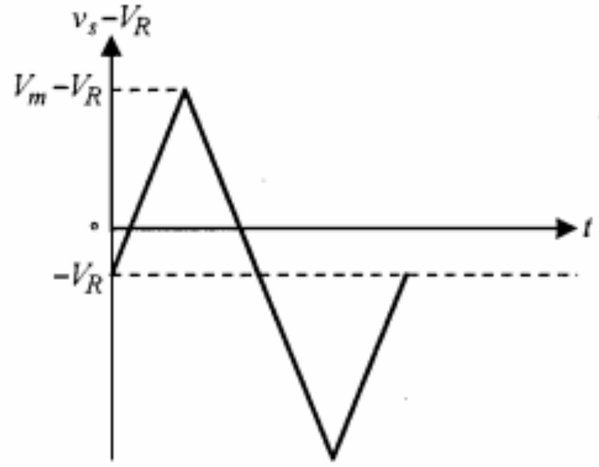
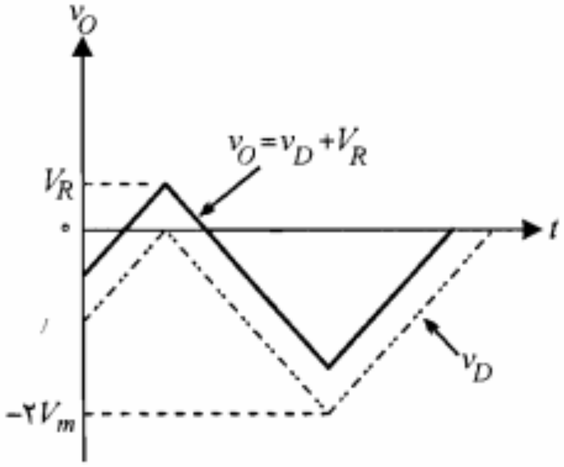


شکل ۳-۴۶: مجموع شکل موج v_s و منبع ثابت



شکل ۳-۴۷: ولتاژ دو سر دیود و ولتاژ خروجی در مدار کلمپ شکل ۳-۴۵

۳-۸ خلاصه

- در بسیاری از موارد کاربردی از مدل ایده‌آل دیود استفاده می‌شود. در این مدل دیود در بایاس مستقیم به صورت اتصال کوتاه و در بایاس معکوس به صورت مدار باز در نظر گرفته می‌شود.
- در تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک، دیود را با مقاومت دینامیکی آن جایگزین می‌کنند.
- با استفاده از دیود و منبع ولتاژ می‌توان مدار برش طراحی نمود. مدارهای برش قادرند بخش دلخواهی از دامنه یک سیگنال را حذف نمایند.
- در یکسوکننده نیم‌موج جریان DC تحویل شده به مقاومت بار عبارت است از

$$I_{dc} = \frac{V_m/\pi}{R_f + R_L}$$

و برای یکسوکننده تمام‌موج دو برابر مقدار فوق است.

- در یکسوکننده تمام موج با فیلتر خازنی اندازه ولتاژ DC خروجی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fC}$$

برای یکسوکننده نیم موج در رابطه فوق عدد ۴ به ۲ تبدیل می‌شود.

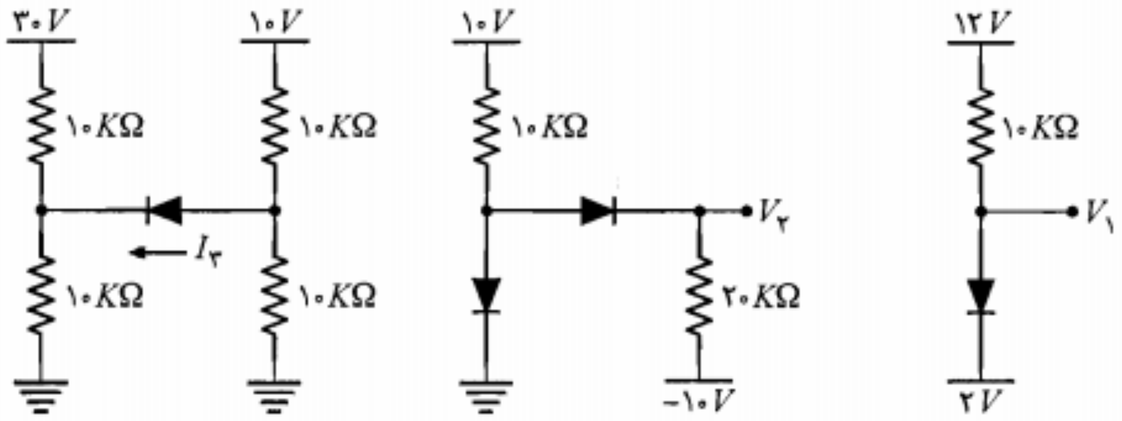
- برای یک مدار تنظیم‌کننده ولتاژ ساده مقادیر حداقل و حداکثر جریان بار توسط روابط زیر برحسب مقادیر نامی دیود زنر به‌کار رفته قابل محاسبه هستند:

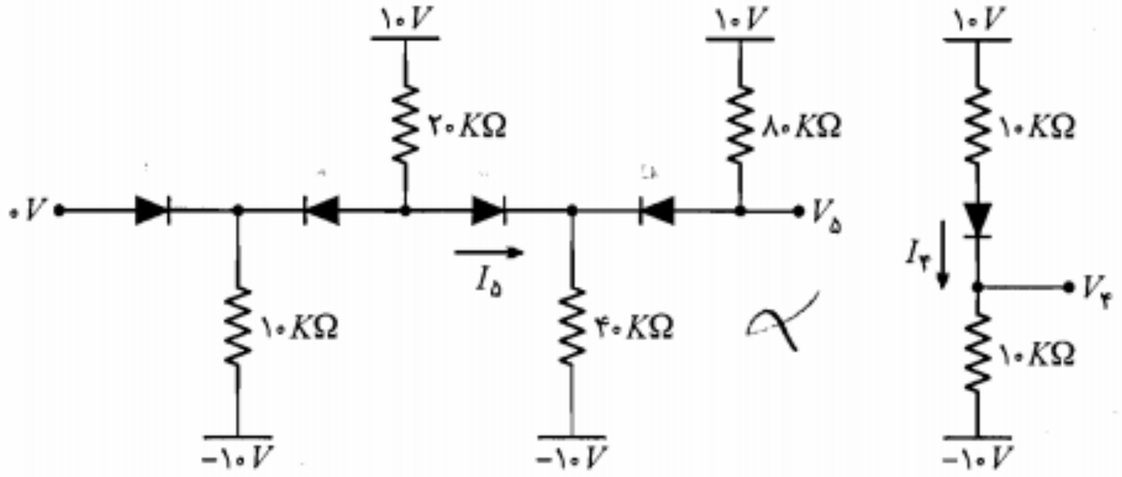
$$i_{L,max} = \frac{v_{I,min} - V_Z}{R} - I_K \qquad i_{L,min} = \frac{v_{I,max} - V_Z}{R} - I_{Z,max}$$

- با استفاده از یک مدار کلمپ می‌توان حداکثر یا حداقل یک سیگنال باشکل موج متناوب را به یک سطح معین دلخواه رسانید. این سطح توسط ولتاژ DC مدار کلمپ (V_R) مشخص می‌شود.

