

# Elektrik Devre Temelleri

2024-2025 Bahar Dönemi

Hafta 6

28 Mart 2025

Sibel ÇİMEN

Umut Engin AYTEN

# Devre Elemanları

## DEVRE ELEMANLARININ SINIFLANDIRILMASI

1. Enerji fonksiyonuna bakarak devre elemanlarının sınıflandırılması:

**Aktif Eleman:** Tanım bağıntısını sağlayan hiç değilse bir akım ve bir gerilim fonksiyonu için ve hiç değilse bir  $t$  anı için enerjisi negatif olan elemana denir.

$$W(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau)i(\tau)d\tau < 0$$

Örnek:  $v(t) = i^2(t)$  Elamanı aktif bir eleman mıdır?

$$W(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau)^3 d\tau$$

$i(t) < 0$  için  $W(t) < 0$  olacağına göre bu eleman aktif elemandır.

**Pasif Eleman:** Tanım bağıntısını sağlayan tüm akım ve gerilim fonksiyonları ve her  $t$  anı için enerjisi pozitif veya 0 olan elemana pasif eleman denir.

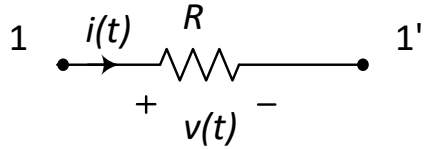
**Kayıplı Eleman:** Tüm akım ve gerilim fonksiyonları ve her  $t$  anı için enerjisi ve enerjisinin zamana göre türevi pozitif veya 0 olan pasif elemana kayıplı pasif eleman denir.

**Kayıpsız Eleman:** Hiç değilse bir akım ve gerilim fonksiyon ve  $t = \infty$  için enerjisi 0 olan pasif elemana kayıpsız pasif eleman denir.

# Devre Elemanları

## Direnç İki Uçluları

### 1. Lineer Zamanla Değişmeyen Direnç:

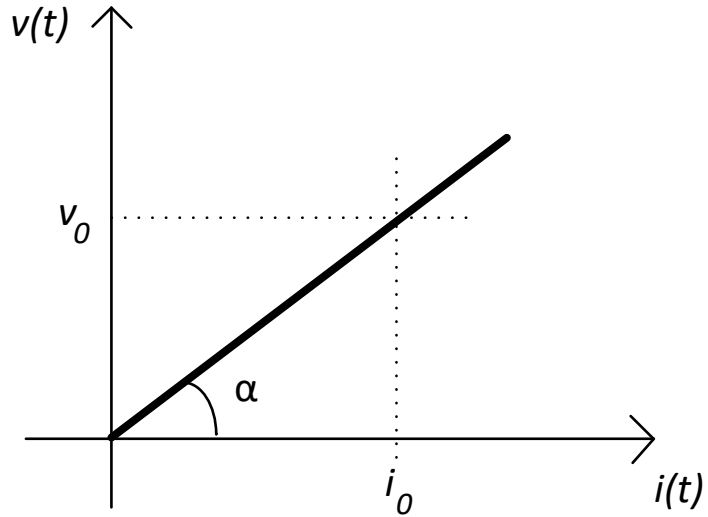


$$v(t) = Ri(t)$$

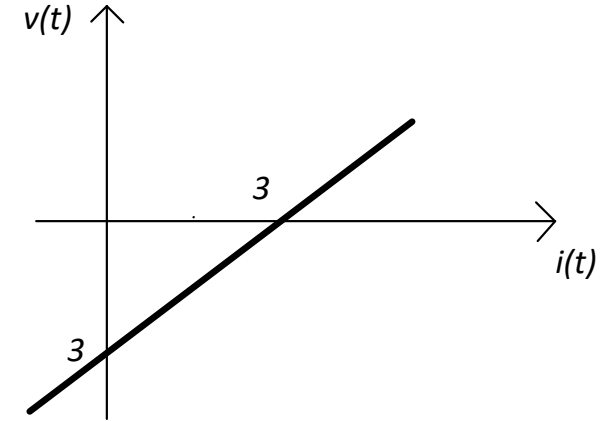
$$R = \frac{v(t)}{i(t)} : u\grave{c} \text{ denkleme}$$

Lineer olması çarpımsallık ve toplamsallık özelliklerini sağlaması demektir.

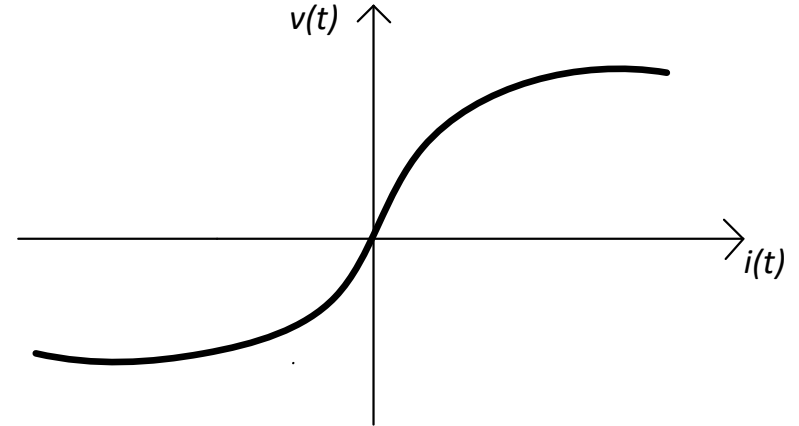
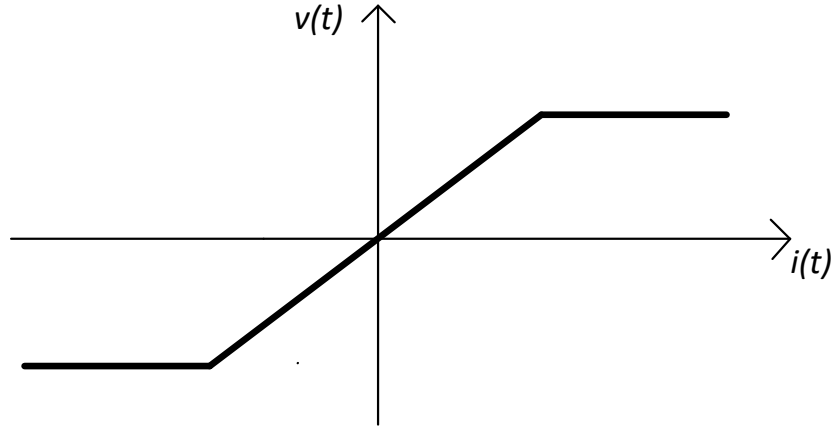
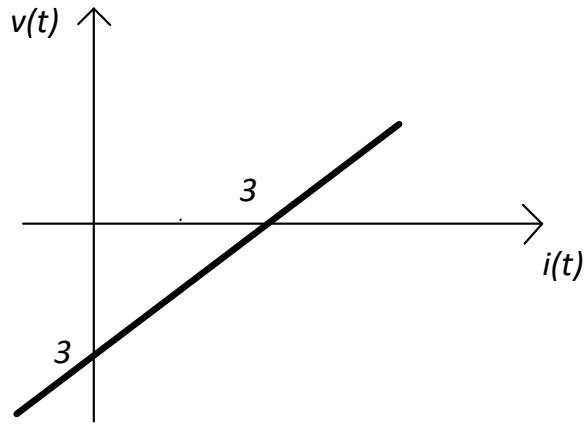
# Direnç İki Uçlularını



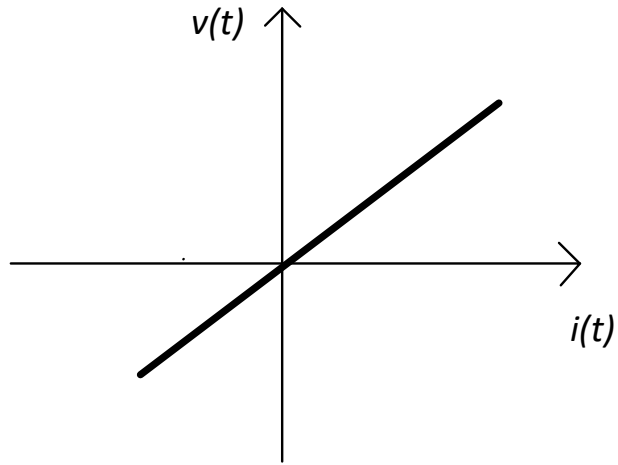
$$m = \tan \alpha = \frac{v_0}{i_0} = R$$



