

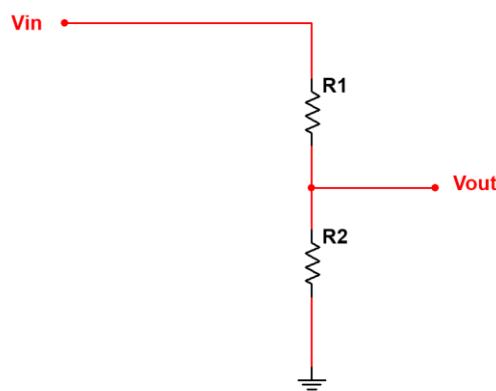
## «بخش اول: تشخیص اضافه ولتاژ شبکه تک فاز»

### ۱- مقسم ولتاژ

در این بخش باید مدار مقسم ولتاژ طراحی شود. می دانیم ورودی آن سیگنالی است که طبق دستور پروژه پیک نامی آن ۸۱.۵ ولت است. همچنین می دانیم که اضافه ولتاژ در شبکه موجود بین ۱۲۰٪ الی ۱۷۰٪ ولتاژ نامی خواهد بود.

$$V_{max} = 81.5 \times 1.7 = 138.55 V$$

در نتیجه حداکثر ولتاژ ورودی ۱۳۸.۵۵ ولت خواهد بود که باید به ولتاژی در بازه کمتر از ۱۳ ولت تبدیل شود چرا که آپ امپ استفاده شده در ادامه مدار دارای ولتاژ تعذیه ۱۵ ولت است و نباید در ناحیه اشباع قرار گیرد. برای این امر از مدار مقاومتی شکل ۱-۱ استفاده خواهیم کرد.



$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} (138.55) \leq 13 \\ \rightarrow R_1 + R_2 \geq 10.66R_2 \rightarrow R_1 \geq 9.66R_2$$

مطابق نامساوی بدست آمده میتوان مقادیر  $R_1$  را با  $10R_2$  برابر در نظر گرفت و از مقادیر مقابل برای مقاومت‌ها استفاده کرد:

$$R_1 = 10k\Omega, R_2 = 1k\Omega$$

و در نتیجه این مقادیر داریم:

شکل ۱-۱

$$V_{out} = \frac{1}{11} V_{in} \rightarrow V_{out} \approx 0.09V_{in}$$

مقادیر مقاومت‌ها از مرتبه کیلو اهم انتخاب شده است تا جریان مدار بزرگ نشده و موجب آسیب به قطعات نشود.

### ۲- فیلتر

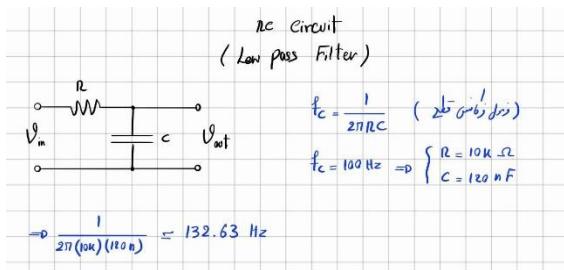
در این بخش به طراحی فیلتر پایین گذر (Low-Pass Filter) میپردازیم و جزئیات کار آن را بررسی میکنیم.

فرکانس هدف در ۵۰ هرتز است زیرا فرکانس برق شهر ایران ۵۰ هرتز است. این فرکانس در محدوده عبور فیلتر قرار دارد و بدون تغییر عبور میکند. دلیل اینکه از این فیلتر استفاده میشود تا فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ هرتز را فیلتر کند این است که هر نویزی که ناشی از کلیدزنی منابع سوئیچینگ یا موتور‌ها باشد حذف شود زیرا کلیدزنی معمولاً فرکانس بالایی دارد فرکانس بالا در برق شهر (که به آن نویز یا هارمونیک می‌گوییم) لزوماً مثل اضافه ولتاژ باعث "انفجار" فوری قطعات نمی‌شود، بلکه مثل یک "سم تدریجی" عمل می‌کند و از سه طریق اصلی به مدار آسیب می‌زند:

۱. تلفات حرارتی (Eddy Currents)

۲. کاهش امپدانس خازنی ( $X_C$ )

۳. تداخل الکترومغناطیسی (EMI) و خطای منطقی



شکل ۱-۲

دلیل اینکه وجود این فیلتر حیاتی است این است که چون هدف تشخیص دقیق است. اگر فیلتر ۱۰۰ هرتز را نگذاریم، ممکن است یک نویز فرکانس بالا برای چند میلی ثانیه وارد سیستم شود و به اشتباه آن را به عنوان اضافه ولتاژ تشخیص دهد و برق کل را قطع کند.

