

به نام خدا



دانشگاه تهران

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گزارشکار آزمایش ۴

پیاده سازی و تحلیل پاسخ زمانی سیستم های مرتبه اول و دوم

آزمایشگاه کنترل خطی

گروه ۲ - دوشنبه ۱۳ تا ۱۶ (۵)

عرفان پناهی ۸۱۰۱۹۸۳۶۹

فاطمه صالحی ۸۱۰۱۹۸۴۲۳

سوگل گودرزی ۸۱۰۱۹۸۴۶۷

فهرست

چکیده صفحه ۲

بخش اول و دوم صفحه ۳

بخش سوم صفحه ۶

بخش چهارم صفحه ۱۸

چکیده

در پیش گزارش آزمایش ۴ به طراحی مدارها با استفاده از تقویت کننده عملیاتی برای رسیدن به تابع تبدیل های مختلف پرداختیم. در این آزمایش قصد داریم این توابع تبدیل را با استفاده از ادوات الکترونیکی و به صورت عملی تحقق دهیم.

در بخش اول و دوم آزمایش به بررسی سیستم مرتبه اول می پردازیم و مشاهده می کنیم که برای پیاده سازی این سیستم نیاز به یک تقویت کننده عملیاتی داریم.

در بخش سوم به پیاده سازی سیستم مرتبه دوم می پردازیم. برای مدلسازی از یک حلقه فیدبک استفاده می کنیم که خود حلقه فیدبک نیاز به یک تفریق کننده دارد که برای طراحی آن از یک تقویت کننده استفاده می کنیم.

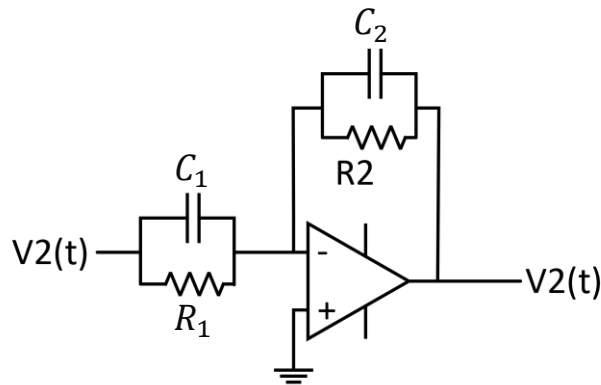
در بخش چهارم نیز سعی می کنیم با استفاده از دو بلوک انتگرال گیر و حلقه فیدبک یک مدار نوسانی طراحی و پیاده سازی کنیم و مشکلات آنرا بررسی نمائیم.

بخش اول و دوم : پیاده سازی سیستم های مرتبه اول

در این قسمت با استفاده از ادوات الکتریکی (مقاومت ، خازن ، تقویت کننده و ...) سعی می کنیم تابع تبدیل زیر را پیاده سازی کنیم.

$$G(s) = -\frac{2}{0.1s + 1}$$

حال با استفاده از مدار تقویت کننده تصویر ۱-۲ (که تابع تبدیل آن در پیش گزارش ۴ داده شده بود) ، سعی می کنیم برای تابع تبدیل $G(s)$ مقادیر مقاومت و خازن ها را بدست آوریم.

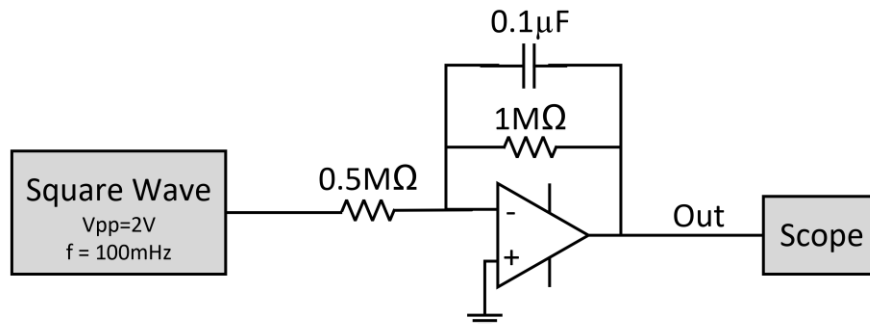


تصویر ۱-۲: شماتیک مدار تقویت کننده پیش گزارش ۴

$$G(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_2 C_2 s + 1} = -\frac{2}{0.1s + 1} \rightarrow C_1 = 0, C_2 = 100nF = 0.1\mu F$$

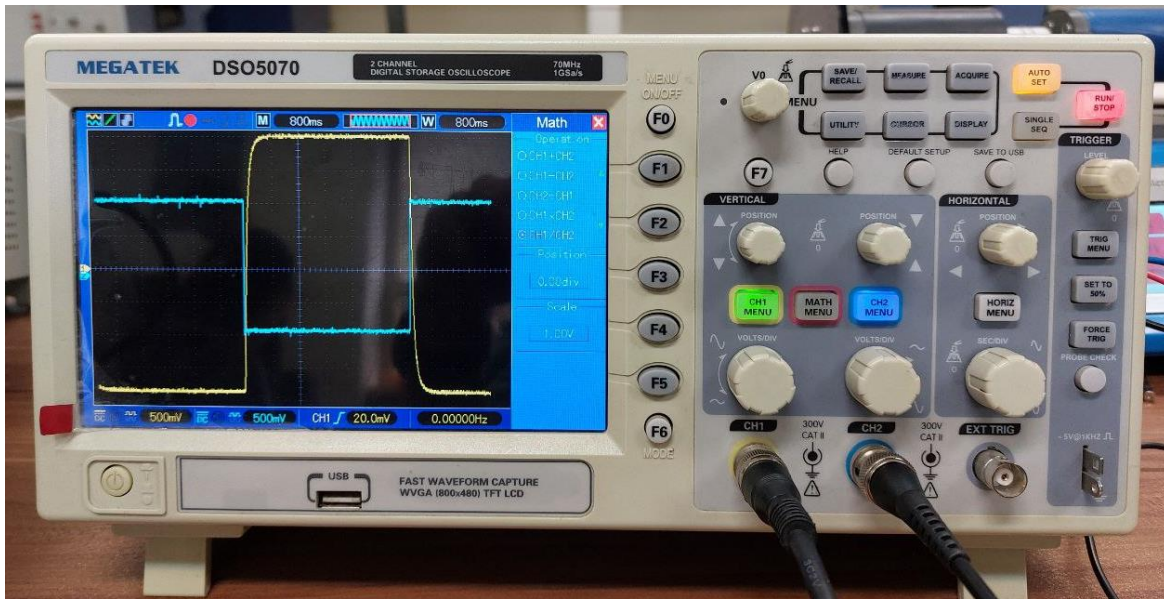
$$\frac{\frac{R_2}{R_1}}{R_2 C_2 s + 1} = \frac{2}{0.1s + 1} \rightarrow R_2 C_2 = 0.1 \rightarrow R_2 = 1M\Omega \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 2 \rightarrow R_1 = 0.5M\Omega = 1 \parallel 1M\Omega$$

تصویر ۲-۲ مدار بسته شده برای پیاده سازی عملی تابع تبدیل $G(s)$ را نشان می دهد.