# Direnç İki Uçlulararı

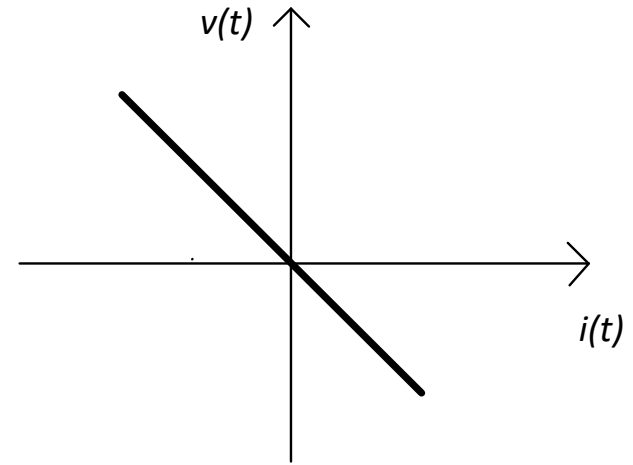


# Direnç İki Uçlulararı



$$m = R > 0$$

Pasif, devrede güç tüketen eleman

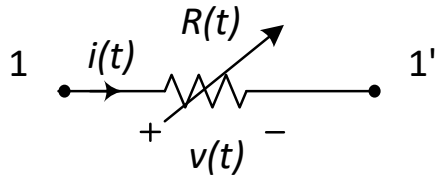


$$m = R < 0$$

Aktif, devrede güç üreten eleman

# Direnç İki Uçluları

## 2. Lineer Zamanla Değişen Direnç:

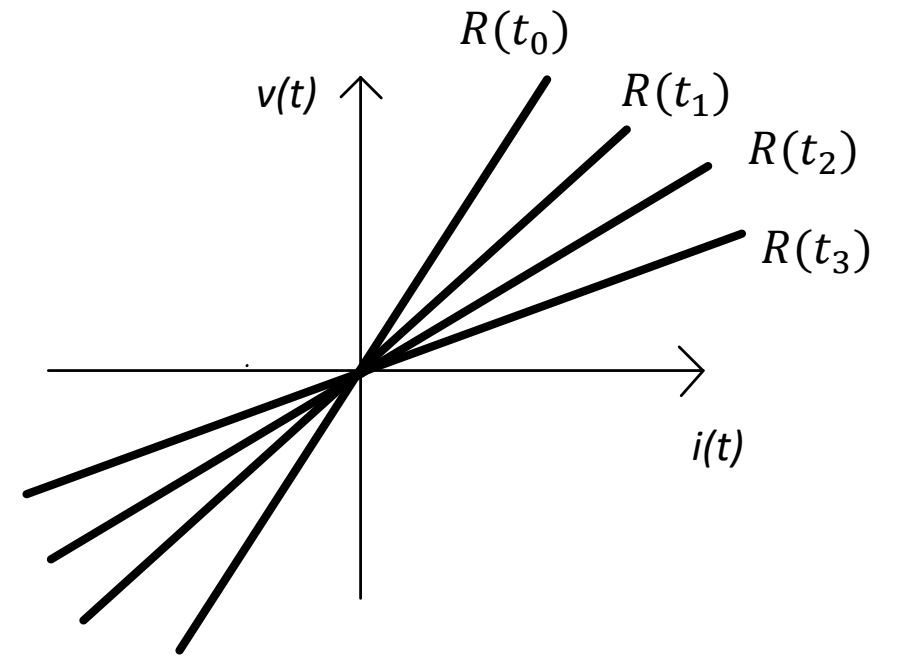


$$v(t) = R(t)i(t)$$

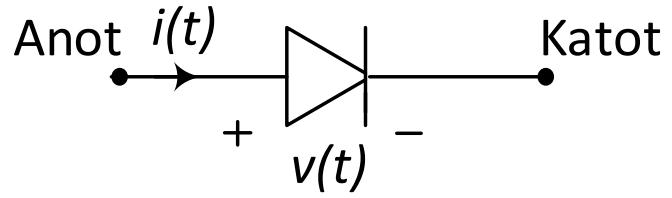
$$R = m \cdot e^{at}$$

$$R = \sin(\omega t)$$

$$R = m \cdot t$$

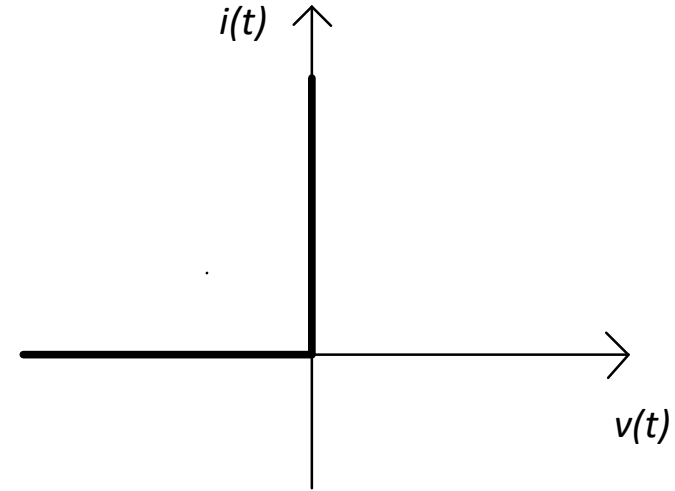


# Diyot Elemanı



$$v(t) \leq 0 \implies i(t) = 0$$

$$i(t) \geq 0 \implies v(t) = 0$$

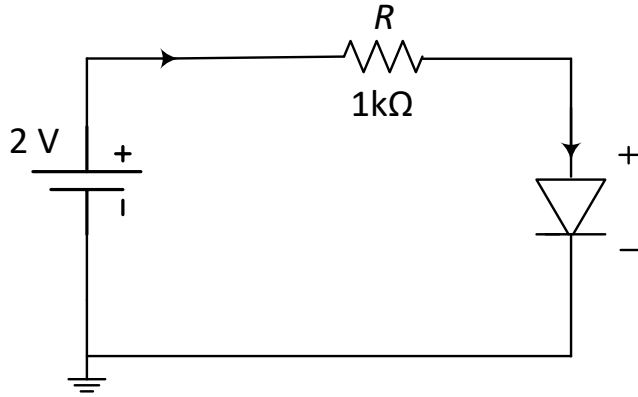


$v_{anot} > v_{katot}$  olmalıdır.



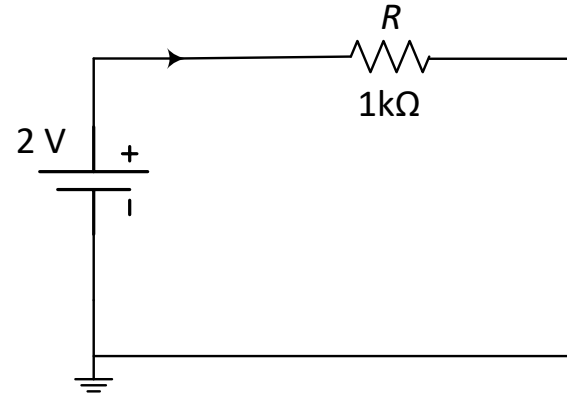
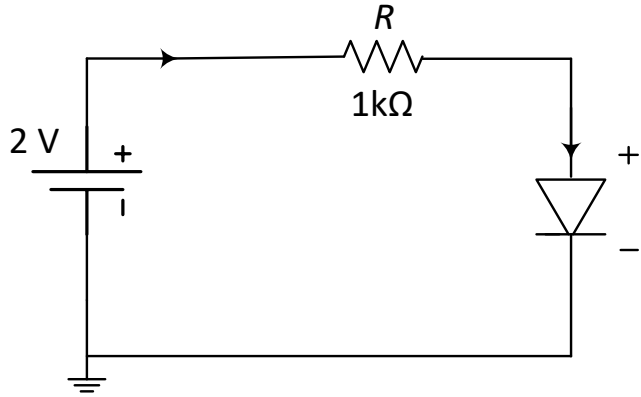
# Diyot Elemanı

$v_{anot} > v_{katot}$  olmalıdır.



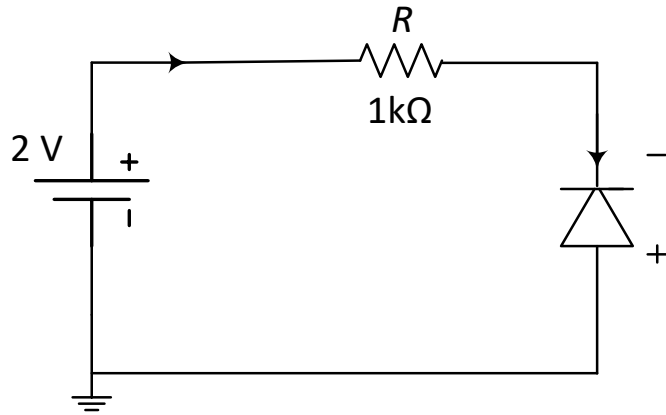
# Diyot Elemanı

$v_{anot} > v_{katot}$  olmalıdır.



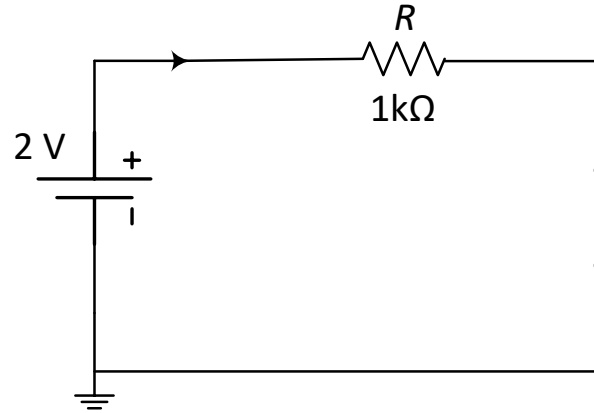
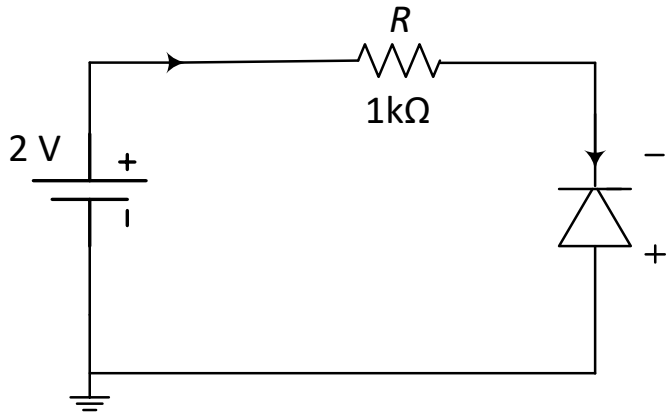
# Diyot Elemanı

$v_{anot} > v_{katot}$  olmalıdır.

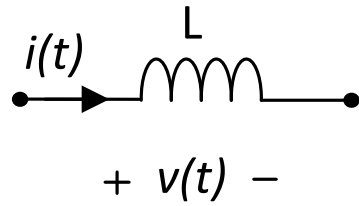


# Diyot Elemanı

$v_{anot} > v_{katot}$  olmalıdır.

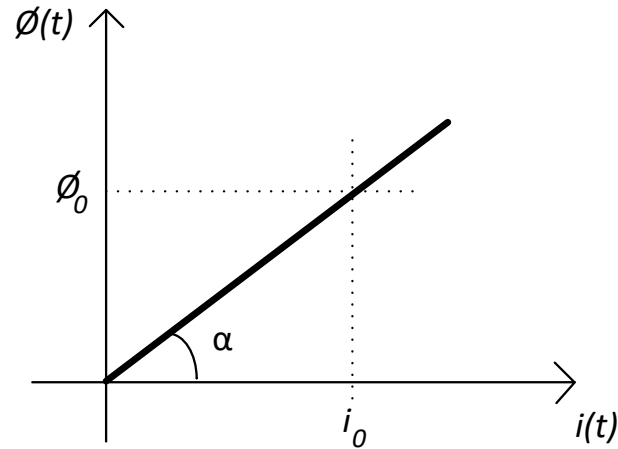


# Endüktör İki Uçlusu



$$\phi(t) = L \cdot i(t)$$

## 1. Lineer Zamanla Değişmeyen Endüktör:



$$m = \tan \alpha = \frac{\phi_0}{i_0} = L$$

# Endüktör İki Uçlusu

$$\phi(t) = L \cdot i(t)$$

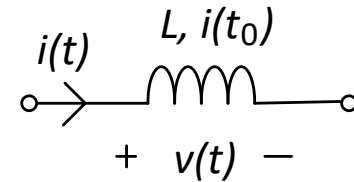
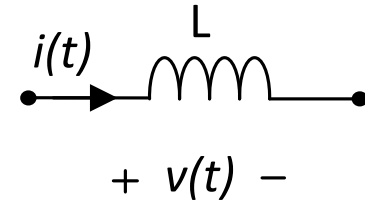
$$i(t) = \frac{1}{L} \phi(t)$$

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau = \frac{1}{L} \left[ \int_{-\infty}^{t_0} v(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \right]$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \left[ \phi(t_0) + \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \right]$$

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau$$



# Endüktör İki Uçlusu

$$\phi(t) = L \cdot i(t)$$

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

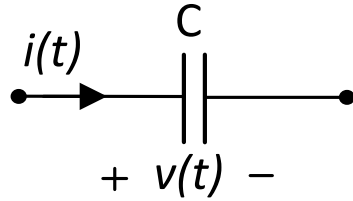
Akım-gerilim tanım bağıntıları diferansiyel ya da integral şeklinde olup cebirsel olmayan elemanlara dinamik elemanlar denir. Bu elemanlar üzerlerinde enerji depo eder.

