

## Zadaci

**Z1.** U pojačalu je spojeno:

|                                | $\lambda [10^{-6} h^{-1}]$ |
|--------------------------------|----------------------------|
| 6 silicijskih tranzistora      | 0,70                       |
| 2 silicijska tranzistora snage | 65,00                      |
| 4 silicijske diode             | 2,00                       |
| 18 otpornika                   | 0,60                       |
| 9 folijskih kondenzatora       | 0,79                       |
| 3 elektrolitska kondenzatora   | 2,20                       |

Pojačalo se smatra neispravnim ako bilo koja komponenta doživi kvar.

- a) Koliki je intenzitet kvara i srednja trajnost pojačala?  
b) Kolika je vjerojatnost da će pojačalo ispravno raditi nakon 1000 sati?

---

Rješenje:

- a) Pouzdanost (serijski sustav):

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdots e^{-\lambda_n t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) t}$$

Intenzitet kvara:

$$\lambda_{uk} = \sum_i \lambda_i \cdot n_i$$

Objašnjenje: uređaj radi ako sve radi; poput logičko „ILI“ (vjerojatnost da nešto ne radi jednaka je vjerojatnosti da jedno ILI drugo ne radi).

$$\begin{aligned}\lambda_{uk} &= 6 \cdot 0.7 + 2 \cdot 65 + 4 \cdot 2 + 18 \cdot 0.6 + 9 \cdot 0.79 + 3 \cdot 2.2 \\ &= 166.71 \cdot 10^{-6} h^{-1}\end{aligned}$$

Srednja trajnosti:

$$t_m = \frac{1}{\lambda_{uk}} = 6000 h$$

- b)

$$t_1 \ll t_m$$

Uputa: za funkciju pouzdanosti upotrijebiti funkciju eksponencijalne razdiobe (područje II):

$$R(t_1) = e^{-\lambda_{uk} \cdot t_1} = 0.846 = 84.6\%$$

**Z2.** Računalo čija je srednja trajnost 5000 sati predviđeno je za rad na važnom projektu između 1000-tog i 2000-tog sata rada. Kolika je vjerojatnost da će računalo u tom razdoblju pretrpjeti kvar?

---

Rješenje:

$$t_m = 5000 \text{ h}$$

$$t_1 = 1000 \text{ h}$$

$$t_2 = 2000 \text{ h}$$

Nepouzdanost:

$$F(t_1, t_2) = ?$$

$$t_1, t_2 \ll t_m \quad \Rightarrow \quad \text{područje II}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\begin{aligned} \text{vrijedi:} \quad R(t) + F(t) &= 1 & / \frac{d}{dt} \\ \Rightarrow \frac{dF(t)}{dt} &= -\frac{dR(t)}{dt} \end{aligned}$$

Funkcija gustoće kvara:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}(e^{-\lambda t}) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

Intenzitet kvara:

$$\lambda = \frac{1}{t_m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$

Funkcija nepouzdanosti:

$$\begin{aligned} P(t_1 < t < t_2) &= F(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt = \lambda \cdot \left( -\frac{1}{\lambda} \right) e^{-\lambda t} \Big|_{t_1}^{t_2} = -e^{-\lambda t} \Big|_{t_1}^{t_2} = \\ &= e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2} = 0.818 - 0.67 = 14.87\% \end{aligned}$$

**Z3.** Intenzitet kvara uređaja je  $18 \cdot 10^{-3} h^{-1}$ . Srednje vrijeme popravka uređaja je 4 sata, a srednje vrijeme potrebno za održavanje je 1 sat. Kolika je raspoloživost uređaja ako je vrijeme između redovitih održavanja (servisni interval) 100 sati?

