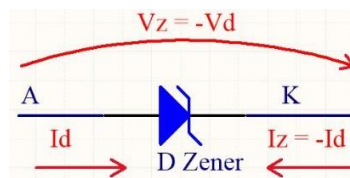
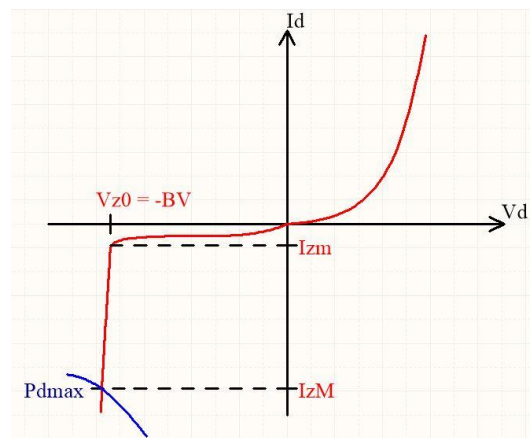


Hardverski interfejs

Vežbe 5

Zener dioda (referentna dioda)



Ukoliko postoji izvor napajanja čiji se napon smanjuje u toku vremena, diode referentnog napona treba da obezbede konstantan napon na potrošaču. Ove diode rade u oblasti proboja. Spoljašnje kolo ograničava struju kroz diodu, pa stoga nema pregorevanja diode. Ova dioda kombinuje lavinski i zenerov efekat, pa se dobija komponenta sa nultim temperaturnim koeficijentom, odnosno napon na njoj V_z se ne menja sa promenom temperature.

Zenerova dioda se formira kao p-n spoj koji je jako dopiran primesama. Kao posledica takve konstrukcije dobija se mali probojni napon i povećanje kapacitivnosti prostornog tovara diode koja usporava njen prekidački režim rada.

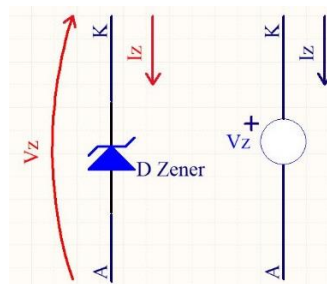
Probojni napon diode se naziva Zenerov napon V_{z0} . Radna tačka Zenerove diode se najčešće postavlja u oblast proboja definisanom opsegom struja $I_{zm} < I_z < I_{zM}$. Time se dobija približno konstantan napon na diodi pri promeni vrednosti struje. Donja granica strujnog opsega I_{zm} određena je strujno-naponskom karakteristikom diode odnosno njenom nelinearnošću, a gornja I_{zM} dozvoljenom snagom disipacije P_D na diodi. U oblasti proboja ne važi strujno-

naponska zavisnost opisana Šoklijevom jednačinom (u sklopu prethodnih vežbi), pa se Zenerova dioda modeluje linearnom jednačinom:

$$V_z = V_{z0} + R_z \cdot (I_z - I_{zm}),$$

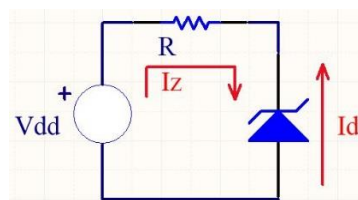
gde R_z predstavlja statičku otpornost diode određenu u oblasti proboja. Manjoj vrednosti otpornosti odgovara konstantniji napon na krajevima diode pri promeni struje I_z .

Sa strujno-naponske karakteristike Zenerove diode vidi se da su referentni smerovi struje i napona Zenerove diode suprotni od referentnih smerova struje i napona diode ($I_z = -I_d$ i $V_z = -V_d$), što je posledica toga da Zener dioda radi u oblasti proboja gde i struja kroz nju i napon na njoj imaju negativne vrednosti. Da se ne bi uvek pisale negativne vrednosti i za napon i za struju, referentni smerovi su obrnuti u odnosu na diode kakve smo do sada radili. U analizi u jednosmernom režimu Zenerova dioda se zamenjuje modelom konstantnog pada napona koji je jednak naponu na Zener diodi V_z .



