

Výpočty chlazení elektronických součástí

s řešenými příklady

Úvodní poznámky

Tento spisek vznikl ze snahy o vytvoření praktického vodítka pro návrh chlazení elektronických součástek. Technika vedení tepla je samostatný obor s rozsáhlým a komplikovaným matematickým aparátem. Elektronické součástky však většinou pracují v omezeném rozsahu teplot, proto jsou přípustná značná zjednodušení. Pro řešení jejich chlazení se vžil soubor jednoduchých postupů, který používá linearizované prvky (tepelné odpory). Tyto hodnotami nyní také výrobci chladičů uvádějí v katalogích svých výrobků.

Postup výpočtu je analogický s principy řešení elektrických obvodů. V základní části (1 - 3) jsou používány tyto vzorce a hodnoty.

Protože otázky chlazení přinášejí další záludnosti při posuzování výsledků, jsou v následující části uvedeny některé podrobnosti a příklady jejich použití v praktických případech chlazení.

Obsah jednotlivých oddílů:

1. Základní vztahy pro výpočty chlazení (str. 2)

Obsahuje definici tepelného odporu a kapacity, vymezení a vlivy jednotlivých prvků náhradního obvodu, postup jednoduchého výpočtu chlazení s jedním zdrojem tepla, složitější výpočty s několika zdroji tepla a také vliv tepelné kapacity.

2. Konstrukční provedení chladičů (str. 6)

Uvádí příklady provedení chladičů pro různé výkony, účely a umístění, pokyny pro montáž a upevnění součástek, základní uspořádání pro nucené chlazení.

3. Příklady výpočtu chlazení (str. 10)

Různé aspekty při výpočtu chlazení se dají nejlépe vysvětlit na příkladech. Jsou zvoleny příklady s různým ztrátovým výkonem, s rozličnými typy chladičů a zdroji tepla. Je uveden postup určení tepelného zatížení tranzistorů s malým výkonem, stabilizačních prvků a integrovaných koncových stupňů pro elektroakustická zařízení. Příklady jsou řešeny pro přirozené chlazení. V příkladech jsou řešeny podmínky jak pro normální pracovní stav, tak ztrátový výkon a tepelné podmínky při zkratu na výstupu. Jednotlivé problémy jsou v příkladech uvedeny jako otázky (Q:) a po příslušných výpočtech je vždy uvedena odpověď (R:).

4. Omezení ztrátového výkonu při zkratu (str. 18)

Z řešení zkratových podmínek vyplynulo, že je třeba blíže popsat metody ochrany elektronických součástek před přetížením při zkratu. Jsou uvedeny metody s omezením výstupního proudu, s vnitřním omezením výkonu integrovaného obvodu a se zpětným zahnutím výstupní charakteristiky (foldback) a příklady výpočtu.

5. Podrobnější rozvahy o chlazení (str. 20)

Obsahují vztahy pro šíření tepla vedením, sáláním a prouděním, včetně aplikací při chlazení elektronických prvků. Podrobnější vztahy pro nucené chlazení a použití údajů k chladicím jednotkám a ventilátorům. Příklady šíření tepla ochlazovanou tyčí a deskou. Tabulka tepelných hodnot vybraných materiálů.

Toto je pracovní text. Uvítám všechny připomínky a upozornění na chyby.

s díky: Kazda

Základní vztahy pro výpočty chlazení

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. Z katalogů lze získat údaje o maximální přípustné teplotě nebo o dovoleném ztrátovém výkonu. Tento oddíl se bude zabývat významem těchto mezních parametrů a popíše postupy, které vedou k jejich dodržení.

Správná činnost polovodičových výkonových prvků je zaručena jen tehdy, když není překročena maximální teplota přechodu. Povolený ztrátový výkon součástky je udáván pro ideální chlazení a určitou teplotu okolí. Součástka ovšem obvykle musí pracovat při vyšší teplotě okolí a s reálným chlazením, které může být podstatně nižší než ideální. Pro tyto podmínky je nutné určit přípustný ztrátový výkon, při kterém nebude překročena teplota přechodu ani v nejhorsím případě. Když se tento výkon dále sníží, je součástka méně namáhána a zvyšuje se její spolehlivost a tím i spolehlivost celého zařízení. Dodržení tepelných režimů má tedy v elektronických výrobcích zásadní význam.

Výkon, teplo, teplota.

Když se ve hmotném tělese ztrácí výkon, zvyšuje se tepelná energie v jeho objemu a stoupá jeho teplota. Kdyby bylo těleso dokonale izolováno (kalorimetr), stoupala by jeho teplota lineárně. Rychlost zvyšování teploty závisí na dodávaném výkonu, hmotnosti tělesa a specifickém teple materiálu.

Z neizolovaného tělesa přechází teplo do okolí, je odváděno buď do dalšího pevného tělesa (chladič), nebo do okolního prostoru (vzduch). Přenos tepelné energie se zvyšuje s rozdílem teploty mezi tělesem a okolím. Při určité teplotě tělesa se odváděný výkon rovná výkonu přiváděnému, teplota dále nestoupá a je dosažen ustálený stav. Pomocí odváděného výkonu a rozdílu teplot je definován tepelný odpor.

$$R_{\vartheta} = \frac{\vartheta_a - \vartheta_m}{P} = \frac{\Delta\vartheta}{P} \quad [K/W]$$

kde:	ϑ_a	teplota okolí	[K (°C)]
	ϑ_m	teplota tělesa	[K (°C)]
	P	odváděný výkon [W]	
	R_{ϑ}	tepelný odpor	[K/W (°C/W)]

Při dodání energie A do tělesa o hmotnosti m , z látky se specifickým teplem c , vzroste jeho teplota o $\Delta\vartheta$. Při dodávaném výkonu P bude rychlost změny:

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = P \cdot c \cdot m$$

kde:	c	měrná energie látky	[J/kg]
	m	hmotnost tělesa	[kg]

Součin $c \cdot m$ se nazývá tepelná kapacita tělesa.

Starší jednotkou množství tepla je kalorie. Je definována jako množství tepla pro zvýšení teploty 1 g vody o 1 °C při 15 °C (1 cal₁₅). Mimoto byla definována mezinárodní kalorie:

1 cal_{IT} = 1/860 Wh (mezinárodní Watthodiny).

V některých pramenech jsou starší jednotky kalorie a kilokalorie stále používány.

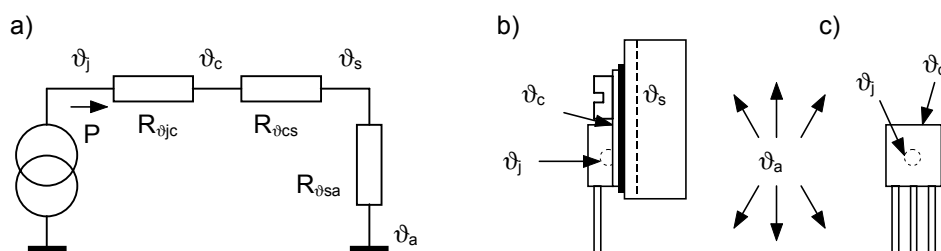
Převod: 1 cal_{IT} = 4,1868 J.

Postup při řešení tepelných poměrů elektronických součástek

Výpočet vychází ze ztrátového výkonu, který vzniká v systému polovodičové součástky (PN přechod diody, stabilizační diody, bipolárního nebo unipolárního tranzistoru, v systému integrovaného obvodu). 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. Obvykle se používají zkratky a indexy z anglicky nebo německy psaných katalogů.

index			veličina	název
j	junction	přechod (PN)	ϑ_j	teplota přechodu
c	case	pouzdro	ϑ_c	teplota pouzdra
s	heatsink	chladič	ϑ_s	teplota chladiče
a	ambient	okolí	ϑ_a	teplota okolí
			$R_{\vartheta_{jc}}$	tepelný odpor vnitřní
			$R_{\vartheta_{cs}}$	tepelný odpor styku s chladičem
G	Gehäuse	pouzdro	$R_{\vartheta_{sa}}$	tepelný odpor chladiče
K	Kühlkörper	chladič	R_{ϑ}	celkový tepelný odpor (= $R_{\vartheta_{jc}} + R_{\vartheta_{cs}} + R_{\vartheta_{sa}}$)
U	Umgebung	okolí	C_{ϑ_c}	tepelná kapacita pouzdra
			C_{ϑ_s}	tepelná kapacita chladiče

Náhradní schema tepelného okruhu pro ustálený stav (neuplatní se kapacity):



Z tohoto obvodu lze pro ustálený stav dosadit do výše uvedeného vzorce známé hodnoty ϑ_j , ϑ_a a P a dostaneme hodnotu výsledného tepelného odporu. Podle katalogových hodnot vybereme součásti, které splňují rovnici:

$$R_{\vartheta_{jc}} + R_{\vartheta_{cs}} + R_{\vartheta_{sa}} \leq R_{\vartheta}$$

Pokud můžeme použít katalogové hodnoty jak polovodičového prvku, tak chladiče, je návrh ukončen. Protože však údaje nebývají vždy dostupné a při technickém návrhu je vhodné postihnout další souvislosti, budou jednotlivé části okruhu probrány podrobněji.

U součástek s malým ztrátovým výkonem není obvykle nutné používat chladič (c). Udávaný tepelný odpor představuje celkový tepelný odpor mezi přechodem a okolím $R_{\vartheta_{ja}}$.

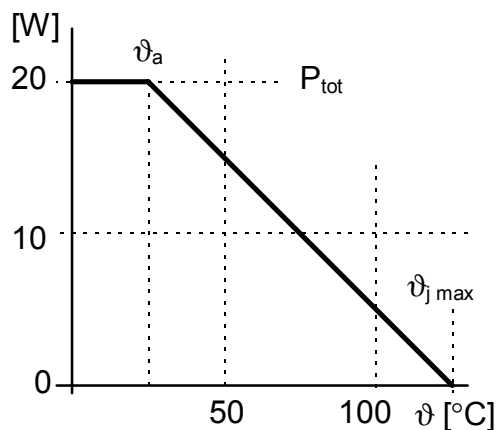
Popis částí náhradního tepelného okruhu:

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

V katalogu může být u dané součástky 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 $\vartheta_{j \max}$. Vnitřní tepelný odpor se pak vypočítá ze vztahu:

$$R_{\vartheta_{jc}} = (\vartheta_{j \max} - \vartheta_a) / P_{tot}$$

Při zvýšené teplotě okolí se musí ztrátový výkon snížit. Většinou je snížení předepsáno grafem, jehož příklad je na následujícím obrázku:



Pro tranzistor je udán dovolený ztrátový výkon 20 W 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.

Tato přímá redukce ztrátového výkonu platí pro provedení c) (bez chladiče). Pro provedení s chladičem (b) se z těchto hodnot vypočítá vnitřní tepelný odpor a použije se pro návrh chladiče.

Poznámka:

Hodnota P_{tot} bez údaje o mezní teplotě okolí, pro kterou platí, je pro výpočty bezcenná.

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_2O_3 , 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):

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_2O_3 , 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):

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

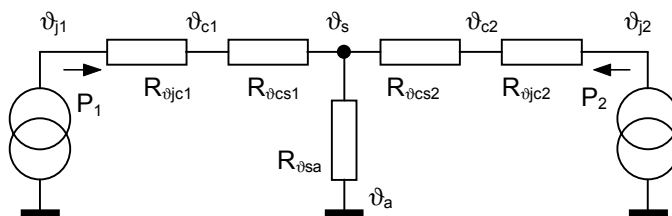
Tepelný odpor chladiče ($R_{\theta sa}$)

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:



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.

Skutečné pracovní podmínky je možné ověřit měřením. Je ovšem nutné, aby umístění snímače teploty neovlivnilo měření. Protože postup pro měření tepelného odporu není normalizován, mohou se naměřené hodnoty lišit od katalogových údajů

Tepelná kapacita pouzdra (C_{ϑ_c})

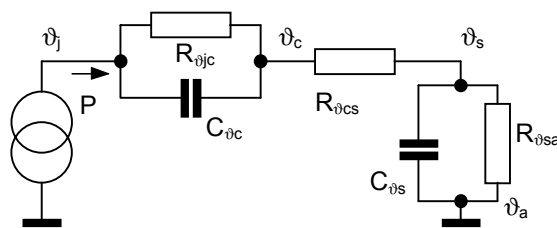
Uplatní se jen u velkých pouzder a při malé hmotě chladiče. Lze s ní také uvažovat při použití součástek bez chladiče. Projeví se také při měření na průběhu křivky oteplování.

Tepelná kapacita chladiče (C_{ϑ_s})

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. Tuto 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 následujících rozšířeného schematu:



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.

Příklad:

Chladič z hliníkové slitiny váží 420 g. Při výkonu 18 W bylo dosaženo ustáleného oteplení 30°C. Měrné teplo hliníku je 895 J/kg·°C.

tepelný odpor: $R_{\vartheta} = \Delta\vartheta / P = 30 / 18 = 1,67 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$

tepelná kapacita: $C_{\vartheta} = c \cdot m = 895 \cdot 0,42 = 376 \text{ J/}^{\circ}\text{C}$

časová konstanta: $\tau_{\vartheta} = R_{\vartheta} \cdot C_{\vartheta} = 376 \cdot 1,67 = 627 \text{ s} = 10,5 \text{ min.}$

Ze známých vztahů lze odvodit, že podle požadované přesnosti bude ustálený tepelný stav chladiče dosažen za 30 až 50 min.

Tepelná kapacita styku pouzdra a chladiče je zde zanedbána. Zjednodušen je také model vnitřní tepelné struktury pouzdra. V technických údajích výkonových prvků lze najít náhradní zapojení z několika seriově spojených paralelních kombinací RC, která slouží k vyšetřování tepelných režimů v impulsním provozu.

Konstrukční provedení chladičů.

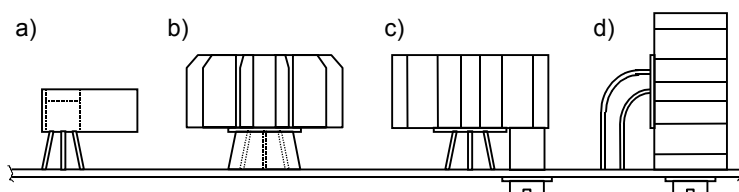
Provedení chladičů se liší podle jejich velikosti a hlavně také podle způsobu upevnění. Můžeme je zhruba rozdělit na chladiče upevněné

- na tranzistoru (malé)
- na desce plošných spojů (střední)
- na skříni přístroje (velké).