تصویر ۲-۲: پیاده سازی عملی تابع تبدیل $G(s)$

حال مدار تصویر ۲-۲ را بسته و خروجی اسکوپ را مطابق با تصویر ۲-۳ مشاهده می کنیم.



تصویر ۲-۳: خروجی تابع تبدیل به ازای ورودی مربعی (مشابه پله)

اندازه گیری نظری: به این منظور ثابت زمانی، بهره حالت ماندگار را به صورت زیر بدست می آوریم.

۱. ثابت زمانی :

$$\frac{-2}{0.1s + 1} \xrightarrow{\mathcal{L}} -20e^{-10t} = c \times e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow \tau = 0.1$$

۲. بهره حالت ماندگار :

همانطور که در شکل دیده میشود، سیگنال مربعی به عنوان ورودی به سیستم داده شده است و چون در بازه مشخص شده انگار

ورودی پله با دامنه ۲ ولت داده ایم، با تبدیل لاپلاس آن که برابر $\frac{-2}{s}$ میباشد خروجی را حساب میکنیم:

$$\text{output} = Y(s) = \frac{-2}{s} \times \frac{-2}{0.1s + 1} = \frac{4}{s} - \frac{4}{s + 10} \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} y(t) = 4u(t) - 40e^{-10t}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} 4u(t) - 40e^{-10t} = 4$$

$$\text{بهره حالت ماندگار} = \frac{4}{-2} = -2$$

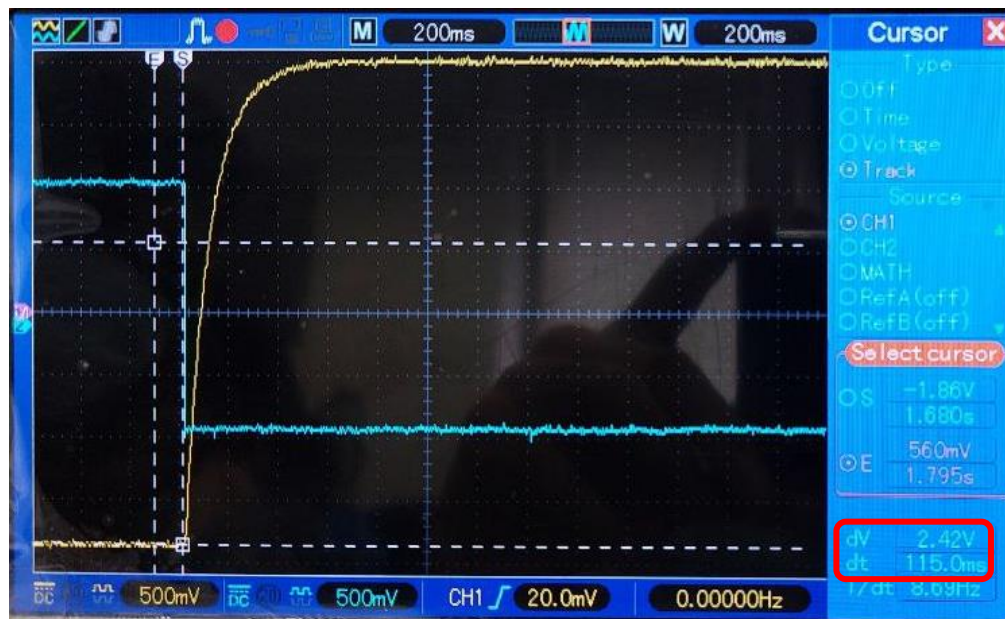
اندازه گیری عملی: به این منظور با استفاده از اسیلوسکوپ به صورت زیر داریم.

۱. ثابت زمانی : می دانیم ، پس از گذر یک ثابت زمانی ، پاسخ به ۶۳٪ (تقریباً) حالت ماندگار خود می رسد.

$$\text{output}(\tau) = 63\% \times 4 = 2.52V$$

مطابق با تصویر ۲-۴ ، زمانی که به ولتاژ ۲.۵۲ ولت می رسیم، مدت زمان ۱۱۵msec طول می کشد که با ثابت زمانی بدست

آمده نظری تقریباً یکسان است.



تصویر ۲-۴: محاسبه ثابت زمانی با استفاده از اسیلوسکوپ

۲. بهره حالت ماندگار:

همانطور که در تصاویر بالا نیز مشاهده می‌شود، حالت ماندگار خروجی منفی دو برابر ورودی است که با مقدار نظری یکسان است.

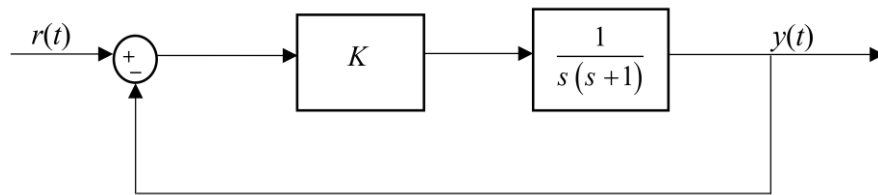
جدول ۱ مقایسه مقدار عملی و نظری را نشان می‌دهد که تقریباً یکسان هستند.

اندازه گیری عملی	مقدار نظری	
0.115	0.1	ثابت زمانی (ثانیه)
-2	-2	بهره حالت ماندگار

جدول ۱: مقایسه مقادیر نظری و عملی برای سیستم مرتبه اول

بخش سوم: پیاده‌سازی سیستم‌های مرتبه دوم****** قسمت ۳-۱:**

در این قسمت به پیاده‌سازی سیستم مرتبه دوم با استفاده از ادوات الکترونیکی می‌پردازیم. به این منظور از دو تقویت کننده برای ایجاد سیستم مرتبه دوم و سپس از یک تفریق کننده برای ایجاد فیدبک واحد منفی استفاده می‌کنیم. تصویر ۱-۳ بلوک دیاگرام سیستم فیدبک دار را نشان می‌دهد.



