

4 HLAJENJE VENTILOV

Med obratovanjem nastanejo na polprevodniških ventilih izgube v obliki toplote. Ker se ta toplota sprošča v silicijevi tabletki, ki ima zelo majhen volumen in debelino le nekaj desetink milimetra, se temperatura tabletki lahko zelo hitre dvigne na nedopustno velike vrednosti, če ne uspemo učinkovito odvajati te toplote prek hladilnih teles na okolico. Celotne izgube na ventilih so sestavljene iz:

- prevodnih izgub
- zapornih in blokirnih
- preklopnih
- krmilnih.

Temperatura zapornih plasti v polprevodniških ventilih ne sme med obratovanjem trajno prekoračiti nekaj zgornjih mej, ker se sicer najprej poslabšajo blokirna napetost, kritična strmina $(dU_T/dt)_{\text{krit}}$ in sprostitveni čas t_q . Ponavadi znaša ta zgornja dovoljena obratovalna temperatura pri tiristorjih 125°C , pri silicijevih diodah 200°C in pri močnostnih tranzistorjih 200°C . Seveda teh maksimalno dovoljenih temperatur ne moremo v normalnem obratovanju povsem izkoristiti, ker moramo računati z neko rezervo, če bi prišlo med obratovanjem do občasnih preobremenitev.

Med obratovanjem lahko toki zaradi motenj kratkotrajno porastejo čez nazivno vrednost in lahko temperaturo zapornih plasti **prehodno** nekoliko povečajo čez prej navedene vrednosti, ne da bi se zato karakteristike ventilov bistveno poslabšale. Pri večjih kratkotrajnih temperaturnih porastih (npr. pri tiristorjih med 200 in 400°C) pa že nastopijo trajne okvare oz. uničenja. Za polprevodniške ventile podajajo proizvajalci tudi najnižje dovoljene obratovalne temperature. Na primer pri tiristorjih je to med 0°C in -65°C , ker nastopijo tedaj potrebe po zelo velikem krmilnem toku.

Projektant mora problemu hlajenja ventilov posvetiti veliko pozornost, ker je to pogoj za dobro izkoriščenost ventilov in za zanesljivo obratovanje.

4.1 Električne izgube

Izgubno električno moč p na ventilu podaja produkt trenutne napetosti u_A in trenutnega toka i_A v ventilu:

$$p(t) = u_A \cdot i_A$$

Pri periodičnem obratovanju je srednja izgubna moč P :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_A \cdot i_A dt$$

pri čemer je T čas ene periode. Z integracijo po času lahko nato izračunamo izgubno energijo W , ki se sprošča kot toplota v ventilu.

Izgube prevajanja p_T nastopajo, ko ventil prevaja električni tok. Če upoštevamo u/i -karakteristiko silicijeve diode in tiristorja, je napetost (oz. napetostni padec) na prevajajočem ventilu:

$$u_T = U_{(TO)} + r_T \cdot i_T$$

Sledi povprečna izgubna moč zaradi prevajanja P_T :

$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T (U_{(TO)} + r_T \cdot i_T) \cdot i_T dt = U_{(TO)} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_T dt + r_T \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_T^2 dt = U_{(TO)} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{Aef}^2$$

Vidimo, da so izgube prevajanja odvisne tako od aritmetične srednje vrednosti ventilskega toka I_{TAV} , kakor tudi od njegove efektivne vrednosti I_{Aef} . To pa pomeni, da moramo pri računanju dovoljenih mejnih ventilskih tokov vedno upoštevati **obliko** periodičnega ventilskega toka!

Pri ventilih, ki obratujejo z nizkimi frekvenacmi do 50/60 Hz, prispevajo k celotnim ventilskim izgubam v glavnem le izgube prevajanja p_T .

Izgube zapiranja p_R nastopijo na ventilu, ko le-ta ne prevaja (ko je inverzno polariziran) in ko teče le zelo majhen inverzni tok i_R . Izgubna moč:

$$p_R = u_R \cdot i_R$$

je zelo majhna in je v skupni bilanci ponavadi zanemarljiva.

Podobno so **izgube blokiranja** p_D , ki nastopijo na tiristorju, ko le-ta blokira napetost u_D in teče pri tem le zelo majhen blokirni tok i_D (glej sl. 3.2). Tudi ta izgubna moč:

$$p_D = u_D \cdot i_D$$

je zelo majhna in v skupni bilanci zanemarljiva.

Ko prehajajo ventili iz zapornega (oz. blokirnega pri tiristorju) v prevodno stanje in narobe, nastopajo na njih t.i. **dinamične** ali **preklopne izgube**.