با توجه به مقدار‌هایی که انتخاب شده است ممکن این سوال بوجود بیاید که چرا فیلتر دقیقاً ۱۰۰ هرتز نشد؟ دو پاسخ برای این وجود دارد:

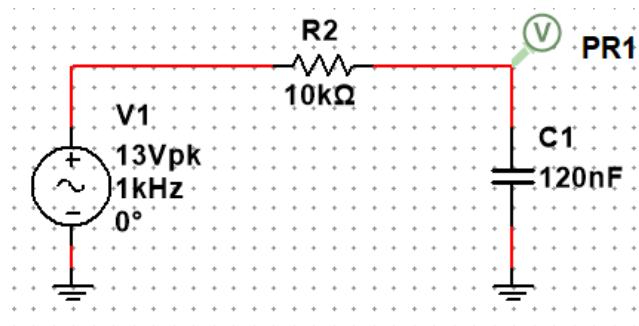
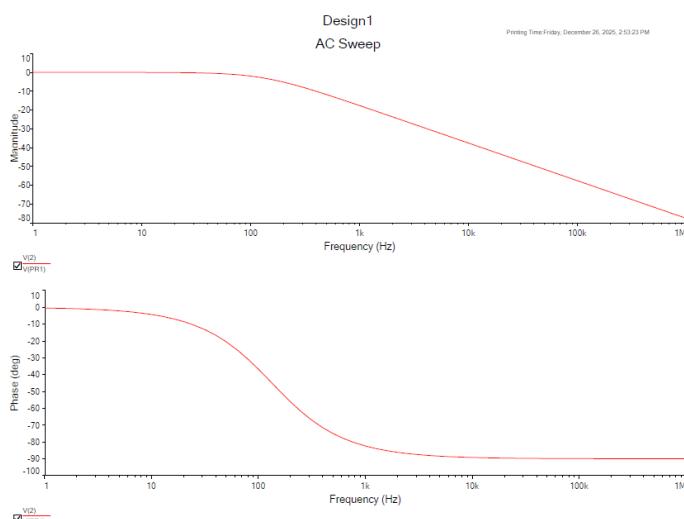
۱. حاشیه امنیت برای فرکانس ۵۰ هرتز:

اگر فرکانس قطع را دقیقاً روی ۱۰۰ هرتز تنظیم کنید، فیلتر شما در فرکانس ۵۰ هرتز (فرکانس اصلی برق شهر) شروع به کاهش دامنه (تضییف) می‌کند. با انتخاب ۱۳۲ هرتز، شما مطمئن می‌شوید که سیگنال اصلی ۵۰ هرتز بدون هیچ افتی و با قدرت کامل عبور می‌کند.

۲. استاندارد قطعات:

مقاومت  $10k$  و خازن  $120n$  قطعات استانداردی در بازار هستند که به راحتی پیدا می‌شوند.

توجه: خازنی که خریداری می‌شود نباید الکتروولیتی باشد. خازن خریداری شده از جنس سرامیکی می‌تواند باشد.



$$\frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \rightarrow 7.335$$

$$R = 10k$$

$$\omega = 2\pi \times 50$$

$$C = 120n$$

$$10 \times 10^3 \times 100 \Omega \times 120 \times 10^{-9} = 12 \pi \times 10^{-2} \approx 0.377$$

$$\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2} \approx 1.0687$$

$$\rightarrow V_{out} = \frac{V_{in}}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}} = \frac{7.335}{1.0687} = 6.863$$

$$\Rightarrow 81.5 \times 1.2 \times 0.09 = 8.802$$

$$\Rightarrow V_{out,120} = \frac{8.802}{1.0687} = 8.236$$

در فیلتر های پایین گذر برای مقدار افت ولتاژ رخ داده داریم:

$$\frac{|V_{out}|}{|V_{in}|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}}$$

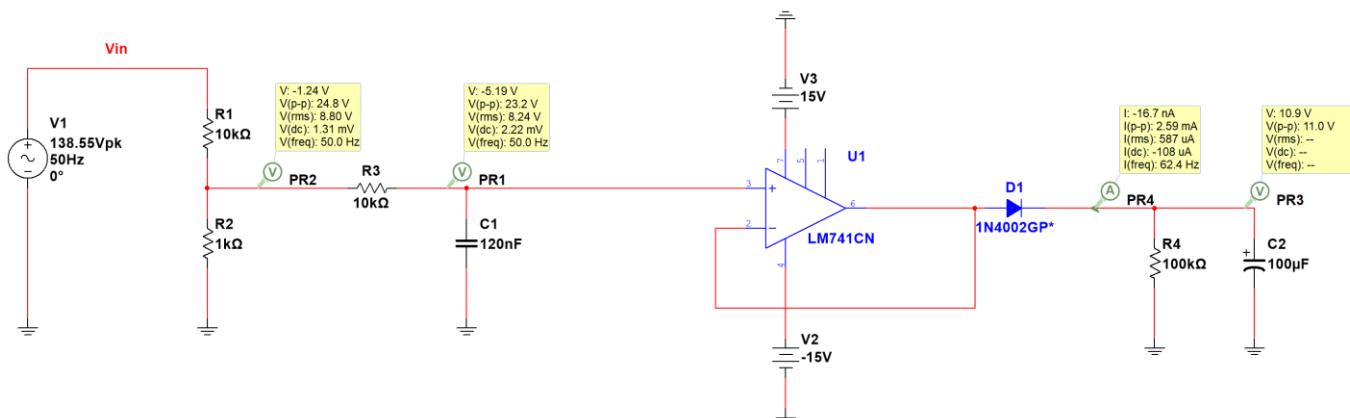
$$f = 50Hz ; R = 10k\Omega ; C = 120nF$$

$$\rightarrow |V_{out}| = \frac{1}{1.0687} |V_{in}| \approx 0.94 |V_{in}|$$

در این بخش میزان افت ولتاژ به واسطه فیلتر طراحی شده به ازای ورودی نامی شبکه محاسبه شده و مقدار ولتاژ  $120\%$  خروجی برای مقایسه گر آپ امپ نوشته شده که در ادامه این ولتاژ وارد یکسوساز نیم موج خواهد شد تا از سیگنال AC به سیگنالی شبیه به DC تبدیل شود و قابل مقایسه باشد و سپس به مقایسه گر داده خواهد شد.

