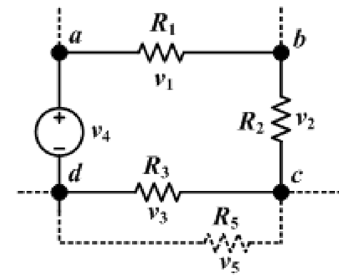
Op Amp

Dr. Cahit Karakuş

Basic Circuits Review

- Kirchoff's Law
  - Voltage Law: The sum of all the voltage drops around the loop = V_{in}

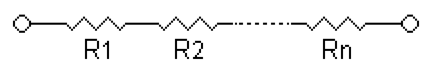


$$V_1 + V_2 + V_3 = V_{in}$$

- Resistance (Ohms – Ω)

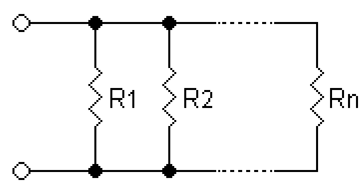
$$R = \frac{V}{I}$$

  - Series



$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

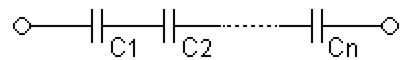
  - Parallel



$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

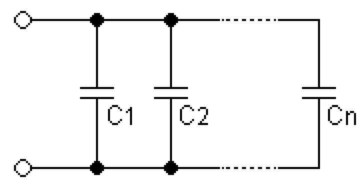
Basic Circuits Review

- Capacitance (Farad – F) $C = \frac{Q}{V}$ $I = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt}$
  - Series



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

  - Parallel

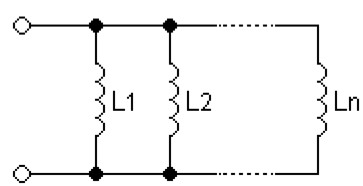


$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$$

- Inductance (Henry – H) $v(t) = L\frac{di(t)}{dt}$
  - Series

$$L_{\text{eq}} = L_1 + L_2 + \cdots + L_n$$

  - Parallel



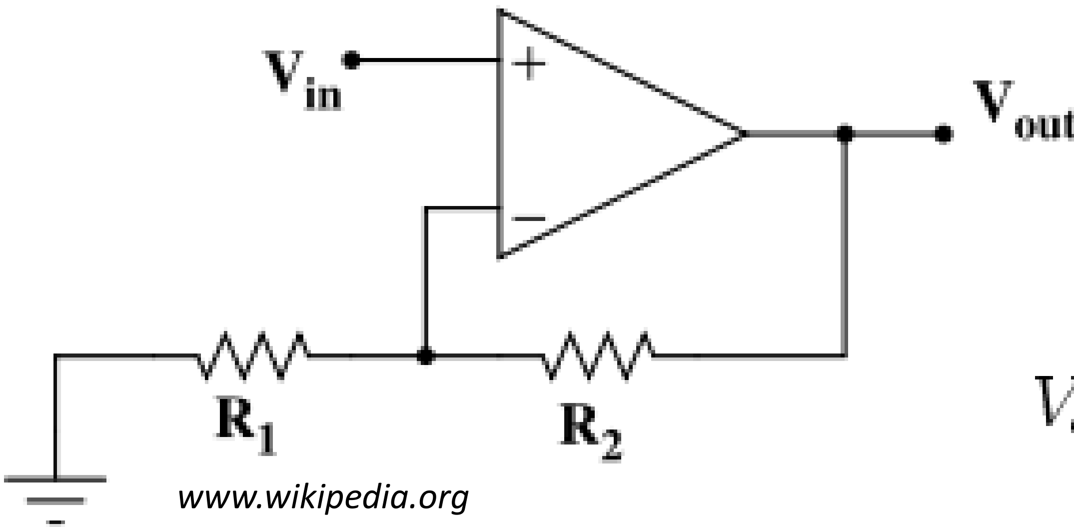
$$\frac{1}{L_{\text{eq}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_n}$$

How are Op-Amps used?

- Comparator (seen earlier)
- Voltage follower (seen earlier)
- Signal Modulation
- Mathematical Operations
- Filters
- Voltage-Current signal conversion

- Op amp can be configured to be used for different type of circuit applications:
  - **Inverting Amplifier**
  - **Non – inverting Amplifier**
  - **Summing Amplifier**
  - **Integrator**
  - **Differentiator**

Non-inverting Op-Amp

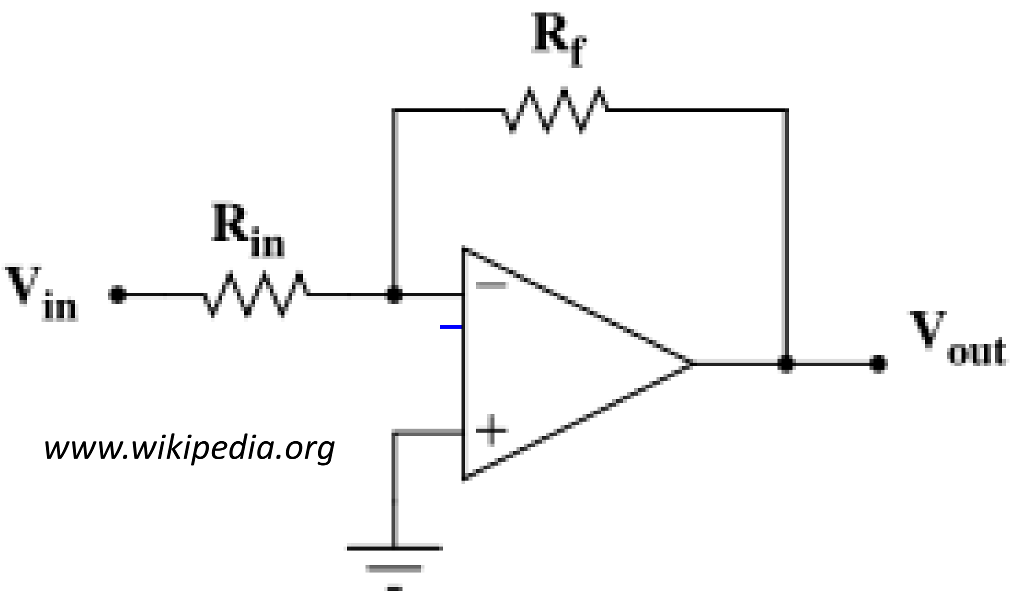


www.wikipedia.org

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

Uses: Amplify…straight up

Inverting Op-Amp

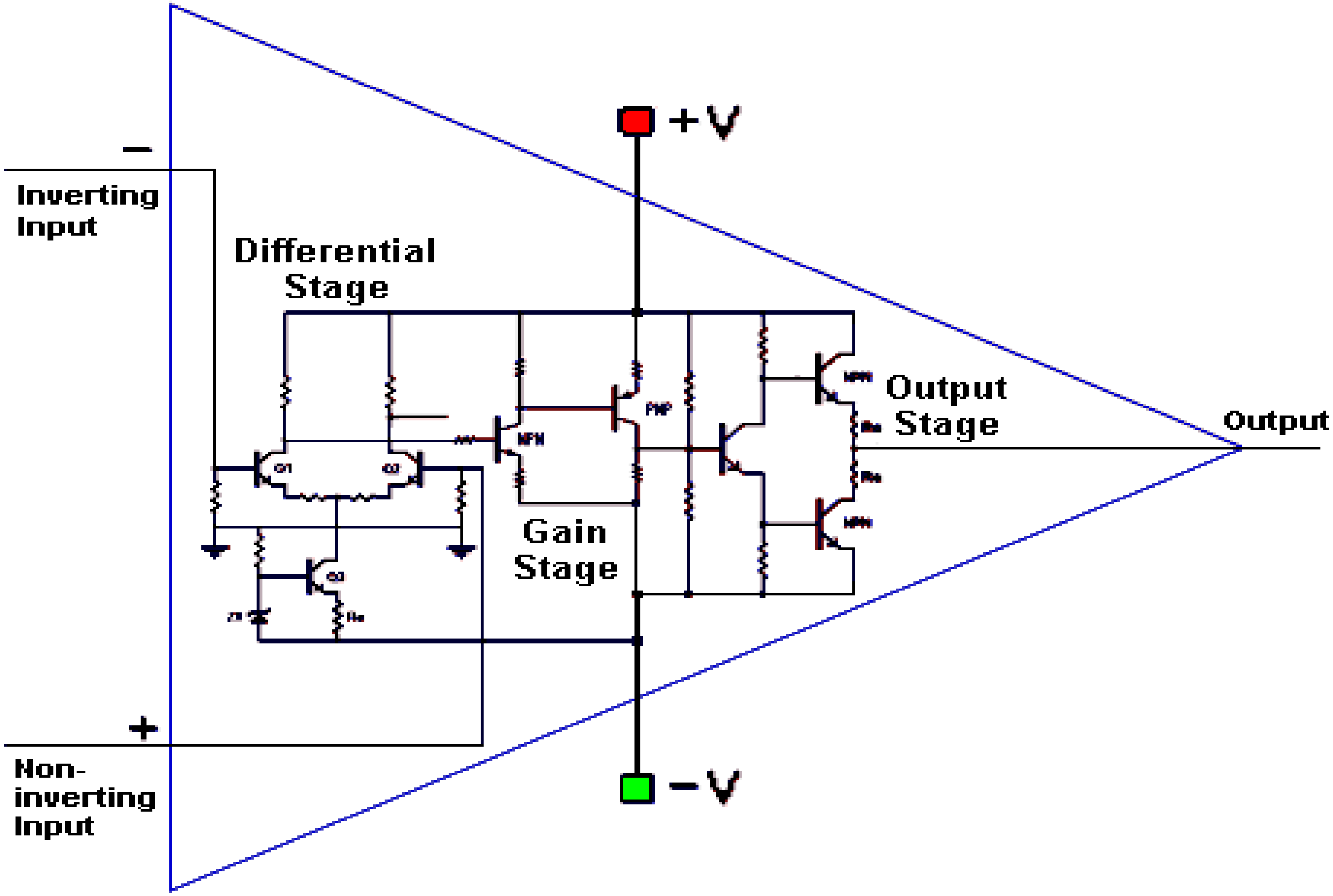


www.wikipedia.org

$$V_{\mathrm{out}} = -V_{\mathrm{in}}(R_{\mathrm{f}}/R_{\mathrm{in}})$$

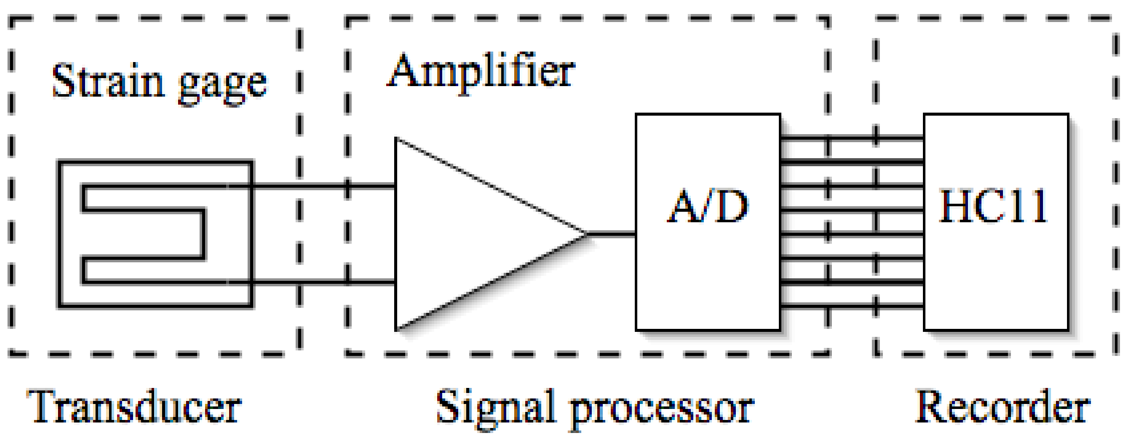
Uses: Analog inverter

3-stage Op-Amp



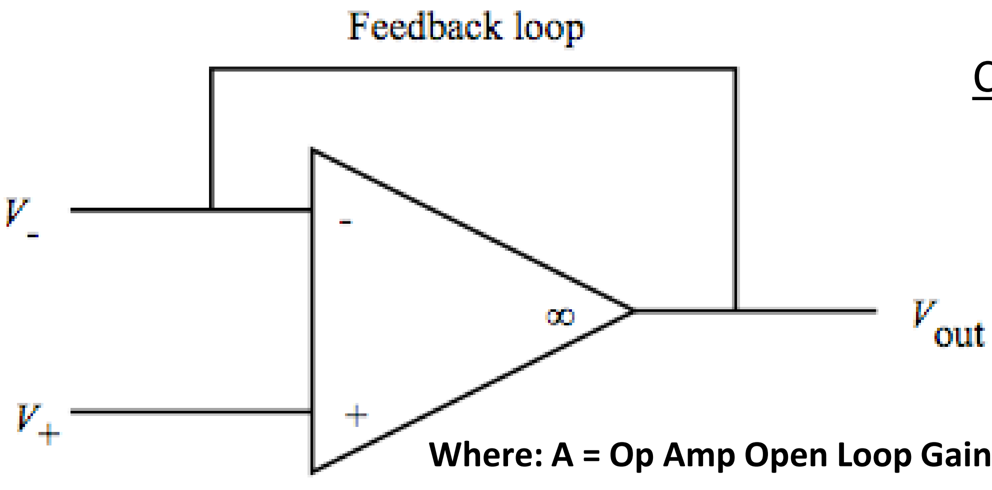
Why are they useful?