Pouze malé a lehké chladiče mohou být nasazeny na tranzistor bez dalších upevňovacích prvků. Ale i v tomto případě je vhodné použít pro zvýšení stability tranzistoru distanční podložku, která znemožní ohnutí přívodů. Vývody (nožky) tranzistorů slouží k připojení, nejsou navrženy pro mechanické namáhání! Chladič musí být upevněn k desce, nebo deska k chladiči vhodným mechanickým spojením (šrouby, nýty, pájecí kolíky). Zejména u zařízení, která budou podrobena chvění nebo vibracím, musí být toto spojení naprosto spolehlivé.

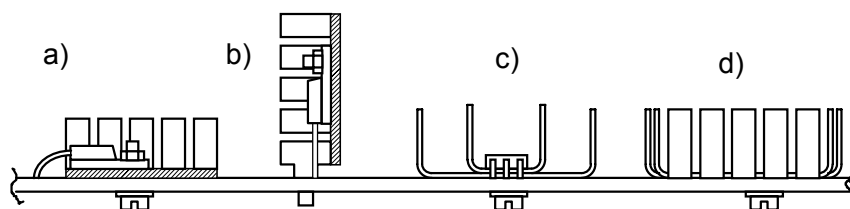
Příklady provedení chladičů

1. Malé chladičí prvky:



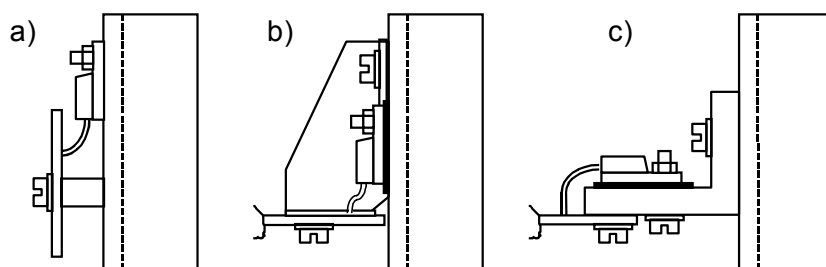
- a) „praporek“
- b) „hvězdička“, pružný plech, fosforbronz
- c) hvězdicový Al profil
- d) „hvězdička Al“, svisle

2. Chladiče střední, upevněné na desce



- a) chladič „U“
- b) chladič „U“ svisle, upevněný v desce
- c) dvojitý profil „U“
- d) „prstový“ čtvercový chladič

3. Chladiče velké, z tažených hliníkových profilů



- a) deska rovnoběžně s chladičem
- b) deska upevněna úhelníky z plechu
- c) hliníkový úhelník pro přenos tepla

Provedení tažených profilů pro chladiče



- a) tvar chladiče pro přirozené chlazení
- b) tvar chladiče, vhodný pro nucené chlazení

Poznámky ke konstrukčnímu provedení:**Ad 1. Malé chladičí prvky:**

Používají se k zlepšení tepelného režimu malých tranzistorů, které mají většinou válcovité pouzdro. Pozor: Kovová pouzdra jsou většinou spojena s kolektorem! Je nutné vyloučit možnost zkratu na chladič.

- a) Jednoduchý chladičí prvek lze vytvořit z proužku plechu. Stočený konec má průměr poněkud menší, než pouzdro tranzistoru. Na tranzistor se nasadí, může se zajistit lepidlem.
- b) Hvězdicovitý chladič z pružinového fosforbronzového plechu umožní nasazení s velkým přesahem, drží vlastní pružností. Je vhodné použít distanční podložku a vývody tranzistoru zahnout a dobře zapájet.
- c) Hvězdicovitý chladič z taženého hliníkového profilu má větší hmotnost a proto by měl být upevněn např. pomocí šroubu a distančního sloupku. Vývody se pájejí po namontování chladiče. Pro vyloučení namáhání vývodů je lze prohnut do tvaru mírného S.
- d) Některé profily hvězdicovitých chladičů mají jedno zesílené žebro a tím je možné je montovat na desku přímo. Vývody jsou přístupné pro měření.

Ad 2. Chladiče k upevnění na desku plošných spojů:

Používají se pro tranzistory s plochým pouzdem, které je určeno pro montáž na chladič. Obvykle neslouží k plnému využití tranzistoru s maximálním ztrátovým výkonem. Při použití izolačních podložek mohou být uzemněny, což je vhodné pro případné snížení elektromagnetického rušení. Chladiče jsou většinou vyrobeny z hliníkového plechu (duralu). Při prototypové výrobě se používají souvislé profily tvaru U. Prodávané chladiče mají boční stěny děleny do úzkých praporků, které dovolují lepší proudění vzduchu a zmenšují rozdíly při různých pracovních polohách. Chladiče U mají být montovány tak, aby v pracovní poloze byla jejich drážka svisle.

- a) Chladič tvaru U lze montovat přímo na desku. Jediným šroubkem se upevní chladič na desku a tranzistor na chladič. Zabírá značnou plochu desky. Vhodná montáž pro svisle umístěné desky.
- b) Chladič U lze montovat kolmo k desce. Zabírá na desce menší plochu, je nutné dobré mechanické upevnění. To se provádí pomocí plochých výstupků, které se zasunou do obdélníkových otvorů v desce a jejich konce se zkroutí (bezpečnější než zahnutí). Nakupované chladiče mají také kolíky pro upevnění zapájením. Vhodnější pro desky s vodorovnou pracovní polohou.
- c) Dvojitý nebo vícenásobný chladič tvaru U se používá tam, kde není po ruce vhodný profil. Zdvojení tloušťky profilu pod tranzistorem zlepší přestup tepla do chladiče, je ovšem nutné, aby styčné plochy byly rovné. Lze použít i tepelně vodivou pastu.
- d) „Prstový“ chladič je obvykle čtvercový, na všech stranách obvodu jsou vytvořeny úzké, navzájem přesazené praporky (prsty). Při daném objemu má dobrou účinnost a lze je montovat v prakticky libovolné poloze.

Ad 3. Chladiče z tažených hliníkových profilů

Tyto chladiče většinou tvoří zadní stěnu přístroje a jsou s ní pevně spojeny. Proto je nutné montovat tranzistory s izolační podložkou, výjimkou jsou integrované obvody a tranzistory s izolovanou plochou styku. Vývody tranzistorů neslouží k mechanickému upevnění a nemají být mechanicky namáhány. Deska musí být proto pevně smontována s chladičem a vývody tranzistorů mají být tvarovány tak, aby umožnily vyrovnání tepelných dilatací. Při kusové výrobě se deska smontuje s chladičem, tranzistory se přišroubují na chladič s patřičně tvarovanými vývody a v tomto uspořádání se zapájejí.

- a) Desku lze upevnit na chladič pomocí distančních sloupků a tranzistory vyhnout do patřičné polohy. Zůstává málo místa pro součástky. Pokud se tranzistor má montovat ze strany spojů, je nutné na to pamatovat při návrhu obrazce spojů. Vhodné pro menší desky (stabilizátory a pod.). Pamatovat také na otvory pro přišroubování desky!
- b) Chlazené tranzistory jsou vyrovnány na okraji desky, mechanické upevnění zajišťují úhelníky na okrajích desky. Běžné upevnění integrovaných výkonových zesilovačů elektroakustických přístrojů. Deska je upevněna k chladiči pomocí úhelníků.
- c) Desku plošných spojů a úhelník pro odvod tepla je možné kompletně smontovat a pak přišroubovat na chladič. Izolační podložka může být mezi úhelníkem a chladičem. Náročná výroba úhelníku, nutné dodržet rovinnost styčných ploch. Do výpočtu je nutné zahrnout tepelný odpor úhelníku. V některých případech může být toto provedení výhodné.

Volba profilu

Profil chladiče má zajistit dobrý přestup tepla z tranzistoru do tělesa chladiče a z chladiče do okolního vzduchu.

Přestup tepla z tranzistoru do tělesa chladiče závisí na tloušťce materiálu v místě upevnění chlazené součásti. Proto jsou vhodné chladiče se zesílením v místě styku (dvojitý plechový profil U - (1c), chladič pro nucené chlazení, provedení b)).

Praktická poučka pro přirozené chlazení říká, že drážka chladiče je účinná jen do hloubky, která se přibližně rovná její šířce. U hlubokých drážek je proudění vzduchu brzděno tak, že se hlubší části drážek na výsledné účinnosti chladiče prakticky nepodílejí. Proto by pro přirozené chlazení měly být výhodnější chladiče se širokými drážkami podle provedení a). Z porovnání chladičů podle údajů katalogu plyne, že vliv tohoto pravidla je zřejmý, ale snížení účinnosti se uplatní až při větší délce chladiče. U krátkých chladičů s hlubokými drážkami, se dosahuje nižší výsledný tepelný odpor. Takové chladiče zabírají větší objem, ale zabírají menší plochu. Dalším aspektem volby je cena.

Při nuceném chlazení prohání ventilátor vzduch prakticky celou plochou drážky a zvětšení plochy vede k zmenšení výsledného tepelného odporu. U speciálních profilů vyplňují žebra přibližně polovinu průřezu vzduchového kanálu. Ventilátor prohání vzduch celým průřezem mezery, tím se dosáhne dobrá účinnost chlazení.

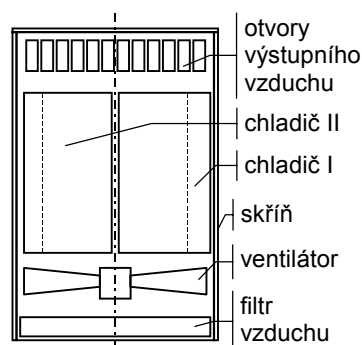
Při návrhu nuceného chlazení je nutné znát pracovní charakteristiky ventilátoru, vliv odporu žebor pro proudění a další údaje. Proto se obvykle používají typové chladičí jednotky od specializovaných firem.

Nucené chlazení

U přirozeného chlazení se předpokládá, že vzduch, který se ve styku s chladičem ohřívá, stoupá vzhůru, vzniká přirozené proudění, kterým je teplo z chladiče odváděno. Při nuceném chlazení je proudění vnuceno ventilátorem. S rychlostí vzduchu se zvyšuje odváděné teplo z chladiče a jeho tepelný odpor se tím snižuje. Katalogy uvádějí grafy této závislosti. Protože jde o experimentálně stanovené vztahy, připouštějí různé řešitelé jiná zjednodušení a křivky se do určité míry liší. Jako hrubé pravidlo můžeme uvést: při rychlosti 1,5 m/s se tepelný odpor sníží na polovinu, při 3 m/s asi na třetinu, při 6 m/s na pětinu a dále se prakticky nemění.

Množství vzduchu, potřebné pro chlazení lze odvodit z měrného tepla vzduchu. Měrné teplo plynů se udává pro grammolekulu (mol) plynu. Za normálních podmínek (tlak, teplota) můžeme pro přibližné výpočty můžeme brát jako přibližnou hodnotu měrného tepla 1 J/l.K. Pak můžeme např. odhadnout, že pro odvedení ztrátového výkonu 1 kW musíme zařízením prohánět 40 l/s a rozdíl teploty vstupního a výstupního vzduchu bude pak 25°C.

Ve větších nadmořských výškách je vzduch řidší a účinnost chlazení klesá. Proto bývá v technických podmínkách zařízení uvedena přípustná nadmořská výška.



Čistě nucené chlazení.

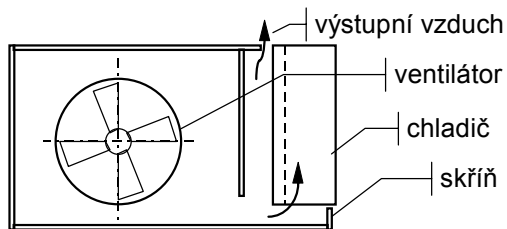
Aby byla zajištěna stejná rychlost proudění kolem žebor chladiče po celém jejich povrchu, umístí se chladičí profily do chladičích kanálů, kterými ventilátor prohání vzduch potřebnou rychlostí. Je jasné, že při zastavení ventilátoru by prudce stoupla teplota chladiče a došlo by ke zničení drahých součástek nebo i celého zařízení. Funkce ventilátoru musí být proto hlídána a při zastavení se zařízení vypne. V průmyslových aplikacích jsou tyto hlídací obvody pravidlem. Ve spotřební elektronice (počítače) se spoléhá na spolehlivost ventilátoru.

Větší jednotky se obvykle montují svisle, aby přirozená ventilace podporovala ventilaci nucenou.

Při tomto způsobu chlazení je třeba zajistit, aby se na chladiči neusazovaly nečistoty, které by znemožnily odvod tepla. Proto se před ventilátor zařazuje vzduchový filtr, který nečistoty zachytí. Ten se ovšem v prašném prostředí zanáší a snižuje množství chladičívho vzduchu a musí se také čistit. Zařízení s nuceným chlazením tedy vyžaduje pravidelnou údržbu.

Smíšené chlazení

Zejména u zařízení s proměnným ztrátovým výkonem (výkonové zesilovače akustických zařízení) je vhodné použít smíšené chlazení. V tomto případě není chladič zcela uzavřen, ale může vyzařovat určitý výkon do prostoru. Pak lze použít obvody pro hlídání teploty chladiče, které spínají ventilátor až tehdy, když teplota přestoupí určitou mez.



Výhody tohoto uspořádání jsou zřejmé: Když např. výkonový akustický zesilovač dává jen malý výkon, stačí přirozené chlazení a šum ventilátoru neruší. Když akustický výkon stoupne, sepne se ventilátor, ale akustický výkon je tak velký, že je šum ventilátoru bezpečně zamaskován. U ventilátorů se stejnosměrným pohonem lze také plynule regulovat otáčky v závislosti na teplotě.

Pomocí přepážek ve skříni lze proud vzduchu usměrnit, takže ventilátor chladí celou skříň.