برای حذف اثر بارگذاری قبل از قسمت یکسوساز از بافر استفاده شده است که در ادامه به اثر وجود یا عدم وجود آن خواهیم پرداخت.

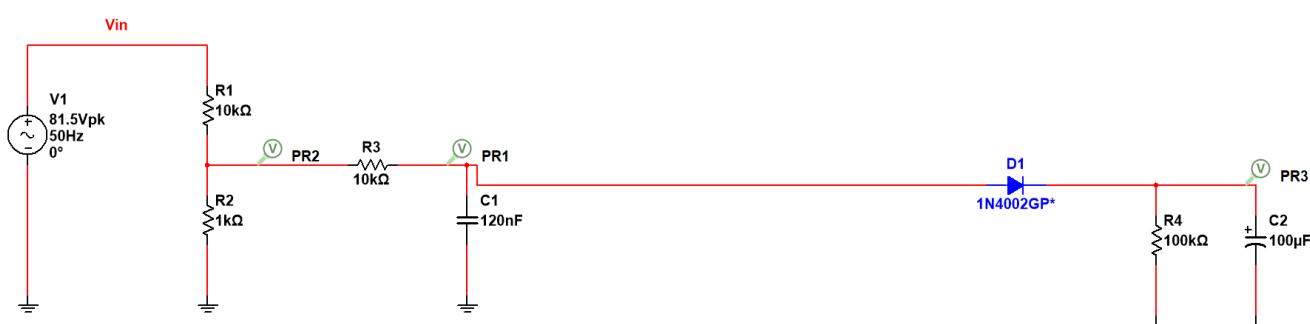
به کمک مقاومت، خازن و دیود یک یکسوساز نیم موج طراحی کردیم که هدف آن است ولتاژ متناوب به ولتاژ DC تقریبی تبدیل شود که کمترین ولتاژ ریپل ممکن را داشته باشد. برای این امر از یک مقاومت ۱۰۰ کیلو اهمی و همچنین یک خازن الکتروولیتی ۱۰۰ میکروفارادی استفاده شده است. نکته قابل توجه در این بخش آن است که اگر مقاومت خیلی زیاد باشد، ثابت زمانی مدار خیلی زیاد خواهد شد و این امر موجب تاخیر در پاسخ دهی مدار می شود. و اگر مقاومت کم باشد، ریپل ولتاژ خروجی زیاد خواهد شد. پس باید با توجه به مقادیر موجود در بازار اندازه مناسب برای مقاومت و خازن انتخاب شود تا سیگنال خروجی ریپل کمی داشته باشد و همچنین سرعت پاسخگویی مدار بالا باشد. همچنین استفاده از خازن الکتروولیتی بلامانع است چرا که دیود موجود در این قطعه از مدار مقادیر منفی را عبور نمی دهد.