- Sensor signals are often too weak or too noisy
  - Op Amps ideally increase the signal amplitude without affecting its other properties



Why are they useful?

- Negative feedback leads to stable equilibrium
- Voltage follower (direct feedback)
  - If Vout = V- , then Vout ~ V+



Where: **A = Op Amp Open Loop Gain**

F = Feedback Loop Gain

<u>Closed Loop Transfer Function</u>

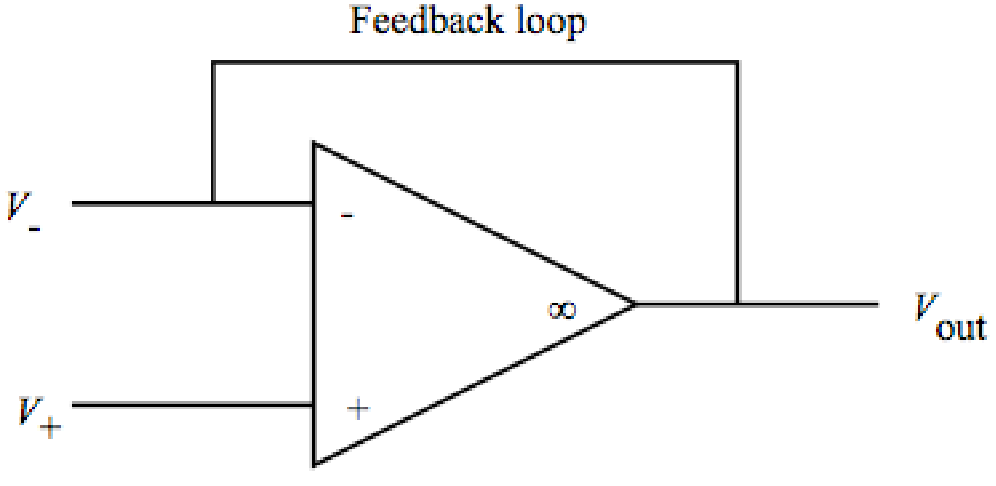
H(s) = **A** / (1 + **AF**)

<u>When AF >> 1…</u>

H(s) = 1 / **F**

Op Amp Golden Rules

1. The output attempts to do whatever is necessary to make the voltage difference between the inputs zero.
2. The inputs draw no current.



Açıklama

- Kirşof'un akım denkleminde giren akımlar çıkan akımlara eşittir.
- İdal op amp devrelerinde giriş akımları birbirlerine eşit ve 0A dir. Gerilimlerde birbirine eşittir.

1) Op amp'lı devrelerde max kazanç ne olur, evirende: $K = -\frac{R_F}{R_1}$

Besleme gerilimi +12V
-12V

$R_F = 200\Omega$

$R_1 = 1\Omega$

$V_1 = 1V$ ise

$V_{o_{TT}} \neq 200V$ olamaz. Çünkü max gerilim en fazla 24V'tur..

2) $\frac{R_F}{R_1}$ olayının yorumlanması

$K = 1 + \frac{R_F}{R_1}$

a) Yorumlayınız.
Evirmeyendir..

B) $R_F \geq R_1$ ise yorumlayınız.
$K > 1$
her zaman kazanç vardır..

c) $R_F < R_1$ ise yorumlayınız
$K \simeq 1$
Kazanç gittikçe artar.

3) $K = -\frac{R_F}{R_1}$ olayının yorumlanması

a) K'yı yorumlayınız.

b) $R_F > R_1$

c) $R_F < R_1$ → 0'a doğru gider

4) K=30 evirmeyen kuvvetlendiricide besleme gerilimi ne olmalıdır?

; $V_g = 1V$
$V_{out} = 30V$ olması için V- ve V+ besleme gerilimi ne olmalıdır.

$V- = -15$ $V_+ = +15V$

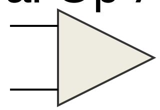
5) Kirchoff'un temel prensibi nedir?

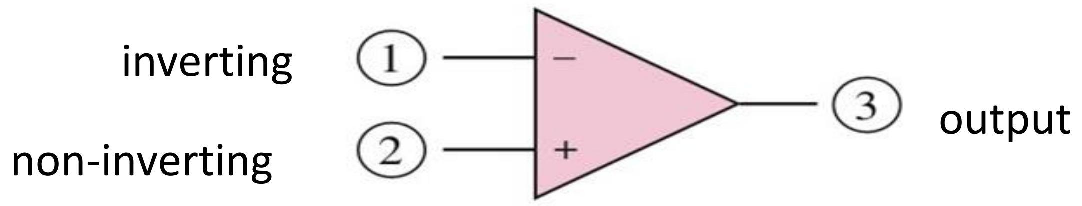
: Gelen ve giden akımlar birbirine eşittir, Her bir direnç üzerindeki gerilim farkının dirence bölümü o koldaki akımı verir.

Ideal Op Amp

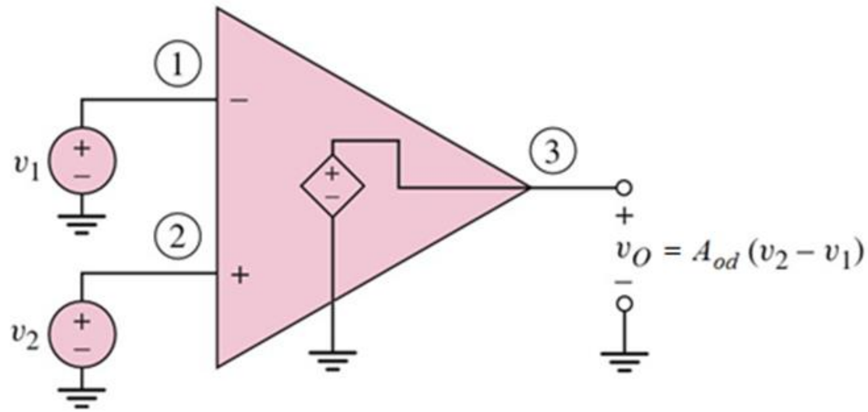
- Z_{in} is infinite
- Z_{out} is zero
- Amplification (Gain) $V_{out} / V_{in} = \infty$
- Unlimited bandwidth
- $V_{out} = 0$ when Voltage inputs = 0

Ideal Op Amp

	Ideal Op-Amp 	Typical Op-Amp 
Input Resistance	infinity	$10^6\ \Omega$ (bipolar) $10^9\ \Omega$ - $10^{12}\ \Omega$ (FET)
Input Current	0	10^{-12} – 10^{-8} A
Output Resistance	0	100 – 1000 Ω
Operational Gain	infinity	10^5 - 10^9
Common Mode Gain	0	10^{-5}
Bandwidth	infinity	Attenuates and phases at high frequencies (depends on slew rate)
Temperature	independent	Bandwidth and gain

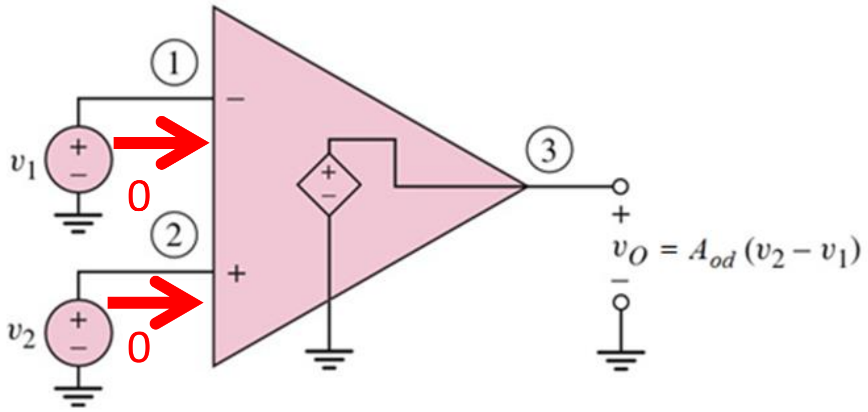


Op-amp circuit symbol



- Open loop mode
- $V_o = A_{od} (v_2 - v_1)$
  - A_{od} is referred to as the open loop gain.
  - Notice that is $v_2 = v_1$, the open loop gain equals to ∞

- Two main characteristics:
  - We want the open loop gain to be equal to ∞ which means that $v_2 = v_1$



  - We also want the input resistance to be equal to ∞ , hence there is no current going into the op-amp

Opamplara (İşlemsel yükselteçler) Giriş

-Operasyonel (işlemsel) yükselteçler, kısaca "opamp" olarak bilinir ve bu adla tanımlanırlar.

-OpAmp kelime anlamı olarak işlemsel kuvvetlendirici demektir. (İşlemsel Kuvvetlendirici = Operational Amplifier)

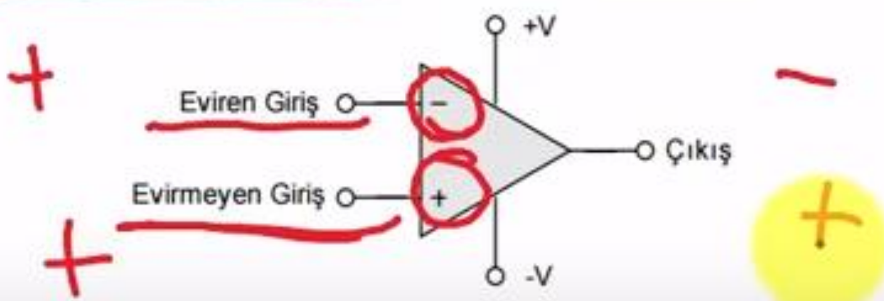
-Elektronik endüstrisinde üretilen ilk tümdevre (İntegrated circuits=IC's) bir opamp'tır. 1963 yılında Fairchild firması tarafından µA702 kodu ile üretilip tüketime sunulmuştur.

-İşlemsel yükselteçler aktif devre elemanlarıdır.

-Devrede gerilim kontrollü gerilim kaynağı gibi çalışırlar.

-İşlemsel yükselteçler sinyalleri toplama, çıkarma, bölme ve çarpma özelliklerine sahiptirler.

