جلسه هشتم و نهم

بسم الله

فصل سوم: آشنایی با اصول و طراحی مدارهای الکترونیکی اندازه گیری

سرفصل مطالب: پل وتستون

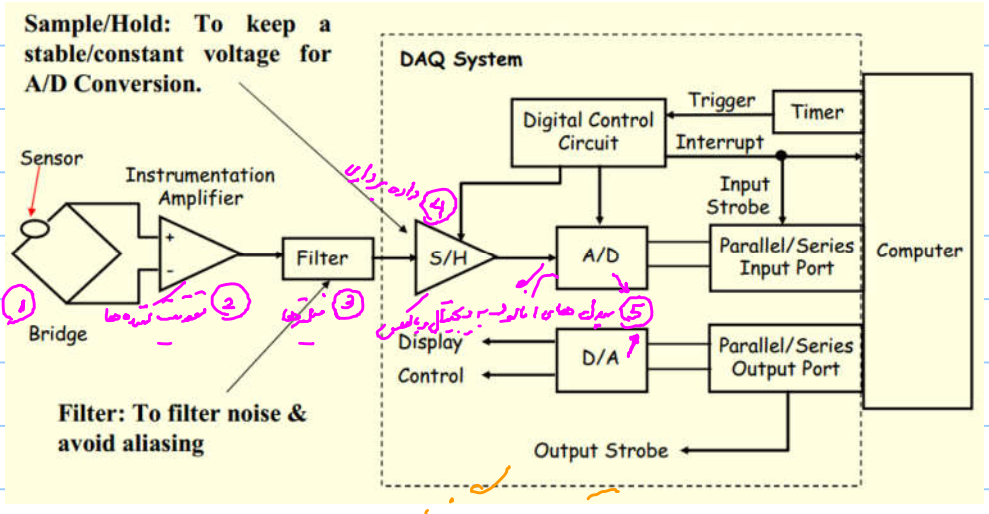
- تقویت کننده های عملیاتی (Op-Amp) و کاربردهای آن

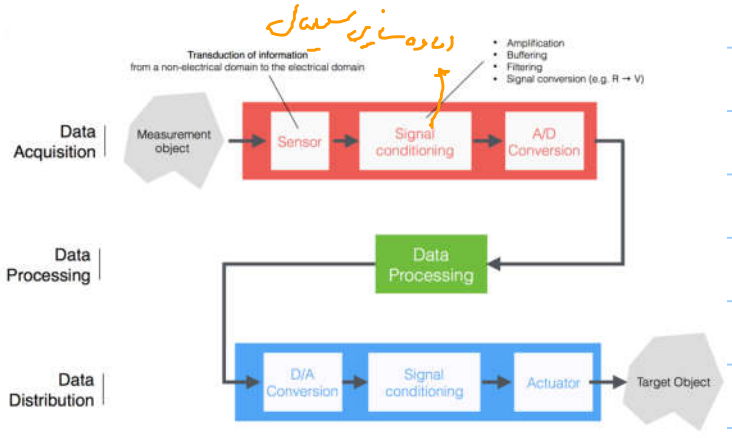
- فیلترها

- داده برداری

- مبدل های آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ

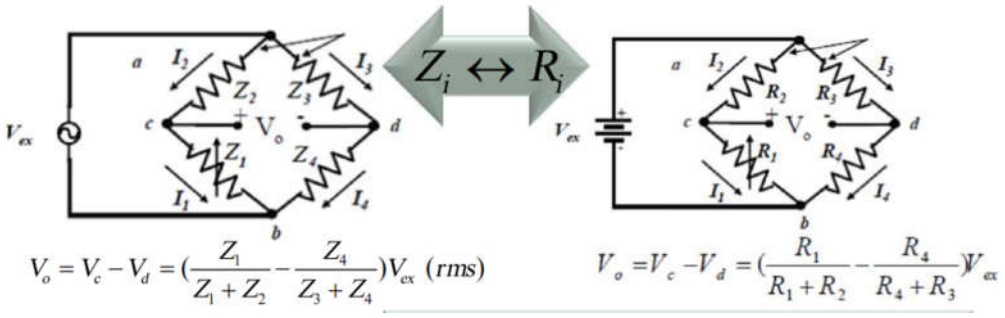
* شباهت هر سیستم اندازه گیری و کنترل ارائه شده در برنامه های زیربنای مطالب مورد بحث درس فصلی را تشکیل می دهد!





① پل تعادلی یا آنالوگی و دستون

- در فصل گذشته، پل وستون را در حالت تعادل بررسی نمودیم. در نظر داشته باشید که در حالت تعادل جریان شاخه وسط صفر می‌باشد از این پل استفاده می‌شود.



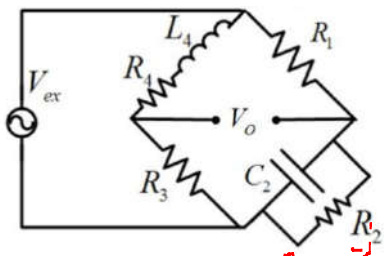
- در پل‌های جریان متناوب، هر شاخه می‌تواند شامل مجموعه‌ای مقاومت (با امپدانس $Z_R = R$)، خازن (با امپدانس $Z_C(s) = \frac{1}{Cs}$ یا $Z_C(j\omega) = \frac{-j}{\omega C}$) و سلف (با امپدانس $Z_L(s) = Ls$ یا $Z_L(j\omega) = j\omega L$) باشد.

* شرط تعادل پل ($V_{cd} = 0 \Leftrightarrow V_{cb} = V_{db}$):

$$\begin{cases} I_1 = I_2 \\ I_3 = I_4 \end{cases} \Rightarrow \frac{Z_1}{Z_1+Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3+Z_4} \Rightarrow \boxed{Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4}$$

(باید هم‌نوع خازن خازن هم‌نوع سلف سلف باشد)

- مثال: شرایط تعادل پل جریان متناوب شکل مقابل را بیابید.



$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4 \Rightarrow R_1 \cdot R_3 = (R_2 \| C_2) \cdot (R_4 + jL_4\omega)$$

$$\Rightarrow R_1 \cdot R_3 = \left(\frac{R_2 \cdot \frac{-j}{\omega C_2}}{R_2 + \frac{-j}{\omega C_2}}\right) \cdot (R_4 + jL_4\omega) \Rightarrow R_1 \cdot R_3 = \frac{-R_2 j}{R_2 C_2 \omega - j} \cdot (R_4 + j\omega L_4)$$

$$\Rightarrow R_1 R_3 R_2 C_2 \omega - R_1 R_3 j = + R_2 L_4 \omega - R_2 R_4 j \Rightarrow \begin{cases} R_1 R_3 = R_2 R_4 & \leftarrow \text{شاخه‌ی مخالف مقاومتی} \\ L_4 = R_1 R_3 C_2 & \leftarrow \text{شاخه‌ی مخالف خازنی} \end{cases}$$

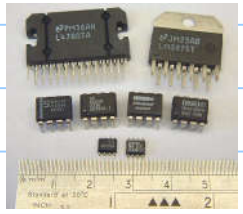
۲) تقویت کننده های عملیاتی Operational Amplifiers (Op-Amp)

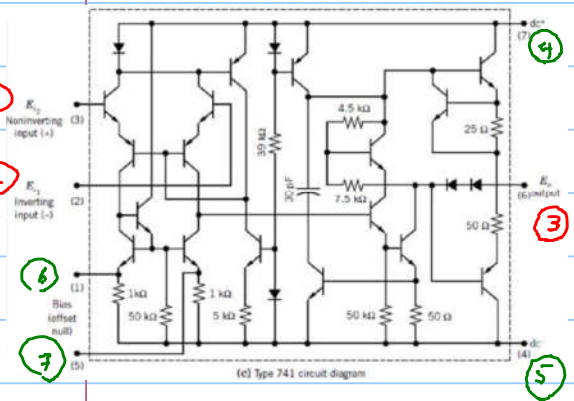
- خروجی بسیاری از ترنسدیوسرها به دلیل اندازه های کوچک، نوری بودن، دارا بودن ولتاژهای بایاس DC و ... به شکل مستقیم قابل استفاده نیستند و پیش از ورود به مدارهای دیجیتال و انجام عملیات کنترلی، باید پردازش شوند. (Signal Conditioning)

- در سیستم های اندازه گیری، از تقویت کننده ها جهت افزایش سطح سیگنال های خروجی ترنسدیوسرها بهره گرفته می شود.