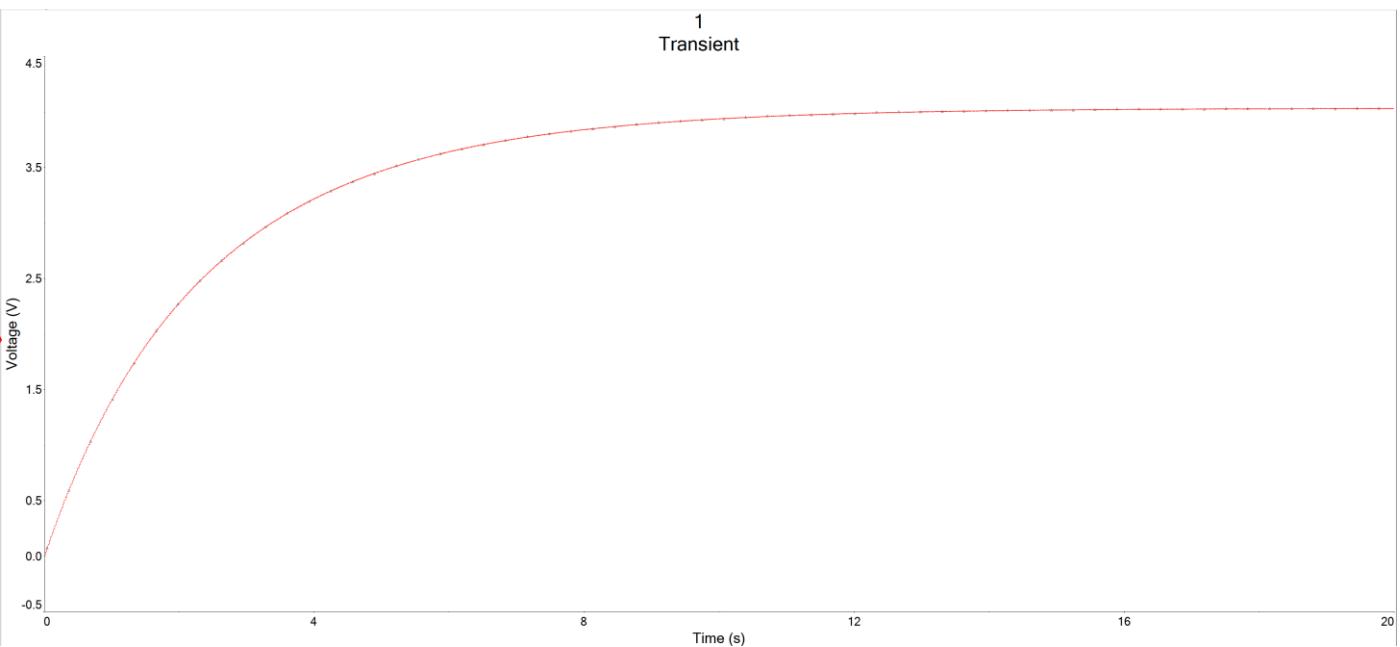


با توجه به تصویر بالا اگر منبع ولتاژ ورودی در بالاترین حد نامی شبکه باشد، جریان دیود از مرتبه میلی آمپر تجاوز نخواهد کرد در صورتی که در دیتاشیت دیود 1N4002GP، مقدار جریان مجاز برابر با ۱ آمپر است. همچنین ولتاژ تغذیه آپ امپ مثبت و منفی ۱۵ ولت تعیین شده است که با توجه به مقادیر مقسم ولتاژ از همان ابتدا ولتاژ های موجود در مدار، زیر ۱۳ ولت خواهند بود در نتیجه اطمینان حاصل می شود که آپ امپ در ناحیه اشباع قرار نخواهد گرفت.

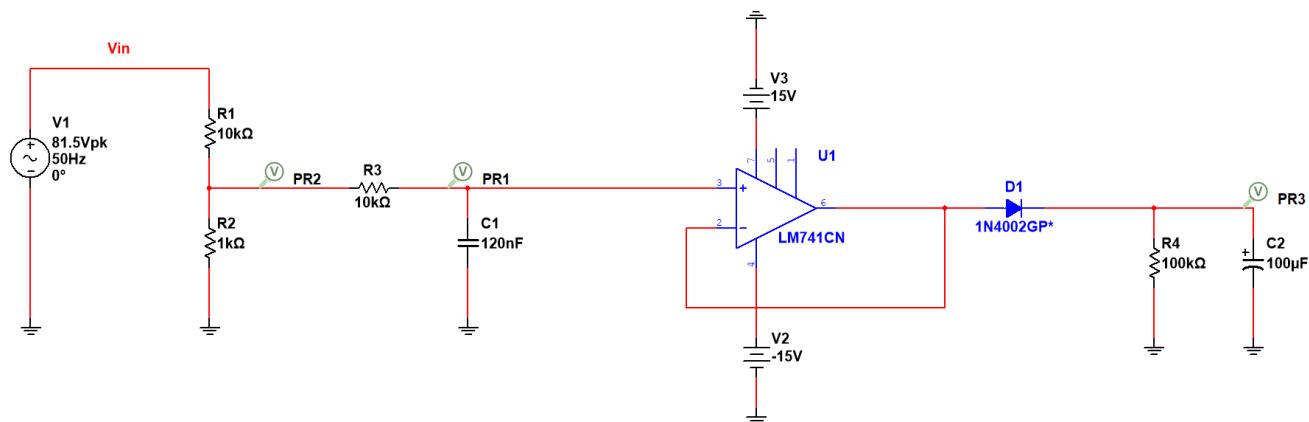
بررسی اثر وجود و عدم وجود بافر:

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وجود بافر قبل از یکسوساز تأثیر قابل توجهی بر رفتار مدار دارد. در حالت استفاده از بافر، خازن خروجی بدون تحمیل بار به مدار ورودی و تنها با تأمین جریان از بافر، به سرعت تا مقدار نزدیک به پیک واقعی ولتاژ شارژ شده و ولتاژ DC خروجی در مدت کوتاهی به مقدار نهایی و پایدار می‌رسد. در مقابل، در حالت بدون بافر، خازن خروجی جریان شارژ خود را مستقیماً از مدار RC ورودی دریافت می‌کند که این موضوع باعث افت دامنه، کندی فرآیند شارژ و کاهش مقدار نهایی ولتاژ DC می‌شود. به همین دلیل، استفاده از بافر موجب حفظ شکل موج ورودی، افزایش سرعت پاسخ، پایداری بیشتر خروجی و قابل اعتمادتر شدن عملکرد کلی مدار می‌گردد. در تصاویر زیر شکل موج خروجی هر مدار در کنار مدار استفاده شده نمایش داده می‌شود.

