

VIŠOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-
VIŠER, BEOGRAD

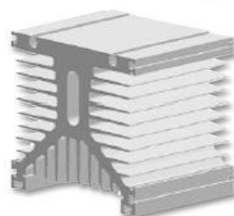
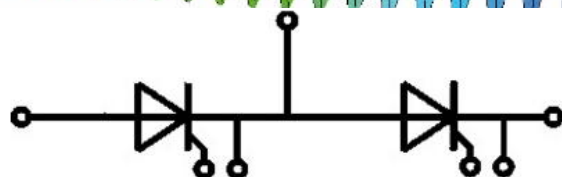
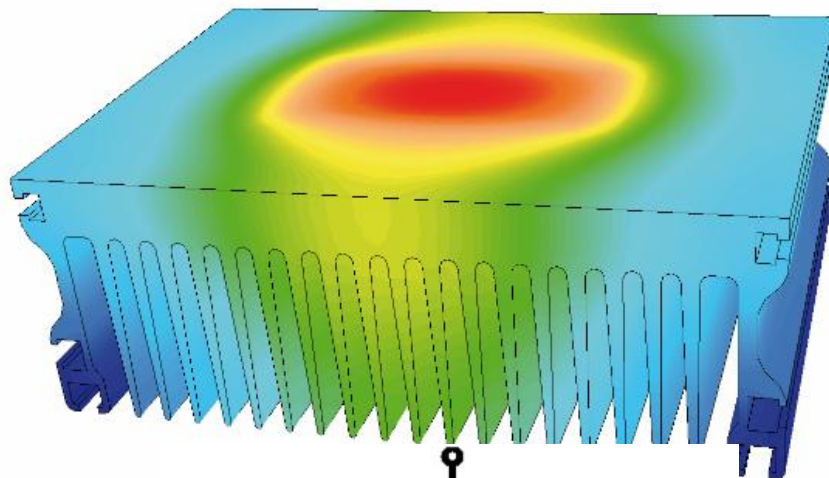
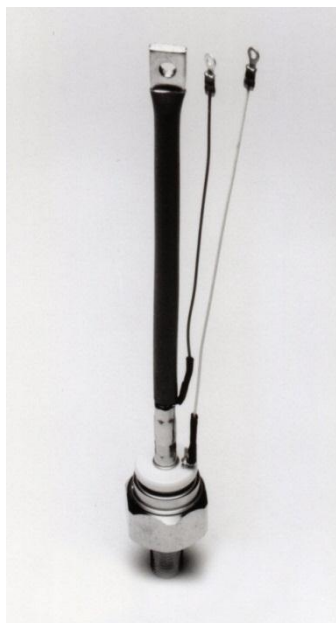
STUDIJSKI PROGRAM: Elektrotehničko inženjerstvo

MASTER STUDIJE 2017/2018

PREDMET: PROJEKTOVANJE ELEKTROENERGETSKIH PRETVARAČA



TERMIČKI PRORAČUNI TIRISTORSKIH ENERGETSKIH PRETVARAČA



Predmetni profesor:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

OKTOBAR 2017

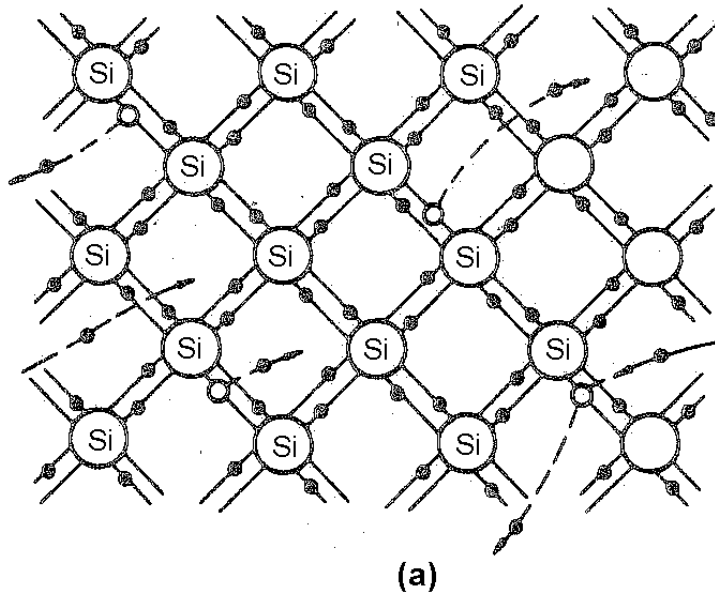
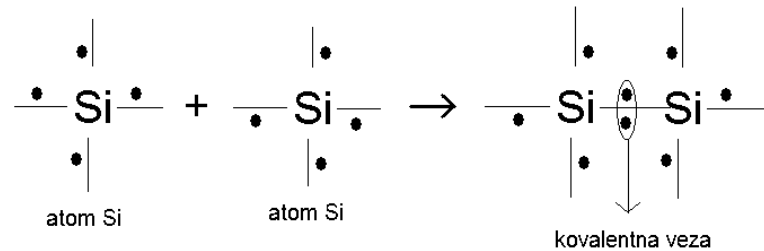
UVOD

- Termički proračun energetskog pretvarača je u veoma značajnoj meri određen poznavanjem rada samog pretvarača i određivanjem talasnih oblika napona i struja na prekidačkim elementima
- Potrebno je odrediti ukupnu snagu disipacije na prekidačkom elementu (računski ili koristeći kataloške podatke za date tiristore)
- Ukupna snaga disipacije se sastoji od dva dela: snaga gubitaka u stanju vođenja ("on-state") i snage gubitaka usled komutacija (uključenja- engl. "*turn-on*" i isključenja-engl. "*turn'off*", prekidačkih elementa)
- Izračunavanje ukupne snage disipacije je veoma bitan korak, obzirom da tu snagu treba odvesti sa poluprovodničkog elementa
- U slučaju neefikasnog odvođenja toplote dolazi do njegove destrukcije
- Proračun hlađenja je moguće uraditi pod uslovom da su poznati gubici snage na prekidačkim elementima, ali i dozvoljeni porast temperature na prekidačkom elementu u odnosu na temperaturu okoline
- Izbor tipa hlađenja (prirodno, prinudno)
- Prinudno hlađenje (prinudna cirkulacija vazduha, prinudna cirkulacija fluida (obično voda ili neki drugi rashladni medijum koji odvodi višak toplote)
- **Dimenzije pretvarača su pored električnih karakteristika, dominantno određene izborom tipa hlađenja!!!!**

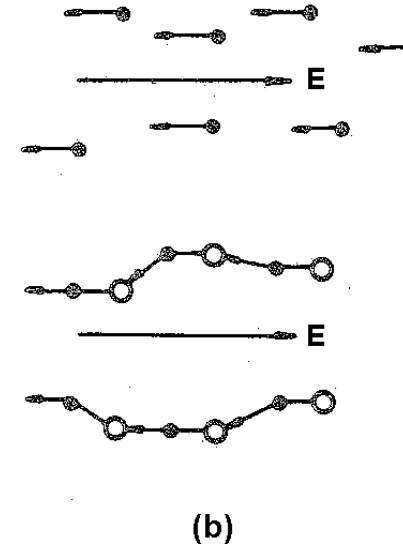
OSNOVA POLUPROVODNIKA- MONOKRISTAL SILICIJUMA

Si- četvorovalentan el. konfiguracija zadnjeg nivoa : ns^2np^2

KOVALENTNA VEZA-sparivanje elektrona



(a)-monokristal u odsustvu spoljnog električnog polja



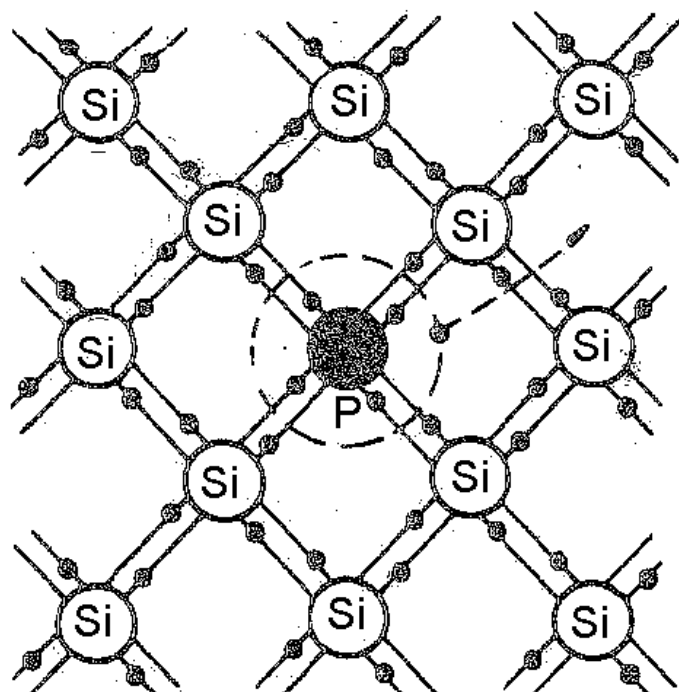
(b)-Dejstvo spoljnog električnog polja

PRIMESNI POLUPROVODNICI

Fosfor-P petovalentan, el. konfiguracija ns^2np^3

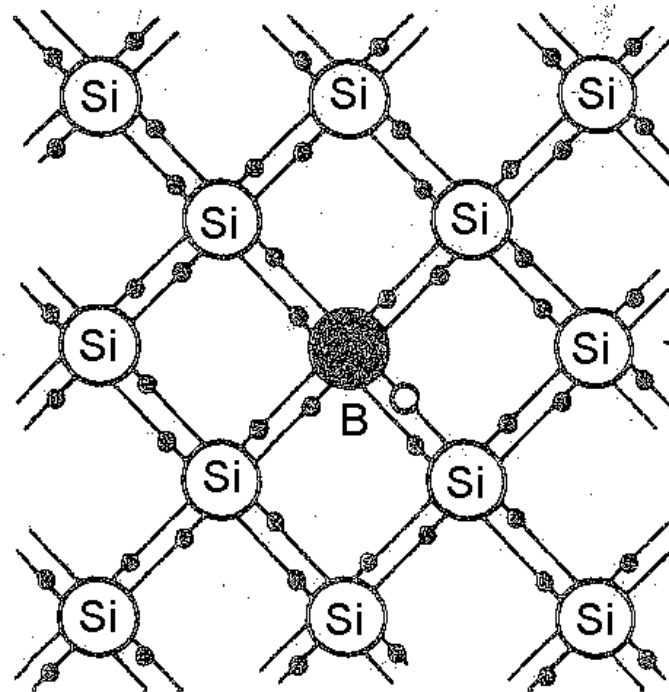
Bor-B trovalentan, el. konfiguracija ns^2np^1

N-tip poluprovodnika



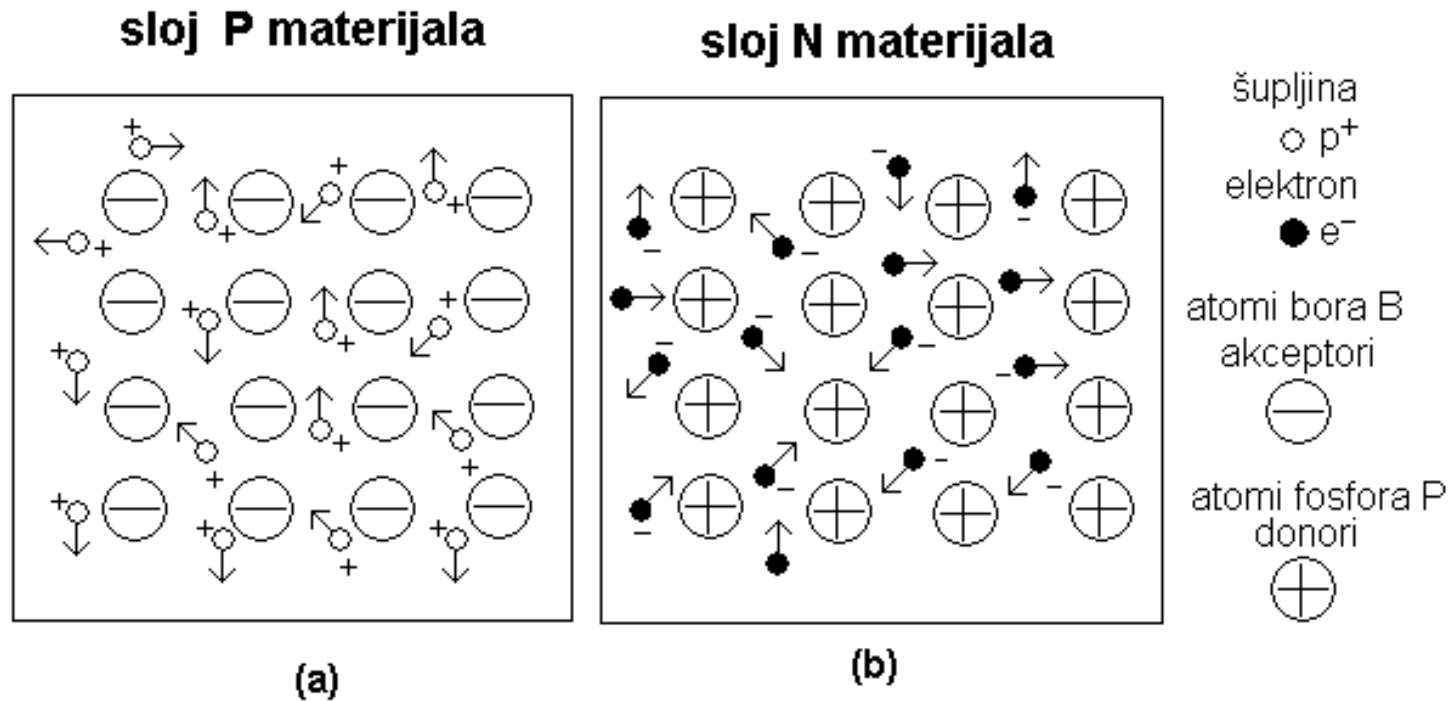
P-fosfor DONOR $\oplus$

P-tip poluprovodnika



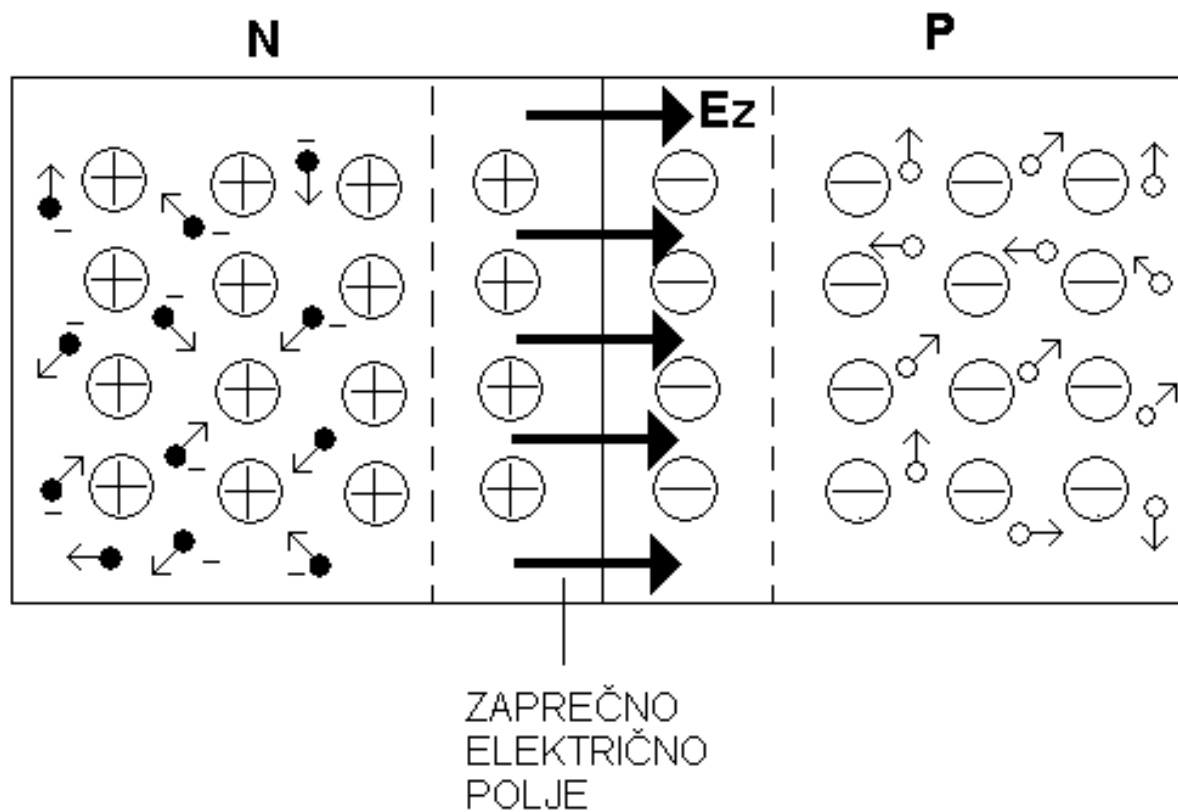
B-Bor AKCEPTOR $\ominus$

PREDSTAVE POLUPROVODNIKA P i N TIPA

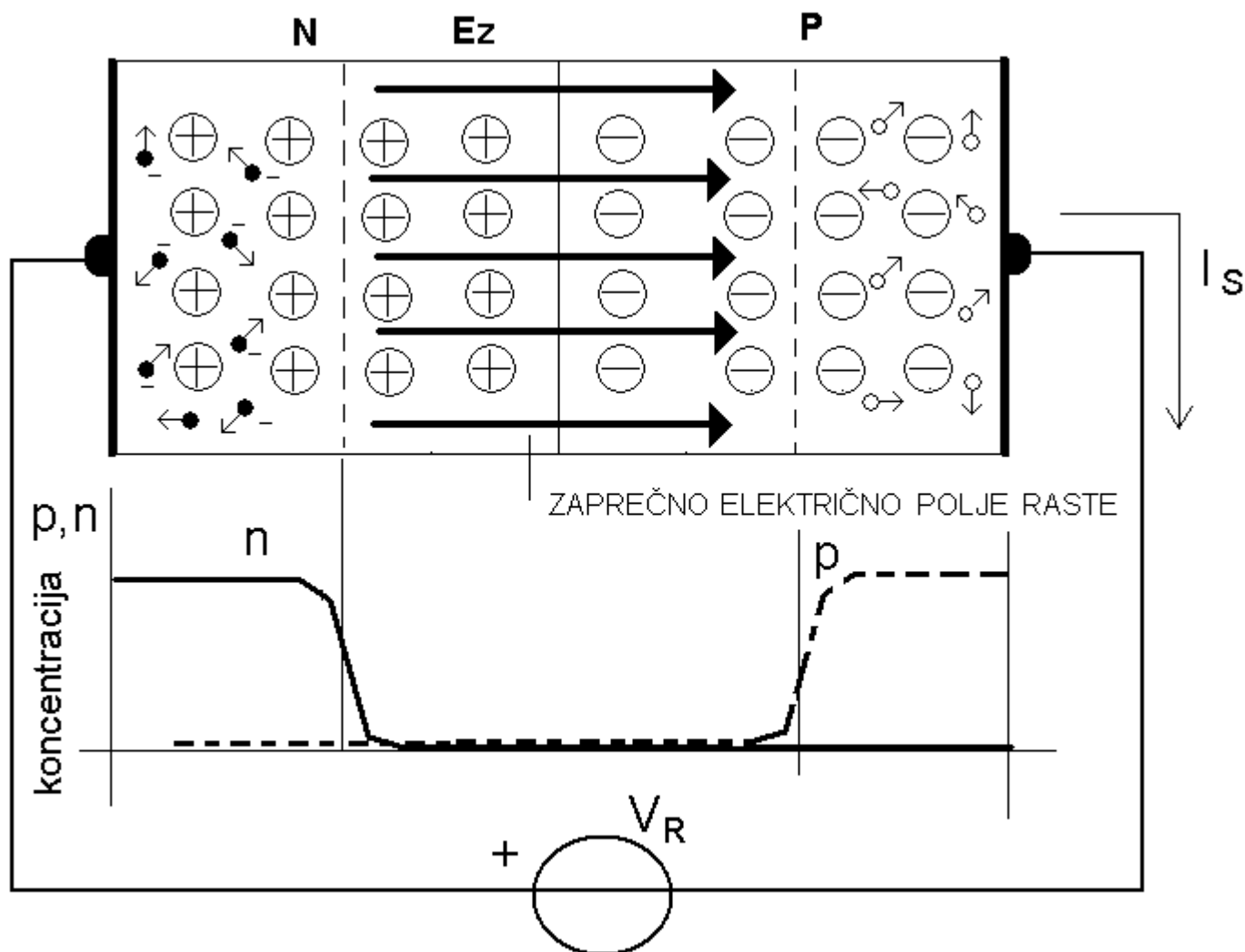


Predstave poluprovodnika, (a)- P tip materijala , (b)-N tip materijala

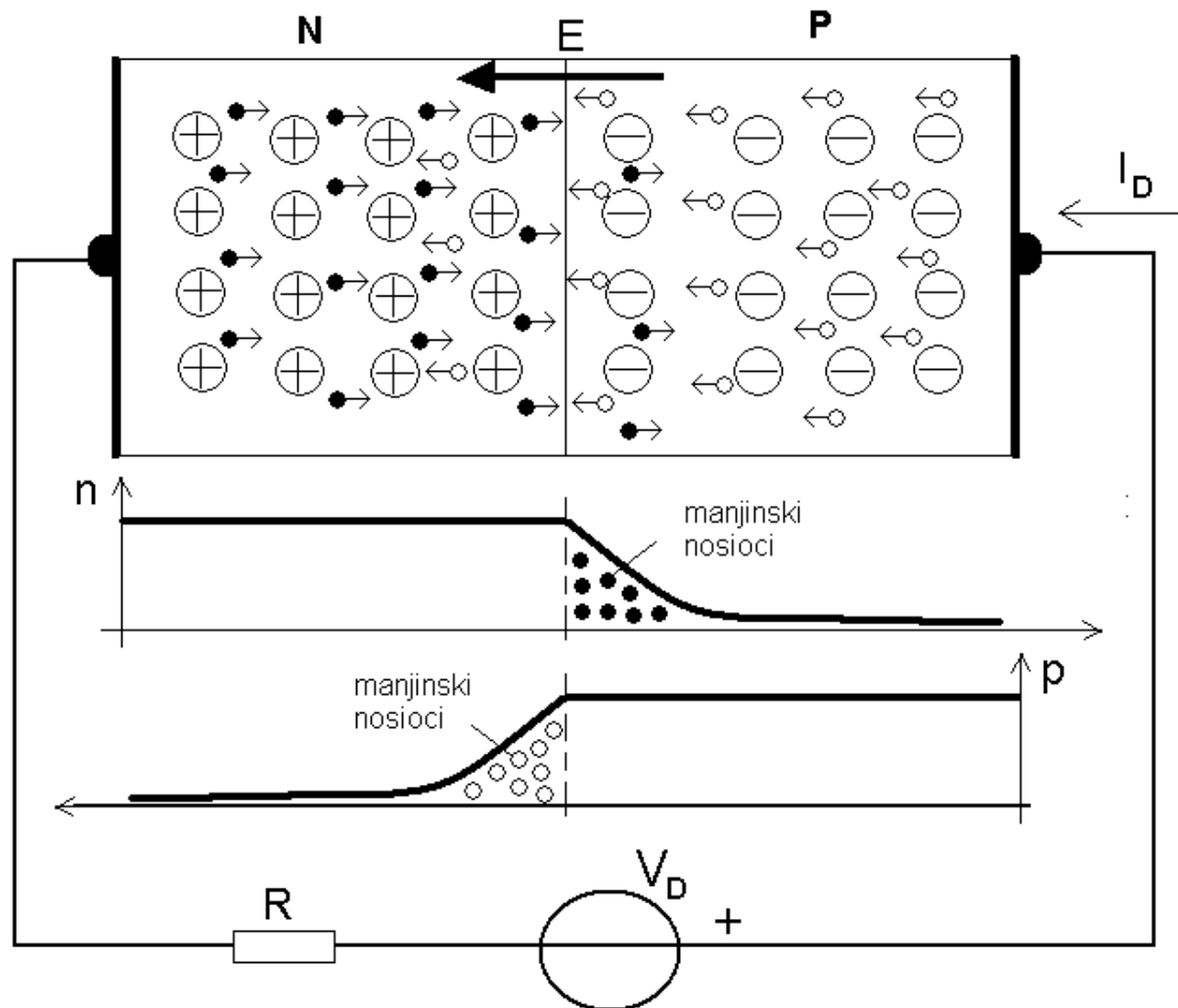
P-N spoj bez polarizacije



INVERZNO POLARISAN P-N SPOJ



DIREKTNO POLARISAN P-N SPOJ



KAPACITIVNOSTI na PN spoju u DIODI

Dok se dioda nalazi u stanju vođenja, oko P-N spoja se nalazi nagomilano dodatno naelektrisanje.

Ubrizgani nosioci naelektrisanja se šire u prostor gde je njihova koncentracija manja

$$Q_D = I_D \cdot \tau \quad \text{Difuziono naelektrisanje}$$

I_D struja kroz P-N spoj

τ srednje vreme života nosilaca naelektrisanja dok se ne rekombinuju

$$\text{Difuzioni kapacitet} \quad C_D = \frac{dQ_D}{dV_D} \quad C_D = \frac{\tau \cdot I_D}{\eta V_T}$$

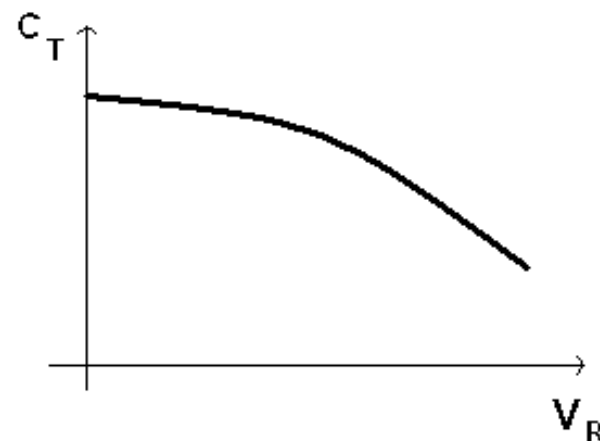
zaključak: dok dioda (P-N spoj) vodi, u njoj se nalazi nagomilano neko naelektrisanje

KAPACITIVNOST PROSTORNOG OPTEREĆENJA

Inverzno polarisan P-N spoj

kapacitivnost prostornog tovara (opterećenja)

$$C_T = \frac{C_{TO}}{\sqrt[3]{1 + \frac{V_R}{\psi_o}}}$$



C_{TO} kapacitet pri naponu 0V

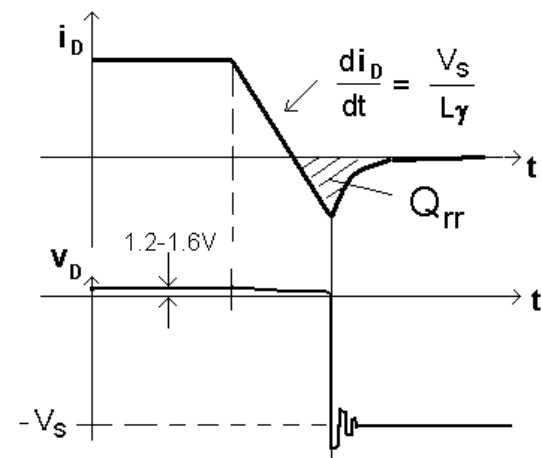
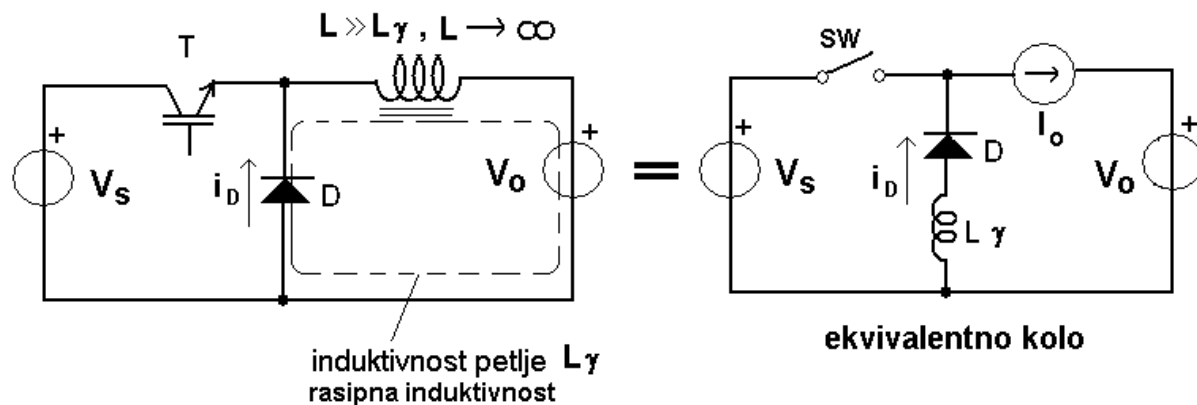
V_R napon inverzne polarizacije

ψ_o ugrađeni napon skokovitog P-N spoja (visina potencijalne barijere)

zaključak: *svaki inverzno polarisan P-N spoj poseduje neki kapacitet*

BRZE DIODE

Ove diode se koriste kao **zamajne diode** u jednosmernim pretvaračima, kolima za prenaponsku zaštitu i sl. Glavna karakteristika im je da mogu veoma brzo da pređu iz provodnog u neprovodno stanje (kada se inverzno polarišu).



Brza dioda u kolu spuštača napona

$V_s > V_o$

Povraćeno naelektrisanje

Q_{rr}

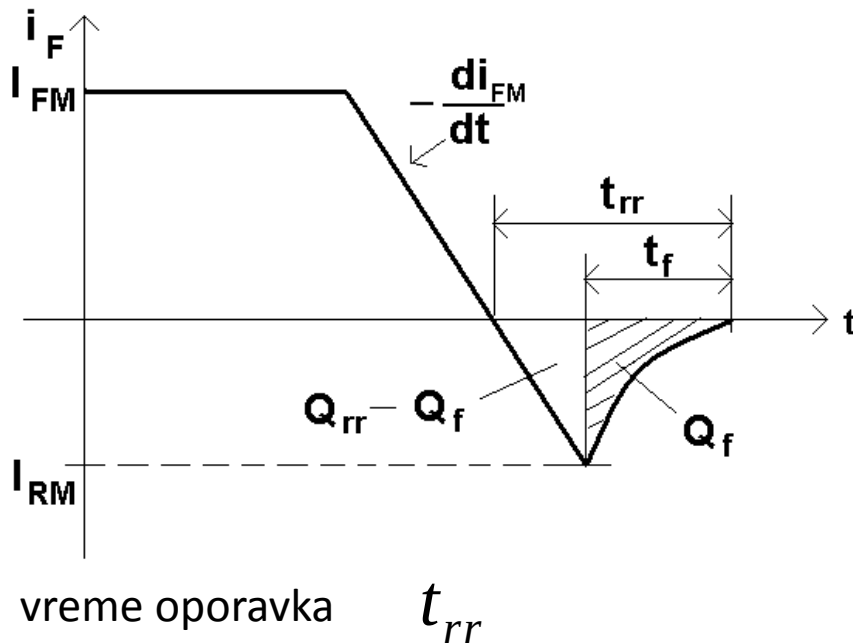
Vreme trajanja oporavka diode

t_{rr}

Inverzni oporavak brze diode

$$\frac{di_D}{dt} = \frac{V_s}{L_\gamma}$$

POVRAĆENO NAELEKTRISANJE



$$t_{rr} = g(I_{FM}, -\frac{di_F}{dt}, T)$$

$$Q_{rr} = f(I_{FM}, -\frac{di_F}{dt}, T)$$

$$t_{rr} = \frac{I_{RM}}{\left(-\frac{di_F}{dt}\right)} + t_f \quad ts$$

$$I_{RM} \approx \frac{2Q_{rr}}{t_{rr}}$$

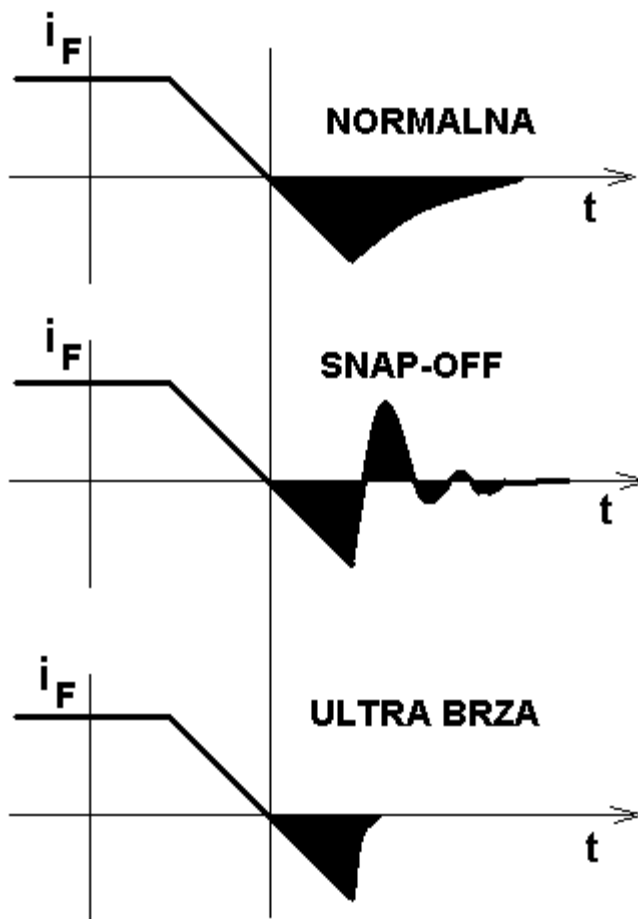
$$Q_f \approx \frac{I_{RM} t_f}{2}$$

$$t_{rr} = \frac{t_f}{2} + \sqrt{\frac{t_f^2}{4} + \frac{2Q_{rr}}{-\frac{di_F}{dt}}}$$

Disipirana energija u diodi u toku jednog gašenja

$$W_1 = Q_f \cdot V_R \approx (0.2 \dots 0.4) \cdot V_R \cdot Q_{rr}$$

Tipovi brzih dioda prema talasnim oblicima struje oporavka



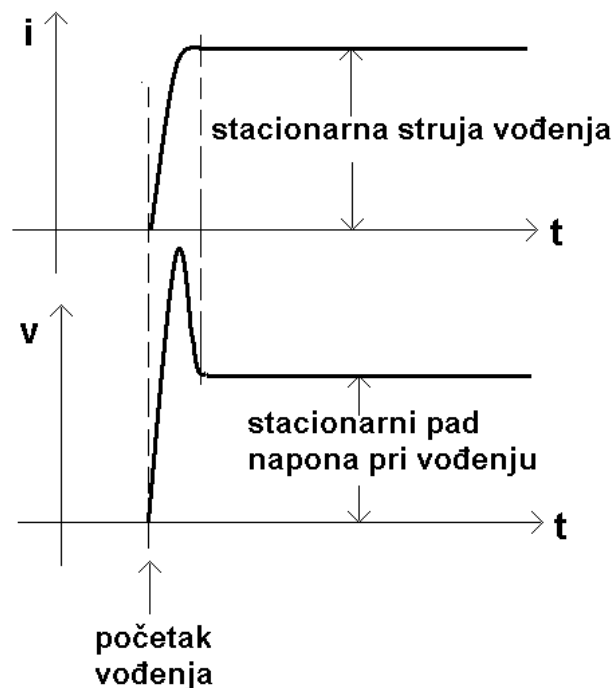
Dioda tipa *snap-off* je veoma brza dioda, ali zbog oscilatornog završetka procesa oporavka. Ova dioda se manje koristi u pretvaračima.

Ultrabrza dioda se preporučuje za korišćenje u visokofrekventnim pretvaračima

Postoje Šotki diode koje umesto P-N spoja imaju P-metal spoj. One su brže od najbržih dioda (pod uslovom da su od Si), imaju male probojne napone (50-100V) i mnogo velike inverzne struje zasićenja (2-10mA).

U poslednje vreme na tehnološkom tržištu poluprovodnika su se pojavile silicijum karbidne (SiC) diode koje rade na višim probojnim naponima.

Brze diode pri prelasku iz stanja blokiranja u stanje vođenja



U neprovodnom stanju centralno područje oko P-N spoja je siromašno nosiocima naelektrisanja.

Kada se naponu izvora promeni polaritet, potrebno je konačno vreme da nosioci naelektrisanja stignu iz visoko-dopiranih područja do centralnog i da ga preplave.