۳-۹ مسائل

۱. در مدارهای دیودی شکل م-۱ ولتاژها و جریانهای نشان داده شده را محاسبه کنید. دیودها را ایده‌آل در نظر بگیرید.





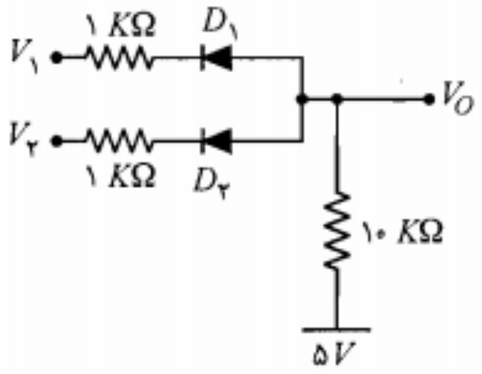
شکل م-۱

۲. در مدارشکل م-۲ دیودها ایده‌آل هستند. مطلوب است ولتاژ خروجی V_O برای حالتهای زیر:

الف) $V_1 \cong V_2 = 5\,V$

ب) $V_1 = 5\,V \;,\; V_2 = 0\,V$

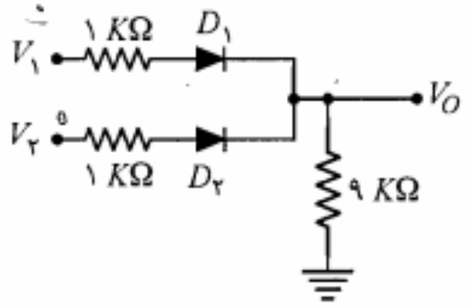
ج) $V_1 = V_2 = 0\,V$



شکل م-۲

FREE

۳. در مدار شکل م-۳، برای دیودها $V_D(ON) = ۰/۷V$ است. ولتاژ خروجی را به ازای ولتاژهای ورودی داده شده به دست آورید و وضعیت قطع یا وصل هر یک از دیودها را مشخص کنید.



شکل م-۳

الف) $V_۱ = ۱۰\,V$, $V_۲ = ۰\,V$

ب) $V_۱ = ۵\,V$, $V_۲ = ۰\,V$

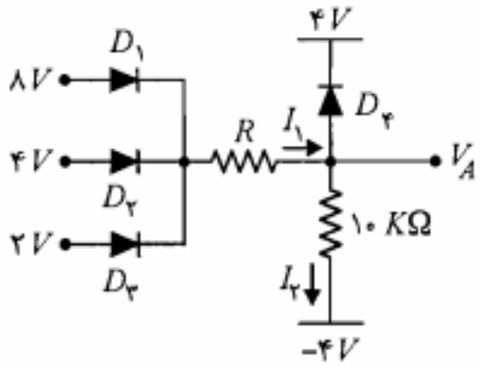
ج) $V_۱ = ۱۰\,V$, $V_۲ = ۵\,V$

د) $V_۱ = ۵\,V$, $V_۲ = ۵\,V$

۴. در مدار شکل م-۴ دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

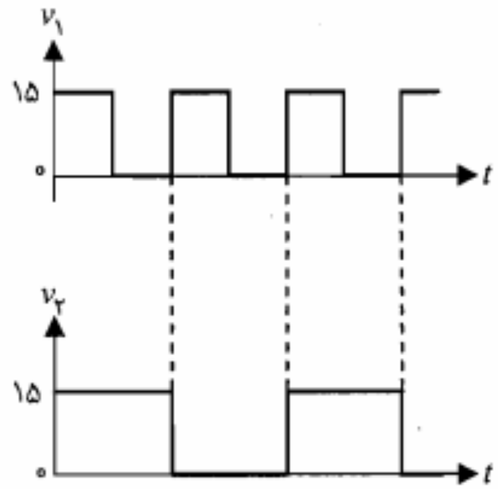
الف) مقاومت R را طوری تعیین کنید که V_A برابر $۲V$ شود. در این صورت $I_۱$ و $I_۲$ چقدر خواهد بود؟

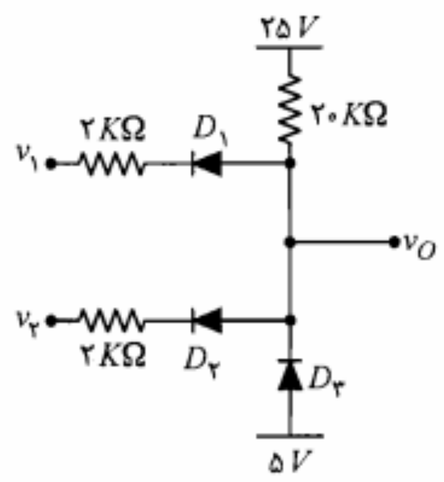
ب) به ازای $R = ۲K\Omega$ مقادیر V_A، $I_۱$ و $I_۲$ را تعیین کنید.



شکل م-۴

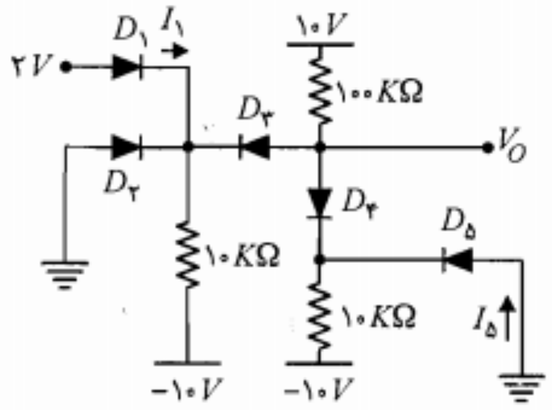
۵. در مدار شکل م-۵ دیودها ایده‌آل هستند. با توجه به شکل موج ولتاژهای $v_۱$ و $v_۲$، شکل موج ولتاژ خروجی را رسم کنید.





شکل م-۵

۶. در مدار شکل م-۶ با فرض ایده‌آل بودن همه دیودها، ولتاژ V_O و جریانهای $I_۱$ و $I_۵$ را تعیین کنید.

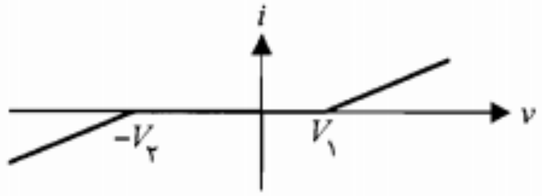


شکل م-۶

۷. منحنی مشخصه ولتاژ ـ جریان در شکل م-۷ را در نظر بگیرید:

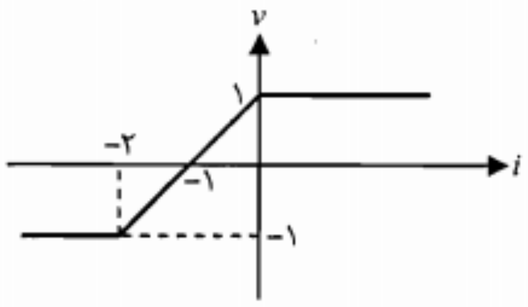
الف) با استفاده از دیودهای ایده‌آل، منابع و مقاومت مداری طراحی کنید که دارای مشخصه مزبور باشد.

ب) طرح خود را به نحوی اصلاح کنید که دو شیب موجود در مشخصه متفاوت باشند.



