

Hardverski interfejsi

Vežbe 8

Napomena: Sve što je označeno plavom bojom na crtežima u sklopu zadataka je deo postavke zadataka, a sve što je označeno crvenom bojom dodato je u postupku rešavanja zadataka.

Prekidačka aplikacija sa induktivnim potrošačem.

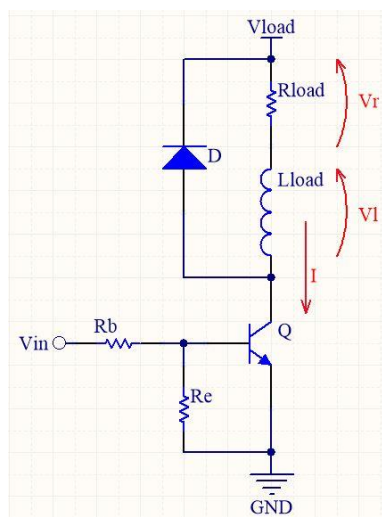
Tranzistor Q se u početnom trenutku uključuje (u stanju zasićenja), a nakon 5 sekundi isključuje (u stanju zakočenja). Odrediti izraze za struju kroz induktivni potrošač (R_{load} i L_{load}) ako je prilikom pražnjenja magnetske energije akumulirane na induktoru (tranzistor Q isključen) napon na potrošaču ograničen:

- samo upotrebom diode D ($V_{ON} = 0.6 V$)
- upotrebom redno vezanih dioda D ($V_{ON} = 0.6 V$) i Zener diode – $V_Z = 5V$

Grafički ilustrovati dobijene rezultate.

Poznato je: $R_{load} = 100\Omega$, $L_{load} = 100 mH$, $V_{load} = 10V$.

Napomena: Zbog jednostavnijeg zapisa zanemariti pad napona na tranzistoru V_{ces} kada je on u zasićenju.



Najpre ćemo odrediti izraz za struju kada se prekidač zatvori (tranzistor Q uključi) u trenutku $t = 0s$. Ukoliko zanemarimo pad napona na tranzistoru Q dok je on u zasićenju, na osnovu KZN važi:

$$V_{load} - V_r - V_l = 0$$

$$V_r = i \cdot R$$

$$V_l = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$V_{load} = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt}$$

Primenom Laplasove transformacije dobija se:

$$V_{load}(s) = I(s) \cdot R + L \cdot (s \cdot I(s) - i(0))$$

Napon V_{load} može se posmatrati kao Hevisajdov step signal (nakon uključivanja tranzistora Q u $t = 0s$, napon ima vrednost V_{load} (10 V) – prekidač zatvoren, a pre toga 0, jer je tranzistor Q bio isključen – prekidač otvoren), pa je $V_{load}(s) = 10 \cdot \frac{1}{s}$.

$$10 \cdot \frac{1}{s} = I(s) \cdot (R + Ls)$$

$$I(s) = 10 \cdot \frac{1}{s(R + Ls)} = 10 \cdot \frac{1}{Ls(s + \frac{R}{L})}$$

$$\frac{1}{s(s + \frac{R}{L})} = \frac{K_1}{s + \frac{R}{L}} + \frac{K_2}{s} = \frac{K_1 \cdot s + K_2 \cdot s + K_2 \cdot \frac{R}{L}}{s(s + \frac{R}{L})}$$

Sledi:

$$K_2 = \frac{L}{R}$$

$$K_1 = -\frac{L}{R}$$

$$I(s) = \frac{10}{L} \cdot \left(\frac{-\frac{L}{R}}{s + \frac{R}{L}} + \frac{\frac{L}{R}}{s} \right) = \frac{10}{L} \cdot \frac{L}{R} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \right)$$

Sada može da se primeni inverzna Laplasova transformacija:

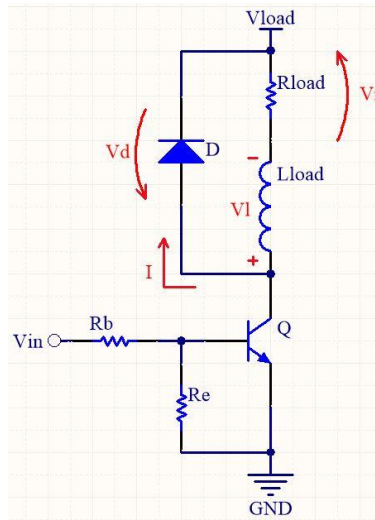
$$i(t) = \frac{10}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \cdot h(t)$$

Iz prethodne relacije je jasno da nakon određenog vremenskog perioda induktivnost potrošača više neće imati uticaj na vrednost struje i kroz potrošač i ona će praktično zavisiti samo od njegove otpornosti:

$$i = I_o = i(t = 5s) = \frac{V_{load}}{R} = \frac{10}{100} = 0.1 A = 100 mA$$

Koliko brzo će nastupiti to „ustaljeno stanje“ zavisi od vremenske konstante $\tau = \frac{R}{L}$.