Zaključak: otpor diode u početnim trenucima znatan, a pad napona na diodi je veći od stacionarnog

Disipacija snage u diodama

Ukupna snaga disipacije u energetscoj diodi

$$P_{TOT} = P_{FAV} + P_{RAV}$$

disipacija snage u provodnom stanju disipacija snage u stanju inverzne polarizacije

PROVODNO STANJE:

Trenutna vrednost snage gubitaka usled vođenja $p_F = (V_{TO} + r_d \cdot i_F) \cdot i_F$

Srednja vrednost snage gubitaka usled vođenja

$$P_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_F(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_0^T V_{TO} i_F dt + r_d \cdot \int_0^T i_F^2 dt \right]$$

$$P_{FAV} = V_{TO} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot I_{FRMS}^2$$

$I_{FRMS} / I_{FAVG} = F_F$ faktor oblika (Form Factor)

$$I_{FRMS}^2 / I_{FAVG}^2 = F_F^2$$

$$P_{FAV} = V_{TO} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot F_F^2 I_{FAV}^2$$

$$I_{FRMS}^2 / I_{FAVG}^2 = 360^\circ / \Theta$$

za pravougaone impulse

$$I_{FRMS}^2 / I_{FAVG}^2 \sim 2.5 * (180^\circ / \Theta)$$

UGAO VOĐENJA Θ
za fazno kontrolisane impulse

Θ	180°	120°	90°	60°	30°	15°
$\frac{I_{TRMS}^2}{I_{TAV}^2}$	2.47	3.5	4.93	7.7	15.9	31.8

za fazno kontrolisane impulse

UGAO VOĐENJA $\Theta = \pi - \alpha$

UGAO UPRAVLJANJA α

•za diodne ispravljače
 $\alpha=0$, $\theta=\pi$ rad

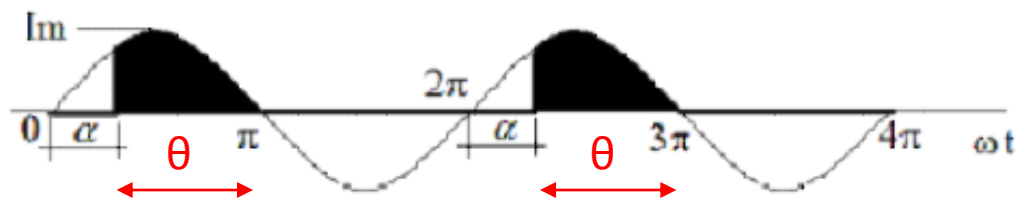
Θ	180°	120°	90°	60°	30°	15°
$\frac{I_{\text{TRMS}}^2}{I_{\text{TAV}}^2}$	2.47	3.5	4.93	7.7	15.9	31.8

UGAO VOĐENJA

$$\Theta = \pi - \alpha$$

UGAO UPRAVLJANJA

$$\alpha$$

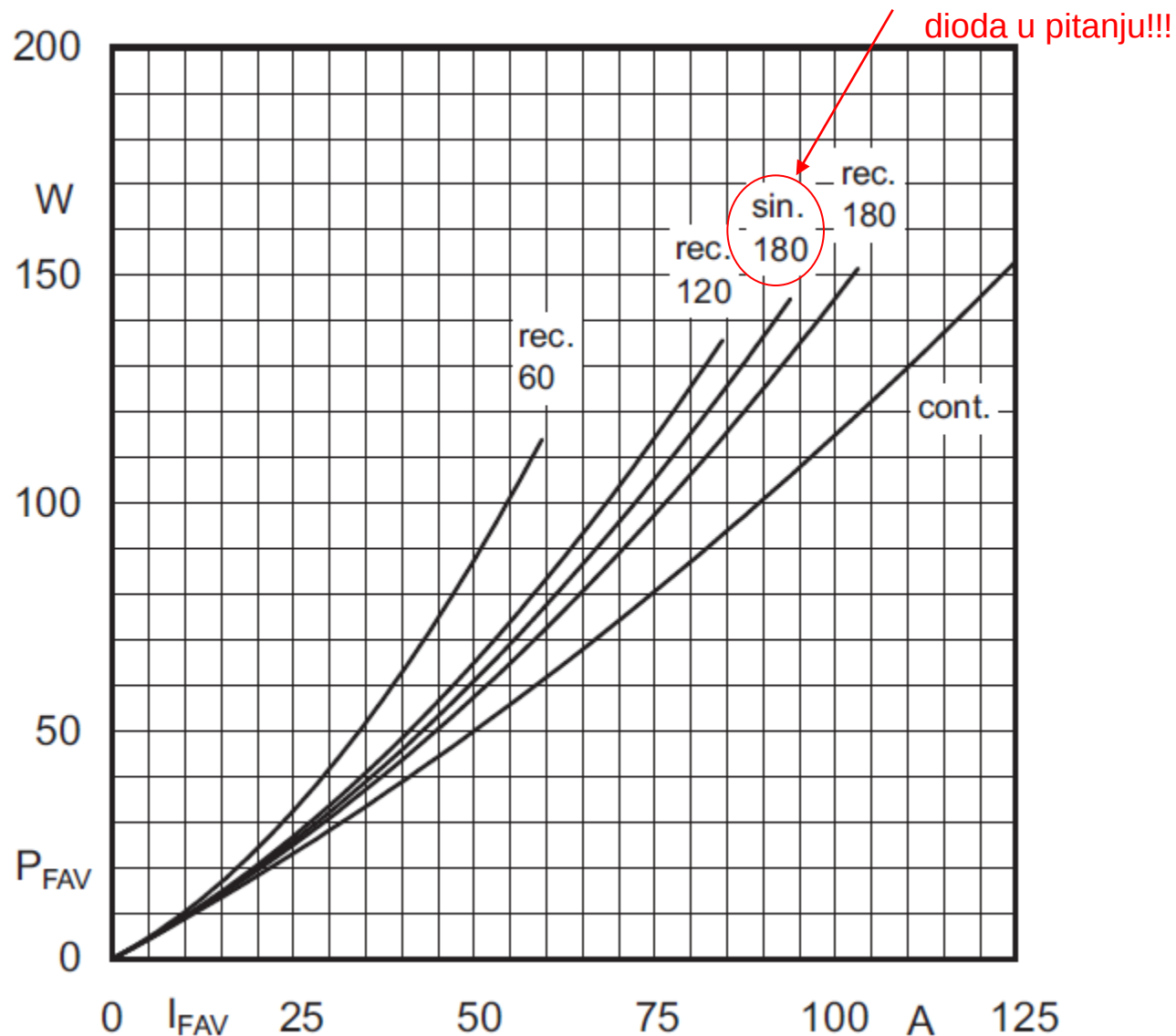


$$I_{\text{AVG}} = \frac{I_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) \quad I_{\text{RMS}} = \frac{I_m}{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$$\frac{I_{\text{RMS}}}{I_{\text{AVG}}} = \frac{\cancel{I_m} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{\frac{\cancel{I_m}}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)} = \pi \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{(1 + \cos \alpha)}$$

$$\left[\frac{I_{\text{RMS}}}{I_{\text{AVG}}} \right]^2 = \pi^2 \cdot \frac{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}{(1 + \cos \alpha)^2}$$

• za diodne ispravljače
 $\alpha=0$, $\theta=\pi$ rad



Srednja vrednost disipacije tipične energetske diode za 100A , za razne vrednosti ugla vođenja (rec-pravougaoni talasni oblici, sin-sinusni polutalas, cont-kontinualni režim)

INVERZNA POLARIZACIJA

GUBICI

$$P_{RAV} = f \cdot V_R \cdot (Q_f + I_{RO} \cdot t_R)$$

$$t_R = T - t_p$$

V_R - vršna vrednost inverznog napona pri oporavku diode

Q_f - povraćeno naelektrisanje tokom vremena t_f

I_{RO} - inverzna struja curenja (≈ 0 , osim u slučaju Šotki dioda)

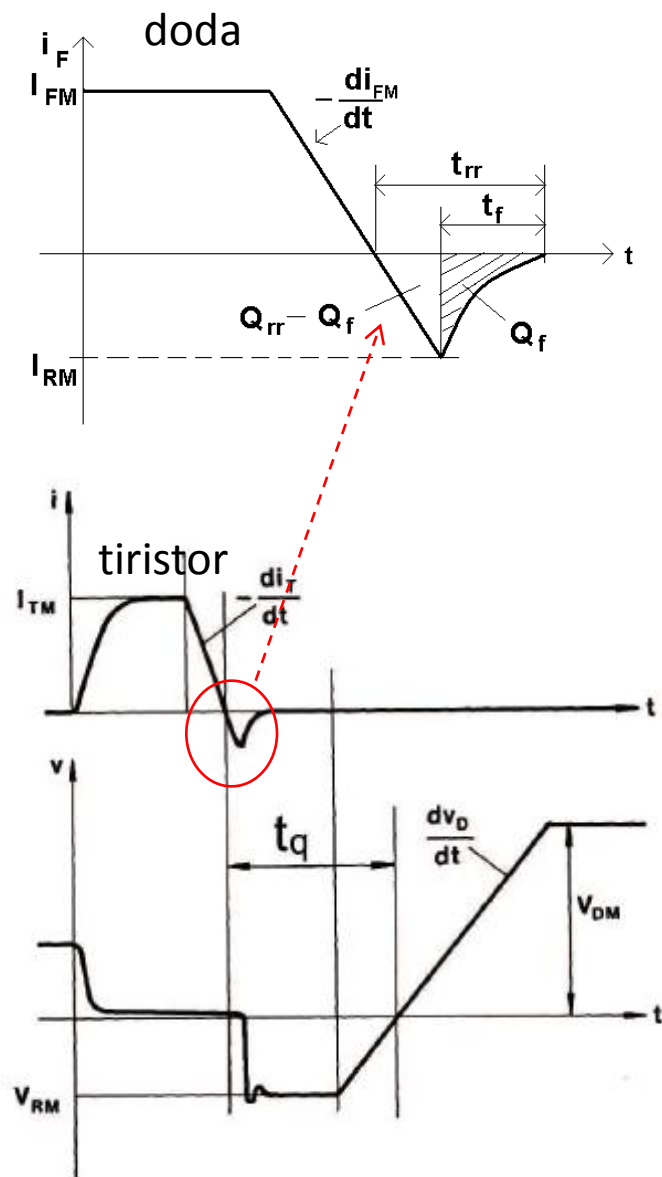
$f = 1/T$ - učestanost primenjenog inverznog napona na diodi

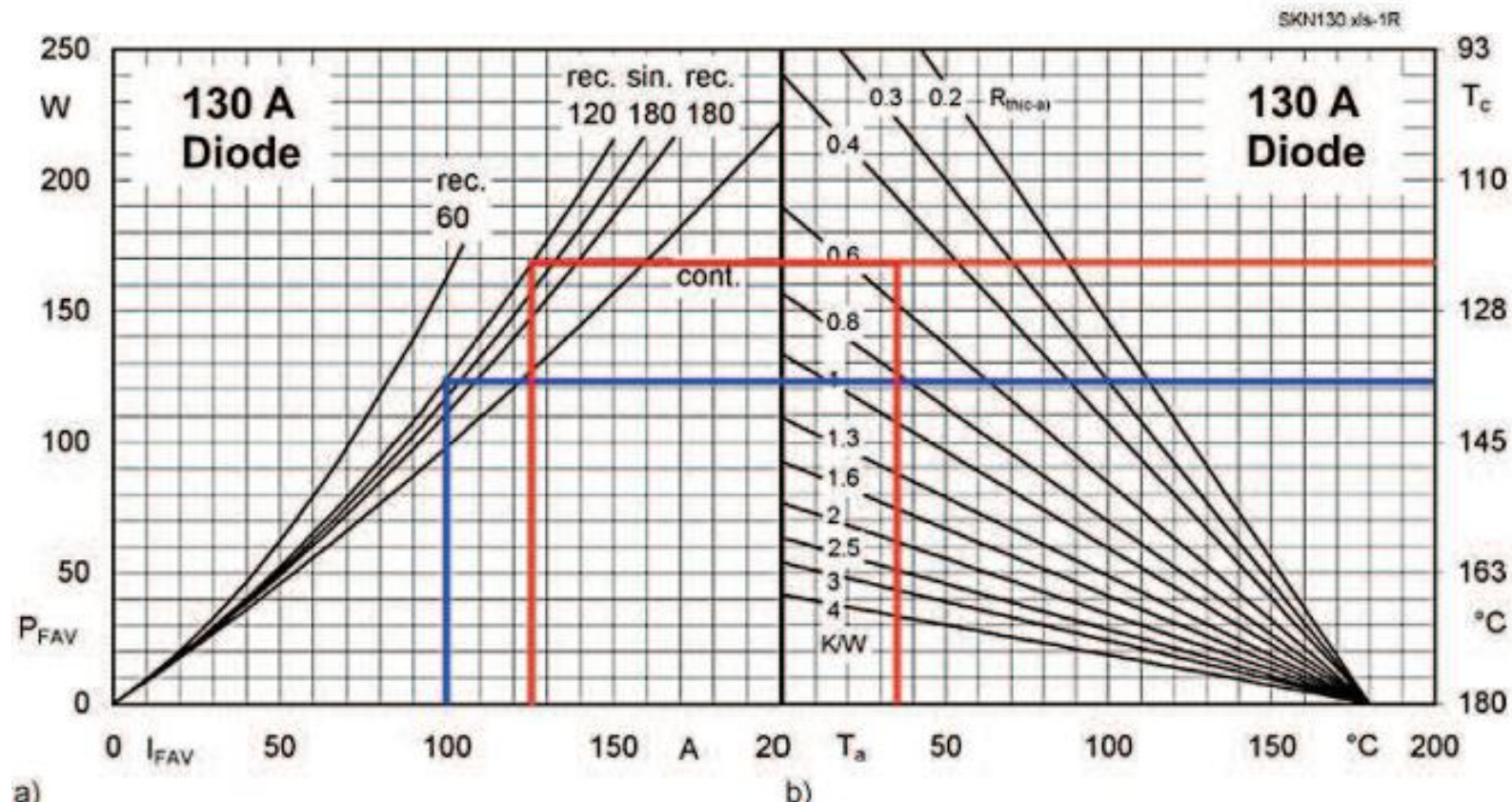
T - perioda rada

t_R - vreme trajanja primenjenog inverznog napona V_R u toku periode rada

t_p - vreme trajanja impulsa struje diode

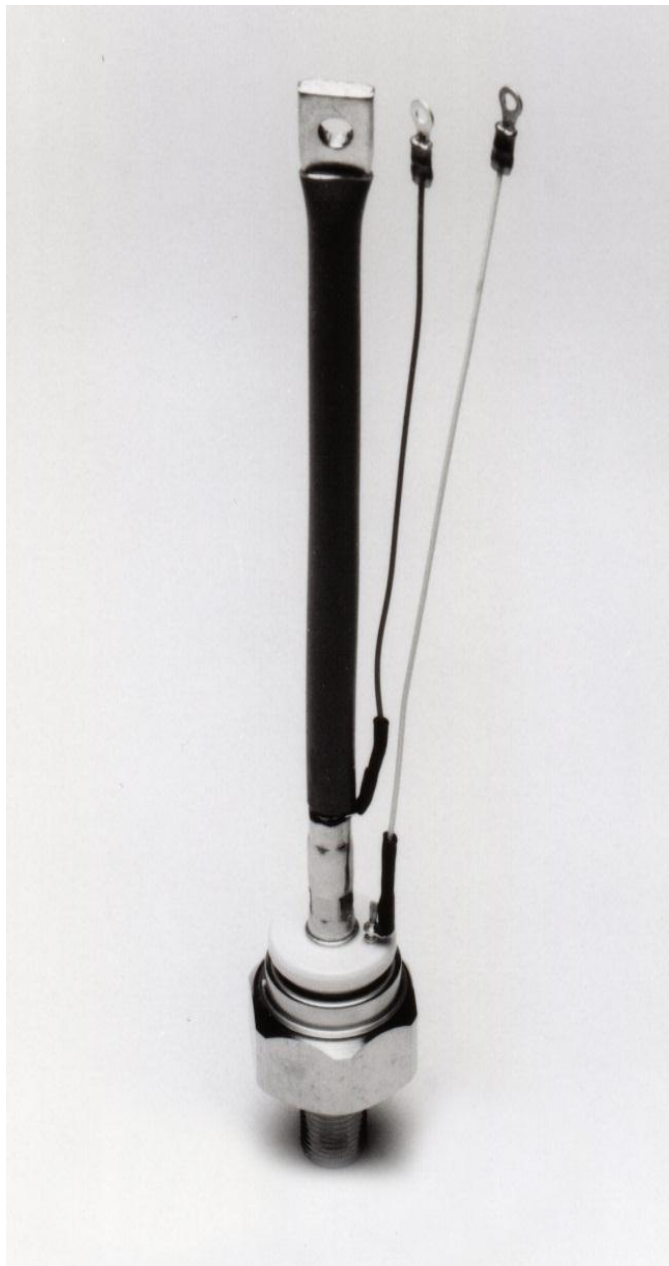
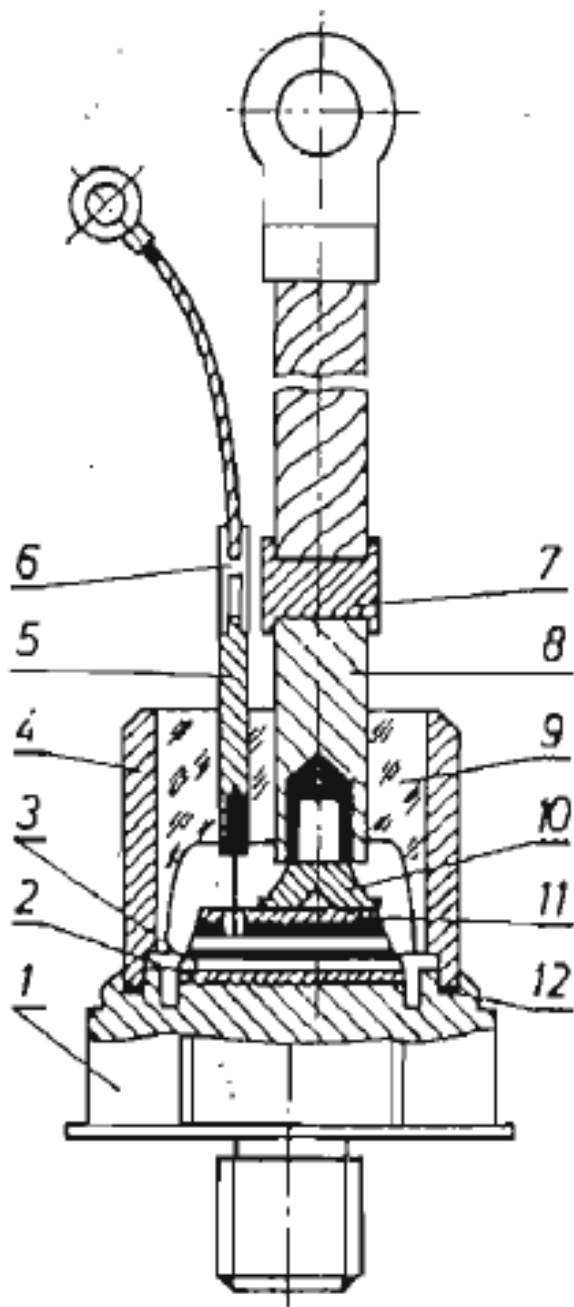
$$Q_f = Q_{rr} - \frac{2Q_{rr}^2}{2(-\frac{di_F}{dt})} \approx (0.2 \dots 0.4) \cdot Q_{rr}$$





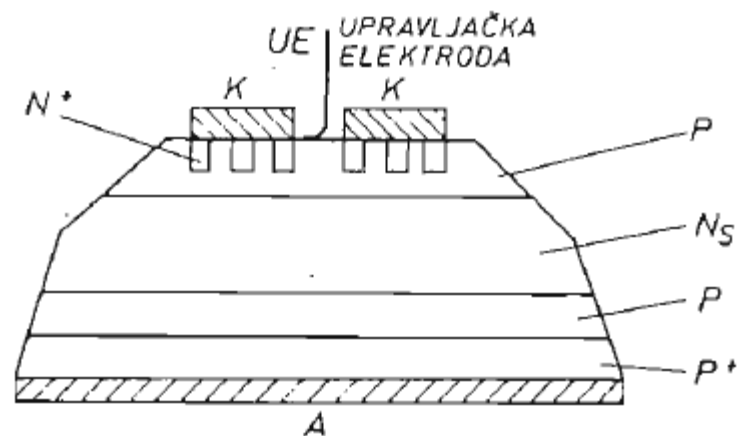
•Dioda za 130A se koristi u šesto-pulsnom ispravljaču (B6). Zahtevana DC struja opterećenje je 300 A u kontinualnom režimu. Ovo odgovara $I_{FAV}=100$ A po diodi. Talasni oblik struje je pravougaoni sa uglom vođenja od 120° (rec.120).

•Za $I_{FAV}=100$ A, $P_{FAV} = 122$ W i maksimalna temperatura kućišta je $T_c=137^{\circ}\text{C}$ (plava linija). Sa sigurnosnom marginom od 25% tj. $I_{FAV} = 125$ A (crvena linija) maksimalna temperatura $T_c=120^{\circ}\text{C}$ i $P_{FAV}=170$ W. Za temperaturu okoline 35°C maksimalna termička otpornost $R_{th(c-a)}$ diode mora biti 0.5K/W (Ovo uključuje $R_{th(c-s)}$ od 0.08K/W i $R_{th(s-a)}$ od 0.42K/W).

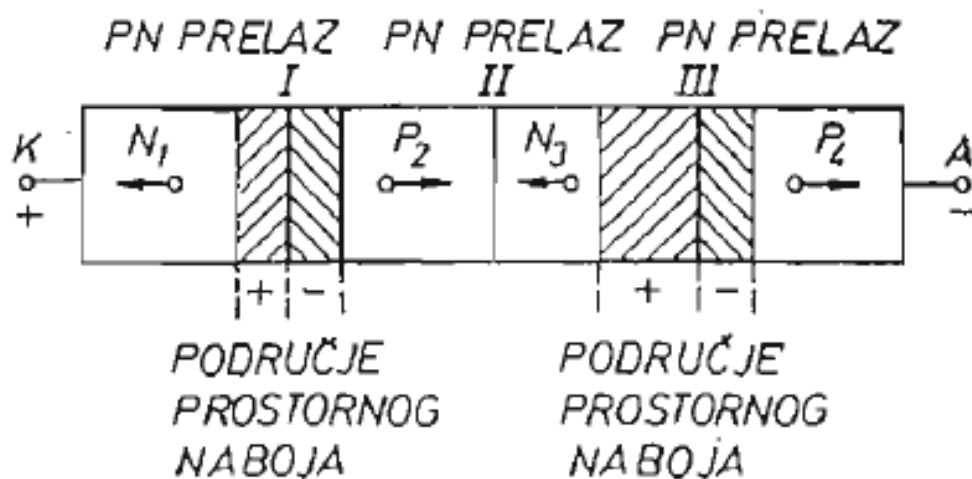


STRUKTURA JEDNOG TIPIČNOG TIRISTORA

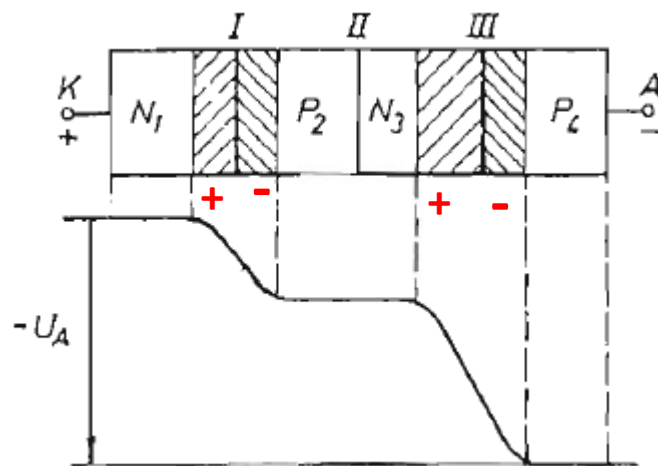
- 1-bakarna osnova
- 2-nalemljena pločica od volframa
- 3-četvoroslojna Struktura PNP
- 4-keramičko kućište izolatora
- 5-upravljačka elektroda GEJT
- 6-spojnicica za priključak Gejta
- 7-spojna košuljica
- 8-košuljica energetskog izvoda
- 9-stakleni izolator
- 10-energetski izvod KATODE
- 11-nalemljena pločica od volframa



Prikaz četvoroslojne strukture PNP

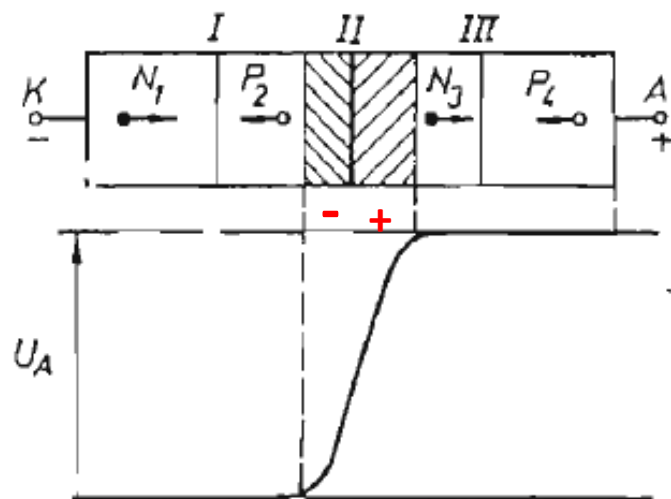


Strukturni prikaz inverzno polarizovane PNP strukture



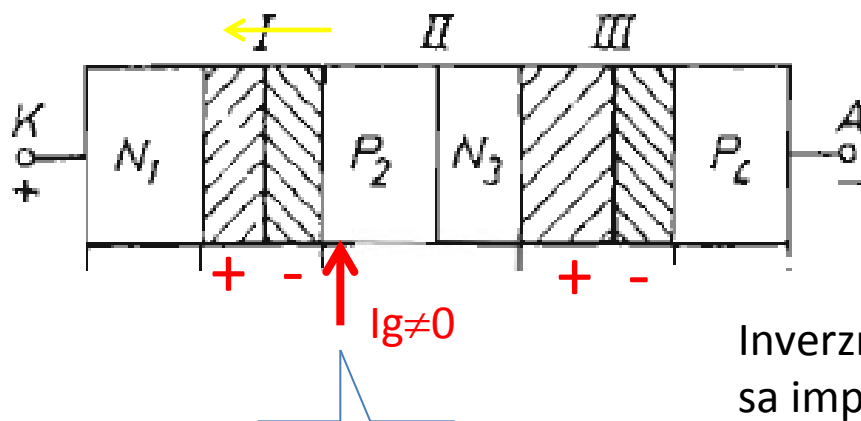
**Raspodela potencijala na
inverzno polarizovanoj PNPN
strukturi**

***struja gejta = 0**

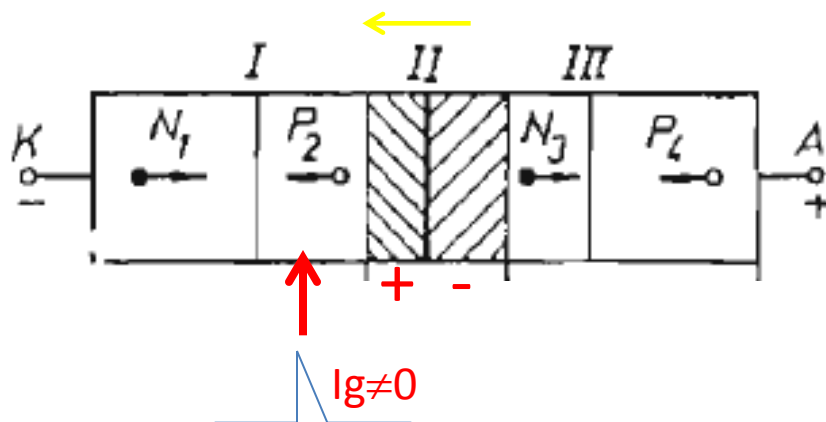


**Raspodela potencijala na
direktno polarizovanoj PNPN
Strukturi**

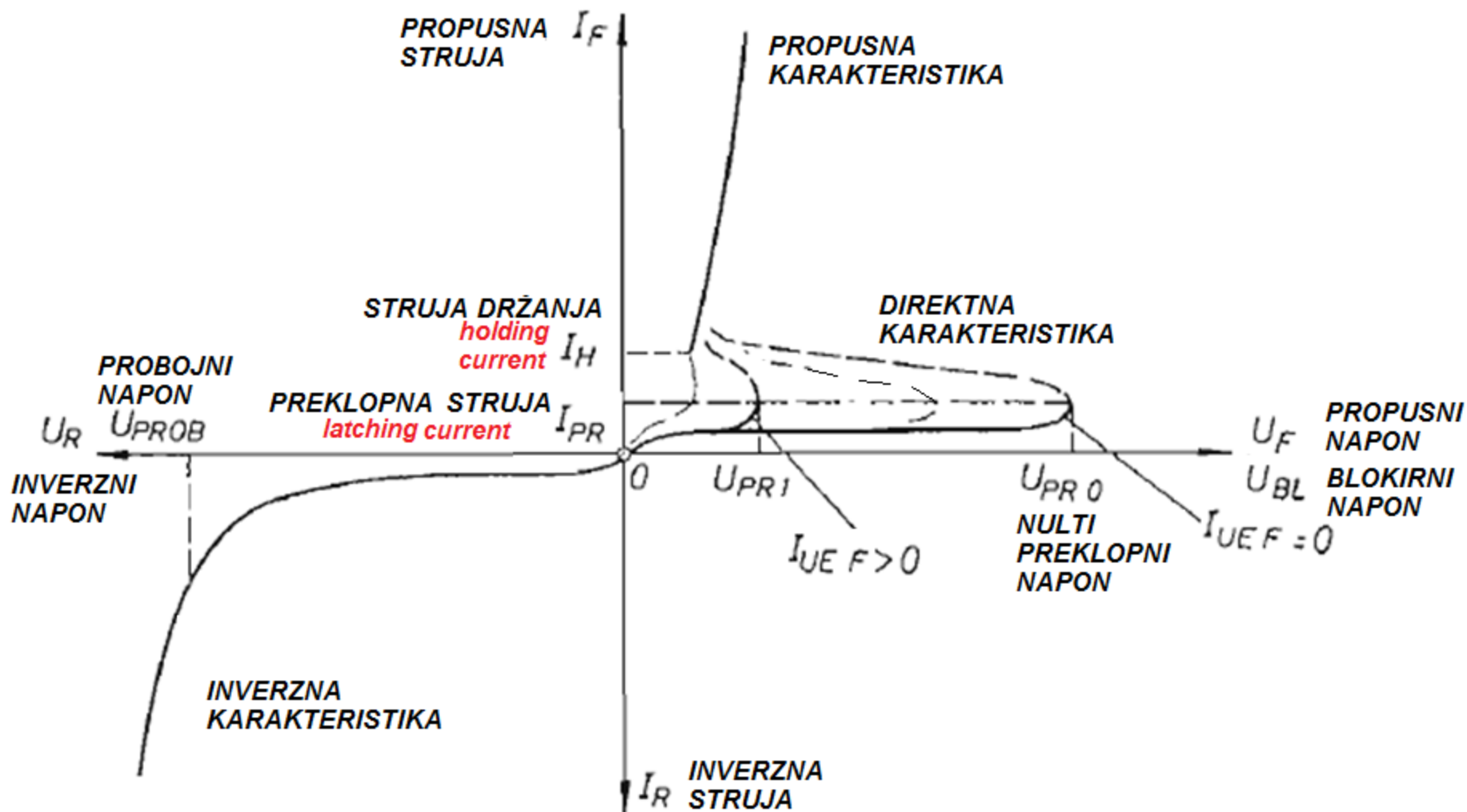
***struja gejta = 0**



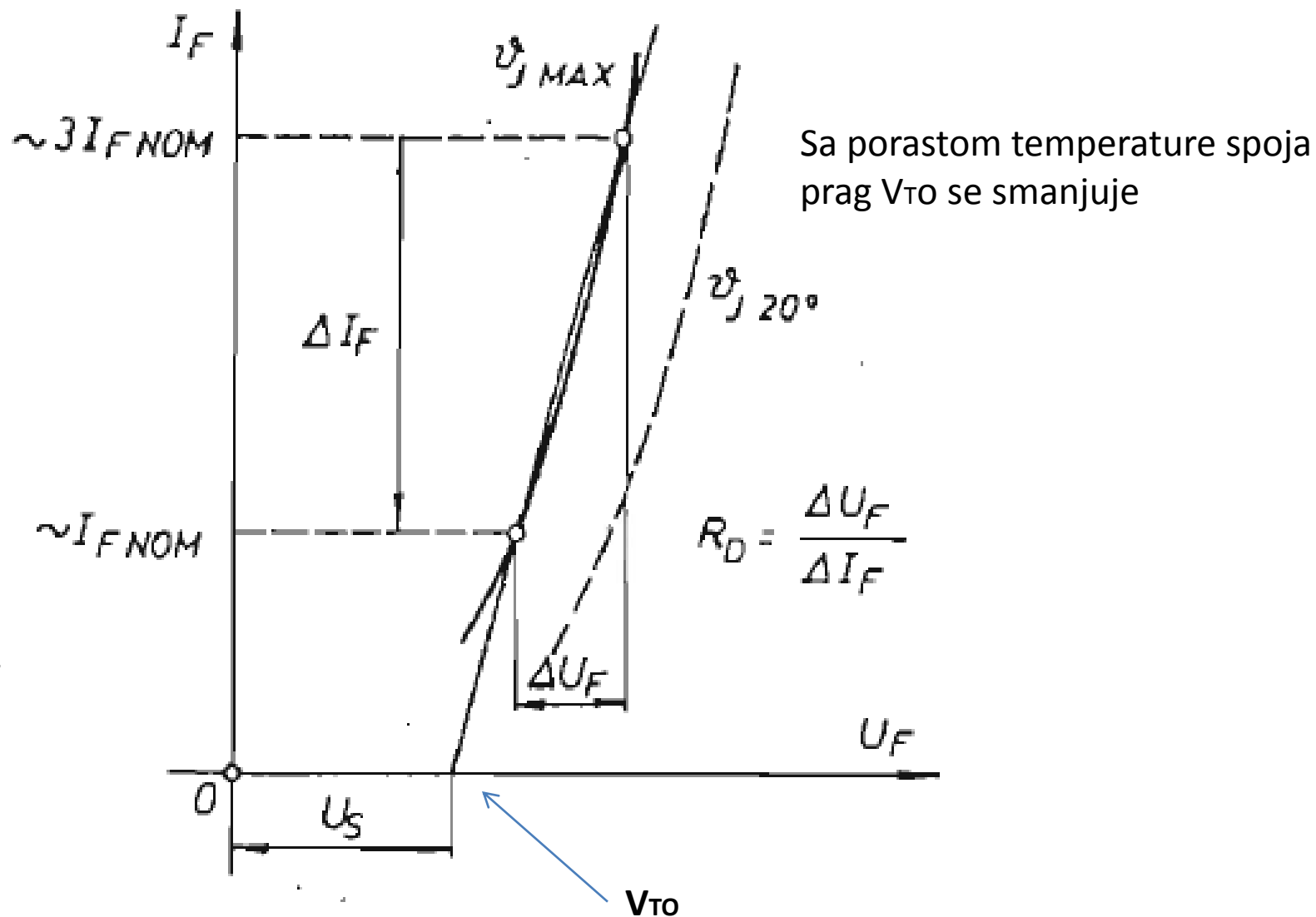
Inverzno polarizovana struktura
sa impulsom na gejtu neće
provesti struju



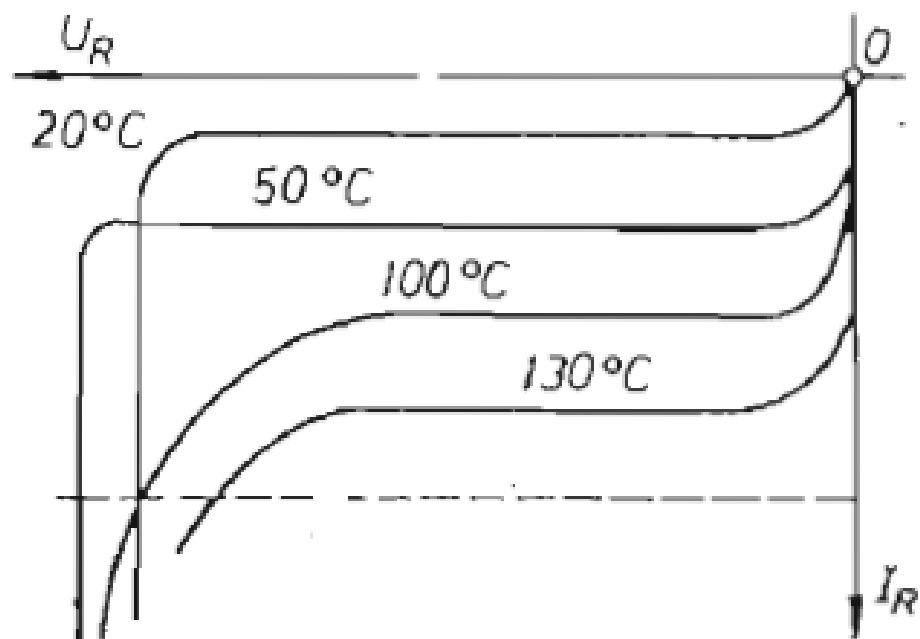
Direktno polarizovana struktura
sa impulsom na gejtu će
provesti struji i pad napona je
 $2 \times V_{to} = 2 \times 0.7V = 1.4V$,
pošto su dva PN spoja direktno
polarizovana



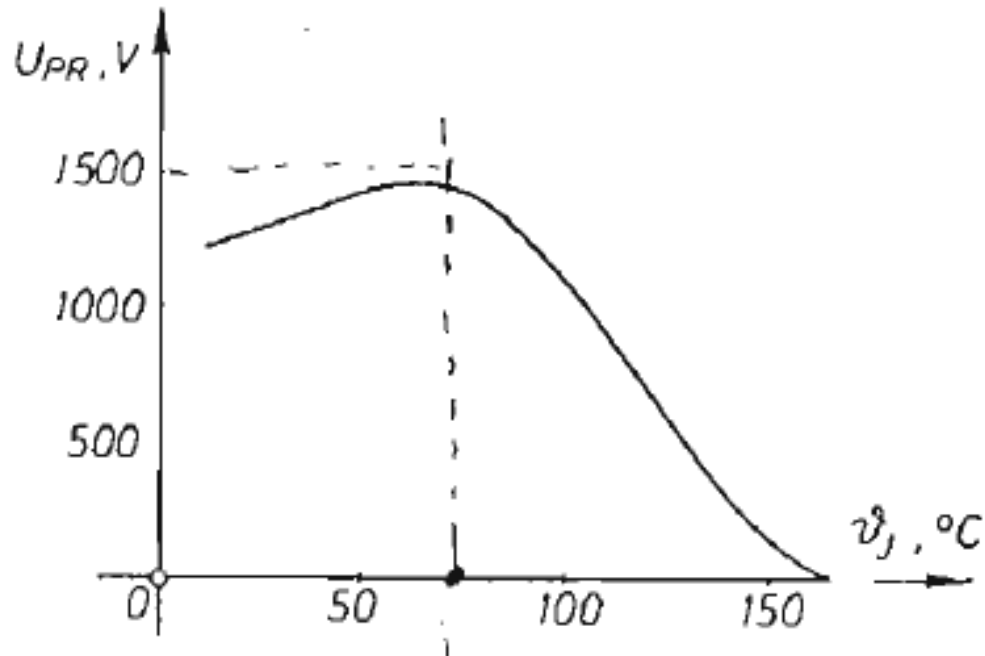
I-V karakteristika
tiristora



Prikaz konstruisanja radne prave za propusnu karakteristiku tiristora



Pri porastu temperature inverzna karakteristka degradira i lavinski proboj nastaje pri nižim naponima



Zavisnost preklopnog napona od temperature

Ako se tiristor koristi na višim temperaturama postoji mogućnost „propaljivanja“. Stoga sa porastom temperature treba ići na niže preklopne napone

