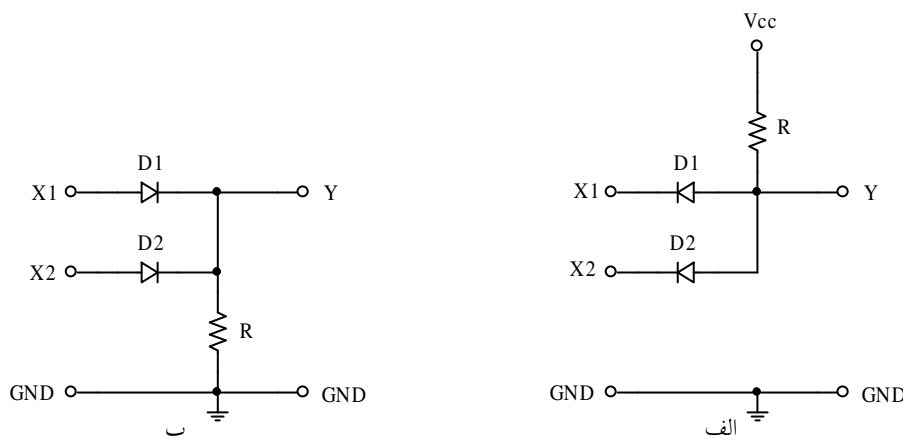


۴-۶-۲ کار برد علایم بزرگ دیود

در این قسمت با چند کار برد علایم بزرگ متداول دیودهای معمولی آشنا می‌شویم که عبارتند از: گیت‌ها، یکسو سازی، محدود کننده‌گی، گیرشی و چند برابر کننده ولتاژ.

۴-۶-۲-۱ گیت‌ها

همان طور که در بخش ۴-۵-۲ دیدیم (شکل ۴-۲۲)، از دیود به عنوان یک سویچ می‌توان استفاده کرد. بنابراین دیودها را می‌توان به عنوان عناصر اصلی جهت پیاده سازی مدارهای منطقی به کار برد. برای مثال در شکل ۴-۲۷ مدار یک گیت *AND* و یک گیت *OR* را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۷ گیت‌های منطقی الف- *AND* ب- *OR*

فرض کنیم که در مدارهای شکل ۴-۲۷ $V_{CC} = +12V$ و محدوده $V = 0 \dots 3V$ محدوده صفر منطقی و محدوده $V = 9 \dots 12V$ محدوده یک منطقی باشد. اگر مثلاً در شکل ۴-۲۷ الف، $V_{X1} = 11V$ ($X1 = "1"$) و $V_{X2} = 11V$ ($X2 = "1"$) باشد، $V_Y = 10.3V$ ($Y = "1"$) خواهد بود. اگر هر کدام از ورودی‌ها یا هر دو به زمین وصل شود، $V_Y = 0.7V$ ($Y = "0"$) خواهد بود یعنی

$$Y = X1 \& X2$$

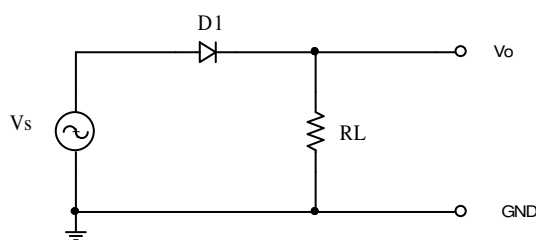
همچنین اگر مثلاً در شکل ۴-۲۷ ب، $V_{X1} = 11V$ ($X1 = "1"$) یا $V_{X2} = 11V$ ($X2 = "1"$) باشد، $V_Y = 10.3V$ ($Y = "1"$) خواهد بود. فقط هر گاه هر دو ورودی به زمین وصل شود، $V_Y = 0V$ ($Y = "0"$) خواهد بود یعنی $Y = X1 + X2$.

۴-۲-۶-۲ یکسو سازها

مهم‌ترین کار برد دیود معمولی، یکسو سازی است. همان طور که ملاحظه شد، دیود در جهت مستقیم جریان را از خود عبور می‌دهد، و در جهت معکوس مانند مدار باز عمل می‌کند. یعنی اگر دیود را در مداری قرار دهیم که توسط ولتاژ متناوبی^۱ تحریک می‌شود، جریان گذرنده از آن در یک جهت خواهد بود، یعنی جریان یکسو^۲ شده است.

• یکسو ساز نیمه موج

شکل ۴-۲۸ مدار یک یکسو کننده نیمه موج^۳ و شکل ۴-۲۹ شکل موج‌های مربوطه را نمایش



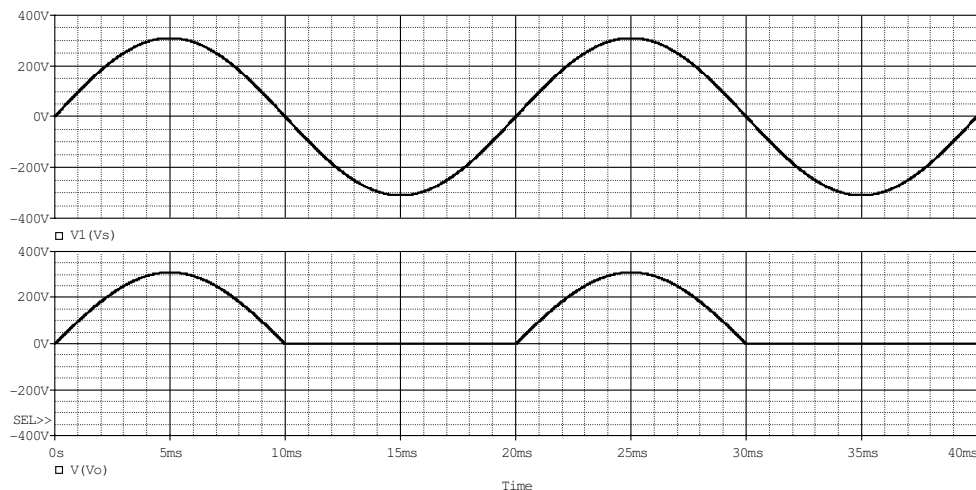
شکل ۴-۲۸ مدار یکسو کننده نیمه موج

میدهد. برای مثال اگر V_s ولتاژ برق شهر در ایران باشد، فرکانس آن ۵۰ هرتز، مقدار مؤثر ولتاژ ۲۲۰ ولت و در نتیجه دامنه ولتاژ حدوداً ۳۱۰ ولت خواهد بود. در نیم پریود^۴ مثبت،

ولتاژ آند نسبت به کاتد مثبت بوده دیود هدایت می‌کند. در این صورت افت ولتاژ دیود (۰,۷ ولت) در مقابل ولتاژ ورودی (۳۱۰ ولت) قابل اغماض بوده ولتاژ خروجی عملاً با ولتاژ ورودی

¹ AC: Alternating Current
² DC: Direct Current
³ HWR: Half-Wave Rectifier
⁴ Half-Cycle, Half-Period

برابر است. در نیم پریود منفی، ولتاژ آند نسبت به کاتد منفی بوده دیود قطع است. بنابراین ولتاژ خروجی تقریباً صفر است (در مقابل ولتاژ ورودی قابل اغماض می باشد).



شکل ۴-۲۹ شکل موج‌های مربوط به مدار شکل ۴-۲۸: ولتاژ منبع (ورودی)، پایین: ولتاژ بار (خروجی)

بنابراین، ولتاژ خروجی - برخلاف ولتاژ ورودی، که مقدار لحظه ایش هم منفی و هم مثبت بوده مقدار متوسط آن در یک پریود کامل صفر است - فقط مقادیر مثبت یا صفر را داشته، مقدار متوسط آن در یک پریود کامل مقداری مثبت است. به همین دلیل به این مدار یک یکسو کننده، و چون فقط انرژی نصف موج به خروجی منتقل میشود، نیمه موج (نیم موج)، گویند.

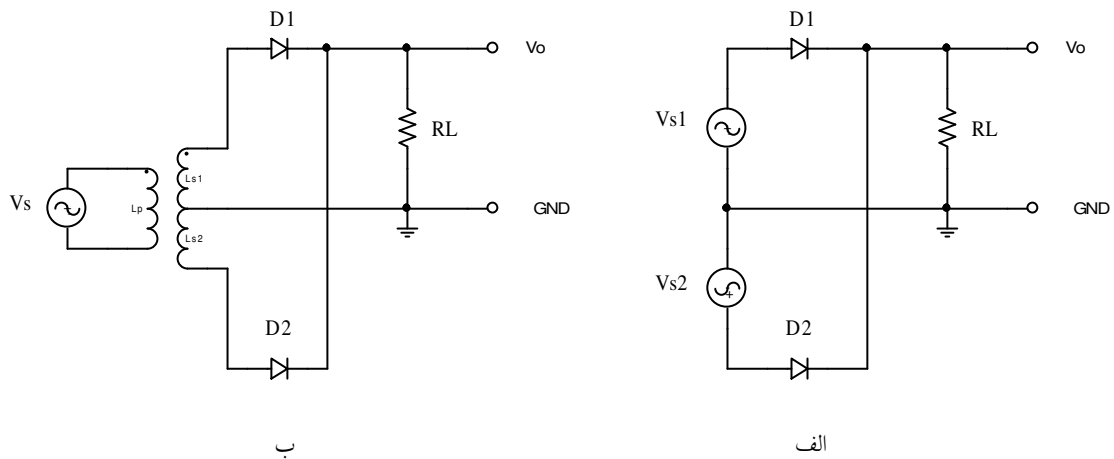
سوال: اگر جهت دیود را (در شکل ۴-۲۸) بر عکس کنیم چه تغییری رخ می دهد؟

• یکسو ساز تمام موج

اگر مانند شکل ۴-۳۰ الف دو منبع سینوسی با دامنه و فرکانس یکسان و اختلاف فاز 180° را پس از یکسو سازی، باهم موازی کنیم، یک یکسو کننده تمام موج^۱ حاصل می شود. ساده ترین روش برای ایجاد اختلاف فاز 180° ، استفاده از یک ترانسفورماتور با دو ثانویه یکسان است، که

^۱ FWR: Full-Wave Rectifier

سر انتهایی یکی به سر ابتدایی دیگری وصل شده باشد. به این نوع یکسو ساز، یکسو ساز تمام موج با سر وسط^۱ گفته میشود. شکل ۴-۳۰ ب چنین مداری را نمایش می دهد.



شکل ۴-۳۰ مدار یکسو کننده تمام موج با سر وسط الف- نحوه کار کرد ب- نحوه پیاده سازی

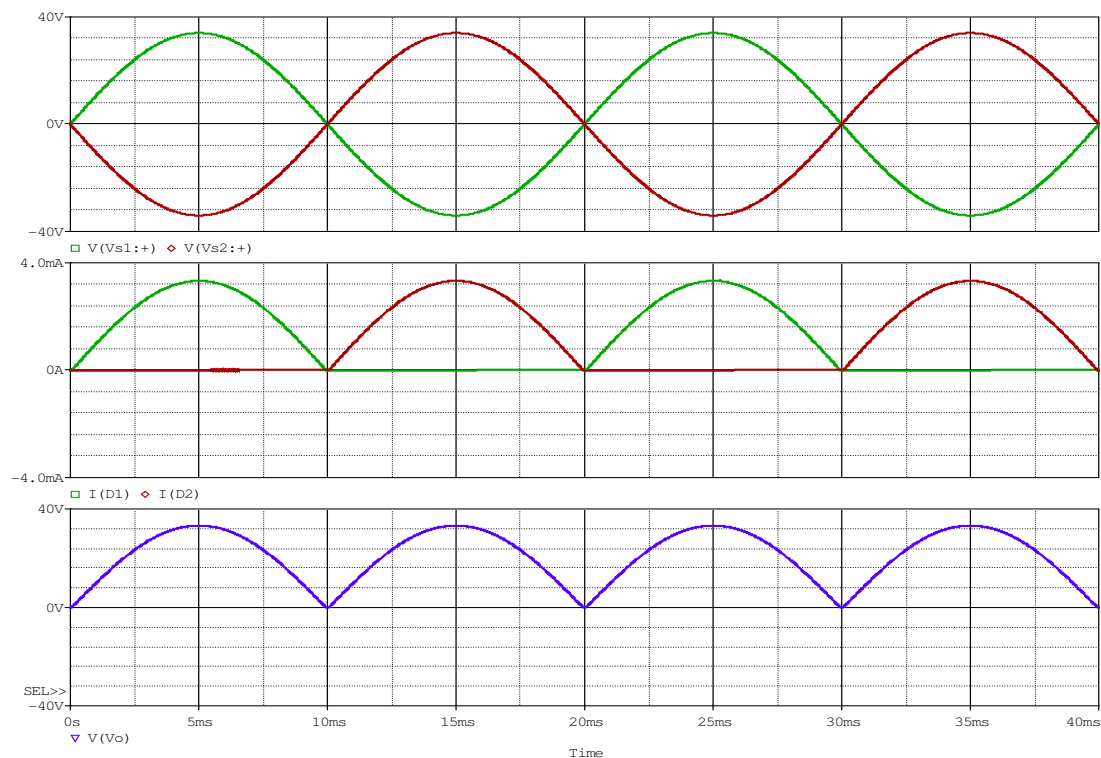
حسن دیگری که استفاده از ترانس دارد این است که به کمک آن می توان به ازای یک منبع ولتاژ مشخص - مثلاً ۲۲۰ ولت برق شهر- عملاً به هر ولتاژ دلخواه، چه کمتر (به کمک ترانس کاهنده) و چه بیشتر (به کمک ترانس افزایشنده) دست یافت. در مدارهای شکل ۴-۳۰ $v_{s1} \equiv v(L_{S1})$ و $v_{s2} \equiv v(L_{S2})$. با فرض این که ترانس به کار رفته یک مبدل $220V:2 \times 24V$ ^۲ باشد، دامنه ولتاژ هر کدام از ثانویه ها حدوداً ۳۴ ولت خواهد بود (چرا؟). در نیم پریود مثبت برق شهر، ولتاژ Vs1 نسبت به زمین (GND) مثبت و ولتاژ Vs2 منفی خواهد بود. لذا دیود D1 هدایت می کند (سوئیچ بسته) و D2 قطع است (سوئیچ باز). اگر از افت ولتاژ دو سر دیود (۰,۷ ولت) در مقابل دامنه ولتاژ ترانس (۳۴ ولت) صرف نظر کنیم، ولتاژ خروجی حدوداً با ولتاژ ثانویه ترانس برابر خواهد بود. در نیم پریود منفی برق شهر، ولتاژ Vs1 نسبت به زمین (GND) منفی و ولتاژ Vs2 مثبت خواهد بود.