Güç:  $p(t) = v(t)i(t)$

Enerji:  $w_L(t) = \int_{-\infty}^t p(x)dx = \frac{1}{2}Li(t)^2$

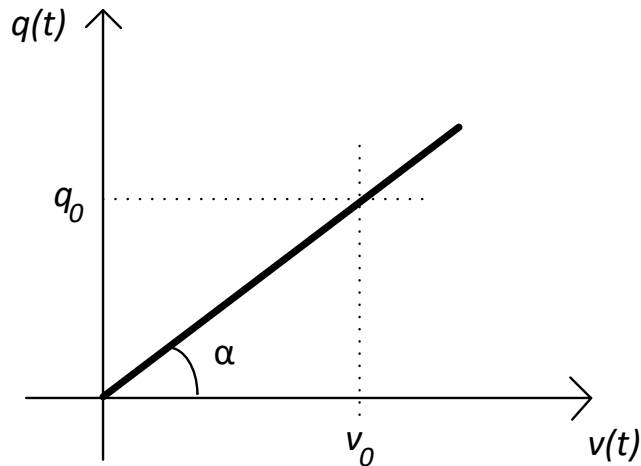
$$L > 0 \text{ için } w_L(t) > 0$$

# Kapasitör İki Uçlusu



$$q(t) = C \cdot v(t)$$

## 1. Lineer Zamanla Değişmeyen Kapasitör:



$$m = \tan \alpha = \frac{q_0}{v_0} = C$$



# Kapasitör İki Uçlusu

$$q(t) = C \cdot v(t)$$

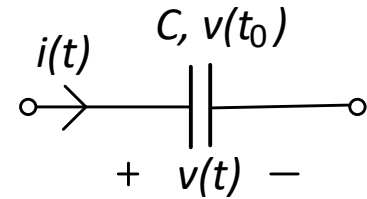
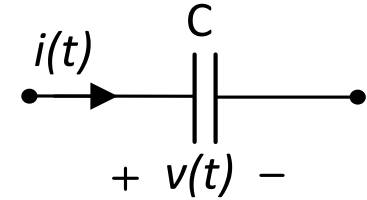
$$v(t) = \frac{1}{C} q(t)$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau = \frac{1}{C} \left[ \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \right]$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \left[ q(t_0) + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \right]$$

$$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$$



# Kapasitör İki Uçlusu

$$q(t) = C \cdot v(t)$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

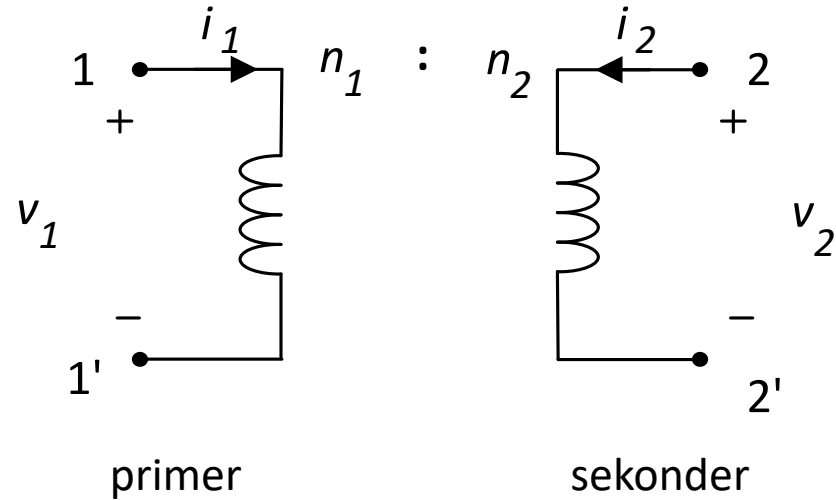
Akım-gerilim tanım bağıntıları diferansiyel ya da integral şeklinde olup cebirsel olmayan elemanlara dinamik elemanlar denir. Bu elemanlar üzerlerinde enerji depo eder.

Güç:  $p(t) = v(t)i(t)$

Enerji:  $w_C(t) = \int_{-\infty}^t p(x)dx = \frac{1}{2} C v(t)^2$

$$C > 0 \text{ için } w_C(t) > 0$$

# İdeal Transformatör Elemanı



Örnek:

$$n_2 = 10T$$

$$n_1 = 1T$$

$$p_1 = -p_2$$

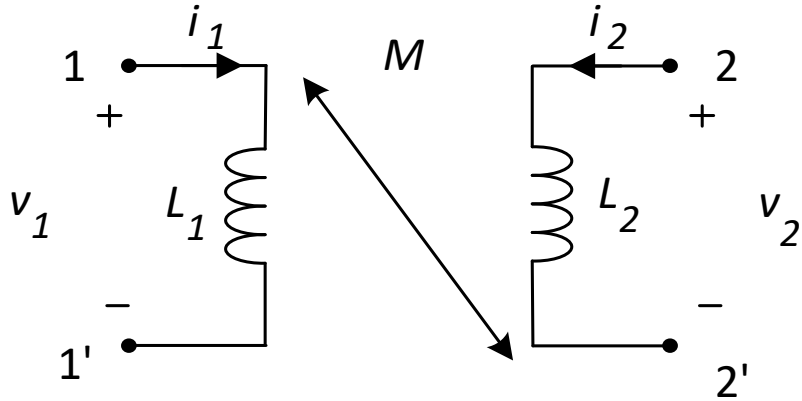
$$v_1 i_1 = -v_2 i_2$$

$$v_2 = \frac{n_2}{n_1} v_1$$

$$i_2 = -\frac{n_1}{n_2} i_1$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{-i_2}{i_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

# İdeal Olmayan Transformatör Elemanı



$M$ : karşılıklı endüktans katsayısı

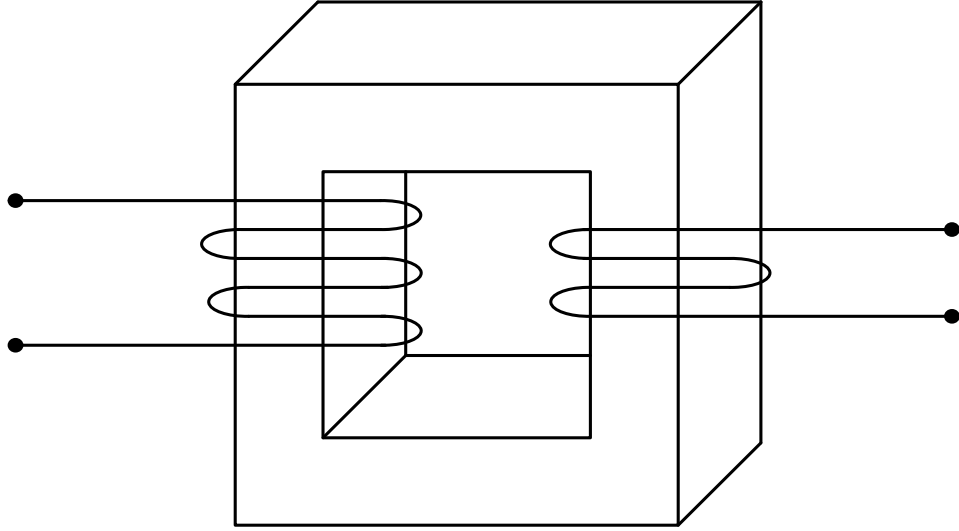
$k$ : karşılıklı etkileşim katsayısı

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}$$

$$v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}$$

# İdeal Olmayan Transformatör Elemanı

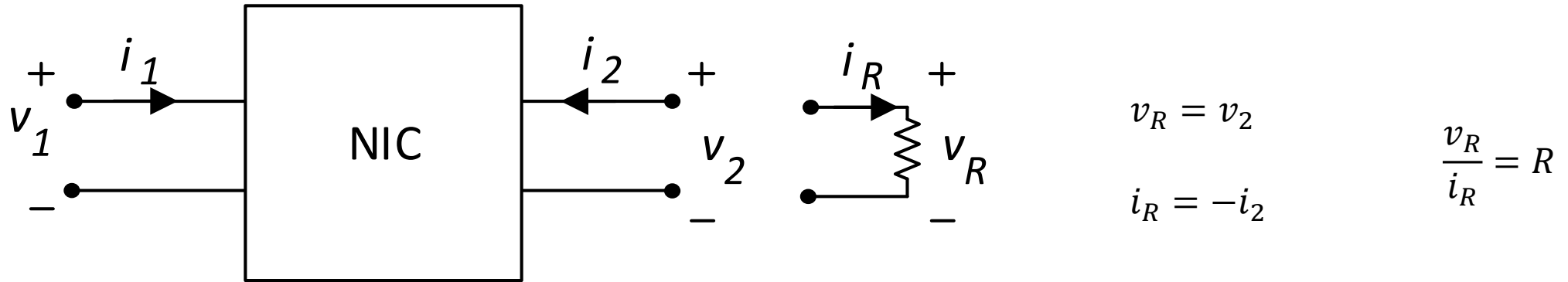


$M$ : karşılıklı endüktans katsayısı

$k$ : karşılıklı etkileşim katsayısı, kaçak akımlar sebebiyle oluşur.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

# Negatif Empedans Çevirici (NIC)



1. Gerilim Eviren Tip (VNIC):

$$v_1 = -v_2$$

$$i_1 = -i_2$$

$$\frac{v_1}{i_1} = \frac{v_2}{i_2} = \frac{v_R}{-i_R} = -R$$

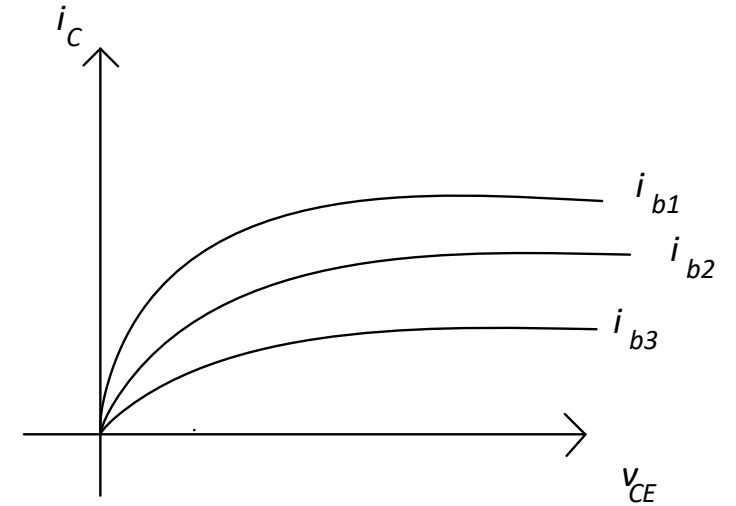
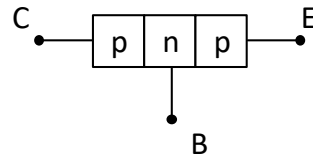
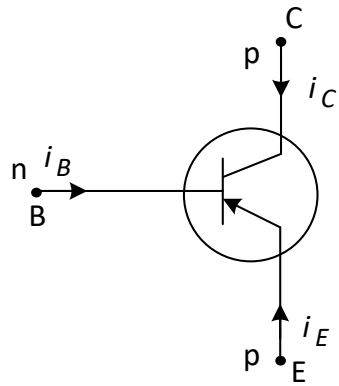
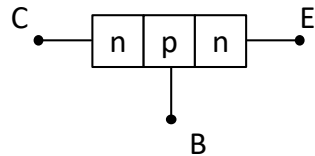
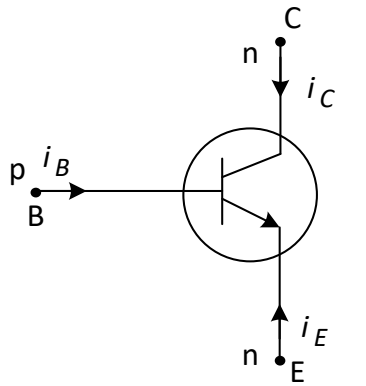
2. Akım Eviren Tip (INIC):

