

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Chlazení polovodičových součástek  
Cooling semiconductor parts**

Rok: 2008/2009

Radomír Janošek

## Zadání bakalářské práce

Student: **Radomír Janošek**

Studijní program: B2645 Elektrotechnika, sdělovací a výpočetní technika

Studijní obor: 2612R018 Elektronika a sdělovací technika

Téma: **Chlazení polovodičových součástek**  
**Cooling semiconductor parts**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte postup návrhu systémů chlazení polovodičových součástek v elektronických zařízeních. V práci se zaměřte na:

1. Popis způsobů přenosu tepla, tepelné vlastnosti a parametry součástek, určení ztrátového výkonu součástek.
2. Způsoby chlazení.
3. Měření tepelných vlastností součástek a chladících systémů.

Seznam doporučené odborné literatury:

FUKÁTKO, J., FUKÁTKO, T., ŠINDELKA, J. *Teplo a chlazení v elektronice*. Praha : BEN, 1997. 30 s. ISBN 80-86056-24-4.

AKSENOV, A., GLUŠKOVÁ, D., IVANOV, V. *Chlazení polovodičových součástek*. Praha : SNTL, 1975. 156 s. Polovodičová technika; sv. 23. ISBN 04-521-75.

Vlastní literární rešerše k řešené problematice.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Tesař**

Datum zadání: 30.11.2008

Datum odevzdání: 07.05.2009

---

prof. Ing. Zdeněk Diviš, CSc.  
vedoucí katedry

---

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
děkan fakulty

### Prohlášení Studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou/diplomovou práci užít (§35 ods. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské/diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a údaje o bakalářské /diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 6.5.2009

Podpis studenta

## Seznam použitých symbolů a zkratk:

$m$	hmotnost systému
$\alpha$	součinitel přestupu tepla při proudění vzduchu pravoúhlým kanálem
$b$	šířka kanálu
$C$	tepelná kapacita
$c$	součinitel sálavosti
$\chi$	vyzařovací konstanta absolutně černého tělesa
$C_m$	měrná tepelná kapacita
$C_p$	měrné teplo při stálém tlaku
$C_p$	měrné teplo
$C_{\tau c}$	tepelná kapacita pouzdra
$C_{\tau s}$	tepelná kapacita chladiče
$d$	tloušťky
$d$	síla stěny
$D$	vnější průměr trubky, kterou protéká chladicí médium
$De$	ekvivalentní průměr pravoúhlého chladicího kanálu
$\Delta\vartheta$	teplotní rozdíl
$\Delta t$	časový interval
$\Phi$	tepelný tok
$g$	tíhové zrychlení
$H$	výška kanálů
$\eta$	viskozita
$h_v$	měrná entalpie odpařování
$I_B$	proud báze
$I_C$	proud kolektoru
$I_{cm}$	maximální (špičkový) proud
$I_F$	trvalý proud protékající diodou
$I_{imp}$	proud pulsu
$I_T$	trvalý proud protékající součástkou
$I_t$	tepelný tok
$\vartheta_1$	teplota vstupujícího vzduchu
$\vartheta_2$	teplota vystupujícího vzduchu
$\vartheta_{2Ch}$	teplota chladiče
$\vartheta_a$	teplota okolí
$\vartheta_c$	teplota pouzdra
$\vartheta_j$	teplota přechodu PN
$K$	součinitel přestupu tepla
$\Lambda$	měrná tepelná vodivost

$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti
$L$	délka kanálů
$n$	počet kanálů, kterými proudí chladící vzduch
$P_{imp}$	výkon pulsu
$P_S$	střední výkon
$P_{tot}$	ztrátový výkon pouzdra
$P_Z$	ztrátový výkon
$Q$	množství tepla
$\Theta_1$	absolutní teplota okolí
$\Theta_2$	absolutní teplota tělesa teplo vysílající
$Q_h$	teplo vyzařované
$Q_v$	množství vzduchu
$\rho$	hustota vzduchu
$R_B$	referenční odpor
$R_{\theta cs}$	tepelný odpor styku s chladičem
$R_{\theta ja}$	tepelný odpor přechod - okolní prostředí
$R_{\theta jc}$	tepelný odpor vnitřní (přechod pouzdro)
$R_{\theta sa}$	tepelný odpor chladiče
$R_t$	tepelný odpor
$\rho_t = \lambda^{-1}$	měrný tepelný odpor
$S$	plocha
$\tau$	tepelná konstanta
$t$	šířka pravoúhlého pulsu
$T_0$	perioda
$T_c$	teplota studené strany
$T_h$	teplota teplé strany
$\tau_{je}$	tepelná konstanta přechod – pouzdro
$U_{2m}$	napájecí (špičkové) napětí
$U_{BE}$	úbytek napětí báze - emitor
$U_{CE}$	úbytek napětí kolektor - emitor
$U_F$	úbytek napětí na diodě
$U_T$	úbytek napětí na součástce
$v$	rychlost proudícího vzduchu
$\zeta$	úhel, který svírá nakloněná chladící deska s vodorovnou rovinou
$\Delta T$	rozdíl počáteční teploty $T_1$ a koncové teploty $T_2$

**Abstrakt:**

Tato práce se zabývá popisem používaných druhů chlazení. A nejenom to popisuje tepelné vlastnosti a parametry součástek a také měření těchto parametrů. Uvádí návrhy přirozeného chlazení vzduchem, které je nejjednodušší, spolehlivé a levné chlazení polovodičové součástky.

**Klíčová slova:**

Teplo, chlazení, přenos tepla, tepelné parametry součástek, ztrátový výkon,

**Abstract:**

This thesis deals with the description of different kinds of cooling. Apart from this, the thesis also describes the properties and parameters of components and the measurements of these parameters. Self-cooling by the air has also been suggested as it is cheap, reliable and the easiest cooling of semiconductor device.

**Key words:**

Heat, cooling, heat transfer, thermal parameters of components, dissipated power

## **Obsah:**

1.	Úvod.....	8
2.	Základní pojmy.....	8
3.	Základní způsoby přenosu tepla.....	10
3.1.	Vedením.....	11
3.2.	Prouděním.....	11
3.3.	Zářením.....	12
4.	Tepelné vlastnosti a parametry součástí.....	13
4.1.	Teplota přechodu.....	14
4.2.	Tepelný odpor.....	15
4.3.	Tepelné konstanty.....	18
4.4.	Tepelná kapacita.....	18
5.	Určení ztrátového výkonu.....	19
6.	Způsoby chlazení.....	21
6.1.	Přirozené chlazení vzduchem.....	22
6.2.	Nucené chlazení proudícím vzduchem.....	23
6.3.	Chlazení pomocí kapalinového media.....	25
6.4.	Využití změny skupenství pro chladící účely.....	27
6.5.	Chlazení pomocí tepelných trubic.....	29
6.6.	Chlazení pomocí zkapalněných plynů.....	31
6.7.	Chlazení pomocí Peltierova jevu.....	32
7.	Měření tepelných parametrů.....	35
8.	Závěr.....	37
	Literatura.....	38
	Přílohy	
P.1.	Návrh chlazení pro diodový usměrňovač.....	39
P.2.	Návrh chlazení pro zesilovač třídy A.....	40
P.3.	Návrh chlazení pro zesilovač třídy B.....	41
P.4.	Měření navržených chlazení.....	42
P.5.	Tabulky hodnot pro různé materiály.....	45

## 1. Úvod

Při každém reálném přenosu a transformaci energie dochází ke ztrátám, část energie se mění na energii tepelnou. Výjimkou nejsou ani elektronické součástky. Vznikem tepla stoupá teplota, se změnou teploty se mění parametry součástky a při překročení určité meze dojde k nevratným změnám. Vlastní teplota má vliv na celou řadu faktorů (např. na životnost a degradaci materiálů), které ovlivňují spolehlivost funkce součástek a také celkovou spolehlivost elektronického systému. Správná činnost polovodičových prvků je zaručena jen tehdy, když není překročena maximální teplota přechodu. Dodržení tepelných režimů má tedy v elektronických výrobcích zásadní význam. Je proto třeba zabývat se odvodem tepla z polovodičových součástek.

V práci nejprve uvedu základní fyzikální pojmy související s touto tematikou. V následující kapitole popíšu základní způsoby přenosu tepla. Další kapitola se věnuje vlastnostem a parametrům součástek. Následně uvedu vztahy pro výpočet ztrátového výkonu, který je jeden z rozhodujících faktorů pro návrh chlazení. Šestá kapitola popisuje jednotlivé způsoby chlazení. A následující kapitola se zabývá měřením tepelných parametrů. V přílohách se nachází ukázkové návrhy chlazení, které jsou následně prakticky ověřeny a proměřeny.

## 2. Základní pojmy

### ***Teplota***

Teplota je základní veličinou pro určení vnitřní pohybové energie látky. Teplota je dána pohybovou energií molekul, čím rychleji molekuly kmitají, tím je teplota větší. Měří se ve stupních Kelvina [K] nebo ve stupních Celsia [°C]. Stupeň Celsiovy stupnice je shodný se stupněm Kelvinovy stupnice. Rozdíl je však v počátku měrné soustavy. Celsiova stupnice bere za nulovou hodnotu teplotu rovnovážného stavu směsi voda-led (při normálním atmosférickém tlaku). Vývojově mladší Kelvinova stupnice počíná stavem absolutního klidu částic v látce.

$$0 \text{ [}^\circ\text{C]} = 273,15 \text{ [K]}$$



Při styku teplejší a studenější látky předávají rychlejší molekuly část své pohybové energie molekulám pomalejším. Tento přenos (vnitřní) energie mezi dvěma soustavami, jejichž teploty jsou odlišné, je charakterizován veličinou, které říkáme teplo.

### **Teplo (Tepelná energie)**

Teplem  $Q_0$  [J] je rozuměna tepelná energie, kterou obsahuje těleso o hmotnosti  $m$  [kg] a teplotě  $t$  [°C] od počátku soustavy. Při teplotě  $t > 0^\circ\text{C}$  je tepelná kapacita kladná, při teplotě  $t < 0^\circ\text{C}$  je kapacita záporná. Pro teplotu  $t = 0^\circ\text{C}$  je  $Q_0 = 0$ . Z toho vyplývá, že v Celsiově stupnici může být tepelná kapacita kladná i záporná. V Kelvinově stupnici pak pouze kladná. Množství tepla  $Q$  přijatého fyzikálně (skupenství) a chemicky homogenním systémem souvisí se vzrůstem teploty  $\Delta T$  vztahem:

$$Q = m \cdot c_m \cdot \Delta T \quad (1)$$

kde  $m$  je hmotnost systému  
 $c_m$  je jeho měrná tepelná kapacita  
 $\Delta T$  je rozdíl počáteční teploty  $T_1$  a koncové teploty  $T_2$  (tzn.  $\Delta T = T_2 - T_1$ ).