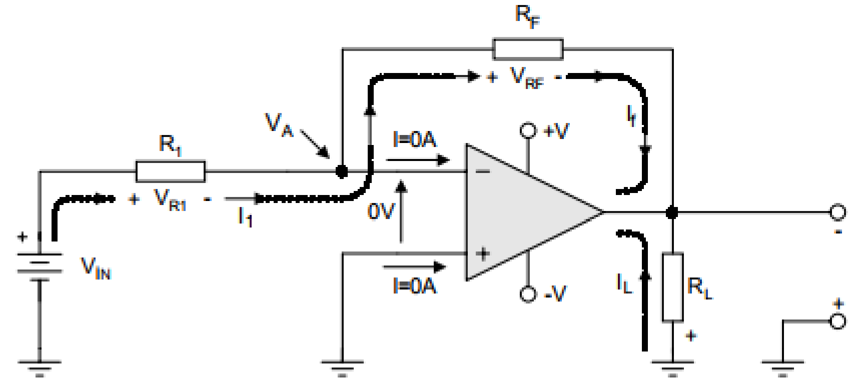
-Bu matematiksel özelliklerinden dolayı da işlemsel yükselteç adını alırlar.



Op amp

- Opamp kazancının kontrol edilebileceği iki temel tip yükselteç devresi vardır. Bunlar; eviren (inverting) ve evirmeyen (noninverting) yükselteçlerdir.
- Opamp'ın kazancını kontol etmede en etkili yöntem geri besleme kullanmaktır

Op amp



Temel Eviren Yükselteç Devresi

Eviren yükselteç devresinde giriş gerilimi V1, R1 direnci ile opamp'ın negatif terminaline uygulanmıştır. Opamp'ın pozitif terminali ise topraklanmıştır. Opamp'ın giriş ve çıkış terminalleri arasına bağlanan Rf direnci, geri besleme direnci olarak anılır. VİN giriş işareti ile V0 çıkış işareti arasındaki bağıntı R1 ve RF dirençleri ile ifade edilir.

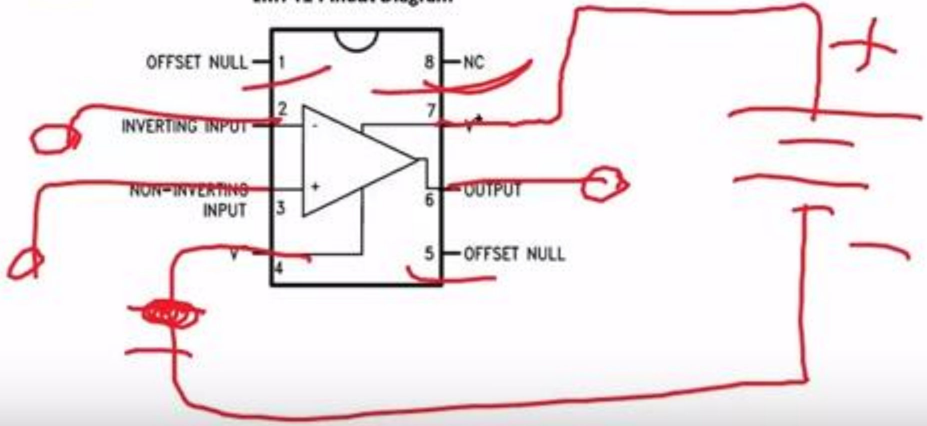
Devre analizi yapmadan önce, opamp özellikleri tekrar hatırlatalım.

- Opampın eviren (-) ve evirmeyen (+) uçlarından, opamp içerisine küçük bir akım akar. Bu akım çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.
- Girişe uygulanan işaretin AC veya DC olması durumu değiştirmez, her ikisi de kuvvetlendirilir.
- Opamp'ın (-) ucu ile (+) ucu arasındaki potansiyel fark sıfırdır. Bu nedenle, devre de opamp'ın (-) ucuda toprak potansiyelindedir.

Uygulamada yaygın olarak kullanýlan 741 kodlu opamp'ın özellikleri:

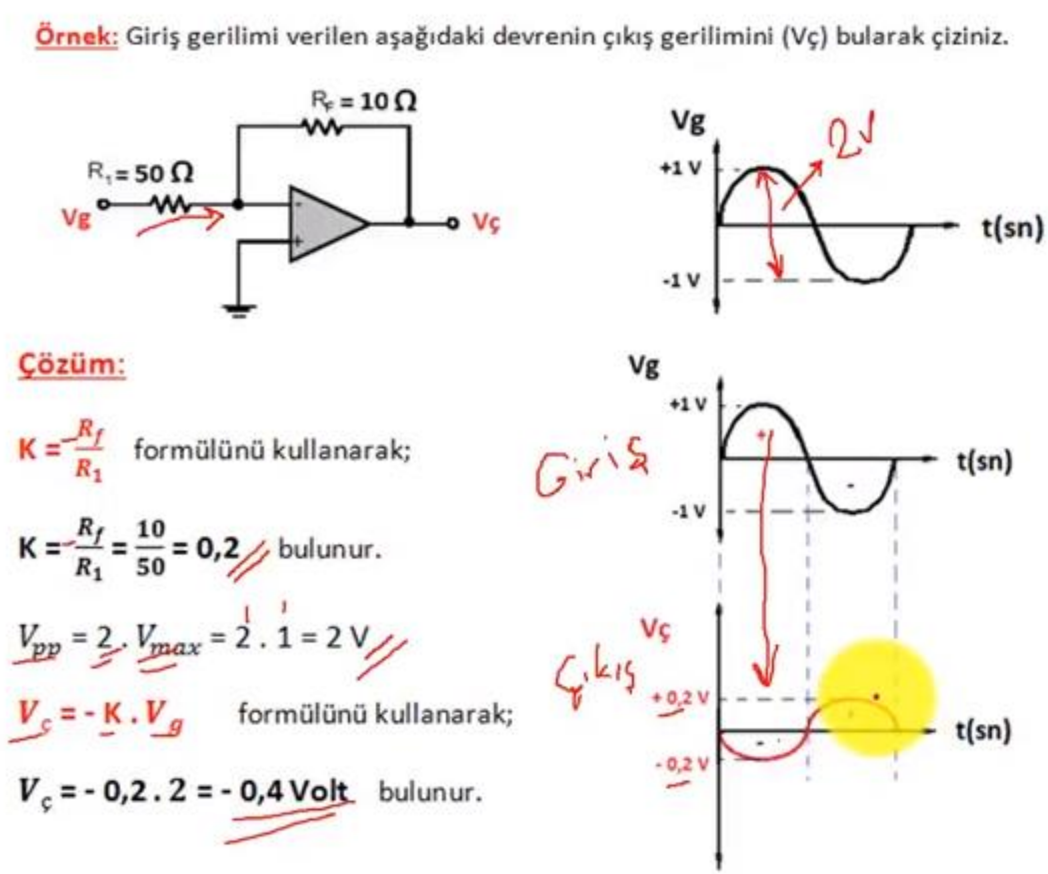
I- Gerilim kazancı 45.000-200.000 arasındadır.
II- Giriş direnci (empedansı) 0,3-2 MW arasındadır.
III- Çkış empedansı 50-100 W arasındadır.
IV- Band genişliği 1 MHz dolayındadır.
V- Çıkış akımları -100 mA dolayındadır.
VI- Giriş uçlarýna 0 Volt uygulandığında çıkışuçlarında da 0 Volt oluşmaktadır.
VII- Karakteristikleri sıcaklıkla çok az denilmektedir.
VIII- Giriş uçların çektiği akım sıra yakındır.

LM741 Pinout Diagram



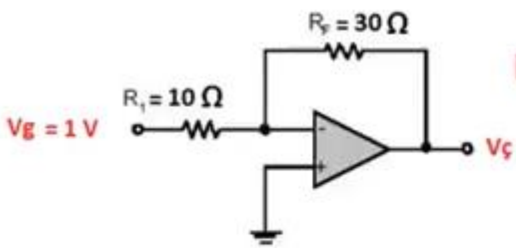
Op Amp

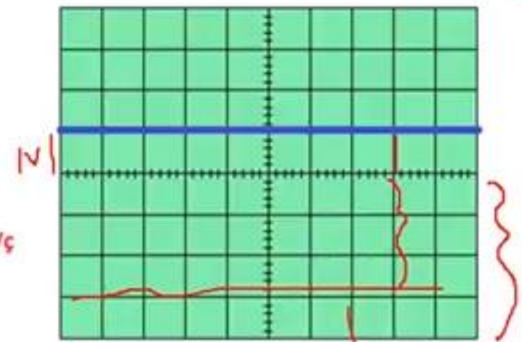
- Op amp devrelerinin çözümünde Kirşof akım ve gerilim denklemleri kullanılır.
- Negatif uca uygulanan sinyal terslenerek çıkışa uygulanır.
- Pozitif uca uygulanan sinyal katsayı oranında büyütülerek çıkışa uygulanır.
- Op Amp'lı devrelerde kazanç çok yüksek olsa bile çıkış gerilimi besleme geriliminden büyük olamaz. Op Amp'ın simetrik besleme gerili -12, +12 V çıkış gerilimi maksimum 24 V olur.



- Çıkış gerilim terslendi.
- Çıkış gerilimi tepeden tepeye 0.2V

Örnek: Şekildeki Op-Amplı eviren yükselteç devresinde, Giriş gerilimi olarak osilaskop görüntüsü verilen Vg = 1 V DC uygulanmaktadır. Çıkış gerilimini hesaplayıp, osilaskop görüntüsünü çiziniz. (Volt /Div = 1V)





Tersleyen yükselteç devresi ve giriş sinyali

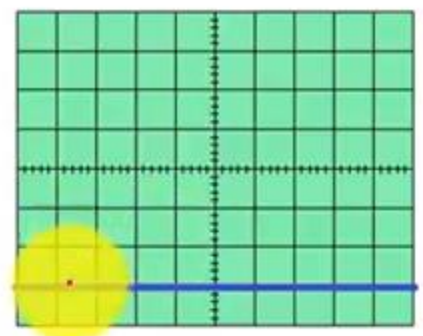
Çözüm:

$$K = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{30}{10} = -3$$

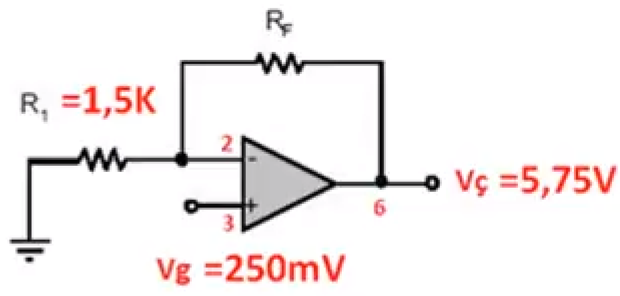
$V_ç = -K \cdot V_g$ formülünü kullanarak;

$V_ç = -3 \cdot 1 =$ **-3 Volt** bulunur.

Sinyal şekli şöyle çizilir: (Volt/Div = 1V kademesinde, $V_ç$ = - 3 V DC)



Örnek: Şekildeki devrede **Rf** geri besleme direnç değerini hesaplayınız.



Çözüm:

Vg = 250mV = 0,25V

$$K = \left| \frac{V_ç}{V_g} \right| = \left| \frac{5,75}{0,25} \right| = 23$$

$$K = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$23 = 1 + \frac{R_f}{1,5}$$

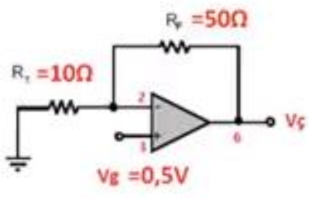
$$23-1 = \frac{R_f}{1,5}$$

$$22 = \frac{R_f}{1,5}$$

$$R_f = 22.1,5 = 33\ K$$

- Bu devre terslenmeyen yükselteç devresidir.
- Terslenmeyen girişten Vg=250mV gerilim uygulanmış.

