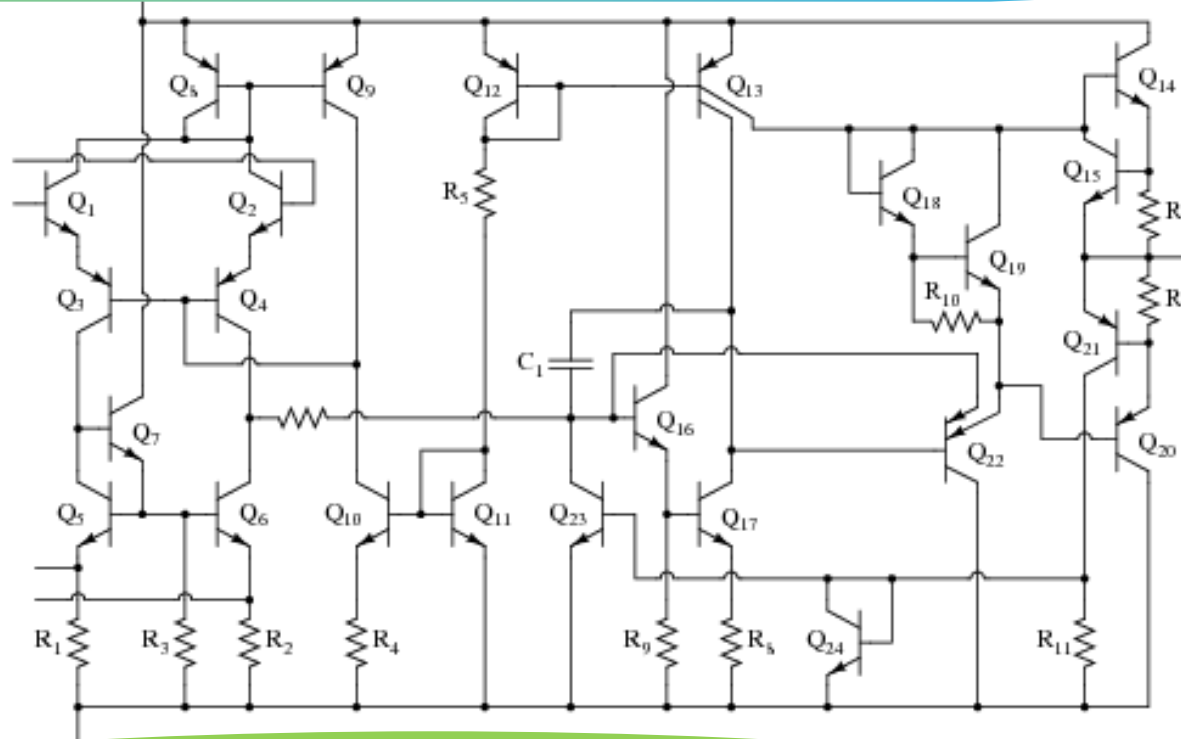


Analog Electronics (Electronics III)

By: M. Shahraki



University of
Sistan and Baluchestan

University of Sistan & Baluchestan
Faculty of Electrical and Computer Engineering
Department of Electrical & Electronics Engineering

Introduction

Text:

۱- الکترونیک ۳
محمد حسن نشاطی

2- Fundamentals of Microelectronics (Second Edition)
Behzad Razavi

۲- مبانی میکروالکترونیک
بهزاد رضوی
ترجمه: محمود دیانی

3- Microelectronic Circuits (Sixth Edition) (Part II)
Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith

۳- مبانی میکروالکترونیک (جلد دوم)
سدرا و اسمیت
ترجمه: خلیل باغانی



Introduction

References:

Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design

Alan B. Greben

Design of Analog CMOS Integrated Circuits (Second Edition)

Behzad Razavi

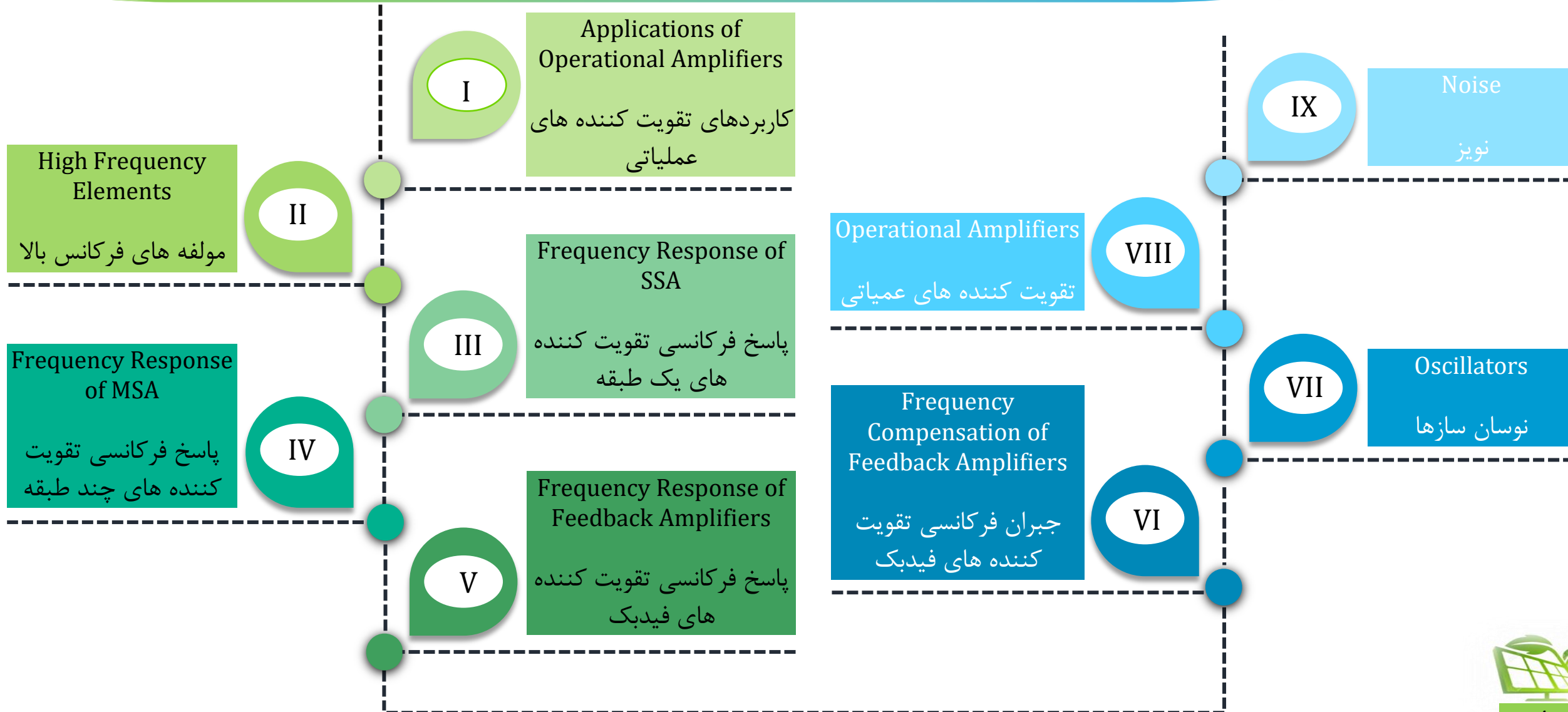
Analysis And Design of Analog Integrated Circuits (Fifth Edition)

Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis, Robert G. Meyer



Contents

فهرست

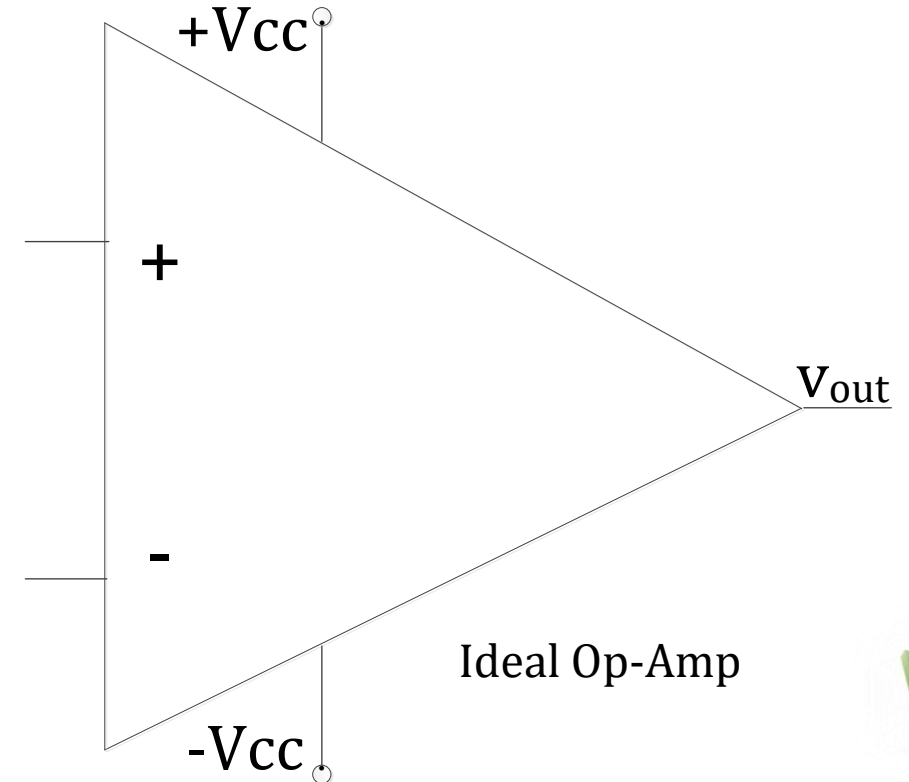
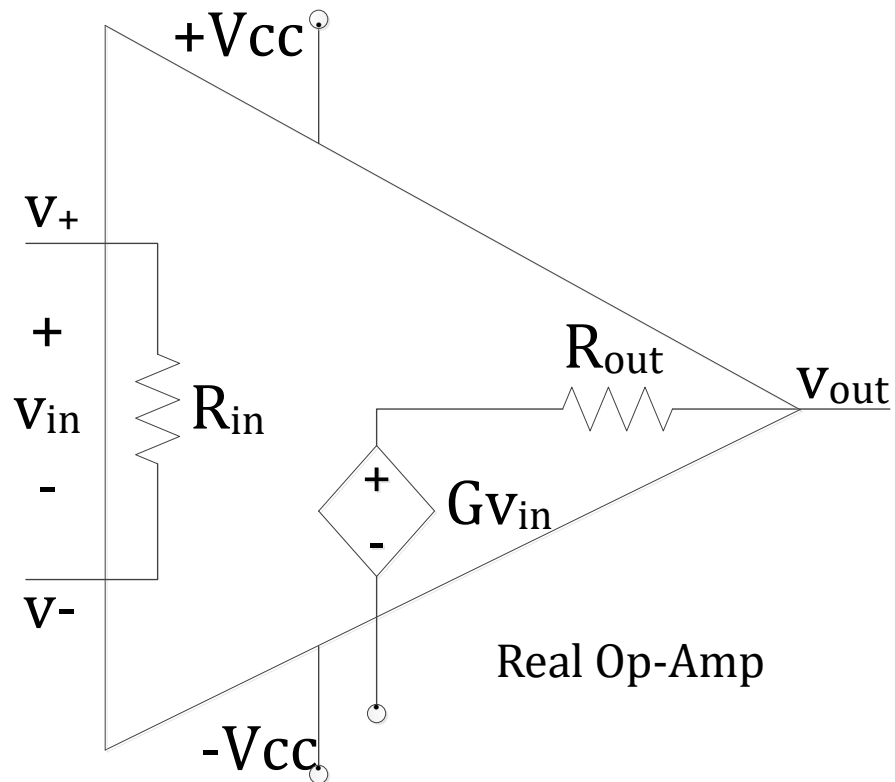


Operational Amplifiers (Op-Amp)

تقویت کننده های عملیاتی

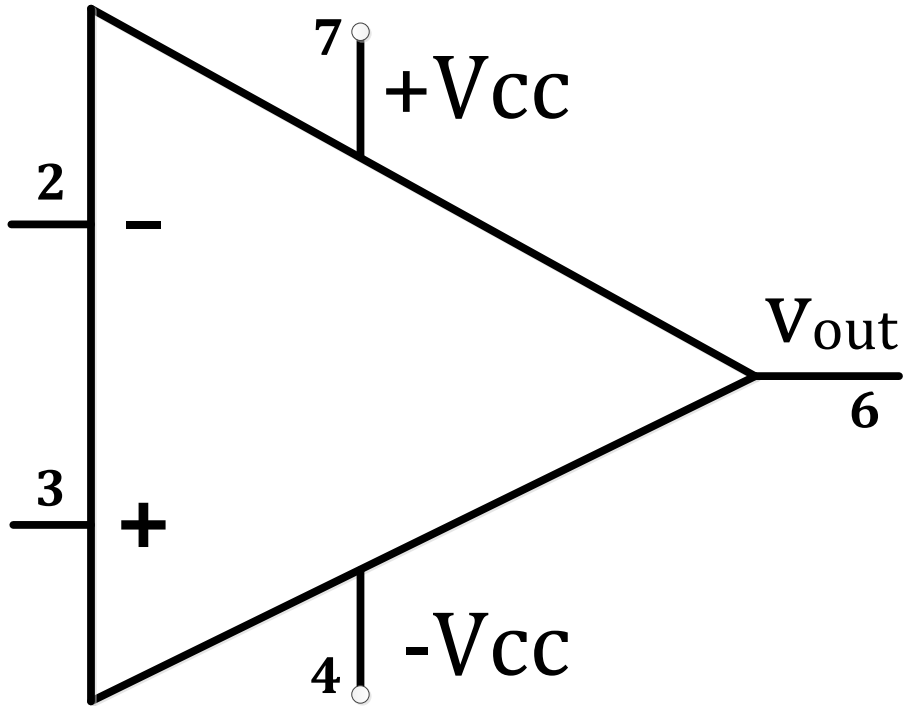
تقویت کننده عملیاتی چیست؟

یک تقویت کننده ولتاژ با بهره بسیار بالا، که اختلاف ولتاژ ورودی را با بهره بسیار بالا در خروجی اعمال می کند. در عمل تزویج شده با ولتاژ DC تغذیه بوده و به سرعت به اشباع مثبت یا منفی می رود.

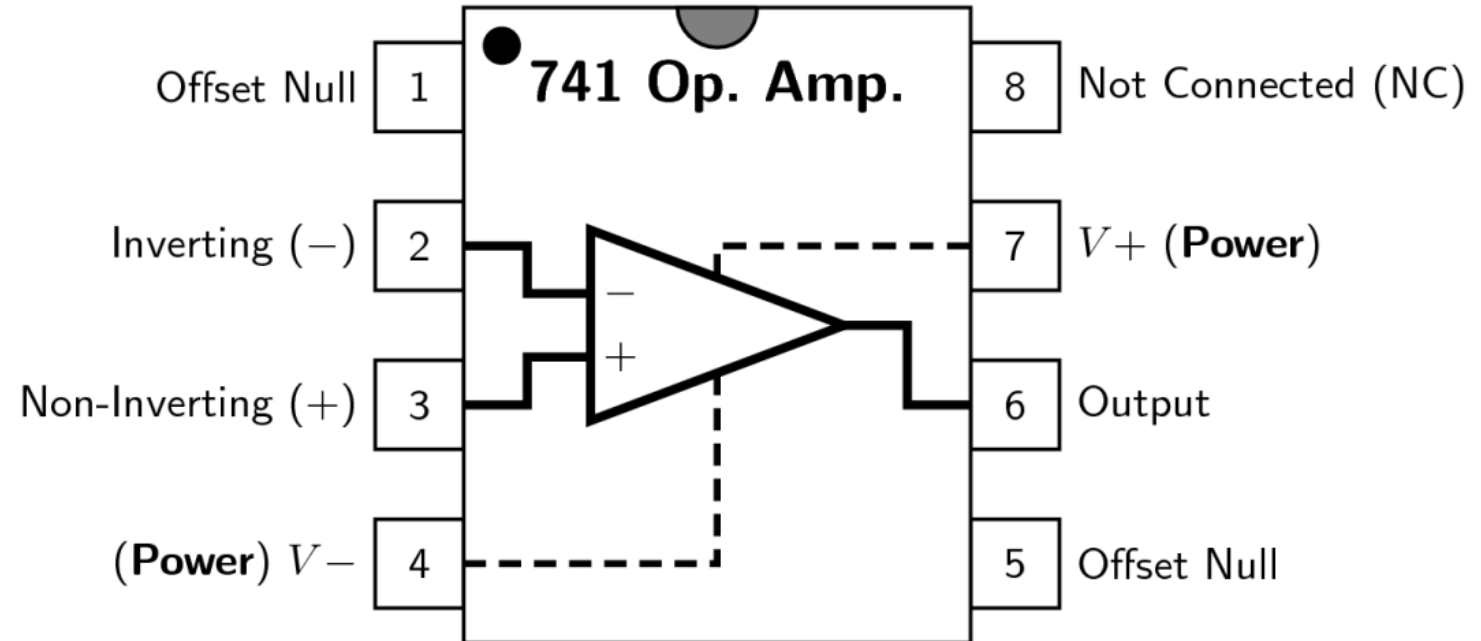


Operational Amplifiers (Op-Amp)

تقویت کننده های عملیاتی



741 Op-Amp



Operational Amplifiers (Op-Amp)

تقویت کننده های عملیاتی

Real Op-Amp

Limited Differential Voltage Gain

Non-Zero Common Mode Voltage Gain

Limited Bandwidth

Finite Input Impedance

Non-Zero Output Impedance

Non-Zero Input Offset (V & A)

Limited Slew Rate (S.R.)

Ideal Op-Amp

Infinite Differential Voltage Gain

Zero Common Mode Voltage Gain

Infinite Bandwidth

Infinite Input Impedance

Zero Output Impedance

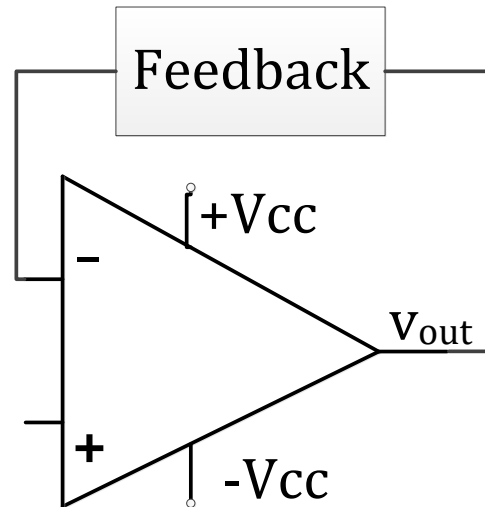
Zero Input Offset (V & A)

Infinite Slew Rate (S.R.)