^۱ CTFWR: Centre-Tapped Full-Wave Rectifier

^۲ این نحوه نگارش یعنی، یک ترانس با دو ثانویه که اگر اولیه آن به یک منبع ولتاژ ۲۲۰ ولتی (موثر) وصل شود، نیروی محرکه ثانویه های آن هر کدام ۲۴ ولت خواهد بود.

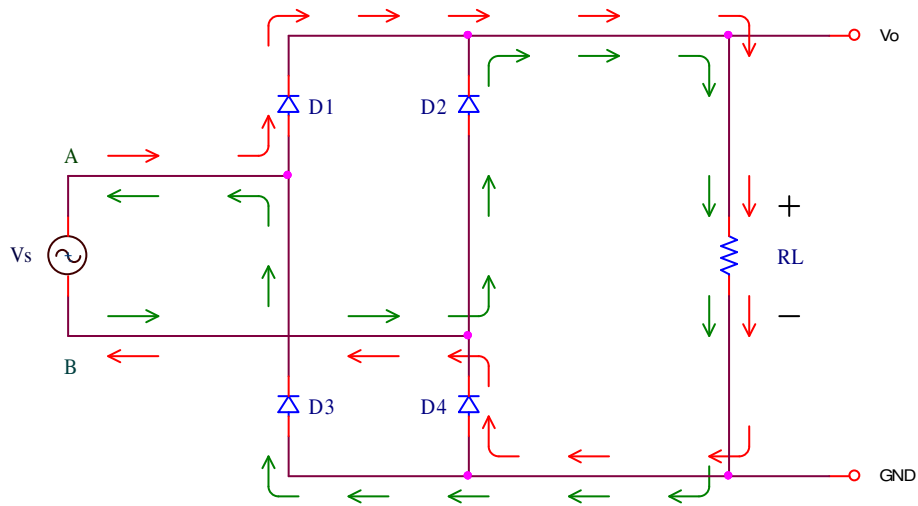
لذا دیود D2 هدایت می کند (سوئیچ بسته) و D1 قطع است (سوئیچ باز). بنابراین این در هر نیم پریود یکی از دیودها مانند یکسو ساز نیم موج عمل کرده در یک پریود کامل، دو نیم موج یکسو شده داریم. در این حالت چون انرژی تمام موج به خروجی منتقل میشود، یکسو کننده را تمام موج، نامند.

در شکل ۴-۳۱ نمودار زمانی ولتاژهای منبع و خروجی و جریان های گذرنده از دیودها نمایش داده شده است. در نمودار بالایی، شکل موج ولتاژهای ثانویه ترانس رسم شده اند. در این نمودار Vs1 با رنگ سبز و Vs2 با رنگ قرمز نمایش داده شده است. در نمودار وسطی، شکل موج جریان های گذرنده از دیودها رسم شده اند. در این نمودار جریان گذرنده از دیود D1 (I(D1)) با رنگ سبز و جریان گذرنده از D2 با رنگ قرمز نمایش داده شده است. بالاخره نمودار پایینی شکل موج ولتاژ خروجی به عبارت دیگر ولتاژ دو سر مقاومت بار (R_L) را نمایش می دهد.



شکل ۴-۳۱ نمودارهای زمانی مدار شکل ۴-۳۰ بالا: ولتاژ منابع، وسط: جریان های گذرنده از دیودها و پایین: ولتاژ خروجی

در جایی که ترانس با دو ثانویه مشابه در اختیار نیست، یا به دلایلی نمی‌خواهیم از ترانس استفاده کنیم، مدار شکل ۴-۳۲ - که به مدار یکسو ساز پل تمام موج^۱ مشهور است - به کار می‌رود. در این مدار از چهار عدد دیود که به صورت یک پل به هم بسته شده‌اند، استفاده شده است.



شکل ۴-۳۲ پل یکسو ساز

نحوه کار کرد مدار از این قرار است:

در نیم پریود مثبت، یعنی هنگامی که $v_A > v_B$ است، جریان از گره بالایی منبع ولتاژ (گره A) خارج شده به سمت دو دیود D1 و D3 می‌رود (فلش‌های قرمز در شکل ۴-۳۲). در این حالت D1 در جهت مستقیم (سوئیچ وصل) و D3 در جهت معکوس (سوئیچ قطع) قرار دارند، لذا جریان از طریق D1 و مقاومت بار (R_L) به سمت آندهای دیودهای D3 و D4 می‌رود. به علت این که ولتاژ کاتد D3 نسبت به آند آن مثبت است، این دیود قطع بوده جریان از طریق D4 به گره پایینی منبع ولتاژ (گره B) بر می‌گردد.

¹ FWRF: Full-Wave Bridge Rectifier

در نیم پریود منفی، یعنی هنگامی که $v_A < v_B$ است، جریان از گره B خارج

شده، مانند حالت قبل، از طریق D2، RL و D3 به گره A بر می‌گردد (فلش‌های سبز

در شکل ۴-۳۲).

چنان که مشاهده می‌شود، جریان در مسیر منبع متناوب ولی در مسیر بار یکسو شده است.

شکل موج‌های این مدار مشابه شکل موج‌های نمایش داده شده در شکل ۴-۳۱ می‌باشند.

• فیلتر

همان طور که در شکل موج یکسو سازها مشاهده می‌شود، با وجود این که ولتاژ خروجی، یک

ولتاژ یک طرفه است، ولی مقدار لحظه ای آن ثابت نیست. بنا به تعریف مقدار ولتاژ یکسو شده

معادل است با مقدار متوسط آن ولتاژ. این مقدار برای یک ولتاژ سینوسی یکسو شده نیمه موج برابر

است با:

$$V_{DC} = \frac{V_P - V_\gamma}{\pi} \approx \frac{V_P}{\pi} \quad (۴-۲۶)$$

برای تمام موج با سر وسط:

$$V_{DC} = 2 \cdot \frac{V_P - V_\gamma}{\pi} \approx \frac{2 \cdot V_P}{\pi} \quad (۴-۲۷)$$

و برای پل:

$$V_{DC} = 2 \cdot \frac{V_P - 2 \cdot V_\gamma}{\pi} \approx \frac{2 \cdot V_P}{\pi} \quad (۴-۲۸)$$

در این روابط V_{DC} مقدار متوسط ولتاژ خروجی، V_P دامنه ولتاژ ورودی و V_γ ولتاژ آستانه هر

دیود است. بنابراین برای مثال با فرض این که یک ولتاژ سینوسی ۲۴ ولتی به ورودی یکسو کننده

اعمال شود، مقدار ولتاژ یکسو شده برای یکسو سازهای مختلف طبق روابط (۴-۲۶) تا (۴-۲۸) به ترتیب حدوداً برابر خواهد بود با: ۶،۱۰، ۲،۲۱ و ۸،۲۰ ولت (چرا؟).

برای خیلی از دستگاه‌های الکترونیکی ثبوت نسبی ولتاژ مهم است. مثلاً یک رادیو که با ولتاژ نامی ۹ ولت کار می‌کند، ممکن است در محدوده ولتاژی ۶ تا ۱۲ ولت کار خود را درست انجام دهد. حال فرض کنیم بخواهیم این رادیو را به کمک یکسو کننده نیم موج (مدار شکل ۴-۲۸) تغذیه کنیم. طبق مثال فوق ولتاژ ۶،۱۰ ولت برای این منظور مناسب است. ولی با وجود این که مقدار متوسط خروجی این یکسو ساز خواسته ما را برآورده می‌سازد، مقدار لحظه ای ولتاژ (طبق شکل ۴-۲۹) در هر ثانیه ۵۰ بار بین صفر تا حدوداً ۳۳ ولت تغییر می‌کند. در زمان‌هایی که ولتاژ زیر ۶ ولت است، رادیو قطع می‌شود. بعد از آن صدا به تدریج بلند می‌شود. در صورتی که ۳۳ ولت باعث معیوب شدن رادیو نگردد، صدا بسیار بلند می‌شود، و پس از آن صدا کم می‌شود تا دو باره قطع شود! این عمل متناوباً ۵۰ بار در ثانیه تکرار می‌شود. اثر این امر به این گونه ظاهر می‌گردد که، بجای شنیدن صدای رادیو، صدای ۵۰ هرتز برق شهر را به طرز ناخوش آیندی میشنویم. برای برطرف کردن این اشکال، یعنی حذف - یا حداقل کاهش - تغییرات ولتاژ، از فیلترها^۱ استفاده می‌شود. فیلترها مدارهایی هستند که از یک طیف فرکانسی، قسمتی را جدا می‌کنند^۲. بنابراین نیاز به فیلتری است که مؤلفه ثابت ولتاژ (DC، 0Hz) را عبور دهد و مؤلفه‌های متغیر ولتاژ (AC، 50Hz)^۳ را تضعیف نماید. این نوع فیلتر "پایین گذر"^۴ نام دارد. از فیلترهای متداول

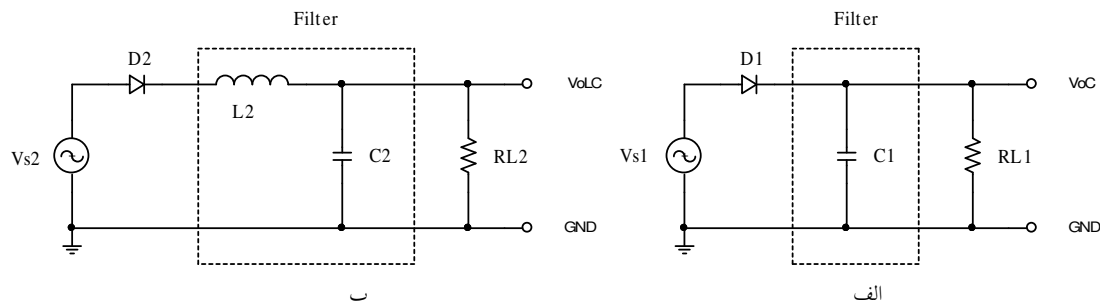
^۱ صافی، Filter

^۲ ر. ک. به فصل ۱-۴

^۳ البته بغیر از ۵۰ هرتز، هارمونی‌های آن یعنی: ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ ... هرتز نیز وجود دارند (ر. ک. به فصل ۱-۴) که فیلتر آن‌ها را هم تضعیف می‌کند.

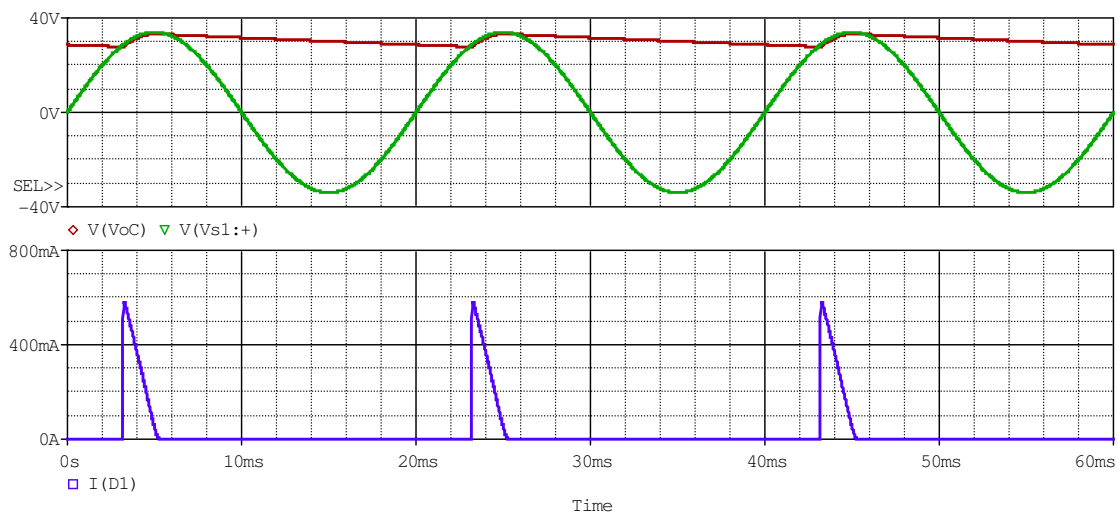
^۴ LPF: Low-Pass Filter

می‌توان فیلترهای (C) و LC را نام برد که اولی بسیار متداول‌تر است. در شکل ۳۳-۴ مدارهای یکسو ساز با فیلتر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳۳-۴ مدار یکسو کننده نیم موج با فیلتر: الف- C و ب- LC

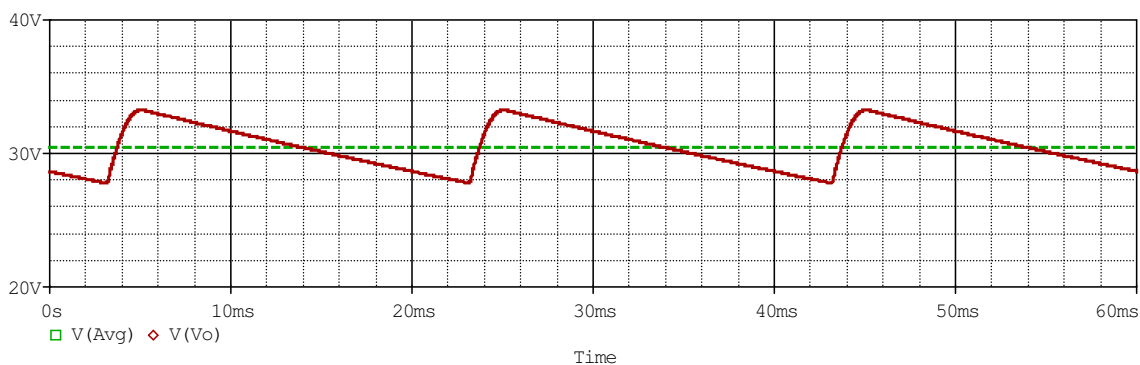
در شکل ۳۴-۴ نمودارهای زمانی مدار شکل ۳۳-۴ الف نمایش داده شده‌اند. ولتاژ ورودی با دامنه حدود ۳۴ ولت با رنگ سبز نمایش داده شده است. هنگامی که ولتاژ ورودی به حداکثر مقدار خود (۳۴ ولت) می‌رسد، ولتاژ دو سر خازن بعبارت دیگر ولتاژ خروجی - که با رنگ قرمز نمایش داده شده است - به اندازه افت ولتاژ دو سر دیود از آن کمتر می‌باشد، یعنی حدوداً ۳۳,۳ ولت. با کم شدن ولتاژ ورودی - بعلت بار ذخیره شده در خازن- ولتاژ خروجی کمتر افت می‌کند، در نتیجه ولتاژ آند دیود از ولتاژ کاتدش کمتر شده دیود قطع می‌شود. جریان دیود (نمودار آبی رنگ) تا زمانی صفر باقی می‌ماند که ولتاژ خروجی از ورودی بیشتر است. پس از گذشت زمان نزدیک به یک پریود، ولتاژ خازن بتدریج افت کرده و ولتاژ ورودی افزایش یافته، این دو به هم میرسند. هنگامی که ولتاژ ورودی به اندازه ولتاژ آستانه دیود از ولتاژ خروجی بیشتر شد، دیود وصل شده، ولتاژ خروجی ولتاژ ورودی را دنبال می‌کند ($V_O \approx V_S$). در این مدت خازن دوباره شارژ شده، به هنگام قطع بودن دیود انرژی خروجی را تأمین می‌کند.



