

# ENDÜSTRİYEL ELEKTRONİK

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİLERİN  
LİNEER OLMAYAN UYGULAMALARI

HAKAN KUNTMAN

2013-2014 EĞİTİM-ÖĞRETİM YILI

- İşlemsel kuvvetlendiriciler ve yarıiletken diyotlar, bipolar tranzistor gibi devre elemanlarının birlikte kullanılmasıyla, karakteristikleri lineer olmayan çeşitli türden devrelerin gerçekleştirilmesi
- Fonksiyon üreticileri, analog çarpma devreleri, doğrultucular, gerilim karşılaştırıcılar, Schmitt tetikleme devreleri gibi yapılar sayılabilir. Lineer olmayan devre uygulamaları, ölçü algılayıcıların karakteristiklerinin düzeltilmesi, çeşitli ölçü düzenlerinin gerçekleştirilmesi gibi alanlar

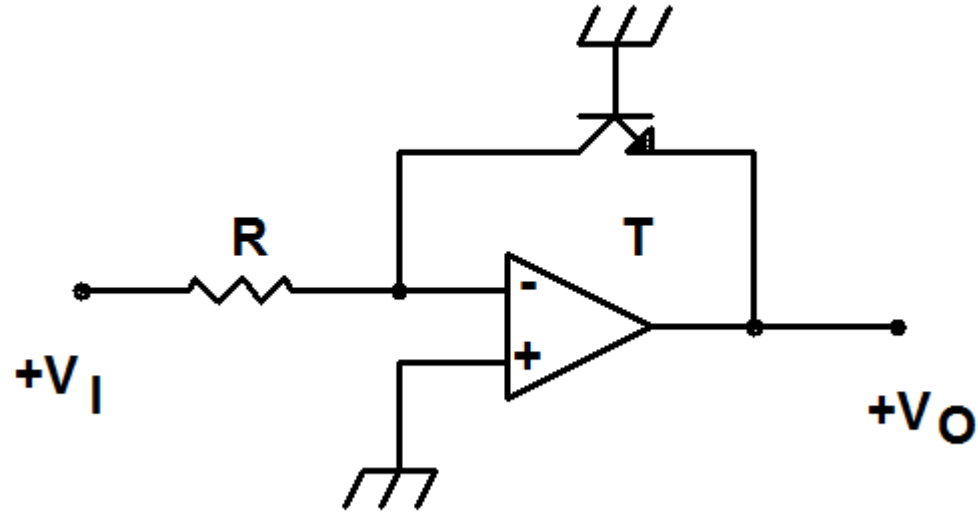
**3.1. İşlemsel kuvvetlendiriciler ve  
yarıiletken devre elemanlarının birlikte  
kullanılmasıyla  
karakteristikleri lineer olmayan çeşitli  
türden devrelerin gerçekleştirilmesi**

### **3.1.1. Fonksiyon üreticileri**

Logaritma ve üs alma, üstel fonksiyon elde etme, sinüs ve kosinüs fonksiyonları üretme, analog çarpma, bölme, karekök alma gibi işlemleri gerçekleştiren devre düzenleri fonksiyon üreticileri olarak isimlendirilirler.

## **Logaritmik kuvvetlendiriciler**

Çıkış geriliminin giriş geriliminin logaritmasıyla orantılı bir değişim gösterdiği kuvvetlendirici yapıları logaritmik kuvvetlendiriciler olarak isimlendirilirler. Logaritmik kuvvetlendiricilerin gerçekleştirilmesi amacıyla bipolar tranzistor yahut diyot karakteristiğinden yararlanılmaktadır.



Basit logaritmik kuvvetlendirici yapısı.

$$I_C = I_S \cdot \left[ \left( \exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right) - \left( \exp \frac{V_{BC}}{V_T} - 1 \right) \right]$$

$$V_{BC} = 0 \quad I_C = I_S \cdot \left( \exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right)$$

$$V_{BE} = V_T \cdot \ln \frac{I_C}{I_S} \quad I_C = I_1 = \frac{V_I}{R_1}$$

$$V_O = -V_{BE} = -V_T \cdot \ln \frac{V_I}{I_S \cdot R_1}$$

$$I_S(T) = I_S(T_{nom}) \cdot \left( \frac{T}{T_{nom}} \right)^3 \cdot \exp\left( -\frac{E_g}{k} \right)$$

$$(1.07)^{10} = 2$$

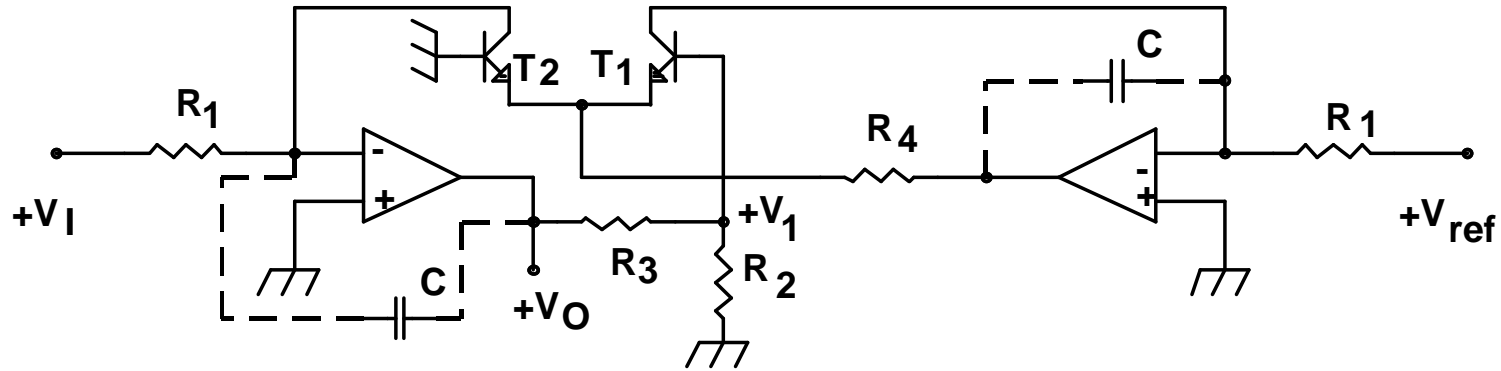
$$I_S(T) = I_S(T_{nom}) \cdot 2^{(T-T_{nom})/10}$$

Sıcaklık 20 °C den 50 °C ye yükseldiğinde,  $V_T$  ısıl gerilimi %10 oranında artar.  $I_S$  doyma akımı ise 8 katına çıkar.

Logaritmik kuvvetlendiricinin düzgün olarak çalışabilmesi için bu etkinin azaltılması gerekir.  $I_S$  doyma akımının etkisi, iki logaritma alıcı devresinin çıkışlarının farkı alınarak elimine edilebilir.



## Sıcaklık kompanzasyonlu logaritmik kuvvetlendirici



$$I_{C1} = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right) \quad I_{C2} = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right)$$

$$V_1 = V_{BE1} - V_{BE2} \quad \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \exp\left(\frac{V_1}{V_T}\right)$$

$$V_I = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot V_O \quad I_{C1} = \frac{V_I}{R_1}, \quad I_{C2} = \frac{V_{ref}}{R_1}$$

$$V_O = -V_T \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot \ln\left(\frac{V_I}{V_{ref}}\right)$$

- Çıkış gerilimi  $I_S$  doyma akımına bağlı değil
- $R_4$  direnci çıkış gerilimi bağıntısına girmez.
- Bu direncin değeri, üzerindeki gerilim düşümü OP2 işlemsel kuvvetlendiricisinin çıkış geriliminin dalgalanma aralığından yeteri kadar küçük olacak şekilde seçilir.

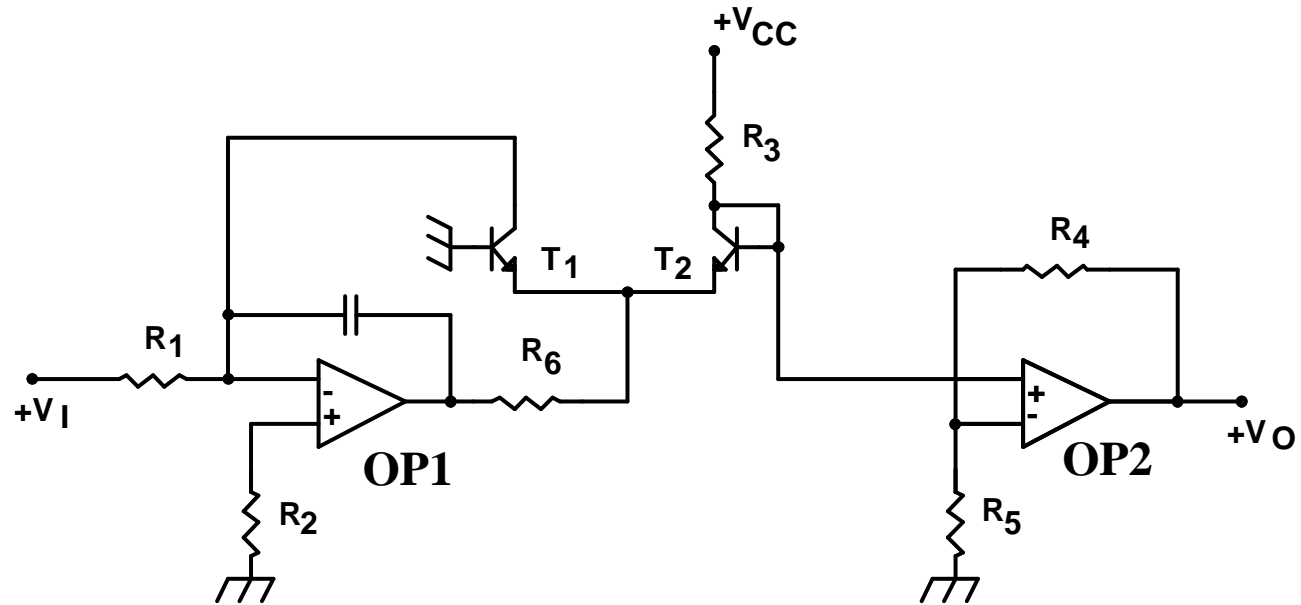
$R_2$  direnci için sıcaklık katsayısı  $TC_R = \%0.3/^\circ K$  olan bir direnç kullanılırsa,  $V_T$  ısıl geriliminin etkisi de kompanze edilebilir.

Genellikle, logaritmik kuvvetlendiricinin karakteristiğinin 1V/dek'lık bir eğim göstermesi istenir.

$$V_O = -V_T \frac{R_2 + R_3}{R_2} \frac{1}{\log e} \log\left(\frac{V_I}{V_{ref}}\right) = -1V \cdot \log\left(\frac{V_I}{V_{ref}}\right)$$

$$\frac{R_2 + R_3}{R_3} = \frac{1V \cdot \log e}{V_T} = 16.7 \quad V_T = 26 \text{ mV}$$

$$R_2 = 1k\Omega, \quad R_3 = 15.7k\Omega \quad R_2 \ll R_3$$



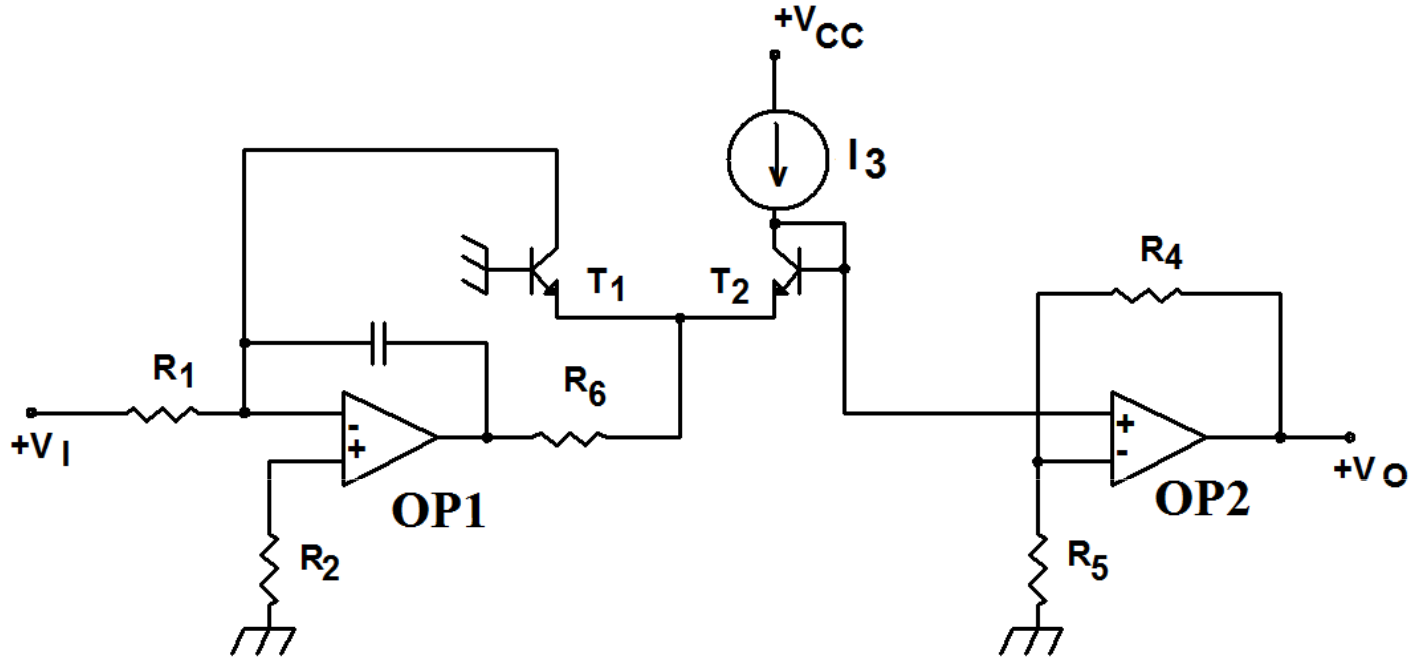
$$V_{BE1} - V_{BE2} = -V_T \cdot \ln \frac{I_1}{I_3}$$

$$K_{vf} = \frac{R_4 + R_5}{R_5}$$

$$V_O = -V_T \frac{R_4 + R_5}{R_5} \ln \frac{I_1}{I_3}$$

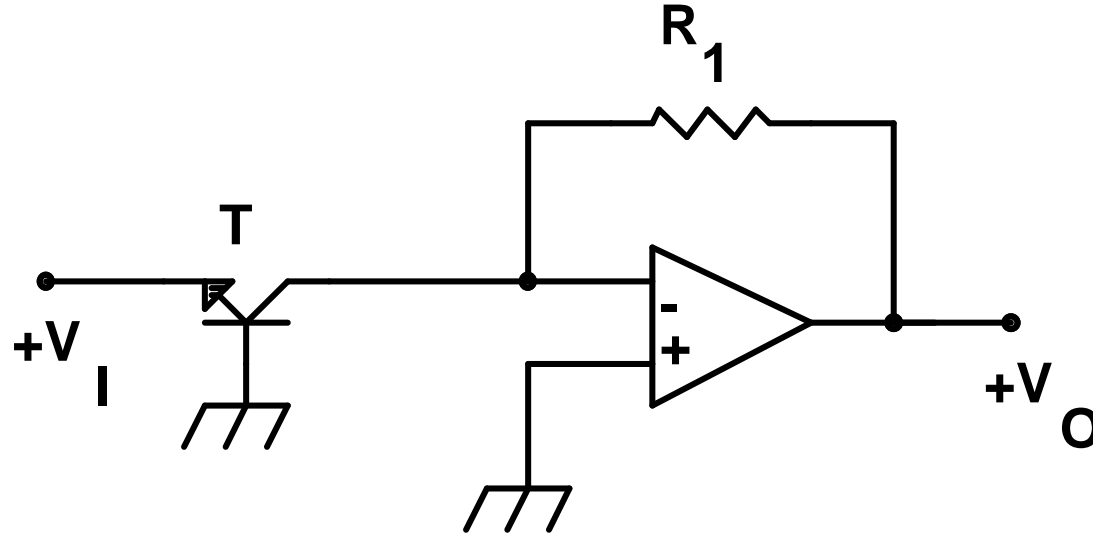
$$V_O = -V_T \frac{R_4 + R_5}{R_5} \ln \frac{V_I}{R_1 \cdot I_3}$$