Sada ćemo posmatrati šta se dešava sa izrazom za struju i kada se tranzistor Q isključi (prekidač otvoren). Nakon otvaranja prekidača, induktor se „protivi“ promeni struje i i teži da je i dalje održi u toku, te se ponaša kao generator sa pozitivnijim krajem prema tranzistoru Q a negativnijim krajem prema potencijalu V_{load} :



Struja i će praktično da teče kroz diodu D sve dok se magnetska energija akumulirana u induktoru ne potroši. Drugim rečima, struja i će eksponencijalno opadati sve dok se magnetska energija u potpunosti ne potroši.

Opet po KZN po konturi kroz diodu važi:

$$V_l = V_d + V_r$$

S obzirom na to da se induktor sada ponaša kao generator, odnosno magnetska energija se troši (neusaglašeni smerovi struje i napona) važi:

$$V_l = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$-L \cdot \frac{di}{dt} = R \cdot i + V_d$$

$$V_d = 0.6V = \text{const.}$$

$$-L \cdot (s \cdot I(s) - i(t = 5s)) = R \cdot I(s) + \frac{V_d}{s}$$

$$-L \cdot s \cdot I(s) + L \cdot I_o = R \cdot I(s) + \frac{V_d}{s}$$

$$I(s) \cdot (sL + R) + \frac{V_d}{s} = L \cdot I_o$$

$$I(s) = \frac{L \cdot I_o}{sL + R} - \frac{\frac{V_d}{s}}{sL + R} = \frac{I_o}{s + \frac{R}{L}} - \frac{V_d}{s(sL + R)}$$

Sličnim sređivanjem kao i u prvom delu zadatka dobiće se:

$$I(s) = \frac{I_o}{s + \frac{R}{L}} - \frac{V_d}{R} \cdot \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \right).$$

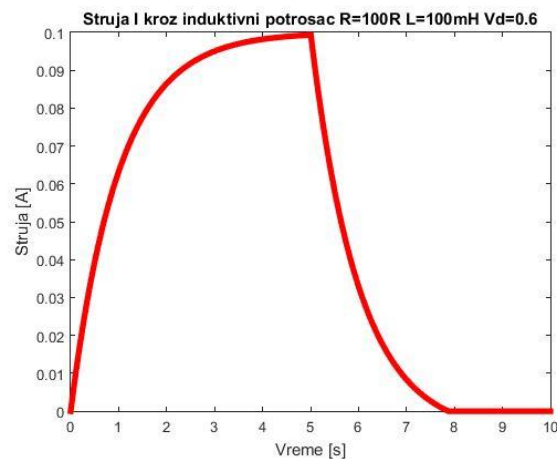
Inverznom Laplasovom transformacijom dobija se izraz za struju i nakon otvaranja prekidača, odnosno tokom procesa trošenja akumulirane magnetske energije u induktoru. Nakon što se ta energija potroši, struja će biti $i = 0A$:

$$i(t) = (I_o e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{V_d}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}))h(t).$$

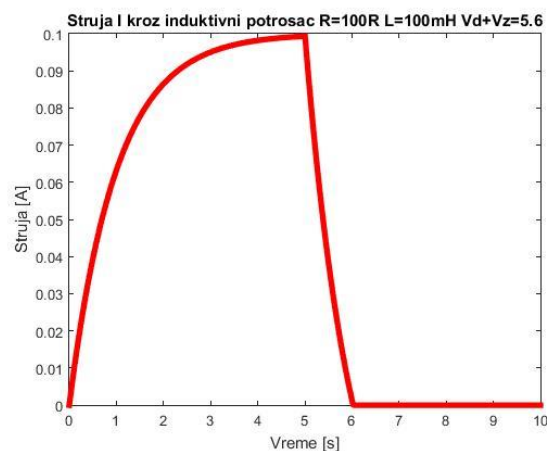
Odnosno:

$$i(t) = (I_o + \frac{V_d}{R})e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{V_d}{R}.$$

Ukoliko uvrstimo zadate vrednosti ($R = 100 \Omega, L = 100 \text{ mH}, V_{load} = 10V$ i $V_d = 0.6V$) u dobijene izraze funkcija struje kroz potrošač će izgledati na sledeći način:



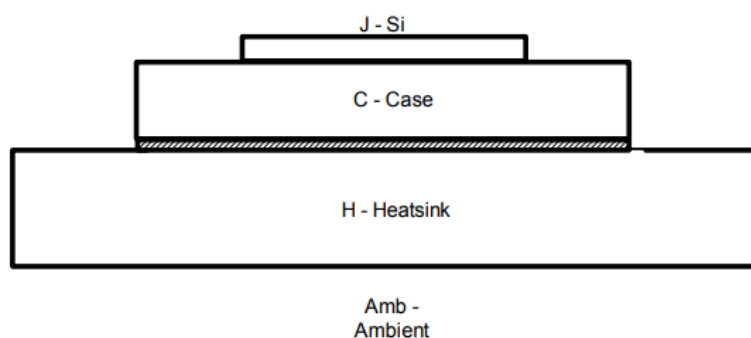
Ukoliko se pak redno sa diodom D veže Zener dioda ($V_z = 5V$), povećava se ukupan napon na potrošaču a na taj način struja i brže opadne na 0, odnosno akumulirana magnetska energija unutar induktora brže se potroši (kao što se može videti sa slike ispod):



Termički proračun hladnjaka poluprovodničkih elemenata

Da bi se odvela toplota sa poluprovodničke komponente (dioda, tranzistor...) stvorena u njegovoj strukturi zbog proticanja struje, odnosno snage disipacije, potrebno je poluprovodnik montirati na odgovarajuće rashladno telo, hladnjak, koje će povećati kontaktnu površinu poluprovodničke komponente i okolnog vazduha. Razmena toplotne energije između poluprovodnika i ambijentalnog vazduha ograničena je parametrom koji se naziva toplotna otpornost. Toplotna otpornost se javlja između:

1. Silicijumskog jezgra (J) i kućišta komponente (C): R_{thJC}
2. Kućišta komponente (C) i hladnjaka (H): R_{thCH}
3. Hladnjaka (H) i ambijentalnog vazduha (A): R_{thHA}

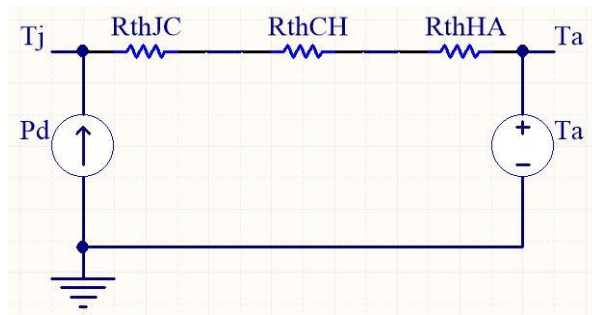


- **J** (Junction) – Silicijumsko jezgro
- **C** (Case) – Kućište poluprovodničkog elementa
- **H** (Heatsink) – Hladnjak na koji se montira kompletan poluprovodnički element (koga čine J i C)
- **A** (Ambient) – Okolina u koju se preko hladnjaka odvodi toplota sa poluprovodnika

Temperatura silicijumskog jezgra (T_j) ne sme da pređe vrednost definisanu u data sheet-u date komponente, npr. za tranzistor 2SCR574D $T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$, dok je za 2N3055 $T_{jmax} = 200^\circ\text{C}$. Temperatura ambijentalnog vazduha (T_a) zavisi od načina upotrebe uređaja i može da bude između 25°C , ako je hladnjak na sobnoj temperaturi, pa i preko 50°C ako se hladnjak nalazi zatvoren u nekom kućištu. Termičko kolo koje modeluje proces odvođenja toplote može se predstaviti ekvivalentnim električnim kolom uz primenu elektro-termičke analogije, koja se bazira na činjenici da se određeni termički i električni procesi mogu opisati jednačinama istog oblika. Ovo važi ako usvojimo da:

1. Snaga disipacije odgovara u električnom kolu struji
2. Termička otpornost odgovara u električnom kolu otpornosti
3. Temperatura odgovara u električnom kolu naponu

Uz primenu ovih analogija ekvivalentno električno kolo koje predstavlja proces odvođenja toplote sa poluprovodničke komponente prikazano je na slici ispod.