Příklady výpočtu chlazení

Příklad 1: Kontrola zatížení tranzistoru z malým ztrátovým výkonem

Zkontrolujte tepelné zatížení tranzistoru BC527 pro teplotu okolí 45°C a navrhnete chladič.

Mezní hodnoty tranzistoru BC527 (pouzdro TO 92/SOT 30)

napětí	U_{CB0}	80 V	
proud kolektoru	I_{Cmax}	1 A	
ztrátový výkon	P_{tot}	0,625 W	bez chladiče, pro 25°C
teplota přechodu	ϑ_{jmax}	150°C	
tepelný odpor	$R_{\vartheta ja}$	200 K/W	bez chladiče
tepelný odpor vnitřní	$R_{\vartheta jc}$	83 K/W	



Kontrolní výpočet celkového tepelného odporu (bez chladiče)

$$R_{\vartheta ja} = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_{amax}}{P_{tot}} = \frac{150 - 25}{0,625} = 200 \quad [K/W] \quad \text{- souhlasí s katalogem.}$$

Q1: Jaký je maximální přípustný výkon bez chladiče při teplotě okolí 45°C?

Při teplotě okolí 25°C a při ztrátovém výkonu 0,625 W je teplota přechodu 150°C.
Při teplotě okolí 45°C výkonu se musí výkon snížit o $\Delta P = (45 - 25)/200 = 0,1$ W

R: Při teplotě okolí 45°C může být tranzistor zatížen ztrátovým výkonem 0,525 W.

Q2: Jaká bude teplota přechodu a teplota pouzdra při zatížení 0,5 W a okolí 45°C?

$$\begin{aligned} \vartheta_j &= \vartheta_a + R_{\vartheta ja} \cdot P = 45 + 200 \cdot 0,5 = 145^\circ\text{C} \\ \vartheta_c &= \vartheta_j - R_{\vartheta jc} \cdot P = 145 - 83 \cdot 0,5 = 103,5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

R: Teplota přechodu bude 145°C a teplota povrchu pouzdra 103,5°C.
(pozn.: teplotu povrchu plastového pouzdra lze měřit jen obtížně, sonda povrch ochladí.)

Q3: Jak se za stejných podmínek sníží teplota přechodu a povrchu, když použijeme hvězdičkový chladič (Ø13 x 5) s katalogovou hodnotou tepelného odporu 65 K/W?

Plocha styku je malá a není dokonalá. Odpor styku odhadneme 2 K/W.

$$\begin{aligned} R_{\vartheta} &= R_{\vartheta jc} + R_{\vartheta cs} + R_{\vartheta sa} = 83 + 2 + 65 = 150 \text{ K/W} \quad \text{- (celkový tepelný odpor)} \\ \vartheta_j &= \vartheta_a + R_{\vartheta} \cdot P = 45 + 150 \cdot 0,5 = 120^\circ\text{C} \\ \vartheta_c &= \vartheta_a + R_{\vartheta ca} \cdot P = 45 + 65 \cdot 0,5 = 77,5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

R: Teplota přechodu bude 120°C a teplota chladiče 77,5°C.
Při normální teplotě okolí (25°C) teplota chladiče nepřekročí 60°C.

Q4: Jaký může být maximální ztrátový výkon s chladičem?

$$P = (\vartheta_{jmax} - \vartheta_a) / R_{\vartheta} = (150 - 45) / 150 = 0,7 \text{ W}$$

R: S chladičem a při teplotě okolí 45°C dosáhne teplota přechodu maximální povolené hodnoty 150°C při ztrátovém výkonu 0,7 W.

Závěr:

Také u tranzistorů pro malé výkony je nutné kontrolovat tepelný režim, když se jejich ztrátový výkon blíží mezní hodnotě. Při použití chladiče lze získat bezpečnější odstup od mezních hodnot. Také je možné zvýšit zatížení tranzistoru, je ale nutné mít na paměti, že nasazený chladič může být při opravách zapomenut. Proto je třeba zvážit možnost současného výskytu této chyby s maximálním zatížením. Použití většího chladiče (48 K/W) nepředstavuje soustatné zlepšení.

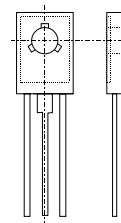
Vypočtené hodnoty jsou mezní, při snížení zatížení se zvýší spolehlivost a životnost.

Příklad 2: Seriový stabilizátor s tranzistorem středního výkonu

Navrhněte chladič pro tranzistor BD135, který pracuje jako výkonový prvek seriového stabilizátoru se vstupním napětím $U_1 = 12\text{ V}$ a výstupním napětím $U_2 = 5\text{ V}$, odebíraný proud 0 až 0,5 A. Omezení proudu 0,7 A při zkratu. Teplota okolí 45°C.

Mezní hodnoty tranzistoru BD135 (TO 126/SOT-32)

napětí	U_{CB0}	45 V	
proud kolektoru	I_{Cmax}	1,5 A	
ztrátový výkon	P_{tot}	8 W	teplota pouzdra 70°C
teplota přechodu	ϑ_{jmax}	150°C	
tepelný odpor	$R_{\vartheta ja}$	110 K/W	bez chladiče
tepelný odpor vnitřní	$R_{\vartheta jc}$	10 K/W	



Q1: Navrhněte chladič, upevnění se slídivou podložkou, styk potřen silikonovou vazelínou ($R_{\vartheta cs} = 6\text{ K/W}$).

Ztrátový výkon v normálním pracovním režimu:

$$P_z = (U_1 - U_2) \cdot I_2 = (12 - 5) \cdot 0,5 = 3,5\text{ W}$$

Celkový tepelný odpor:

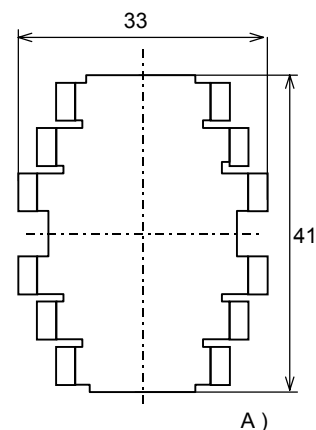
$$R_{\vartheta} = (\vartheta_j - \vartheta_a) / P_z = (150 - 45) / 3,5 = 30\text{ K/W}$$

Tepelný odpor chladiče:

$$R_{\vartheta sa} = R_{\vartheta} - R_{\vartheta jc} - R_{\vartheta cs} = 30 - 10 - 6 = 14\text{ K/W}$$

V katalogu se této hodnotě přibližují chladiče s půdorysem 42 x 33 mm s 12 „prsty“, které mají udávan tepelný odpor 14, 12, 10,5 a 9 K/W při výšce cca 13, 19, 26 a 32 mm (provedení A).

R: Pro bezpečnost vybereme chladič s tepelným odporem 10,5 K/W. Výsledný tepelný odpor bude 26,5 K/W



Q2: Zkontrolujte teplotu přechodu a chladiče v normálním pracovním režimu.

$$\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta ja} \cdot P = 45 + 26,5 \cdot 3,5 = 137,8^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_c = \vartheta_a + R_{\vartheta sa} \cdot P = 45 + 10,5 \cdot 3,5 = 81,8^\circ\text{C}$$

R: Teplota přechodu bude 137,8°C a teplota povrchu chladiče 81,8°C. Bezpečnostní rozdíl je 12°C, doporučuje se alespoň 20°C. Teplota chladiče je značně velká.

Q3: O kolik stupňů poklesnou tyto teploty, budeme-li volit další chladič z řady (provedení A)?

Další chladič má udávaný tepelný odpor 9 K/W.

Rozdíl je tedy 1,5 K/W.

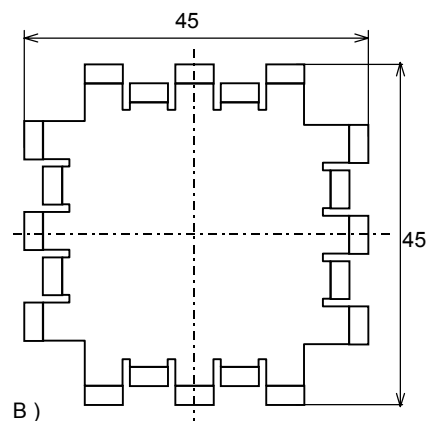
$$\Delta\vartheta = \Delta R_{\vartheta} \cdot P_z = -1,5 \cdot 3,5 = -5,25^\circ\text{C}$$

R: Bezpečnostní rozdíl teploty přechodu se zvýší na 17°C, chladič bude mít 77°C. Je vhodné použít ještě větší chladič.

Další typ chladiče (provedení B) má rozměry 45x45 mm a je v provedeních výškou 13 nebo 26 mm.

Tepelný odpor je uváděn 8 a 6 K/W.

Zvolíme typ 6 K/W. Teploty budou nižší o dalších 10,5°C, bezpečnostní rozdíl teploty přechodu bude 28°C.



Q4: Stanovte, za jakou dobu dosáhne teplota ustáleného stavu.

Podle katalogu je chladič vyroben z Al plechu síly 2,5 mm, plocha je cca 35 cm².

objem chladiče je	$V = s \cdot t = 35 \cdot 0,25$	$= 8,75 \text{ cm}^3$
hmotnost chladiče	$m = \rho \cdot V = 2,7 \cdot 8,75$	$\approx 24 \text{ g}$
tepelná kapacita	$C_{\vartheta} = c \cdot m = 895 \cdot 24 \cdot 10^{-3}$	$= 21,4 \text{ J/K}$
časová konstanta	$\tau_{\vartheta} = C_{\vartheta} \cdot R_{\vartheta} = 21,4 \cdot 6$	$= 128,4 \text{ s} \approx 2 \text{ min}$

R: Ustálený stav je dosažen po 3 - 5 τ_{ϑ} , teplotu můžeme brát jako ustálenou za 6 - 10 min.

Q5: Zkontrolujte teplotu přechodu při zkratu na výstupu a teplotě okolí 25°C.

Ztrátový výkon při zkratu:
 $P_k = U_1 \cdot I_2 = 12 \cdot 0,7 = 8,4 \text{ W}$.
 $\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta ja} \cdot P = 25 + 22 \cdot 8,4 = 209,8^{\circ}\text{C}$

R: Teplota přechodu při trvalém zkratu překročí povolenou teplotu přechodu a tranzistor se zničí. Teplota povrchu chladiče není třeba počítat. Při teplotě 25°C bude při normálním zatížení teplota přechodu 102°C. Vnitřní časová konstanta pouzdra je podstatně menší, proto při zvýšení ztrátového výkonu o 4,9 W stoupne teplota přechodu velmi rychle o 49°C a překročí teplotu povolenou. Ke zničení dojde v krátkém čase.

Q6: Jaké jsou cesty k zvýšení odolnosti při zkratu?

- použít tranzistor s vyšší povolenou teplotou přechodu
- zmenšit výsledný tepelný odpor
 ⇒ je třeba zmenšit vnitřní tepelný odpor, tepelný odpor styku nebo tepelný odpor chladiče.

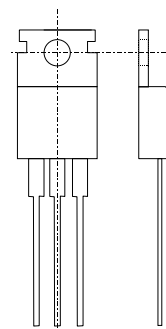
Potřebný tepelný odpor: $R_{\vartheta} = (\vartheta_j - \vartheta_a) / P_k = (150 - 45) / 8,4 = 12,5 \text{ K/W}$

tepelný odpor	$R_{\vartheta jc}$	$R_{\vartheta cs}$	$R_{\vartheta sa}$	R_{ϑ}
původní provedení	BD135 10 K/W	slída 6 K/W	6 K/W	22 K/W
změna	BD202 2,08 k/W	silikon. pryž 3 K/W	6 K/W	11,08 k/W

R1: V původním provedení představoval největší část výsledného tepelného odporu vnitřní odpor tranzistoru. Izolační podložka ze slídy má také značný tepelný odpor. Po zmenšení těchto hodnot není nutné měnit použitý chladič.

Mezní hodnoty tranzistoru BD201 (TO 220AB/SOT-78)

napětí	U_{CB0}	60 V	
proud kolektoru	I_{Cmax}	8 A	
ztrátový výkon	P_{tot}	60 W	teplota pouzdra 25°C
teplota přechodu	$\vartheta_{j max}$	150°C	
tepelný odpor	$R_{\vartheta ja}$	70 K/W	bez chladiče
tepelný odpor vnitřní	$R_{\vartheta jc}$	2,08 K/W	



Existuje také provedení izolované, které lze montovat bez podložky, BD201F. Tepelný odpor styku je pak několik desetin K/W, pro výpočet použijeme hodnotu 0,2 K/W.

Mezní hodnoty tranzistoru BD201F (SOT-186)

ztrátový výkon	P_{tot}	>20 W	teplota pouzdra 25°C
teplota přechodu	$\vartheta_{j max}$	150°C	
tepelný odpor vnitřní	$R_{\vartheta jc}$	6,3 K/W	

⇒ celkový tepelný odpor $R_{\vartheta} = R_{\vartheta jc} + R_{\vartheta cs} + R_{\vartheta sa} = 6,3 + 0,2 + 6 = 12,5 \text{ K/W}$

R2: Výsledný tepelný odpor lze také změnit volbou jiného typu tranzistoru. Lze použít i tranzistor izolovaný. Výsledné provedení zvolit podle ceny a dostupnosti součástek.

Q7: Jaké budou tepelné poměry při použití tranzistoru BD201F?

$$\begin{aligned} \text{Normální režim: } \vartheta_j &= \vartheta_a + R_{\vartheta ja} \cdot P = 45 + 12,5 \cdot 3,5 = 88,8^\circ\text{C} \\ \vartheta_c &= \vartheta_a + R_{\vartheta sa} \cdot P = 45 + 6 \cdot 3,5 = 66^\circ\text{C} \\ \text{Zkratový režim: } \vartheta_j &= \vartheta_a + R_{\vartheta ja} \cdot P_k = 45 + 12,5 \cdot 8,4 = 150^\circ\text{C} \\ \vartheta_c &= \vartheta_a + R_{\vartheta sa} \cdot P_k = 45 + 6 \cdot 8,4 = 95,4^\circ\text{C} \end{aligned}$$

R: Teplota přechodu ϑ_j nepřestoupí dovolenou hodnotu ani při zkratu. Teplota povrchu chladiče 66°C při mezní teplotě uvnitř přístroje. Nebezpečnou teplotu přestoupí pouze v poruchovém stavu. Výsledek návrhu lze považovat za uspokojivé.