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.

Primer 1: Proveriti da li Zener dioda zaista radi u režimu proboja, ako je njen probojni napon $V_z = 5V$, $R = 2.5 k\Omega$, $V_{dd} = 10V$.

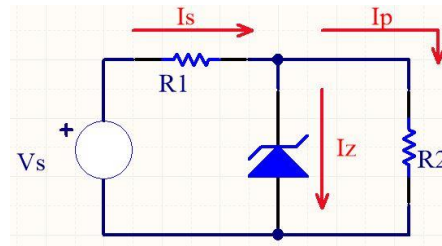


$$-V_{dd} + R \cdot I_z + V_z = 0$$

$$I_z = \frac{V_{dd} - V_z}{R} = \frac{(10 - 5)V}{2.5k\Omega} = 2 \text{ mA}$$

Kako je $I_z > 0$ ($I_d < 0$) sledi da je radna tačka Zenerove diode zaista u oblasti proboja.

Primer 2: Proveriti da li Zener dioda radi kao regulator napona, tako što obezbeđuje konstantan napon na otporniku R_2 . Odrediti minimalnu vrednost otpornika R_2 pri kojoj će se Zener dioda ponašati kao regulator napona. $R_1 = 5\text{ k}\Omega$, $R_2 = 5\text{ k}\Omega$, $V_s = 20\text{V}$, $V_z = 5\text{V}$.



$$I_z = I_s - I_p$$

Umesto obilaženja konture na crtežu za određivanje struje kroz određeni element te konture (otpornik u ovom slučaju), može se pisati:

$$\text{Struja kroz otpornik} = \frac{\text{Napon odakle krecemo} - \text{Napon gde stizemo}}{\text{Otpornik kroz koji smo prosli}}$$

Na ovaj način može se odrediti struja I_s :

$$I_s = \frac{V_s - V_z}{R_1} = \frac{(20 - 5)\text{V}}{5\text{k}\Omega} = 3\text{ mA}$$

Ukoliko samostalno probate preko konture da odredite struju I_s dobićete identičan izraz.

$$I_p = \frac{V_z}{R_2} = \frac{5\text{V}}{5\text{k}\Omega} = 1\text{ mA}$$

$$I_z = I_s - I_p = 2\text{ mA}$$

Uloga Zener diode je da drži konstantan napon na otpornom opterećenju R_2 . Sve dok dioda radi u oblasti proboja napon na diodi će biti $V_z = 5\text{V}$ i delovaće na opterećenje R_2 . Da bi dioda radila u proboju I_z mora biti veće od 0, što je upravo i dokazano. U suprotnom, Zener dioda se ne bi ponašala kao regulator napona.

Sada treba odrediti kolika je minimalna vrednost otpornika R_2 da bi se Zener dioda ponašala kao regulator napona.

$$I_z = I_s - I_p$$

$$I_z = \frac{V_s - V_z}{R_1} - \frac{V_z}{R_2} = \frac{V_s}{R_1} - V_z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) > 0$$

$$\frac{V_s}{R_1} - V_z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) > 0$$

$$V_z \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) < \frac{V_s}{R_1}$$

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) < \frac{V_s}{R_1 \cdot V_z}$$

$$\frac{1}{R_2} < \frac{V_s}{R_1 \cdot V_z} - \frac{1}{R_1}$$

$$\frac{1}{R_2} < \frac{1}{R_1} \cdot \left(\frac{V_s}{V_z} - 1\right)$$

$$R_2 > \frac{1}{\frac{1}{R_1} \cdot \left(\frac{V_s}{V_z} - 1\right)}$$

$$R_2 > \frac{R_1}{\left(\frac{V_s}{V_z} - 1\right)}$$

$$R_2 > \frac{5k\Omega}{\left(\frac{20V}{5V} - 1\right)}$$

$$R_2 > 1.67 k\Omega$$

Primer 3:

- Odrediti napone U_1 i U_2 sa slike, ako je napon napajanja $V_{cc} = 20V$, $R_1 = 2.7 k\Omega$, $R_2 = 2.2 k\Omega$, $V_z = 10V$.
- Odrediti snagu disipacije (zagrevanja) Zener diode.