### **Tepelná kapacita**

Tepelná kapacita je fyzikální veličina, která vyjadřuje množství tepla, kterým se těleso ohřeje o 1 kelvin. Tepelná kapacita je určena jako podíl dodaného (nebo odebraného) tepla a teplotní změny.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2)$$

kde  $Q$  je teplo, které bylo tělesu dodáno (nebo odebráno)  
 $\Delta T$  je rozdíl teplot mezi počátečním a konečným stavem, kdy bylo teplo dodáváno (odebíráno).

Měrná tepelná kapacita je tepelná kapacita jednoho kilogramu látky. Tepelnou kapacitu tělesa o hmotnosti  $m$  lze tedy vyjádřit ve tvaru:

$$C = m \cdot c_m \quad (3)$$

kde  $m$  je hmotnost tělesa  
 $c_m$  je měrná tepelná kapacita viz. Příloha P.4

### ***Tepelný tok***

Tepelný tok, značka  $\Phi$ [W], vyjadřuje rychlost průchodu tepla danou plochou nebo také výkon přenášený při průchodu tepla danou plochou:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}, \quad (4)$$

Kde dQ je teplo, které projde danou plochou za jednotku času dt.

### ***Měrná tepelná vodivost***

Měrná tepelná vodivost  $\Lambda$  [W/m.K] je mírou schopnosti dané látky vést teplo, tj. přenášet kinetickou energii neuspořádaného pohybu mezi molekulami bez proudění látky. Je funkcí teploty a materiálu prostředí, nezávisí na gradientu teploty. Tepelná vodivost ukazuje, jak látka vede teplo, tzn. jak snadno se v ní vyrovnávají teplotní rozdíly.

## **3. Základní způsoby přenosu tepla**

Teplo se přenáší z jednoho bodu prostoru do druhého vlivem rozdílu jejich teplot a to z místa vyšší teploty do místa s nižší teplotou

Přenos (odvod, přestup, sdílení) tepla je zásadně možný těmito způsoby :

- **Vedením** (kondukcí) vzájemné předávání kinetické energie sousedících molekul (hmotné prostředí)
- **Prouděním** (konvekci) dochází k přemístování zahřáté hmoty (hmotné prostředí)
- **Zářením** (radiací, sáláním) elektromagnetické záření (možné i ve vakuu)

V praxi se na odvodu tepla podílejí různou měrou všechny uvedené způsoby.

### 3.1 Šíření tepla vedením

Přenos tepla vedením je proces, ve kterém tepelný tok prochází pevnými, kapalnými a plynnými prostředími nebo mezi dvěma prostředími, které jsou v těsném kontaktu. Tento mechanismus přenosu energie je dominantní u pevných látek, u kapalin a plynů není příliš výrazný, neboť molekuly jsou volnější a mají více místa k tepelnému pohybu bez srážek potřebných k předání energie. Vedení tepla tedy umožňuje nejintenzivnější přenos tepelné energie.

Stěnou o ploše  $S$  [ $\text{m}^2$ ] a tloušťky  $d$  [ $\text{m}$ ], při teplotním rozdílu  $\Delta t = t_2 - t_1$  [ $\text{K}$ ], prochází tepelný tok  $I_t$  [ $\text{W}$ ]. Někdy bývá tento tepelný tok značen jako přenášený výkon  $P$  [ $\text{W}$ ].

$$I_t = S \frac{\lambda}{d} (t_2 - t_1) \quad [\text{W}, \text{m}^2, \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{m}, \text{K}] \quad (5)$$

kde  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti materiálu [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] viz. Příloha P.4

Pro chlazení se často používá pro vyjádření tepelné vodivosti materiálu ekvivalentu elektrického odporu, tak zvaného tepelného odporu  $R_t$  [ $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ].

$$R_t = \frac{d}{\lambda S} = \rho_t \frac{d}{S} \quad [\text{K} \cdot \text{W}^{-1}, \text{m}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1}, \text{K}, \text{m}^2] \quad (6)$$

kde  $\rho_t = \lambda^{-1}$  Měrný tepelný odpor [ $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$ ]

Množství tepla  $Q$  prošlého průřezem tělesa je dán součinem tepelného toku  $I_t$  a času  $t$ .

$$Q = I_t \cdot t \quad [\text{J}, \text{W}, \text{s}] \quad (7)$$

### 3.2 Šíření tepla prouděním

Další způsob šíření tepla je šíření konvekcí, tedy prouděním. Což představuje přestup tepla mezi povrchem pevného tělesa a kapalinou nebo plynem, který těleso obklopuje. Známe dva způsoby proudění, přirozené a nucené. K přirozenému proudění dochází v důsledku změny hustoty kapaliny v závislosti na teplotě (ohřátý vzduch stoupá vzhůru). Kdežto pro vyvolání nuceného proudění musíme použít pomocné zařízení (větrák, čerpadlo). Při proudění kapaliny kolem tělesa se vytváří hraniční vrstva, jejíž velikost je dána rychlostí proudící kapaliny. U přirozeného

proudění je tato vrstva nepříznivě silná a je v důsledku molekulárních sil nepohyblivá a přenos tepla se v ní uskutečňuje vedením. Při nuceném proudění se tato vrstva ztenčuje, v případě turbulentního proudění skoro zaniká. Při nuceném proudění rozlišujeme dva druhy proudění: laminární a turbulentní.

Tepelný tok  $\Phi$ , který za časovou jednotku projde mezi plochou povrchu ponořeného tělesa  $S$  a obklopujícím prostředím, při rozdílu teplot  $\Delta\theta$ .

$$\Phi = K \cdot S \cdot \Delta\theta \quad [\text{W}, \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \text{m}^2, \text{K}] \quad (8)$$

kde  $K$  je součinitel přestupu tepla.

Přibližné hodnoty jsou v tab. 1. Přesné určení závisí na typu proudění geometrickém uspořádání a charakteru povrchu tělesa.

Tab. 1 Jednotlivé druhy proudění chladícího média

Chladící médium	K – volné proudění [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	K – nucené proudění [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Plyn	2-10	10-100
Olej	200-300	300-1000
Voda	200-600	1000-3000
Nasycená pára		8000-10000
Kondenzát vodní páry		8000-12000
Voda ve varu	500	45000

### 3.3 Šíření tepla zářením

Při přenosu tepla zářením dochází k tepelné výměně prostřednictvím vyzařování elektromagnetických vln, které nevyžaduje hmotné médium, tento způsob přenosu tepla se tedy uskutečňuje i ve vakuu. Při šíření sáláním se uplatňuje provedení povrchu. Jako vztažný povrch se uvažuje absolutně černé těleso, které vyzáří nebo pohltí veškeré záření. Je důležité, že každé těleso, které má určitou teplotu, je zářičem tepla. Tepelný tok (tepelný proud) vystupující z tělesa je úměrný ploše  $S$  [m<sup>2</sup>], čtvrté mocnině absolutní teploty a tak zvané sálavosti.

$$I_t = \chi \cdot c \cdot S(\Theta_2^4 - \Theta_1^4) \quad (9)$$

kde  $\Theta_2$  je teplota tělesa teplo vysílající

$\Theta_1$  je teplota okolí

$\chi = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-4</sup>] - vyzařovací konstanta absolutně černého tělesa

$c$  je součinitel sálavosti

Sálavost  $c$  závisí na druhu, barvě a povrchu látky teplo vyzařující. Při stejné teplotě vyzařují plochy světlé a hladké teplo hůře, než plochy černé a drsné.

Tab. 2 Koeficient sálavosti

Materiál a jeho povrch	$c$ – součinitel sálavosti
Leštěný hliník	0,05
Leštěná měď	0,07
Leštěný nikl	0,17
Pískovaný hliník	0,4
Oxidovaná měď	0,7
Válcovaná ocel	0,66
Eloxovaný hliník	0,15-0,87
Barevný smalt	0,87-0,91
Černý lesklý nátěr	0,88
Černý matový nátěr	0,97
Bílý matový nátěr	0,9
Šedý nátěr	0,84-0,91

Při normálních podmínkách chladiče můžeme počítat s rozdílem teplot 20 až 30°C, těleso nedokonale černé, přitom může vyzařit za vteřinu 100 - 200 W z 1 m<sup>2</sup> plochy. U reálného chladiče ( $A = 0,85$ ) představuje tedy sálavá složka tepelný odpor 20 až 15 K/W na každý dm<sup>2</sup> plochy. Tento odpor se ve výpočtu řadí paralelně k odporu, daného konvektivní složkou. U čistých kovových površích může sálavá složka klesnout na třetinu až čtvrtinu, u leštěných površích ještě více. Proto se chladiče z hliníkových slitin černě eloxují. Přípustný je i nátěr vhodnou tmavou barvou, nejlépe matnou.

Jak bylo uvedeno, plocha tělesa nejen vyzařuje, ale také přijímá záření okolních těles. Proto je třeba si uvědomit, že energie, vyzářená boční stěnou vnitřního žebra chladiče dopadne na žebro sousední a tam je pohlcena, zůstane tedy v chladiči. Pro výpočet sálavé složky, bychom proto měli uvažovat povrch plochy, která chladič uzavírá, ne skutečný povrch chladiče.

## **4. Tepelné vlastnosti a parametry součástek**

Je známo, že parametry polovodičových součástek jsou značně závislé na teplotě. Tato zvláštnost je určena jejich fyzikálními vlastnostmi. Navíc ještě teplota přechodu polovodičové součástky také určuje její provozní spolehlivost. Čím vyšší

teplota přechodu PN, tím větší je změna elektrických parametrů, větší nekontrolovatelné proudy, větší pravděpodobnost vzniku nevratných změn přechodu PN. Tepelnými parametry je stanovena souvislost mezi ztrátovým elektrickým výkonem a teplotou různých oblastí polovodičové součástky.

Polovodičové součástky se charakterizují následujícími tepelnými parametry:

Teplotou přechodu PN

Tepelným odporem mezi přechodem a pouzdrem

Tepelnou konstantou mezi přechodem a pouzdrem

Tepelnou kapacitou

Tyto parametry jsou určeny konstrukcí součástky a materiálem, ze kterého je vyrobena. Kromě uvedených parametrů existuje ještě mnoho jiných, které například určuje tepelný pracovní režim.

Tepelný odpor mezi pouzdrem a okolním prostředím

Tepelná kapacita objemu pouzdro – okolní prostředí

Tyto parametry závisí na způsobu upevnění součástky v bloku zařízení, použitím chladiči, elektrickém režimu polovodičové součástky a jiných vnějších činitelích.