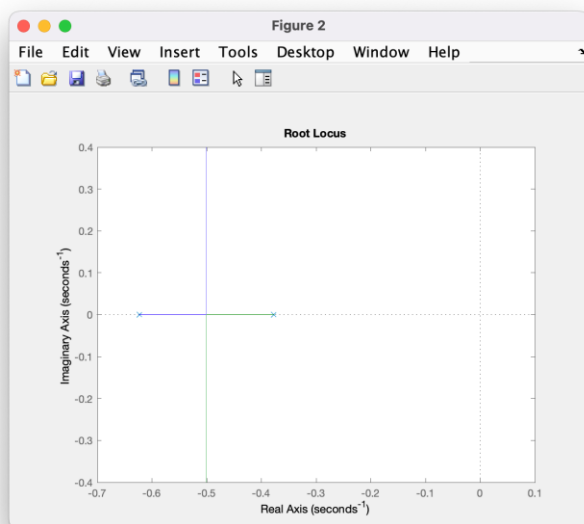
تصویر ۱-۳: بلوک دیاگرام پیاده‌سازی سیستم مرتبه دوم

در نتیجه تابع تبدیل کلی سیستم بالا به صورت زیر خواهد بود:

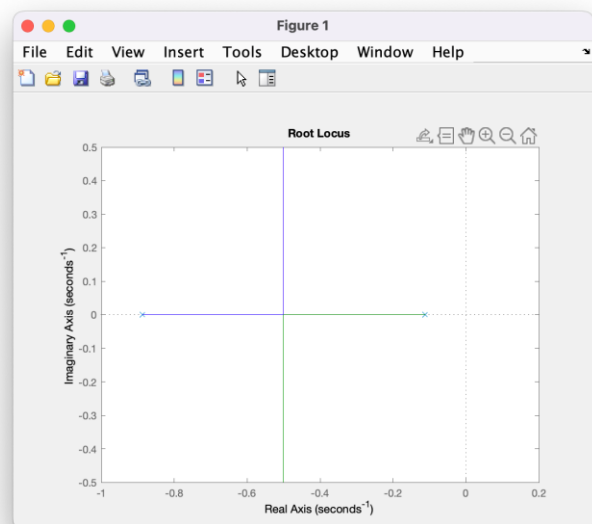
$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2 + s + K}$$

***** ترسیم مکان هندسی ریشه‌های سیستم و بررسی میرایی بر اساس مقادیر K :**

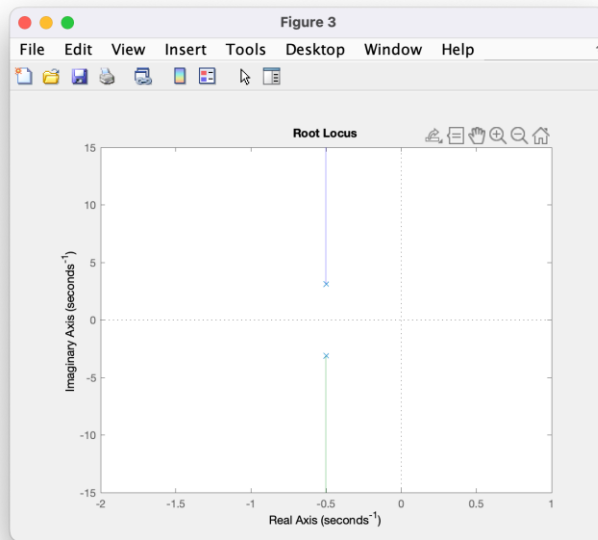
تصویر ۲-۳ مکان هندسی ریشه‌های سیستم را به ازای هر سه مقدار K نشان می‌دهد.



ب



الف



ج

تصویر ۳-۲: ترسیم مکان هندسی ریشه های سیستم الف) $k = 0.1$ ، ب) $k = 0.235$ ، ج) $k = 10$

حال برای سیستم داده شده براساس حالت های مختلف K مقادیر پارامترهای خواسته شده را به صورت زیر بدست می آوریم و جدول خواسته شده را پر می کنیم:

a) $K = 0.1$:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.1}{s^2 + s + 0.1} \rightarrow \omega_n^2 = 0.1 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{0.1}, \quad 2\zeta\omega_n = 1 \Rightarrow \zeta = \frac{1}{2 \times \sqrt{0.1}} = 1.581 > 1$$

سیستم فوق میرا می باشد، پاسخ گذرای سیستم نوسانی نیست.

۱. قطب های سیستم:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.1}{s^2 + s + 0.1} \rightarrow s^2 + s + 0.1 = 0 \rightarrow \begin{cases} p_1 = -0.1127 \\ p_2 = -0.8872 \end{cases}$$

که این قطب ها در مکان هندسی تصویر ۳-۲ نیز مشاهده می شود.

۲. زمان خیز:

$$Y(s) = \frac{2}{s} \times \frac{0.1}{s^2 + s + 0.1} = \frac{0.2}{s(s^2 + s + 0.1)}$$

$$\mathcal{L}^{-1} \rightarrow y(t) = 0.2 (10 + 1.45497 e^{-0.887298 t} - 11.455 e^{-0.112702 t})$$

$$\text{if } t \rightarrow \infty : C_{SS} = 2$$

با توجه به ضابطه بدست آمده، مقدار حالت ماندگار برابر ۲ می باشد؛ بنابراین ۱۰٪ آن برابر ۰.۲ و ۹۰٪ آن برابر ۱.۸ می باشد. حال زمان هایی که خروجی این مقادیر را اخذ میکند را بدست می آوریم:

$$\begin{cases} 0.1 C_{SS} \approx 0.2 \rightarrow y(t) = 0.2 \Rightarrow t_{0.2} \approx 1.87 \\ 0.9 C_{SS} \approx 1.8 \rightarrow y(t) = 1.8 \Rightarrow t_{1.8} \approx 21.636 \end{cases} \rightarrow t_r = t_{1.8} - t_{0.2} = 21.636 - 1.87 = 19.7660 \text{ sec}$$

۳. زمان نشست:

برای محاسبه این پارامتر باید اولین جایی که مقدار سیستم به محدوده ۵ درصدی مقدار پایدار خودش می رسد را مشخص کنیم. برای این منظور خواهیم داشت:

$$\pm 0.05 C_{SS} + C_{SS} : \begin{cases} 1.05 C_{SS} \rightarrow \text{non-existent} \\ 0.95 C_{SS} \rightarrow t_s = 27.786 \end{cases}$$

۴. درصد فراجهش:

$$M_p = 0$$

$$\text{b) } K = 0.235 :$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.235}{s^2 + s + 0.235} \rightarrow \omega_n^2 = 0.235 \Rightarrow \omega_n = 0.4847, \quad 2\zeta\omega_n = 1 \Rightarrow \zeta \approx 1.031 > 1$$

سیستم فوق میرا می باشد، پاسخ گذرای سیستم نوسانی نیست.