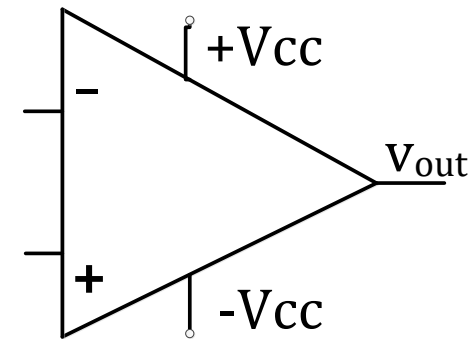


Operational Amplifiers (Op-Amp)

تقویت کننده های عملیاتی



با فیدبک منفی:



بدون فیدبک منفی:

نحوه اتصال آپ امپ:

ولتاژهای ورودی و خروجی از طریق فیدبک تعیین می شوند.

$$v^- = v^+$$

$$I^- = I^+ = 0$$

ولتاژ خروجی به اشباع مثبت یا منفی می رود.

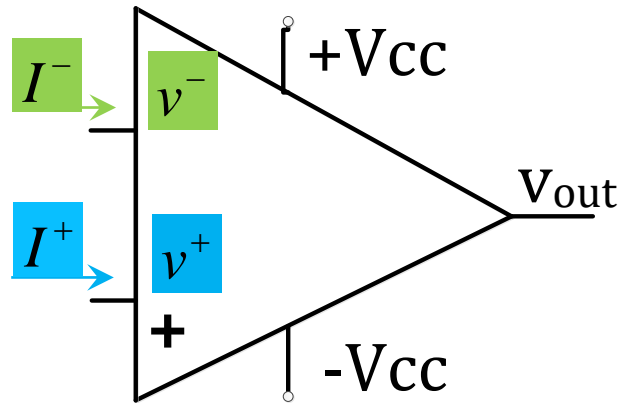
$$v^- > v^+ \rightarrow v_{out} = -V_{CC}$$

$$v^- < v^+ \rightarrow v_{out} = +V_{CC}$$



Operational Amplifiers (Op-Amp)

تقویت کننده های عملیاتی



Input Offset Voltage

$$V_{offset(in)} = |v^- - v^+|$$

ولتاژ آفست ورودی:
تفاوت ولتاژ بین پایه های ورودی

Output Offset Voltage

$$V_{offset(out)} = V_{out} \Big|_{v^+ = v^- = 0}$$

ولتاژ آفست خروجی:
ولتاژ خروجی در حالتی که پایه های ورودی هر دو زمین شده اند

Input Bias Current

$$I_{Bias} = \frac{I^+ + I^-}{2}$$

جریان بایاس ورودی:
جریان گذرنده از پایه های ورودی

Input Offset Current

$$I_{offset} = |I^+ - I^-|$$

جریان آفست ورودی:
اختلاف جریان گذرنده از پایه های ورودی



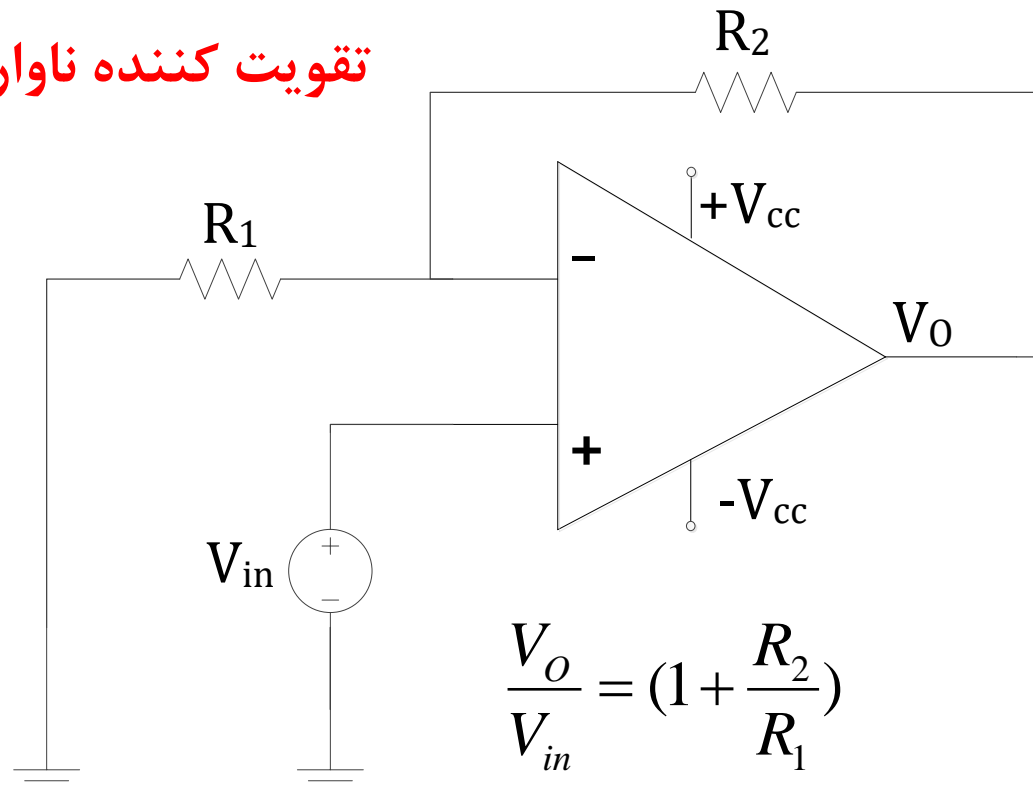
Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

کاربرد خطی:

۱- ناحیه خطی (فیدبک منفی) ۲- قطعات مورد استفاده خطی باشند.

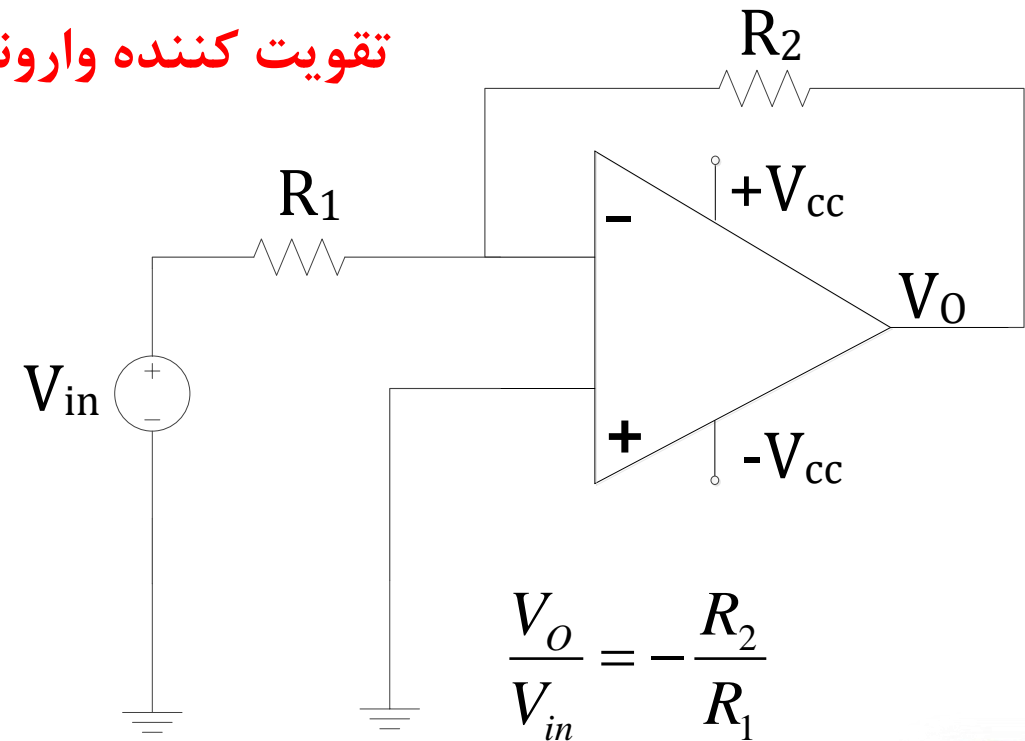
تقویت کننده ناوارونگر:



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

بافر مثبت $R_2=0$ ($R_1=\infty$) \rightarrow

تقویت کننده وارونگر:



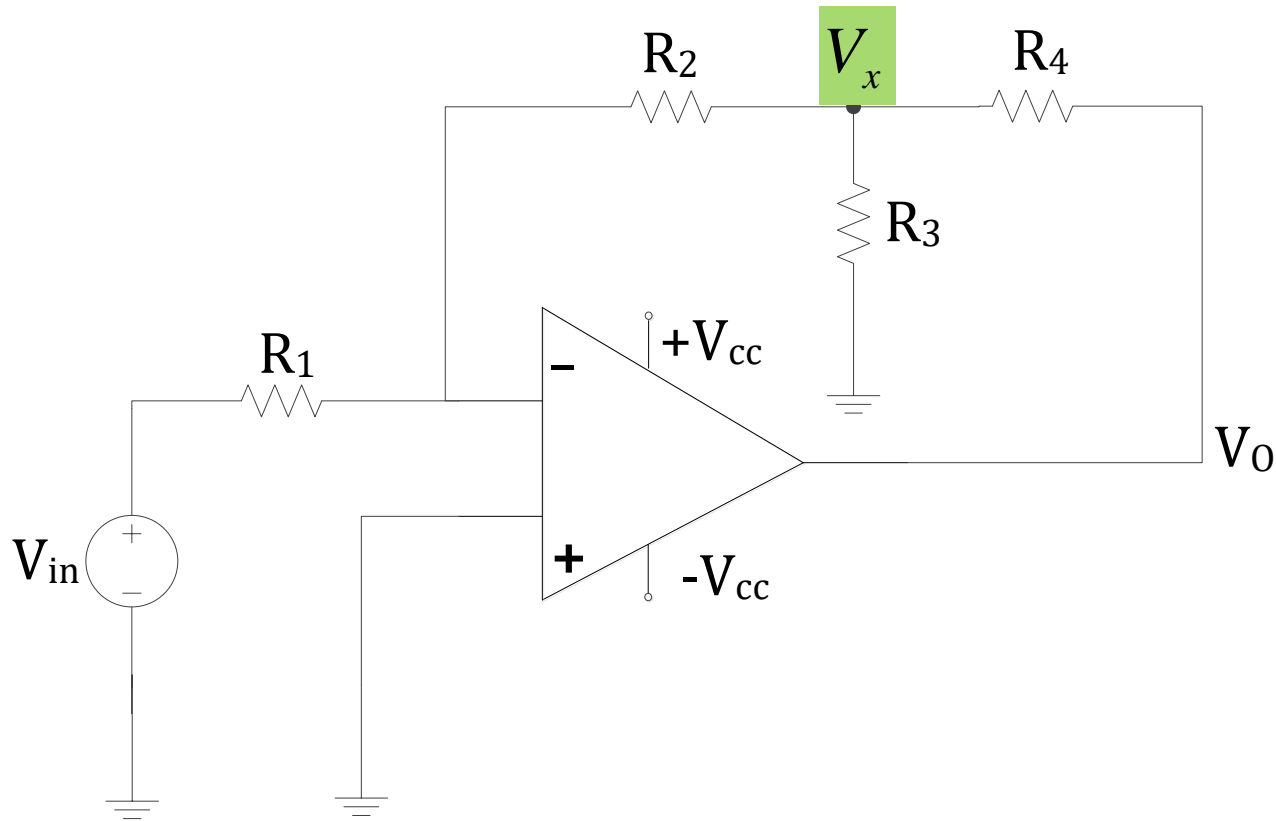
$$\frac{V_O}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

بافر منفی $R_2=R_1 \rightarrow$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی



کاربرد خطی:
طرح دیگری از وارونگر:

$$\frac{V_x}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{V_x - V_o}{R_4} + \frac{V_x}{R_2} + \frac{V_x}{R_3} = 0$$

$$\frac{V_o}{V_x} = 1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3}$$

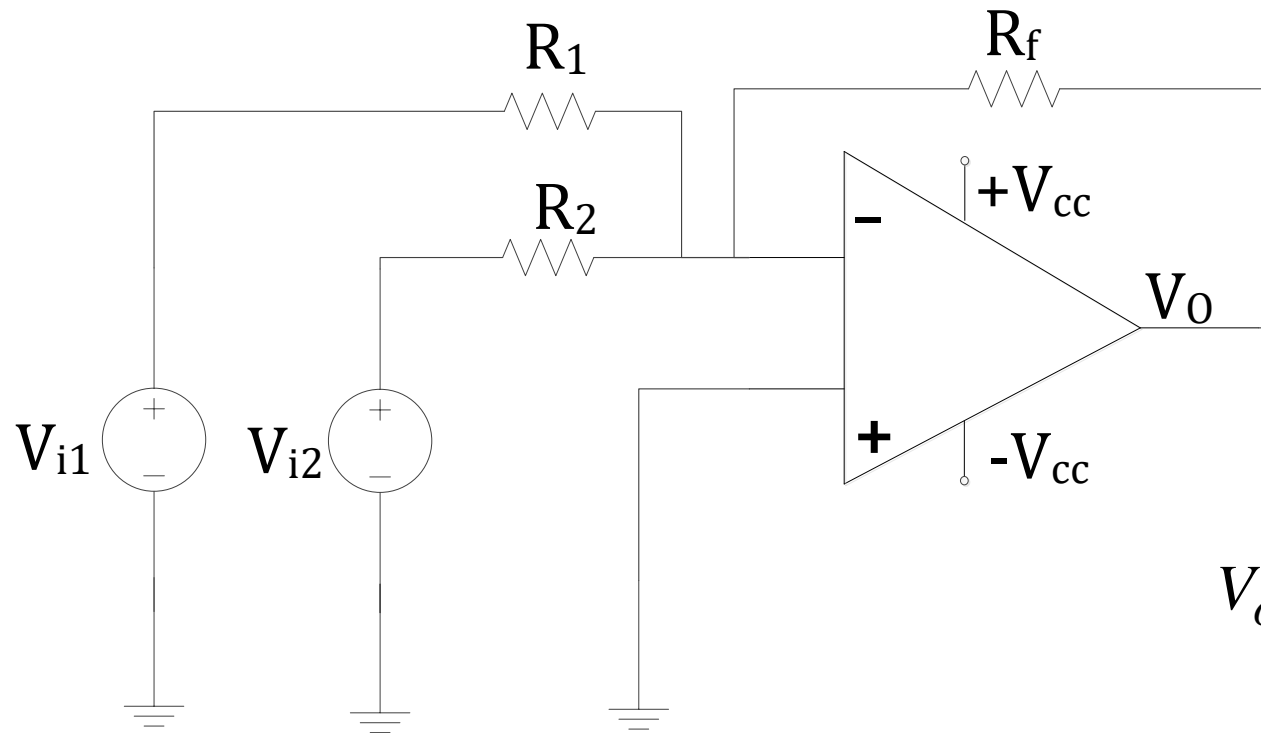
$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right)$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

کاربرد خطی:
مدار جمع کننده



$$V_O = -R_f \left(\frac{1}{R_1} V_{i1} + \frac{1}{R_2} V_{i2} + \dots + \frac{1}{R_n} V_{in} \right)$$

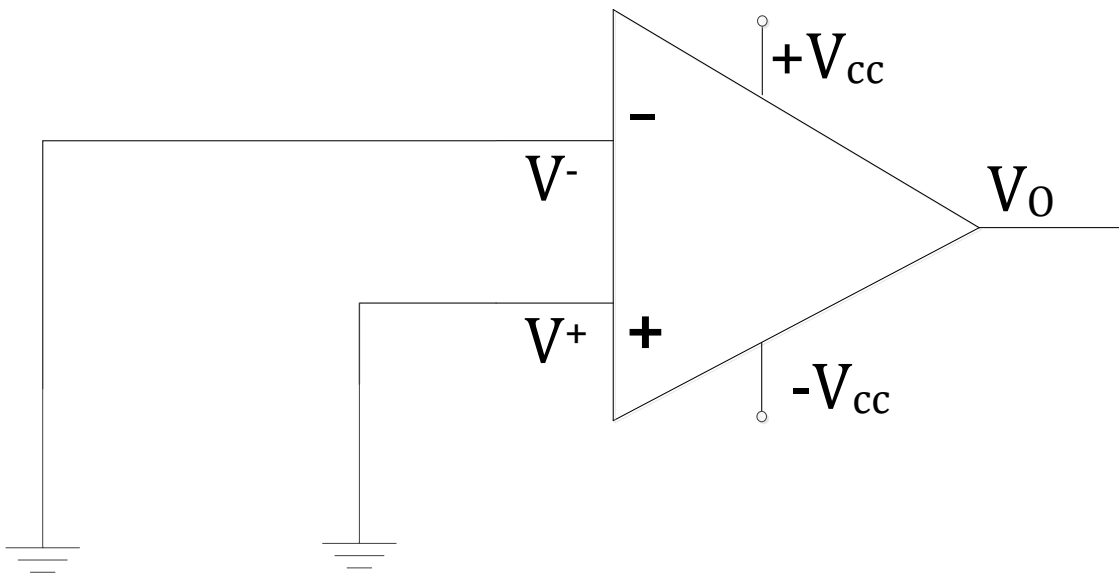


Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

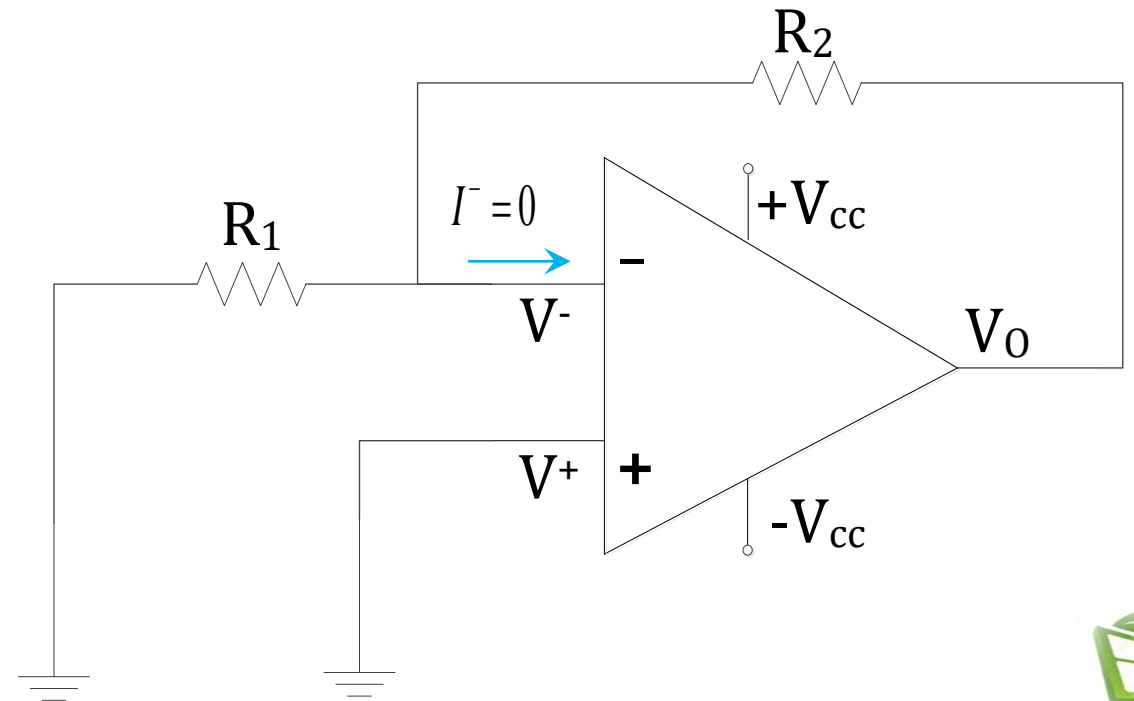
اندازه گیری ولتاژ آفست خروجی

$$V_{offset(out)} = V_O$$



اندازه گیری ولتاژ آفست ورودی

$$V_{offset(in)} = |V^- - V^+| = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_O$$

