

«باسمہ تعالیٰ»



گزارش و پیش گزارش آزمایش پنجم
پاسخ گذرای مدارهای RC و RL



طراحی و تدوین:

مهدی رحمانی

9731701

هدف آزمایش

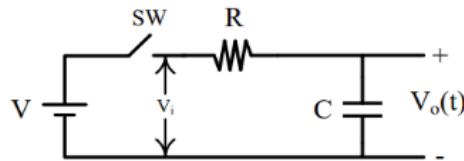
بررسی پاسخ گذرای مدارهای RC و RL به ورودی پله

بخش اول) پاسخ گذرای مدار RC پایین گذر و بالاگذر

الف) صافی پایین گذر: شکل ۱ مدار RC پایین گذر را نشان می‌دهد. کلید SW در لحظه $t=0$ بسته می‌شود و ولتاژ خروجی (پاسخ مدار) پس از مدت کوتاهی به مقدار نهایی خود، یعنی V خواهد رسید. بطوریکه می‌دانید، پس از بسته شده کلید، می‌توان نوشت:

$$V_o(t) = V(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = RC$$



شکل ۱

در رابطه با شکل بالا میتوان اینگونه توضیح داد که قبل از بسته شدن کلید مقدار V_0 برابر ۰ میباشد.

اما با بسته شدن کلید میتوان در مدار با نوشتن یک KVL فرمول به دست آمده را توجیه کرد:

$$kvl : -V + RI_1 + V_o = 0 \quad (1)$$

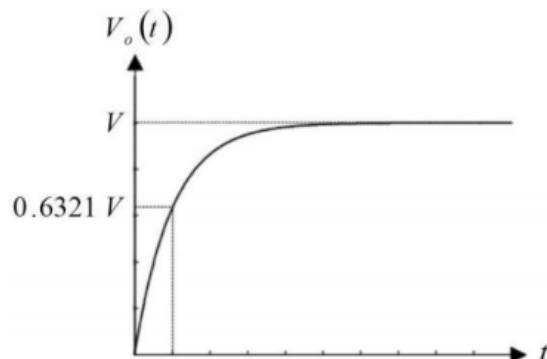
$$I_1 = I_o = C \frac{dV_o}{dt} \quad (2)$$

$$\stackrel{(1),(2)}{\implies} V = RC \frac{dV_o}{dt} + V_o \xrightarrow{\text{حل معادله مرتبه اول}} V_o(t) = V(1 - e^{\frac{-t}{RC}})$$

$$\stackrel{\tau=RC}{\implies} V_o(t) = V(1 - e^{\frac{-t}{\tau}})$$

طبق فرمول به دست آمده مقدار V_0 در لحظه برابر با 0 میشود و در $t = \infty$ خواهیم داشت :
اما میتوان گفت که در $t = 5\tau$ تقریباً با مقدار V برابر خواهد شد. بنابراین

نمودار به شکل زیر میشود:

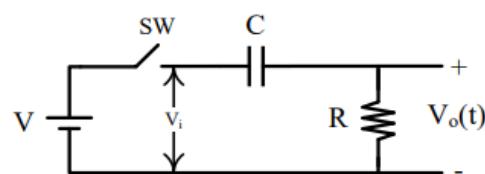


شکل ۲

هم چنین لازم به ذکر است که به ثابت RC که از جنس زمان میباشد، ثابت زمانی مدار RC میگویند و با τ نشان می دهند.

همچنین تا قبل از زمان 5τ ما پاسخ گذرا را داریم و بعد از آن را پاسخ دائمی مدار گویند. بنابراین داریم : پاسخ دائمی + پاسخ گذرا = پاسخ کامل

ب) صافی بالا گذر: شکل ۴ مدار بالا گذر را نشان می دهد. با بسته شدن کلید، خازن در مقابل جهش ورودی به صورت اتصال کوتاه عمل نموده و ولتاژ خروجی به V ولت جهش می کند و پس از مدت کوتاهی به مقدار نهایی خود یعنی صفر خواهد رسید، به طوری که پس از بسته شدن کلید، می توان نوشت:



شکل ۴

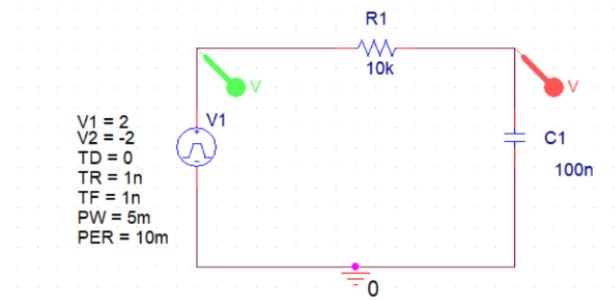
$$V_o(t) = Ve^{-t/\tau}$$

$$\tau = RC$$

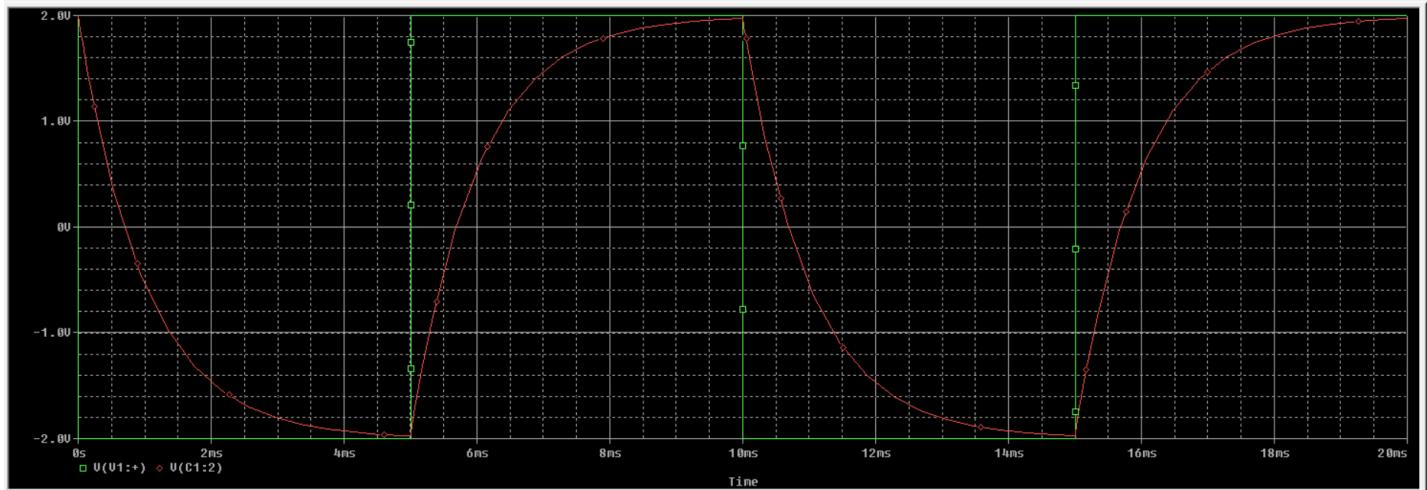
قسمت پیش گزارش:

پیش گزارش ۱: پاسخ گذرای مدارهای مربوط به RC پایین گذر با $C=100nF$ و $R=10k\Omega$ را با استفاده از نرم افزار Orcad و تحلیل Time Transient شبیه سازی کنید و ثابت زمانی مدار را بدست آورید.

بنابراین مدار مورد نظر به شکل زیر می‌شود:



نتیجه‌ی شبیه ساز هم به صورت زیر می‌باشد:

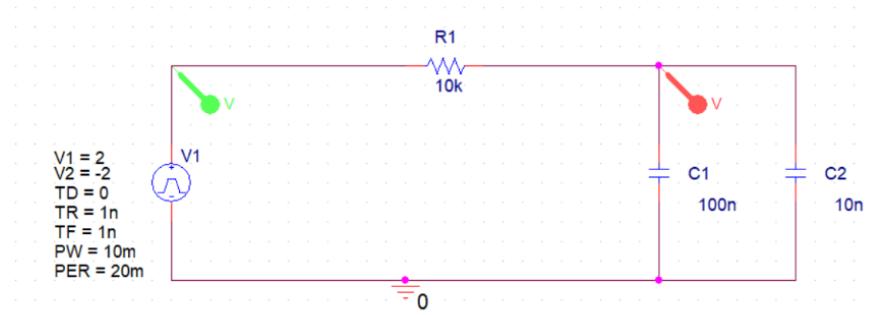


حال ثابت زمانی به صورت زیر به دست می‌آید:

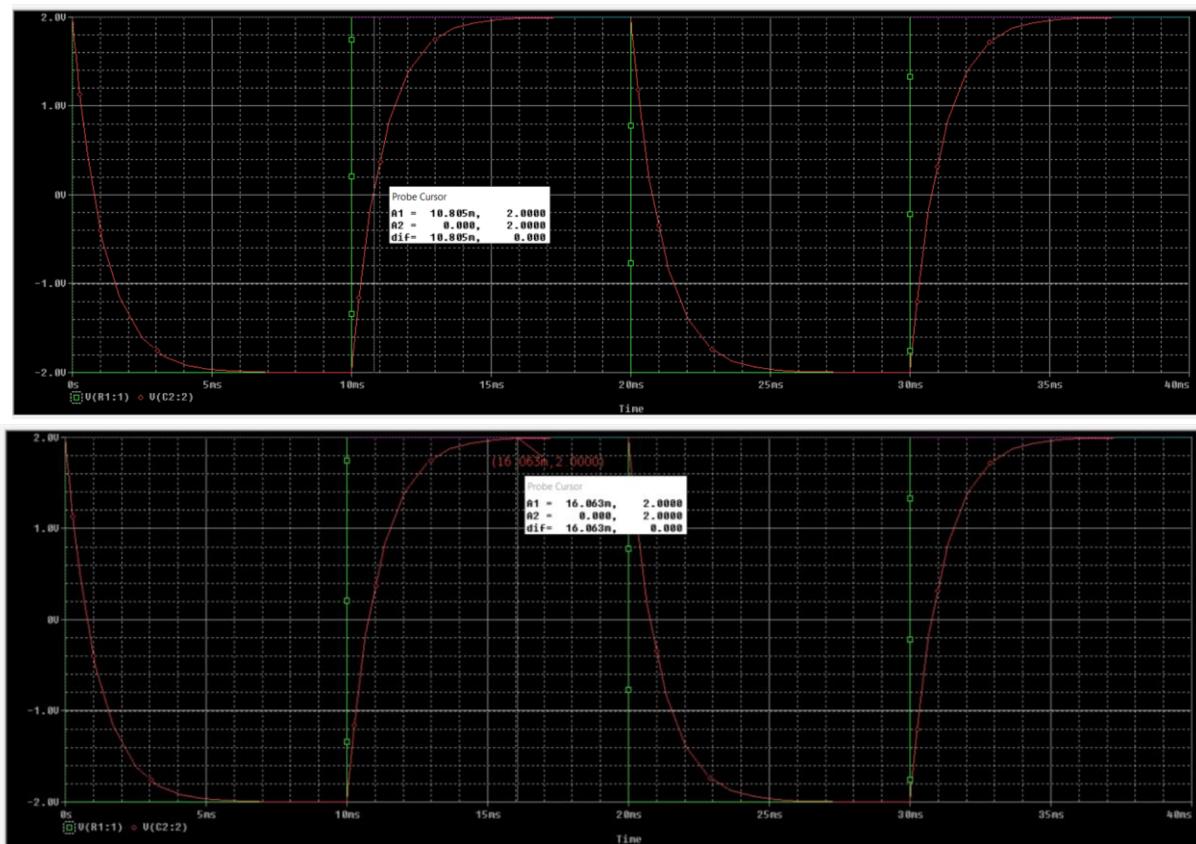
$$5\tau = 20.733 \text{ ms} - 15.733 \text{ ms} = 5 \text{ ms} \rightarrow \tau = 1 \text{ ms}$$

پیش گزارش ۲: در مدار مربوط به RC پایین گذر، چنانچه یک خازنی با مقدار ۱۰ نانوفاراد به موازات خازن مدار قرار گیرد پاسخ مدار را چگونه توجیه می کنید؟

مدار مورد نظر به صورت زیر میشود:



همچنین نتیجه‌ی شبیه سازی به صورت زیر میشود (دوره را برای مشاهده پاسخ کامل افزایش داده ایم)



همانطور که مشاهده میشود در اینجا مقدار 5RC افزایش میابد چرا که میزان خازن معادل نیز افزایش یافته است.

