

Elektrik Devre Temelleri

2024-2025 Bahar Dönemi

Hafta 7

4 Nisan 2025

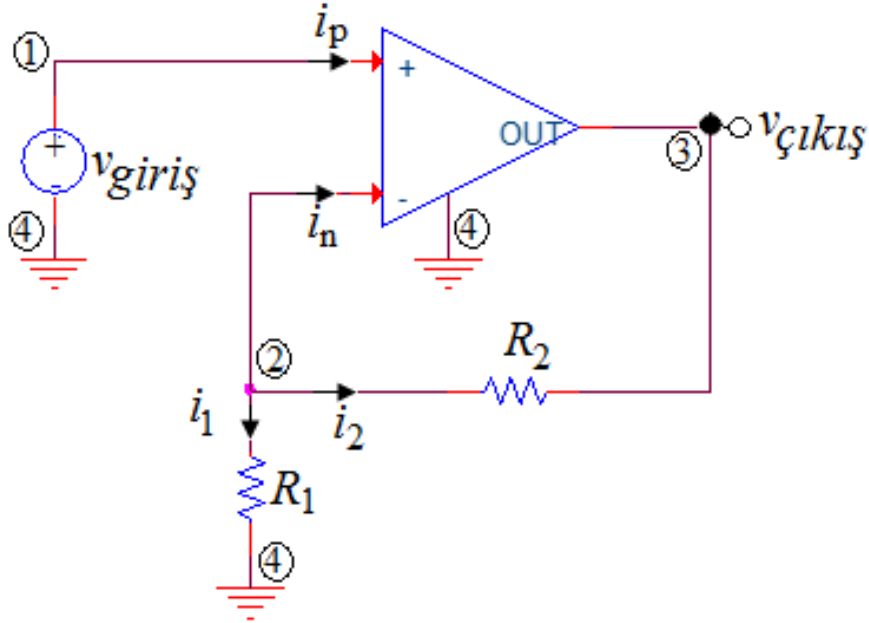
Sibel ÇİMEN

Umut Engin AYTEN

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

Evirmeyen Kuvvetlendirici (Non-Inverting Amplifier)

Devresi



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

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

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

$$d_3 \text{ için: } -i_2 + i_o = 0$$

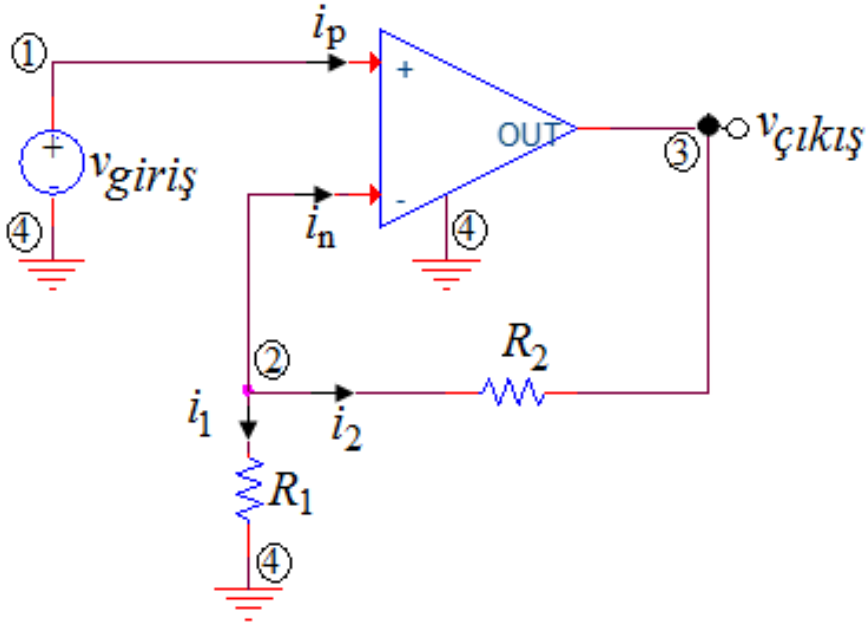
3. Adım: Direnç elemanlarının tanım bağıntıları eleman akımları yerine yazılır.

