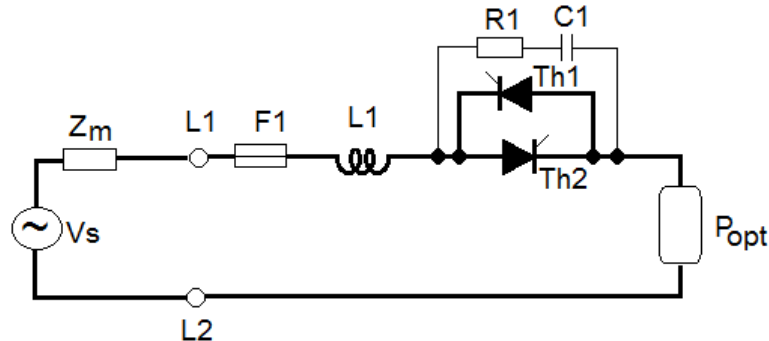


REŠENJE

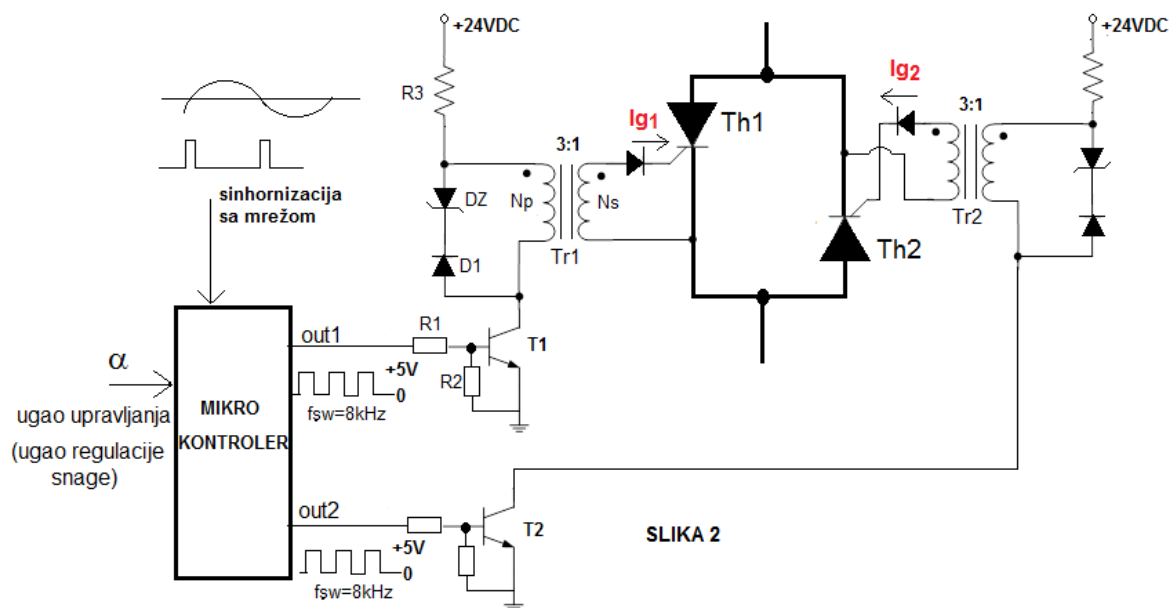
Tiristorski pretvarač sa anti-paralelnom spregom tiristora Th1 i Th2, prikazan na slici 1, se koristi za regulaciju snage otpornog potrošača (termičke peći) čija je maksimalna snaga $P=50\text{kW}$. Ulazni mrežni napon je $V_s=400\text{V}\pm 10\%$, 50Hz. Impedansa kratkog spoja mrežnog priključka je $Z_m=(3+j10)[\text{m}\Omega]$.



SLIKA1

U PRILOGU 1 su dati raspoloživi tiristorski moduli sa ugradnim merama i tehničkim karakteristikama. U PRILOGU 2 su dati raspoloživi hladnjaci sa ugradnim merama i krivama termičke otpornosti. U okviru projektnog zadatka je potrebno:

- 1) Projektovati energetski pretvarač (izvršiti izbor adekvatnog tiristorskog modula)
- 2) Projektovati sistem hlađenja pretvarača pod pretpostavkom da će on raditi u temperaturnim uslovima okoline -15°C do $+50^{\circ}\text{C}$. Nakon projektovanja sistema hlađenja odrediti temperature na hladnjaku i kućištu tiristorskog modula.
- 3) Objasniti ulogu elemenata L_1 , R_1 , C_1 i izvršiti njihovo projektovanje
- 4) Izvršiti izbor osigurača F_1 (vrednost i tip) i pod pretpostavkom kratkog spoja na opterećenju dati kriterijume koje on mora da zadovolji u pogledu toplotnog impulsa i struje kratkog spoja.
- 5) Projektovati pobudno kolo tiristora (R_1, R_2, R_3, DZ). Električna šema pobudnog kola je data na Slici 2

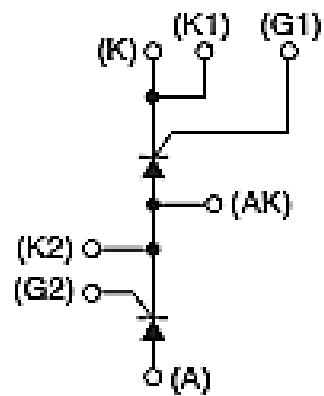


SLIKA 2

Usvojiti da je potrebnii napon na spoju gej-tkatoda tiristora 3V pri struji od 1A. Pad napona na signalnim diodama je 0.7V. Za bipolarne tranzistore su poznati naponi zasićenja $V_{bes}=0.75\text{V}$ i $V_{ces}=0.2\text{V}$, dok je njegovo pojačanje $h_{FE}=300$. Induktivnost magnećenja impulsnog transformatora je 30mH, dok je njegova rasipna induktivnost zanemarljiva.

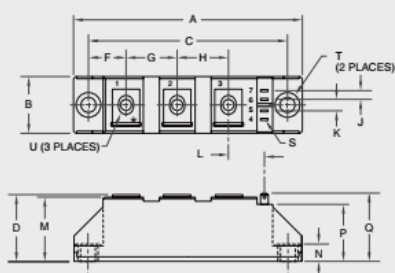
PRILOG 1

Type	V _{DRM} / V _{RRM} Volts (V _{RRM} = V _{DRM} • 100V)	I _{T(av)} /T _C Amperes/°C (180° sin)	I _{T(RMS)} Amperes (180° sin)	EUROPEAN		V _{TO} Volts (T _{J(max)})	R _T mΩ (T _{J(max)})	di/dt Amperes/μsec (Non-Repetitive)	dV/dt Volts/μsec	R _{th(j-c)} °C/W	R _{th(c-s)} °C/W	T _{J(max)} °C	Outline Drawings Number
				I _{TSM} Amperes (10ms, T _{J(max)} · No V _{RRM} Reapplied)	i ² t A ² sec (10ms, T _{J(max)} · No V _{RRM} Reapplied)								
Dual Thyristor Modules													
•CD43–40B	800 – 1800	40 / 85	63	850	3,610	0.88	5.90	150	500	0.230	0.1	125	1
•CD43–60B	800 – 1800	60 / 95	95	1,665	13,860	0.82	3.00	150	500	0.165	0.1	125	1
•CD43–90B	800 – 1800	90 / 87	140	1,785	15,910	0.80	2.40	150	500	0.135	0.1	125	1
•CD43–90C	800 – 1800	90 / 85	141	2,200	24,200	0.80	3.01	150	800	0.28	0.15	125	10
•CD63–15B	800 – 1800	160 / 85	250	4,870	119,000	0.80	1.67	300	1000	0.08	0.05	125	2
•CD63–15C	800 – 1800	150 / 86	235	5,940	176,415	0.80	1.69	300	800	0.17	0.08	125	12
•CD63–15C	2000 – 2500	150 / 83	235	4,950	122,510	1.10	1.96	300	800	0.17	0.08	125	12
•ND43–21	600 – 2000	210 / 92	330	13,200	871,200	0.813	0.810	800	500	0.07	0.03	130	5
•LD83–24	3600 – 4000	240 / 74	377	7,525	236,000	1.563	2.141	TBD	1000	0.0325	0.065	125	6
•ND43–25	600 – 1600	250 / 89	393	13,200	871,200	0.819	0.589	800	500	0.07	0.03	130	5
•ND431825	1800	250 / 84	393	13,200	871,200	0.877	0.731	800	500	0.07	0.03	130	5
•LD43–43	1800 – 2200	430 / 80	800	12,000	0.72 x 10 ⁶	0.88	0.66	200	1000	0.0325	0.01	130	6
•LD43–50	600 – 1600	500 / 86	900	25,500	3.25 x 10 ⁶	0.81	0.32	200	1000	0.0325	0.01	130	6
•LD431850	1800	500 / 84	900	25,500	3.25 x 10 ⁶	0.916	0.280	200	1000	0.0325	0.01	130	6