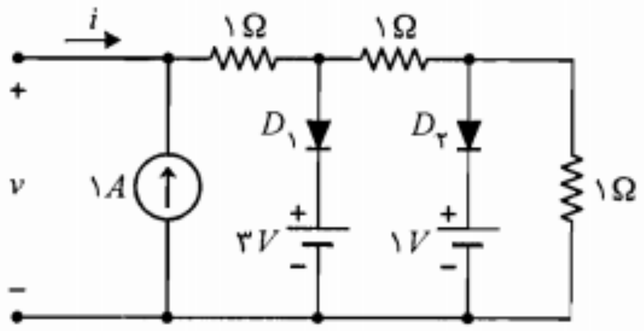
شکل م-۷

۸. با استفاده از کمترین تعداد مقاومت، منبع ولتاژ و دیود ایده‌آل مداری با مشخصه جریان ـ ولتاژ مطابق شکل م-۸ طراحی کنید.



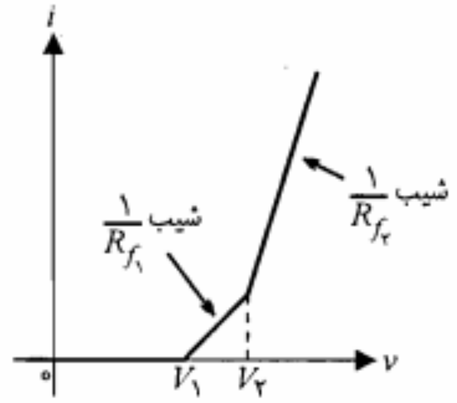
شکل م-۸

۹. در مدار شکل م-۹ دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه i برحسب v را در این مدار به دست آورده و رسم کنید.



شکل م-۹

۱۰. منحنی مشخصه یک دیود را مطابق شکل م-۱۰ مدلسازی کنید. مدار معادل این مدل را با استفاده از دیودهای ایده‌آل، مقاومتها و منابع طرح کنید. مقادیر قطعه‌های به‌کار رفته در مدار را برحسب پارامترهای مدل به دست آورید.



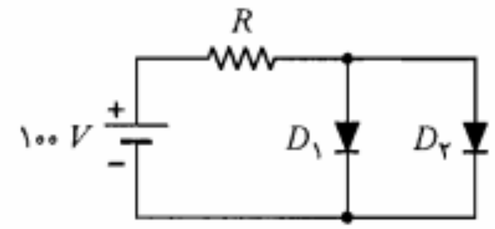
شکل م-۱۰

۱۱. در مدار شکل م-۱۱ دیودها دارای مدل خطی پاره‌ای به صورت زیر هستند:

$D_1: V\gamma_1 = ۰/۲\,V,\ R_f = ۲۰\,\Omega$

$D_2: V\gamma_2 = ۰/۶\,V,\ R_f = ۱۵\,\Omega$

به ازای $R = ۱۰\,K\Omega$ و $R = ۱\,K\Omega$ جریان دیودها را به دست آورید.



شکل م-۱۱

۱۲. در مدار شکل م-۱۲ معادله ولتاژ ـ جریان دیود آن به صورت زیر است:

$$i_D = ۱۰^{-۶}(e^{v_D/V_T} - ۱)$$

(i_D برحسب آمپر و v_D برحسب ولت)

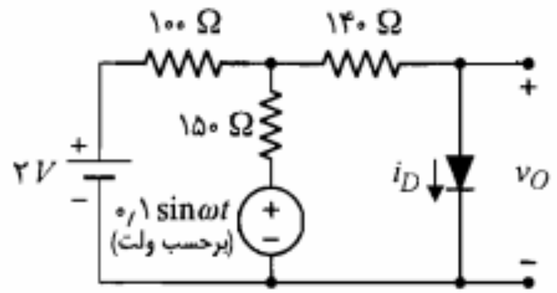
مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:

الف) مدار معادل تونن دو سر دیود.

ب) جریان ثابت گذرنده از دیود.

ج) مقاومت دینامیکی دیود (r_d).

د) ولتاژ خروجی v_O.



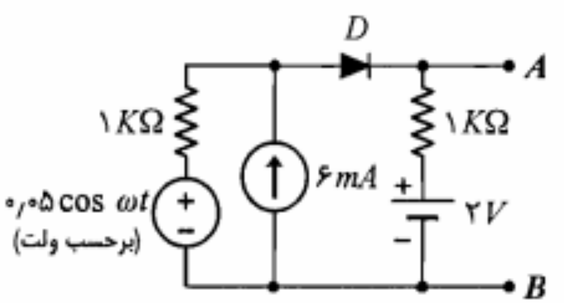
شکل م-۱۲

۱۳. در مدار شکل م-۱۳ دیود دارای $I_S = ۱\,nA$ است. مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:

الف) نقطه کار DC دیود.

ب) مقاومت دینامیکی دیود.

ج) $v_{AB}(t)$.

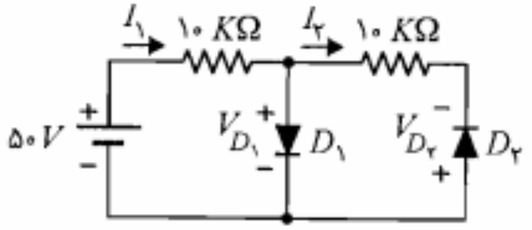


شکل م-۱۳

۱۴. در مدار شکل م-۱۴، دیودها دارای $R_f = r_z = ۵۰\ \Omega$، $V_\gamma = ۰/۷V$ و ولتاژ شکست $۲۵\,V$ هستند. مطلوب است

الف) I_1، I_2، V_{D_1} و V_{D_2}.

ب) با تغییر جهت هر دو دیود، بند (الف) را تکرار کنید.



شکل م-۱۴

۱۵. در مدار شکل م-۱۵ معادله مشخصه دیود را به صورت زیر در نظر بگیرید.

$$i_D = \begin{cases} ۲۰۰(v_D - ۰/۵)^۲ & v_D \geq ۰/۵ \\ ۰ & v_D \leq ۰/۵ \end{cases}$$

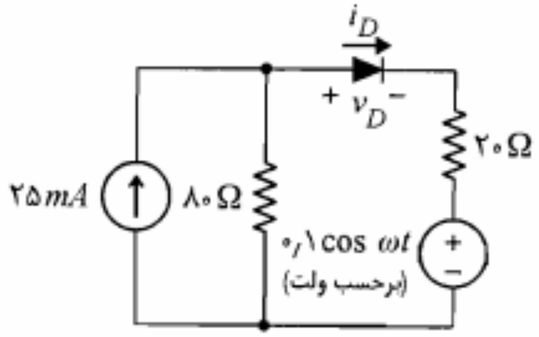
(i_D برحسب mA و v_D برحسب V)

مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:

الف) نقطه کار DC دیود.

ب) مقاومت دینامیکی دیود.

ج) $i_D(t)$.