- $V_O = 0$  noktası  $I_3$  akımı ile belirlenir. Bu akımın değeri de  $R_3$  direnci ile ayarlanır.  $I_3 = I_1$  de  $V_{BE1} = V_{BE2}$  olur.
- $V_{BE}$  gerilimlerinin sıcaklıkla değişimleri, bu devrede birbirlerini kompanze ederler.
- Devredeki  $R_1$  direncinin değeri  $T_1$  tranzistorunun kolektör akımına ve giriş geriliminin değişim aralığına bağlıdır.
- Giriş geriliminin değişim aralığı bir kaç 10V mertebesindedir; alabileceği minimum değer ise mikrovoltlar mertebesine inmektedir.
- Devrede görülen  $R_6$  direnci,  $T_1$  tranzistorunun OP1 işlemsel kuvvetlendiricisinin çevrim kazancını yükseltip kararsızlığa yol açmaması için kullanılmıştır;



$I_3$  akımının akım kaynağı ile sağlanması

# Üstel fonksiyon devresi, ters logaritmik kuvvetlendirici

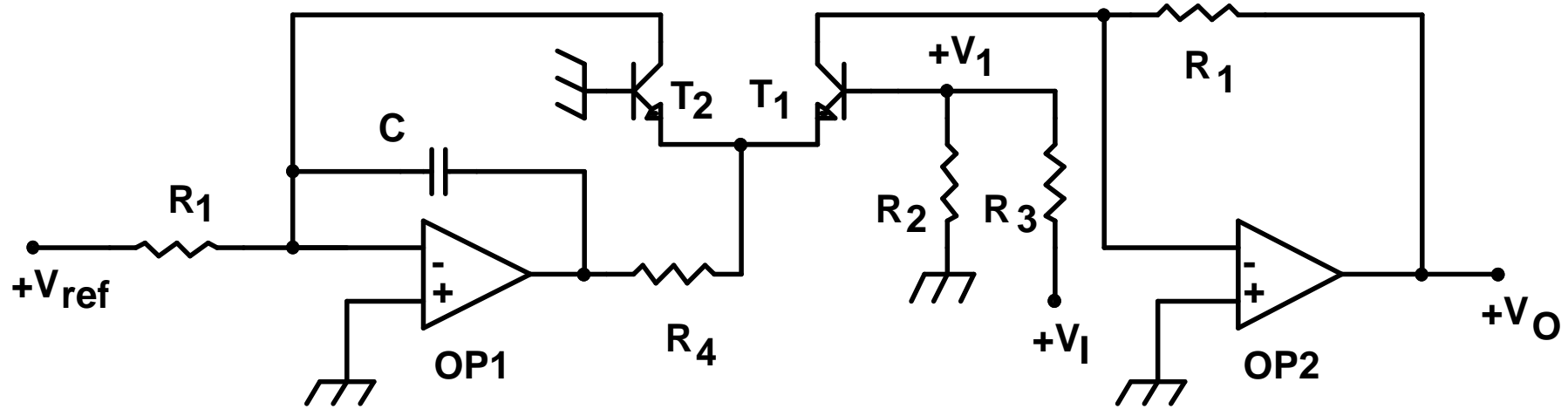


Basit ters logaritmik kuvvetlendirici

$$I_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) = I_S \cdot \exp\left(-\frac{V_I}{V_T}\right)$$

$$V_O = I_S \cdot R_1 \cdot \exp\left(-\frac{V_I}{V_T}\right)$$

## Sıcaklık kompanzasyonlu ters logaritmik kuvvetlendirici.



$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \exp \frac{V_1}{V_T}, \quad I_{C1} = \frac{V_O}{R_1}, \quad I_{C2} = \frac{V_{ref}}{R_1}$$

$$V_1 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_I \quad V_O = V_{ref} \cdot \exp \left( \frac{R_2}{R_2 + R_3} \frac{V_I}{V_T} \right)$$



- $I_S$  doyma akımını içermemektedir.
- $R_4$  direnci,  $T_1$  ve  $T_2$  tranzistorlarının akımını sınırlamaya yarar.
- Bu direnç bağıntılarda görülmediği için değeri çıkış gerilimini etkilemez.

Devre uygulamalarında, çoğunlukla, 1V'luk bir giriş gerilimi değişimi için bir dekatlık bir çıkış gerilimi değişimi istenir. Bu şartı yerine getiren direnç oranını belirlemek üzere bağıntı düzenlenirse

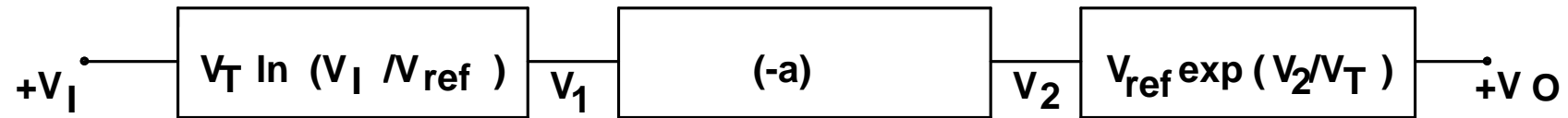
$$V_O = V_{ref} \cdot 10^{\frac{R_2}{R_2+R_3} \frac{V_I}{V_T} \cdot \log e} = V_{ref} \cdot 10^{\frac{V_I}{1V}}$$

$$\frac{R_2 + R_3}{R_2} = \frac{1V \cdot \log e}{V_T} = 16.7 \quad V_T = 26 \text{ mV}$$

# Üs alma devresi

$$y = x^a$$

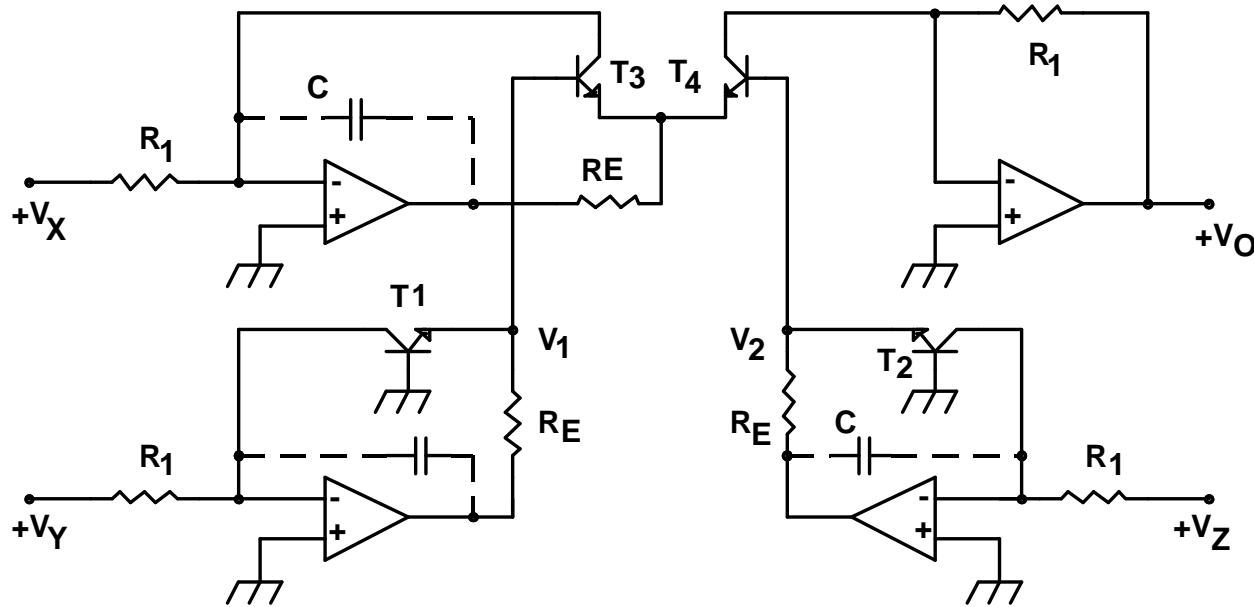
$x > 0$  için logaritmik kuvvetlendirici ve ters logaritmik kuvvetlendirici



$$V_O = V_{ref} \cdot \exp\left(\frac{a \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{V_I}{V_{ref}}\right)}{V_T}\right) = V_{ref} \cdot \left(\frac{V_I}{V_{ref}}\right)^a$$

# Analog çarpma devreleri

Logaritmik kuvvetlendiricilerin biraraya getirilmesi ile çarpma ve bölme işlemlerinin gerçekleştirilmesi



üç logaritmik kuvvetlendirici, bir ters logaritmik kuvvetlendirici ve bir toplama-çıkarma devresi

$$\frac{x \cdot y}{z} = \exp[\ln x + \ln y - \ln z]$$

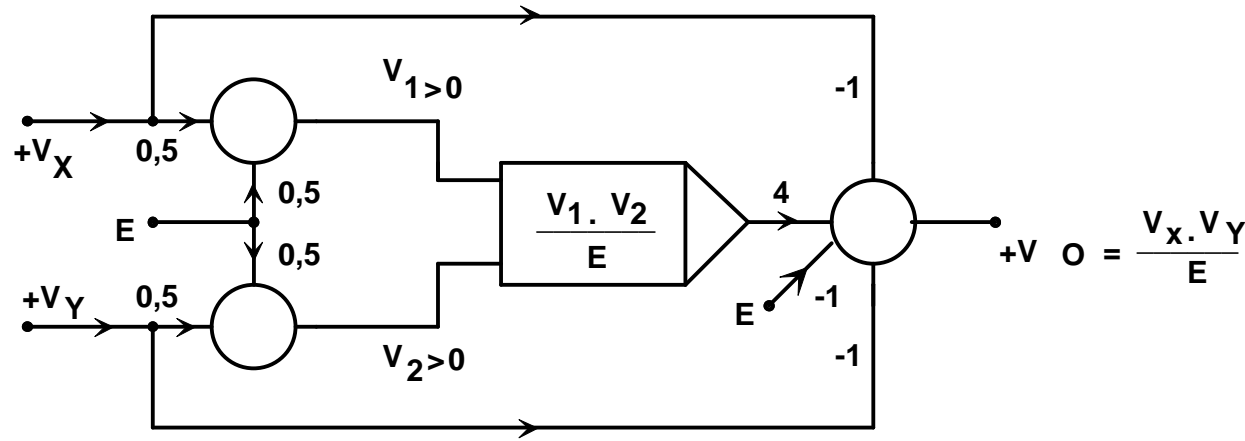
$$V_1 = V_T \cdot \ln \frac{V_y}{I_S \cdot R_1} \quad V_2 = -V_T \cdot \ln \frac{V_z}{I_S \cdot R_1}$$

$$V_o = V_x \cdot \exp\left(\frac{V_2 - V_1}{V_T}\right) = \frac{V_x \cdot V_y}{V_z}$$

tek bölgeyi bir analog çarpma devresi  
giriş gerilimlerinin daima pozitif olması  
zorunluluğu

# Dört bölge analog çarpma devresi

$V_x$  ve  $V_y$  gerilimlerine sabit değerli  $V_{xk}$  ve  $V_{yk}$  gerilimlerini eklemek ve bileşke giriş gerilimlerinin her şart altında izin verilen bölge içerisinde kalmasını sağlamak



$$V_o = \frac{(V_x + V_{xk}) \cdot (V_y + V_{yk})}{E}$$

$$\frac{V_x \cdot V_y}{E} = V_o - \frac{V_{xk}}{E} \cdot V_y - \frac{V_{yk}}{E} \cdot V_x - \frac{V_{xk} \cdot V_{yk}}{E}$$

$$-E \leq V_x \leq E$$

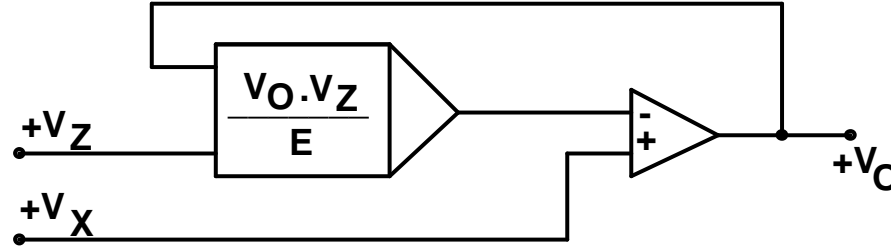
$$V_1 = 0,5.V_x + 0,5.E \quad 0 \leq V_1 \leq E$$

$$-E \leq V_y \leq E$$

$$V_2 = 0,5.V_y + 0,5.E$$

$$V_o = 4 \frac{\frac{1}{2} \cdot (V_x + E) \cdot \frac{1}{2} \cdot (V_y + E)}{E} - V_x - V_y - E = \frac{V_x \cdot V_y}{E}$$

# Bölme ve karekök alma devreleri



Bölme devresi

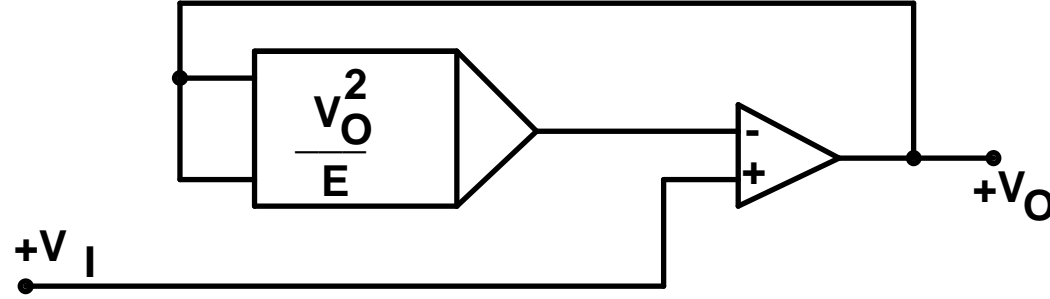
Analog çarpma devresini işlemsel kuvvetlendirici ile birlikte kullanarak bölme devresi gerçekleştirilebilir.

$$V_x = \frac{V_o \cdot V_z}{E} \quad V_o = E \cdot \frac{V_x}{V_z}$$

$V_z > 0$  için devre düzgün çalışır.  $V_z < 0$  durumunda ise geribesleme pozitif geribeslemeye dönüşür ve kararsızlık sorunu ortaya çıkar.



