

# ENDÜSTRİYEL ELEKTRONİK

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİLERİN  
LİNEER UYGULAMALARI

HAKAN KUNTMAN

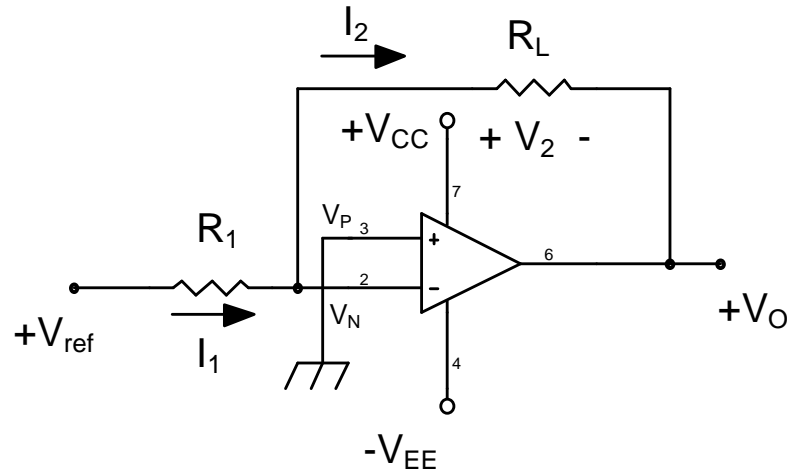
2013-2014 EĞİTİM-ÖĞRETİM YILI

İşlemsel kuvvetlendiriciler, endüstriyel elektronik alanında çeşitli ölçü ve kontrol düzenlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla geniş ölçüde kullanılmakta, bu yapı grubu yardımıyla değişik özelliklerdeki lineer ve lineer olmayan devre fonksiyonları elde edilebilmektedir.

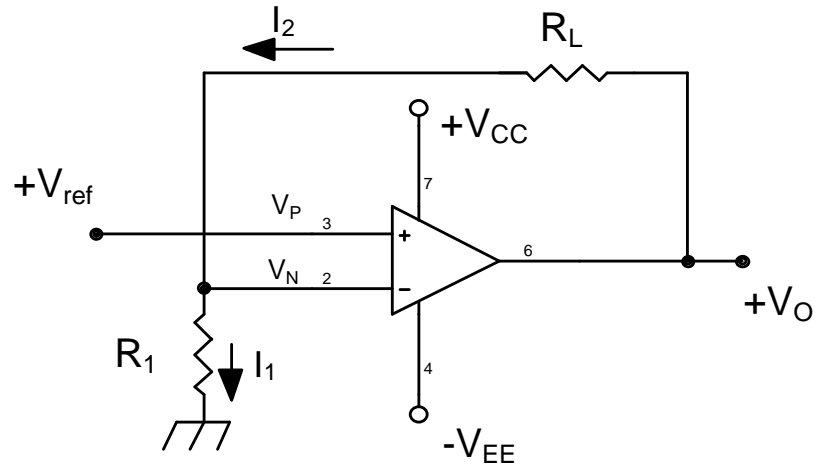
Akım kaynakları, negatif empedans çevirici, integral ve türev alıcılar, logaritmik ve ters logaritmik kuvvetlendiriciler, çeşitli türden osilatör devreleri, presizyonlu doğrultucular, AC-DC çeviriciler, analog çarpma-bölme ve karekök alma devreleri, örnekleme ve tutma devreleri, karşılaştırıcılar, Schmitt tetikleme devreleri, enstrümantasyon kuvvetlendiricileri gibi devrelerin ve düzenlerin gerçekleştirilmesi

## 2.1. Akım Kaynakları

### 2.1.1. "Yüzen" yükler için akım kaynakları



a) faz döndüren yapı



b) faz döndürmeyen yapı.

işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancı sonlu ve  $K_V$  ise, kuvvetlendiricinin giriş gerilimi  $V_{IN} = V_P - V_N$  sıfır olmaz. Giriş direncinin sonsuz, ancak açık çevrim kazancının sonlu olduğu kabulü ile

$$I_1 = I_2 = \frac{V_{ref} - V_N}{R_1} \quad , \quad V_N = -\frac{V_O}{K_V}$$

$$V_2 = V_N - V_O \quad I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} - \frac{V_2}{R_1 \cdot (1 + K_V)} \approx \frac{V_{ref}}{R_1} - \frac{V_2}{K_V \cdot R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} \quad R_O = -\frac{\partial V_2}{\partial I_2} = K_V \cdot R_1$$

İşlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancı ise frekansa bağlıdır. Genel amaçlı işlemsel kuvvetlendiriciler, çoğunlukla, frekans eğrileri tek kutuplu düşme gösterecek biçimde kompanze edilirler

$$K_V(s) = \frac{K_{VO}}{1 + \tau \cdot s} \quad \tau = \frac{1}{\omega_c} \quad R_O = R_1 \cdot K_V(s)$$

$$Z_O(s) = \frac{K_{VO}}{1 + \tau \cdot s} \cdot R_1 \quad Z_O(j\omega) = \frac{K_{VO}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} \cdot R_1$$

$$Z_o = \frac{1}{\frac{1}{K_{VO} \cdot R_1} + j \frac{\omega}{K_{VO} \cdot R_1 \cdot \omega_c}} = R_o // \frac{1}{j\omega C_o}$$

$$R_o = K_{VO} \cdot R_1 \quad C_o = \frac{1}{K_{VO} \cdot R_1 \cdot \omega_c}$$

Elde edilen sonuçların hem faz döndüren hem de faz döndürmeyen yapılar için geçerli

## Örnek:

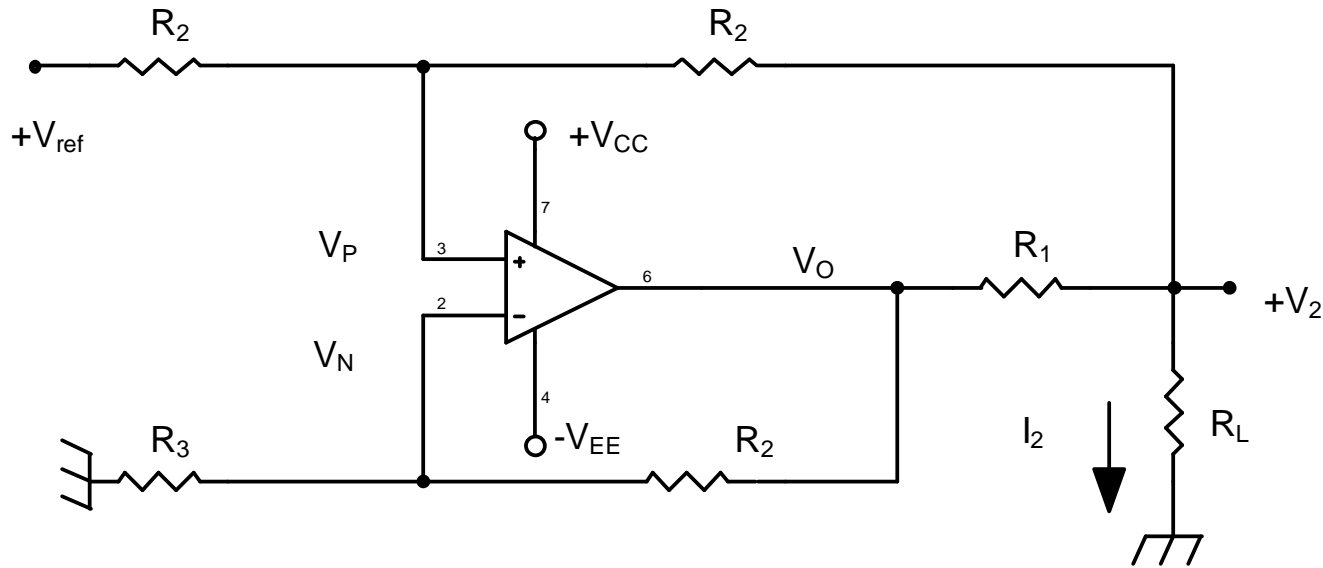
Açık çevrim kazancı  $K_{VO} = 10^5$  ve 3 dB kesim frekansı da  $f_c = 10$  Hz olsun. Devredeki  $R_1$  direncinin değeri de  $1 \text{ k}\Omega$  olarak verilsin.