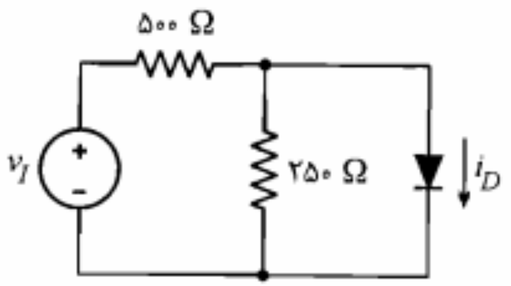
شکل م-۱۵

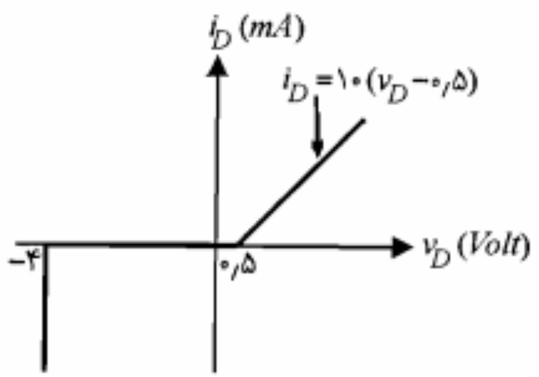
۱۶. شکل موج ورودی، مشخصه ولتاژ ـ جریان دیود و مدار شکل م-۱۶ را در نظر بگیرید.

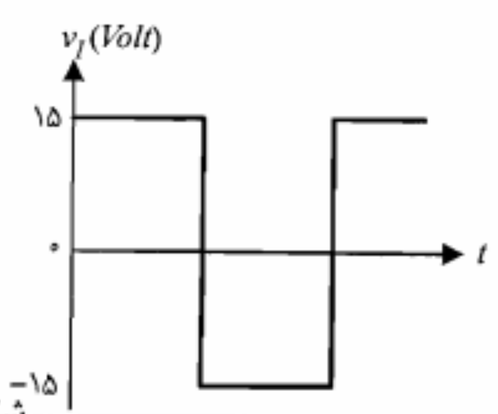
الف) مدار معادل تونن دو سر دیود را به دست آورید.

ب) $i_D(t)$ را رسم کنید.

ج) جریان متوسط دیود را به دست آورید.





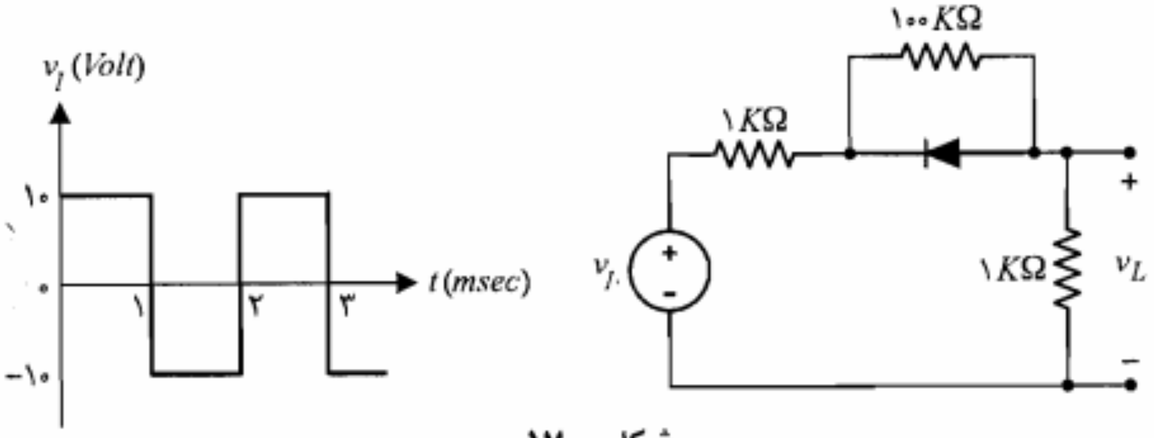


شکل م-۱۶

۱۷. مدار شکل م-۱۷ را در نظر بگیرید.

الف) با فرض ایده‌آل بودن دیود ولتاژ $v_L(t)$ را به دست آورده و رسم کنید.

ب) بند (الف) را با فرض ورودی مثلثی تکرار کنید (دامنه موج ورودی را ۱۰ ولت در نظر بگیرید).

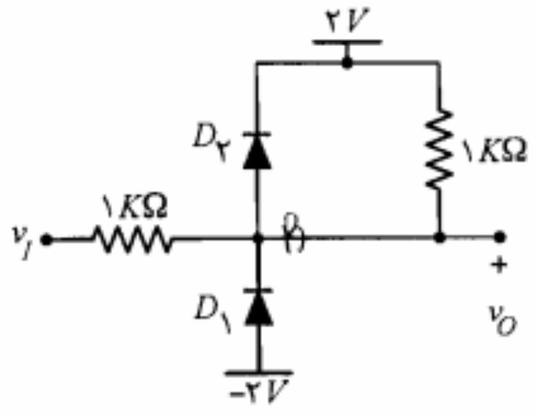


شکل م-۱۷

۱۸. در مدار شکل م-۱۸ دیودها را ایده‌آل در نظر بگیرید.

الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید $(-۸V < v_I < ۸V)$.

ب) پس از حذف مقاومت موازی $D_۲$ مشخصه را مجدداً رسم نمایید.

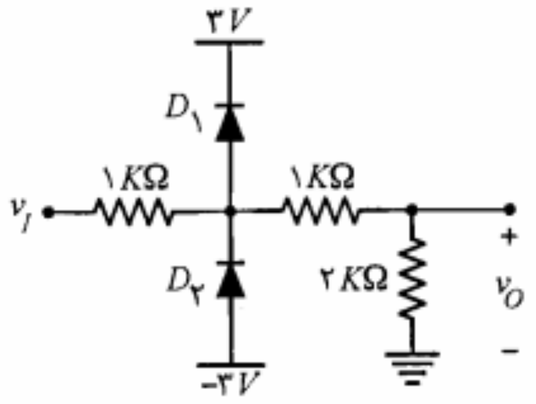


شکل م-۱۸

۱۹. در مدار شکل م-۱۹ دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید $(-۷V \le v_I \le ۷V)$.

ب) اگر جهت $D_۱$ عوض شود مشخصه جدید را رسم نمایید.

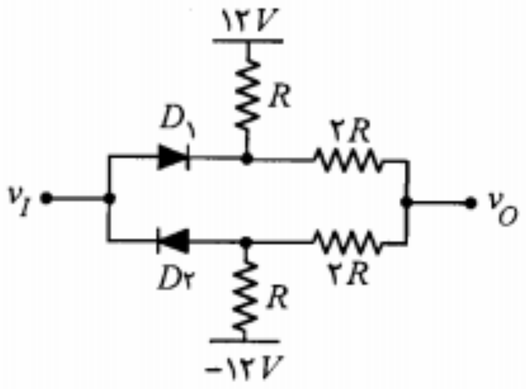


شکل م-۱۹

۲۰. در مدار شکل م-۲۰ برای هر یک از دیودها داریم

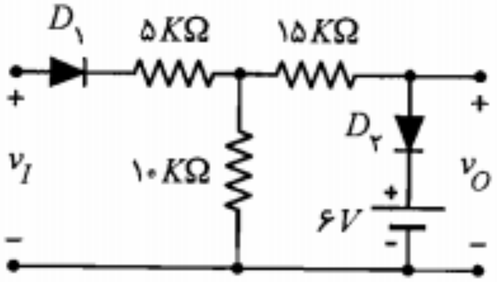
$V\gamma = ۰/۷V$, $R_f = ۰$, $R_r = \infty$

مشخصه انتقالی مدار را به دست آورده و رسم کنید.