Q8: Lze místo tranzistoru použít integrovaný stabilizátor 7805?

V katalogu najdeme pouze hodnotu dovoleného ztrátového výkonu $P_{tot} = 15 \text{ W}$ a maximální teplotu přechodu 150°C . Vnitřní omezení proudu 1 A (ztrátový výkon při zkratu 12 W).

Protože není uvedena teplota pouzdra při maximálním ztrátovém výkonu, bereme nejnižší a běžnou hodnotu 25°C . Tepelný odpor pak vyjde

$$R_{\vartheta ja} = \frac{\vartheta_{j \max} - \vartheta_{a \max}}{P_{tot}} = \frac{150 - 25}{15} = 8,34 \text{ K/W}$$

celkový tepelný odpor $R_{\vartheta} = R_{\vartheta jc} + R_{\vartheta cs} + R_{\vartheta sa} = 8,34 + 0,2 + 6 = 14,54 \text{ K/W}$

Normální režim: $\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta ja} \cdot P = 45 + 14,54 \cdot 3,5 = 95,9^\circ\text{C}$
teplota chladiče bude stejná jako v předchozím případě.

Zkratový režim: $\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta ja} \cdot P_k = 45 + 14,54 \cdot 12 = 219^\circ\text{C}$

Předpokládáme, že vnitřní tepelná ochrana sníží při zkratu proud tak, aby nedošlo ke zničení stabilizátoru.

R: Integrovaný stabilizátor s navrženým chladičem lze použít.

Pozor:

Postup s odhadováním hodnot lze použít pouze při návrhu prototypů. Pro průmyslovou výrobu a použití je nutné vždy vycházet z výrobcem zaručovaných mezních hodnot!

Q9: Je možné přibližně ověřit, jaký je skutečný vnitřní tepelný odpor stabilizátoru?

Pro odhad použijeme vypočtený tepelný odpor $14,6 \text{ K/W}$. Při teplotě okolí 20°C a předpokládaném omezení vnitřní teploty na 150°C bude ztrátový výkon:

$$P_k' = (\vartheta_j - \vartheta_a) / R_{\vartheta ja} = (150 - 20) / 14,6 = 8,9 \text{ W}$$

Při zkratovaném výstupu a vstupním napětí 12 V tomu odpovídá snížený zkratový proud:

$$I_k' = P_k' / U_1 = 8,9 / 12 = 0,742 \text{ A}$$

Teplota chladiče by přitom byla:

$$\vartheta_c = \vartheta_a + R_{\vartheta sa} \cdot P_k' = 20 + 6 \cdot 8,9 = 73,4^\circ\text{C}$$

R: Výstupní proud stabilizátoru je omezen na 1 A při teplotě přechodu menší než $\vartheta_{j \max}$. Při zkratu na výstupu bude zkratový proud zpočátku 1 A , pak bude klesat zhruba na vypočtenou hodnotu. Bude-li vypočtená hodnota vyšší, je výsledný tepelný odpor nižší, a také opačně. Pro spolehlivější vyhodnocení je třeba měřit také teplotu pouzdra. Lze předpokládat, že stabilizátor zkrat vydrží.

Upozornění:

Při zkouškách zařízení za mezních podmínek nelze nikdy vyloučit negativní výsledek. Konstruktor by měl zvážit nutnost takové zkoušky a s tím spojené náklady

Závěr k příkladu 2:

Při návrhu chladiče je třeba brát v úvahu také poruchové stavy. Při řešení je vhodné se zaměřit na složky, které nejvíce ovlivňují výsledný tepelný odpor. Při použití integrovaného stabilizátoru s vnitřní tepelnou ochranou je situace jednodušší. Při poruchovém stavu (zvýšení teploty přechodu) sníží vnitřní ochrana zkratový proud tak, aby povolená teplota přechodu nebyla překročena. Chladič je nutné volit tak, aby teplota přechodu nebyla překročena v normálním provozním stavu.

Příklad ukazuje, že lze postavit spolehlivě fungující obvod s použitím tranzistorů s vyšším dovoleným ztrátovým výkonem bez náročné změny velikosti chladiče.

Příklad 3: Chladič pro nízkofrekvenční výkonový zesilovač

Navrhnete chladič pro dvojitý nízkofrekvenční výkonový zesilovač (stereo), osazený dvěma integrovanými obvody TDA 2030, napájený symetricky napětím ± 12 V. Zátěž $2 \times 4\Omega$.

Chladič bude umístěn na vnější stěně přístroje, teplota okolí nepřestoupí 35°C .

Vybrané mezní a typické hodnoty TDA 2030:

hodnoty	podmínky , poznámka		
mezní:	napájecí napětí	± 18 V	
	špičkový výstupní proud	3,5 A	vnitřně omezen
	výkonová ztráta pouzdra	20 W	teplota pouzdra 90°C
	max. teplota přechodu	150°C	
	tepelný odpor pouzdra	3°C/W	
typické:	výstupní výkon (4Ω)	12 W	$k_d = 0,5\%$, 40 Hz -15 kHz
	výstupní výkon (4Ω)	18 W	$k_d = 10\%$, 1 kHz

Výpočet nejvyššího ztrátového výkonu

Pro výpočet budeme uvažovat s buzením sinusovým signálem. Na integrovaném obvodu, který budí konstantní zátěž (4Ω), bude maximální ztrátový výkon při takovém vybuzení, kdy výkon ztrátový (P_z) se rovná výkonu na zátěži (P_v). Příkon (P_p) pak bude dvojnásobkem výkonu.

Výkon na zátěži budeme počítat ze špičkové hodnoty sinusového signálu (U_m) :

$$P_v = U_{ef}^2 / R_L = U_m^2 / 2R_L$$

Při tomto výkonu odebírá zesilovač z jednoho zdroje (po dobu poloviny periody) proud I_n :

$$I_n = (1/\pi) \cdot I_m = (1/\pi) \cdot (U_m / R_L)$$

Příkon u obou zdrojů je pak:

$$P_p = 2 \cdot U_n \cdot I_n = (2/\pi) \cdot (U_m^2 / R_L)$$

Maximální ztrátový výkon bude při splnění podmínky $P_z = P_v$, tedy $P_z = P_p / 2$:

$$U_m^2 / 2R_L = U_n \cdot I_n = U_n \cdot (1/\pi) \cdot (U_m / R_L)$$

Po úpravě:

$$U_m = (2/\pi) \cdot U_n = 0,636 U_n$$

Při této hodnotě výstupního napětí je výkon právě:

$$P_v = U_m^2 / 2R_L = (2/\pi)^2 \cdot U_n^2 / 2R_L = 0,405 U_n^2 / 2R_L$$

Pro náš případ je maximální ztrátový výkon:

$$P_{z \max} = P_v = 0,405 U_n^2 / 2R_L = 0,405 \cdot 12^2 / (2 \cdot 4) = 7,295 \text{ W} \approx 7,3 \text{ W}$$

Oba integrované obvody budou na společném chladiči, proto musíme počítat s celkovým ztrátovým výkonem 14,6 W.

Z dokumentace není jasné, zda je chladič izolovaný, nebo zda je některý vývod (napájení) spojen s chladič plochou. Proto pro výpočet budeme uvažovat izolační podložku s tepelným odporem 2 K/W . Pro přestup tepla z jednoho integrovaného obvodu do chladiče budeme počítat s tepelným odporem 5 K/W . Protože je celkový výkon rozdělen na dva obvody, bude výsledný tepelný odpor představovat jejich paralelní spojení, tedy $2,5 \text{ K/W}$.

Z maximální teploty přechodu 150°C a nejvyšší teploty okolí 35°C vypočteme potřebný celkový tepelný odpor:

$$R_{\vartheta} = (\vartheta_j - \vartheta_a) / P_z = (150 - 35) / 14,6 = 7,88 \text{ K/W} \approx 7,9 \text{ K/W}$$

Tepelný odpor chladiče:

$$R_{\vartheta_{sa}} = R_{\vartheta} - (R_{\vartheta_{jc}} + R_{\vartheta_{cs}}) / 2 = 7,9 - 2,5 = 5,4 \text{ K/W}$$

V katalogu najdeme, že chladič s profilem SK182 (89 x 10 mm), délky 50 mm má tepelný odpor 4 K/W. Celkový tepelný odpor pak bude 6,9 K/W.

Provedeme kontrolu teplot přechodu a chladiče:

$$\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta_{ja}} \cdot P_{z \max} = 35 + 6,9 \cdot 14,6 = 135,7^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_s = \vartheta_a + R_{\vartheta_{sa}} \cdot P_{z \max} = 35 + 4,0 \cdot 14,6 = 94,4^\circ\text{C}$$

Teplota přechodu těsně vyhoví, teplota chladiče je příliš velká. Pro maximální teplotu chladiče 60°C vyjde odpor chladiče:

$$R_{\vartheta_{sa}} = (\vartheta_s - \vartheta_a) / P_z = (60 - 35) / 14,6 = 1,712 \text{ K/W} \approx 1,7 \text{ K/W}$$

V katalogu zjistíme, že této hodnotě vyhoví chladič s profilem SK58 (150 x 27 mm), délky 50 mm. Celkový tepelný odpor je 4,2 K/W. Kontrola teplot přechodu a chladiče:

$$\vartheta_j = \vartheta_a + R_{\vartheta_{ja}} \cdot P_{z \max} = 35 + 4,2 \cdot 14,6 = 96,3^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_s = \vartheta_a + R_{\vartheta_{sa}} \cdot P_{z \max} = 35 + 1,7 \cdot 14,6 = 59,8^\circ\text{C}$$

Q: Kontrola maximálního výstupního výkonu při sinusovém signálu (z typ. hodnot).

Pro zkreslení 10% a napájecí napětí $\pm 14 \text{ V}$ je udáván výkon 18 W na zátěži 4 Ω .

Při tomto výkonu je špičková hodnota výstupního napětí :

$$U_m = \sqrt{2 \cdot P \cdot R} = \sqrt{2 \cdot 18 \cdot 4} = 12 \text{ V}$$

Zbytkové napětí na výstupních tranzistorech je rozdíl napájecího špičkové hodnoty výstupního napětí. Předpokládáme, že při napájecím napětí 12 V bude zbytkové napětí stejné. Pak dostaneme špičkové napětí 10 V a tedy výstupní výkon 12,5 W při zkreslení 10%. Stejným postupem vypočítáme pro zkreslení 0,5% výkon 7,6 W.

R: Špičková hodnota výstupního proudu je 2,5 A, tomu odpovídá střední hodnota proudu, odebíraného z každého zdroje 0,8 A. Příkon ze zdrojů je tedy 16 W, ztrátový výkon tedy při plném vybuzení poklesl na 3,5 W.

Q: Zkrat na výstupu při teplotě okolí 25°C:

Integrovaný obvod omezí špičkovou hodnotu výstupního proudu na 3,5 A, při teplotě přechodu 150°C proud snižuje, aby se obvod nezničil. Předpokládejme zkrat na výstupu jednoho zesilovače.

Tepelný odpor musíme nyní vypočítat pro jedno pouzdro:

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_{sa}} + R_{\vartheta_{jc}} + R_{\vartheta_{cs}} = 1,7 + 3 + 2 = 6,7 \text{ K/W}$$

Ztrátový výkon pak bude:

$$P_z = (\vartheta_j - \vartheta_a) / R_{\vartheta} = (150 - 25) / 6,7 = 18,7 \text{ W}$$

R: Protože je výstupní napětí nulové, je celý tento výkon dodáván ze zdrojů. Každý zdroj bude proto zatížen proudem 0,78 A.

Upozornění: Tepelné zatížení při hudebním signálu je nižší (asi 75% sinusového), ale lze je obtížně definovat. Proto byl tento výpočet proveden pro sinusový signál.

Závěr pro příklad 3:

V tomto návrhu byl uveden postup výpočtu ztrátového výkonu integrovaného koncového nízkofrekvenčního zesilovače. Tento výpočet platí i pro zesilovače z diskretních součástek.

Návrh chladiče se dvěma oddělenými pouzdry (zdroji výkonu) je zjednodušen tím, že integrovaný obvod má vestavěnou ochranu před výkonovým přetížením, která chrání přímo systém zesilovače. Při špatném chlazení pak není dosahován plný výkon. U výkonových zesilovačů z diskretních součástek je nutné tepelné podmínky při zkratu řešit podrobněji.

Příklad 4: Dosažitelný výkon nízkofrekvenčního zesilovače při dané velikosti chladiče

Na zadní stěně skříně výkonového nf. zesilovače lze umístit chladič o šířce do 300 mm a výšce 100 mm. Jaký trvalý sinusový výkon můžeme získat při přirozeném chlazení a nejvyšší teplotě okolí 35°C?

Žebra chladiče mají být pro dobrou účinnost chladiče svislá. V katalogu najdeme pro tuto šířku dva typy: s výškou žebor 40 mm s tepelným odporem 0,4 K/W a s výškou žebor 83 mm s tepelným odporem 0,33 K/W. Podle předpokládané ceny zvolíme první typ.

Q1: Jaký ztrátový výkon může tento chladič rozptýlit při přirozeném chlazení?

Chceme se dodržet maximální teplotu chladiče 60°C. Pro může být ztrátový výkon:

$$P_z = (\vartheta_j - \vartheta_a) / R_{\vartheta sa} = (60 - 35) / 0,4 = 62,5 \text{ W}$$

R: Teplota chladiče nepřestoupí 60°C při teplotě okolí 35°C a ztrátovém výkonu 62,5 W.

Q2: Jaký má být vnitřní tepelný odpor a tepelný odpor přechodu, když je dovolená teplota přechodu 150°C a ztrátový výkon vzniká ve dvou koncových tranzistorech?

