. Tato veličina je však nejvíce ovlivněna použitým chladivem a jeho hodnotou skupenského tepla varu.

9.4. Výhody nevýhody, použití

Obrovský chladicí účinek je využíván v krajních případech, kdy je zapotřebí chladit vysoce přetaktované komponenty po dlouhou dobu při nízkých teplotách. V jistých případech to může být nevýhodou např. když je ochlazována komponenta s malými tepelnými ztrátami, což dovolí bloku udržet si nízkou teplotu, kdy hrozí kondenzace vodních par. Proto je nutné chladit tepelně výkonné součástky nebo je nutné zaizolovat blok a vedení.

Kompresor je součástí spotřebovávající nemalé množství energie, v případě Xpressaru RCS 100 je to maximálně 50 W, vynutí si tak výkonnější zdroj, dále vytváří hluk a vibrace. Další nevýhodou je také vyšší hmotnost a rozměry celého systému. Náklady na pořízení tohoto chlazení jsou velmi vysoké a mohou přesáhnout i cenu chlazeného hardwaru.

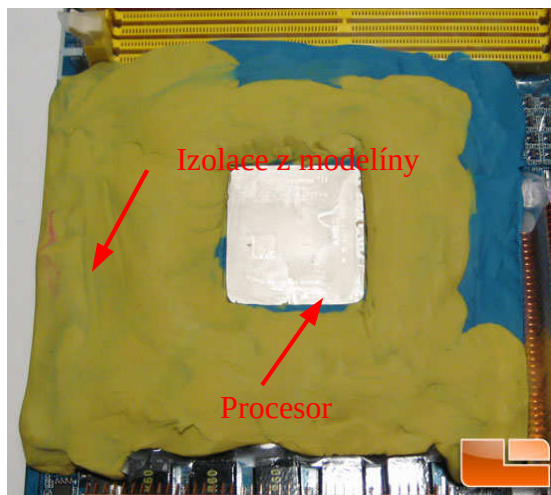
10. Chlazení kapalným dusíkem

Chlazení kapalným dusíkem je nejextrémnějším způsobem chlazení. Využívá stejně jako kompresorové nízké teploty varu kapaliny a jejího skupenského tepla varu. Z názvu plyne, že kapalinou je tekutý dusík. Dusík je využíván kvůli své relativně snadné dostupnosti a nízké teplotě varu. Je možné použít tekuté helium, avšak teplota varu helia je -269 °C na rozdíl od teploty varu kapalného dusíku -196 °C , což často vede k tzv. “cold bugu” kdy procesor přestane fungovat.

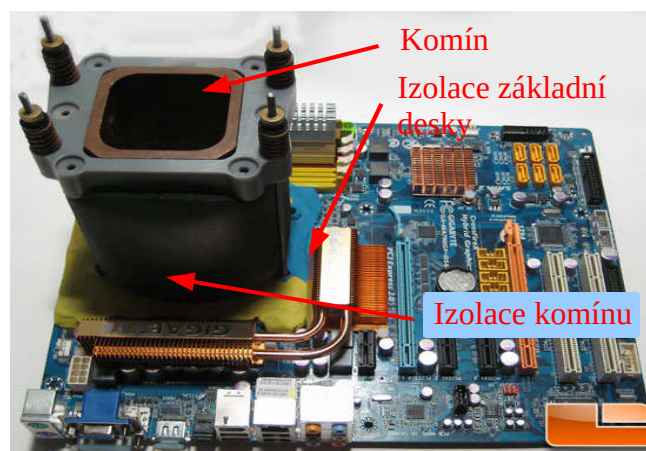
K chlazení se používá výparník slangově “komín” speciálně vyrobený pro tento způsob chlazení, často se jedná o komíny domácí výroby, ale objevují se i specializované firmy zabývající se výrobou těchto pomůcek. Je většinou vyrobený z mědi, má válcovitý tvar a uvnitř může být žebrování k zvětšení kontaktní plochy. Dno je opracované pro co nejlepší kontakt s procesorem.