۱. قطب های سیستم:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.235}{s^2 + s + 0.235} \rightarrow s^2 + s + 0.235 = 0 \rightarrow \begin{cases} p_1 = -0.3775 \\ p_2 = -0.6224 \end{cases}$$

۲. زمان خیز:

$$Y(s) = \frac{2}{s} \times \frac{0.235}{s^2 + s + 0.235} = \frac{0.47}{s(s^2 + s + 0.235)}$$

$$y(t) = 0.47 (4.25532 + 6.55847 e^{-0.622474 t} - 10.8138 e^{-0.377526 t})$$

$$\text{if } t \rightarrow \infty : C_{SS} \approx 2$$

در این صورت مشابه حالت قبل داریم:

$$\begin{cases} 0.1C_{SS} \approx 0.2 \rightarrow y(t) = 0.2 \Rightarrow t_{0.2} \approx 1.103 \\ 0.9C_{SS} \approx 1.8 \rightarrow y(t) = 1.8 \Rightarrow t_{1.8} \approx 8.353 \end{cases} \rightarrow t_r = t_{1.8} - t_{0.2} = 8.353 - 1.103 = 7.25 \text{ sec}$$

۳. زمان نشست:

$$\pm 0.05C_{SS} + C_{SS} : \begin{cases} 1.05C_{SS} \rightarrow \text{non-existent} \\ 0.95C_{SS} \rightarrow t_s = 10.272 \text{ sec} \end{cases}$$

۴. درصد فراجهش:

$$M_p = 0$$

c) $K = 10$:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{10}{s^2 + s + 10} \rightarrow \omega_n^2 = 10 \Rightarrow \omega_n = 3.162, \quad 2\zeta\omega_n = 1 \Rightarrow \zeta \approx 0.158 < 1$$

سیستم فوق میرا میباشد، پاسخ گذرای سیستم نوسانی است.

۱. قطب های سیستم:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{10}{s^2 + s + 10} \rightarrow s^2 + s + 10 = 0 \rightarrow \begin{cases} p_1 = -0.5 + 3.122i \\ p_2 = -0.5 - 3.122i \end{cases}$$

۲. زمان خیز:

$$Y(s) = \frac{2}{s} \times \frac{10}{s^2 + s + 10} = \frac{20}{s(s^2 + s + 10)}$$

$$\xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} 20 \left(\frac{1}{10} - \frac{e^{-\frac{t}{2}} \left(\sqrt{39} \cos\left(\frac{\sqrt{39}t}{2}\right) + \sin\left(\frac{\sqrt{39}t}{2}\right) \right)}{10\sqrt{39}} \right)$$

$$\text{if } t \rightarrow \infty : C_{SS} = 2$$

$$\begin{cases} 0.1C_{SS} \approx 0.2 \rightarrow y(t) = 0.2 \Rightarrow t_{0.2} \approx 0.146 \\ 0.9C_{SS} \approx 1.8 \rightarrow y(t) = 1.8 \Rightarrow t_{1.8} \approx 0.513 \end{cases} \rightarrow t_r = t_{1.8} - t_{0.2} = 0.367 \text{ sec}$$

۳. زمان نشست:

$$\pm 0.05C_{ss} + C_{ss}: \begin{cases} 1.05C_{ss} \rightarrow t_{s_1} = 5.019 \\ 0.95C_{ss} \rightarrow t_{s_2} = 4.54 \end{cases} \rightarrow \max\{t_{s_1}, t_{s_2}\} = t_{s_1} = 5.019 \text{ sec}$$

۴. درصد فراجهش:

$$M_p = \frac{C(t_p) - C_{ss}}{C_{ss}} = \exp\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) = \exp\left(-\frac{0.158\pi}{\sqrt{1-0.158^2}}\right) = 0.6049 \cong 60\%$$

بعد از بدست آوردن مقادیر پارامترها به صورت تئوری جدول ۲ (متناظر با مقادیر نظری) را به صورت زیر پر می کنیم:

درصد فراجهش	زمان نشست (ثانیه)	زمان خیز (ثانیه)	قطب ها	$\frac{K}{s^2 + s + K}$
0	27.786	19.766	$\begin{cases} p_1 = -0.1127 \\ p_2 = -0.8872 \end{cases}$	K=0.1
0	10.272	7.25	$\begin{cases} p_1 = -0.3775 \\ p_2 = -0.6224 \end{cases}$	K=0.235
60%	5.019	0.367	$\begin{cases} p_1 = -0.5 + 3.122i \\ p_2 = -0.5 - 3.122i \end{cases}$	K=10

جدول ۲: مقادیر نظری پیاده سازی مدار مرتبه دوم

حال با استفاده از محاسبات مقادیر مقاومت و خازن ها را بدست می آوریم و مدار مورد نیاز برای پیاده سازی عملی را طراحی می کنیم:

$$G(s) = \frac{K}{s(s+1)} = \left(-\frac{1}{s}\right)\left(-\frac{K}{s+1}\right)$$

در حقیقت یک تقویت کننده انتگرال گیر و یک تابع تبدیل $\frac{K}{s+1}$ (به کمک تابع تبدیل تصویر ۲-۱) داریم:

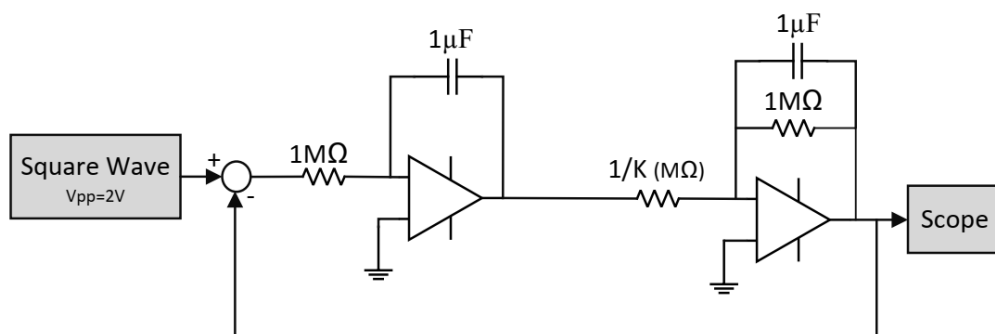
$$G_1(s) = -\frac{1}{s} = -\frac{R_2 R_1 C_1 s + 1}{R_1 R_2 C_2 s + 1} \rightarrow C_1 = 0, R_2 = \infty \text{ (مدار باز)}, R_1 = 1M\Omega, C_2 = 1\mu F$$

$$G_2(s) = -\frac{1}{s+1} = -\frac{R_2 R_1 C_1 s + 1}{R_1 R_2 C_2 s + 1} \rightarrow C_1 = 0$$

$$\frac{K}{s+1} = \frac{\frac{R_2}{R_1}}{R_2 C_2 s + 1} \rightarrow R_2 = 1M\Omega, C_2 = 1\mu F, R_1 = \frac{1}{K} (M\Omega)$$