Ztrátový výkon je na obou tranzistorech stejný, tj. 31,25 W. Maximální přípustný rozdíl mezi chladičem a přechodem je tedy 90°C. Tepelný odpor může být nejvýše:

$$R_{\vartheta js} = (\vartheta_j - \vartheta_s) / P_z = (150 - 60) / 31,25 = 2,88 \text{ K/W} \approx 2,9 \text{ K/W}$$

Podle katalogových údajů má slídivá izolační podložka tloušťky 0,05 mm pro pouzdro T03 tepelný odpor 0,4 K/W (až 0,6 K/W). Na vnitřní odpor tranzistoru zbude 2,3 - 2,5 K/W. Celkový katalogový ztrátový výkon při teplotě pouzdra 25°C musí být pak větší než:

$$P_{tot} = (\vartheta_j - \vartheta_a) / R_{\vartheta sa} = (150 - 25) / (2,5...2,3) = 50...55 \text{ W}$$

R: Pro daný účel vyhoví dva tranzistory v kovovém pouzdru TO-3 s povoleným katalogovým výkonem nad 55 W. Vyhoví např. BD141 ($P_{tot} = 117 \text{ W}$ při 25°C, $R_{\vartheta jc} = 1,5 \text{ K/W}$). Je nutná dokonalá montáž izolační podložky s tepelně vodivou pastou.

Upozornění: Některé tranzistory, např. KD605 ($P_{tot} = 70 \text{ W}$), byly vyráběny v ocelovém pouzdře s měděnou vložkou $\varnothing 10 \text{ mm}$. V tom případě prochází teplo do chladiče přes menší plochu a podložka se uplatní s patřičně vyšším tepelným odporem.

Q3: Lze najít řešení s dostupnějšími tranzistory? V kovových pouzdrech TO3 se většinou vyrábějí tranzistory pro $P_{tot} = 100 \dots 200$, které jsou obvykle drahé.

R1: Obvyklé provedení výkonových tranzistorů má pouzdro TO-220. Plocha styku tohoto pouzdra je přibližně 1,5 cm², u pouzdra TO-3 je větší než 5 cm². Měli bychom tedy počítat s odporem slídivé podložky asi čtyřnásobným, tj. 1,6...2 K/W. Potřebovali bychom tedy tranzistor s vnitřním tepelným odporem 1,3...0,9 K/W ($P_{tot} = 100...150 \text{ W}$). Je také vhodné zvážit použití kvalitnější podložky ze silikonové gumy nebo z keramiky.

R2: Výkon také můžeme rozdělit na paralelně spojené tranzistory. Výsledný tepelný odpor dosáhneme spojením dvou tranzistorů s dvojnásobným tepelným odporem, tj 5,8 K/W. Když od této hodnoty odečteme tepelný odpor podložky, vychází vnitřní tepelný odpor tranzistoru 3,8 K/W. Tomu odpovídá max. ztrátový výkon $P_{tot} > 33 \text{ W}$.

Důležité upozornění: Bipolární tranzistory se nemohou přímo paralelně spojovat. Parametry tranzistorů nejsou dokonale stejné. Pak se přechod jednoho tranzistoru zahřeje více, jeho napětí mezi bází a emitorem poklesne, bude jím protékat větší bázevý proud a tedy i větší kolektorový proud. Tranzistor se stále více zahřívá, až dojde k jeho zničení. Rozdělení proudů se zajišťuje zapojením odporu do každého emitoru, na kterém je při maximálním pracovním proudu úbytek 0,1 až 0,15 V. U tranzistorů unipolárních, vybraných se shodným prahovým napětím, se kolektorový proud s teplotou zmenšuje a proudy se tak vyrovnají.

Q4: Jaký lze dosáhnout maximální sinusový výkon na výstupu pro zátěž 4Ω?

V předchozím příkladu byla odvozena podmínka, že maximální ztrátový výkon je:

$$P_{z\max} = P_v = 0,405 U_n^2 / 2R_L$$

Z toho vyjde hodnota napájecího napětí pro symetrické napájení:

$$U_n = \sqrt{\frac{2 \cdot R_L \cdot P_{z\max}}{0,405}} = 35,1 \text{ V}$$

Když budeme uvažovat zbytkové napětí na tranzistorech 3,1 V, vyjde nám špičkové výstupní napětí 32 V a z toho výstupní výkon 128 W.

R: Teoreticky můžeme dosáhnout výstupní výkon 128 W na zátěži 4Ω při symetrickém napájení ±35 V. Přitom ztrátový výkon nepřekročí předpokládanou hodnotu 62,5 W. V této úvaze není zahrnut poruchový stav, např. zkrat na výstupu.

Q5: Jak lze zajistit odolnost zesilovače před zkratem na výstupu?**R1: Omezení výstupního proudu:**

Při špičkovém výstupním napětí 32 V teče zátěži špičkový proud 8 A. Výstupní proud omezíme na 10 A při zkratu. Při zkratovaném výstupu poteče tento proud v každé půlperiodě střídavě z každého zdroje. Ztrátový výkon tedy bude $2 \cdot 35 \cdot 10 / 2 = 350 \text{ W}$. Tento výkon nelze uchladiť. Při opačném postupu by bylo nutné silně snížit výstupní výkon a použít tak velkoryse navrženého chladiče pouze pro odolnost při případném zkratu by byla rozmařilost.

R2: Omezení výstupního proudu se zpětně zahnutou charakteristikou (foldback):

Při zmenšení odporu zátěže a překročení hodnoty omezení proudu klesá napětí na zátěži. Ochranný obvod snižuje mezní proud podle napětí na zátěži a tím se omezuje ztrátový výkon. Výstupní charakteristika má charakter zdroje napětí v normální pracovní oblasti, ve které při zvyšování proudu zůstává napětí konstantní. Po překročení mezního proudu se charakteristika ohýbá směrem k počátku (fold-back). Pro daný ztrátový výkon by při zkratu měl celkový výstupní proud klesnout na hodnotu $62,5 / 35 = 1,78 \text{ A}$. Toto omezení je značné, praktická strmost zpětné větve charakteristiky bývá menší.

Obvykle se volí kompromis, poněkud se zmenší požadovaný výkon, tím se také sníží maximální výstupní proud, zkratový proud zůstává stejný a výsledná strmost zpětné větve je příznivější. Ve výpočtu lze také připustit vyšší teplotu chladiče v poruchovém stavu, nesmí se ale překročit maximální teplota tranzistoru. Postup lze také použít pro lineární stabilizátory. Základní vztahy jsou v následujícím oddílu, přesnější výpočet lze najít v příslušné literatuře.

R3: Odpojení výstupu:

Na výstupu zesilovače je zapojeno relé, které při překročení mezního proudu zátěž odpojí.

POZOR:

Podle náhradního schématu s tepelnými kapacitami je zřejmé, že při náhlém zvýšení ztrátového výkonu, např. při zkratu, stoupá nejprve teplota přechodu, teprve později teplota chladiče. Obvod musí být navržen se značnou bezpečností a tento postup má u obvodů z diskretních součástí jen omezenou účinnost. Jiná situace je u integrovaných obvodů, kde ochranný obvod měří přímo teplotu na čipu, na kterém jsou i zdroje výkonu.

Závěr pro příklad 4:

S přirozeným chlazením lze počítat u ztrátových výkonů řádu desítek Wattů. Je nutné zajistit dobrý tepelný styk a zamezit zvýšení výkonu při poruchovém stavu, pokud nejde o integrovaný obvod s vestavěnou tepelnou ochranou.

Pro ztrátové výkony nad 100 W je třeba uvažovat o nuceném chlazení.

Omezení ztrátového výkonu při zkratu

Při výpočtech ztrátového výkonu byly uváděny podmínky při zkratu. Bude vhodné uvést základní vztahy pro jejich výpočet. Jako příklad vezmeme lineární integrovaný stabilizátor, který má omezený výstupní proud a kromě toho ochranu před výkonovým přetížením.

Ta nedovolí, aby teplota přechodu překročila povolenou hodnotu.

Provedme rozbor pracovních podmínek takového stabilizátoru za všech okolností. Vyšetřování rozdělíme do tří oblastí:

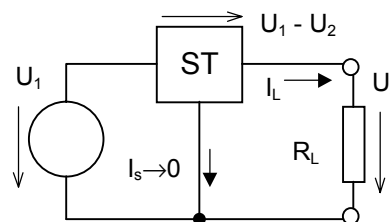
- normální pracovní oblast, výstupní proud nepřekročí povolenou mezní hodnotu
- oblast omezení výstupního proudu
- oblast omezení ztrátového výkonu

Tyto oblasti je možné vymezit výstupním proudem nebo hodnotou odporu zátěže. Pro výpočet ztrátového výkonu použijeme odpor zátěže jako nezávisle proměnnou. Od nekonečně velké hodnoty (výstup naprázdno) do maximálního povoleného proudu je normální pracovní oblast (a), oblasti b) a c) jsou oblasti přetížení. Rozbor končí nulovým odporem zátěže (výstup nakrátko, zkrat). Provedeme výpočet ztrátového výkonu v závislosti na odporu zátěže.

Jako příklad použijeme stabilizátor v následujícím zapojení (7805) a s hodnotami:

vstupní napětí	U_1	12 V
výstupní napětí	U_2	5 V
maximální proud	I_m	1 A
maximální výkon	P_m	9 W

Maximální výkon je vypočítán z tepelného odporu použitého chladiče a teploty, při které začíná působit výkonová ochrana.



Normální pracovní oblast stabilizátoru.

Klidový proud stabilizátoru I_s je podstatně menší než proud pracovní a můžeme ho proto zanedbat. Proud zátěže je pak stejný jako proud stabilizátorem. Výstupní napětí je konstantní. Ztrátový výkon stabilizátoru je:

$$P_z = (U_1 - U_2) \cdot I_L$$

Po dosazení za $I_L = U_2 / R_L$:

$$P_z = (U_1 - U_2) \cdot U_2 / R_L$$

Protože obě napětí U_1 a U_2 jsou konstanty a proměnná R_L je ve jmenovateli, je charakteristikou pro tuto oblast hyperbola a (viz graf). Při ideálním zdroji napětí U_1 by byl při zkratu ($R_L = 0$) ztrátový výkon nekonečně velký. Pro zdroje, u kterých nelze vyloučit zkrat výstupu, se proto provádí omezení výstupního proudu na konstantní hodnotu I_m . To je také náš případ.

Oblast konstantního výstupního proudu

Když je odpor zátěže menší než U_2 / I_m , je výstupní proud konstantní a výstupní napětí klesá. Napětí U_2 můžeme vyjádřit $U_2 = R_L \cdot I_m$. Pak pro ztrátový výkon vychází vztah:

$$P_z = (U_1 - U_2) \cdot I_m = U_1 \cdot I_m - R_L \cdot I_m^2$$

kde U_1 a I_m jsou konstanty.

Vztah tedy představuje rovnici přímky b , která protíná osy grafu P_z/R_L v bodech:

$$\text{osa X: } (P_z = 0) \quad R_L = U_1 / I_m = 12 \, \Omega$$

$$\text{osa Y: } (R_L = 0) \quad P_z = U_1 \cdot I_m = 12 \, \text{W}$$

Maximální ztrátový výkon při omezení proudu je tedy konečný, ale stále ještě je vyšší, než výkon, na který je navržen chladič.

Z rovnosti výkonů pro hyperbolu a a přímku b můžeme určit průsečíky:

$$(U_1 - U_2) \cdot U_2 / R_L = U_1 \cdot I_m - R_L \cdot I_m^2$$

$$35 / R_L = 12 - R_L$$

$$R_L^2 - 12 R_L + 35 = 0$$

Řešením kvadratické rovnice jsou hodnoty odporu zátěže 7 a 5 Ω . Meznímu proudu odpovídá hodnota 5 Ω , pro větší hodnoty (oblast a) bude ztrátový výkon určen hyperbolou a , pro menší hodnoty zátěže se bude měnit podle přímky b . Při vstupním napětí 10 V má rovnice jen jedno řešení. Při dalším zmenšování vstupního napětí bude oblast a končit prvním průsečíkem.

Oblast konstantního ztrátového výkonu

Při omezení proudu a snižování zátěže klesá výstupní napětí, zvyšuje se úbytek na stabilizátoru a ztrátový výkon stoupá. Při dosažení maximální teploty systému (čipu) sníží vestavěná tepelná ochrana výstupní proud tak, aby se obvod nezničil. Do stabilizátoru se dodává právě jen takový výkon, který chladič odvede při daném rozdílu teplot:

$$P_m = (\vartheta_j - \vartheta_a) / R_{\vartheta}$$

V grafu je tato oblast charakterizována vodorovnou přímkou *c*. Průsečík s *b* je:

$$P_m = U_1 \cdot I_m - R_L \cdot I_m^2$$

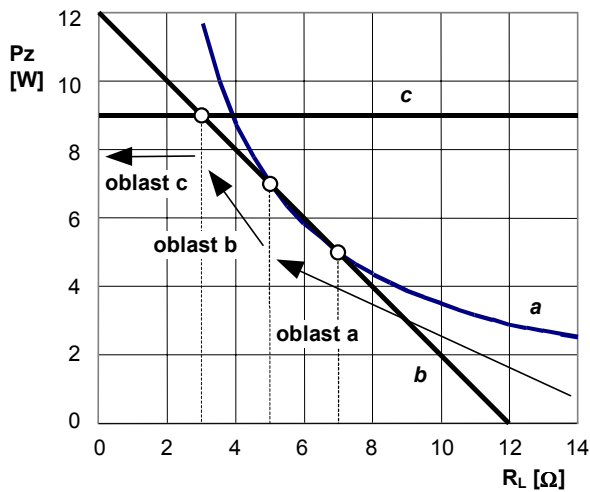
$$9 = 12 - R_L \Rightarrow R_L = 3 \Omega$$

Výstupní proud při zkratu (po ustálení teplot):

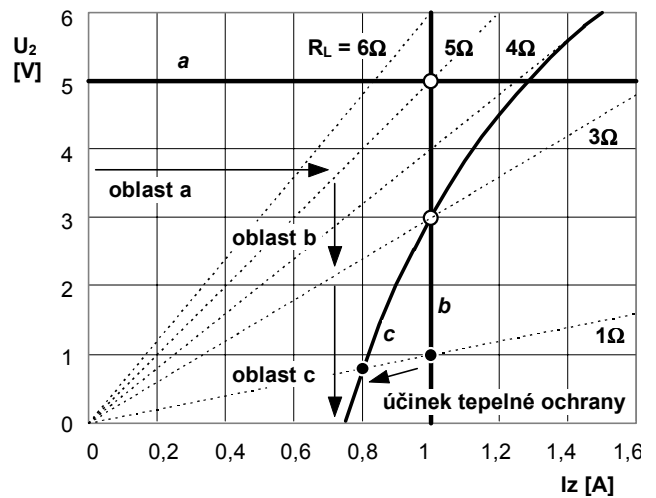
$$I_{mk} = P_m / U_1 = 9 / 12 = 0,75 \text{ A}$$

Bezprostředně po zkratu dodá stabilizátor proud 1 A, systém uvnitř pouzdra se rychle zahřeje a proud poklesne na hodnotu, danou vnitřním tepelným odporem a okamžitou teplotou chladiče. Postupně se zvyšuje také teplota chladiče a proud se ustálí na vypočtené hodnotě.