INVERZNA POLARIZACIJA

GUBICI

$$P_{RAV} = f \cdot V_R \cdot (Q_f + I_{RO} \cdot t_R)$$

$$t_R = T - t_p$$

V_R - vršna vrednost inverznog napona pri oporavku diode

Q_f - povraćeno naelektrisanje tokom vremena t_f

I_{RO} - inverzna struja curenja (≈ 0 , osim u slučaju Šotki dioda)

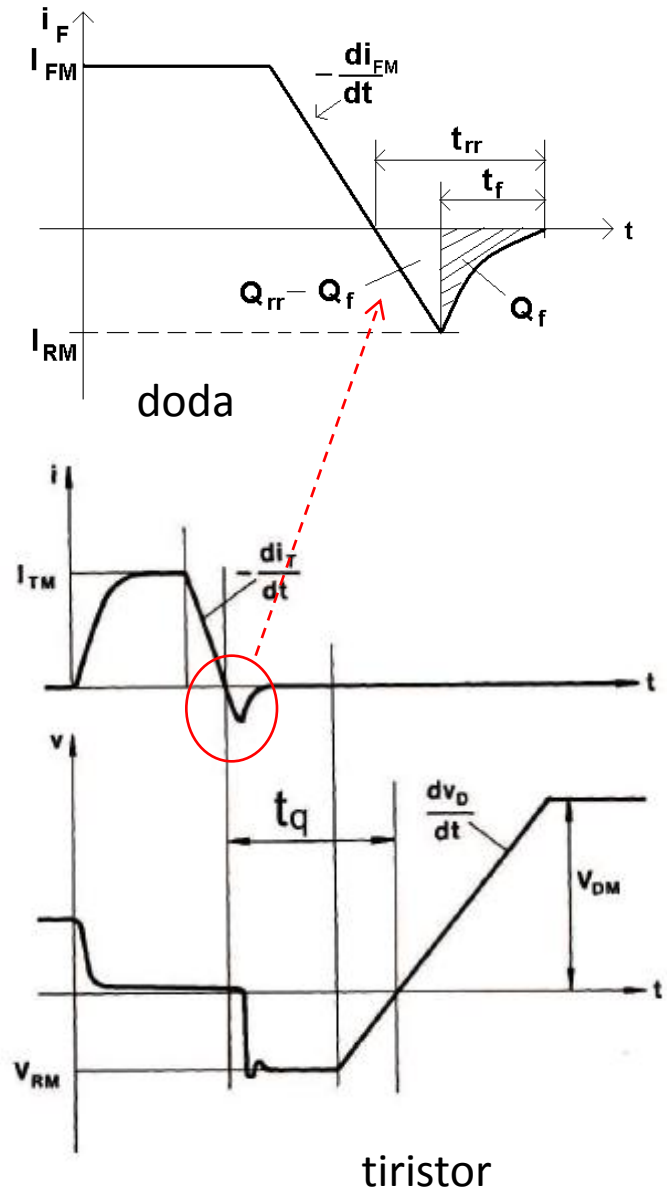
$f = 1/T$ - učestanost primenjenog inverznog napona na diodi

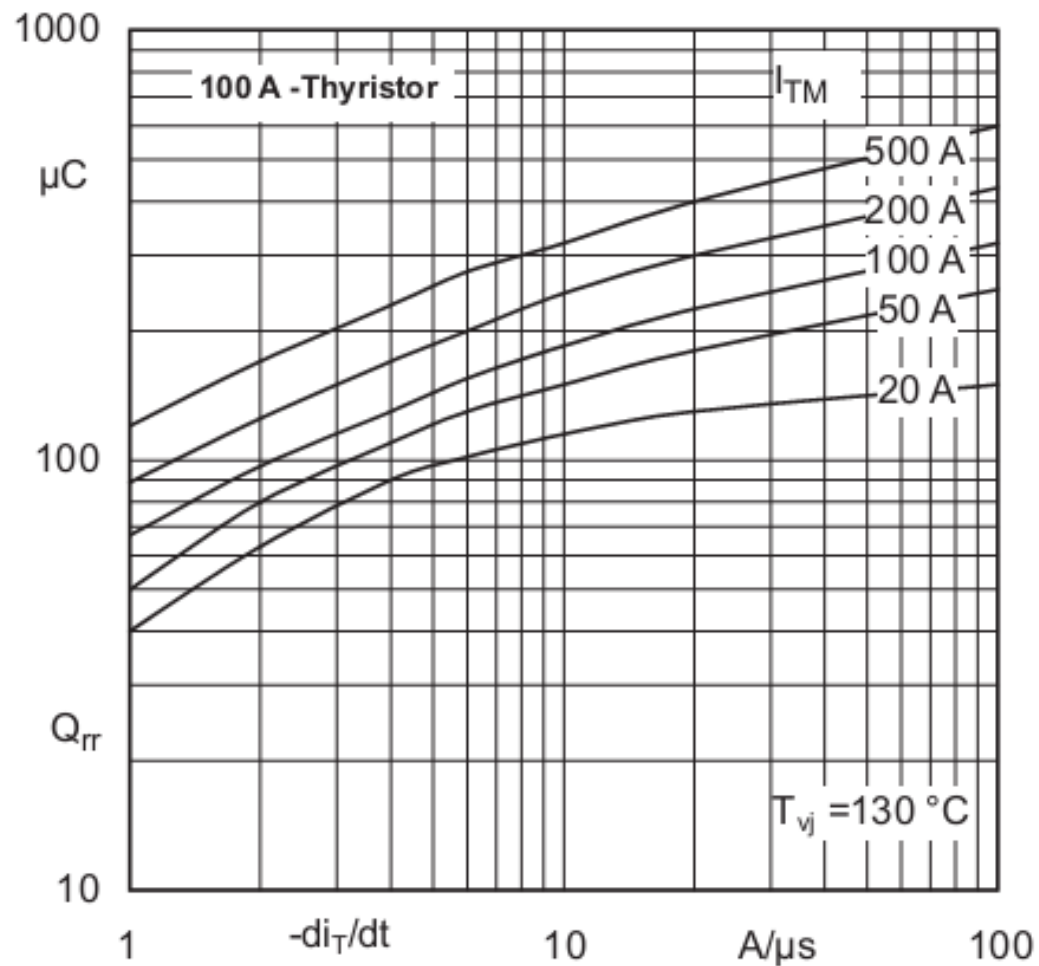
T - perioda rada

t_R - vreme trajanja primenjenog inverznog napona V_R u toku periode rada

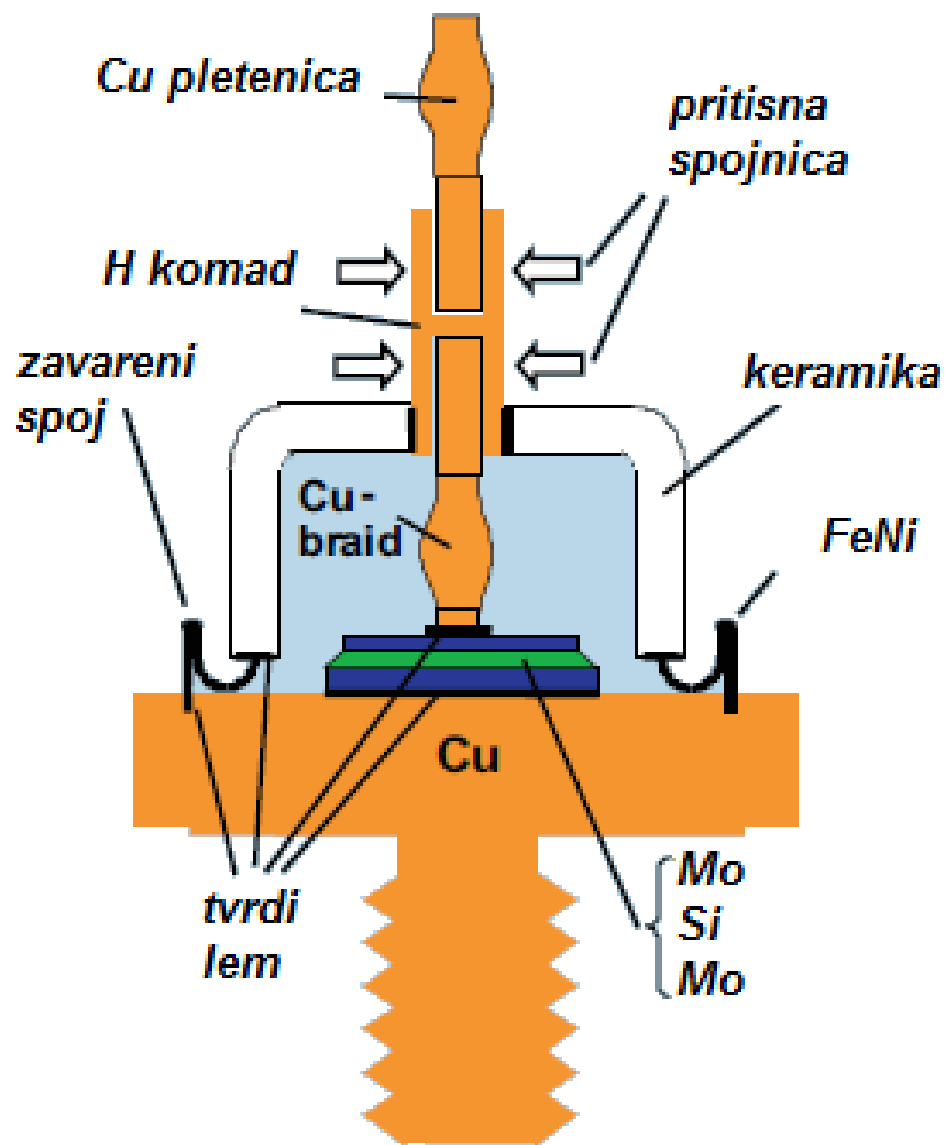
t_p - vreme trajanja impulsa struje diode

$$Q_f = Q_{rr} - \frac{2Q_{rr}^2}{2(-\frac{di_F}{dt})} \approx (0.2 \dots 0.4) \cdot Q_{rr}$$



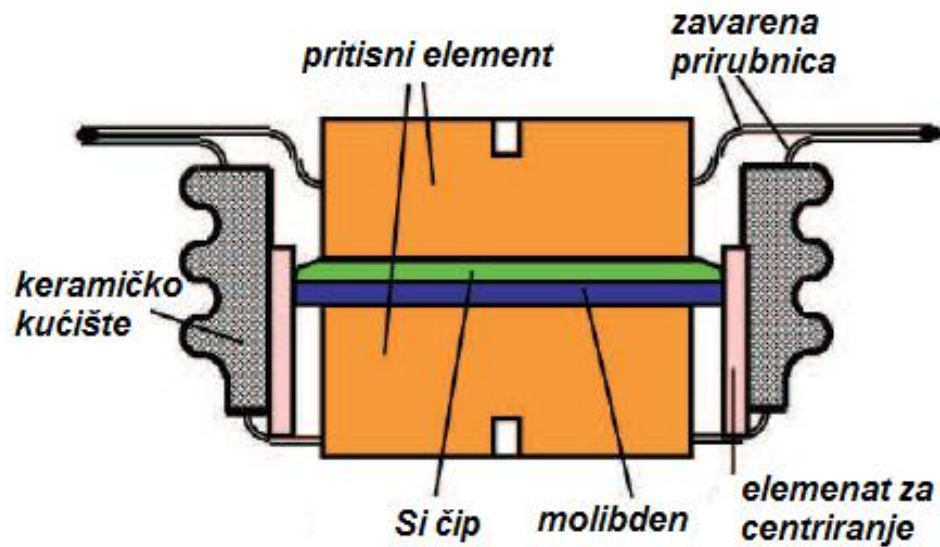


Povraćeno naelektrisanje tokom komutacije –isključenja, u zavisnosti od “di/dt” za različite vrednosti “on-state” struje (struje vođenja tiristora)

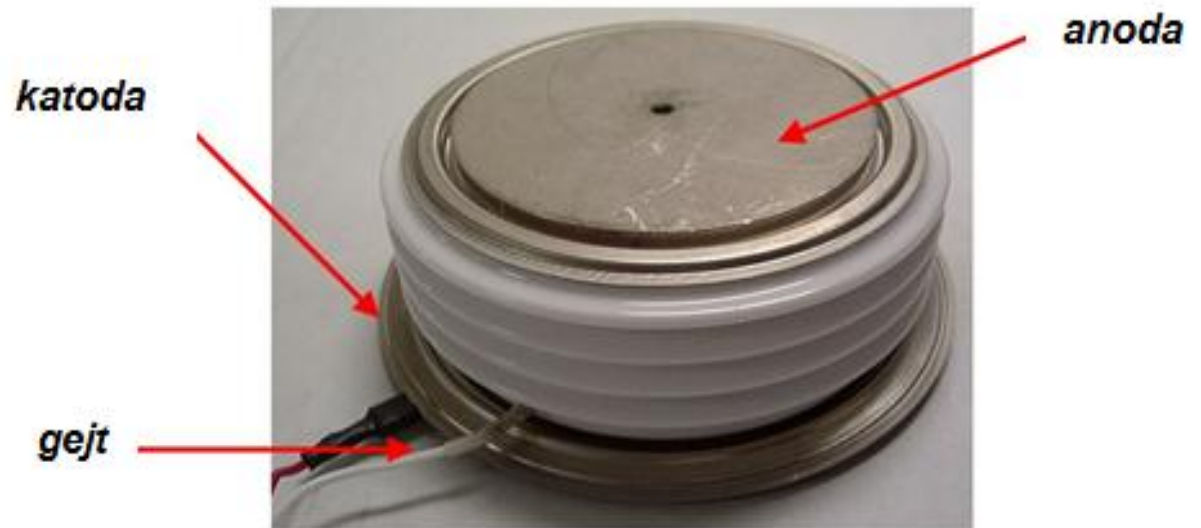


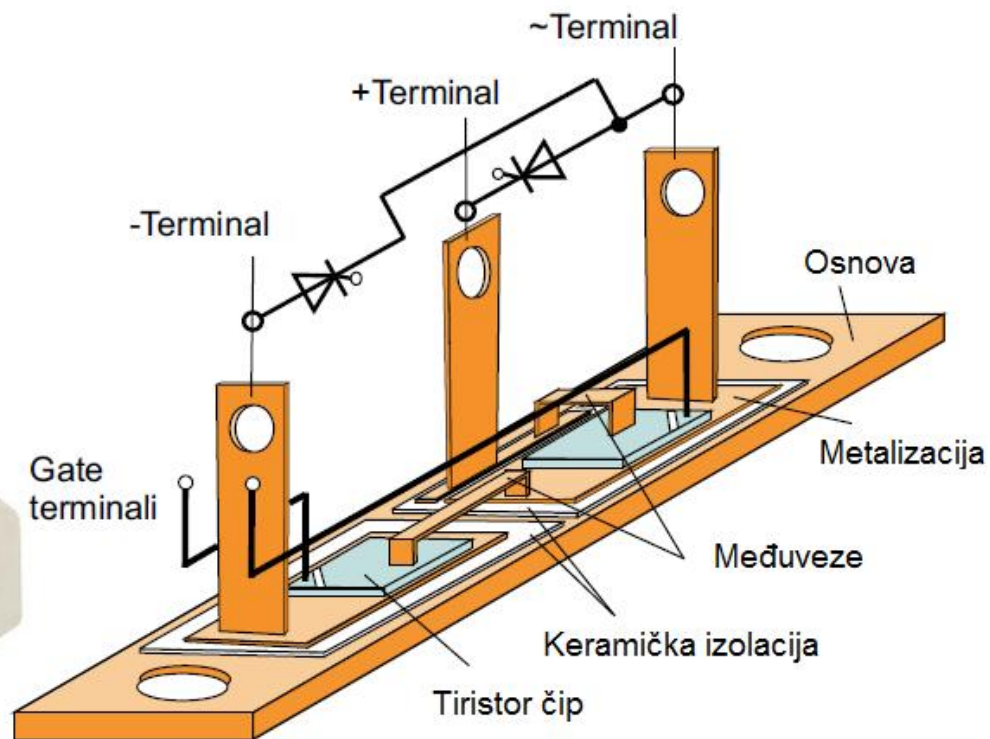
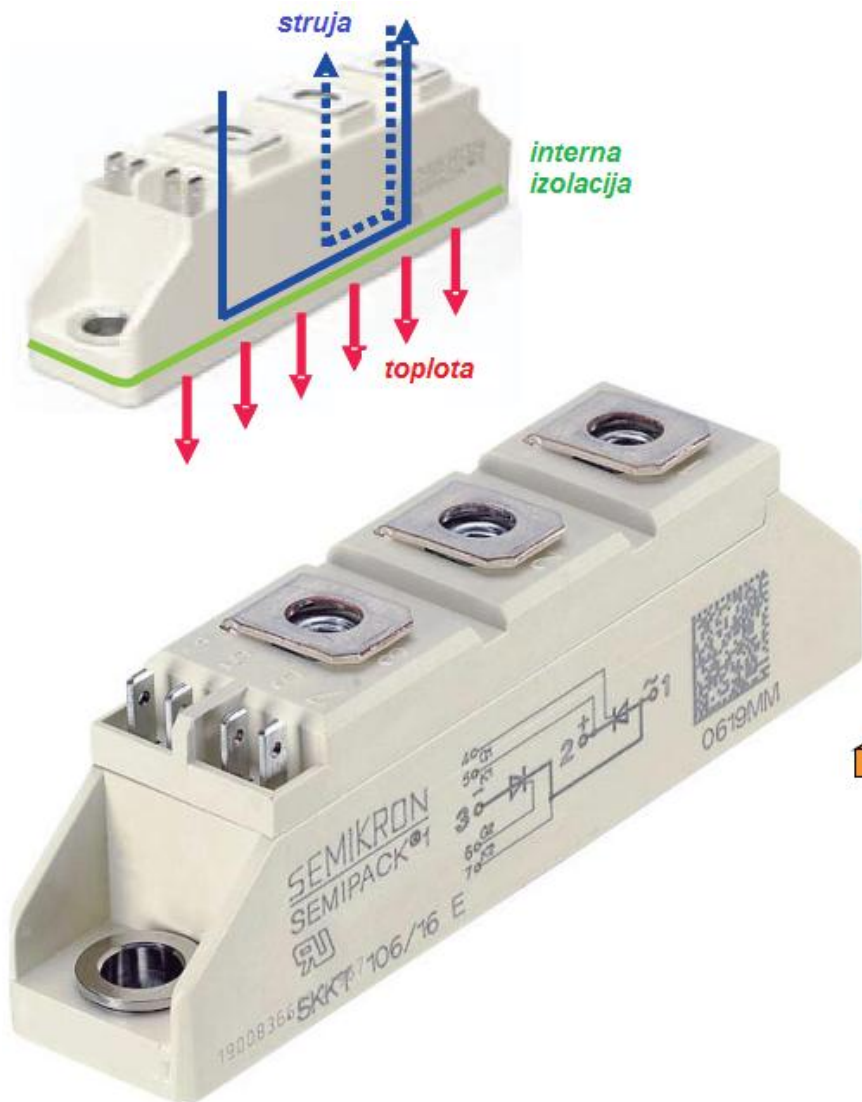
SCR sa bakarnim navojem za montažu na hladnjak

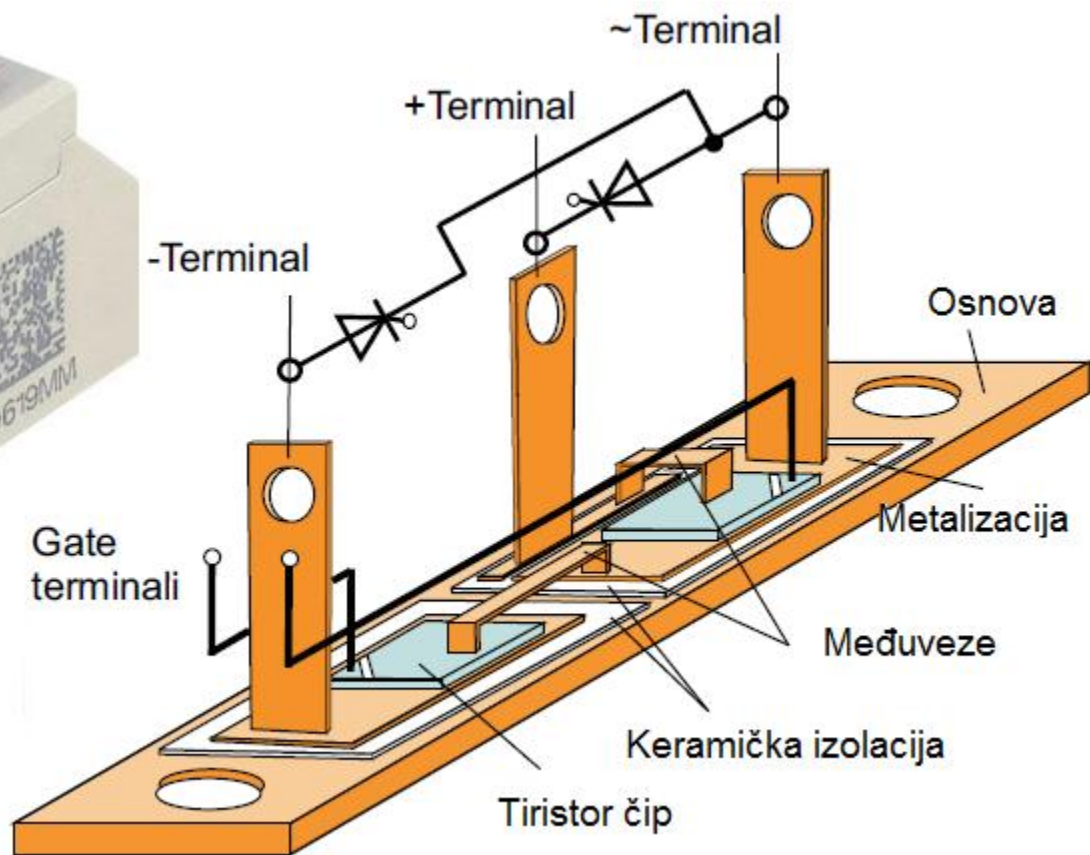
Disk (hokey-pak) SCR



Propušta struju 100A do nekoliko kA
Podnosi napone od 100V do nekoliko kV (4-6kV)

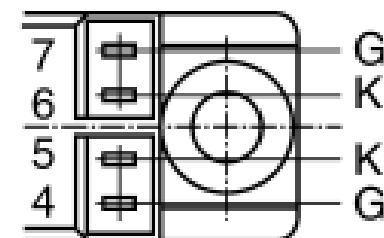
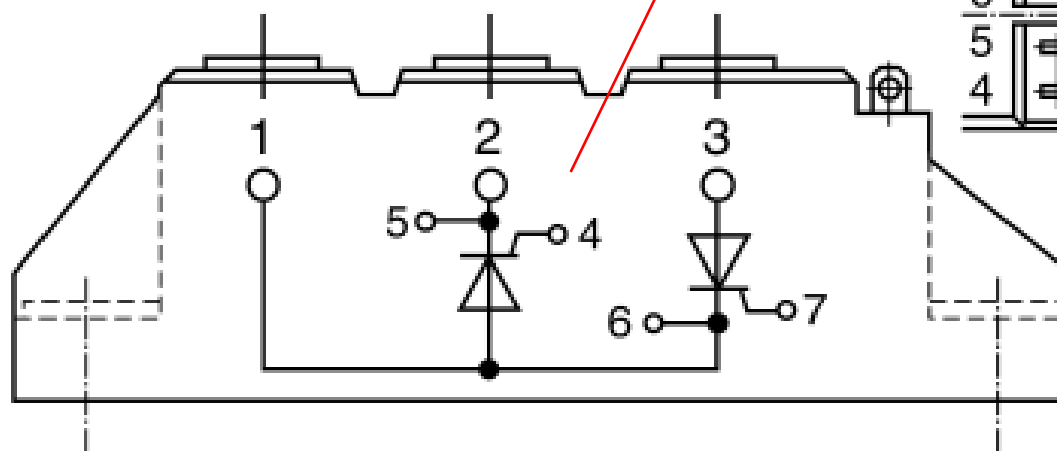




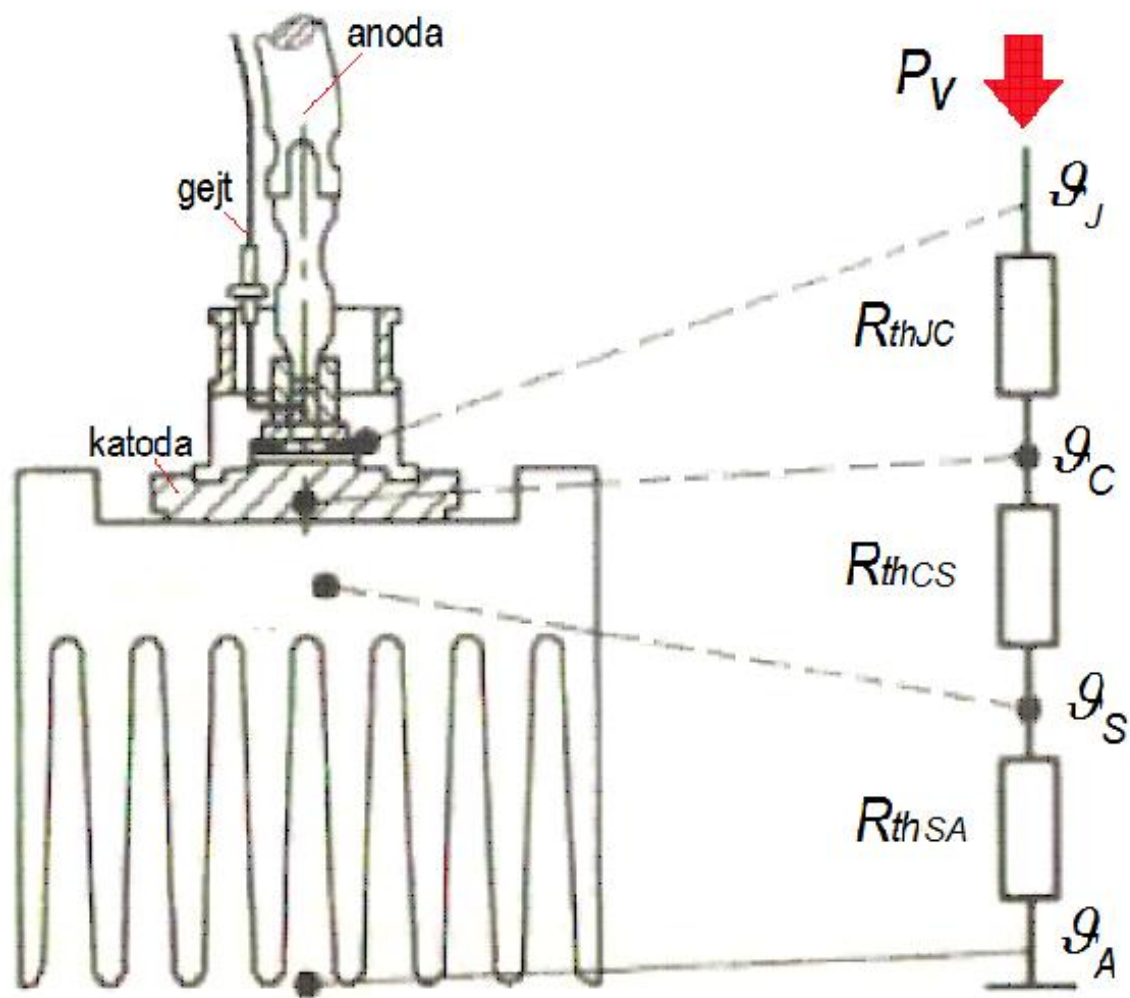




SKKT .. B



EKVIVALENTNA TERMIČKA ŠEMA SISTEMA TIRISTOR-HLADNJAK



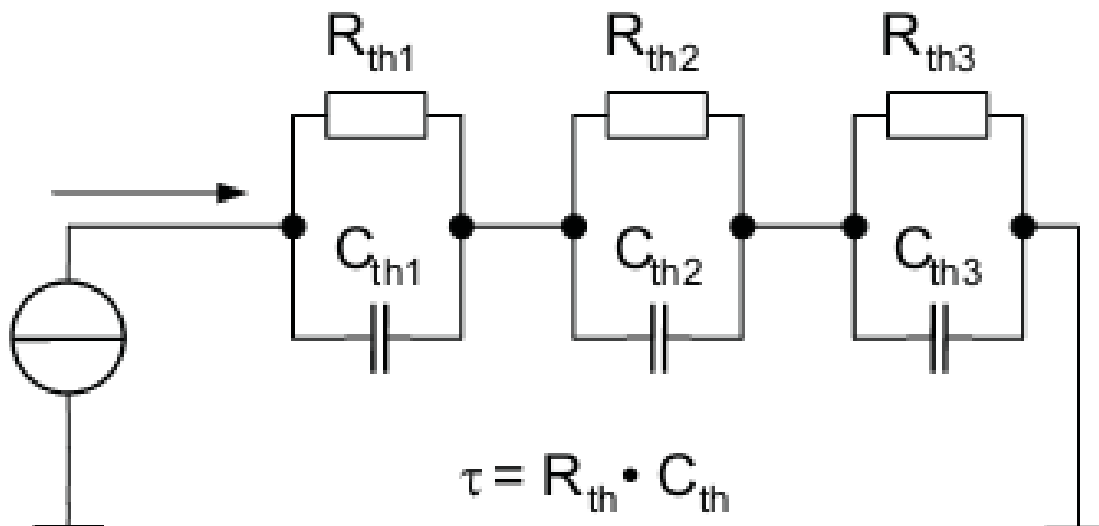
STACIONARNO
STANJE:

$$R_{th} \cong \text{const}$$

$$R_{th} [=] \text{K/W}$$

$$P_v = \frac{\vartheta_j - \vartheta_a}{R_{thJA}}$$

$$R_{thJA} = R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA}$$



$$\tau = R_{th} \cdot C_{th}$$

C_{th} – termički kapacitet

Opšti dinamički termički model (važi u prelaznom režimu)

$$Z_{th} = \sum_{i=1}^n R_{thi} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right)$$

Dinamička termička impedansa

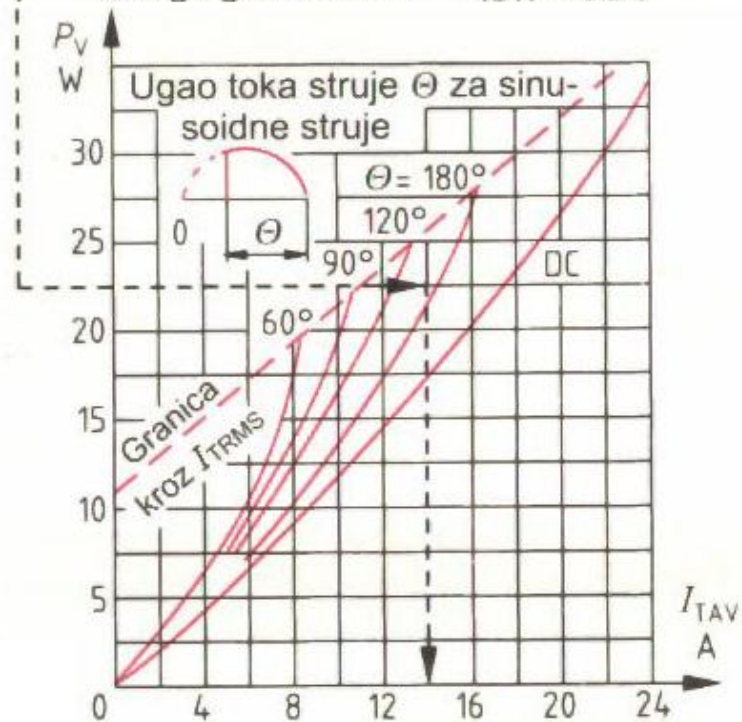
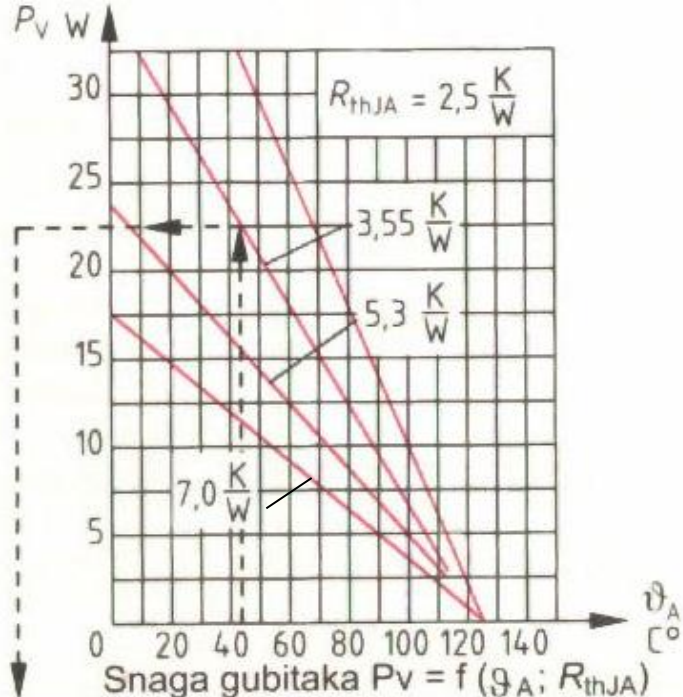
Tiristor $I_{TAV} = f(P_v; \Theta)$

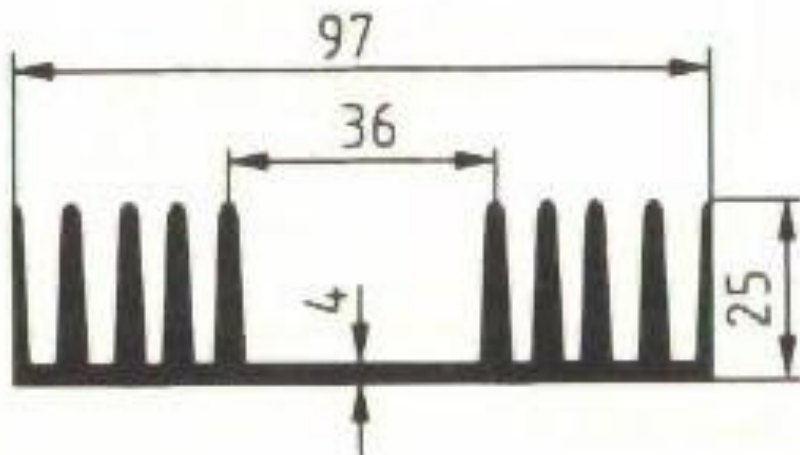
Trajno dozvoljena struja tiristora CS 8

pri $\vartheta_A = 45^\circ\text{C}$, $R_{thJA} = 3,55 \frac{\text{K}}{\text{W}}$

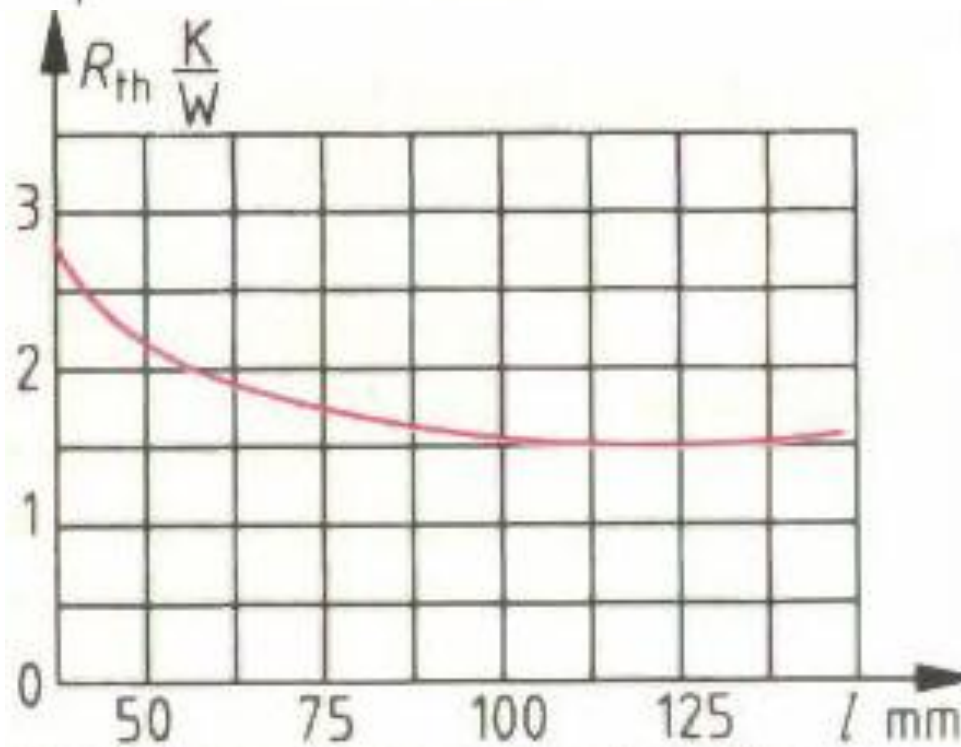
za $\Theta = 180^\circ$

Odvođenje disipacione toplote SCR prekidača
utiče na opterećenje i konstrukcionu zapreminu
pretvarača!!!