Bu durumda akım kaynağının çıkış direnci  $R_o = 100 \text{ M}\Omega$  ve çıkış kapasitesi de  $C_o = 159 \text{ pF}$  olur.

$f = 10$  kHz için akım kaynağının çıkış empedansının modülünün  $100 \text{ k}\Omega$  değerine düşeceği kolayca görülebilir.



## 2.1.2. Bir ucu topraklanmış yükler için akım kaynağı devreleri



$$I_2 = \left( \frac{1}{2 \cdot R_2} + \frac{R_2 + R_3}{2 \cdot R_1 \cdot R_3} \right) \cdot V_{ref} + \left( \frac{R_2 + R_3}{2 R_1 \cdot R_3} - \frac{R_1 + 2 R_2}{2 R_1 R_2} \right) \cdot V_2$$

$R_3$  direncinin belirli bir değeri için ikinci terim sıfır ve bunun sonucunda çıkış akımı çıkış geriliminden bağımsız

$$R_3 = \frac{R_2^2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1 // R_2}$$

Pratikte  $R_1$  direnci  $R_2$  direncinden yeteri kadar küçük

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1}$$

## Bağlanacak yük direnci için sınır değerler

bağlanacak yükün sınır değerleri, devreyi gerçekleştirmek amacıyla kullanılacak işlemel kuvvetlendiricinin  $V_O$  çıkış geriliminin sınırları ile belirli

$$V_{omaks} = V_{CC} - V_{sat}$$

$$V_{omin} = -V_{EE} + V_{sat}'$$

$$V_2 = V_0 - I_2 \cdot R_1$$

$$V_{\text{ref}} = V > 0 \text{ için } I_2 = V_{\text{ref}}/R_1 = V/R_1$$

$$V_{2\text{maks}} = V_{0\text{maks}} - I_2 \cdot R_1 = V_{0\text{maks}} - V_{\text{ref}}$$

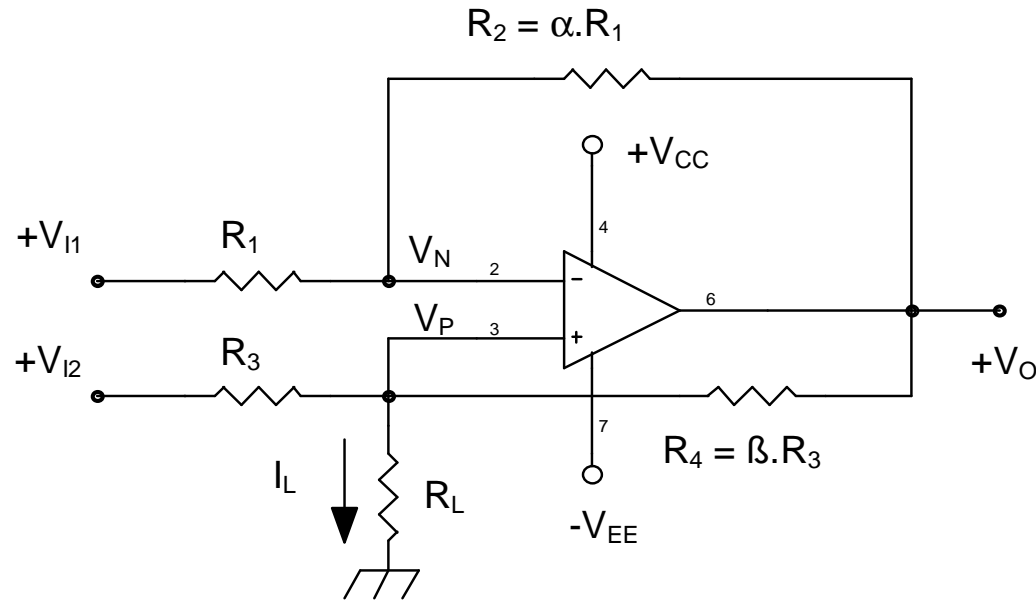
$$R_L \leq \frac{V_{0\text{maks}} - V_{\text{ref}}}{I_L}$$