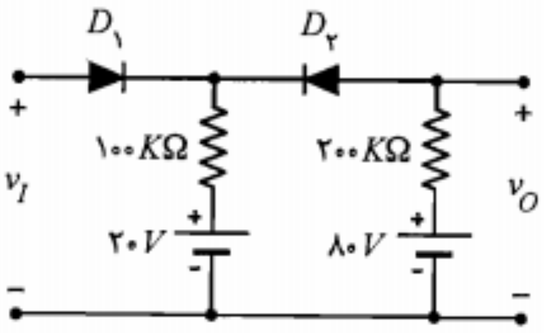
شکل م-۲۰

۲۱. در شکل م-۲۱ دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه انتقالی مدار را برای $-۲۰V \le v_I \le ۲۰V$ رسم نموده، در هر ناحیه از مشخصه، وضعیت هر یک از دیودها را تعیین نمایید.



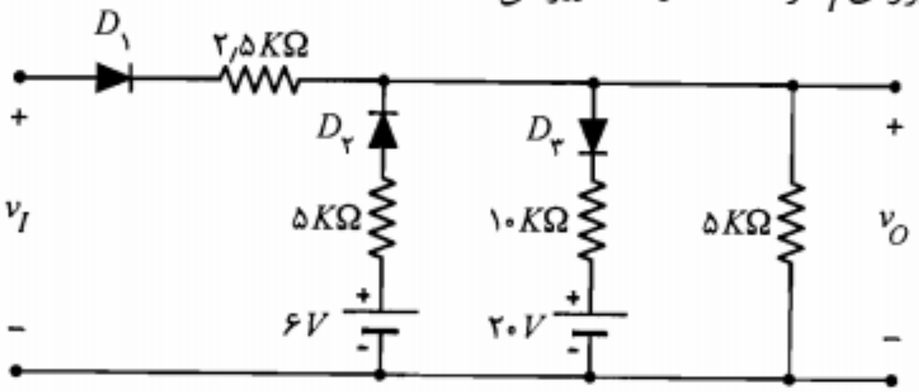
شکل م-۲۱

۲۲. ولتاژ ورودی v_I مدار شکل م-۲۲ از ۰ تا ۱۰۰ ولت به صورت خطی تغییر می‌کند. ولتاژ خروجی v_O را با همان مقیاس زمانی v_I رسم نمایید (دیودها را ایده‌آل فرض کنید).



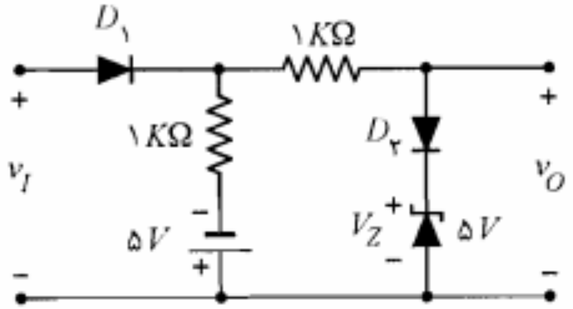
شکل م-۲۲

۲۳. در مدار شکل م-۲۳، با فرض ایده‌آل بودن دیودها، مشخصه انتقالی را به دست آورده و رسم نمایید. ورودی v_I از ۰ تا ۵۰ ولت تغییر می‌کند.



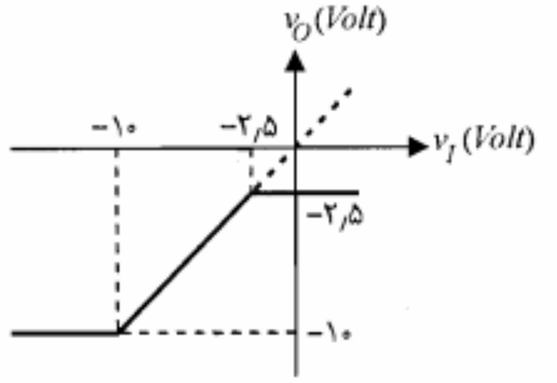
شکل م-۲۳

۲۴. در مدار برش شکل م-۲۴، مشخصه انتقالی را محاسبه و رسم نمایید (دیودها را ایده‌آل فرض کنید).



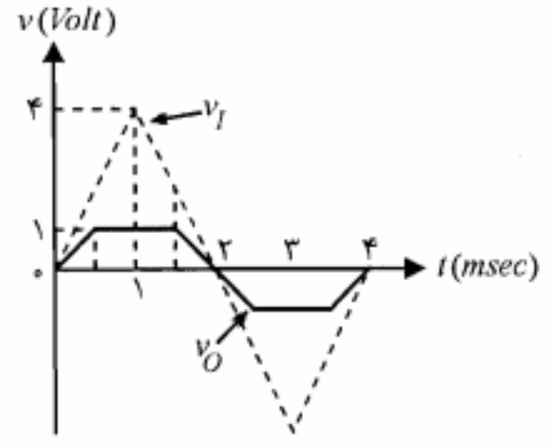
شکل م-۲۴

۲۵. مشخصه انتقالی شکل م-۲۵ را در نظر بگیرید. یک مدار برای مشخصه مذکور طراحی نموده و مقادیر قطعه‌های به‌کار رفته را مشخص نمایید. (از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع استفاده کنید.)



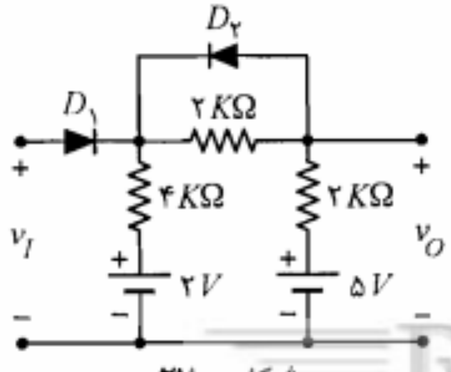
شکل م-۲۵

۲۶. مداری طراحی‌کنید که از شکل موج مثلثی ورودی نشان‌داده‌شده در شکل م-۲۶، شکل موج ذوزنقه‌ای نشان داده شده را ایجاد نماید (از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع استفاده نمایید).



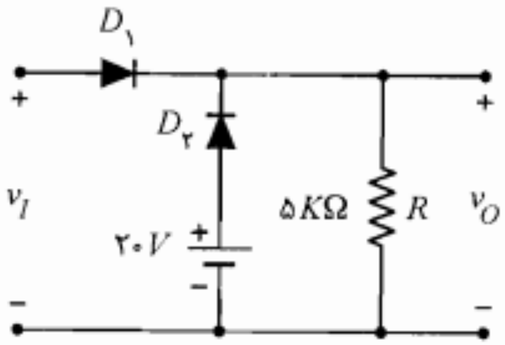
شکل م-۲۶

۲۷. در مدار شکل م-۲۷ دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه انتقالی را محاسبه و رسم کنید.



شکل م-۲۷

۲۸. در مدار برش شکل م-۲۸، برای دیودهای مدار $R_f = ۲۰\ \Omega$، $R_r = \infty$ و $V_\gamma = ۰$ است.