## 4.1 Teplota přechodu PN

Teplota přechodu PN je určujícím tepelným parametrem z hlediska tepelné stability polovodičových součástek. V katalogích a technické dokumentaci pro tranzistory se jako mezní teplota udává maximální teplota přechodu, při které je součástka ještě schopna provozu. Pro polovodičové diody se obvykle uvádí mezní teplota pouzdra  $\vartheta_{c \max}$ , působí-li zadaný usměrněný proud a závěrné napětí. Souvislost ztrátového výkonu polovodičové součástky a teploty přechodu PN v statickém tepelném režimu je dána vztahem

$$\vartheta_j = \vartheta_c + P_Z \cdot R_{\vartheta_{jc}} \quad (10)$$

kde  $\vartheta_j$  teplota přechodu PN

$\vartheta_c$  Teplota pouzdra

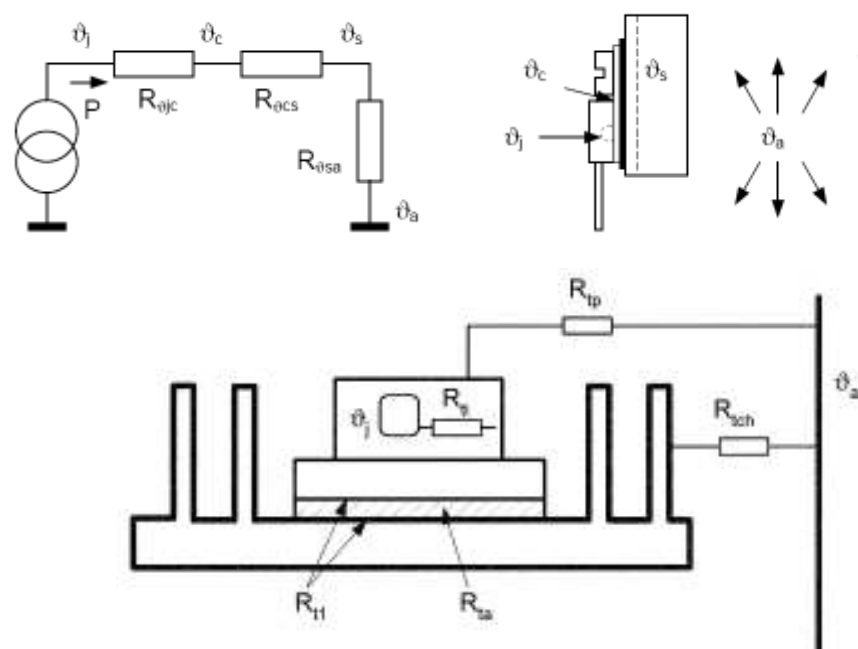
$P_Z$  Ztrátový výkon přechodu PN

$R_{\vartheta_{jc}}$  Tepelný odpor vnitřní (přechod pouzdro)

Při současné úrovni technologie výroby a používaných materiálech se dosahuje mezní teploty přechodu PN 150 až 200°C

## 4.2 Tepelný odpor

Vzniklé teplo se musí ze systému odvést do pouzdra, ze kterého se přes vhodnou styčnou plochu převádí do chladiče. Chladič musí být navržen tak, aby veškerý výkon vyzářil do okolního prostoru. Pro běžné výpočty se předpokládá, že jsme schopni charakterizovat každý z těchto úseků zjednodušeným způsobem. Používáme analogie s elektrickými obvody tím, že uvažujeme jako náhradní lineární prvky tepelné odpory jednotlivých úseků. Zdrojem tepelného toku je ztrátový výkon, který na tepelném odporu vyvolá rozdíl teplot. Přičtením všech rozdílů teplot k teplotě okolí dostaneme předpokládanou teplotu přechodu při zatížení daným výkonem.



obr.1,2: Náhradní schéma tepelného okruhu pro ustálený stav

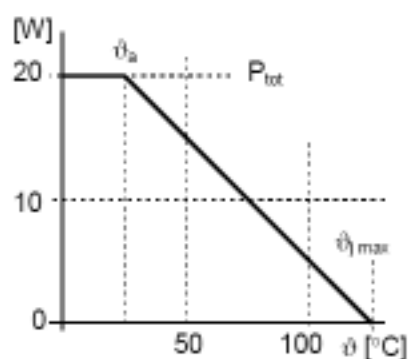
### Tepelný odpor vnitřní ( $R_{\theta jc}$ )

V katalogu může být u dané součástka uveden přímo vnitřní tepelný odpor nebo bývá uváděn maximální ztrátový výkon při ideálním chlazení, při určité teplotě pouzdra (obvykle 25°C) a také maximální teplota přechodu  $\theta_{jmax}$ . Vnitřní tepelný odpor se pak vypočítá ze vztahu:

$$R_{\theta jc} = (\theta_{jmax} - \theta_a) / P_{tot} \quad (11)$$

Při zvýšené teplotě okolí se musí ztrátový výkon snížit. Většinou je snížení předepsáno grafem, jehož příklad je na obr.3.

Pro tranzistor je udán dovolený ztrátový výkon 20W při teplotě pouzdra 25°C. Maximální teplota přechodu je 125°C. Když se při zatížení zvýší teplota pouzdra na 50°C, může být ztrátový výkon již jen 15W. Při této teplotě pouzdra totiž teplota přechodu dosáhne právě 125°C.



obr.3

### **Tepelný odpor styku s chladičem ( $R_{\theta cs}$ )**

Hodnota tohoto tepelného odporu závisí na velikosti plochy styku, kvalitě opracování styčných ploch, použití izolačních podložek a teplovodivých past. Při přímé montáži na rovnou plochu chladiče lze počítat s hodnotou několika desetin K/W, izolační podložky ji poněkud zvyšují. Hodnoty tepelného odporu podložek udávají někteří výrobci v katalogu. Podložky se vyrábějí ze slídy nebo z umělých hmot. Pro zvláště náročná použití se vyrábějí speciální podložky z keramiky Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, které se vyznačují vyšší tepelnou vodivostí. Některé součástky mají plochu pro montáž na chladič izolovanou od systému a montují se na chladič přímo. Pro zlepšení tepelného styku se na styčné plochy nanáší silikonová vazelina, speciální pasty mají přísady pro zlepšení tepelné vodivosti. Směrné hodnoty tepelných odporů styku pouzdra s chladičem jsou v následující tabulce (podle katalogu chladičů Fischer):

Tab.3: *Různé způsoby styku polovodiče s chladičem*

Provedení	tepelný odpor [K / W]
přímý styk, bez tepelně vodivé pasty	0,05 - 0,2
přímý styk, s tepelně vodivou pastou	0,005 - 0,1
podložka z keramiky Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , s pastou	0,2 - 0,6
silikonová guma, s pastou (pouzdro TO3)	0,34 - 0,45
slída 0,05 mm, s pastou	0,4 - 0,9



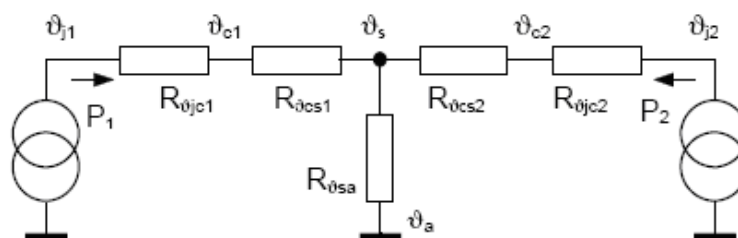
Tepelný odpor podložky závisí také na ploše pouzdra (podle katalogu tranzistorů ECA):

Tab.4: Závislost tepelného odporu na ploše pouzdra

Pouzdro + podložka (slída 0,1 mm)	suchý styk	s pastou
TO-3, TO-41	1,5	0,6 K/W
TO-66, SOT-9	3	1,5 K/W
TO-126, SOT-32	10	6 K/W

### Tepelný odpor chladiče ( $R_{gsa}$ )

Kromě výpočtů v předchozí části je nutné mít při návrhu chladiče na zřeteli ještě další vlivy. Při konstrukci zařízení je obvykle udána maximální pracovní teplota. Pro normální podmínky v mírném pásmu se počítá s teplotou okolí maximálně 35°C. Tato teplota bude platit pro chladiče, umístěné na vnějších stěnách přístroje (většinou na zadní stěně). Malé chladiče, umístěné přímo na deskách plošných spojů, budou pracovat uvnitř skříně, tedy v prostředí, jehož teplota může být zřetelně vyšší. Zde můžeme počítat s teplotou 40°C, záleží na provedení skříně a na případném větrání. Podle bezpečnostních předpisů nemá teplota částí, přístupných dotyku, přestoupit 60°C. Z toho plyne, že tepelný spád na vnějším chladiči by neměl být vyšší než 25°C. Také součástky uvnitř přístroje, jejichž teplota přesáhne bezpečnou hranici, jsou označovány výstražnými štítky (např. hlavy jehličkových tiskáren). Návrh by měl být veden tak, aby tepelný odpor chladiče nebyl značně menší než vnitřní tepelný odpor, protože pak vychází chladič neúnosně velký. Potom je vhodnější volit prvek (tranzistor) s menším vnitřním tepelným odporem nebo zapojit několik tranzistorů paralelně. Chladič se ovšem navrhuje podle celkového výkonu. Když jsou na chladiči upevněny dva zdroje tepla, lze výpočet provádět podle rozšířeného náhradního zapojení:



obr.4 Náhradní zapojení pro dva zdroje tepla

Ze zapojení je zřejmé, že při stejných tranzistorech se stejným ztrátovým výkonem budou stejné i teploty přechodů. Vnitřní tepelné odpory se jeví jako paralelní a při

stejně velkém chladiči je možné dosáhnout výhodnějších tepelných poměrů. Tranzistory by však měly být umístěny na chladiči symetricky. Při větším počtu zdrojů (tranzistorů, stabilizátorů) se náhradní zapojení patřičně rozšíří a řeší se známými metodami pro elektrické obvody. V uvedeném postupu výpočtu se s tepelným odporem zachází jako s lineární veličinou. Ve skutečnosti však hodnota tepelného odporu závisí na podmínkách, ve kterých chladič pracuje. Je ovlivněna polohou chladiče, možností proudění vzduchu, nebo také rozdílem teploty mezi chladičem a okolím. Katalogové hodnoty jsou uváděny pro provedení podle běžné konstrukční praxe. Výrobce tyto hodnoty uvádí s jistou bezpečností a navíc doporučuje zachovat určitý odstup od mezních hodnot. Při přehnané bezpečnosti vyjde chladič zbytečně velký.