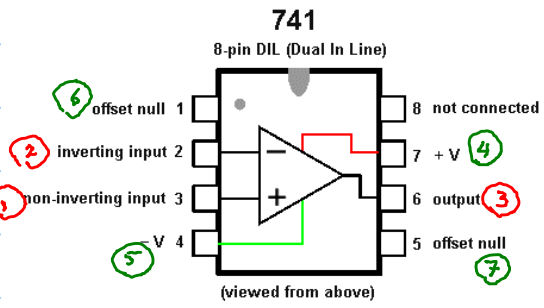
- تقویت کننده های عملیاتی جهت تفاضل، جمع و تقویت سیگنال ها، تقویت سیگنال ها، تبدیل سیگنال های دیجیتال به آنالوگ و برعکس (D/A و A/D)، فیلترها و بالاگذرها، کاربردهای کنترلی، مشتق گیری و انتگرال گیری و ... مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین در بسیاری عملیات ریاضی به صورت الکترونیکی

- هر تقویت کننده عملیاتی، یک مدار مجتمع (IC) شامل ترانزیستورها، مقاومت ها، دیودها، خازن های میکروسکوپی و ... است که با استفاده از عناصر غیرفعال (passive) می توانند توابع زیادی را ایجاد کنند.



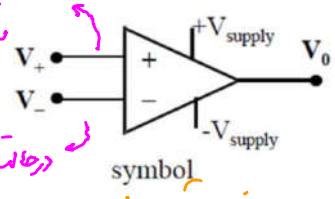


تراشه معروف ترین و پرکاربردترین آپ امپ ها 741



- تقویت کننده های عملیاتی سه پایه اصلی دارند: ① V_+ به عنوان ورودی non-inverting، ② V_- به عنوان ورودی inverting و ③ V_o خروجی آپ امپ.

- همچنین هر آپ امپ پایه های ⑤ و ④ تغذیه + و - و ⑦ و ⑥ پایه های اضافه دارد.



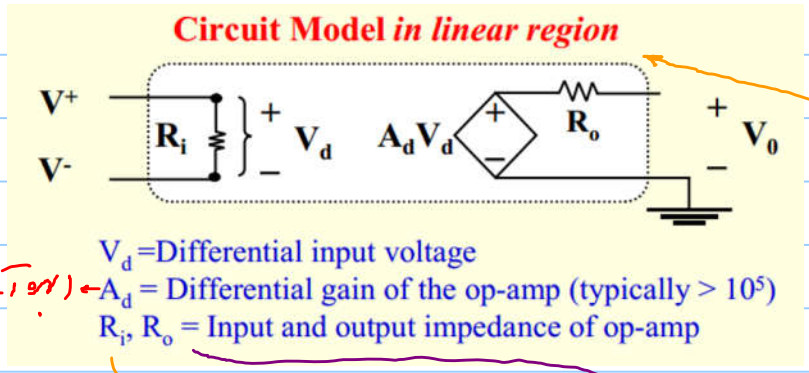
در حالت ایده آل، ولتاژ خروجی آپ امپ برابر است با: $V_o = A(V_+ - V_-)$

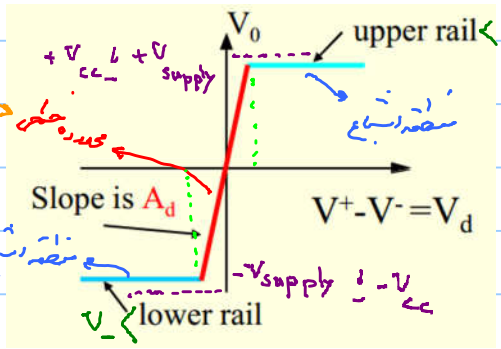
در محدوده خطی عملکرد

در حالت ایده آل، ولتاژ خروجی V_o با این ولتاژ اختلاف فاز ۱۸۰ درجه دارد.

$\pm V_{supply}$ ($\pm 15V$ ، $\pm 1.5V$)

- مدار معادل اپ ـ امپ :





(بهره اپ ـ امپ) ← A_d = Differential gain of the op-amp (typically > 10^5)

R_i, R_o = Input and output impedance of op-amp

(معمولاً در محدوده 10^{12} تا 10^{15} اهم) مقاومت ورودی

(معمولاً در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ اهم) مقاومت خروجی

- در صورتی که اختلاف بین ولتاژهای ورودی از محدوده خطی خارج شود، ولتاژ خروجی اشباع شده و خروجی به حداکثر اندازه خود یا rail، میرسد (و اندکی کمتر از اندازه ولتاژ تغذیه است)، می‌رسد.

- اپ ـ امپ ایده‌ال :

1) فرض می‌شود که امپدانس ورودی اپ ـ امپ بینهایت است. ($R_i \to \infty$) ← جریان ورودی به اپ ـ امپ صفر است (جریان نمی‌کشد)

2) فرض می‌شود که امپدانس خروجی اپ ـ امپ صفر است ($R_o = 0$) ← ولتاژ تولید شده خروجی، بدون تضعیف به خروجی میرسد

3) بهره اپ ـ امپ بی‌نهایت فرض می‌شود ($A_d \to \infty$)

← در اپ ـ امپ ایده‌ال $V_+ = V_-$ برقرار فرض می‌شود و همچنین هیچ جریانی به پایه‌های ورودی وارد/خارج نمی‌شود. البته در عمل داشته باشید جریان می‌تواند از این پایه خروجی خارج/وارد شود.

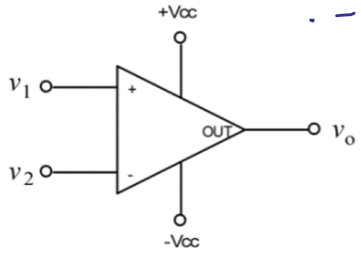
- هدف از تحلیل مدارهای مداری اپ ـ امپ، محاسبه ولتاژ خروجی برحسب ولتاژهای ورودی است.

- اپ ـ امپ بدون داشتن فیدبک (به ورودی منفی)، ناپایدار (مدار باز) بوده و به همین علت خروجی موارد زیر منظور

همواره صفر، به صورت مدار باز استفاده می‌شود.

* کاربرد تقویت کننده های عملیاتی

الف) مقایسه گر (Comparator): استفاده از آپ امپ بدون فیدبک



V_+ V_-

if $v_1 > v_2 \Rightarrow V_o \simeq +V_{cc}$

if $v_1 < v_2 \Rightarrow V_o \simeq -V_{cc}$

} مقدار ماکزیمم ولتاژ خروجی

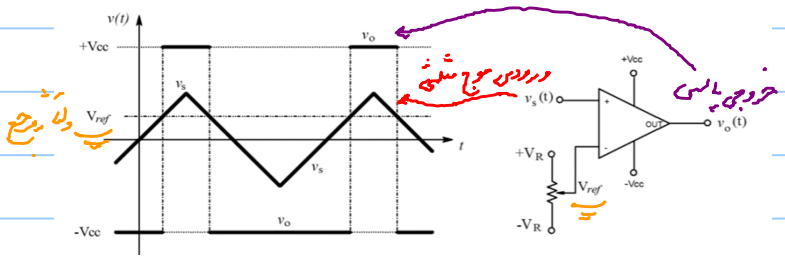
نشان دهنده این است که ولتاژ v_1 نسبت به v_2 است.