Chlazení dusíkem je závislé na jeho trvalém zdroji, je totiž nutné ho kvůli vypařování doplňovat. Je také nutné dbát na množství dusíku ve výparníku, které zajistí optimální teplotu. Kapalný dusík je distribuován v tlakových lahvích.

S teplotami pod bodem mrazu se dostaví kondenzace vodních par na chladných součástech, proto je nezbytné tyto součásti tepelně izolovat, vzhledem k nízkým teplotám se doporučuje zaizolovat i okolí patice procesoru viz Obr. 55.



Obr. 55: Izolace okolí patice procesoru zaizolované obyčejnou modelínou [59]



Obr. 54: Upevněný komín na patici procesoru, připraveno k přetaktování [59]

Výhodou a důvodem používání je možnost získání maximálního možného výkonu z procesorů a grafických karet. Náklady spojené s chlazením kapalným dusíkem jsou enormně vysoké, náročnost na zkušenosti osoby provádějící přetaktování je taktéž vysoká. V mezních případech může být přetaktovaný hardware zničen ať už kondenzovanou vodou nebo nedostatečným chlazením. Tuto metodu nelze doporučit do žádné aplikace neboť komplikovanost tohoto způsobu chlazení převyšuje jeho klady.

11. Proudění vzduchu (air flow) ve skříni počítače

Každý způsob chlazení ke své správné funkci vyžaduje správný tok vzduchu ve skříni. Aby nedocházelo k přehřívání je nutné do skříně přivádět chladný vzduch z okolí a ohřátý ze skříně odvádět pryč. Průtok vzduchu musí navíc přijít do styku s heatsinky chladičů. Na Obr. 56 je zobrazen optimální průtok vzduchu skříní, kde červené šipky označují teplý a modré šipky studený vzduch.



Obr. 56: Optimální průtok vzduchu skříní [1]

Tok vzduchu je vytvořen pomocí vhodně otočených ventilátorů, které na vstupní straně vhánějí vzduch dovnitř a na výstupní ven. Vstupní strana bývá obvykle níž než výstupní protože teplý vzduch stoupá vzhůru. Pro optimální průtok vzduchu je vhodné uspořádat kabely, dále je vhodné podle rozměrů komponent vybrat k nim odpovídající rozměr PC skříně.

12. Chlazení datových center

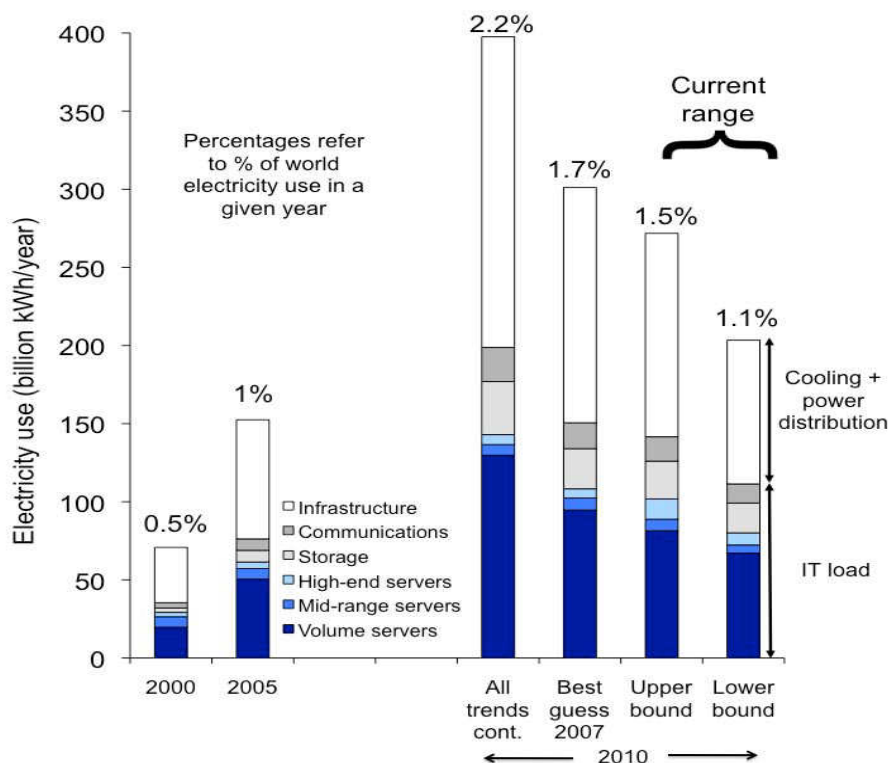
Světová síť Internet je funkční prostřednictvím datových center Obr. 57. Tato centra jsou místem, kde se fyzicky nacházejí servery, provádějící veškeré výpočetní operace. Každá činnost nebo služba jako jsou webová hledání, vzdálená úložiště dat, emailové služby, komunikační klienti, zobrazování požadovaných informací atp., požadovaná uživatelem Internetu je provedena na vzdálených serverech v datových centrech. Jsou tedy naprosto nezbytná ke správné funkci světové sítě Internet. Podle odhadu společnosti McKinsey tvořilo Internet v roce 2010 45 milionů serverů [60].