Na slici iznad prikazan je pojednostavljeni statički model toplotne šeme poluprovodničkog elementa. Razvijena snaga disipacije P_d se modelira kao strujni izvor, a temperatura ambijentalnog vazduha smatra se konstantom i modeluje se naponskim izvorom T_a . Izbor hladnjaka se svodi na određivanje njegove termičke otpornosti R_{thHA} , tako da bude zadovoljen uslov:

$$T_{jmax} > T_j = P_d \cdot (R_{thJC} + R_{thCH} + R_{thHA}) + T_a$$

Termička otpornost R_{thJC} je parametar koji zavisi od konstrukcije komponente i nalazi se u data sheet-u, npr. za tranzistor 2N3055 iznosi $R_{thJC} = 1.52 \frac{^{\circ}C}{W}$. Termička otpornost R_{thCH} zavisi od načina montaže poluprovodničke komponente na hladnjak (direktno bez ili sa termalnom provodnom pastom, sa ili bez izolacione podloge...) i obično se kreće u granicama od 0,2 do 2 $^{\circ}C/W$. Maksimalna dozvoljena vrednost R_{thHA} se dobija kao:

$$R_{thHA} = \frac{T_j - T_a}{P_d} - (R_{thJC} + R_{thCH})$$

Na osnovu dobijene vrednosti bira se odgovarajući hladnjak čija je termička otpornost manja ili jednaka izračunatoj vrednosti, primer data sheet pod nazivom *hs02.pdf* hladnjak čija je $R_{thHA} = 4.5 \frac{^{\circ}C}{W}$ (definisano kao *thermal rating*).

Primer 1: Maksimalna radna temperatura spoja (*junction*) tranzistora 2N3055 je $200^{\circ}C$ a toplotni otpor spoja poluprovodnik-kućište (*junction-case*) iznosi $R_{thJC} = 1.5 \frac{^{\circ}C}{W}$. Snaga disipacije tranzistora u kolu u kom radi kao pojačavač iznosi 10 W. Odrediti maksimalni dopušteni toplotni otpor hladnjaka $R_{thHA(MAX)}$, ako je temperatura okoline $40^{\circ}C$, ukoliko:

a) Nije upotrebljena termalna pasta, pa je otpornost $R_{thCH} = 2 \frac{^{\circ}C}{W}$.

b) Upotrebljena je termalna pasta, pa je otpornost spoja kućište-hladnjak $R_{thCH} = 0.75 \frac{^{\circ}C}{W}$.

a)

$$R_{thHA(MAX)} = \frac{(T_{j(MAX)} - T_a)}{P_d} - (R_{thJC} + R_{thCH}) = 12.5 \frac{^{\circ}C}{W}$$

b)

$$R_{thHA(MAX)} = \frac{(T_{j(MAX)} - T_a)}{P_d} - (R_{thJC} + R_{thCH}) = 13.75 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Sa upotrebom termalne paste maksimalni dopušteni toplotni otpor hladnjaka se povećao, što je i logično, jer je upotrebom termalne paste ukupna toplotna provodljivost povećana (ukupna toplotna otpornost smanjena). U praksi je potrebno odabrati da toplotna otpornost hladnjaka bude što manja (toplotna provodljivost što veća) kako bi radna temperatura poluprovodnika (tranzistora) bila daleko od maksimuma, odnosno kako bi se bolje odvodila toplota.

Ukoliko je na tranzistoru manja snaga disipacije (1 W), maksimalna dopuštena toplotna otpornost hladnjaka bila bi veća, i obrnuto, što je i logično, jer pri većim strujama (veća snaga disipacije), tranzistor se više zagreva (radna temperatura se bliži maksimalnoj dozvoljenoj) pa je potrebna veća toplotna provodljivost (manja toplotna otpornost) da bi se odvodila toplota.

Primer 2: Za tranzistor iz prethodnog zadatka odrediti maksimalnu temperaturu ambijenta da ne dođe do pregorevanja tranzistora ako je korišćena termalna pasta ($R_{thCH} = 0.7 \frac{^{\circ}C}{W}$) i hladnjak, čiji je toplotni otpor $R_{thHA} = 15 \frac{^{\circ}C}{W}$.

$$T_{a(MAX)} = T_j - P_d \cdot (R_{thJC} + R_{thCH} + R_{thHA}) = 28^{\circ}C$$

Što je ambijentalna temperatura viša, potreban je hladnjak niže toplotne otpornosti (veće toplotne provodljivosti), jer što je manja razlika u temperaturi tranzistora i ambijenta tranzistor se teže hladi, pa je potreban hladnjak niže otpornosti kako bi se ta temperatura odvodila. I obrnuto, što je temperatura niža (razlika u temperaturi tranzistora i ambijenta veća) dozvoljeno je upotrebiti hladnjak veće toplotne otpornosti (lošije toplotne provodljivosti), jer već ambijentalna temperatura ima „dovoljni uticaj“ na hlađenje tranzistora.