$\Rightarrow V_o = \text{sign}(V_+ - V_-)$

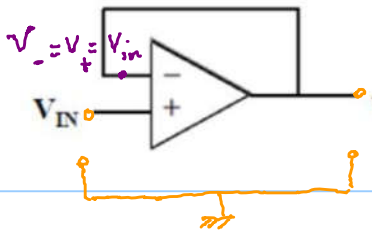
علامت این عبارت هم است

- در این مدار ولتاژهای ورودی را به عنوان ورودی می پذیرد و خروجی آن فقط دو حالت مشخص (دیجیتال) دارد، این مدار قسمت اصلی مدل های آنالوگ به دیجیتال (ADC) است.

- کاربرد دیگر: مدل موج مثلثی به پالسی



ب) تقویت کننده بافر ولتاژ (Voltage follower Amplifier)



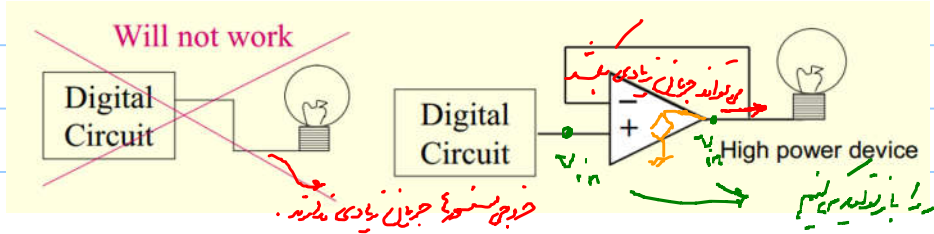
$V_0 = V_{in} \Rightarrow$! copy-paste از ولتاژ ورودی

حال چون توان از ورودی گرفته می شود، V_{in} تقریبا به V_0 منتقل می شود و ما از این ویژگی برای مدارهای بعدی استفاده می کنیم.

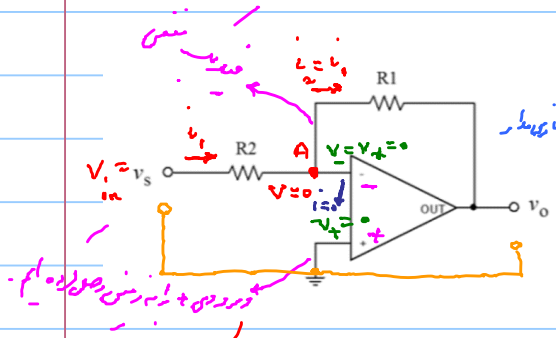
- مدارهای دیجیتال عموما جریان خروجی زیادی تولید نمی کنند.

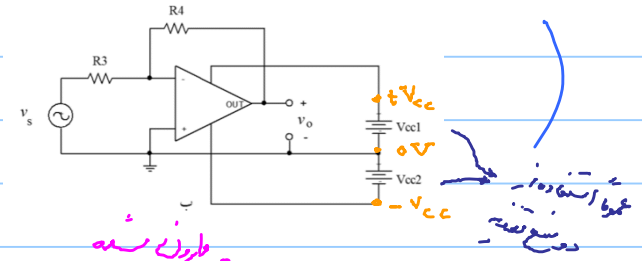
- وقتی بخواهیم از یک مدار دیجیتال توان بالایی دریافت کنیم (= جریان قابل توجهی داشته باشیم) باید مدار بافر ولتاژ (یا همان بافر دنباله رو) را

بین مدار دیجیتال و بار استفاده کنیم.

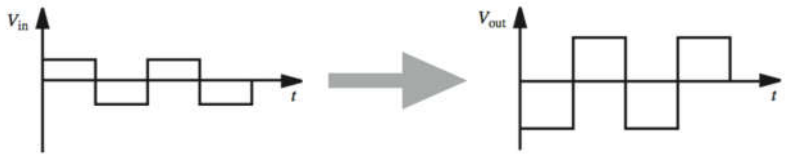


ب) تقویت کننده با بهره منفی (عاوون ساز) : Inverting Amp.



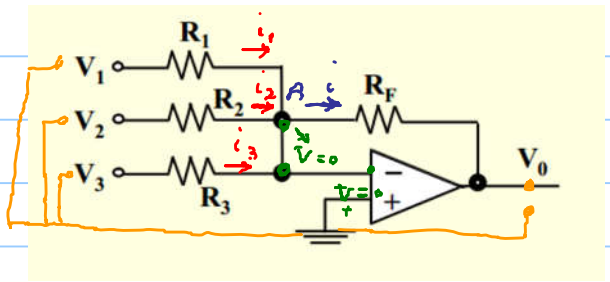


در گره A : $i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{V_s - 0}{R_2} = \frac{0 - V_o}{R_1} \Rightarrow \boxed{V_o = -\frac{R_1}{R_2} V_{in}}$ (if $R_1 = R_2 \Rightarrow V_o = -V_{in}$)



پ) تقویت کننده جمع کننده : (Summing Amplifier)

- در برخی کاربردها، سیگنال های ورودی از دو یا چند منبع باید با هم جمع شوند تا سیگنال خروجی متناسب با مجموع سیگنال های ورودی بدست آید. این عمل می‌تواند توسط مدار زیر که به تقویت کننده جمع کننده معروف است، انجام گردد. (مثال: صدای های دو مکالمه تلفن)

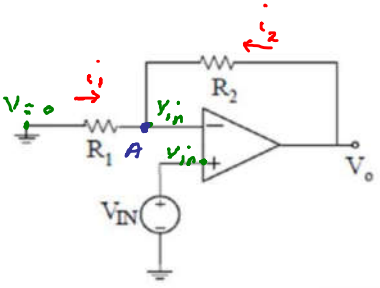


در گره A : $i_1 + i_2 + i_3 = i$

$\Rightarrow \frac{V_1 - 0}{R_1} + \frac{V_2 - 0}{R_2} + \frac{V_3 - 0}{R_3} = \frac{0 - V_o}{R_F} \Rightarrow$

$\boxed{V_o = -R_F \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)}$ (if $R_1 = R_2 = R_3 = R_F \Rightarrow V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$)

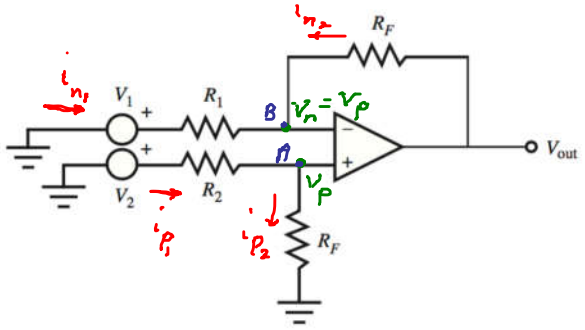
ت) تقویت کننده با بهره مثبت : (Non-inverting Amp.)



در گره A : $i_1 + i_2 = 0 \Rightarrow \frac{0 - V_{in}}{R_1} + \frac{V_o - V_{in}}{R_2} = 0$

$\Rightarrow \boxed{V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{in} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in}}$

ج) تقویت کننده تفاضلی (Difference Amplifier) ← خروجی این تقویت کننده تفاضل ولتاژهای ورودی + و - است.



- می‌خواهیم تابع تبدیل V_o به ورودی‌های V_1 و V_2 را بیابیم.