### 4.3 Tepelné konstanty

Tepelné konstanty jsou dány součinem tepelného odporu a tepelné kapacity odpovídající části polovodičové součástky a jsou nutné pro zhodnocení jejich tepelného pracovního režimu. Známe tři druhy tepelných časových konstant: přechod-pouzdro, přechod – okolní prostředí, pouzdro – okolní prostředí.

Tepelná konstanta  $\tau_{je}$  přechod – pouzdro, se určuje podle křivek chladnutí (oteplování) polovodičových součástek, které mohou být získány sledováním závislosti změny teplotně citlivého parametru součástky na čase.

### 4.4 Tepelná kapacita

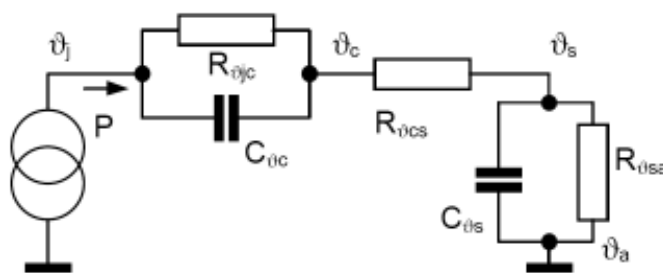
Je-li délka impulsů výkonu mnohem menší než doba, kdy se začínají uplatňovat procesy předávání tepla vedením v systému, je nutné při určování tepelných režimů polovodičových součástek znát tepelné kapacity. Tepelná kapacita určuje množství energie, kterou musíme vynaložit k oteplení objemu látky o 1 °C.

**Tepelná kapacita pouzdra ( $C_{\tau c}$ ),** se uplatní jen u velkých pouzder a při malé hmotě chladiče. Lze s ní také uvažovat při použití součástek bez chladiče. Projeví se také při měření na průběhu křivky oteplování.

**Tepelná kapacita chladiče ( $C_{ts}$ ).** Chladič je vyroben z materiálu, který má schopnost akumulovat teplo. Tato skutečnost má dva důsledky:

1. Při návrhu zařízení s trvalým zatížením a při měření tepelného odporu je třeba brát v úvahu, že teplota stoupá podle exponenciální křivky. Proto je nutné volit dostatečně dlouhou dobu měření, aby hodnoty byly určeny po spolehlivém dosažení ustáleného stavu.

2. Této skutečnosti lze využít u zařízení, které není zatěžováno nepřetržitě plným výkonem. Při plném zatížení teplota postupně stoupá, než ale teplota chladiče vystoupí na ustálenou hodnotu, zatížení klesne. Při známém způsobu zatěžování pak není nutné provádět návrh pro ustálený stav, chladič vychází menší. Při uvažování tepelných kapacit můžeme obvod řešit podle následujícího rozšířeného schématu:



*obr.5 Rozšířené náhradní schéma s tepelnými kapacitami*

Obvod můžeme řešit známými metodami pro řešení elektrických obvodů. Když zanedbáme tepelnou kapacitu pouzdra, dostaneme prostý integrační článek. Protože v našem obvodu funguje zdroj výkonu  $P$  jako zdroj proudu v elektrickém obvodu, bude časovou konstantu určovat jen tepelná kapacita chladiče a jeho tepelný odpor. Tyto znalosti můžeme využít při vyhodnocení oteplovací křivky a při návrhu chladiče pro přerušované zatížení. Při známém tepelném odporu chladiče, známé hmotnosti a materiálu, lze snadno vypočítat časovou konstantu oteplování.

## 5. Určení ztrátového výkonu

Teplo v součástce vzniká v důsledku jejího ztrátového výkonu. Přitom je třeba rozlišovat mezi trvalým ztrátovým výkonem součástky a pulzním výkonovým zatížením.

### Trvalé (klidové) výkonové zatížení

$$P_Z = U_T \cdot I_T \quad (12)$$

kde  $U_T$  je úbytek napětí na součástce při proudu  $I_T$

$I_T$  je trvalý proud protékající součástkou  $P_Z$

U polovodičové diody je  $P_Z = I_F \cdot U_F$  v pracovním bodě. U tranzistoru je ztrátový výkon dán elektrickým příkonem báze a kolektoru. Avšak ztrátový výkon báze je ve většině případů zanedbatelný.

$$P_Z = P_C + P_B = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B \quad (13)$$

Kde  $U_{CE}$ ,  $I_C$ ,  $U_{BE}$ ,  $I_B$  jsou hodnoty platící pro klidový pracovní bod.

### Pulzní výkonové zatížení (pro pravoúhlý impulz)

$$P_S = \frac{t_p}{T_0} P_{imp} \quad (14)$$

$$P_{imp} = U_T \cdot I_{imp} \quad (15)$$

kde  $P_S$  je střední výkon

$P_{imp}$  je výkon pulzu

$t$  je šířka pravoúhleho pulzu

$T_0$  je perioda

$I_{imp}$  je proud pulzu

Ztrátový výkon koncových zesilovačů ve třídě A je při plném vybuzení  $P_Z = 0,5P_C$ .

Ztrátový výkon koncových zesilovačů ve třídě B a AB je při plném vybuzení

$$P_Z = P_{SS} - P_{výst} = \frac{U_{2m} \cdot I_{cm}}{\pi} - \frac{U_{2m} \cdot I_{cm}}{4} = U_{2m} \cdot I_{cm} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{1}{4} \right) \quad (16)$$

kde  $U_{2m}$  je napájecí (špičkové) napětí

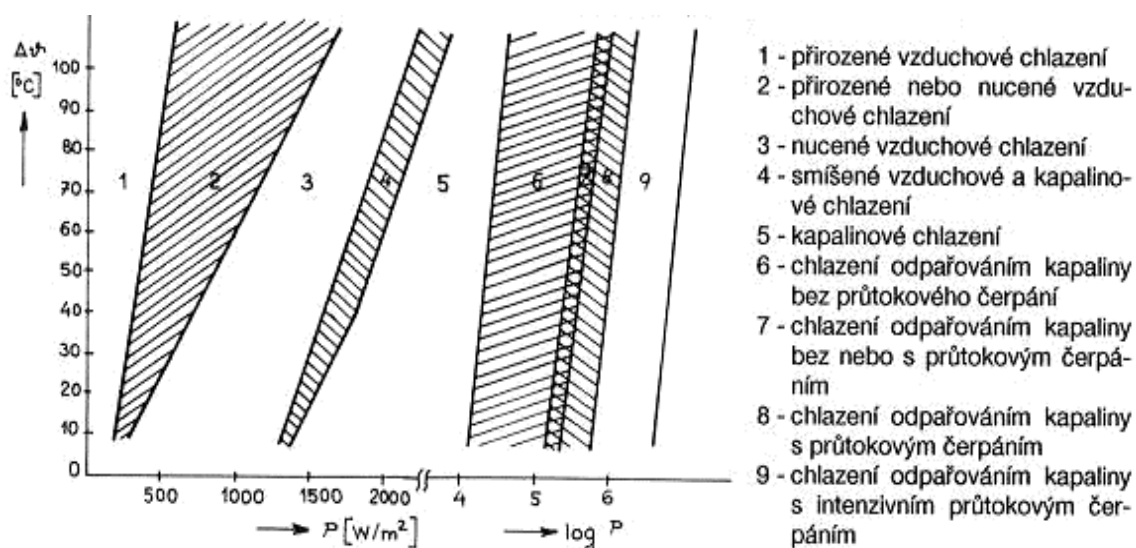
$I_{cm}$  je maximální (špičkový) proud

## 6. Způsoby chlazení

Současná konstrukce polovodičových součástek, dovoluje rozptylovat výkony bez přehřátí součástky nad stanovenou mez, ne více než 2 až 3W. Chceme-li, aby součástka pracovala v širším rozsahu výkonů (desítek a stovek wattů) používáme různých způsobů chlazení polovodičových součástek. Uvolňované teplo může být odvedeno z povrchu systému a předáno mimo zařízení několika způsoby, které se používají jednotlivě nebo ve vzájemné kombinaci. Nejrozšířenější jsou tyto:

- Přirozené chlazení vzduchem
- Nucené chlazení proudícím vzduchem
- Chlazení pomocí kapalinového media
- Využití změny skupenství pro chladící účely
- Chlazení pomocí tepelných trubic
- Chlazení pomocí zkapalněných plynů
- Chlazení pomocí Peltierova jevu

Použití některého z uvedených způsobů chlazení závisí na požadované spolehlivosti, hospodárnosti a konstrukčních zvláštnotech zařízení, je proto nevhodné doporučit jen jediný způsob chlazení. Pracuje-li součástka v zařízení, je velmi důležité určit hlavní a nejučinnější způsob přenosu tepla pro zadaný konkrétní případ. Je vhodné se řídit např. uvedeným přehledem z hlediska požadované hustoty tepelného toku a předpokládaného teplotního rozdílu.



obr.6: Diagram pro volbu způsobu chlazení

## 6.1 Přirozené chlazení vzduchem

Nejjednodušším, spolehlivým a levným chlazením polovodičové součástky je přirozené chlazení, které zahrnuje tepelnou vodivost, přirozené proudění a záření. Přirozené chlazení je účinné a ekonomicky výhodné pro polovodičové součástky s poměrně nevelkými ztrátovými výkony (menší než 20W). Celkový tepelný odpor se určí podle vzorce:

$$R_{gja} = \frac{(g_j - g_a)}{P_z} \quad (17)$$

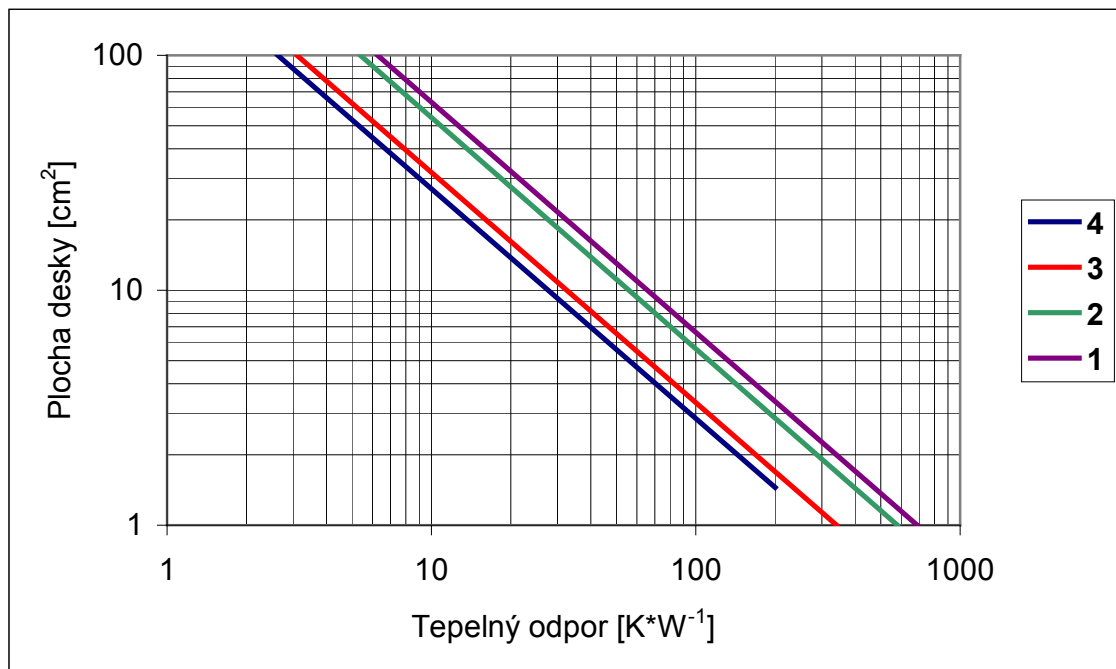
Tepelný odpor chladiče se určí podle vzorce:

$$R_{gja} = \frac{(g_j - g_a)}{P_z} - R_{gjc} - R_{gcs} \quad (18)$$

kde  $R_{gjc}$  je tepelný odpor mezi přechodem a pouzdrem

$R_{gcs}$  je tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem (stykový), viz. Tab.3