<u>Örnek:</u> Şekildeki devrede girişten uygulanan sinyalin osilaskoptaki görüntüsü verilmiştir. Çıkış gerilimini hesaplayarak osilaskop görüntüsünü çiziniz. (Volt/Div =1V)



<u>Çözüm:</u>

$K = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

$K = 1 + \frac{50}{10} = 1 + 5 = 6$

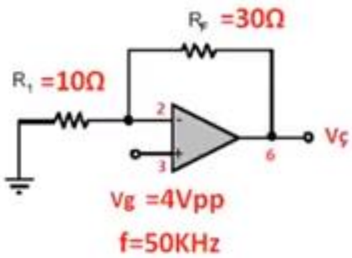
$V_ç = K . V_g$ formülünü kullanarak;

$V_ç = 6 . 0{,}5 = 3$ Volt bulunur.

Bu çıkış sinyalinin Osilaskop görüntüsü şöyle çizilir:

Volt/Div=1V kademesindedir.

Örnek: Şekildeki devrede kazancı ve çıkış gerilimini hesaplayıp, Giriş ve Çıkış sinyallerinin osilaskop görüntüsünü çiziniz. (Volt/Div =2V , Time/Div = 5 µsn)



Çözüm:

Vpp = Volt/Div . DKS formülünden;

4 = 2 . DKS

DKS = 2 bulunur.

T = Time/Div . YKS

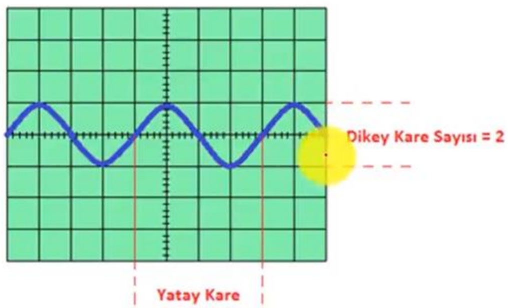
$$T=\frac{1}{f}= 5.10^{-6} \text{ . YKS}$$

f= 50 KHz = 50. 10^3 Hz olur.

$$\frac{1}{50.10^3} = 5.10^{-6} \text{ . YKS}$$

$$\text{YKS} = \frac{1}{50.10^3.5.10^{-6}} = \frac{1}{250.10^{-3}} = \frac{1000}{250} = 4 \text{ bulunur.}$$

Giriş sinyali



- DKS: Dikey Kare Sayısı
- YKS: Yatay Kare Sayısı

Çıkış gerilimi ise;

$$K = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

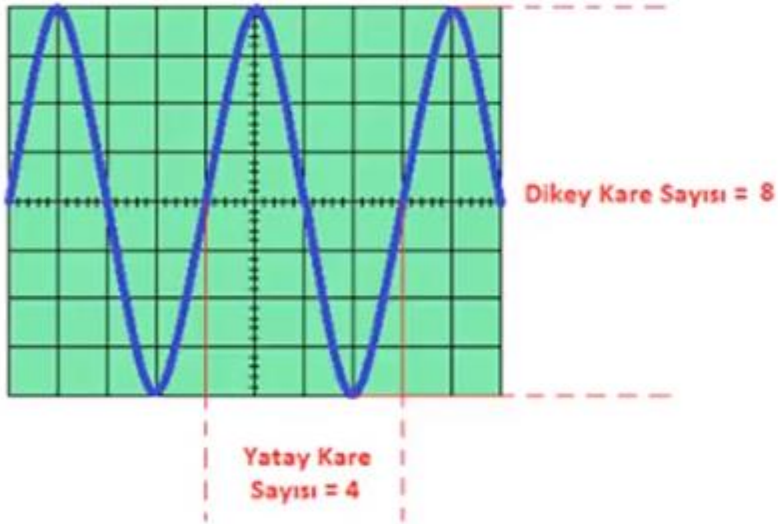
$$K = 1 + \frac{30}{10} = 1 + 3 = 4$$

$$V_ç = K \cdot V_g$$

$V_ç = 4 \cdot 4 = 16$ Volt bulunur.

Bu çıkış sinyalinin tepeden tepeye değeridir. Osilaskopta şöyle görünür;

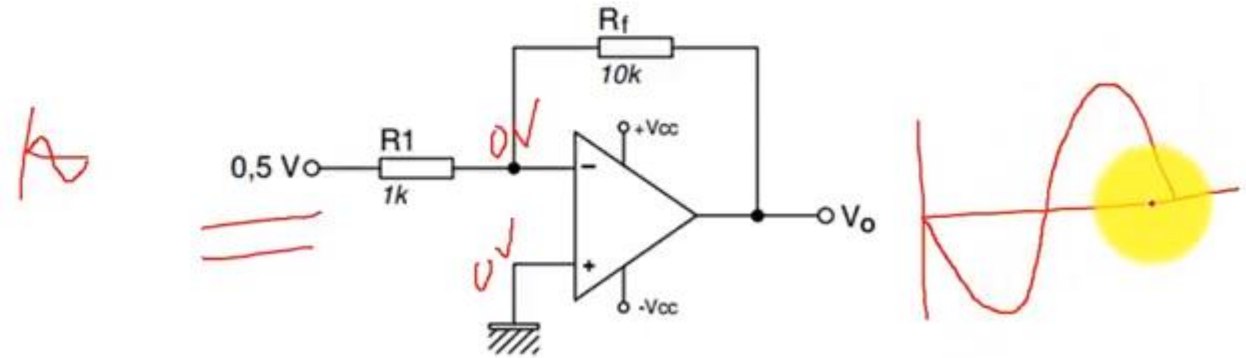
Vç=16Vpp (Volt/Div =2V , Time/Div = 5 µsn)



Giriş – çıkış sinyalleri arasında faz farkı yoktur. Giriş sinyali terslenmeden 4 kat yükseltilmiştir. Çıkış sinyalinin frekansı da girişle aynıdır. (f=50 Khz)

Örnek

Şekildeki devrenin kazancını ve çıkış geriliminin değerini hesaplayın.



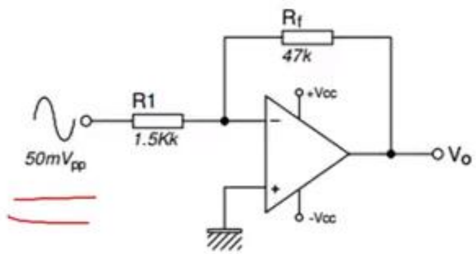
$$A_V = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-10}{1} = -10$$

$$V_O = A_V.V_i = -10.(0,5V) = -5V$$

- Terslenmiş yükselteç devresi
- Kazanç=-Rf/R1

Örnek

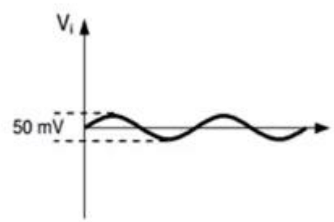
Örnek 2.2: Şekildeki devrenin kazancını ve çıkış sinyalinin değerini hesaplayın.

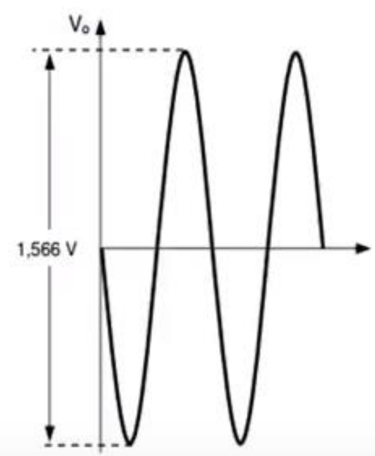


$$A_V = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-47}{1,5} = -31,33 \qquad V_O = A_V . V_i = -31,33.(50\,mV_{pp}) = -1,566\,V_{pp}$$

Çıkıştan, tepeden tepeye 1,566 V' luk bir sinüs sinyal alınacak ve girişle arasında 180° faz farkı olacaktır. Giriş ve çıkış sinyalleri aşağıda görülmektedir.

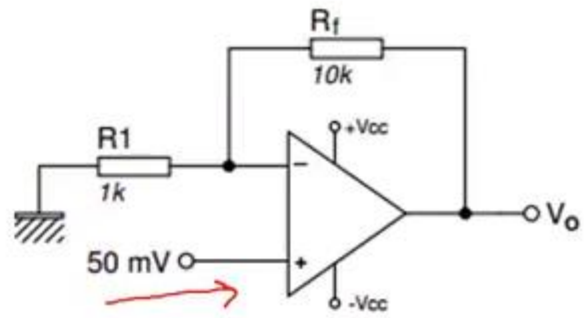
Çıkıştan, tepeden tepeye 1,566 V' luk bir sinüs sinyal alınacak ve girişle arasında 180° faz farkı olacaktır. Giriş ve çıkış sinyalleri aşağıda görülmektedir.





Örnek

Şekildeki devrenin kazancını ve çıkış geriliminin değerini hesaplayın.

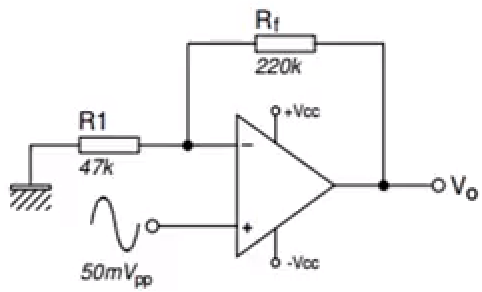


$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{10}{1} = 11$$

$$V_O = A_v . V_i = 11.(50\,mV) = 550\,mV$$

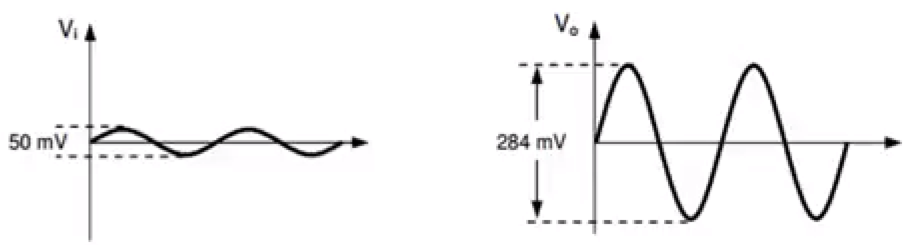
Örnek

Şekildeki devrenin kazancını ve çıkış sinyalinin değerini hesaplayın.



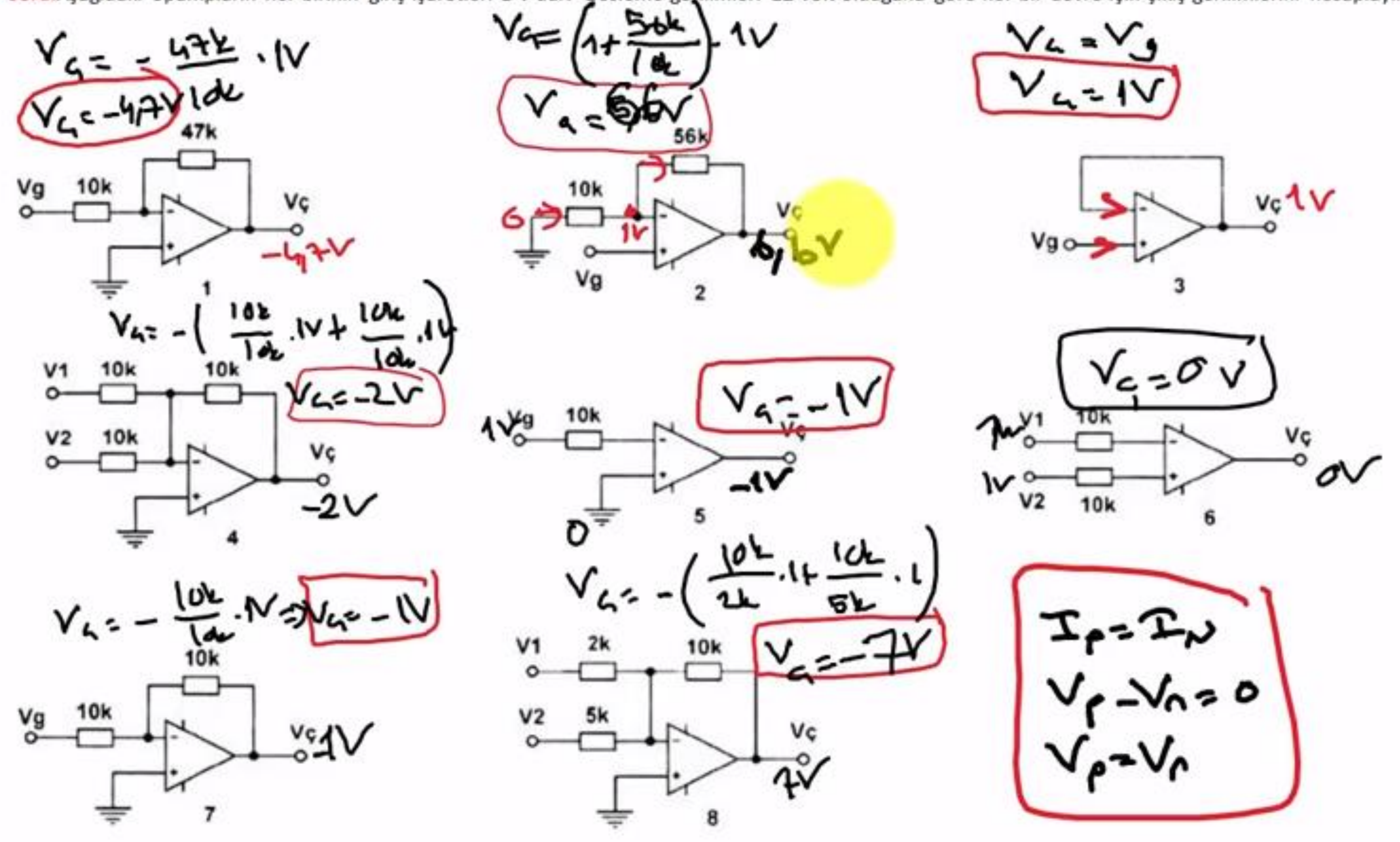
$$A_V = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{220}{47} = 5,68 \qquad V_O = A_V . V_i = 5,68.(50\,mV_{pp}) = 284\,mV_{pp}$$