در A داریم: $i_{p_1} = i_{p_2} \rightarrow \frac{V_2 - V_p}{R_2} = \frac{V_p - 0}{R_F}$

$$\Rightarrow \boxed{V_p = \left(\frac{R_p}{R_2 + R_p}\right) V_2 = V_n}$$

در B داریم: $i_{n_1} + i_{n_2} = 0 \Rightarrow \frac{V_1 - V_n}{R_1} + \frac{V_o - V_n}{R_F} = 0 \xrightarrow{V_n = V_p} \frac{V_1 - \frac{R_F}{R_2 + R_p} V_2}{R_1} + \frac{V_o - \frac{R_F}{R_1 + R_2} V}{R_F} = 0$

$$\Rightarrow \boxed{V_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\left(\frac{R_F}{R_2 + R_F}\right) V_2 - \left(\frac{R_F}{R_1}\right) V_1}$$

if $R_1 = R_2 = R \Rightarrow \boxed{V_o = \frac{R_F}{R_1}(V_2 - V_1)}$

واسته به تفاضل $V_2 - V_1$

* این تقویت کننده:

$V_d = V_2 - V_1$ ← تفاضل ولتاژها ، $V_{cm} = \frac{1}{2}(V_1 + V_2)$ ← میانگین (ولتاژ مشترک) ولتاژها

$\left(\Rightarrow V_1 = V_{cm} - \frac{V_d}{2},\ V_2 = V_{cm} + \frac{V_d}{2}\right)$ ← بخش مشترک

و رابطه ولتاژ خروجی را بدین صورت می‌نویسیم:

$$V_o = A_{cm} V_{cm} + A_d V_d$$

خواهیم داشت:

$$V_o = \left(-\frac{R_F}{R_1} + \left(\frac{R_F}{R_F + R_2}\right)\left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\right) V_{cm} + \left(\frac{R_F}{2R_1} + \frac{1}{2}\left(\frac{R_F}{R_2 + R_F}\right)\left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\right) V_d$$

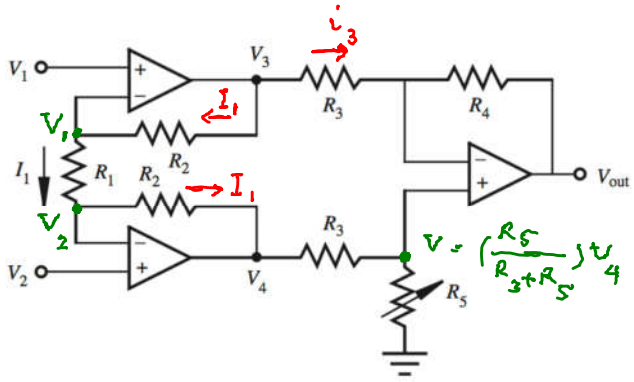
بهره مود مشترک (Common Mode Gain) — بهره تفاضلی (Difference Mode Gain)

- سپس CMRR را اینطور تعریف می‌کنیم:

(Common Mode Rejection Ratio) $\boxed{CMRR = \frac{\text{Difference Mode Gain}}{\text{Common Mode Gain}} = 20 \log \frac{A_d}{A_{cm}} \text{ (dB)}}$ ← (هرچه بزرگ، بهتر!)

if $R_1 = R_2 = R \Rightarrow \begin{cases} A_{cm} = 0 \\ A_d = \frac{R_F}{R} \end{cases} \Rightarrow CMRR \rightarrow \infty$ (در تقویت کننده‌های ایده‌آل، مدارمان هم اینطور در واقعیت اینطور نیست!)

ج) تقویت کننده ابزاردقیق (Instrumentation Amp.)



- این تقویت کننده، جریان‌های ورودی بالا دارد.
- هر دو ولتاژ V_1 و V_2 به ورودی‌های غیر معکوس اپ‌امپ‌ها وصل شده‌اند.
- دارای ضریب CMRR بسیار بالا
- در محیط‌های نویزی، قابلیت تقویت سیگنال‌های بسیار کوچک را دارد.

- در این مدار، می‌توان نشان داد:

$$V_3 = \left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)V_1 - \frac{R_2}{R_1}V_2$$

$$V_4 = -\frac{R_2}{R_1}V_1 + \left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)V_2$$

$$V_o = \frac{R_5(R_3+R_4)}{R_3(R_3+R_5)}V_4 - \frac{R_4}{R_3}V_3$$

if $R_5 = R_4$ $\rightarrow$ $V_o = \left(\frac{R_4}{R_3}\left(1+2\frac{R_2}{R_1}\right)\right)(V_2-V_1)$

$\hookrightarrow$ CMRR $\rightarrow \infty$, $A_{CM} = 0$ در این حالت ($V_d = V_2 - V_1$, $V_{cm} = \frac{V_1+V_2}{2}$ با توجه به فرض)

- برای داشتن حداکثر CMRR در عمل، باستی از مقاومت‌های بسیار دقیق استفاده کرد (= دقتی در حدود صدم درصد)
- این نوع تقویت کننده به صورت IC موجود است (مثل National Semiconductor LM623، AD620، AD624)

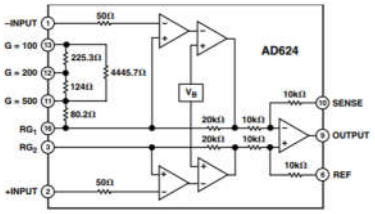
ANALOG DEVICES

Precision Instrumentation Amplifier

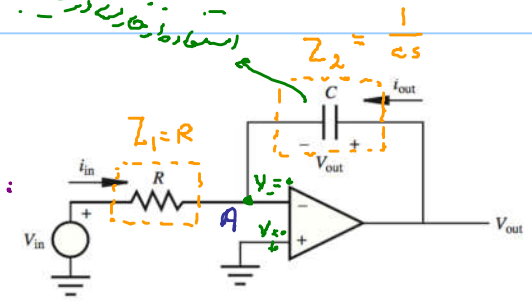
AD624

FEATURES
Low Noise: 0.2 µV p-p 0.1 Hz to 10 Hz
Low Gain TC: 5 ppm max (G = 1)
Low Nonlinearity: 0.001% max (G = 1 to 200)
High CMRR: 130 dB min (G = 500 to 1000)
Low Input Offset Voltage: 25 µV, max
Low Input Offset Voltage Drift: 0.25 µV/°C max
Gain Bandwidth Product: 25 MHz
Pin Programmable Gains of 1, 100, 200, 500, 1000
No External Components Required
Internally Compensated

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ج) تقویت کننده انتگرال گیر و مشتق گیر:



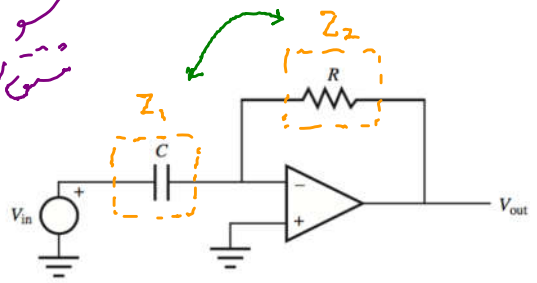
انتگرال گیر:

A و: $i_{in} + i_{out} = 0 \Rightarrow \frac{V_{in} - 0}{R} = -C\frac{dV_o}{dt}$

$$\Rightarrow \boxed{V_o(t) = \frac{-1}{RC}\int_0^t V_{in}(\tau)\,d\tau}$$

لاپلاس: $V_o(s) = \frac{-Z_2}{Z_1} V_{in}(s) = \frac{-1}{RCs} V_{in}(s)$ ← در فضای لاپلاس — درحوزه زمان ← $V_o(t) = \frac{-1}{RC}\int_0^t V_{in}\,dt$

مشتق گیر:



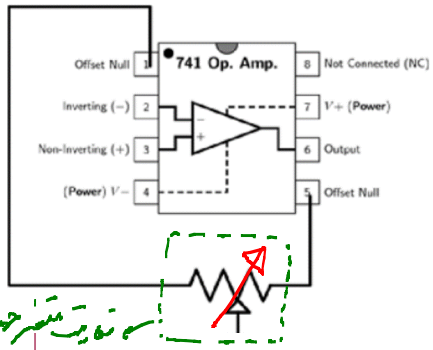
$V_o(s) = \frac{-Z_2}{Z_1} V_{in}(s) = \frac{-R}{\frac{1}{Cs}} V_{in}(s) \Rightarrow$

$V_o(s) = -RCs \cdot V_{in}(s) \Rightarrow V_o(t) = -RC\frac{d}{dt}V_{in}(t)$

← در فضای لاپلاس — درحوزه زمان

تقویت کننده مشتق گیر، نویزها (با تغییرات سریع) را تقویت می‌کند به همین عنوان معایب دارد و باید مورد توجه قرار گیرد.