V prehodnih pojavih so lahko izgubne moči p zelo velike, saj znašajo npr. pri prehodu tiristorja iz blokirnega v prevodno stanje v tokokrogih s standardnimi komutacijskimi induktivnostmi nekaj kW. Ker pa so prehodi (preklopi) hitri in trajajo le nekaj μ s, je sproščena izgubna električna oz. toplotna energija praviloma zelo majhna in jo lahko zato v skupni bilanci zanemarimo. Vendar le tako dolgo, dokler obratujejo ventili periodično s preklopnimi frekvencami do 50/60 Hz. Pri višjih preklopnih frekvencah nekaj 100 Hz ali celo nekaj kHz pa se preklopne izgube seštevajo in v skupni energetski izgubni bilanci celo prevladujejo! Tako lahko pri silicijevih diodah in tiristorjih, ki obratujejo s preklopnimi frekvencami nad 1 kHz, in pri močnostnih tranzistorjih, ki obratujejo s preklopnimi frekvencami več 10 kHz do 100 kHz, vse ostale izgube v primerjavi s preklopnimi zanemarimo. Razumljivo je, da smemo zato ventile, ki obratujejo z velikimi delovnimi frekvencami, tokovno precej manj obremeniti.

Pri krmiljenih ventilih nastopajo dodatno še **krmilne izgube** p_G . Pri tiristorjih povzroči krmilni tok i_G trenutno krmilno izgubno moč:

$$p_G = u_G \cdot i_G$$

Srednjo krmilno moč P_G lahko izračunamo iz krmilne karakteristike tiristorja in iz oblike krmilnega tokovnega impulza. Pri pravilno izvedenih proženjih je ta izgubna moč zanemarljivo majhna, razen kadar obratujemo z zelo visokimi frekvencami.

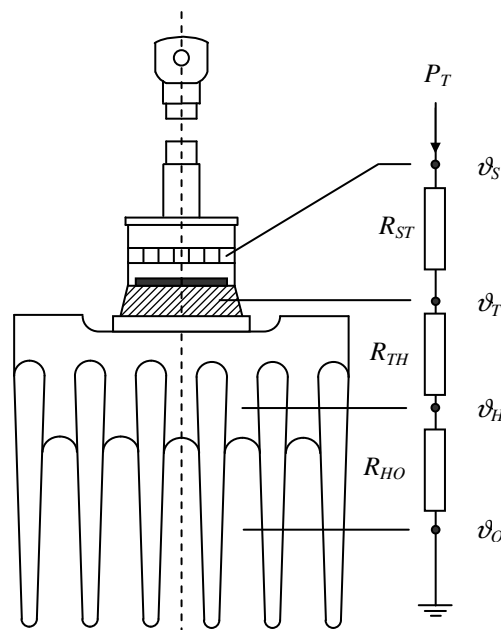
4.2 Termično nadomestno vezje

Zaradi električnih izgub prihaja do segrevanja ventilov. Da temperatura silicijeve tabletko ne prekorači dopustne vrednosti, moramo poskrbeti za dobro odvajanje izgubne toplote iz tabletko na okolico, t.j. za njeno hlajenje. Zato nameščamo ventile na ustrezna hladilna telesa, ki naj omogočijo čim boljše odvajanje toplote na okolico (največkrat je to kar okoliški zrak). Čim boljše je odvajanje oz. hlajenje, tem bolj lahko ventil tokovno obremenimo, ne da bi presegli dopustno temperaturo tabletko. Natančen toplotni izračun ni možen. Za poenostavljeno računanje pa si lahko pomagamo s termičnim nadomestnim vezjem, ki ga kaže npr. sl. 4.1. Posameznim delom dodelimo temperature ϑ_S , ϑ_T , ϑ_H in ϑ_O . Izgubna moč P prehaja iz tabletko na okolico prek termičnih upornosti med posameznimi deli: R_{ST} , R_{TH} in R_{HO} . S tem poenostavljenim nadomestnim vezjem lahko računamo podobno kot z električnim vezjem, le da nastopajo namesto električnih