Znajući napon Zener diode, može se izračunati pad napona na rednoj vezi otpornika R_1 i R_2 .

$$U_{12} = V_{cc} - V_z = 10 V$$

Iz dobijenog pada napona na otpornicima, metodom naponskog razdelnika mogu se izračunati padovi napona U_1 i U_2 .

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{12} = 5.51 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{12} = 4.49 \text{ V}$$

Snaga disipacije je proizvod struje i napona na toj diodi.

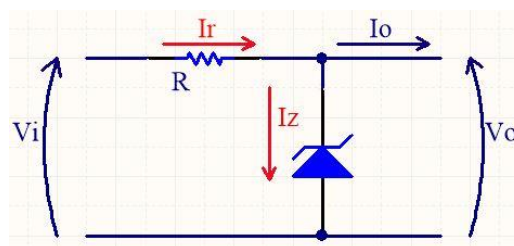
$$I = \frac{U_{12}}{R_1 + R_2} = 2.041 \text{ mA}$$

$$P = V_z \cdot I = 20.41 \text{ mW}$$

Primer 4: Stabilizator napona

Zener dioda treba da obezbedi stabilan napon na potrošaču od 5V. Maksimalna struja koja može da protekne kroz potrošač, ukoliko je priključen na napon od 5V, iznosi $I_{omax} = 50 \text{ mA}$. Minimalna jačina struje koja je potrebna da bi Zener dioda radila u probojnom režimu je $I_{zmin} = 5 \text{ mA}$, a ulazni napon se kreće u opsegu $V_i \in [23.15 \text{ V}, 25 \text{ V}]$.

- Odrediti vrednost otpornika R , tako da kroz potrošač uvek može da protekne maksimalna struja I_{omax} dok je on priključen na napon od 5V (da Zener dioda i dalje radi u oblasti proboja). Takođe, odrediti i minimalnu dozvoljenu snagu koju određeni otpornik mora da bude u stanju da izdrži, kako bi uvek radio ispravno (kako ne bi pregoreo).
- Odrediti minimalnu snagu disipacije koju odgovarajuća Zener dioda mora da bude u stanju da podnese, kako bi uvek radila u oblasti proboja, odnosno kako bi izlazni napon uvek bio $V_o = 5 \text{ V}$ (kako ne bi pregorela).



Najpre je potrebno odrediti vrednost otpornika R , tako da i pri minimalnom ulaznom naponu, na izlazu bude $V_o = 5 \text{ V}$ dok je na njega priključen potrošač takav da može da povuče struju od $I_{omax} = 50 \text{ mA}$.

$$R = \frac{V_{imin} - V_o}{I_r} = \frac{V_{imin} - V_o}{I_{omax} + I_{zmin}} = 330 \Omega$$

Zašto je u prethodnom izrazu, pri računanju vrednosti R uzeta minimalna vrednost ulaznog napona V_{imin} ?

Zato što je potrebno obezbediti da i u „najgorem“ mogućem slučaju kroz potrošač, koji je priključen na napon od 5 V, može da protekne struja $I_{omax} = 50 \text{ mA}$. A najgori mogući slučaj je kada je na ulazu minimalni napon. Ukoliko bi određivali vrednost R pri maksimalnom ulaznom naponu V_{imax} , jasno je da bi izračunata vrednost bila veća od 330Ω . U tom slučaju, ukoliko bi se na ulazu kola pojavio minimalni napon V_{imin} struja I_r bi bila manja od dozvoljene. Drugim rečima, struja I_r ne bi bila dovoljno velika da obezbedi da Zener dioda radi u oblasti proboja (odnosno da je I_z barem I_{zmin}) i da kroz potrošač može da protekne struja $I_{omax} = 50 \text{ mA}$, dok je on priključen na napon od 5 V.