شکل ۴-۳۴ شکل موج‌های یکسو کننده نیم موج با فیلتر خازنی: بالا- سبز، ولتاژ ورودی، قرمز، ولتاژ خروجی، پایین- جریان دیود

به تغییرات ولتاژ خروجی ریپل^۱ گویند. در شکل ۴-۳۵ ولتاژ تضاریس (قرمز) بزرگتر نمایش

داده شده است. خط سبز مبین مقدار متوسط ولتاژ خروجی است.



شکل ۴-۳۵ نمودار زمانی ولتاژ خروجی مدار شکل ۴-۳۳ الف، قرمز: مقدار لحظه ای، سبز مقدار متوسط

تضاریس و مقدار متوسط ولتاژ خروجی از روابط (۴-۲۷) و (۴-۲۸) بدست می‌آیند.

$$V_{r_{PP}} \approx \frac{V_{S_P} - V_{\gamma}}{R \cdot C \cdot f_o + 0.5} \approx \frac{V_{S_P}}{R \cdot C \cdot f_o} \quad (۴-۲۷)$$

^۱ تضاریس، Ripple

$$V_{O_{Avg}} \approx V_{sP} - V_{\gamma} - \frac{V_{rPP}}{2} \quad (28-4)$$

در این روابط: دامنه تغییرات ولتاژ خروجی، V_{sP} دامنه ولتاژ ورودی، V_{γ} ولتاژ آستانه دیود، R مقاومت بار، C ظرفیت خازن و f_o فرکانس تضاریس خروجی است. برای برق شهر در ایران، برای یکسو ساز نیم موج $f_o = 50Hz$ و برای یکسو ساز تمام موج $f_o = 100Hz$ است (چرا؟).

بنابراین با افزودن یک خازن به مدار، تضاریس کم و مقدار متوسط ولتاژ خروجی زیاد میشود. چنان که از روابط فوق بر می آید، برای یک مدار مشخص، V_{sP} ، V_{γ} ، C و f_o مقادیر ثابتی هستند و مقادیر تضاریس و متوسط ولتاژ خروجی تابعی از مقاومت بار بعبارت دیگر جریان خروجی هستند. در صورتی که از خروجی جریانی کشیده نشود ($R_L \rightarrow \infty$) ولتاژ خروجی برابر با دامنه ولتاژ ورودی و ریپل آن صفر خواهد بود. با افزایش جریان خروجی، ولتاژ خروجی کم و تضاریس آن زیاد خواهد شد.

مثال ۴-۳: فرض کنیم برای رادیوی مثال فوق میخواهیم یک منبع تغذیه بسازیم. اگر برای این منظور از یک پل دیودی (مدار شکل ۴-۳۲) و یک خازن ۱۰۰۰ میکرو فاراد استفاده کنیم، با انتخاب یک ترانس $9V : 220V$ دامنه ولتاژ ثانویه آن $V_{sP} = 9 \times \sqrt{2} \approx 12.7V$ بنابراین در حالت بی باری حداکثر ولتاژ خروجی تقریباً برابر این مقدار است. با فرض این که جریان خروجی یکسو کننده - متناظر با صدای رادیو- بین حدود ده تا صد میلی آمپر تغییر کند، طبق روابط (۴-۲۷) و (۴-۲۸)، مقدار متوسط خروجی و ریپل آن برابر خواهند بود با:

$$a: I = 10mA \rightarrow R \approx 1.1k\Omega, \quad V_{r_{PP}} \approx \frac{V_{s_p} - V_\gamma}{R.C.f_o + 0.5} \approx \frac{12.7V - 2 \times 0.7V}{1.1k\Omega \times 1000\mu F \times 100Hz + 0.5} \approx 100mV$$

$$V_{o_{Avg}} \approx V_{o_p} - V_\gamma - 0.5V_{r_{PP}} \approx 12.7V - 2 \times 0.7V - 0.5 \times 100mV \approx 11.3V$$

$$b: I = 100mA \rightarrow R \approx 110\Omega, \quad V_{r_{PP}} \approx \frac{V_{s_p} - V_\gamma}{R.C.f_o + 0.5} \approx \frac{12.7V - 2 \times 0.7V}{110\Omega \times 1000\mu F \times 100Hz + 0.5} \approx 1V$$

$$V_{o_{Avg}} \approx V_{s_p} - V_\gamma - 0.5V_{r_{PP}} \approx 12.7V - 2 \times 0.7V - 0.5 \times 1V \approx 10.8V$$

بنابراین اضافه کردن یک خازن مناسب در مدار باعث می شود که ولتاژ خروجی در محدوده:

$$V_o = 10.3 \dots 11.3V \text{ قرار بگیرد، که برای رادیوی مثال ذکر شده کاملاً مناسب است.}$$

• مشخصات یکسو کننده ها

مشخصاتی که از یکسو کننده ها باید بدست آوریم عبارتند از: حداکثر ولتاژی که دو سر دیود می افتد، حداکثر جریان گذرنده از آن، حداکثر افت ولتاژ دو سر خازن، ولتاژ متوسط خروجی و ریپل آن.

حداکثر افت ولتاژ بر روی دیود در جهت معکوس، باید کمتر از ولتاژ شکست آن باشد. حداکثر ولتاژ معکوس دیود در یکسو کننده های نیم موج و تمام موج با سر وسط، تقریباً دو برابر دامنه ولتاژ ورودی، و برای یکسو کننده با پل دیودی تقریباً برابر دامنه ولتاژ ورودی است (چرا؟). حداکثر ولتاژ دو سر خازن در تمام حالات برابر دامنه ولتاژ ورودی می باشد.

در حالت عادی، هنگامی که از ولتاژ یا جریان سخن به میان می‌آید، منظور مقدار مؤثر^۱ آنها

است. که برای شکل موج‌های سینوسی این مقدار حدوداً ۰,۷ برابر دامنه است. بنا به تعریف:

$$V_{eff} \equiv V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v(t))^2 dt} \quad (۲۹-۴)$$

مقدار DC یک متغیر، میانگین^۲ آن است. بنا به تعریف:

$$V_{Avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (۳۰-۴)$$

که در این روابط t زمان، $v(t)$ ولتاژ متناوب، V_{RMS} مقدار مؤثر، V_{Avg} مقدار متوسط و T زمان

تناوب آن است. بنابراین برای یک ولتاژ سینوسی با دامنه V_P :

$$v(t) = V_P \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow V_{RMS} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}, \quad V_{Avg} = 0$$

و برای ولتاژهای یکسو شده:

$$HWR: V_{Avg} = \frac{V_P}{\pi}, \quad V_{RMS} = \frac{V_P}{2} \quad FWR: V_{Avg} = \frac{2V_P}{\pi}, \quad V_{RMS} = \frac{\sqrt{2} V_P}{2}$$

بنابراین وقتی مقدار ولتاژ سینوسی معلوم است، برای انتخاب دیودها و خازن، ولتاژ مجاز آنها

از: $V_P = \sqrt{2} V_{RMS} \approx 1.4 V_{RMS}$ بدست می‌آید.

جریان متوسط دیودها با جریان متوسط خروجی (مقاومت بار) برابر است (چرا؟).

توان تلف شده بر روی دیودها برابر است با: $P_D \approx I_{D_{Avg}} \times V_\gamma$ و توان تلف شده بر روی خازن

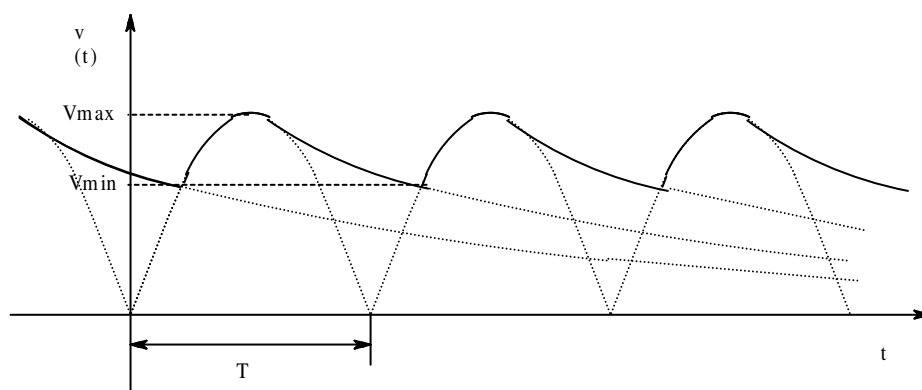
صفر است (چرا؟).

برای محاسبه تضاریس به این ترتیب عمل می‌کنیم: با توجه به شکل‌های ۴-۲۸ و ۴-۲۹، ولتاژ

لحظه ای ریپل، هنگامی که دیود وصل می‌باشد، برابر است با ولتاژ ورودی (منهای ولتاژ آستانه

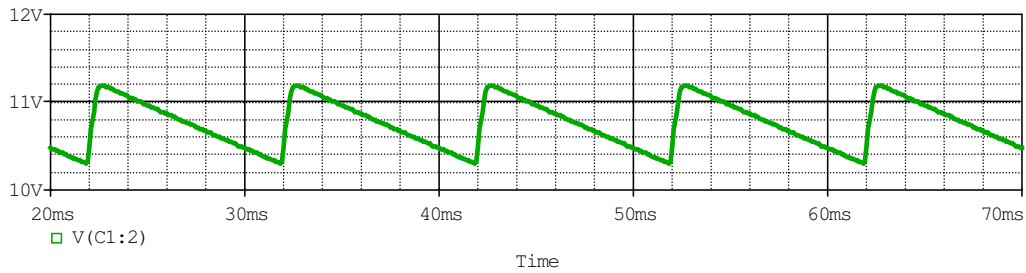
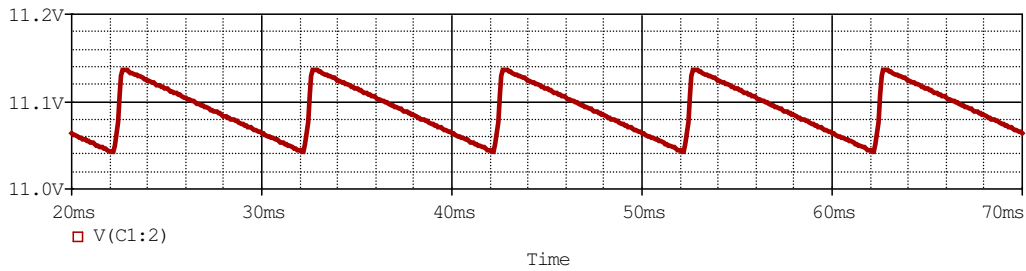
¹ eff: Effective, RMS: Root Mean Square
² Avg: Average

دیود)؛ و هنگامی که دیود قطع می باشد، برابر است با یک تابع نمایی که مبین تخلیه خازن بر روی مقاومت بار (با ثابت زمانی $\tau = C \cdot R_L$) می باشد. بنابراین تغییرات ولتاژ خروجی، به عبارت دیگر، دامنه ولتاژ ریپل، اختلاف دو ولتاژ: $V_{\max} = V_p - V_\gamma$ و V_{\min} که محل تلاقی دو ولتاژ سینوسی و نمایی است، می باشد.



شکل ۴-۳۶ نحوه بدست آوردن ولتاژ ریپل

با توجه به این که معادله ای که شامل اجزای نمایی و سینوسی است، به کمک روش های تحلیلی به سادگی قابل حل نمی باشد، اکثراً آنها را از روش های تقریبی حل می کنند. با توجه به این که مقدار ریپل هر قدر کمتر باشد بهتر است در عمل سعی می شود $V_{rpp} \leq 0.1V_{\max}$ گردد. به مثال ۴-۳ در مورد منبع تغذیه رادیو توجه کنید؛ $V_{\max} \approx 11V$ و به ازای جریان رادیو $I \approx 100mA$ ولتاژ تضاریس $V_{rpp} \approx 1V$ و حتی به ازای $I \approx 10mA$ ، $V_{rpp} \approx 100mV$ محاسبه شده است. نمودار تضاریس این منبع تغذیه در شکل ۴-۳۷ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۳۷ نمودار ریپل مدار مثال ۴-۳ بالا: $I = 10\text{mA}$ ، پایین: $I = 100\text{mA}$

همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، فرم‌های سینوسی و نمایی شکل ۴-۳۶ به خوبی دیده نمی‌شوند. دلیل این امر این است که: هر قدر تغییرات یک متغیر بر روی یک منحنی کمتر باشد، آن قسمت از منحنی به یک خط راست نزدیکتر می‌شود. به همین دلیل در خیلی از موارد، برای ساده شدن حل معادلات غیر خطی، از تقریب خطی استفاده می‌کنند.

با بهره‌گیری از مطالب فوق ولتاژ ریپل را می‌توان طبق استدلال زیر بدست آورد. شکل ۴-۳۸ شکل ساده، به عبارت دیگر کاملاً خطی شده‌ی شکل ۴-۳۶ می‌باشد.