Závislost ztrátového výkonu na zátěži



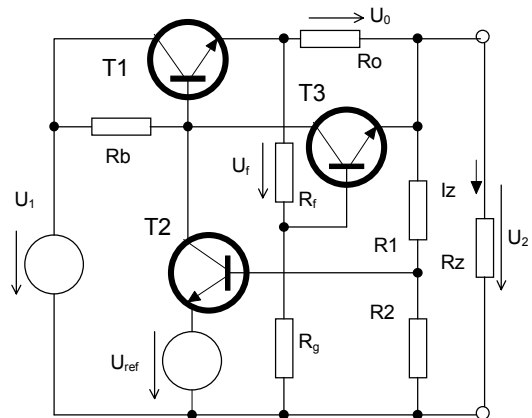
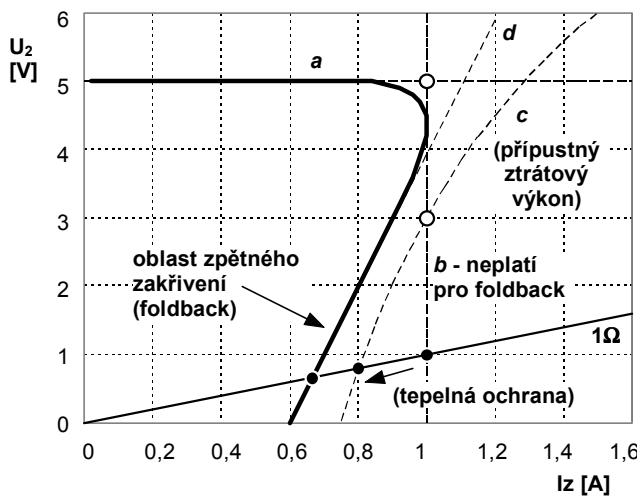
Výstupní charakteristika zdroje



Výstupní charakteristika zdroje s omezením proudu a výkonu

Pro stabilizátor s uvedenými typy ochran bude mít zatěžovací charakteristika také tři části. V normální pracovní oblasti *a* udržuje stabilizátor konstantní napětí a chová se jako ideální zdroj napětí. V oblasti *b* udržuje konstantní proud (ideální zdroj proudu) a podle odporu zátěže výstupní napětí klesá. Při překročení přípustného výkonu, např. při trvalé zátěži 1 Ω, výstupní proud poklesne a ustálí se na hodnotě 0,8 A. Změřená výstupní charakteristika se bude od těchto průběhů poněkud lišit

Stabilizátor se zpětným zakřivením výstupní charakteristiky (foldback)



Tepelná ochrana pracuje spolehlivě v integrovaných obvodech. Pokud je zapojení sestaveno z diskretních součástek, je odezva snímače teploty značně zpožděná a nelze dosáhnout optimálního účinku. V takových případech lze použít zapojení se zpětným zakřivením výstupní charakteristiky, které snižuje maximální proud v závislosti na výstupním napětí. V tomto případě nejde o přímé hlídání teploty čipu, proto je třeba ponechávat dostatečně bezpečnou vzdálenost od mezních hodnot. Provedeme porovnání s předchozím integrovaným stabilizátorem. Rozhodneme, že zpětné zakřivení bude probíhat podle přímky d . Pro jednoduchost budeme uvažovat stejný tepelný odpor výkonového tranzistoru a tedy i stejnou mezní křivku.

Návrh omezení proudu se zpětným zakřivením lze vysvětlit na jednoduchém stabilizátoru. Kdyby v zapojení nebyl použit dělič $R_f + R_g$, omezoval by tranzistor T3 výstupní proud na konstantní hodnotu, která se počítá ze známého vztahu:

$$I_m = U_{BE} / R_o$$

V děliči bude hodnota R_g značně větší než R_f , proto můžeme použít zjednodušené vztahy. Při zkratu je na výstupu nulové napětí. Na bázi T3 bude přibližně stejné, jako úbytek na R_o . Chceme dosáhnout, aby omezený proud při zkratu byl 0,6A. Hodnota R_o se vypočte:

$$R_o = U_{BE} / I_{mk} = 0,6 / 0,6 = 1 \Omega$$

Z přímky d vychází, že při výstupním napětí 5 V by měl být výstupní proud 1,1 A. Tomu odpovídá úbytek 1,1 V na R_o . Aby při této hodnotě se tranzistor T3 otevíral, potřebujeme na R_f úbytek 0,5 V. Zvolíme $R_g = 5,6 \text{ k}\Omega$. Protože na něm je 5,6 V, protéká jím právě 1 mA. Když zanedbáme proud báze T3, vychází hodnota $R_f = 500 \Omega$. Zvolíme hodnotu 470 Ω .

Tranzistor se otevírá postupně, proto výsledná charakteristika nebude ostrá, ale bude probíhat zhruba podle zakreslené křivky. V konečném návrhu je nutné počítat s proudy všech tranzistorů.

Podobné obvody se používají také u výkonových nízkofrekvenčních zesilovačů. Omezení zkratového proudu se musí počítat ze ztrátového výkonu zesilovače.

Podrobnější rozvahy o chlazení

Šířením tepla se zabývají různé technické obory. Teoretické základy šíření tepla jsou známé, ale jejich aplikace na jednotlivé případy není právě jednoduchá. Používané vztahy a koeficienty v vzorcích nejsou lineární. Při šíření tepla v kapalinách a plynech ovlivňují výsledek další veličiny, jako tlak, rychlost proudění, vazkost, vlhkost a podobně. Jejich vliv závisí na dalších podmínkách. Pro orientaci a snadnější zhodnocení výsledků budou uvedeny vybrané vztahy, které mohou poskytnout přesnější názor a umožní vybrat vhodné konstrukční uspořádání.

Teplu se šíří z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší třemi způsoby:

- ◆ vedením (kondukcí)
- ◆ sáláním (radiací)
- ◆ prouděním (konvekcí)

Uvnitř pevného tělesa se uvažuje šíření vedením, z tělesa ve vakuu se může teplo šířit jen sáláním. V kapalinách a plynech se uplatní všechny způsoby, jejich vliv však záleží na rychlosti kapaliny nebo plynu. Pokud je těleso (chladič) v klidném vzduchu, pohybuje se vzduch jen tím, že ohřátý vzduch stoupá vzhůru. Dochází jen k přirozenému pohybu vzduchu a mluvíme tedy o přirozeném chlazení. Odvod tepla se děje jak prouděním, tak sáláním.

Při zvýšení rychlosti vzduchu, např. ventilátorem, se podstatně zvýší množství tepla, odvedeného prouděním, složka sálavá se nemění. Při nuceném chlazení součástek v uzavřené skříni je obvykle vnější plocha skříně ve srovnání s plochou chladiče malá, takže sálavou složku lze zanedbat a zabývat se jen složkou konvektivní. V těchto případech mluvíme o chlazení nuceném.

Šíření tepla vedením

Pro řešení šíření tepla vedením se uplatňuje tepelná vodivost materiálu, průřez a délka. Tepelný odpor R_{ϑ} tyče, která má odvádět teplo se vypočítá ze vztahu:

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S}$$

kde: λ tepelná vodivost materiálu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$]
 l délka tyče [m]
 S průřez tyče [m^2]

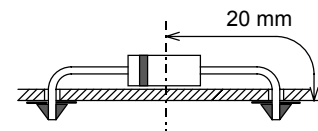
Vliv tepelného odporu nelze zanedbat tam, kde nedochází k ochlazování jiným způsobem a kde odvod tepla vedením převažuje.

Výpočet tepelného spádu na materiálu, který vede teplo, přichází v úvahu např.

- při odvodu tepla ze součástky pomocí vývodů,
- při vyhodnocení vlivu izolačních podložek a
- při návrhu konstrukčního provedení chladiče.

Příklad 5: Výpočet tepelného spádu na přívodech součástky

Stabilizační dioda má povolený ztrátový výkon 1,4W. Přívodní vodiče mají kruhový průřez, průměr je 0,86 mm. Dioda je zapájena do otvorů v desce plošných spojů do otvorů ve vzdálenosti 40 mm. Vypočítáme tepelný odpor přívodů.



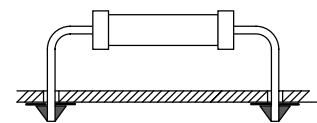
Každý přívod má délku 20 mm. Tepelný odpor obou přívodů je řazen paralelně, výsledný tepelný odpor bude poloviční. Stačí tedy vypočítat tepelný odpor drátu s průměrem 0,86 mm a délkou 10 mm. Tepelná vodivost mědi je $398 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{°C}$.

$$R_{\vartheta} = l / (\lambda \cdot S) = 10^{-2} / (398 \cdot \pi \cdot (0,86 \cdot 10^{-3})^2 / 4) = 43,25 \text{ °C/W}$$

Při zatížení mezním výkonem a při zanedbání ochlazování pouzdra bude teplota přechodu o 60°C vyšší, než teplota desky v místě zapájení. Když vývody zkrátíme na polovinu, snížíme oteplení přechodu o 30°C . Počítali jsme délku vývodu od zdroje tepla uprostřed pouzdra až do bodu zapájení, ve kterém je teplo rozváděno do desky. Zanedbali jsme chlazení pouzdra vzduchem. Někdy se může přestup tepla do desky zlepšit přitmělením pouzdra na desku.

Opačným způsobem se využívá tepelný odpor vývodů u výkonových odporů. Pracovní teplota tělísek může být při maximálním zatížení až 300°C (podle typu).

Aby nezahřívaly desku, montují se na delších vývodech nad deskou, aby ji nevytápěly. Tělísko je pak chlazeno vzduchem a deska se nepoškodí.



Příklad 6: Tepelný odpor izolační podložky

Tranzistor v pouzdru TO-220 je namontován na chladič se slidovou izolační podložkou tloušťky 0,05 mm, plocha styku je $1,5 \text{ cm}^2$. Tepelná vodivost slidy je $0,58 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$

$$R_{\vartheta} = l / (\lambda \cdot S) = 5 \cdot 10^{-5} / (0,58 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}) = 0,574 \text{ K/W} \approx 0,6 \text{ K/W}$$

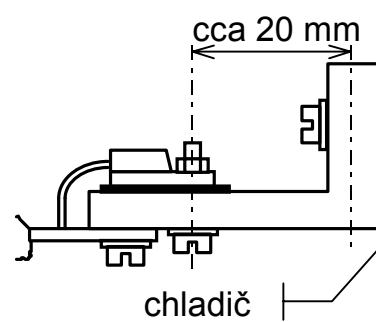
Při použití izolační podložky se výsledný tepelný odpor zvýší o $0,6 \text{ K/W}$.

Příklad 7: Vliv konstrukčního uspořádání

Výkonové tranzistory někdy nelze namontovat přímo na chladič. Tepelné spojení je provedeno hliníkovým úhelníkem s průřezem 5 x 50 mm a délkou 20 mm. ($\lambda_{Al} = 245 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$)

$$R_{\vartheta} = l / (\lambda \cdot S) = 2 \cdot 10^{-2} / (245 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = 0,32 \text{ K/W}$$

Tuto hodnotu musíme započítat do výsledného tepelného odporu. Uplatní se při větších odváděných výkonech, při menších výkonech se může zanedbat.



Šíření tepla sáláním.

Při šíření sáláním se uplatňuje provedení povrchu. Jako vztažný povrch se uvažuje absolutně černé těleso, které vyzáří nebo pohltí veškeré záření. S ním se porovnávají různé povrchy:

materiál, provedení	teplota	relativní pohltivost A
stříbro leštěné	230	0,02
chrom leštěný	150	0,058
pozinkovaný železný plech	30	0,23
ocel leštěná		0,29
železo, povrch slabě zrezivělý	20	0,61
sklo	20	0,094
cihly	20	0,093

Pro posouzení množství vyzářeného tepla trochu teorie:

Vyzářená energie závisí na čtvrté mocnině absolutní teploty T. Intenzita vyzářování černého tělesa H_0 je dána vzorcem:

$$H_0 = \sigma \cdot T^4,$$

kde $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4]$ - (Stefan - Boltzmannova konstanta)

V technických výpočtech se používá součinitel sálání černého tělesa, krátce sálavost:

$$C_0 = 10^8 \cdot \sigma$$

Pro šedá tělesa se vypočítá sálavost

$$C = C_0 \cdot A$$

Reálné těleso je obklopeno jinými tělesy, která rovněž sálají a naše těleso tuto energii pohlcuje. Když je teplota okolí T_2 vyšší než teplota tělesa T_1 , je přijatá sálavá energie větší než vyzářená a těleso se zahřívá, při opačném poměru teplot chladne. Množství tepla, odcházejícího z tělesa, závisí tedy na rozdílu teplot, na ploše povrchu tělesa a na relativní pohltivosti (provedení povrchu). Když je (sálající) plocha, která těleso obklopuje, podstatně větší než vlastní povrch tělesa (místnost, skříň), lze z předchozího odvodit vzorec pro množství vyzářené energie:

Pro teplotu okolí $T_2 = 300 \text{ K}$ (27°C) nám pak vyjde pro 1 m^2 plochy černého tělesa závislost množství vyzářené

$$Q = C_1 \cdot S_1 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

energie na vlastní teplotě tělesa T_1 :

$T_1 - T_2$ [K]	0	2	5	10	20	30	40	50
Q [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	0	12,4	31,4	64	130	213	298	392

Při normálních podmínkách chladiče můžeme počítat s rozdílem teplot 20 až 30°C, těleso nedokonale černé přitom může vyzářit za vteřinu 100 - 200 W z 1 m² plochy. U reálného chladiče (A = 0,85) představuje tedy sálavá složka tepelný odpor 20 až 15 K/W na každý dm² plochy. Tento odpor se ve výpočtu řadí paralelně k odporu, daného konvektivní složkou. U čistých kovových povrchů může sálavá složka klesnout na třetinu až čtvrtinu, u leštěných povrchů ještě více.