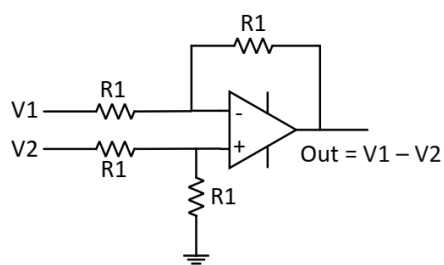
حال برای K های مختلف، مقدار مقاومت R_1 را تغییر داده و خروجی را روی اسیلوسکوپ نشان می دهیم.

تصویر ۲-۳ مدار مربوط برای پیاده سازی سیستم های این بخش به ازای k های مختلف را نشان می دهد.



تصویر ۳-۲: مدار مربوط به پیاده سازی سیستم به ازای K های مختلف

همچنین به جای جمع و تفریق کننده از مدار نشان داده شده در تصویر ۳-۳ استفاده می شود.

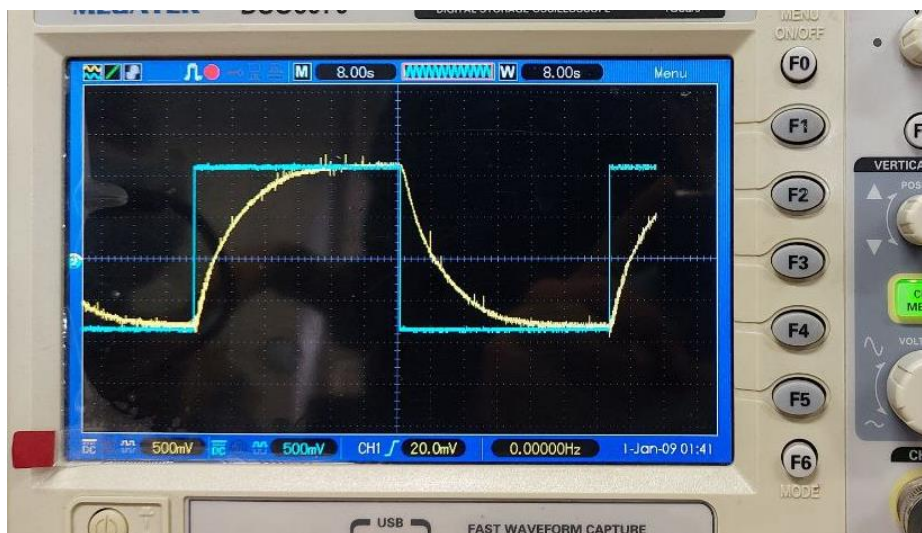


تصویر ۳-۳: مدار تفریق کننده مورد نیاز برای فیدبک

*** $a. K = 0.1 \rightarrow R_1 = 10M\Omega$

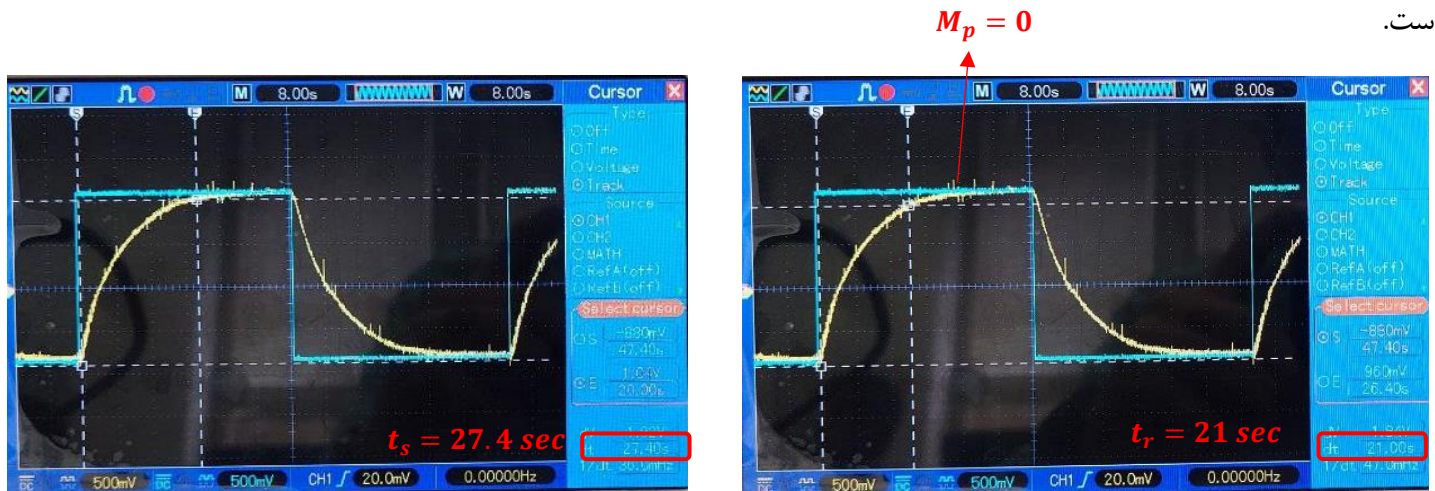
با پیاده سازی سیستم به ازای مقدار $K = 0.1$ خروجی به صورت تصویر ۳-۴ خواهد بود که همانطور که انتظار داریم خروجی به

صورت گیرنوسانی میرا است:



تصویر ۳-۴: خروجی به ازای $K = 0.1$

همچنین تصویر ۳-۵ نیز مقادیر فراجش ، زمان صعود و زمان نشست را نشان می‌دهد. همانطور که در این تصویر نیز مشخص است مقدار فراجش صفر ، زمان صعود تقریباً ۲۱ ثانیه و زمان نشست نیز حدوداً ۲۸ ثانیه است که با محاسبات نظری نیز مشابه است.