Obr. 57: Pohled na datové centrum, kde jsou servery naskládány do skříní (racků) [60]

12.1. Spotřeba elektrické energie

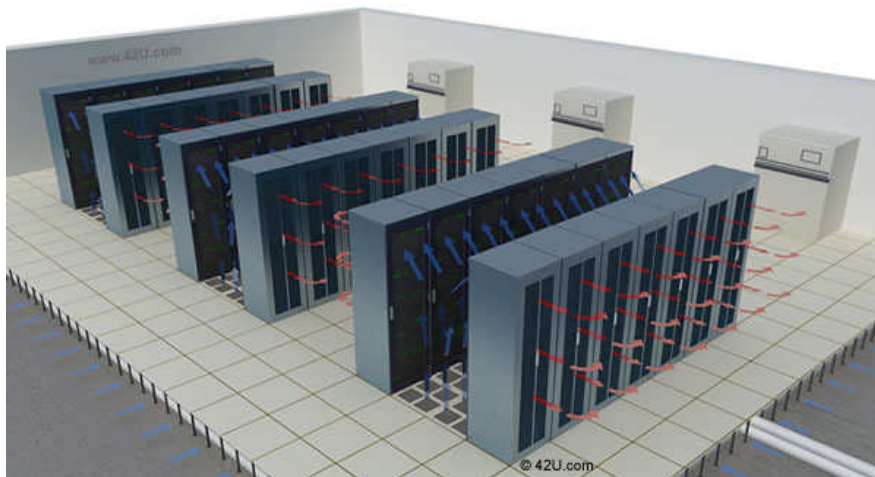
Každý jednotlivý server je nutné napájet a zároveň odebírat ztrátovou energii ve formě tepla. V případě velkých datových center se jedná o miliardy kWh elektrické energie ročně spotřebované k jejich funkci. S rostoucím počtem zařízení připojených k Internetu roste také potřeba dalších výkonnějších datových center. Celosvětová spotřeba datových center je zobrazena v grafu na Obr. 58. V grafu vidíme celkovou spotřebu datových center v letech 2000, 2005 a odhady pro rok 2010. V grafu je také uvedeno procento z celosvětové spotřeby elektrické energie připadající na provoz datových center. Pro rok 2010 jsou první dva sloupce odhady z roku 2007, kdy se očekával značný růst spotřeby, odhady z roku 2010 však ukázaly pomalejší růst (dva sloupce vpravo). Celková odhadovaná spotřeba se pro rok 2010 pohybuje v rozmezí od 200 do 270 miliard kWh. Sloupce jsou rozděleny do částí podle množství energie spotřebované k chlazení a k provozu serverů. Z tohoto rozdělení plyne, že polovina spotřebované energie datovými centry je využita k jejich chlazení. Chlazení je tedy vysoce nákladné proto jsou tendence vyvíjet nové způsoby, zefektivňovat stávající a také využívat možnosti chlazení v závislosti na geografické poloze okolním prostředím např. vzduchem, mořskou vodou, odpadní vodou, atp.