Nakon toga, potrebno je odrediti minimalnu snagu disipacije koju ovaj otpornik mora da bude u stanju da izdrži, kako ne bi pregoreo:

$$P > \frac{(V_{imax} - V_o)^2}{R}$$
$$P > 1.21 \text{ W}$$

Jasno je da će najveća snaga disipacije na otporniku R biti kada je na ulazu maksimalan napon V_{imax} .

Pri ovoj vrednosti otpornosti, Zener dioda će uvek raditi u oblasti proboja, a kroz potrošač priključen na napon od 5V će uvek moći da protekne struja $I_{omax} = 50 \text{ mA}$.

Zatim je potrebno odrediti minimalnu snagu disipacije koju Zener dioda mora da bude u stanju da podnese, kako bi na njoj, odnosno na izlazu uvek bio napon od 5V. Drugim rečima, potrebno je pronaći maksimalnu struju koju Zener dioda mora da bude u stanju da provede, odnosno pri kojoj i dalje treba da radi na ispravan način u oblasti proboja (pri kojoj će i dalje obezbediti izlazni napon od 5V).

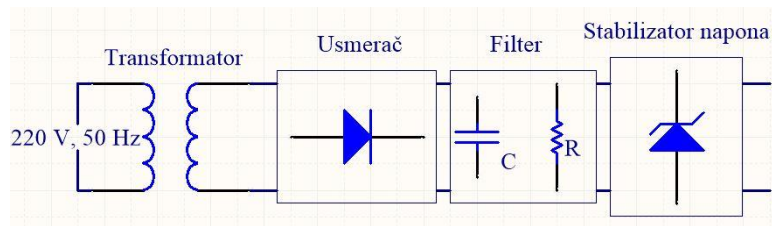
Maksimalna struja će proteći kada na izlaz nije priključen nikakav potrošač, odnosno kada je $I_o = 0 \text{ A}$, a kada je na ulazu maksimalni napon ($V_{imax} = 25 \text{ V}$). Stoga sledi da je:

$$I_{zmax} = I_{rmax} = \frac{V_{imax} - V_o}{R} = 60.6 \text{ mA}$$

$$P_z \geq I_{zmax} \cdot V_o$$

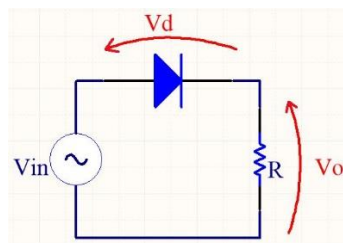
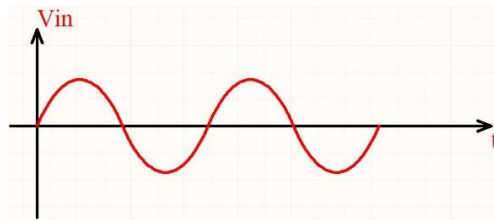
$$P_z \geq 303 \text{ mW}$$

Dioda u kolu ispravljača napona

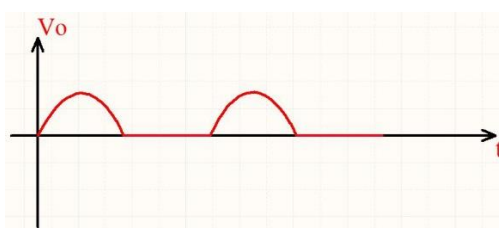


Ispravljanje naizmeničnog napona je važna primena dioda. Naizmenični napon se primenom diode (usmerača) pretvara u jednosmerni pulsirajući napon. Nakon usmerača dodaje se filter da bi umanjio AC komponente u talasnom opsegu i da bi stvorio skoro konstantan oblik *DC* napona na njegovom izlazu. Na izlazu celokupnog kola dodaje se stabilizator napona (Zener dioda) kako bi izlazni napon uvek bio jednosmeran, konstantan, bez ikakvih oscilacija.