* مدلسازی ولتاژ یا بایس، جریان افست و امپدانس ورودی اپ امپ واقعی :



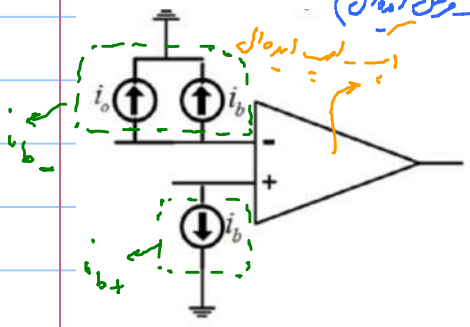
- اگر جه امپدانس ورودی برای هر دو ورودی اپ امپ صفر است، ولتاژ خروجی نیز صفر شده، را به علت خطاهای ساخت اپ امپ و نادقیق بودن المان ها،

ولتاژ بایس (= غیر صفر) داریم که با بهره گیری از مقاومت متغیر متصل به پایه های افست اپ امپ

مدار معادل ورودی) می توان آن را حذف نمود.

(مدل سازه بیضی)

- همچنین در اپ امپ های واقعی، جریان افست دو پایه های ورودی وجود دارد. (برخلاف حالت ایده آل)

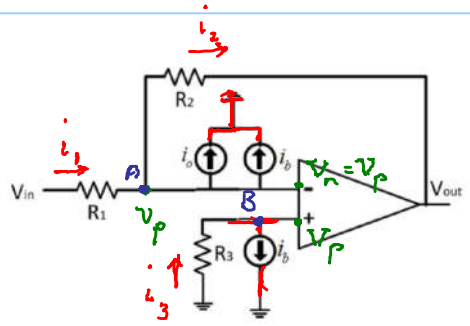


- جریان بایس (i_b) و افست (i_o) در اپ امپ های واقعی به صورت

مقابل مدل می شوند.

مثال : مدار تقویت کننده معکوس کننده را با فرض اپ امپ واقعی (= در نظر گرفتن جریان های افست و بایس) تحلیل نموده

و شرایط حذف اثر جریان بایس را تعیین نمایید.



در گره A : $i_1 = i_2 + i_o + i_b$

$$\Rightarrow \frac{V_{in} - V_p}{R_1} = \frac{V_p - V_o}{R_2} + i_o + i_b$$

در گره B : $i_3 = i_b \Rightarrow \frac{0 - V_p}{R_3} = i_b \Rightarrow V_p = -R_3 i_b$

$$\Rightarrow \frac{V_{in}}{R_1} + \frac{R_3}{R_1} i_b = \frac{-R_3}{R_2} i_b - \frac{V_o}{R_2} + i_o + i_b \Rightarrow$$

این ترم همان بایس خروجی است

$$V_o = \frac{-R_2}{R_1} V_{in} - \left(\frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2} - 1\right) R_2 i_b - R_2 i_o$$

خروجی اپ امپ ایده آل

اگر مساوی صفر شود، اثر بایس در ولتاژ خروجی حذف می شود. $\Rightarrow R_3(R_1 + R_2) - R_1 R_2 = 0 \Rightarrow \boxed{R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \| R_2}$

③ فیلترها

- جهت پالایش سیگنال، حذف نویز و یا ارتقای مشخصات دیتاهای مد نظر، از فیلترها استفاده می‌شود.

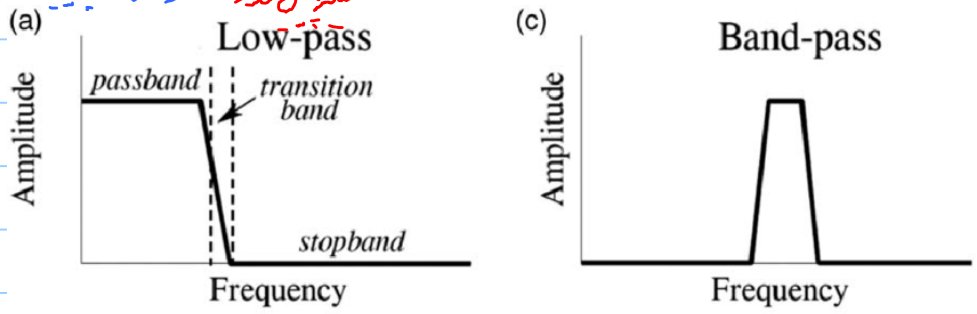
- دو دسته اصلی فیلترها، عبارتند از:

1) فیلترهای آنالوگ که روی سیگنال‌های آنالوگی عمل می‌کنند و شامل:
- فیلترهای غیرفعال (Passive) ← شامل RLC
- فیلترهای فعال (active) ← شامل اپ‌امپ، ترانزیستور، IC و...

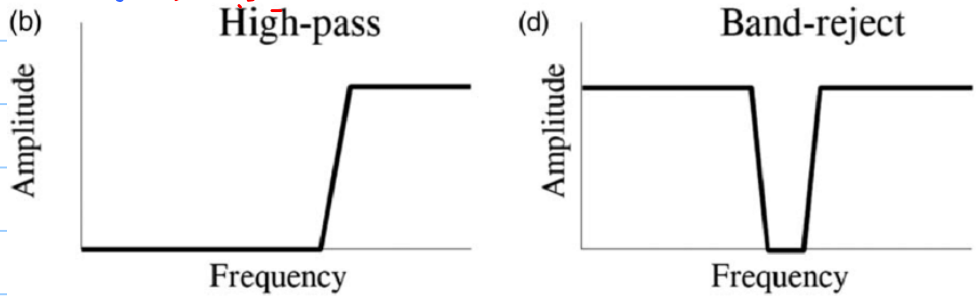
2) فیلترهای دیجیتال که روی سیگنال‌های دیجیتالی عمل می‌کنند.

- دسته‌بندی فیلترها از منظر محدوده فرکانس‌های:

فیلتر پایین‌گذر ← فرکانس‌های پایین را از خود عبور می‌دهد.



فیلتر بالاگذر ← فرکانس‌های بالا را از خود عبور می‌دهد.

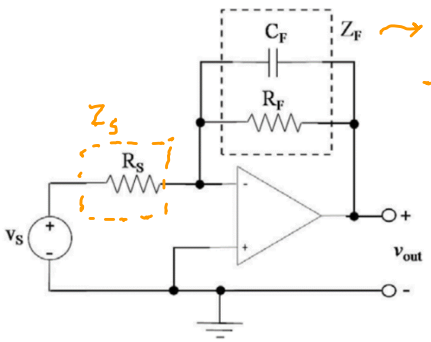


- ویژگی‌های فیلترهای فعال و غیرفعال:

- غیرفعال: عدم نیاز به منبع تغذیه، قابلیت کار در دما و فشار و جریان بالا، تأثیر اسپایس بار بر روی فرکانس عبوری
- فعال: قابلیت تقویت سیگنال‌ها با بهره‌ی مشخص (در شرایط ایده‌آل)، نیاز به منبع تغذیه

۱- فیلترهای پایین گذر (مرتبه اول)

(فعال)

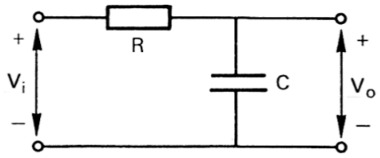


خازن در مقاومت موازی در حوزه S

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_F}{Z_S} = -\frac{\frac{R_F}{R_S}}{1 + R_F C_F \cdot s}$$