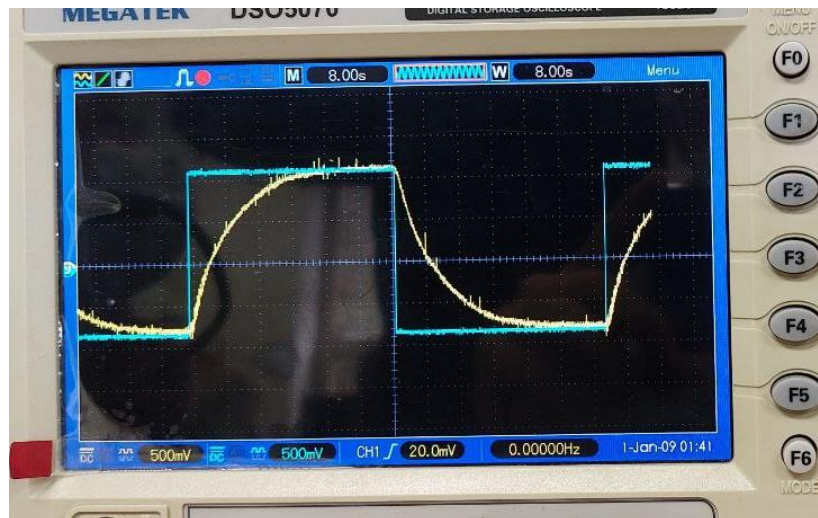


تصویر ۳-۵: فراجش ، زمان صعود و زمان نشست به ازای $K = 0.1$

$$b. K = 0.235 \rightarrow R_1 = 4.2553 M\Omega$$

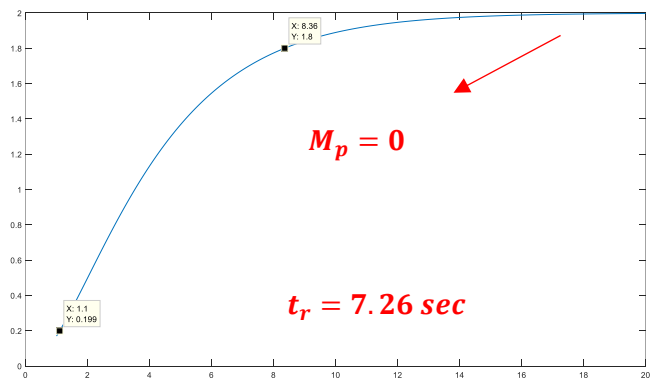
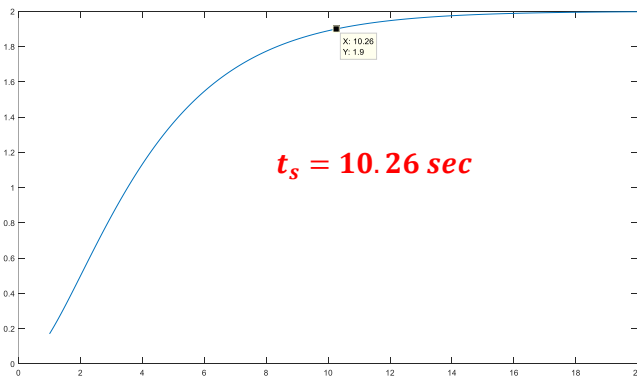
*** تصاویر مربوط به پیاده سازی این بخش ذخیره نشده است و با هماهنگی دستیار آموزشی درس از نرم افزار متلب برای تصاویر این بخش بهره می‌گیریم.

با پیاده سازی سیستم به ازای مقدار $K = 0.235$ خروجی به صورت تصویر ۳-۶ خواهد بود که همانطور که انتظار داریم خروجی به صورت غیرنوسانی میرا است:



تصویر ۳-۶: خروجی به ازای $K = 0.235$

همچنین تصویر ۳-۷ نیز مقادیر فراجش ، زمان صعود و زمان نشست را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود می‌توان گفت که زمان نشست تقریباً برابر با ۱۰ ثانیه است که با مقادیر حل تئوری همخوانی دارد. زمان خیز نیز برابر ۷ ثانیه است که با محاسبات تئوری همخوانی دارد.

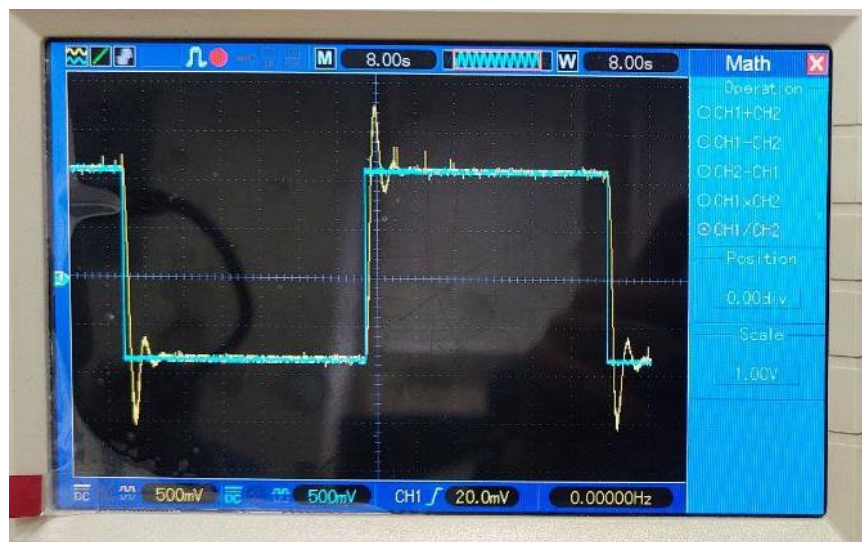


تصویر ۳-۷: فراجش، زمان صعود و زمان نشست به ازای $K = 0.235$

دقت شود که برای دو سیستم اول یعنی به ازای $K = 0.1$ و $K = 0.235$ مقداری برای فراجش نداریم چون سیستم ها نوسانی نیستند.

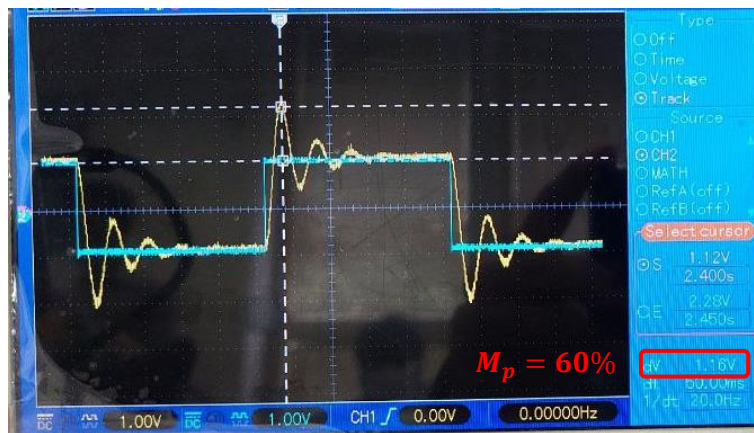
***c. $K = 10 \rightarrow R_1 = 100K\Omega$

خروجی سیستم را در تصویر ۳-۸ مشاهده می کنیم که همانطور که انتظار می رفت، به صورت نوسانی میرا شونده است.