NAPOMENA: Termičke otpornosti R_{th} (j-c) i R_{th}(c-s) su date po jednom tiristoru u modulu

1

CD41--99B, CD42--40B, CD42--60B, CD42--90B, CD43--40B,
CD43--60B, CD43--90B, CD47--40B, CD47--60B, CD47--90B,
*CS41--99B

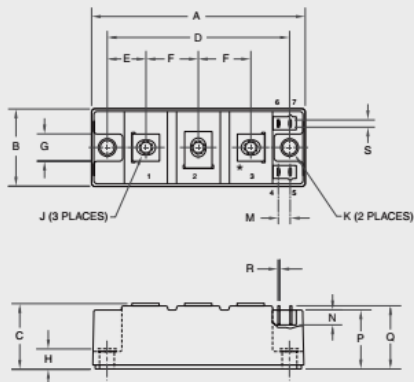
*CS41 TERMINAL 1 IS NOT PRESENT

Dim.	Inches	Millimeters	Dim.	Inches	Millimeters
A	3.66	93.0	L	0.59	15.5*
B	0.79	20.0	M	1.10	28.0
C	3.15	80.0	N	0.31	8.0
D	1.18	30.0	P	0.94	24.0
F	0.61	15.5	Q	1.16	29.4*
G	0.79	20.0	S	0.11 x 0.03	2.8 x 0.8*
H	0.79	20.0	T	0.25	6.4
J	0.16	4.0*	U	M5 Metric	M5
K	0.22	5.7*			

*Does not apply to CD41--99B and CS41--99B.

2

CD61, CD62, CD63, CD67, CS61*



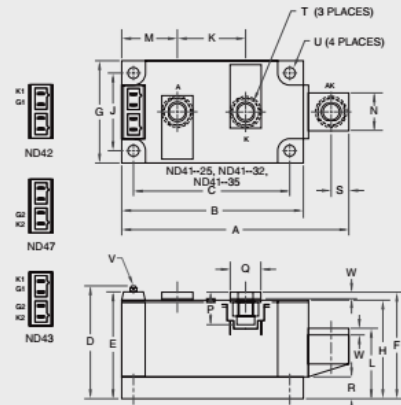
*CS61 TERMINAL 3 IS NOT PRESENT

Dim.	Inches	Millimeters	Dim.	Inches	Millimeters
A	3.70	94.0	J	M6 Metric	M6
B	1.34	34.0	K	0.26	6.4
C	1.18	30.0	M	0.02	5.0*
D	3.15	80.0	N	0.28	6.0*
E	0.67	17.0	P	1.06	27.0*
F	0.91	23.0	Q	1.14	29.0*
G	0.51	13.0	R	0.03	0.8*
H	0.35	8.3	S	0.11	2.8*

*Does not apply to CD61--16B, and CS61--16B.

5

ND41, ND42, ND43, ND47

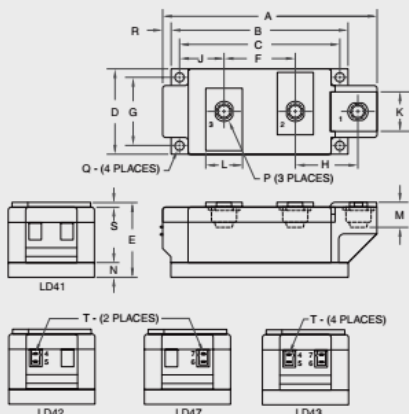


Dim.	Inches	Millimeters	Dim.	Inches	Millimeters
A	4.57	116.0	M	1.122	28.5
B	3.66	93.0	N	0.71	18.0
C	3.15	80.0	P	0.57	14.5
D	2.17	55.1	Q	0.625	15.9
E	2.06	52.3	R	0.394	10.0
F	2.07	52.0	S	0.35	8.9
G	1.97	50.0	T	M8 Metric	M8
H	1.90	48.3	U	0.25 Dia.	6.35 Dia.
J	1.50	38.1	V	0.110 x 0.032	2.8 x 0.8*
K	1.36	35.0	W	0.12	3.0
L	1.26	32.0			

*Does not apply to ND41--26, ND41--32, and ND41--35.

6

LD41, LD42, LD43, LD47, LD81, LD83

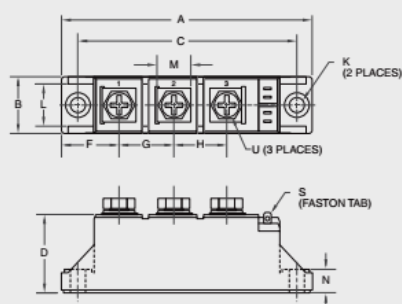


Dim.	Inches	Millimeters	Dim.	Inches	Millimeters
A	5.91	150.0	K	1.10	28.0
B	4.88	124.0	L	1.00	25.4
C	4.41	112.0	M	0.69	17.5
D	2.36	60.0	N	0.39	10.0
E	2.05	52.0	P	M10 Metric	M10
F	1.97	50.0	Q	0.26 Dia.	6.5 Dia.
G	1.89	48.0	R	0.24	6.0
H	1.73	44.0	S	0.12	3.0
J	1.22	31.0	T	0.110 x 0.32	2.5 x 0.8*

*Does not apply to LD41--60.

10

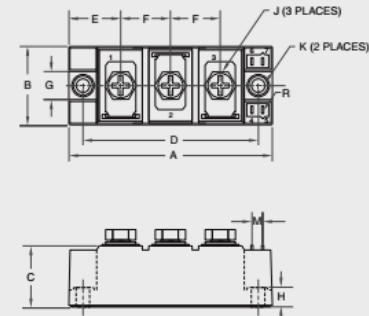
CD43--90C



Dim.	Inches	Millimeters	Dim.	Inches	Millimeters
A	3.62	92.0	K	0.24	6.2
B	0.83	21.0	L	0.63	16.0
C	3.15	80.0	M	0.51	13.0
D	1.18	30.0	N	0.33	8.5
F	0.83	21.0	S	0.11 x 0.02	2.8 x 0.5
G	0.79	20.0	U	M5 Metric	M5
H	0.79	20.0			