Při návrhu deskového chladiče můžeme použít následné závislosti velikosti potřebné plochy desky v  $\text{cm}^2$  na požadovaném tepelném vyzařovacím odporu  $R_t$ .



obr.7: Závislost tepelného odporu na ploše desky

- kde
- 1 - lesklý povrch a vodorovná poloha
  - 2 - lesklý povrch a svislá poloha
  - 3 - černý povrch a vodorovná poloha
  - 4 - černý povrch a svislá poloha

## 6.2 Nucené chlazení proudícím vzduchem

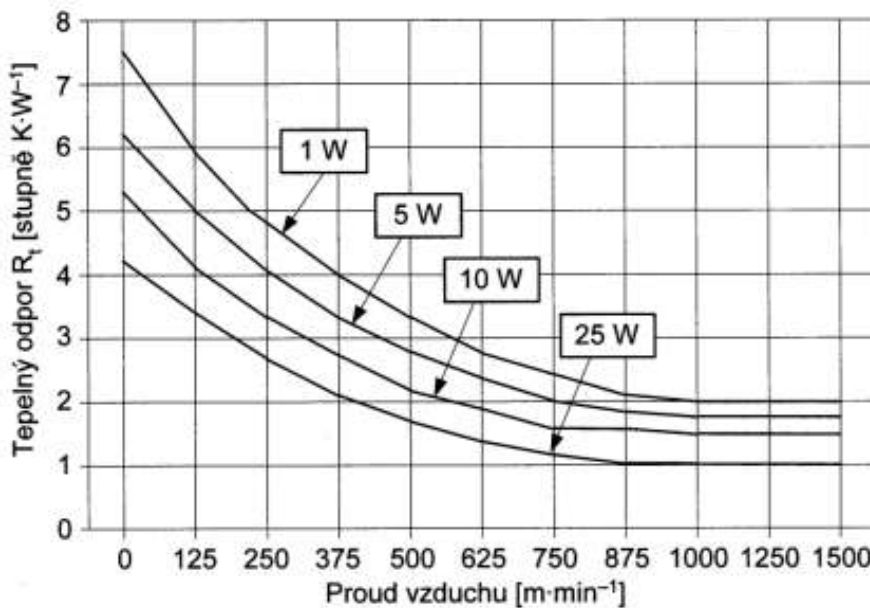
Jestliže tepelný tok z aplikovaných součástí přesáhne hodnotu cca  $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak je rozumné použít jiného způsobu chlazení, na příklad nuceného proudění vzduchu pomocí ventilátoru. Nucenou ventilací se zvyšuje součinitel přestupu tepla prouděním a zlepšuje výměna chladícího vzduchu v prostoru přístrojové skříňe. Množství vzduchu  $Q_v$  [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ], které je nuceně prohnáno za jednotku času přístrojovou skříňí, odvede celkový tepelný tok

$$\Phi_t = Q_v \cdot c_p \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (19)$$

- kde
- $c_p$  je měrné teplo při stálém tlaku
  - $\vartheta_1$  teplota vstupujícího vzduchu
  - $\vartheta_2$  teplota vystupujícího vzduchu

Aby se dosáhlo minimálního oteplení desek plošných spojů, umisťují se součástky s největším ztrátovým výkonem až do míst v blízkostech výstupu teplého vzduchu. Tím tyto výkonové součástky neohřívají ostatní prvky umístěné na deskách plošného spoje.

Existují dva zásadní způsoby chlazení pomocí proudícího vzduchu. První způsob využívá prostého proudění vzduchu okolo chladiče (tento zjednodušený způsob vyhoví pro odvod menšího množství tepla), druhým způsobem je výměňkový způsob chlazení. Postup výpočtu pro první způsob je stejný jako pro klidný vzduch pouze s tím rozdílem, že se velikost odporu  $R_{tr}$  odečte pro konkrétní chladič a rychlost proudícího vzduchu z grafu (platícího pro tento chladič).



obr.8: Tepelný odpor v závislosti na rychlosti proudění vzduchu okolo vějířovitého chladiče (profil TO18, TO5).

Pokud je tento jednodušší způsob nedostačující, používá se takzvaných výměňkových kazet. V případě výměňkového chladiče ochlazovaného proudícím vzduchem, dojde k jejich oteplení o teplotní rozdíl:

$$\Delta \vartheta = \vartheta_{2Ch} - \vartheta_1 = \frac{\Phi}{\alpha \cdot S} \quad (20)$$

- kde  $\vartheta_{2Ch}$  je teplota chladiče [°C]  
 $\vartheta_1$  je teplota chladícího vzduchu [°C]  
 $\Phi$  je tepelný tok (je roven tepelné ztrátě  $P_z$ ) [W]  
 $S$  je plocha přestupu tepla [m<sup>2</sup>]  
 $\alpha$  je součinitel přestupu tepla při proudění vzduchu pravoúhlým kanálem

$$S = 2 \cdot n \cdot L \cdot (H + b) \quad (21)$$

- kde  $n$  je počet kanálů kterými proudí chladící vzduch  
 $L$  je délka kanálů  
 $H$  je výška kanálů  
 $b$  je šířka kanálu

$$\alpha = 0,019 \cdot \frac{\lambda}{De} \cdot \left( \frac{\rho \cdot v \cdot De}{\eta} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \right)^{0,33} \quad (22)$$



kde  $\lambda$  je tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $\rho$  je hustota vzduchu (cca 1,23) [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $\eta$  je viskozita vzduchu [ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ], pro 30°C je  $1,8\cdot 10^{-5}\text{Ps}$   
 $v$  je rychlost proudícího vzduchu  
 $C_p$  je měrné teplo vzduchu při stálém tlaku  
 $De$  je ekvivalentní průměr pravoúhlého chladícího kanálu šířky  $b$  a výšky  $H$  [m].

$$De = \frac{2 \cdot b \cdot H}{H + b} \quad (23)$$

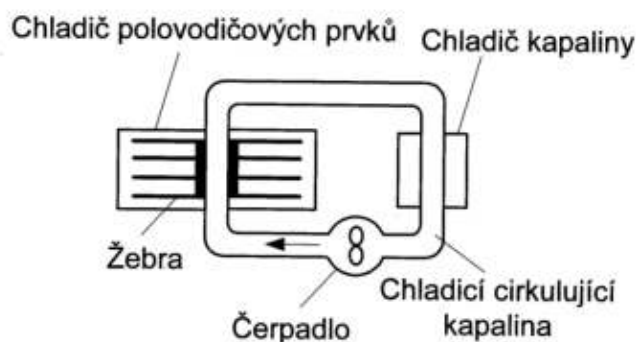
Potřebné množství vzduchu se vypočte z následujícího vztahu za použití vztahu (20) přičemž  $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{P_z}{\rho \cdot c_p \cdot Q_v} \quad (24)$$

kde  $Q_v$  je množství prošlého vzduchu [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $P_z$  je ztrátový tepelný výkon [W]  
 $\vartheta_2$  je teplota vystupujícího vzduchu [°C]  
 $\vartheta_1$  je teplota vstupujícího vzduchu [°C]

### 6.3 Chlazení pomocí kapalinového média

Pro chlazení větších výkonů elektrických zařízení se používá chlazení pomocí cirkulujícího kapalinového média. Nejrozšířenějším chladícím médiem je voda, převážně se však používá voda destilovaná.



obr.9: Chlazení pomocí cirkulujícího kapalinového média

Důležitou roli zde hraje přenos tepla z kapaliny do vlastního ochlazovaného chladiče.

Přenos tepelného toku  $\Phi_t$  [W] je přímo úměrný ploše přestupu  $S$  [m<sup>2</sup>]

$$\Phi_t = S \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta \vartheta \quad [\text{W}] \quad (25)$$

kde:  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti určující tepelnou vodivost materiálu.