قسمت آزمایش:

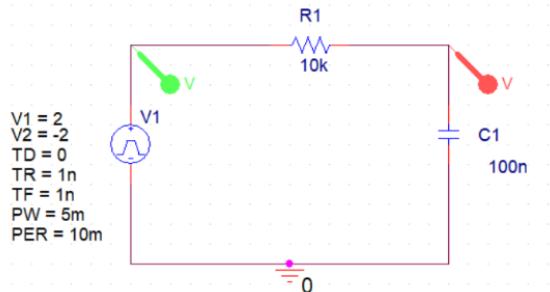
سوال اول:

۱- مدار شکل ۱ را با $R = 10k\Omega$ و $C = 100nF$ بسته و یک ولتاژ پله‌ای با دامنه ۲ ولت ماقزیم به مدار اعمال کنید (از موج مربعی با فرکانس حدود ۱۰۰ هرتز به عنوان ولتاژ پله‌ای استفاده کنید). ورودی مدار را به کanal ۱ و خروجی آن را به کanal ۲ نوسان نگار متصل نمائید. پاسخ مدار را مشاهده و رسم کنید و از روی منحنی بدست آمده ثابت زمانی مدار را تعیین نموده و با مقدار RC مقایسه کنید.

علت اینکه ما از ولتاژ با موج مربعی استفاده میکنیم این است که به صورت یک کلید یا سوییچ عمل کند و مدار را قطع و وصل کند و می توانیم هم شارژ و هم دشارژ خازن را ببینیم. در سیکل مثبت و منفی پولاریته ها عوض میشود. یعنی اگر در پولاریته i مثبت شارژ شود سپس با وارد شدن به سیکل منفی و عوض شدن پولاریته ابتدا خازن مقدار ولتاژ ذخیره شده از قبل را از دست میدهد تا ۰ شود و سپس در جهت پولاریته i جدید شارژ میشود.

در رابطه با مشخصات منبع یک ولتاژ پله‌ای با دامنه i ۲ ولت داریم پس $V_1 = 2V$ و $V_2 = -2V$ میباشد. TD مقدار تاخیر از مبداء را مشخص میکند که برابر ۰ قرار میدهیم. مدت زمانی که طول میکشد از V_1 به V_2 باید با TR مشخص میشود که یک مقدار خیلی کوچک در حد ۱ نانوثانیه میگیریم. مدت زمانی هم که طول میکشد که از V_2 به V_1 برسد با TD مشخص میشود و آن را هم برابر ۱ نانو ثانیه میگیریم. همانطور که در سوال گفته شده فرکانس ۱۰۰ هرتز میباشد پس مقدار دوره برابر s ۰.۰۱ یا $10ms$ میباشد. بنابراین مقدار PER را برابر $10m$ قرار میدهیم. PW را هم نصف دوره یعنی برابر $5m$ در نظر میگیریم.

بنابراین مدار موردنظر به شکل زیر میشود:

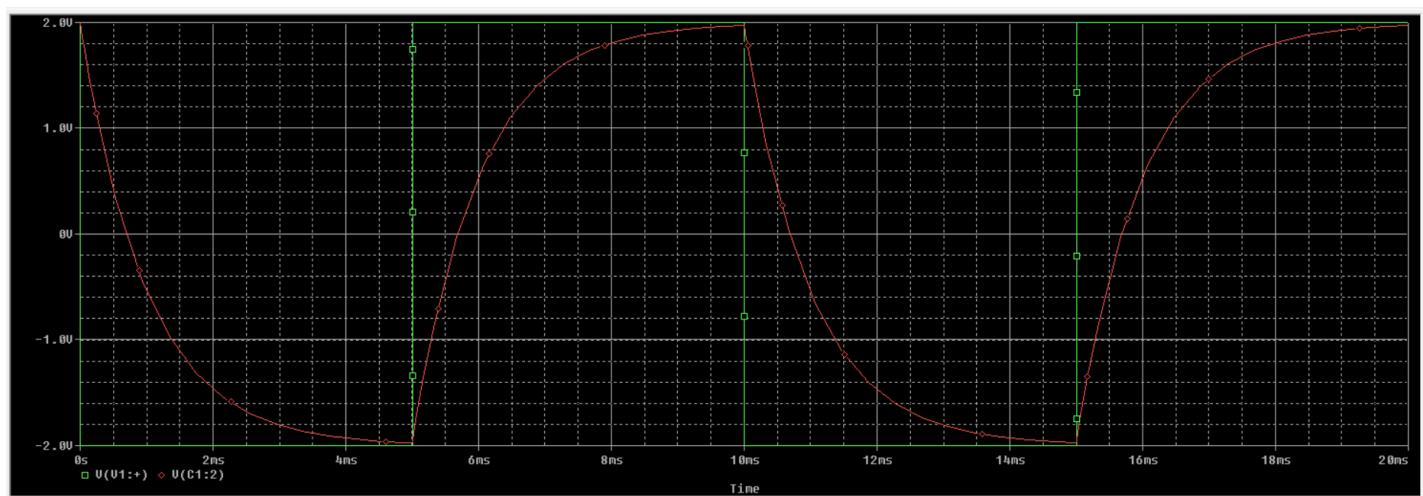


حال با توجه به نتیجه‌ی شبیه ساز میتوان مدت زمان موردنیاز برای شارژ شدن که در انتهای پاسخ گذرا مشخص میشود را به دست آورد. طبق شکل این زمان تقریباً برابر 5ms میباشد.

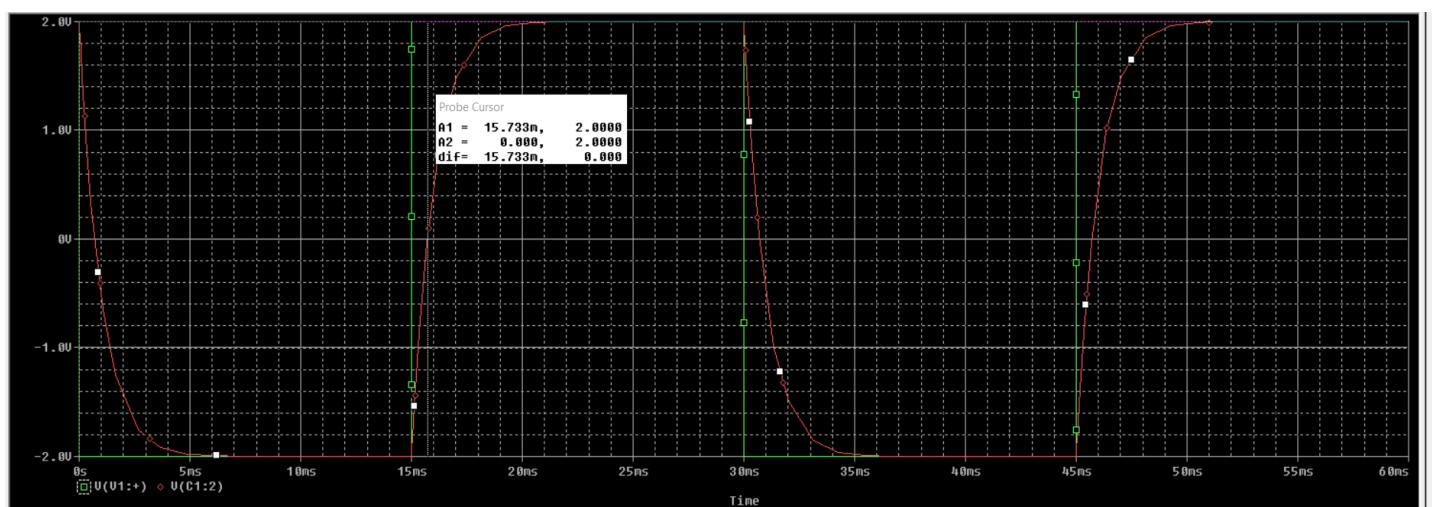
$$\tau = RC = 10k\Omega \times 100nF = 1\text{ms}$$

پس در واقع میتوان نتیجه گرفت که در $t = 5\tau$ تقریباً خازن شارژ میشود.

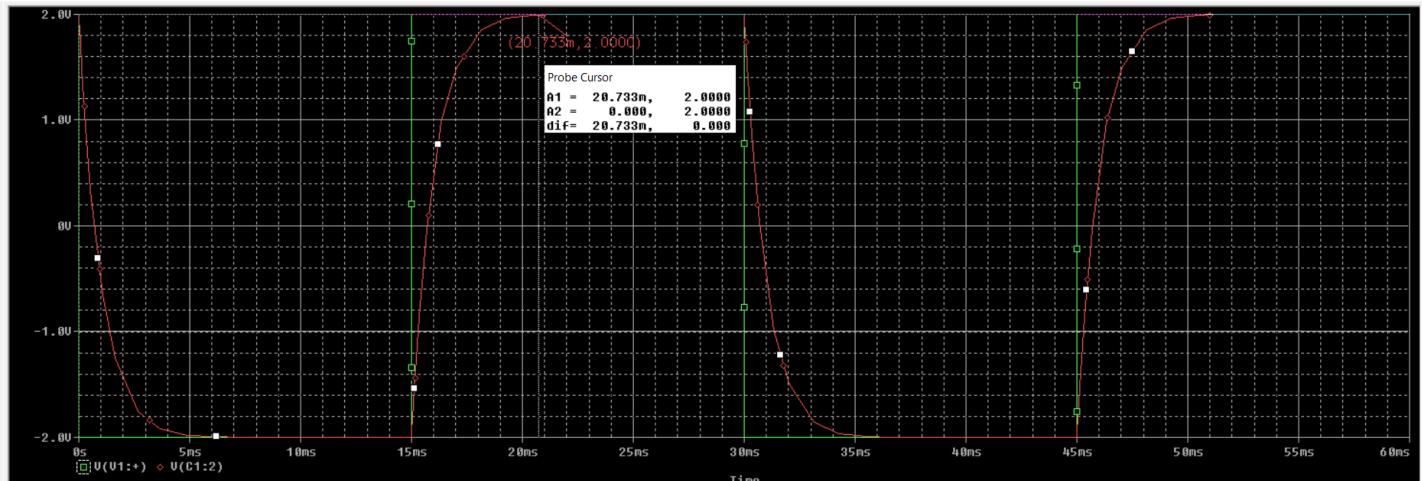
در شکل زیر نتیجه‌ی شبیه ساز را میتوانید مشاهده کنید:



هم چنین با زیاد کردن دوره میتوان پاسخ گذرا و دائمی را به صورت واضح‌تر مشاهده کرد:



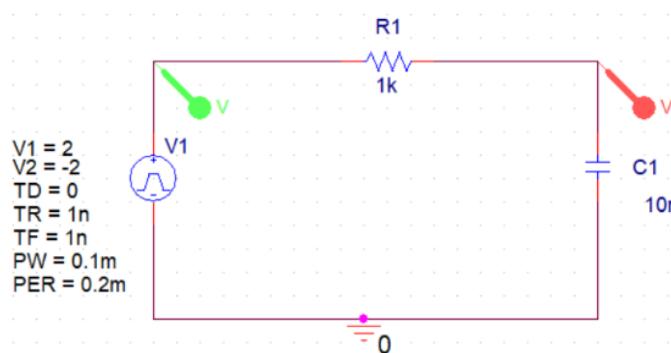
در این شکل ابتدا موس را روی نقطه تقاطع 0 ولت با نمودار برد که در 15.733ms خازن خالی بوده و در بالا نشان داده است. حال موس را روی نقطه ای که خازن شارژ شده است قرار میدهیم که طبق شکل برابر 20.733ms میباشد تا با تفاضل این دو زمان مدت زمان شارژ به دست آید: $(20.733 - 15.733) = 5 \text{ ms}$



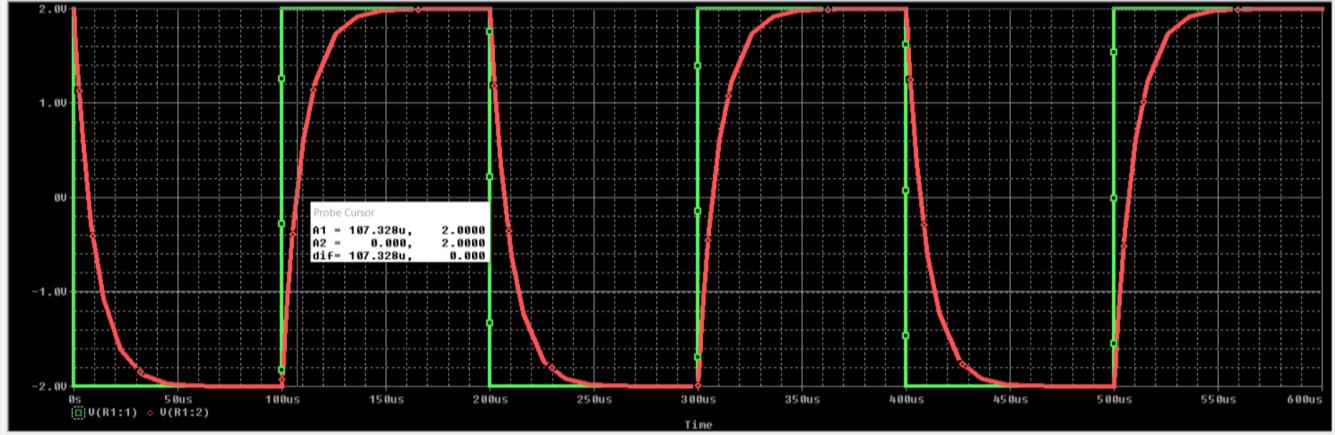
سوال دوم:

کاربرد این قسمت برای آن است که برای مثال اگر یک سری مقاومت کربنی داشتیم که لایه های رنگی آن برای مثال ازبین رفته بود و دسترسی به اهم متر نیز نداشتیم بتوانیم با این روش به صورت تقریبی مقدار مقاومت را به دست آوریم.

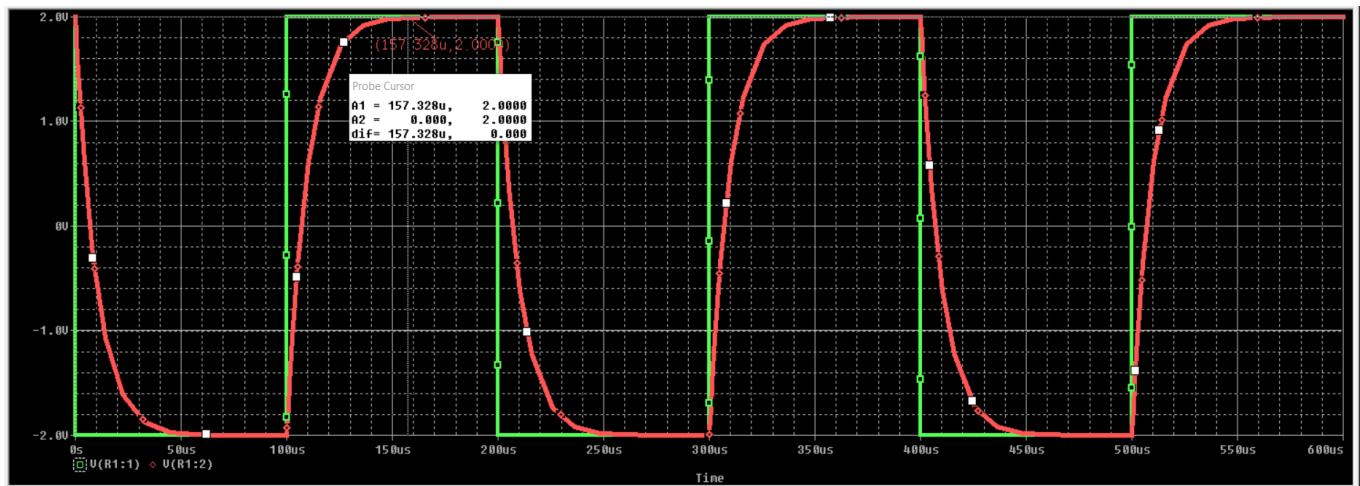
بار اول مقدار مقاومت را برابر $1\text{k}\Omega$ در نظر گرفته ولی فرض میکنیم که مقدار آن را نمیدانیم. مقدار دوره را برابر 0.2ms میگیریم و نمودار را برابر 0.6ms یعنی 3 تناوب رسم میکنیم مدار به شکل زیر میشود:



حال یک بار زمان در لحظه‌ی خالی بودن خازن را میابیم که باتوجه به نمودار زیر برابر با 107.32 μ s میباشد:



بار دیگر زمانی که خازن کامل شارژ شده است را به دست می‌آوریم که طبق شکل برابر 157.32 μ s شده است:



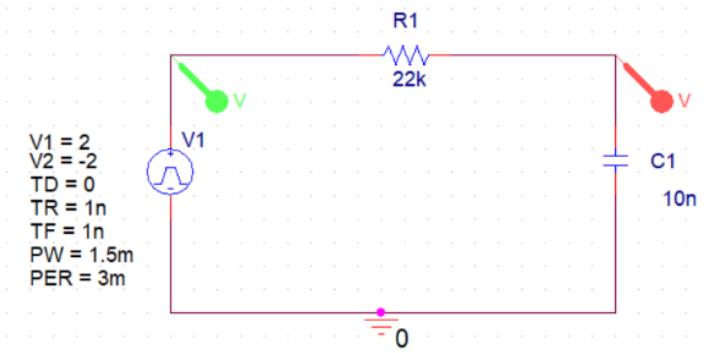
حال طبق روابطی که به دست آوردیم میدانیم $\tau = RC$ میباشد با تفاضل دو زمان به دست آمده خواهیم داشت:

$$5\tau = 157.32\mu\text{s} - 107.32\mu\text{s} = 50\mu\text{s} \rightarrow \tau = 10\mu\text{s} \quad (1)$$

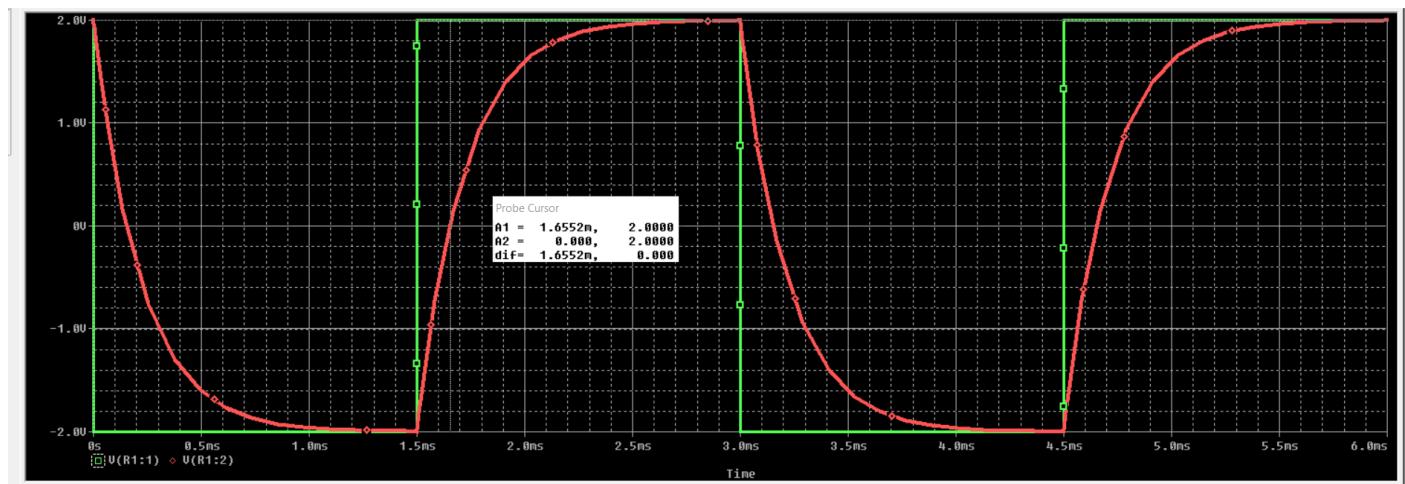
$$\tau = RC \xrightarrow{(1)} 10\mu\text{s} = RC \xrightarrow{C=10nF} 10\mu\text{s} = 10n\text{F} \times R \rightarrow R = 1k\Omega$$

بنابراین R مجهول به صورت تقریبی برابر 1 $k\Omega$ شد.