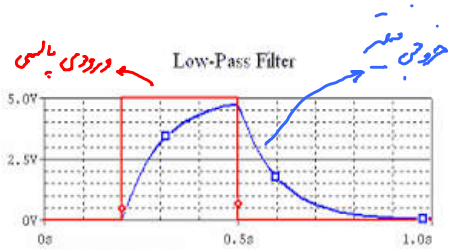
τ

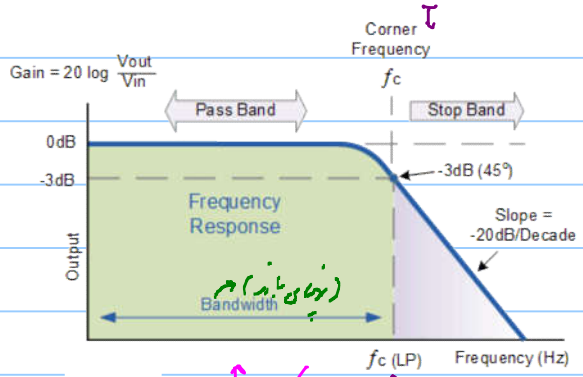
(غیر فعال)



$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + RC \cdot s}$$

τ



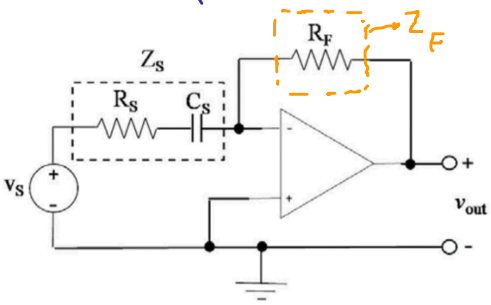


پاسخ فرکانسی

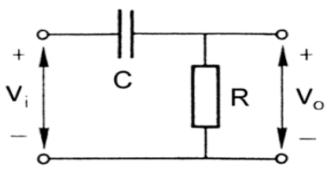
$\frac{1}{2\pi\tau}$

۲) فیلترهای بالا گذر (مرتبه اول)

(فعال)



(غیر فعال)

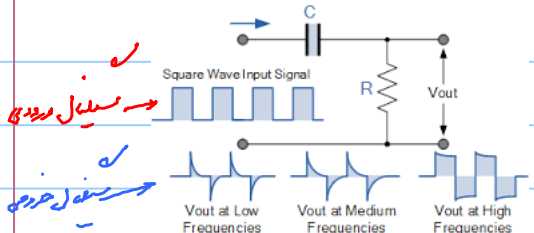


$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_F}{Z_S} = \frac{R_F C_S \cdot s}{1 + R_S C_S \cdot s}$$

τ

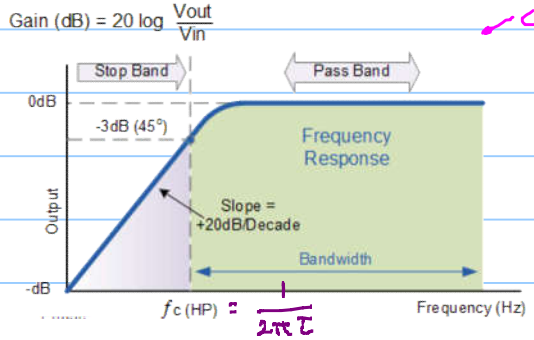
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{RC \cdot s}{1 + RC \cdot s}$$

τ



موج مستطیل ورودی

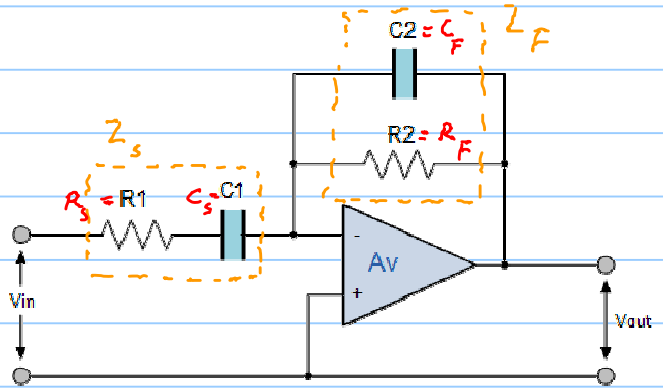
موج مستطیل خروجی



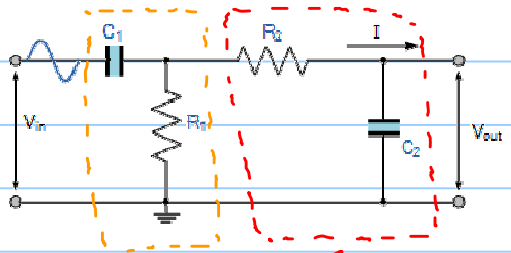
پاسخ فرکانسی

3) فیلترهای Bandpass (مرتبه دوم)

(فعال)



(غیرفعال)

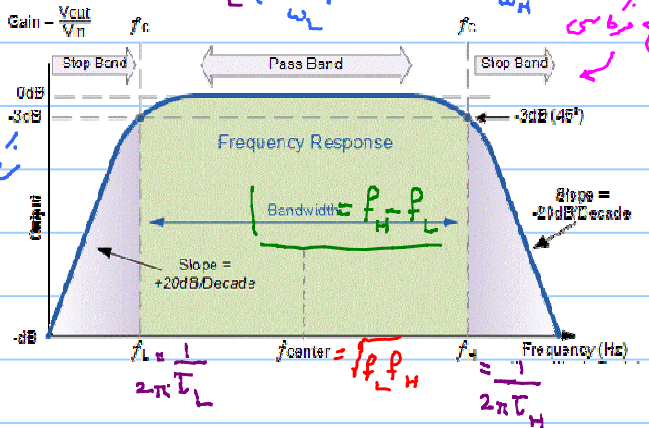


فیلتر بالاگذر — فیلتر پایین‌گذر

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{Z_F}{Z_S} = \frac{C_S R_F s}{(1+R_F C_F s)(1+R_S C_S s)}$$

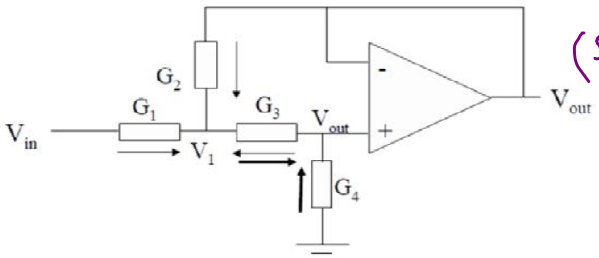
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_1 C_1 s}{(1+R_1C_1 s)(1+R_2C_2 s) + R_1 C_2 s}$$

$\tau_L = \frac{1}{\omega_L}$ $\quad$ $\tau_H = \frac{1}{\omega_H}$



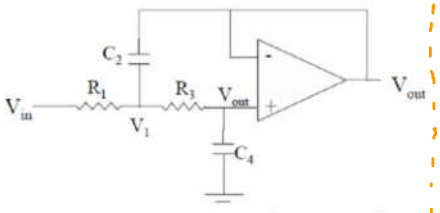
پاسخ فرکانسی

فرکانس قطع مربوط به فیلتر بالاگذر $f_L = \frac{1}{2\pi\tau_L} < f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}$ فرکانس قطع مربوط به فیلتر پایین‌گذر



* طراحی فیلتر فعال مناسب با الگوی مدار مقابل (Salken - Key Active Filters):

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{G_2 G_4}{G_2G_4 + G_2G_3 + G_1G_3 + G_1G_2}$$ (چرا؟)