Obr. 58: Graf celosvětové spotřeby elektrické energie datovými centry [61]

12.2. Chlazení

Chlazení datových center se provádí vzduchem nebo vodou. Chlazení vzduchem je zobrazeno na Obr. 59, klíčovým řešením je uspořádání serverových racků do pásů. Mezi těmito pásy vznikají uličky, které jsou střídavě využívány k rozvodu chladného vzduchu a odvodu ohřátého vzduchu. Ohřátý vzduch je ochlazován kompresorovým chlazením a vháněn zpět, popřípadě za vyhovující teploty a vlhkosti vzduchu je možné využít k chlazení přímo venkovního vzduchu, tato metoda je nazývána „free cooling“. K vedení vzduchu je použito vedení v podlaze. [62]



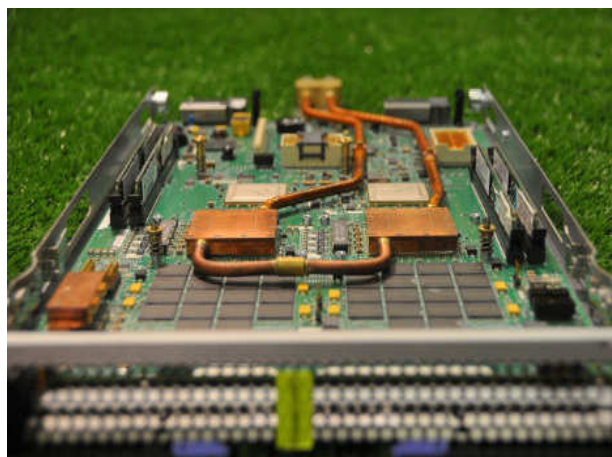
Obr. 59: Systém "Hot Aisle / Cold Aisle" studená, teplá ulička [62]

Chlazení vzduchem je méně náročné na konstrukci, nemá však velký chladicí výkon, proto je vhodné do menších, méně výkonných datových center. Svými uličkami je náročné na prostor.

Chlazení vodou je provedeno pomocí systému potrubí (Obr. 61) přivádějícího chladnou vodu k výpočetním jednotkám a odvádí ohřátou do výměníků. Nutnou součástí jsou výměníky tepla viz Obr. 60 a vodní pumpy. Ohřátá voda je dobře využitelná k transportu tepla což přispívá k jeho možnému využití.



Obr. 60: Chladicí věže datového centra Googlu [60]



Obr. 61: Vodovodní vedení s CPU bloky na základní desce serveru [63]

Chlazení vodou je efektivnější, dovoluje tak odvádět ztrátové teplo z většího počtu výpočetních jednotek na menší ploše v porovnání s chlazením vzduchovým. Jeho instalace je však nákladnější, je nutný propracovaný systém vodovodního potrubí. Při chlazení vody v okruhu také dochází k jejímu vypařování a tak se datová centra stávají velkými spotřebiteli vody.

12.3. Využití odpadního tepla datových center

Při myšlence jak zefektivnit datová centra se nabízí možnost ztrátové teplo využít a snížit tak náklady na provoz a ekologickou zátěž. Proto je již realizovaná řada projektů, které využívají rekuperované odpadní teplo z datových center. Využití odpadního tepla závisí také na místě, kde je datové centrum vystavěno, musí být totiž nablízku subjekt, který odpadní teplo může využít.

Datové centrum firmy Quebecor ve Winipegu je nainstalováno v budově sídla Winnipeg sun, kde je 60 % ztrátového tepla vedeno potrubím zajišťujícím vytápění budovy v zimě. Je tak dosaženo značné úspory energie za vytápění budovy. [64]

Úložné datové centrum firmy Academica v Helsinkách o výkonu 2 MW využívá nevyužitého protiatomového bunkru k svému provozu. Voda ohřátá provozem serverů přenáší teplo do 500

rodinných domů nebo 1000 bytů, které pomáhá v zimě vytápět. Ochlazená voda je zpětně distribuována k chlazení serverů. [65]