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

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

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

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)



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

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

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

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

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

$$d_1 \text{ için: } 0 = -i_{giriş} - i_p$$

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

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

Denklemler matrisel halde aşağıdaki şekilde yazılabilir.

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

$i_{giriş}$, i_p , i_n ve i_o akım değerleri bilinmektedir. 4 Adet ek denklem gereklidir.

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

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: $v_p = v_n \Rightarrow v_{d2} = v_{giriş}$

3. Ek denklem: $i_n = 0, \quad i_p = 0$

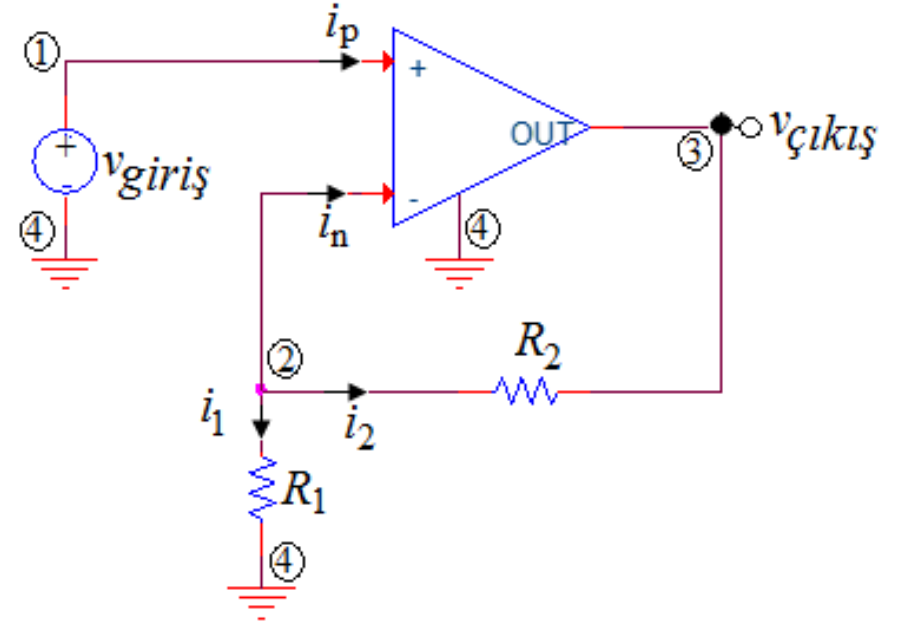
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{giriş} - i_p \\ -i_n \\ -i_o \end{bmatrix}$$

2. Satır açılırsa:

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

$$v_{d2} = v_{giriş}$$

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



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

Evirmeyen
Kuvvetlendirici

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

Örnek:

1. Yanda verilen devre için;
 - a) Parametrik olarak düğüm ve ek denklemlerinin elde edilmesini adım adım gösteriniz (15p).
 - b) Eleman değerleri, $R_1=R_2=R_3=R_4=1\Omega$ olması durumunda, çıkış gerilimi $v_o(t)=f(v_5, v_6)$ 'yi parametrik olarak bulunuz (10p).
 - c) $v_5(t)=1$ V, $v_6(t)=3$ V gerilim değerlerinin devreye uygulanması durumunda işlemsel kuvvetlendiricinin gücünü hesaplayınız (5p).