Çıkıştan tepeden tepeye 284 mV' luk bir sinüs sinyal alınacak ve girişle arasında faz farkı olmayacaktır. Giriş ve çıkış sinyallerinin şekilleri aşağıda görülmektedir.



Örnekler

Soru:Aşağıdaki opampların her birinin giriş işaretleri 1 V dur. Besleme gerilimleri 12 volt olduğuna göre her bir devre için çıkış gerilimlerini hesaplayınız.

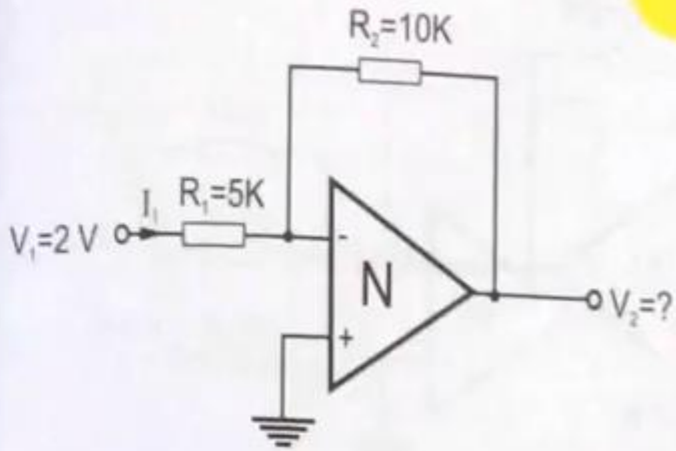


Bir önceki örnekte

- 1- Eviren yükselteç devresi
- 2- Evirmeyen yükselteç devresi
- 3- Gerilim izleyici op amp devresi
- 4- Eviren girişi olan toplayıcı yükselteç devresi
- 5- Karşılaştırıcı op amp devresi
- 6- Karşılaştırıcı op amp devresi
- 7- Eviren girişli yükselteç devresi
- 8- Eviren girişli toplayıcı yükselteç devresi

Örnek

ÖRNEK 1: Aşağıdaki şekilde verilen faz çeviren op-amp'ın çıkış gerilimini ve kazancını bulunuz.



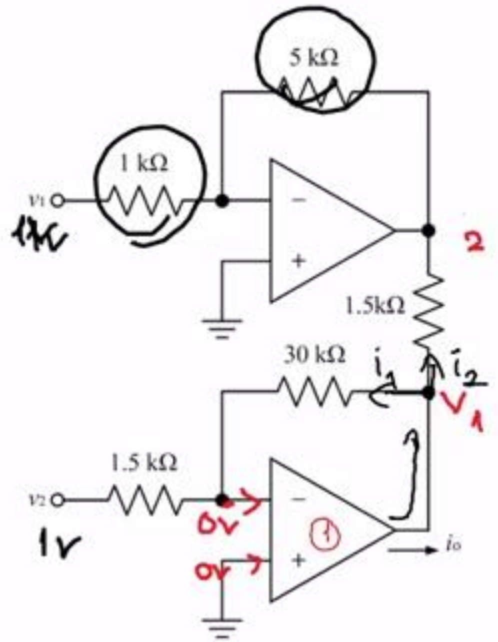
$$V_2 = -V_1.\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = -2.\left(\frac{10}{5}\right) = -2\ .\ 2 = -4\ V$$

$$K = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10}{5} = -2 \quad \text{veya,}$$

$$K = -\frac{V_2}{V_1} = \frac{(-4)}{2} = -2$$

example 1:

Determine the output current i_o when $V_1 = 1V$ and $V_2 = 1\,V$



$$i_o = i_1 + i_2$$

$$i_1 = \frac{V_1 - 0}{30k} \qquad i_2 = \frac{V_1 - V_2}{1,5k}$$

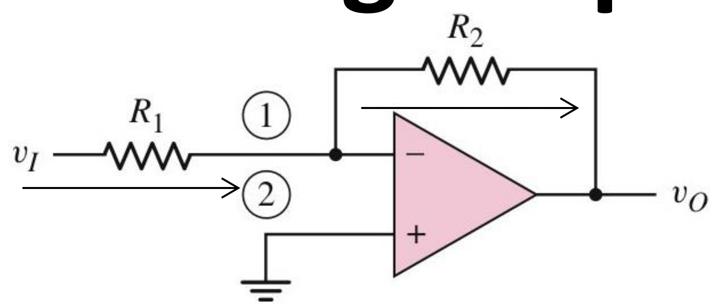
$$V_1 = -\frac{30k}{1,5k} \cdot 1V \Rightarrow V_1 = -20\,V$$

$$V_2 = -\frac{5k}{1k} \cdot 1V \Rightarrow V_2 = -5V$$

$$i_o = \frac{-20-0}{30k} + \frac{(-20)-(-5V)}{1,5k}$$

$$i_o = -\frac{20}{30k} + \frac{(-15)}{\underset{(20)}{1,5k}} \Rightarrow i_o = \frac{-20-300}{30k} \Rightarrow i_o = -10,667\ mA$$

Inverting Amplifier



Op-amp as an inverting amplifier

Voltage at node 1 (inverting) = voltage at node 2 (non-inverting)

KCL at node 1:

$(V_i - 0) / R_1 = (0 - V_o) / R_2$

$V_i / R_1 = - V_o / R_2$

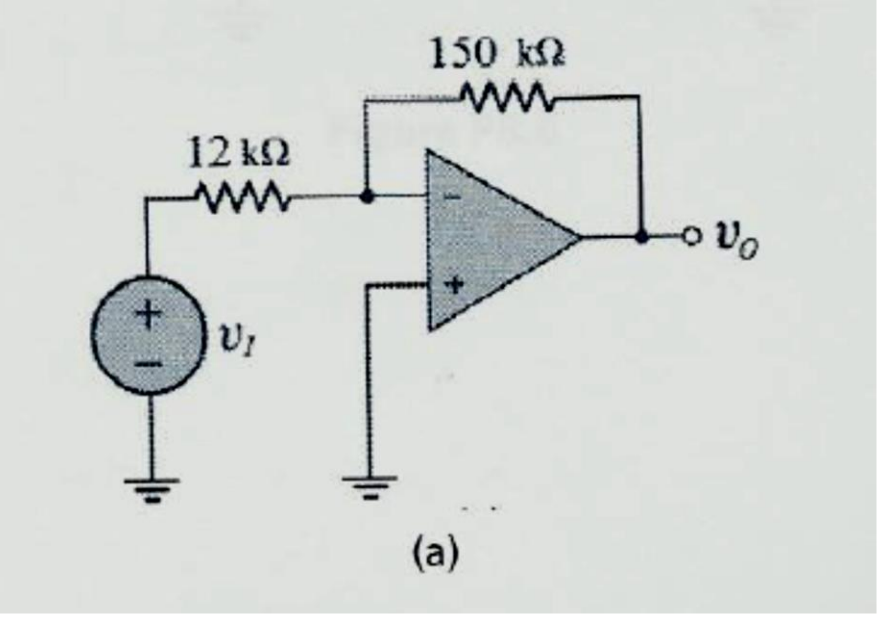
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Voltage gain, $A_v = \frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$

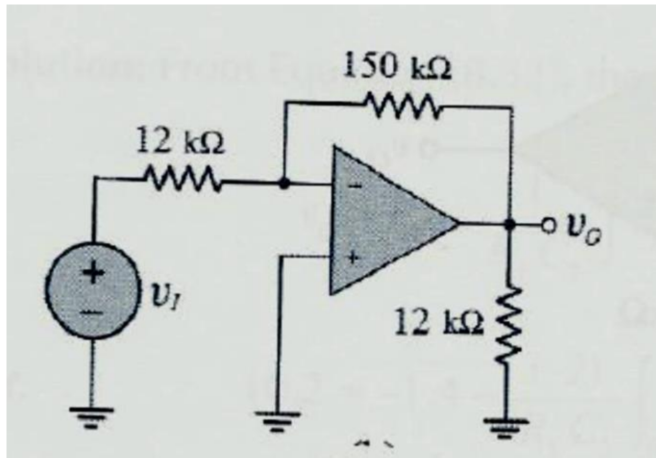
Input Resistance, $R_i = \frac{V_i}{I_1} = R_1$

Output resistance, $R_o = \frac{V_o}{I_2} = R_2$

Exercise 8.3



Gain = - (R_2 / R_1) = -(150/12) = **-12.5**



(b)

Can the voltage gain be calculated using the same formula?
Try and use the same method in deriving V_o/V_i

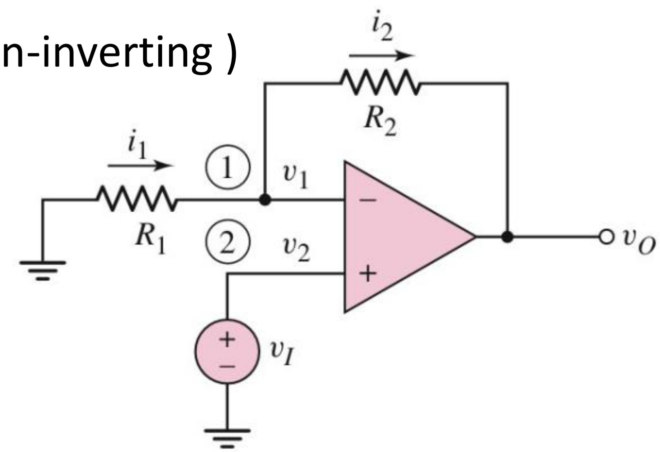
Non - Inverting Amplifier

Voltage at node 1 (inverting) = voltage at node 2 (non-inverting)
KCL at node 1:
$(0 - V_i) / R_1 = (V_i - V_o) / R_2$

$-(V_i / R_1) = (V_i / R_2) - (V_o / R_2)$

$V_o / R_2 = (V_i / R_2) + (V_i / R_1) = V_i \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right)$