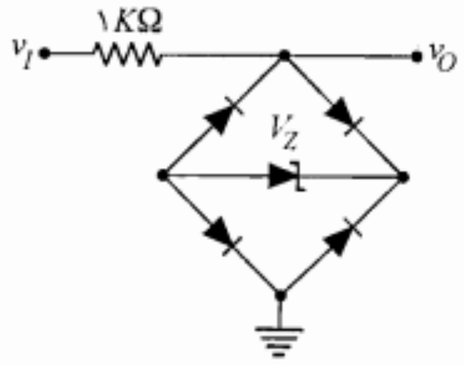
شکل م-۲۸

الف) مشخصه انتقالی را رسم نمایید. نشان دهید که مدار دارای یک نقطه شکست گسترش یافته (دو نقطه شکست نزدیک به هم) است.

ب) با فرض تعویض دیود D_2 با یک مقاومت ۵ KΩ، مشخصه انتقالی را به دست آورید.

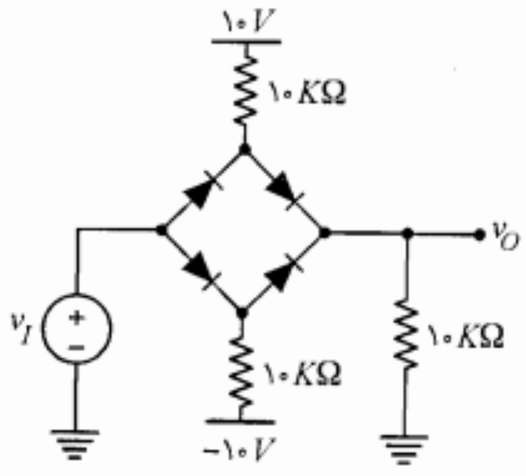
ج) نشان دهید در صورتی که R_f دیود خیلی کوچکتر از R باشد، دو نقطه شکست بند (الف) به یک نقطه شکست بند (ب) تبدیل می‌شود.

۲۹. در مدار شکل م-۲۹ با فرض $V_\gamma = ۰٫۷\ V$، $R_f = ۰$، $R_r = \infty$ و $V_Z = ۸٫۲\ V$، مشخصه انتقالی را برای $۲۰\ V \le v_I \le ۲۰\ V$ - رسم کنید.



شکل م-۲۹

۳۰. در مدار شکل م-۳۰ با فرض ایده‌آل بودن دیودها، مشخصه انتقالی مدار را به دست آورید.



شکل م-۳۰

۳۱. یک مدار یکسوکننده تمام موج دارای دامنه ولتاژ حداکثر برابر ۱۰۰ ولت است. به این مدار یک صافی خازنی اضافه می‌کنیم. در صورتی که $R_L = ۱\ K\Omega$ و فرکانس برق شهر $۵۰\ Hz$ باشد؛ در

هر یک از حالتهای زیر ضریب ریپل (*r.f.*) که به صورت زیر تعریف می‌شود و جریان حداکثر دیود را محاسبه کنید.

الف) $C = ۱۰\ \mu F$ ب) $C = ۱۰۰۰\ \mu F$

ضریب ریپل به صورت نسبت درصد ولتاژ مؤثر ریپل به ولتاژ DC خروجی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\%\ r.f. = \frac{v_r(rms)}{V_{dc}} \times ۱۰۰$$

برای $v_r(rms)$ از نتایج مسأله ۳-۳۵ استفاده کنید.

۳۲. با استفاده از تعریف بازده (η) در یکسوکننده‌ها نشان دهید که

الف) برای مدار یکسوکننده نیم موج رابطه زیر برقرار است:

$$\eta = \frac{۴۰/۵}{۱ + R_f/R_L}$$

ب) برای مدار یکسوکننده تمام‌موج مقدار η دو برابر مقدار فوق است.

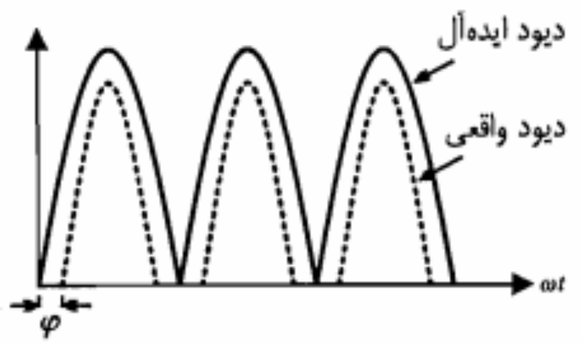
۳۳. یک مدار یکسوکننده تمام موج غیر پل با صافی خازنی و $C = ۴۰\ \mu F$ و $R_L = ۵\ K\Omega$ را در نظر بگیرید. در صورتی که ولتاژ بین هر یک از سرهای ثانویه و زمین به صورت $v_I = V_m \sin ۲\pi ۵۰ t$ با $V_m = ۱۰۰\ V$ باشد.

الف) $V_{L,dc}$ و ولتاژ ریپل V_r خروجی را محاسبه کنید.

ب) با فرض $V_\gamma = ۰/۶\ V$، آیا مقادیر فوق به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر خواهند کرد؟

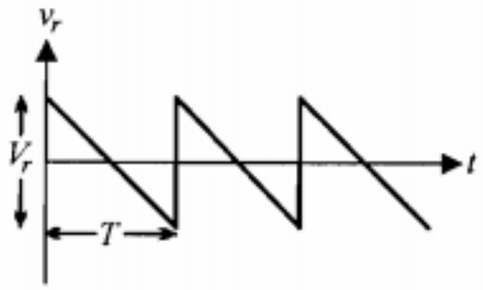
ج) دیودهای به‌کار رفته در این مدار چه جریان حداکثر و چه ولتاژ معکوس حداکثری را باید بتوانند تحمل کنند؟

۳۴. در شکل م-۳۴، خروجی یکسوکننده تمام موج برای دو حالت دیود ایده‌آل و واقعی رسم شده است. مقدار تأخیر φ را برحسب دامنه ورودی سینوسی (V_m) و ولتاژ آستانه هدایت (V_γ) دیود بیان نمایید. آیا φ برای یکسوکننده پل متفاوت خواهد بود؟ چرا؟



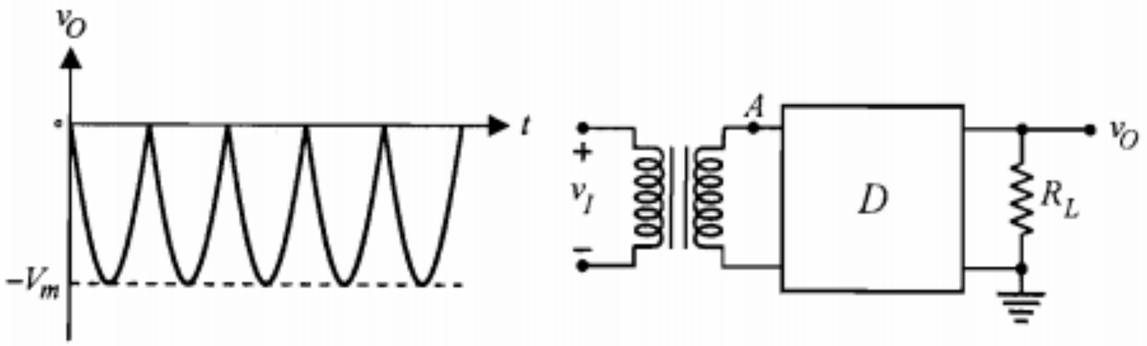
شکل م-۳۴

۳۵. ریپل خروجی یک یکسوکننده با صافی خازنی را می‌توان با منحنی شکل م-۳۵ تقریب زد. مقدار مؤثر ولتاژ ریپل $v_r(rms)$ را برحسب V_r به دست آورید.