## Karekök alma devresi.

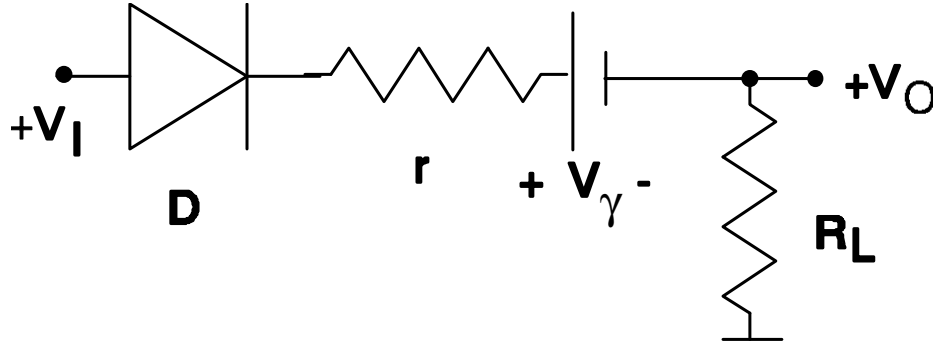


$$V_I = \frac{V_O^2}{E} \quad V_O = \sqrt{E \cdot V_I}$$

Devre pozitif giriş ve çıkış gerilimlerinde düzgün çalışır. Negatif giriş gerilimlerinde ise çevrim kazancı işaret değiştirir, pozitif geribesleme oluşur, bunun sonucunda çıkış gerilimi negatif kaynağa giderek kenetlenir. Bu olayın ortaya çıkmaması için diyotlu kenetleme vb önlemlerin alınması gerekmektedir.

# AC-DC çeviriciler

## Yüksek doğruluklu doğrultucular

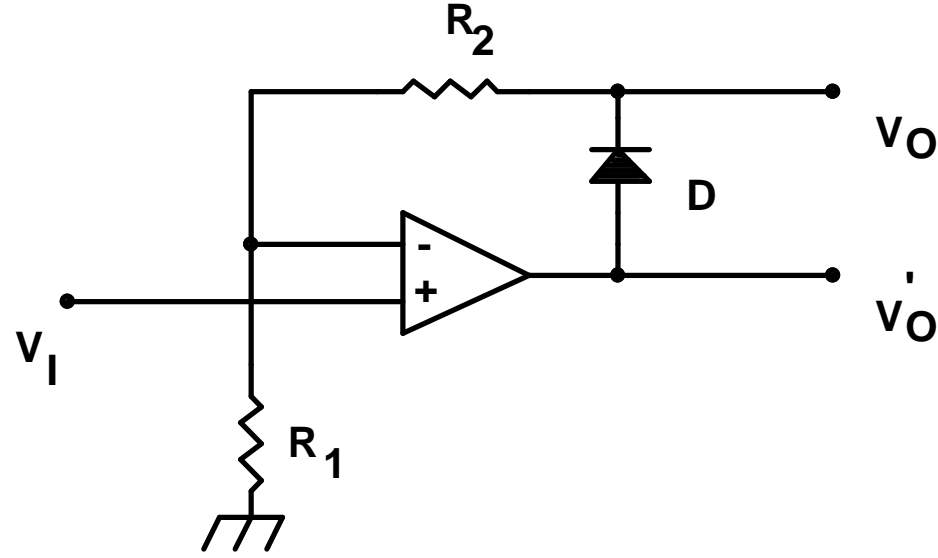


r direnci devredeki  
diyodun seri direnci,  
 $V_\gamma$  diyodun eşik gerilimi

Basit diyotlu doğrultucu

$V_I > V_\gamma$  için çıkış gerilimi

$$V_O = \frac{R_L}{R_L + r} \cdot (V_I - V_\gamma)$$



Faz döndürmeyen kuvvetlendirici yapısı ile presizyonlu doğrultucu devresi.

- $V_{O'} < V_{\gamma}$  olduğu sürece diyot tıkalıdır; dolayısıyla geribesleme çevrimi etkisiz.
- İşlemsel kuvvetlendiricinin  $V_{O'}$  çıkışında yüksüz (geribeslemesiz) haldeki kazanç elde edilir.
- Küçük değerli negatif bir giriş gerilimi,  $V_{O'}$  çıkış gerilimini işlemsel kuvvetlendiricinin  $V_{Omin}$  sınır değerine getirmeye yeterli olur. Diyodun kesimde olması durumu için devrenin  $V_O$  çıkış gerilimi  $V_O = 0$  olur.

$$V_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + r} (V_O' - V_\gamma)$$

$$V_O' = K_V \cdot \left[ V_I - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_O \right]$$

$$V_I > 0 \text{ için } \beta = R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$V_O = \frac{R_1 + R_2}{(R_1 + R_2) \cdot \left( 1 + \frac{1}{K_V \cdot \beta} \right) + \frac{r}{K_V \cdot \beta}} \left[ \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_I - \frac{V_\gamma}{K_V \cdot \beta} \right]$$

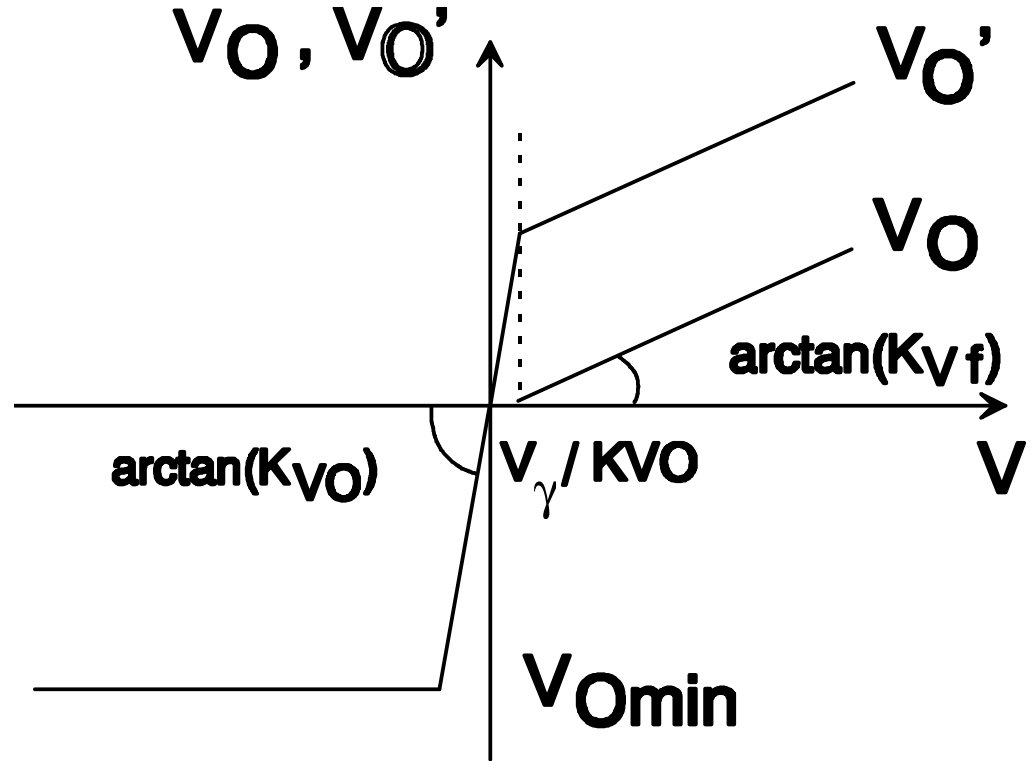
$$\beta \cdot K_V \gg 1$$

$$V_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + \frac{r}{K_V \cdot \beta}} \cdot \left[ \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_I - \frac{V_\gamma}{K_V \cdot \beta} \right]$$

faz döndürmeyen kuvvetlendirici yapısındaki  
doğrultucunun gerilim kazancı

$$K_{Vf} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

işlemsel kuvvetlendirici ile kurulan presizyonlu doğrultucuda eşik geriliminin ve seri direncin  $\beta.K_V$  çevrim kazancı kadar küçülmüş olduğu kolayca görülebilir.



Faz döndürmeyen doğrultucunun  $V_O - V_I$  ve  $V_O' - V_I$  geçiş karakteristikleri.

Ortalama değer doğrultucusu olarak kullanılma ve sinüs biçimli bir giriş işareti uygulanması durumunda, devrenin ortalama çıkış gerilimi

$$\overline{V_O} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{V_P}{\pi} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + \frac{r}{K_V \cdot \beta}} \cdot \left[ 1 - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_\gamma}{K_V \cdot V_P} \right]$$

$V_P$  büyüklüğü  $V_I$  giriş geriliminin tepe değeridir.

Ortalama değer doğrultucusu olarak kullanılma durumunda, çıkış işaretinde oratya çıkacak bağıl hata

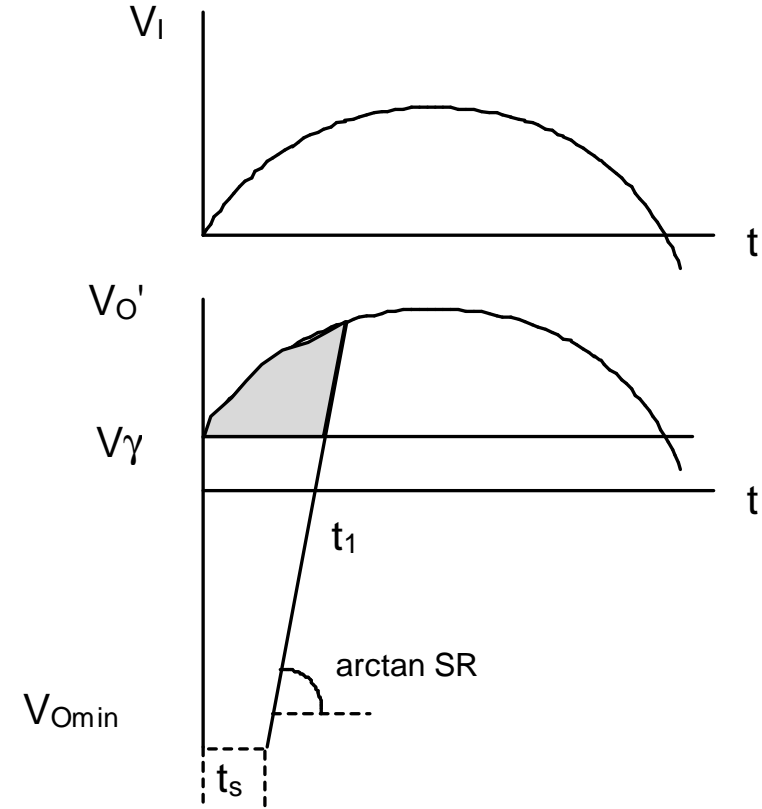
$$h = -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_\gamma}{K_V \cdot V_P}$$

Alçak frekanslarda  $K_V = K_{V0}$  olacağından, kazanç çok büyük değerlidir; bu nedenle  $h$  bağıl hatası bu frekanslarda ihmal edilebilir. Dolayısıyla, alçak frekanslarda doğruluk sadece işlemsel kuvvetlendiricinin dengesizlik gerilimine ve sürüklenmesine bağlı olur.



Yüksek frekanslarda kullanılmaya elverişli değildir Kararlılığının sağlanması gerektiğinden, işlemsel kuvvetlendiriciye frekans kompanzasyonu uygulanması zorunlu olur;

Çıkış işaretinin değişim hızı, işlemsel kuvvetlendiricinin YE yükselme eğimi ile sınırlıdır.



Diyodun  $t_s$  toparlanma süresinin de etkisi vardır

$$t_1 = \frac{V_\gamma - V_{Omin}}{YE}$$

Gerilim diyagramında kaybedilen alan

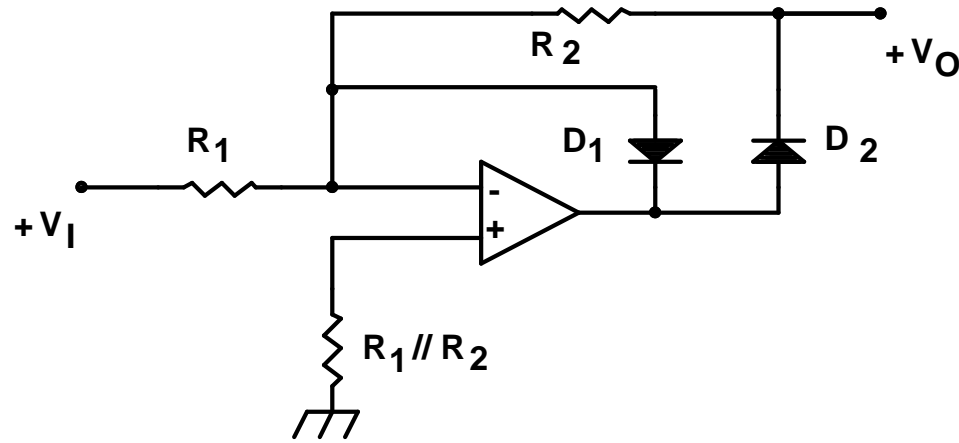
$$\frac{\overline{V_{OP}}}{T} \int_0^{t_1} \sin \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot dt \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot V_{OP}}{T^2} \int_0^{t_2} t \cdot dt = \frac{V_{OP} \cdot \omega^2}{4\pi} \cdot \left( t_s + \frac{V_{\gamma V_{Omin}}}{YE} \right)^2$$

Frekansa bağıl hata

$$h_2 = -\frac{1}{4} \omega^2 \left[ t_s + \frac{V_{\gamma} - V_{Omin}}{YE} \right]^2$$

## Faz döndüren doğrultucu

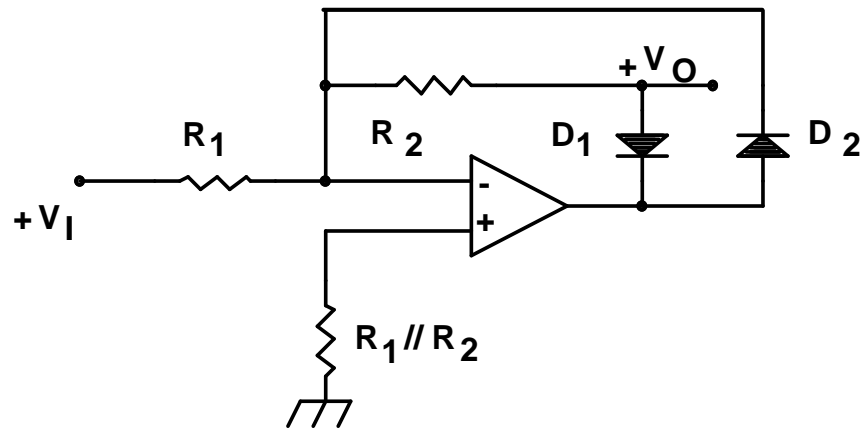
- Doğrultucu devresi faz döndüren kuvvetlendirici yapısı yardımıyla da kurulabilir.
- Yüksek frekans cevabı açısından bu yapı faz döndürmeyen doğrultucu yapısına göre daha üstündür. Bunun başlıca iki nedeni vardır:
- Devreye uygulanan geribesleme  $V_I$  giriş geriliminin tek yarıperiyodu ile sınırlı değildir.
- Devreye uygulanan kompanzasyon daha büyük bir yükselme eğimi elde edilmesini mümkün kılmaktadır.