Tepelný výkon datových center však může být využit i jinak než k vytápění. Například datové centrum firmy GIB-Services se spoluúčastí IBM ve městě Utitikon je sice schopné vytápět 80 rodinných domů, je ovšem využito k ohřevu vody v lokálním plaveckém bazénu. Teoreticky je možné využít až 90 % elektrické energie požadované pro provoz datového centra jako tepelnou energii. Využitím odpadního tepla je ušetřeno kolem 130 tun emisí CO₂ ročně. [66]

Návrhy dalších možností jak se vypořádat se ztrátovým teplem datových center silně závisí na okolních subjektech, které mají možnost využít teplo. Toto teplo je nejčastěji využíváno k vytápění, což se dá dobře využít v případě dostupnosti sídel. To však sebou přináší i nevýhody jako je nutnost vybudovat pro danou lokalitu systém potrubí a pump, který v případě poruchy může vyřadit datové centrum z provozu a také odříznout obyvatele vytápěných obydlí od dodávek teplé vody. Další nevýhodou je také nezbytná údržba systému, či jeho případné úpravy.

Jedním ze způsobů jak se zbavit odpadního tepla je využít ho k přímé generaci elektrické energie pomocí termočlánků. Efektivita termočlánků je sice nízká, avšak s výzkumem nových materiálů se otevírá možnost využití mnohem efektivnějších termočlánků, které by již mohly účinněji převádět tepelný tok v elektrickou energii.

Tím nejlepším způsobem jak se vypořádat s odpadním teplem od výpočetních jednotek je snažit se omezit jeho generaci např. používat procesory s nižším TDP, používat dostupné přírodní zdroje k chlazení (často se datová centra budují v lokalitách s chladnějším klimatem kvůli možnosti free cooling), maximalizovat možnosti využití odpadního tepla a v neposlední řadě zajistit správný management celého datového centra.

13. Závěr

Tato práce se zabývá rozčleněním a popisem možností jak chladit PC a datová centra s nastíněním možností jak využít odpadní teplo. První část práce se zabývá přenosem tepla a kvantifikací těchto jevů, které jsou důležité pro vyjádření efektivity chladících systémů. Nejdůležitějšími způsoby přenosu tepla je vedením a konvekcí, přenos tepla zářením má zanedbatelný význam proto není v práci zahrnut. Přenos vedením je nejčastěji zaznamenán na rozhraní dvou součástí, přenos konvekcí mezi chladičem a pevnou součástí chlazení.

Další část práce se zabývá popisem nejběžnějších metod chlazení PC. V této části je rozebírána především jejich konstrukce, princip funkce a celkový tepelný odpor rozebraného systému, z toho jsou vyvozeny výhody a nevýhody konkrétního způsobu chlazení. Rešerše je vedena tak, aby bylo možné podle ní určit optimální chlazení pro určitý případ PC. Popisovány jsou také provozní vlastnosti, zdali je nutná údržba a v neposlední řadě také náklady na pořízení.

V praxi nejpoužívanějším systémem je chlazení za pomoci heatpipe. Základem jejich výkonnosti je schopnost odvést teplo na místo, kde je možné ho lépe předat do okolí. V druhé řadě jsou to jejich malé rozměry, a tvarovatelnost, což otevírá rozsáhlý prostor k jejich použití. Velkým přínosem heatpipe je zefektivnění chlazení notebooků. Poměrem cena k výkonu jsou to nejvýhodnější chladiče, navíc ty nejvýkonnější jsou opatřeny mnoha heatpipe s velkou plochou ke konvekci, což jim dovoluje odebírat ještě vyšší teplo. Maximální odebrané teplo pro chladič CPU se pohybuje nad 200 W, pro chladič grafických karet kolem 400 W. Takto vysoké hodnoty je možné použít k chlazení výkonných čipů i v přetaktovaném stavu.

V poslední části jsou popsány dvě základní metody chlazení datových center, jejich přednosti a nevýhody. Nevýhodou jim je dnes vysoká spotřeba, která dosahuje až poloviny veškeré spotřeby datových center, proto je snaha odpadní teplo dále využívat. Dnes se běžně využívá k vytápění. Potenciál k využití ztrátového tepla vidím v termoelektrických článcích, které by s přispěním nových materiálů mohly generovat elektrickou energii s vysokou efektivitou.