زمان شارژ خازن بسیار کوتاه است (چرا)، در نتیجه $Te \approx T$ از طرف دیگر

$$V_{rpp} = V_{\max} - V_{\min} = \Delta V \quad \text{و برای تغییر بار خازن داریم:}$$

$$C \cdot \Delta V = I \cdot \Delta t \quad (۴-۳۱)$$

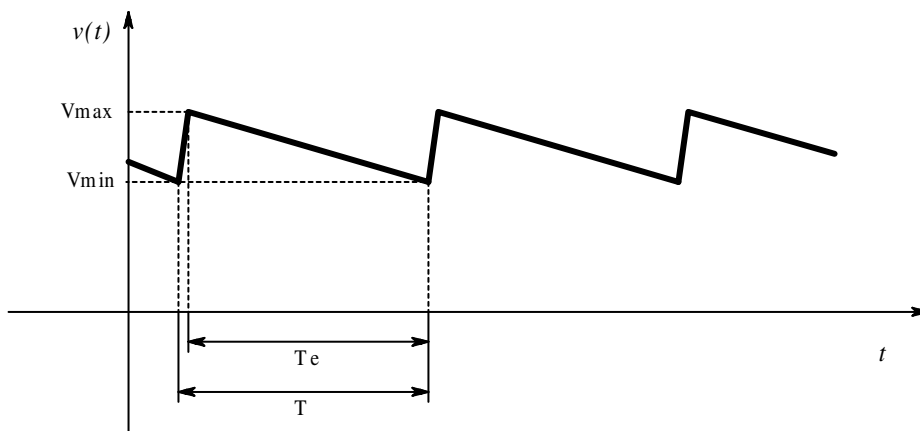
$$\Delta t = Te \approx T, \quad T = \frac{1}{f_o}, \quad \Delta V = V_{rpp}, \quad I \approx \frac{V_{oDC}}{R_L}$$

$$V_{r_{PP}} \approx \frac{I \cdot T}{C} = \frac{I}{C \cdot f_o} \approx \frac{V_{o_{DC}}}{R_L \cdot C \cdot f_o} \quad (32-4)$$

$$V_{O_{DC}} = V_{max} - \frac{V_{r_{PP}}}{2} \quad (33-4)$$

با جانشینی (33-4) در (32-4):

$$V_{r_{PP}} \approx \frac{V_{max}}{R_L \cdot C \cdot f_o + 0.5} \approx \frac{V_{max}}{R_L \cdot C \cdot f_o} \quad (34-4)$$



شکل ۳۸-۴ نحوه بدست آوردن ولتاژ ریپل به روش خطی سازی

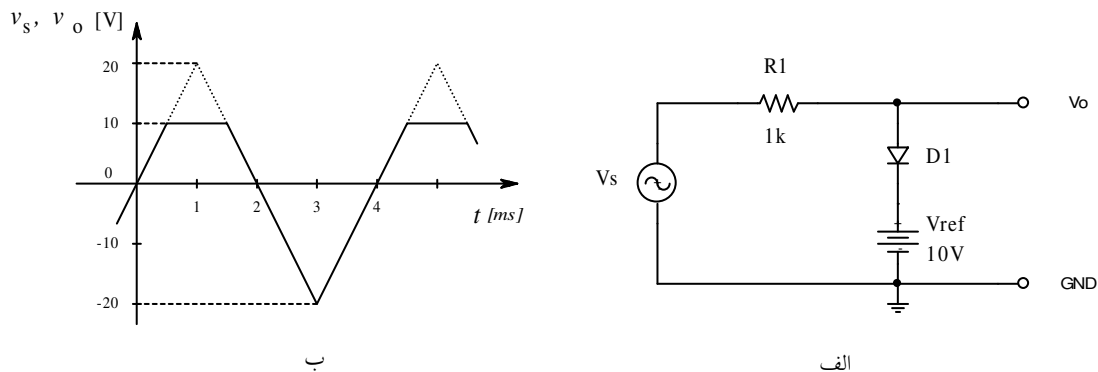
در جدول ۲-۴ خلاصه مطالب فوق منعکس شده است.

جدول ۲-۴ مشخصات یکسو کننده ها

ردیف	مشخصات	تمام موج پل دیودی	تمام موج سر وسط	نیم موج
۱	V_{max}	$V_{SP} - 2 V_{\gamma}$	$V_{SP} - V_{\gamma}$	$V_{SP} - V_{\gamma}$
۲	$V_C (max)$	V_{max}	V_{max}	V_{max}
۳	$V_D (max)$	V_{SP}	$2 V_{SP}$	$2 V_{SP}$
۴	$I_D (DC)$	$I_o / 2$	$I_o / 2$	I_o
۵	f_o (ایران)	100Hz	100Hz	50Hz
۶	$V_{r_{PP}}$	$V_{max} / R_L C f_o$	$V_{max} / R_L C f_o$	$V_{max} / R_L C f_o$
۷	$V_{O_{DC}}$	$V_{max} - V_{r_{PP}} / 2$	$V_{max} - V_{r_{PP}} / 2$	$V_{max} - V_{r_{PP}} / 2$

۴-۶-۲-۳ محدود کننده ها

مدار شکل ۴-۳۹ الف را در نظر بگیرید. اگر $v_s < V_{ref} + V_\gamma$ باشد، $D1$ قطع بوده، جریان گذرنده از مقاومت، $i(R1) \approx 0$ بوده $v_o \approx v_s$ می شود. به ازای $v_s \geq V_{ref} + V_\gamma$ دیود وصل بوده $v_o \approx V_{ref} + V_\gamma \approx Const$. بنابراین اگر ولتاژ ورودی از حدی بیشتر شد، ولتاژ خروجی به یک مقدار مشخص "محدود" می شود. به همین دلیل به این مدار یک محدود کننده^۱ یا برش دهنده^۲ گویند (شکل موج سیگنال ورودی بصورت بریده شده در خروجی ظاهر می شود).



شکل ۴-۳۹ محدود کننده ولتاژ نامتقارن الف-مدار، ب-دیاگرام زمانی

مثال ۴-۴ با فرض این که در مدار شکل ۴-۳۹ الف، v_s یک ولتاژ مثلثی متقارن با فرکانس ۲۵۰ هرتز و دامنه ۲۰ ولت، و دیود ایده آل باشد، شکل موج های ورودی و خروجی را رسم نمایید.

حل: فرکانس ۲۵۰ هرتز معادل است با پریود ۴ میلی ثانیه. بنابراین ولتاژ ورودی به صورت خطی از صفر رشد می کند و در یک میلی ثانیه به ۲۰ ولت میرسد. پس از آن به صورت خطی کم می شود تا در ۲ میلی ثانیه به صفر و در ۳ میلی ثانیه به -۲۰ ولت میرسد و دوباره افزایش پیدا می کند تا در ۴ میلی ثانیه مجدداً به صفر برسد. این روند بطور متناوب ادامه دارد. چون دیود ایده آل

¹ Limiter
² Clipper

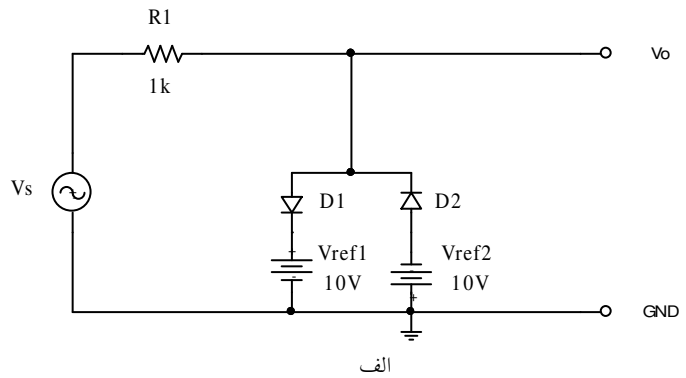
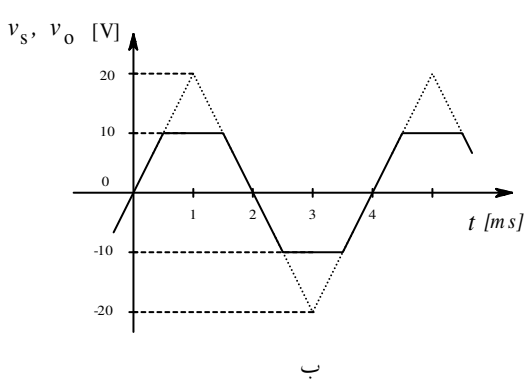
فرض شده است ($V_{\gamma} = 0, R_f = 0$)، برای ولتاژ ورودی کمتر از ده ولت، ولتاژ خروجی ورودی را دنبال می کند، و پس از آن ولتاژ خروجی به ده ولت محدود می شود (شکل ۴-۳۹ ب).

تذکر: برای شبیه سازی یک دیود ایده آل در *PSpice*، برای مدل دیود $n = 0.01$ قرار داده شود.

سؤال: اگر جهت دیود معکوس شود، چه تغییری در کارکرد مدار حاصل می شود؟ اگر ولتاژ مرجع معکوس شود، یا هر دو؛ ولتاژ خروجی چگونه خواهد بود؟

سؤال: آیا می توانید وابستگی ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی (نمودار رابطه $v_o = f(v_s)$) و وابستگی جریان ورودی به ولتاژ ورودی (نمودار رابطه $i_s = f(v_s)$) را رسم کنید؟

مثال ۴-۵ با مفروضات مثال ۴-۴ ولتاژ خروجی مدار شکل ۴-۴۰ الف را بدست آورید.

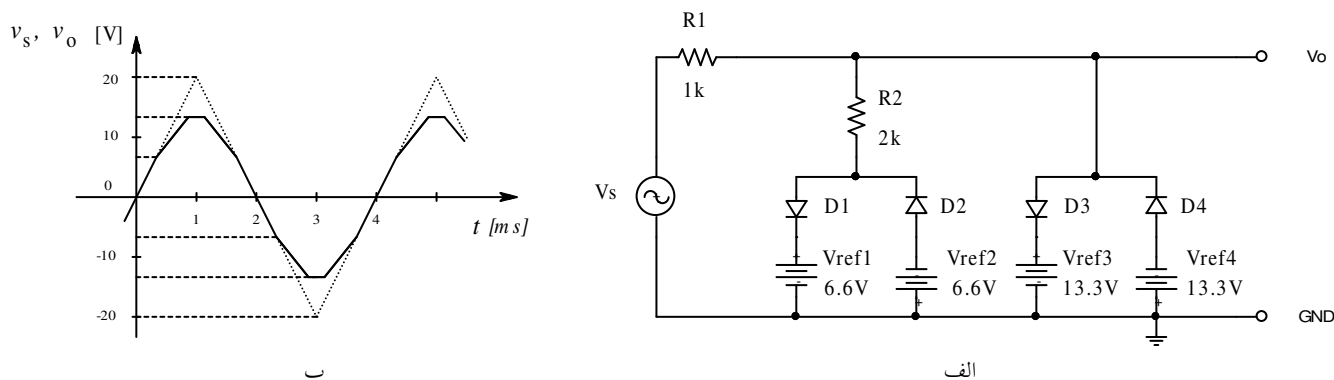


شکل ۴-۴۰ مدار مثال ۴-۵

حل: این مدار مانند مدار قبل عمل می کند، با این تفاوت که محدود کننده به صورت متقارن انجام می شود. در نیم پریود مثبت $D1$ و V_{ref1} ولتاژ خروجی را به ۱۰ ولت محدود می کنند و در نیم پریود منفی $D2$ و V_{ref2} ولتاژ خروجی را به -۱۰ ولت محدود می نمایند.

تذکر: یکی از کار بردهای این مدار، محافظت سیستم‌های الکترونیکی در مقابل ولتاژهای غیر مجاز میباشد. به همین دلیل گاهی به این مدارها "مدار محافظ" گویند. برای مثال اگر یک ولت متر داشته باشیم که در محدوده ده ولت قابل استفاده است، اگر اشتبهاً آن را به برق شهر وصل کنیم فوراً میسوزد. در صورتی که به کمک مدار فوق - با فرض طراحی صحیح - مدار ولت متر محافظت میشود. یا در سیستم‌های مخابراتی، که به واسطه داشتن سیم‌های بلند در فضای آزاد در معرض خطر صاعقه قرار دارند، ...

مثال ۶-۴ با مفروضات مثال ۴-۴ ولتاژ خروجی مدار شکل ۴-۴ الف را بدست آورید.



شکل ۴-۴ مدار مثال ۶-۴

حل: تفاوت این مدار با دو مدار قبل یکی در این است که دو محدود کننده متقارن با ولتاژهای حد متفاوت وجود دارد، دوم این که یک مقاومت (R_2) بین خروجی و یکی از محدود کننده ها وجود دارد. تا زمانی که ولتاژ منبع در محدوده $-6.6V < v_s < +6.6V$ قرار دارد، هر چهار دیود قطع بوده $v_o = v_s$. هنگامی که ولتاژ منبع به ± 6.6 ولت می‌رسد، $D1$ وصل شده شیب ولتاژ خروجی 0.66 برابر شیب ولتاژ ورودی می‌شود (چرا؟). پس از آن که ولتاژ منبع به حدود 15.5

ولت رسید، ولتاژ خروجی به ۱۳,۳ ولت محدود گشته با افزایش ولتاژ ورودی، خروجی تغییر نمی‌کند ($D1$ و $D3$ هر دو وصل). در نیم پریود منفی نیز قرینه حالت فوق (توسط $D2$ و $D4$) پیش می‌آید.

تذکر: مدار شکل ۴-۴۰ از یک شکل موج مثلثی یک شکل موج دوزنقه ای و مدار شکل ۴-۴۱ از یک شکل موج مثلثی یک شکل تقریباً سینوسی تولید می‌کند. به همین دلیل به این مدارها "فرم دهنده موج"^۱ نیز گویند. با اضافه کردن شاخه‌های بیشتر، میتوان به سینوسی‌های دقیق‌تر دست یافت. در ضمن لازم به یادآوری است، که چون مشخصه دیودهای واقعی منحنی هستند و نه پاره خطی، شکل موج‌ها به سینوسی نزدیک‌ترند. همچنین برای دیودهای واقعی می‌توان مانند دیودهای ایده‌آل عمل کرد، با این تفاوت که اثر ولتاژ آستانه دیود را بر روی ولتاژ مرجع، و اثر مقاومت دیود را بر روی مقاومت‌های مدار در نظر گرفت.

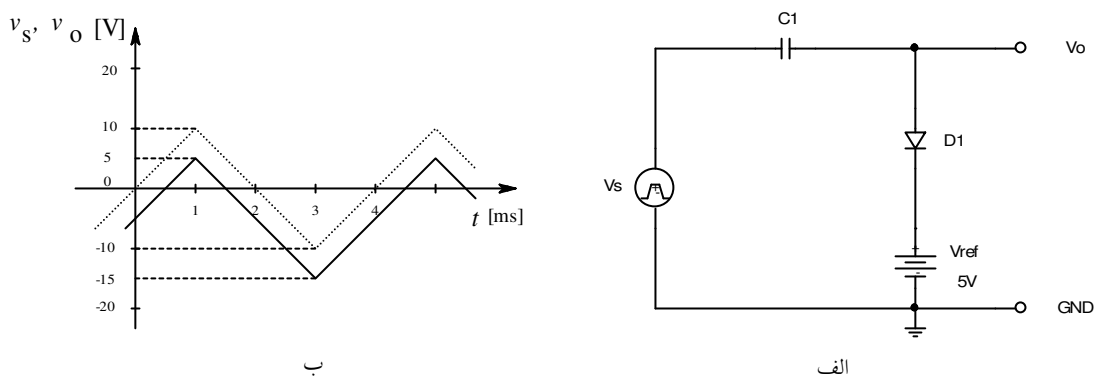
سؤال: اگر در مدار شکل ۴-۴۱ الف $R2 = 0$ باشد، شکل موج خروجی چگونه خواهد بود؟

۴-۶-۲-۴ مدارهای گیرشی

مدار شکل ۴-۴۲ الف را در نظر بگیرید. تا زمانی که $v_s - V_{C1} \leq V_{ref} + V_\gamma$ است، دیود قطع می‌باشد. و چون جریانی از خازن نمی‌گذرد، بار خازن به عبارت دیگر ولتاژ دو سر آن ثابت می‌ماند. اگر بخواهد $v_s - V_{C1} \geq V_{ref} + V_\gamma$ شود، دیود وصل شده، $v_o = V_{ref} + V_\gamma$ مقدار ثابتی باقی می‌ماند. در این حالت جریان حلقه، خازن را تا $V_{C1} = V_{sp} - (V_{ref} + V_\gamma)$ شارژ می‌کند. پس از آن چون خازن پر شده است - در صورتی که مقاومتی در مدار قرار نداشته باشد، که خازن را تخلیه کند- جریان حلقه صفر بوده، ولتاژ دو سر خازن ثابت باقی می‌ماند. صفر بودن جریان حلقه مترادف

¹ Wave-Shaper

است با قطع بودن دیود، یعنی مانند آن است که شاخه دیود- ولتاژ مرجع اصلاً در مدار وجود ندارد! (پس خاصیت وجود این دو عنصر در چیست؟). در این صورت ولتاژ خروجی ولتاژ ورودی را، با اختلاف ولتاژ دو سر خازن، دنبال می کند $(v_o = v_s - V_{C1})$. یعنی این که حداکثر ولتاژ خروجی به مقدار $V_{ref} + V_\gamma$ "گیر" کرده است. به همین دلیل به این مدارها مدار گیرشی^۱ یا میخکوب کننده گویند.