$$V_O = -\frac{R_2}{R_1} V_I, \quad V_I < 0$$

$$V_O = 0, \quad V_I > 0$$

a) negatif giriş işaretleri için doğrultucu.



$$V_O = -\frac{R_2}{R_1} V_I, \quad V_I > 0$$

$$V_O = 0, \quad V_I < 0$$

b) pozitif giriş işaretleri için doğrultucu.

negatif giriş işaretleri için doğrultucu

$$V_{IN} = V_P - V_N$$

$$V_{IN} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_O$$

$$V_{IN} = \frac{R_2}{R_2 + r} (V_O - V_\gamma)$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad V_{IN} = \beta \frac{\frac{R_2}{R_1} V_I - V_\gamma}{1 + K_V \cdot \beta}$$

$$V_o' = \frac{K_v \cdot \beta}{1 + K_v \cdot \beta} \left[ \frac{R_2}{R_1} V_I - V_o \right]$$

$V_I > 0$  için

$$V_o = V_{IN}$$

$V_I < 0$  için

$$V_o = -\frac{R_2}{R_2 \left( 1 + \frac{1}{\beta \cdot K_v} \right) + \frac{r}{\beta \cdot K_v}} \cdot \left[ \frac{R_2}{R_1} V_I + \frac{V_\gamma}{\beta \cdot K_v} \right]$$

$\beta.K_V \gg 1$  için

$$V_O = \frac{-R_2}{R_2 + \frac{r}{\beta.K_V}} \left[ \frac{R_2}{R_1} V_I + \frac{V_\gamma}{\beta.K_V} \right]$$

ortalama değer doğrultucusu olarak çalışması halinde, sinüs biçimli bir giriş işareti için çıkış gerilimi

$$\overline{V_O} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{V_{IP}}{\pi} \frac{R_2}{R_2 + \frac{r}{\beta.K_V}} \left[ 1 + \frac{\pi}{2} \frac{R_1}{R_2} \frac{V_\gamma}{\beta.K_V V_{IP}} \right]$$

Ortalama değer doğrultucusu olarak kullanılmada ortaya çıkacak bağıl hata

$$h_1 = \frac{\pi R_1}{2 R_2} \frac{V_\gamma}{\beta \cdot K_V \cdot V_{IP}}$$

Yazılanlar ıkış işaretinin pozitif yarıperiyodu için geçerlidir.

Bağıntılarda işlemsel kuvvetlendiricinin 180° faz döndürdüğü ve  $V_{IP} < 0$  olduğu dikkate alınmalıdır.



## Faz döndüren doğrultucunun frekansa bağımlılığı

$$K_V(j\omega) = \frac{K_{VO}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$D_2$  diyodu tıkalı iken

$$V_O = 0$$

$D_2$  diyodu iletimde iken

$$V_O = -\frac{R_2}{R_1}V_I$$

$$V_o(s) = -\frac{R_2}{R_1} V_I \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_2 + r} \beta K_V(s)} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \frac{V_\gamma}{\beta K_V(s) V_I} \right)$$

$$R_2 \gg r, \beta \cdot K_{V0} \gg 1$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_I \left[ 1 - \left( 1 - \frac{R_1 V_\gamma}{R_2 V_I} \right) \frac{1}{\beta K_V(s)} \right]$$

$$K_V(s) = \frac{K_{VO}}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

$V_{IP} < 0$  kabulü ile  $\omega_0 \ll \omega \ll \beta \cdot K_{VO} \cdot \omega_0$  aralığında çıkış geriliminin genliği ve fazı

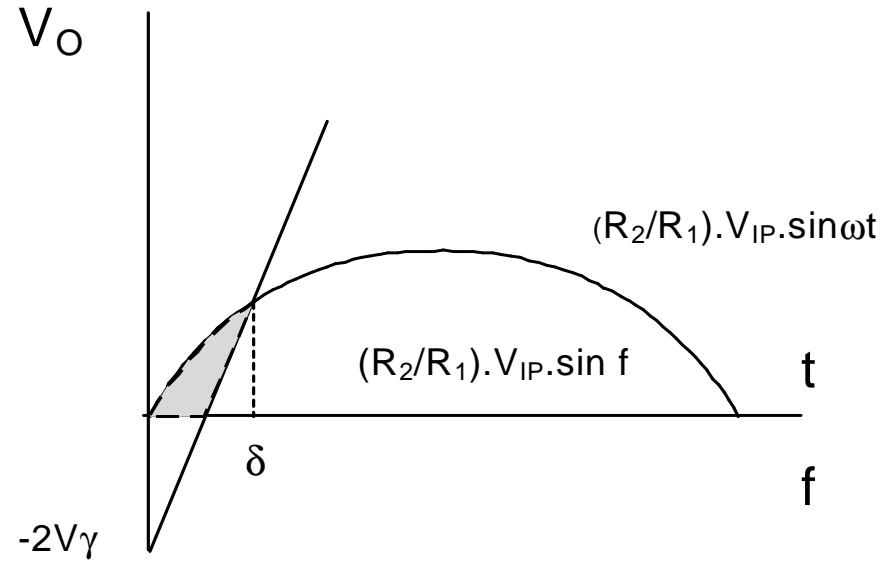
$$V_{OP}(\omega) = \frac{R_2}{R_1} V_{IP} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \frac{V_\gamma}{V_{IP}} \right)^2 \left( \frac{\omega}{\beta K_{VO} \omega_0} \right)^2 \right]$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left( \frac{1 - \frac{R_1}{R_2} \frac{V_\gamma}{V_{IP}}}{\beta K_{VO}} \frac{\omega}{\omega_0} \right)$$

$V_{IP} < 0$  için frekansa bağımlı bağıl hata

$$h_2 = -\frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \frac{V_\gamma}{V_{IP}} \right)^2 \left( \frac{\omega}{\beta K_{VO} \omega_0} \right)^2$$

Yükselme eğiminin çıkış gerilimine etkisi



Yükselme eğimi nedeniyle ortaya çıkacak bağıl hata

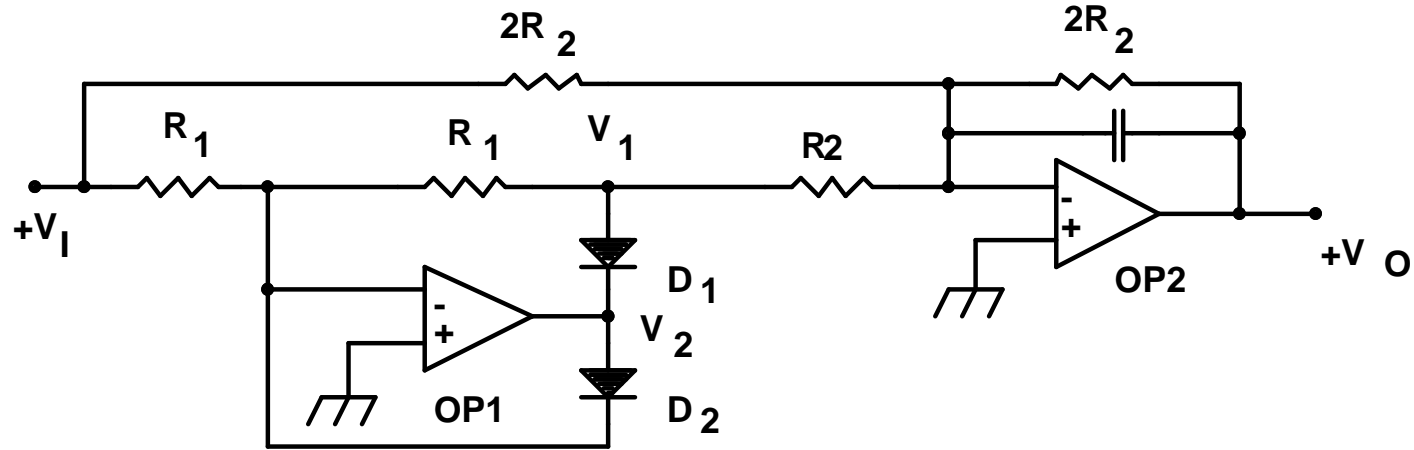
$$h_3 = -\frac{1}{2}(1 - \cos\delta) - \left( \frac{V_\gamma \omega}{2YE} - \frac{\delta}{4} \right) \sin\delta$$

$$\frac{YE}{V_\gamma \omega} \delta + \frac{R_2 V_{IP}}{R_1 V_\gamma} \sin\delta - 2 = 0$$

$\delta = \pi/2$ , mutlak frekans kısıtlaması

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot YE}{2 \cdot V_\gamma \cdot \left( 2 - \frac{R_2 V_{IP}}{R_1 V_\gamma} \right)} \quad h_{3H} = -\frac{1}{2} - \frac{\pi}{4} \left( \frac{1}{2 - \frac{R_2 V_{IP}}{R_1 V_\gamma}} - \frac{1}{2} \right)$$

## Çift yönlü doğrultucu



$$V_O = -\frac{2 \cdot R_2}{2 \cdot R_2} V_I - \frac{2 \cdot R_2}{R_2} V_1 = -(V_I + 2 \cdot V_1)$$

$$V_O = V_I \quad , \quad V_I \geq 0$$

$$V_O = -V_I \quad , \quad V_I \leq 0 \quad \quad V_O = |\overline{V_I}|$$

## Etkin değer ölçme düzenleri

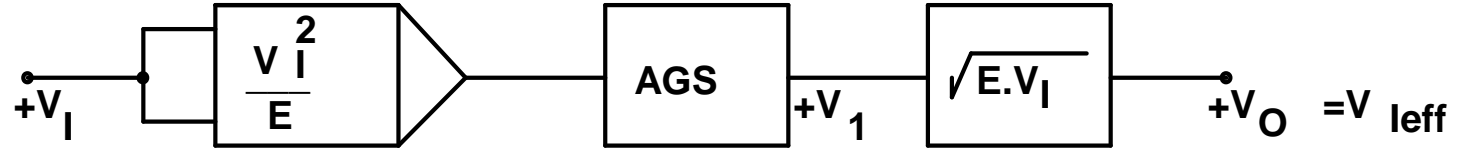
Bir gerilimin ortalama değeri

$$\overline{|V|} = \frac{1}{T} \int_0^T |V| \cdot dt$$

Etkin değer (root mean square value: RMS)

$$V_{eff} = \sqrt{\overline{(V^2)}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2 \cdot dt}$$

## Gerçek etkin değer çeviricisinin blok şeması

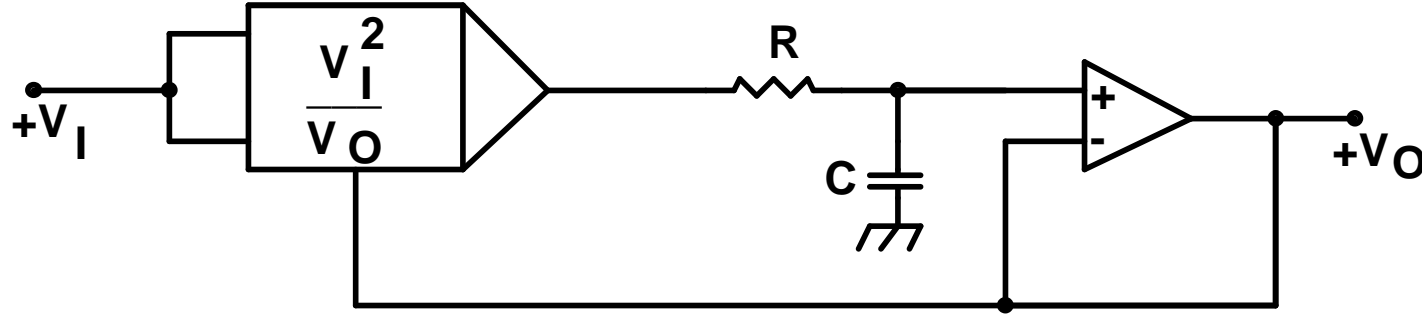


- Giriş işaretinin karesi alınmakta, kare alma devresinin çıkış gerilimi alçak geçiren bir süzgeçten geçirildikten sonra bir karekök alma devresine uygulanmakta, karekök alma devresinin çıkışından da giriş geriliminin etkin değerine eşit bir doğru gerilim alınmaktadır.
- Karesel ortalama için kullanılan alçak geçiren süzgecin kesim frekansı, en düşük işaret frekansından yeteri kadar küçük tutulmalıdır.



- Bu devrenin dinamiği dardır ve küçük giriş gerilimleri gürültüden ayırt edilemez.
- Örnek vermek gerekirse,  $E = 10 \text{ V}$  olan bir yapıya  $10 \text{ mV}$ 'luk bir giriş gerilimi uygulanması halinde, analog çarpma devresi çıkışında  $10 \mu\text{V}$ 'luk bir değişim oluşur.
- Bu kadar küçük bir gerilimin ise karekök alıcının gürültüsünden kolayca ayırt edilemeyeceği açıktır.

## Dinamiği genişletilmiş etkin deger ölçü düzeni



alçak geçiren süzgeç çıkışında

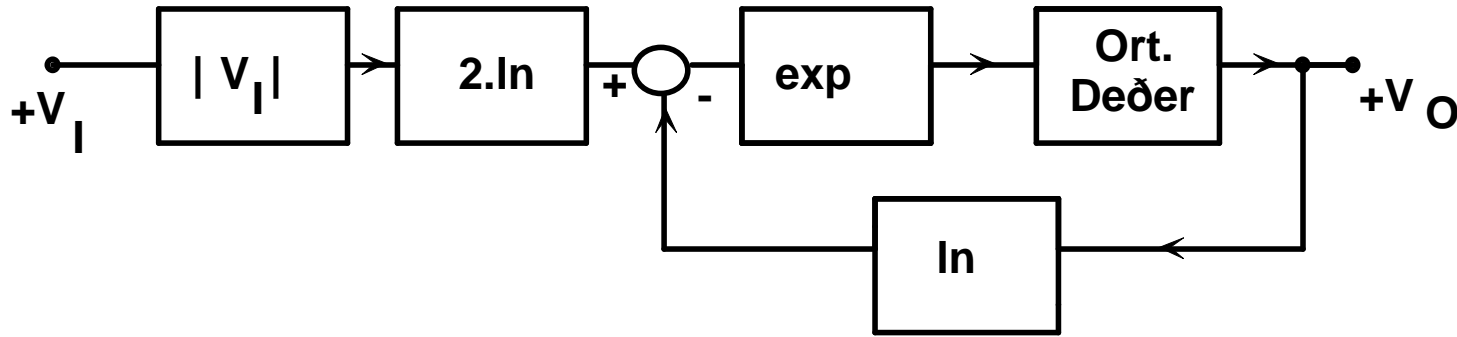
$$V_I = \left( \frac{V_{IN}^2}{V_O} \right)$$

$$V_O = \frac{\overline{(V_{IN}^2)}}{V_O}$$

$$V_O = \sqrt{\overline{V_{IN}^2}} = V_{Ieff}$$

$V_I$  giriş gerilimi  $V_I/V_O$  ile, başka bir deyişle 1'e çok yakın bir çarpanla çarpılmakta, böylece daha büyük bir giriş gerilimi değişim aralığı elde edilmektedir.