Seznam použité literatury

- [1] STACH, Jan. Základy PC: chlazení tichý počítač. [online]. 2006-06-19 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z : <http://pctuning.tyden.cz/navody/zaklady-stavba-pc/7167?start=2>
- [2] Intel. [online]. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.ark.intel.com
- [3] nVidia Co. [online]. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.nvidia.com
- [4] PUTRA, Nandy, YANUAR a Ferdiansyah N. ISKANDAR. Application of nanofluids to a heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2011, roč. 35, č. 7, s. 1274-1281 [cit. 2012-05-15]. ISSN 08941777. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177711000835>
- [5] FUKÁTKO, Jaroslav. *Teplo a chlazení v elektronice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 30 s. ISBN 80-860-5624-4.
- [6] DFI Lanparty nF4 Ultra-D & SLI-DR Thermal Images. [online]. 2005-05-25 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://bigbruin.com/reviews05/nf4thermals/index.php?file=1>
- [7] FUKÁTKO, Tomáš. *Teplo a chlazení v elektronice II*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 118 s. ISBN 80-7300-199-3.
- [8] TXcess Surplus Computer. [online]. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.txcesssurplus.com/servlet/the-9042/Dell-7R766-Dimension-OptiPlex/Detail>
- [9] LI, Hung-Yi, Shung-Ming CHAO a Go-Long TSAI. Thermal performance measurement of heat sinks with confined impinging jet by infrared thermography. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2005, roč. 48, 25-26, s. 5386-5394 [cit. 2012-05-15]. ISSN 00179310. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931005004497>

- [10] STEINBRECHER, Tillmann. The Heatsink Guide [online]. 2005 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.heatsink-guide.com/>
- [11] Thermal Grease Shootout [online]. 2010 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://wccftech.com/review/thermal-grease-shootout/>
- [12] JANOTKOVÁ, Eva, Milan PAVELEK a Josef ŠTĚTINA. Studijní pomůcky (opora) pro kombinovanou formu bakalářského studia. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/termomechanika/>
- [13] COOL INNOVATIONS. Flared Aluminum Pin Fin Heat Sinks. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.coolinnovations.com/includes/pdf/heatsinks/3-2020XXG.pdf>
- [14] BALANDIN, Alexander A., Suchismita GHOSH, Wenzhong BAO, Irene CALIZO, Desalegne TEWELDEBRHAN, Feng MIAO a Chun Ning LAU. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. [online]. 2008 [cit. 2012-05-15]. DOI: 10.1021/nl0731872. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl0731872>
- [15] AKASA. [online]. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.akasa.co.uk
- [16] COOLER MASTER CO., Ltd. [online]. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.coolermaster.com/>
- [17] PFISTER, Anne-Marie. World Health Organization. *Guidelines for Community Noise – Executive summary* [online]. 2000, [cit. 2012-05-15]. Dostupné z : <http://www.who.int/docstore/peh/noise/ComnoiseExec.htm>
- [18] THERMALTAKE TECHNOLOGY CO., Ltd. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.thermaltake.com/default.htm>
- [19] ZALMAN TECH CO., Ltd. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <https://www.zalman.com/eng/main.asp>