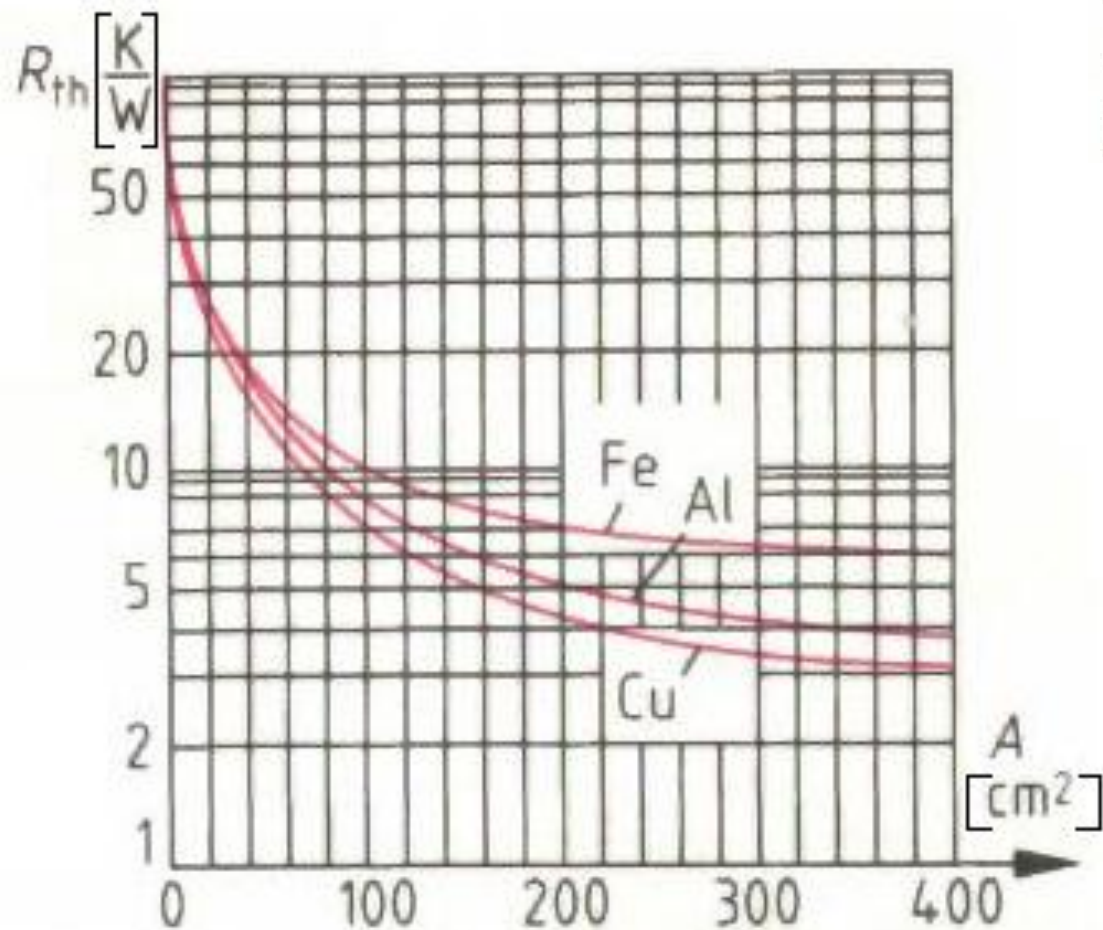




Rebrasto rashladno telo od Al livenog pod pritiskom kao šipkasti materijal



Toplotna otpornost rebrastog rashladnog tela kao f (l)



Toplotna otpornost R_{thKA} od 1 mm debelih, golih, kvadratnih limova

- KARAKTERISTIKE VAŽE ZA VERTIKALNU MONTAŽU
- KOD HORIZONTALNE MONTAŽE POVRŠINA SE MORA POVEĆATI 20%
- KOD LIMOVA CRNE BOJE POVRŠINA SE MOŽE SMANJITI ZA OKO 15%

Oznake načina hlađenja

Vrsta hlađenja	Rashladno sredstvo	Nepo- sredno hlađenje		Posredno hlađenje nosiocima toplote					
				Provodnici toplote	Prirodna cirkulacija		Prisilna cirkulacija		
					vazduh	ulje	vazduh	ulje	voda
Prirodno	vazduh	S		KS	LS	OS	LUS	OUS	—
Pojačano	vazduh ¹⁾	F	G	KF	—	OF	LUF	OUF	WUF
	voda	W		—	—	OW	LUW	OUW	WUW

¹⁾ Kod posrednog pojačanog hlađenja vazduhom je umesto oznake F moguća oznaka G



PRETPOSTAVLJENI PARAMETRI JEDNOG TIPIČNOG TIRISTORA

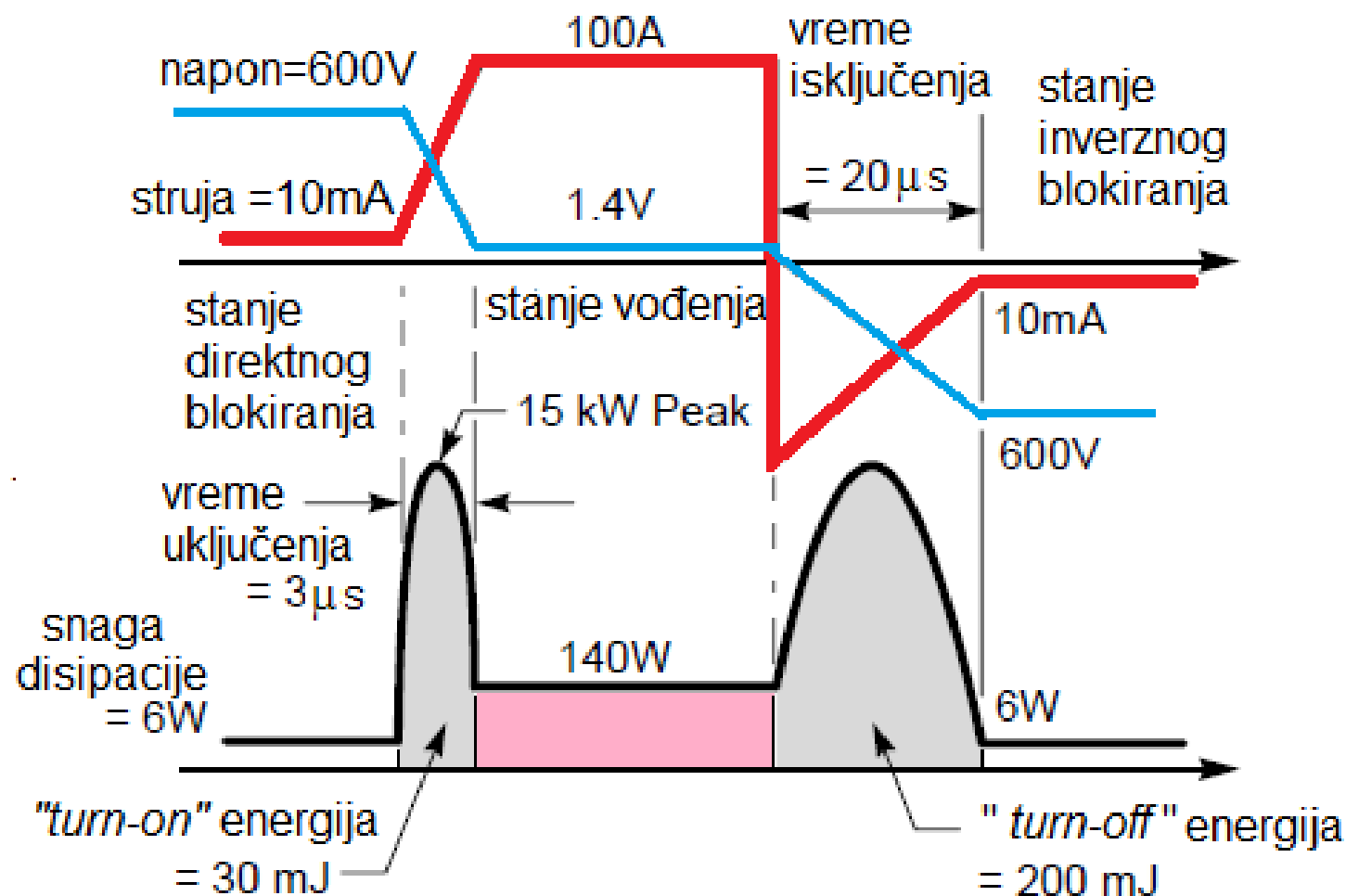
$I_{T(RMS)}$	Current Rating	100A
V_{RRM}, V_{DRM}	Blocking Voltage Rating	600V
V_T	Forward Voltage Drop at 100A	1.4V
I_{DRM}, I_{RRM}	Leakage Current at 600V	10mA
t_{ON}	Turn-On Time	3 μ s
t_{OFF}	Turn-Off Time	20 μ s

- $I_{T(RMS)}$ -Srednja vrednost struje 100A
- V_{RRM}, V_{DRM} -Trajni inverzni napon 600V
- V_T -Pad napona u stanju vođenja 1.4V
- I_{RRM}, I_{DRM} -Struja „curenja“
(struja inverzne polarizacije) 10mA
- t_{on} - Vreme uključenja 3 μ s
- t_{off} - Vreme isključenja 20 μ s



Cilj nam je da na jednostavan način procenimo ukupne gubitke na tiristoru!!!

NAPOMENA: radi jednostavnijeg proračuna zanemarena je dinamička otpornost r_d



**termini u katalozima*

turn off time = vreme isključenja

turn-on time = vreme uključenja

U stanju inverznog blokiranja SCR disipira $600\text{V} \times 10\text{mA} = 6\text{W}$

U stanju direktnog blokiranja SCR disipira $600\text{V} \times 10\text{mA} = 6\text{W}$

U stanju vođenja SCR disipira $1.4\text{V} \times 100\text{A} = 140\text{W}$

- Tokom prekidačkih komutacija ne možemo izbeći činjenicu da se disipacija u tom intervalu menja veoma brzo i da ima značajne vrednosti.
- Tokom intervala uključjenja od $3\mu\text{s}$ napon na tiristoru mora opasti sa 600V na 1.4V , dok struja mora porasti od vrednosti 10mA do vrednosti 100A .
- Trenutna snaga je proizvod trenutnih vrednosti napona i struje i stoga zavisi od njihovih dinamičkih talasnih oblika.

Talasni oblik trenutne snage tokom isključenja je obrnuta parabola koja ima vršnu vrednost od 15 kW !

Kada se silicijumski spoj podvrgne ovoj vrednosti disipacije temperatura spoja raste veoma brzo.

Disipirana energija na prekidačkom elementu tokom uključjenja je jednaka površini ispod parabole :

$$(2/3) \times 15\text{ kW} \times 3\mu\text{s} = 30\text{ mJ}.$$

Pretpostavljajući linearne talasne oblike struje i napona tokom isključenja i uz pretpostavku da je vršna vrednost ("peak") snage takođe 15kW, dobija se da je energija disipacije u odnosu na slučaj uključenja, značajno veća:

$$(2/3) \times 15 \text{ kW} \times 20\mu\text{s} = 200 \text{ mJ.}$$

Ovo je posledica znatno dužeg vremena isključenja!!!

Ako pretpostavimo da je vreme u toku koga je uključen tiristor jednako vremenu u toku koga je on isključen možemo dobiti ukupnu srednju vrednost snage disipacije:

On-Time = Off-Time = 10ms

Disipacija tokom vremenskog intervala provođenja tiristora $140\text{W} \times 10\text{ms} = 1.40\text{J}$

Disipacija u stanju blokiranja $6\text{W} \times 10\text{ms} = 0.06\text{J}$

Disipacija tokom vremena uključenja (turn-on) $(2/3) \times 15 \text{ kW} \times 3 \mu\text{s} = 0.03\text{J}$

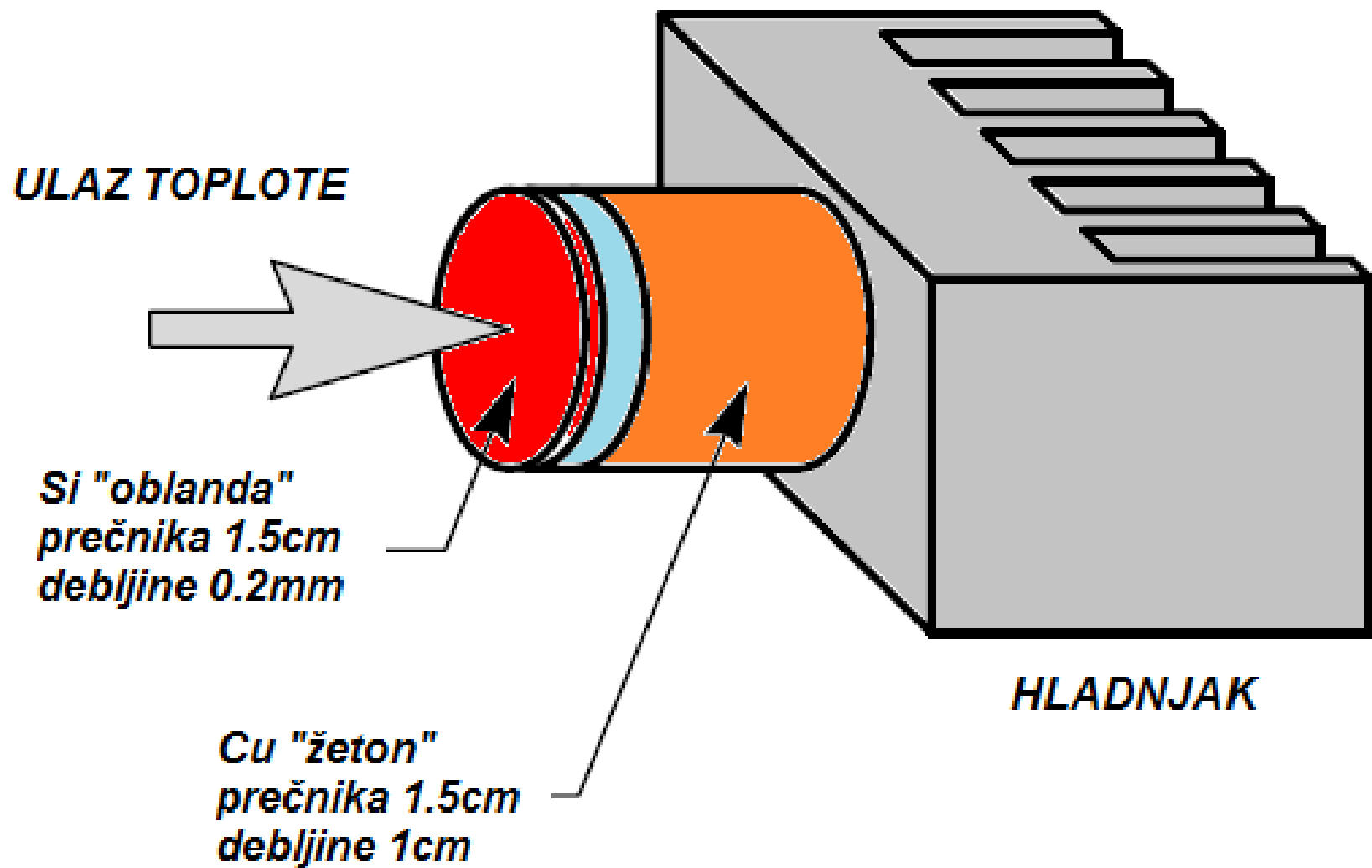
Disipacija tokom vremena isključenja (turn-off) 0.20 J

Ukupna disipacija energije po jednoj periodi je jednaka:

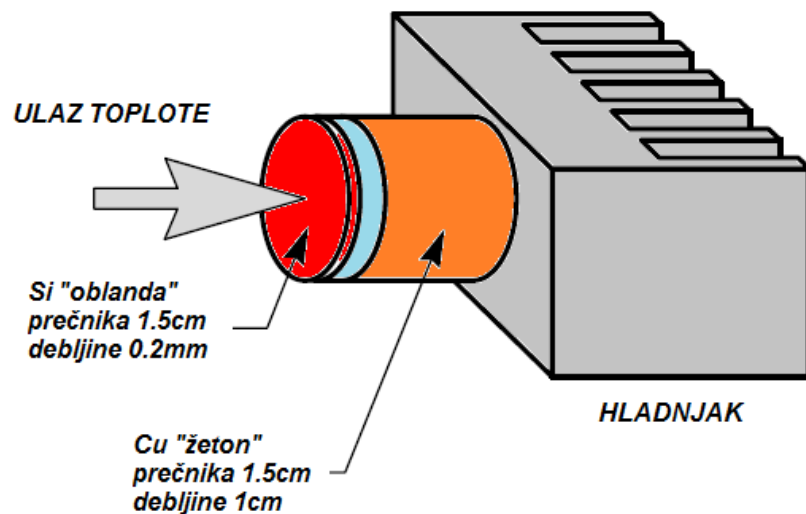
$$1.40\text{J} + 0.06\text{J} + 0.03\text{J} + 0.20\text{J} = 1.69\text{J}$$

Dok je **SREDNJA VREDNOST SNAGE DISIPACIJE**

$$(\text{Average Power Dissipation}) = 1.69\text{J}/20\text{ms} = \underline{\underline{84.5\text{W}}}$$



Pojednostavljena geometrija za Si prekidački element (SCR) koji je montiran na hladnjak



d -debljina sloja
 k - specifična termička provodnost
 A - površina poprečnog preseka

$$R_{\theta Si} = \frac{d}{kA} = \frac{2 \times 10^{-4} m}{(84 W / m^{\circ}C)(1.5^2 \times 10^{-4})(\pi / 4) m^2}$$

$$= 0.0135^{\circ}C / W$$

U ustaljenom stanju disipacija 100W će prouzrokovati razliku temperature na Si pločici za svega 1.35°C

$$R_{\theta Cu} = \frac{d}{kA} = \frac{1 \times 10^{-2} m}{(388 W / m^{\circ}C)(1.5^2 \times 10^{-4})(\pi / 4) m^2}$$

$$= 0.146^{\circ}C / W$$

U ustaljenom stanju 100W disipacija će prouzrokovati razliku temperature na Cu „žetonu“ za 14.6°C

$$R_{\theta Si} + R_{\theta Cu} = R_{\theta j-c} \quad \text{termička otpornost Si spoj (Junction)-Kućište (Case)}$$

Termička otpornost „junction-case“ se daje u katalozima proizvođača za dati SCR prekidač!!

PRORAČUN HLADNJAKA

Proračunaćemo hladnjak za trajnu struju tiristora od 100A (srednja vrednost disipacije 140W, i da pri tome temperatura Si spoja (junction) ne prelazi 120°C uz pretpostavku da je maksimalna temperatura ambijenta 35°C.

$$\sum R_{\theta} = \frac{T_J - T_A}{\text{srednja vrednost snage disipacije}} = \frac{(120 - 35)^{\circ}\text{C}}{140\text{ W}} = 0.607^{\circ}\text{C} / \text{W}$$

$$\begin{aligned} R_{\theta_{\text{hladnjaka}}} &= \sum R_{\theta} - R_{\theta_{Si}} - R_{\theta_{Cu}} \\ &= 0.607 - 0.014 - 0.146 = 0.447^{\circ}\text{C} / \text{W} \end{aligned}$$

Takođe, moguće je za dati tip hladnjaka (izabran u katalogu proizvođača), uz poznatu disipaciju u [W] i temperaturu ambijenta izračunati temperaturu na Si spoju (Junction)

Disipacija snage u tiristorima

Ukupna snaga disipacije u energetsnoj diodi

PROVODNO STANJE:

Trenutna vrednost snage gubitaka usled vođenja

$$p_F = (V_{TO} + r_d \cdot i_F) \cdot i_F$$

Srednja vrednost snage gubitaka usled vođenja

$$P_{TAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_F(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_{0T} V_{TO} i_F dt + r_d \cdot \int_0^T i_F^2 dt \right]$$

$$P_{TAV} = V_{TO} \cdot I_{TAV} + r_d \cdot I_{TRMS}^2$$

$$I_{TRMS} / I_{TAV} = F_F \quad \text{faktor oblika (Form Factor)}$$

$$I_{TRMS}^2 / I_{TAV}^2 = F_F^2$$

$$P_{TAV} = V_{TO} \cdot I_{TAV} + r_d \cdot F_F^2 I_{TAV}^2$$

$$I_{TRMS}^2 / I_{TAV}^2 = 360^\circ / \Theta$$

za pravougaone impulse

UGAO VOĐENJA Θ

$$I_{TRMS}^2 / I_{TAV}^2 \sim 2.5 * (180^\circ / \Theta)$$

za fazno kontrolisane impulse

Θ	180°	120°	90°	60°	30°	15°
$\frac{I_{TRMS}^2}{I_{TAV}^2}$	2.47	3.5	4.93	7.7	15.9	31.8

za fazno kontrolisane impulse

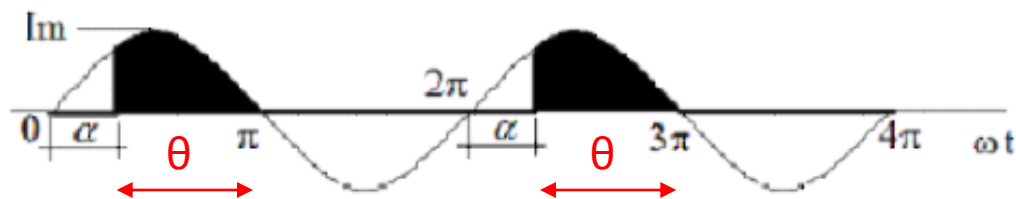
Θ	180°	120°	90°	60°	30°	15°
$\frac{I_{\text{TRMS}}^2}{I_{\text{TAV}}^2}$	2.47	3.5	4.93	7.7	15.9	31.8

UGAO VOĐENJA

$$\Theta = \pi - \alpha$$

UGAO UPRAVLJANJA

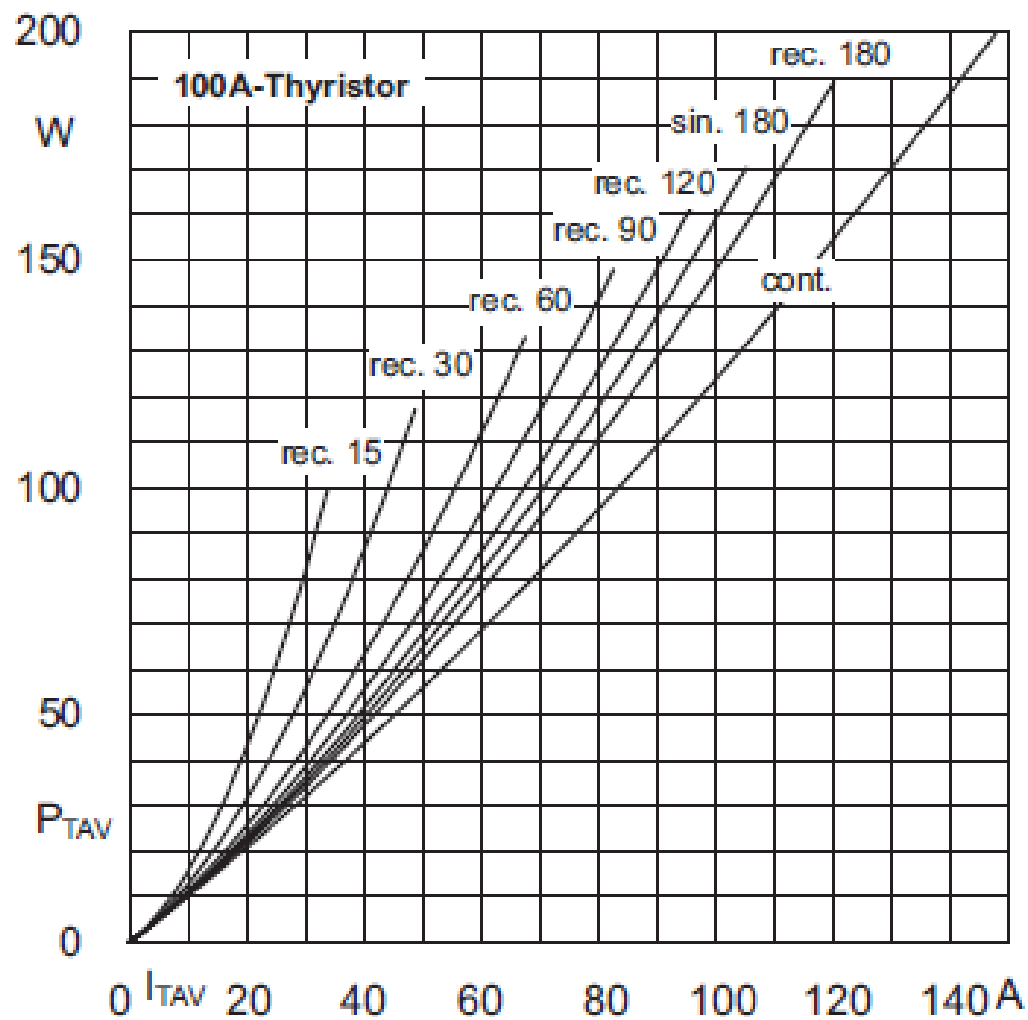
$$\alpha$$



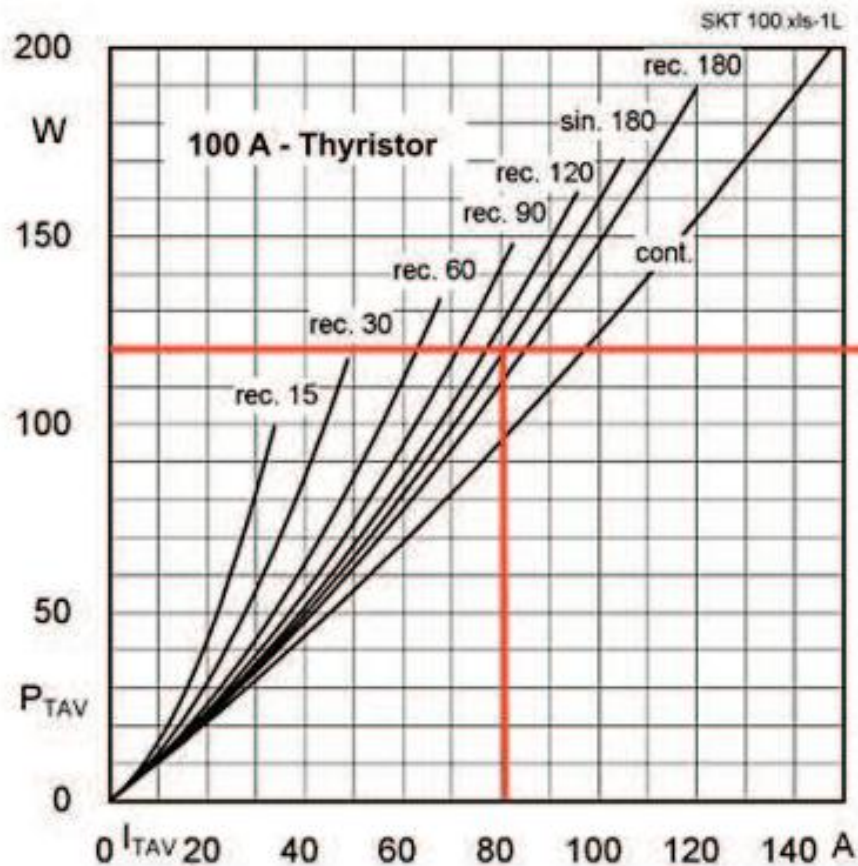
$$I_{\text{AVG}} = \frac{I_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) \quad I_{\text{RMS}} = \frac{I_m}{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$$\frac{I_{\text{RMS}}}{I_{\text{AVG}}} = \frac{\cancel{I_m} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{\frac{\cancel{I_m}}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)} = \pi \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{(1 + \cos \alpha)}$$

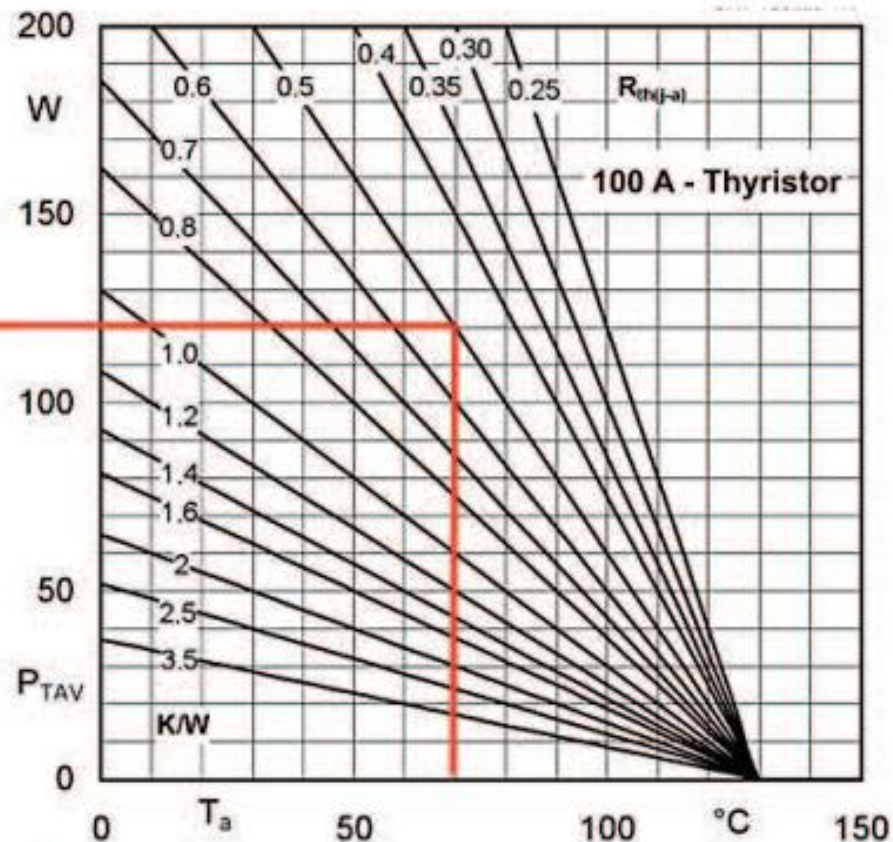
$$\left[\frac{I_{\text{RMS}}}{I_{\text{AVG}}} \right]^2 = \pi^2 \cdot \frac{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}{(1 + \cos \alpha)^2}$$



Srednja vrednost disipacije tipičnog tiristora za 100A ; Za razne vrednosti ugla vođenja (*rec*-pravougaoni talasni oblici, *sin*-sinusni polutalas, *cont*-kontinualni režim)



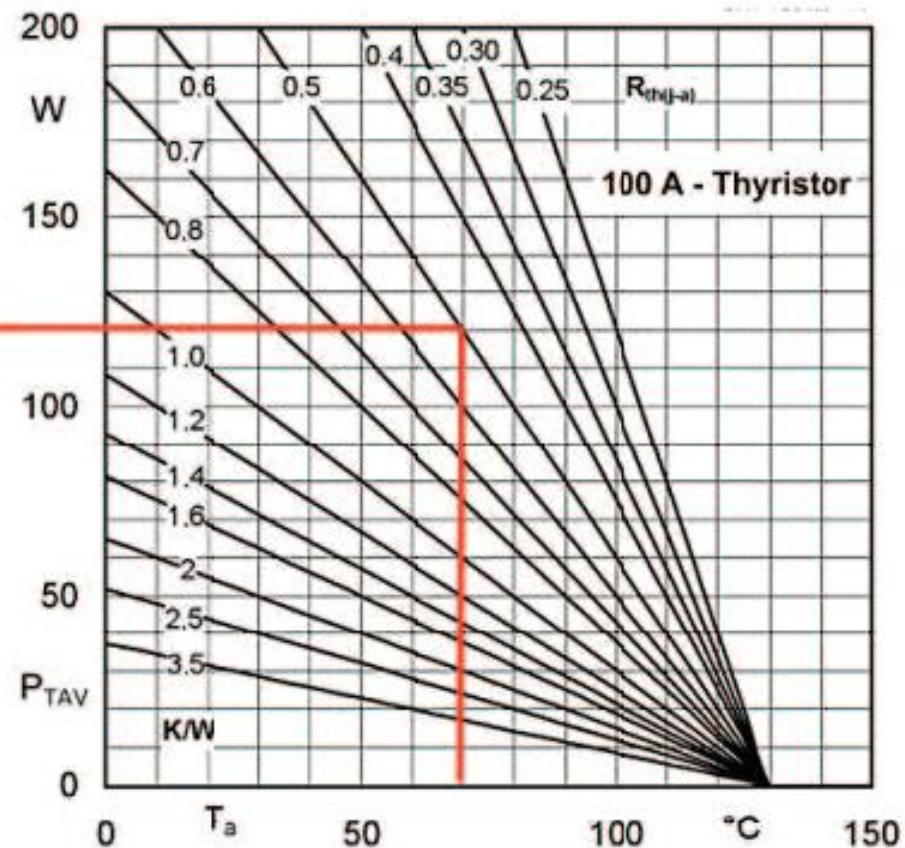
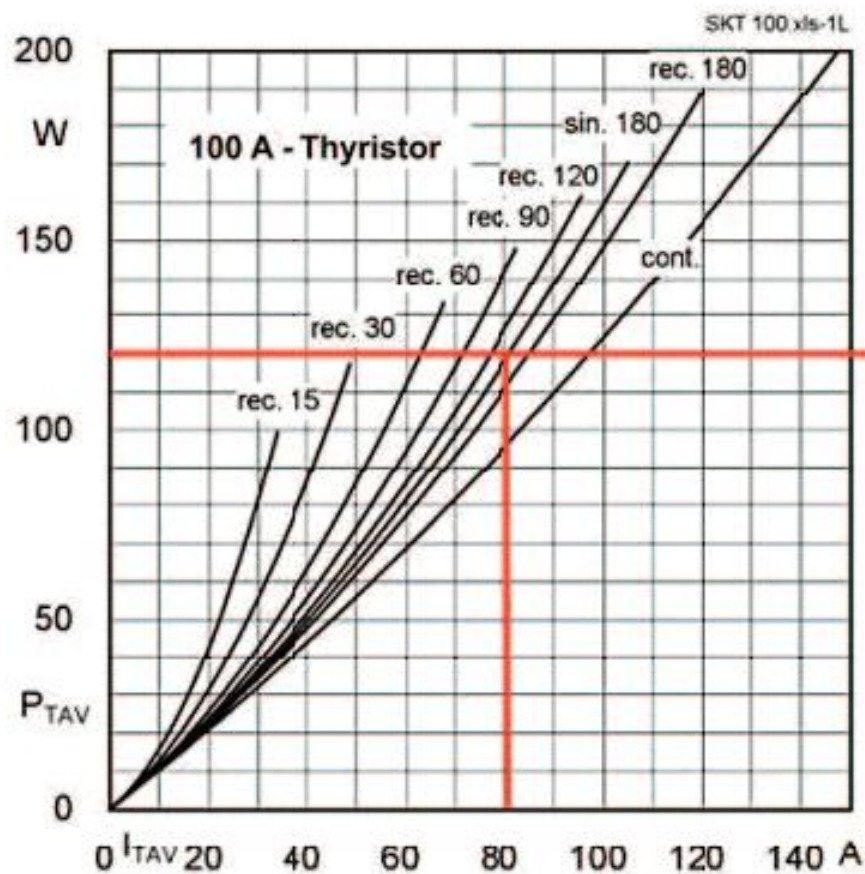
a)



b)

a) Srednja vrednost snage disipacije u zavisnosti od srednje vrednosti struje I_{TAV} za različite talasne oblike struje (vremena vođenja 15-180°)

b) Dozvoljena temperatura ambijenta preko termičke otpornost spoj-okolina ("junction-ambient") uključujući kontaktnu otpornost kućište-hladnjak ("case-sink")

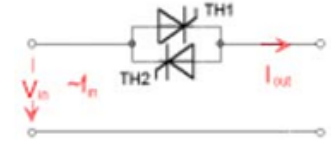


- Za temperaturu ambijenta $T_a = 70^\circ\text{C}$ i termičku otpornost $R_{th(j-a)} = 0.5 \text{ K/W}$, gubici snage ne smeju biti veći od 120 W.
- Pod ovim okolnostima tiristorski p-n spoj se zagreva do MAX dozvoljene temperature od 130°C .
- Sinusni polutalas struje sa srednjom vrednosti $I_{TAV} = 80 \text{ A}$ proizvodi ove gubitke snage
- Preporuka je da se usvoji za proračunsku vrednost dozvoljene struje usvoji $0.8 \cdot I_{TAV}$

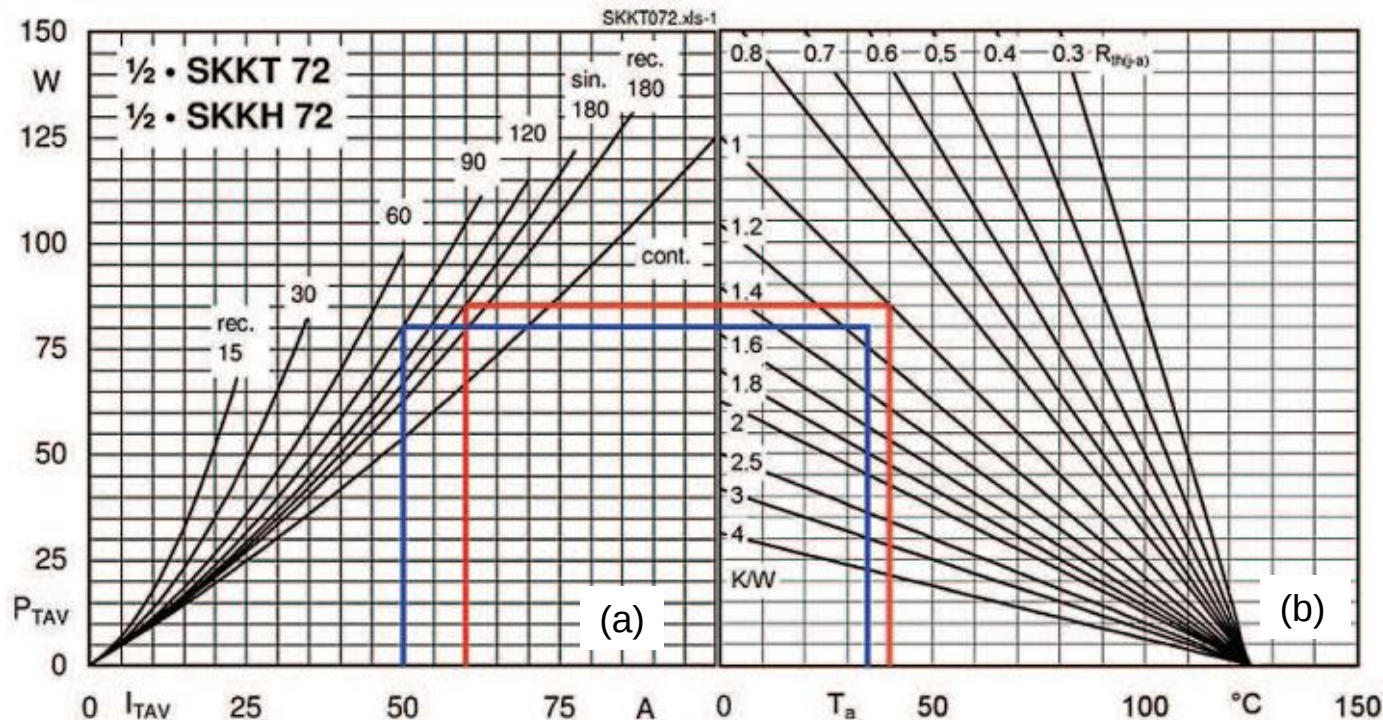
PRAKTIČNI PRIMERI TERMIČKOG DIMENZIONISANJA



1.PRIMER DIMENZIONISANJA AC/AC KONTROLERA tipW1C (anti paralelna veza dva SCR)



Tiristorski modul SEMIPACK SKKT 72 je predviđen za struju kontinualnu struju 120Arms. Pri maksimalnom uglu vođenja od $\theta=180^\circ$, srednja vrednost struje tiristora je $120\sqrt{2}/\pi = 52A$ po jednom tiristoru. Ako se uzme minimalna sigurnosna margina od 10%, dobija se da je $I_{TAV}=60A$. Kataloške karakteristike za dati modul su date na slici:



- a) Srednja vrednost snage disipacije u zavisnosti od srednje vrednosti struje I_{TAV} za različite talasne oblike struje (vremena vođenja 15° - 180°)
- b) Dozvoljena temperatura ambijenta preko termičke otpornost spoj-okolina ("junction-ambient") uključujući kontaktnu otpornost kućište-hladnjak ("case-sink")

Sa prethodnih dijagrama se dobija da su gubici snage po jednom tiristoru za srednju vrednost struje 60A, jednaki $P_{TAV}=85W$ (180° sinusni polutalas). Pretpostavljajući da je MAX temperatura ambijenta $T_a=40^{\circ}C$ i dozvoljena temperatura Si spoja $T_j=125^{\circ}C$ dobijamo da termička otpornost $R_{th(j-a)} \leq (125^{\circ}C - 40^{\circ}C)/85W = 1K/W$. Shodno kataloškim podacima (naredni slajd), za sinusni polutalas 180°, za jedan tiristor se dobija:

$$R_{th(j-s)} = R_{th(j-c)} + R_{th(c-s)} = 0.37K/W + 0.2K/W = 0.57K/W$$

Termička otpornost pojedinačnog hladnjaka za svaki tiristor bi trebala da bude jednaka: $R_{th(s-a)} = 1K/W - 0.57K/W = 0.43K/W$. Jasno je da bi za dva tiristora montirana na isti hladnjak ova vrednost morala da iznosi $R_{th(s-a)}^* = 0.215K/W$.