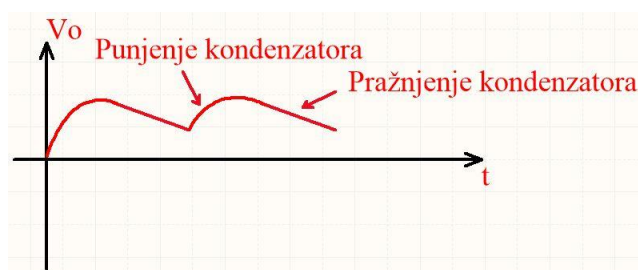
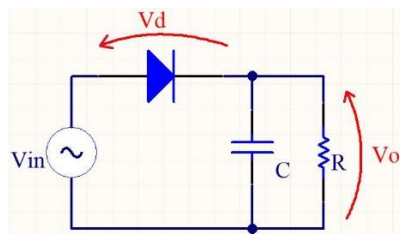
Ulazni signal (V_{in}) je signal gradske mreže (220 V, 50 Hz):



Dioda u usmeraču se može posmatrati kroz model sa konstantnim padom napona (0.6 V). Odnosno, dioda provodi kada je ulazni napon veći od 0, a ne provodi kada je manji. Stoga izlazni napon na potrošaču R izgleda kao na slici ispod. Amplituda talasnog dela signala je umanjena za 0.6 V, zbog pada napona na samoj diodi u režimu provođenja.

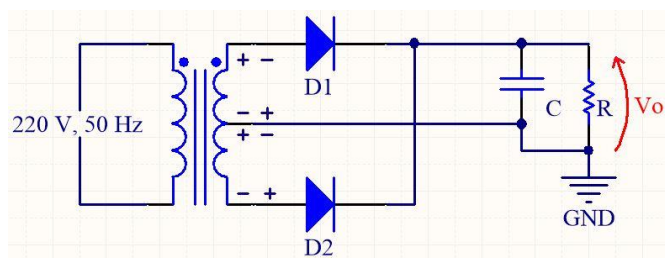


Ukoliko se u kolo ubaci LP filter (kondenzator), izlazni signal će imati manje oscilacija, odnosno mogući opseg napona koji može da se javi na izlazu će biti smanjen. Takvo kolo se naziva **polutalasni ispravljač sa filtrom**.



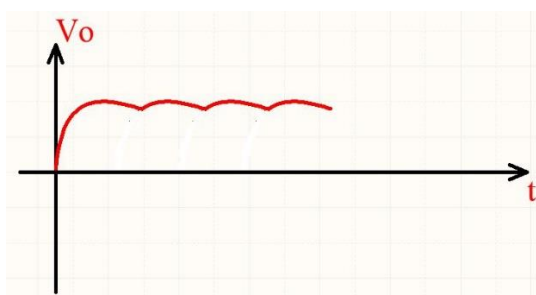
Kada dioda provodi, kondenzator se puni i izlazni napon se ponaša isto kao i bez filtra. Kada dioda više ne provodi, kondenzator počinje da se prazni kroz potrošač R i samim tim izlazni napon ima manje oscilacije. Prisetite se zadatka u sklopu vežbi sa integratorom i diferencijatorom ukoliko imate problem da razumete zašto izlazni napon V_o izgleda baš kao na slici iznad. Zadatak koji možda najbolje ovo objašnjava je onaj koji ste imali za domaći u sklopu tih vežbi.

Opseg oscilovanja signala se dodatno može smanjiti upotrebom **punotalasnog ispravljača** (slika ispod).

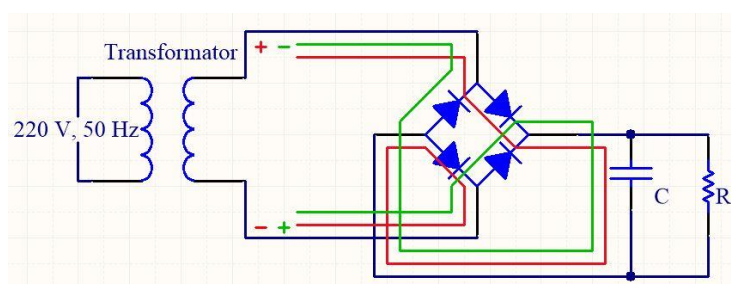


U ovom kolu jedna od dioda uvek provodi, što znači da ne mora da se čeka polovina periode ulaznog signala da bi se kondenzator punio, već se to čini i kada je ulazni signal negativan. Naime, sekundar mrežnog transformatora se može motati tako da se sastoji od dva identična namotaja vezana na red. Srednja tačka namotaja predstavlja zajedničku tačku, koja se obično