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

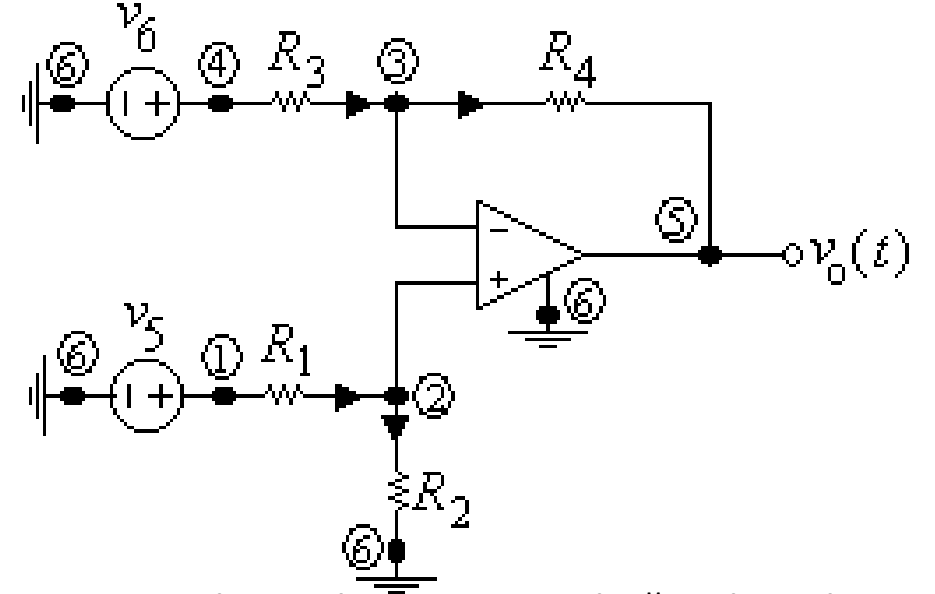
$$d_1 \text{ için: } i_5 + i_1 = 0$$

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

$$d_3 \text{ için: } -i_3 + i_4 + i_n = 0$$

$$d_4 \text{ için: } i_6 + i_3 = 0$$

$$d_5 \text{ için: } -i_4 + i_o = 0$$



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

$$d_1 \text{ için: } i_5 + v_1/R_1 = 0$$

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

$$d_3 \text{ için: } -\frac{v_3}{R_3} + \frac{v_4}{R_4} + i_n = 0$$

$$d_4 \text{ için: } i_6 + \frac{v_3}{R_3} = 0$$

$$d_5 \text{ için: } -\frac{v_4}{R_4} + i_o = 0$$

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

Örnek:

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

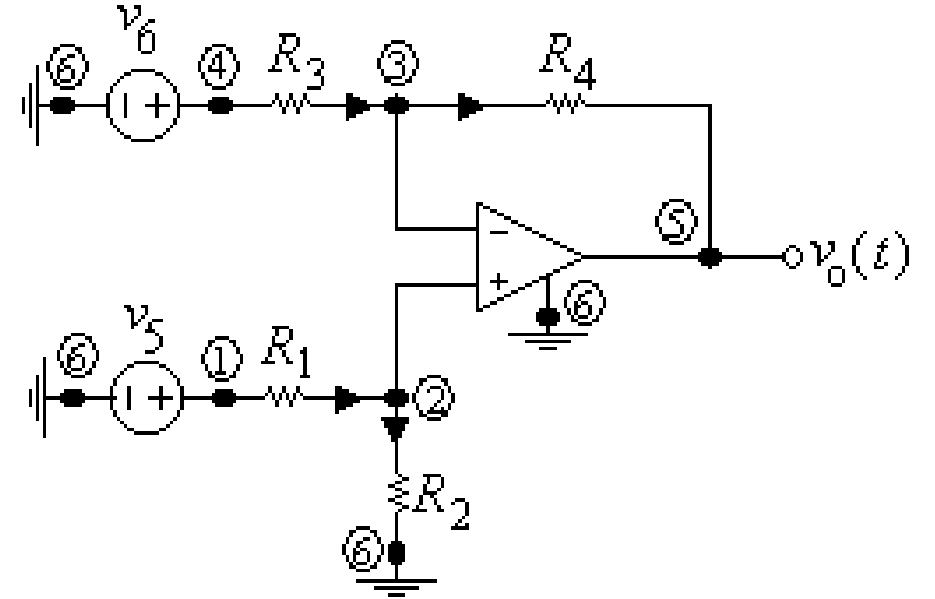
$$d_1 \text{ için: } i_5 + \frac{(v_{d1} - v_{d2})}{R_1} = 0$$

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

$$d_3 \text{ için: } -\frac{(v_{d4} - v_{d3})}{R_3} + \frac{(v_{d3} - v_{d5})}{R_4} + i_n = 0$$

$$d_4 \text{ için: } i_6 + \frac{(v_{d4} - v_{d3})}{R_3} = 0$$

$$d_5 \text{ için: } -\frac{(v_{d3} - v_{d5})}{R_4} + i_o = 0$$



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

$$\begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 & 0 & 0 \\ -G_1 & G_1 + G_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 + G_4 & -G_3 & -G_4 \\ 0 & 0 & -G_3 & G_3 & 0 \\ 0 & 0 & -G_4 & 0 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \\ v_{d4} \\ v_{d5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_5 \\ -i_p \\ -i_n \\ -i_6 \\ -i_o \end{bmatrix}$$