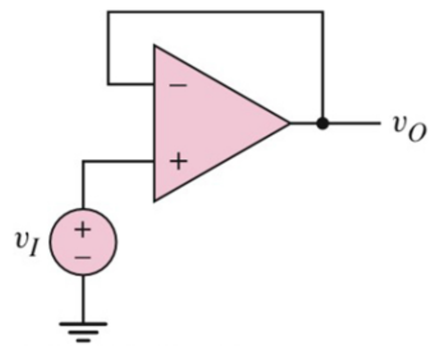
$V_o / V_i = R_2 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right)$



Noninverting amplifier

Voltage gain, $A_v = \frac{V_0}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

Voltage Follower / Buffer Amplifier

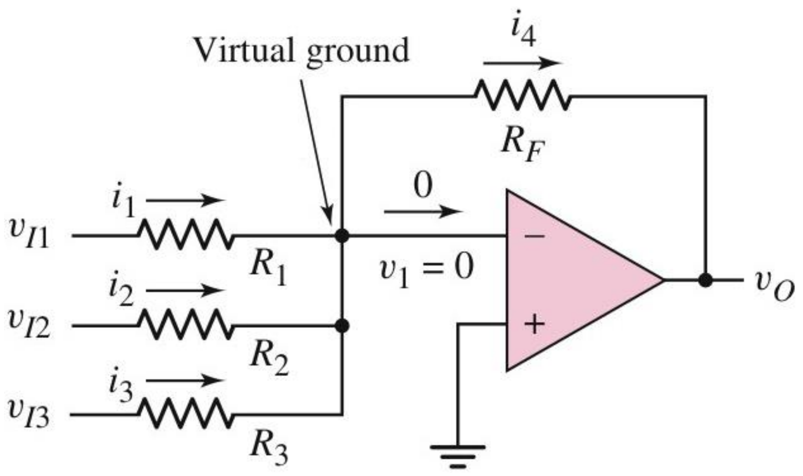


A voltage follower circuit/Buffer amplifier

$V_o = V_i$

Hence, gain = 1

Summing Amplifier



Similarly,

Using KCL at the input node

$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 - 0 = 0$$

Output voltage

$$V_0 = -R_F\left(\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} + \frac{V_{i3}}{R_3}\right)$$

Example 8.2

Design a summing amplifier as shown in figure to produce a specific output signal, such that **$v_o = 1.25 - 2.5 \cos \omega t$** volt. Assume the input signals are **$v_{I1} = -1.0$ V, $v_{I2} = 0.5 \cos \omega t$** volt. Assume the feedback resistance $R_F = 10\ k\Omega$

Solution: output voltage

$$v_0 = -R_F\left(\frac{v_{I1}}{R_1} + \frac{v_{I2}}{R_2} + \frac{v_{I3}}{R_3}\right) = -R_F\left[\frac{(-1)}{R_1} + \frac{0.5\cos\omega t}{R_2}\right]$$

Or, $$1.25 - 2.5\cos\omega t = R_F\left[\frac{1}{R_1} - \frac{0.5\cos\omega t}{R_2}\right]$$

Or, $$1.25 - 2.5\cos\omega t = \frac{R_F}{R_1} - \left(\frac{R_F}{R_2}\right)(0.5\cos\omega t)$$

So, the DC input line contains the resistance R_1 can be calculated as

$$\frac{R_F}{R_1} = 1.25 \qquad \text{Or,} \qquad R_1 = \frac{R_F}{2.5} = \frac{10}{1.25} = 8\ \text{k}\Omega$$

Similarly the time varying signal input line contains the resistance R_2 as

$$\left(\frac{R_F}{R_2}\right)(0.5\cos\omega t) = 2.5\cos\omega t \qquad \text{Or,} \qquad R_2 = R_F \times \frac{0.5\cos\omega t}{2.5\cos\omega t} = 10 \times \frac{0.5}{2.5} = 2\ \text{k}\Omega$$

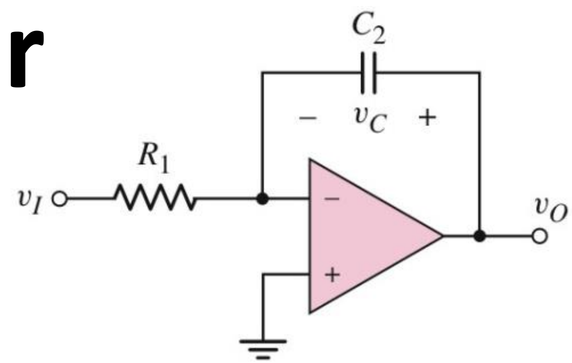
Other Op-Amp Applications

Integrator

Output voltage, $$v_0 = -\frac{1}{R_1 C_2}\int v_I \, dt$$

If the capacitor has some initially voltage, V_C

$$v_0 = V_C - \frac{1}{R_1 C_2}\int v_I \, dt$$



Integrator circuit

EXAMPLE 8.3

An integrator circuit as shown in figure has a voltage $V_C = -1.4$ V across the capacitor at time $t = 0$. A step input voltage $v_I = -2$ V is applied at time $t = 0$. Determine the *RC* time constant necessary such that the output voltage reaches +10.2 V at time $t = 5$ ms.

Solution: output voltage

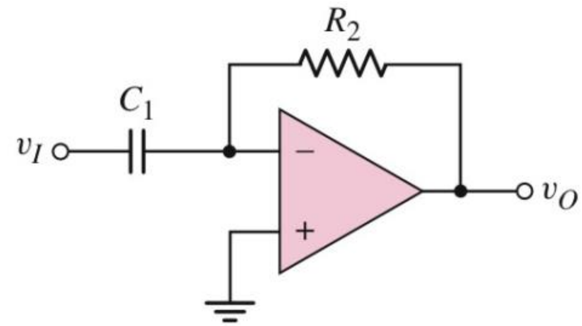
$$v_0 = V_C - \frac{1}{R_1 C_2}\int v_I \, dt = V_C - \frac{1}{R_1 C_2}\int_0^5 v_I \, dt$$

Or, $$10.2 = -1.4 - \frac{(-2)}{R_1 C_2}\int_0^5 dt = -1.4 + \frac{2}{R_1 C_2}[5]$$

Or, $R_1 C_2 = 0.862$ ms.

Differentiator

Output voltage, $v_0 = -R_2 C_1 \frac{dv_I}{dt}$



Differentiator circuit

EXAMPLE 8.4

Determine the output voltage of a differentiator circuit as shown in figure, assume that the input voltage $v_I = 3.5\ \cos(100\pi\, t)$ volt and the time constant RC = 1.5 ms.

Solution: output voltage

$$v_0 = -R_2 C_1 \frac{dv_I}{dt} = -(1.5 \times 10^{-3}) \frac{d[3.5\ \cos(100\pi\, t)]}{dt}$$

Or, $v_0 = -(1.5 \times 10^{-3})[-3.5 \times 100\pi \times\ \sin(100\pi\, t)]$

Or, $v_0 = 1.65\, \sin(100\pi\, t)$ volt

Calculating Gain and Design Questions

INVERTING

Voltage gain, $A_v = \frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$

NON - INVERTING

Voltage gain, $A_v = \frac{V_0}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

Calculating Output and Design Questions

SUMMING AMPLIFIER

Output voltage

$$V_0 = -R_F\left(\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} + \frac{V_{i3}}{R_3}\right)$$

DIFFERENTIATOR AMPLIFIER

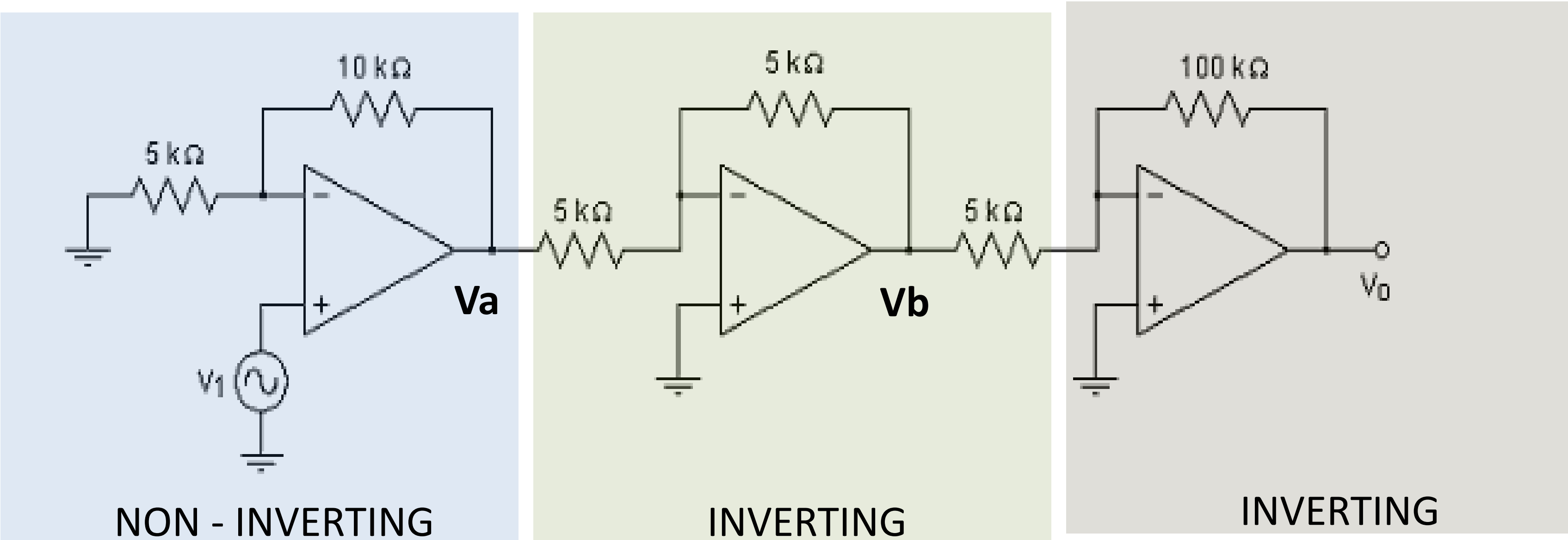
Output voltage, $v_0 = -R_2 C_1 \frac{dv_I}{dt}$

INTEGRATOR AMPLIFIER

Output voltage, $v_0 = -\frac{1}{R_1 C_2}\int v_I \, dt$

If the capacitor has some initially voltage, V_C

$$v_0 = V_C - \frac{1}{R_1 C_2}\int v_I \, dt$$



Calculate the input voltage if the final output, V_O is 10.08 V.