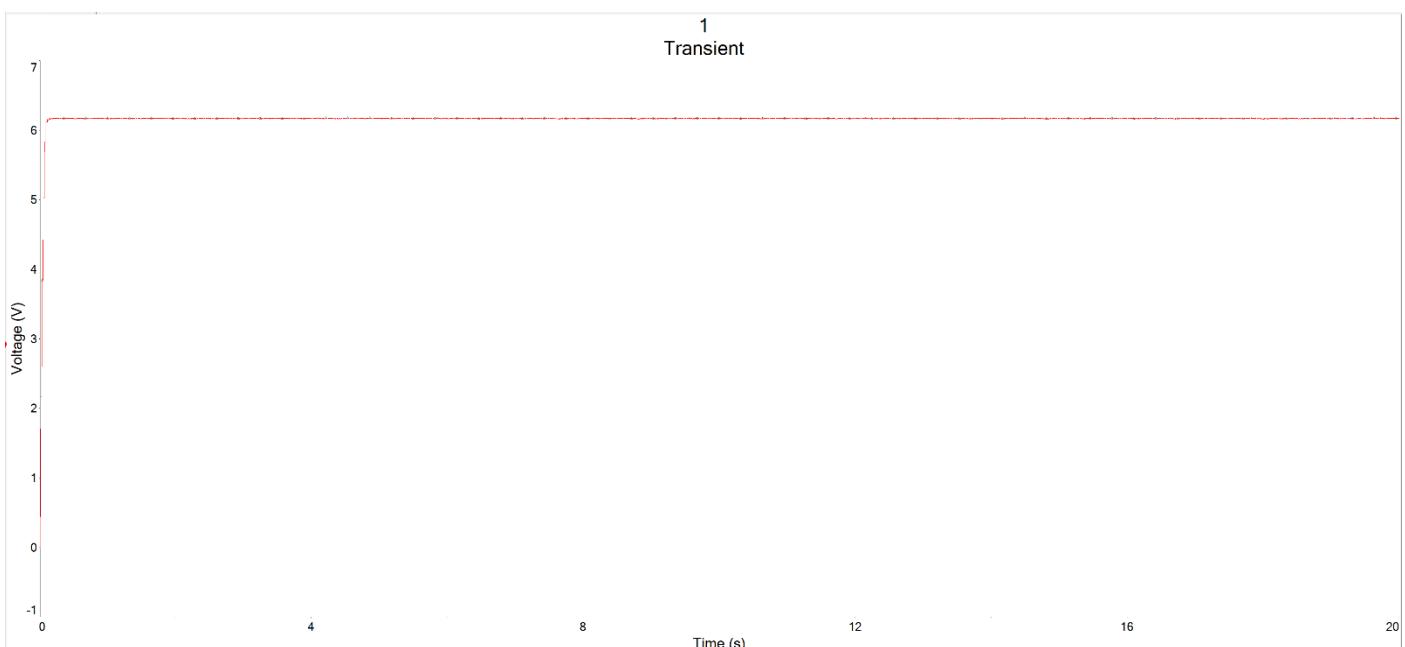




با استفاده از بافر به حالت دلخواه خواهیم رسید:



1  
Transient



در این مدار به علت مقادیر قابل توجه اندازه مقاومت و خازن میزان افت ولتاژ مدار RC قابل چشم پوشی است. اما می دانیم که دیود مورد استفاده در این مدار برای روشن شدن، نیازمند ۰.۷ ولت است. (البته این مقدار با توجه به جریان عبوری از دیود متغیر است ولی به علت جریان کم مدار موجود این مقدار در بازه ۰.۶ الی ۰.۷ خواهد بود).

$$V_{out} = V_{in} - 0.7 = 6.86 - 0.7 = 6.16 \text{ V}$$

## ۴- مقایسه گر با Op-Amp

با توجه به قسمت های قبل ولتاژ وارد شده به مدار مقایسه گر از رابطه زیر به دست می آید:

$$V_{out} = 0.09 \times 0.94 V_{in} - 0.7 \rightarrow 8.24 - 0.7 = 7.54V$$

ولتاژ رفنس آپ امپ مقایسه گر باید برابر با  $7.54\text{ ولت}$  باشد. این ولتاژ توسط یک مقسم از ولتاژ منبع تغذیه ها که برابر با  $15\text{ ولت}$  تنظیم شده است به دست می آید.