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

Örnek:

$$\begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 & 0 & 0 \\ -G_1 & G_1 + G_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 + G_4 & -G_3 & -G_4 \\ 0 & 0 & -G_3 & G_3 & 0 \\ 0 & 0 & -G_4 & 0 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \\ v_{d4} \\ v_{d5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_5 \\ -i_p \\ -i_n \\ -i_6 \\ -i_o \end{bmatrix}$$

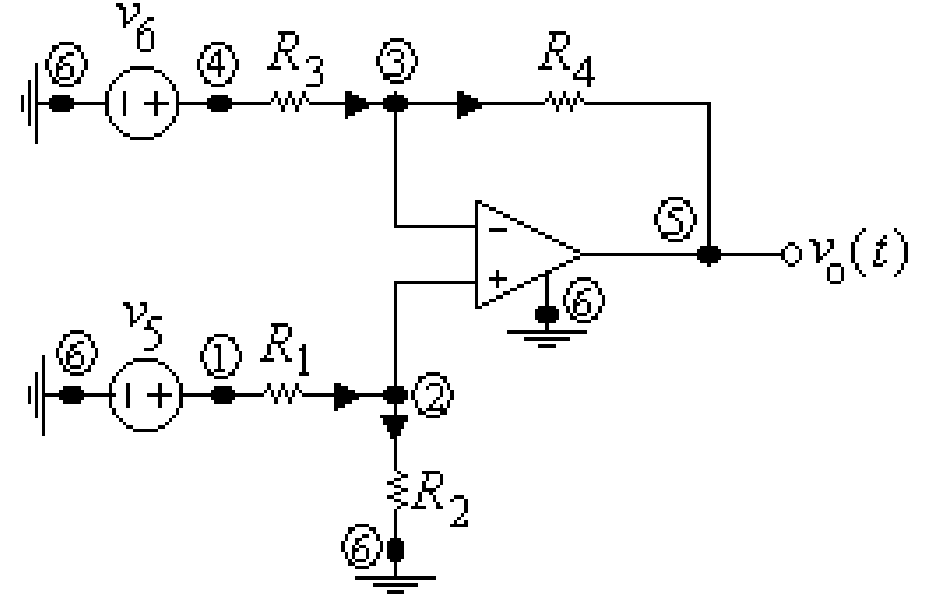
6. Adım: Ek denklemler yazılır. Direnç elemanları ve bağımsız akım kaynakları dışındaki tüm elemanlar için tanım bağıntıları yazılır.

1. Ek denklem: $v_{d1} = v_5$

2. Ek denklem: $v_{d4} = v_6$

3. Ek denklem: $v_p = v_n \Rightarrow v_{d2} = v_{d3}$

4. Ve 5. Ek denklem: $i_n = 0, \quad i_p = 0$



b) Eleman değerleri, $R_1=R_2=R_3=R_4=1\Omega$ olması durumunda, çıkış gerilimi $v_o(t)=f(v_5, v_6)$ 'yi parametrik olarak bulunuz.

İkinci satırdan:

$$-G_1 v_{d1} + (G_1 + G_2) v_{d2} = 0 \Rightarrow v_{d2} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} v_{d1} \Rightarrow v_{d2} = \frac{1}{2} v_5$$

Üçüncü satırdan:

$$(G_3 + G_4) v_{d3} + (-G_3) v_{d4} + (-G_4) v_{d5} = 0 \quad v_{d2} = v_{d3}$$

$$v_{d5} = v_o = v_5 - v_6$$

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ (Operational Amplifier- OpAmp)

c) $v_5(t)=1$ V, $v_6(t)=3$ V gerilim değerlerinin devreye uygulanması durumunda işlemsel kuvvetlendiricinin gücünü hesaplayınız

