

Výpočty s teplem při dimenzování chlazení počítačů

František Ryšánek [rysanek AT fccps DOT cz]

Úvodem základní úvaha „selským rozumem“: kolik elektřiny přivedu (příkon), tolik tepla musím odvést (výkon). A pokud mi záleží na životnosti součástek uvnitř, musím se v tomto daném rámci snažit, aby uvnitř zařízení nevznikaly velké teplotní gradienty = aby konkrétní součástky zbytečně teplotně „nevyčnívaly“ = aby zdroje tepla měly vůči okolí minimální tepelný odpor.

Zejména u fanless sestav (pasivních) je třeba mít se na pozoru. Označení „fanless“ má sklon ukolébat integrátora k bezstarostnosti – na místě je ovšem naopak zvýšená opatrnost. Pokud pomíneme zásadní problém s tím, že v typickém fanless počítači mají všechny součástky uvnitř stejnou nebo vyšší teplotu než žebrovaná skříňka, tepelně navázaná na procesor a další topné součástky, zůstává přinejmenším otázka, jaký je vztah mezi topným výkonem (= spotřebou počítače) a ustáleným rozdílem teplot mezi chladičem a okolím. V tomto bodě se strojař pousměje či ušklíbne, člověk s elektro vzděláním se zamyslí a poškrábe na hlavě, samorostlý ajťák vytřeští oči.

V zásadě je třeba řešit přinejmenším dva problémy: 1) přestup tepla do okolí a 2) kapacitu „chladičoho média“ (např. okolního vzduchu) pro jímání a odvod tepla.

1) Přestup a prostup tepla

Základní vzorec pro přestup tepla počítá s energií a časem:

$$Q = \alpha S t (T_1 - T_2)$$

Lze ho ovšem snadno přepsat tak, aby pracoval s výkonem (energií za jednotkový čas):

$$P = \frac{Q}{t} = \alpha S \Delta T$$

Ze vzorce lze také vytknout potřebnou teplosměnnou plochu, pokud známe příkon = vyzářený tepelný výkon a požadovaný rozdíl oproti teplotě okolí:

$$S = \frac{P}{\alpha \Delta T}$$

Dosud jsme se bavili o jednom přechodu, například pevná látka / plyn (např. kovový chladič / vzduch). Pokud se bavíme o skříňce či krabici a její schopnosti odvádět teplo do okolí prostým „prostupem skrz stěnu“, myšleno „z vnitřního vzduchu na vnější vzduch“, je třeba počítat se dvěma přestupy tepla v sérii. Tj. při shodném koeficientu přestupu tepla bude potřeba dvojnásobná plocha, nebo poloviční výkon, nebo dvojnásobný teplotní spád.

$$S = 2 \cdot \frac{P}{\alpha \Delta T}$$

U kovové desky/plechu se dá zanedbat tepelný spád uvnitř samotné stěny, protože tepelná vodivost kovů je relativně vysoká a stěna relativně tenká. U jiných materiálů (hodně tlusté sklo, plast) může být zapotřebí přičíst do vzorce (pokud si osamostatníme delta T na levou stranu) ještě taky tepelný spád v materiálu stěny – do vzorce nám tedy vstupuje tloušťka stěny (plochu už máme) a měrná tepelná vodivost či odpor materiálu..

$$\Delta T = 2 \cdot \frac{P}{\alpha S} + \frac{P \cdot d}{\lambda S} = \frac{P}{S} \cdot \left(\frac{2}{\alpha} + \frac{d}{\lambda} \right)$$

$$S = \frac{P}{\Delta T} \cdot \left(\frac{2}{\alpha} + \frac{d}{\lambda} \right) \quad \dots \text{kde } d = \text{tloušťka stěny v metrech a } \lambda = \text{tepelná vodivost materiálu.}$$

A jaký že tedy vlastně je, tento **koeficient přestupu**, v našem vzorci písmenko **Alfa**?

Nebo také někdy užívaný **celkový koeficient prostupu** stěnou, $k = \frac{1}{\frac{2}{\alpha} + \frac{d}{\lambda}}$?