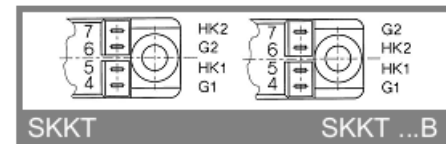
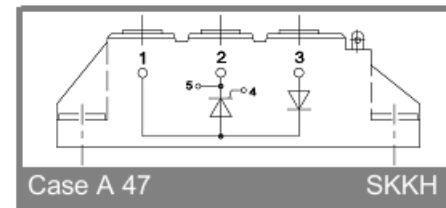
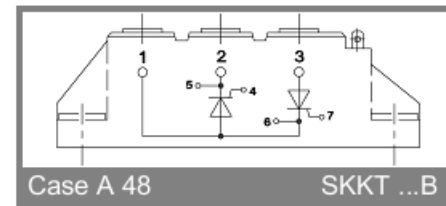
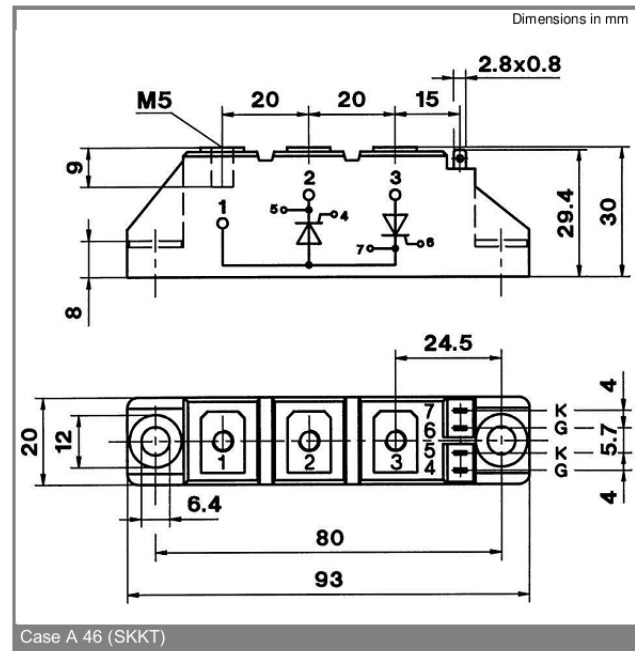
Dakle hladnjak za jedan SEMIPACK modul ($n=1$) i ukupnu disipaciju $P_{tot} = 2 \times 85W = 170W$ mora imati termički otpor $R_{th(s-a)} \leq 0.215K/W$.

Sledi naredni korak IZBOR HLADNJAKA i eventualno prinudnog sistema hlađenja!!!.

SEMICONDUCTOR
SEMIPACK 106/12 E

V_{RSM} V	V_{RRM}, V_{DRM} V	$I_{TRMS} = 125 \text{ A}$ (maximum value for continuous operation) $I_{TAV} = 70 \text{ A}$ (sin. 180; $T_c = 85^\circ \text{C}$)		
900	800	SKKT 72/08E	SKKT 72B08E	SKKH 72/08E
1300	1200	SKKT 72/12E	SKKT 72B12E	SKKH 72/12E
1500	1400	SKKT 72/14E	SKKT 72B14E	SKKH 72/14E
1700	1600	SKKT 72/16E	SKKT 72B16E	SKKH 72/16E
1900	1800	SKKT 72/18E	SKKT 72B18E	SKKH 72/18E

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{TAV}	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	70 (50)	A
I_D	P3/180; $T_a = 45$ °C; B2 / B6	62 / 75	A
	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	115 / 145	A
I_{RMS}	P3/180F; $T_a = 35$ °C; W1 / W3	155 / 3 * 115	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	1600	A
	$T_{vj} = 125$ °C; 10 ms	1450	A
i^2t	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	13000	A²s
	$T_{vj} = 125$ °C; 8,3 ... 10 ms	10500	A²s
V_T	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 300$ A	max. 1,9	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 0,9	V
r_T	$T_{vj} = 125$ °C	max. 3,5	mΩ
I_{DD} ; I_{RD}	$T_{vj} = 125$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}$; $V_{DD} = V_{DRM}$	max. 20	mA
t_{gd}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
t_{gr}	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	1	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 150	A/μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 1000	V/μs
t_q	$T_{vj} = 125$ °C ,	80	μs
I_H	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 250	mA
I_L	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 600	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 150	mA
V_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 0,25	V
I_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 6	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,35 / 0,18	K/W
$R_{th(j-c)}$	sin. 180; per thyristor / per module	0,37 / 0,19	K/W
$R_{th(j-c)}$	rec. 120; per thyristor / per module	0,39 / 0,2	K/W
$R_{th(c-s)}$	per thyristor / per module	0,2 / 0,1	K/W
T_{vj}		- 40 ... + 125	°C
T_{stg}		- 40 ... + 125	°C
V_{iso}	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
M_s	to heatsink	5 ± 15 % ¹⁾	Nm
M_t	to terminals	3 ± 15 %	Nm
a		5 * 9,81	m/s²
m	approx.	95	g
Case	SKKT	A 46	
	SKKT ...B	A 48	
	SKKH	A 47	



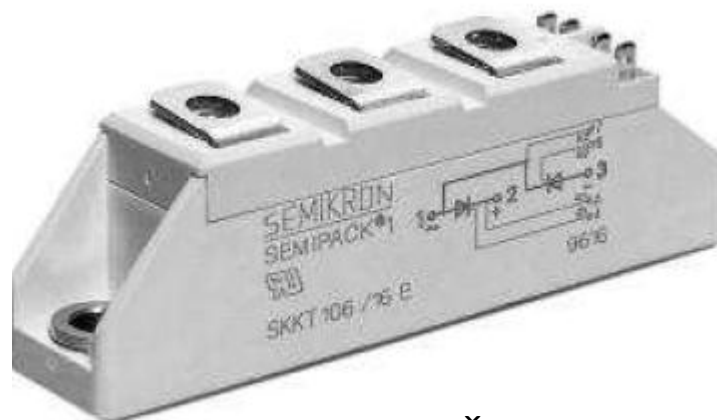


SKKT 72

V_{RSM} V	V_{RRM}, V_{DRM} V	$I_{TRMS} = 125\text{ A}$ (maximum value for continuous operation) $I_{TAV} = 70\text{ A}$ (sin. 180; $T_c = 85\text{ °C}$)		
900	800	SKKT 72/08E	SKKT 72B08E	SKKH 72/08E
1300	1200	SKKT 72/12E	SKKT 72B12E	SKKH 72/12E
1500	1400	SKKT 72/14E	SKKT 72B14E	SKKH 72/14E
1700	1600	SKKT 72/16E	SKKT 72B16E	SKKH 72/16E
1900	1800	SKKT 72/18E	SKKT 72B18E	SKKH 72/18E

KATALOŠKI PODACI O NAPONIMA ZA TIRISTORE U MODULU

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{TAV}	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	70 (50)	A
I_D	P3/180; $T_a = 45$ °C; B2 / B6	62 / 75	A
	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	115 / 145	A
I_{RMS}	P3/180F; $T_a = 35$ °C; W1 / W3	155 / 3 * 115	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	1600	A
	$T_{vj} = 125$ °C; 10 ms	1450	A
i^2t	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	13000	A ² s
	$T_{vj} = 125$ °C; 8,3 ... 10 ms	10500	A ² s
V_T	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 300$ A	max. 1,9	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 0,9	V
r_T	$T_{vj} = 125$ °C	max. 3,5	mΩ
$I_{DD}; I_{RD}$	$T_{vj} = 125$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}; V_{DD} = V_{DRM}$	max. 20	mA
t_{gd}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
t_{gr}	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	1	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 150	A/μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 1000	V/μs
t_q	$T_{vj} = 125$ °C ,	80	μs
I_H	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 250	mA
I_L	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 600	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 150	mA
V_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 0,25	V
I_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 6	mA



SKKT 72



KATALOŠKI PODACI O KARAKTERISTIČNIM TERMIČKIM OTPORNOSTIMA

$R_{th(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,35 / 0,18	K/W
$R_{th(j-c)}$	sin. 180; per thyristor / per module	0,37 / 0,19	K/W
$R_{th(j-c)}$	rec. 120; per thyristor / per module	0,39 / 0,2	K/W
$R_{th(c-s)}$	per thyristor / per module	0,2 / 0,1	K/W
T_{vj}		- 40 ... + 125	°C
T_{stg}		- 40 ... + 125	°C
V_{isol}	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
M_s	to heatsink	$5 \pm 15 \%^{1)}$	Nm
M_t	to terminals	$3 \pm 15 \%$	Nm
a		$5 * 9,81$	m/s ²
m	approx.	95	g
Case	SKKT	A 46	
	SKKT ...B	A 48	
	SKKH	A 47	

IZBOR HLADNJAKA $R_{th(s-a)} \leq 0.215 \text{ K/W}$

Kataloški podaci za hladnjak P3

Standard lengths ¹⁾	n	b mm	R_{thha} ²⁾ natural cooling °C/W	R_{thha} ³⁾ forced air cooling °C/W	w kg
P3/120	1	20	0,55 (100 W)	0,167	2,1
	2		0,53 (100 W)	0,157	
	3		0,43 (150 W)	0,147	
P3/180	1	20	0,47 (70 W)	0,145	3,1
	2		0,39 (150 W)	0,132	
	3		0,36 (180 W)	0,120	
	6		0,33 (200 W)	0,108	
	1	34		0,144	3,1
	2			0,126	
	3			0,118	

1) Non-standard lengths available on request

2) At the given power dissipation per semiconductor component

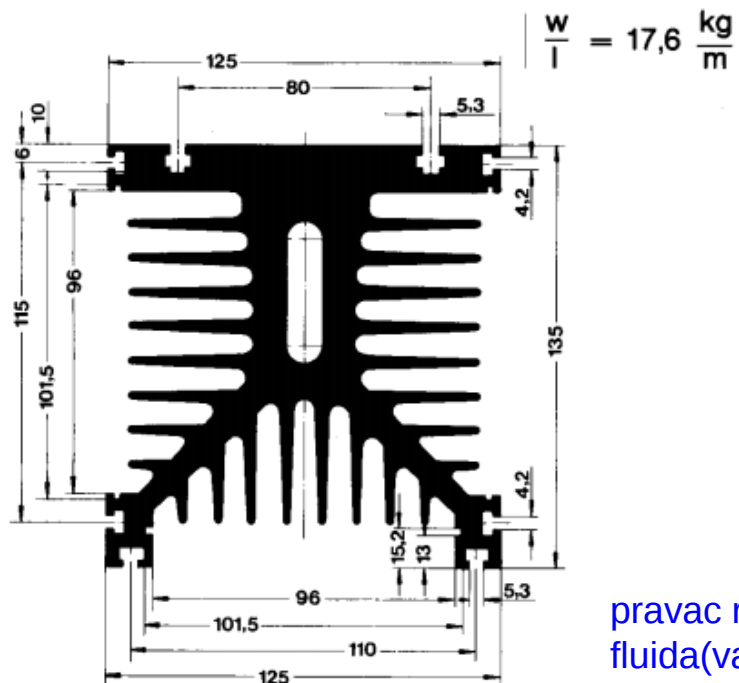
3) With fan type SKF 3-230-01 (see B14-109)

Hladnjak tip P3

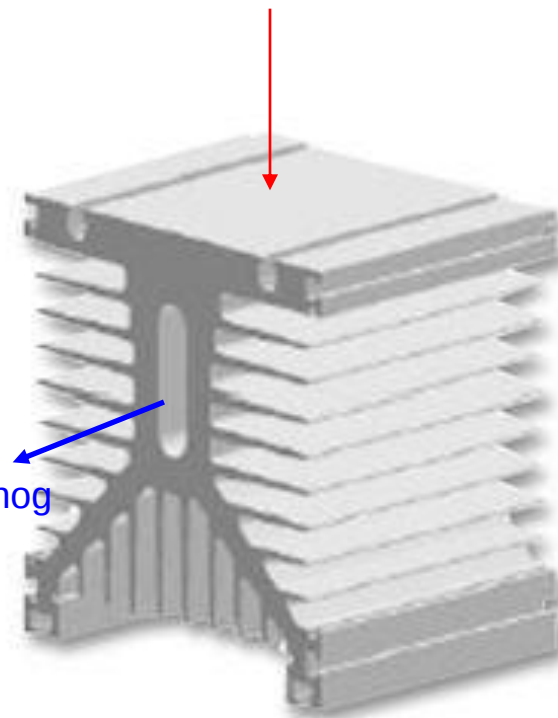


Iz date tabele zaključujemo da za sve date vrednosti termičke otpornosti u slučaju prirodnog hlađenja, ovaj način hlađenja ne zadovoljava. Za $n=1$, i uz uslov $R_{th(s-a)} \leq 0.215 \text{ K/W}$, sledi da je izbor koji daje povoljan ishod, HLADNJAK P3/120 sa prinudnim hlađenjem sa vazduhom. Potrebno je u sledećem koraku odrediti protok vazduha u m^3/h .

P3

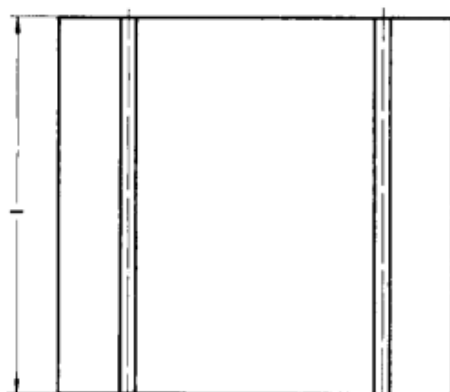


površina na koju se montira
SCR modul



pravac rashladnog
fluida(vazduha)

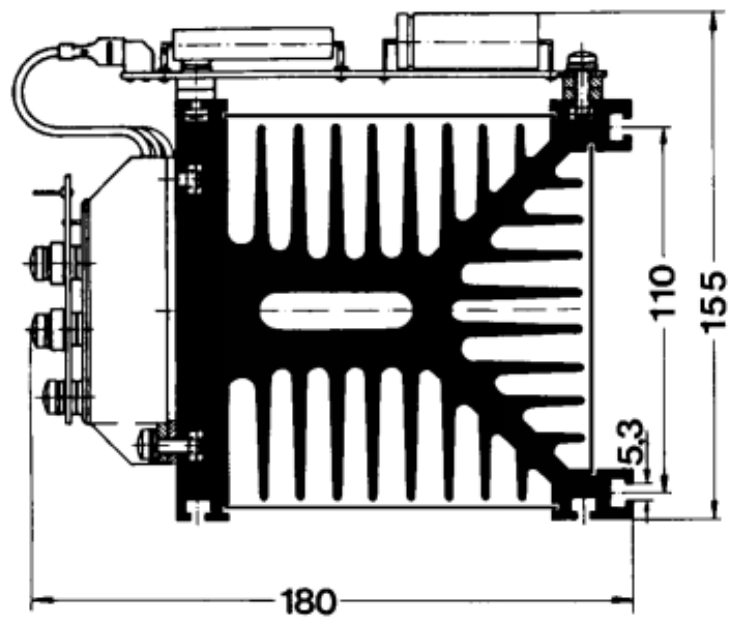
3D prikaz



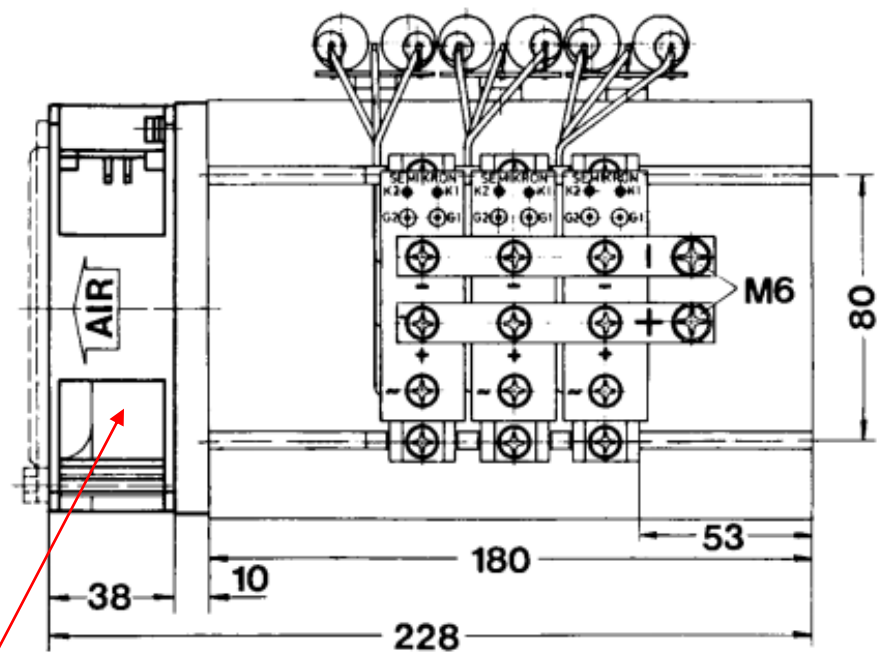
P3/120 : l = 120 mm
P3/180 : l = 180 mm
P3/265 : l = 265 mm
P3/300 : l = 300 mm

Dimensions in mm

P3/180F



Dimensions in mm



VENTILATOR

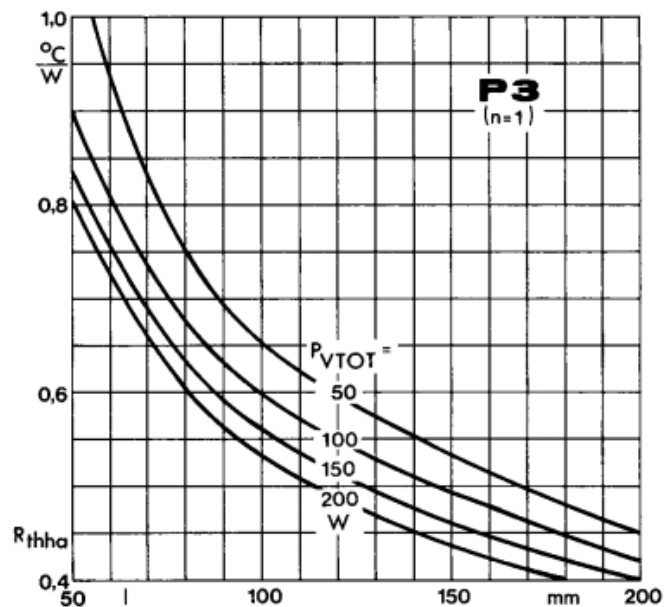


Fig. 3 a Total thermal resistance vs. length

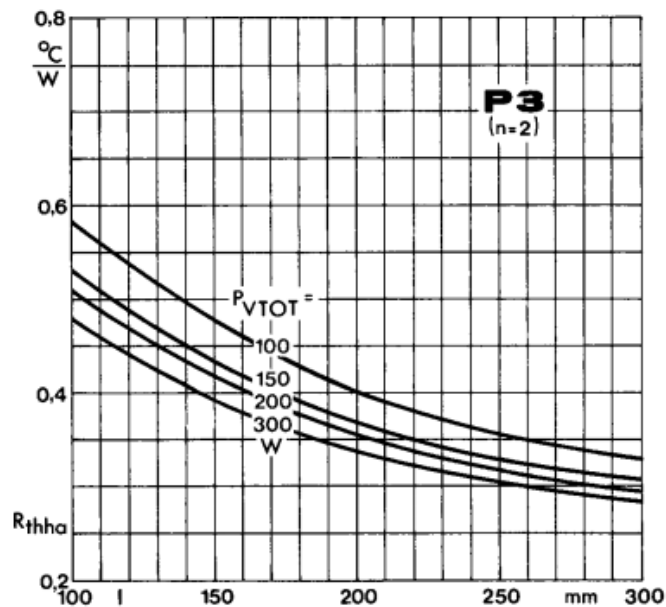


Fig. 3 b Total thermal resistance vs. length

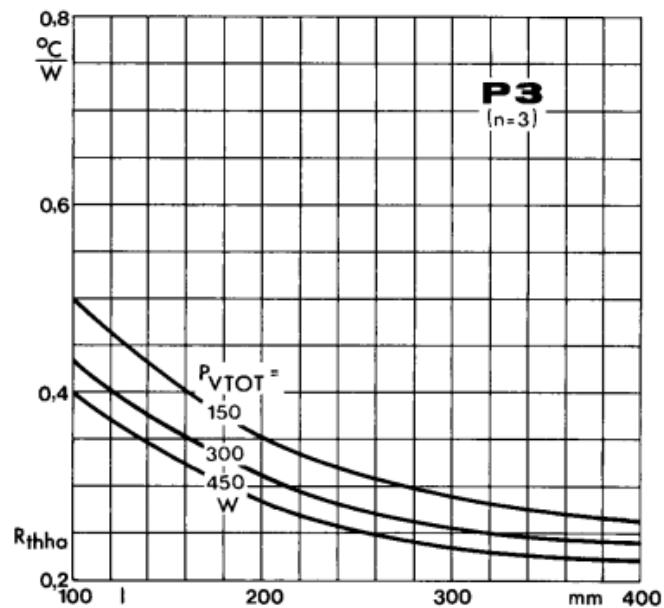


Fig. 3 c Total thermal resistance vs. length

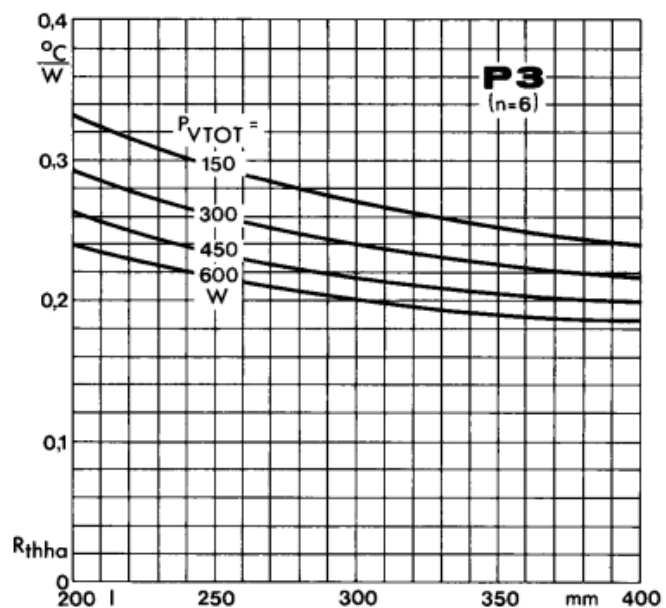


Fig. 3 d Total thermal resistance vs. length

P3/...**F** - forisirano hlađenje (**F**)

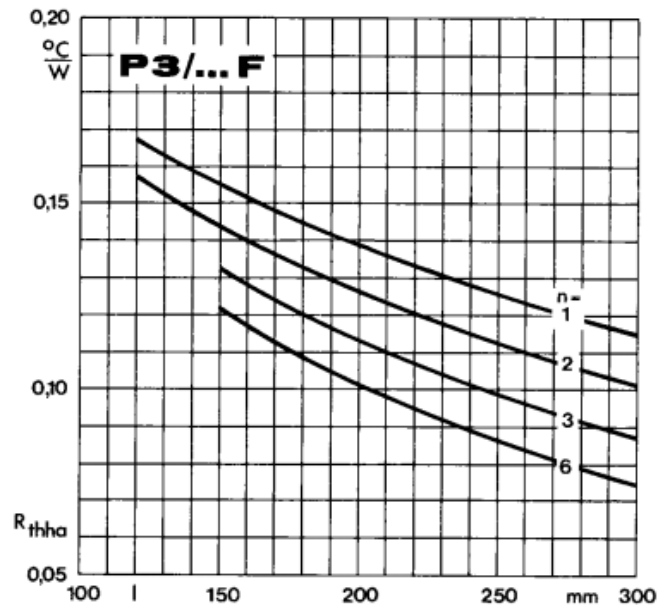
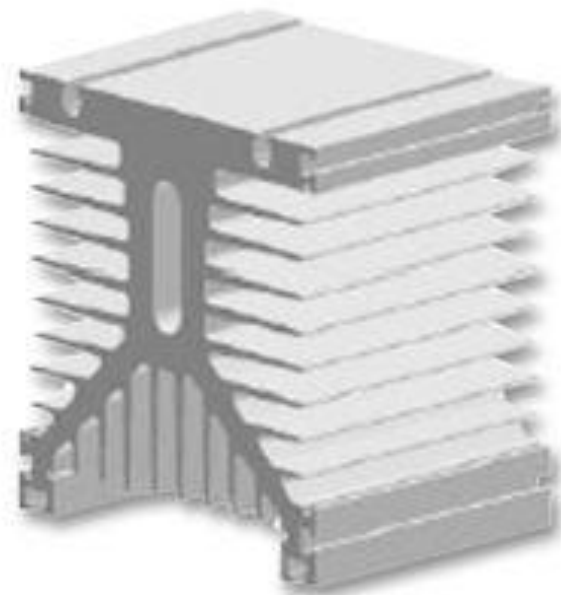


Fig. 6 Total thermal resistance vs. length

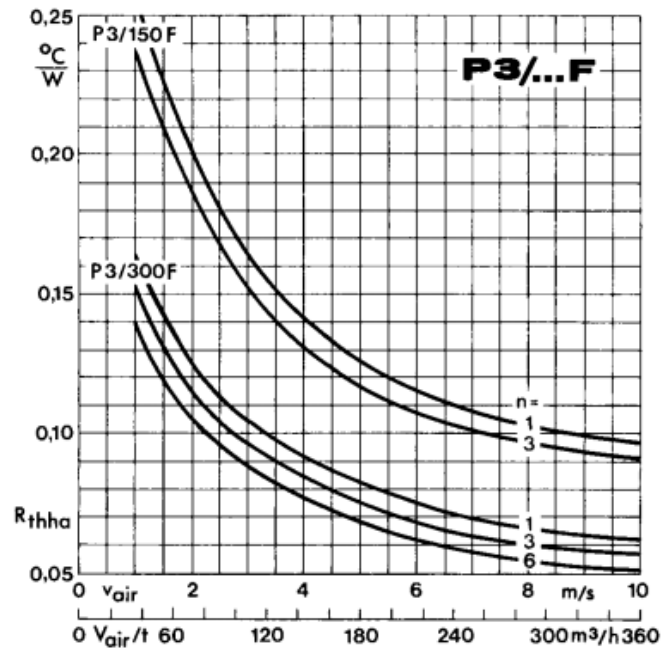


Fig. 7 Total thermal resistance vs. air flow

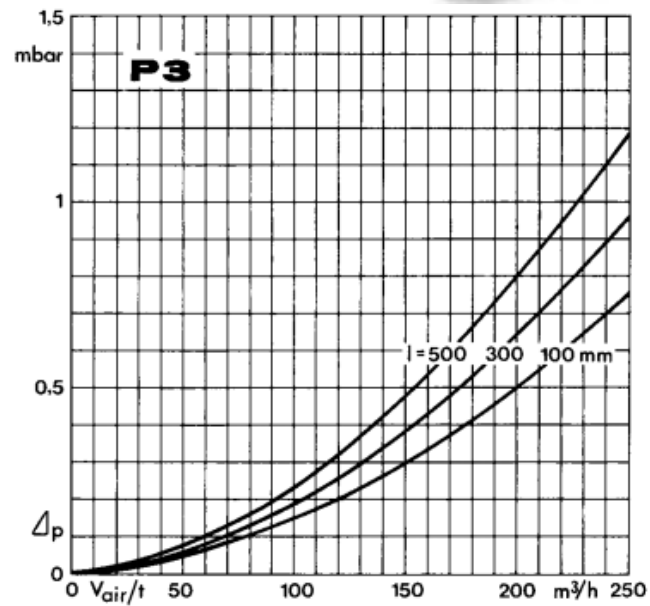


Fig. 8 Pressure drop vs. air flow

Termičke impedanse SKT modula (n=1.....6)

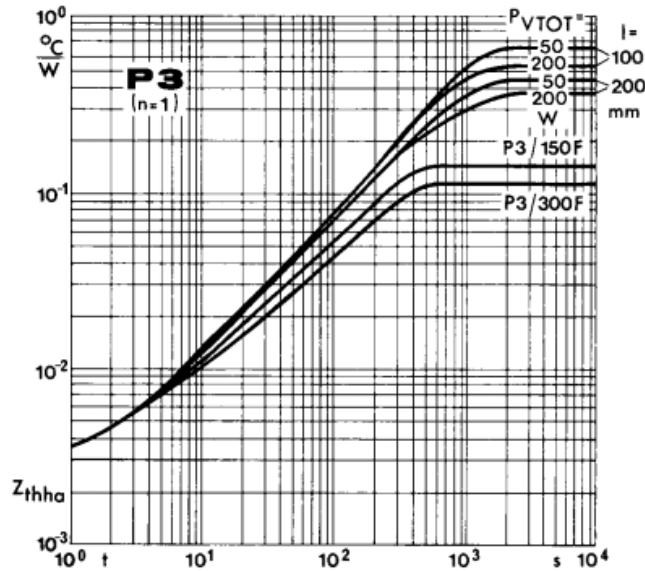


Fig. 10 a Total transient thermal impedance vs. time

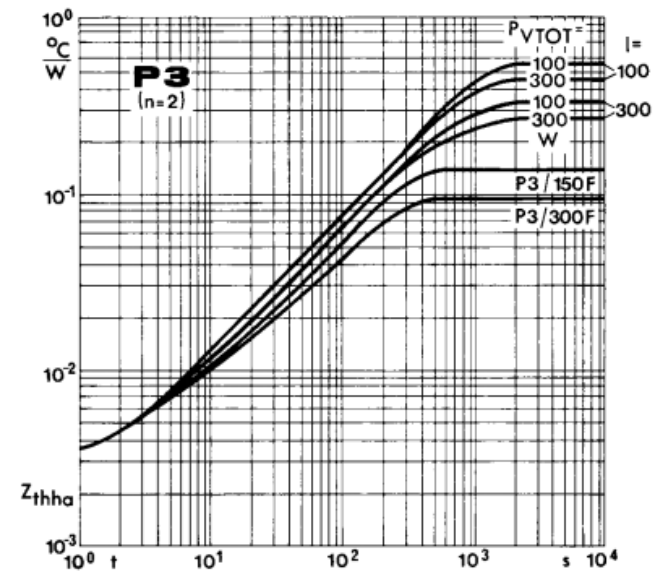


Fig. 10 b Total transient thermal impedance vs. time

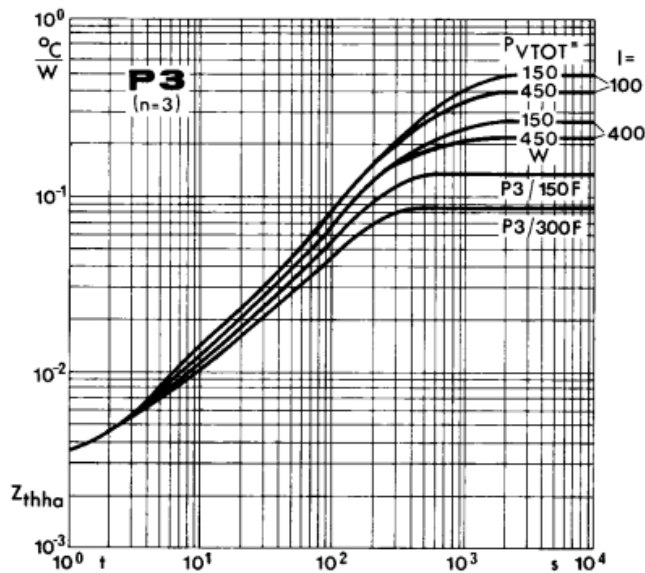


Fig. 10 c Total transient thermal impedance vs. time

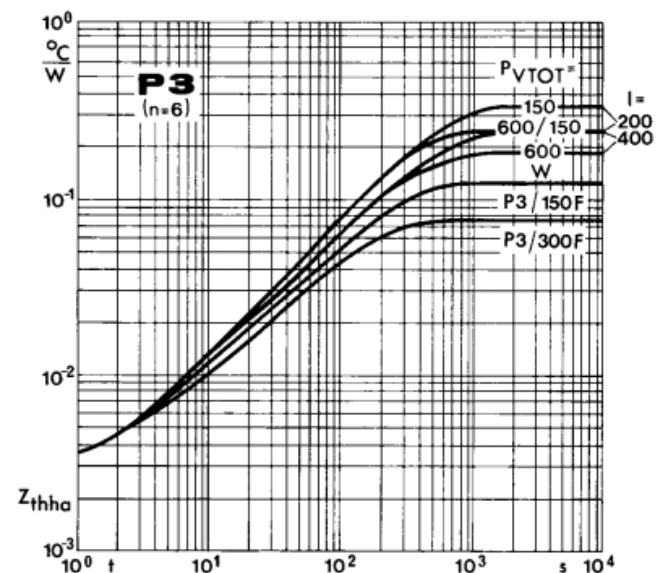
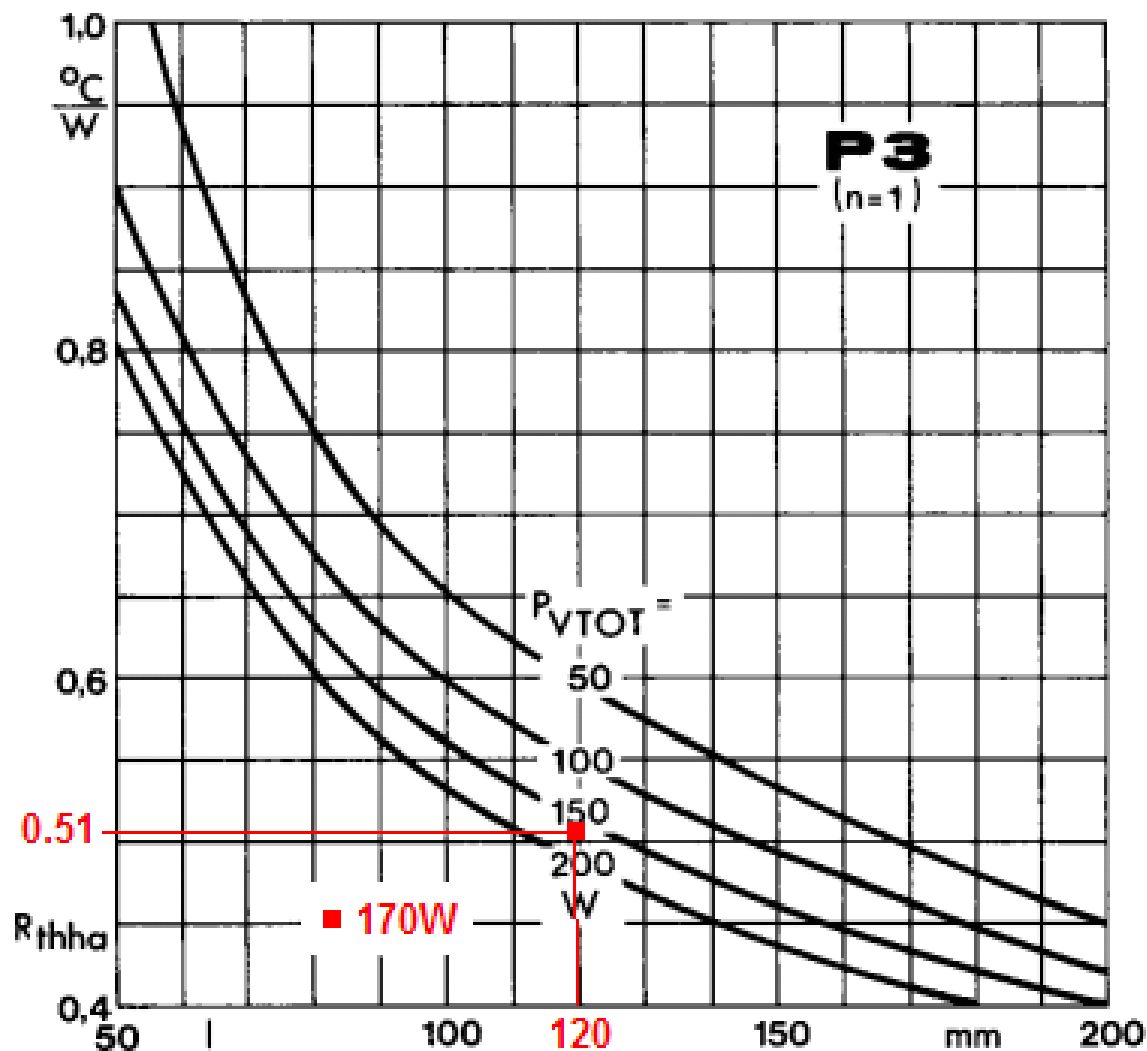


Fig. 10 d Total transient thermal impedance vs. time



Ukupni termički otpor hladnjaka u funkciji od njegove dužine (prirodno hlađenje)

Fig. 3 a Total thermal resistance vs. length

Očigledno je da prirodno hlađenje ne zadovoljava jer za datu dužinu hladnjaka od 120mm nije zadovoljen uslov $R_{th(s-a)} \leq 0.215K/W$ (dobijena vrednost je 0.51K/W)

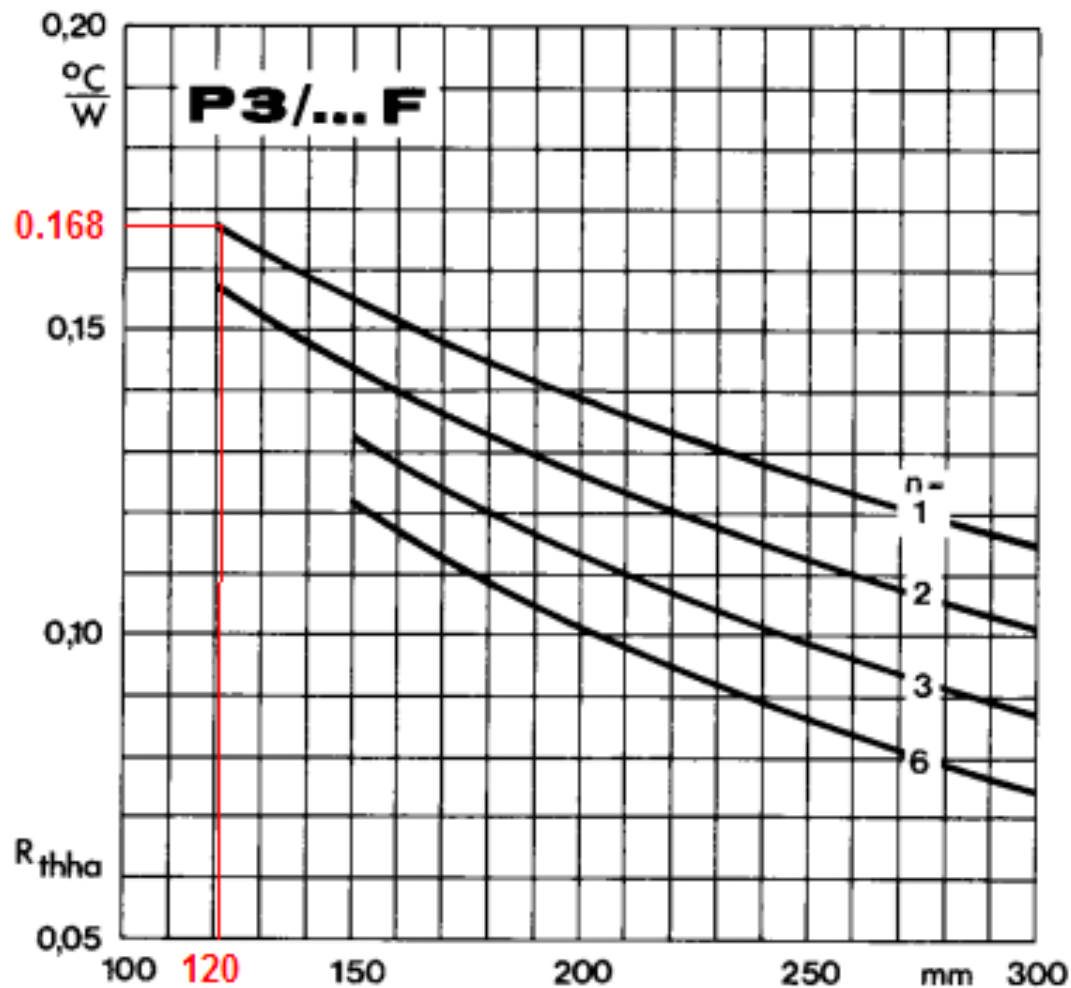


Fig. 6 Total thermal resistance vs. length

Ako se usvoji forsirano hlađenje sa $130\text{m}^3/\text{h}$ i za dužinu hladnjaka od 120mm dobija se da je $R_{th(s-a)} = 0.168\text{K}/\text{W} \leq 0.215\text{K}/\text{W}$, tako da ova konfiguracija hlađenja AC/AC tiristorskog modula zadovoljava.