$$v_1 = v_2$$

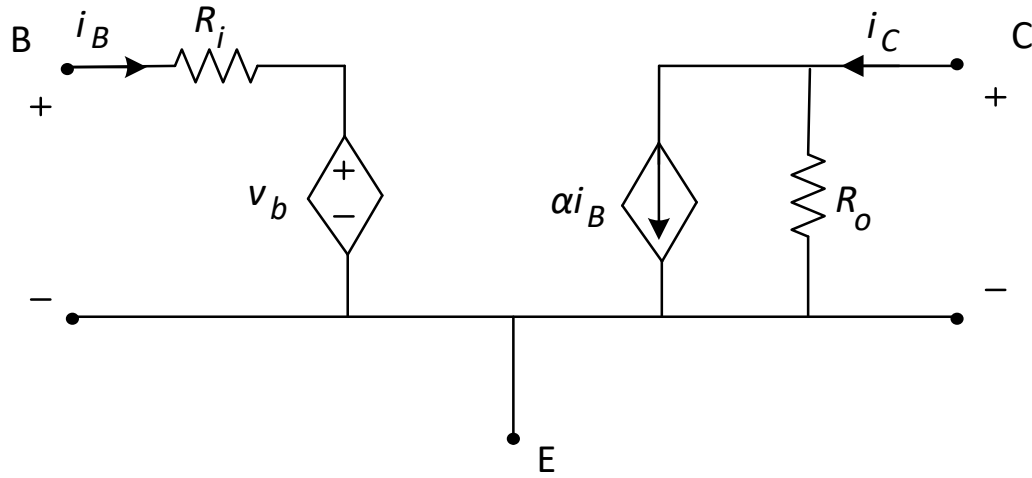
$$i_1 = i_2$$

$$\frac{v_1}{i_1} = \frac{v_2}{i_2} = \frac{v_R}{-i_R} = -R$$

# Transistör Elemanı (BJT-Bipolar Jonksiyonlu Transistör)



# Transistör Elemanı (BJT-Bipolar Jonksiyonlu Transistör)



İdealde;

$$R_i = 0$$

$$R_o = \infty$$

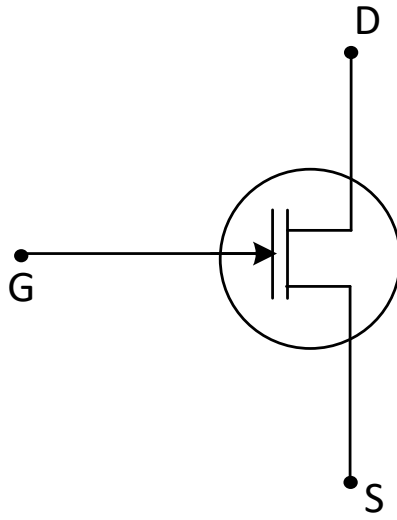
$$v_{BE} = v_b + R_i i_b$$

$$i_C = \frac{v_{CE}}{R_o} + \alpha i_b$$

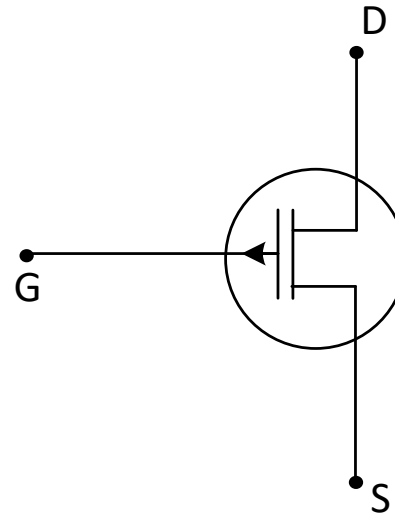
$$i_E = i_B + i_C = (\alpha + 1)i_B$$



# Alan Etkili Transistör(FET-Alan Etkili Transistör)

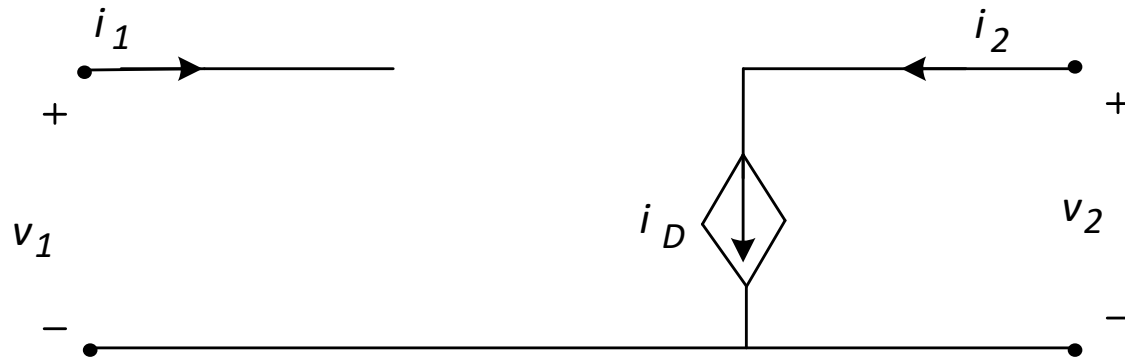


n kanallı



p kanallı

# Alan Etkili Transistör(FET-Alan Etkili Transistör)



İdealde;

$$R_i = \infty$$

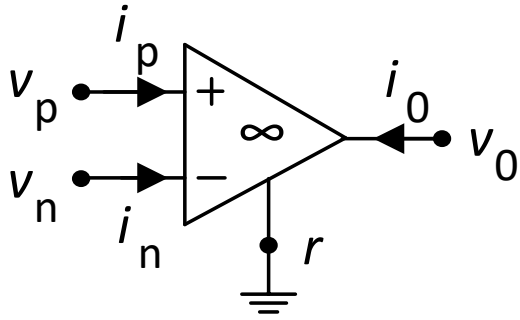
$$R_o = \infty$$

$$i_1 = 0$$

$$i_2 = i_D = g_m v_1$$

# 4-Uçlu Elemanlar

## 1. İşlemsel Kuvvetlendiriciler (OpAmp)



$\infty$ : ideal olduğunu gösterir.

$p(+)$ : non-inverting input.

$n(-)$ : inverting input.

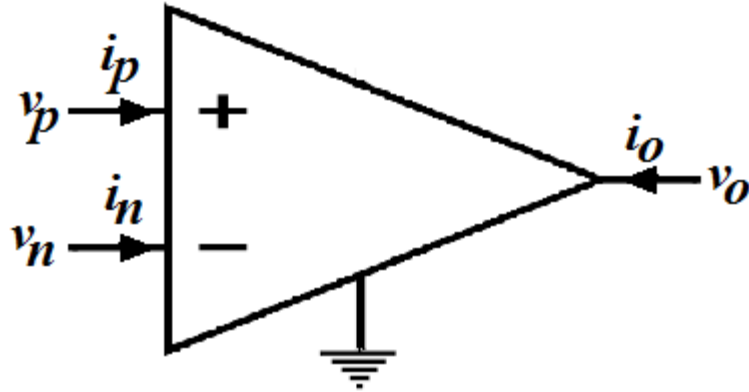
$o$ : output.

İdeal Opamp:

$$i_p = i_n = 0$$

$$v_p = v_n$$

# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)



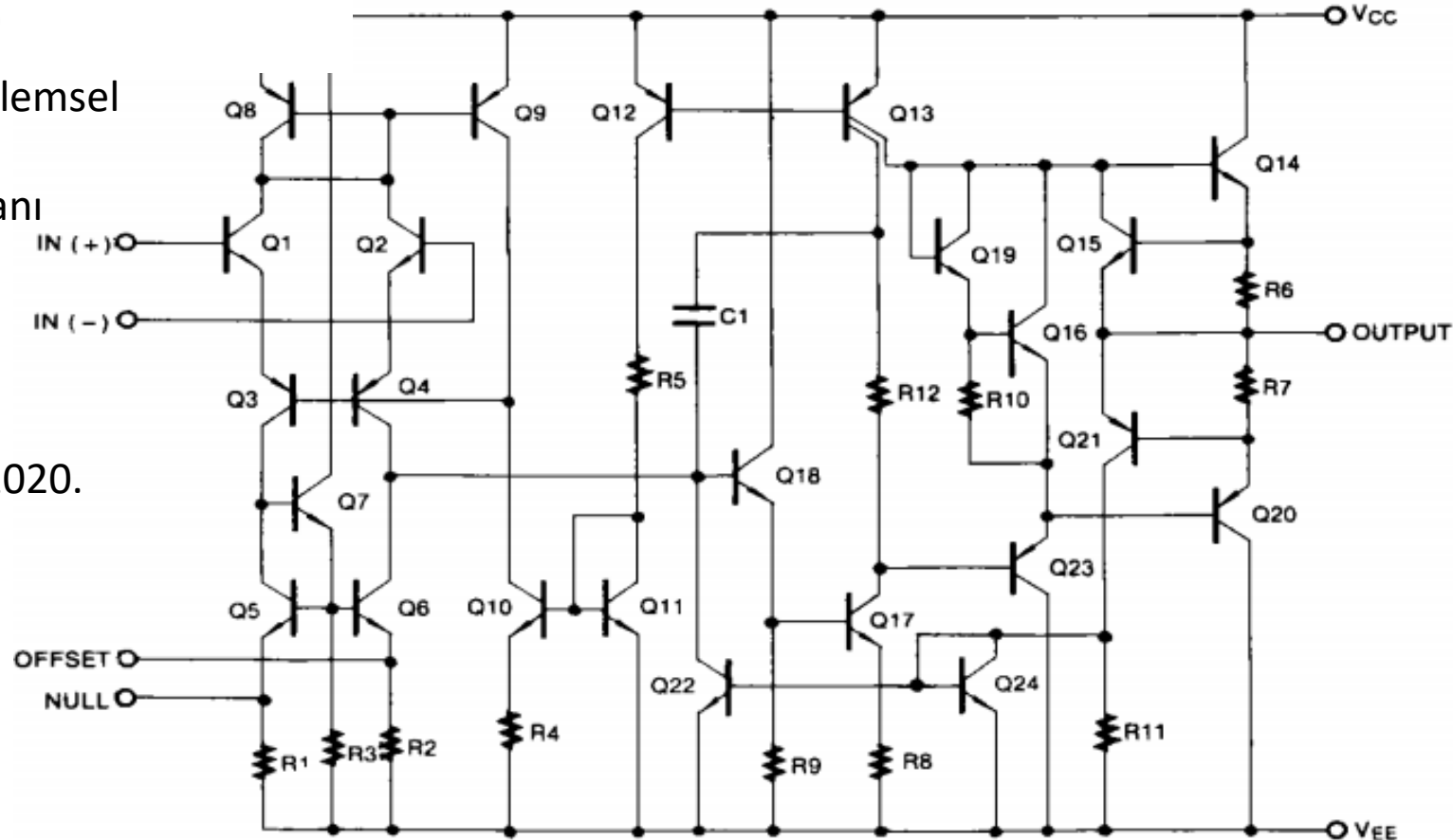
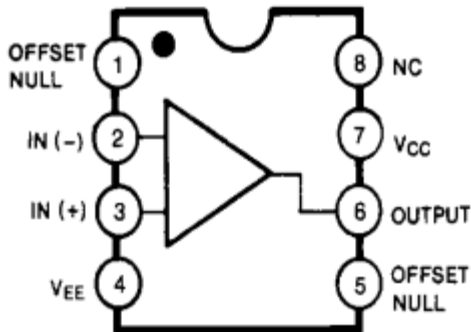
OpAmp 4 uçlu, 3 kapılı bir devre elemanıdır.