vezuje na masu. Naponi na krajevima sekundara su istih amplituda i suprotnih faza. Na oba kraja sekundara se vezuju diode koje ispravljaju napon. Kada je ulazni napon pozitivan dioda D_1 provodi i radi kao polutalasni ispravljač, a dioda D_2 je zakočena i ne provodi. Kada je ulazni napon manji od 0 dioda D_1 je isključena, a dioda D_2 provodi. Smer struje u obe poluperiode je isti kroz opterećenje, s tim da naizmenično napajanje daje svaka polovina transformatora. Na ovaj način, oscilovanje izlaznog napona je još više smanjeno.

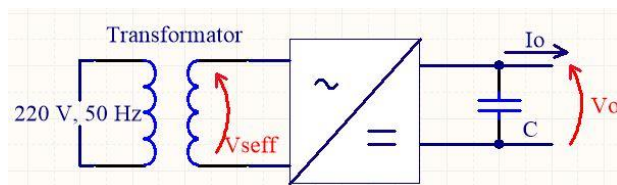


Ista ova priča može da se realizuje pomoću Grecovog spoja:

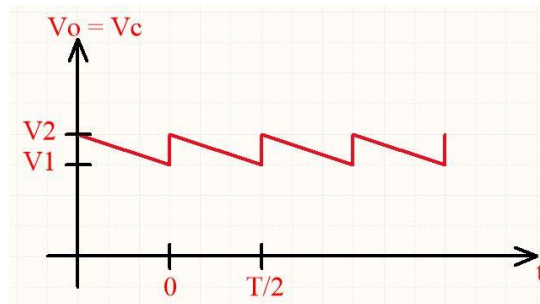


Na izlazu celog ovog kola se dodaje Zener dioda kako bi izlazni napon bio u potpunosti bez oscilacija, odnosno kako bi bio jednosmeran i konstantan.

Primer 5: Projektovati kolo za ispravljanje napona ako izlazni napon mora da bude u opsegu $V_o \in [20V, 25V]$, maksimalna struja na izlazu (struja kroz potrošač) iznosi $I_{omax} = 5A$. Pad napona na svakoj diodi u Grecovom spoju iznosi 0.6V.



Napon na izlazu kola za ispravljanje napona (na izlazu iz Grecovog spoja, odnosno napon na kondenzatoru) se može linearno aproksimirati tako da izgleda:



Napon bruma (V_{bpp}) predstavlja promenu napona na kondenzatoru:

$$V_{bpp} = V_2 - V_1$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

$$du_c = \frac{1}{C} i_c \cdot dt$$

Sa početnog crteža vidi se da je $i_c = I_0$, pa važi:

$$\int_{V_1}^{V_2} du_c = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{T}{2}} I_0 dt$$

$$V_2 - V_1 = \frac{1}{C} \cdot I_0 \cdot \left(\frac{T}{2} - 0\right)$$

$$V_{bpp} = \frac{1}{C} \cdot I_0 \cdot \frac{T}{2}$$

Naizmenična struja se meri, odnosno procenjuje na osnovu njenih efekata, odnosno na osnovu rada koji izvrši. Najpogodnije je upoređivati njeno toplotno dejstvo, sa toplotnim dejstvom jednosmerne struje. Za tu svrhu može da se uporedi dejstvo koje izvrši naizmenična struja u provodniku sa dejstvom jednosmerne struje pod istim uslovima (ista otpornost provodnika i za isto vreme). U provodniku se oslobađa toplota na način koji ne zavisi od smera struje. Lako se zaključuje da uvek može da se nađe jačina jednosmerne struje koja će sa posmatranom naizmeničnom strujom stvarati isti termički efekat. Ta vrednost jednosmerne struje naziva se efektivna vrednost naizmenične struje. Efektivne vrednosti napona i jačine električne struje jednake su naponu, odnosno jačini jednosmerne struje koja za isto vreme ostvari isti učinak kao naizmenična struja:

$$U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

$$I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

gde su I_0 i U_0 maksimalne (amplitudne) vrednosti jačine naizmenične struje, odnosno napona.