Obecně se jedná o poměrně nejistou veličinu, kterou v konkrétním praktickém případě výrazně ovlivňují další okolnosti – především proudění vzduchu či vody na jedné straně teplosměnného přechodu, nebo uspořádání předmětů v okolí, které naopak zabraňují volné samotížné cirkulaci média (nejen vody, ale i vzduchu). Například skříňka postavená na stůl a přiražená ke zdi bude mít o dost horší schopnost odvádět teplo volným prouděním, než tatáž skříňka visící volně v prostoru. Také může mít vliv, v jaké výšce uvnitř skříňky bude umístěn zdroj tepla...

Nejedná se o odchylky o pár procent, ale klidně o řád (v případě nuceného proudění nebo narušené samotížné cirkulace). Snad i proto se těžko hledají nějaké tabulky či typické hodnoty teplosměnných koeficientů. Učebnice zabývající se tímto problémem typicky zabředají hluboko do detailní analýzy problému, srší integrály a maticemi a dalšími dílčími materiálovými koeficienty, případně zdůrazní nezbytnost konkrétní situace/uspořádání empiricky změřit - ale najít konkrétní číslo či tabulku je úkol takřka nadlidský.

Dají se nalézt řekněme tyto hodnoty:

Přestup pevná látka / vzduch = 5 – 35 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ s přirozeným prouděním

Přestup pevná látka / vzduch = 10 – 140 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ s nuceným prouděním

Prostup, obyčejné okenní sklo a uvnitř i venku vzduch s přirozeným prouděním = 1 – 2 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

Prostup, vzduch s přirozeným prouděním – plech – voda s nuceným prouděním

(typický radiátor) = 5 – 15 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

2) Tepelná kapacita chladicího média a jeho oběh

Pod pojmem „chladicí médium“ si každý představí nejspíš vodu, fridex, freony nebo izobutan v chladničkách. Ovšem pozor: v počítačové branži je zdaleka nejběžnějším chladicím médiem **vzduch!**

Leckdo si patrně ze základní školy pamatuje měrnou tepelnou kapacitu vody: $C = 4.2 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

Vodní pára a led mají jenom lehce přes 2 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$.

Patrně mnohem méně známá je **tepelná kapacita vzduchu: cca $1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$** .

Voda váží kilo na litr, ale vzduch jsme zvyklí počítat spíš v kubických metrech – jeden kubík vzduchu váží v našich nadmořských výškách okolo 1.3 kg.

Vzduch je tedy schopen odvádět **cca $1.3 \frac{kJ}{m^3 \cdot K}$** tepla. Říkejme této kapacitě třeba C_v (objemová).

Pokud jednotku dále upravíme pro ustálený výkon (příkon) a tok vzduchu v kubících za vteřinu, vyjde nám

$$P = \frac{Q}{t} \Rightarrow 1.3 \cdot \frac{kJ}{m^3 \cdot K} = 1.3 \cdot \frac{kW}{\frac{m^3}{s} \cdot K} = 1.3 \cdot \frac{W}{\frac{l}{s} \cdot K}$$

Nebo-li, praktické výpočtové vzorce s veličinami budou opět vycházet z klasického

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T$$

„Objemovou“ měrnou tepelnou kapacitu si označíme C_v a namísto hmotnosti (m) použijeme $V =$ objem.

$$Q = C_v \cdot V \cdot \Delta T$$

Dále dosadíme $P = \frac{Q}{t}$; $V_t = \frac{V}{t}$ (veličina čas na obou stranách rovnice se vykrátí).

Výsledný „tokový“ vzoreček lze samozřejmě obrátit několikrát naruby a použít různými způsoby:

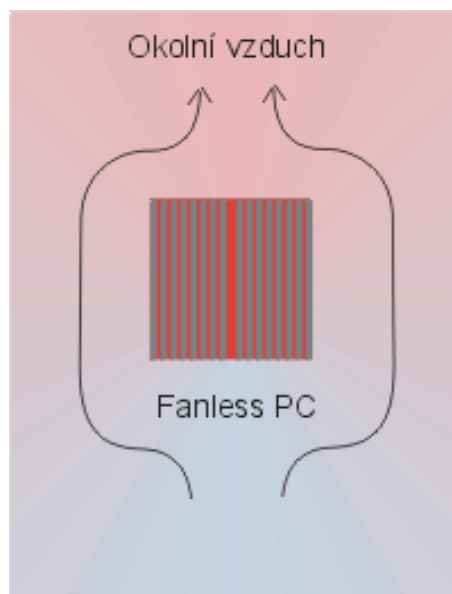
$$P = C_v \cdot V_t \cdot \Delta T \Rightarrow V_t = \frac{P}{C_v \cdot \Delta T} ; \Delta T = \frac{P}{C_v \cdot V_t}$$

Pokud tedy máte počítač, monitor a jiné vybavení, všechno zabudováno v nějaké skříní, a máte změřený celkový ustálený odběr (příkon ve Watech), můžete si po zadání požadovaného oteplení vydechovaného vzduchu spočítat potřebný průtok vzduchu skříní v kubících za vteřinu, případně můžete zadat příkon zařízení (= topný výkon) a výkon předpokládaného ventilátoru a vyjde Vám oteplení vydechovaného vzduchu za těchto podmínek.

Základní tvar vzorce Vám po zadání průtoku a oteplení vzduchu vypočte maximální výkon, který lze za těchto podmínek „uchladit“.

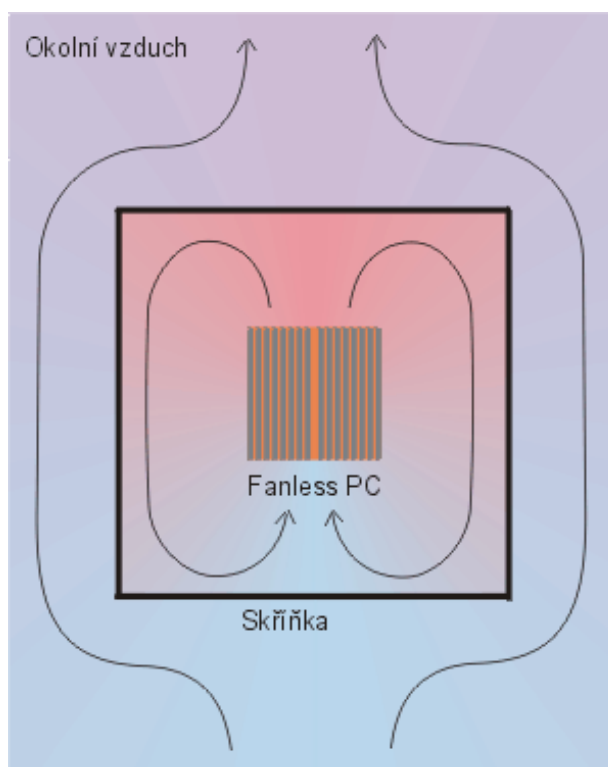
Přestup/prostup tepla a oběh média dohromady

Všimněte si, že rozdíl teplot v kap.1 (přestup a prostup) není tentýž rozdíl teplot, jako v kapitole 2 (o kolik se ohřeje vzduch průchodem skrz chlazený systém). Výstupní vzduch v kapitole 2 je zjevně pořád „venkovní“ vzduch ve smyslu kapitoly 1 (pokud se bavíme o počítačích, které mají vnitřní prostor šasi nevětraný). Prakticky by se oba tyto teplotní rozdíly měly patrně sčítat, nebo přinejmenším nějak netriviálně agregovat. Přesné zjištění by znamenalo zkoumat/počítat trojrozměrný model metodou konečných prvků, nebo měřit v laborce (s trochou štěstí budou podmínky v reálném nasazení podobné).



Krabička v krabičce

Pozor ještě na jednu možnost: „bezvětrákový“ počítač zavřeme do nějaké krabice či skříňky – kvůli bezpečnosti, krytí proti prachu/vodě/povětrnosti apod. Pak je ovšem třeba si uvědomit, že pokud je skříňka hermeticky uzavřená, bude mít svůj vlastní teplotní spád, tj. pokud bude uvnitř topit počítač, bude uvnitř tepleji než venku, a výslednou ustálenou teplotu uvnitř skříňky bude ovlivňovat prostup tepla skrz stěny skříňky.