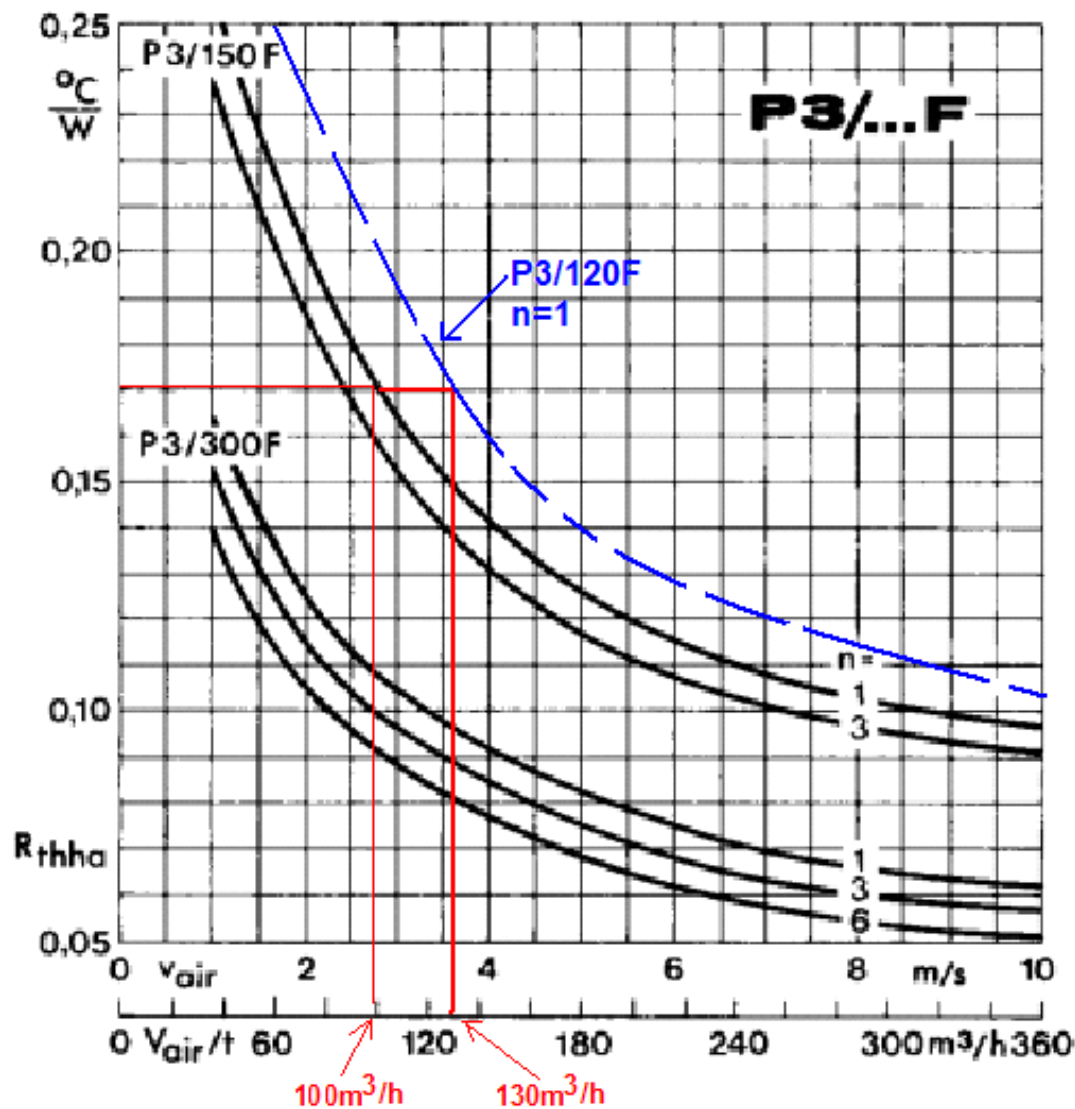
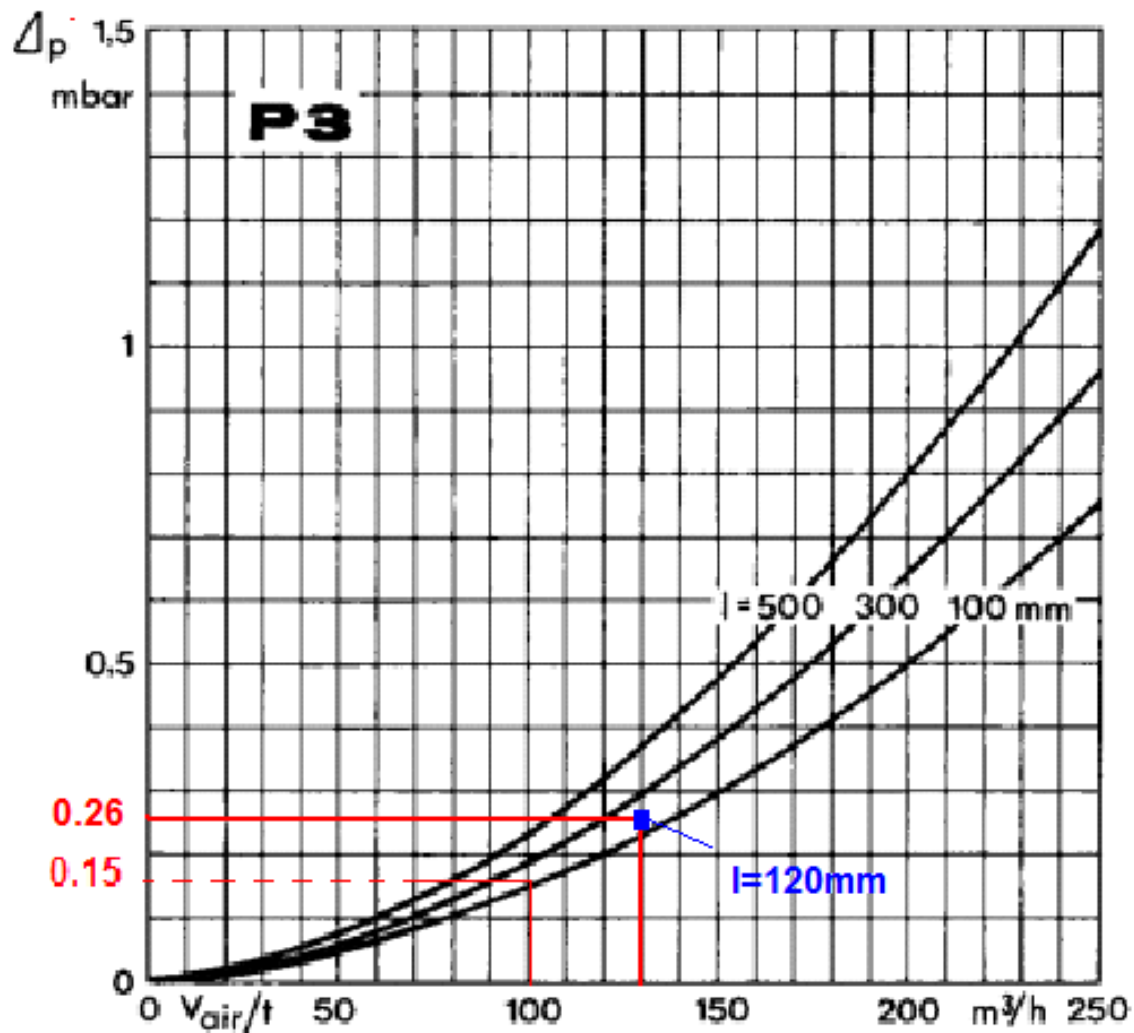


Fig. 7 Total thermal resistance vs. air flow

Termički otpor hladnjaka
u funkciji protoka rashladnog
vazduha

Za protok vazduha
130 m^3/h ($v=3.6 m/s$) i za
hladnjak P3/120F, $n=1$
se dobija
 $R_{th(s-a)}=0.17 K/W \leq 0.215 K/W$.

Napomena: Karakteristika
P3/120F (plava kriva) je
estimirana na osnovu
karakteristika P3/150F i
P3/300F.



Pad pritiska u funkciji
od protoka vazduha

Za protok od $130 m^3/h$ se
dobija pad pritiska od
 $0.26 mbar$ ($26 Pa$).

Za ove vrednosti se bira
ventilator :

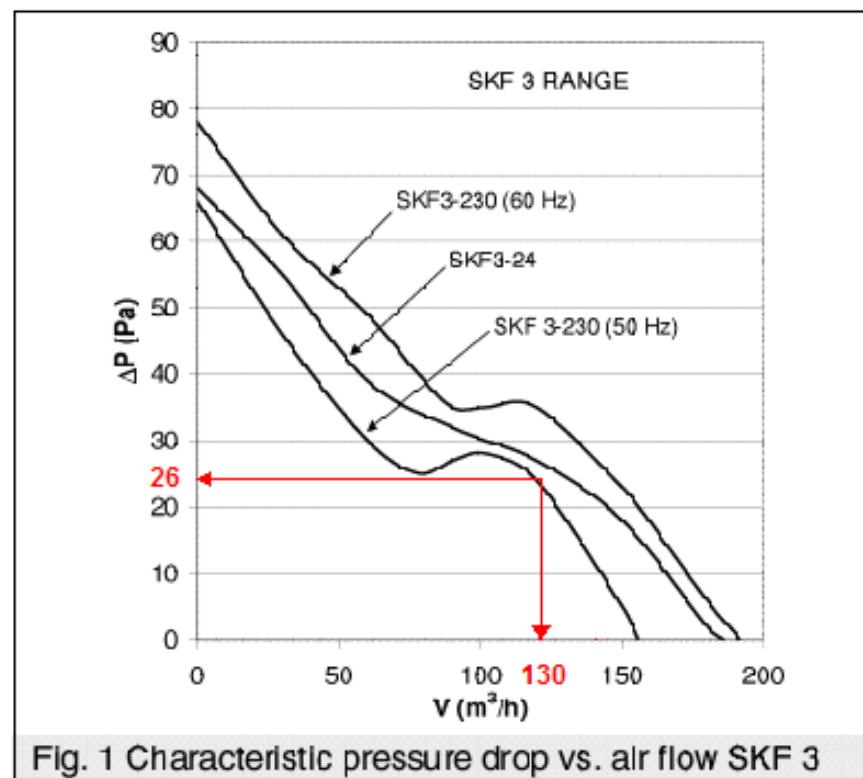
SEMIKRON

SKF-3-230-01

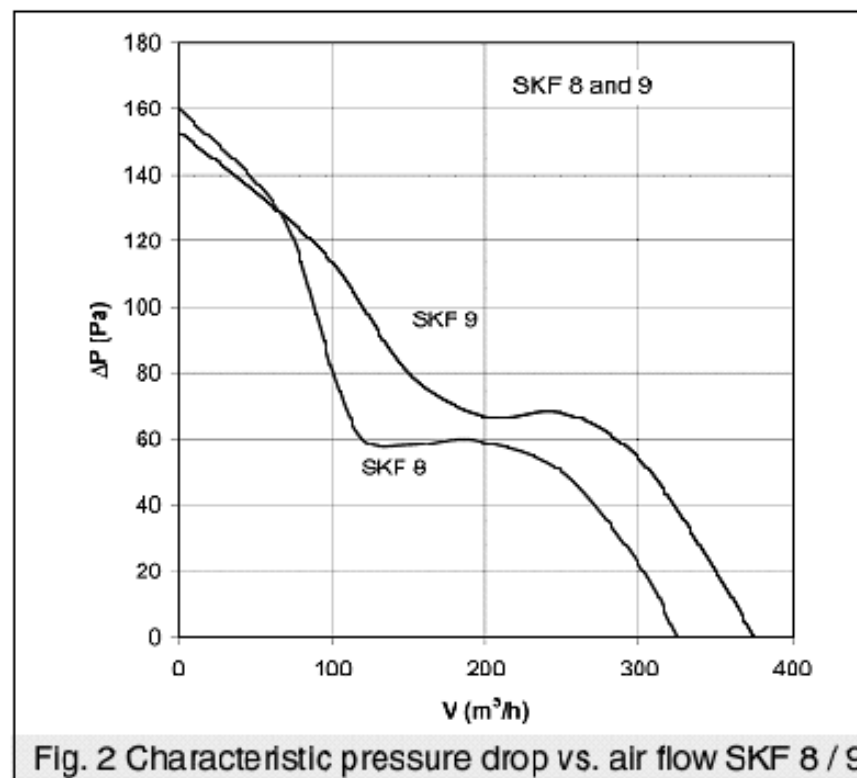
Fig. 8 Pressure drop vs. air flow

Axial Fans

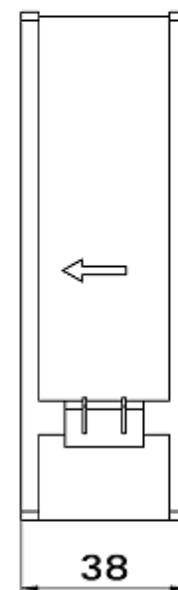
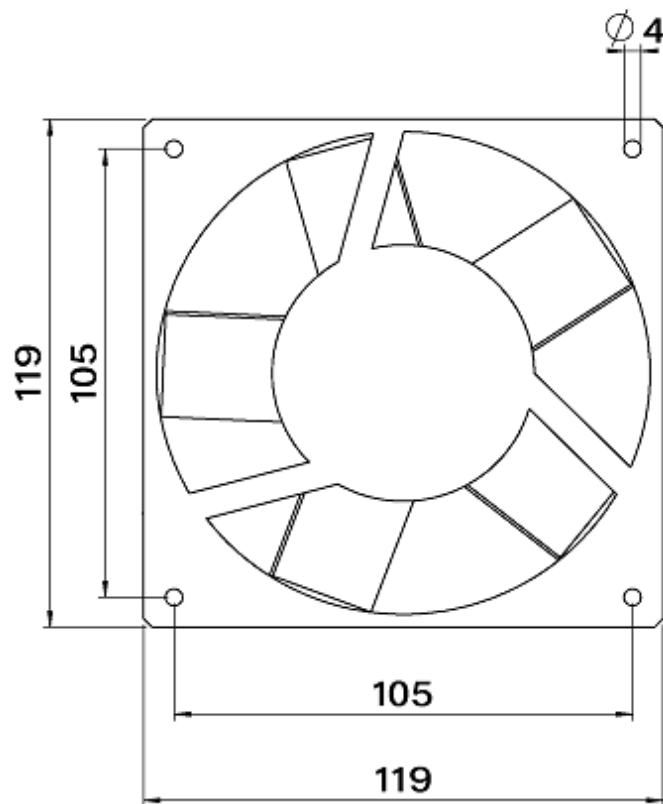
Types	Ident No.		f Hz	V ₁ V	Max volume m ³ /h	P W	T _{amb} max °C	Weight kg	Noise dB
SKF 3-230-01	30031061		50 / 60	230	159 / 190	15 / 14	70	0,55	37 / 41
SKF 3-115-01	30031110		50 / 60	115	160 / 190	15,5 / 14,5	70	0,55	37 / 41
SKF 3-24c-01	VE001030		DC	24	185	7,5	70	0,26	43
SKF 8-230-01	30145431		50	230	325	45	50	1,1	48
SKF 9-230-01	30142395		50	230	375	24	70	1	54



1mbar=100Pa



Dimensions in mm



SKF 3

Tehnički crtež ventilatora (dvodimenzioni)

Rezultati proračuna:

Za projektovano $R_{th(s-a)} = 0.17 \text{ K/W}$ izračunavamo temperature T_j , T_c i T_s .
Usvojeno je da je temperatura ambijenta $T_a = 40^\circ\text{C}$.

Temperatura hladnjaka u ustaljenom režimu:

$$T_s = T_a + R_{th(s-a)} \times P_{tot} = 40^\circ\text{C} + 0.17 \text{ K/W} \times 170 \text{ W} = 68.9^\circ\text{C}$$

Temperatura kućišta u ustaljenom režimu:

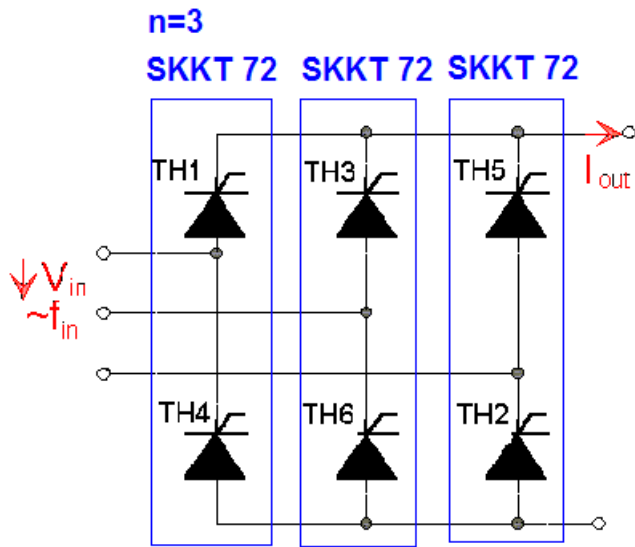
$$T_c = T_s + R_{th(c-s)} \times P_{tot} = 68.9^\circ\text{C} + 0.1 \text{ K/W} \times 170 \text{ W} = 85.9^\circ\text{C}$$

Temperatura Si poluprovodničkog spoja u ustaljenom režimu:

$$T_j = T_c + R_{th(j-c)} \times P_{tot} = 85.9^\circ\text{C} + 0.185 \text{ K/W} \times 170 \text{ W} = 117^\circ\text{C}$$

$$T_j = 117^\circ\text{C} \leq \text{od dozvoljenih } 125^\circ\text{C} \quad \text{☀}$$

2. PRIMER TERMIČKOG DIMENZIONISANJA 6-pulsnog ISPRAVLJAČA tip B6C



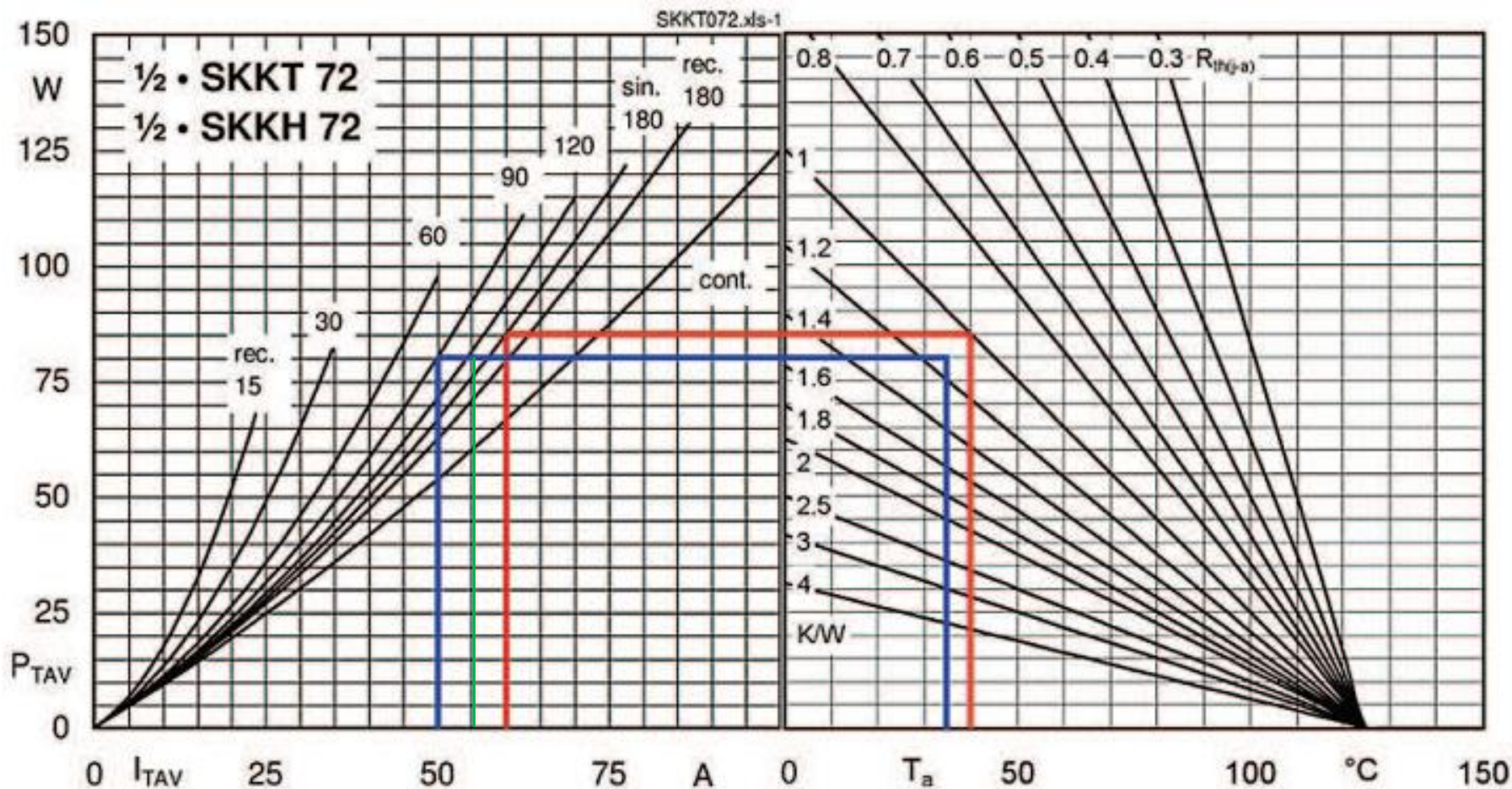
Tri modula SKKT 72 proizvodnje SEMIKRON treba da obezbede struju od 150A opterećenju za koje se može smatrati da je strujni ponor. Ugao provođenja tiristora je 120° (maksimalne performanse!!!).

Srednja vrednost struje svakog od tiristora u konfiguraciji B6C je $150A/3 = 50A$. Usvojicemo da je srednja vrednost struje tiristora 55A (sigurnosna margina od oko 10%).

Za struju od 55A i pravougaonu struju (rec. $\Theta = 120^\circ$), dobijamo da je srednja vrednost snage gubitaka po jednom tiristoru $P_{TAV}=80W$ (videti naredni slajd)

Za temperaturu ambijenta $T_a = 35^\circ C$ zahtevana termička otpornost po jednom tiristoru je : $R_{th(j-a)} \leq (127^\circ C - 35^\circ C)/80W = 1.15K/W$.

Usvojicemo da su $R_{th(j-c)} = 0.40^\circ K/W$ i $R_{th(c-s)} = 0.2 K/W$ (kataloški podaci za SCR SKKT 72 module)



(a)

(b)

a) Srednja vrednost snage disipacije u zavisnosti od srednje vrednosti struje I_{TAV} za različite talasne oblike struje (vremena vođenja 15°-180°)

b) Dozvoljena temperatura ambijenta preko termičke otpornost spoj-okolina ("junction-ambient") uključujući kontaktnu otpornost kućište-hladnjak ("case-sink")

Termička otpornost hladnjaka se dobija iz relacije:

$$R_{th(s-a)} = (1.15 - 0.41 - 0.20) / 6 = 0.09 \text{ K/W}$$

Ovo je veoma mali termički otpor!!!!

ZAHTJEVI ZA HLADNJAKOM SU: $R_{th(s-a)} = 0.09 \text{ K/W}$ za $n = 3$ izvora toplote /tri modula. Jedno od mogućih rešenja je hladnjak tipa P3/300 sa ventilatorom koji mora da obezbedi $120 \text{ m}^3/\text{h}$ (ustvari oznaka mu je P3/300F)



Standard lengths	n	b / d Ø mm	R_{thha} natural cooling K/W	R_{thha} with Fan SKF 3-230-01 K/W	w kg
P 3/120	1	20	0,55 (100W)	0,167	2,1
	3		0,43 (150W)	0,147	
P 3/180	2	20	0,39 (150W)	0,132	3,1
	3		0,36 (180W)	0,12	
	6		0,33 (200W)	0,108	
	1	34		0,144	
P 3/300	3	34		0,118	5,3
	3			0,0847	
	3			0,0847	

P3/300F

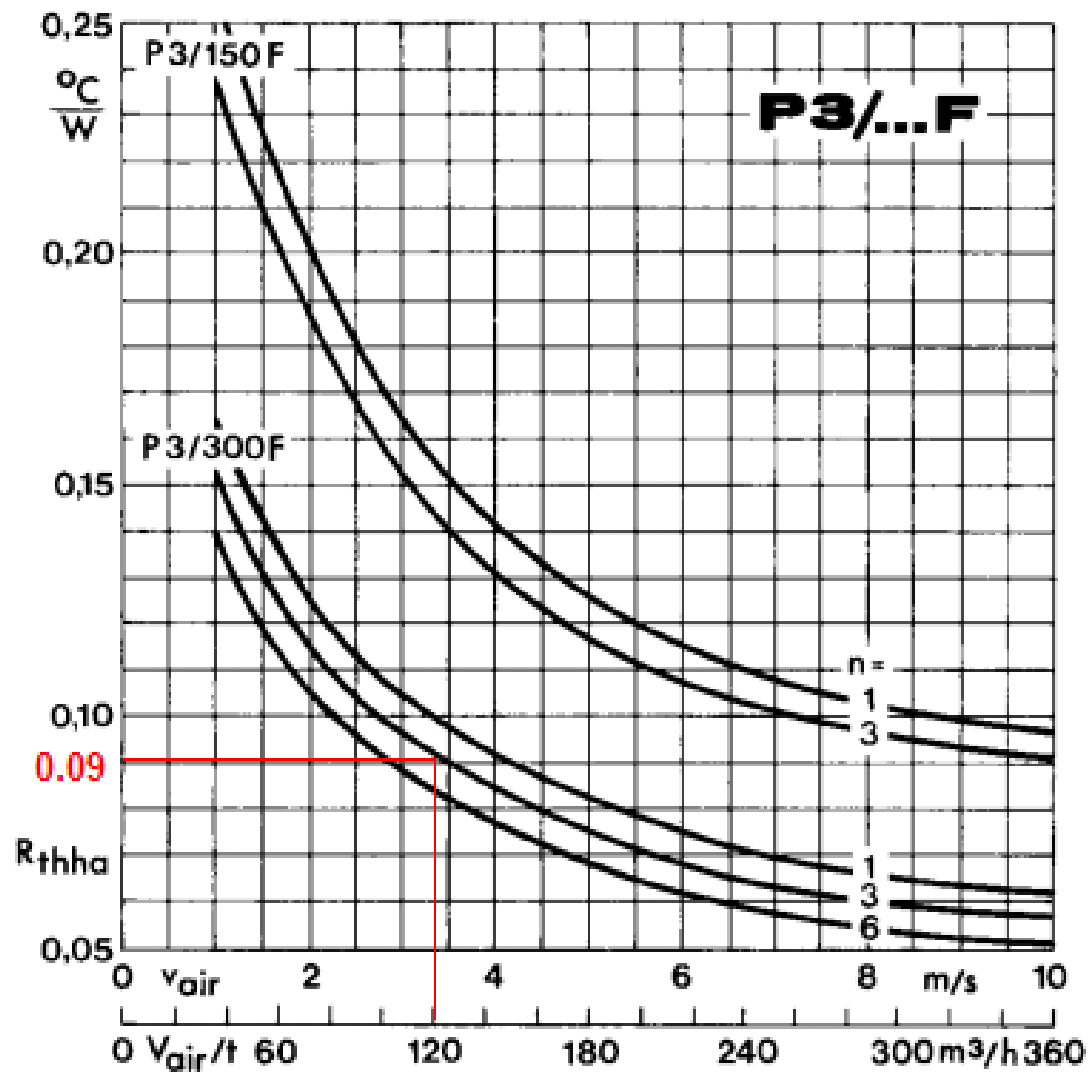
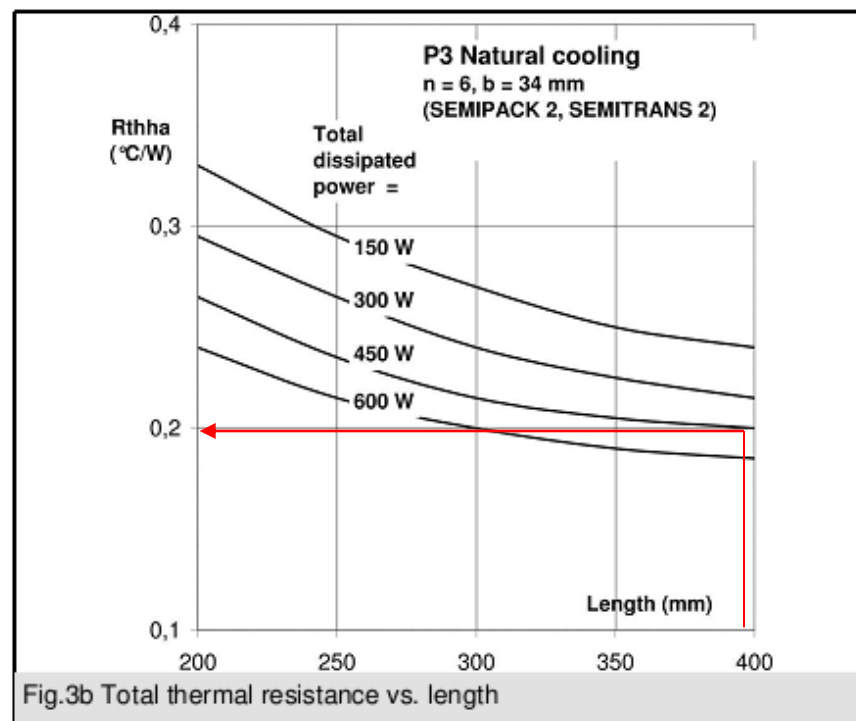
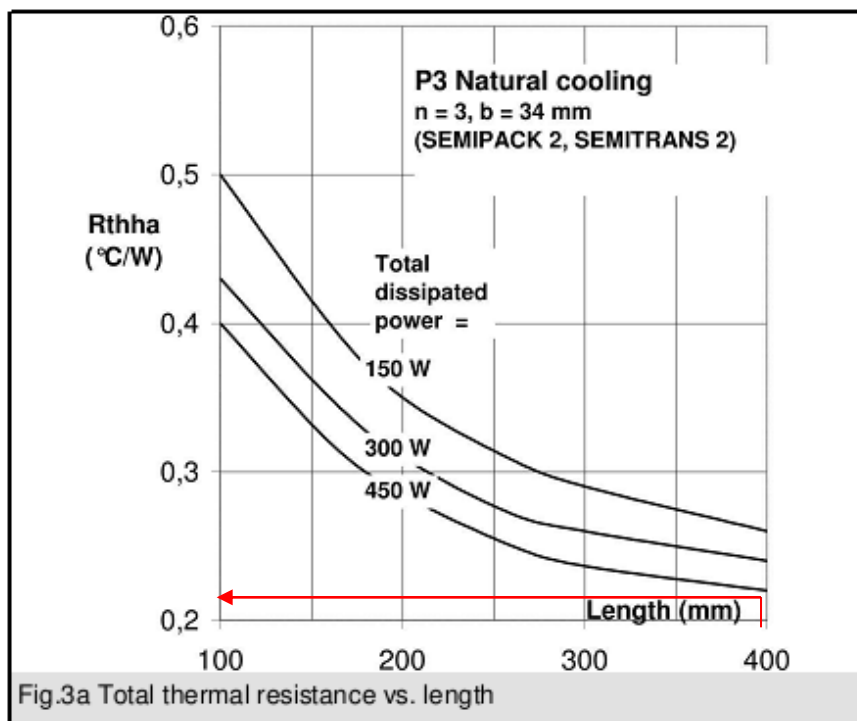
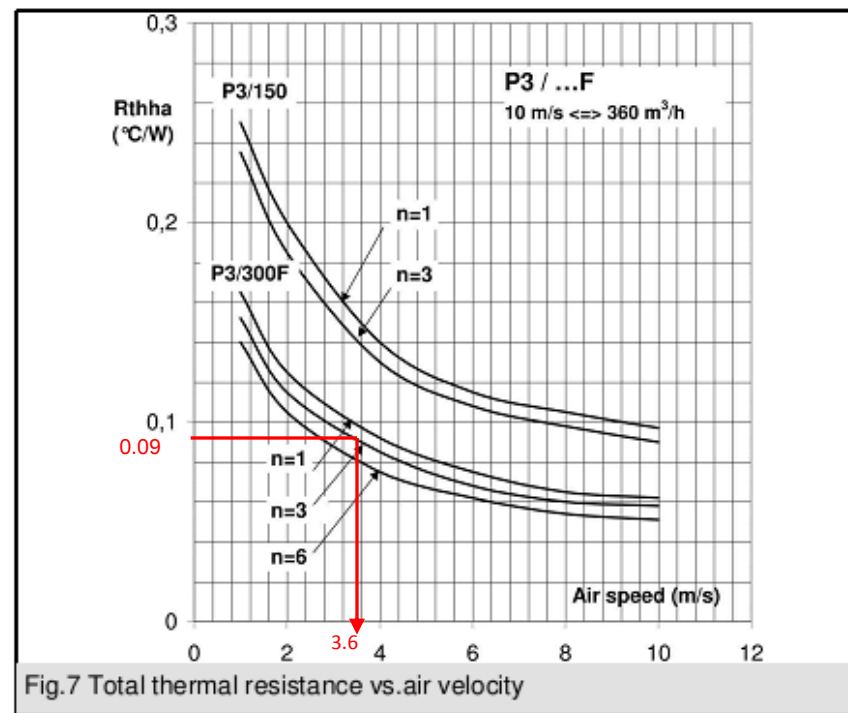
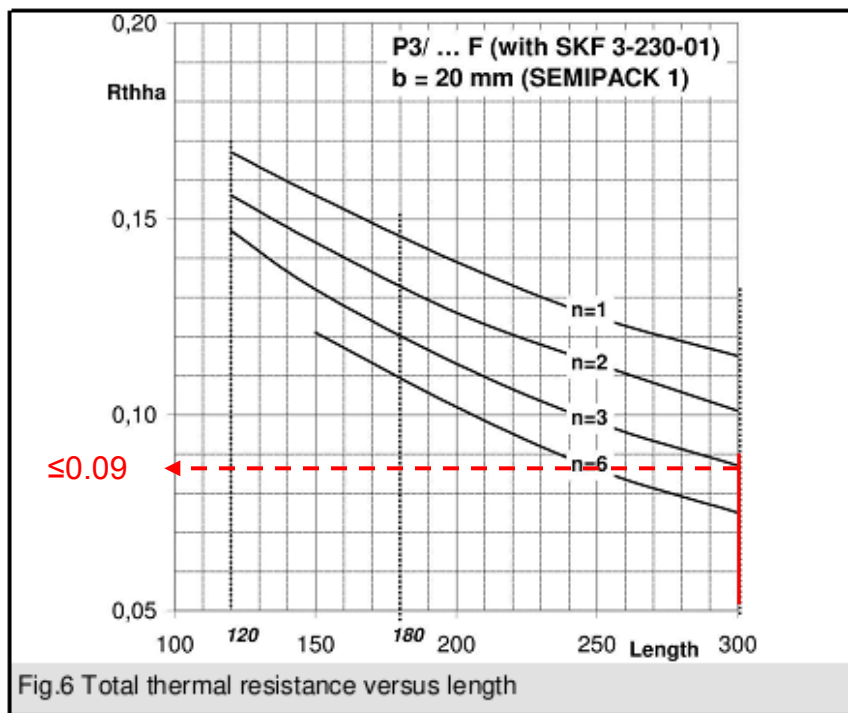