$$P_{opamp} = v_p i_p + v_n i_n + v_o i_o = v_o i_o$$

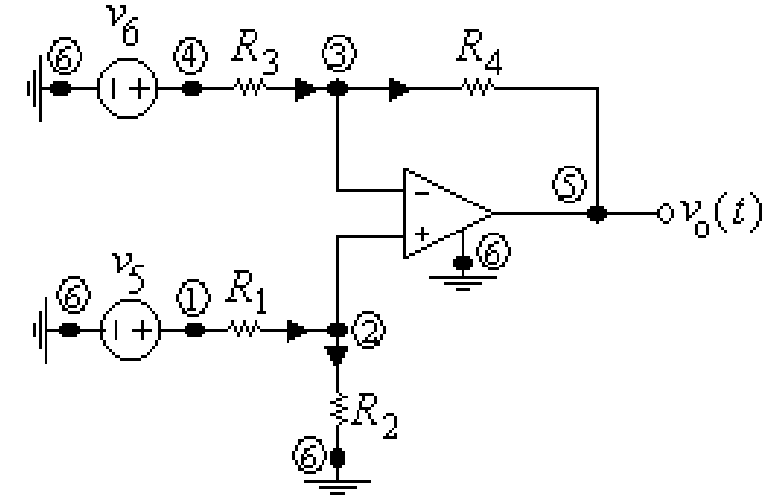
$$v_o = v_5 - v_6 = 1 - 3 = -2 \text{ V}$$

Beşinci satırdan:

$$-G_4 v_{d3} + G_4 v_{d5} = -i_o$$

$$-1 \frac{v_5}{2} + 1 v_o = -i_o \rightarrow i_o = 2.5 A$$

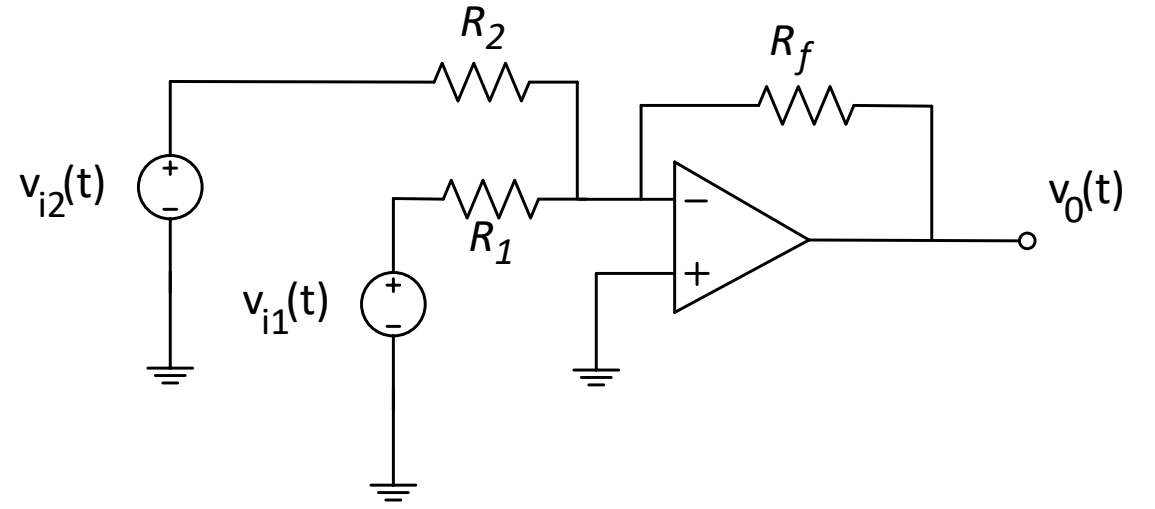
$$P_{opamp} = v_o i_o = (-2)(2.5) = -5 W$$