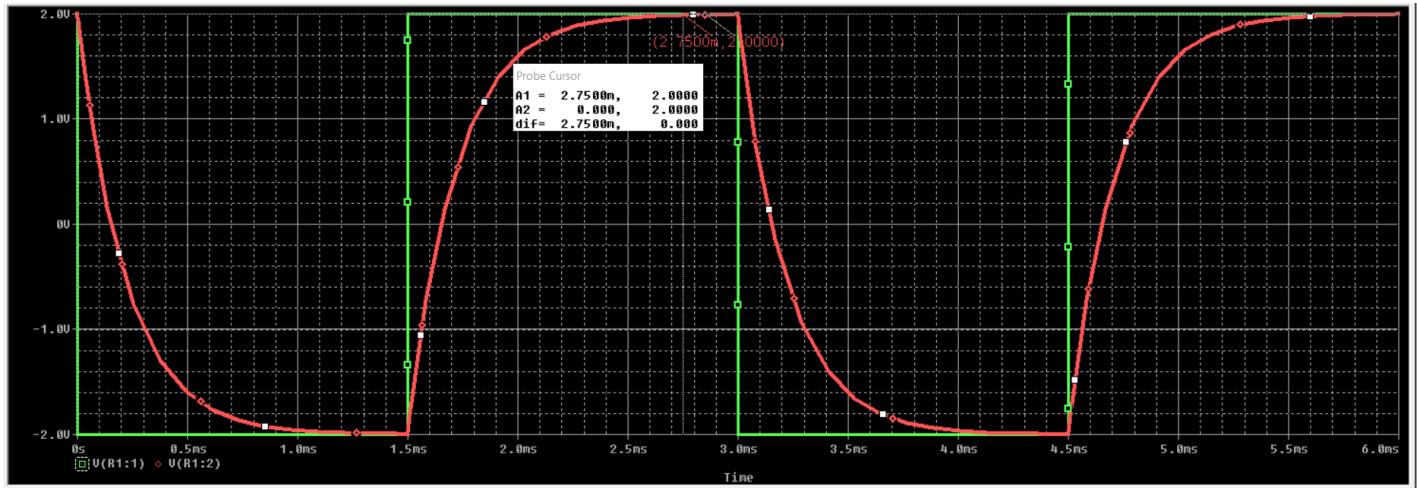
بار دوم مقدار مقاومت را برابر $22\text{k}\Omega$ در نظر گرفته ولی فرض میکنیم که مقدار آن را نمیدانیم.
 مقدار دوره را برابر 3ms میگیریم و نمودار را برای 6ms یعنی ۲ تناوب رسم میکنیم مدار به شکل زیر میشود:



حال یک بار زمان در لحظه‌ی خالی بودن خازن را میابیم که باتوجه به نمودار زیر برابر با 1.655ms میباشد:



بار دیگر زمانی که خازن کامل شارژ شده است را به دست می آوریم که طبق شکل برابر 2.75ms شده است:



حال طبق روابطی که به دست آوردیم میدانیم $\tau = RC$ میباشد با تفاضل دو زمان به دست آمده خواهیم داشت:

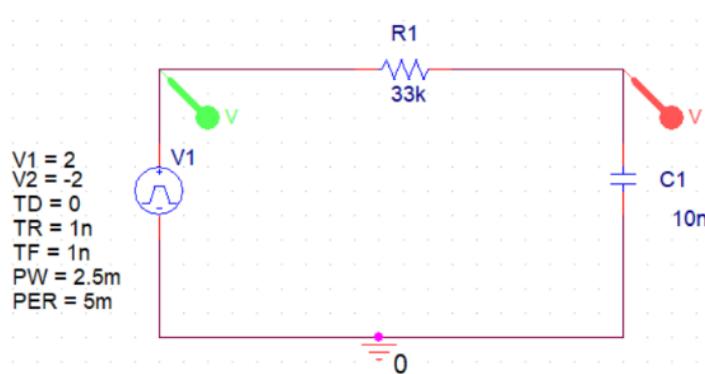
$$5\tau = 2.75\text{ms} - 1.655\text{ms} = 1.095\text{ms} \rightarrow \tau = 0.219\text{ms} \quad (1)$$

$$\tau = RC \stackrel{(1)}{\Rightarrow} 0.219\text{ms} = RC \xrightarrow{C=10\text{nF}} 0.219\text{ms} = 10\text{nF} \times R \rightarrow R = 21.9\text{k}\Omega$$

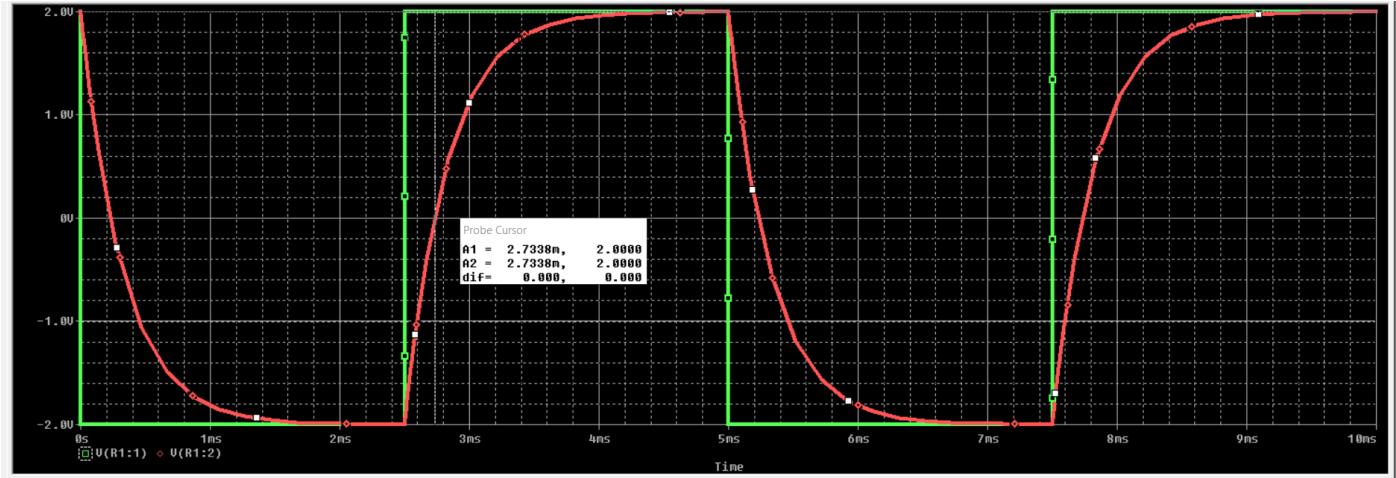
بنابراین R مجھول به صورت تقریبی برابر $21.9\text{k}\Omega$ شد که خیلی نزدیک به $22\text{k}\Omega$ میباشد.

بار سوم مقدار مقاومت را برابر $33\text{k}\Omega$ در نظر گرفته ولی فرض میکنیم که مقدار آن را نمیدانیم. مقدار دوره را برابر 5ms میگیریم و نمودار را برای 10ms یعنی ۲ تناوب رسم میکنیم مدار به شکل

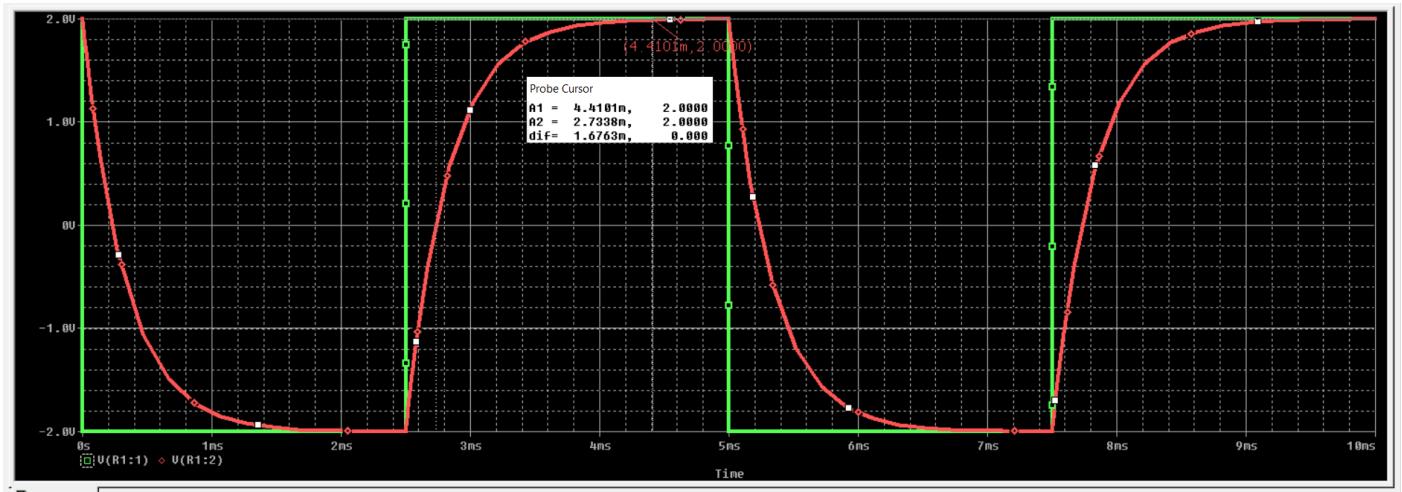
زیر میشود:



حال یک بار زمان در لحظه‌ی خالی بودن خازن را میابیم که باتوجه به نمودار زیر برابر با 2.733ms میباشد:



بار دیگر زمانی که خازن کامل شارژ شده است را به دست می‌آوریم که طبق شکل برابر 4.41ms شده است:



حال طبق روابطی که به دست آوردیم میدانیم $\tau = RC$ میباشد با تفاضل دو زمان به دست آمده خواهیم داشت:

$$5\tau = 4.41ms - 2.733ms = 1.677ms \rightarrow \tau = 0.335ms \quad (1)$$

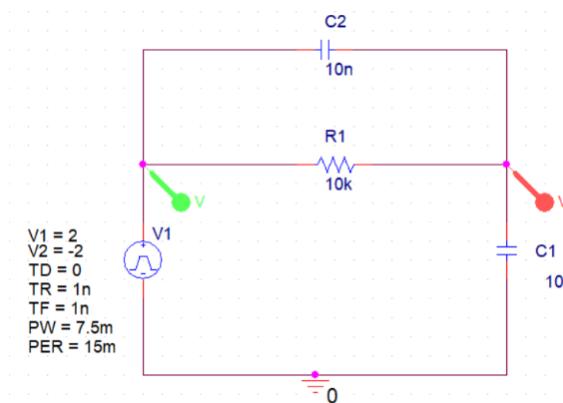
$$\tau = RC \stackrel{(1)}{\Rightarrow} 0.335ms = RC \xrightarrow{C=10nF} 0.335ms = 10nF \times R \rightarrow R = 33.5k\Omega$$

بنابراین R مجھول به صورت تقریبی برابر $33.5 k\Omega$ شد که خیلی نزدیک به $33 k\Omega$ میباشد.