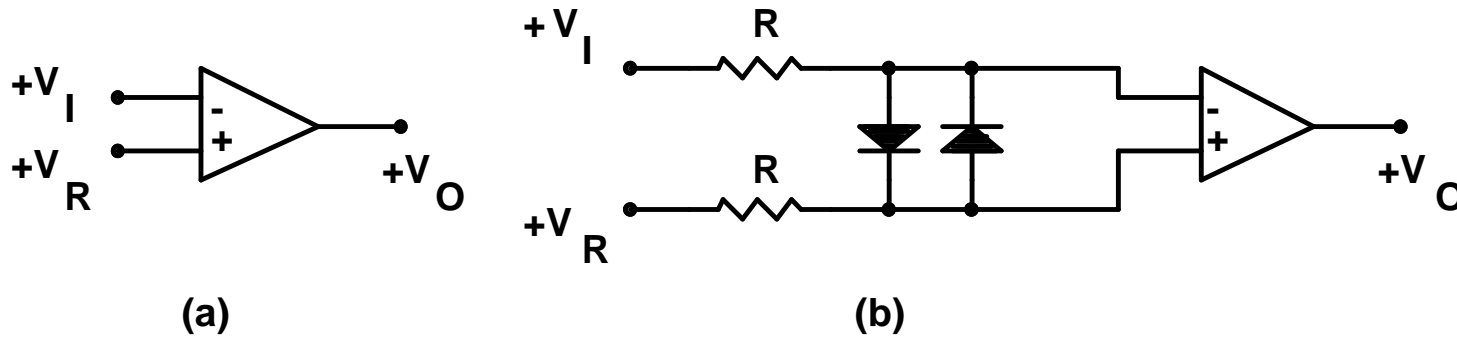
## Gerçek etkin değer çeviricinin logaritma ve üs alma devreleri yardımıyla gerçekleştirilmesi

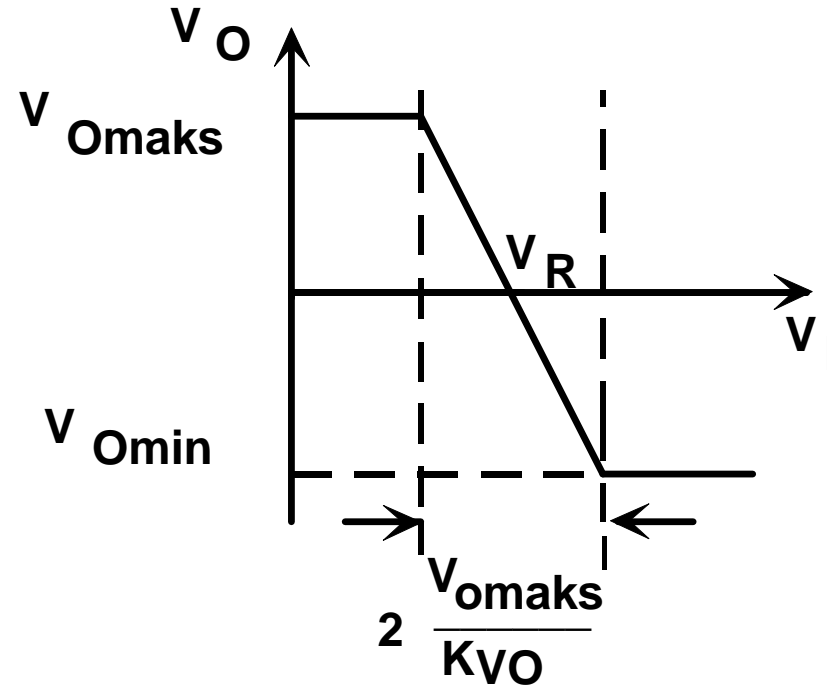


- Devredeki ilk blok çift yönlü bir doğrultucudur ve giriş işaretinin mutlak değerini alır.
- İkinci blok doğrultulan işaretin logaritmasını alıp 2 ile çarpar.
- Daha sonraki bloklarda ise çıkış geriliminin logaritması alınıp giriş işaretinin logaritmasından çıkartılmakta, elde edilen fark işaret ters logaritmik kuvvetlendiriciye uygulandıktan sonra alçak geçiren bir süzgeçten geçirilerek çıkış işareti elde edilmektedir.

## 3.2. İşlemsel kuvvetlendiricilerin lineer olmayan geçiş karakteristiğinden yararlanılarak gerçekleştirilen devreler

### Gerilim karşılaştırıcılar





$$V_P = V_R \quad , \quad V_N = V_I$$

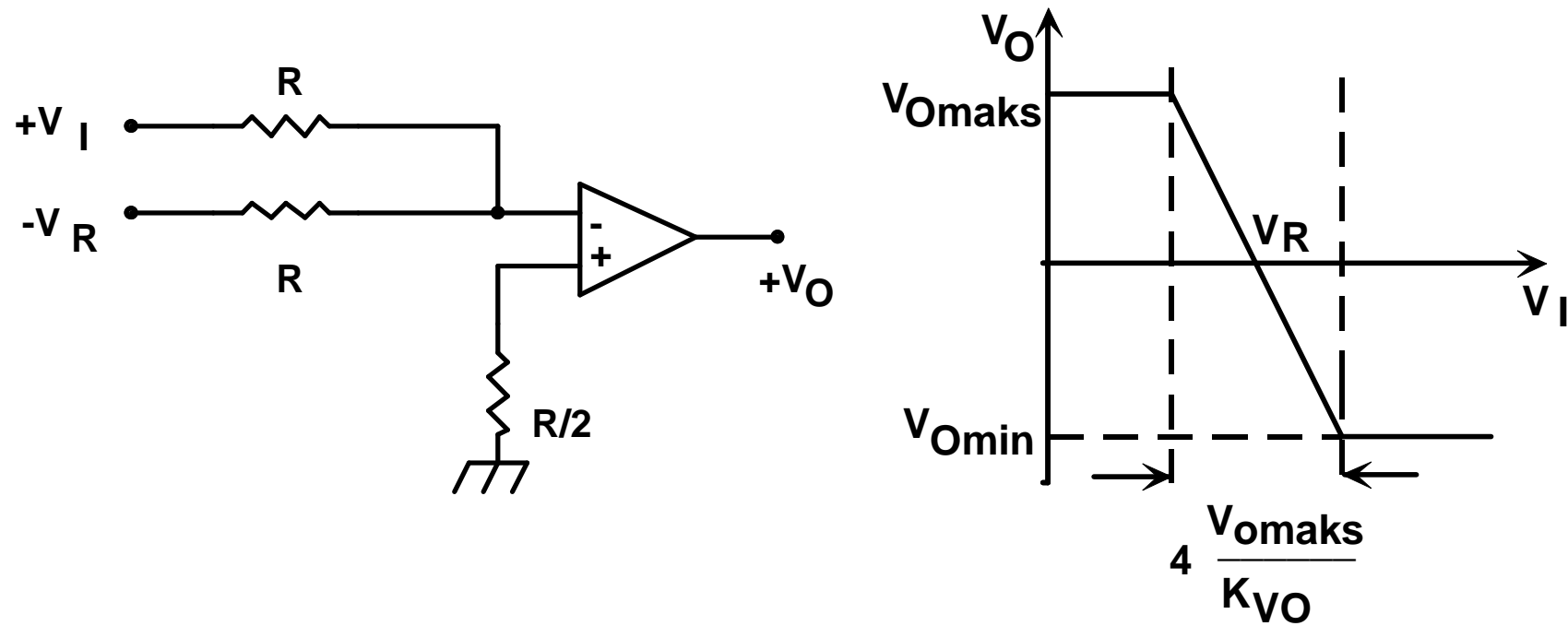
$$(V_R - V_I) > \frac{V_{Omaks}}{K_{VO}} \quad V_O = V_{Omaks}$$

$$(V_I - V_R) \geq -\frac{V_{Omin}}{K_{VO}} \quad V_O = V_{Omin}$$

$$V_O = \begin{cases} V_{Omaks} & , \quad V_I \leq V_R - \frac{V_{Omaks}}{K_{VO}} \\ V_{Omin} & , \quad V_I \geq V_R - \frac{V_{Omin}}{K_{VO}} \end{cases}$$

- Gerilim karşılaştırıcı devresinin giriş uçları arasına gelen gerilimin büyük değerlere ulaşması durumunda, işlemsel kuvvetlendiricinin girişine uygulanmasına izin verilen sınır değerler aşılabılır ve kuvvetlendirici zarar görebilir.
- Devrenin girişine R dirençlerinden ve diyotlardan oluşan bir koruma devresi yerleştirilir.

Geçiş hatası azaltılmış gerilim karşılaştırıcı ve geçiş karakteristiği.



- Devredeki R dirençleri ile bir toplama devresi oluşturulmuştur.
- Devrenin her iki girişine bağlanan dirençlerin değerce eşit olmaları, işlemsel kuvvetlendiricinin dengeli çalışması için bir zorunluluktur.
- Bu nedenle, faz döndürmeyen girişe bağlanan direnç  $R/2$  değerinde seçilmiştir.
- Giriş geriliminin referans gerilimine eşit iken karakteristiğinin sıfırdan geçmesi için referans geriliminin  $V_{ref} = -V_R$  biçiminde negatif değerli olması gerekeceği açıktır.



devrenin giriş dengesizlik gerilimi

$$V_{I'O} = -R_P \cdot \left[ I_I + \frac{I_{IO}}{2} \right] + R_N \cdot \left[ I_I - \frac{I_{IO}}{2} \right] - V_{IO}$$

sıcaklıkla sürüklenme

$$\frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T} = -R_P \cdot \left[ \frac{\Delta I_I}{\Delta T} + \frac{1}{2} \frac{\Delta I_{IO}}{\Delta T} \right] + R_N \cdot \left[ \frac{\Delta I_I}{\Delta T} - \frac{1}{2} \frac{\Delta I_{IO}}{\Delta T} \right] + \frac{\Delta V_{IO}}{\Delta T}$$

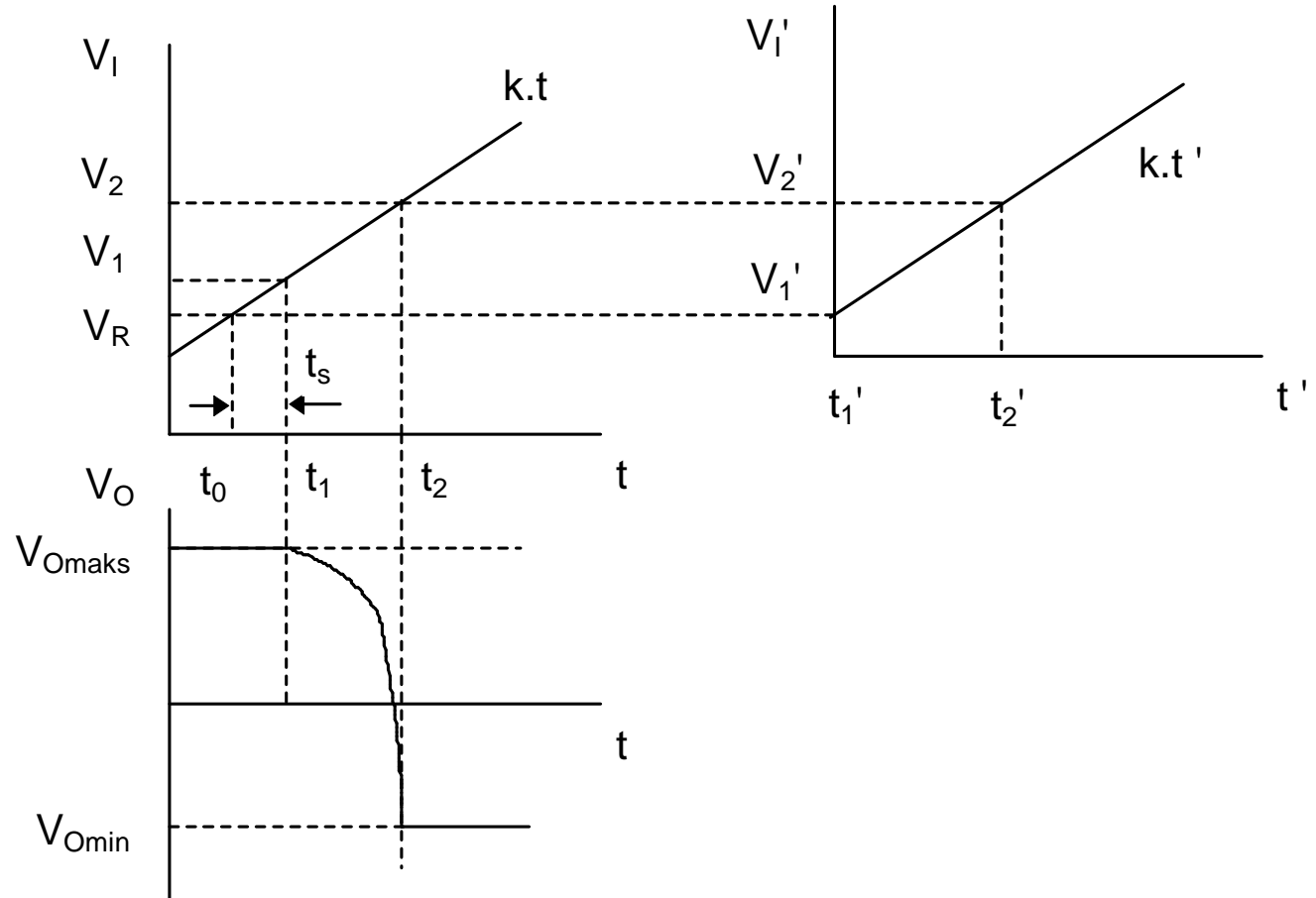
## Devrenin karşılaştırma sınırları

$$V_R - \frac{V_{Omaks}}{K_{VO}} \quad , \quad V_R + \frac{V_{Omin}}{K_{VO}}$$

Hızlı değişen işaretlerde hem giriş işaretinin hem de işlemsel kuvvetlendiricinin yükselme eğimi için içine girer.

- Giriş işaretinde hızlı değişimler söz konusu olduğunda, çıkış gerilimi kuvvetlendiricinin geçici hal cevabına da bağlıdır.
- $V_o$  çıkış geriliminin zamana bağımlılığı giriş işaretinin yükselme eğiminin, kuvvetlendiricinin  $t_s$  toparlanma süresinin,  $f_o$  band genişliğinin ve YE yükselme eğiminin bir fonksiyonudur.

Giriş işaretinin zamanla lineer olarak değiştiği ve bu değişimin hızının  $k$  olduğu kabul edilsin.



Karşılaştırıcı  $t_0$  da değil, fakat  $t_1$  anında konum değiştirmekte,  $t = t_2$  anında da  $V_O$  çıkış gerilimi son değerine ulaşmaktadır.