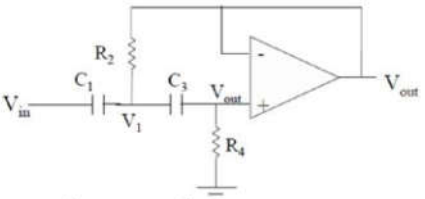
$G_1 = R_1 \; ; G_3 = R_3 \; ; G_2 = \frac{1}{sC_2} \; ; G_4 = \frac{1}{sC_4}$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{R_1R_3C_2C_4}}{s^2 + \frac{(R_1+R_3)}{R_1R_3C_2}s + \frac{1}{R_1R_3C_2C_4}}$$

$2\xi\omega_n$ ← ω_n^2

with $R_1 = R_3 = R$:

$$\omega_n = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{1}{C_2C_4}} \quad ; \quad \zeta = \sqrt{\frac{C_4}{C_2}}$$



$G_1 = \frac{1}{sC_1} \; ; G_3 = \frac{1}{sC_3} \; ; G_2 = R_2 \; ; G_4 = R_4$

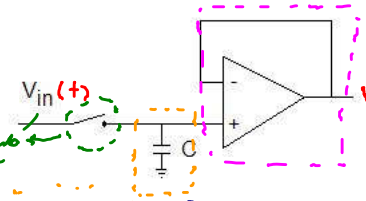
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{(C_1+C_3)}{C_1C_3R_4}s + \frac{1}{C_1C_3R_2R_4}}$$

with $C_1 = C_3 = C$:

$$\omega_n = \frac{1}{C}\sqrt{\frac{1}{R_2R_4}} \quad ; \quad \zeta = \sqrt{\frac{R_2}{R_4}}$$

۴) مدار نمونه برداری و نگهداری اطلاعات (Sample and Hold Circuit (S/H))

مدار بافر



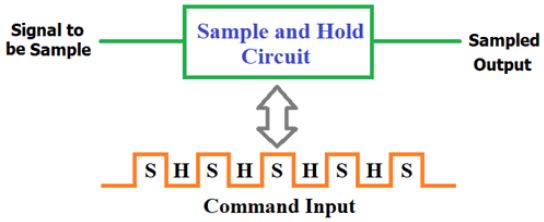
کلید وصل باشد : $V_o(t) = V_i(t)$

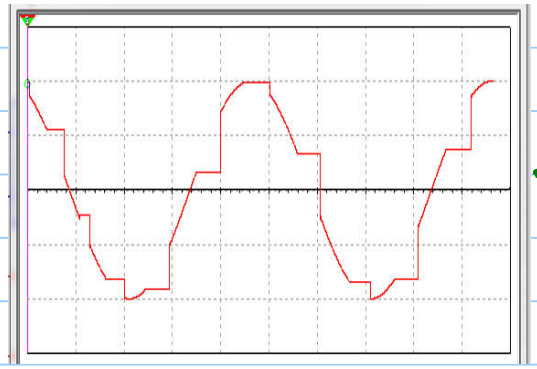
آخرین V_i قبل از قطع کلید = (V_o در لحظات قطع) کلید قطع باشد :

سوئیچ خازن هست خازن (یا خازن سیگنال)

ولتاژ ورودی در لحظات قطع کلید

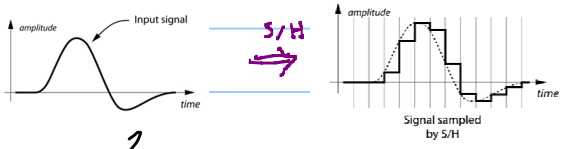
این خازن باید مقاومت خیلی کمی داشته باشد.





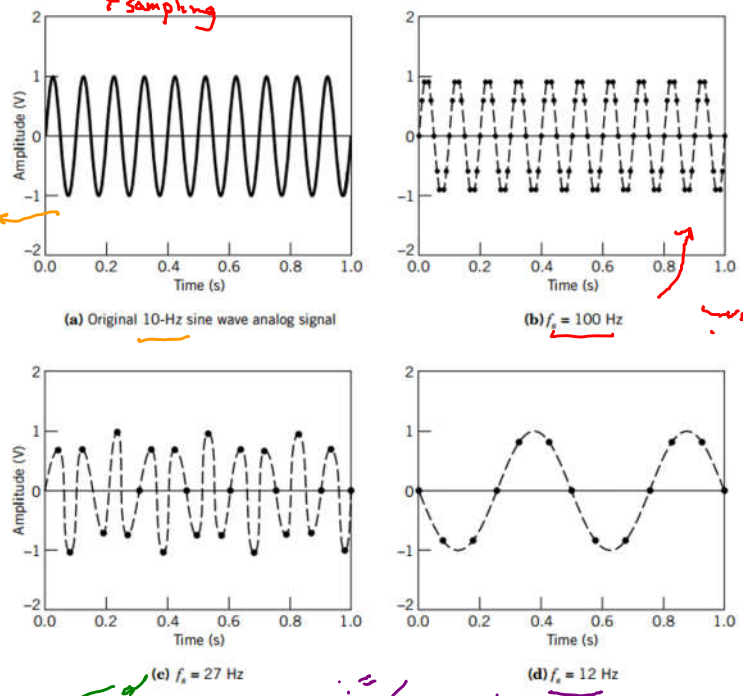
نمونه برداری از داده برداری

(داده استخراج شده همانند به صورت دنباله است)



توجه: برای حفظ تمامی اطلاعات موجود سیگنال خروجی سنسورها، نرخ داده برداری باید حتی از ۲ برابر بزرگترین فرکانس سیگنال مورد بررسی باشد. ($f_{sampling} > 2f_{max}$) ← در غیر این صورت پدیده زیر نمونه برداری (Aliasing) رخ می‌دهد.

$$\Delta t = \frac{1}{f_{sampling}}$$



سیگنال مورد مطالعه

۱۰ Hz است

شکل صحیح سیگنال با داده برداری مناسب

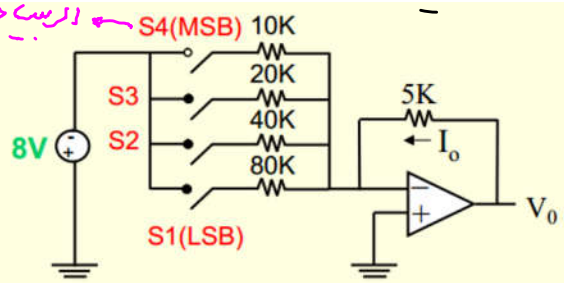
نمونه برداری کاملاً مناسب (نزدیکترین نمونه گیری کمتر از فرکانس سیگنال اصلی است)

5 مبدل های آنالوگ به دیجیتال (Analog to Digital Converter (ADC)) و دیجیتال به آنالوگ (DAC)

۵ - الف) مبدل های دیجیتال به آنالوگ: با استفاده از مدار شکل زیر، می‌توان داده‌های دودویی (Binary) را به ولتاژ آنالوگ (با پله‌های نیم ولت) تبدیل کرد.

اگر بیت خروجی ۱ باشد، مقاومت متناظر وصل و در غیر این صورت قطع می‌باشد.