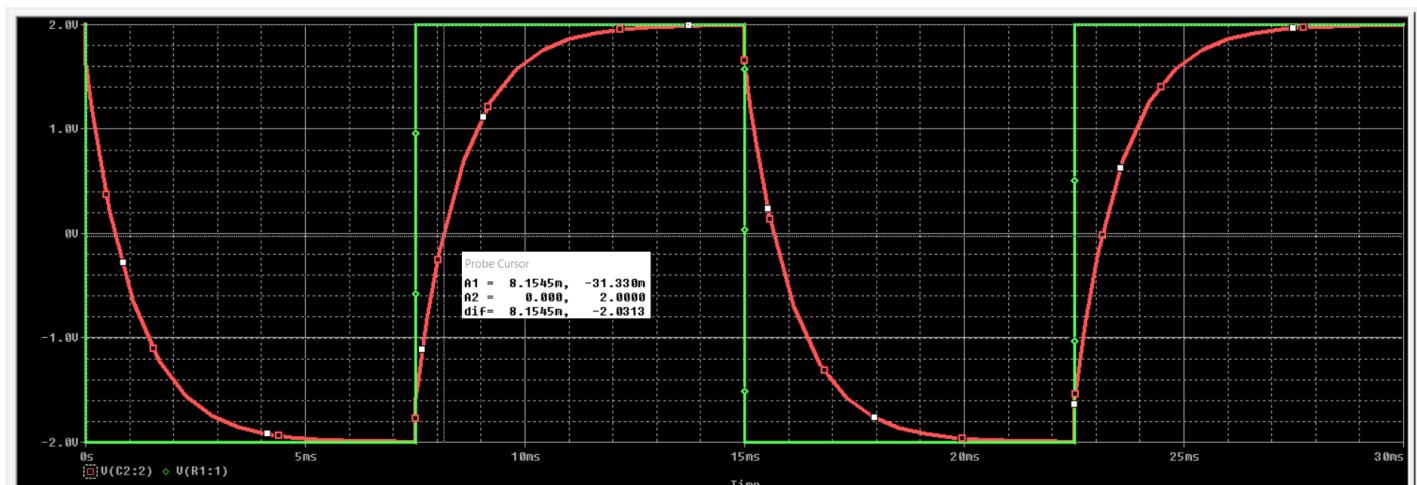
سوال سوم:

۳- حال یک خازن $C = 10 nF$ دیگر را به طور موازی با مقاومت R (در مرحله ۱) قرار داده و پاسخ مدار را مشاهده کنید.

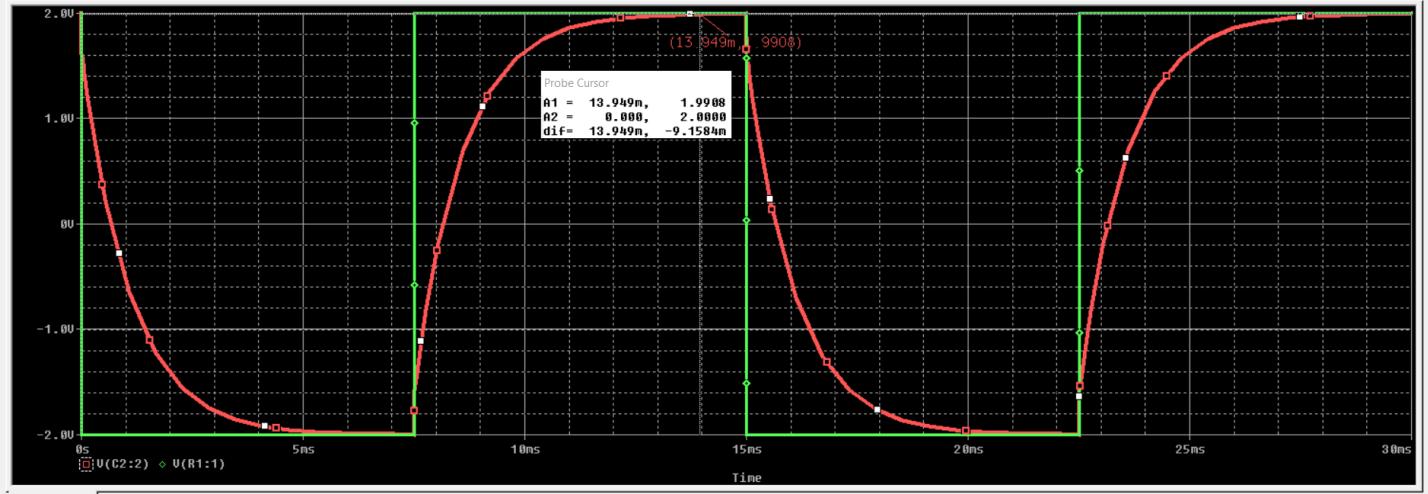
ابتدا مدار را میبندیم که به صورت زیر میشود:



حال یک بار زمان در لحظه‌ی خالی بودن خازن را میابیم که باتوجه به نمودار زیر برابر با 8.154 ms میباشد:



بار دیگر زمانی که خازن شارژ شده است یا درواقع به ولتاژ $1.99V$ رسیده است را به دست می آوریم که طبق شکل برابر $13.94ms$ شده است:



حال اگر مقدار τ را محاسبه کنیم به صورت زیر:

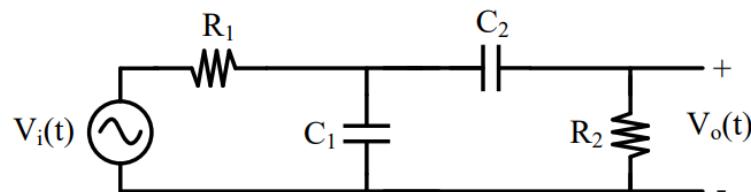
$$5\tau = 13.94ms - 8.154ms = 5.786ms \rightarrow \tau = 1.157ms$$

همانطور که دیده میشود با اضافه شدن این خازن $10nF$ مقدار ثابت زمانی افزایش یافته است.

بخش دوم) پاسخ گذرای مدار RC میان گذر

مدار RC میان گذر از یک RC بالاگذر و یک RC پایین گذر ساخته شده است.

شکل ۶ مدار RC میان گذر را نشان می‌دهد.



شکل ۶

با اعمال ولتاژ پله‌ای به این مدار خازنها به صورت اتصال کوتاه عمل می‌نمایند، لذا $V_o = 0$ ، لکن پس از $t = 0$ خازن C_1 و C_2 شارژ می‌شوند. ابتدا تمام جریان مقاومت R_1 وارد خازن C_1 شده (خازن C_1 در $t = 0$ اتصال کوتاه است) لذا خازن C_1 سریعتر از C_2 شارژ می‌گردد. با افزایش ولتاژ خازن C_1 ، چون خازن C_2 چندان شارژ نشده است، ولتاژ خروجی تقریباً برابر ولتاژ خازن C_1 می‌باشد. ($V_o \approx V_{C1}$) و بنابراین ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد. اما پس از مدتی با شارژ خازن C_1 و کاهش جریان آن و افزایش جریان خازن C_2 ، خازن C_2 بقدر کافی شارژ شده بطوریکه از افزایش ولتاژ خروجی جلوگیری می‌کند و ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. بنابراین ولتاژ خروجی پس از زمان مشخصی به مقدار ماکریتمی خواهد رسید و در $t = \infty$ ، $V_{C1} = V_{C2} = V$ خواهد بود. با نوشتند معادلات جریان و ولتاژ در مدار شکل ۶ به معادله دیفرانسیل زیر بین ورودی و خروجی خواهیم رسید:

$$R_1 = R_2 = R \quad , \quad C_1 = C_2 = C$$

$$R^2 C^2 \frac{d^2 V_o}{dt^2} + 3RC \frac{dV_o}{dt} + V_o = RC \frac{dV_i}{dt} \quad (I)$$

با انتگرالگیری از طرفین معادله بالا در لحظه $t = 0$ معادله زیر بدست می‌آید:

$$R^2 C^2 \frac{dV_o}{dt} + 3RCV_o + \int_{0^-}^{0^+} V_o = RCV$$

با در نظر گرفتن شرط اولیه زیر داریم:

$$V_o(0) = 0$$

$$\frac{dV_o(0)}{dt} = \frac{V}{RC}$$

با حل معادله دیفرانسیل (I) و با در نظر گرفتن شرایط اولیه بدست آمده خواهیم داشت:

$$V_o(t) = \frac{V}{\sqrt{5}} e^{-\frac{3-\sqrt{5}}{2RC}t} - \frac{V}{\sqrt{5}} e^{-\frac{3+\sqrt{5}}{2RC}t}$$

برای محاسبه ماکزیمم ولتاژ خروجی از رابطه بالا مشتق گرفته و برابر صفر قرار میدهیم:

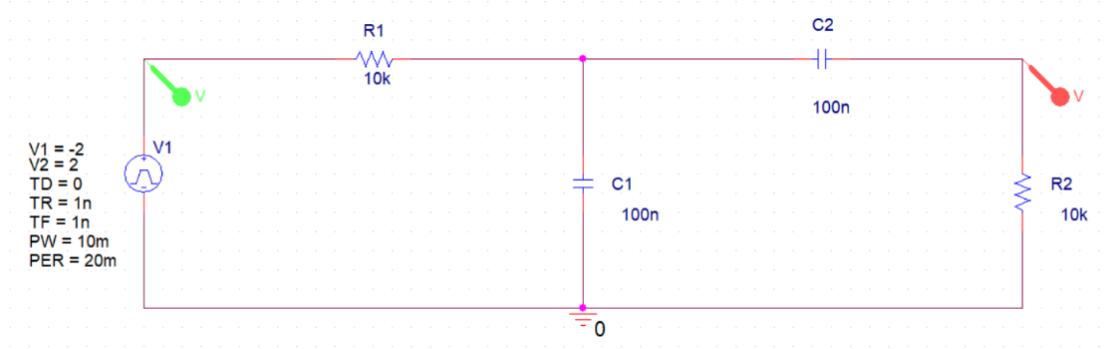
$$\frac{dV_o}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad t_1 = \frac{\tau}{\sqrt{5}} \ln \frac{2}{7-3\sqrt{5}} \approx 0.86\tau$$

$$V_{o_{\max}} = 0.275V$$

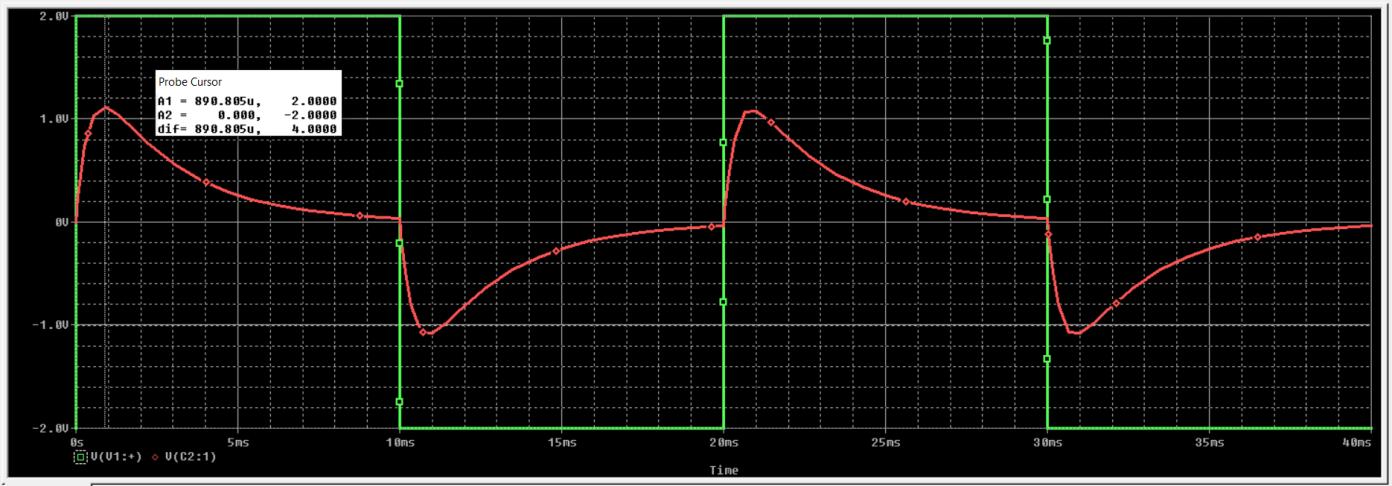
قسمت پیش گزارش:

پیش گزارش ۳: پاسخ گذرای مدارهای مربوط به RC میان گذرا با $R = 10k\Omega$ و $C = 100nF$ را با استفاده از نرم افزار Orcad و تحلیل Time Transient شبیه سازی کنید و ثابت زمانی مدار را بدست آورید.