---

Rješenje:

$$\lambda = 18 \cdot 10^{-3} h^{-1}$$

$$MTTR = 4h \quad (\text{mean time to repair})$$

$$MTTPR = 1h \quad (\text{mean time to preventive repair})$$

$$MTBPR = 100h \quad (\text{mean time between preventive repair})$$

Vrijeme raspoloživosti uređaja:

$$A = \frac{T_{uk} - T_k}{T_{uk}} = \frac{T_{uk} - N_k \cdot MTTR - N_s \cdot MTTPR}{T_{uk}}$$
$$= 1 - \frac{MTTR}{MTBF} - \frac{MTTPR}{MTBPR}$$

Srednje vrijeme između kvarova:

$$MTBF = \frac{T_{uk}}{N_k} = t_m = \frac{1}{\lambda}$$

$$\Rightarrow A = 0.989928$$

**Z4.** Za kondenzator intenziteta kvara  $0,8 \cdot 10^{-6}/h$ , ukoliko dođe do kvara, vjerojatnost da je kvar nastao uslijed prekida je 15%. Predložite redundantni sklop od dva kondenzatora tako da pouzdanost bude najveća moguća. Usporedite pouzdanost jednog kondenzatora i odabranog redundantnog sklopa nakon  $5 \cdot 10^4 h$ ,  $10^5 h$  i  $5 \cdot 10^5 h$ .

Rješenje:

$$\lambda = 0,8 \cdot 10^{-6} h^{-1}$$

$$f_p = 15\% \quad \Rightarrow \quad f_k = 1 - f_p = 85\%$$

C je sustav sa tri stanja:

$$\begin{aligned} R + F_k + F_p &= 1 \\ R + f_k F + f_p F &= 1 \end{aligned}$$

1) serijski spoj

$$\begin{aligned} F_k &= F_{k1} \cdot F_{k2} = (f_k F) \cdot (f_k F) = (f_k F)^2 = F_k^2 \\ F_p &= 1 - R_{p1} \cdot R_{p2} \\ &= 1 - (1 - F_{p1})(1 - F_{p2}) \\ &= F_{p1} + F_{p2} - F_{p1}F_{p2} = f_p F + f_p F - (f_p F)^2 \\ &= 2F_p - F_p^2 \\ F_{serije} &= F_k + F_p = F_k^2 + 2F_p - F_p^2 \\ R_{serije} &= 1 - F_{serije} = 1 - F_k^2 - 2F_p + F_p^2 \end{aligned}$$

2) paralelni spoj

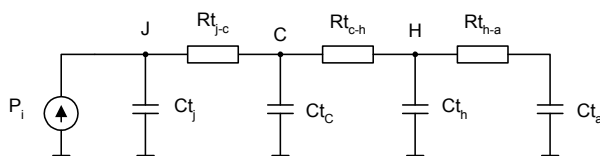
$$\begin{aligned} F_p &= F_{p1} \cdot F_{p2} = F_p^2 \\ F_k &= F_{k1} + F_{k2} - F_{k1}F_{k2} \\ &= 2F_k - F_k^2 \\ F_{paralele} &= F_k + F_p = F_p^2 + 2F_k - F_k^2 \\ R_{paralele} &= 1 - F_{paralele} = 1 - F_k^2 - 2F_p + F_p^2 \end{aligned}$$

Zaključak:  $R_{serije} > R_{paralele}$

|                        | $R = e^{-\lambda t}$ | $R_{serije}$ | $R_{paralele}$ |
|------------------------|----------------------|--------------|----------------|
| $t_1 = 5 \cdot 10^4 h$ | 96.08%               | 98.72%       | 98.71%         |
| $t_2 = 10^5 h$         | 92.31%               | 97.28%       | 97.25%         |
| $t_3 = 5 \cdot 10^5 h$ | 67.03%               | 82.50%       | 82.01%         |

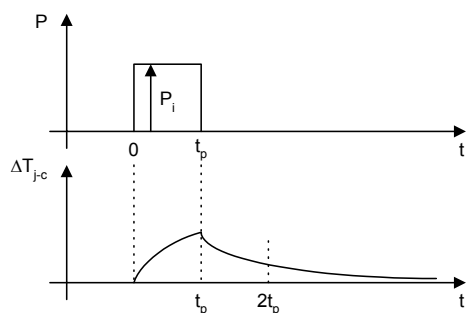
**Z5.** Na tranzistor zadane toplinske impedancije PN spojeva prema kućištu, doveden je pravokutni impuls snage 10W, trajanja 1ms. Koliko se povisi temperatura PN spoja 1ms nakon početka, a koliko 1ms nakon završetka impulsa?

Nadomjesna električka shema toplinskog kruga za impulsni način rada (impulsno opterećenje snagom):



Krivulja  $Z_{t_{j-c}}$  je odziv na jedinični skok snage (prijelazna toplinska impedancija za konstantnu snagu).