Iz prethodno rečenog, jasno je da je napon na sekundaru transformatora, zapravo efektivna vrednost naizmeničnog napona. Samim tim, u određivanju minimalnog V_{omin} , odnosno maksimalnog V_{omax} izlaznog napona (napona na kondenzatoru), mora se uzeti u obzir amplitudna vrednost napona na sekundaru transformatora.

$$V_{omin} = V_{seff} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot V_d - V_{bppmax}$$

$$V_{omax} = V_{seff} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot V_d$$

V_d u prethodne dve relacije predstavlja pad napona na jednoj diodi u Grecovom spoju.

$$V_{bppmax} \leq V_{omax} - V_{omin}$$

U tekstu zadatka stoji da je maksimalni napon bruma koji sme da bude dozvoljen 5V ($V_o \in [20V, 25V]$), pa je:

$$V_{bppmax} \leq 5V$$

Na početku zadatka smo izveli:

$$V_{bpp} = \frac{1}{C} \cdot I_0 \cdot \frac{T}{2}$$

Stoga sledi:

$$\frac{1}{C} \cdot I_{omax} \cdot \frac{T}{2} \leq V_{bppmax}$$

$$C \geq \frac{I_{omax} \cdot T}{2 \cdot V_{bppmax}}$$

Perioda nekog signala je:

$$T = \frac{1}{f}$$

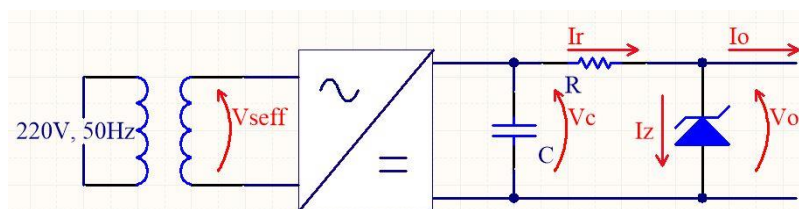
gde je f frekvencija tog signala.

$$C \geq \frac{5 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 5}$$

$$C \geq 10\,000 \mu F$$

$$V_{seff} = \frac{V_{omax} + 2 \cdot V_d}{\sqrt{2}} = 18.6 V$$

Primer 6: Projektovati kolo za ispravljanje i stabilizaciju napona tako da izlazni napon V_o bude 5V, a maksimalna izlazna struja (maksimalna struja kroz potrošač kada je priključen na 5V) I_{omax} bude 50 mA. U konstruisanju ovog kola koristiće se otpornik $R = 20 \Omega$, Zener dioda sa minimalnom strujom kroz nju (da bi radila u režimu proboja) $I_{zmin} = 5 \text{ mA}$ i transformator čiji efektivni napon na sekundaru iznosi $V_{seff} = 7 \text{ V}$, ali sa mogućim oscilacijama u opsegu $[+10\%, -15\%]$. Pad napona na svakoj diodi u Grecovom spoju iznosi 0.6 V.



Dakle, potrebno je odrediti maksimalni dozvoljeni napon bruma na kondenzatoru, kapacitivnost tog kondenzatora kako napon bruma ne bi bio veći od dozvoljenog, minimalnu snagu koju upotrebljena Zener dioda mora da bude u stanju da izdrži (odnosno da i pri toj snazi može da radi kao regulator napona), i minimalnu snagu koju upotrebljeni otpornik mora da bude u stanju da izdrži, kako ne bi pregoreo.