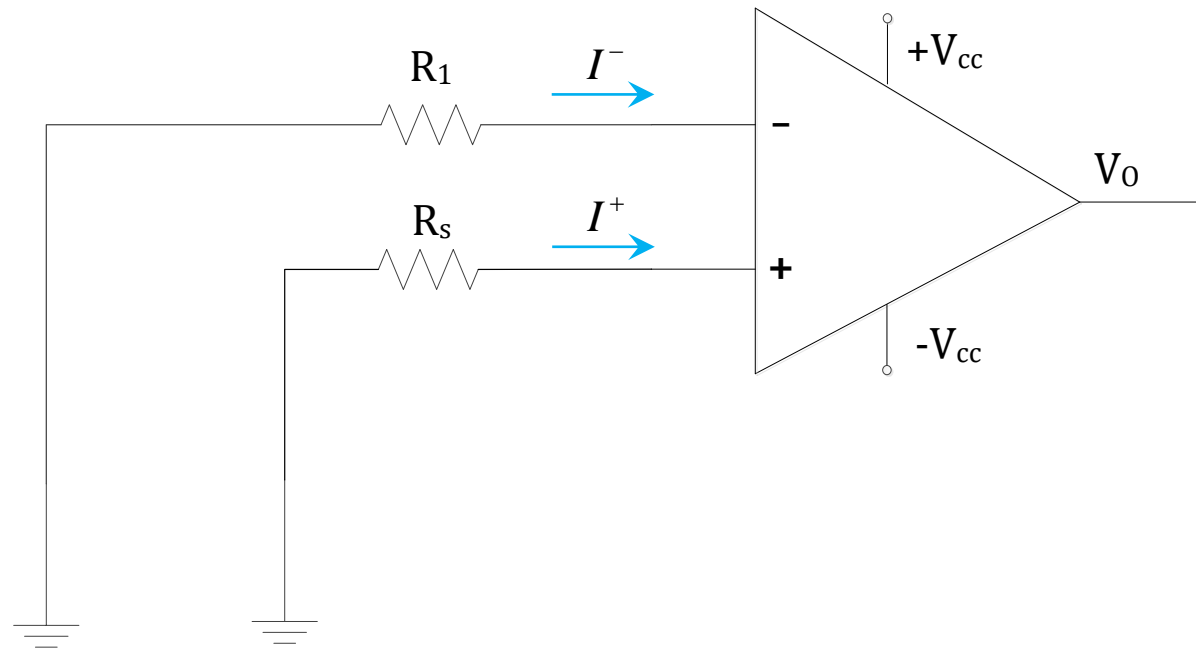


Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

اندازه گیری جریان آفست خروجی

$$I_{Offset(in)} = |I^- - I^+|$$



اندازه گیری جریان بایاس ورودی

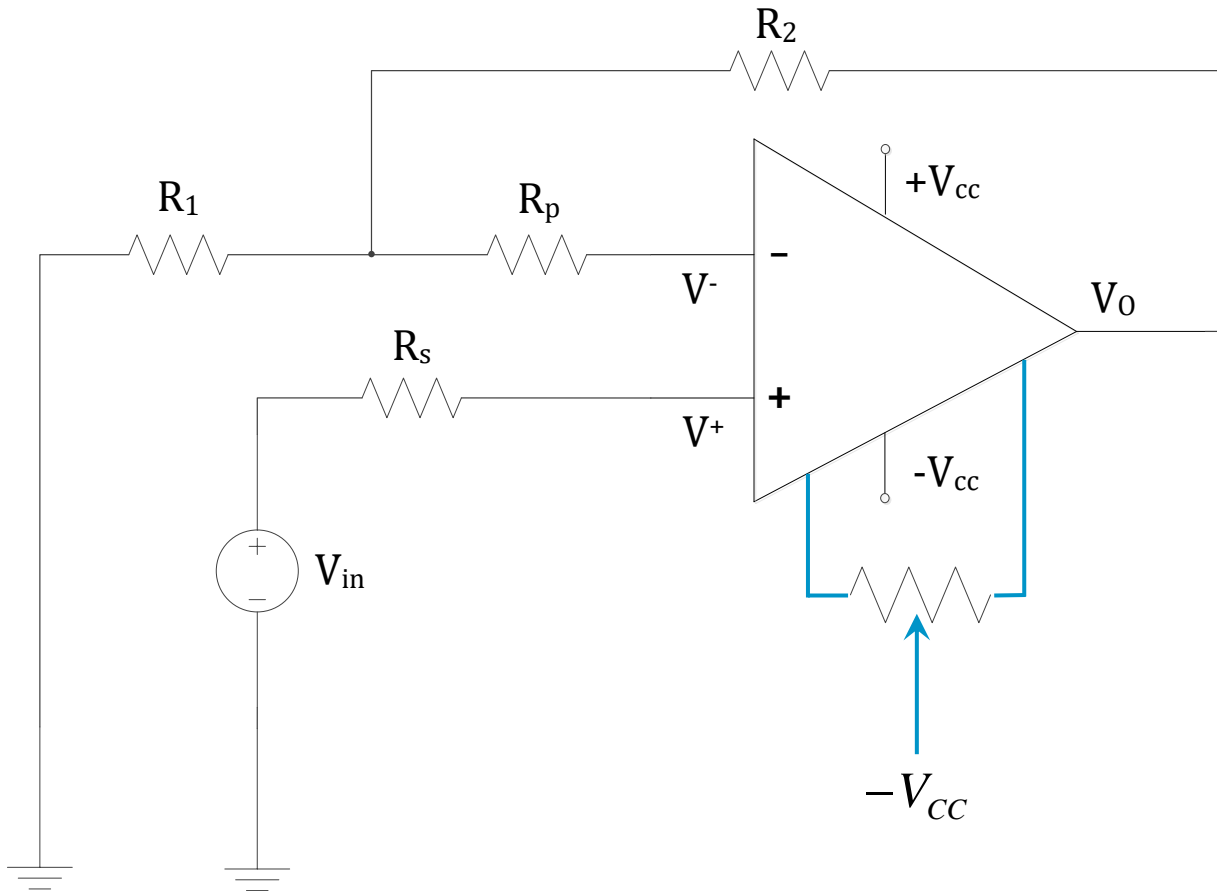
$$I_{B(in)} = \frac{|I^- + I^+|}{2}$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

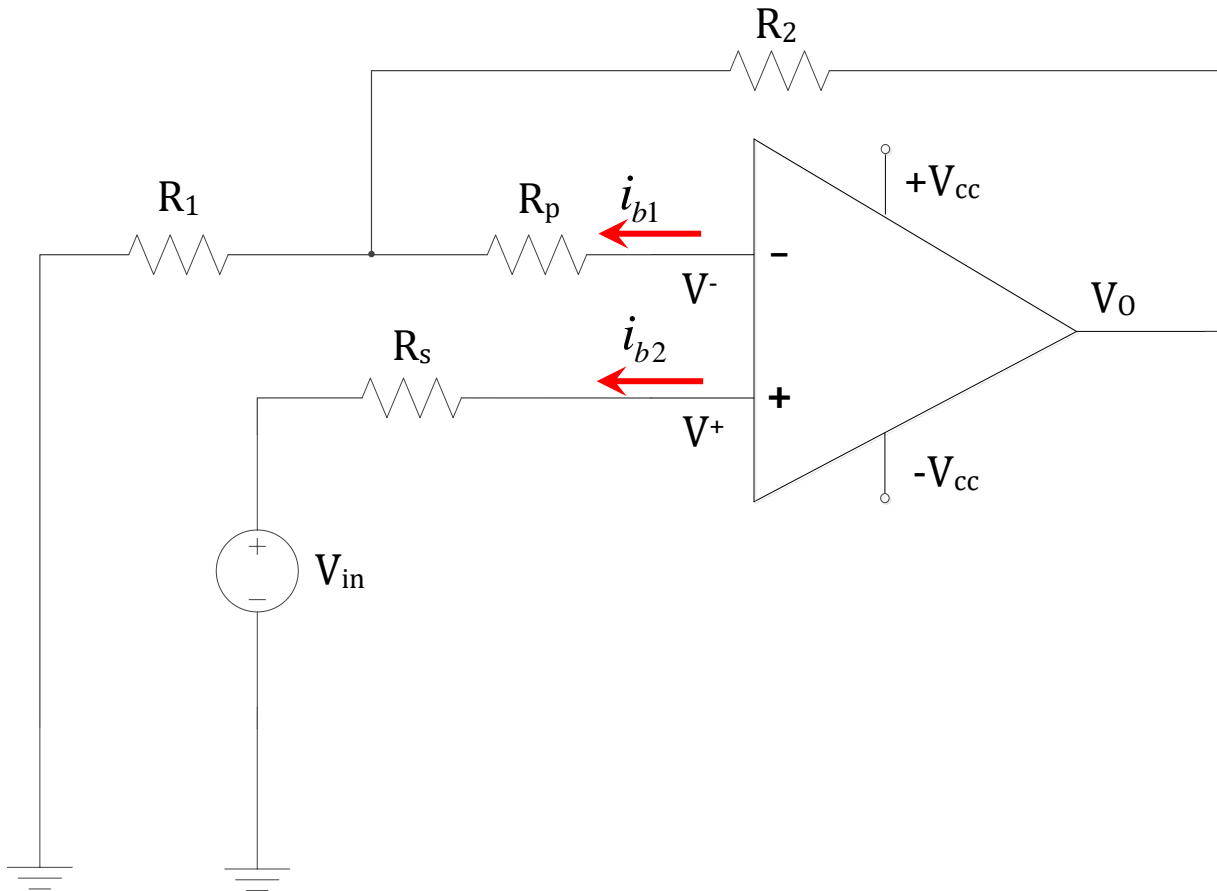
جبران ولتاژ آفست خروجی



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

کاهش جریان بایاس و جبران جریان آفست



Offset: $V_{in} = 0 \rightarrow V_O = 0$

$$i_{b2} = \frac{V^+}{R_s} \quad i_{b1} = \frac{V^-}{R_p + (R_1 \parallel R_2)}$$

$$i_{Offset} = i_{b1} - i_{b2} = \frac{V^+}{R_s} - \frac{V^-}{R_p + (R_1 \parallel R_2)} = 0$$

$$R_s = R_p + (R_1 \parallel R_2)$$

$$R_s = (R_1 \parallel R_2) \quad R_p = 0$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

تعیین فرکانس قطع بالای آپ امپ

Modeling with a Single Pole Transmission Function

$$A_v = \frac{A_{v0}}{\frac{S}{P} + 1}$$

$$A_v|_{S=0} = A_{v0}$$

$$\omega_b = \omega \Big|_{|A_v| = \frac{\sqrt{2}}{2}}$$

$$\omega_b = P$$

Open Loop

Transition Frequency

$$\omega_T = \omega \Big|_{|A_v| = 1}$$

$$\omega_T \cong A_{v0} \omega_b$$

Closed Loop

$$A_{v-cl} = \frac{A_v}{1 + A_v f}$$

$$A_{v-cl} = \frac{A_{v0}}{\frac{S}{P} + 1 + A_{v0} f}$$

$$A_{v-cl} = \frac{\frac{A_{v0}}{1 + A_{v0} f}}{\frac{S}{P(1 + A_{v0} f)} + 1}$$

$$A_{v-cl}|_{S=0} = \frac{A_{v0}}{1 + A_{v0} f}$$

$$\omega_{3dB} = \omega \Big|_{|A_{v-cl}| = \frac{\sqrt{2}}{2}} = P(1 + A_{v0} f)$$

$$Gain \times Bandwidth = cte$$



Linear Applications of Op-Amps

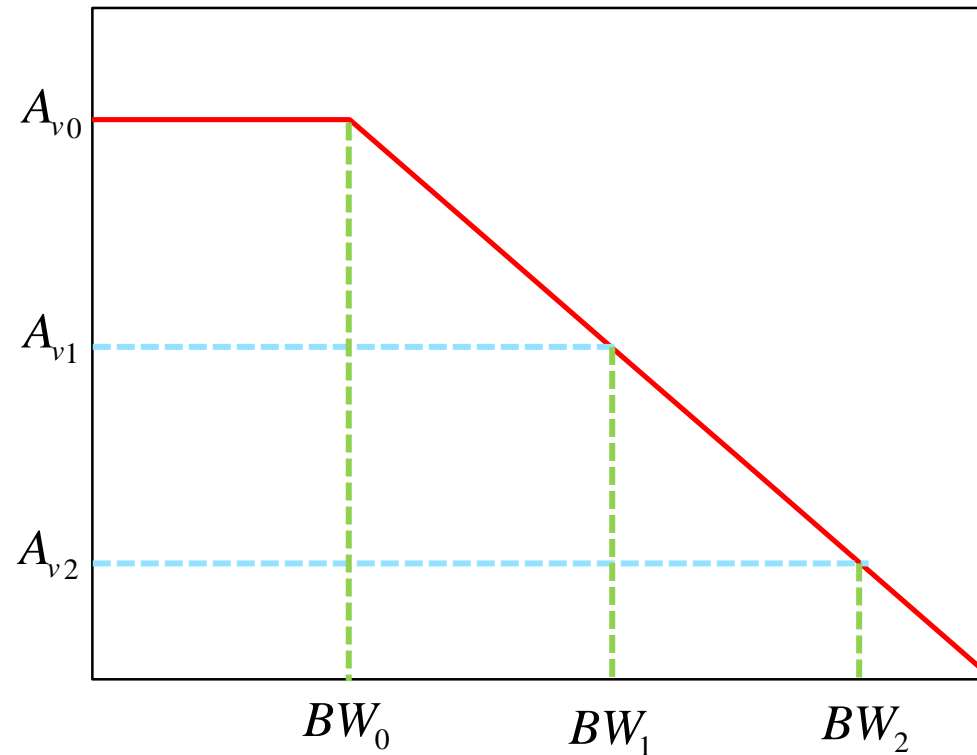
کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

$Gain \times Bandwidth = cte$

$$A_{v1} BW_1 = A_{v2} BW_2$$

$$A_{v2} BW_2 = A_{v3} BW_3$$

$$BW_n = \frac{A_{v0} BW_0}{A_{vn}}$$

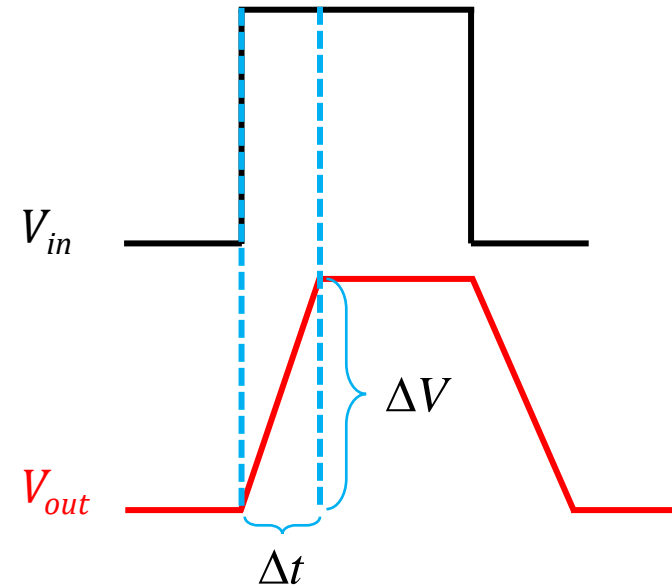
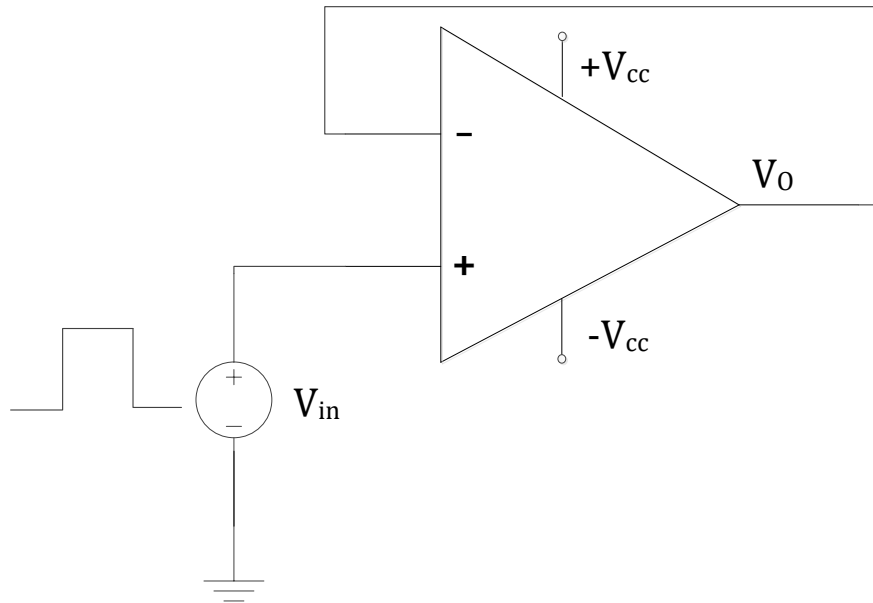