Jak mi nedávno řekl jeden strojař s dlouholetou praxí v relevantním oboru: ventilátor je jistota.

Životnost elektrolytických kondenzátorů

Asi nejdoulostivější součástí ve fanless počítačích jsou elektrolytické kondenzátory. Jejich životnost je do značné míry předem známa a je závislá na dvou ovlivnitelných faktorech: na provozní teplotě a na zátěži (především ripple current = střídavá složka proudu). Zátěž proudem způsobuje tepelnou ztrátu uvnitř kondenzátoru a tedy jeho další ohřívání. Potažmo se v datasheetech kondenzátorů občas objevuje „operating temperature derating by ripple current“.

Závislost životnosti (L) na teplotě je cca následující: každých 10°C nahoru znamená zkrácení životnosti na polovinu. Nebo naopak, každých 10°C dolů prodlouží životnost na dvojnásobek. Pro kondenzátor specifikovaný pro provozní teplotu 105°C tedy platí následující vzorec:

$$L = L_{105} * 2^{\frac{105^{\circ}\text{C} - T}{10}}$$

Závislost životnosti na protékajícím proudu je méně triviální. Jak již výše zmíněno, snížení životnosti souvisí s „přihříváním“ vlastní ztrátou kondenzátoru. Konkrétně ztrátový=tepelný výkon P roste se čtvercem proudu a přímo úměrně závisí na „ekvivalentním sériovém odporu“ (ESR) – protože

$$P_T = R_{ESR} \cdot I_{RIPPLE}^2$$

Konkrétní představu dále komplikuje přepočítání na „míru dodatečného ohřátí“, tzn. ekvivalentní rozdíl teplot, protože tento výsledný rozdíl teplot závisí vedle ztrátového výkonu také na tepelném odporu pouzdra kondenzátoru [$^{\circ}\text{K}/\text{W}$], což je proměnná obvykle neznámá:

$$\Delta T = P_T \cdot R_T$$

A navíc „stárnutí“ kondenzátoru se projevuje pozvolným nárůstem ESR (až v určitém bodě ESR

„vystřelí k nebesům“ a kondík z obvodu úplně „zmizí“).

Obecně udávaná hodnota povoleného střídavého proudu (ripple current) znamená nějakou hranici, za kterou „přestává legrace“, životnost se začíná zkracovat nadměrně, ohřátí překračuje rozumné meze a hrozí rychlá destrukce kondenzátoru. Pokud si u konkrétního modelu kondíku spočítáte ESR krát I_r^2 , vyjde Vám obvykle povolený ztrátový výkon řádově 250 mW (třeba 10 mΩ, 5A = moderní solid-polymer elyt ve VRM). Rozdíl teplot osobně odhaduji do 10°C – záleží také na proudění vzduchu, ploše mědi apod. Hrubým odhadem tedy snížení proudu na polovinu bude znamenat pokles ztrátového výkonu kondíku (a potažmo „endogenního ohřátí“ = tepelného rozdílu) na čtvrtinu, tj. řekněme z 10°C na zanedbatelnou hodnotu.

Pokud byste uvažovali o snížení teploty omezením softwarové zátěže CPU, je třeba si uvědomit, že v reálném počítači snížení spotřeby CPU především povede ke snížení teploty samotného CPU, takže výsledný dopad na životnost kondíků ve VRM bude výrazně větší, než by vysvětlovalo omezení střídavé zátěže kondíků (nejedná se o změnu „za jinak stejných okolností“).

Osobně však doporučuji dimenzovat a testovat chlazení vždy na maximální zátěž CPU – jedině tak bude počítač trochu odolný vůči kruté realitě v ostrém nasazení.