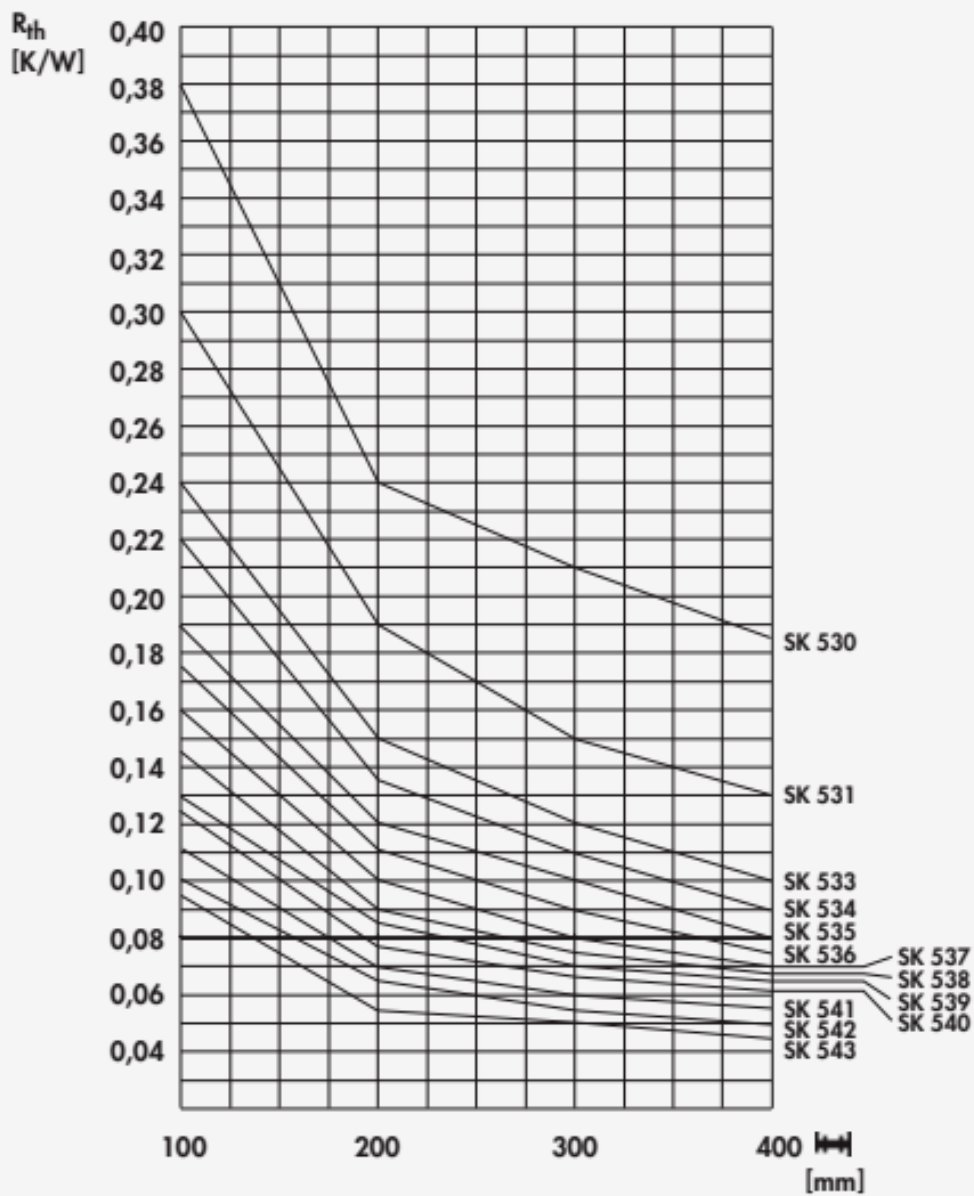
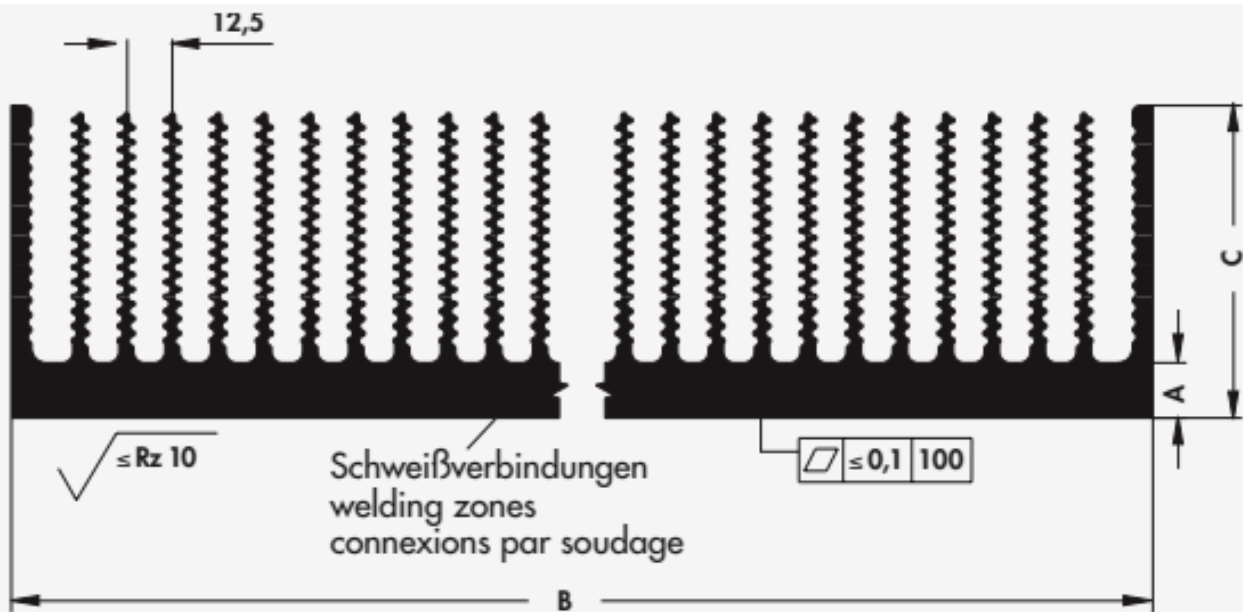
12

CD63--15C



Dim.	Inches	Millimeters	Dim.	Inches	Millimeters
A	3.70	94.0	G	0.51	13.0
B	1.34	34.0	H	0.35	9.0
C	1.15	29.2	J	M6 Metric	M6
D	3.15	80.0	K	0.24 Dia.	6.2 Dia.
E	0.94	24.0	M	0.19	4.9
F	0.91	23.0	R	0.03 x 0.11	2.8 x 0.8

PRILOG2



Art. Nr. art. no. art. n°	Rippenanzahl no. of fins n° d'ailettes	A	B	C
SK 530	14	15	200 ±0,7	84
SK 531	22	16	300 ±1	
SK 533	30	16	400 +0,6/-1,6	85 +0/-0,5
SK 534	34		450 +0,6/-1,6	
SK 535	38		500 +0,6/-1,6	
SK 536	42		550 +0,6/-1,6	
SK 537	46		600 +0,6/-1,6	
SK 538	50		650 +0,6/-1,6	
SK 539	54		700 +0,6/-1,6	
SK 540	58		750 +0,6/-1,6	
SK 541	62		800 +1/-2	
SK 542	66		850 +1/-2	
SK 543	70		900 +1/-2	

1) DIMENZIONISANJE ENERGETSKOG PRETVARAČA

Snaga opterećenja je $P_{opt} = \text{const} = 50 \text{ kW}$ i sa stanovišta strujnih, odnosno termičkih procesa u pretvaraču je kritičniji slučaj kada je mrežni napon minimalan, jer ja tada maksimalna struja opterećenja. Označićemo minimalnu efektivnu vrednost mrežnog napona sa V_s . Shodno prethodnom $V_{smin} = 400 \cdot 0.1 \cdot 400 = 360 \text{ V}$. Za ovu vrednost napona efektivna vrednost struje opterećenja je :

$$I_{eff_opt} = \frac{P}{V_{smin}} = \frac{50 \text{ kW}}{360 \text{ V}} = 138.88 \text{ A}$$

Maksimalna vrednost struje opterećenja je jednaka:

$$I_m = \sqrt{2} I_{eff_opt} = 1.41 \cdot 138.88 \text{ A} = 195.83 \text{ A}$$

Što se tiče proračuna tiristorskog pretvarača najkritičniji režim rada je onaj, kada je ugao upravljanja jednak $\alpha = 0^\circ$ (odnosno ugao provođenja svakog od tiristora jednak $\theta = 180^\circ = \pi \text{ rad}$). U tom slučaju svaki od tiristora provodi celu polovinu svoje poluperiode pa prema tome tada se svaki od tiristora najviše greje odnosno disipira snagu. Efektivne i srednje vrednosti struja svakog od tiristora su jednake:

$$I_{T1eff} = I_{T2eff} = I_{Teff} = \frac{I_m}{2} = \frac{195.83}{2} = 97.9 \text{ A}$$

$$I_{T1sr} = I_{T2sr} = I_{Tsr} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{195.83}{3.14} = 62.36 \text{ A}$$

Maksimalni napon kojim je svaki od tiristora (slučaj koji se ima kad je ugao upravljanja $\alpha = 90^\circ$ izložen je: $V_{THmax} = 1.41 \cdot V_{Smax} = 1.41 \cdot (400 + 0.1 \cdot 400) = 1.41 \cdot 440 \text{ V} = 564 \text{ V}$.