تعیین فرکانس قطع بالای آپ امپ



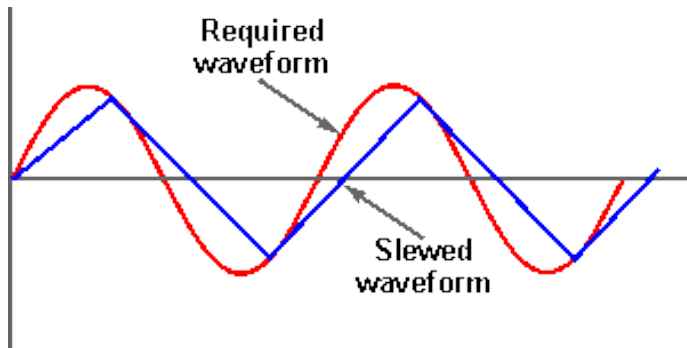
Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی



Slew Rate: سرعت چرخش
حد سرعت تغییرات ولتاژ در خروجی

$$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$



$$V_{Out} = V_m \sin(\omega t)$$

$$SR = \max\left(\left|\frac{dV}{dt}\right|\right) \Big|_{V \text{ is not distorted}}$$

برای موج سینوسی

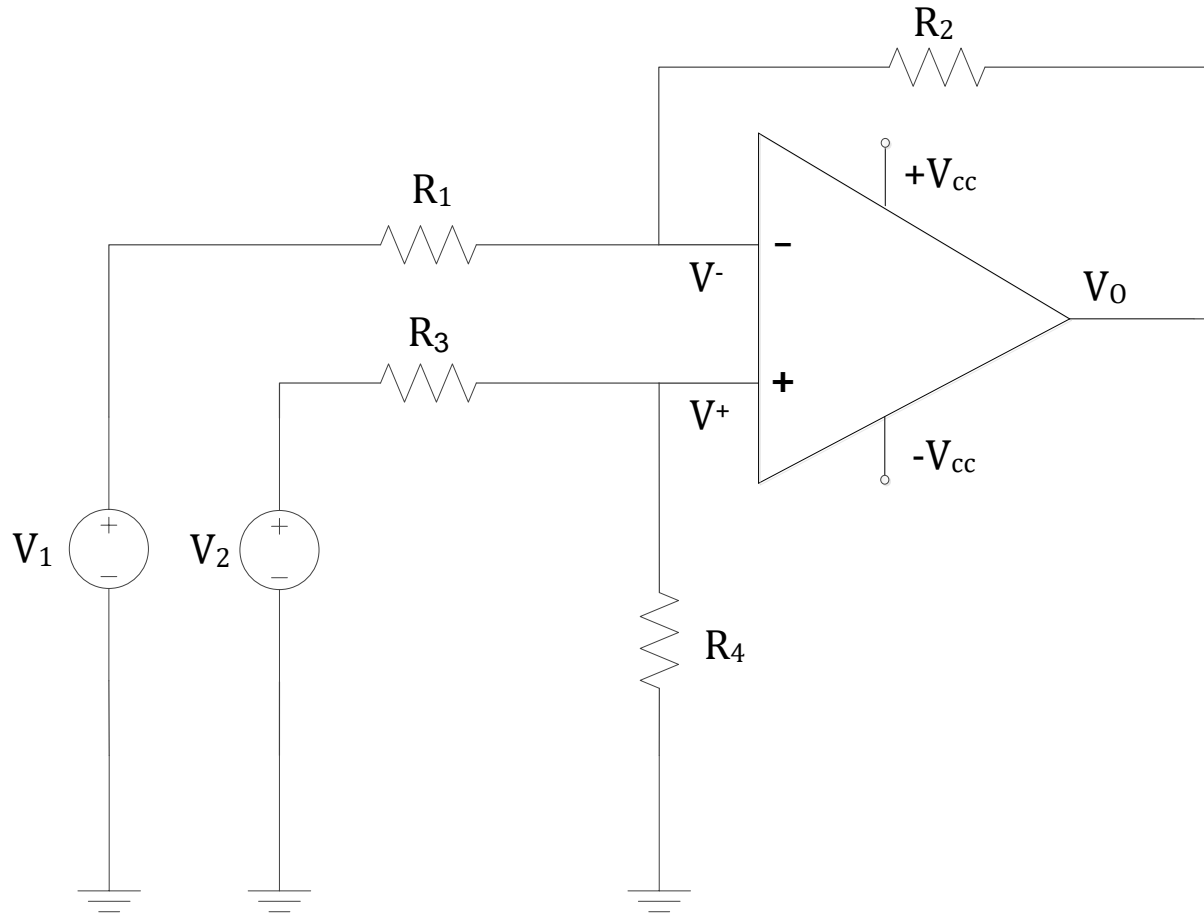
$$SR = \max(\omega V_m) \Big|_{V \text{ is not distorted}} = 2\pi f_{\max} V_m$$

$$SR = \pi f_{\max} V_{p-p}$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی



استفاده از آپ امپ به عنوان تقویت کننده تفاضلی

$$v_d = v_1 - v_2$$

$$A_d = \frac{v_O}{v_d}$$

$$v_{CM} = \frac{(v_1 + v_2)}{2}$$

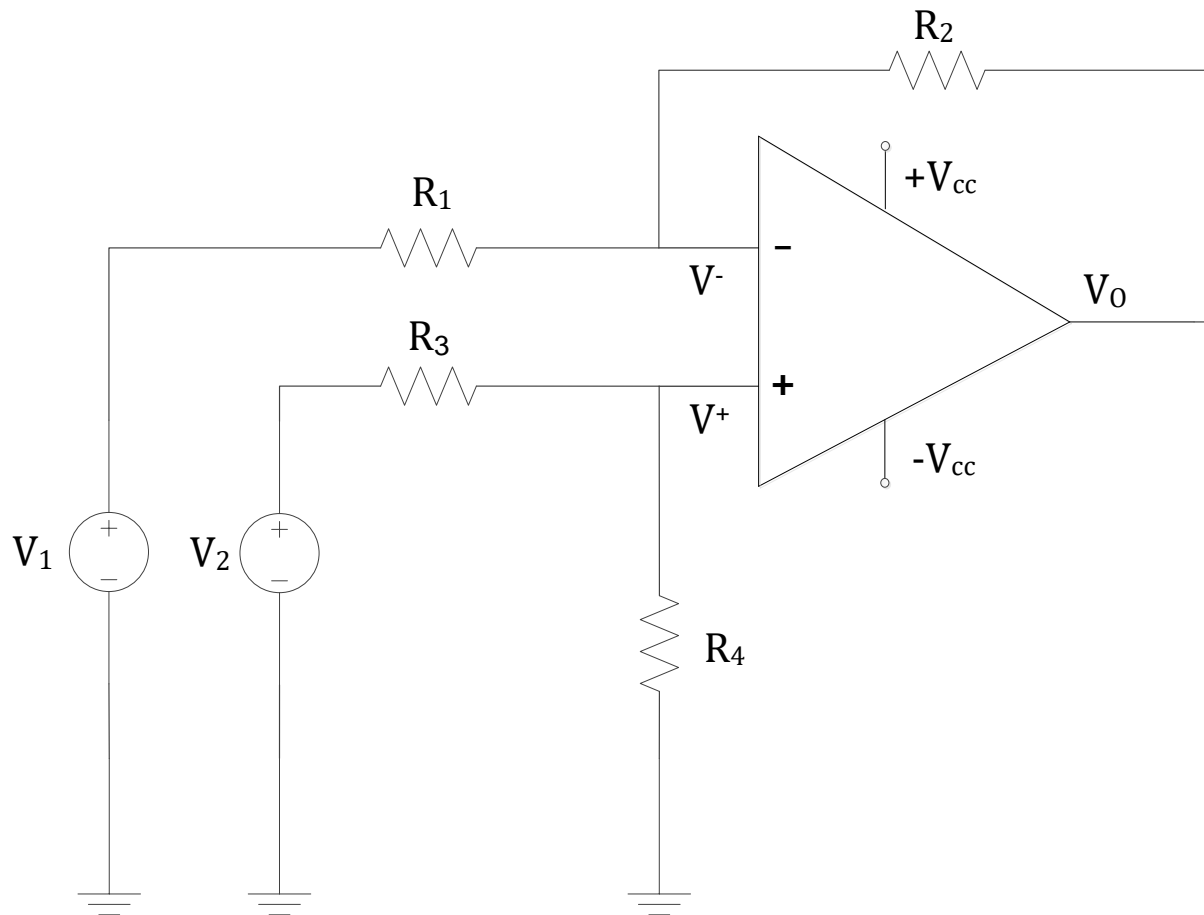
$$A_{CM} = \frac{v_O}{v_{CM}}$$

$$v_O = A_d v_d + A_{CM} v_{CM}$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی



استفاده از آپ امپ به عنوان تقویت کننده تفاضلی

مد تفاضلی

$$v_1 = +\frac{v_d}{2}$$

$$v_2 = -\frac{v_d}{2}$$

$$v_1 - v_2 = v_d$$

$$A_d = \frac{v_O}{v_d}$$

مد مشترک

$$v_1 = v_{CM}$$

$$v_2 = v_{CM}$$

$$\frac{v_1 + v_2}{2} = v_{CM}$$

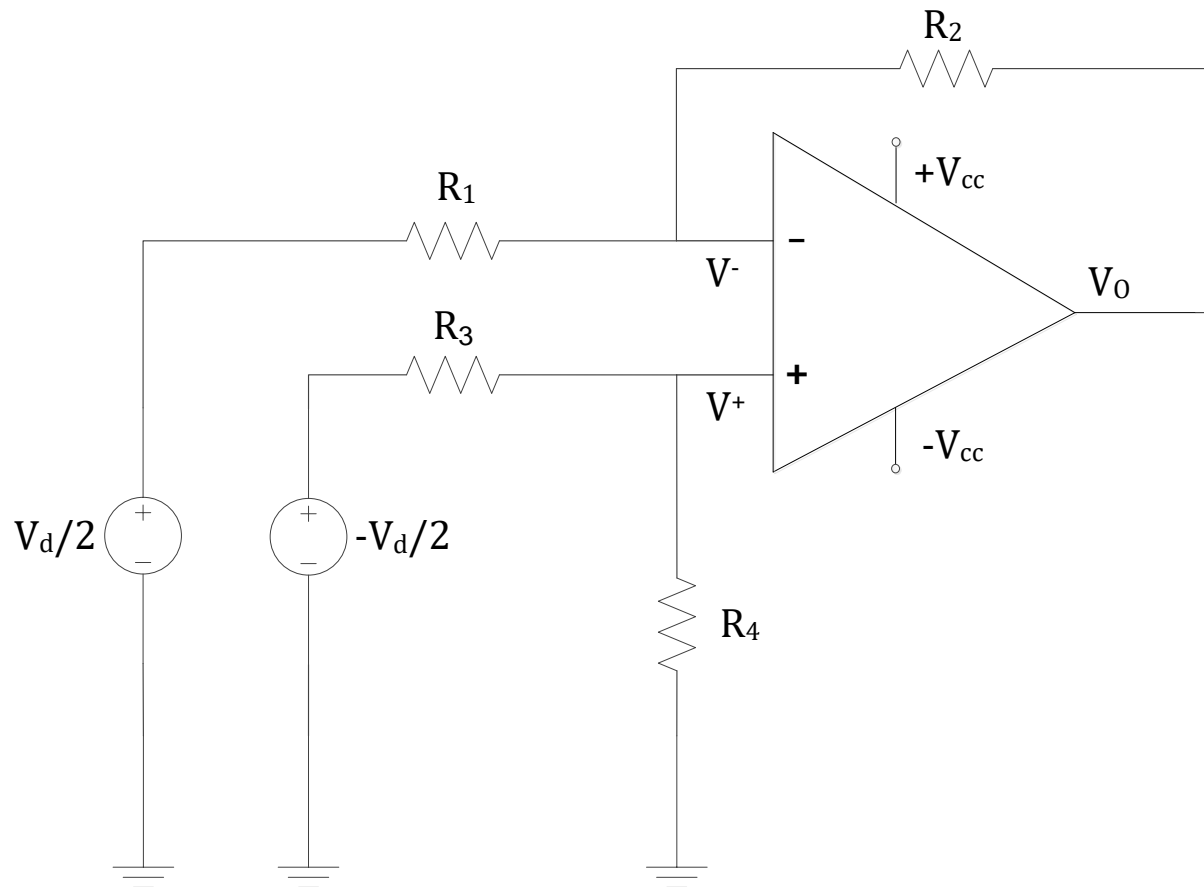
$$A_{CM} = \frac{v_O}{v_{CM}}$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

مد تفاضلی: محاسبه توسط قانون جمع آثار



$$v_O = +\frac{v_d}{2} \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{v_d}{2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\frac{v_O}{v_d} = -\frac{R_2}{2R_1} - \frac{1}{2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

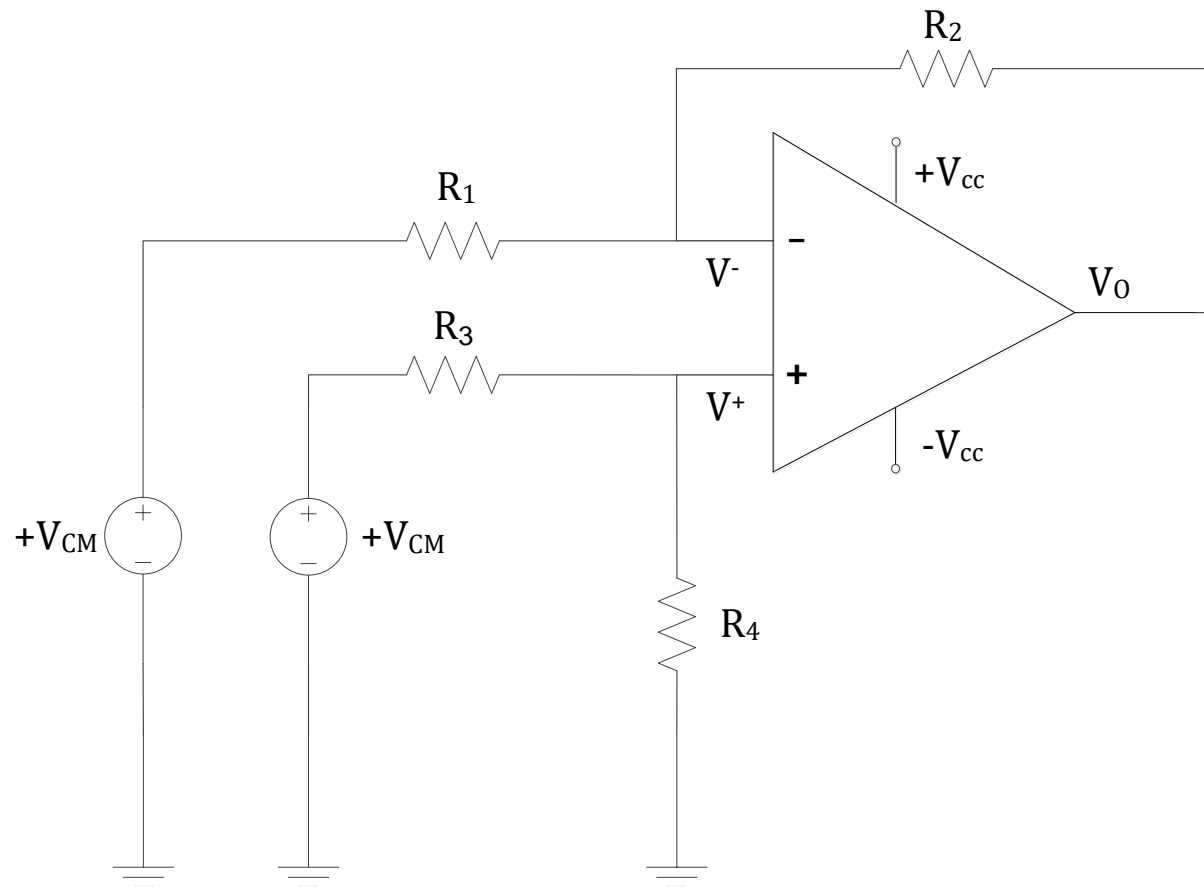
$$A_d = -\frac{R_2}{2R_1} - \frac{1}{2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

مد مشترک: محاسبه توسط قانون جمع آثار



$$v_O = +v_{CM} \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) + v_{CM} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\frac{v_O}{v_{CM}} = -\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$A_{CM} = -\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی

Common Mode Rejection Ratio:
نسبت رد کردن مد مشترک

$$CMRR = 20 \log \left(\frac{A_d}{A_{CM}} \right)$$

تقویت کننده تفاضلی ایده آل:

CMMR Approaches to Infinity

استفاده از آپ امپ به عنوان تقویت کننده تفاضلی

$$A_{CM} = -\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \quad A_d = -\frac{R_2}{2R_1} - \frac{1}{2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

تقویت کننده تفاضلی ایده آل: بهره مشترک صفر

$$A_{CM} = -\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) = 0$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$\begin{aligned} R_4 &= R_2 \\ R_3 &= R_1 \end{aligned}$$