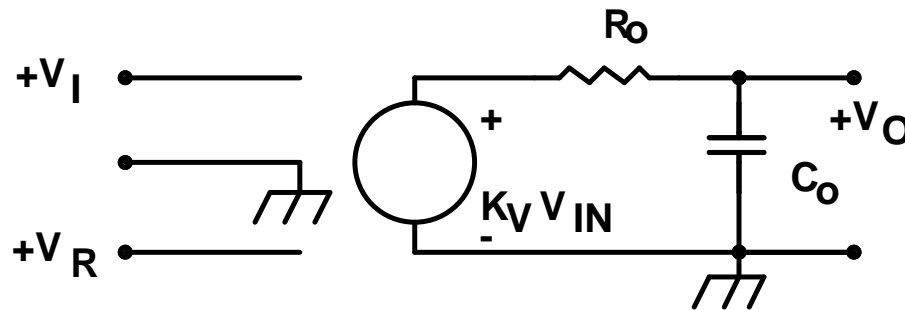
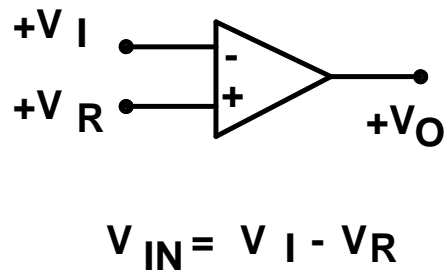
Karşılaştırıcının konum değiştirmeye başlaması için geçen süre

$$t_s = t_1 - t_0$$

$t_2$  büyüklüğü kuvvetlendiricinin  $f_0$  kesim frekansına ve YE yükselme eğimine bağlı

$t_1$  anında işlemsel kuvvetlendirici doymadan çıkar ve lineer bölgeye girer.

$$K_V(s) = \frac{K_{VO}}{1 + \frac{s}{\omega_o}}$$



Devrenin zaman domenindeki davranışı, bir transformasyon yardımıyla  $V_I - t$  düzleminden  $V_I' - t'$  düzlemine geçilerek incelenebilir.

$$V_I' = k.t' + V_I'$$

$$V_O(s) = -\frac{\omega_0}{\omega_0 + s} \left[ \frac{k \cdot K_{VO}}{s^2} + \frac{K_{VO} \cdot V_I'}{s} - \frac{V_{Omaks}}{\omega_0} \right]$$

$$v_o(t') = -K_{VO} \cdot k \cdot t' + K_{VO} \cdot \left[ \frac{k}{\omega_0} - V_I' \right] \cdot (1 - \exp(-\omega_0 \cdot t')) \\ + V_{Omaks} \cdot \exp(-\omega_0 \cdot t')$$

$\omega_0 \cdot t' \ll 1$  olduğu sürece üstel terimler yerine bunların seri açılımları

$$v_o(t') = -K_{VO} \cdot \left[ \frac{k}{\omega_o} - \frac{V_{Omaks}}{K_{VO}} - V_1' \right] \cdot \frac{\omega_o^2 \cdot t'^2}{2} - (K_{VO} \cdot V_1' + V_{Omaks}) \cdot \omega_o \cdot t' + V_{Omaks}$$

$t' = t_2'$  anında çıkış gerilimi işlemsel kuvvetlendiricinin  $V_{Omin}$  negatif doyma gerilimine ulaşır. Karşılaştırma işleminin sınırındaki giriş gerilimi değeri  $V_2'$  ile gösterilmiştir.

$$\frac{k}{\omega_o} \gg \left[ \frac{V_{Omaks}}{K_{VO}} + V_1' \right]$$

$$K_{VO} \cdot V_1' = K_{VO} \cdot k \cdot t_s \gg V_{Omaks}$$



$$V_O = \begin{cases} V_{Omaks} & V_I \leq V_R + k \cdot t_s \\ V_{Omin} & V_I \geq V_R + \sqrt{k^2 t_s^2 + 2k \frac{V_{Omaks} - V_{Omin}}{K_{VO} \cdot \omega_O}} \end{cases}$$

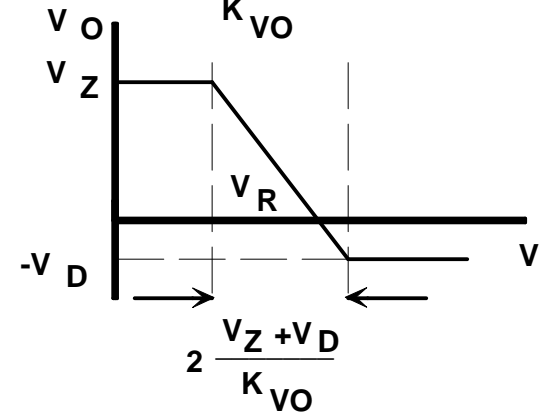
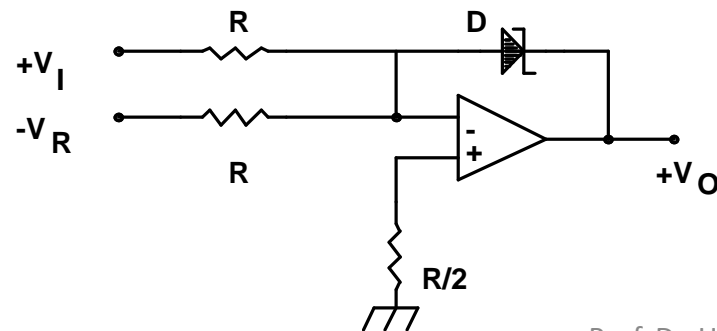
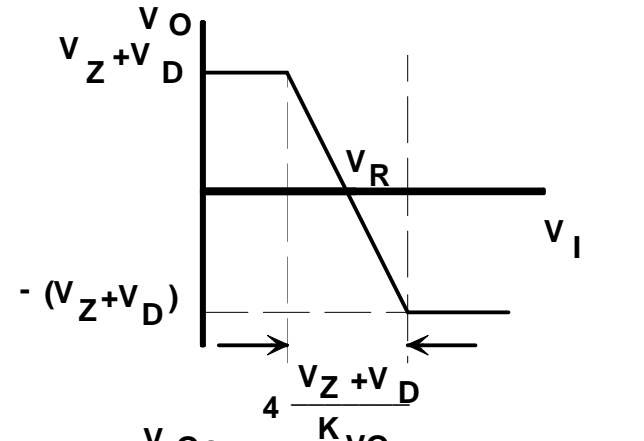
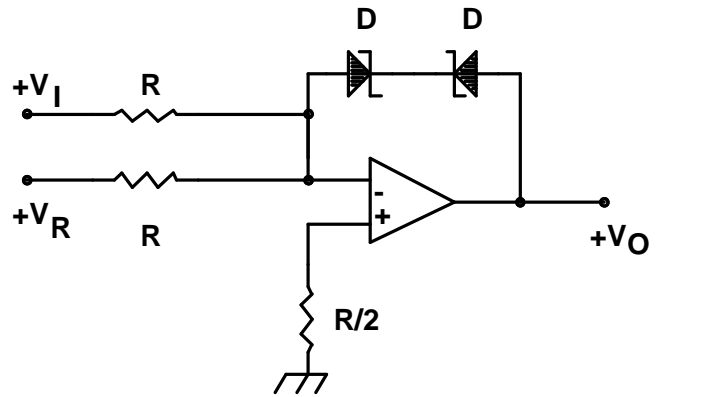
Çok büyük  $k$  değerlerinde işlemsel kuvvetlendiricinin YE yükselme eğimi  $t_2$  süresini belirleyen temel faktör, Bu durumda  $t_2'$  büyüklüğü  $t_2''$  gibi bir değer alır :

$$t_2'' = \frac{V_{Omaks} - V_{Omin}}{YE}$$

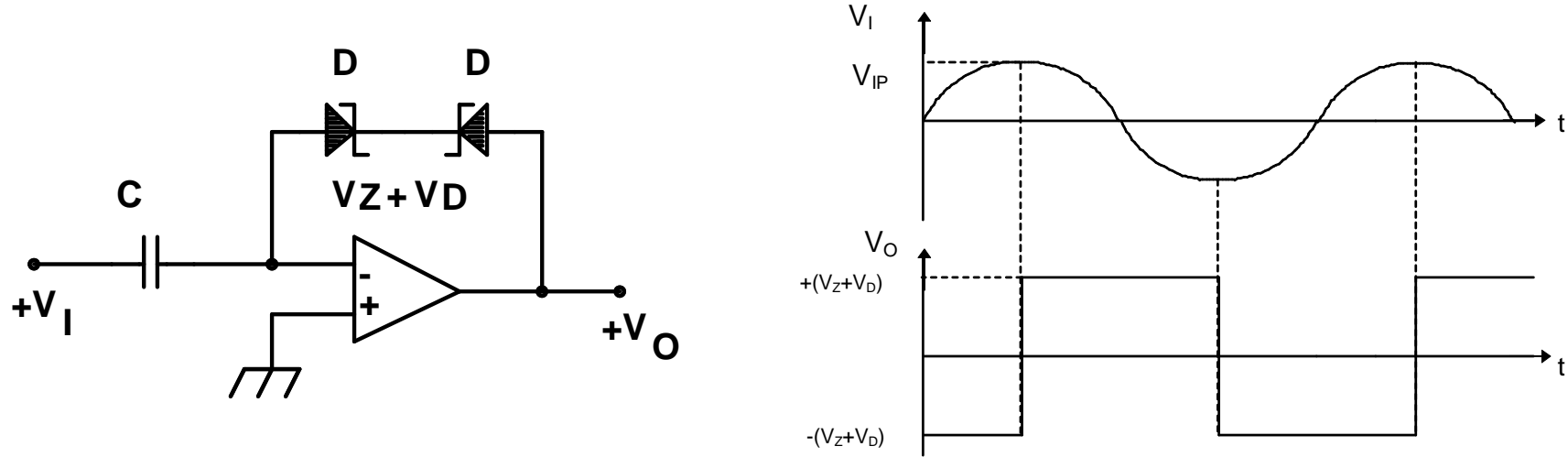
$$V_O = \begin{cases} V_{Omaks} & V_I \leq V_R + k \cdot t_s \\ V_{Omin} & V_I \geq V_R + k \cdot t_s + k \frac{V_{Omaks} - V_{Omin}}{YE} \end{cases}$$

$V_O$  çıkış geriliminin yükselme eğimi,  $V_I$  giriş geriliminin yükselme eğiminden bağımsız olarak işlemsel kuvvetlendiricinin YE yükselme eğimi ile belirlenir.

Devrenin çıkışından belli seviyeler arasında değişen işaretler elde edilmesi istenirse, Diyot-Zener diyodu kombinezonları üzerinden işlemsel kuvvetlendiriciye geribesleme uygulanarak çıkış işaretinin sınırlanması yoluna gidilir.



## Tepe değer karşılaştırıcısı



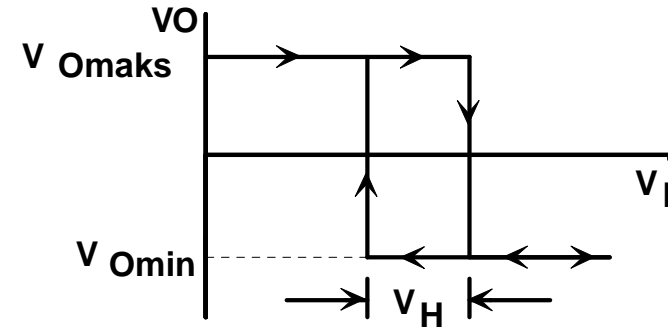
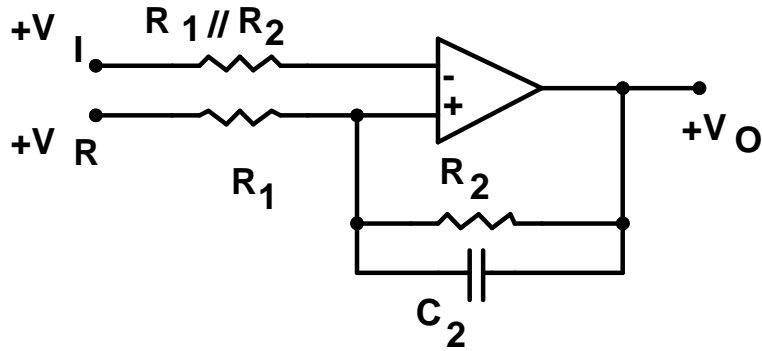
Girişe seri bağlanan elemanın empedansı  $Z = 1/sC$  şeklindedir ve bu  $C$  elemanı kuvvetlendirici ile birlikte bir türev alıcı oluşturur.

Giriş akımı tepelerde sıfır olacağından devre tepeye ulaşıldığında konum değiştirir.

# Schmitt tetikleme devreleri

- Geçiş karakteristiği histerezis gösteren gerilim karşılaştırıcıları **Schmitt tetikleme devreleri** olarak isimlendirilirler.
- Schmitt tetikleme devreleri pozitif geribeslemeli düzenlerdir.
- Bir Schmitt tetikleme devresinin geçiş eğrisi faz döndüren karakteristik gösterebileceği gibi faz döndürmeyen nitelikte de olabilir

## Faz döndüren Schmitt tetikleme devresi ve geçiş karakteristiği



$$V_O = \begin{cases} V_{Omaks} \\ V_{Omin} \end{cases} \quad \begin{cases} V_I \leq \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_R - \frac{V_{Omin}}{R_1 + R_2} \left( \frac{R_1 + R_2}{K_{VO}} - R_1 \right) \\ V_I \geq \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_R - \frac{V_{Omaks}}{R_1 + R_2} \left( \frac{R_1 + R_2}{K_{VO}} - R_1 \right) \end{cases}$$

$$V_{Omaks} = - V_{Omin}$$

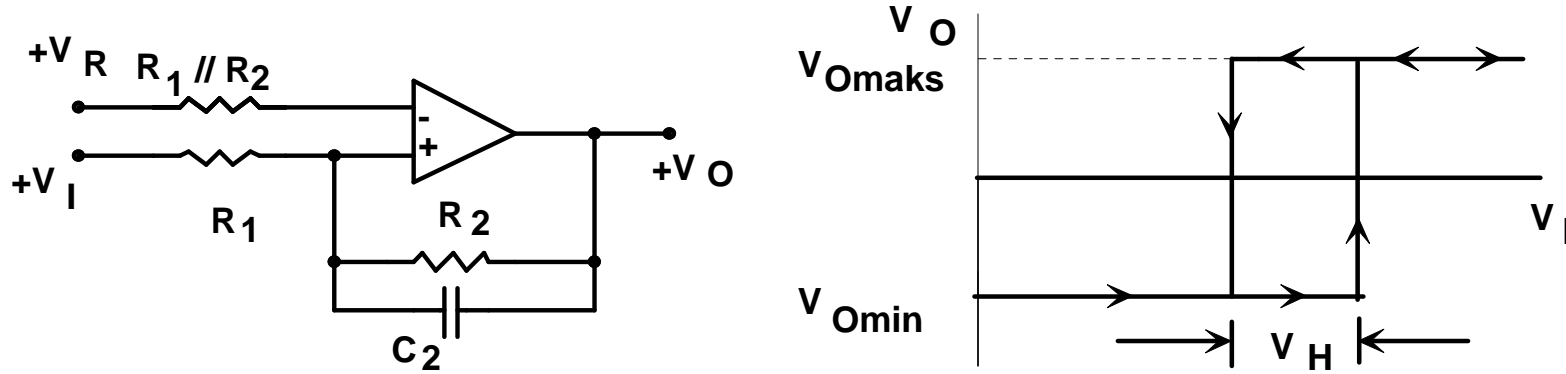
$$V_H = 2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{Omaks}$$