Proto se chladiče z hliníkových slitin černě eloxují. Přípustný je i nátěr vhodnou tmavou barvou, nejlépe matnou.

Upozornění: 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.

Závěr k šíření tepla sáláním:

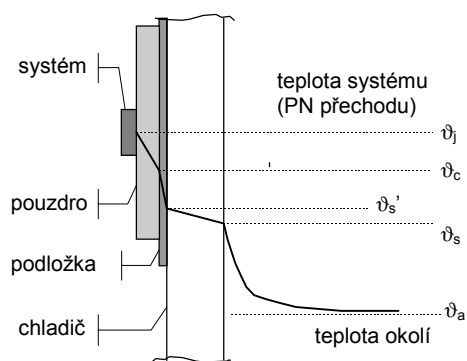
Tento oddíl se zabýval výpočtem sálavé složky při přenosu tepla z chladiče. Z výsledků plyne, že sálání není převažující, ale také ne zanedbatelnou složkou chlazení. Sálavá složka se zvětšuje s rozdílem teplot a je závislá na úpravě povrchu chladiče.

Žebra chladiče se uplatní při chlazení prouděním, zejména pak prouděním nuceným. Zvláště u chladičů s hustým a hlubokým žebrovaním se sálavá složka příliš neuplatní. Proto se také u chladičích profilů pro nucené chlazení často upouští od černění.

Tento výpočet může sloužit k posouzení podílu sálavé složky na celkovém účinku chladiče. Může vést např. k rozhodnutí o vypuštění nákladné povrchové úpravy, nebo také vysvětlí, proč se tato úprava příliš neprojevila.

Šíření tepla prouděním

Jako poslední způsob šíření tepla zůstalo šíření konvekcí, tedy prouděním. Byla řeč o dvojitým způsobu proudění, přirozeném a nuceném. V obou případech je teoretické řešení tak složité, že v knihách jsou uváděny pouze základní příklady, jako je proudění v trubkách. Pro tyto případy jsou vypočítány součinitele přestupu tepla rozhraním. Do výpočtu vstupuje průměr trubky, tepelná vodivost kapaliny, její objemové teplo, vazkost, hustota a rychlost proudění. Pokud je geometrie teplosměnné plochy komplikovaná, je řešení velmi nesnadné. Proto se často používají vzorce, které byly odvozeny experimentálně.



Na obrázku je naznačen průběh teploty na chlazené polovodičové součástce. Průběh teploty v pevných materiálech je zjednodušeně naznačen přímkou, jako by teplo prostupovalo stejným průřezem a uplatnil se jen tepelný spád, daný tepelnou vodivostí. Rozdíl $\vartheta_s - \vartheta_s'$ se pro různé body na desce liší. Při přestupu tepla z chladiče do vzduchu je naznačen průběh teploty vzduchu v těsné blízkosti povrchu chladiče. Tento průběh je silně závislý na rychlosti proudění okolního vzduchu.

Při průchodu tepla rozhraním (Horák, Technická fyzika 1961, str. 774) se počítá se součinitelem přestupu tepla α , jehož velikost pro klidný vzduch udává hodnotou 3 ... 10, pro

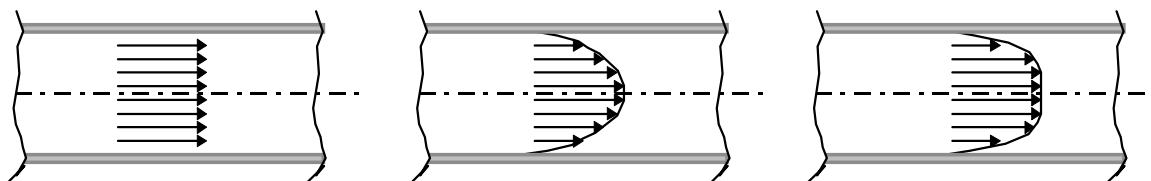
proudící vzduch 10 ... 500 [kcal. m⁻². °C⁻¹.h⁻¹], po přepočtu (1 cal = 4,1868 J) vychází pro klidný vzduch 3,5 ... 12, pro proudící 12 ... 580 [W. m⁻². °C⁻¹].

Z těchto údajů je zřejmé, že účinnost chlazení lze v širokých mezích ovlivnit. Zásadní ovšem je, znát způsob, jak neovlivnit chlazení negativně. Proto bude vhodné probrat některé základní poznatky z teorie proudění.

Nejjednodušším případem je proudění v trubce kruhového průřezu. U ideální kapaliny nebo plynu se neuvažuje vnitřní tření a proto je rychlost v celém průřezu stejná. Reálná kapalina je brzděna a rychlost u stěny je nulová, směrem ke středu roste. Průběh rychlosti závisí na tom, zda je proudění laminární nebo turbulentní. Rozmezí mezi laminárním a turbulentním prouděním je dán Reynoldsovým číslem Re, které je definováno:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad \text{kde} \quad \begin{array}{l} v_s - \text{střední rychlost} \\ d - \text{průměr trubky} \\ \nu - \text{kinematická viskozita, (vzduch, 1 bar: } \nu = 15 \cdot 10^{-6} - 16,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s při 20 - 40}^\circ\text{C)} \end{array}$$

Pro $Re < 2320$ je proudění laminární, při vyšších hodnotách turbulentní. Rychlostní profily pro jednotlivé druhy proudění jsou na obrázcích:



ideální kapalina (plyn)

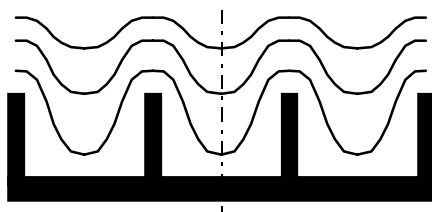
laminární proudění

turbulentní proudění

Při laminárním proudění jsou ztráty třením nižší, proto při chlazení přirozeném bude převažovat laminární proudění. Pro normální tlak a teplotu (1 bar, 20°C) bude součin

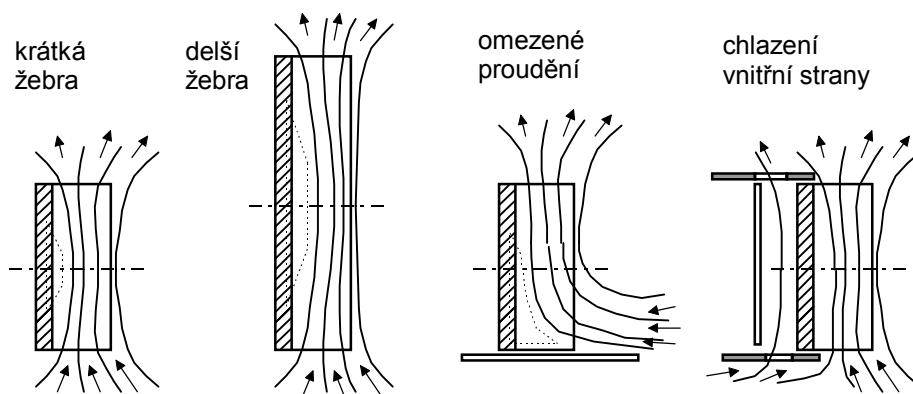
$$Re \cdot v = v \cdot d = 3,48 \cdot 10^{-2}$$

Katalog Alutronic udává pro závislost tepelného odporu na rychlosti vzduchu jako základ hodnotu 0,32 m/s. Pro tuto hodnotu rychlosti vychází, že v trubkách s průměrem menším než 100 mm bude proudění laminární. Mezi žebry chladiče bude při přirozeném chlazení docházet k laminárnímu proudění, rychlost při povrchu chladiče bude malá. Protože je drážka otevřená, můžeme předpokládat rozložení rychlosti jako v polovině trubky nebo v korytě (obvykle s obdélníkovým průřezem), které můžeme naznačit křivkami stejných rychlostí:



Je zřejmé, že u kořene žebry je rychlost proudění nejmenší a tato část žebra bude mít nejmenší účinnost. Tento vliv bude ještě výraznější u chladičů s vějířovitými žebry, protože se drážka mezi nimi značně zužuje. Chladič optimální z hlediska proudění by zaujímal velkou plochu, praktické provedení je vždy kompromisem.

U přirozeného chlazení se využívá přirozeného tahu, kdy teplý vzduch stoupá vzhůru. Tomuto tahu kladou nejmenší odpor svisle uspořádaná žebra. Z porovnání hodnot tepelného odporu chladičů stejného profilu a různé délky lze soudit, že u chladičů s delšími drážkami si můžeme proudění představit přibližně podle dalšího obrázku. Nejvyšší rychlost je na spodním a dolním okraji. Uprostřed, kde jsou obvykle umístěny výkonové prvky, je oblast s menší účinností, která je vyznačena přerušovanou čarou. Z obrázku je také zřejmé, že pro optimální proudění by měl být zachován volný přístup vzduchu z dolní strany chladiče. U vnějších chladičů to lze zajistit dostatečně vysokými nožkami, uvnitř skříně se desky s chladiči se montují svisle, ve spodní a horní stěně jsou větrací otvory. Omezením proudění na okrajích chladiče se jeho celková účinnost poněkud snižuje.



V některých případech se předpokládá, že uzavření chladiče z vnější strany vytvoří komín, který zvýší rychlost proudění. Obvykle není chladič tak vysoký, aby vznikl významný tah a předmět v blízkosti chladiče proudění spíše brzdí.

Jistý význam může mít vytvoření takového kanálu u zadní stěny chladiče. Účinnost chladiče se tím zvýší jen málo, ale chladič méně ohřívá vnitřek skříně. Mezera by měla být alespoň 2 cm (podle výšky). Většina z uvedených vlivů nemá rozhodující efekt, ale pokud se vyskytne několik takových omezení najednou, může se tím účinek chladiče značně snížit.

Podobný prostor je třeba zachovat i na vnější straně. Protože sem odchází větší množství tepla, má zmenšení mezery větší vliv. Za chladičem na zadní stěně by měla zůstat mezera alespoň 5 až 10 cm a měl by být zachován přístup vzduchu zdola a ze stran.

Ventilátory pro nucené chlazení

Přestup tepla z chladiče do proudícího vzduchu závisí na rychlosti proudění. U systémů nuceného chlazení udržuje rychlost proudění ventilátor. Výkon ventilátoru se udává v objemových jednotkách za jednotku času, např. v l/min nebo v m³/h. Pro zjištění rychlosti proudění v okolí chladiče potřebujeme znát další údaje. Při chodu naprázdno se veškerá energie, dodaná ventilátorem, spotřebuje na zvýšení kinetické energie vzduchu. Když je vzduch hnán potrubím, vznikají třením o stěny ztráty energie a tím tlaková ztráta. O tyto ztráty se snižuje množství kinetické energie, výsledná rychlost vzduchu se snižuje také. Tlaková ztráta v potrubí se zvětšuje s druhou mocninou rychlosti. Při změnách průřezu potrubí, změně směru, na vtoku a výtoku vznikají další tlakové ztráty. Závislost ventilátorem dodávaného množství vzduchu na výstupním tlaku není také lineární. Podrobné řešení takového systému spadá do oboru vzduchotechniky. Uvedeme proto jen základní vztahy, které umožní přibližný návrh pro nenáročné, ale potřebné případy.

Pro chlazení mohou být použity pro menší výkony ventilátory axiální (viz obrázek) nebo odstředivé, které jsou konstrukčně složitější a používají se pro větší tlaky. Axiální ventilátory jsou jednodušší a pro běžné případy chlazení postačují. Je však třeba znát, že jejich výkon může být značně snížen, když nepracují v podmínkách, pro které byly konstruovány. Např. vrtulka pro model letadla, umístěná v trubce, bude mít značně snížený výkon, naopak vrtulka tlakového ventilátoru nebude správně pracovat ve volném prostoru.

Ventilátory, určené pro chlazení elektronických zařízení jsou většinou určeny pro montáž do stěny skříně. Mohou pracovat jako sací nebo tlačné. Udává se, že pro některé typy je třeba zachovat za ventilátorem volný prostor (cca 2 cm, podle typu), aby se proud vzduchu ustálil.

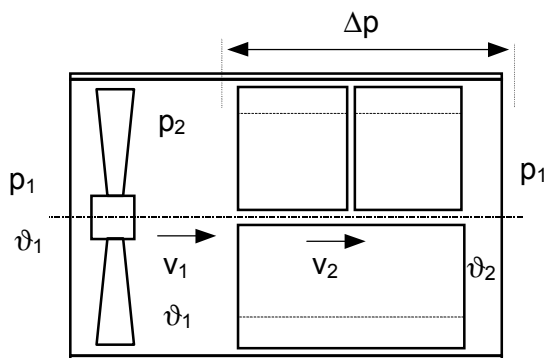
Měření rychlosti vzduchu vyžaduje zvláštní vybavení, které většinou není dostupné. Pracuje se v oblasti velmi malých tlakových rozdílů a s rychlostmi, které jsou na dolním rozsahu anemometrů. Protože se jedná především o chlazení, je vhodné místo těchto hodnot měřit teplotu chladiče a případně i teplotu výstupního vzduchu při určitém výkonu. Podle výsledků lze posoudit vhodnost uspořádání a případné konstrukční změny.

Množství vzduchu, potřebné pro chlazení lze odvodit z měrného tepla vzduchu.

Za normálních podmínek je vzduch složení převážně z 80% N₂ a 20% O₂. Měrné teplo dvouatomových plynů je v rozmezí 0 až 100°C je 4,99 až 5,05 kcal / kmol.K. Po přepočtu a zaokrouhlení je to 21 J/mol. Protože za normálních podmínek zaujímá grammolekula (mol) plynu 22,42 l, vychází na 1 litr vzduchu 1,07 J/l.K. Pro přibližné výpočty můžeme brát 1 J/l.K. Pak můžeme odhadnout, že pro odvedení ztrátového výkonu 1 kW musíme zařízením prohnát 40 l/s a rozdíl teploty vstupního a výstupního vzduchu bude přitom 25°C.