Maksimalni napon na kondenzatoru će biti onda kada je napon na sekundaru uvećan za 10% (iz tog razloga se prvi element u jednačini ispod, koja je poznata iz prethodnog primera, množi sa 1.1), odnosno kada se javi maksimalni mogući napon na sekundaru transformatora.

$$V_{cmax} = V_{seff} \cdot \sqrt{2} \cdot 1.1 - 2 \cdot V_d = 9.67 \text{ V} \approx 10 \text{ V}$$

Maksimalni napon koji može da se pojavi na kondenzatoru iznosi 10 V i ostatak kola mora biti projektovano tako da izdrži (odnosno da radi na adekvatan način) napon od 10 V.

U sklopu *Primera 4* jednačina ispod je korišćena kako bi se odredila vrednost otpornika R . U ovom slučaju zna se vrednost otpornika koja treba da se koristi, pa će se sledeća relacija iskoristiti za određivanje minimalnog napona koji sme da se pojavi na kondenzatoru.

$$R = \frac{V_{cmin} - V_o}{I_r} = \frac{V_{cmin} - V_o}{I_{omax} + I_{zmin}}$$

$$V_{cmin} = R \cdot (I_{omax} + I_{zmin}) + V_o = 6.1 \text{ V}$$

Dakle, minimalni napon koji sme da se pojavi na kondenzatoru, a da ostatak kola radi ispravno (Zener dioda u oblasti proboja ($V_o = 5 \text{ V}$) i izlazna struja 50 mA) iznosi 6.1 V.

Minimalni napon na kondenzatoru će biti onda kada je napon na sekundaru umanjen za 15% (iz tog razloga se prvi element u jednačini ispod, koja je poznata iz prethodnog primera, množi sa 0.85), odnosno kada se javi minimalni mogući napon na sekundaru transformatora.

$$V_{cmin} = V_{seff} \cdot \sqrt{2} \cdot 0.85 - 2 \cdot V_d - V_{bppmax}$$

$$V_{bppsmax} = V_{seff} \cdot \sqrt{2} \cdot 0.85 - 2 \cdot V_d - V_{cmin} = 1.11 \text{ V}$$

Važno je napomenuti da u ovom primeru, za razliku od prethodnog, maksimalni napon bruma $V_{bppsmax}$ nije jednak razlici maksimalnog i minimalnog napona na kondenzatoru ($V_{cmax} - V_{cmin} \neq V_{bppsmax}$) zato što u ovom slučaju postoji mogućnost oscilovanja napona na sekundaru transformatora [+10%, -15%]. Drugim rečima, maksimalni napon bruma se posmatra za fiksnu vrednost napona na sekundaru transformatora.

Dakle, maksimalni dozvoljeni napon bruma, odnosno maksimalna dozvoljena promena napona na kondenzatoru iznosi 1.11 V.

U prethodnom primeru je izveden sledeći izraz (s tom razlikom da to što je bila struja I_{omax} , ovde predstavlja struja I_{rmax})

$$V_{bppsmax} = \frac{1}{C} \cdot I_{rmax} \cdot \frac{T}{2}$$

$$I_{rmax} = \frac{V_{cmax} - V_o}{R} = 250 \text{ mA}$$

$$C \geq \frac{I_{rmax} \cdot T}{2 \cdot V_{bppsmax}}$$

$$C \geq 2250 \text{ uF}$$

Kapacitivnost kondenzatora mora biti veća od 2250 uF kako napon bruma ne bi prešao dozvoljenu granicu.

U sklopu *Primera 4* objašnjeno je da je:

$$I_{zmax} = I_{rmax} = 250 \text{ mA}$$

$$P_z \geq I_{zmax} \cdot V_o$$

$$P_z \geq 1.25 \text{ W}$$

$$P_R \geq \frac{(V_{cmax} - V_o)^2}{R}$$

$$P_R \geq 1.25 \text{ W}$$

Važno je napomenuti da se u praktičnim realizacijama vrlo teško može naći Zener dioda čija je maksimalna struja I_{zmax} veća od 100 mA. Stoga se kao izlazni stepen ovog kola, odnosno kao regulator napona češće koristi kolo sa tranzistorom, nego sama Zener dioda. Zener dioda kao regulator napona se koristi za veoma male oscilacije napona na ulazu (napona na kondenzatoru) i male vrednosti izlazne struje I_o .