$$\frac{754}{15} = \frac{x}{y+x}$$

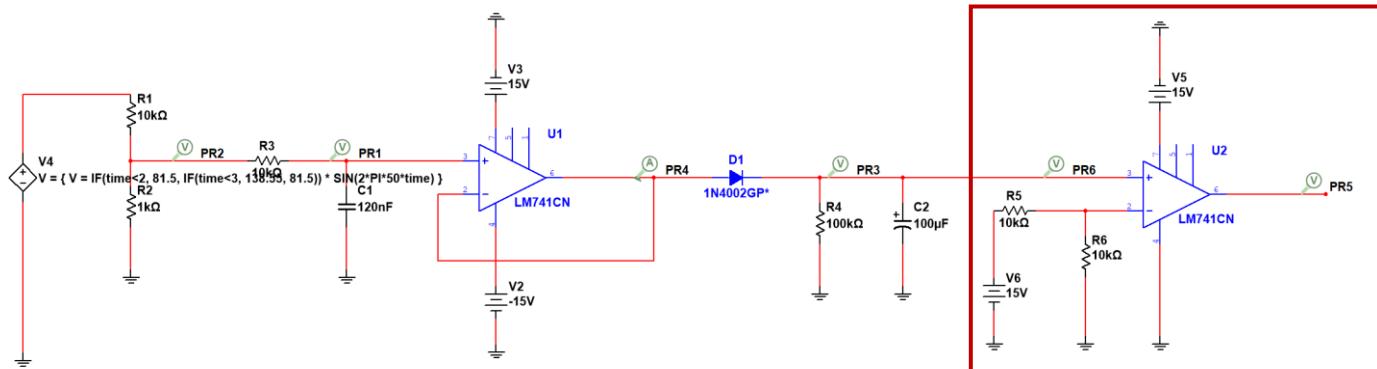
$$15x - 7.54x = 7.54y$$

$$\underbrace{7.46x}_{7.46y} = 7.54y$$

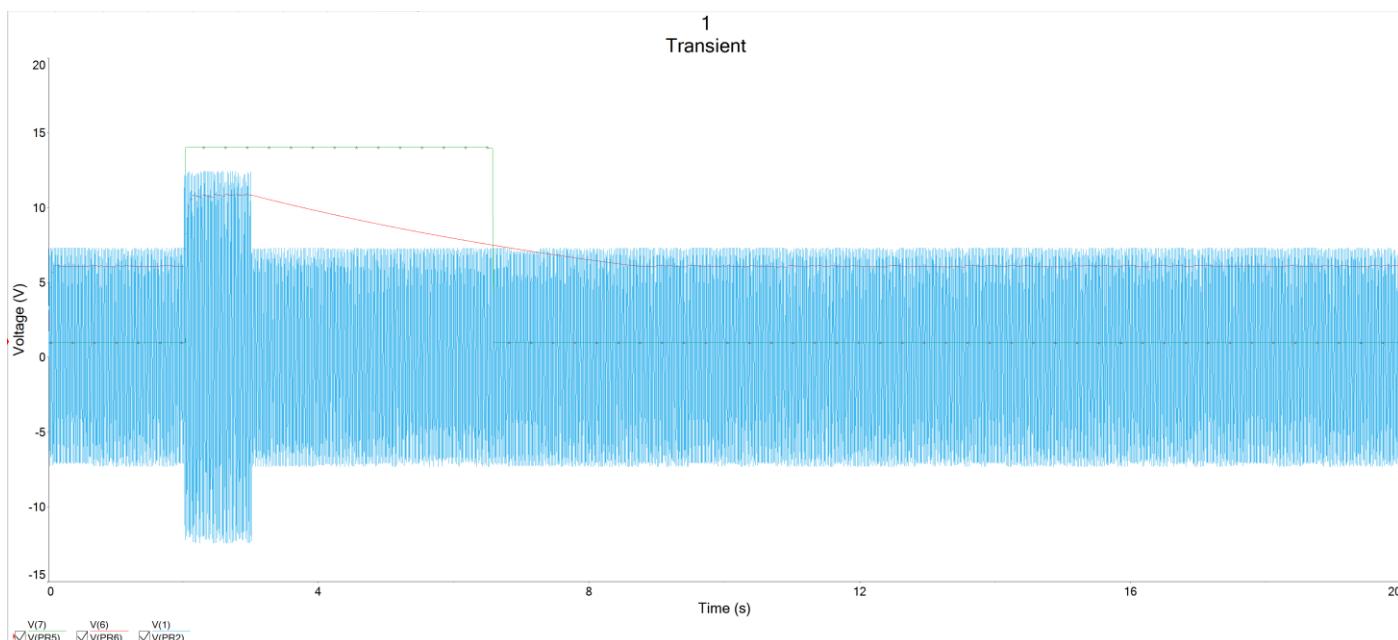
$$\Rightarrow y = 0.99x$$

با توجه به محاسبات انجام شده در تصویر روبرو مقدار مقاومت های  $u, X$  بسیار نزدیک به هم خواهند بود در نتیجه برای این قسمت دو مقاومت یکسان  $10$  کیلو اهمی در نظر گرفتیم. پایه منفی تغذیه آپ امپ به صفر ولت و پایه مثبت آن به  $15$  ولت متصل است که اگر ولتاژ ورودی از ولتاژ رفرنس کمتر بود ولتاژ صفر را در خروجی بدهد و لامپ روشن نشود و اگر بزرگتر بود ولتاژ  $15$  ولت در خروجی خواهیم داشت که روشن کدن لامپ هشدار استفاده خواهد شد.

پرای این بخش قسمت زیر به مدار اضافه گردید:



شکل موج خروجی پروب های ۲، ۵ و ۶ در تصویر زیر مشاهده می شود.

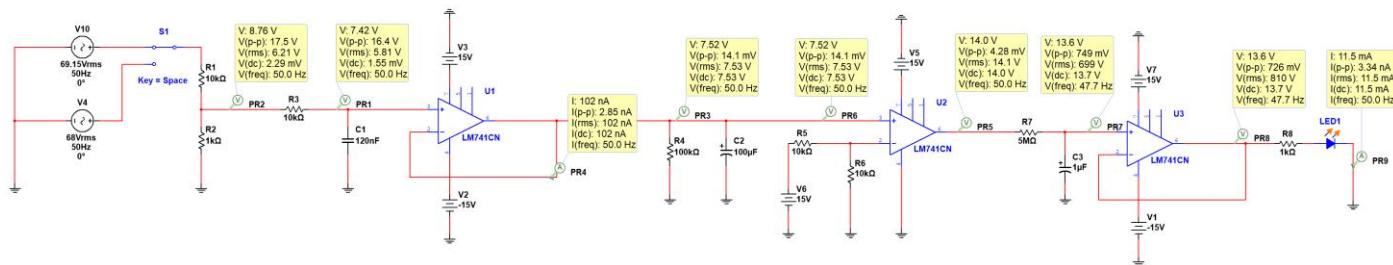


برای این بخش از مدار باید از یک مدار RC با ثابت زمانی ۵ ثانیه استفاده شود در نتیجه پس از گذشت ۵ ثانیه ولتاژ ورودی ال ای دی به ۶۳ درصد ولتاژ نهایی آن خواهد رسید که این یعنی پس از گذشت ۵ ثانیه ال ای دی مدار تقریباً روشن خواهد بود.