Have to work backwards:

Vo = -(100/5) Vb

10.08 = -20 Vb

Vb = -0.504 V

Then:

Vb = -(5/5) Va

-0.504 = - Va

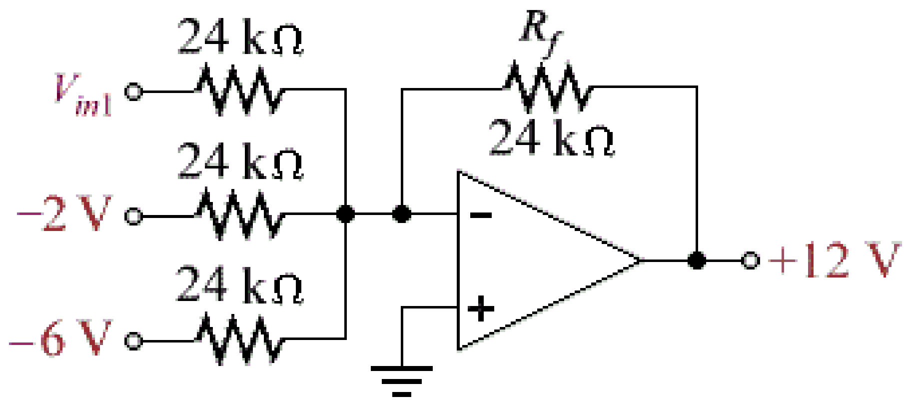
Va = 0.504 V

Finally:

Va = (1 + 10/5) V_1

0.504 = 3V_1

<u>V_1 = 0.168 V</u>



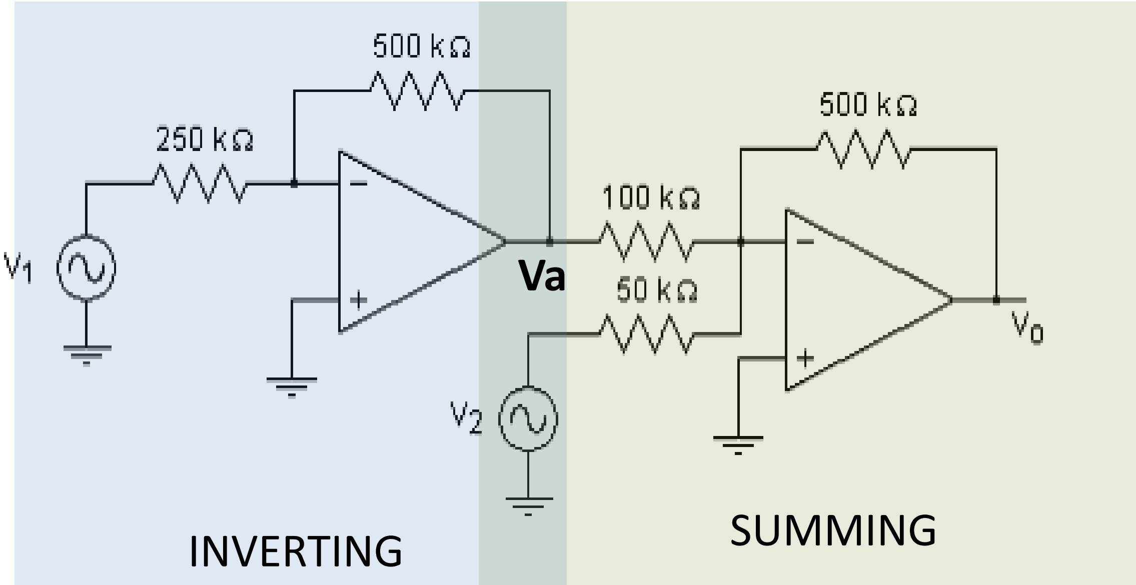
What is the value of V_{in1} from the figure above?

$12 = - 24 \,[\, V_{in1} / 24 + (-2) / 24 + (-6) / 24 \,]$

$12 = - [\, V_{in1} - 2 - 6 \,]$

$12 = - V_{in1} + 2 + 6$

$\underline{V_{in1} = - 4\ V}$



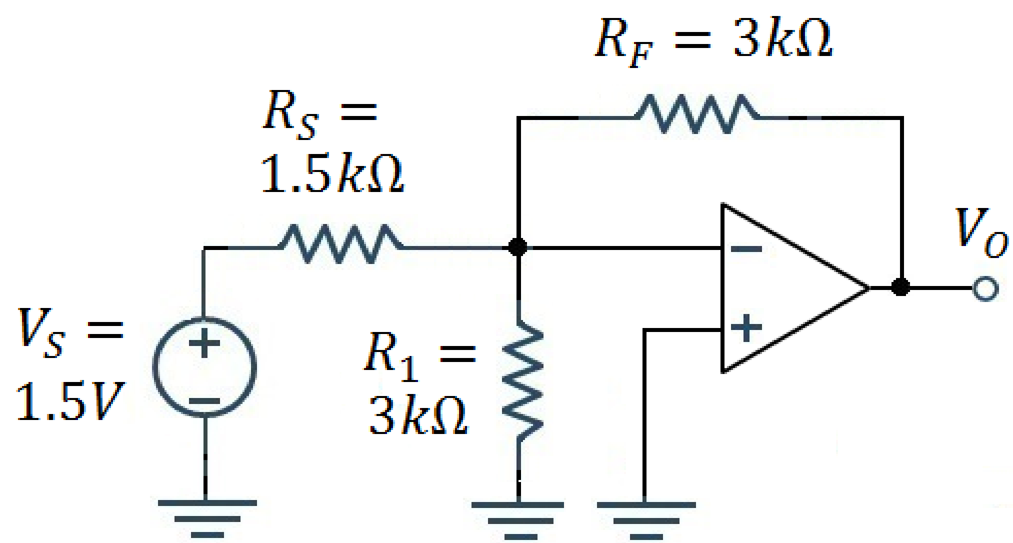
Calculate the output voltage, V_O if $V_1 = V_2 = 700$ mV

Va = -(500/250) 0.7
Va = -1.4 V

→

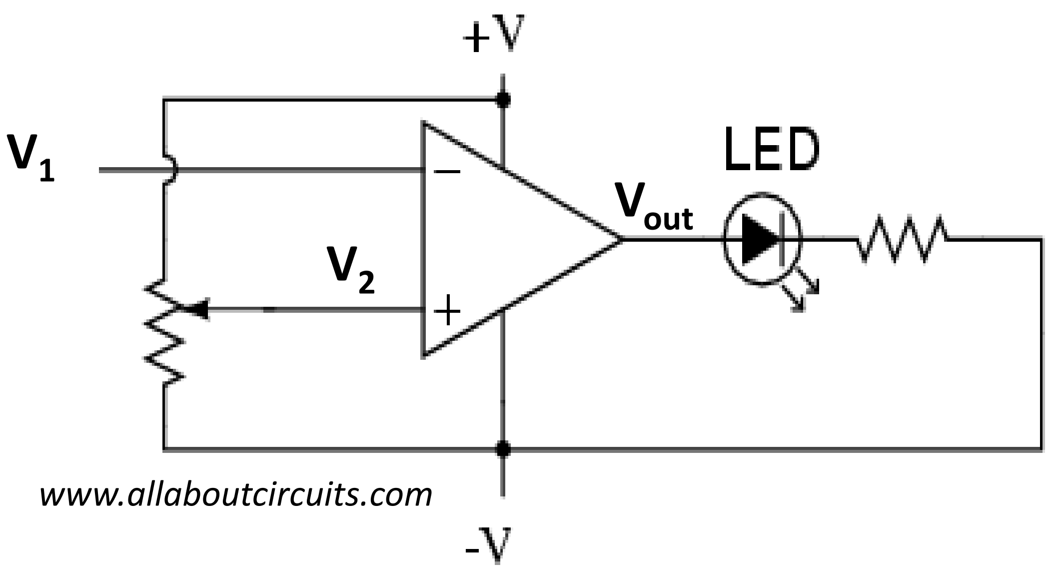
Then:

Vo = - 500 [V_a / 100 + V_2 / 50]
Vo = - 500 [-1.4 / 100 + 0.7 / 50]
Vo = 0 V



Calculate the output voltage V_O of the operational amplifier circuit as shown in the figure.

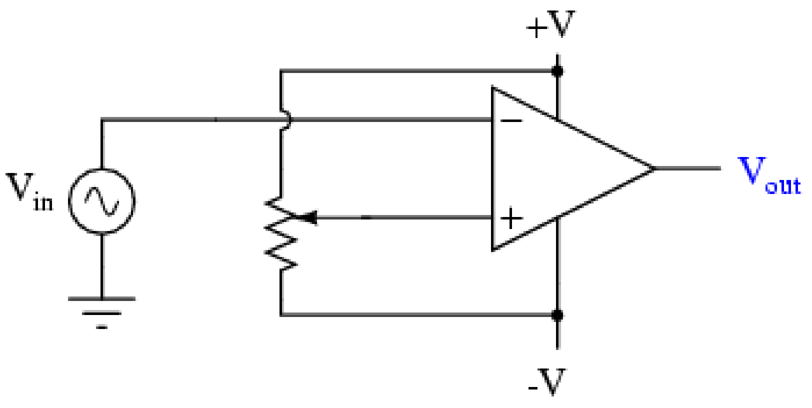
Comparator



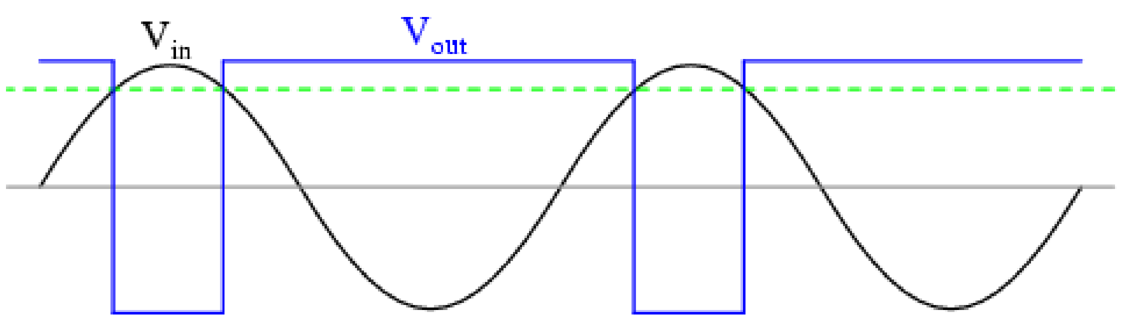
$$V_{\mathrm{out}} = \begin{cases} V_{\mathrm{S}+} & V_1 > V_2 \\ V_{\mathrm{S}-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$

Uses: Low-voltage alarms, night light controller

Pulse Width Modulator



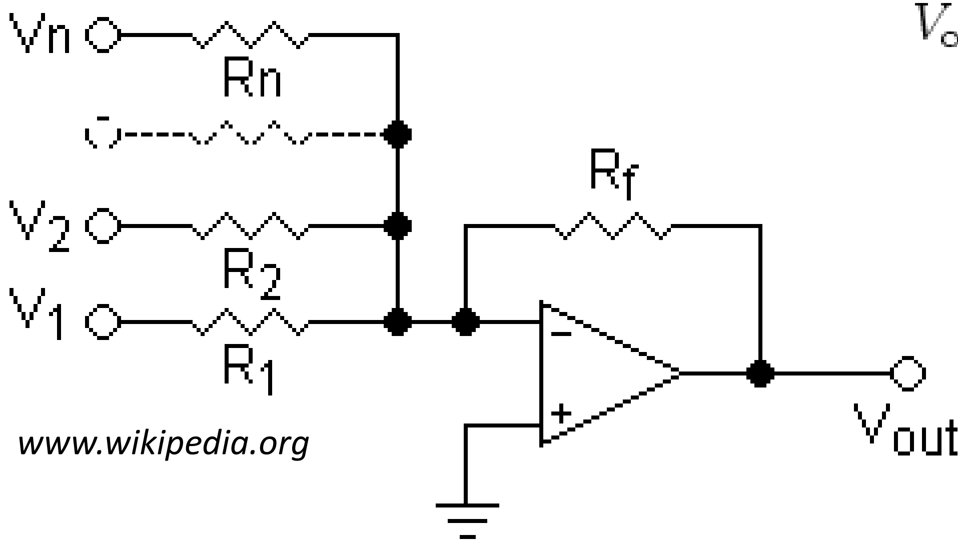
- Output changes when
  - $V_{in} \sim= V_{pot}$
- Potentiometer used to vary duty cycle



www.allaboutcircuits.com

Uses: Motor controllers

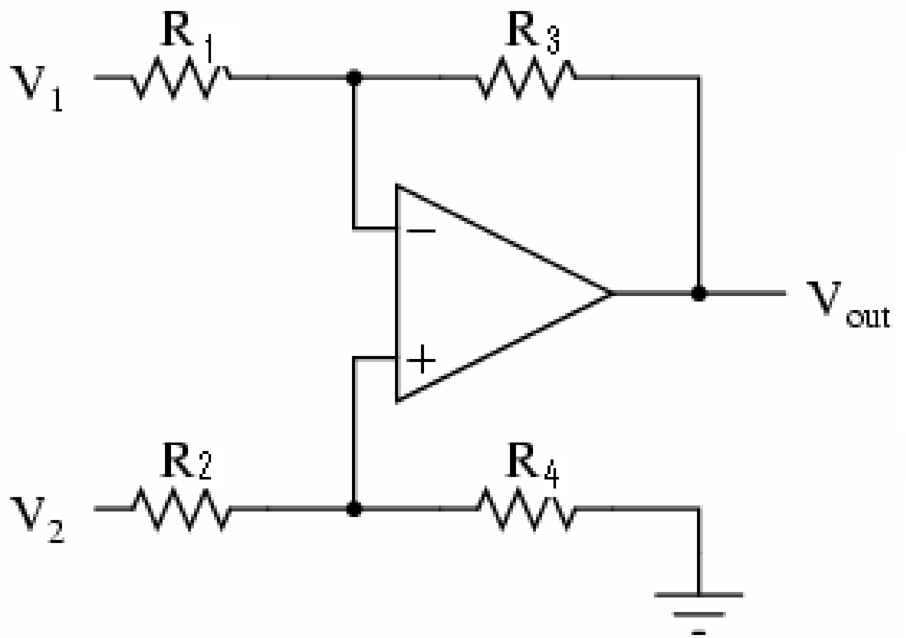
Summation



$$V_{\mathrm{out}} = -R_{\mathrm{f}}\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \cdots + \frac{V_n}{R_n}\right)$$

Uses: Add multiple sensors inputs until a threshold is reached.