çıkışa olabildiğince büyük bir yük bağlayabilmek için  $V_{\text{ref}} \ll V_{0\text{maks}}$  seçilmeli

$$V_{\text{ref}} = -V < 0 \text{ için } I_2 = -V/R_1$$

$$R_L \leq \frac{V_{2\text{min}}}{I_2} = \frac{V_{O\text{min}} + V}{I_2}$$

# "Howland" akım kaynağı



$$V_N = \frac{V_{i1} \cdot R_2 + V_O \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{\alpha \cdot V_{i1} + V_O}{1 + \alpha}$$

$$V_O = K_V(s) \cdot (V_P - V_N)$$

$$I_L = I_3 + I_4 = \frac{V_{i2} - V_P}{R_3} + \frac{V_O - V_P}{\beta \cdot R_3}$$

$$V_P = I_L \cdot R_L$$

$$I_L = \frac{\beta \cdot (1 + \alpha + K_V(s)) \cdot V_{i2} - \alpha \cdot K_V(s) \cdot V_{i1}}{\beta(1 + \alpha + K_V(s)) \cdot R_3 + R_L \cdot (1 + \alpha)(1 + \beta) + R_L K_V(s)(\beta - \alpha)}$$

$$\alpha = \beta, \quad |K_V(s)| \gg (1 + \alpha),$$

$$|K_V(s)| \cdot R_3 \gg R_L \cdot (1 + \alpha) \cdot (1 + \beta)$$

$$I_L = \frac{V_{i2} - V_{i1}}{R_3}$$

$$R_O = R_3 \frac{(1 + \alpha + K_V(s)) \cdot \beta}{(1 + \beta)(1 + \alpha) + K_V(s) \cdot (\beta - \alpha)}$$

$$R_O = R_3 \cdot \frac{\beta}{\beta - \alpha}$$

Devrenin çıkış direnci eleman toleranslarına bağlıdır.  
En kötü durumda

$$R_1 = R_1 \cdot (1 + k), R_2 = \alpha \cdot R_1 \cdot (1 - k), R_3 \\ = R_1 \cdot (1 - k), R_4 = \alpha \cdot R_1 \cdot (1 + k)$$

$$R_o = \frac{R_3}{4 \cdot k}$$



$V_{i1} = 0$  ,  $V_{i2} = V_{ref}$  ve  $\alpha = \beta$  için işlemsel kuvvetlendiricinin  $V_O$  çıkış gerilimi

$$V_O = R_L \frac{(1 + \alpha) \cdot K_V(s) V_{ref}}{1 + \alpha + K_V(s) R_3}$$

$$V_O = R_L \cdot (1 + \alpha) \cdot \frac{V_{ref}}{R_3}$$

işlemsel kuvvetlendiricinin çıkış gerilimi yük direnci ile orantılı.

Devre, sabit ölçü akımlı ve lineer ölçekli direnç ( yahut empedans) ölçer düzeni gerçekleştirilmesine uygun

Yük direnci üzerinde düşecek maksimum gerilim, işlemsel kuvvetlendiricinin çıkış geriliminin maksimum değeri olan  $V_{Omaks}$  ile sınırlı