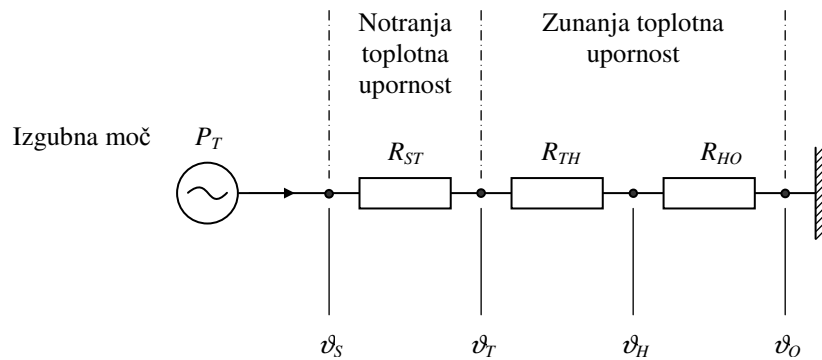
napetosti sedaj temperaturne razlike, namesto električnega toka izgubna moč P in namesto električnih upornosti termične upornosti. S sl. 4.2 lahko ob upoštevanju trajnega (stacionarnega) obratovanja s konstantno izgubno močjo P v tabletki, ki se pretaka na okolico, napišemo enačbo ustrezno ohmovemu zakonu:

$$\vartheta_S = P \cdot (R_{ST} + R_{TH} + R_{HO}) + \vartheta_O$$

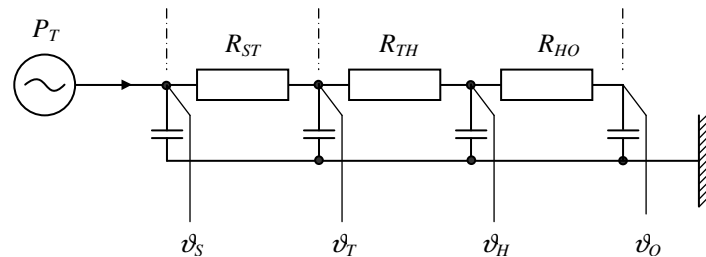
ϑ_S je srednja temperatura tabletki; temperaturna razlika $\vartheta_S - \vartheta_O$ (ustreza električni napetosti!) povzroča pretok moči P čez termične upornosti. V enačbi so poznane: izgubna moč P , temperatura ϑ_O okoliškega hladilnega medija (npr. zraka), toplotna upornost R_{ST} (podajajo jo proizvajalci ventila) ter toplotna upornost $R_{TH} + R_{HO}$, ki upošteva toplotno prehodnost med telesom ventila, hladilnim telesom in okoliškim hladilnim medijem. Izračunana temperatura tabletki ϑ_S mora biti nižja od dopustne vrednosti. Da dosežemo čim manjše vrednosti za R_{TH} , moramo napraviti čim boljši termični stik med telesom ventila in med hladilnim telesom: stični ploskvi morata biti veliki, ravni in tesni, pomagamo pa si lahko še s posebnimi toplotno prevodnimi pastami (masami) itd. Vrednost R_{HO} je odvisna od velikosti in izvedbe hladilnega telesa ter od načina hlajenja (naravno-pospešeno, zračno-tekočinsko). Iz nadomestne sheme na sl. 4.2 lahko izračunamo tudi vmesni temperaturi ϑ_H in ϑ_T . Če izgubna moč P v tabletki ni konstantna, (npr. pri spremenljivih tokih) so tudi vse temperature, razen ϑ_O , podvržene spremembam.



Slika 4.1: Polprevodniški ventil s hladilnim telesom za zračno hlajenje ter termična nadomestna shema za stacionarne razmere: ϑ_S -temperatura silicijeve tabletki, ϑ_T -temperatura telesa ventila, ϑ_H -temperatura hladilnega telesa, ϑ_O – temperatura okoliškega zraka, R_{ST} -termična upornost med tabletko in telesom ventila, R_{TH} -termična upornost med telesom ventila in hladilnim telesom, R_{HO} -termična upornost med hladilnim telesom in okolico



Slika 4.2: Poenostavljeno nadomestno termično vezje tiristorja s hladilnim telesom za stacionarno obratovanje



Slika 4.3: Termično nadomestno vezje nekega tiristorja s hladilnim telesom za impulzno obratovanje