Pro Al je  $\lambda_{\text{Al}} = 201 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$S$  je plocha přestupu tepla

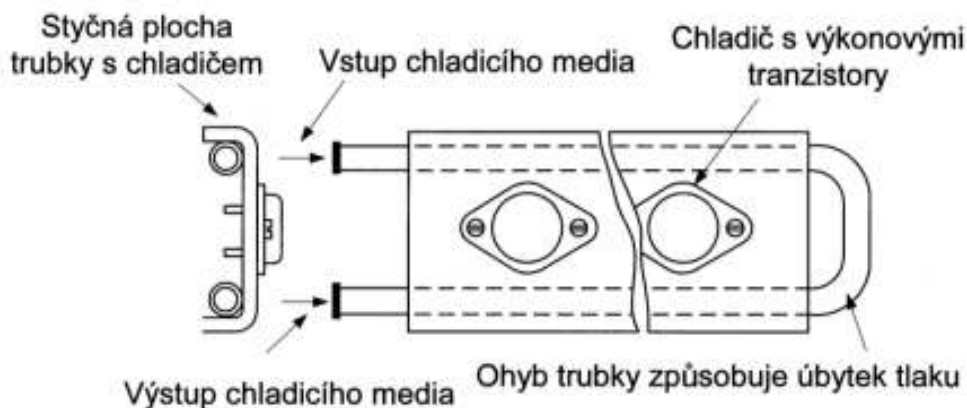
$d$  je síla stěny

$\Delta \vartheta$  je teplotní rozdíl mezi stěnou, přes kterou prochází tepelný tok  $\Phi_t$

Tepelný tok  $\Phi_t$  [W] ohřeje za jednotku času (1s) množství chladicího média  $q$  [kg·s<sup>-1</sup>] o rozdíl teplot  $\Delta \vartheta$

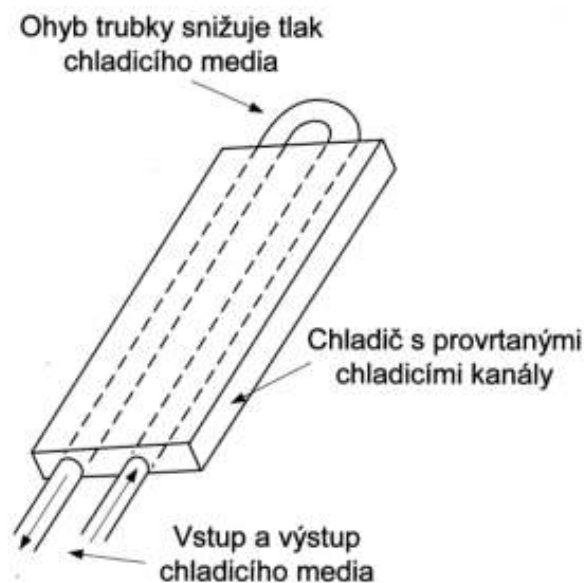
$$Q = c_p \cdot q \cdot \Delta \vartheta \Rightarrow q = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta \vartheta} \quad (26)$$

kde  $c_p$  je měrné teplo chladicího média. Pro vodu je  $c_p = 4198 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



obr.10: Uspořádání chladících kanálů

Z obr. je zřejmé, že při tomto uspořádání pouze část povrchu chladicí trubky je ve styku s chladičem. Mimo to, zde vznikají problémy se vzájemným tepelným spojem, protože na chladiče se nejčastěji používá jako materiál dural, naopak na chladicí trubky pak měď nebo mosaz. Dále se při tomto uspořádání prodlužuje vzdálenost mezi zdrojem tepla a chladicí trubkou. Na dalším obrázku je vhodnější uspořádání. Vlastní chladič má ve svém tělese vyvrtané chladicí kanály, kterými proudí chladící medium. Propojka mezi kanály je na obrázku uskutečněna spojkou. Každá změna směru proudící kapaliny (koleno) však způsobuje úbytek tlaku  $\Delta p$ .

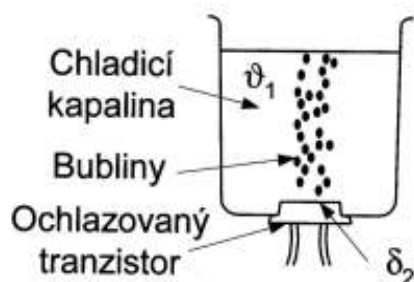


obr.11: Vhodnější uspořádání chladících kanálů

Při chlazení vodou je používána rychlost chladicí vody až  $< 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , běžně 1 až  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rozdíl teplot se volí relativně nízký, cca 15K.

## 6.4 Využití změny skupenství pro chladící účely

Fyzikální podstata, ke které dochází při změně stavu látky, spočívá v tom, že při ní dochází ke změně tepelné energie, kterou látka obsahuje. Má-li dojít k sublimaci, vypařování či tavení látky, pak je látce nutno tepelnou energii dodávat, tedy jinému tělesu teplo odebrat. Chladícího účinku lze dosáhnout buď tím, že se chlazená součástka umístí na dno nádoby, ve které se nachází chladící kapalina, například voda, olej, petrolej, freon apod., nebo je použito nuceného promíchávání, kdy se kapalina uvádí do pohybu, například čerpadlem. Změny stavu látky jsou vždy spojeny se změnou tepelné energie v látce obsažené. Jestliže dochází k sublimaci nebo vypařování, pak je nutno tepelnou energii látce dodávat (v případě chlazení látka tuto energii odebírá chlazenému objektu). Při chlazení se proto často využívá tzv. bublinkového varu.



obr.12: Využití změny skupenství (bublínkový var)

Princip spočívá v tom, že kapalina je ohřívána elektronickými prvky z její původní (chladné) teploty až do bodu varu, nastane rovnovážný stav, ve kterém dojde k pokrytí celého povrchu (celé hladiny) kapaliny bublinami páry a tím k vypařování kapaliny. Pára kondenzuje na povrchu chladiče, čímž se opět přemění v kapalinu a ta se vrací nazpět. Při kondenzaci páry na chladiči kondenzovaná pára odevzdá chladiči stejné množství tepla, jakého bylo třeba k jejímu vytvoření. Využití bublínkového varu má velký význam při vysokém stupni integrace, protože kapalina pronikne i do nejmenších prostorů mezi součástkami a tím umožní zmenšit jejich vzdálenosti (i menší než 1mm), při výrazně vyšším výkonovém zatížení. U součástek je ale důležité dbát na umístění např. rezistory je vhodné umisťovat vodorovně, protože při svislém umístění bublinky vzniklé v jejich spodní části stoupají vzhůru a u horní části rezistoru vytváří spojitou vrstvu plynu, která zhoršuje odvod tepla. Obecně je nevhodnější poloha součástek je taková, která umožňuje smáčení všech bodů jejich povrchu a nezabraňuje volnému pohybu vznikajících bublin.

Tepelný tok, který projde za jednotku času stěnou chladiče (o ploše  $S$ ), na které dochází ke kondenzaci páry, je roven

$$\Phi_t = \alpha \cdot S \cdot \Delta\vartheta \quad [\text{W}, \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \text{m}^2, \text{K}] \quad (27)$$

Součinitel přestupu tepla při kondenzaci na vodorovných trubkách o vnějším průměru  $D$

$$\alpha = 0,551 \left[ \frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot h_v}{D \cdot \eta \cdot \Delta\vartheta} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (28)$$

V případě, že chladicí vodorovné trubky jsou vybaveny deskami, pak součinitel přestupu tepla při kondenzaci je roven

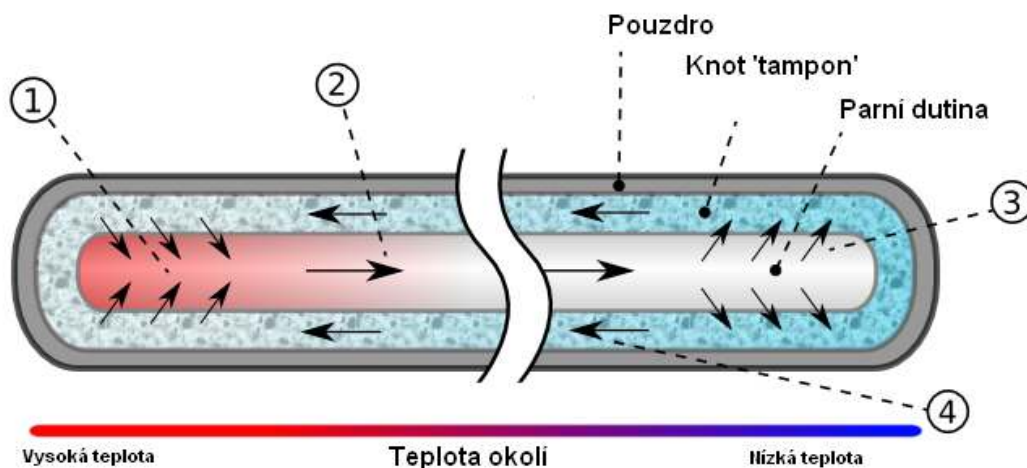
$$\alpha = 0,717 \left[ \frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot h_v \cdot \sin \zeta}{\eta \cdot \Delta\vartheta} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (29)$$

kde

$\alpha$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla při kondenzaci
$\lambda$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti kapaliny
$\rho$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota kapaliny
$g$	$[9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}]$	tíhové zrychlení
$h_v$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$	měrná entalpie odpařování
$D$	$[\text{m}]$	vnější průměr trubky, kterou protéká chladicí médium
$\eta$	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$	viskozita kapalin
$\Delta\vartheta$		rozdíl teploty nasycené páry a teploty chladicího povrchu
$\zeta$	$[\text{°}]$	úhel, který svírá nakloněná chladicí deska s vodorovnou rovinou. Pro svislou desku je $\zeta = 90^\circ$ , tedy $\sin\zeta = 1$

## 6.5 Chlazení pomocí tepelných trubíc

Tepelné trubice jsou velmi efektivním prostředkem sloužícím k přenosu tepla mezi dvěma místy. Navenek se tepelná trubice chová jako pevné těleso vyrobené z materiálu o extrémně vysoké tepelné vodivosti, o několik řádů vyšší než např. měď a je schopna takto intenzivně přenášet teplo i při relativně nízkém teplotním spádu. Tepelná trubice je tvořena dvěma základními prvky - uzavřeným obalem (plášťem) a pracovní látkou uvnitř, která se volí s ohledem na předpokládaný rozsah pracovních teplot. Přenos tepla je v tepelné trubici realizován uzavřeným oběhem pracovní látky v plynném a kapalném skupenství, mezi nimiž dochází k neustálým vzájemným fázovým přeměnám. Podle způsobu dopravy kapalně fáze (kondenzátu) se tepelné trubice dělí na dva základní typy – gravitační a kapilární. U gravitačních tepelných trubíc stéká kondenzát po stěnách zpět do výparníku vlivem zemské tíže. Kapilární tepelné trubice obsahují uvnitř navíc kapilární soustavu, kterou proudí kondenzát vlivem kapilárního tlaku a jejich funkce je téměř nezávislá na orientaci v prostoru.



#### Heat Pipe - Tepelný cyklus

- 1) Z pracovní kapaliny se zahřátím stává pára
- 2) Pára putuje parní dutinou ke konci s nižší teplotou
- 3) Pára kondenzuje zpátky na kapalinu a je absorbována knotem, přitom se uvolňuje tepelná energie
- 4) Pracovní kapalina vzlíná (teče) ke konci s vyšší teplotou

obr.13: Tepelný cyklus tepelné trubice

Funkce - princip:

Jde o hermeticky uzavřený (zavařený, zapájený..) kovový (z oceli, mědi..) válec, který je naplněn tekutinou. Na jednom konci je zasazený do zdroje tepla a na druhém do chladiče. Po dosažení teploty, na kterou je nastaven, se začne pracovní látka (čpavek, voda...) odpařovat a proudí směrem k ochlazenému místu, kde kondenzuje.