شکل م-۳۵

۳۶. در مدار شکل م-۳۶، در محل جعبه D یک مدار پل دیودی مناسب طوری جایگزین کنید که به ازای یک شکل موج سینوسی ورودی با دامنه V_m، ولتاژ خروجی v_O دارای شکل موج نشان داده شده باشد. شکل موج ولتاژ نقطه A نسبت به زمین چگونه خواهد بود؟ (از دیودهای ایده‌آل استفاده کنید.)



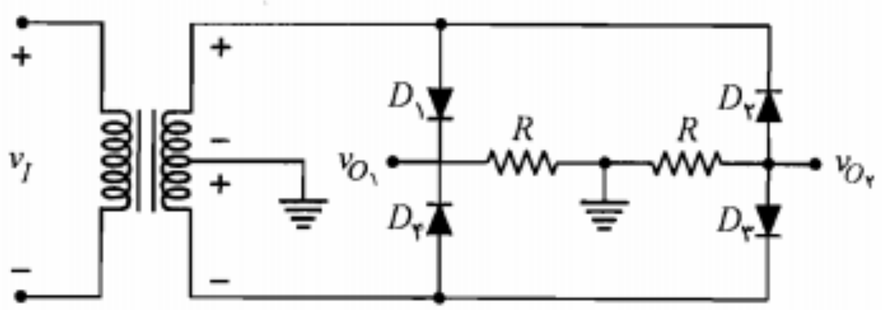
شکل م-۳۶

۳۷. در مدار شکل م-۳۷ ولتاژ آستانه هدایت دیودها را صفر و مقاومت مستقیم آنها را R_f در نظر بگیرید. اگر v_I یک ولتاژ سینوسی باشد.

الف) شکل موج ولتاژهای خروجی v_{O_1} و v_{O_2} را رسم کنید.

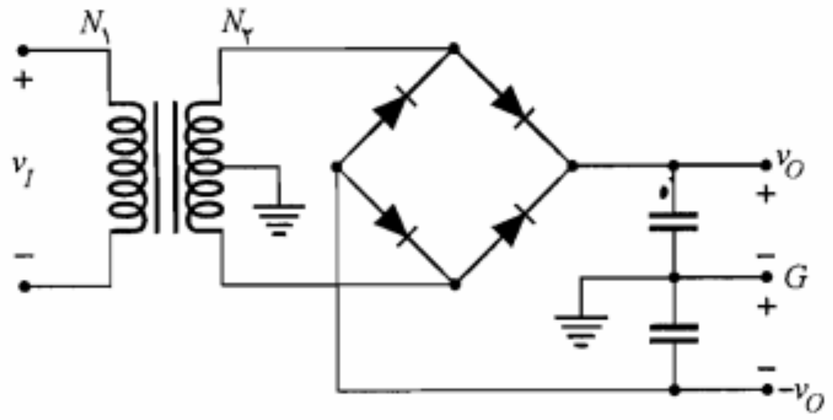
ب) مقادیر متوسط و مؤثر ولتاژهای v_{O_1} و v_{O_2} را محاسبه کنید.

ج) حداکثر ولتاژ معکوسی که روی هر یک از دیودها قرار می‌گیرد، دقیقاً چقدر است؟



شکل م-۳۷

۳۸. مدار شکل م-۳۸ یک مدار پل با سر وسط است. طرز کار آن را توضیح دهید. در صورتی که $N_۲/N_۱ = ۰/۱$ و $v_I = ۱۰۰ \sin \omega t$ باشد، ولتاژ خروجی را تعیین نمایید.



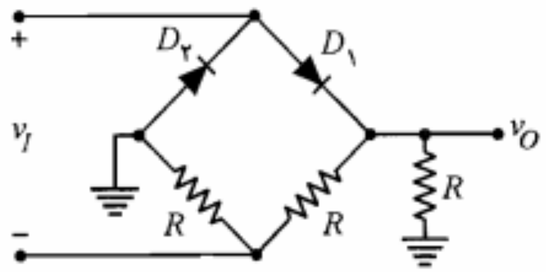
شکل م-۳۸

۳۹. در مدار شکل م-۳۹ دیودها ایده‌آل و $v_I = V_m \sin \omega t$ است.

الف) شکل موج ولتاژ خروجی v_O را به دست آورده و رسم کنید.

ب) مقدار DC ولتاژ خروجی را محاسبه کنید.

ج) مشخصه انتقالی مدار را رسم کنید.



شکل م-۳۹

۴۰. با استفاده از رابطه ۳-۴۱ و مدار شکل ۳-۳۰ معادل تونن یکسوکننده تمام‌موج با فیلتر خازنی را به دست آورید.

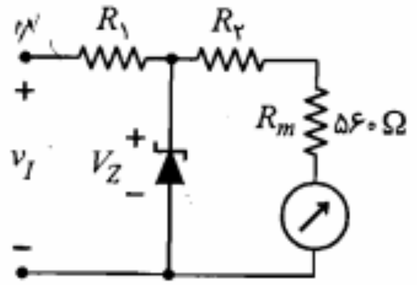
۴۱. ضریب تنظیم بار را برای هر یک از مدارهای یکسوکننده زیر به دست آورید.

الف) یکسوکننده نیم‌موج ب) یکسوکننده تمام‌موج

ج) یکسوکننده نیم‌موج با صافی خازنی د) یکسوکننده تمام‌موج با صافی خازنی

۴۲. برای حفاظت دستگاههای اندازه‌گیری می‌توان از دیود زنر استفاده نمود، بدون اینکه به خطی بودن دستگاه خدشه‌ای وارد شود. مدار شکل م-۴۲ نمایش یک ولتمتر DC است که حداکثر ولتاژ قابل خواندن با آن $۲۵\ V$، مقاومت داخلی آن $۵۶۰\ \Omega$ و حداکثر جریان گذرنده از آن $۰/۲ mA$ است. در صورتی که ولتاژ شکست دیود زنر برابر $۲۰\ V$ باشد، مقاومتهای $R_۱$ و $R_۲$

را طوری به دست آورید که برای $v_I > ۲۵V$ دیود زنر هدایت نموده و اضافه جریان دستگاه اندازه‌گیری را از خود عبور دهد.

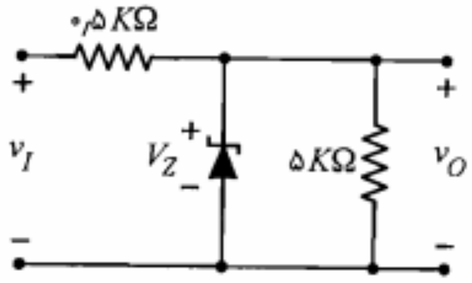


شکل م-۴۲

۴۳. در مدار تنظیم‌کننده ولتاژ شکل م-۴۳ $I_{Z,max} = ۱۰\ mA$، $I_K = ۰/۲\ mA$ و $V_Z = ۵V$ است.

الف) با فرض $r_z = ۰$ حداقل و حداکثر مجاز v_I را تعیین نمایید.

ب) در صورتی که $r_z = ۵\ \Omega$ باشد، Δv_O را به ازای $\Delta v_I = ۲V$ محاسبه کنید.