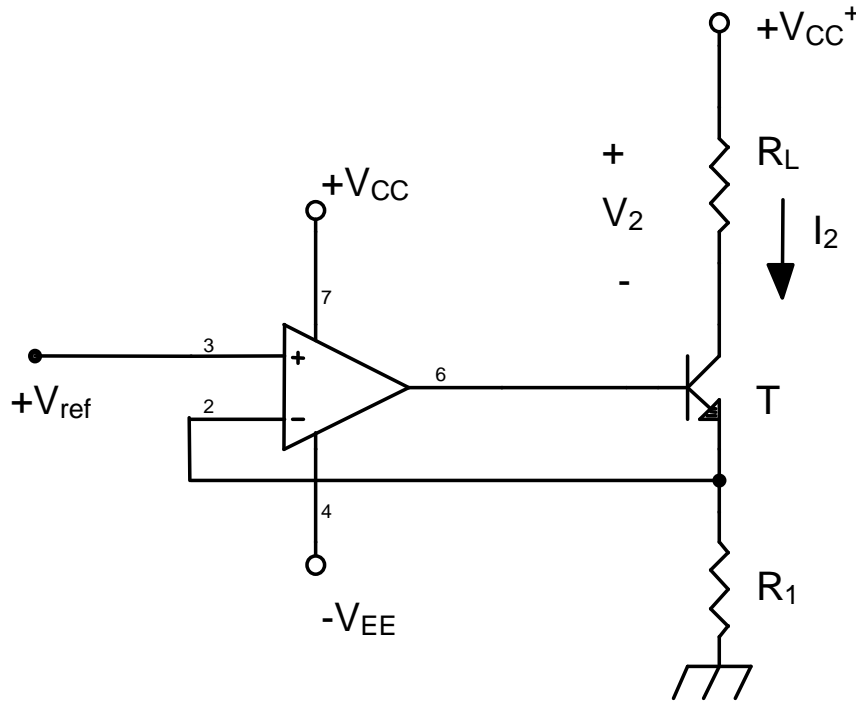
$$V_{Omaks} = R_{Lmaks} \cdot (1 + \alpha) \frac{V_{ref}}{R_3}$$