Fig. 7 Total thermal resistance vs. air flow

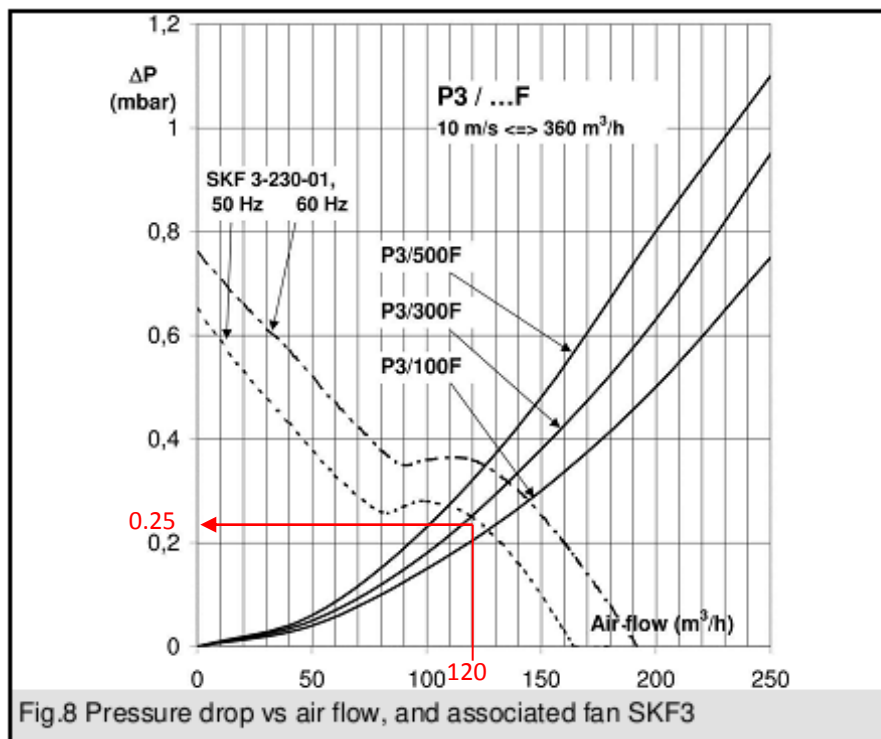


Za ukupnu snagu disipacije $6 \times 80 \text{ W} = 480 \text{ W}$ sa prikazanih krivih prirodnog hlađenja zaključujemo da za realne dužine od 100-400mm nije moguće ostvariti termičku otpornost hladnjaka $\leq 0.09 \text{ K/W}$. **Stoga se mora ići na prinudno hlađenje!!!**

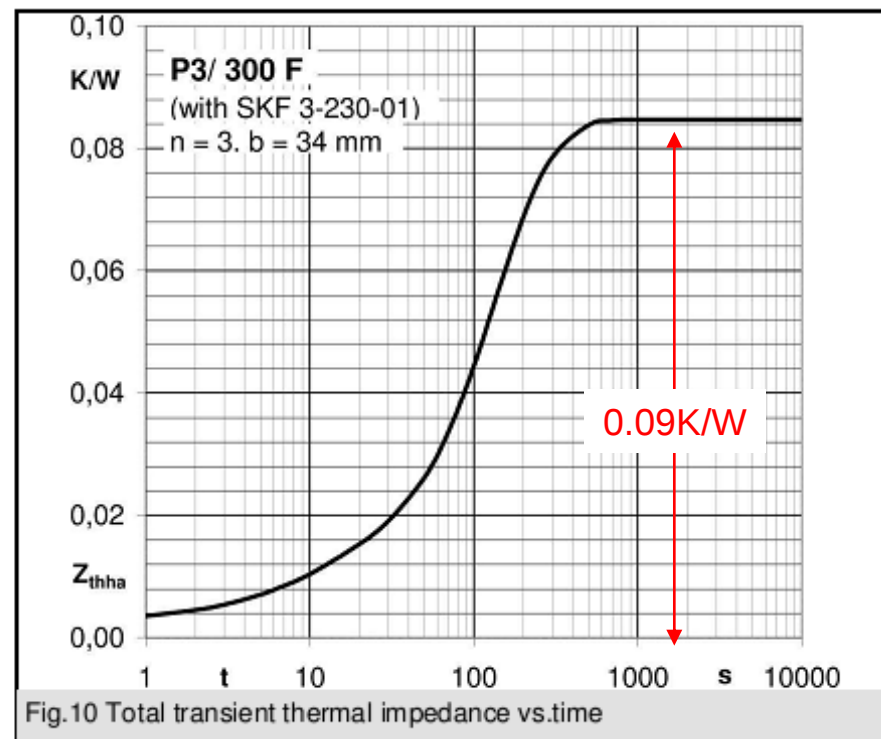


Za $n=3$, $L=300\text{mm}$, $R_{th(s-a)} \leq 0,09\text{K}/\text{W}$

Brzina strujanja vazduha pod ovim uslovima je 3,6m/s

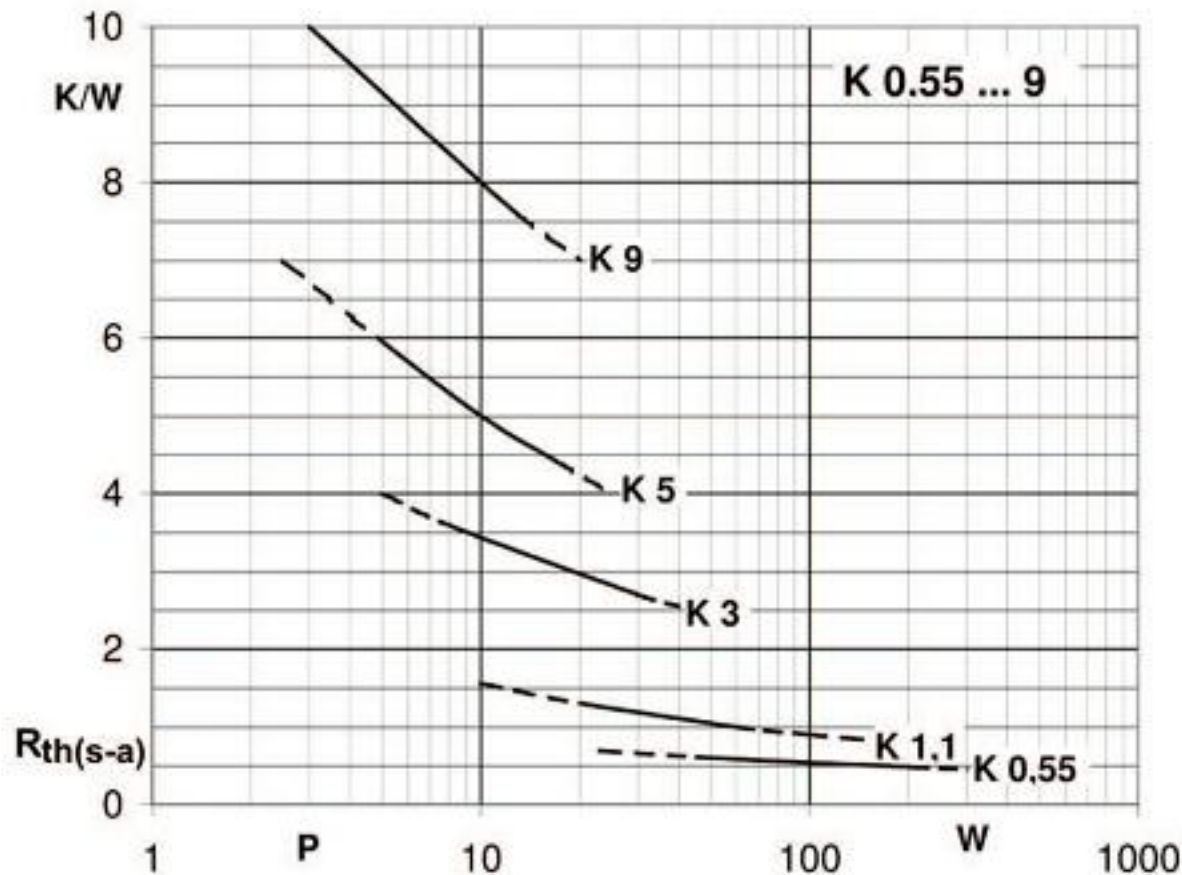


Pad pritiska je oko 0.25mbar (25Pa)



Termička otpornost ustaljenog stanja se postiže nakon 10-tak minuta (600s)

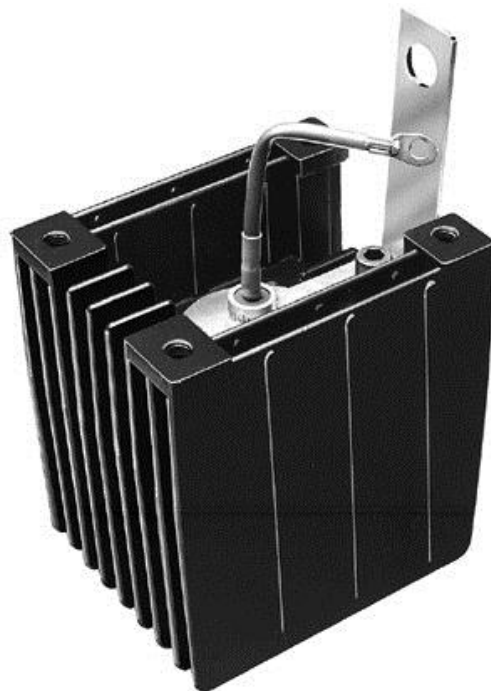
U nastavku će biti date još neke napomene koje se odnose na izbor hladnjaka a koje mogu biti korisne za projektantsku praksu



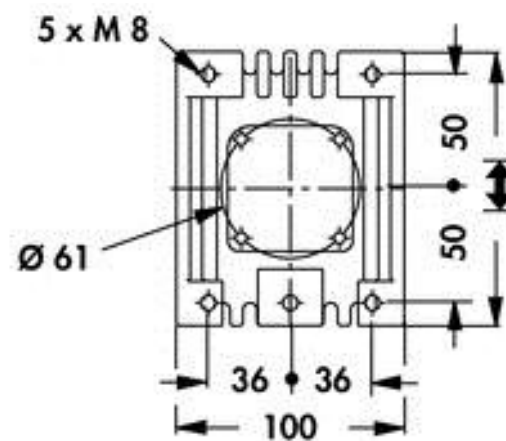
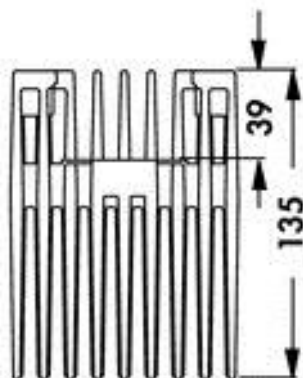
Termičke otpornosti nekoliko tipova hladnjaka koji se koriste za tiristorska kućišta sa navojem (koja se montiraju šrafljenjem na hladnjak)

- Termička otpornost hladnjaka nije fiksni parametar. U slučaju vazdušnog samo-hlađenja ova vrednost zavisi od temperaturne razlike između hladnjaka i vazduha, odnosno od snage disipacije koja se ima u tom slučaju.
- Ako snaga disipacije raste hladnjak se zagreva intenzivnije i efektivne zone za razmenu toplote se povećavaju (kao što pokazuje slika sa karakteristikama za pojedine tipove hladnjaka).
- Ako se iz nekih razloga mora koristiti više hladnjaka jedan iznad drugog, treba imati u vidu da su za prirodno hlađene sisteme, gornji slojevi topliji od onih nižih.

Hladnjak tip K 0.55



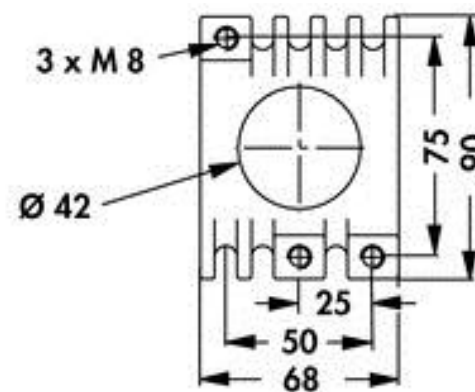
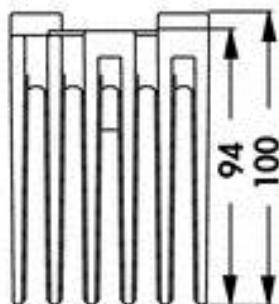
0,55 K/W



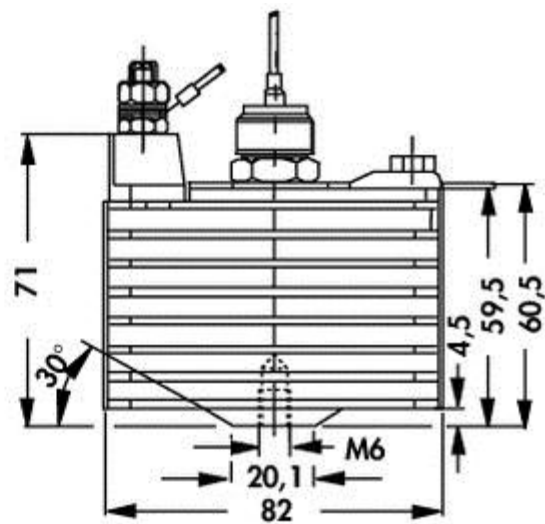
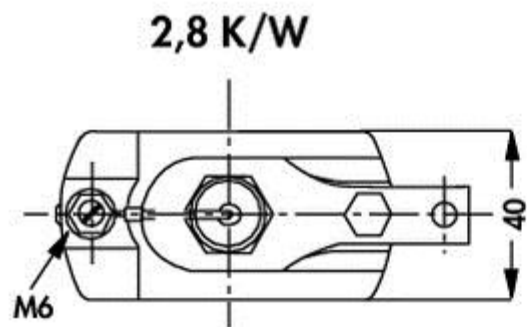
Hladnjak tip K 1.1



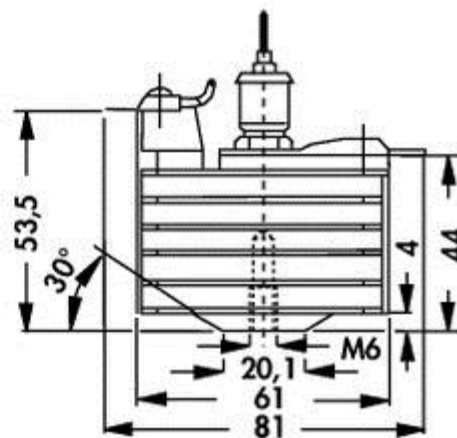
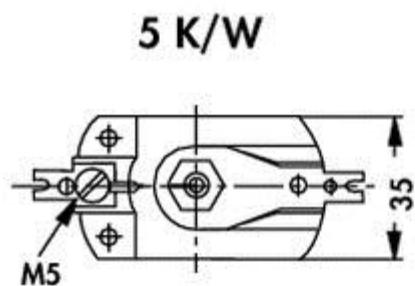
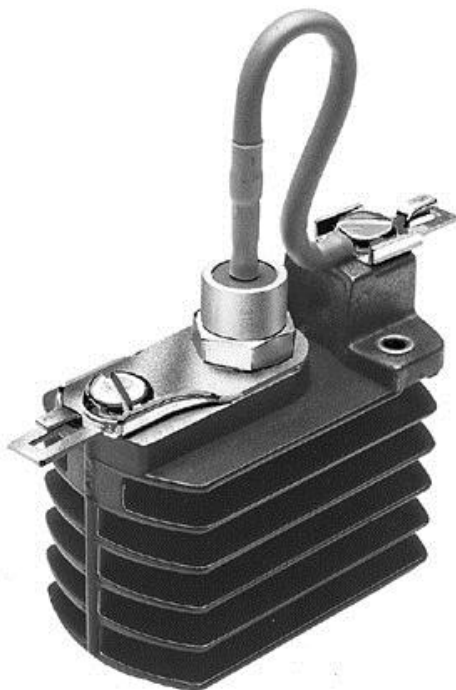
1,1 K/W



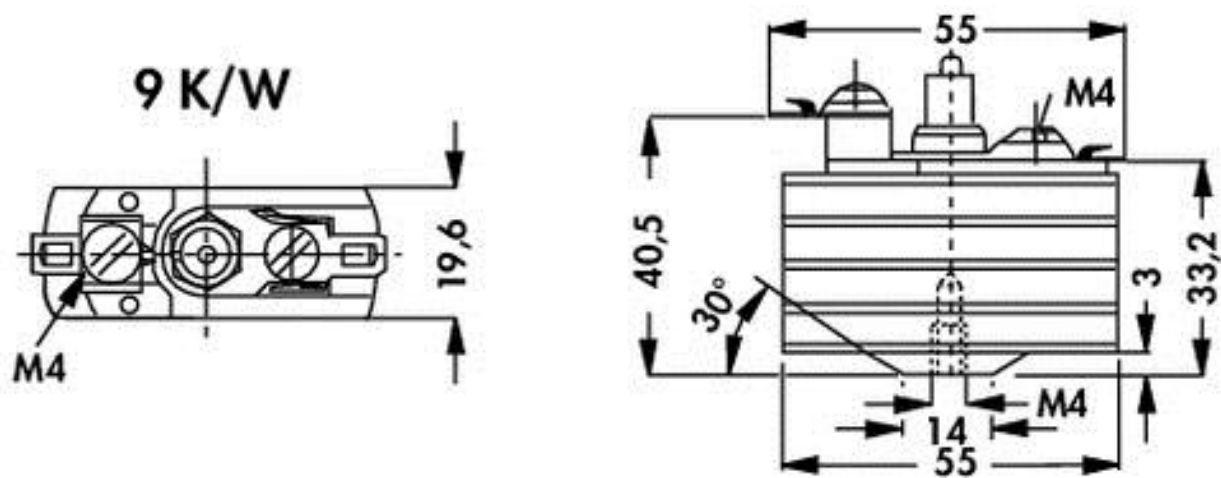
Hladnjak tip K 3

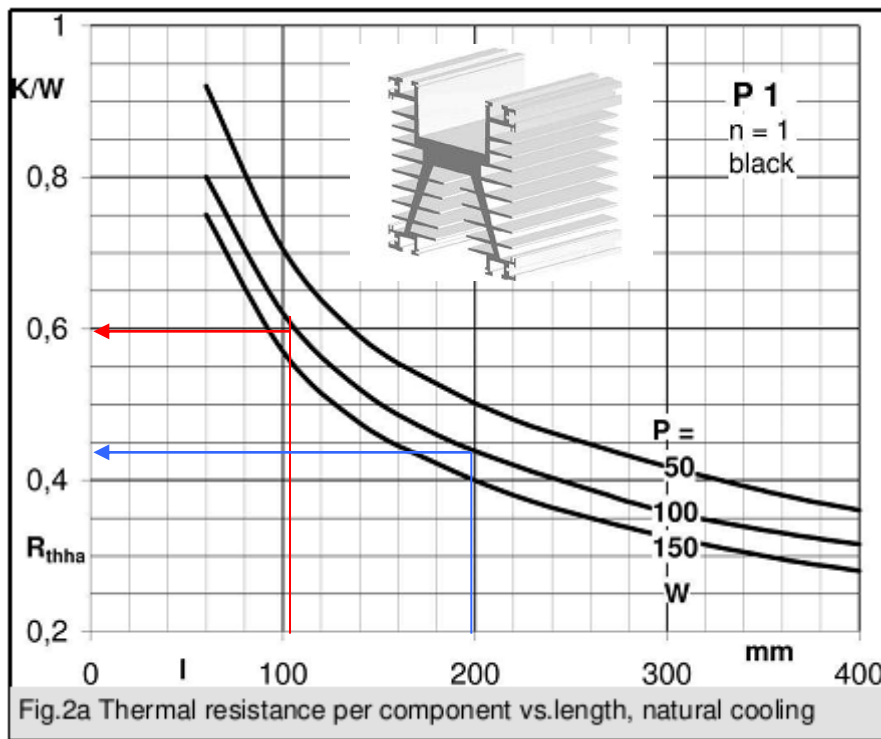


Hladnjak tip K 5



Hladnjak tip K 9

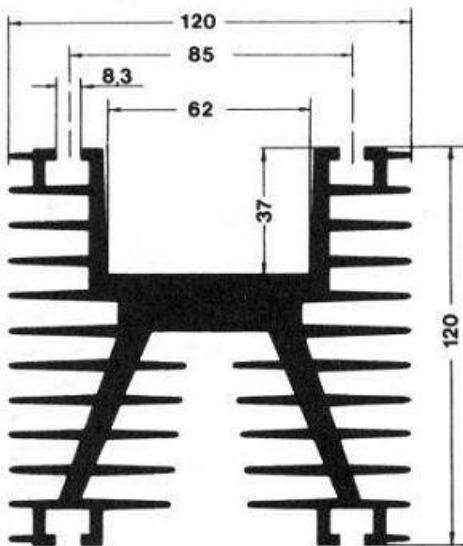




PRIMER:

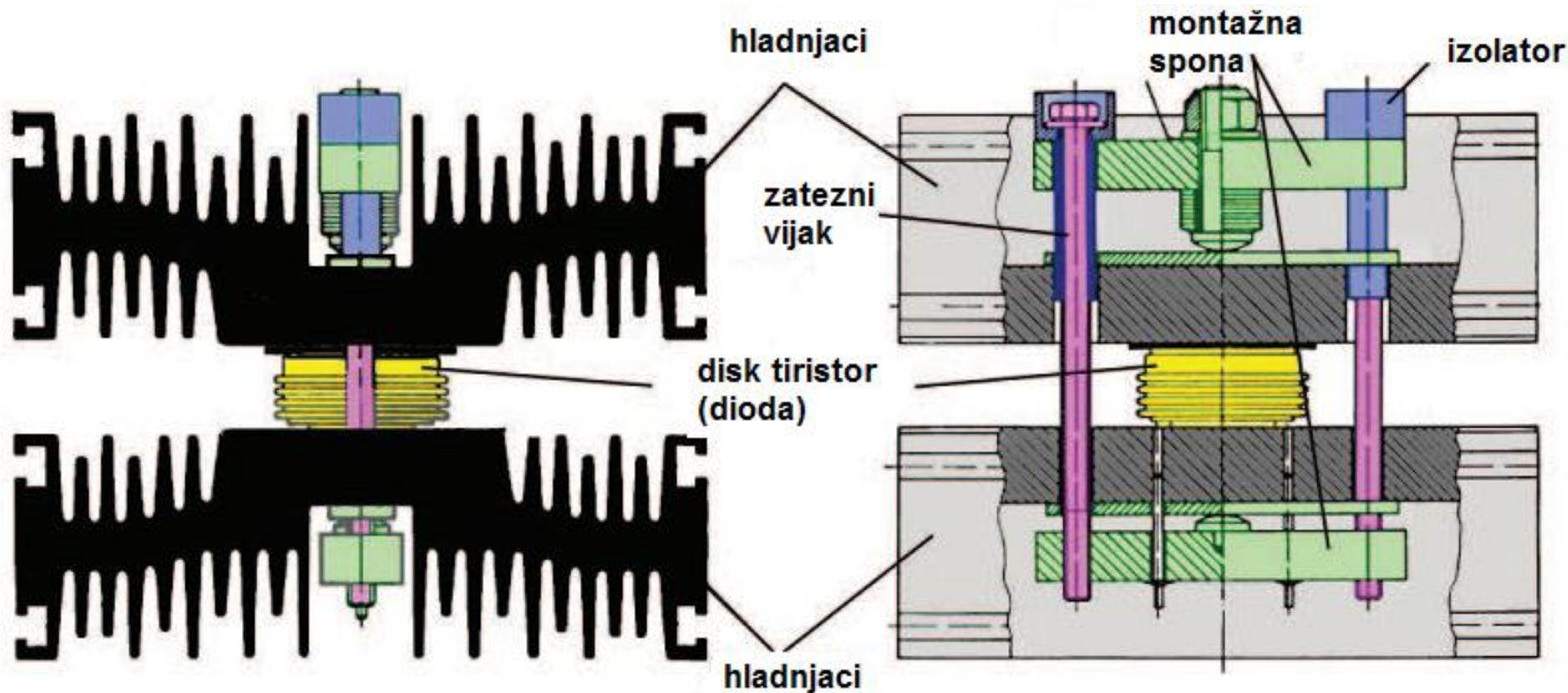
- Za hladnjak P1 je data karakteristika termičke otpornosti za slučaj prirodnog hlađenja i za slučaj montaže jednog izvora toplote ($n=1$)
- Za dve komponente (dva izvora toplote) od kojih svaka disipira po 50W i koje su montirane na dužini hladnjaka od recimo 200mm dobija se termička otpornost :

$$R_{th(s-a)}^* = R_{th(s-a)}(100mm, 50W) / 2 = 0.6 / 2 \text{ K/W} = 0.3 \text{ K/W}$$
- Za jednu komponentu čija je disipacija 100W i koja je montirana na dužini hladnjaka 200mm ima se termička otpornost oko 0.45K/W



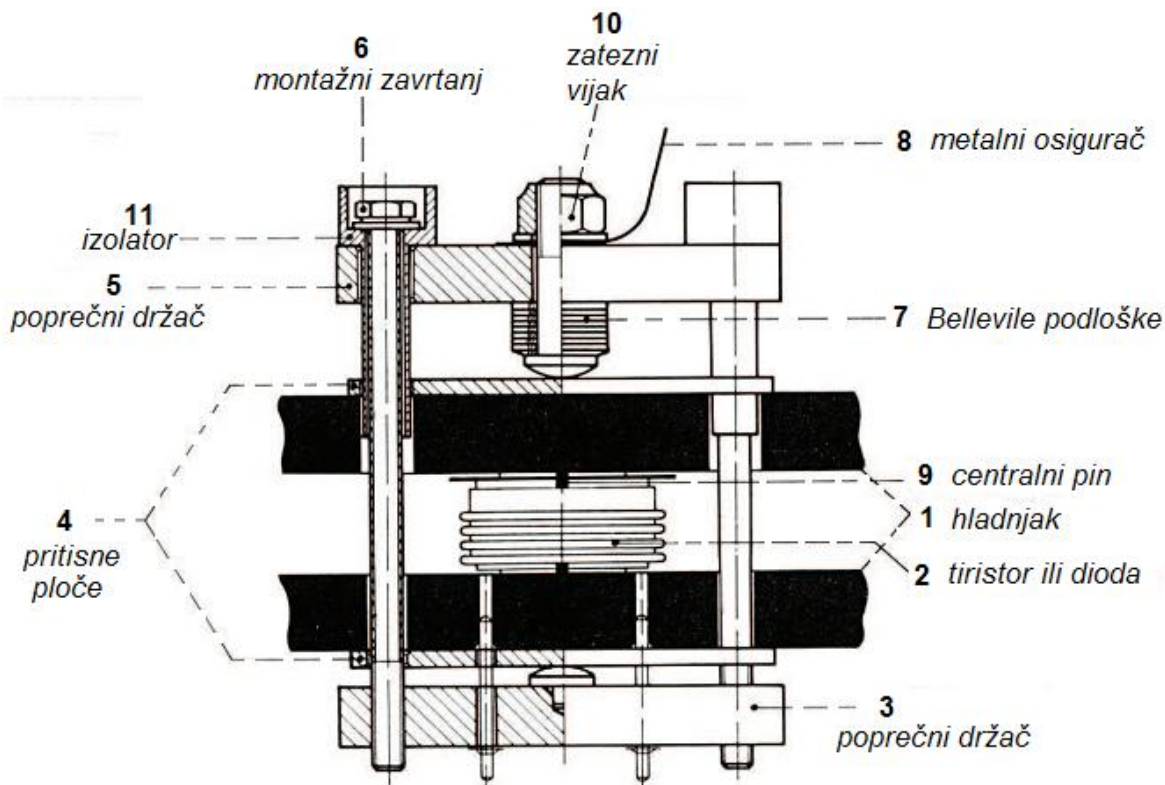
Zaključak je da se za istu snagu disipacije i za istu dužinu hladnjaka bolje, hlađenje ostvaruje distribucijom više komponenti duž hladnjaka nego sa jednom koncentrisanom komponentom. Ovo je još izraženije za veoma dugačke profile i ugrađeno vazdušno hlađenje. Proizvođači daju karakteristike termičke otpornosti za veći broj montiranih komponenti ($n=1,2,3...6$).

DVOSTRUKO HLAĐENI DISK TIRISTOR POSTAVLJEN IZMEĐU DVA PROFILA HLADNJAKA



Da bi se postiglo dvostrano hlađenje tiristora oblika diska i samim tim dvostruko Manja termička otpornost $R_{th(j-s)}$, komponenta se ugrađuje između dva profila hladnjaka. Sistem za pričvršćenje mora biti dimenzionisan tako da je bar jedna ploča hladnjaka pokretna kako bi se osiguralo da je distribucija pritiska na celoj površini ćelije diska ravnomerna.

MONTAŽA DISK TIRISTORA (DIODA)



Detaljni prikaz montaže energetskog tiristora ili diode koji imaju kućište oblika diska ("hockey pack")

- Električni kontakt između komponente i hladnjaka uspostavljen je preko kontaktnih površina.
- Kontaktne površine moraju ispuniti kako termičke tako i električne zahteve.
- Kontaktne površine moraju biti jednolike i glatke (maksimalna dopuštena neravnina 10 μm , maksimalna hrapavost površine 6,3 μm).
- Kontaktne površine moraju biti čiste i bez prašine
- U samo nekoliko minuta izlaganja vazduhu na aluminijumu će se formirati oksidni sloj.
- Zbog ovog sloja oksida, otpornost električnog kontakta će se povećati mnogo puta, što može dovesti do korozije kontakta nakon proticaja značajne struje.
- Iz tog razloga, kontaktne površine ne-pocinkovanih alumijskih površina za hlađenje se moraju mehanički očistiti neposredno pre nego se montira disk SCR ćelija.

PRIČA O PRINUDNOM HLAĐENJU

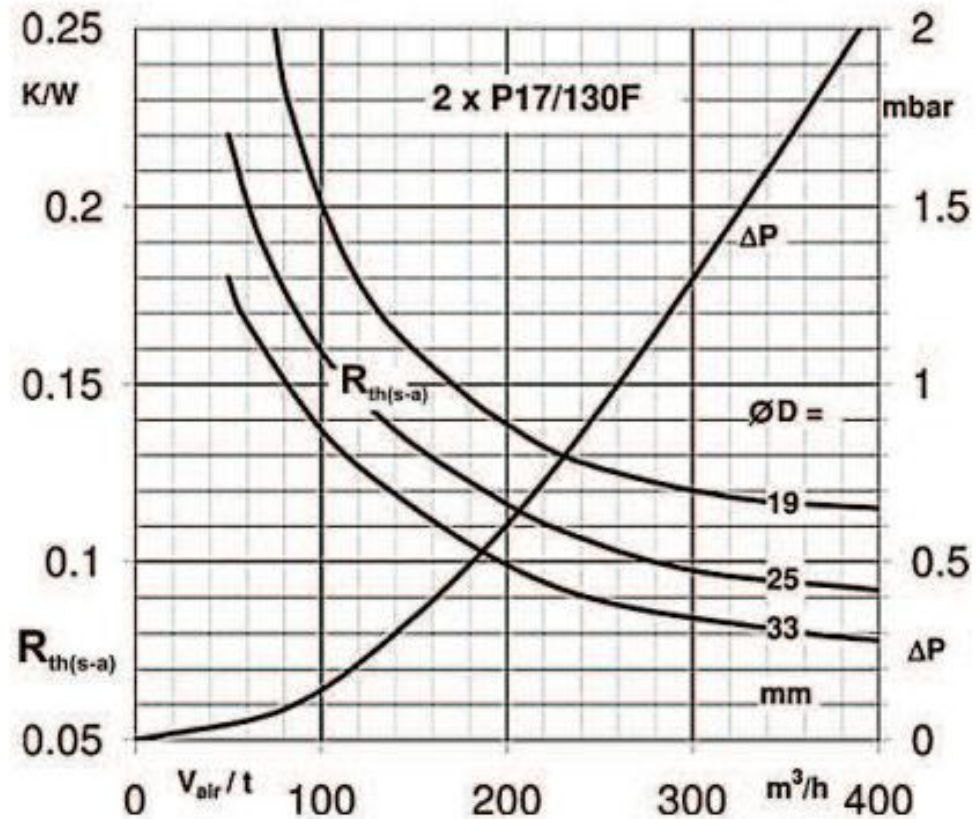
- Za veće snage disipacije (npr. veće od 100 W), često se koristi prinudno vazdušno hlađenje, što uključuje uduvavanje vazduha kroz prozor hladnjaka, pri čemu se kao sredstvo za prinudnu cirkulaciju koristi ventilator.
- Zavisno od protoka vazduha, dolazi do smanjenja toplotnog otpora hladnjaka R_{th} za jednu trećinu pa čak i do više, tako da njegova karakteristika postaje nezavisna od snage disipacije
- Premazivanje ili farbanje hladnjaka u crno ne dovodi do daljnjeg poboljšanja kada se koristi prinudno hlađenje.
- Vrednost $R_{th}(s-a)$, međutim, jako zavisi od zapremine vazduha koja protiče u datom vremenu V_{air}/t ili još drugačije rečeno od srednje brzine rashladnog vazduha v_{air} .
- Srednja brzina rashladnog vazduha pomnožena sa ulaznom površinom daje zapreminski protok vazduha za hlađenje u jedinici vremena:

$$v_{air} [m / s] \cdot A [m^2] = \frac{V_{air} [m^3]}{t [s]}$$

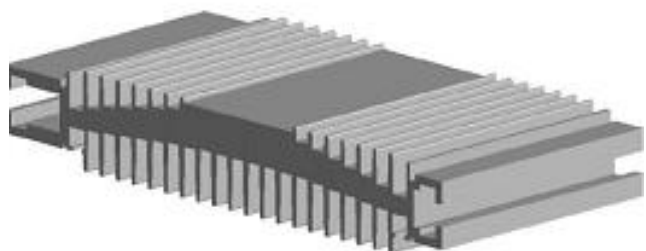
- Obično se zapreminski protok daje u (m^3/h)

KARAKTERISTIKE PRINUDNOG HLAĐENJA

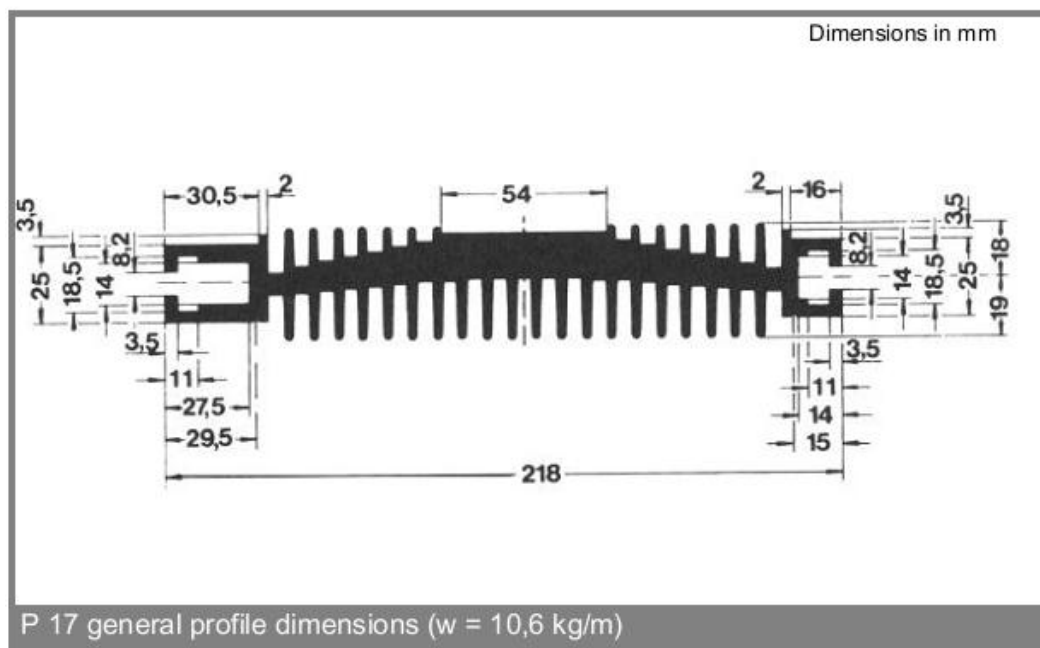
- Zahteva se laminarni protok.
- Među lopaticama hladnjaka, međutim, protok vazduha je normalno turbulentan.
- To je od prednosti jer to pomaže poboljšanju prenosa toplote iz hladnjaka u vazduh.
- Ako postoji turbulencija, neće se moći dobiti tačnu vrednost za srednju brzinu rashladnog vazduha.
- Zato je ova specifikacija ove vrednosti ograničena.
- Da bi se postigao toplotni otpor R_{th} predviđenog sklopa hladnjaka sa određenim ventilatorom, prvi je korak mapiranje specificiranog grafikona pada pritiska Δp u hladnjaku a u funkciji zapreminskog protoka rashladnog vazduha V_{air}/t .