$K_{VO} R_1 / (R_1 + R_2) > 1$  şartının yerine gelmesi

Büyük  $R_2$  değerlerinde, kuvvetlendiricinin fark işaret giriş kapasitesi devrenin anahtarlama hızını etkiler. Bu etkiyi ortadan kaldırmak üzere  $R_2$  direncine paralel bir  $C_2$  kondansatörü bağlanır.

$$C_2 \gg \frac{R_1}{R_2} C_{id}$$

## Faz döndürmeyen Schmitt tetikleme devresi.

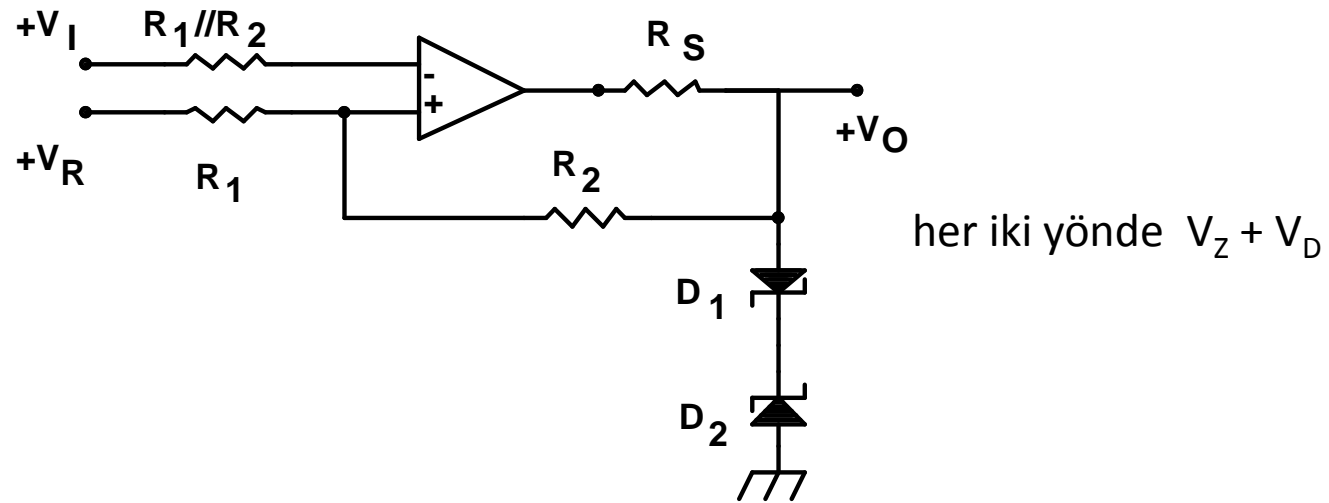


$$V_O = \begin{cases} V_{Omaks} & V_I \geq \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_R + \frac{V_{Omin}}{R_2} \left( \frac{R_1 + R_2}{K_{VO}} - R_1 \right) \\ V_{Omin} & V_I \leq \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_R + \frac{V_{Omaks}}{R_2} \left( \frac{R_1 + R_2}{K_{VO}} - R_1 \right) \end{cases}$$

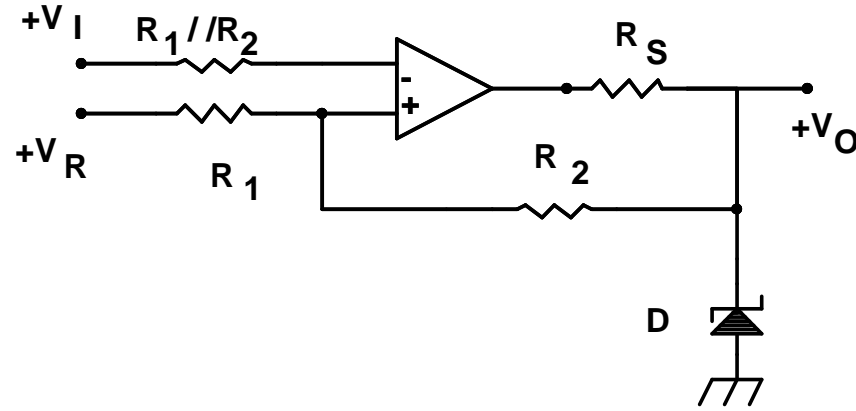
$$V_{Omaks} = -V_{Omin} \text{ için} \quad V_H = 2 \frac{R_1}{R_2} V_{Omaks}$$



- Her iki yapıda da çıkış gerilimi ve histerezis genişliği besleme gerilimine bağımlı.
- Bazı devre uygulamaları açısından sakıncalı olabilecek bu bağımlılık, devrenin çıkış geriliminin maksimum değeri stabilize edilerek ortadan kaldırılabilir.



Çıkış geriliminin Zener diyodu ile stabilize edilmesi.



Asimetrik çıkış gerilimi veren Schmitt tetikleme devresi

Pozitif çıkış gerilimlerinde bu eleman Zener diyodu olarak çalışır ve devrenin çıkış gerilimini  $+V_Z$  değerinde sınırlar.

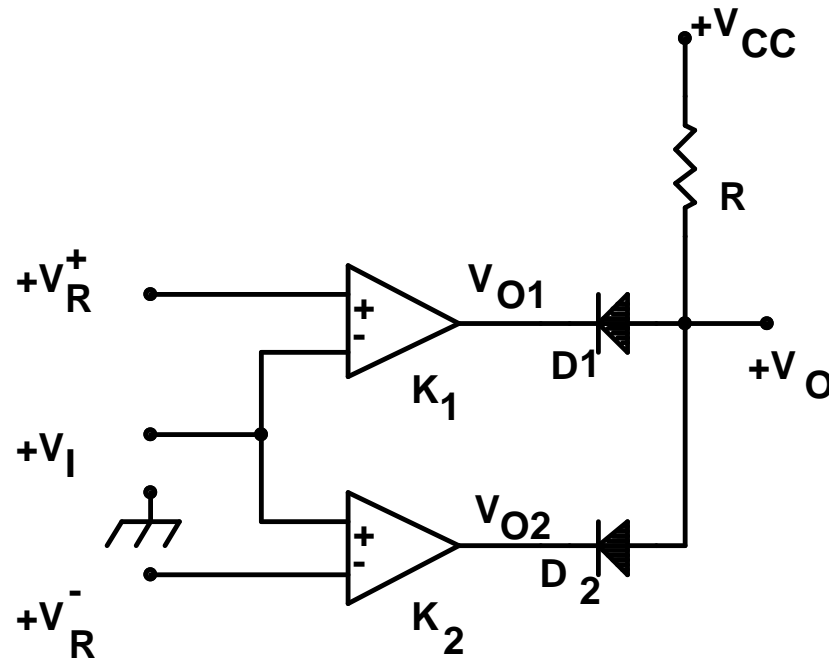
Negatif çıkış gerilimlerinde eleman iletim yönünde kutuplanacağından, çıkış gerilimi  $V_D$  iletim yönü gerilimi ile sınırlanır.

$$V_R = \frac{V_Z - V_D}{2 \cdot R_2} \cdot \left( \frac{R_1 + R_2}{K_{VO}} - R_1 \right)$$

$$V_R \approx \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_2} (V_D - V_Z)$$

## Pencere karşılaştırıcılar

- $V_I$  giriş geriliminin belirli bir gerilim aralığı içerisinde düşüp düşmediğinin belirlenmesi istenir.
- Bu karşılaştırma işlevini yerine getiren karşılaştırıcılar **pencere karşılaştırıcılar** olarak isimlendirilirler.



K1 faz döndüren bir karşılaştırıcıdır ve tanım bağıntıları

$$V_I > V_R^+ \quad \text{iç in} \quad V_{O1} = V_{Omin}$$

$$V_I < V_R^+ \quad \text{iç in} \quad V_{O1} = V_{Omaks}$$

K2 faz döndürmeyen bir karşılaştırıcıdır ve bunun tanım bağıntıları

$$V_I > V_R^- \quad \text{iç in} \quad V_{O2} = V_{Omaks}$$

$$V_I < V_R^- \quad \text{iç in} \quad V_{O2} = V_{Omin}$$

$$V_I < V_R^-, V_R^+ \text{ için}$$

$$V_{O2} = V_{Omin}, D_2 \text{ iletimde} \rightarrow V_O = V_{Omin}$$

$$V_{O1} = V_{Omaks}, D_1 \text{ kesimde}$$

$$V_R^- < V_I < V_R^+ \text{ için}$$

$$V_{O2} = V_{Omaks}, D_2 \text{ kesimde} \rightarrow V_O = V_{Omaks}$$

$$V_{O1} = V_{Omaks}, D_1 \text{ kesimde}$$

$$V_I > V_R^-, V_R^+ \text{ için}$$

$$V_{O2} = V_{Omaks}, D_1 \text{ kesimde} \rightarrow V_O = V_{Omin}$$

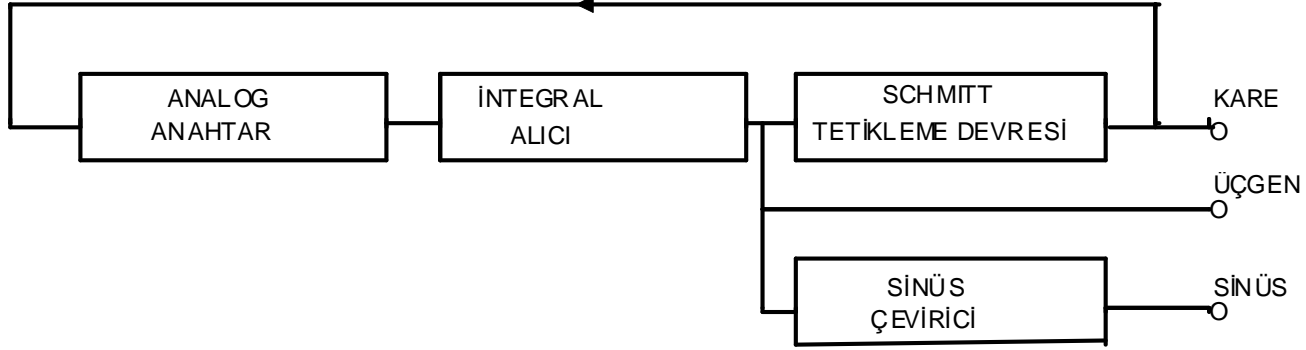
$$V_{O1} = V_{Omin}, D_1 \text{ iletimde}$$

## Fonksiyon üreticileri

Bir çok devre uygulamasında kare dalga, üçgen dalga, sinüs, darbe gibi çeşitli türden dalga şekillerinin oluşturulmasına sıkça gereksinme duyulur

- Alçak frekanslarda, ideal birer eleman gibi davranan işlemsel kuvvetlendiricilerle kurulan fonksiyon üretici yapıları iyi bir çözüm oluştururlar.
- Çalışma frekansı yükseldikçe, daha önceki bölümlerde ele alınan hata kaynakları da etkili olmaya başlayacaklarından, üretilen dalga şekillerinde bozulmalar ortaya çıkar.

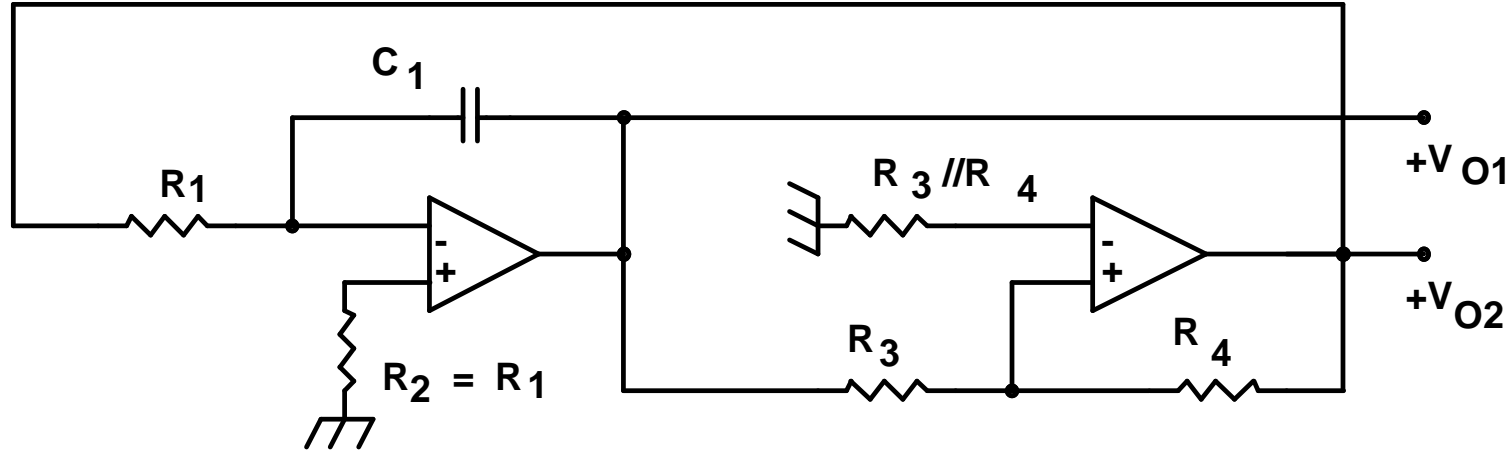
## Fonksiyon üreticinin blok şeması



- Devre bir analog anahtardan, bir integral alıcıdan, bir Schmitt tetikleme devresinden ve bir de üçgen/sinüs çeviriciden oluşmaktadır.
- Üretilen temel dalga şekilleri kare dalga ve üçgen dalgadır. Sinüs biçimli işaretler ise, üçgen dalganın bir dalga şekillendiriciden geçirilmesi ile elde edilir.