مدار مورد نظر به صورت زیر میباشد:



همچنین نمودار شبیه سازی به صورت زیر میباشد:



برای محاسبه ی مقدار ثابت زمانی مدار داریم:

$$\tau = RC = 10k\Omega \times 100nF = 1ms$$

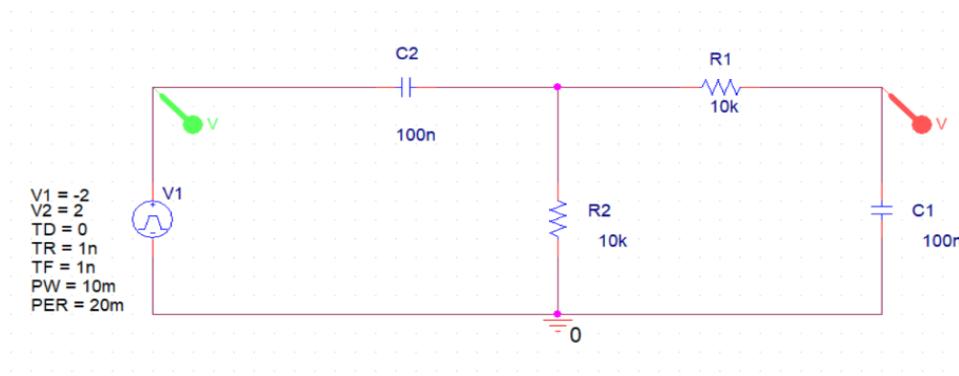
همچنین به کمک نمودار نیز میتوان گفت که:

$$0.86\tau = 0.89ms \rightarrow \tau = 1.03ms$$

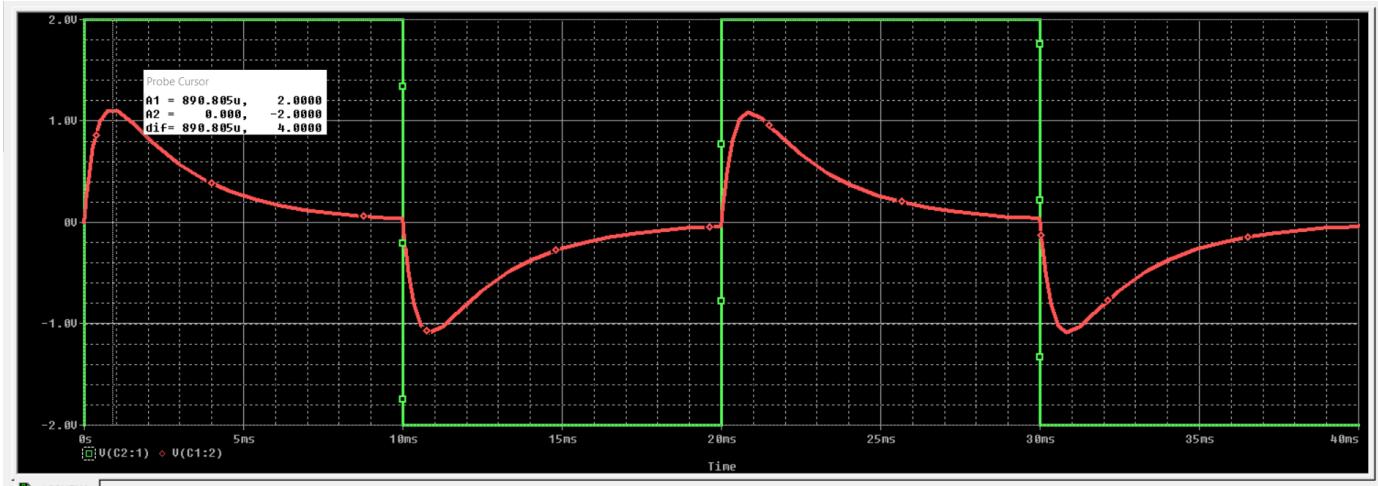
پیش گزارش ۴: با جابجا نمودن طبقه پایین گذر و بالاگذر در مدار میانگذر، پاسخ گذرای مدار تغییری خواهد نمود؟ در این حالت شکل پاسخ مدار را چگونه توجیه می کنید؟

خیر- با جابه جا کردن این دو طبقه پاسخ گذرای مدار تغییری نخواهد کرد.

مدار بسته شده به صورت زیر میباشد:



نتیجه‌ی شبیه سازی نیز به فرم زیر است:



از آنجایی که مقدار هردو مقاومت یکسان و مقادیر خازن‌ها نیز یکسان است با این جابه جایی نتیجه تغییر نمیکند و هم چنان به همان فرم سابق خازن‌ها شروع به پر شدن میکنند.

قسمت آزمایش:

سوال اول:

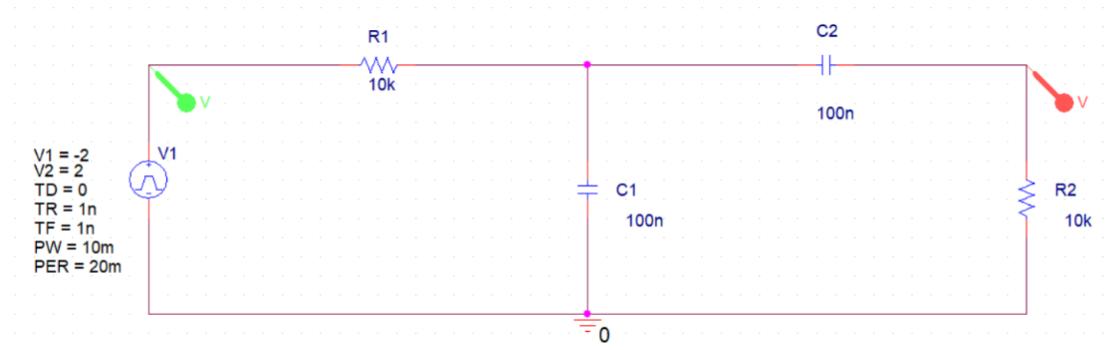
۱- مدار شکل ۶ را با $C=100nF$ و $R=10k\Omega$ بسته و یک ولتاژ پله‌ای با دامنه ۲ ولت ماکزیمم به مدار اعمال کنید. (از موج مربعی با فرکانس حدود ۵۰ هرتز به عنوان ولتاژ پله‌ای استفاده کنید). ورودی مدار را به کanal ۱ و خروجی را به کanal ۲ نوسان نگار متصل نمایید و از روی آن پاسخ مدار را مشاهده و رسم کنید و با مقادیر تئوری آن مقایسه کنید.

ابتدا براساس فرمول‌هایی که با kvl نوشتند در مدار در بالا به دست آوردیم مقدار $V_{o \max}$ و زمان اتفاق افتادن آن را به دست می‌آوریم:

$$V_{o \max} = 0.275 V = 0.275 \times 4 = 1.1v$$

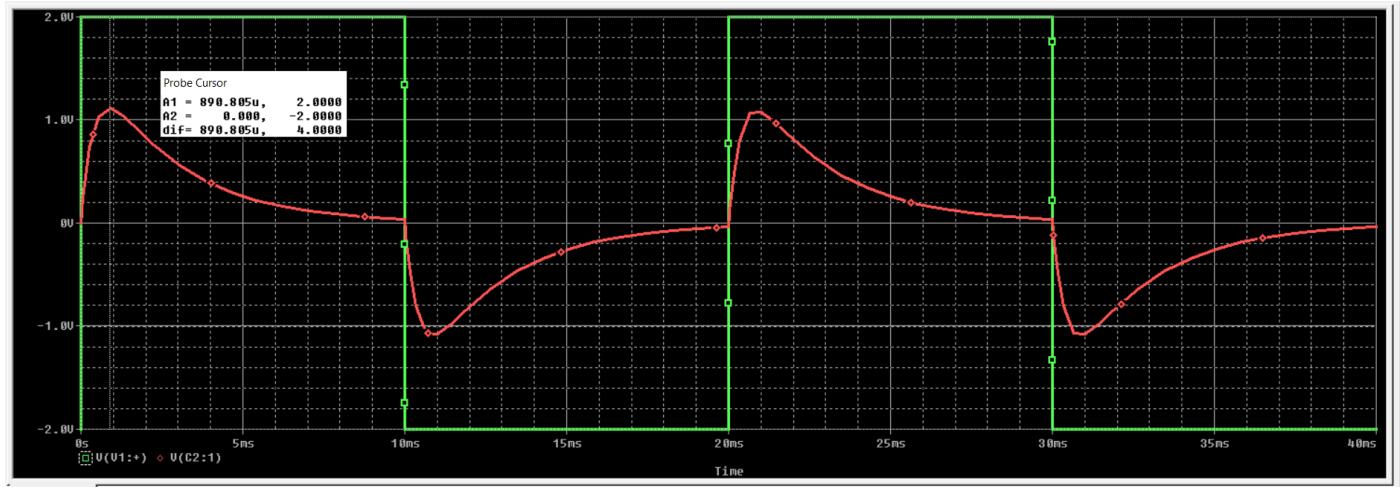
$$t = 0.86 \tau = 0.86 RC = 0.86 \times 10k\Omega \times 100nF = 0.86ms$$

حال مدار مورد نظر را می‌بینیدم:



حال طبق نتیجه‌ی شبیه ساز نیز در $0.89ms$ مقدار بیشینه‌ی ولتاژ اتفاق می‌افتد و تقریباً برابر $1.1v$ می‌باشد.