$$R_{Lmaks} = \frac{V_{Omaks}}{(1 + \alpha) \cdot V_{ref}} R_3$$

$$R_L \leq \frac{V_{Omaks}}{(1 + \alpha) \cdot V_{ref}} R_3$$

## 2.1.3. Büyük akımlı akım kaynağı devreleri

işlemsel kuvvetlendirici-tranzistor (BJT, JFET, MOSFET) kombinezonları

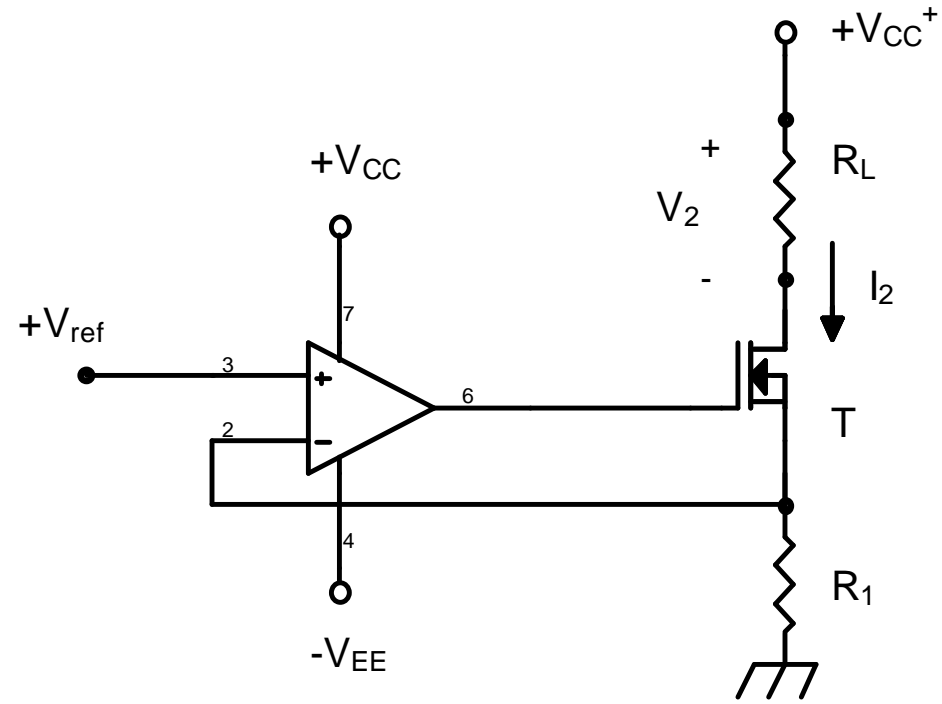


BJT-işlemsel kuvvetlendirici kombinezonu ile akım kaynağı devresi

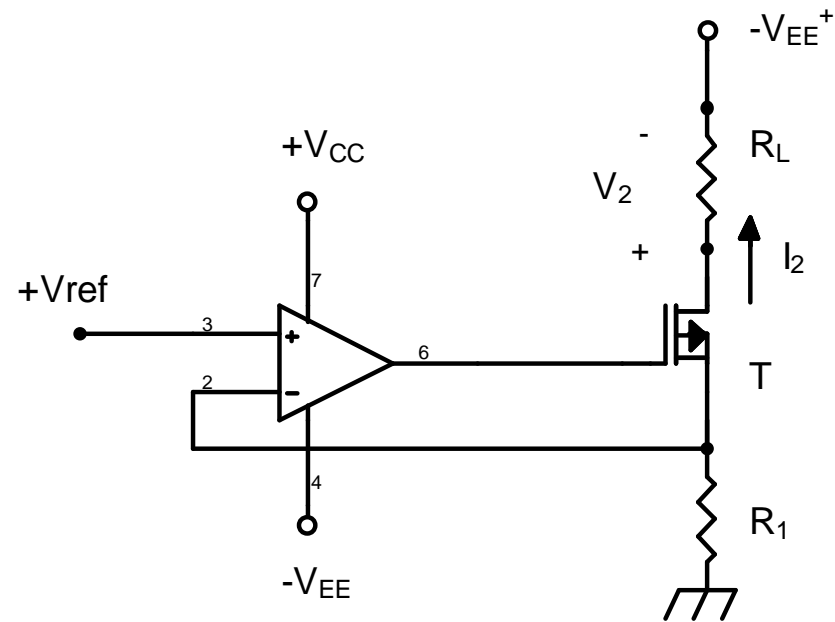
$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\beta_F} \right)$$

$$R_O = \beta_F \cdot r_{ce}$$

$V_{ref} > 0$  olmalı



N kanallı MOSFET ile kurulan devre



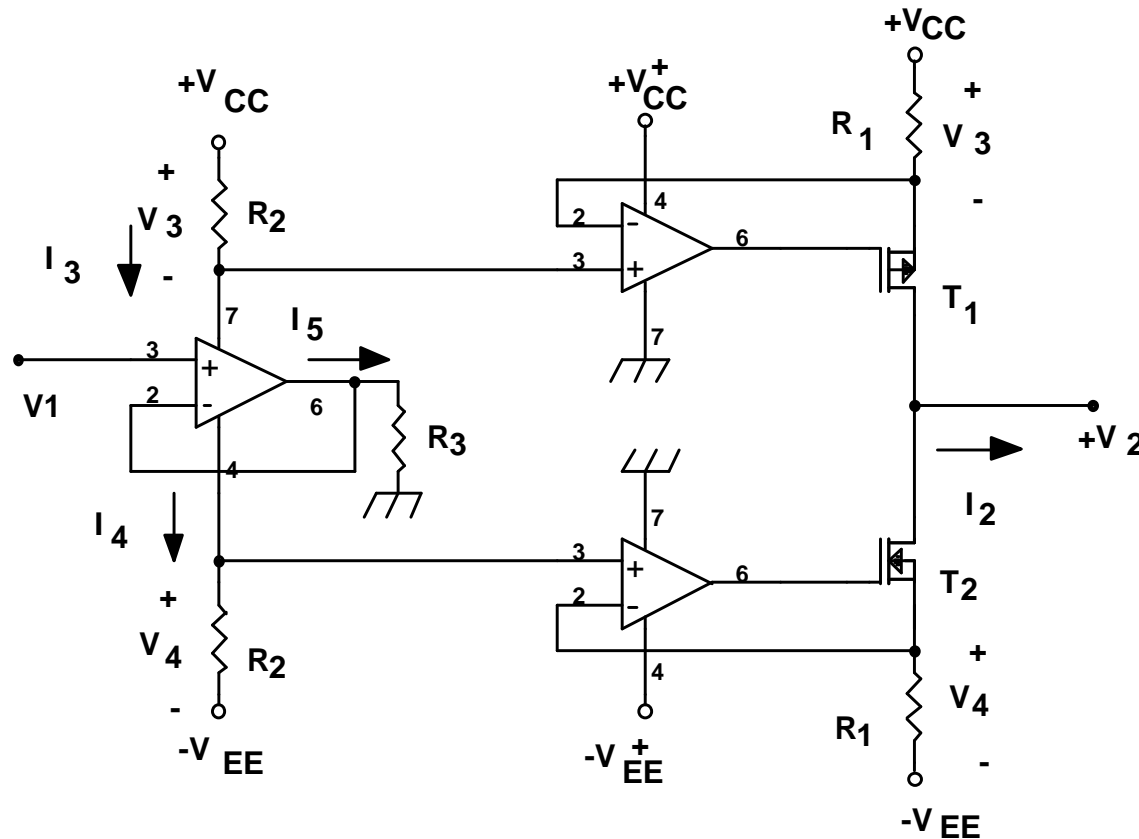
P kanallı MOSFET ile kurulan devre,  $V_{ref} < 0$ .