شکل ۴-۴ مدار گیرشی الف- شماتیک، ب- نمودار زمانی (خط چین: ورودی، پر خروجی)

تذکر: برای این که مدار کار کند، باید $V_{s_p} > V_{ref} + V_\gamma$ باشد! (چرا؟).

سؤال: اگر جهت دیود، یا جهت ولتاژ مرجع، یا هر دو، عوض شود؛ چه تغییری در طرز کار

مدار رخ می دهد؟

مثال ۷-۴ ولتاژ ورودی در شکل ۴-۴ الف یک ولتاژ مثلثی با دامنه ده ولت و پریود ۴ میلی

ثانیه فرض می شود. شکل موج های ولتاژهای ورودی و خروجی را با فرض ایده آل بودن عناصر،

رسم کنید.

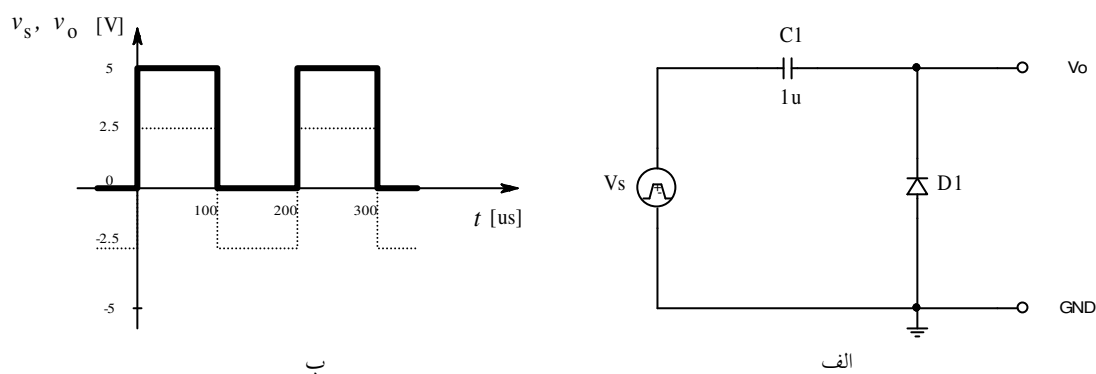
¹ Clipper

حل: چون دیود ایده‌آل فرض شده است، $V_{\gamma} = 0$ و در نتیجه $v_{o_{max}} = V_{ref} = 5V$ ، لذا مقدار

ماکزیمم ولتاژ خروجی به ۵ ولت "گیر" کرده، شکل موج - بدون تغییر فرم- به اندازه ۵ ولت به پایین منتقل می‌شود. به همین دلیل، گاهی به این مدار "منتقل کننده سطح"^۱ نیز گویند.

مثال ۴-۸ ولتاژ ورودی در مدار شکل ۴-۳ الف یک ولتاژ مربعی متقارن با دامنه ۲,۵ ولت و

پریود ۲۰۰ میکرو ثانیه فرض می‌شود. شکل موج‌های ولتاژهای ورودی و خروجی را با فرض ایده‌آل بودن عناصر، رسم کنید.



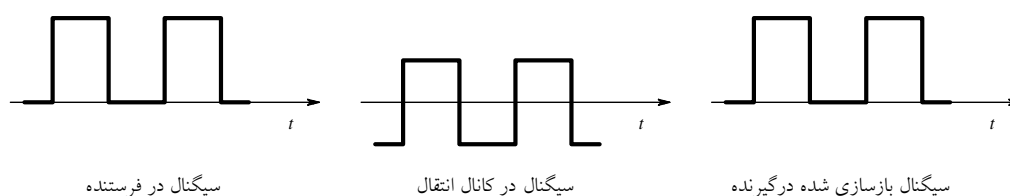
شکل ۴-۳ الف- شماتیک ب- نمودار زمانی، خط چین ورودی، پر: خروجی

حل: بنا به تعریف یک موج متقارن شکلی است که نسبت به مبدا مختصات تقارن داشته باشد.

دامنه ولتاژ ورودی ۲,۵ ولت و پریود آن ۲۰۰ میکرو ثانیه است، بنابراین ولتاژ ورودی بمدت ۱۰۰ میکرو ثانیه ۲,۵ ولت و بمدت ۱۰۰ میکرو ثانیه دیگر ۲,۵- ولت بوده هر ۲۰۰ میکرو ثانیه یک بار تکرار می‌شود (نمودار خط چین در شکل ۴-۳ ب). مدار شکل ۴-۳ الف یک مدار گیرشی با ولتاژ مرجع صفر است. بنابراین ولتاژ خازن تا دامنه ورودی - یعنی ۲,۵ ولت- شارژ می‌شود. یعنی ولتاژ ورودی به این اندازه به بالا منتقل شده در خروجی ظاهر می‌شود. در نتیجه ولتاژ خروجی یک

¹ Level-Shifter

ولتاژ مربعی (نامتقارن) با دامنه ۵ ولت خواهد بود (به مدت ۱۰۰ میکرو ثانیه ۵ ولت، به مدت ۱۰۰ میکرو ثانیه دیگر صفر ولت). ولتاژ خروجی در شکل ۴-۴۳ ب با خط پر نمایش داده شده است. بعضی از سیگنال‌ها نظیر سیگنال‌های متداول دیجیتال^۱ دارای سطوح ولتاژ فقط مثبت هستند (برای مثال صفر و پنج ولت). در برخی از موارد، بدلالی، برای انتقال اطلاعات مؤلفه DC آن را در فرستنده حذف می‌کنند. در گیرنده باید سیگنال به حالت اولیه خود باز گردانیده شود یعنی مؤلفه DC به آن باز گردانیده شود. این کار را می‌توان به کمک مدار شکل ۴-۴۳ الف انجام داد. به همین دلیل گاهی به این مدار، "باز یابنده DC"^۲ نیز گفته می‌شود. شکل ۴-۴۴ مطلب فوق را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۴۴ انتقال یک سیگنال دیجیتال و باز سازی آن

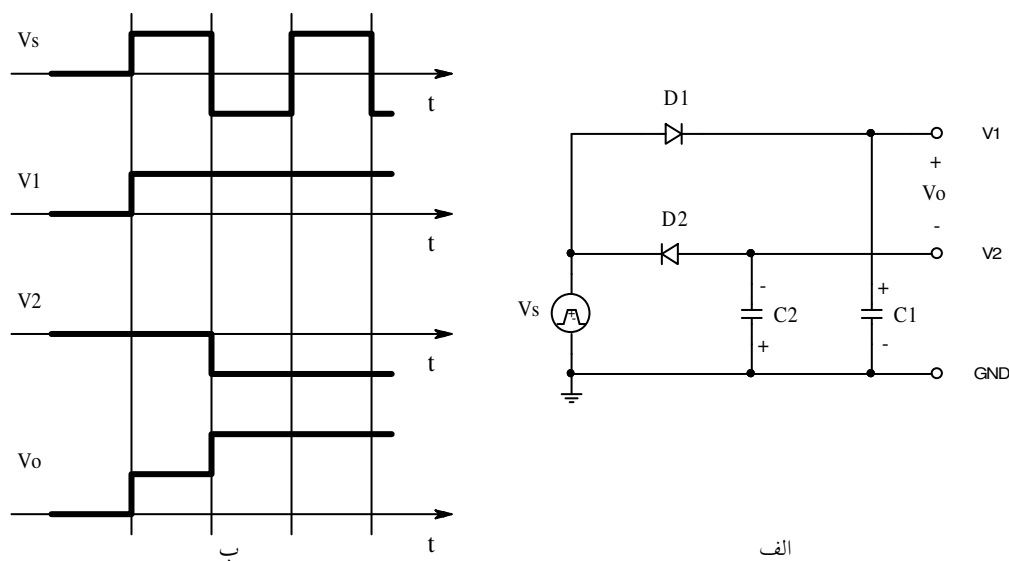
۴-۶-۲-۵ چند برابر کننده های ولتاژ

گاهی اوقات در مدارها یا سیستم‌های الکترونیکی لازم است از یک ولتاژ مشخص که در اختیار است به یک ولتاژ بیشتر، یا از یک ولتاژ مثبت به یک ولتاژ منفی، یا ... دست یابیم. مثلاً تغذیه یک سیستم توسط چهار عدد باتری قلمی (۶ ولت) تأمین میشود ولی برای بعضی از قسمت‌های مدار نیاز به ولتاژهای ۱۲ ولت و ۱۲- ولت نیز هست. اگر بخواهیم این ولتاژها را به کمک باطری تأمین کنیم، به ۸ عدد باتری برای ولتاژ ۱۲+ ولت و ۸ عدد باتری برای ولتاژ ۱۲- ولت نیاز داریم که

^۱ ر. ک. به فصل ۷ درس اصول مهندسی برق
^۲ DC-Restorer

مجموعاً می‌شود ۲۰ عدد باطری، که در حالت کلی راه حلی غیر منطقی است (چرا؟). در چنین مواردی، راه حل کلی این است که ولتاژ DC را توسط نوسان ساز^۱ تبدیل به ولتاژ AC می‌کنند. سپس این ولتاژ به اولیه یک ترانسفورماتور که دارای چند ثانویه است اعمال می‌شود. هر کدام از ثانویه‌ها به کمک مدار یکسو ساز مناسب، ولتاژ مطلوب را تولید می‌نمایند. در برخی از موارد میتوان بدون استفاده از ترانسفورماتور عمل تبدیل ولتاژ را انجام داد. شکل های ۴-۴۵ تا ۴-۴۸ مدارهایی را برای این منظور نمایش میدهند. بعلت این که تولید ولتاژ مربعی به کمک مدارهای الکترونیکی، ساده‌تر از تولید ولتاژ سینوسی است، در عمل تقریباً همیشه از ولتاژ مربعی برای تبدیل ولتاژ استفاده می‌شود. نحوه کار کرد مدارها و بررسی آنها مستقل از شکل موج است.

تذکر: در بررسی‌های زیر - به جهت سادگی - دیودها ایده‌آل ($V_f = 0$) در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۴-۴۵ مدار دو برابر کننده ولتاژ الف- شماتیک ب- نمودارهای زمانی

^۱ Oscillator ر. ک. به درس اصول الکترونیک یا مراجع مربوطه

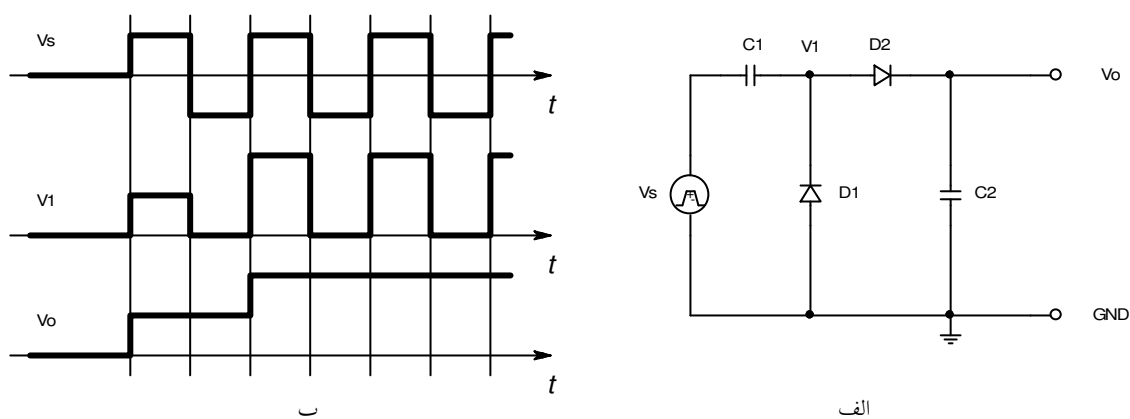
شکل ۴-۴۵ الف یک دو برابر کننده ولتاژ را نمایش می دهد. این مدار از دو یکسو ساز نیم موج با فیلتر خازنی^۱ و بدون مقاومت بار، تشکیل شده است. یکسو ساز اول ($C1, D1$) خروجی $V1 = +V_{sp}$ و یکسو ساز دوم ($C2, D2$) خروجی $V2 = -V_{sp}$ را تولید می کند، لذا: $V_o = V1 - V2 = 2V_{sp}$ ، یعنی ولتاژ خروجی یک ولتاژ یکسو شده ی دو برابر دامنه ورودی است. عیب این مدار در این است که ولتاژ خروجی نسبت به زمین سنجیده نمی شود، یعنی هیچ کدام از سرهای خروجی زمین نیستند. در این حالت اصطلاحاً گویند ولتاژ خروجی شناور^۲ است. نمودارهای زمانی مدار، در شکل ۴-۴۵ ب نمایش داده شده است.

طرز کار مدار به این ترتیب است: با فرض این که از زمان $t = -\infty$ تا صفر سیستم در حال آرامش باشد - یعنی کلیه ولتاژها و جریان ها صفر است- و در لحظه $t = 0$ ولتاژ منبع به ورودی اعمال شود. در حالت کلی - یعنی به ازای هر شکل موج دلخواه- در نیم پریود مثبت $D1$ وصل بوده، $v_1 = v_{C1} = v_S$ می باشد. این امر تا زمانی ادامه دارد که v_S بخواهد از مقدار ماکزیمم خود کمتر شود. در این صورت بعلت بار ذخیره شده بر روی $C1$ ولتاژ خروجی از ورودی بیشتر بوده باعث قطع شدن $D1$ میگردد. چون مقاومت بار در مدار وجود ندارد، جریانی از خازن عبور نکرده و ولتاژ آن به مقدار ماکزیمم ولتاژ ورودی ثابت می ماند؛ یعنی: $V1 = +V_{sp}$. همین امر در نیم پریود منفی برای $D2, C2$ و $V2 = -V_{sp}$ اتفاق می افتد و $V2 = -V_{sp}$ ثابت باقی می ماند. بالاخره ولتاژ خروجی تفاضل دو مقدار فوق است ($V_o = 2V_{sp}$).