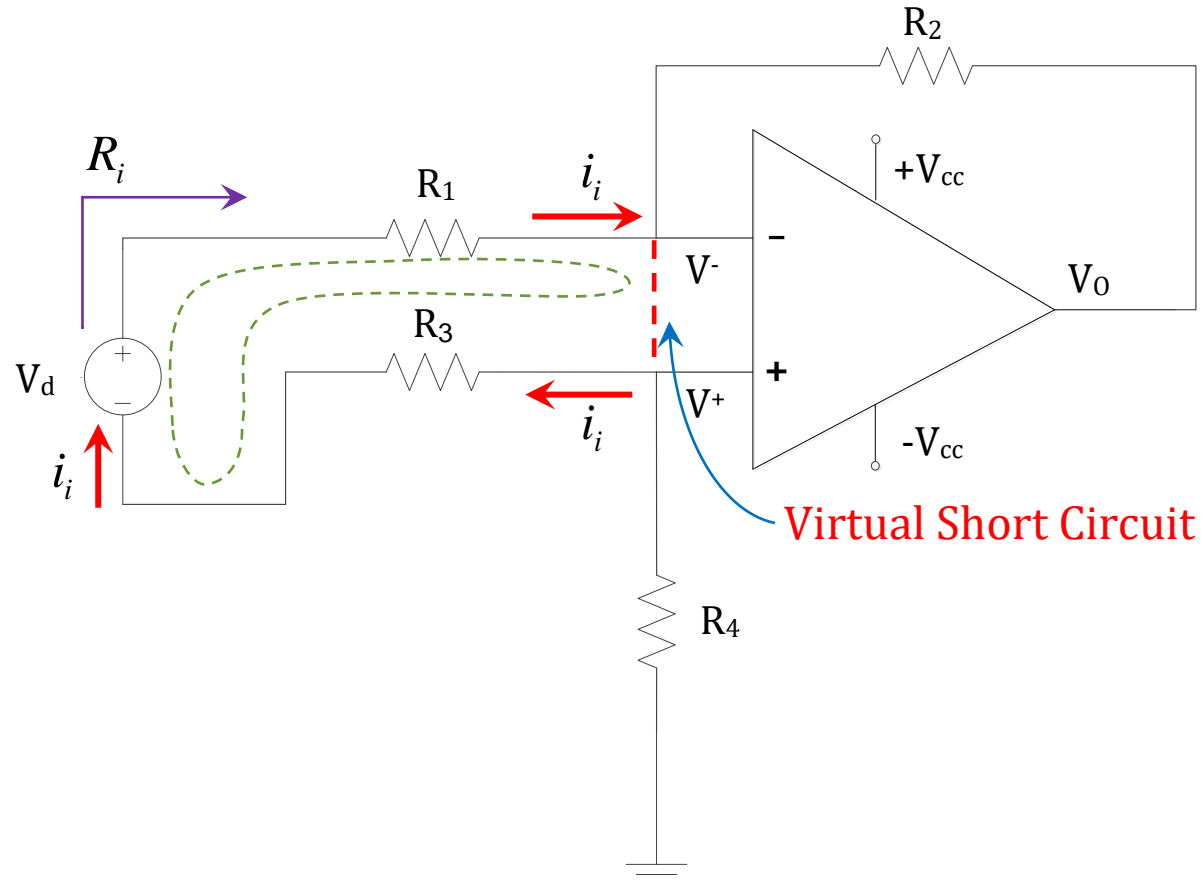
$$A_d = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$A_d = -\frac{R_2}{2R_1} - \frac{1}{2} \frac{R_4}{R_1} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right)$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی



استفاده از آپ امپ به عنوان تقویت کننده تفاضلی

مقاومت ورودی در حالت مد تفاضلی

$$R_i = \frac{V_d}{i_i}$$

$$-v_d + R_1 i_i + R_3 i_i = 0$$

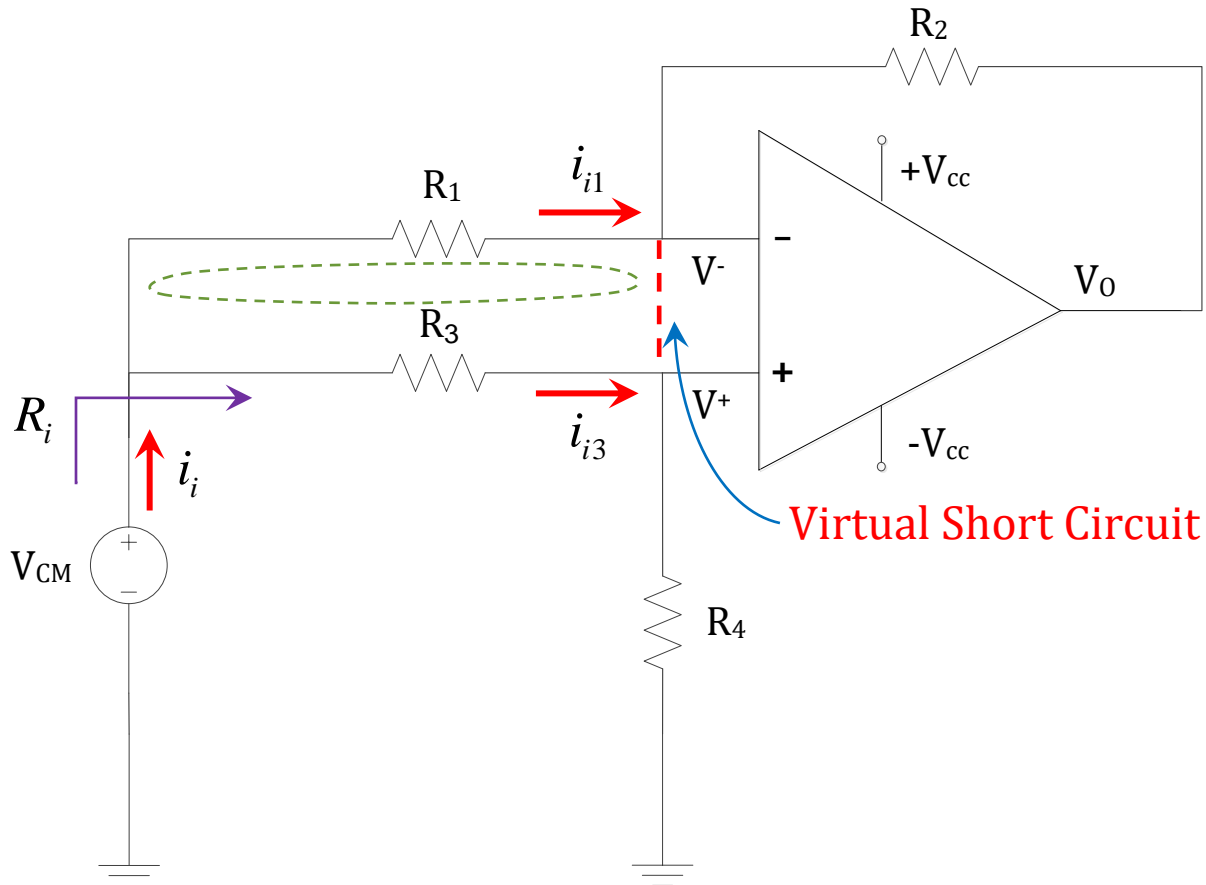
$$i_i = \frac{v_d}{R_1 + R_3}$$

$$R_i = R_1 + R_3$$



Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای خطی تقویت کننده های عملیاتی



استفاده از آپ امپ به عنوان تقویت کننده تفاضلی

مقاومت ورودی در حالت مد مشترک

$$R_i = \frac{V_{CM}}{i_i}$$

$$i_i = i_{i1} + i_{i3}$$

$$R_1 i_{i1} = R_3 i_{i3}$$

$$i_{i3} = \frac{V_{CM}}{R_3 + R_4}$$

$$R_i = \frac{V_{CM}}{i_{i3} \left(1 + \frac{i_{i1}}{i_{i3}}\right)} = \frac{V_{CM}}{\frac{V_{CM}}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{R_3 + R_4} \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1}\right)}$$

$$R_i = \frac{R_1(R_3 + R_4)}{R_1 + R_3} = (R_1 \parallel R_3) \left[1 + \frac{R_4}{R_3}\right]$$



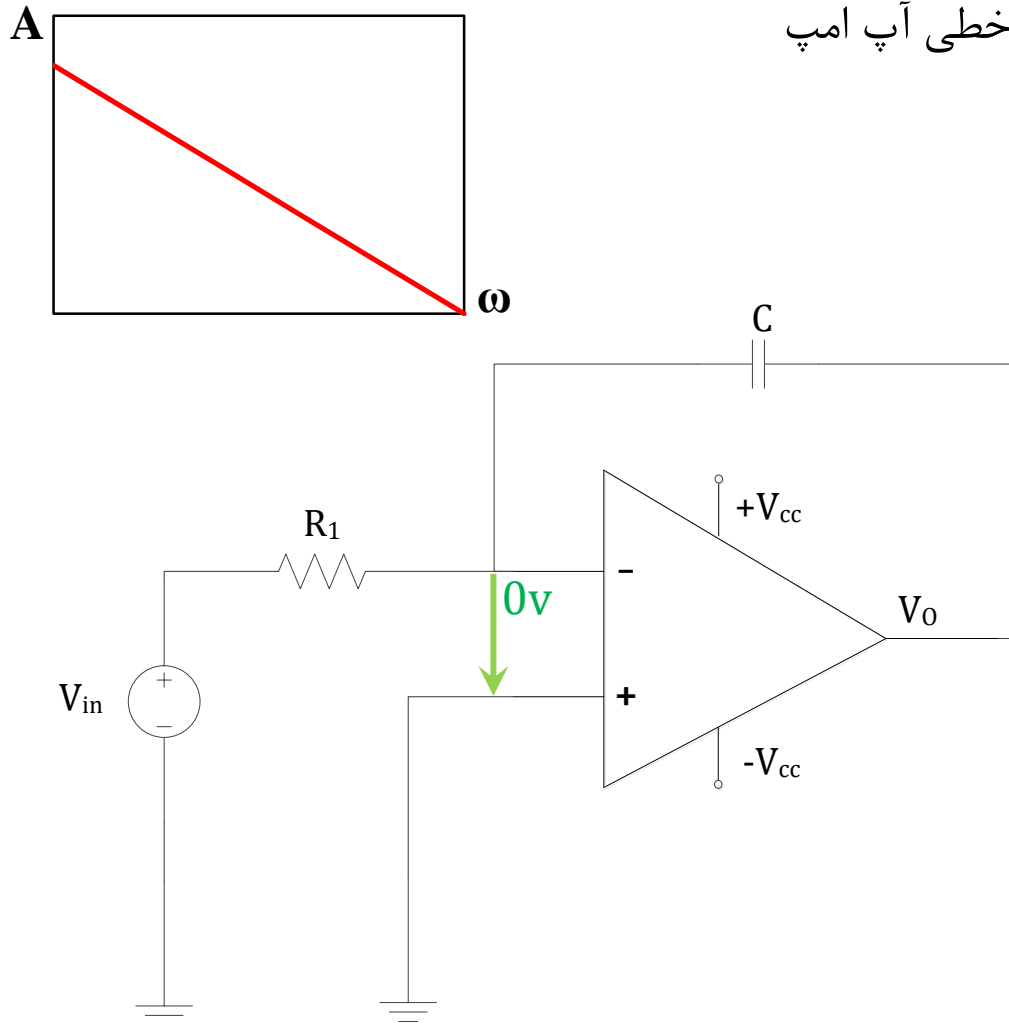
Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

کاربرد غیرخطی: ۱- استفاده از قطعات غیرخطی ۲- استفاده از محدوده غیرخطی آپ امپ

۱- استفاده از خازن

انتگرالگیر



$$V_{oSC} = -\frac{V_{in}}{R_1}$$

۹۰ درجه اختلاف فاز

$$V_o = -\frac{V_{in}}{SCR_1} = -\frac{1}{R_1C} \int V_{in} dt$$

Low Frequencies: C is Open Circuit

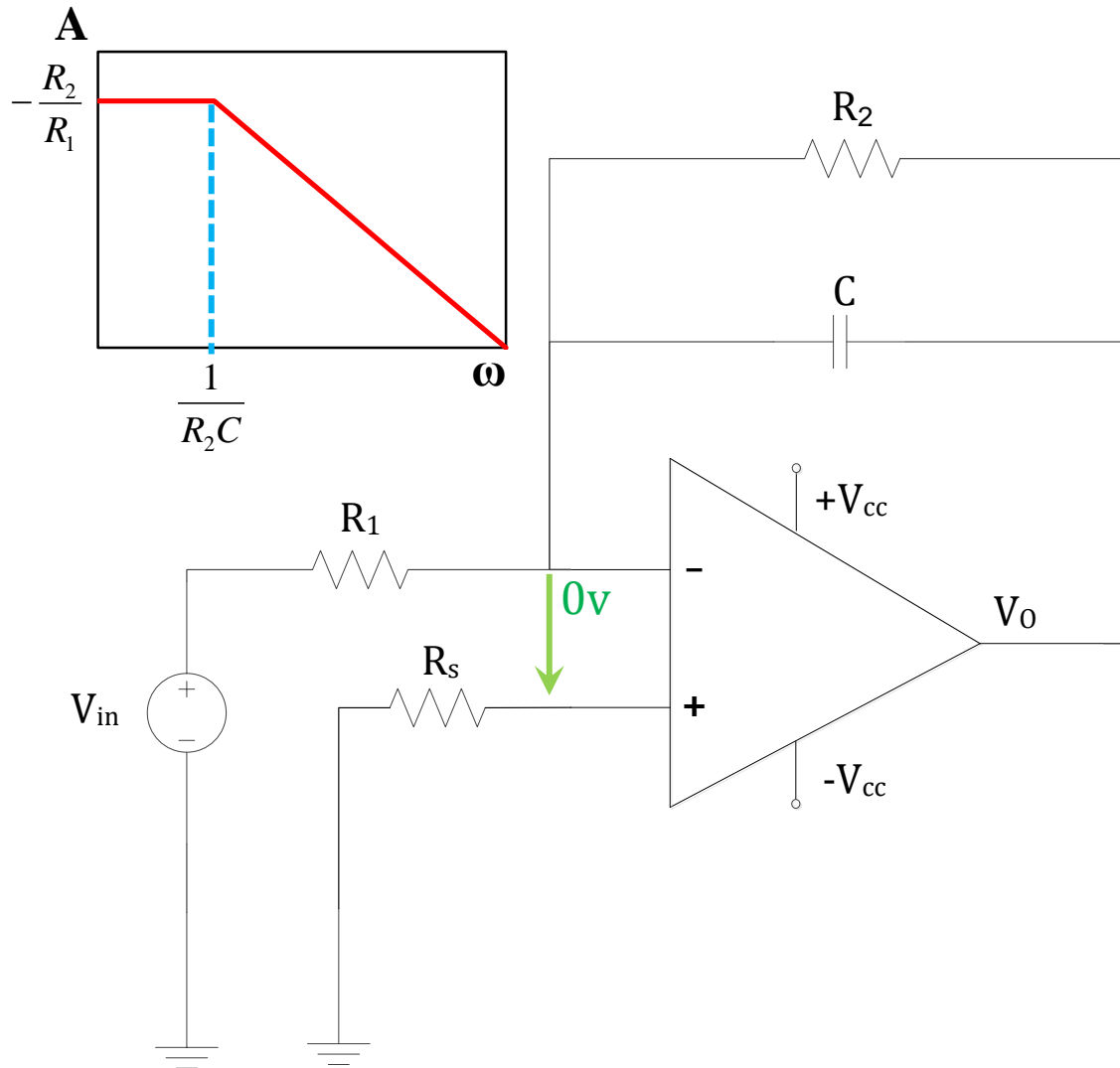
Very High Frequencies: C is Short Circuit, Gain is Zero



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

Low Pass Filter



انتگرالگیر عملی (فیلتر پایین گذر)

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

$$V_o = -\frac{V_{in}}{\left(SC + \frac{1}{R_2} \right) R_1} = -\frac{V_{in}}{SR_1C + \frac{R_1}{R_2}}$$

$$V_o = -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{SR_2C + 1} V_{in}$$

Low Pass Filter

$$V_o = -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{SR_2C} V_{in} = -\frac{1}{SR_1C} \quad \leftarrow SR_2C \gg 1$$

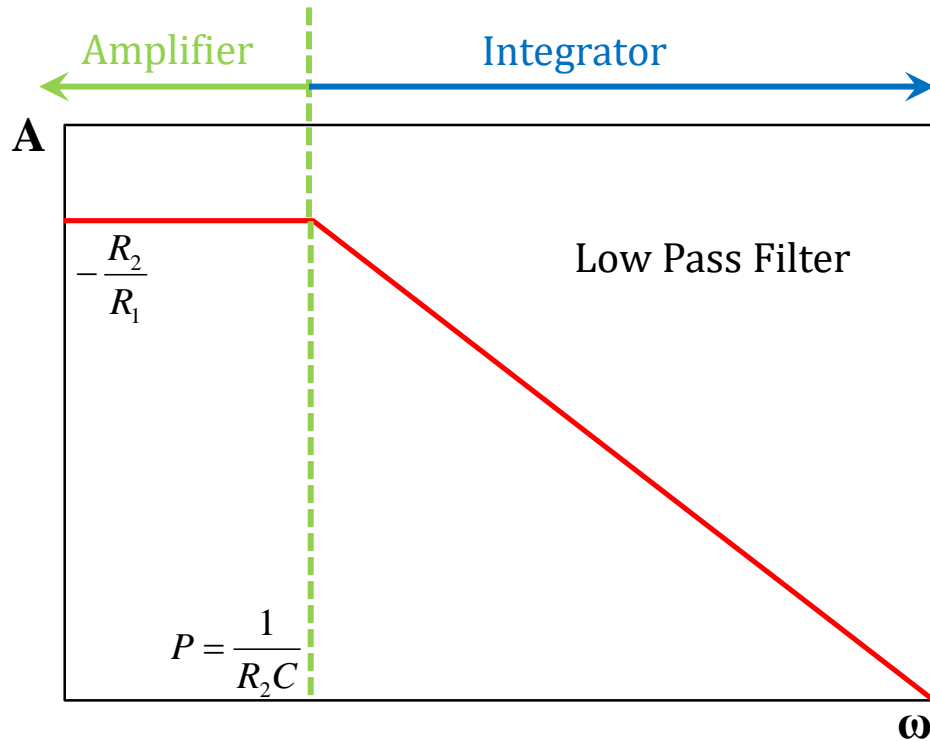
$$V_o = -\frac{1}{R_1C} \int V_{in} dt$$