Ve větších nadmořských výškách je vzduch řidší a účinnost chlazení klesá. Proto je v technických podmínkách ochlazovaných zařízení omezena nadmořská výška.

Příklad tepelných poměrů v chladičí jednotce



Chladičí jednotka je vybavena ventilátorem s výkonem 40 m³/hod. Ve vzduchovém kanálu jsou umístěny tři chladičí segmenty. Pro úplný segment je v grafu pro tuto jednotku udáván tepelný odpor 0,35 K/W, pro segmenty poloviční délky 0,6 K/W.

Výkon na větším segmentu je 100 W, na menších po 50 W. Celkový výkon je 200 W, přepočtený výkon ventilátoru 11 l/s.

Podle předchozích údajů odhadneme, že teplota výstupního vzduchu theta₂ bude asi o 18°C vyšší, než vstupní teplota theta₁. Větší chladičí segment se ohřeje

o 100 · 0,35 = 35°C. Je zřejmé, že je více ochlazován na vstupní straně. Rozdíl teplot se vyrovnává vedením tepla průřezem chladiče. Při delších chladičích bude zřetelný rozdíl teplot mezi vstupní a výstupní stranou.

V horní části je chladič přerušen a k vyrovnání teplot nedojde. Teplota přední části chladiče se zvýší o 50 · 0,6 = 30°C. Teplota vstupního vzduchu pro zadní část chladiče bude přibližně o 9°C vyšší, proto můžeme očekávat, že při stejném výkonu může být oteplení zhruba 39°C.

Příklad volby ventilátoru (odhad)

Vybraný chladič s obrysem 79 x 80 mm bude umístěn v kanálu 90 x 90 mm. K použití jsou dva typy ventilátoru s udávaným dopravovaným objemem 10 l/s a 20 l/s. Základní tepelný odpor chladiče (SK89, délka 100 mm) je podle katalogu 1 K/W.

Plocha průřezu kanálu je 81 cm². Z náčrtu profilu chladiče přibližně určíme jeho plochu, cca 28 cm². Volná plocha kanálu je tedy s₂ = 0,53 dm². Předpokládejme, že tlaková ztráta v kanálu sníží dopravované množství o 20%. Rychlost vzduchu v prostoru žebër bude:

$$v_2 = 0,8 \cdot 10 / 0,53 = 1,5 \text{ m/s.}$$

Pro výkonnější ventilátor bude rychlost dvojnásobná, tj. 3 m/s. Z grafu v katalogu odečteme pro tyto hodnoty koeficienty 0,5 a 0,3. Výsledný tepelný odpor bude 0,5 a 0,3 K/W. Když připustíme oteplení chladiče 30°C, uchladí první ventilátor 60 W, druhý typ 100 W. Oteplení výstupního vzduchu můžeme očekávat 6 až 8°C. Podle těchto hodnot lze posoudit dosažení předpokládaných pracovních podmínek.

Vedení tepla v ochlazeném tělese.

Zatím jsme probírali odděleně jednotlivé vlivy, které se uplatňují při chlazení. Vybrali jsme převažující vliv a předpokládali, že účinek zbývajících můžeme zanedbat, nebo později k výsledku přičíst. V praktických případech se však uplatňují všechny vlivy najednou. Probereme dva základní příklady: šíření tepla ochlazenou tyčí a ochlazenou deskou.

Šíření tepla ochlazenou tyčí

Přestup tepla do prostoru se děje sáláním a prouděním. Vliv obou složek bude představován součinitelem přestupu tepla do prostoru, který budeme považovat za lineární. Množství tepla, procházející částí povrchu tělesa, bude závislé jen na uvažované ploše a na rozdílu teplot mezi tělesem a okolním vzduchem. Pro zjednodušení výrazů budeme uvažovat okolní teplotu za referenční, s hodnotou rovnou nule. Po zavedení činitele přestupu tepla z jednotkové plochy (α) můžeme udat množství tepla, unikající z části povrchu ΔS_p:

$$\Delta Q = \alpha \cdot \vartheta \cdot \Delta S_p$$

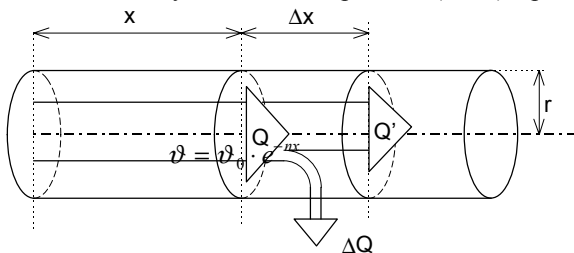
Když tělesem prochází tepelný tok Q, vznikne mezi body, vzdálenými o Δx, rozdíl teplot:

$$\Delta \vartheta = Q \cdot \Delta x / (\lambda \cdot S_t),$$

kde λ je tepelná vodivost materiálu tělesa a s_t je plocha průřezu, kolmého na tok Q.

Poměry pro část ochlazené tyče jsou zřejmé z obrázku.

Pro velmi dlouhou tyč, která má na počátku (x = 0) teplotu ϑ₀ lze odvodit vzorec pro teplotu ve vzdálenosti x:



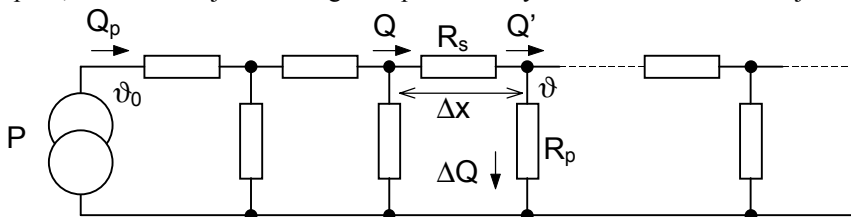
kde $n^2 = \frac{2\alpha}{\lambda r}$

Při známé teplotě na počátku lze tepelný tok na počátku vypočítat pomocí integrálu

$$Q = 2\pi \alpha r \vartheta_0 \cdot \int_0^\infty e^{-nx} dx = \pi r^2 \cdot \sqrt{2\alpha \lambda} \cdot \vartheta_0$$

tepelných toků všech elementárních ploch, kterými teplo přechází do prostoru.

Z tohoto vztahu můžeme vypočítat tepelný odpor nekonečně dlouhé tyče s kruhovým průřezem. Je zřejmé, že si tuto tyč můžeme představit jako řadu podélných tepelných odporů, na kterých vzniká tepelný spád a příčných odporů, které odvádějí část energie do prostoru. Výsledné náhradní schema je na dalším obrázku:



Pomocí tohoto zapojení je možné získat názor také ve složitějších případech. Je vhodné si povšimnout, že i nekonečně dlouhá tyč má konečný tepelný odpor a promyslet důsledky.

Šíření tepla ochlazovanou deskou

Pro odvození je vhodné uvažovat nekonečně rozlehlou desku, ochlazovanou po obou stranách. Na takové desce budou místa se stejnou teplotou vytvářet soustředné kružnice se středem ve zdroji tepla. Okraje desky budou na nulové teplotě. Když plochu rozdělíme na soustředná mezikružiči o konstantní šířce ΔR , bude se směrem ke středu zmenšovat ochlazovací plocha a tím také zmenšuje hodnota dílčího tepelného odporu R_p . Průřez plochy, kterou prochází tepelný tok se s poloměrem zmenšuje a tím se zvětšuje dílčí tepelný odpor R_s . Tepelný spád v těsném okolí tepelného zdroje bude tedy značný.

Řešení výsledného tepelného odporu desky s konečnými rozměry je dosti komplikované. Z těchto vztahů lze vycházet při odvození zjednodušených vzorců. Pro základní orientaci bude vhodné probrat jednoduchý příklad a provést rozbor výsledků. Jednou z možností je použití vzorce pro výpočet chladiče desky z konstrukčního katalogu Tesla.

Návrh chladiče desky podle konstrukčního katalogu Tesla

Pro tepelný odpor přibližně čtvercové desky, ochlazované z obou stran, se uvádí vzorec

$$R_{th} = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C^{0,25} + \frac{650}{A} \cdot C \quad [K \{ W; W/K \text{ cm, mm, cm}^2 \}]$$

kde: R_{th} tepelný odpor chladiče desky
 λ tepelná vodivost materiálu
 d tloušťka desky [mm]
 C korekční faktor

tepelná vodivost λ	[W/K cm]
měď	3,8
hliník	2,1
mosaz	1,1
ocel	0,46

korekční faktor	C
poloha vodorovná, povrch čistý	1
poloha svislá, povrch čistý	0,85
poloha vodorovná, povrch černěn	0,5
poloha svislá, povrch černěn	0,43

První zlomek ve vzorci závisí jen na materiálu desky a jeho tloušťce, představuje tepelný odpor nekonečně velké desky. Okraje takové desky by měly teplotu okolí, teplota bude zvýšena jen v okruhu kolem zdroje. Je tedy zřejmé, že pro chlazení má význam jen tato část desky.

Pozor: bude záviset také na ploše styku součásti s deskou.

Když tuto konstantní složku označíme R_{thk} a zavedeme koeficient pro plochu K_s , můžeme vzorec zjednodušit na tvar:

$$R_{th} = R_{thk} + \frac{K_s}{A}$$

Průběh má tvar hyperboly, posunutě o R_{thk} . Podobné průběhy jsou uváděny v katalogu *fischer elektronik* pro tepelný odpor daného profilu v závislosti na délce. Základní hodnoty v katalogích jsou však uváděny pro svislý chladič s černěným povrchem. Pro černěný svislý chladič by měl být koeficient $K_s = 650 \cdot C = 650 \cdot 0,43 = 280 \text{ K/W cm}^2$

Ze vzorce je zřejmé, že je zbytečné zvyšovat plochu chladiče, pokud nesnížíme také konstantní složku R_{thk} , která závisí na tloušťce desky. Tento vzorec je odvozen pro přibližně čtvercovou desku, se zdrojem tepla uprostřed. Teplo se tedy z něj šíří do desky do všech stran. Když bude zdroj tepla umístěn na okraji, zvětší se tato složka téměř dvakrát, protože se teplo nyní šíří jen v jednom půlkruhu. Při umístění zdroje na okraji je proto vhodné zvýšit tloušťku desky asi o 40%. Připevnění chlazené součástky do rohu není příliš vhodné.

Katalog *fischer elektronik* udává jako základní případ chladič černě eloxovaný, v poloze svislé. Pro neupravený povrch v přirozené barvě se má tato hodnota zvýšit o 10 až 15%, pro vodorovnou polohu zvýšit o 15 až 20%. To odpovídá koeficientu zvětšení 1,26 až 1,38. Podle katalogu Tesla by se tento vliv měl projevit koeficientem až 2,3. Záleží zřejmě na definici „čistého“ povrchu a také na pracovní teplotě chladiče.

Firma *fischer* doporučuje při kontrole teploty přechodu ponechávat pro bezpečnost teplotu asi o 20°C menší než je povolená maximální teplota. Zdá se tedy, že svým výpočtům důvěřuje, pravděpodobně proto, že uvedené křivky jsou kresleny v poloze, která chrání výrobce. Vyjádřit efektivní chladiční plochy žebrovaného chladiče je ovšem obtížné.

Přehled charakteristických hodnot některých materiálů:Molekulová tepla plynů při stálém objemu [kcal . °K⁻¹ . kmol⁻¹]:

θ [°C]	0	100		
N ₂ , O ₂ , CO (dvouatomové)	4,99	5,05		

kmol: tolik kg hmoty, kolik činí její molekulová hmota. Grammolekula plynu zaujímá za stejných podmínek (teplota, tlak) stejný objem, jako grammolekula jiného plynu.

Pro normální podmínky (1 atm = 760 torr) je objem jedné kilogrammolekuly:

$$v_0 = (22420,7 \pm 0,6) \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \approx 22,42 \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$$

Z toho můžeme počítat pro vzduch za normálních podmínek:

$$c_v = 5 / 22,42 \text{ [kcal} \cdot \text{°K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

Pevné materiály:

hustota ρ_{18} [kg m⁻³]

měrné teplo c_{18} [kcal . kg⁻¹ . °C⁻¹], přepočtená měrná tepelná energie c_p [Ws . kg⁻¹ . °C⁻¹],

tepelná vodivost λ_{18} [kcal . m⁻¹ . °C⁻¹ . s⁻¹], přepočtená tepel. vodivost λ_p [W . m⁻¹ . °C⁻¹],

materiál	ρ_{18}	c_{18}	$\lambda_{18} \cdot 10$	c_p	λ_p
hliník	2,72	0,214	0,585	895	245
měď	8,93	0,092	0,95	385	398
mosaz (%: 62 Cu, 38Zn)	cca 8,3	0,092	0,19	385	80
zinek	7,12	0,0925	0,268	387	112
stříbro	10,51	0,0556	1,0	233	419
zlato	19,3	0,0312	0,74	131	310
železo čisté	7,86	0,111	0,20	465	84
ocel litá	7,84	0,104 - 0,123	0,1 - 0,14	435 - 515	42 - 59
litina šedá	7,2	0,129	0,12 - 0,15	540	50 - 63
ocel nerez (74Fe,18Cr,8Ni)	7,86	0,115	0,036		48
olovo	11,34	0,031	0,083	348	35
sklo jenské	2,4 - 2,58	0,186 - 0,19	0,0023 - 0,0022	779 - 795	0,96 - 0,92
sklo křemenné	2,21	0,174	0,0032	728	1,34
vzduch, 18°C, [cal . cm ⁻¹ . °C ⁻¹ . s ⁻¹]	(str.769)		0,000 057		
Recknagel, [kcal/mh deg]					
sklo priemerné			0,50 - 0,90		0,58 - 1,05
plexisklo			0,16		0,18
slída			0,40 - 0,50		0,581
Vinidur			0,13		0,15
korek (korkové desky)	100 - 300		0,032-0,051		0,037-0,059
vzduch			0,02		0,021