از خازن الکتروولیتی ۱ میکروآهم و مقاومت ۵ مگا اهمی استفاده شده است جهت ساخت ثابت زمانی استفاده شده است.

ورودی این مدار ۱۵ ولت یا صفر ولت خواهد بود یعنی ورودی آن متناوب نبوده و به شکل توابع پله است در نتیجه در حالت پایدار افت ولتاژ روی این مدار نخواهیم داشت و خروجی آن پس از گذشت مدت زمان مطلوب همان مقادیر ورودی خواهد بود.

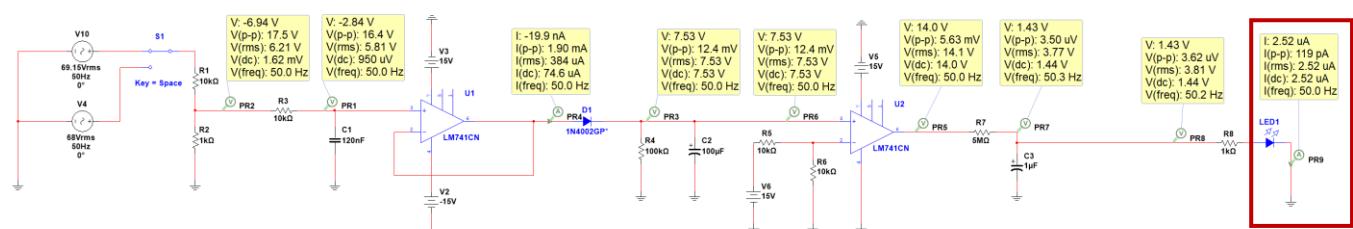
مطلوب دیتاشیت ال ای دی های معمول مورد استفاده جریان مجاز آنها در بازه ۱۰ الی ۲۰ میلی آمپر خواهد بود. ولتاژ وارد شده به ال ای دی حداقل می تواند ۱۵ ولت باشد و در نتیجه یک مقاومت ۱ کیلو اهمی با آن سری شده است تا جریان شاخه از مقدار ۱۵ میلی آمپر فراتر نرود. البته مقدار این مقاومت با توجه به شرایط مدار و افت ولتاژ های نا خواسته در طول مدار می تواند متغیر باشد چرا که مقدار خروجی مقایسه گر در تئوری و شبیه سازی مولتی سیم متفاوت است و ۱۴ ولت است. همچنین مدار تاخیر به ۱۳ ولت در نهایت می رسد و این افت ولتاژ ها شاید سبب شود که لامپ با نور کمی روشن شود که در نتیجه می توان مقادیر مقاومت سری با ال ای دی را کاهش داد. علاوه بر نکات اشاره شده خود ال ای دی دارای مقاومتی است که در محاسبات تئوری صفر در نظر گرفته شده است.



شکل نهایی مدار مشابه شکل بالا خواهد بود. همانطور که مشاهده می شود پس از گذشت زمانی بسیار زیاد جریان ال ای دی به ۱۱.۵ میلی آمپر رسیده است که پایین تر از حداقل اعلام شده در دیتا شیت است.

بررسی وجود و عدم وجود بافر:

اگر بافر وجود نداشته باشد در حالت پایدار مدار که خازن ۱ میکروفارادی مانند مدار باز عمل می کند، مقاومت ۵ مگا اهمی و مقاومت ۱ کیلو اهمی با یکدیگر سری می شوند و این امر باعث جریان کشی روی این سیم می شود. از آنجایی که مقاومت ۵ مگا اهمی به نسبت ولتاژ حداقل ۱۵ ولت خیلی بزرگتر است در نتیجه افت ولتاژ بسیار زیادی روی مقاومت بزرگ رخ می دهد و جریان ال ای دی بسیار کم می شود و به مرتبه میکرو آمپر می رسد که برای روشن کردن ال ای دی کافی نیست. همانطور که در شکل زیر مشاهده می شود جریان ال ای دی پس از گذشت زمان طولانی خیلی کوچک خواهد بود.



اما بافر باعث می شود جریان گذرنده از مقاومت ۵ مگا اهمی خیلی کوچک باشد و افت ولتاژ دو سر آن ناجیز باشد و همچنین فقط ولتاژ را انتقال دهد تا جریان گذرنده از ال ای دی تحت تاثیر مقاومت قرار نگیرد.

## ۶- بررسی عملکرد مدار:

طبق دستور پروژه ولتاژ آستانه برابر با  $120$  درصد ولتاژ نامی شبکه است.