Lineer Tanım Bağlılıkları:

$$i_p=0, i_n=0, v_p = v_n$$

İşlemsel kuvvetlendirici elemanının iç yapısı [1]. İşlemsel Kuvvetlendirici olarak ilk üretilen işlemsel kuvvetlendiricilerden bir tanesi olan LM741 elemanı seçilmiştir.

[1] LM741 Datasheet, Fairchild Semiconductor, <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/53589/FAIRCHILD/LM741.html>, 4 Nisan 2020.

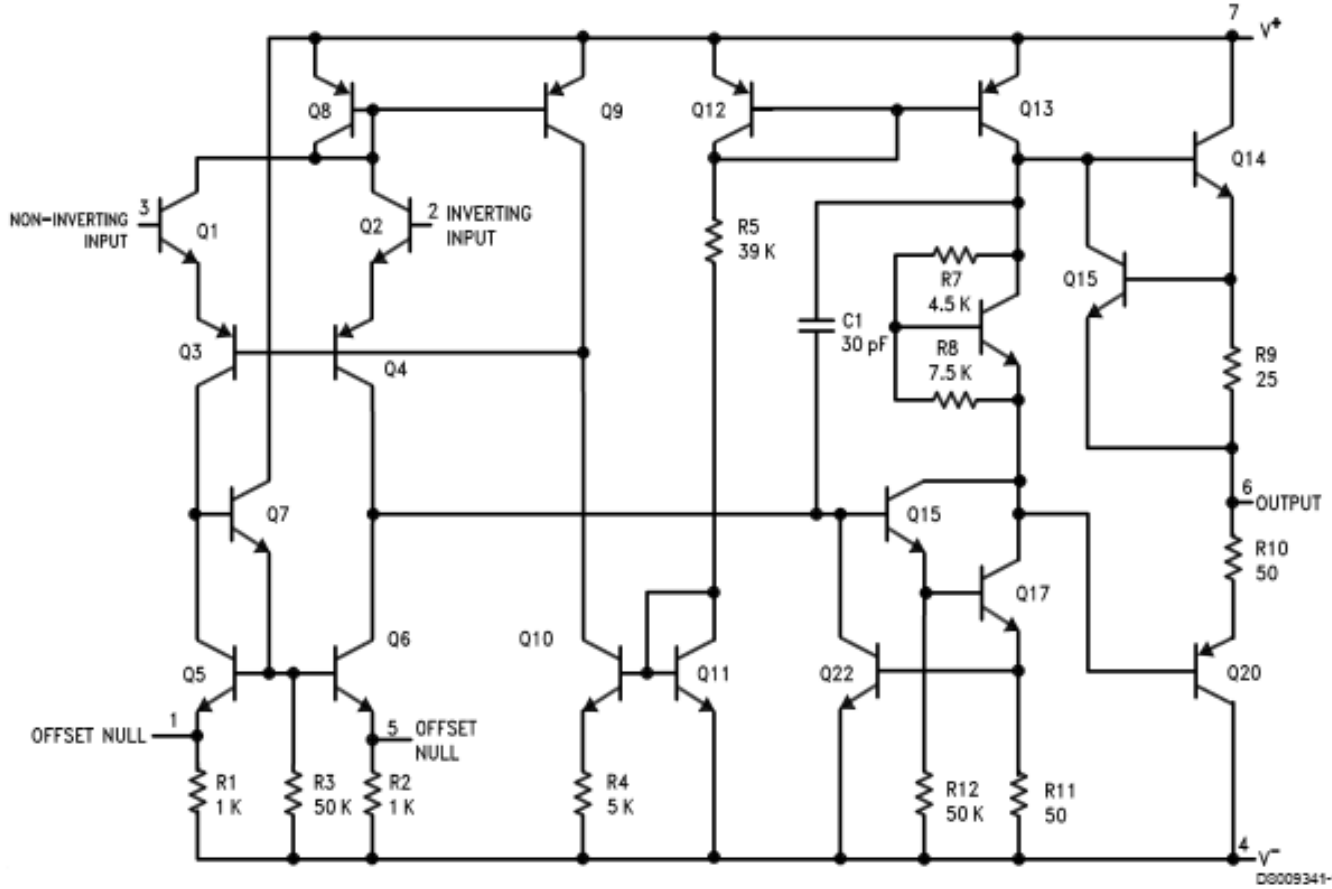


# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

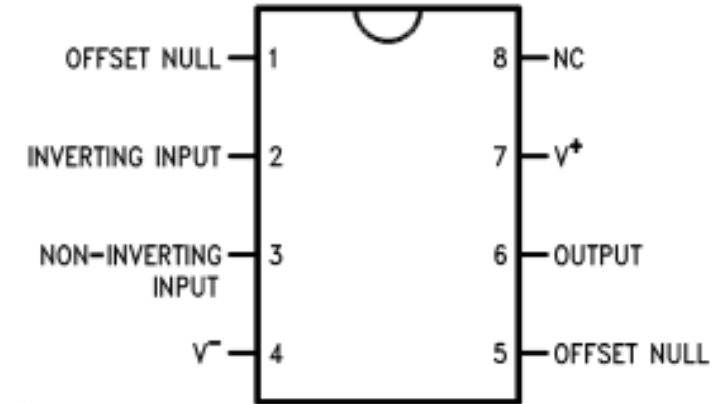
İşlemsel kuvvetlendirici elemanının iç yapısı [2]. National Instruments firmasının ürettiği LM741 elemanının iç yapısı [2].

[1] LM741 Datasheet, National Instruments, <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/9027/NSC/LM741.html>, 4 Nisan 2020.

Uç adları ve genel bağlantı şeması [2].



**Dual-In-Line or S.O. Package**



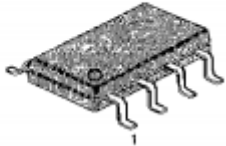
**Order Number LM741J, LM741J/883, LM741CM, LM741CN or LM741EN**

# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

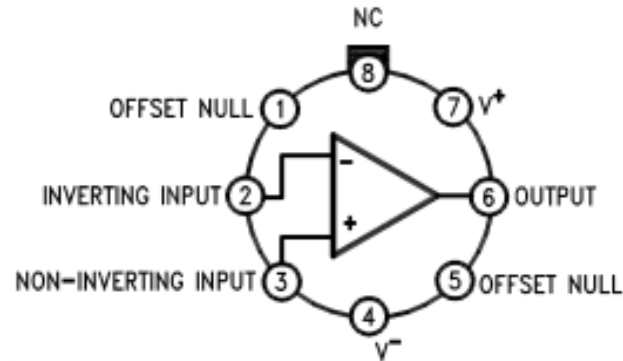
8 DIP



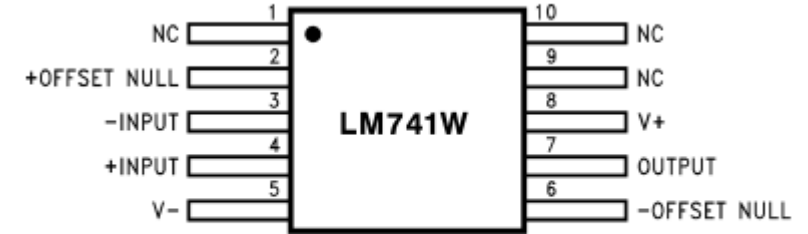
8 SOP



**Metal Can Package**

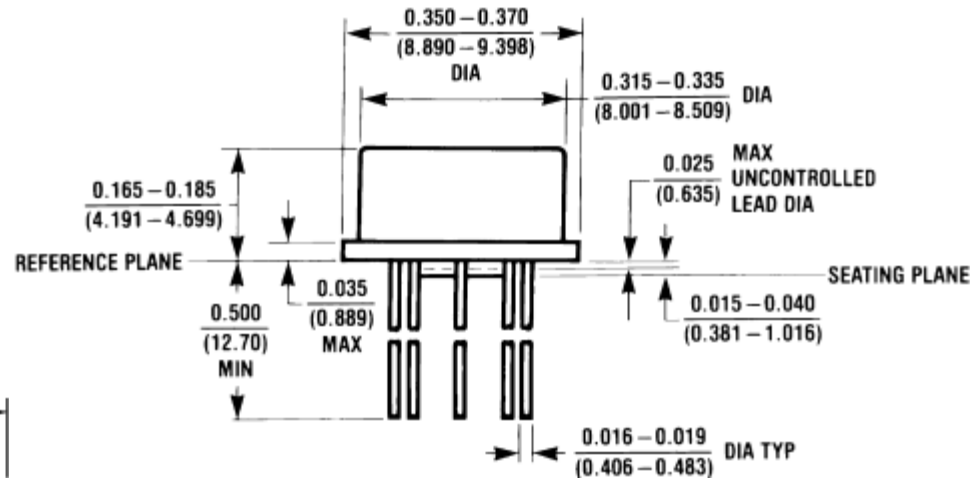


**Ceramic Flatpak**

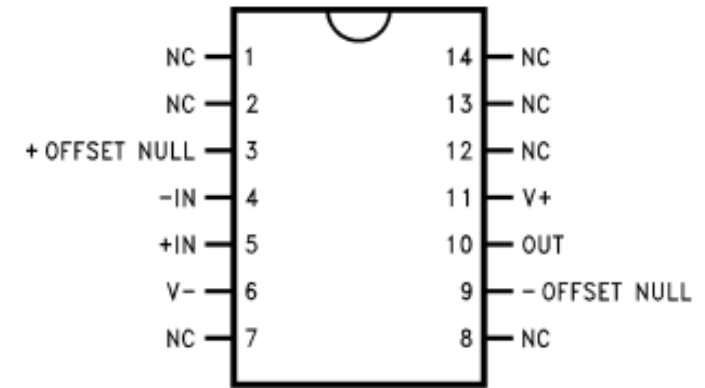


DS009341-6

Order Number LM741W/883  
See NS Package Number W10A

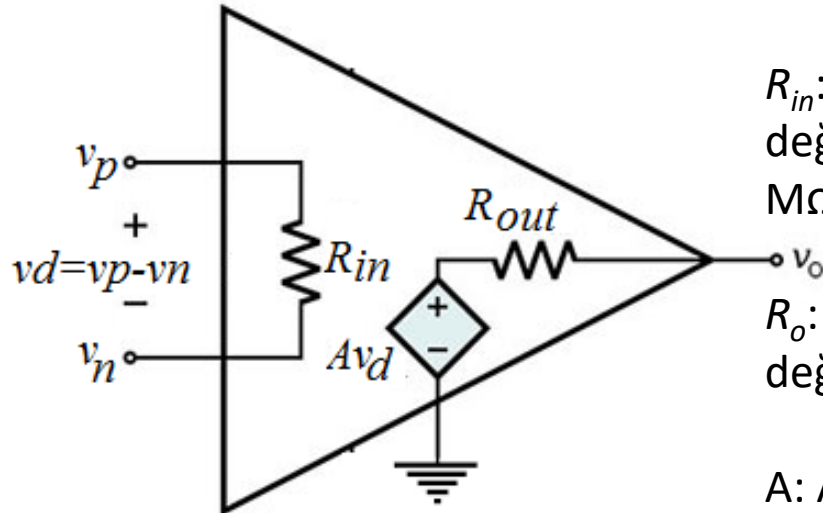
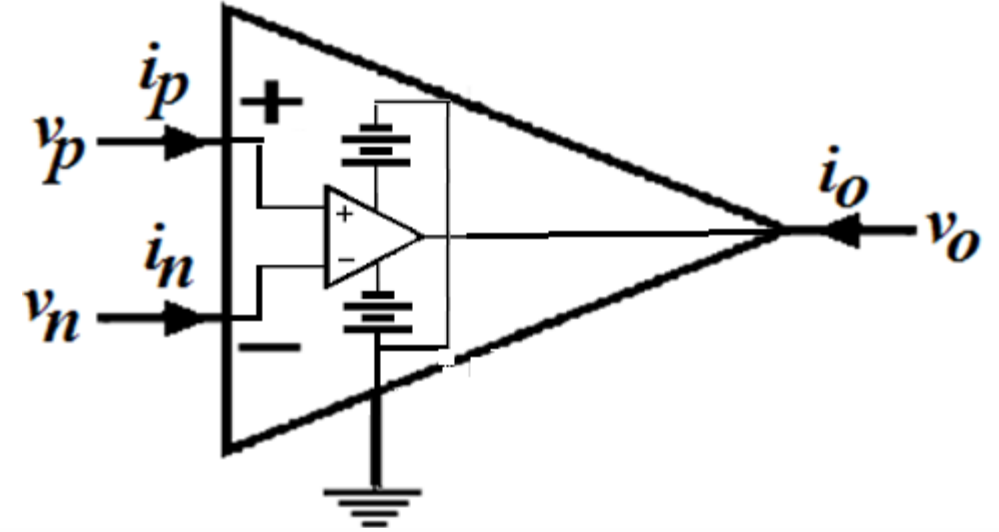
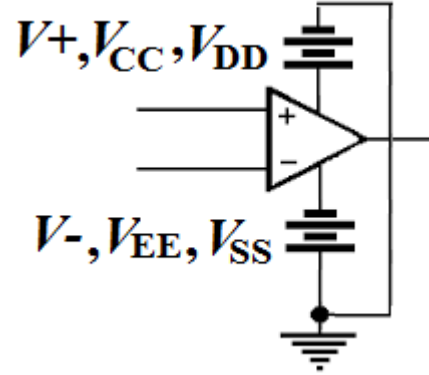
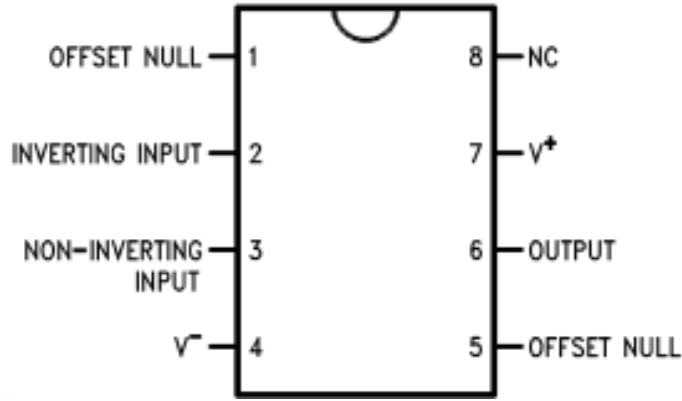


**Ceramic Dual-In-Line Package**



DS009341-5

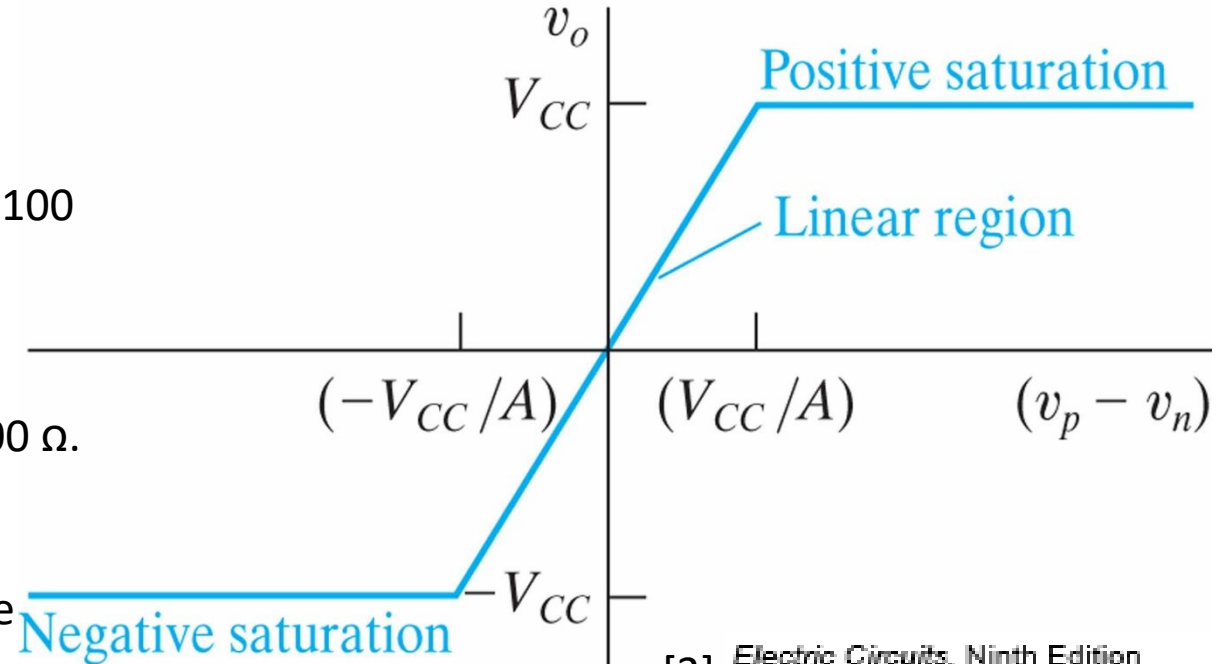
# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)



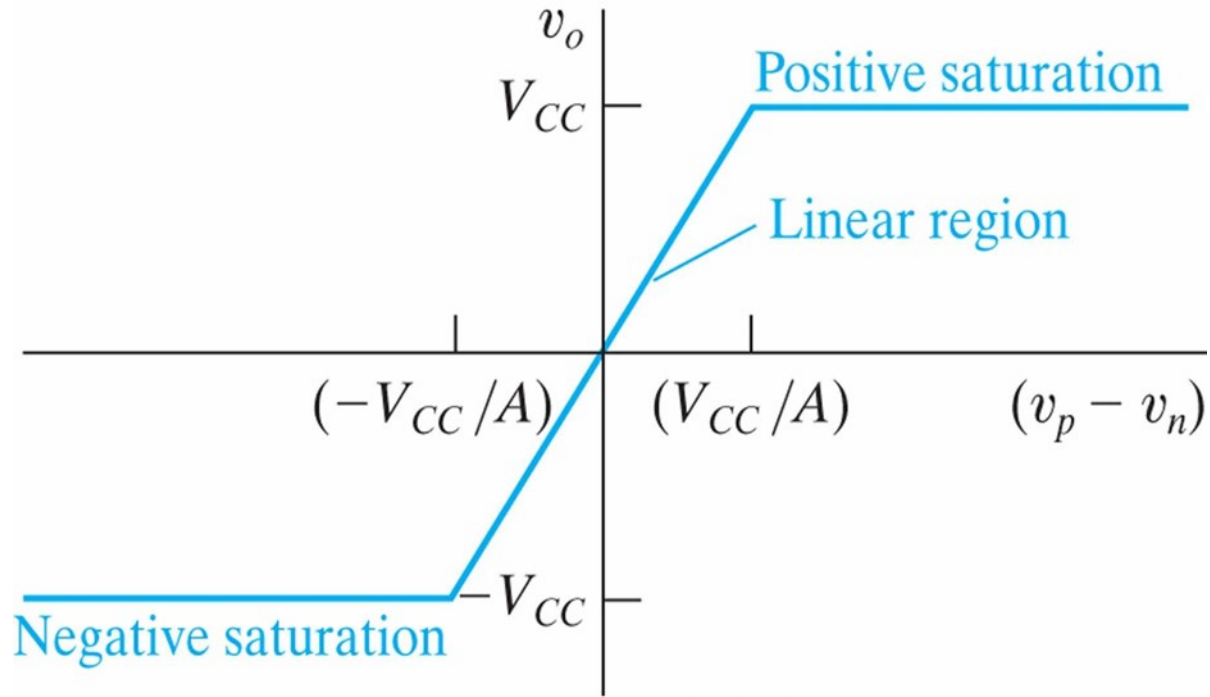
$R_{in}$ : Giriş direnci. İdealde değeri  $\infty \Omega$ . Pratikte 1 M-100 M $\Omega$ .

$R_o$ : Çıkış direnci. İdealde değeri 0  $\Omega$ . Pratikte 10-100  $\Omega$ .

A: Açık çevrim kazancı. İdealde değeri  $\infty$ . Pratikte  $2 \cdot 10^5 - 10^7$ .



# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)



Copyright © 2011 Pearson Education, Inc. publishing as Prentice Hall

**Lineer Bölgede:**

$$v_p - v_n \approx 0 \Rightarrow v_p = v_n$$

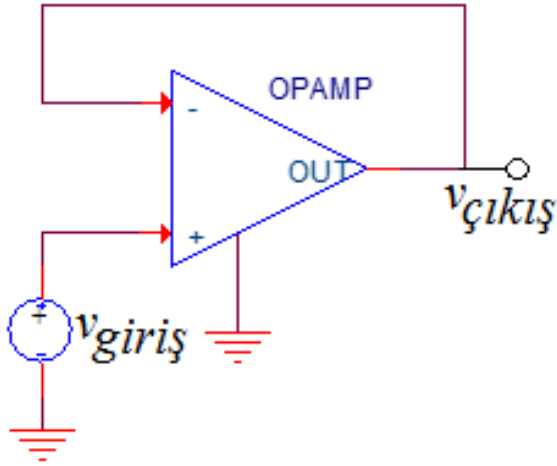
Giriş direncinin değeri çok yüksek olduğu için;

$$i_p = 0, i_n = 0$$



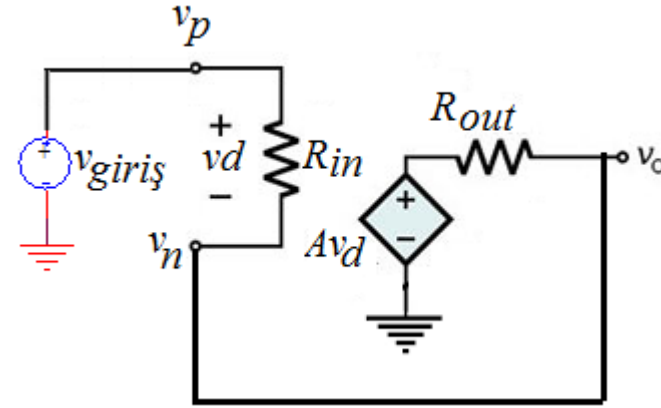
# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

Gerilim İzleyici (Voltage Follower) Devresi



Opamp'ın lineer uygulaması

Eşdeğer devresini çizelim.



$R_{in}$  değerini sonsuz alalım.  $R_{out}$ 'un değerini de  $0\Omega$  alalım.



$$v_{\text{çıkış}} = A(v_p - v_n)$$

$$v_{\text{çıkış}} = A(v_{\text{giriş}} - v_{\text{çıkış}})$$

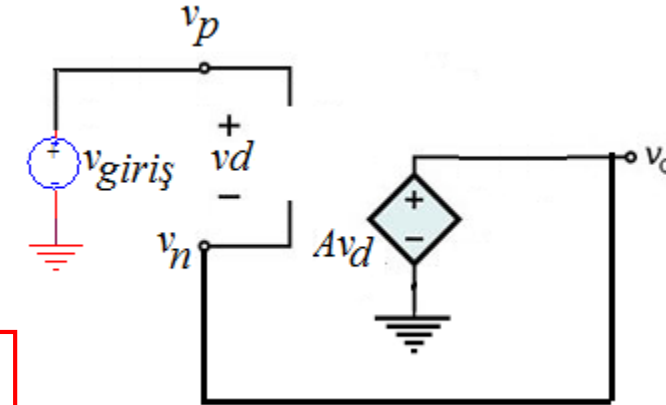
$$v_{\text{çıkış}}(1 + A) = Av_{\text{giriş}}$$

$$v_{\text{çıkış}} = \frac{A}{1 + A} v_{\text{giriş}}$$

$$A \gg 1$$

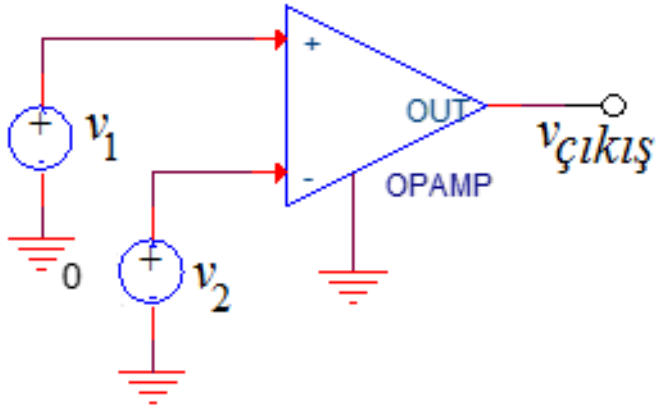
$$v_{\text{çıkış}} = v_{\text{giriş}}$$

$v_n = v_p$  olur. Yani opamp lineer bölgede çalışıyor.



# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

Karşılaştırıcı Devresi (Comparator Circuit)



Besleme gerilimleri

$$V_{DD} = 12V$$

$$V_{SS} = -12V$$

a)  $v_1 = 2V$  ve  $v_2 = 1V$  olsun.  $V_{cikis} = ?$

b)  $v_1 = 1V$  ve  $v_2 = 2V$  olsun.  $V_{cikis} = ?$

c)  $v_1 = 2\sin(2\pi 1000t)V$  ve  $v_2 = 1V$  olsun.  $V_{cikis} = ?$   
Zamana bağlı olarak değişimini çiziniz.

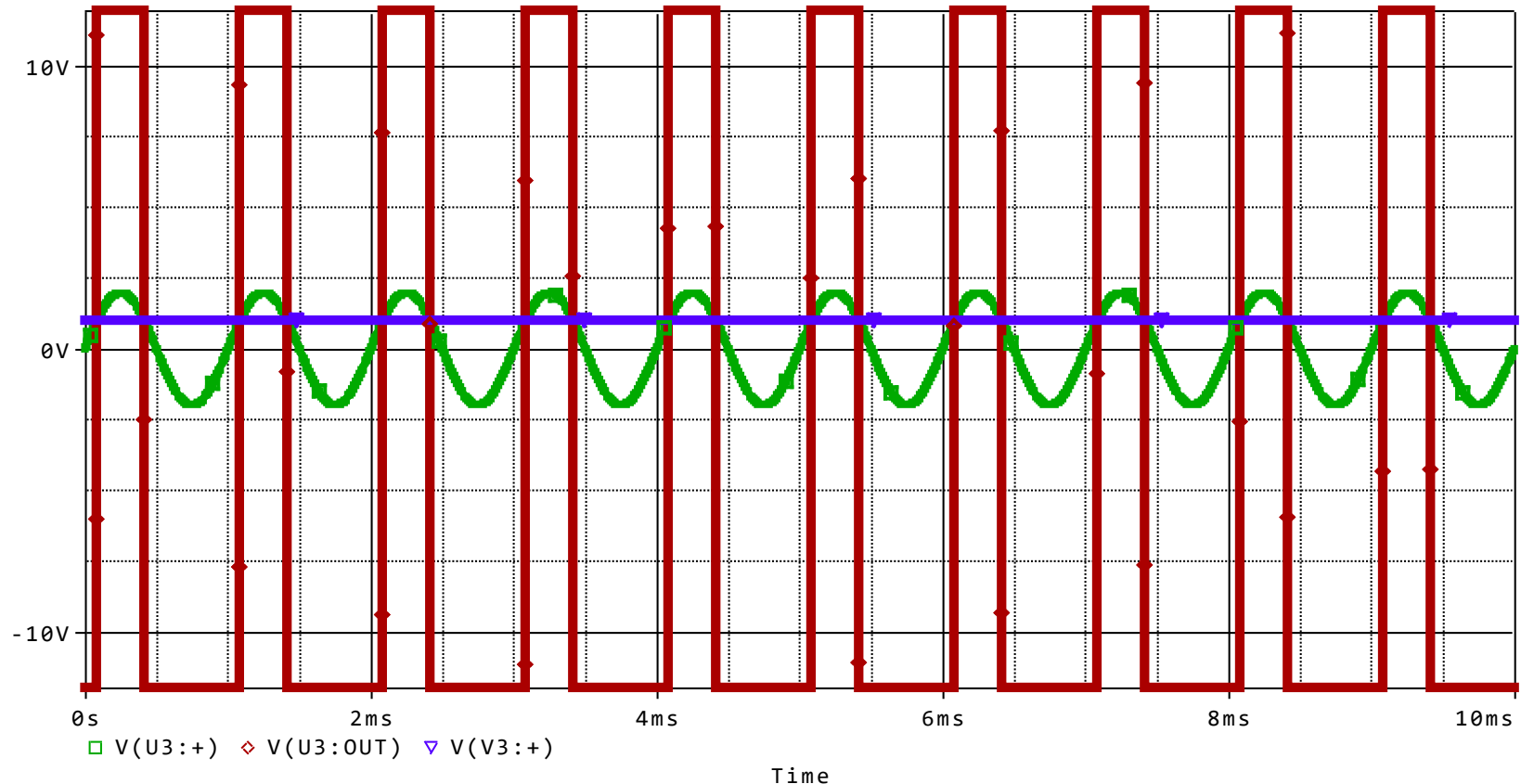
Nonlinear uygulama.  $v_p \neq v_n$

CEVAP:

a)  $v_{cikis} = 12V$

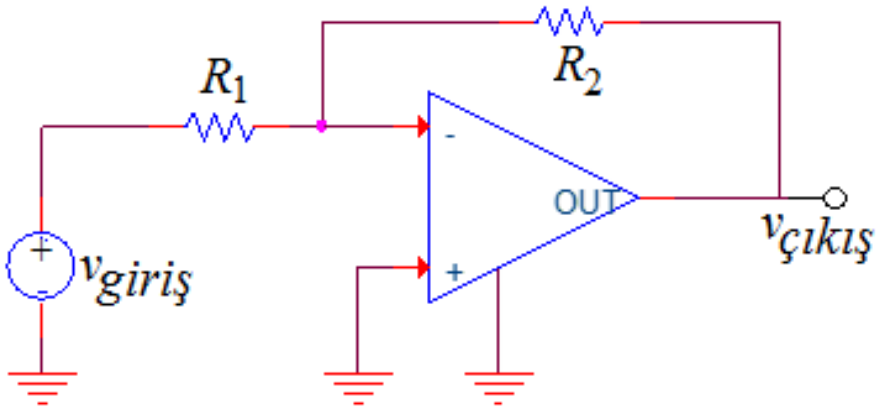
b)  $v_{cikis} = -12V$

c) →



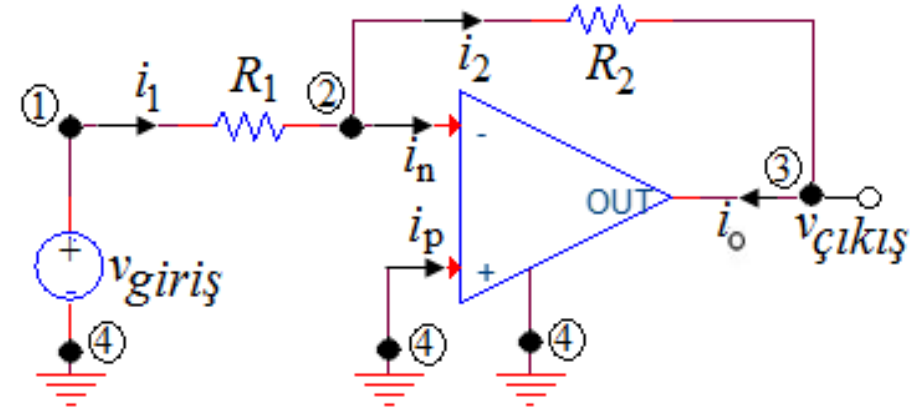
# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

## Eviren Kuvvetlendirici (Inverting Amplifier) Devresi



Opamp bu devrede lineer bölgede çalışmaktadır. Yani  $v_p = v_n$ 'dir.