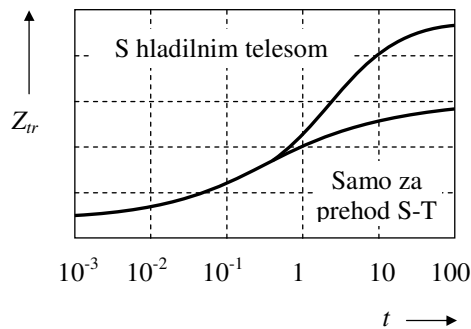
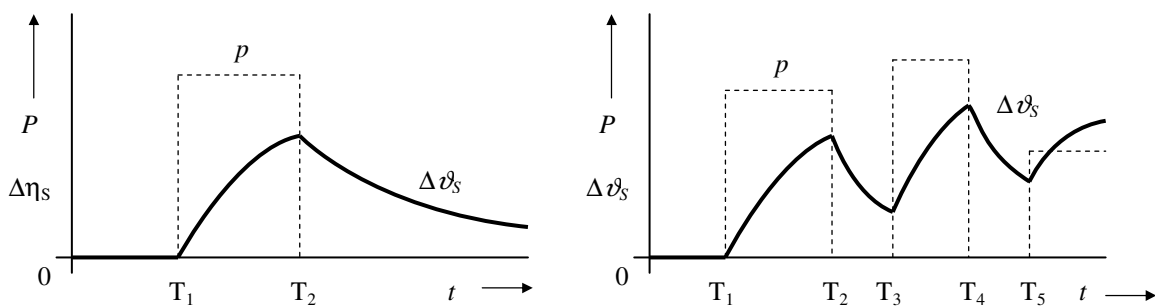
Nadomestno termično vezje na sl.4.2 ne upošteva toplotnih kapacitet posameznih delov. Zato to vezje ni primerno za izračun, če obratuje ventil nestacionarno ali pulzno (prekinjevalno). V tem primeru lahko uporabimo nadomestno vezje na sl. 4.3. V njem so dodatno upoštewane toplotne kapacitete posameznih delov (s toplotnimi kapacitivnostmi). Vsak nastali RC-člen ima svojo termično časovno konstanto:

$$\tau_n = R_n \cdot C_n$$

Iz te verige RC-členov izhaja t.i. transientna toplotna upornost Z_{tr} :

$$Z_{tr} = \sum_{n=1}^{n=m} R_n \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right]$$

Ta upornost je lahko podana grafično v odvisnosti od časa (sl.4.4). Z njeno pomočjo lahko izračunamo temperaturo tabletko v_S pri različnih časovnih potekih izgubne moči $p(t)$. Sl. 4.5 kaže takšen potek za dva različna poteka impulzov $p(t)$.

Slika 4.4: Transientna toplotna upornost Z_{tr} nekega tiristorja s hladilnim telesomSlika 4.5: Temperatura tabletki v_s pri: (a) posamičnih pulzih izgubne moči, (b) pri zaporednih pulzih izgubne moči

4.3 Hladilna telesa in namestitvev ventilov

Večina proizvajalcev ventilov dobavlja tudi ustrezna hladilna telesa. Toplotna upornost $R_{TH} + R_{HO}$ hladilnega telesa je odvisna od materiala, od konstrukcije in od velikosti hladilnega telesa ter od hitrosti oplakovanja s hladilnim medijem (zraka, tekočine). Hladilna telesa so pretežno iz aluminijevih zlitin, bogato narebričena, da imajo čim večjo površino, in so največkrat črno eloksirana, da je koeficient sevanja velik. Posebno pozornost je treba posvetiti toplotnemu uporju med telesom ventila in med hladilnim telesom. Majhne ventile ponavadi kar vtisnemo v hladilno telo (ploščo). Nekatera telesa ventilov so opremljena tudi z vijakom, da lahko napravimo vijačno povezavo. Pozor: izvrtina v hladilnem telesu mora biti napravljena točno pravokotno na površino, sicer ventil ne nalega s svojo celotno kontaktno ploskvijo in je prehod toplote slab!

Diode in tiristorji za srednje velike toke, ki so opremljeni z vijačnim nastavkom, uvijemo v hladilno telo, ki ima navoj.

Telo ventila se nahaja na potencialu anode ali katode. Zato moramo večkrat hladilno telo električno izolirati od telesa ventila. Namestimo ga prek vmesne izolacijske

ploščice (podložke). Ta ploščica mora biti tanka in toplotno dobro vodljiva, hkrati pa mora dobro električno izolirati. Odlične ploščice so iz naravne sljude, v novejšem času pa tudi iz umetnih snovi (berilijev oksid BeO). Obstajajo tudi ploščice iz posebnih epoksidnih mas (z debelino 0,15 mm in s prebojno trdnostjo preko 1 kV).

Včasih nameščamo iz ekonomskih razlogov več ventilov na skupno hladilno telo. Če so telesa teh ventilov na različnih električnih potencialih (npr. ventili v enofaznem mostu, moramo napraviti opisano izoliranje med ventili in hladilnim telesom.

Telesa diod in tiristorjev za večje toke ali za velike obratovalne frekvence, pri katerih je izgubna moč velika, so izdelana s ploščatim dnom, ki ima relativno veliko kontaktno površino. Na hladilno telo je tak ventil privijačen preko posebnega obroča. Ventile za ekstremno velike toke pa je treba hladiti dvostransko. Izdelani so v obliki ploščka (kot hokejski!), ki ga potem z vijaki vpnemo med dve hladilni telesi.