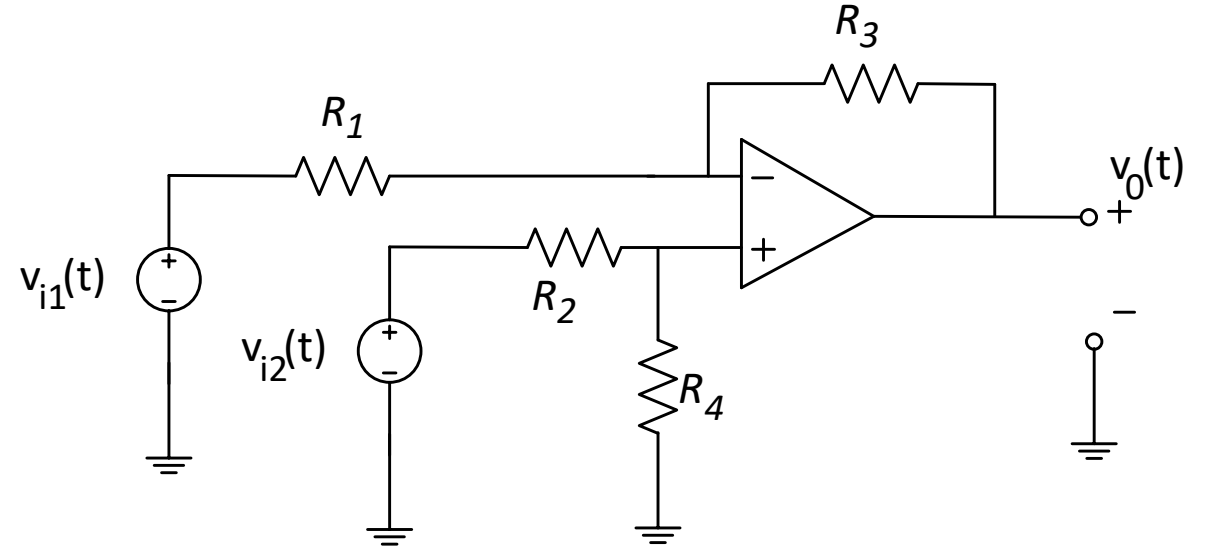
Genelleştirilmiş düğüm gerilimi denklemlerini matrisel şekilde yazalım:

$$\begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_1 & G_1 + G_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 + G_4 & -G_3 & -G_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -G_3 & G_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -G_4 & 0 & G_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \\ v_{d4} \\ v_{d5} \\ i_5 \\ i_6 \\ i_p \\ i_n \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ v_5 \\ v_6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