R2 بینهایت: بهره DC بینهایت



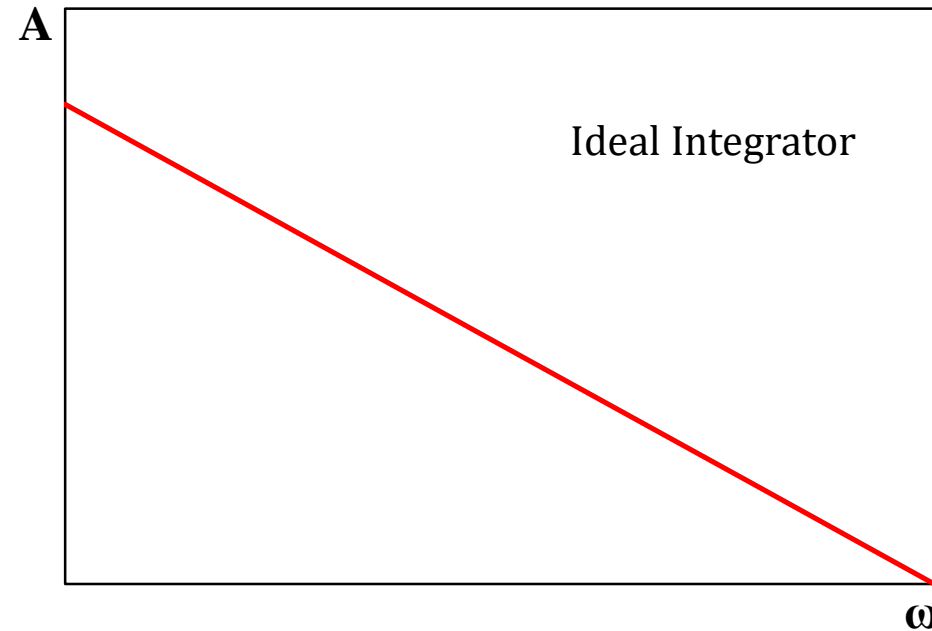
Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی



$$V_o = -\frac{R_2}{SR_2C + 1} V_{in}$$

انتگرالگیر ایده آل در مقایسه با انتگرالگیر عملی (فیلتر پایین گذر)

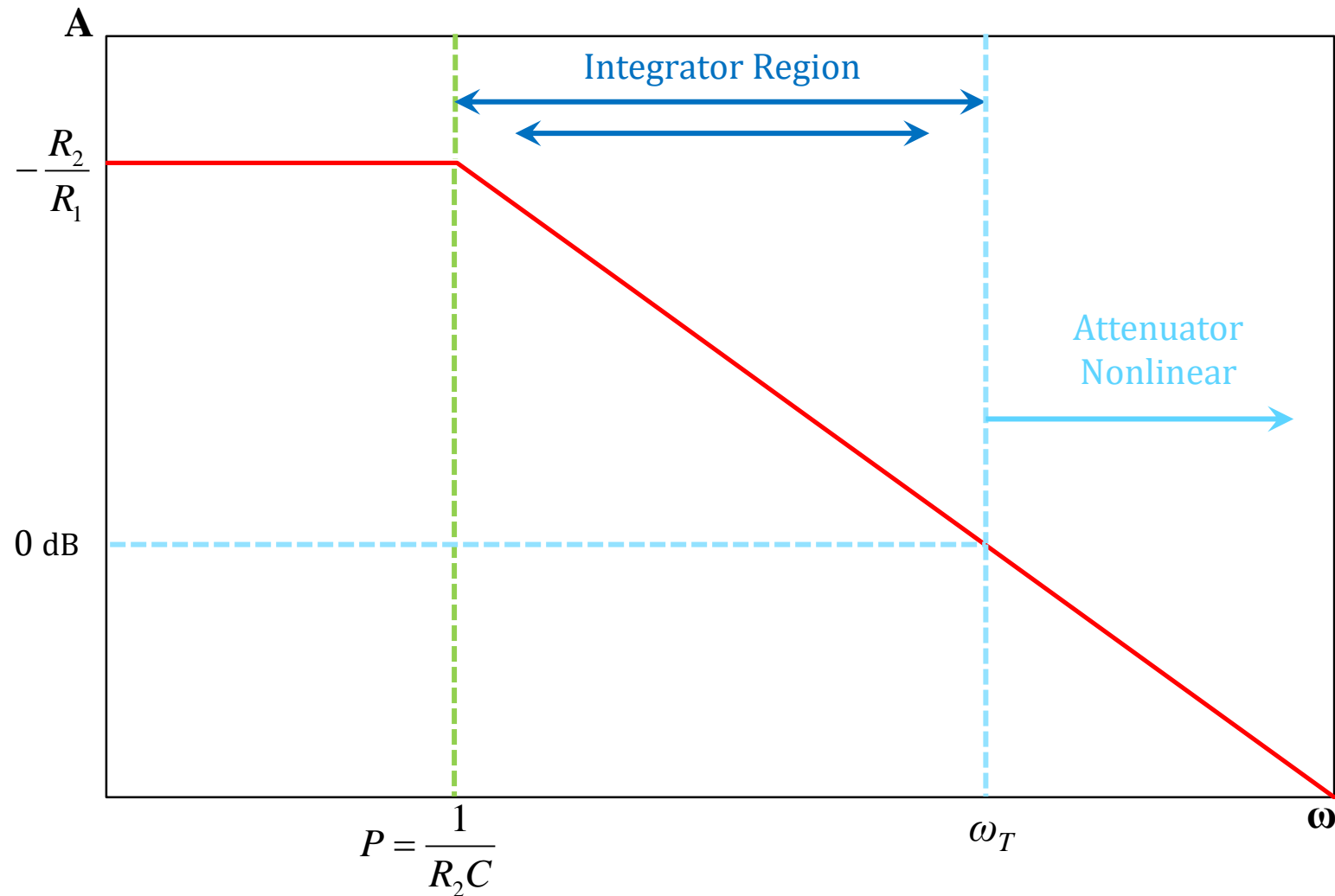


$$V_o = -\frac{V_{in}}{SCR_1}$$



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی



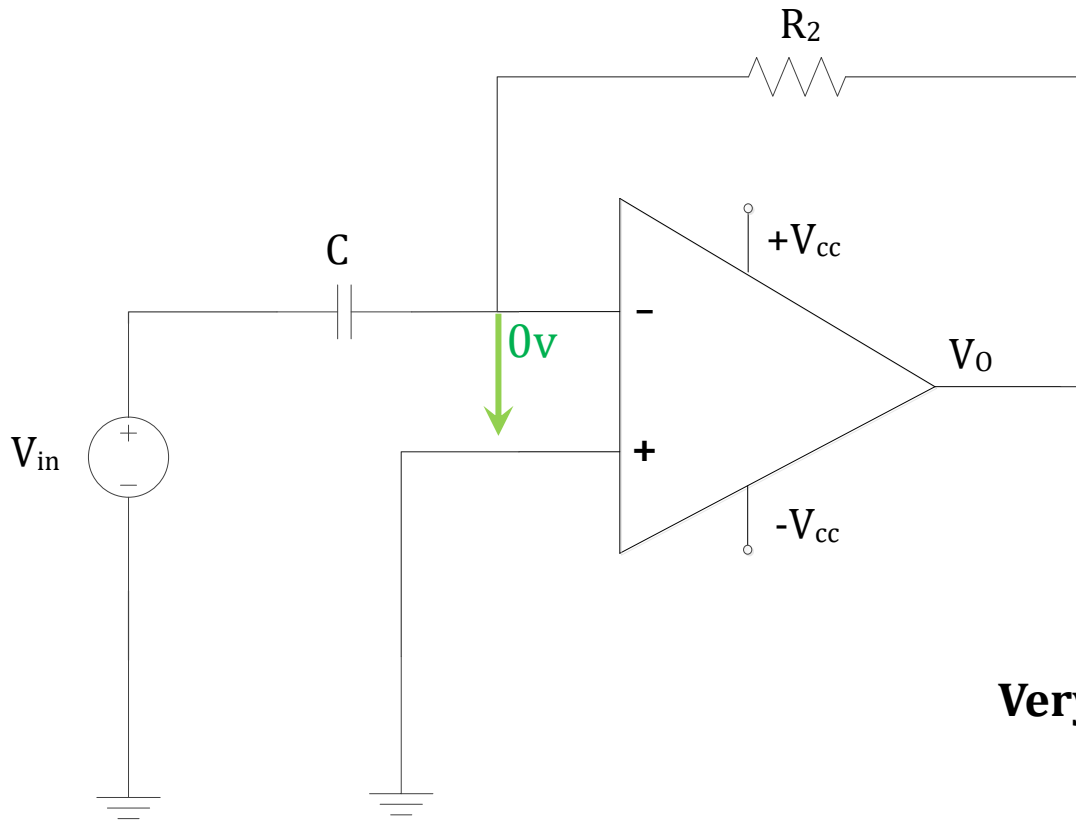
محدوده عملکرد انتگرالگیر واقعی



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

مشتق گیر:



$$\frac{V_O}{R_2} = -V_{in}SC$$

$$V_O = -V_{in}SCR_2 = -R_2C \frac{dV_{in}}{dt}$$

۲۷۰ درجه اختلاف فاز معادل -۹۰

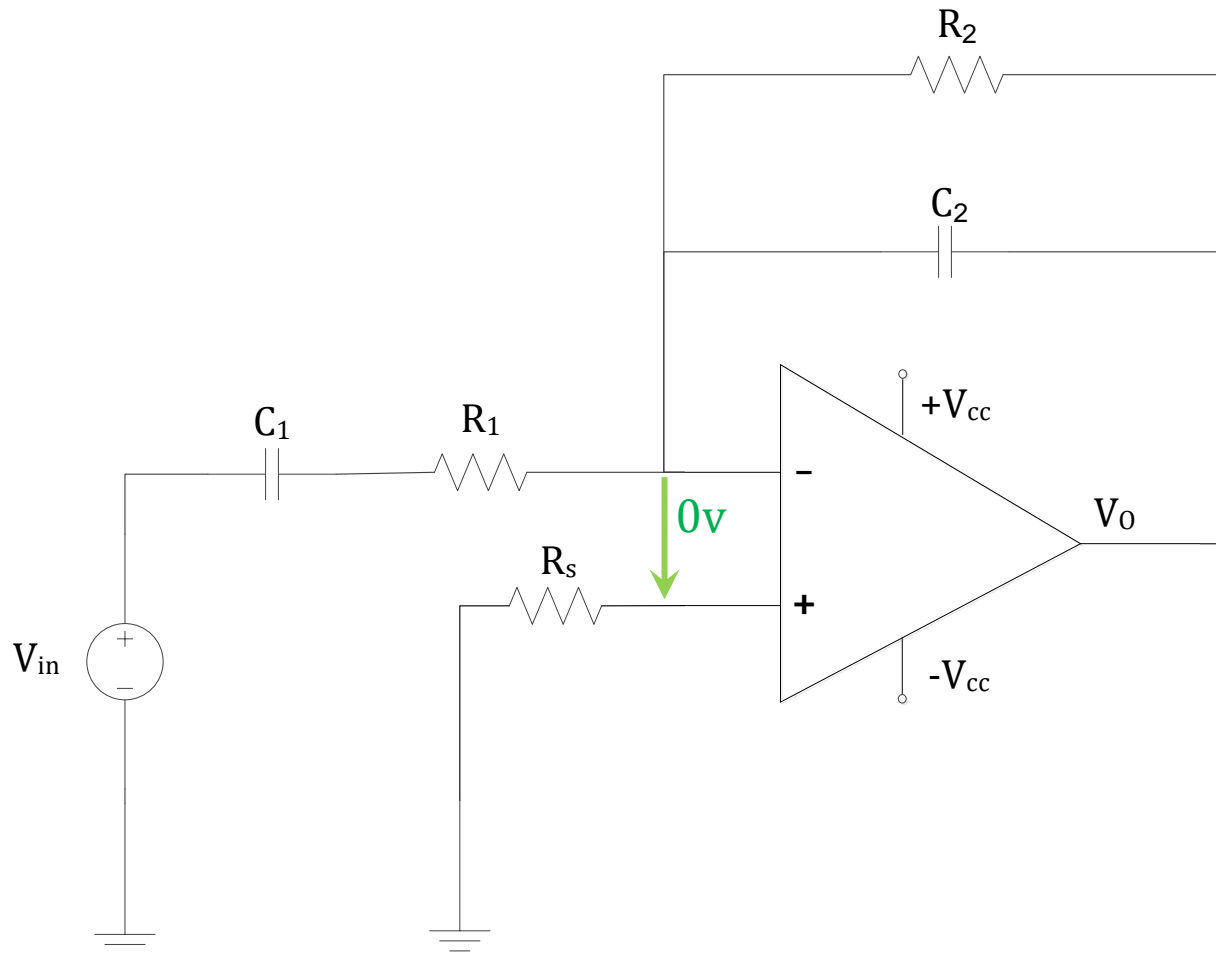
Low Frequencies: C is Open Circuit

**Very High Frequencies: C is Short Circuit, Gain is Infinite:
Noise Problem**



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی



مشتق گیر عملی

$$V_o \left(SC_2 + \frac{1}{R_2} \right) = - \frac{V_{in}}{\left(R_1 + \frac{1}{SC_1} \right)}$$

$$V_o = - \frac{V_{in}}{\left(R_1 + \frac{1}{SC_1} \right) \left(SC_2 + \frac{1}{R_2} \right)}$$

$$V_o = -V_{in} \frac{SC_1 R_2}{(SC_1 R_1 + 1)(SC_2 R_2 + 1)}$$

Band Pass Filter



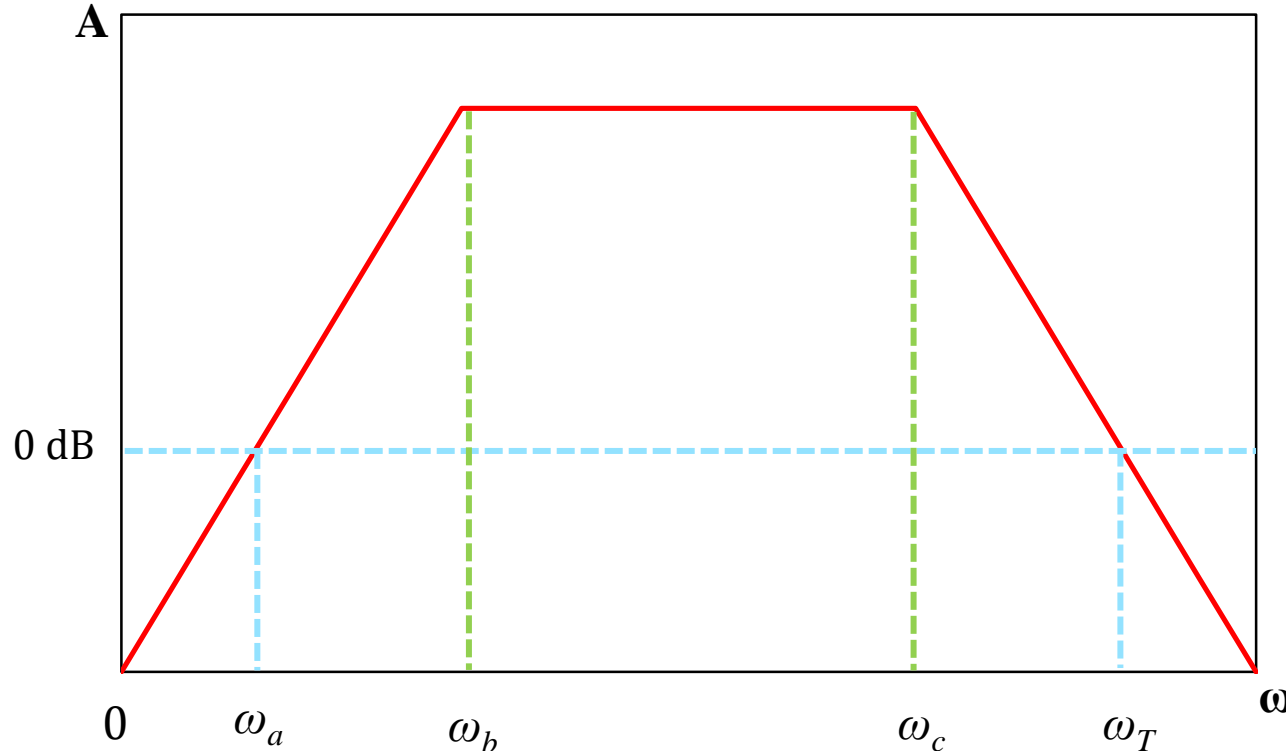
Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

$$V_o = -V_{in} \frac{SC_1R_2}{(SC_1R_1 + 1)(SC_2R_2 + 1)}$$

$$Z = 0, \quad P_1 = \frac{1}{C_1R_1}, \quad P_2 = \frac{1}{C_2R_2}$$

مشتق گیر عملی



$$\omega_b = \frac{1}{C_1R_1} \quad \omega_c = \frac{1}{C_2R_2}$$

$$\omega \ll \omega_b \quad \longrightarrow \quad \omega_a \approx \frac{1}{C_1R_2}$$

if $\omega_b \gg \omega_a$

& $\omega_c > \omega_b$

$$\omega_a < \omega < \omega_b$$

$$\omega_b < \omega < \omega_c$$

$$\omega_c < \omega < \omega_T$$

Differentiator

Amplifier

Integrator

Usually $C_1R_1 = C_2R_2$



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

$$V_o = -V_{in} \frac{SC_1R_2}{(SC_1R_1 + 1)(SC_2R_2 + 1)}$$

مشتق گیر عملی

if $R_2C_2 = R_1C_1$ \longrightarrow $V_o = -V_{in} \frac{SC_1R_2}{(SC_1R_1 + 1)^2}$

$SR_1C_1 \ll 1$ \longrightarrow $V_o = -V_{in} \frac{SC_1R_2}{1}$ \longrightarrow $V_o = -C_1R_2 \frac{dV_{in}}{dt}$ مشتق گیر

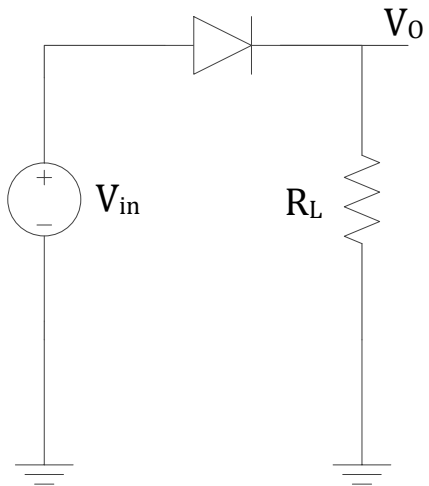
$SR_1C_1 \gg 1$ \longrightarrow $V_o = -V_{in} \frac{SC_1R_2}{(SC_1R_1)^2}$ \longrightarrow $V_o = -V_{in} \frac{1}{SC_1 \frac{R_1^2}{R_2}}$ انتگرال گیر