Rješenje:



$$\Delta T_{j-c}(t_p) = P_i \cdot Z_{t_{j-c}}(t_p)$$

$Z_{t_{j-c}}(t_p)$  se očitava iz krivulje prijelazne toplinske impedancije

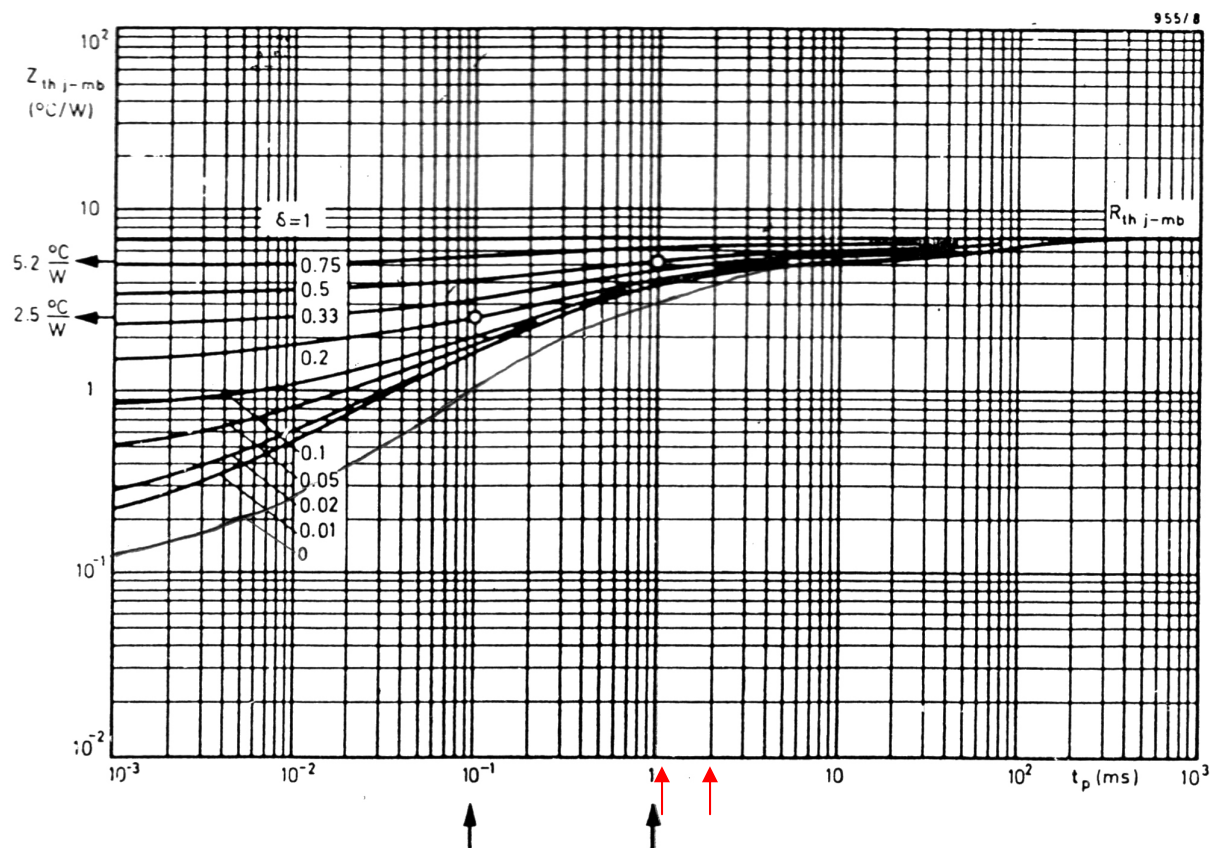
$$Z_{t_{j-c}}(1\text{ms}) = 3.2^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$Z_{t_{j-c}}(2\text{ms}) = 4^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$\Delta T_{j-c}(1\text{ms}) = P_i \cdot Z_{t_{j-c}}(1\text{ms}) = 10 \cdot 3.2 = 32^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{j-c}(2t_p) = P_i \cdot [Z_{t_{j-c}}(2t_p) - Z_{t_{j-c}}(2t_p - t_p)]$$

$$\Delta T_{j-c}(2\text{ms}) = 10 \cdot (4 - 3.2) = 8^\circ\text{C}$$



Prijelazna toplinska impedancija  $Z_{tj-c}$  za impulsnu snagu uz radni omjer  $\delta$  kao parametar. Za  $\delta=0$  prijelazna toplinska impedancija za konstantnu snagu ( $Z_{tj-mb}$  (mb=mounting base) je isto što i  $Z_{tj-c}$ )