Iz PRILOGA-1 biramo odgovarajući tiristorski modul. U obzir dolaze CD 43-90B ili CD 43-90C. Usvojicemo modul CD 43-90B. Njegovi tehnički podaci su:

$V_{DRM}/V_{RRM} = 800 \text{ V}/1800 \text{ V}$; $V_{RSM} = V_{RRM} + 100 \text{ V} = 1900 \text{ V}$, $I_{Tsr}/I_{Teff} = 90 \text{ A}/140 \text{ A}$; Maksimalna podnosiva struja u trajanju od 10ms je $I_{TSM} = 1785 \text{ A}$; Toplotni impuls $P \cdot t = 15910 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$; Napon praga provođenja $V_{TO} = 0.8 \text{ V}$ (pri maksimalnoj temperaturu $T_{jmax} = 125^\circ \text{ C}$) i dinamička otpornost $r_d = 2.4 \text{ m}\Omega$ pri takođe pri $T_{jmax} = 125^\circ \text{ C}$.

2) TERMIČKI PRORAČUN

Pošto je u nominalnom radnom režimu svaki od tiristora zagrejan blizu dozvoljene temperature 125°C , usvajamo iz Tabele-PRILOG 1 da je vrednost praga provođenja svakog od tiristora: $V_{TO1} = V_{TO2} = V_{TO} \approx 0.8\text{V}$. Vrednost ovog praga pri 25°C je veća, ali na ovoj temperaturi (sobna temperatura) praktično tiristor neće nikada raditi. Dinamička otpornost svakog od tiristora je maksimalno $r_d = 2.4\text{m}\Omega$

$$r_{d1} = r_{d2} = r_d = 2.4\text{m}\Omega$$

Disipacija snage (gubitci) na svakom od tiristora je data relacijom:

$$P^{(1)}_{tot1} = V_{TO} \cdot I_{Tsr} + r_d \cdot I_{Teff}^2$$

Odnosno u ovom konkretnom slučaju:

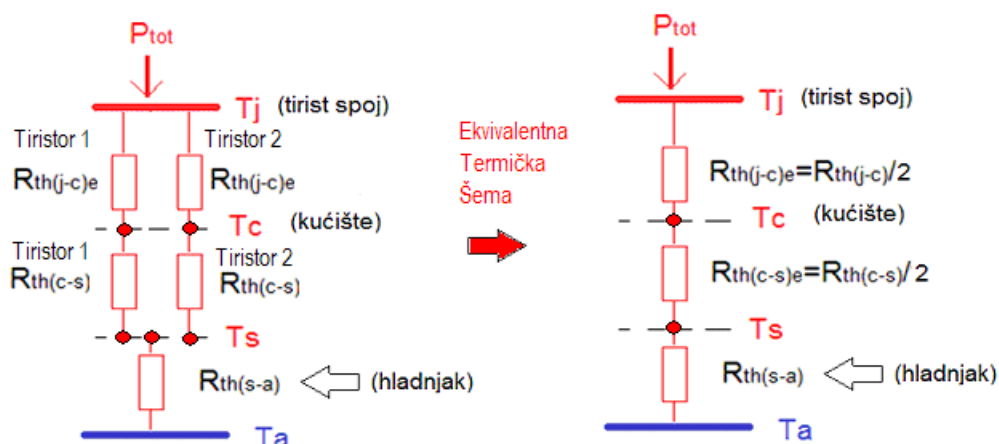
$$P^{(1)}_{tot1} = 0.8\text{V} \cdot 62.36\text{A} + 2.4\text{m}\Omega \cdot 97.9^2\text{A}^2 = 49.9\text{W} + 23\text{W} = 72.9\text{W}$$

Pošto imamo dva izvora toplote (dva tiristora) na istom hladnjaku ukupna snaga disipacije je :

$$P_{tot} = 2P_{tot1} = 2 \cdot 72.9\text{W} = 145.8\text{W}$$

Usvojicemo vrednost $P_{tot} \approx 150\text{W}$

Ekvivalentna termička šema ovog sistema je:



Iz Tabele-PRILOG 1 dobijamo termičke otpornosti po jednom tiristoru:

$$R_{th(j-c)} = 0.135\text{K/W}$$

$$R_{th(c-s)} = 0.1\text{K/W}$$

Na osnovu ovih vrednosti izračunavamo ekvivalentne termičke otpornosti (one su duplo manje jer imamo dva tiristora kao grejna tela):

$$R_{th(j-c)e} = 0.135 / 2 = 0.0675\text{K/W}$$

$$R_{th(c-s)e} = 0.1 / 2 = 0.05\text{K/W}$$

Termička otpornost hladnjaka $R_{th(s-a)} = ?$ je nepoznata i nju treba odrediti na osnovu uslova u zadatku.

Ona se određuje iz ukupne snage disipacije. Snaga disipacije je jednaka:

$$P_{tot} = \frac{T_j - T_a}{R_{th(j-c)e} + R_{th(c-s)e} + R_{th(s-a)}}$$

Iz prethodne jednačine se dobija da je vrednost nepoznate termičke otpornosti $R_{th(s-a)}$ manja ili jednaka:

$$R_{th(s-a)} \leq \frac{T_j - T_a}{P_{tot}} - (R_{th(j-c)e} + R_{th(c-s)e})$$

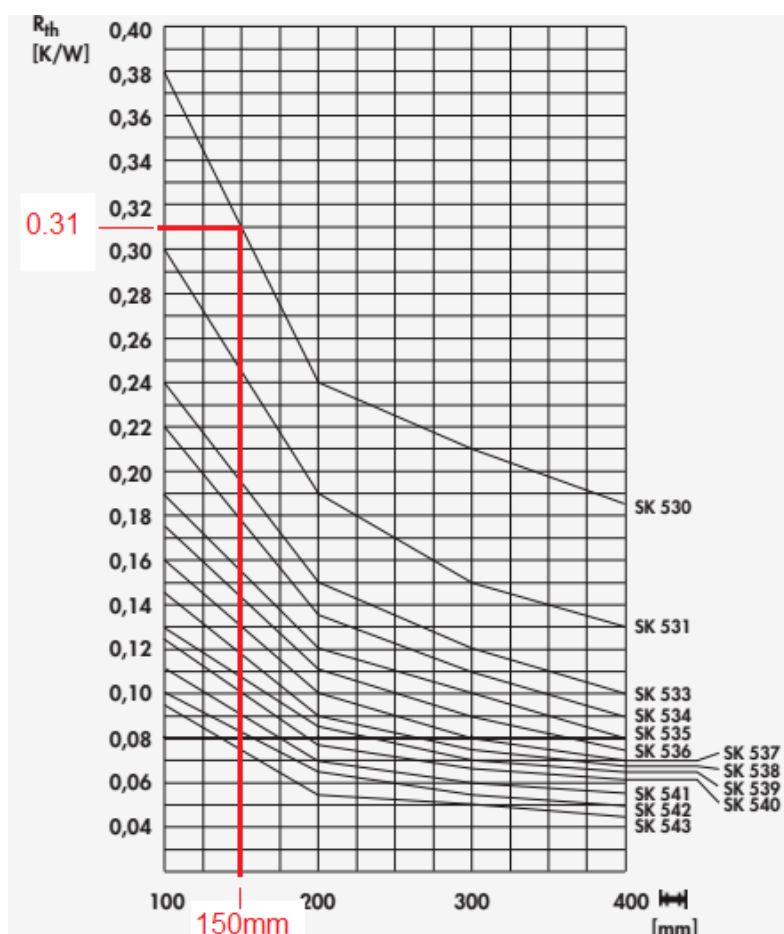
Prema uslovu zadatka maksimalno dozvoljena temperatura silicijumskog spoja (PNPN struktura u sklopu tiristora) je $T_{jmax}=125^{\circ}\text{C}$. Za temperaturu ambijenta se uzima maksimalna temperatura ambijenta $T_{amax}=+50^{\circ}\text{C}$. Ova temperatura je kritičnija sa stanovišta hlađenja jer je tada otežano odvođenje toplote. Proračun koji se dobije za ovu temperaturu sigurno će zadovoljiti za niže temperature, pa prema tome i za -15°C . Shodno prethodno rečenom dobijamo da je zahtevana termička otpornost hladnjaka:

$$R_{th(s-a)} \leq \frac{125^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}}{150\text{W}} - 0.0675\text{K/W} - 0.05\text{K/W}$$

$$R_{th(s-a)} \leq 0.3825\text{K/W}$$

Pri izboru hladnjaka moramo imati u obzir fizičku dimenziju modula. Za odabrani tiristor CD 43-90B dimenzija osnove koja se montira na hladnjak je $A \times B = 93\text{mm} \times 23\text{mm}$ (visina $Q=29.4\text{mm}$ nije u ovom slučaju od značaja)

Uz uvažavanje prethodna dva uslova i karakteristike raspoloživih hladnjaka (PRILOG 2) **usvajamo hladnjak SK 530 dužine $L=150\text{mm}$** (montažna površina dimenzija $B \times L=200\text{mm} \times 150\text{mm}$). Pri ovim uslovima je njegova termička otpornost $R_{th(s-a)}^* = 0.31\text{K/W} \leq 0.3825\text{K/W}$



Za prethodno usvojenu termičku otpornost izračunavamo temperaturu na površini hladnjaka :

$$T_s = T_{a\max} + P_{tot} \cdot R_{th(s-a)}^*$$

$$T_s = 50 + 150 \cdot 0.31 = 96.5^{\circ}C$$

Temperatura kućišta je:

$$T_c = T_s + P_{tot} \cdot R_{th(c-s)_e}$$

$$T_c = 96.5 + 150 \cdot 0.05 = 104^{\circ}C$$

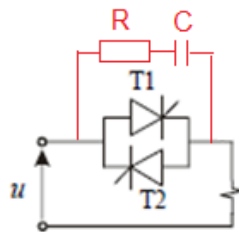
Temperatura silicijumskog spoja :

$$T_j = T_c + P_{tot} \cdot R_{th(j-c)_e}$$

$$T_j = 104 + 150 \cdot 0.0675 = 114^{\circ}C \leq 125^{\circ}C$$

3) PRORAČUNI „RC“ i „di/dt“ ZAŠTITA

3.1. Proračun prenaponske zaštite tiristora (RC zaštita)



Proračun kondenzatora C:

$$C \approx 700 \cdot \frac{I_V}{V_V^2} [\mu F] \quad (\text{videti predavanja})$$

$$V_V = 400 + 0.1 \cdot 400V = 440V \quad (\text{uzima se maksimalna efektivna vrednost mrežnog napona})$$

$$I_V = I_{Teff} \approx 100A \quad (\text{efektivna vrednost struje jednog tiristora})$$

$$C \approx 700 \cdot \frac{100}{440^2} = 0.36 \mu F \quad \text{usvaja se } C^* = 0.47 \mu F \text{ a još bolje}$$

$$C^* = 1 \mu F / 1000V \quad (\text{lako se može naći u prodaji})$$

Proračun otpornika R:

$$R \approx \frac{900}{C \cdot V_V} [\Omega] \quad (\text{videti predavanja})$$

$$R = \frac{900}{1 \cdot 440} = 2.05 \Omega; \text{ usvaja se standardna vrednost } R^* = 2 \Omega$$

Disipacija na otporu R je :

$$P_D \approx 3 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot V_V^2 \cdot f [W] \quad (\text{mrežna učestanost } f=50Hz)$$

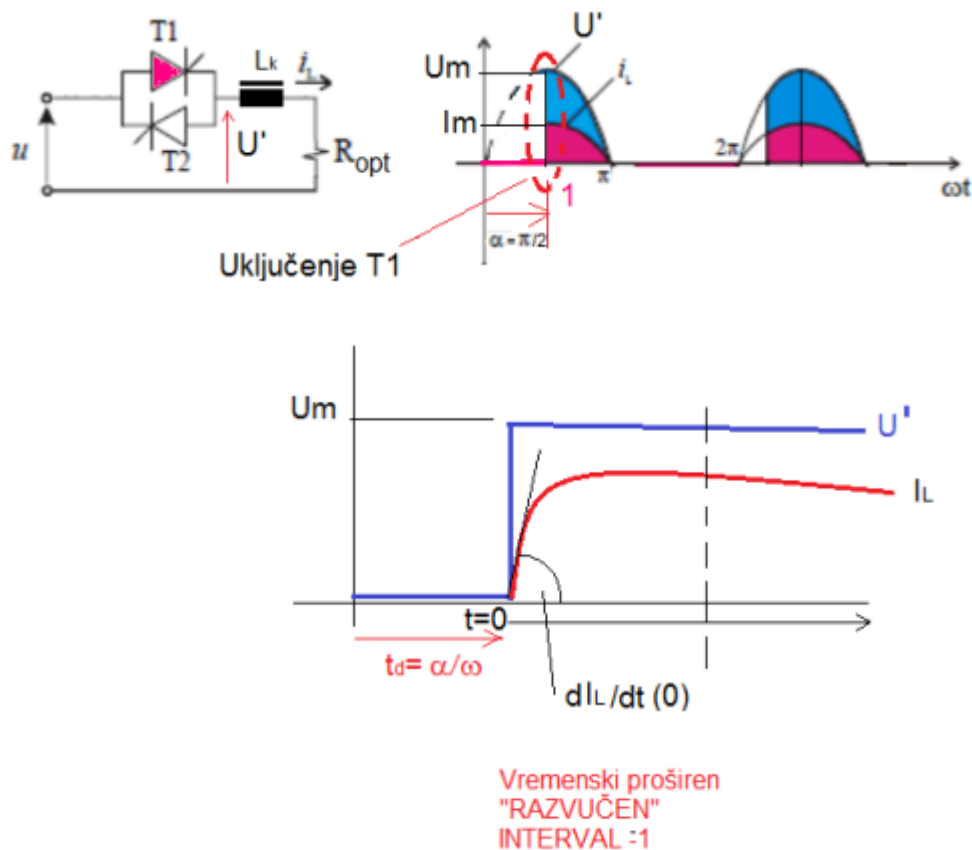
$$P_D \approx 3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 440^2 \cdot 50 = 29W$$