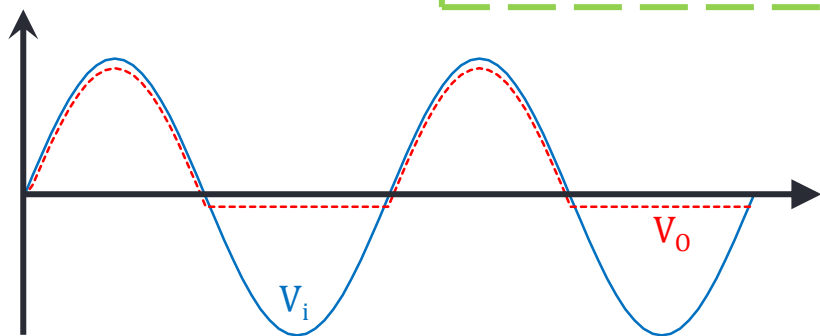
Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

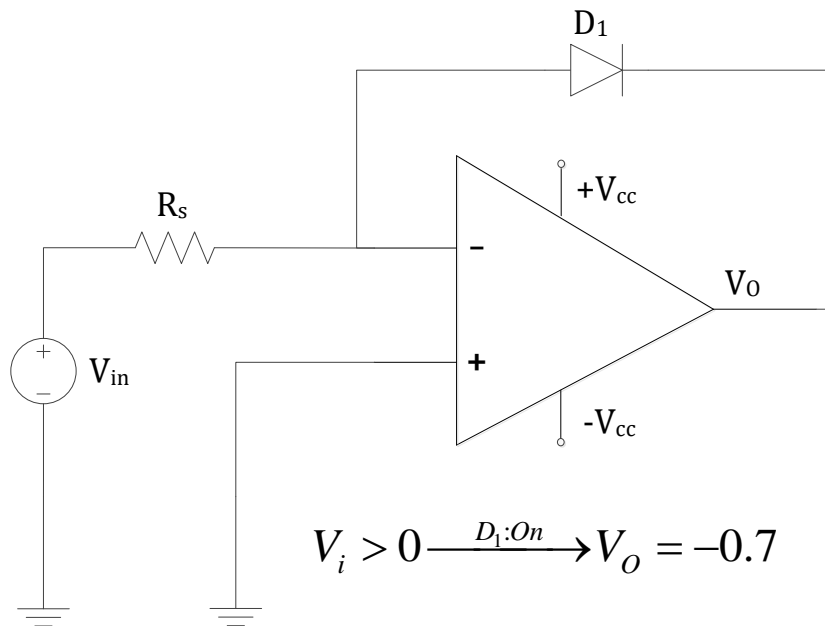
Traditional Half Wave Rectifier



Disadvantage:
Cannot Rectify $V_{in} < 0.7\text{ V}$

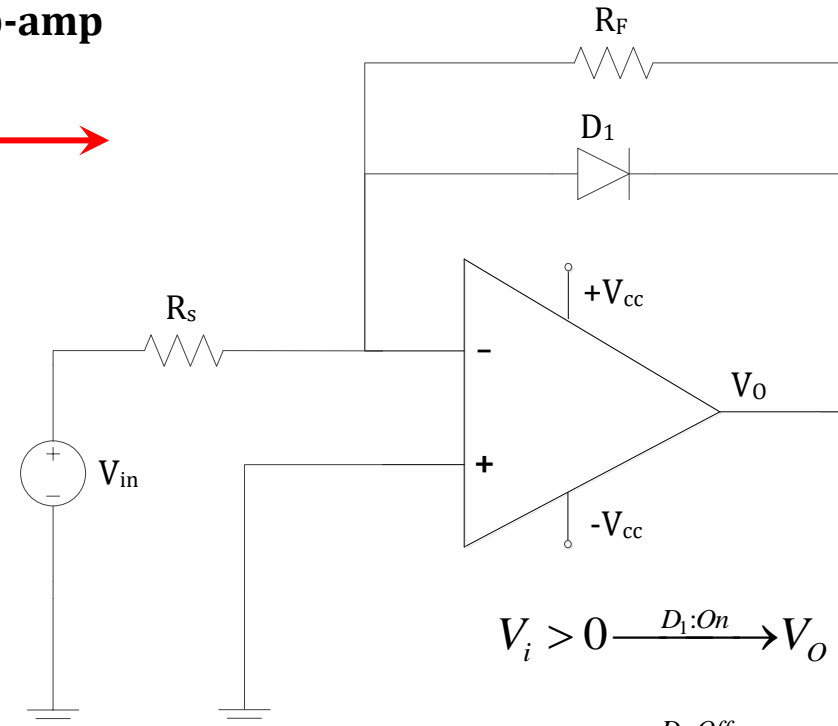


Half Wave Rectifier With Op-amp



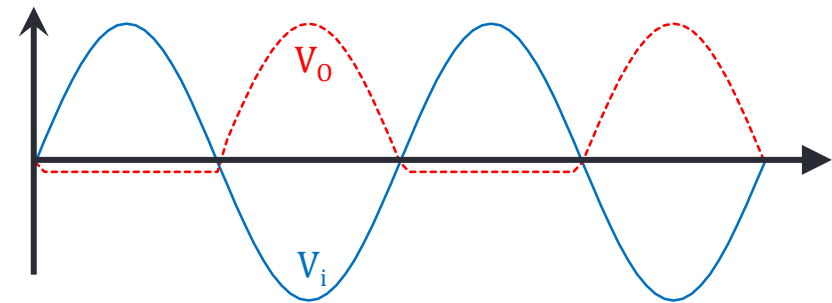
$$V_i > 0 \xrightarrow{D_1: \text{On}} V_O = -0.7$$

$$V_i < 0 \xrightarrow{D_1: \text{Off}} V_O : TS$$



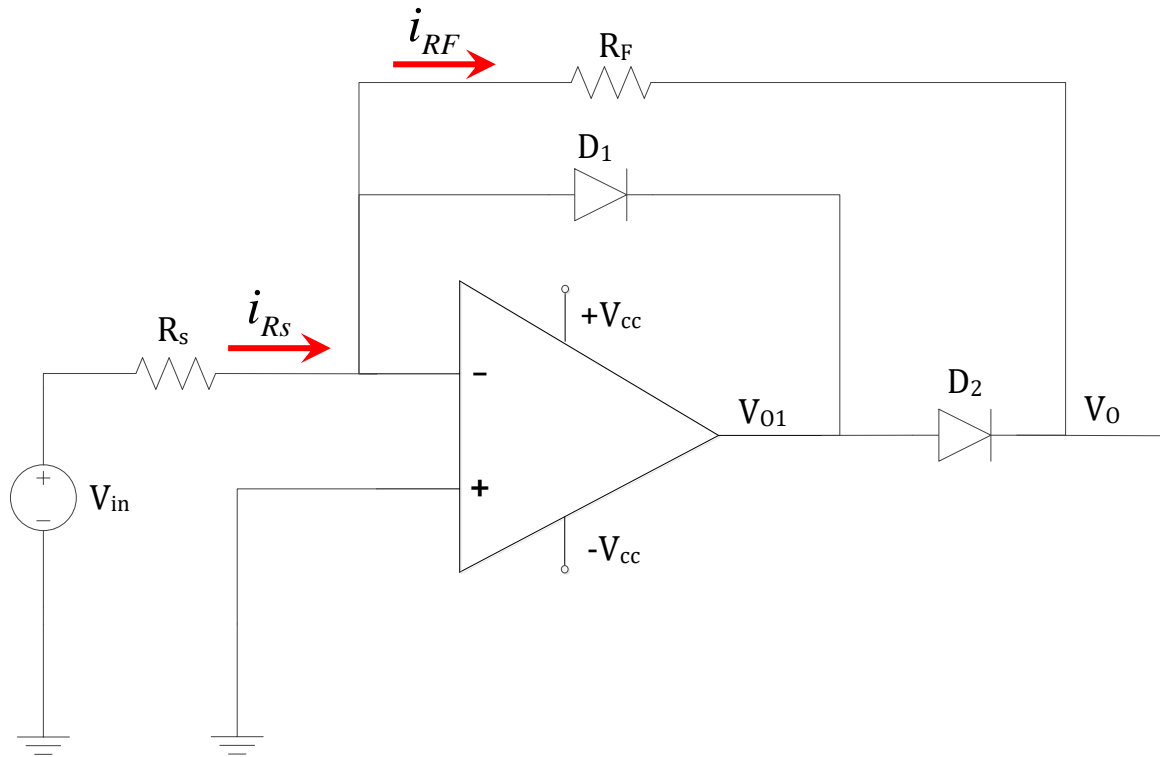
$$V_i > 0 \xrightarrow{D_1: \text{On}} V_O = -0.7$$

$$V_i < 0 \xrightarrow{D_1: \text{Off}} V_O = -\frac{R_F}{R_S} V_i$$



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

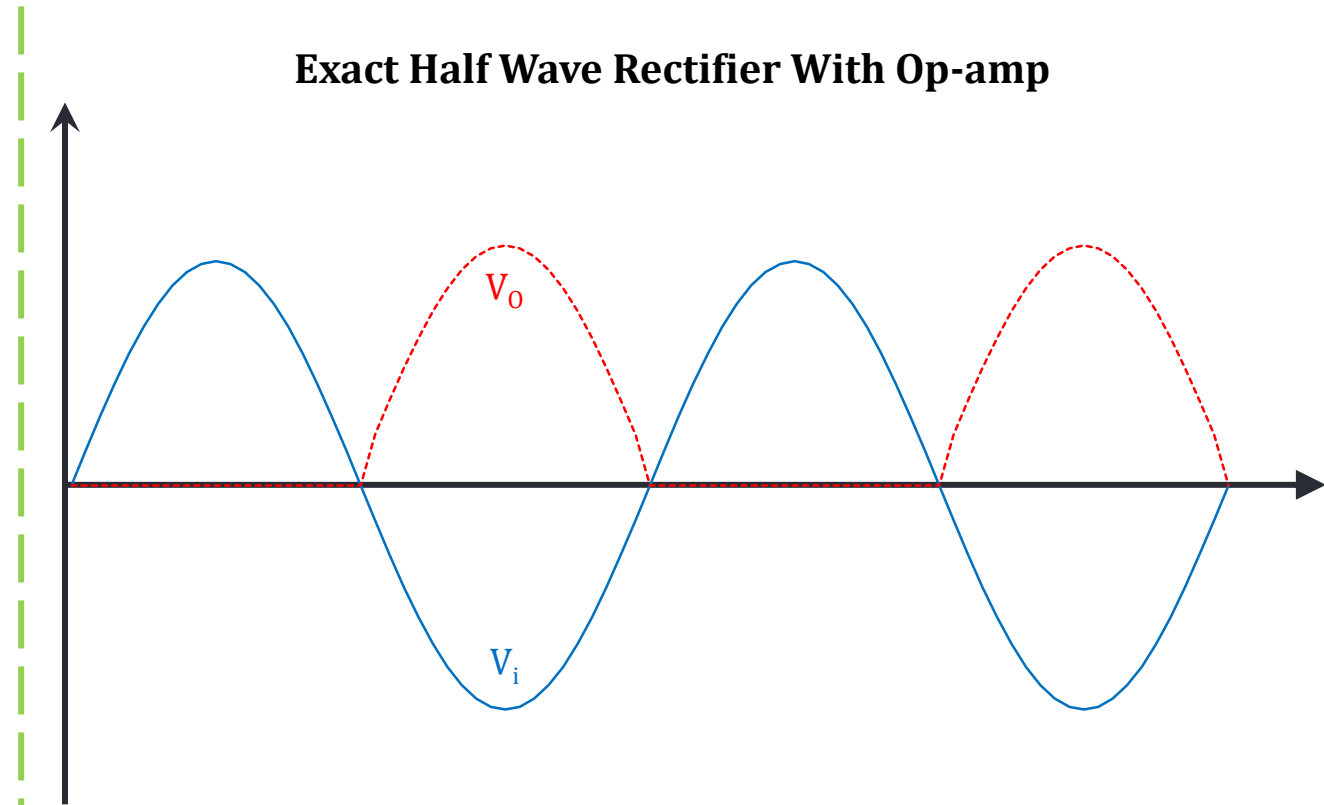


$$V_i > 0 \xrightarrow{D_1: ON} V_{O1} = -0.7 \xrightarrow{D_2: Off} V_O = 0$$

$$V_i < 0 \xrightarrow{D_1: Off} \begin{cases} V_{O1} > 0 \\ I_{RF} < 0 \end{cases} \xrightarrow{D_2: ON} V_O = -\frac{R_F}{R_S} V_i$$

یکسوکننده دقیق نیم موج

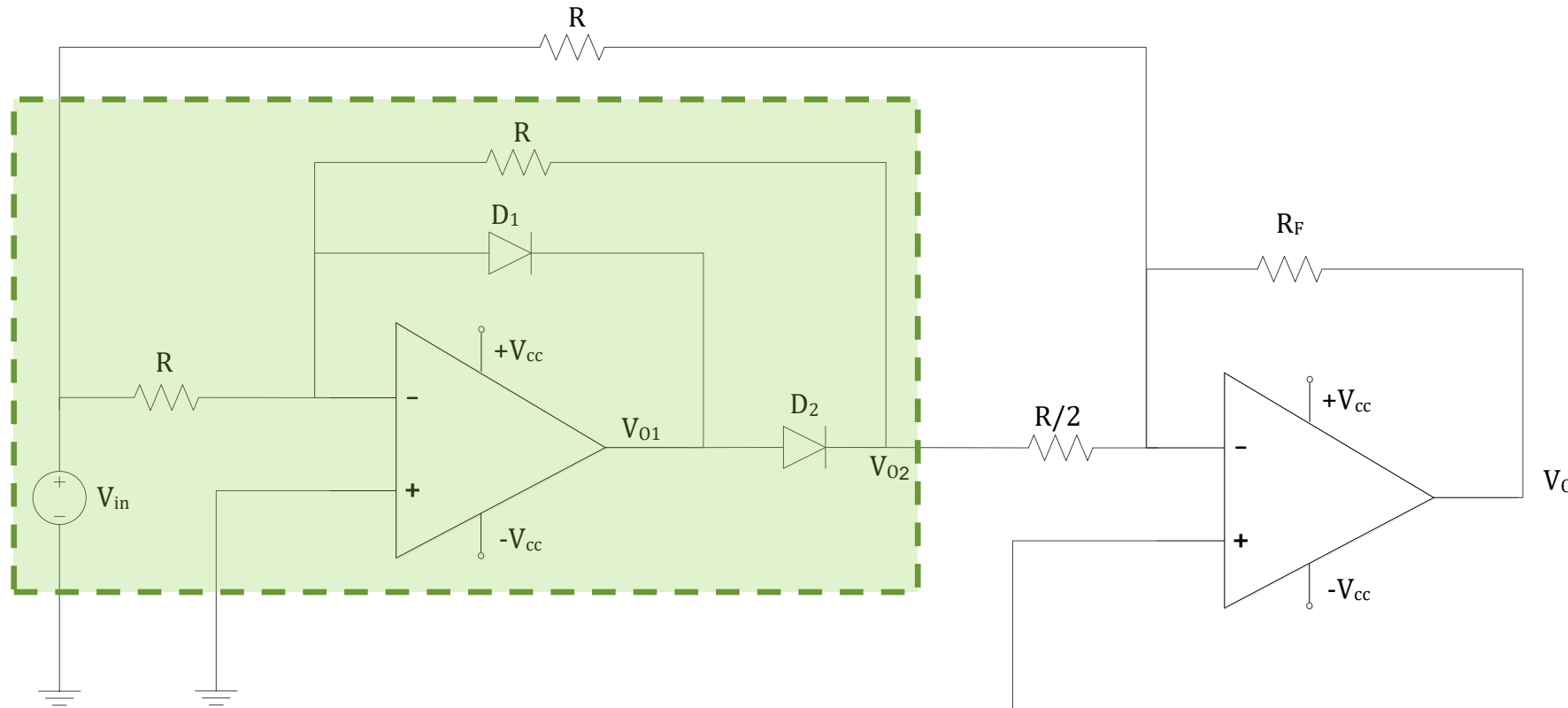
Exact Half Wave Rectifier With Op-amp



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

یکسوکننده دقیق تمام موج



$$V_{in} > 0 \xrightarrow{D_1:ON} V_{O1} = -0.7 \xrightarrow{D_2:Off} V_{O2} = 0$$

$$V_{in} < 0 \xrightarrow{D_1:Off} \begin{cases} V_{O1} > 0 \\ I_{RF} < 0 \end{cases} \xrightarrow{D_2:ON} V_{O2} = -V_{in}$$

$$V_O = -\frac{R_F}{R} V_{in}$$

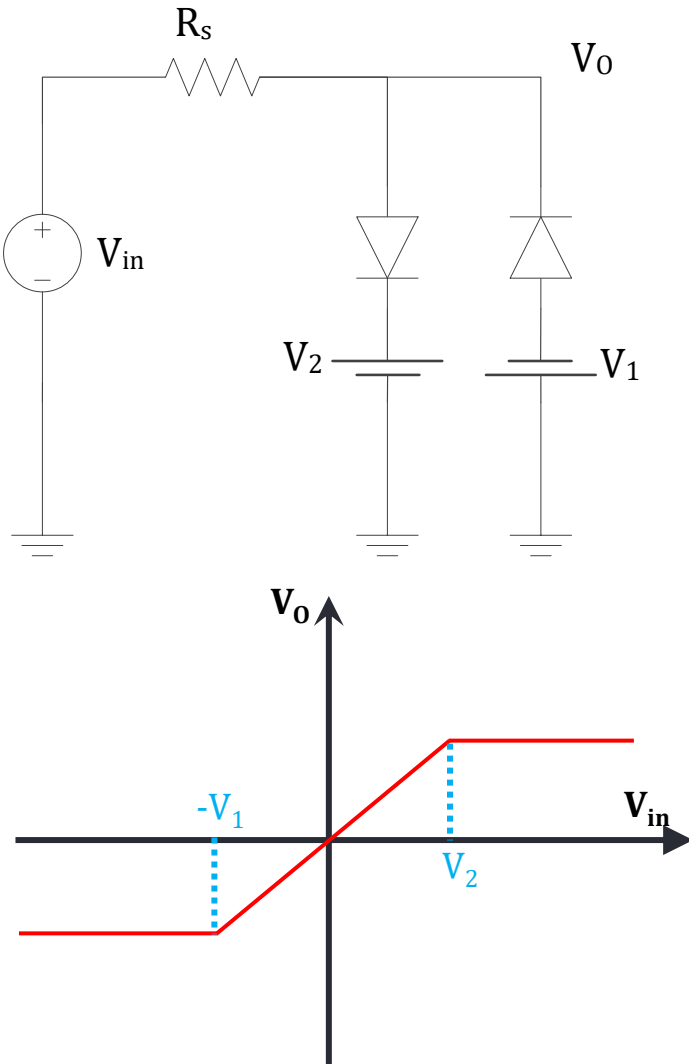
$$V_O = -\frac{R_F}{R} V_{in} - \frac{R_F}{R/2} (V_{O2}) = -\frac{R_F}{R} V_{in} - \frac{2R_F}{R} (-V_{in}) = +\frac{R_F}{R} V_{in}$$