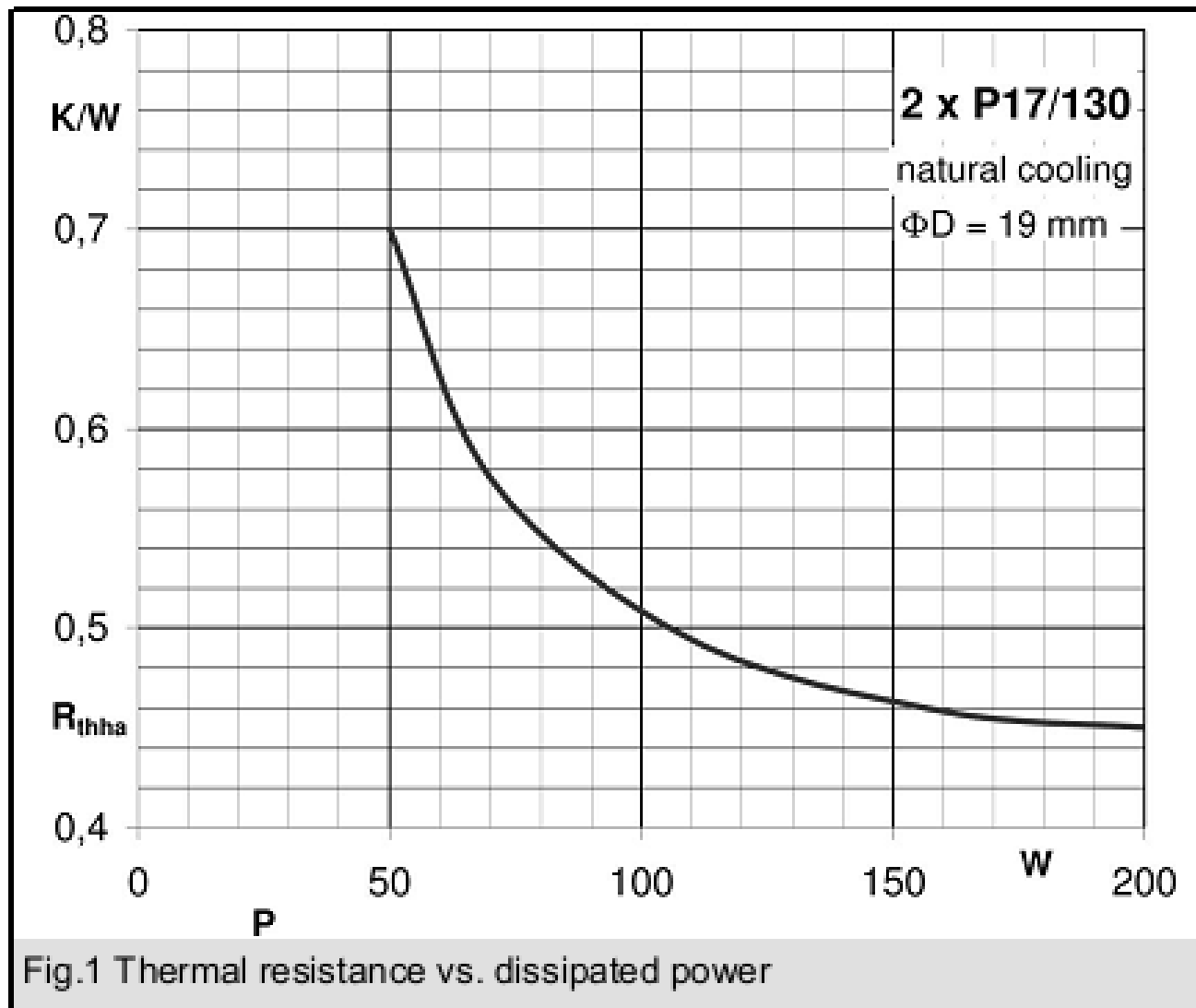
$R_{th(s-a)}$ za hladnjak tipa P17 SEMIKRON dužine 130mm za hlađenje disk tiristora sa dvostranim hlađenjem i pad pritiska Δp između ulaza i izlaza vazduha u funkciji od zapreminskog protoka u vremenu (m^3/h). $\varnothing D$ je prečnik kontaktnog elementa disk poluprovodničke ćelije



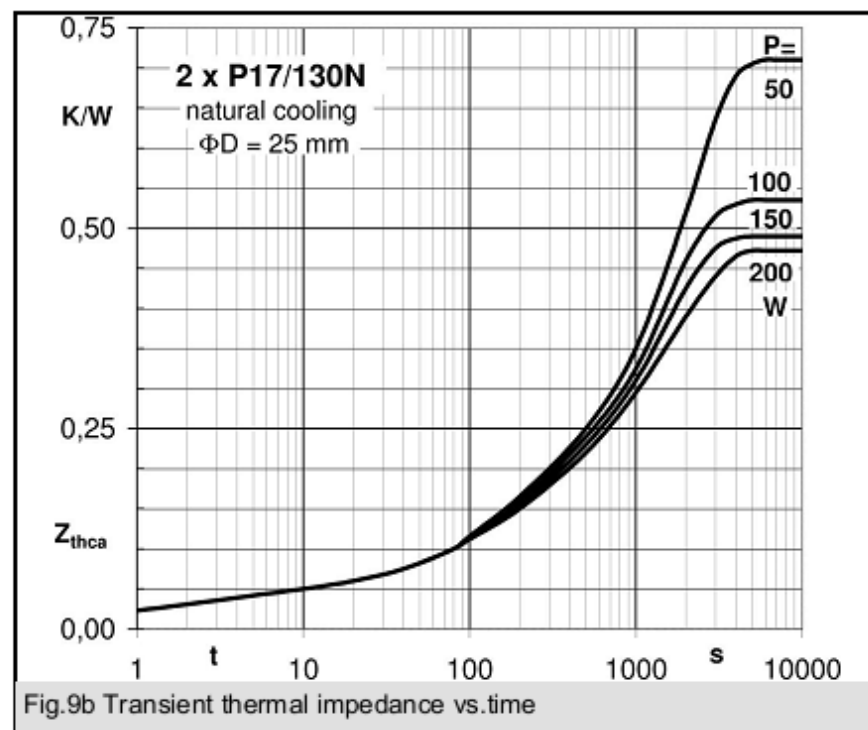
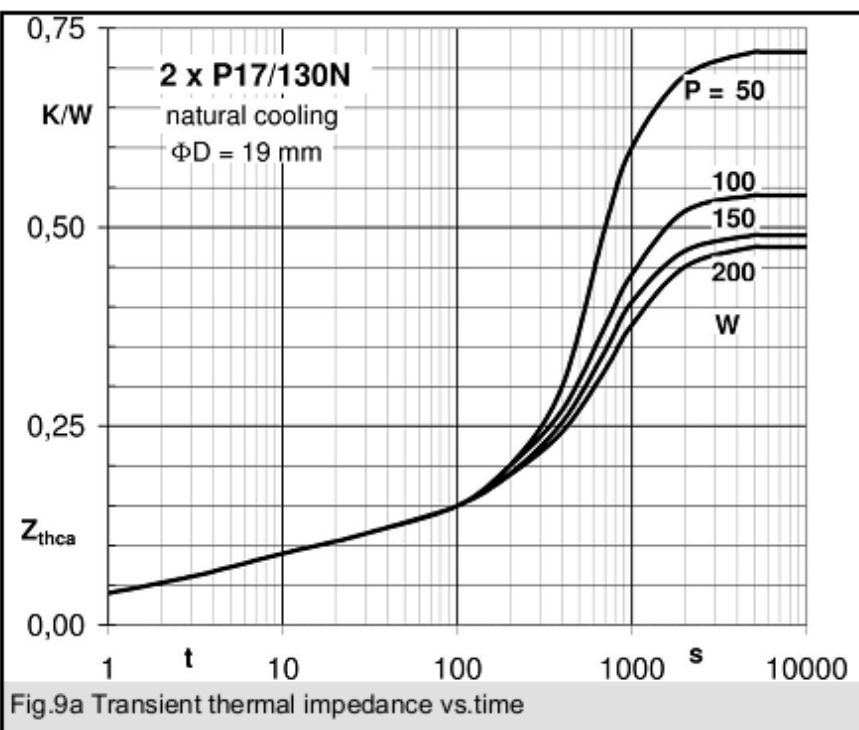
P17 hladnjak
proizvodnje SEMIKRON



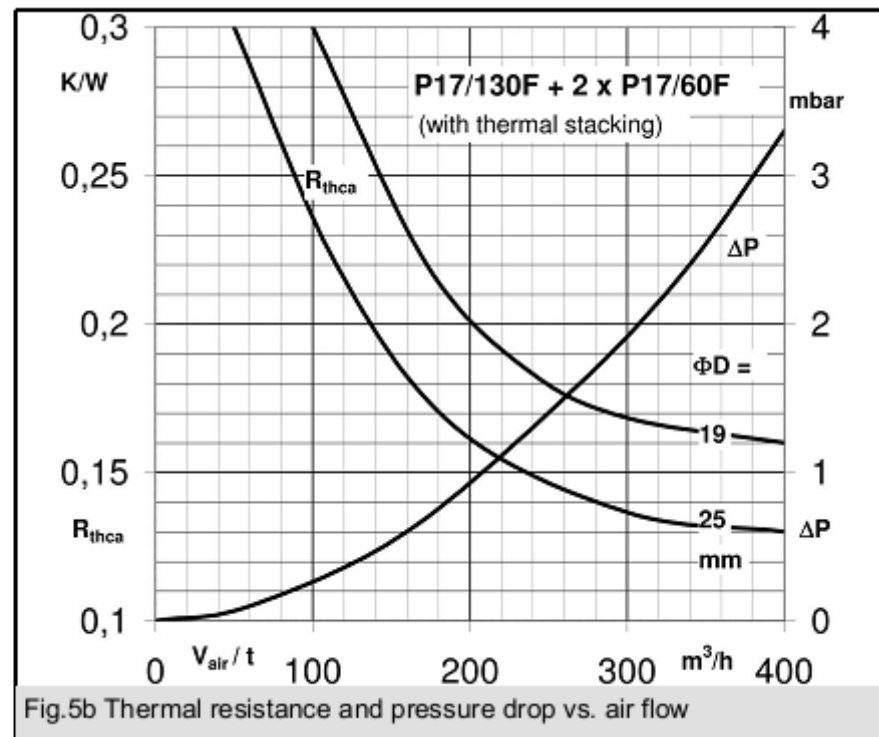
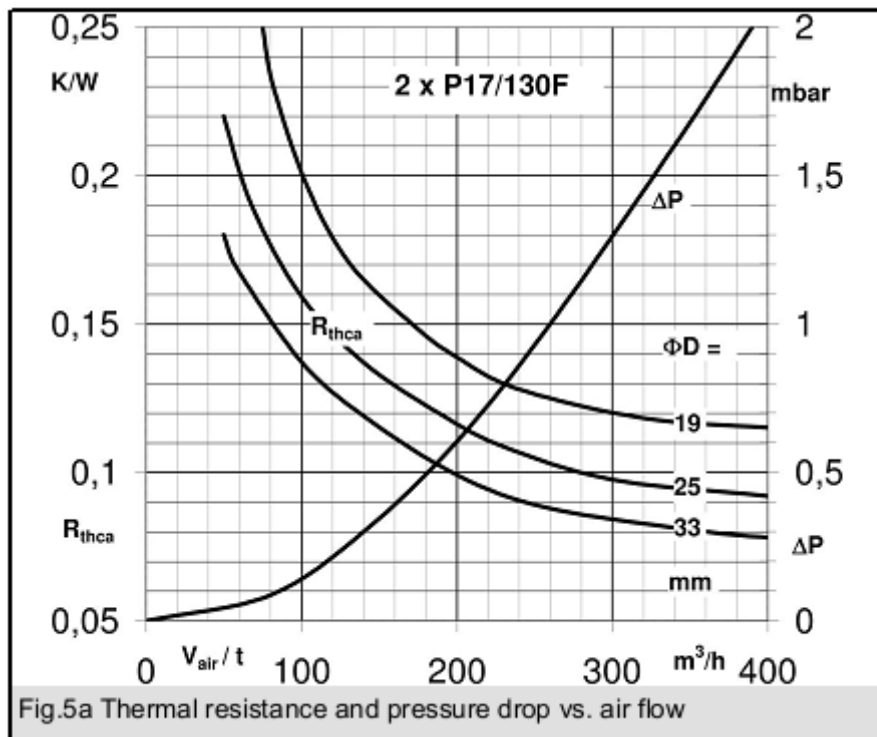
Standard lengths	n	b / d Ø mm	R_{thha} natural cooling K/W	$R_{thca} (V_{air}/t)$ forced air cooling K/W	w kg
2x P 17/130		19 ± 1	0,49 (120W)	0,122 (300 m ³ /h)	3
		25 ± 2	0,48 (120W)	0,1 (300 m ³ /h)	
		33 ± 2	0,47 (120W)	0,085 (300 m ³ /h)	
P 17/130		19 ± 1		0,175 (300 m ³ /h)	2,9
+ 2x P 17/60		25 ± 2		0,14 (300 m ³ /h)	
STACK 1000		25 ± 2		0,135	38
(with P 17/130)		33 ± 2		0,122	
See Fig. Appl.2		47 ± 2		0,115	



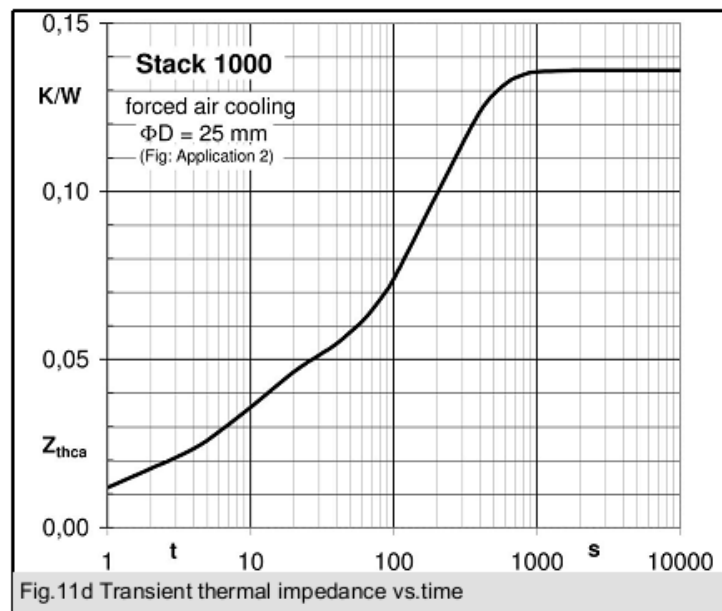
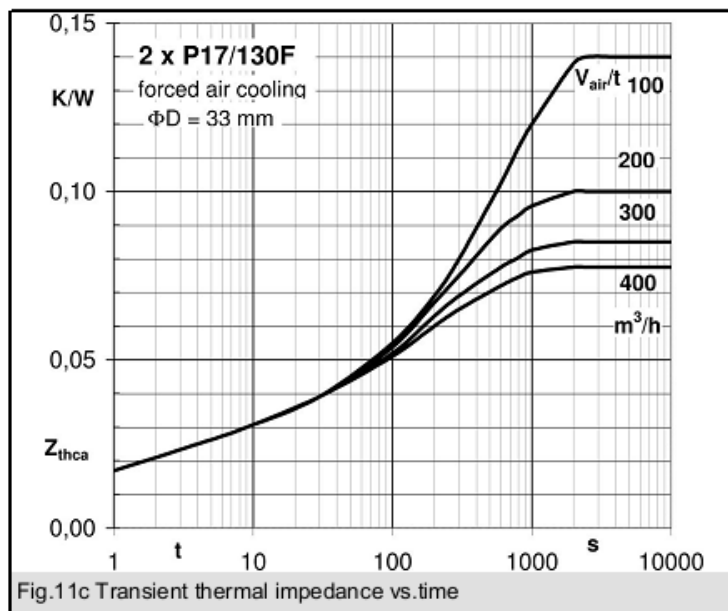
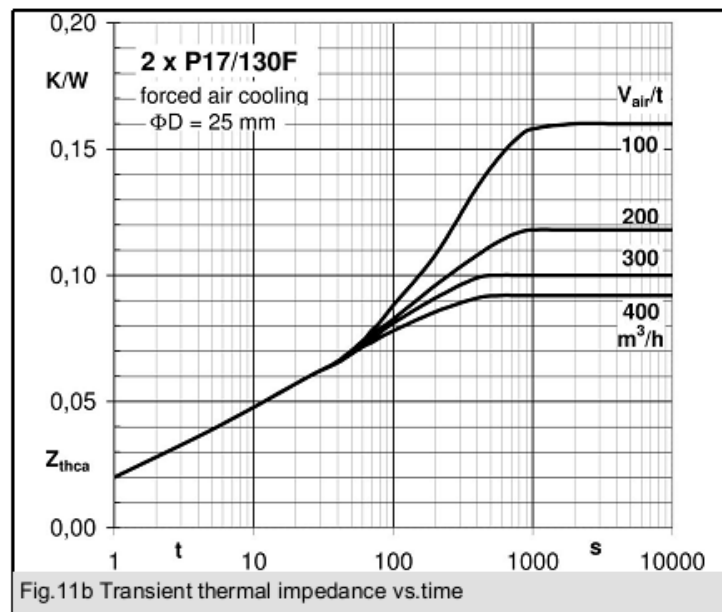
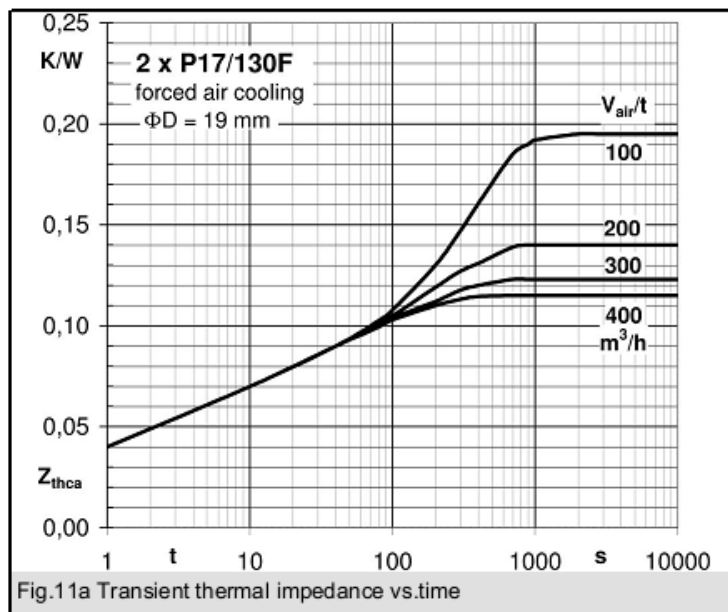
Karakteristika prirodnog hlađenja za 2xP17/130



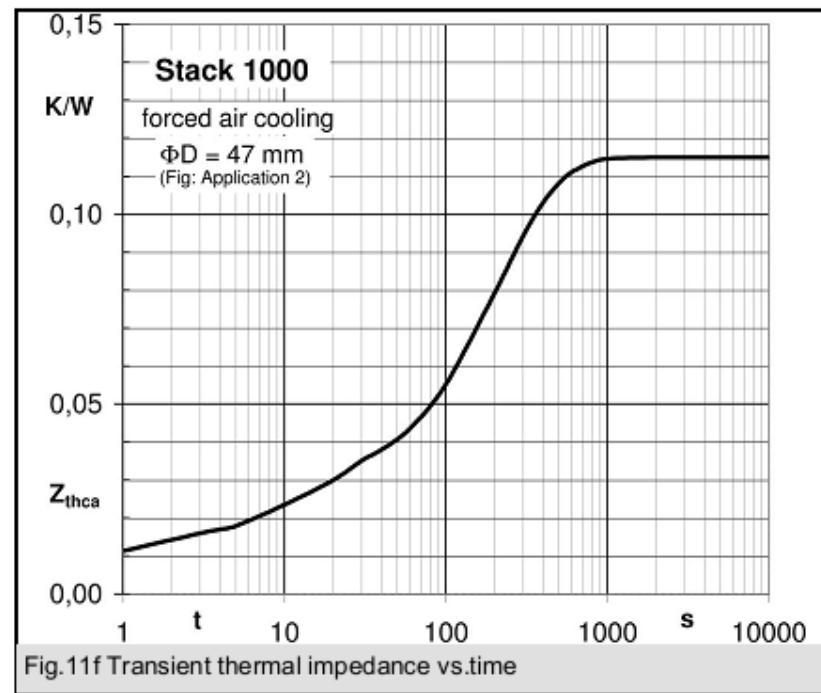
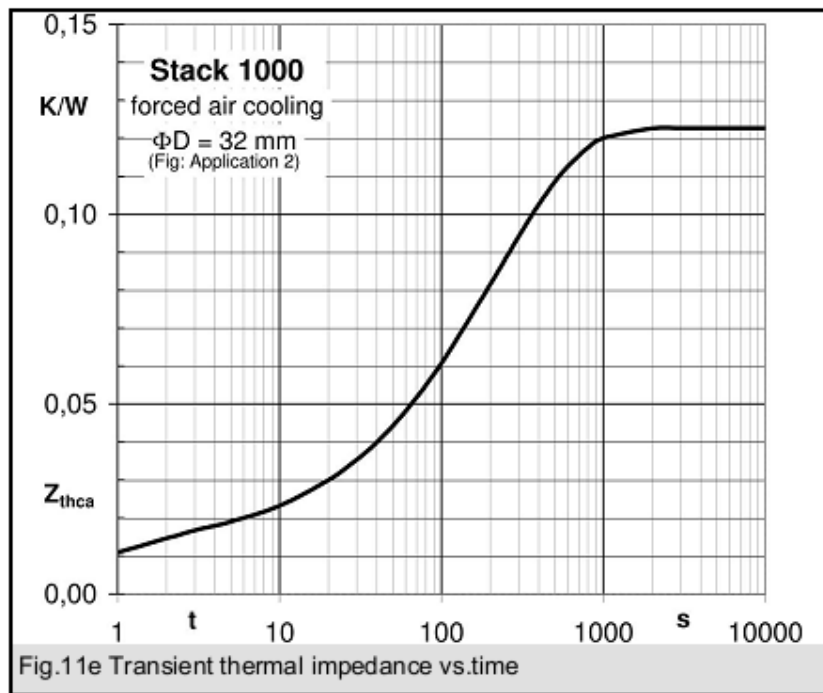
Hladnjak 2x P17/130N -Tranzijentne termičke impedanse za slučaj prirodnog hlađenja i za dve vrednosti prečnika kapsule (diska) 19mm i 25mm



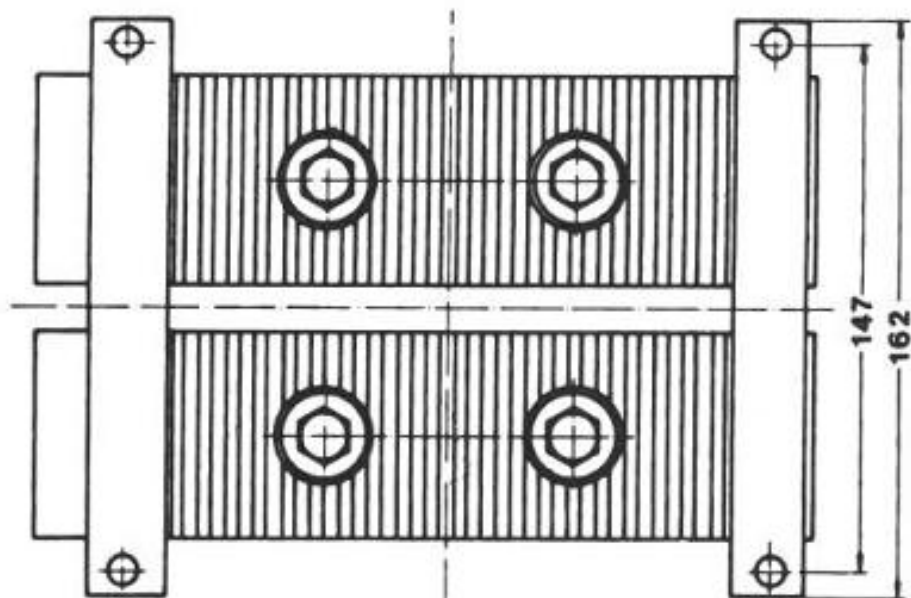
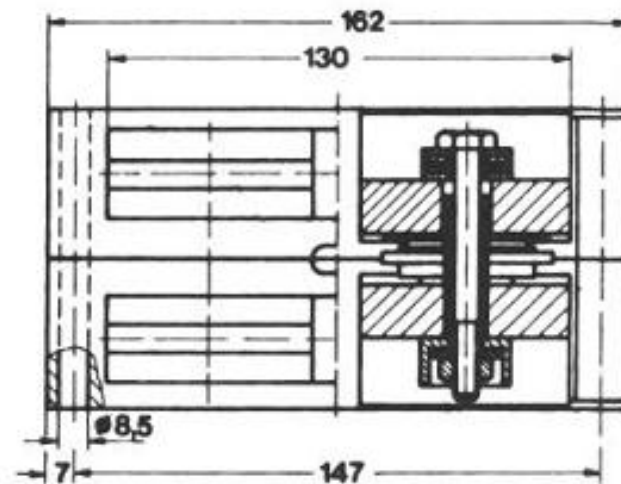
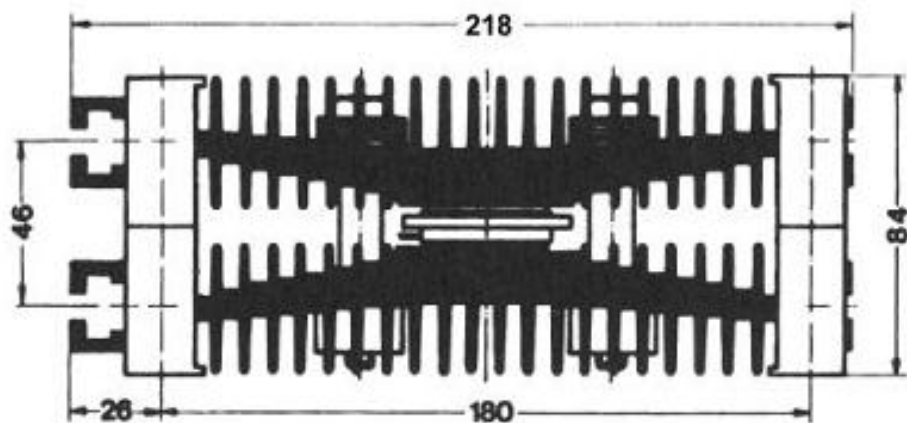
Karakteristike prinudnog hlađenja za P17/130F



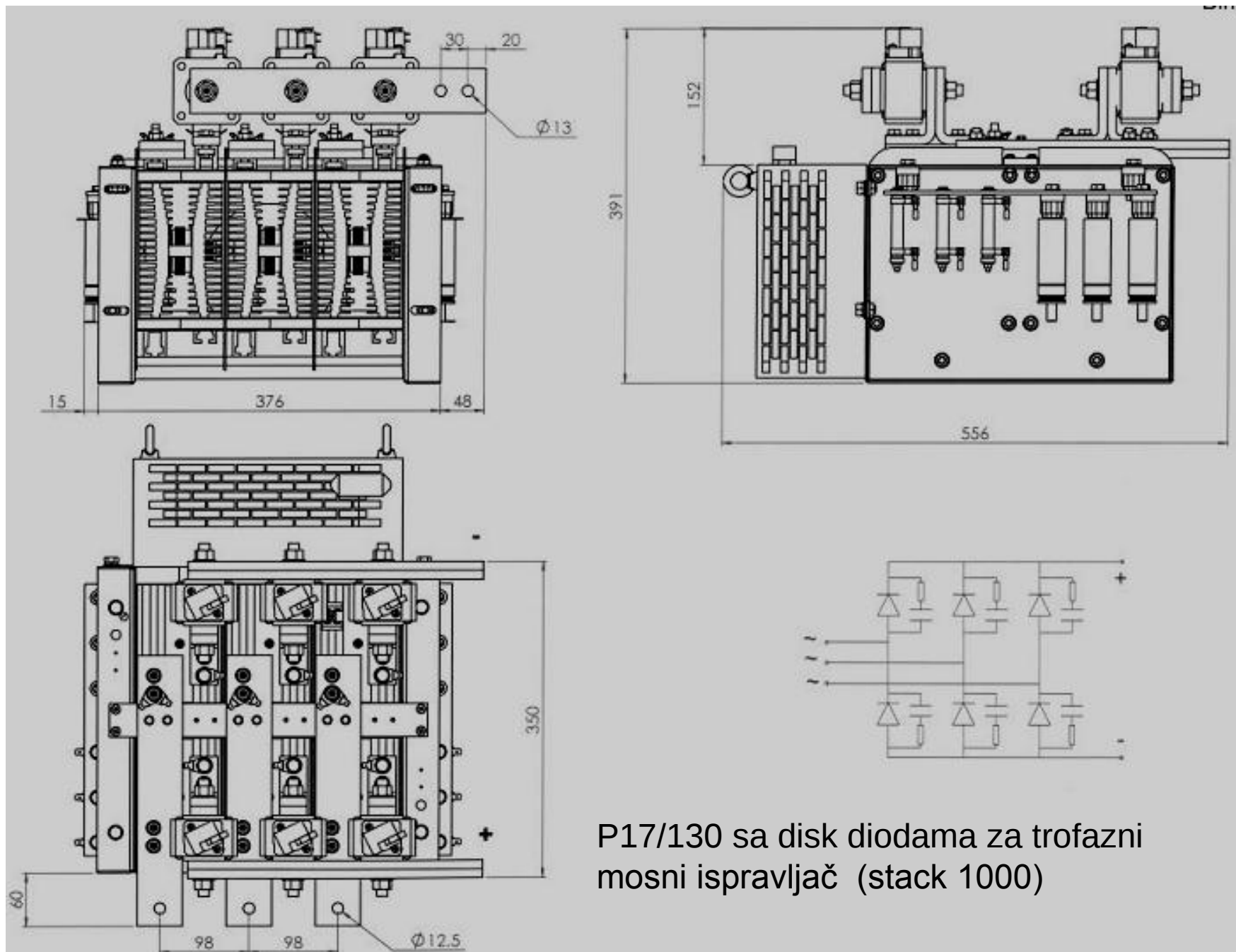
Hladnjak 2x P17/130F -Tranzijentne termičke impedanse za slučaj prinudnog hlađenja



Stack 1000 -Tranzijentne termičke impedanse za slučaj prinudnog hlađenja

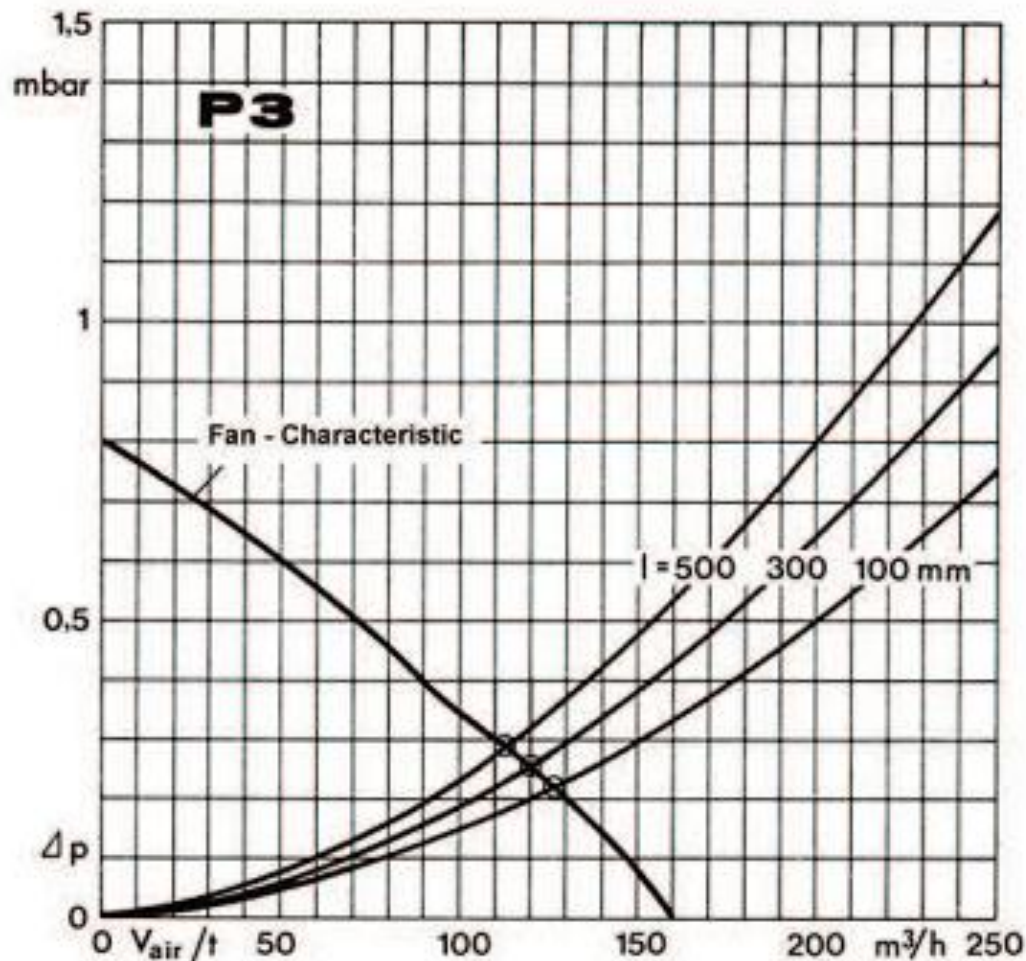


- P17/130 +2xP17/60 sa dve kapsule
- Sve dimenzije su u mm



P17/130 sa disk diodama za trofazni mosni ispravljač (stack 1000)

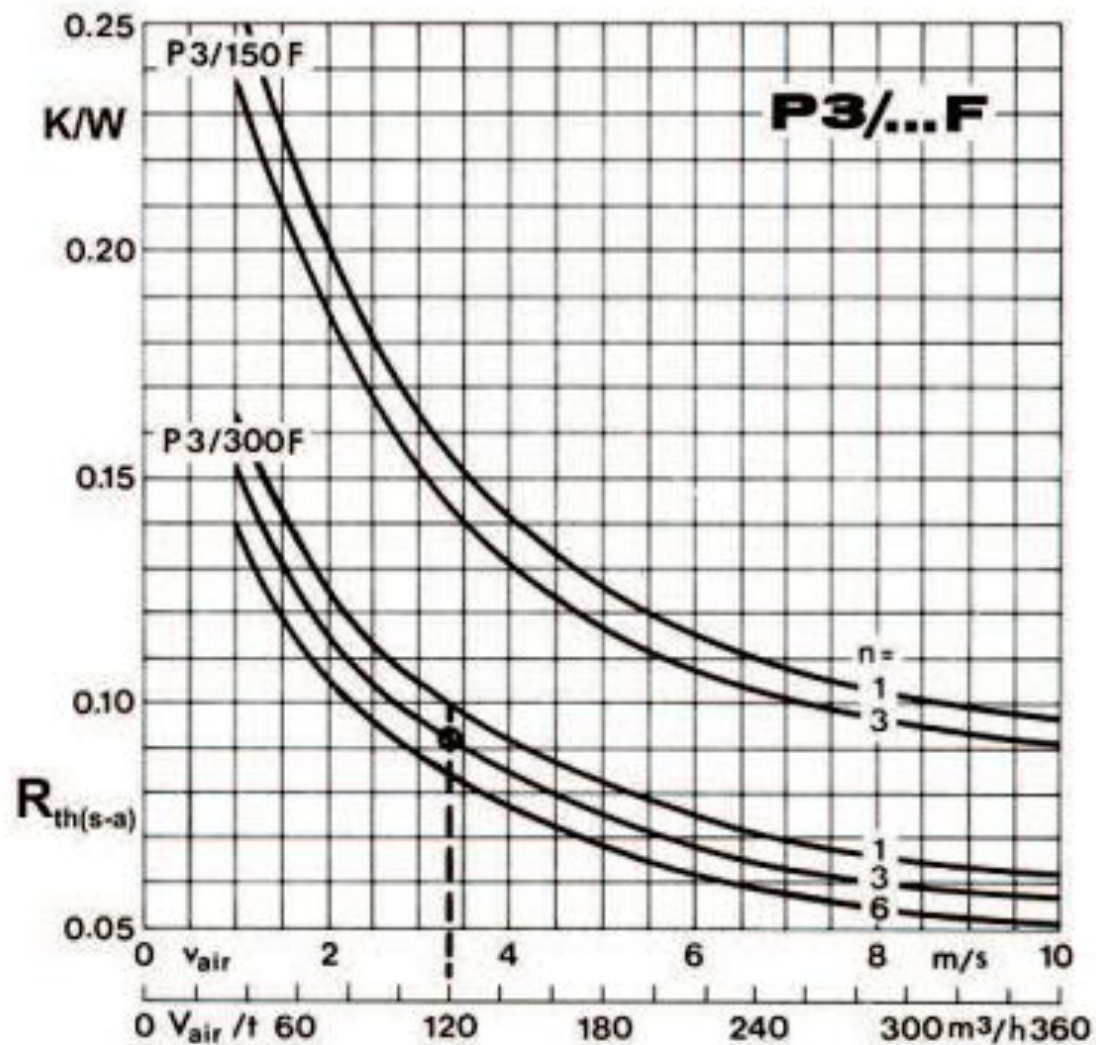
PRIMER ZA PRINUDNO HLAĐENJE SA HLADNJAKOM P3-Semikron



- Za proračun je bitno odrediti tačku preseka krive ventilatora i krive hladnjaka.
- Ova tačka preseka ustvari predstavlja rezultujući zapreminski protok za datu konfiguraciju ventilator/profil hladnjaka
- Za zapreminski protok od 120 m^3/h i za 300mm dužinu hladnjaka dobija se pad pritiska od 0.25mbara(25Pa)

Dijagrami koji prikazuju pad pritiska za različite dužine P3 hladnjaka SEMIKRON u funkciji zapreminskog protoka vazduha (m^3/h), kao i karakteristiku ventilatora (zapreminski protok vazduha evakuisanog od strane ventilatora u funkciji negativne promene pritiska)

TAČKA PRESEKA DAJE REZULTUJUĆI ZAPREMINSKI PROTOK ZA OVU KOMBINACIJU



Za profil hladnjaka
300mm dužine i za slučaj
montaže tri izvora toplote
($n=3$) dobija se termička
otpornost

$$R_{th(s-a)} = 0.093 \text{ K/W}$$



P3/300F

HVALA NA PAŽNJI!!!