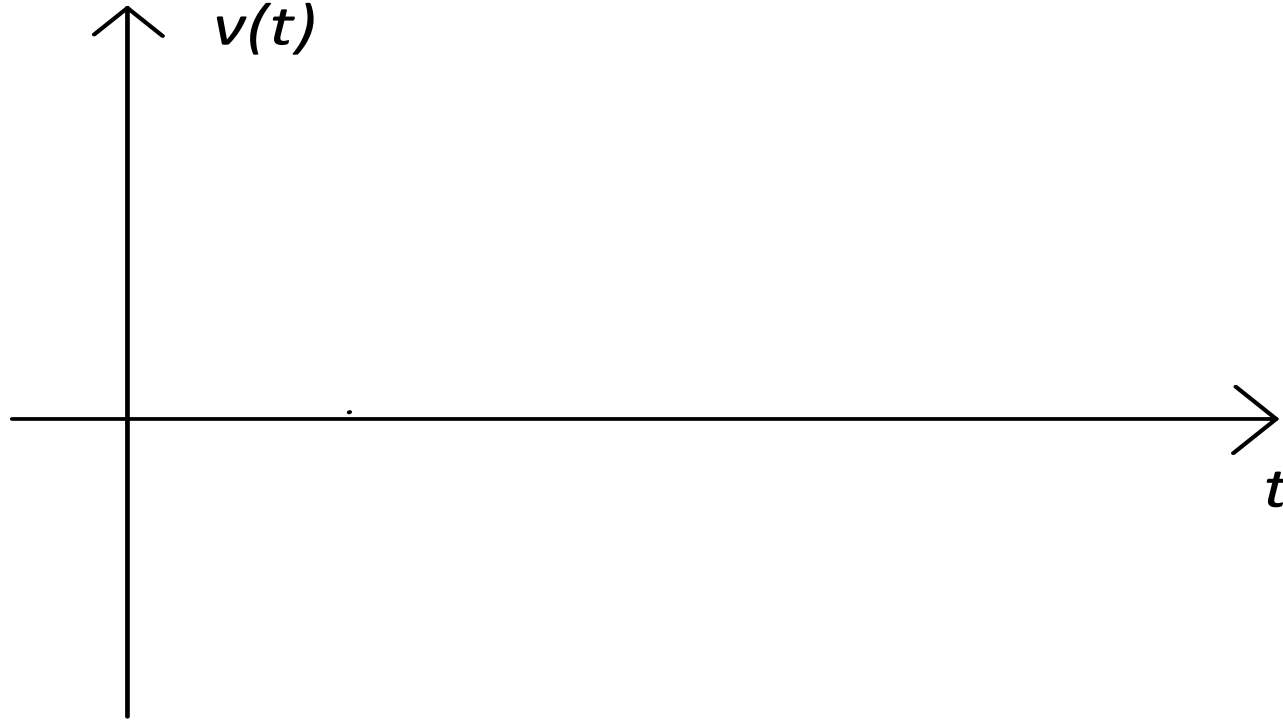
Örnek: $v_o = ?$



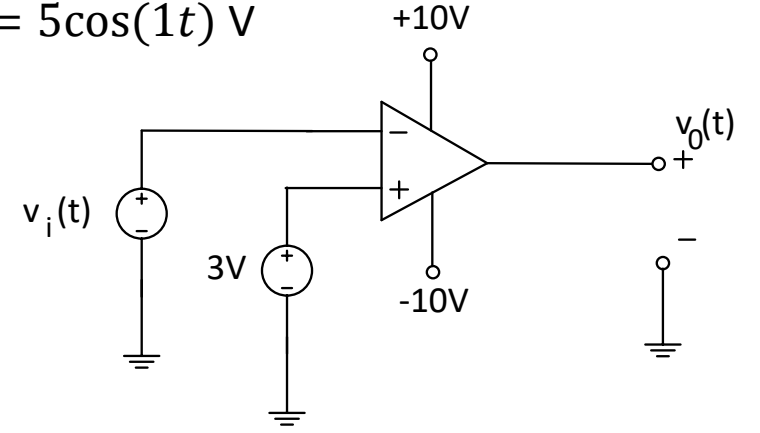
Örnek: $v_o = ?$



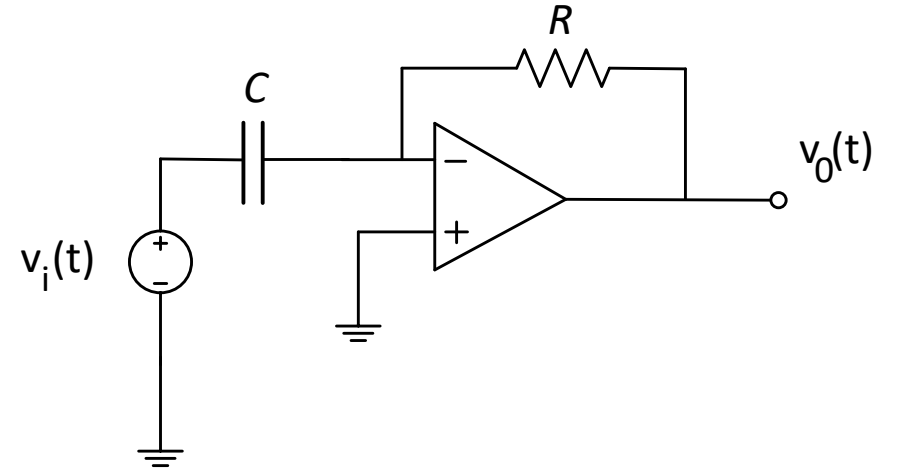
Örnek: $v_i(t)$ ve $v_o(t)$ grafiğini çiziniz.