Konačno se usvajaju sledeće vrednosti:

$$R=2\Omega/30W$$

$$C=1\mu F/1000V\sim$$

3.2. Proračun zaštite od prevelikog porasta struje tiristora, odnosno efekta „di/dt“



Struja prigušnice je data relacijom:

$$I_L = I_{T1} = \frac{U_m}{R_{opt}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Vremenska konstanta kola je:

$$\tau = \frac{L_k}{R_{opt}}$$

Uslov za dimenzionisanje L_k uzimajući u obzir da je maksimalni dozvoljeni porast struje tiristora 150A/μs (Tabela – PRILOG1 za izabrani tiristor):

$$dI_T / dt \leq (dI_T / dt)_{kr} = 150 A / \mu s$$

$$dI_T / dt = -\frac{U_m}{R_{opt}} \cdot \frac{(-1)}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U_m}{R_{opt}} \cdot \frac{1}{\frac{L_k}{R_{opt}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U_m}{L_k} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$(dI_T / dt)_{t=0} = \frac{U_m}{L_k} \leq 150 A / \mu s$$

$$L_k \geq \frac{U_m}{150 A / \mu s}$$

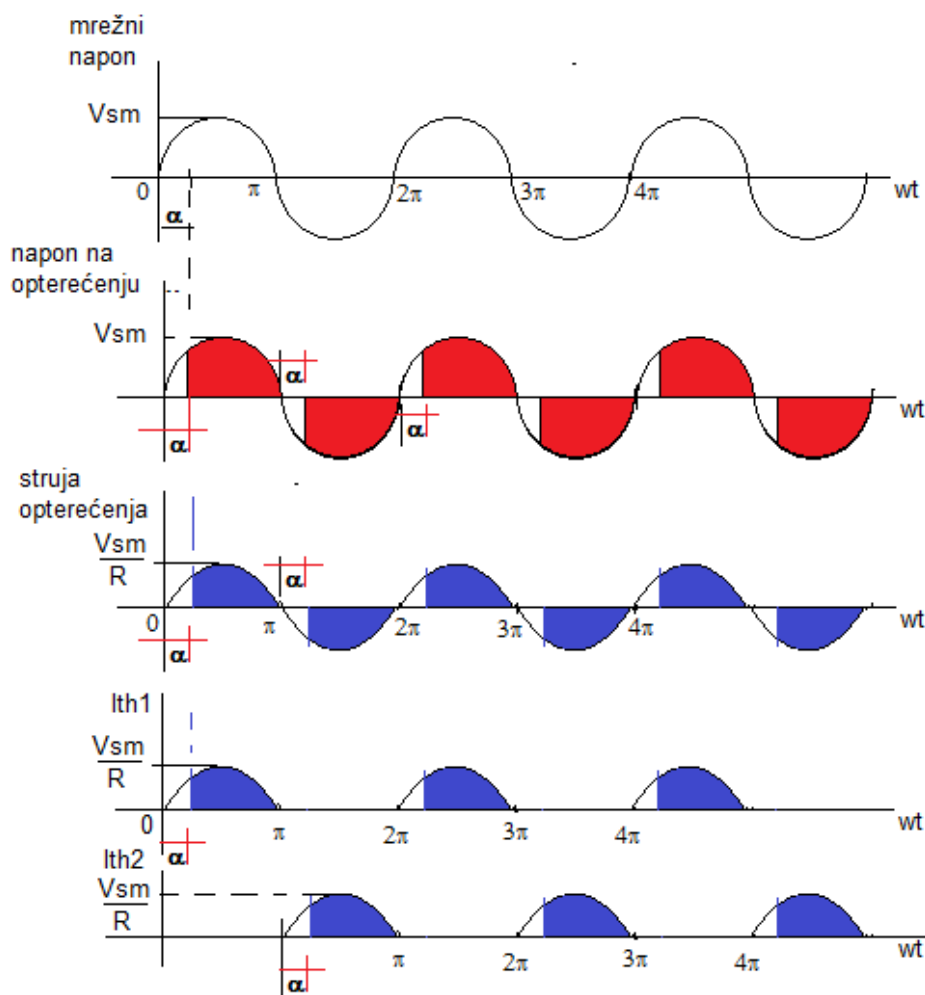
$$L_k \geq \frac{440\sqrt{2}}{150 A / \mu s} = 4.13 \mu H$$

Usvaja se prigušnica : $L_k^* = 5 \mu H$ za nominalnu vrednost struje 150A

4) IZBOR ZAŠTITNOG OSIGURAČA

Osigurač u ovom slučaju služi za zaštitu od kratkih spojeva koji se mogu javiti na opterećenju. U tom slučaju osigurač treba da prekine strujno kolo i zaštiti pre svega skupe poluprovodničke komponente, tiristore snage Th1 i Th2. Takođe u normalnim uslovima osigurač treba da provod nominalnu struju opterećenja.

Za izbor nominalne struje osigurača koristimo uslove za rad samog pretvarača. Svaki tiristor provodi polovinu poluperiode mrežnog napona. Talasni oblici struje i napona na opterećenju, kao i struje svakog od tiristora za proizvoljnu vrednost upravljačkog ugla α su dati na slici:



Karakteristični talasni oblici napona i struja tiristorskog pretvarača

Sa stanovišta izbora osigurača najkritičniji režim je kada je upravljački ugao $\alpha=0$. U tom slučaju su efektivne vrednosti struja tiristora maksimalne (videti predavanja AC/AC pretvarači) i brojno su jednake:

$$I_{Teff1} = I_{Teff2} = \frac{I_m}{2} = 97.9A$$

Efektivna vrednost struje opterećenja je izračunata u delu 1):

$$I_{eff_opt} = \frac{P}{V_{smin}} = \frac{50kW}{360V} = 138.88A$$

Usvaja se zaštitni osigurač nominalne struje $I_{n_osig}=150A$

Odredićemo za koju struju kratkog spoja na opterećenju mora biti predviđen ovaj osigurač.

Obzirom da svaki tiristor vodi u jednoj poluperiodi mesto kvara (kratkog spoja) na opterećenju „vidi“ jednu impedansu, odnosno induktivnost L_1 . Induktivni otpor za ove prigušnice je $X_{L1} = \omega L_1 = 2\pi f \cdot L_1 = 314 \cdot 5\mu = 1.57m\Omega$ (uzeto je da je $f=50Hz$).

Efektivna vrednost struje kratkog spoja je jednaka:

$$I_{ks} = \frac{V_s}{Z_{ks}}$$

$$\hat{Z}_{ks} = \Sigma R_{ks} + j\Sigma X_{ks} = R_m + j(X_m + X_L) = 1m\Omega + j(10m\Omega + 1.57m\Omega)$$

$$\hat{Z}_{ks} = 1m\Omega + j11.57m\Omega$$

$$Z_{ks} = \sqrt{R_{ks}^2 + X_{ks}^2} = \sqrt{1^2 + 11.57^2} [m\Omega] = 11.61m\Omega$$

$$I_{ks} = \frac{V_{s\max}}{Z_{ks}} = \frac{440V}{11.61m\Omega} = 37.9kA$$

$$I_{ks\max} \approx \sqrt{2} \cdot 37.9kA = 54.43kA$$

Toplotni impuls osigurača mora biti manji od toplotnog impulsa tiristora; Cilj je da kada se desi kratak spoj „strada“ pre tiristora osigurač; Obično se ovaj uslov iskazuje matematički:

$$(I^2 \cdot t)_{tiristora} \geq (I^2 \cdot t)_{osig}$$

Obično se bira konzervativan uslov, koji ide na stranu sigurnosti:

$$(I^2 \cdot t)_{tiristora} = 2 \cdot (I^2 \cdot t)_{osig}$$

Odnosno:

$$(I^2 \cdot t)_{osig} = \frac{(I^2 \cdot t)_{tiristora}}{2}$$

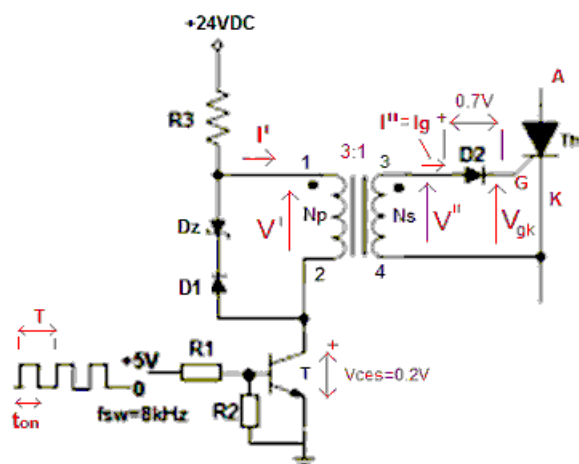
$$(I^2 \cdot t)_{osig} = \frac{15.91kA^2 \cdot s}{2} = 8kA^2 \cdot s$$