طبق تست انجام شده در شبیه سازی مولتی سیم اگر ورودی مقداری بیشتر از  $68.8$  موثر داشته باشد ال ای دی روشن میشود اما طبق محاسبات تئوری باید در  $69.2$  ولت روشن شود.

$$\frac{81.5}{\sqrt{2}} \times 1.2 = 69.2V \rightarrow Err = \frac{69.2 - 68.8}{57.6} \times 100 = 0.69\%$$

در نتیجه خطای بدست آمده در شبیه سازی برابر است با  $0.69$  درصد که خطای کم و قابل قبولی است. مدار طراحی شده به نحوی عمل می کند که کمی قبل از آستانه ال ای دی روشن می شود. اما این مقدار خطا در شبیه سازی مولتی سیم بسیار کم اندازه گیری شده است و مطلوب است.

### «بخش دوم: تشخیص نامتعادلی شبکه سه فاز»

#### ۱- مقسم ولتاژ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} (81.5) \leq 15 \\ \rightarrow R_1 + R_2 \geq 5.43R_2 \rightarrow R_1 \geq 4.43R_2$$

در نتیجه مقاومت های  $R1 = 47$  و  $R2 = 10$  کیلو اهم استفاده خواهیم کرد. علت مرتبه کیلو اهم مقاومت ها آن است که مدار High Resistance باشد و جریان زیادی نکشد.

در واقع در این قسمت ولتاژ هر کدام از فاز ها را به  $15$  ولت کاهش دادیم تا اگر ناترازی ای رخ داد مدار آسیب نبیند.

#### ۲- جمع کننده

در این مرحله از یک تقویت کننده عملیاتی به صورت جمع کننده معکوس استفاده میشود. طبق KCL در نقطه گره چریان های ورودی با هم جمع میشوند این جریان ها به دلیل اینکه از یک مقاومت یکسان در آن ها استفاده شده است هم ارز ولتاژ ان ها است فرمول کلی از رابطه زیر به دست میآید

$$V_{out} = -R_f \left( \frac{V_1}{R_{in1}} + \frac{V_2}{R_{in2}} + \frac{V_3}{R_{in3}} \right)$$

برای مقاومت های ورودی از مقدار  $10k$  استفاده میکنیم این مقدار امپدانس ورودی مناسبی ایجاد کرده و بار اضافی روی مقسم ولتاژ نمیگذارد.

برای استفاده از آمپ امپ در این مدار میتوان به ۲ دلیل اشاره کرد: ۱- اگر ولتاژ ها به صورت مستقیم با هم جمع شود در صورت ناترازی و قطع یکی از فاز ها اصطلاحاً وضعیت "دوفاز شدن" single phasing رخ میدهد زمانی که این پدیده رخ دهد جریان شدیدی از دو فاز دیگه کشیده میشود و مدار آسیب میبیند و فیوز قطع میشود و ۲- اینکه در نقطه زمین مجازی ولتاژ صفر بشود که بتوانیم هر جریان را متناسب با ولتاژ آن در نظر بگیریم در غیر این صورت با فاز های متفاوت نمیتوان این نتیجه را گرفت.

آسی مورد استفاده: LM741CN با تغذیه دوبل  $12$  ولت

از آنجا که مقایسه گر با ولتاژ صفر مقایسه می کند، اگر هر سه فاز قطع باشد مانند حالتی است که متعادل است و در نتیجه ال ای دی روشن نمی شود. همچنین اگر سه فاز قطع شود ورودی ای وجود ندارد که بتواند سبب روشن شدن ال ای شود. همچنین می دانیم قطع یک فاز و دو فاز

تفاوتی در میزان نامتعادلی ایجاد نمی کند. پس بیشترین نامتعادلی در حالت قطع یک و یا دو فاز اتفاق می افتد. می توان مقدار آن را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

**Worst-case1:** قطع شدن یک فاز

فرض کنید فاز سوم ( $V_3$ ) قطع شود. در این صورت خروجی جمع کننده برابر با جمع دو فاز باقیمانده می شود. یعنی:

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

پس مقدار ولتاژ خروجی برابر با دامنه یک فاز می شود و برابر با ۱۵ ولت خواهد بود.

**Worst-case2:** قطع شدن دو فاز

در این مثلاً فاز دوم و سوم قطع می شوند و در نتیجه ولتاژ خروجی برابر خواهد بود با منفی ولتاژ فاز اول که یعنی دامنه آن برابر با دامنه یک فاز و برابر با ۱۵ ولت خواهد بود.

و اگر هر سه فاز قطع شده باشند جمع هر سه صفر شده و ولتاژ خروجی نیز صفر می شود.

این حالت اگرچه یک خطا است، اما چون سیگنالی تولید نمی کند، از نظر "میزان نامتعادلی" مقدار آن صفر است و مدار تشخیص دهنده چیزی حس نمی کند.

#### ۴- بررسی عملکرد مدار

طبق آزمایش انجام شده در شبیه سازی مولتی سیم به ازای تغییر ۲ ولتی مقدار موثر یکی از فاز ها چراغ ال ای دی روشن خواهد شد. یعنی اگر یکی از فاز ها روی مقدار ۵۵ ولت موثر قرار داشته باشند سیستم هشدار می دهد. این مقدار یعنی مدار موجود نزدیک به ۴ درصد حد آستانه در آزمایش شبیه سازی دارد.