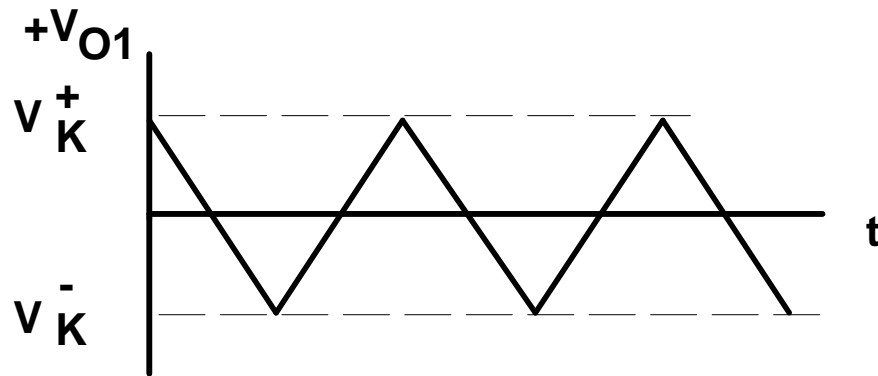
# İşlemsel kuvvetlendiricilerle gerçekleştirilen dolup-boşalmalı osilatör yapısı.



$$V_{K^-} = -\frac{R_3}{R_4} V_{Omaks} \quad V_{K^+} = -\frac{R_3}{R_4} V_{Omin}$$

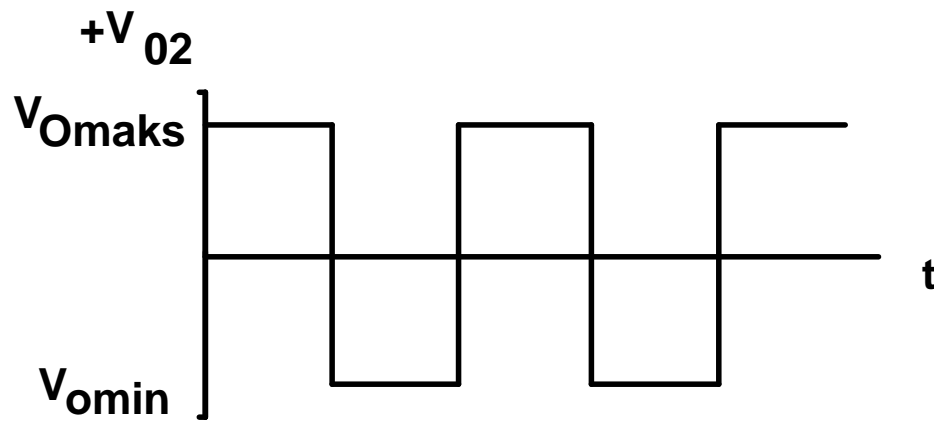
$$T = T_1 + T_2 = R_1 C_1 \frac{R_3}{R_4} \left[ \frac{V_{Omaks} - V_{Omin}}{V_{Omaks}} + \frac{V_{Omin} - V_{Omaks}}{V_{Omin}} \right]$$

$$V_{Omax} = -V_{Omin}$$

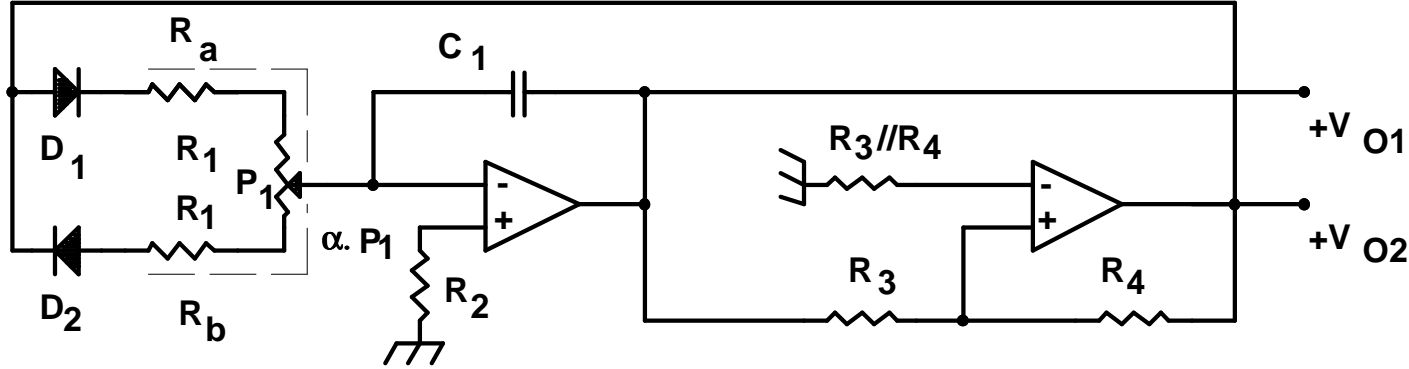


$$T = 4 R_1 C_1 \frac{R_3}{R_4}$$

$$f = \frac{1}{T}$$



## Darbe-periyot oranı değiştirilebilen fonksiyon üreteci.



$C_1$  kondansatörünün farklı yollardan doldurulup boşaltılması

- Kondansatör kollardan biri üzerinden dolmakta, diğeri üzerinden de boşalmaktadır.
- Bu işlem, kollar üzerine yerleştirilen  $D_1$  ve  $D_2$  diyotları yardımıyla sağlanmaktadır.
- $P_1$  potansiyometresi yardımıyla kollardan birindeki seri direnç değeri arttırılırken, diğer koldaki direnç değeri ise azaltılmaktadır.

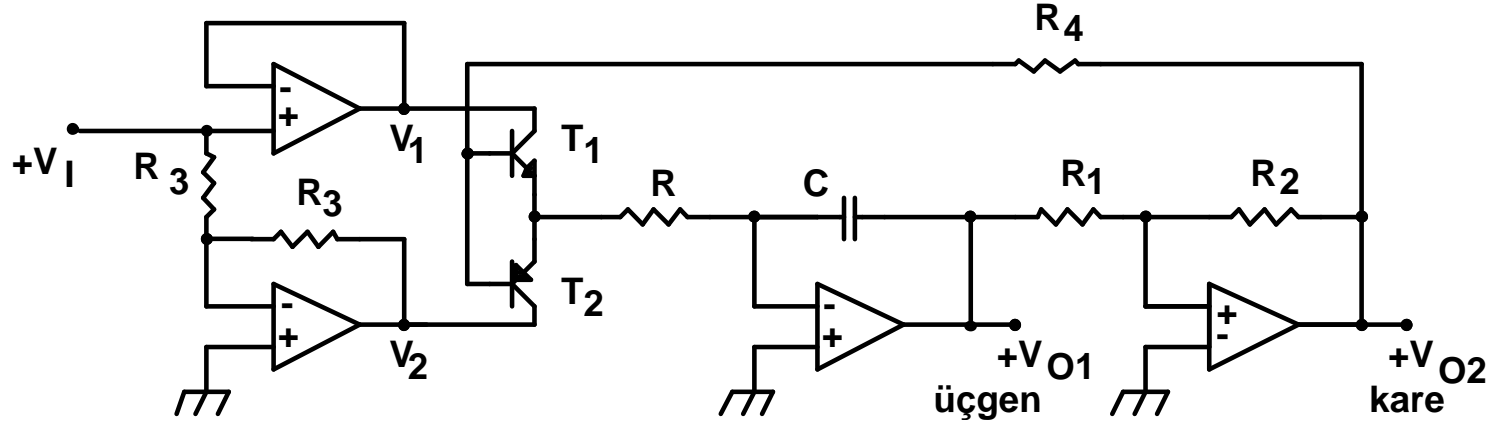
$$\frac{T_1}{T_1 + T_2} = \frac{R_a}{R_a + R_b}$$

$$R_a = R_1' + P_1(1 - \alpha)$$

$$R_b = R_1' + \alpha P_1$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{2(R_a + R_b)C_1}$$

# Frekansı ayarlanabilir osilatörler



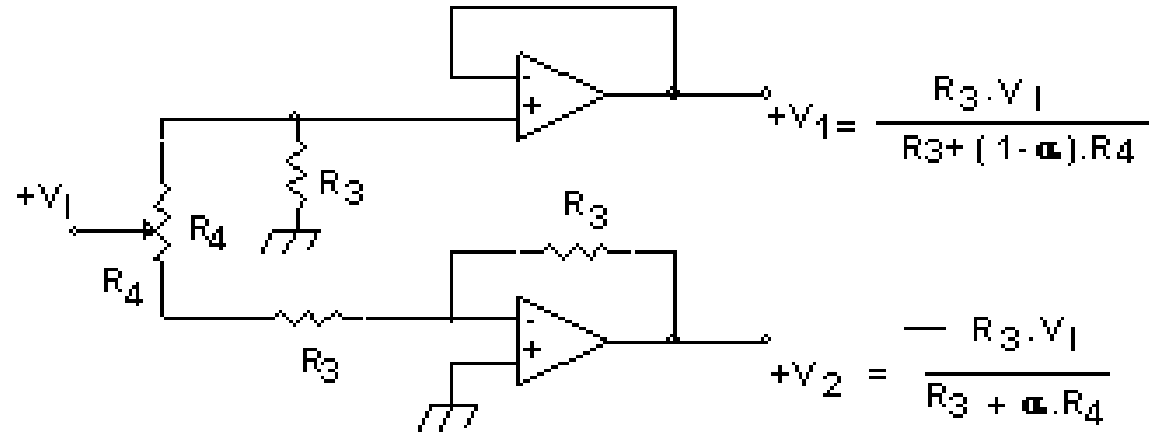
$$V_H = 2 \frac{R_1}{R_2} V_{Omaks}$$

$$f = \frac{V_I}{4R \cdot C \cdot V_{Omaks}} \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_{DM} = \frac{R_1}{R_2} V_{Omaks}$$

- Frekans kontrolü,  $V_1$  ve  $-V_1$  gerilimlerinin değiştirilmesiyle sağlanır.
- Bu gerilimler, girişe uygulanan pozitif kontrol geriliminden OP1 ve OP2 işlemsel kuvvetlendiricileri yardımıyla türetilirler.
- OP1 işlemsel kuvvetlendiricisi faz döndürmeyen birim kazançlı bir kuvvetlendirici olarak, OP2 işlemsel kuvvetlendiricisi ise yine birim kazançlı ve faz döndüren bir kuvvetlendirici olarak görev yapar.

# Darbe-boşluk oranı ayarlanabilir fonksiyon üretici



$$T_1 = \frac{2 \cdot R \cdot C \cdot V_{Omaks}}{V_1} \frac{R_1}{R_2} \quad T_2 = \frac{2 \cdot R \cdot C \cdot V_{Omaks}}{|V_2|} \frac{R_1}{R_2}$$

$$T = T_1 + T_2 = 2 \cdot R \cdot C \cdot \left( \frac{1}{V_1} + \frac{1}{|V_2|} \right) \frac{R_1}{R_2} V_{Omaks}$$

$$\frac{1}{V_1} + \frac{1}{|V_2|} = \frac{1}{V_1 \cdot R_3} \cdot [R_3 + (1 - \alpha) \cdot R_4 + R_3 + \alpha \cdot R_4] = \frac{1}{V_1 \cdot R_3} [2 \cdot R_3 + R_4]$$

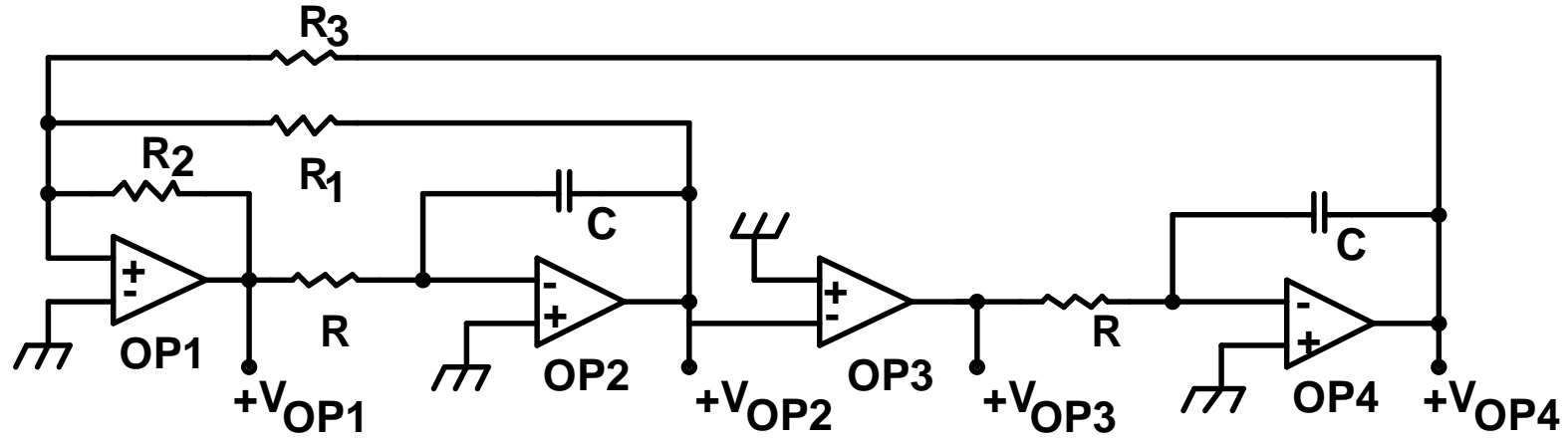
$$f = \frac{R_3}{2 \cdot R \cdot C \cdot [2 \cdot R_3 + R_4]} \frac{V_I}{V_{Omaks}} \frac{R_2}{R_1}$$

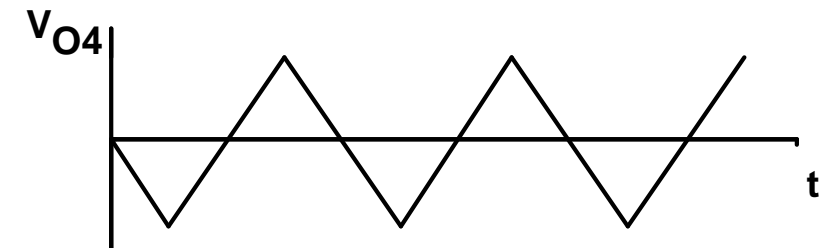
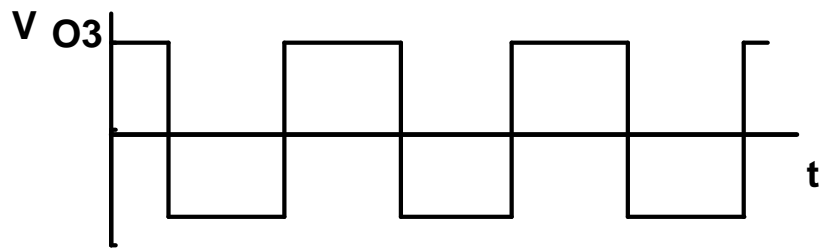
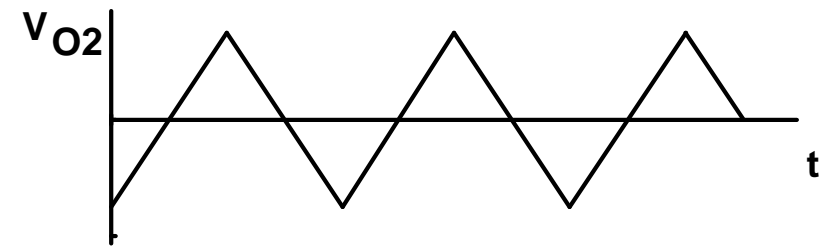
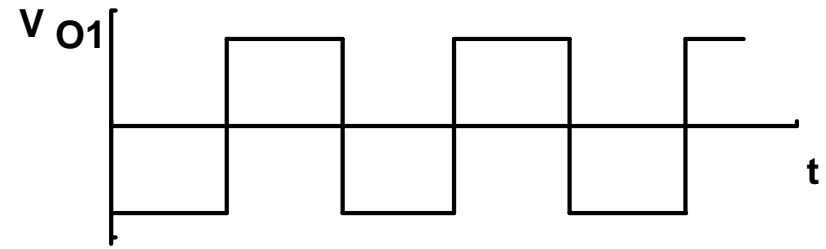
$T_1/T$  ve  $T_2/T$  oranları,  $R_4$  potansiyometresi yardımıyla

$$\frac{R_3}{2 \cdot R_3 + R_4} \quad ve \quad \frac{R_3 + R_4}{2 \cdot R_3 + R_4}$$



# Aynı anda $90^\circ$ faz farklı üçgen ve karedalga işaretleri üreten üreteçler





Dalga şekilleri.