SPECIFIKACIJA OSGURAČA:

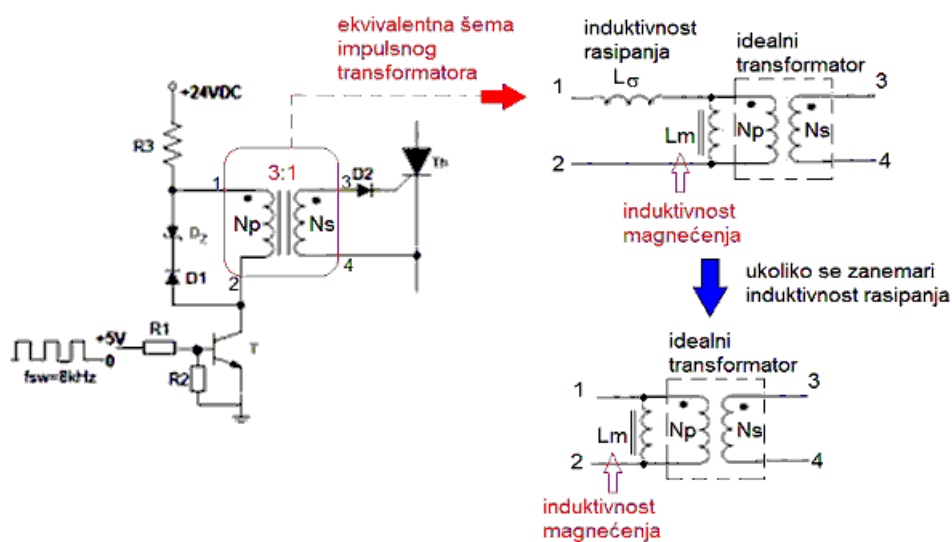
Ultra-brzi osigurač jednopolni za 150A~/ 600V~/ $I_{ks\max}=60kA$ / $I^2t \leq 8kA^2 \cdot s$

5) PRORAČUN POBUDNOG KOLA

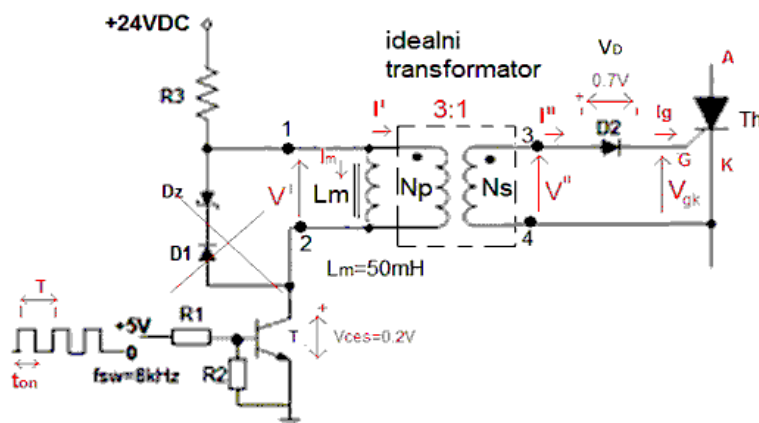
Za dimenzionisanje pobudnog kola će se koristiti električna šema prikazana na slici:



Ekvivalentna šema pobudnog transformatora:



U intervalu pobudnog impulsa t_{on} (kada je bipolarni tranzistor T uključen) je neprovodna grana sa diodama D₁-D_{z1} jer je dioda D₁ tada inverzno polarisana i ne dopušta proticanje struje u toj grani. Perioda pobudnih impulsa $T=1/f_{sw}=1/8000=125\mu s$.



Prema šemi na prethodnoj slici napon sekundara transformatora se dobija iz relacije:

$$V'' = V_{gk} + V_D = 3V + 0.7V = 3.7V$$

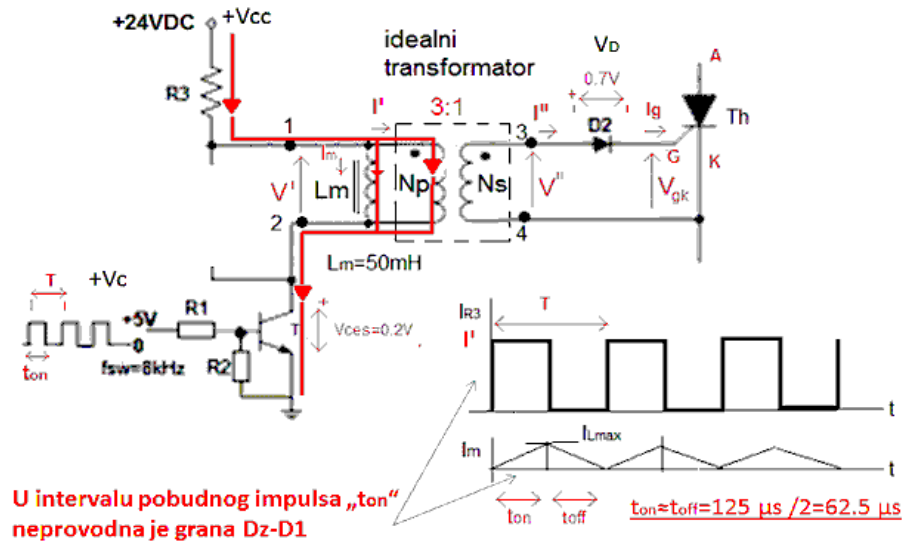
$$V' = 3 \cdot V'' = 3 \cdot 3.7V = 11.1V$$

Zahtevana struja sekundara je :

$$I'' = I_g = 1A$$

A struja primara (obzirom na prenosni odnos 3:1) je jednaka:

$$I' = I'' / 3 = 1A / 3 = 0.333A$$



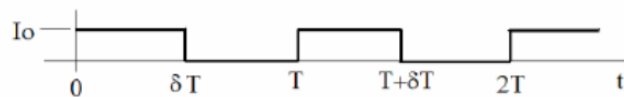
Primenjujući II Kirhofov zakon za konturu u primarnom delu kola :

$$V_{cc} = R_3 \cdot I' + V' + V_{ces}$$

Odnosno, iz prethodne jednačine dobijamo vrednost otpornosti R_3 :

$$R_3 = \frac{V_{cc} - V' - V_{ces}}{I'} = \frac{24V - 11.1V - 0.2V}{0.33A} = 38.48\Omega$$

Usvaja se vrednost od $R_3=38\Omega$, obzirom da proračun radimo na stranu sigurnosti. Za ovu vrednost će struja primara, odnosno struja sekundara transformatora biti veća od proračunate, odnosno struja pobude tiristora će biti nešto veća od 1A, što ne predstavlja nikakav nedostatak, već naprotiv,” paljenje” tiristora će biti pouzdanije.



$$I_{AVG} = \delta \cdot I_0 \quad , \quad I_{RMS} = I_0 \cdot \sqrt{\delta} \quad , \quad \delta \in [0...1]$$

Efektivna vrednost struje otpornika R3, prema dijagramu na slici gore i uz pretpostavku da je koeficijent radnog režima (“duty cycle”) $\delta=0.5$, je jednaka:

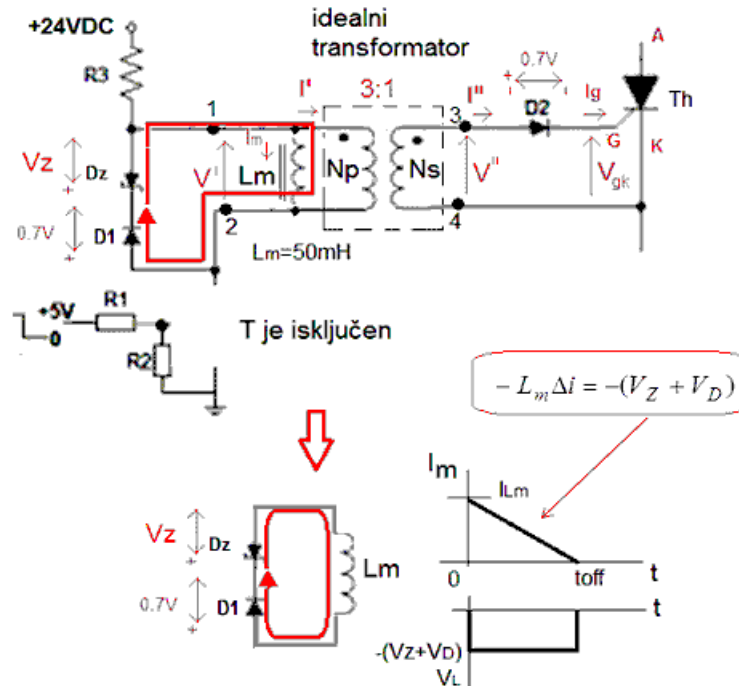
$$I_{effR3} = \frac{I'}{\sqrt{2}} = \frac{0.33A}{1.41} = 0.236A$$

Snaga disipacije na otporniku R_3 je:

$$P_{R3} = R_3 \cdot I_{effR3}^2 = 38 \cdot 0.236^2 = 2.11W$$

Usvajamo otpornik $R'_3=38\Omega/3W$

U intervalu pobudnog impulsa t_{off} (kada je bipolarni tranzistor T isključen) ekvivalentno kolo za analizu je dato na narednoj slici:



Promenu struje Δi dobijamo iz jednačine fluksa Φ (inače je porast struje $\Delta i(+)$ jednak padu struje $\Delta i(-)$, odnosno $\Delta i(+)=\Delta i(-)=\Delta i$):

$$L_m \cdot \Delta i(+) = V' \cdot t_{on} = \Delta \Phi(\text{fluks}) = \text{const}$$

$$\Delta i(+) = \frac{V' \cdot t_{on}}{L_m} = \frac{11.1V \cdot 62.5\mu s}{30mH} = 23.13mA$$

$$\Delta i(+) = \Delta i(-) = \Delta i = I_{Lm} = 23.13mA$$

U intervalu t_{off} i na osnovu dijagrama struje i napona na induktivnosti magnećenja (videti prethodnu sliku) možemo pisati:

$$-L_m \Delta i = -(V_Z + V_D) \cdot t_{off}$$

Pad struje magnećenja mora da se ostvari u vremenskom intervalu $t_{off} \leq 62.5\mu s$, jer bi u suprotnom slučaju moglo da dođe tokom vremena do prelaska ove struje u kontinualni režim, odnosno do odlaska magnetnog kola u zasićenje, a kao posledica ovoga do prevelike struje na sekundaru (ustvari struje gejta I_g), i na kraju do termičkog uništenja spoja gejt-katoda tiristora. Stoga mora da važi uslov:

$$t_{off} = \frac{L_m \Delta i}{V_Z + V_D} \leq 62.5\mu s$$

Odnosno:

$$V_Z + V_D \geq \frac{L_m \Delta i}{t_{off}}$$

$$V_Z + V_D \geq 30mH \cdot 23.13mA / 62.5\mu s = 11.1V$$

$$V_Z + V_D \geq 11.1V$$

$$V_Z \geq 11.1 - 0.7 = 10.4V$$

Usvaja se Zener dioda za $V_Z=11V$. U nastavku ćemo odrediti disipaciju Zener diode:

$$P_{DZ} = \frac{V_Z \cdot (I_{Lm} / 2)}{2} = \frac{V_Z I_{Lm}}{4}$$

Prethodna relacija je posledica činjenice da je srednja vrednost struje u intervalu t_{off} (koji je približno jednak $\approx T/2$), približno jednaka $I_{Lm} / 2$. Na osnovu ovoga je disipacija snage Zener diode:

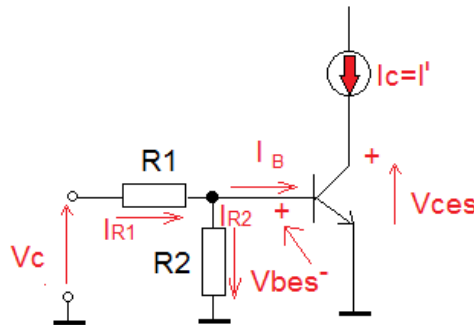
$$P_{DZ} = \frac{11V \cdot 23.13mA}{4} = 63.6mW$$

Konačno se usvaja Zener dioda:

$$V_Z = 11V / 100mW$$

Proračun otpornika R1 i R2:

U cilju ovog proračuna koristićemo električnu šemu prikazanu na narednoj slici:



Usvojimo da je otpornik $R_2=10k\Omega$. Ova otpornost služi za polarizaciju spoja B-E bipolarnog tranzistora pri uključenju, dok pri isključenju ona prazni internu kapacitivnost spoja B-E. Pri ovim uslovima struja kroz otpornik R2 prilikom uključenja bipolarnog tranzistora je jednaka:

$$I_{R2} = \frac{V_{bes}}{R_2} = \frac{0.75V}{10k} = 0.075mA$$

Struja kolektora bipolarnog tranzistora je iz prethodnog proračuna:

$$I_C = I' = \frac{I_g}{3} = 0.33A$$

Struju baze dobijamo iz uslova da ona mora sigurno da uključi bipolarni tranzistor, uzimajući u obzir forsirano pojačanje bipolarnog tranzistora h_{FE} :

$$I_B \geq \frac{I_C}{h_{FE}}$$

$$I_B \geq \frac{0.33A}{300} = 1.1mA$$

Struja kroz otpornik R1 je jednaka:

$$I_{R1} = I_B + I_{R2} = 1.1mA + 0.075mA = 1.175mA$$

Pobudni napon V_c je jednak:

$$V_C = R_1 \cdot I_{R1} + V_{bes}$$

Iz ove relacije određujemo otpornik R₁:

$$R_1 = \frac{V_C - V_{bes}}{I_{R1}} = \frac{5V - 0.75V}{1.175mA} = 3600\Omega$$

Usvaja se vrednost R₁=3k3 (izbor je na strani sigurnog uključanja bipolarnog tranzistora). U ovom slučaju je struja kroz otpor R₁ jednaka $(5-0.75)/3300=1.3mA$

Disipacija na otporniku se dobija nakon izračunavanja iz jednačine :

$$P_{R1} = R_1 \cdot I_{R1}^2 = 3k3 \cdot (1.3mA)^2 = 0.00557W$$

Pri ovome je pretpostavljeno da je struja kroz ovaj otpornik stalno 1.3 mA, što je pesimistička pretpostavka. Ustvari on provodi ovu struju samo u intervalu t_{on}. U intervalu t_{off} ova struja je značajno manja i jednaka je približno V_{bes}/R₁≈0.75V/3300=0.22mA.

Sličan proračun disipacije važi i za R₂ samo u tom slučaju treba uzeti struju od 0.075mA. U ovom slučaju je disipacija takođe mala, tako da se usvaja standardni otpornik za disipaciju od 250mW. Inače, standardni otpornici koji se mogu kupiti u prodaji elektronskih komponenti su za disipaciju od 250mW(0.25W)

Konačno usvojene vrednosti otpornika u pobudnom kolu bipolarnog tranzistora:

$$R_1=3k3/0.25W$$

$$R_2=10k/0.25W$$

REZIME PRORAČUNA:

Zener dioda: $V_Z = 11V / 100mW$

Otpornik $R_3=38\Omega/3W$

Otpornik $R_1=3k3/0.25W$

Otpornik $R_2=10k/0.25W$

U Beogradu 11.12.2020.

Predmetni profesor:

Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.