Difference

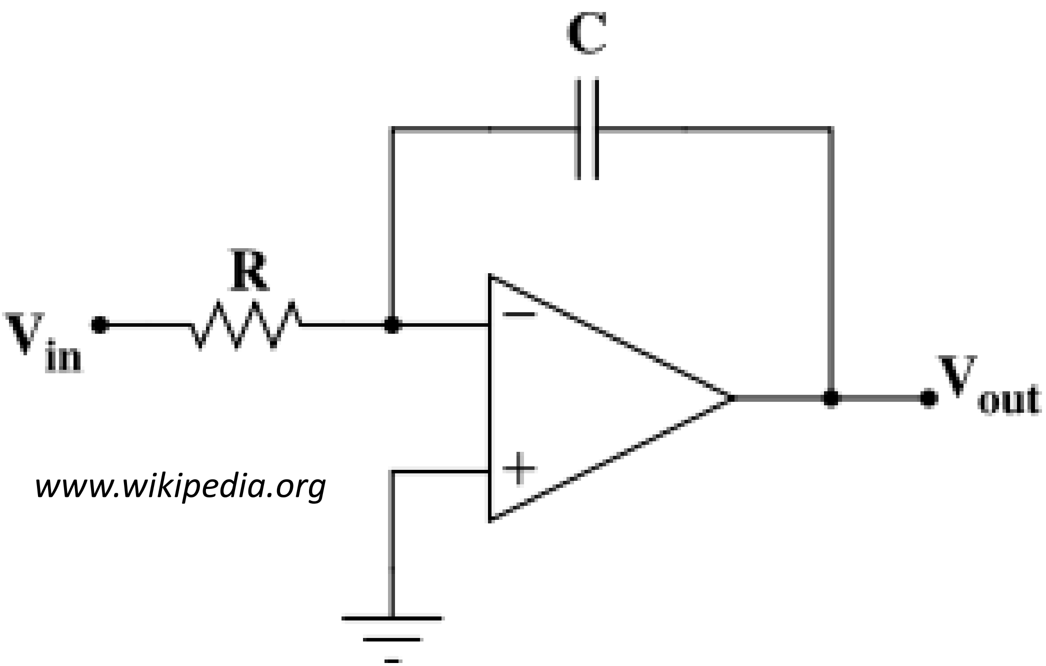


$$V_{out} = \frac{V_2(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} - \frac{V_1 R_3}{R_1}$$

If all resistors are equal:

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

Integrating Op-Amp

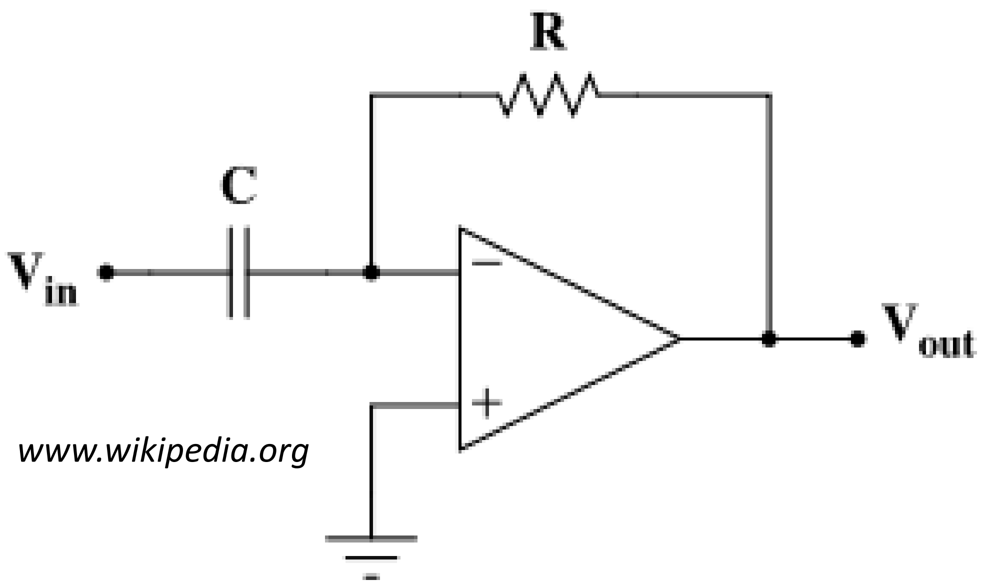


www.wikipedia.org

$$V_{\text{out}} = \int_0^t -\frac{V_{\text{in}}}{RC}\,dt + V_{\text{initial}}$$

Uses: PID Controller

Differentiating Op-Amp

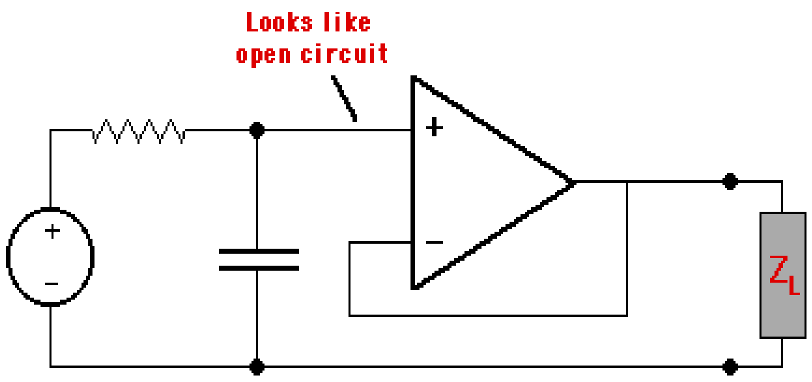


$$V_{\mathrm{out}} = -RC\left(\frac{dV_{\mathrm{in}}}{dt}\right)$$

www.wikipedia.org

(where V_{in} and V_{out} are functions of time)

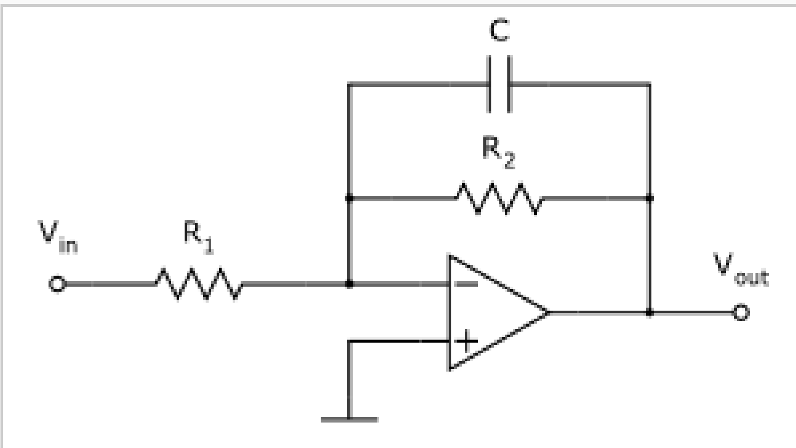
Filters



- Decouple the low-pass RC filter from the load.

Uses: Simple audio. Remove frequencies over 20kHz (audible)

Low-pass Filter (active)



An active low-pass filter

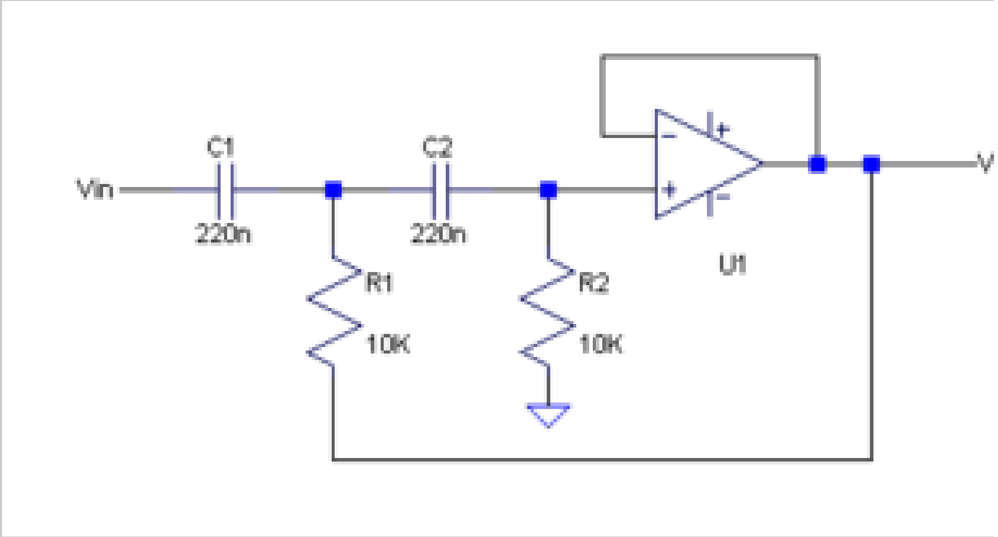
www.wikipedia.org

- Cutoff frequency

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

- This works because the capacitor needs time to charge.

High pass filter (active)

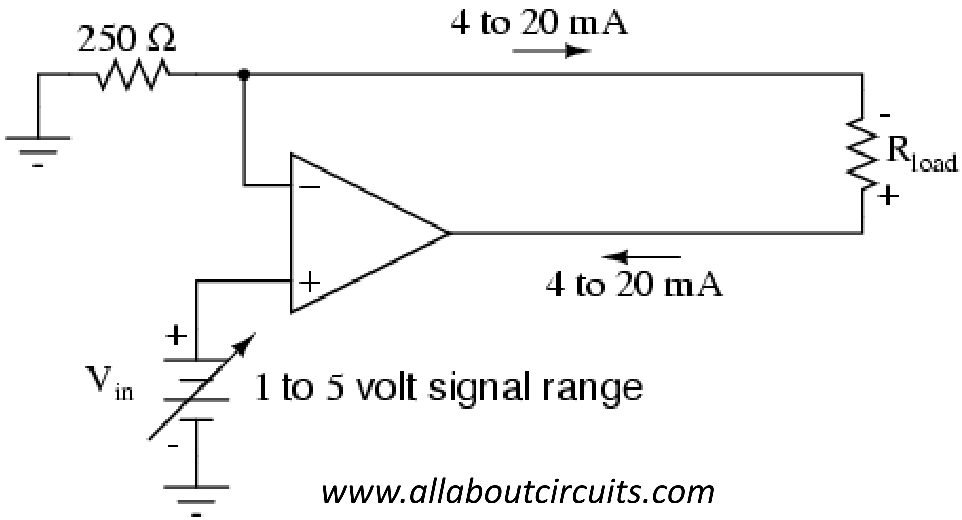


An example of high-pass active filter. The operational amplifier is used as a buffer amplifier.

www.wikipedia.org

Band-pass filter cascades both high-pass and low-pass!

Transconductance Amp



- Precision 250Ω resistor
- 1V / 250 Ω = 4mA
- 5V / 250 Ω = 20mA
- R_{Load} doesn't matter, just as long as op-amp has high enough voltage rails

Uses:

- In: Sensors (temp, pressure, etc),
- Out : Radios (Variable Freq Osc)