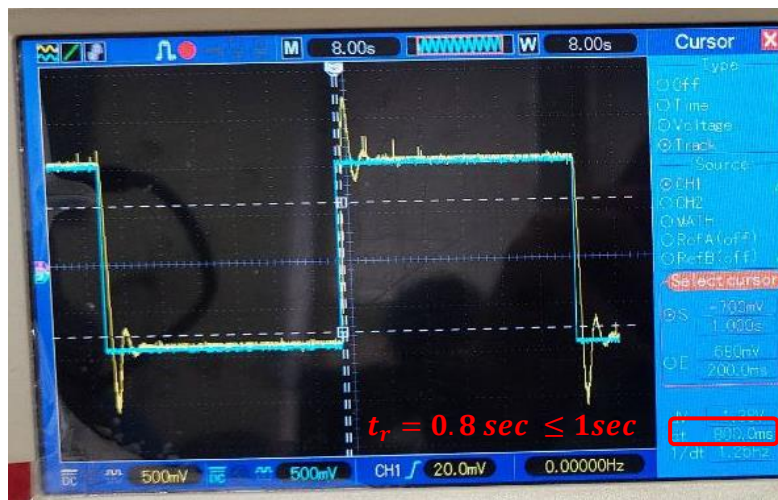


تصویر ۳-۸: خروجی به ازای $K = 10$

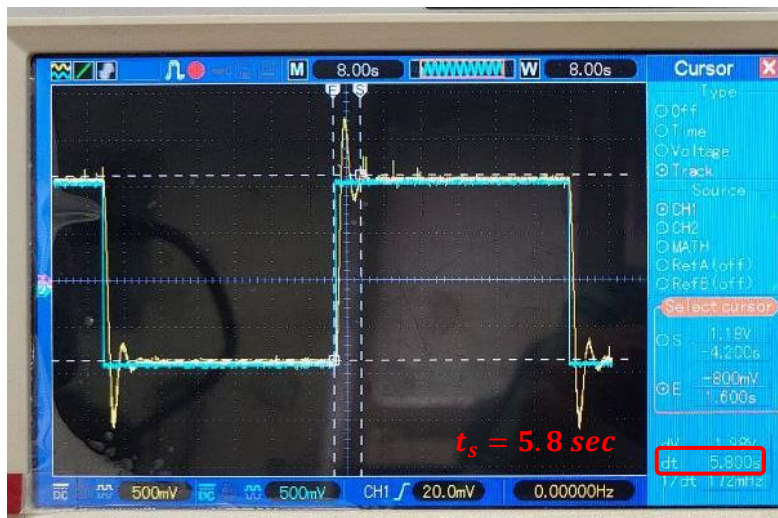
همچنین تصویر ۳-۹ نیز مقادیر فراجش، زمان صعود و زمان نشست را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود می توان گفت که زمان نشست تقریباً برابر با 5 ثانیه است که با مقادیر حل تئوری همخوانی دارد. زمان خیز نیز برابر 0.8 ثانیه است که با محاسبات تئوری همخوانی دارد. همچنین همانطور که مشاهده می شود در زمان فراجش پیک به اندازه 1.2 ولت از حالت ماندگار بالاتر است که نشان می دهد، 60% فراجش داریم.



الف) فراجش



ب) زمان خیز



ج) زمان نشست

تصویر ۳-۹: فراجش، زمان صعود و زمان نشست به ازای $K = 10$

حال جدول ۳ (مربوط به آزمایش های عملی) را نیز براساس نتایج و نمودارهای بدست آمده پر می کنیم و مقادیر دو جدول را با هم مقایسه می کنیم:

درصد فراجش	زمان نشست (ثانیه)	زمان خیز (ثانیه)	$\frac{K}{s^2 + s + K}$
0	27.4	21	K=0.1
0	10.26	7.36	K=0.235
60%	5.8	0.8	K=10

جدول ۳: مقادیر عملی پیاده سازی مدار مرتبه دوم

**** قسمت ۲-۳ ****

با دادن ورودی مثلثی با ویژگی های گفته شده به سیستم، می توان گفت که برای محاسبه خطا باید خطای سیستم به ورودی شیب را بدست آورد چون در واقع ورودی مثلثی معادل با همان خروجی شیب واحد سیستم است. طبق رابطه زیر، خطای سیستم را بدست می آوریم:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \times \frac{1}{s^2} \times \frac{1}{1 + G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \times \frac{1}{1 + G(s)}$$

$$\text{For } k = 0.1 \rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \times \frac{1}{1 + G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \times \frac{1}{1 + \frac{0.1}{s(s+1)}} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s+1}{s^2 + s + 0.1} = 10$$

$$\rightarrow e_{ss} = 10$$

پاسخ بدست آمده زمانی صحیح می باشد که شیب ورودی اعمال شده ۱ باشد ولی با توجه به تصویر زیر مشاهده می شود که شیب

ورودی تقریباً $\frac{1}{48}$ می باشد که سبب می شود خطای حالت ماندگار در پیاده سازی مداری برابر $10 \times \frac{1}{48} = \frac{1}{4.8} V$ شود.

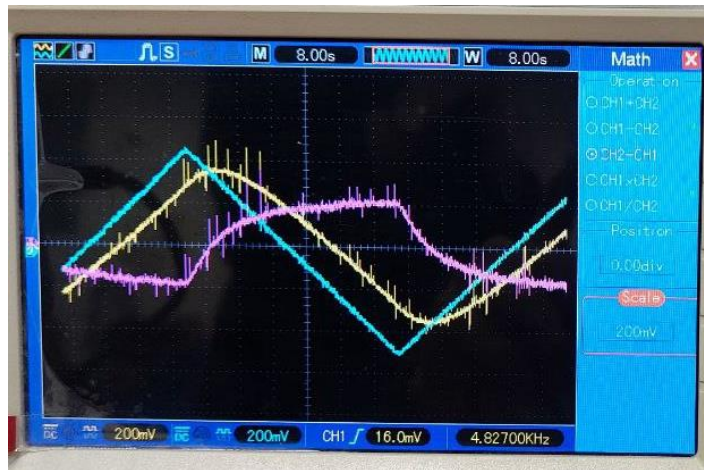
در تصویر ۱۰-۳ نمودار صورتی نشان دهنده اختلاف خروجی از ورودی می باشد که با توجه به اسکیل دامنه ولتاژ، مقدار خطا تقریباً

برابر $0.2V$ می باشد که با مقدار $\frac{1}{4.8} V$ تقریباً برابری می کند.