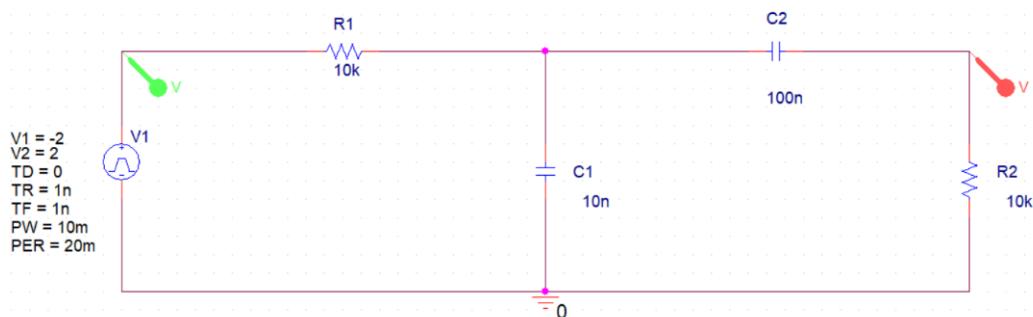
نمودار شبیه سازی در ادامه آمده است:



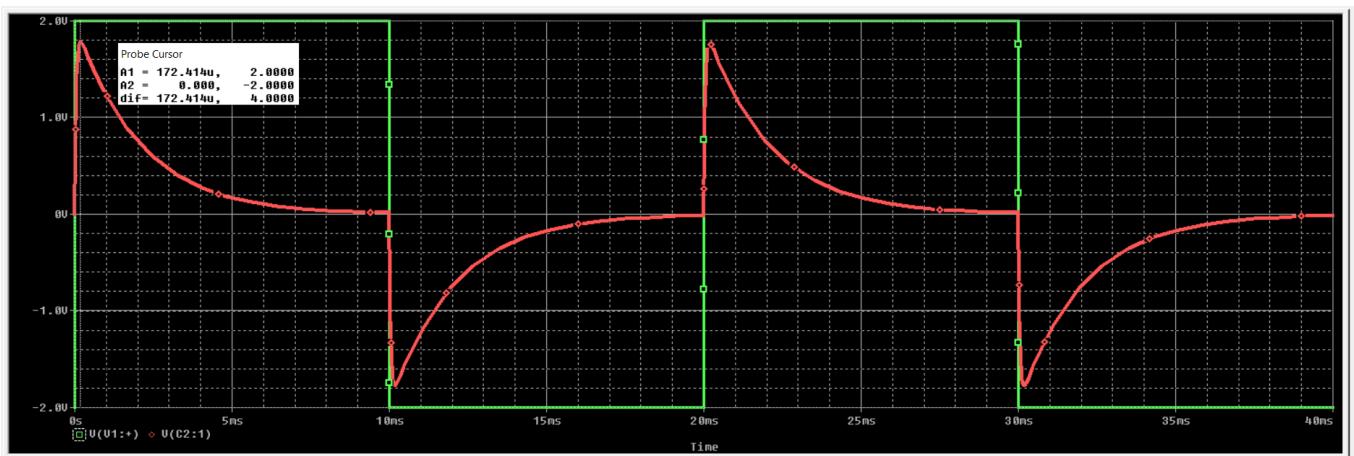
سوال دوم:

۲- مدار شکل ۶ را با $C_2 = 100nF$ و $C_1 = 10nF$ تکرار نمایید و شکل ولتاژ خروجی را رسم کنید.

مدار آن به شکل زیر میباشد:



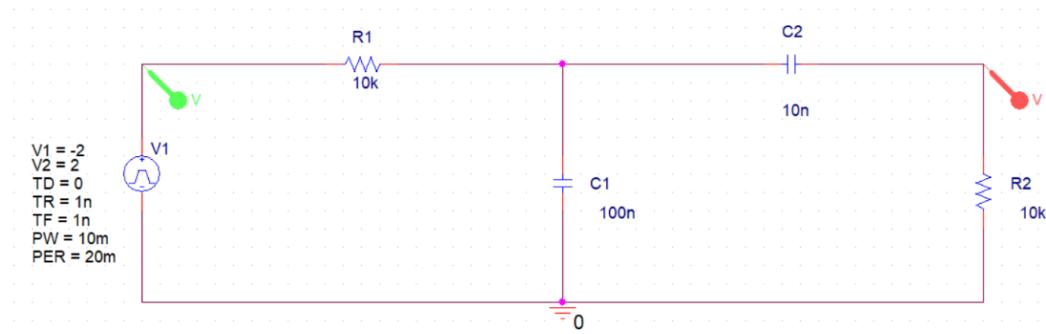
در ادامه شکل ولتاژ خروجی آمده است:



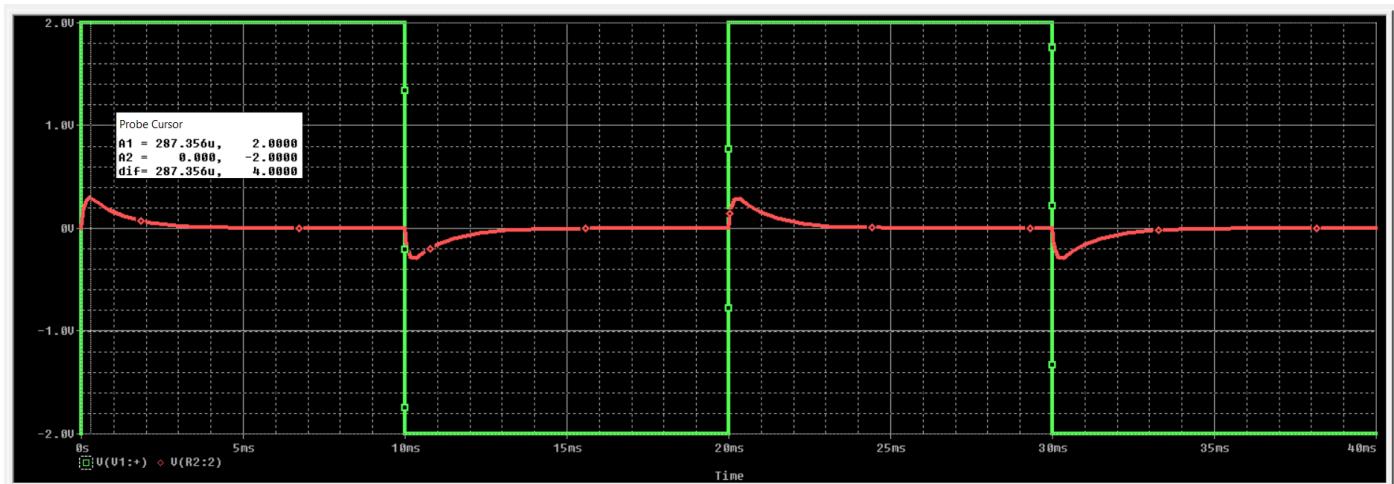
سوال سوم:

۳- مدار شکل ۶ را با $C_2 = 10nF$ و $C_1 = 100nF$ تکرار نمایید و شکل ولتاژ خروجی را رسم کنید.

مدار آن به شکل زیر است:



در ادامه شکل ولتاژ خروجی آمده است:

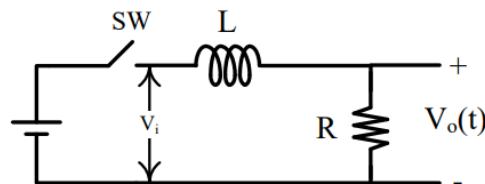


نتیجه گیری: در آزمایش ۲ با کاهش ظرفیت C_1 مقدار ثابت زمانی بسیار کاهش میابد پس C_1 سریعتر شارژ میشود و بنابراین سرعت تغییرات نمودار آزمایش ۲ نسبت به آزمایش ۱ و ۳ بیشتر است اما دامنه و ولتاژ بیشینه آن بیشتر میشود. پس هم زمان رسیدن به بیشینه مقدار کم میشود و هم ولتاژ بیشینه افزایش میابد. در آزمایش ۳ عکس این قضیه اتفاق افتاده و هم زمان بیشتر میشود و هم

بیشینه ولتاژ کاهش میابد. در این حالت با اینکه سرعت شارژ شدن C_2 افزایش میابد اما باز هم سرعتش از C_1 کمتر است چرا که دو تا مقاومت در دوسر خود میبینند.

بخش سوم) پاسخ گذرای مدار RL پایین گذر

شکل ۸ مدار RL پایین گذر را نشان می‌دهد. کلید SW در لحظه $t = 0$ بسته می‌شود و ولتاژ خروجی (پاسخ مدار) پس از مدت کوتاهی به مقدار نهایی خود رسانید. بطوریکه می‌دانید، پس از بسته شدن کلید، می‌توان نوشت:



شکل ۸

$$V_o(t) = V(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

قسمت آزمایش:

مدار شکل ۸ را با $L = 18mH$ و با دو مقاومت $1k\Omega$ و $1.5k\Omega$ بجای R بسته و با اعمال ولتاژ پلهای با دامنه ۲ ولت ماکریم به مدار، پاسخ مدار را رسم کنید (از موج مربعی با فرکانس حدود $6kHz$ به عنوان ولتاژ پلهای استفاده کنید). ثابت زمانی مدار را از روی شکل ولتاژ خروجی بدست آورده و با مقدار تئوری آن مقایسه کنید.

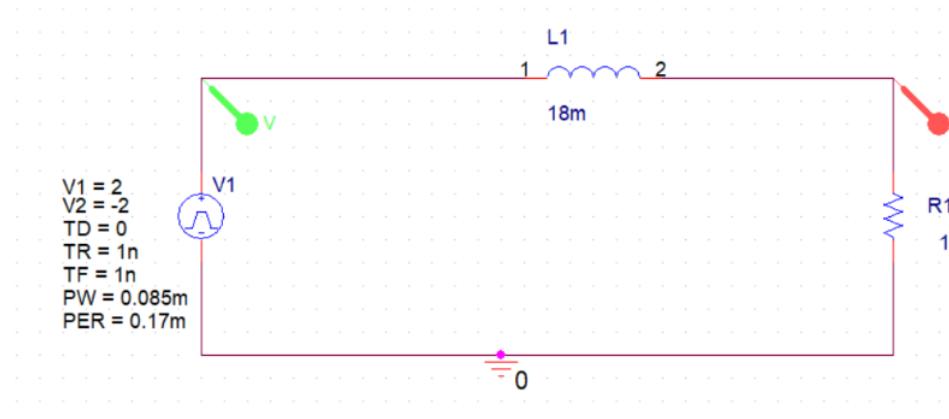
$$R = 1k\Omega$$

ابتدا مقدار ثابت زمانی را به کمک روابط تئوری به دست می‌آوریم که به صورت زیر میباشد:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{18mH}{1k\Omega} = 18\mu s$$

حال مدار را مبندیم. همچنین با توجه به اینکه فرکانس مدار 6kHz میباشد پس دوره‌ی مدار حدود 0.17ms میباشد.