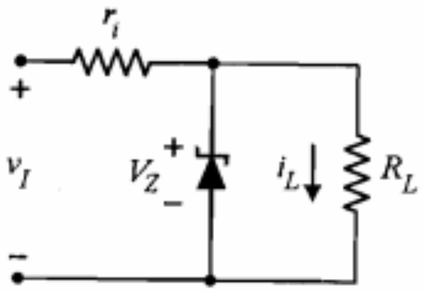


شکل م-۴۳

۴۴. در مدار تنظیم‌کننده ولتاژ شکل م-۴۴ دیود زنر ۱۰ ولتی و جریان حداقل آن $۱۵ mA$ است. ولتاژ ورودی v_I بین ۱۳ تا ۱۶ ولت و جریان i_L بین $۱۰ mA$ تا $۸۵ mA$ تغییر می‌کند.

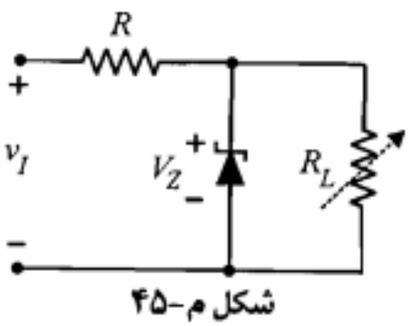
الف) حداکثر مقدار r_i را به دست آورید.

ب) با استفاده از r_i فوق حداکثر توان تلف شده توسط دیود زنر را به دست آورید.



شکل م-۴۴

۴۵. در مدار شکل م-۴۵ با فرض مقادیر $R_{L,min} = ۱K\Omega$، $I_{Z,max} = ۱۰\ mA$، $V_Z = ۶/۸V$ و $I_K = ۰/۲ mA$ و $۱۱V \le v_I \le ۱۳V$ مقدار مقاومت R و نیز $R_{L,max}$ را محاسبه کنید.

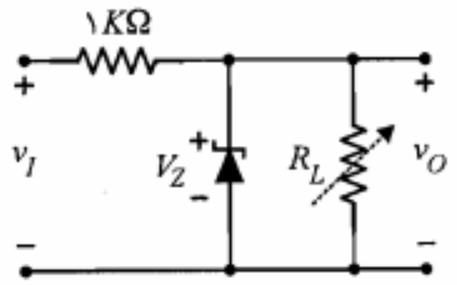


شکل م-۴۵

۴۶. مدار شکل م-۴۶ را با فرض $I_{Z,max} = ۳/۶ mA$ و $I_K = ۰/۲ mA$ در نظر بگیرید.

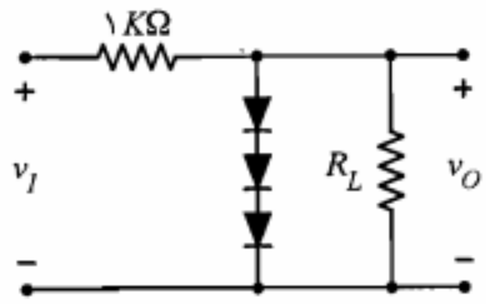
الف) مقادیر حداقل و حداکثر مقاومت R_L را به گونه‌ای تعیین نمایید که تنظیم ولتاژ به خوبی صورت پذیرد. ولتاژ ورودی بین ۸ تا ۱۰ ولت تغییر می‌کند و $V_Z = ۶/۲ V$ است.

ب) اگر $R_L = ۲۰ K\Omega$ بوده و دیود زنر دارای مقاومت داخلی ۵ Ω باشد درصد تغییرات ولتاژ خروجی را به‌ازای تغییرات ولتاژ ورودی به دست آورید.



شکل م-۴۶

۴۷. در مدار تنظیم‌کننده ولتاژ شکل م-۴۷ از دیودهای معمولی مشابه با $V_\gamma = ۰/۷ V$ استفاده شده است. در صورتی که ولتاژ ۴ ولتی ورودی به اندازه $۰/۵ V \pm$ تغییرات داشته باشد، تغییرات ولتاژ خروجی چه مقدار خواهد بود؟ ($R_L \gg ۳r_d$، لازم است r_d محاسبه شود.)

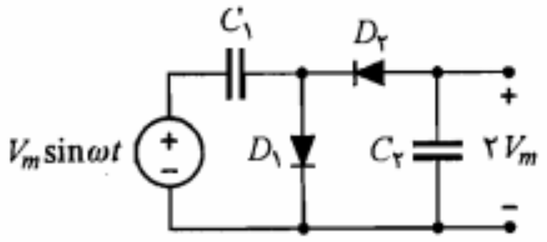


شکل م-۴۷

۴۸. مدار شکل م-۴۸ را در نظر بگیرید.

الف) توضیح دهید که چگونه این مدار به صورت یک مدار دو برابر کننده ولتاژ عمل می‌کند؟

ب) چگونه می‌توان با تکمیل این مدار یک مدار چهار برابر کننده ولتاژ به دست آورد؟

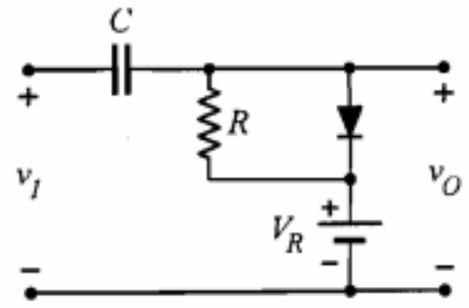


شکل م-۴۸

۴۹. در مدار کلمپ شکل م-۴۹ دامنه شکل موج مثلثی ورودی برابر ۴ ولت است.

الف) شکل موج خروجی را به‌ازای مقادیر $V_R = ۲ V$ و $V_R = -۲ V$ رسم نمایید.

ب) در صورتی که $V_R = \pm ۵ V$ باشد آیا مدار، ورودی را کلمپ خواهد کرد؟ چرا؟



شکل م-۴۹

۴ ترانزیستور پیوندی دوقطبی

در فصلهای گذشته ضمن آشنایی با ساختمان اتمی بلورهای نیمه‌هادی، پیوند $P-N$ را مورد بررسی قرار داده و سپس به معرفی دیود به عنوان یک قطعه الکترونیکی پرداختیم. ترانزیستورها دسته بسیار وسیع و مهم دیگری از قطعه‌های الکترونیکی هستند که با توجه به ساختمان و نوع عملکرد فیزیکی آنها به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. در این فصل به مطالعه یکی از انواع مهم ترانزیستورها یعنی **ترانزیستور پیوندی دوقطبی** (*BJT*)[1] می‌پردازیم. خواهیم دید که ترانزیستور پیوندی دوقطبی که در بسیاری از موارد با همان نام مختصر ترانزیستور شناخته می‌شود، در حقیقت به صورت یک منبع جریان کنترل شده با جریان عمل می‌نماید. همچنین خواهیم دید که در ترانزیستور پیوندی دوقطبی هم حاملهای اکثریت و هم حاملهای اقلیت در ایجاد جریان دخالت دارند. به همین دلیل این نام به این نوع از ترانزیستورها داده شده است. برای دستیابی به شناخت کافی در مورد این قطعه در دو بخش نخست به بررسی ساختمان و طرز کار ترانزیستور می‌پردازیم. پس از آن بخشهایی را به نحوه قرار گرفتن ترانزیستور در ترکیبهای مختلف و مشخصه‌های ترانزیستور در هر ترکیب اختصاص خواهیم داد.

1. *Bipolar Junction Transistor*

RUFER