- [20] RASCOM COMPUTERDISTRIBUTION GES.M.B.H. [online]. [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.noctua.at/>
- [21] TORRES, Gabriel. Anatomy-of-Computer-Fans. [online]. 2010-06-30 [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.hardwaresecrets.com/printpage/Anatomy-of-Computer-Fans/1039>
- [22] NMB TECHNOLOGIES CO. Ball vs. Sleeve: A Comparison In Bearing
Performance. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z:
http://www.nmbtc.com/pdf/engineering/fans_ball_vs_sleeve.pdf
- [23] KRINIT SIN, Vitaly. Cooling systems. [online]. 2002-08-21 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z:
<http://ixbtlabs.com/articles2/cpucoolersinquestion/fans-inquestion-august2k2.html>
- [24] JARO THERMAL. New product introduction FDB (Fluid Dynamic Bearing).
[cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.jarothermal.com/fdb.pdf>
- [25] SUNONWEALTH ELECTRIC MACHINE INDUSTRY CO., Ltd. MagLev Motor Fan.
2004 [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.sunonusa.com/pdf/VapoBearingMaglevTechnology.pdf>
- [26] PASTUKHOV, Vladimir G. a Yury F. MAYDANIK. Low-noise cooling system for PC on
the base of loop heat pipes. Applied Thermal Engineering [online]. 2007, roč. 27, 5-6, s.
894-901 [cit. 2012-05-15]. ISSN 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.09.003.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431106003061>
- [27] KOTLÍK, Václav. Heat Pipe: princip a konstrukce. [online]. 2007-02-01 [cit. 2012-05-15].
Dostupné z:
http://www.svethardware.cz/art_doc-65D63DE45D7F238AC125726C0070D361.html
- [28] Heat Pipe Technology: Passive Heat Transfer for Greater Efficiency. THERMACORE, Inc.
[online]. [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.thermacore.com/thermal-basics/heat-pipe-technology.aspx>

- [29] Heat Pipe Selection. ENERTRON INC. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z:
<http://www.enertron-inc.com/enertron-products/heat-pipe-selection.php>

- [30] PAGE, Max. Heatpipe Wick Structures Exposed: Sintered, Groove and Mesh. [online]. 2009-11-03 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z:
<http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleID=2466>

- [31] LOU, C.K, E. HARRIS a D.J. CHOU. Proceedings / Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium [online]. 2005-03-17, s. 191-195 [cit. 2012-05-15]. ISSN 1065-2221. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1412178&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F9693%2F30598%2F01412178.pdf>

- [32] SCOTT, D. a P.E. GARNER. Heatpipes for electronic cooling application. [online]. 1996-09-01 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z:
<http://www.electronics-cooling.com/1996/09/heat-pipes-for-electronics-cooling-applications/>

- [33] GRAEBNER, John E. Heat pipe fundamentals. [online]. 2005-12-01 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.coolingzone.com/library.php?read=443>

- [34] KRINIT SIN, Vitali. Mid-End Heatpipe Cooler Shootout. [online]. 2008-01-15 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z:
<http://ixbtlabs.com/articles3/cpu/heatpipe-coolers-shootout-dec2k7-part4.html>

- [35] MSI GX623 - herní notebook za dvacítku [online]. 2009-09-04 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/notebooky-pda/14893-msi-gx623-herni-notebook-za-dvacitku?start=5>

- [36] MOON, Seok Hwan, Gunn HWANG, Ho Gyeong YUN, Tae Goo CHOY a Young II KANG. Improving thermal performance of miniature heat pipe for notebook PC cooling. Improving thermal performance of miniature heat pipe for notebook PC cooling [online]. [cit. 2012-05-15]. DOI: 10.1016/S0026-2714(01)00226-8. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026271401002268>

- [37] ADVANCED MICRO DEVICES, Inc. [online]. 2012. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.amd.com>
- [38] ARCTIC COOLING AG. [online]. 2012. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.arctic.ac>
- [39] Arctic Cooling Accelero Twin Turbo 6990 Cooler Review. [online]. 2011-10-16 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.kitguru.net/components/graphic-cards/zardon/arctic-cooling-accelero-twin-turbo-6990-cooler-review/3/>
- [40] SOULE, Christopher A. Heat Pipe Reliability in High-Power Applications. [online]. 2001-08-01 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://powerelectronics.com/mag/power_heat_pipe_reliability/
- [41] HIGHSPEEDPC, LLC. [online]. 2012. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.highspeedpc.com/Merchant2/merchant.mv?Screen=PROD&Product_Code=CMSkit&Category_Code=WatercoolingKits
- [42] JANŽURA, Jiří. Vodní chlazení - teorie a základy stavby. [online]. 2005-10-20 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdrojechladice/5501-vodni_chlazení-teorie_a_zaklady_stavby?
- [43] VÍTEK, Jan. Vodní chlazení a dnešní nabídka. [online]. 2009-04-24 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.svethardware.cz/art_doc-0CA38BBDD7D85D9EC125759C007D51DE.html
- [44] HIGGINS, Shane. Swiftech Apogee GTZ Core i7 Waterblock Review. [online]. 2009-09-13 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.legitreviews.com/article/1067/2/>
- [45] NEKVAPIL, Vojtěch a Jan SKÁCEL. Moderní vodní chlazení a co byste o něm měli vědět. [online]. 2007-12-20 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-snizeni-hluku/9911-moderni_vodni_chlazení_a_co_byste_o_nem_meli_vedet?