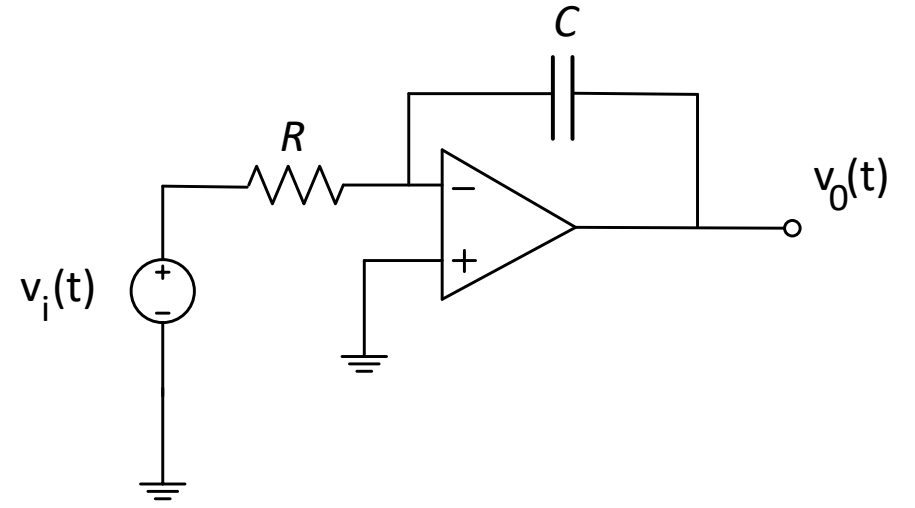
$$v_i(t) = 5\cos(1t) \text{ V}$$



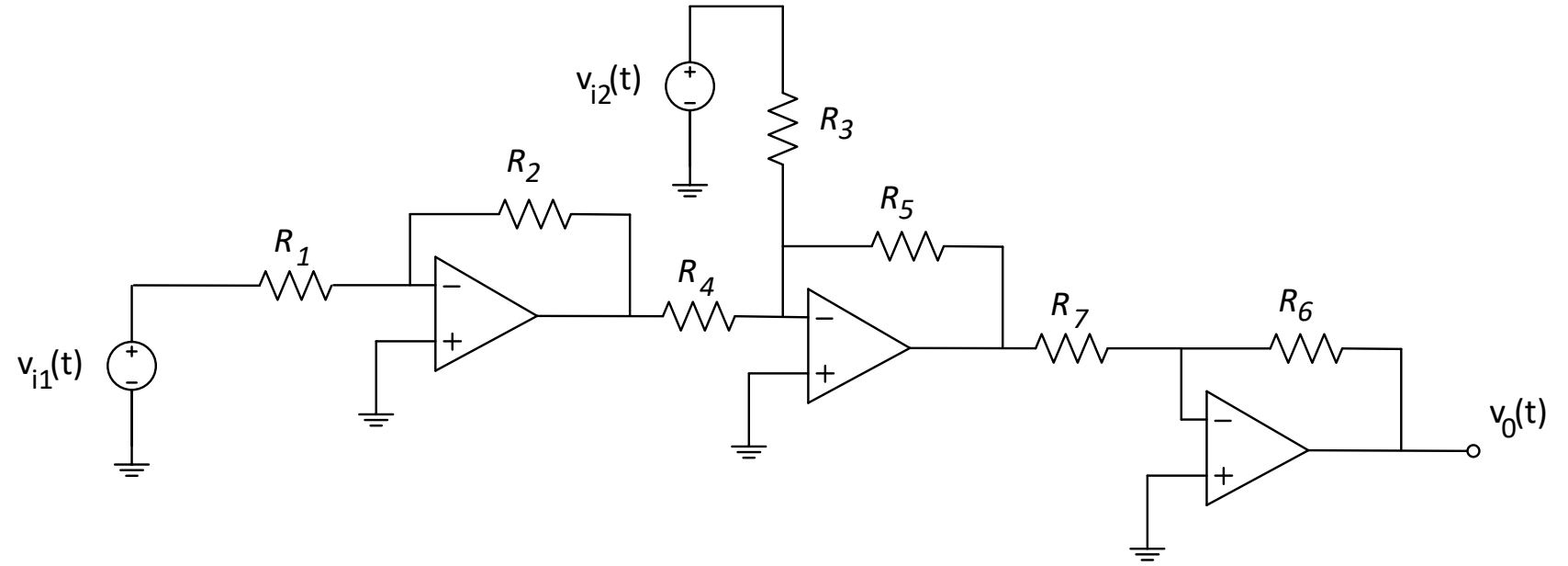
Örnek: $v_o = ?$



Örnek: $v_o = ?$



Örnek: $v_o = ?$



UYGULAMA