Uvažujme kondenzátor, který má projektovanou životnost 2000 provozních hodin při povrchové teplotě 105°C a při nějakém jmenovitém proudu (ripple current). Jmenovitý proud kondenzátoru by měl v reálných konstrukcích přinejhorším odpovídat maximálnímu odběru krmených součástek (tzn. např. maximální procesorové zátěži) – a je bohužel rozumné se domnívat, že výrobci motherboardů proudovou rezervu nenechávají. Pokud chceme dosáhnout provozní životnosti 100 000 hodin, potřebujeme dosáhnout zlepšení 50x. Dvojkový logaritmus je cca 5,6, tzn. potřebujeme dostat kondíky na provozní teplotu $105 - 56 = \text{cca } 50^\circ\text{C}$ (plus případně vylepšení plynoucí ze snížení zátěže kondíku).

Prakticky tedy možná vůbec není od věci starodávný subjektivní „cit“ každého bastlíře, že „pokud na tom udržím ruku a nesmrdí to, tak je to asi zdravé“.

Vadný kondenzátor, na rozdíl třeba od vadného ventilátoru, se poměrně nnesnadno diagnostikuje a vyměňuje...

Životnost keramických kondenzátorů

Mezi mírně zasvěcenou veřejností panuje představa, že keramické kondenzátory jsou prakticky nesmrtelné. Že pokud nějaké zařízení obsahuje pouze keramiku, je přirozeně spolehlivější, než podobná konstrukce, obsahující elektrolytické kondenzátory (ať už vodnaté, nebo polymerové).

Realita je složitější.

Konstrukce založené výhradně na keramických kondenzátorech obvykle uchylují k vyšším spínacím frekvencím, což zvyšuje ztráty ve spínačích, usměrňovačích a indukčnostech. Důsledkem je nižší účinnost / větší tepelná ztráta.

Představa o nesmrtelnosti keramických kondenzátorů se traduje patrně z dob, kdy keramika o mizivé kapacitě plnila roli pomocných blokovacích kondenzátorů, které pouze „sekundovaly“ hlavním filtračním elytům (keramika „sbírala poslední zbytky“). V momentě, kdy moderní vysoko-kapacitní keramika zastává roli hlavní akumulací/filtrační kapacity, musí přirozeně snášet celou hodnotu střídavé složky proudu (ripple current), který filtruje. A keramické kondenzátory, přes svou nesporně vynikající impedanci (relativně nízké hodnoty ESL/ESR a vysoké rezonanční frekvence) mají nějakou poměrně konečnou hodnotu dovolené střídavé zatížitelnosti. A výrobci motherboardů opět mají sklon zapomínat na rezervy.

Kromě toho moderní skládaná MLCC keramika (tloušťka dielektrické vrstvy pod 2 μm) trpí vedle externího mechanického namáhání také napětím a teplotou. Zatímco mechanické namáhání může způsobit praskání elektrod, teplo a napětí vedou časem k průrazu dielektrika. Existuje rámcový empiricky odvozený vzorec, s několika nepříliš jasnými koeficienty a exponenty, vyjadřující závislost životnosti na provozním napětí a teplotě:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n \exp \frac{E_a}{K_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Nebudeme ho zde podrobněji rozebírat, níže v literatuře je odkaz na XLS tabulku, která obsahuje živý vzorec doplněný vysvětlivkami a odkazy na zdroje. Na tomto místě snad stačí shrnout, že ani při dosazení optimistických hodnot neurčitých koeficientů nevyznívá vzorec vůbec optimisticky. Navíc čím modernější MLCC keramika, tím vyšší kapacita na jednotku objemu, tím tenčí dielektrikum, a tím pesimističtější koeficienty je třeba uvažovat – bez ohledu na pokrok ve vývoji používaných keramických materiálů (jde tradičně o velikost zrna – čím jemnější zrno, tím tenčí vrstva stačí). Obvyklým přístupem při návrhu obvodů je, provozovat keramiku na polovině jmenovitého napětí. I v tom případě je ale snesitelná provozní teplota výrazným přínosem.

Literatura

Praktické hodnoty koeficientů zmíněné výše v textu byly spatřeny na těchto webech:

http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99estup_tepla

http://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficient-d_434.html

Hezké obrázky prostorového víření média při volném proudění lze nalézt tady:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Convection>

Životnost kondenzátorů:

http://www.chemi-con.com/u7002/life_ms.php (elyty)

http://support.fccps.cz/download/adv/fr/MLCC_ageing.xls (keramika)