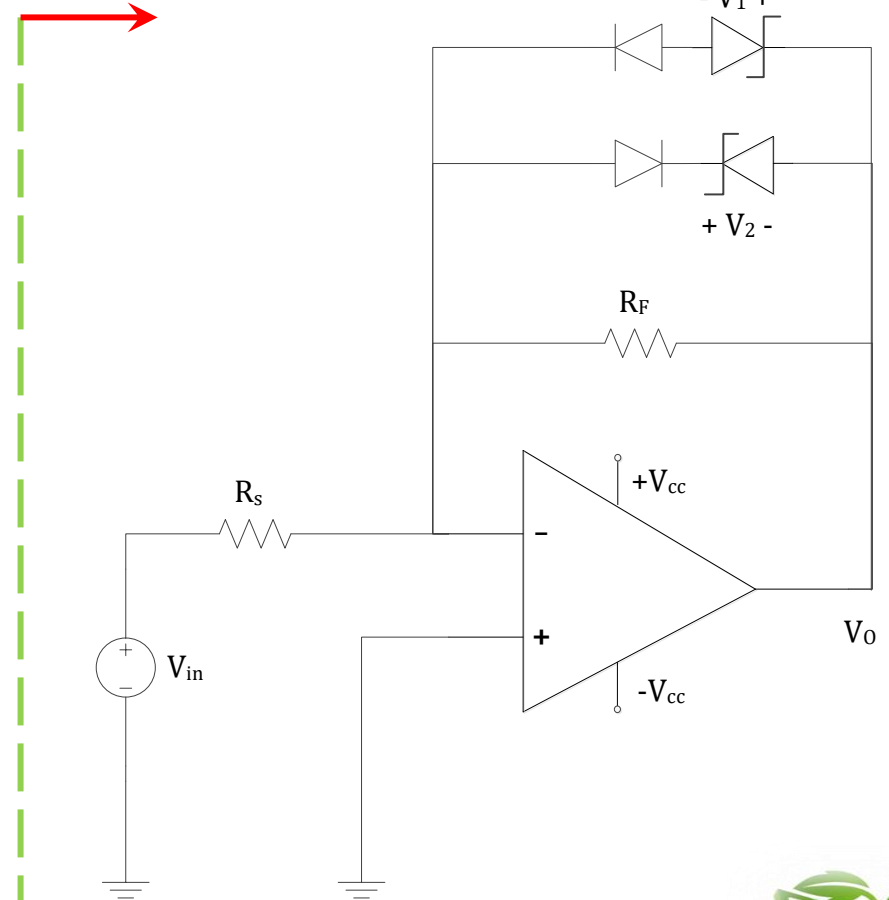
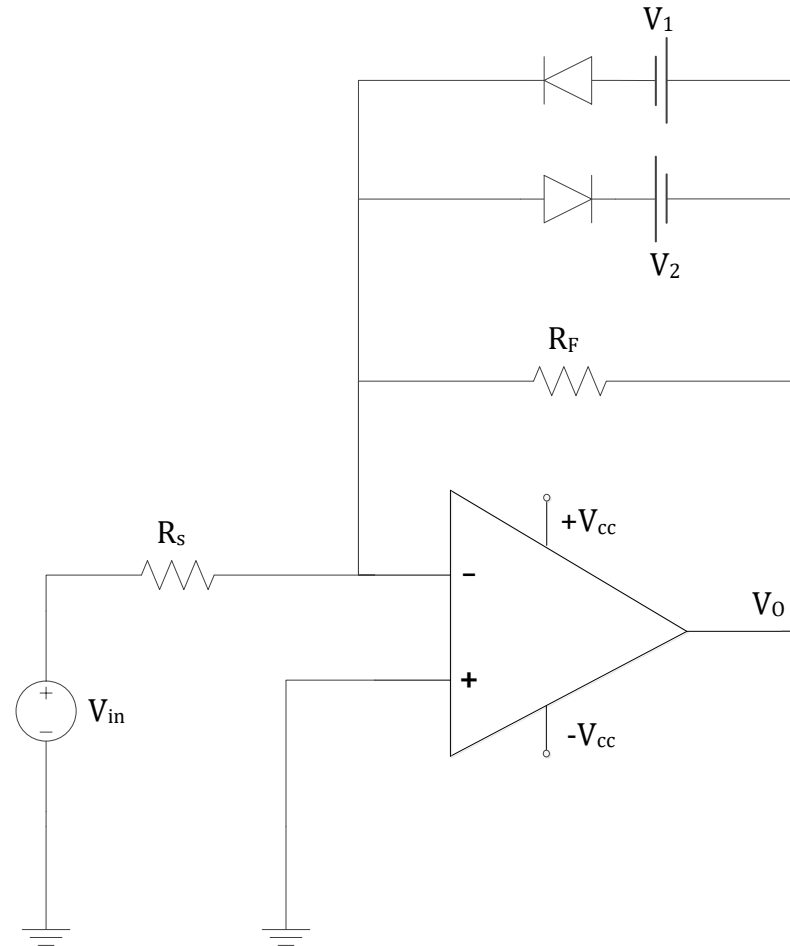
Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

Traditional Clipper



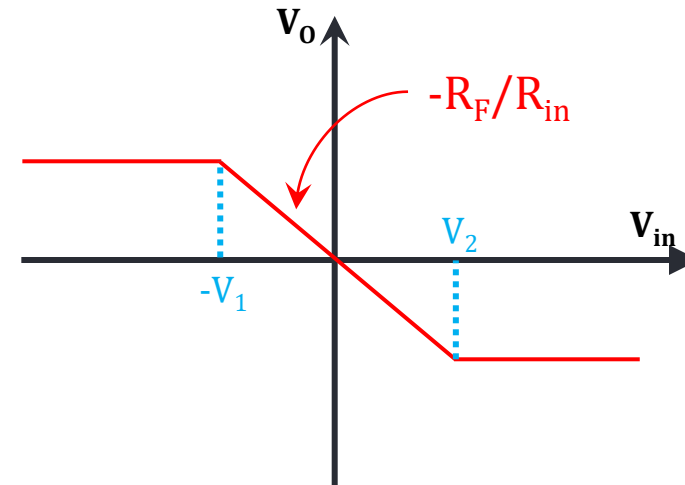
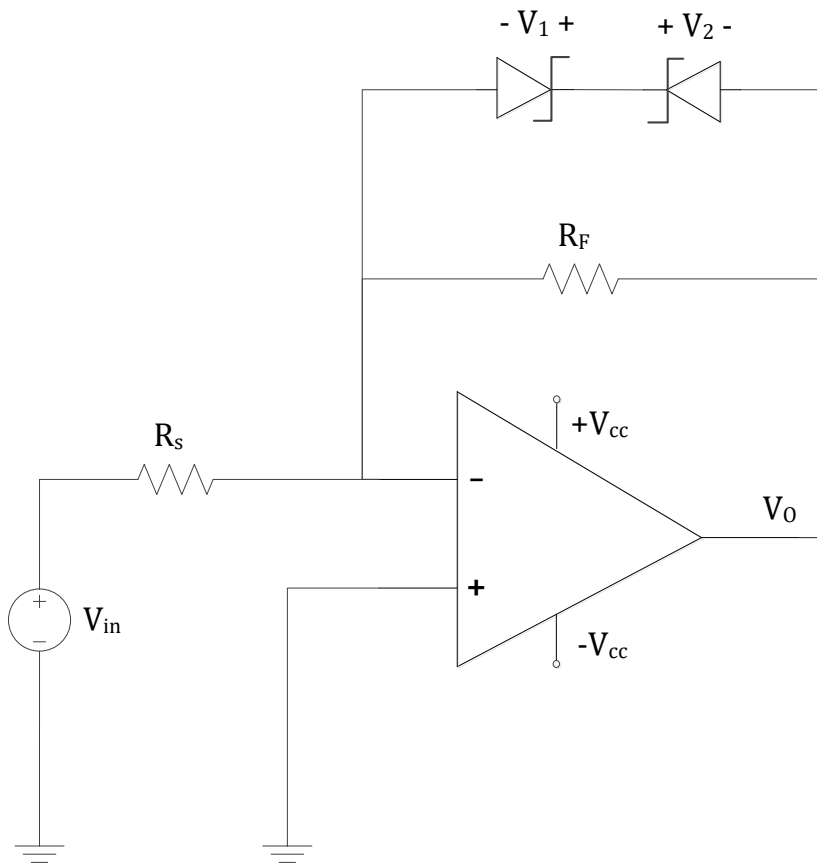
Double Clipper With Op-Amps



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

Double Clipper With Op-Amps



$$V_{in} > V_2 \xrightarrow{Z_2:BD} V_O = 0 - V_2 = -V_2$$

$$V_{in} < -V_1 \xrightarrow{Z_1:BD} V_O = 0 - (-V_1) = V_1$$

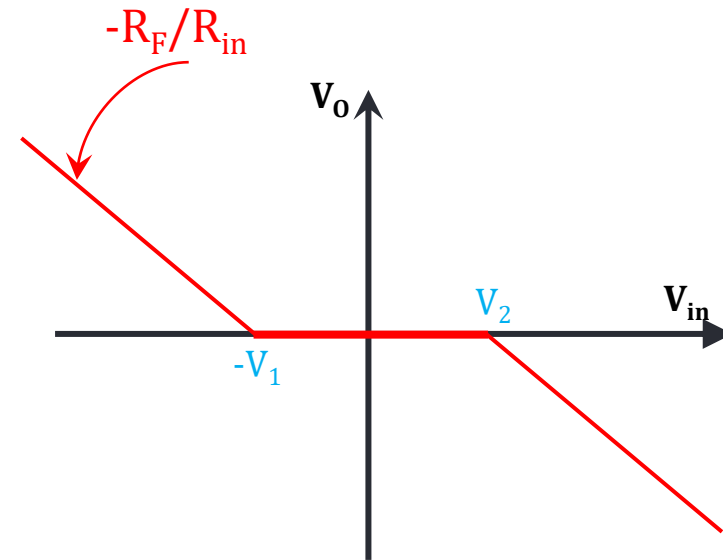
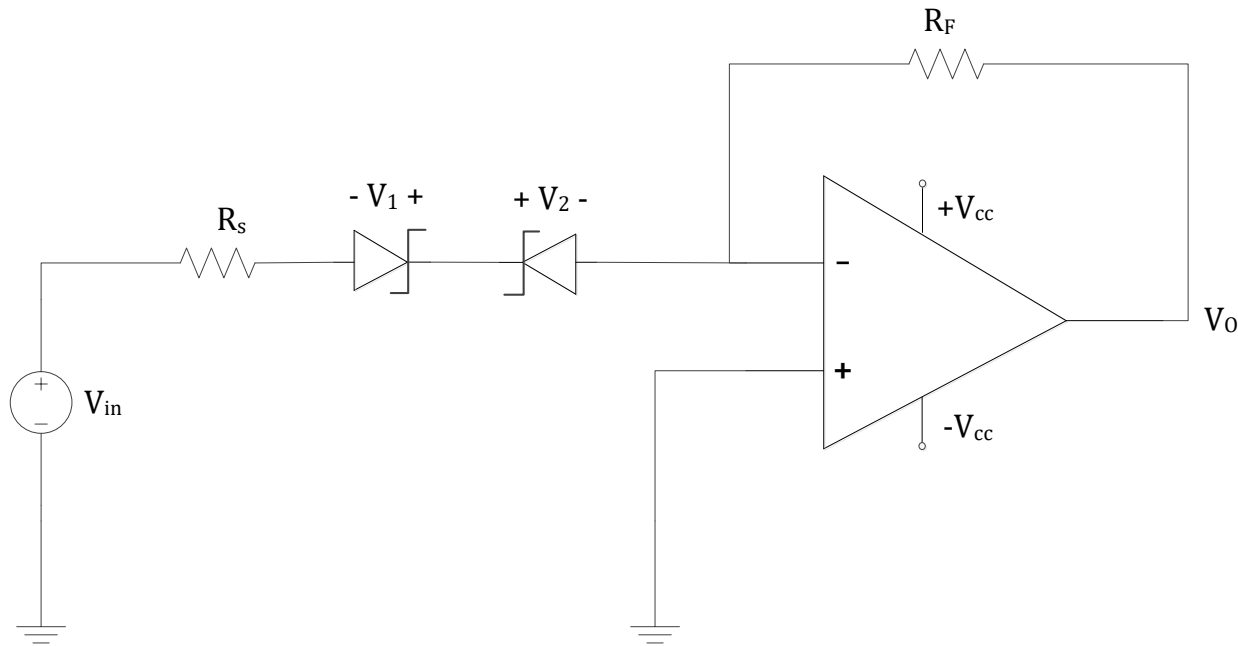
$$-V_1 < V_{in} < V_2 \xrightarrow{Z_1, Z_2 \text{ Out of } BD} V_O = \frac{-R_F}{R_s} V_{in}$$



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

Double Clipper With Op-Amps



$$-V_1 < V_{in} < V_2 \xrightarrow{Z_1, Z_2 \text{ Out of BD}} V_O = 0$$

$$V_{in} > V_2 \xrightarrow{Z_2: BD} V_O = \frac{-R_F}{R_S} (V_{in} - V_2)$$

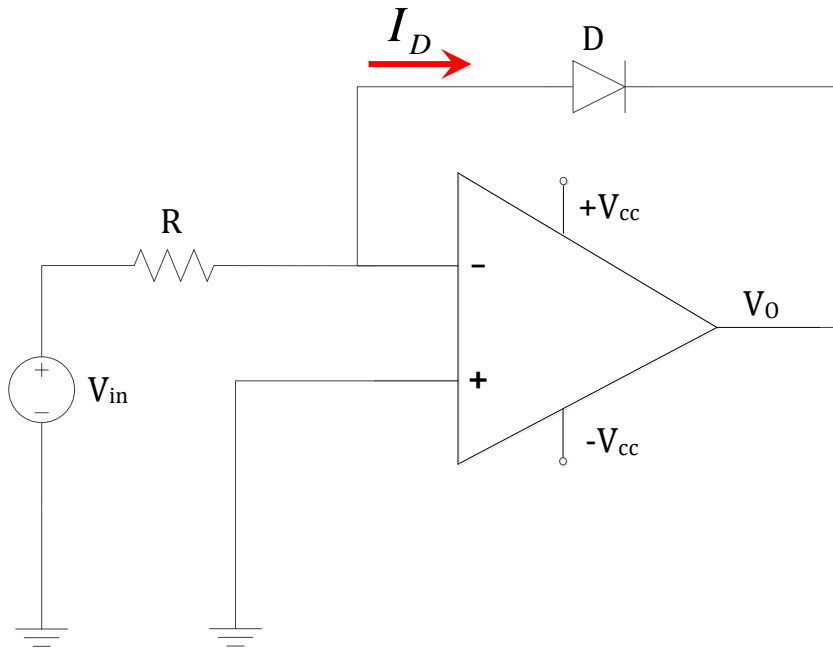
$$V_{in} < -V_1 \xrightarrow{Z_1: BD} V_O = -\frac{R_F}{R_S} (V_{in} + V_1)$$



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

لگاریتم گیر



$$V_O = -V_D = -V_T \ln\left(\frac{I_D}{I_s}\right)$$

$$I_D = I_R = \frac{V_{in}}{R}$$

$$V_O = -V_T \ln\left(\frac{V_{in}}{RI_s}\right)$$

$$V_{in} > 0$$

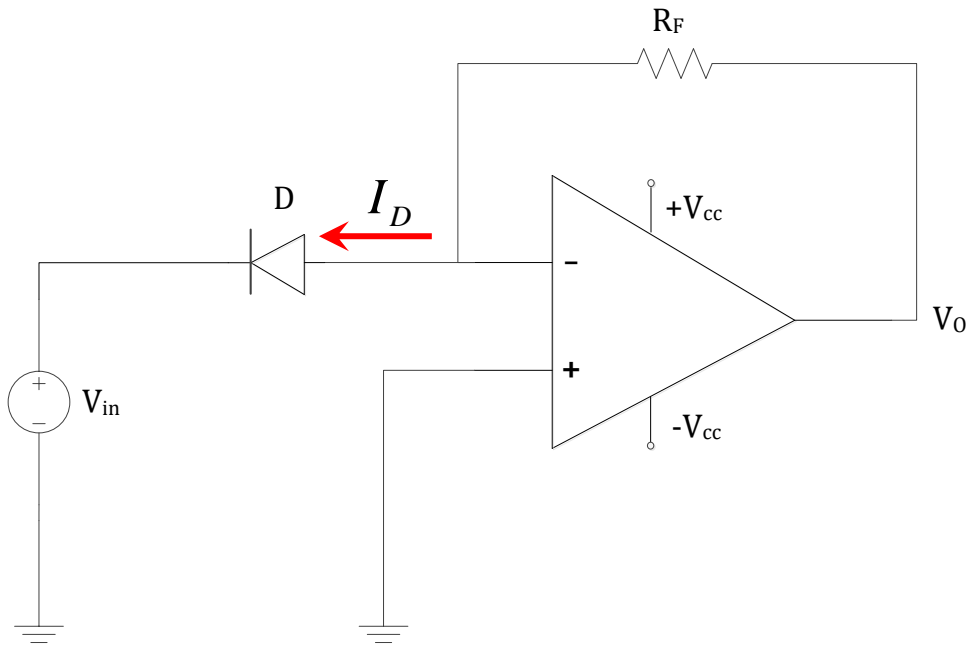
به یک مدار تنظیم سطح نیاز است



Non-Linear Applications of Op-Amps

کاربردهای غیرخطی تقویت کننده های عملیاتی

آنتی لگاریتم گیر



$$V_O = R_F I_D = R_F I_S \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right)$$

$$V_D = -V_{in}$$

$$V_O = R_F I_D = R_F I_S \exp\left(\frac{-V_{in}}{V_T}\right)$$

$$V_{in} < 0$$

به یک مدار تنظیم سطح نیاز است