سؤال: در مدارهای واقعی که مقاومت بار وجود دارد، چه اتفاقی می افتد؟

^۱ ر. ک. به شکل ۴-۳۳ الف
^۲ Float

یک مدار دو برابر کننده ولتاژ که اشکال مدار فوق را نداشته باشد، به عبارت دیگر ولتاژ خروجی نسبت به زمین سنجیده شود (شناور نباشد)، به کمک یک مدار گیرشی و یک یکسو کننده معمولی قابل پیاده سازی است. شکل ۴-۴۳ را در نظر بگیرید؛ ماکزیمم ولتاژ خروجی دو برابر دامنه سیگنال ورودی است. حال به کمک یک یکسو کننده نیم موج با فیلتر، می توان به یک مقدار DC رسید که به اندازه دو برابر دامنه ورودی است. شکل ۴-۴۶ الف شماتیک چنین مداری را نمایش می دهد. نحوه کار کرد این مدار برای حالتی که ولتاژ ورودی مربعی و $C1 \gg C2$ باشد در شکل ۴-۴۶ ب نمایش داده شده است.

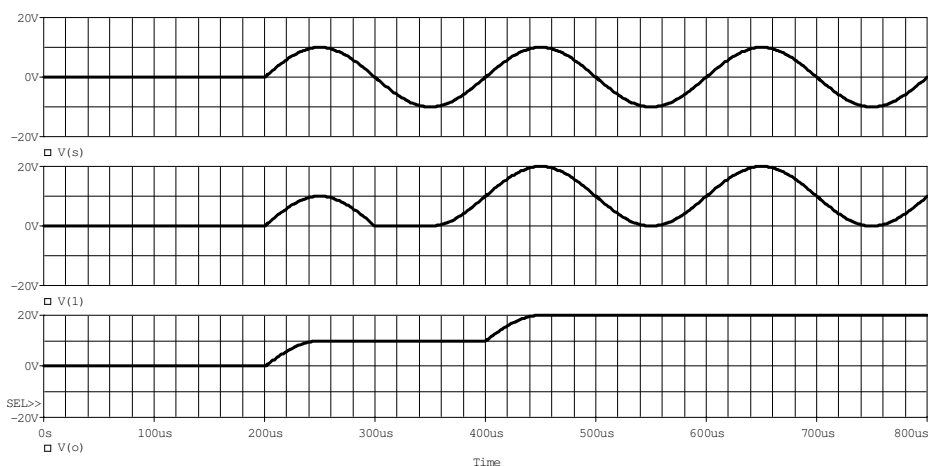


شکل ۴-۴۶ دو برابر کننده ولتاژ الف- شماتیک ب- نمودار زمانی

باز اگر فرض کنیم سیستم در حال آرامش است و در زمان $t = 0$ ولتاژ ورودی از صفر شروع به افزایش می کند، چون $V_{C1} = 0$ است، $v_1 = v_s > 0$ بوده $D1$ در جهت معکوس عبارت دیگر قطع است. به همین نحو $V_{C2} = 0$ و $D2$ در جهت مستقیم عبارت دیگر وصل است. در نتیجه: $v_o = v_1 = v_s + V_{C1} = v_s$ این امر ادامه دارد تا این که v_s به مقدار ماکزیمم خود (دامنه) برسد. در این حالت چون تغییر بار در هر دو خازن برابر است (چرا؟) و چون فرض شده است که: $C1 \gg C2$ ، لذا: $V_{C1} = 0$ و $V_{C2} = V_{s,p}$. در نیم پریود منفی، تا موقعی که ولتاژ ورودی به

مقدار مینیمم خود برسد، $D1$ وصل و $D2$ قطع است (چرا؟). در این حالت خازن $C1$ شروع به شارژ شدن کرده در نهایت ولتاژ آن به: $V_{C1} = V_{Sp}$ میرسد. در نیم پریود بعد نیز این امر اتفاق می افتد؛ با این تفاوت که این بار دیگر $C1$ شارژ شده است. در نتیجه $v_O = V_1 = v_S + V_{Sp}$ و هنگامی که ولتاژ منبع به ماکزیمم مقدار خود میرسد $v_O = 2V_{Sp}$. پس از آن هر دو دیود قطع بوده تغییری در حالت مدار رخ نداده، ولتاژ خروجی به اندازه دو برابر دامنه ولتاژ ورودی ثابت می ماند.

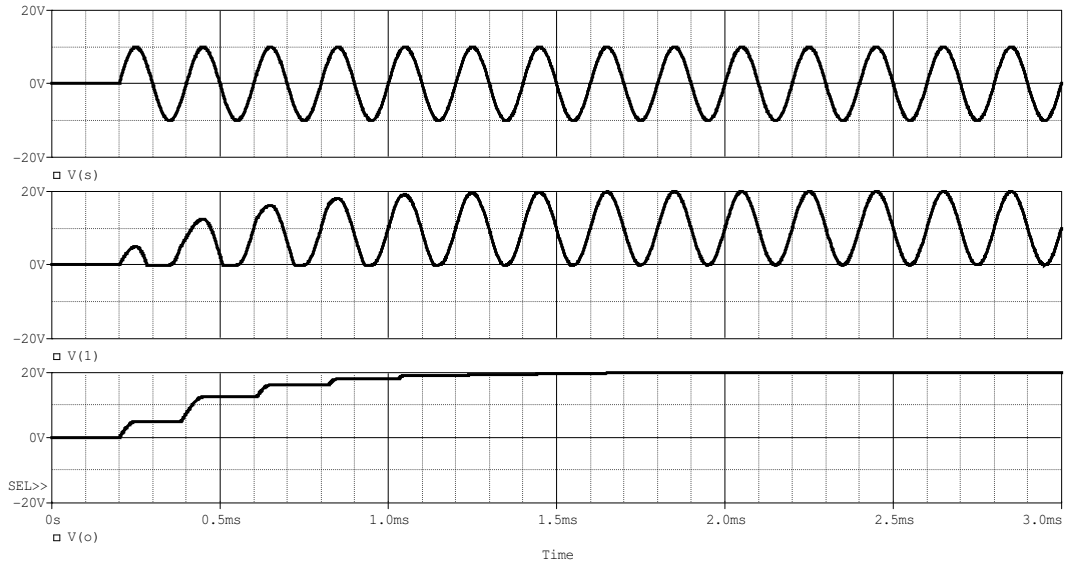
برای درک بهتر مطالب ذکر شده، در شکل ۴-۴۷ دیاگرام زمانی مدار شکل ۴-۴۶ الف، برای یک منبع ولتاژ سینوسی با دامنه ۱۰ ولت، نمایش داده شده است. در این شکل نیز نمودار بالایی ولتاژ منبع، نمودار میانی ولتاژ گره $V1$ و نمودار پایینی ولتاژ خروجی را نمایش می دهد.



شکل ۴-۴۷ نمودار زمانی شکل موجهای مدار شکل ۴-۴۶ الف برای یک ولتاژ سینوسی

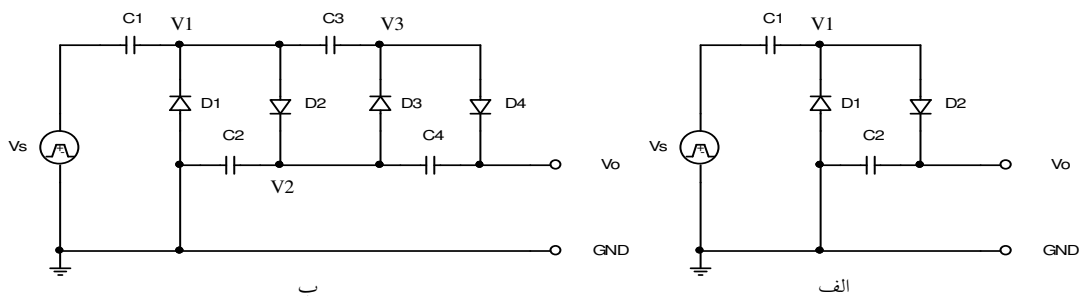
تذکر: فرض $C1 \gg C2$ در عمل الزامی نیست! این حالت فقط برای سادگی تشریح نحوه کار کرد مدار در نظر گرفته شده بود. در عمل مدار به هر نسبتی از خازن‌ها جواب می دهد (حتی به $C1 \ll C2$). فقط زمان رسیدن به حالت نهایی طولانی تر می شود. در عمل اغلب خازن‌ها را برابر انتخاب می کنند. برای مثال شکل ۴-۴۸ نمودار زمانی مدار شکل ۴-۴۶ الف را برای حالتی

که خازن‌ها برابر باشند نمایش می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، ولتاژ خروجی پس از ۷ پریود تقریباً به حالت نهایی خود می‌رسد.



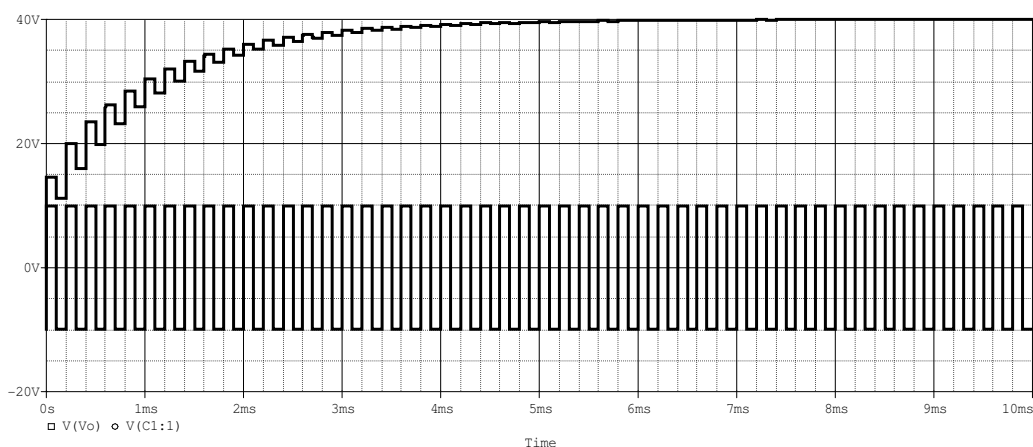
شکل ۴-۸: دیاگرام زمانی مدار شکل ۴-۶ الف برای $C1 = C2$
 شکل بالا: ورودی، شکل وسط: ولتاژ گره ۱، شکل پایین: ولتاژ خروجی

با ترکیب مناسب چند مدار دو برابر کننده، می‌توان بطور دلخواه ولتاژ را افزایش داد. برای مثال مدار شکل ۴-۹ ب مدار یک ۴ برابر کننده ولتاژ است، که از ترکیب دو مدار دو برابر کننده حاصل شده است. برای درک بهتر نحوه کار کرد مدار، شکل ۴-۶ الف به فرم دیگری در شکل ۴-۹ الف نمایش داده شده است.



شکل ۴-۹ الف- دو برابر کننده ولتاژ (مدار شکل ۴-۶ الف) ب- تعمیم مدار به یک چهار برابر کننده ولتاژ

در شکل ۴-۵۰ نمودار زمانی ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی مدار شکل ۴-۴۹ ب نمایش داده شده است. این نمودار برای حالتی رسم شده است که خازن‌ها مساوی و ولتاژ ورودی یک ولتاژ مربعی متقارن با دامنه ۱۰ ولت است. همانطور که از شکل بر می‌آید، حدوداً پس از ۳۰ پریود ولتاژ به مقدار نهایی خود (۴۰ ولت) نزدیک می‌شود.



شکل ۴-۵۰ نمودار زمانی مدار چهار برابر کننده (شکل ۴-۴۹ ب) پایین: ورودی، بالا: خروجی

چنان که در مدارهای ذکر شده جهت تمام دیودها بر عکس شود، ولتاژ خروجی منفی خواهد شد. بنابراین اگر به کمک یک منبع ۶ ولتی و یک نوسان ساز، یک موج مربعی تولید کنیم - که دامنه آن ۳ ولت خواهد بود (چرا؟) - می‌توان به کمک دو مدار ۴ برابر کننده (یکی مدار شکل ۴-۴۹ ب برای ولتاژهای مثبت و دیگری با معکوس کردن دیودها برای ولتاژهای منفی) ولتاژهای +۱۲ ولت و -۱۲ ولت را بدست آورد.

تذکر: با دنبال هم بستن N طبقه مشابه مدار شکل ۴-۴۹ الف می‌توان از یک ولتاژ متناوب با دامنه V_{sp} به یک ولتاژ مستقیم به مقدار $|V_o| = 2NV_{sp}$ دست یافت. البته در مدارهای واقعی به علت وجود مقاومت بار و ایده‌آل نبودن دیودها ($V_\gamma \approx 0.7V$) ولتاژ خروجی کمتر از این مقدار خواهد بود.

۷-۴ معرفی انواع دیودهای متداول

بیشترین کاربردها را دیودهای معمولی دارند. این دیودها در یک محدوده وسیعی جهت یکسو سازی، محدودکنندگی و مدارهای محافظ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ساخت این دیودها اکثراً از سیلیسیوم و ندرتاً از ژرمانیم استفاده می‌شود. بسته به جثه و مورد استفاده، ولتاژ شکست این دیودها $V_{BD}=20V \dots 2kV$ و حداکثر جریان قابل تحمل دائمی $I_{max} = 20mA \dots 2kA$ است.

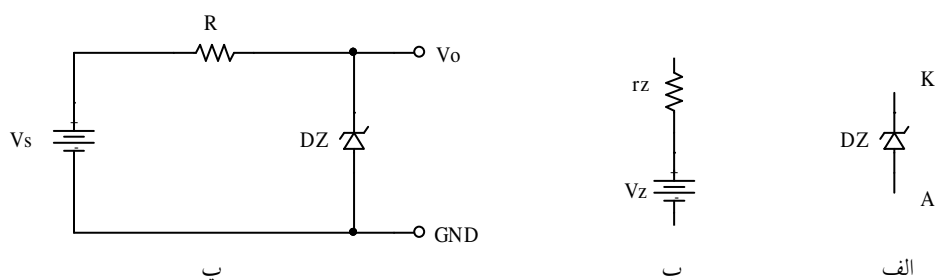
برای کاربردهای خاص دیودهایی می‌سازند که بعضی از خواص دیود برای آن کاربردِ بخصوص، بارزتر شده است. در زیر به معرفی برخی از آنها می‌پردازیم.