- [46] DANGER DEN. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.dangerden.com/>
- [47] KOOLANCE, Inc. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.koolance.com
- [48] EHEIM GMBH & CO. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: www.eheim.cz
- [49] KRASNOV, Yuriy K. a Vladimir LYGIN. Results of Comparison Testing of Leader Water Blocks for Convective Cooling of Modern Processors. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.thequalitycs.com/pdf/QC_tests_report_2.pdf
- [50] SWIFTECH. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.swiftech.com/MCRX20-QP-RADIATOR-SERIES.aspx>
- [51] REDAKCE HW SERVERU. Peltierovy termobaterie. [online]. 1999-12-16 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>
- [52] CUI, Inc. CP60 Series description. 2012-05-08. Dostupné z: <http://products.cui.com/Product/Resource/3129/CP60.pdf>
- [53] BARKER, Dean. Thermaltake SubZero4G TEC for AMD. [online]. 2003-09-04 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: http://www.overclockercafe.com/Reviews/cooling/Tt_SubZero4G_AMD/1010.html
- [54] KIRSCH, Nathan. The CoolIT Eliminator CPU Cooler Review. [online]. 2007-03-13 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.legitreviews.com/article/473/1/>
- [55] Understanding Thermoelectric Cooling. ACTIVE COOL LTD. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.activecool.com/technotes/thermoelectric.html>
- [56] BROWN, Andy. Asetek's Vapochill CPU cooling system. [online]. 2003-03-17 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://techreport.com/articles.x/4875>

- [57] THERMALTAKE TECHNOLOGY CO., Ltd. [online]. 2008 [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.xpressar.com>
- [58] PEEPLES, John W. Vapor Compression Cooling for High Performance Applications. [online]. 2001-08-01 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z:
<http://www.electronics-cooling.com/2001/08/vapor-compression-cooling-for-high-performance-applications/>
- [59] MORRELL, Chris. Liquid Nitrogen and Dry Ice CPU Cooling Insulation Guide. [online]. 2009-03-15 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.legitreviews.com/article/924/2/>
- [60] KUČERA, Roman. Datacentra 1/2: kde je uložený Internet?. [online]. 2010-12-17 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cnews.cz/datacentra-12-kde-je-ulozeny-internet>
- [61] KOOMEY, Johnatan G. Growth in Data Center Electricity Use 2005 to 2010. [online]. 2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.analyticspress.com/datacenters.html>
- [62] 42U. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.42u.com/42u-rack-cooling.htm>
- [63] DUBASH, Manek. Water-cooled IBM supercomputer to heat buildings. [online]. 2009 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.zdnet.co.uk/news/servers/2009/06/24/water-cooled-ibm-supercomputer-to-heat-buildings-39666687/>
- [64] MILLER, Rich. Data Centers That Recycle Waste Heat. [online]. 2010 [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.datacenterknowledge.com/data-centers-that-recycle-waste-heat/>
- [65] VELA, Justin. Helsinki data centre to heat homes. [online]. 2010 [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.guardian.co.uk/environment/2010/jul/20/helsinki-data-centre-heat-homes>
- [66] MILLER, Rich. Data Center Used to Heat Swimming Pool. [online]. 2008 [cit. 2012-05-15].
Dostupné z: <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2008/04/02/data-center-used-to-heat-swimming-pool/>

Seznam použitých zkratk

CPU – central processing unit

TDP – thermal design power

Příloha

Disk CD-ROM s elektronickou verzí této práce.