مدار به شکل زیر میباشد:



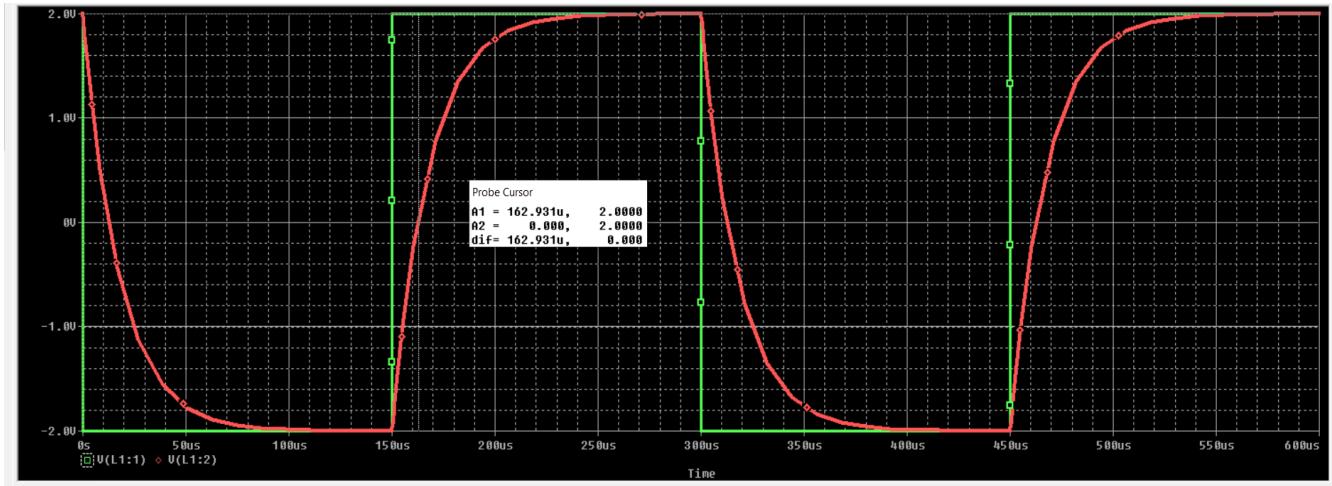
هم چنین نمودار شبیه سازی هم به صورت زیر میشود:



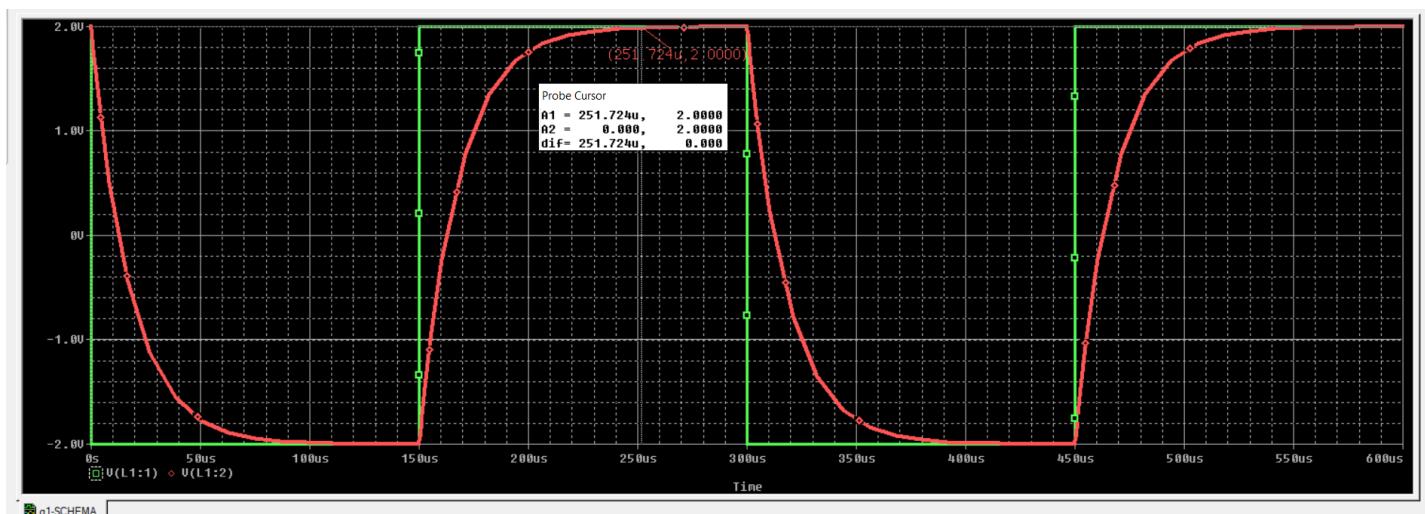
برای اینکه بهتر بتوان زمان شارژ را یافت و پاسخ کامل را دید دوره را افزایش میدهیم:

ابتدا زمانی را میابیم که ولتاژ برابر با 0 میباشد. طبق نمودار زیر این زمان برابر با $162.93\mu s$ میباشد:

میباشد:



حال زمانی را میابیم که ولتاژ بسیار نزدیک به $2V$ میباشد. که در زمان $251.72\mu s$ اتفاق می‌افتد:



حال اگر مقدار τ را محاسبه کنیم به صورت زیر:

$$5\tau = 251.72\mu s - 162.93\mu s = 88.79 \mu s \rightarrow \tau = 17.75\mu s$$

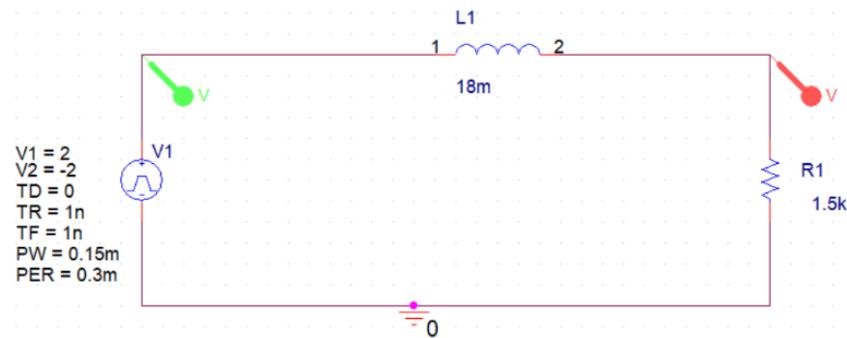
همانطور که مشاهده میشود این مقدار بسیار نزدیک به $18\mu s$ است که به صورت تئوری به دست آوردهیم.

$$R=1.5\text{k}\Omega$$

ابتدا مقدار ثابت زمانی را به کمک روابط تئوری به دست می آوریم که به صورت زیر میباشد:

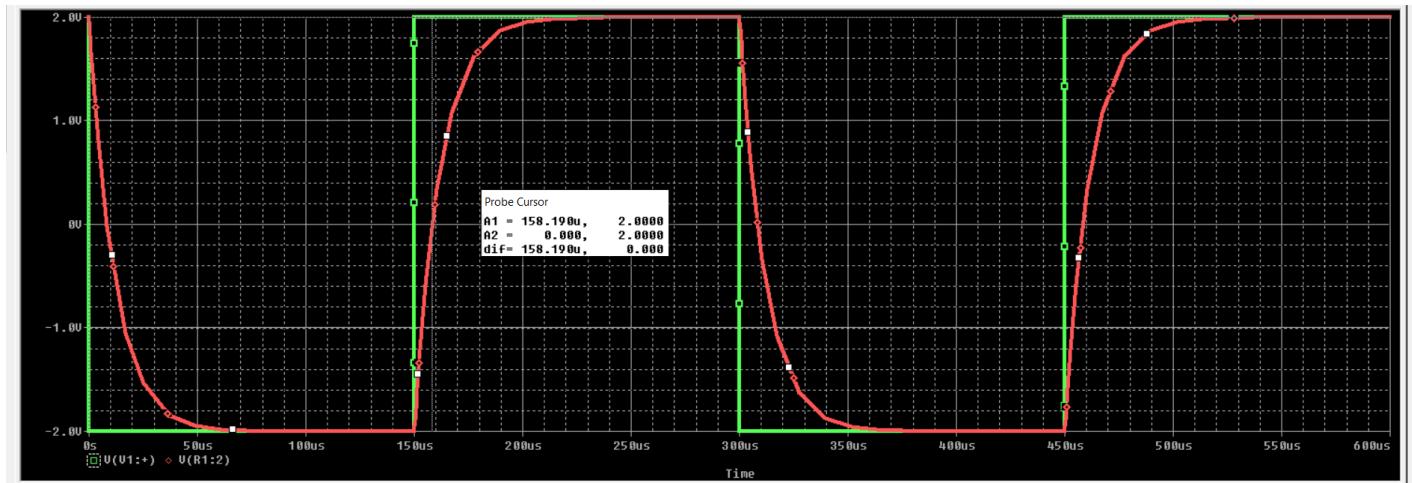
$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{18mH}{1.5k\Omega} = 12\mu s$$

مدار به شکل زیر میباشد:

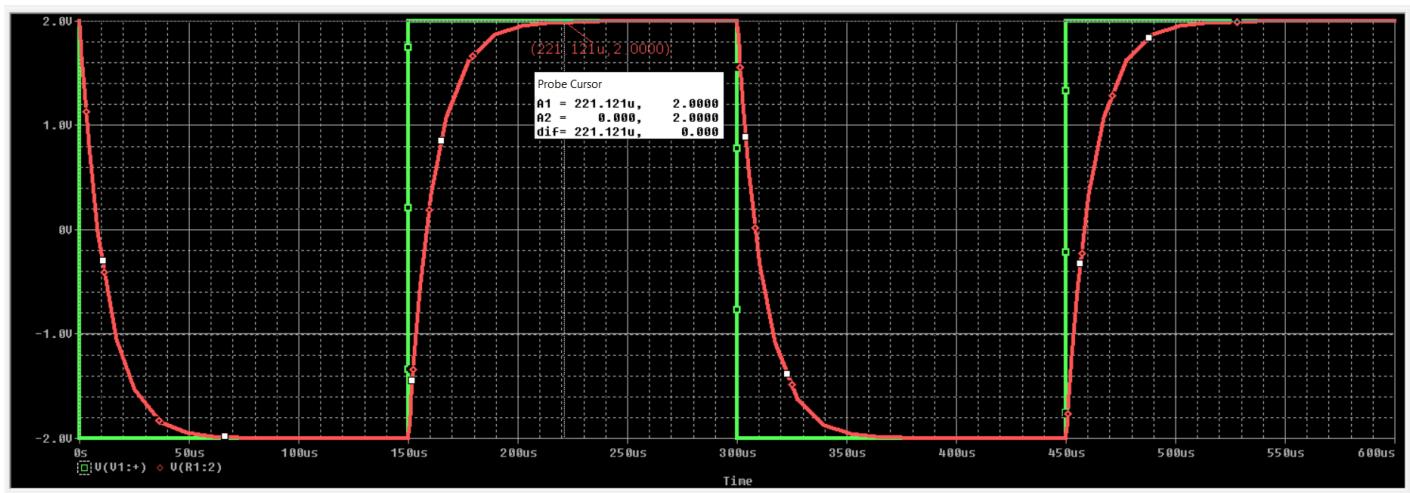


برای اینکه بهتر بتوان زمان شارژ را یافت و پاسخ کامل را دید دوره را افزایش میدهیم:

ابتدا زمانی را میابیم که ولتاژ برابر با 0 میباشد. طبق نمودار زیر این زمان برابر با $158.19\mu s$ میباشد:



حال زمانی را میابیم که ولتاژ بسیار نزدیک به $2V$ میباشد. که در زمان $221.12\mu s$ اتفاق می‌افتد:



حال اگر مقدار τ را محاسبه کنیم به صورت زیر:

$$5\tau = 221.12\mu s - 158.19\mu s = 62.93 \mu s \rightarrow \tau = 12.58\mu s$$

همانطور که مشاهده میشود این مقدار بسیار نزدیک به $12\mu s$ است که به صورت تئوری به دست آوردهیم.

طی این دو آزمایش متوجه شدیم که روابط و فرمول ها برای مدار برقرار میباشند.