1. Adım: Direnç elemanlarının akım referansları keyfi olarak belirlenir. Bir düğüm referans düğümü olarak belirlenir.



**2. Adım:** Referans düğümü dışındaki düğümler için Kirchoff'un Akım Yasası uygulanır.  $n_d - 1$  tane düğüm için bağımsız akım denklemi elde edilmiş olur.

$$d_1 \text{ için: } i_1 + i_{giriş} = 0$$

$$d_2 \text{ için: } -i_1 + i_2 + i_n = 0$$

$$d_3 \text{ için: } -i_2 + i_o = 0$$

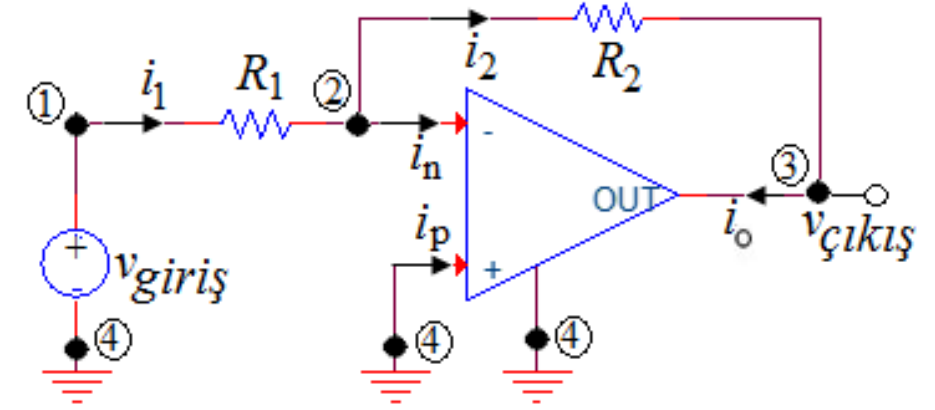
# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

**3. Adım:** Direnç elemanlarının tanım bağıntıları eleman akımları yerine yazılır.

$$d_1 \text{ için: } \frac{v_1}{R_1} + i_{giriş} = 0$$

$$d_2 \text{ için: } -\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + i_n = 0$$

$$d_3 \text{ için: } -\frac{v_2}{R_2} + i_o = 0$$



**4. Adım:** Direnç elemanı gerilimleri düğüm gerilimleri cinsinden eşitliklerde yerine yazılır.

$$d_1 \text{ için: } \frac{(v_{d1} - v_{d2})}{R_1} + i_{giriş} = 0$$

$$d_2 \text{ için: } -\frac{(v_{d1} - v_{d2})}{R_1} + \frac{(v_{d2} - v_{d3})}{R_2} + i_n = 0$$

$$d_3 \text{ için: } -\frac{(v_{d2} - v_{d3})}{R_2} + i_o = 0$$

# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

**5. Adım:** Düğüm gerilimi ifadeleri eşitliğin sağında kalacak şekilde denklemler düzenlenir.

$$d_1 \text{ için: } v_{d1}\left(\frac{1}{R_1}\right) + v_{d2}\left(-\frac{1}{R_1}\right) = -i_{giriş}$$

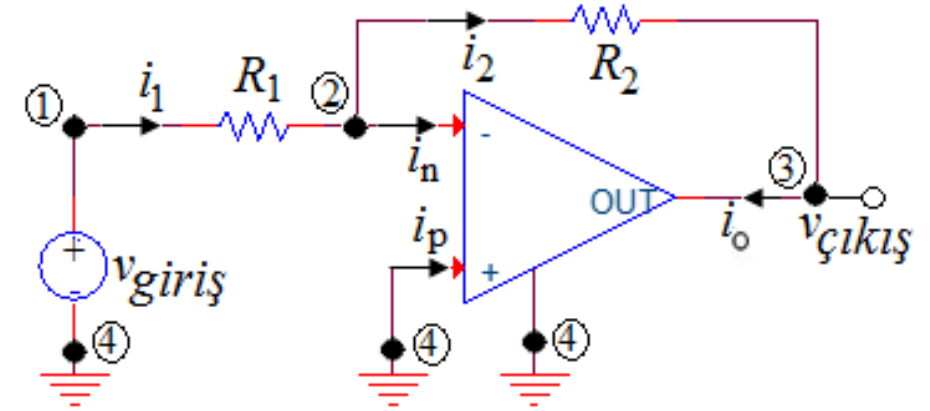
$$d_2 \text{ için: } v_{d1}\left(-\frac{1}{R_1}\right) + v_{d2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) + v_{d3}\left(-\frac{1}{R_2}\right) = -i_n$$

$$d_3 \text{ için: } v_{d2}\left(-\frac{1}{R_2}\right) + v_{d3}\left(\frac{1}{R_2}\right) = -i_o$$

Denklemler matrisel halde aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{giriş} \\ -i_n \\ -i_o \end{bmatrix}$$

$i_{giriş}$ ,  $i_n$  ve  $i_o$  akım değerleri bilinmektedir. 3 Adet ek denklem gereklidir.



**6. Adım:** Ek denklemler yazılır. Direnç elemanları ve bağımsız akım kaynakları dışındaki tüm elemanlar için tanım bağıntıları yazılır.

1. Ek denklem:  $v_{d1} = v_{giriş}$
2. Ek denklem:  $v_p = v_n \Rightarrow v_{d2} = 0 V$
3. Ek denklem:  $i_n = 0, \quad i_p = 0$

# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{giriş} \\ -i_n \\ -i_o \end{bmatrix}$$

2. Satır açılırsa:

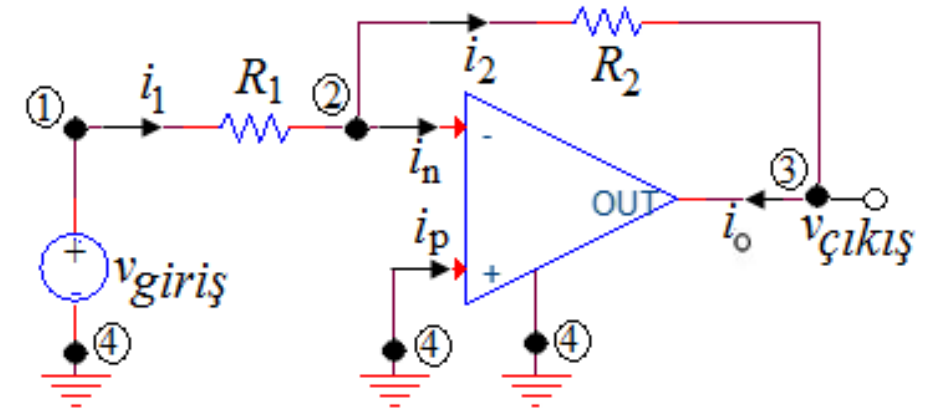
$$\left(-\frac{1}{R_1}\right)v_{d1} + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)v_{d2} + \left(-\frac{1}{R_2}\right)v_{d3} = 0$$

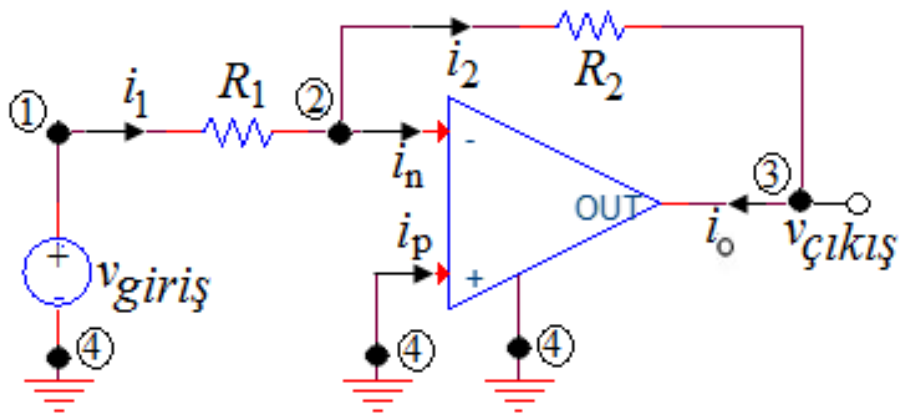
$$v_{d2} = 0 \text{ V}$$

$$\left(-\frac{1}{R_1}\right)v_{giriş} + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot 0 + \left(-\frac{1}{R_2}\right)v_{çıkış} = 0$$

$$v_{çıkış} = -\frac{R_2}{R_1}v_{giriş}$$

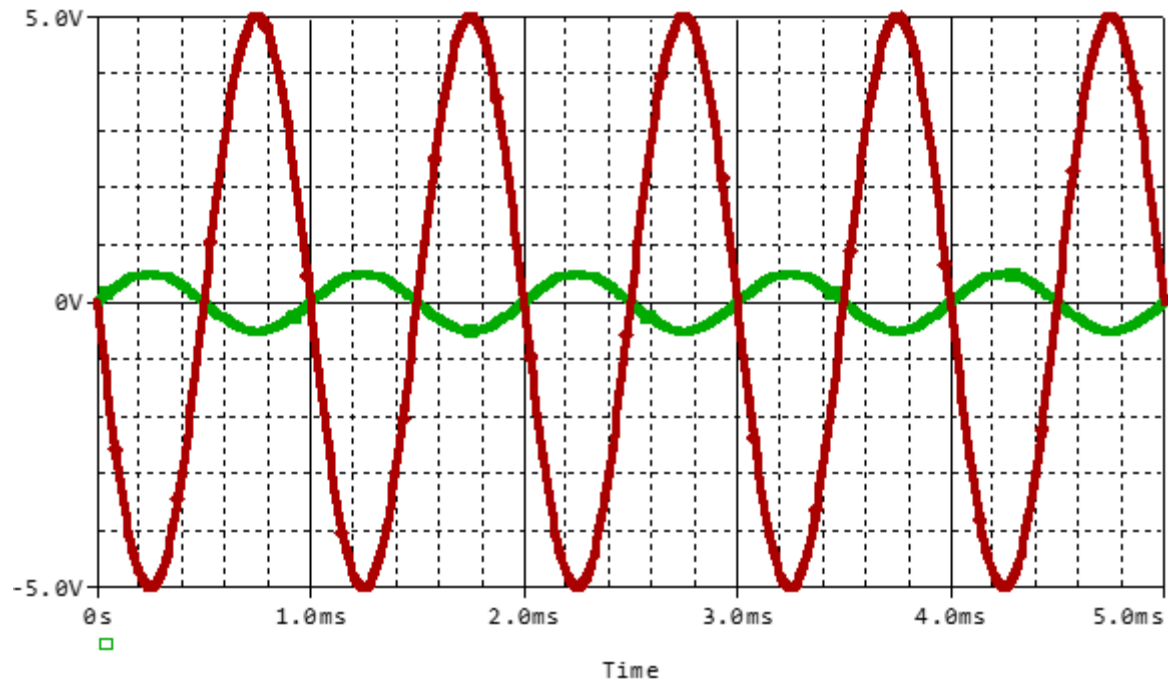
Eviren Kuvvetlendirici





$$v_{\text{çıkış}} = -\frac{R_2}{R_1} v_{\text{giriş}}$$

$$v_{\text{giriş}} = 0.5 \sin(2\pi 1000t) \text{ V} \quad R_1 = 1\text{k}\Omega \quad R_2 = 10\text{k}\Omega$$



$$v_{\text{giriş}} = 0.5 \sin(2\pi 1000t) \text{ V} \quad R_1 = 1\text{k}\Omega \quad R_2 = 30\text{k}\Omega$$