$$I_2 = \frac{V_{ref}}{R_1}$$

$$Z_o = K_v \cdot \mu \cdot R_1 = \frac{K_{v0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} \mu \cdot R_1$$

Çıkış empedansı  $R_o = \mu \cdot K_{v0} \cdot R_1$  değerinde bir direnç ile  $C_o = 1 / \mu \cdot K_{v0} \cdot R_1 \cdot \omega_c$  değerli bir kapasitenin paralel eşdeğeri

# İki yönde akım akıtabilen, büyük akımlı akım kaynakları



$$V_3 = I_3 \cdot R_2$$

$$V_4 = I_4 \cdot R_2$$

$$I_{D1} = \frac{V_3}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} I_3$$

$$I_{D2} = \frac{V_4}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} I_4$$



$$I_2 = I_{D1} - I_{D2} = \frac{R_2}{R_1} (I_3 - I_4)$$

$$I_5 = \frac{V_1}{R_3}$$

$$I_5 = I_3 - I_4 \quad I_2 = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_3} V_1$$

$R_2 = R_3$  yapılırsa

$$I_2 = \frac{V_1}{R_1}$$

$I_3$  ve  $I_4$  akımları  $I_3 = I_4 = I_R$  şeklinde işlemsel kuvvetlendiricinin sükunet akımına eşittirler. Bu nedenle  $I_5 = 0$  olur.

$V_1 > 0$  ise  $I_3 > I_4$  olacağından,  $I_2$  çıkış akımı üst yarıdevre üzerinden akar ve alt yarıdevre kesime gider.

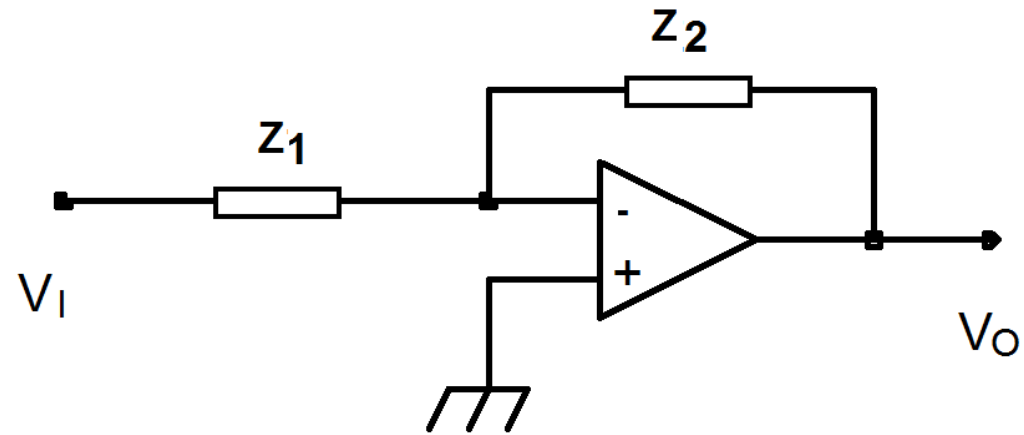
$V_1 < 0$  olması halinde ise bunun tersi olur. Çıkış akımı alt yarıdevre üzerinden akar ve üst yarıdevre kesime gider

$V_1 = 0$  durumunda çıkış tranzistorlarından

$$I_{D1R} = I_{D2R} = \frac{R_2}{R_1} I_R$$

Akım kaynağı devresi AB sınıfında çalışmaktadır.