۱-۷-۴ دیود زنر

همانطور که در فصل ۴-۵-۲ (شکل ۱۷-۴ ب) دیدیم، اگر ولتاژ معکوس دیود از حدی بیشتر شود، دیود وارد ناحیه شکست شده، ولتاژ دو سر آن تقریباً ثابت می‌ماند (V_{BD}). می‌توان از این خاصیت استفاده کرده منابع ولتاژ تثبیت شده یا ولتاژ مرجع درست کرد. V_{BD} برای دیودهای معمولی دارای "تلرانس" زیاد (تا بیش از ۱۰٪) و ثبوت کم است. برای این منظور دیودهایی بنام دیود زنر^۱ درست می‌کنند که دارای ولتاژهای شکست تعریف شده با تلرانس کم (تا کمتر از ۰.۲٪) و ثبوت خوب هستند. این ولتاژ به ولتاژ زنر معروف بوده با V_Z نمایش داده می‌شود. نوع معمولی این دیودها برای $V_Z = 2.7 \dots 220V$ با مقادیر استاندارد E12 وجود دارد.

در شکل ۴-۵۱ نماد، مدار معادل یک زنر دیود و مثالی برای یک تثبیت کننده ولتاژ نمایش داده شده است.

¹ ZD: Zener Diode



شکل ۴-۵۱ زنر دیود الف- نماد، ب- مدار معادل در ناحیه شکست و پ- مدار یک تثبیت کننده ولتاژ

زنر دیود در جهت مستقیم تقریباً مانند یک دیود معمولی عمل می کند. به این معنی که برای آن

همان ولتاژ آستانه $V_Z = 0.7V$ و همان مقاومت دینامیکی $r_d = \frac{nV_T}{I_F}$ در نظر گرفته می شود. در

جهت معکوس - تازمانی که دیود وارد ناحیه شکست نشده است - دیود مانند مدار باز در نظر

گرفته می شود. در ناحیه شکست، مدار معادل دیود، یک منبع ولتاژ با مقدار $V_Z = V_r$ ، سری بایک

مقاومت $R_r = r_z$ در نظر گرفته می شود. طبیعتاً r_z یک مقاومت دینامیکی است. یعنی مقدار آن با

تغییر جریان معکوس تغییر می کند. در حالت ایده آل $r_z = 0$ فرض می شود. در مثال ها اگر مقدار

r_z مشخص نشده باشد - در صورت لزوم - آنرا مقدار ثابت و معمولاً $r_z = 10\Omega$ در نظر می

گیرند.

شکل ۴-۵۱ پ مدار یک تثبیت کننده ولتاژ را نشان می دهد. تا زمانی که $v_S < V_Z$ باشد، دیود

قطع بوده، $I_R = 0$ و در نتیجه $v_O = v_S$. یعنی تثبیت کننده عمل نکرده و (تغییرات) ولتاژ

خروجی، ورودی را دنبال می کند. در صورتی که $v_S > V_Z$ باشد، دیود وصل شده مدار معادل آنرا

می توان مدار شکل ۴-۵۱ ب قرار داد. در این صورت:

$$v_O = \frac{R}{R+r_Z} V_Z + \frac{r_Z}{R+r_Z} v_S \quad (۴-۳۵)$$

و تغییرات ولتاژ خروجی:

$$\frac{\Delta v_O}{\Delta v_S} = \frac{r_Z}{R+r_Z} \approx \frac{r_Z}{R} \quad (36-4)$$

بنابراین در صورتی که $R \gg r_Z$ انتخاب شود، از (35-4) $v_O \approx V_Z = Const$ یعنی اگر ولتاژ منبع تغییر کند، ولتاژ خروجی تقریباً ثابت باقی می ماند.

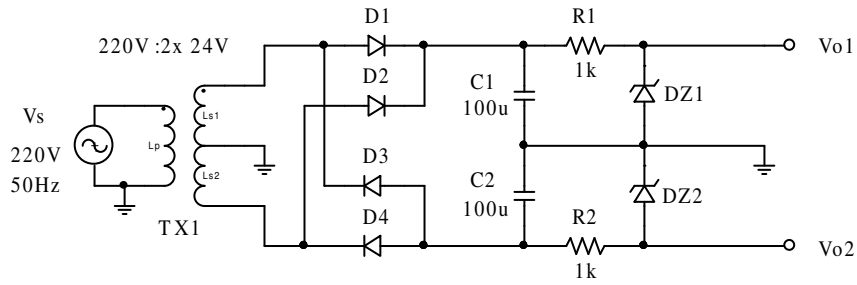
مثال 9-4 با فرض این که در مدار شکل 4-51 پ $v_S = 24 \dots 30V$ ، $R = 1k\Omega$ ، $V_Z = 12V$ و $r_Z = 10\Omega$ باشد، v_O را بدست آورید.

حل: از رابطه (35-4):

$$v_O = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 10\Omega} \times 12V + \frac{10\Omega}{1k\Omega + 10\Omega} \times (24 \dots 30)V = 12.119 \dots 12.178V \approx 12V$$

بنابراین با تغییر ولتاژ ورودی از 24 تا 30 ولت، ولتاژ خروجی تقریباً مقدار ثابت 12 ولت را خواهد داشت. و تغییرات 6 ولتی ورودی فقط باعث تغییرات حدود 59 میلی ولت در خروجی خواهد شد. از رابطه (36-4) $\Delta v_O = \frac{r_Z}{R} \Delta v_S = \frac{10\Omega}{1k\Omega + 10\Omega} \times 6V \approx 59mV$ همان مقدار حاصل میشود.

مثال 10-4 در مدار شکل 4-52 ولتاژ نامی برق شهر $V_{SN} = 220V$ است. نوسانات برق در تهران در نقاط مختلف شهر و در زمانهای متفاوت شبانه روز باعث می شود که ولتاژ ورودی مدار در محدوده $V_S = 180 \dots 250V$ قرار گیرد. با فرض این که برای دیود ها $V_\gamma = 0.7V$ ، $V_{Z1} = V_{Z2} = 18V$ و $r_{Z1} = r_{Z2} = 10\Omega$ باشد، ولتاژ خروجی و تضاریس آنرا بدست آورید.



شکل ۴-۵۲ مدار مثال ۴-۱۰

حل: مدار از دو یکسو کننده تمام موج با سر وسط تشکیل شده است. ترانس $TX1$ دارای دو ثانویه مشابه با سر وسط به مقدار نامی ۲۴ ولت است. $D1$ و $D2$ ولتاژ مثبت و $D3$ و $D4$ ولتاژ منفی را تولید می کنند. مدار متقارن بوده شاخه منفی مدار مشابه شاخه مثبت آن است. بنابراین مدار را برای مقادیر مثبت حل می کنیم، مقادیر منفی همان قدر مطلق ها را دارند. $C1$ خازن صافی است. $R1$ و $DZ1$ تثبیت کنندگی ولتاژ را به عهده دارند. همان طور که میدانیم، منظور از مقادیر ذکر شده AC (برق شهر) مقادیر موثر هستند (مگر این که خلاف آن قید شود). بنابراین:

$$v_{C1p} = \sqrt{2} \times 24V - 0.7V \approx 33V$$

$$I \approx \frac{v_{C1p} - V_Z}{R1} = \frac{33V - 12V}{1k\Omega} = 11mA$$

$$V_{rpp}(C1) \approx \frac{I}{Cf} = \frac{11mA}{100\mu F \times 100Hz} = 1.1V$$

اگر بخواهیم مسئله را دقیق تر حل کنیم (که در حالت کلی لازم نیست)،

$$v_{C1} = v_{C1p} - \frac{V_{rpp}(C1)}{2} \approx 33V - \frac{1.1V}{2} \approx 32.5V$$

$$V_{O1} \approx V_Z + I r_Z = 18V + 11mA \times 10\Omega \approx 18.11V \quad \text{بنابراین ولتاژ خروجی:}$$

$$V_{rpp}(O1) \approx V_{rpp}(C1) \frac{r_Z}{R1} \approx 1.1V \times \frac{10\Omega}{1k\Omega} \approx 11mV \quad \text{و تضاریس آن}$$

حال اگر تغییرات برق شهر را در نظر بگیریم:

$$V_s = 180 \dots 250V \Rightarrow V_{C1p} \approx 27 \dots 38V \Rightarrow$$

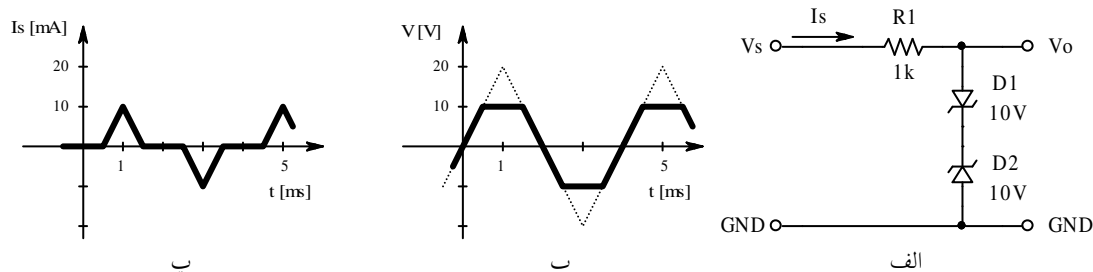
$$I \approx 9 \dots 20mA \Rightarrow V_{O1} \approx 18.09 \dots 18.2V$$

چنان که مشاهده می شود این مدار باعث می شود که تغییرات بیش از ۱۰ درصدی ولتاژ

ورودی با تغییرات حدود فقط نیم درصد در خروجی ظاهر شود.

مثال ۴-۱۱ در صورتی که در مدار شکل ۴-۵۳ یک سیگنال سینوسی متقارن با دامنه

$V_{Sp} = 20V$ و فرکانس $f_s = 250Hz$ باشد، مطلوبست رسم $v_s(t)$ ، $v_o(t)$ و $i_s(t)$.



شکل ۴-۵۳ الف- مدار مثال ۴-۱۱، ب- ولتاژ ورودی (خط چین)، ولتاژ خروجی (خط پر) و پ- جریان منبع

حل: این مدار نحوه پیاده سازی مدار مثال ۴-۵ (شکل ۴-۵۰) را نشان می دهد. چون مدار و

سیگنال متقارن هستند، می توان فقط نیم پریود مثبت را بررسی کرد. سیگنال ها در نیم پریود منفی

- با توجه به جهت ولتاژها و جریانها - مشابه سیگنالها در نیم پریود مثبت خواهند بود.

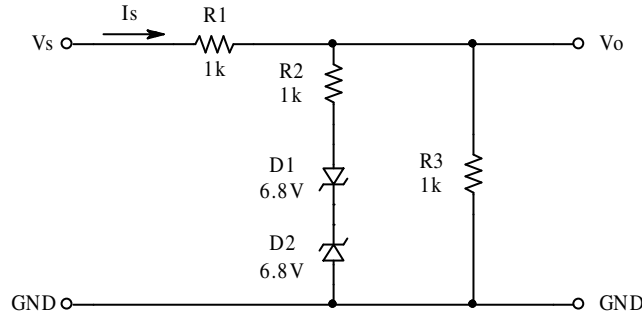
به ازای $0 \leq v_s \leq V_{\gamma 1} + V_{Z2}$ دیودها قطع بوده، $i_s \approx 0$ و در نتیجه $v_o \approx v_s$. با افزایش

ولتاژ ورودی دیودها وارد ناحیه هدایت شده ولتاژ خروجی به مقدار تقریباً ثابت

$$i_s = \frac{v_s - (V_{\gamma 1} + V_{Z2})}{R1} \text{ محدود می شود. در این محدوده } v_o \approx V_{\gamma 1} + V_{Z2} \approx 10.7V$$

مثال ۴-۱۲ در صورتی که در مدار شکل ۴-۵۴ یک سیگنال سینوسی متقارن با دامنه

$V_{Sp} = 30V$ و فرکانس $f_s = 250Hz$ باشد، مطلوبست رسم $v_s(t)$ ، $v_o(t)$ و $i_s(t)$.



شکل ۴-۵۴ مدار مثال ۴-۱۲

حل: سیگنال ورودی یک مثلی متقارن با دامنه $V_{Sp} = 30V$ و پریود $T = 4ms$ است. نمودار

زمانی این سیگنال در شکل ۴-۵۵ الف رسم شده است.

تا زمانی که دیود ها قطع هستند یعنی به ازای $|v_o| < V_\gamma + V_Z \approx 7.5V$ ، ولتاژ خروجی از

$v_o = \frac{R3}{R1 + R3} v_s = \frac{v_s}{2}$ بدست می آید؛ یعنی $\frac{\Delta v_o}{\Delta v_s} = \frac{1}{2}$. به ازای ولتاژ های ورودی بیشتر،

یعنی $|v_s| > |2v_o| = 15V$ ، دیود ها هدایت کرده شیب تغییرات ولتاژ $\frac{\Delta v_o}{\Delta v_s} = \frac{R2 \parallel R3}{R1 + (R2 \parallel R3)} = \frac{1}{3}$

خواهد شد. یعنی بیشترین مقدار ولتاژ خروجی $|v_o|_{\max} \approx 12.5V$ خواهد شد (چرا؟). نمودار

زمانی ولتاژ خروجی در شکل ۴-۵۵ ب رسم شده است.