4 bit Weighted adder D/A converter



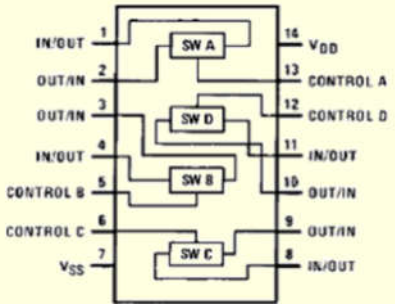
Binary number	Analog output (volts)
0 0 0 0	0
0 0 0 1	.5
0 0 1 0	1
0 0 1 1	1.5
0 1 0 0	2
0 1 0 1	2.5
0 1 1 0	3
0 1 1 1	3.5
1 0 0 0	4
1 0 0 1	4.5
1 0 1 0	5
1 0 1 1	5.5
1 1 0 0	6
1 1 0 1	6.5
1 1 1 0	7
1 1 1 1	7.5

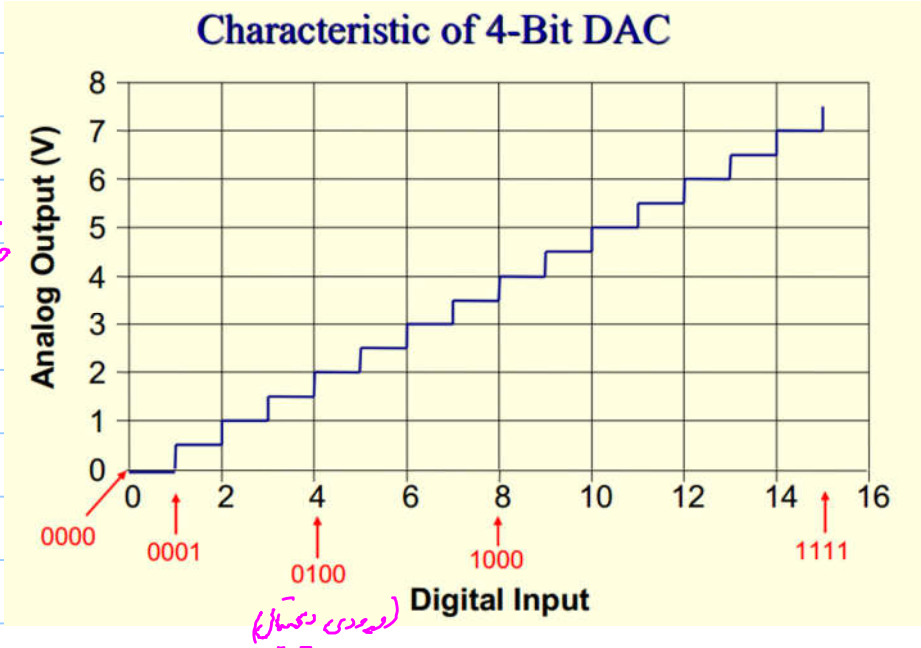
S4(MSB) S1(LSB)

بیت با بیشترین ارزش — بیت با کمترین ارزش

$$V_o = \underbrace{\left(\frac{8}{10}S_4 + \frac{8}{20}S_3 + \frac{8}{40}S_2 + \frac{8}{80}S_1\right)}_{I_O\ (mA)} * 5 = (4S_4 + 2S_3 + 1S_2 + 0.5S_1)$$

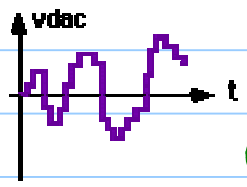
4066 CMOS 4-bit analog switch





خروجی آنالوگ

(ورودی دیجیتال)

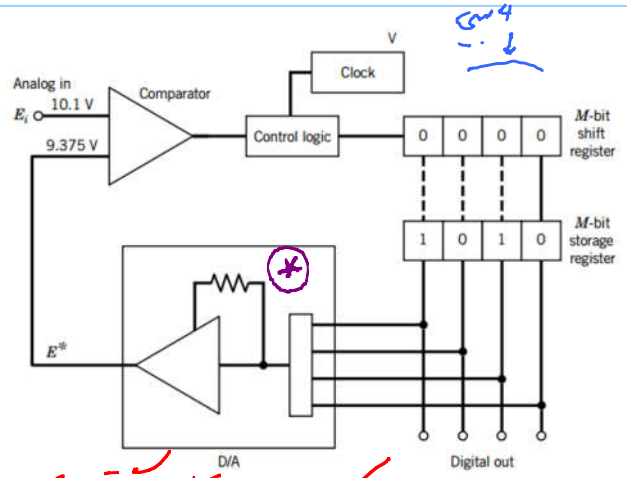


نمونه‌ای از سیگنال خروجی یک مبدل دیجیتال به آنالوگ

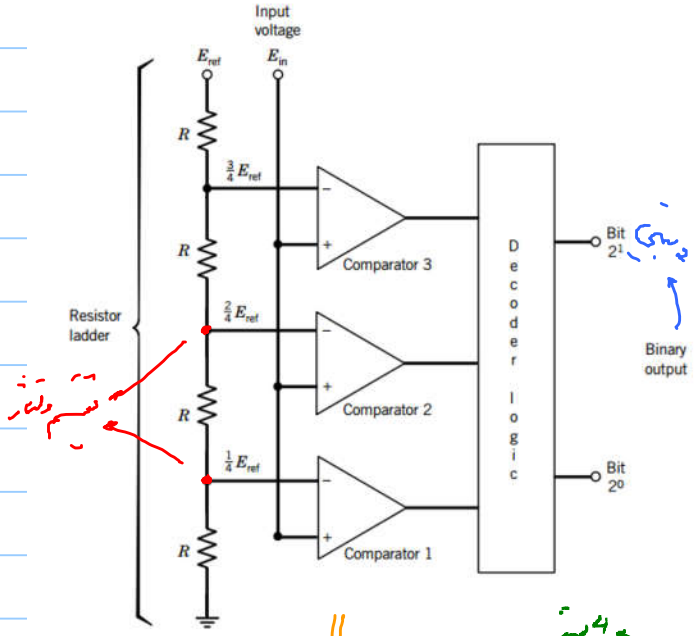
(دقت شود به هموار کردن پله‌های مشاهده شده توجه داشته باشید)

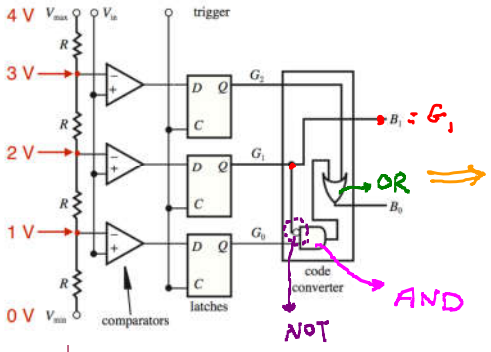
۵ـ ب) مدل‌های آنالوگ به دیجیتال (ADC)

a) روش تقریب متوالی (Successive)



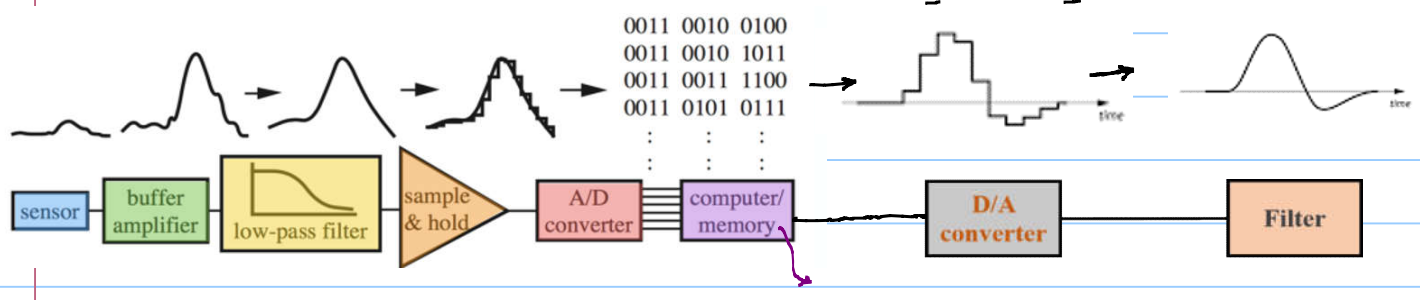
b) روش موازی (Flash یا Parallel)





معادل دیجیتال شده سطوح آنالوگ

Vin	G_2	G_1	G_0	B_1	B_0
0-1	0	0	0	0	0
1-2	0	0	1	0	1
2-3	0	1	1	1	0
3-4	1	1	1	1	1



* به خاطر داشته باشید که Arduino UNO نیز قابلیت تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال را دارد. (analogRead =)