**Z6.** Silicijski tranzistor snage smije raditi uz najvišu temperaturu PN spoja do 125°C. Najveća snaga koju smije disipirati u statičkim uvjetima je 10W. Tranzistor radi impulsno. Frekvencija impulsa je 2 kHz, a radni omjer 0,2. Kolika smije biti disipacija na tranzistoru za vrijeme vođenja, ako se pretpostave pravokutni impulsi snage? Kućište tranzistora održava se na temperaturi 55°C, a toplinski kapacitet kućišta je bitno veći od kapaciteta PN spojeva.

Rješenje:

$$f = 2\text{kHz}$$

$$T = \frac{1}{f} = 0.5\text{ms}$$

$$\delta \text{ (radni omjer, engl. duty cycle)} = \frac{t_p}{T} = 0.2$$

$$t_p = \delta T = 0.1\text{ms}$$

$$Z_{tj-c} = f(t_p) / \delta \quad \text{krivulje prijelazne toplinske impedancije za impulsnu snagu} \\ \text{(engl. transient thermal impedance, pulse power rating chart)}$$

Za kontinuiranu disipaciju na tranzistoru

$$\lim_{tp \rightarrow \infty} Z_{tj-c} = R_{tj-c}$$

$$R_{tj-c} = 7^\circ\text{C} / \text{W} \text{ (iz krivulje } Z_t \text{)}$$

$$\Delta T_{j-c_M} = P_M \cdot R_{tj-c} = 70^\circ$$

$$T_C \leq T_{j_M} - \Delta T_{j-c_M} = 125 - 70 = 55^\circ \Rightarrow \text{zadovoljava}$$

$$Z_{tj-c}(t_p, \delta) = Z_{tj-c}(0.1\text{ms}; 0.2) = 2.5^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$P_{i_M} = \frac{\Delta T_{j-c_M}}{Z_{tj-c}} = \frac{70}{2.5} = 28\text{W}$$

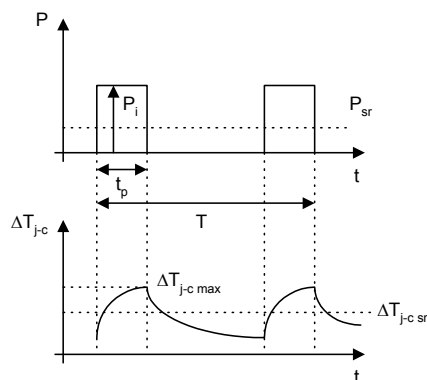
$$P_{i_M} > P_M$$

## Z7.

Silicijski tranzistor snage dissipira u impulsnom načinu rada 10W po impulsu. Trajanje impulsa je 1ms, a odnos vremena vođenja i nevođenja 1:4. Izračunajte najveće povišenje temperature PN spojeva tranzistora u stacionarnom stanju koristeći

- krivulju prijelazne toplinske impedancije za impulsnu snagu i
- krivulju prijelazne toplinske impedancije za stalnu (konstantnu) snagu.

a)



$$\delta = \frac{t_p}{T}$$

$$\frac{t_p}{T - t_p} = \frac{1}{4}$$

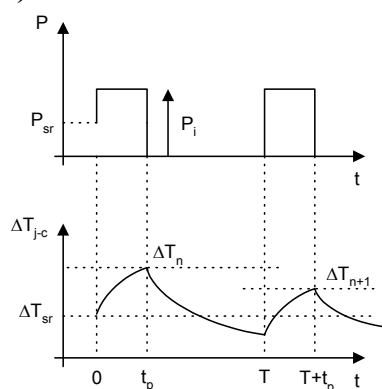
$$t_p = \frac{1}{5}T = 0,2T$$

$$\Delta T_M = P_i Z_{t_{j-c}}(t_p, \delta)$$

$$Z_{t_{j-c}}(1ms; 0,2) = 4^\circ C / W$$

$$\Delta T_M = 10 \cdot 4 = 40^\circ C$$

b)