Proud par se dává do pohybu na základě rozdílných tlaků v místě výparníku (tlak vyšší) a v místě kondenzátoru (tlak nižší). Návrat kondenzátu zpět ke zdroji tepla je zajištěn kapilárními silami (kapilární elevace = vzlínání kapaliny) v porézním materiálu, který kondenzát v podstatě "nasává" zpět ke zdroji tepla. Porézní materiál a kapilární síly heat pipe umožňují, aby pracovala v poloze, kdy je kondenzátor níže než výparník. Dnešní porézní materiály dokáží nasát kondenzát zpět k výparníku až z hloubky 40 centimetrů.

obr.14



Pracovní teplota, to jest teplota, při které se začne pracovní látka vařit, se nastavuje velikostí tlaku uvnitř heat pipe (termosifonu). Ten se pohybuje kolem hodnoty 101 kPa. Zmíníme-li tlak 40 kPa, jde o tlak o 61 kPa nižší, než je tlak atmosférický (tedy podtlak). Jak jistě víte, bod varu kapaliny je na tlaku závislý. Aby heat pipe s vodou užitou jako pracovní látka začala odebírat teplo při 80°C, musí v ní být podle tabulky absolutní tlak 47,41 kPa (tedy podtlak  $101,42 - 47,41 = 54,01$  kPa oproti tlaku atmosférickému).

Tab.5: Závislost teploty varu vody na absolutním tlaku

Bod varu [°C]	70	75	80	85	90	95	100
Tlak [kPa]	31,20	38,60	47,41	57,87	70,18	84,61	101,42

Dělení trubic dle rozsahu teplot:

Kryogenní - použití v rozsahu teplot -260°C do -120°C

Nízkoteplotní - od -120°C do 500°C

Vysokoteplotní - od 500°C do 3000°C

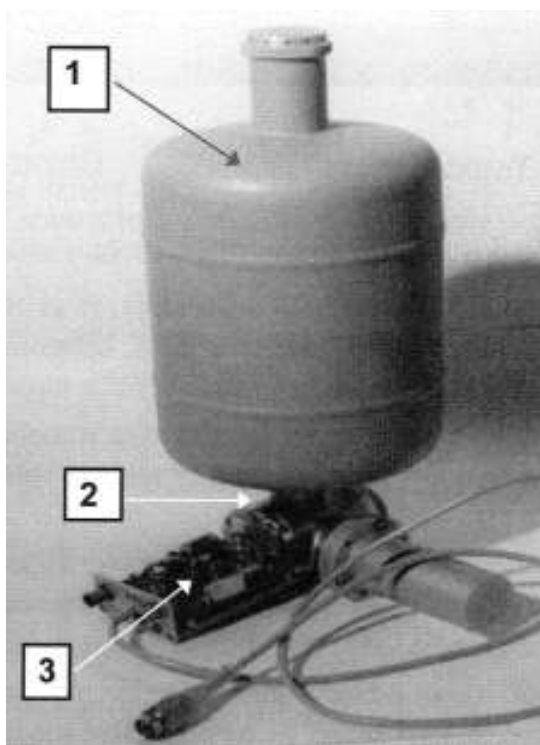
Tab.6: Charakterizuje pracovní látky, rozsahy teplot a používané materiály na stěny tepelných trubic při atmosférickém tlaku.

Pracovní látka	Rozsahy operačních teplot [°C]	Bod varu [°C]	Transportní činitel kapaliny	Vhodný konstrukční materiál
Dusík	-200 ÷ -170	-196	$9 \cdot 10^6$	Nerezová ocel
Čpavek	-70 ÷ 50	-33	$1 \cdot 10^8$	Nerezová ocel, Hliník
Freon 12	-60 ÷ 40	-30	$1 \cdot 10^7$	Nerezová ocel, Měď
Methanol	-30 ÷ 100	65	$5 \cdot 10^5$	Měď
Voda	10 ÷ 200	100	$5 \cdot 10^8$	Měď, Nikl
Rtuť	190 ÷ 500	356	$9 \cdot 10^9$	Nerezová ocel
Draslík	400 ÷ 800	760	$5 \cdot 10^8$	Nerezová ocel
Sodík	500 ÷ 900	883	$2 \cdot 10^9$	Nerezová ocel
Lithium	900 ÷ 1500	1330	$8 \cdot 10^9$	Tantal

## 6.6 Chlazení pomocí zkapalněných plynů

Pro zvláštní účely se používá chlazení (lépe ochlazení) elektronických zařízení na teploty hluboko pod bod mrazu pomocí zkapalněných plynů. Nejčastěji se používá kapalného dusíku, pomocí kterého je možno udržovat ochlazovaný objekt na teplotě

-196°C. Tého metody se využívá na příklad při ochlazování vstupních obvodů nábojově citlivých předzesilovačů určených pro spektrometrická měření s polovodičovými detektory. Důvodem je snížení šumu vstupních obvodů takovýchto předzesilovačů viz. obr.15. Také se tohoto způsobů chlazení používá pro chlazení procesorů taktovaných na velmi vysoké frekvence.



obr.15: Chlazení polovodičového detektoru

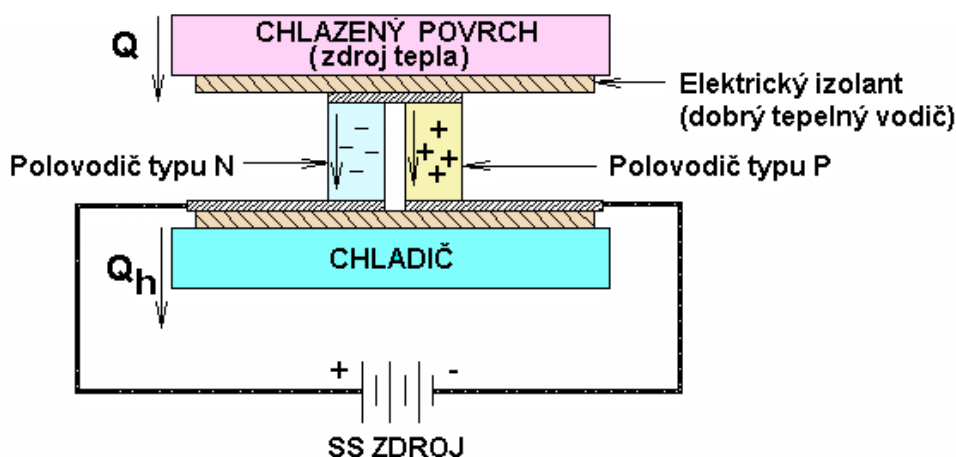
- 1 – Dewarova nádoba s kapalným dusíkem
- 2 – Chlazené vstupní obvody předzesilovače
- 3 – Nechlazené obvody předzesilovače

## 6.7 Chlazení pomocí peltierova článku

Peltierův článek se skládá ze dvou větví (sloupků) hranolovitého tvaru. Sloupky, tvořené polovodiči typu P a N, jsou na jedné straně vodivě spojeny spojovacím můstkem. Spodní kontaktní plošky na druhé straně jsou určeny pro přívod elektrické energie. Spojovací můstek a kontaktní plošky absorbují nebo vyzařují teplo. V místě styku polovodiče se spojovacím můstkem vzniká nežádoucí přechodový



odpor, který značně ovlivňuje dosažitelnou chladicí kapacitu článku a maximální rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou  $\Delta T_{\max}$  [K]. Ideálně je množství absorbovaného tepla na studené straně a vyzařovaného tepla na teplé straně závislé na součinu Peltierova koeficientu a proudu procházejícího polovodičem.

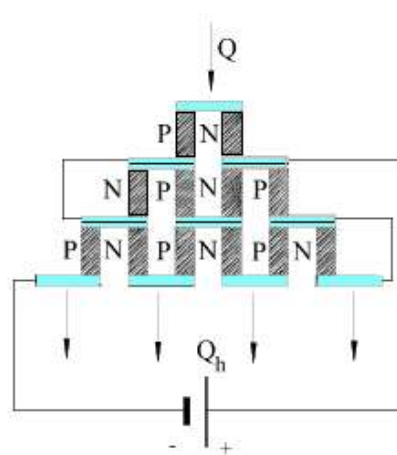


obr.16: Peltierův článek

Kde:  $Q$  teplo absorbované  
 $Q_h$  teplo vyzařované

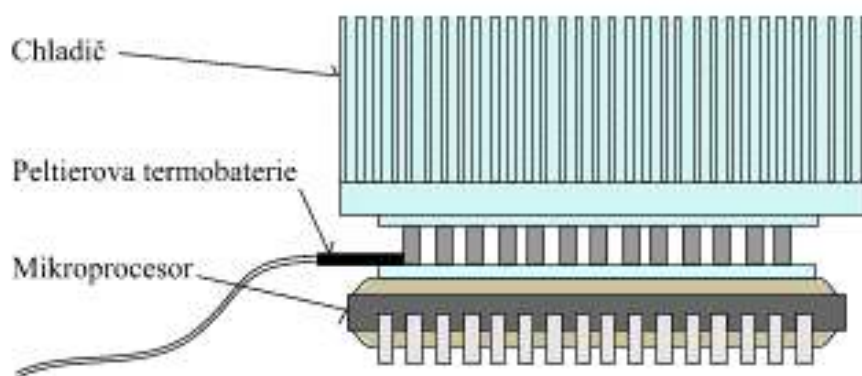
V praxi je množství tepla  $Q$  absorbovaného na studené straně, udávající skutečnou chladicí kapacitu článku, sníženo o Jouleovo teplo a teplo přivedené sem vedením z teplé strany článku. Rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou polovodičového materiálu totiž způsobuje přechod tepla v polovodiči z chladné strany na teplou. Zvýší-li se proud tekoucí obvodem, zvětší se rozdíl teplot mezi oběma stranami, ale také množství tepla vedeného polovodičem. Proud, při kterém už nedochází k dalšímu ochlazování, je označován  $I_{\max}$ .

Jednotlivé Peltierovy články se obvykle zapojují do série do větších celků, tzv. Peltierových modulů (termobaterií). Každý polovodič v modulu se nazývá element, pár elementů tvoří termočlánek. Pro dosažení větších rozdílů teploty se spojují jednotlivé termoelementy do kaskády (vícestupňové moduly).



obr.17: Termobaterie

Peltierovy články dosahují maximálního ochlazení  $(\Delta\vartheta)_{MAX} = 40^{\circ}\text{C}$ . Chladicí účinnost je tedy nižší než u chladicích soustav kompresorových nebo absorpčních, ale hlavní výhodou je v možnosti realizace malých chladicích jednotek bez pohyblivých součástí a bez kapalného nebo plynného media. Jelikož konvenční mechanické chladicí systémy jsou v oblasti chladicích výkonů pod 25 W neekonomické. Zařízení pracující s termoelektrickými moduly mají oproti mechanickým systémům nesporné výhody v úplné nehučnosti chodu, teoreticky neomezené.



obr.18: Příklad použití Peltierovy termobaterie k chlazení mikroprocesoru.