تا زمانی که دیود ها وصل نشده اند یعنی به ازای $|v_o| < V_\gamma + V_Z \approx 7.5V$ ، به عبارت دیگر تا

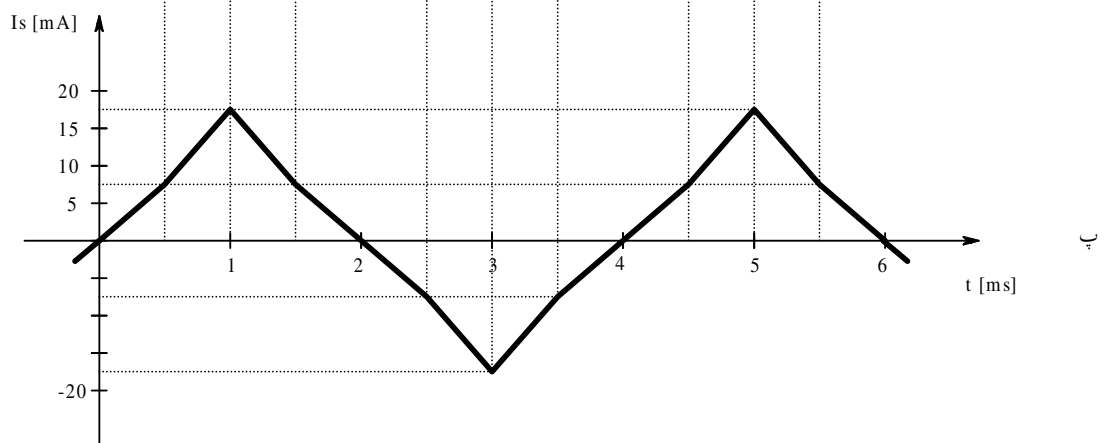
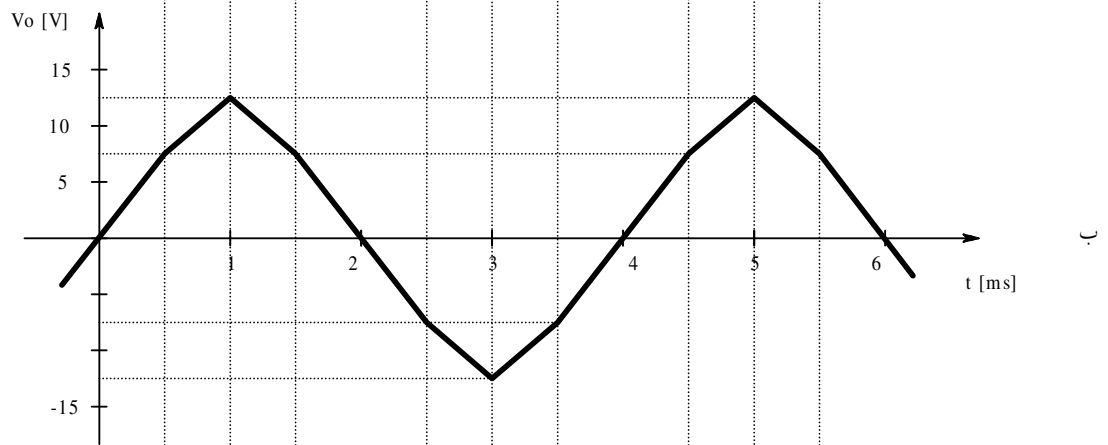
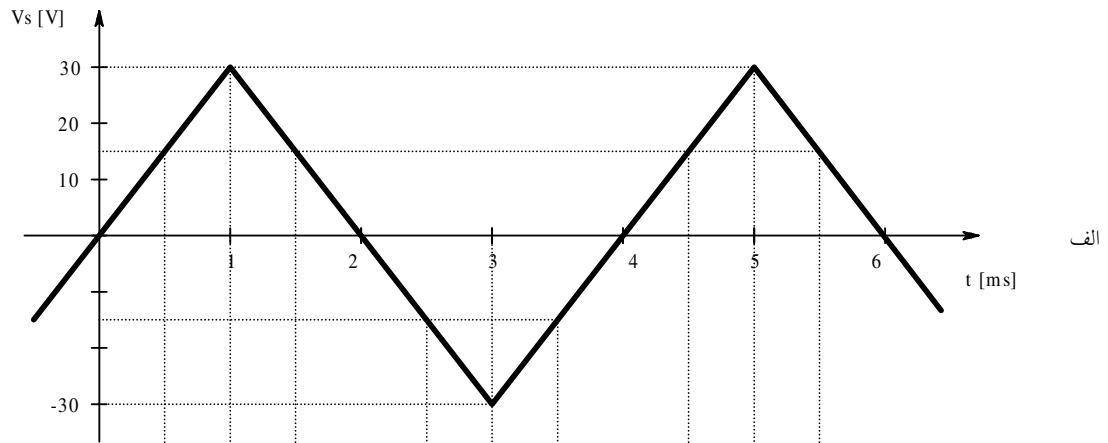
$|v_s| \approx 15V$ جریانی از آنها نمی گذرد. بنابراین $i_s = \frac{v_s}{R1 + R3} = \frac{v_o}{R3}$ در نتیجه جریان منبع به

$i_s = 7.5mA$ میرسد. پس از آن دیود ها وصل شده $i_s = \frac{v_o}{R3} + \frac{v_o - (V_\gamma + V_Z)}{R2}$ خواهد بود.

بنابراین جریان به صورت خط رشد خواهد کرد تا این که بیشترین مقدار جریان منبع سیگنال

شکل ۵۵-۴ نمودار زمانی جریان منبع سیگنال در شکل ۵۵-۴ پ رسم شده

است.



شکل ۵۵-۴ نمودارهای زمانی مدار شکل ۵۴-۴ الف- ولتاژ منبع سیگنال، ب- ولتاژ خروجی و پ- جریان منبع

۴-۷-۲ دیود حساس به اشعه

اگر به محل اتصال $p-n$ یک دیود اشعه (نور) بتابانیم، انرژی فوتونها تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود. اگر دیود را در جهت معکوس قرار دهیم، جریان دیود با افزایش شدت نور - به طور خطی - بیشتر می‌شود. از این خاصیت جهت تشخیص نور (اشعه) یا اندازه‌گیری شدت آن استفاده می‌کنند. به این دیودها دیود نوری یا فتو دیود^۱ گویند. محفظه این دیودها یک پنجره شیشه‌ای یا یک عدسی دارد تا نور بر روی اتصال نیمه رساناها متمرکز شود. این دیودها حتی اگر بایاس هم نشوند، بر اثر تابش اشعه در حالت مدار باز ایجاد ولتاژی در حدود ۰,۵ ولت می‌کنند (نیروی محرکه، منبع ولتاژ). در صورت اتصال کوتاه بودن، جریانی از دیود می‌گذرد که متناسب با شدت نور است (منبع جریان وابسته به نور). انرژی تبدیل شده توسط این دیودها بسیار کم است و برای استفاده باید توسط مدارهای الکترونیکی (تقویت کننده‌ها) تقویت شود. کاربرد اصلی این دیودها در مخابرات نوری^۲ (انتقال اطلاعات به کمک فیبر نوری^۳) و کنترل از راه دور^۴ (مثلاً در سیستمهای صوتی - تصویری) میباشد. جریان اتصال کوتاه این دیودها در نور معمولی اتاق در حد چندین نانو آمپر است. در صورتی که نیاز به جریان بیشتر باشد، سطح دیودها را بیشتر می‌کنند (چند ده میلی‌متر مربع). به این دیودها گاهی فتوسل^۵ گویند. جریان اتصال کوتاه این دیودها در نور معمولی اتاق در حد چندین میکرو آمپر است. کاربرد این دیودها بیشتر در نورسنج‌ها یا جهت شارژ باطری‌های ساعت مچی، ماشین حساب، ... میباشد. برای جریان‌های بیشتر، نوع مواد را تغییر می‌دهند و سطح آنرا باز هم بیشتر می‌کنند (چندین سانتی‌متر مربع). به این دیودها معمولاً باتری آفتابی یا

¹ PhD: Photo-Diode
² Optical Communication
³ Fiber Optics
⁴ RC: Remote Control
⁵ Photo-Cell

سلول خورشیدی^۱ گفته می‌شود. جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی در نور معمولی اتاق در حد میلی‌آمپر و در نور مستقیم خورشید چند ده میلی‌آمپر است. با سری و موازی کردن چند عدد سلول خورشیدی می‌توان به ولتاژها و جریان‌های زیاد دست یافت. به این ترکیب معمولاً پنل‌های خورشیدی^۲ گفته می‌شود. کار برد این سیستم‌ها در تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی است. برای شارژ باتری‌ها معمولاً از پنل‌های ۱۵ ولتی با قدرت جریان‌دهی تا بیش از ۱۰ آمپر استفاده می‌کنند. در ماهواره‌ها و اتومبیل‌های خورشیدی، از پنل‌ها تا چندین کیلو وات و حتی در نیروگاه‌های خورشیدی در حال حاضر تا چند صد کیلو وات توان الکتریکی حاصل می‌شود. راندمان^۳ این مبدل‌ها معمولاً حدود ۱۰٪ است به عبارت دیگر به ازای هر متر مربع باتری خورشیدی در بیشترین تابش خورشید و بهترین موقعیت فقط ۱۰۰ وات بدست می‌آید.

۴-۷-۲ دیود نور زا

در ساختمان این دیود از نیمه‌هادی ترکیبی گالیم-آرسنید^۴ استفاده می‌شود. خاصیت این دیود در این است که اگر در جهت مستقیم بایاس شده باشد، بر اثر عبور جریان الکتریکی، انرژی الکترون‌ها باعث ایجاد فوتون می‌شود (تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی نورانی). بنابراین این دیود برعکس فتودیود عمل می‌کند. به همین دلیل این دیود بنام دیود نورانی، دیود نور زا یا "ال ای دی"^۵ مشهور است. با اضافه کردن مواد مختلف، میتوان طیف وسیعی از نور، از فرسرخ^۶ تا فرابنفش^۷ را تولید کرد. در عمل دیودهای مادون قرمز در مخابرات نوری و کنترل از راه دور؛ دیودهای قرمز برای

¹ Solar-Cell
² Solar-Panel
³ Efficiency
⁴ GaAs: Gallium-Arsenide
⁵ LED: Light Emitting Diode
⁶ مادون قرمز، IR: Infra Red
⁷ ماورای بنفش، UV: Ultra-Violet

اعلام خطر و به عنوان نمایشگر ارقام یا حروف^۱؛ ترکیب دیودهای قرمز، سبز و آبی برای ایجاد صفحه نمایش^۲ رنگی؛ دیود سفید برای جانشینی لامپ کم مصرف؛ و دیودهای با رنگهای مختلف دیگر برای کاربردهای متفاوت، استفاده می‌شوند. با تغییر در ساختمان LED می‌توان یک دیود لیزر^۳ بدست آورد. این دیودها نور تکفام^۴ تولید می‌کنند و بنابراین نور آنها تا حد بسیار بالایی قابل متمرکز کردن است. کاربرد اصلی این دیود در مخابرات نوری، پزشکی، خواندن و نوشتن لوح فشرده^۵، اندازه گیری فواصل، ... می‌باشد.

۴-۷-۳ دیود های دیگر

دیود های دیگری برای کار برد های خاص وجود دارد که در زیر به معرفی برخی از آنها می

پردازیم:

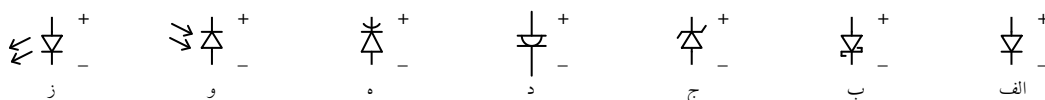
- **دیود شاتکی:** در مواردی که به ولتاژ آستانه‌ای کمتر از ولتاژ آستانه دیود سیلیسیوم ($V_{\gamma} \approx 0.7V$) نیاز است از دیود ژرمانیم با $V_{\gamma} \approx 0.2V$ استفاده می‌شود. امروزه معمولاً بجای دیود ژرمانیم از دیودهای فلز- نیمه‌هادی که به دیود شاتکی^۶ مشهور است استفاده میشود. دیودهای شاتکی از جنس سیلیسیوم دارای $V_{\gamma} \approx 0.3 \dots 0.4V$ میباشد. مزیت دیگر این دیود نسبت به دیودهای معمولی، سرعت بسیار بیشتر آن است (در برخی انواع تا هزار برابر). بسته به جثه و مورد استفاده، ولتاژ شکست این دیودها $V_{BD} = 20 \dots 100V$ و حداکثر جریان قابل تحمل دائمی $I_{max} = 20mA \dots 100A$ است.

¹ Seven-Segment Display, Dot-Matrix Display
² Monitor, Display
³ LD: Laser-Diode
⁴ Coherent
⁵ CD: Compact Disk
⁶ Schottky Diode, Hot-Carrier Diode

- **دیود پین:** دیودهایی می‌سازند که تغییرات مقدار مقاومتی آنها خیلی بیشتر و خطی‌تر از دیودهای معمولی قابل کنترل است و بخصوص در فرکانس‌های بالا بهتر کار می‌کنند. به این دیودها، پین دیود^۱ گویند. از این دیودها جهت ساختن مقسم‌های ولتاژ و پتانسیومترهای الکترونیکی در فرکانس‌های بالا (از مگا تا چندین گیگاهرتز) استفاده میشود.

- **وارکتور:** دیودهایی می‌سازند که تغییرات ظرفیت خازنی آنها خیلی بیشتر از دیودهای معمولی قابل کنترل است. به این دیودها وارکتور یا واریکپ^۲ گویند. کاربرد اصلی این دیودها در نوسان‌سازهای فرکانس متغییر (مثلاً در رادیو و تلویزیون برای انتخاب ایستگاه مورد نظر) است.

انواع مختلف دیودها برای کاربردهای اختصاصی‌تری وجود دارد که معرفی آنها از حوصله این درس خارج است. شکل ۴-۵۶ نماد دیودهای معرفی شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۵۶ نماد چند دیود متداول: الف- معمولی، ب- شاتکی، ج- زنر، د- پین، ه- وارکتور، و- نوری، ز نور زا. دیودها در جهت کار عادی بایاس شده‌اند.

¹ PIN-Diode
² Varactor (Diode); Varicap

خلاصه:

مطالبی که از دیود باید به خاطر داشته باشیم:

- ۱- رابطه ولتاژ و جریان یک دیود در جهت مستقیم: $i_D = I_S e^{v_D / nV_T}$ در صورتی که شرط خاصی نباشد، $n = 1$ و $V_T = 25mV$ فرض میشود.
- ۲- در صورت ثابت بودن دما، با افزایش هر ۶۰ میلی ولت ولتاژ دو سر دیود در جهت مستقیم، جریان آن ۱۰ برابر میشود.
- ۳- در صورت ثابت بودن ولتاژ دو سر دیود، با افزایش هر ده درجه سانتیگراد، جریان دیود دو برابر میشود.
- ۴- در صورت ثابت بودن جریان گذرنده از دیود، با افزایش هر درجه سانتیگراد، ولتاژ دو سر دیود، دو میلی ولت کم میشود.
- ۵- اگر شرط خاصی برقرار نباشد، افت ولتاژ دو سر دیود بایاس شده در جهت مستقیم، ۰/۷ ولت فرض میشود.
- ۶- برای علایم بزرگ، دیود مانند یک سویچ عمل می کند. اگر $V_D \leq V_\gamma$ باشد، دیود قطع است. در غیر این صورت، دیود توسط یک منبع ولتاژ $V_D = V_\gamma$ سری با یک مقاومت $R_D = R_S$ مدل می شود. برای دیود ایده آل: $R_D = 0$ و $V_D = 0$ در نظر گرفته می شود.
- ۷- برای علایم کوچک، دیود باید در جهت مستقیم بایاس شود. در این صورت دیود مانند یک مقاومت عمل می کند که مقدار آن (مقاومت دینامیکی دیود) از رابطه $r_d = \frac{n.V_T}{I_D}$ بدست می آید.