Iz krivulje  $Z(t_p)$  za konstantnu snagu ( $\delta=0$ ):

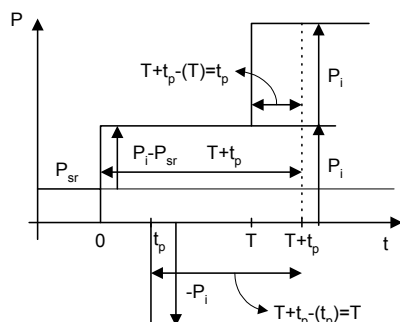
$$Z_t(1ms) = 3,2^\circ C / W$$

$$Z_t(5ms) = 5,5^\circ C / W$$

$$Z_t(6ms) = 6^\circ C / W$$

$$P_{sr} = \delta \cdot P_i = 0,2 \cdot 10 = 2W$$

$$\Delta T_n = P_{sr} \cdot R_{j-c} + (P_i - P_{sr}) \cdot Z_{t_{j-c}}(t_p)$$



$$\Delta T_n = P_{sr} \cdot R_{j-c} + (P_i - P_{sr}) \cdot Z_{t_{j-c}}(t_i)$$

$$\Delta T_n = 2 \cdot 7 + (10 - 2) \cdot 3,2 = 14 + 25,6 = 39,6^\circ C$$

$$\Delta T_{n+1} = P_{sr} \cdot R_{j-c} + (P_i - P_{sr}) \cdot Z_{t_{j-c}}(T + t_p)$$

$$- P_i Z_{t_{j-c}}(T) + P_i Z_{t_{j-c}}(t_p)$$

$$\Delta T_{n+1} = 2 \cdot 7 + (10 - 2) \cdot 6 - 10 \cdot 5,5 + 10 \cdot 3,2 = 39^\circ C$$

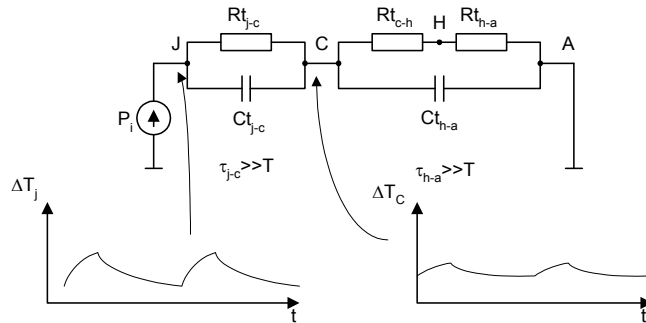
Napomena: Budući da se u katalogima proizvođača redovito dostupni podaci za  $Z_{th}$  za impulsnu snagu (znatno rjeđe  $Z_{th}$  za stalnu snagu odnosno  $Z_{th}$  za impulsnu uz  $\delta=0$ ) ova metoda rada pravi smisao poprima kod proračuna  $\Delta T_{j-c}$  za valne oblike koji nisu pravokutni.



c) Kolika je najviša temperatura PN spojeva tranzistora za slučaj a) ako je tranzistor pričvršćen na hladilo SK-13 ( $R_{th-a} = 12,5^{\circ}\text{C/W}$ ,  $R_{th-c} = 1,2^{\circ}\text{C/W}$ )?

iz a)  $\Delta T_{j-cM} = 40^{\circ}\text{C}$   $t_p = 1\text{ms}$   $T = 5\text{ms}$

iz b)  $P_{sr} = 2\text{W}$



hladilo prenosi samo srednju snagu

$$T_a = 55^{\circ}\text{C};$$

$$T_H = T_a + P_{sr} \cdot R_{th-a} = 55 + 2 \cdot 12,5 = 80^{\circ}\text{C}$$

$$T_C = T_H + P_{sr} \cdot R_{th-c} = 80 + 2 \cdot 1,2 = 82,4^{\circ}\text{C}$$

$$T_{jM} = T_C + \underbrace{P_i \cdot Z_{tj-c}(t_p, \delta)}_{\Delta T_{j-cM}} = 82,4 + 40 = 122,4^{\circ}\text{C}$$