خطای حالت ماندگار به ازای $k = 0.1$:

$$e_{ss} = 0.2 \text{ : عملی}$$

$$e_{ss} = \frac{1}{4.8} \text{ : نظری}$$



تصویر ۳-۱۰: خروجی و ورودی مثلثی به ازای $k = 0.1$

$$\text{For } k = 0.33 \rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \times \frac{1}{1 + G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \times \frac{1}{1 + \frac{0.33}{s(s+1)}} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s+1}{s^2 + s + 0.33}$$

$$\rightarrow e_{ss} \approx 3.030$$

*** برای پیاده سازی مدار این قسمت از مقاومت $300k = \frac{1}{k}$ استفاده می کنیم.

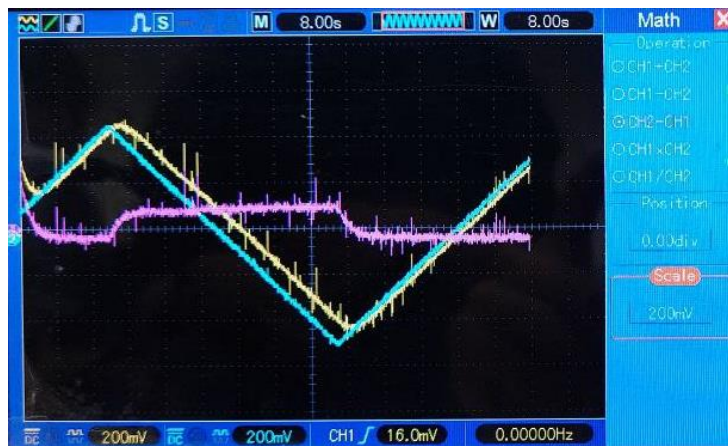
مشابه تحلیلی که برای سیستم قبلی داشتیم در اینجا نیز می توانیم به همین صورت مقدار خطای سیستم را بررسی کنیم. از تصویر

۳-۱۱ مشخص است که مقدار خطا در حدود 0.05 ولت است. همچنین با محاسبات دستی نیز با توجه به اینکه شیب ورودی

تقریباً $\frac{1}{48}$ است داریم:

$$e_{ss} = 0.05 \text{ : عملی}$$

$$e_{ss} = 3.03 \times \frac{1}{48} = 0.063V \text{ : نظری}$$

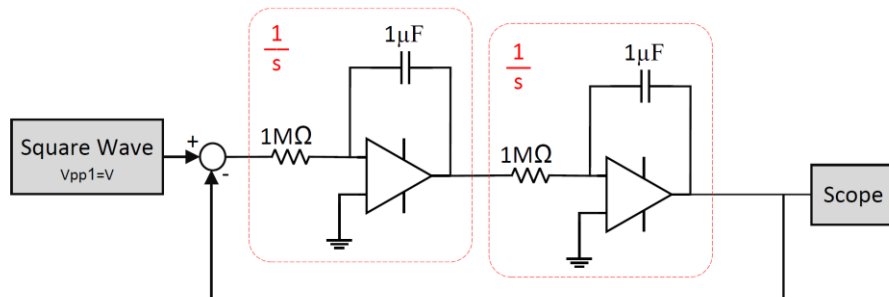


تصویر ۳-۱۱: خروجی و ورودی مثلثی به ازای $k = 0.33$

رابطه ای که بین خطا و مقدار پارامتر K وجود دارد این است که هر چه مقدار K بزرگتر باشد مقدار خطا به شیب واحد کوچکتر خواهد شد. در شکل نمودارهای خروجی نیز مشاهده می کنیم که برای حالت دوم که مقدار K بزرگتر شده است دامنه نمودار خطای رسم شده کوچکتر است پس نتایج بدست آمده با پیاده سازی های انجام شده مطابقت دارند.

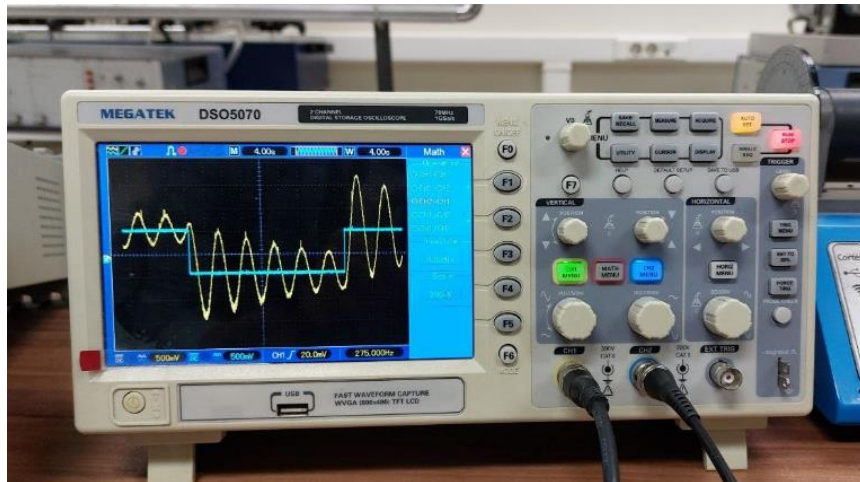
بخش چهارم: نوسان ساز خطی

این سیستم را با قرار دادن دو انتگرال گیر به عنوان سیستم حلقه باز و یک حلقه فیدبک واحد منفی میسازیم. تصویر ۱-۴ مدار مربوط به پیاده سازی این بخش را نشان می دهد.



تصویر ۱-۴: طراحی مدار نوسان ساز

پاسخ پله سیستم مطابق با تصویر ۲-۴ می باشد :



تصویر ۲-۴: خروجی نوسان ساز

حال می خواهیم خروجی را به صورت تئوری بدست آوریم:

$$\text{Step Response} = \frac{1}{s} \times \frac{1}{s^2 + 1} = \frac{1}{s^3 + s} \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} 1 - \cos(t) = u(t) - \cos(t)$$

ضابطه بدست آمده یک نوسانی نامیرا می باشد، ولی همانطور که در تصویر مشاهده میشود، خروجی نوسانی میرا شده است؛ علت این تفاوت غیر ایده آل بودن خازن ها و وجود مقاومت های درونی آنهاست که سبب تلف انرژی میشوند.