Kritériem výběru vhodného modulu jsou tyto tři základní parametry:

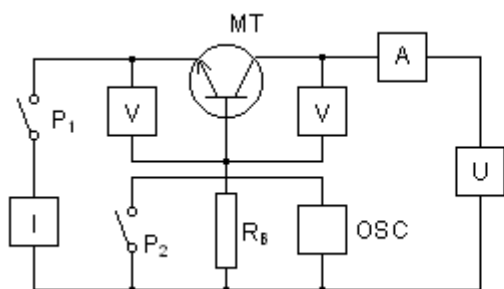
- teplota studené strany  $T_c$
- teplota teplé strany  $T_h$  a tomu odpovídající výběr chladiče
- celkové množství tepla  $Q$ , které musí studená strana modulu absorbovat.

Je-li chlazený objekt v přímém kontaktu se studenou stranou, obvykle se volí teplota studené strany  $T_c$  stejná, jako má být požadovaná teplota objektu  $T_p$ . V případě, že objekt není v přímém kontaktu se studenou stranou, např. při chlazení prostoru, zvolí se teplota studené strany o několik stupňů nižší, než je žádaná teplota. Teplotu  $T_h$  na teplé straně modulu určují dva hlavní parametry. Prvním je teplota  $T_o$  okolního prostředí, do kterého je odváděno teplo vyzařované modulem. Druhým parametrem je účinnost chladiče, který je umístěn mezi teplou stranou modulu a okolním prostředím.

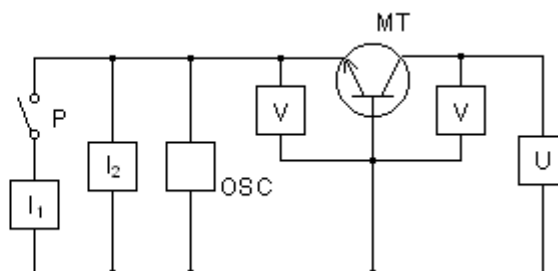
## 7. Měření tepelných parametrů

Princip měření teploty přechodu PN pomocí teplotně citlivých parametrů je takový, že před měřením teploty se zjistí cejchovní křivka funkční závislosti teplotně citlivého parametru na teplotě. Cejchovní křivka se měří tak, že polovodičová součástka se zahřívá v termostatu; pak se takto ocejchovaná součástka v konkrétním zapojení zahřívá požadovaným výkonem a po ustálení se přepíná na měření. Tak se může získat závislost teplotně citlivého parametru na ztrátovém výkonu součástky. Doba přepnutí polovodičové součástky ze stavu zahřívání výkonem do stavu měření, musí být poněkud delší, než doba nutná k zániku nosičů v bázi polovodičové součástky.

Porovnání uvedené závislosti a cejchovní křivky nám dovoluje určit teplotu přechodu PN při zadaném ztrátovém výkonu.



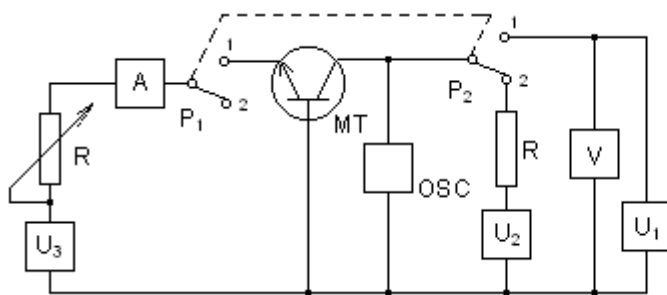
obr. 19



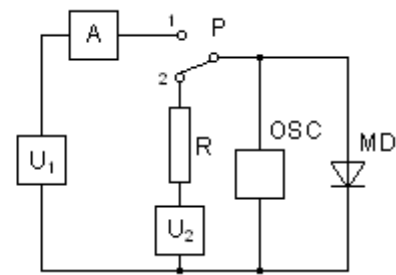
obr. 20

Obrázek 19 uvádí zapojení pro měření teploty přechodu PN metodou zbytkového proudu kolektoru. Ve stavu zahřátí jsou přepínače  $P_1$  a  $P_2$  sepnuty, ve stavu měření rozepnuty. Zbytkový proud kolektoru se určuje pomocí oscilografu podle velikosti úbytku napětí na snímacím referenčním odporu  $R_B$ .

Na obr. 20 je zapojení pro měření teploty přechodu PN pomocí úbytku napětí báze – emitor ( $U_{BE}$ ). V zapojení je použit proudový zdroj  $I_1$ , k zahřívání součástky a  $I_2$  k měření teplotně citlivého parametru. Proud zdroje  $I_2$  musí být malý, aby nezpůsobil chybu měření. Obvykle tento proud nepřesahuje několik miliampérů.



obr. 21



obr. 22

Na obr. 21 je uvedeno zapojení pro měření teploty přechodu PN pomocí napětí báze – kolektor ( $U_{BC}$ ). Zdroje  $U_1$  a  $U_3$  zajišťují ohřev,  $U_2$  slouží k měření parametru.

Na obr. 22 je uvedeno zapojení pro měření teploty přechodu PN diody pomocí úbytku napětí v přímém směru  $U_F$ . Princip je obdobný jako u tranzistoru a měření napětí báze – emitor.

### **Měření tepelných časových konstant**

Tepelná časová konstanta je rovna časovému úseku, během kterého se rozdíl teplot mezi přechodem a pouzdrem zmenší ekrát v porovnání s počátečním rozdílem teplot. Tepelné konstanty přechod – pouzdro  $\tau_{je}$  a přechod – okolní prostředí  $\tau_{ja}$  jsou nezbytné pro výpočet tepelných režimů polovodičových součástek tehdy, když je délka impulsu porovnatelná nebo rovna tepelným konstantám  $\tau_{je}$  a  $\tau_{ja}$ .

Tepelné konstanty se určují podle přechodových tepelných charakteristik oteplování (chladnutí) polovodičové součástky a představují změny teplotně citlivého parametru v závislosti na čase. Tepelná konstanta se určuje jako doba, za kterou se zvýší teplota přechodu na 63% své maximální hodnoty.

K určení tepelné časové konstanty se polovodičová součástka zahřívá určitým výkonem, při kterém se určuje teplotně citlivý parametr. Přeruší se přívádění výkonu a určí se doba, za kterou teplotně citlivý parametr dosáhne hodnoty, která odpovídá teplotě okolního prostředí. Tato doba určuje dobu chladnutí části přechod okolní prostředí polovodičové součástky. Doba chladnutí je rovna době zahřátí polovodičové součástky, charakterizují stanovené konstanty  $\tau_{ja}$  maximální dobu, za kterou je dosaženo tepelného stacionárního stavu v polovodičové součástce bez chlazení.

### **Měření tepelných odporů**

Metodou konstantní teploty prostředí. Pro tento způsob měření potřebujeme znát cejchovní křivku teplotně citlivého parametru podle, které určíme teplotu

přechodu. Tepelný odpor se určuje jako rozdíl teploty přechodu a teploty pouzdra při zadaném ztrátovém výkonu polovodičové součástky P:

$$R_{g_{je}} = \frac{g_j - g_c}{P} \quad (30)$$

### **Určení tepelné kapacity**

Pro určení tepelné kapacity se zjišťuje tepelná přechodová charakteristika polovodičové součástky během krátkého časového intervalu (do 3 $\mu$ s). Závislost  $\Delta g(t)$  je v tomto rozsahu obvykle lineární. Podle přechodové tepelné charakteristiky se určí střední hodnota tepelné kapacity  $C_{je}$  zahřívané oblasti.

$$C_{je} = \frac{P_{\max} \cdot \Delta t}{\Delta g} \quad [\text{Ws} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}] \quad (31)$$

## **8. Závěr**

V této práci jsem uvedl přehled nepoužívanějších typů chlazení polovodičových součástek. U běžně používaných typů jsou uvedeny vzorce pro návrh chladičů a chlazení. V úvodu jsem také seznámil s pojmy, které se v dané problematice vyskytují. V příloze jsem uvedl ukázky návrhu chlazení pomocí přirozeného chlazení vzduchem. Toto chlazení je pro malé výkony v dnešní době nepřijatelnějším řešením. Pro větší výkony se používá nucené chlazení proudícím vzduchem. Pro ještě vyšší výkony se dnes čím dál častěji objevuje chlazení pomocí tepelných trubic nebo lépe kombinace přirozeného nebo nuceného chlazení v kombinaci s tepelnými trubicemi, které díky své velmi vysoké tepelné vodivosti pomáhají odvádět teplo od součástky do vzdálenějších míst chladiče. Do budoucna přináší slibný příslib i peltiérův článek, který díky stále lepším polovodičovým materiálům nabývá vyšší účinnost. Návrhy chlazení jsem také realizoval a z výsledků vyplynulo, že návrhy byly provedeny správně, avšak byly provedeny na ukázkou na hranici teplotní výdrže součástek a tudíž by se pro praktické využití nedaly použít. Zde by bylo třeba volit dostatečné rezervy. Nesmíme opomenout ani fakt, že teplota má značný vliv na životnost, takže platí čím nižší, tím lepší. Při vypracovávání této práce jsem hodně čerpal a využíval citací z literárních zdrojů [1], [2]. Věřím, že tato má práce bude přínosem i pro další studenty, kteří do ní budou v budoucnu nahlížet, jelikož nároky na chlazení se postupem doby, díky stále větší integraci budou zvyšovat.

## **Literatura:**

- [1] FUKÁTKO, J., FUKÁTKO, T. *Teplo a chlazení v elektronice II*. Praha : BEN, 2006. 118 s. ISBN 80-7300-199-3
- [2] AKSENOV, A., GLUŠKOVÁ, D., IVANOV, V. *Chlazení polovodičových součástek*. Praha : SNTL, 1975. 156 s. Polovodičová technika; sv. 23. ISBN 04-521-75

### **Internetové stránky:**

- [3] <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bajer/BNKP/Chlazení.ppt>
- [4] [http://www.mti.tul.cz/files/vke/powersemi\\_short.pdf](http://www.mti.tul.cz/files/vke/powersemi_short.pdf)
- [5] [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/09a\\_tepelny\\_management.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/09a_tepelny_management.pdf)
- [6] <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [7] [http://www.artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199\\_5%20Nevratne%20procesy.pdf](http://www.artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199_5%20Nevratne%20procesy.pdf)
- [8] <http://www.home.zcu.cz/~mkuzel/public2/HEAT%20PIPE.ppt>