## 2.3. İntegral alıcılar



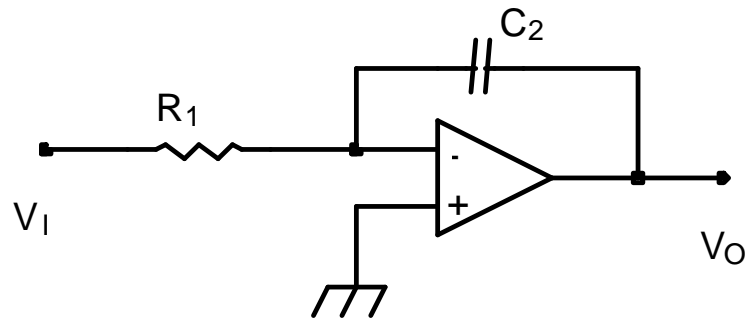
Faz döndüren kuvvetlendirici

$$K_V = \frac{V_O}{V_I} = \frac{-Z_2}{Z_1}$$

# İntegral alıcılar

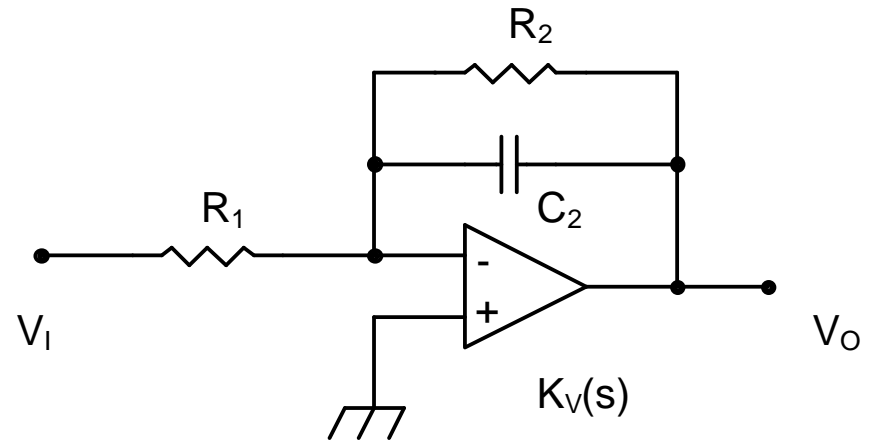
$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = \frac{1}{sC_2}$$

$$V_O = -\frac{1}{T_I} \int V_I \cdot dt + V(0)$$



$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + s \cdot R_2 \cdot C_2}$$

$$K_{Vf}(s) = \frac{K_V(s) \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + K_V(s) \cdot Z_1}$$



İdeal ve ideal olmayan integral alıcılar.

Çıkış geriliminin başlangıç değerinin  $V(0) = 0$

$$V_o = -V_I \frac{K_V(s) \frac{R_2}{1 + s \cdot R_2 \cdot C_2}}{R_I + R_I K_V(s) + \frac{R_2}{1 + s \cdot R_2 \cdot C_2}}$$

$$V_o = -\frac{V_I}{s R_I C_2} \frac{1}{1 + \frac{1}{s R_2 C_2}} \frac{K_V(s)}{1 + K_V(s)} \frac{1}{1 + \frac{1}{s R_I C_2 (1 + K_V(s)) \left[ 1 + \frac{1}{s R_2 C_2} \right]}}$$

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

$K_{VO} \gg 1$  olması halinde

$$V_O = -\frac{V_I}{sT_I} \frac{1}{1 + \frac{1}{sT_C}} \frac{1}{1 + \frac{1}{sK_{VO}T_I}} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_O} \frac{1 + sT_I}{1 + sK_{VO}T_I}}$$

$T_I = R_1.C_2$  ve  $T_C = R_2.C_2$  zaman sabitleri

$$\frac{V_O}{V_I} = -\frac{1}{s \cdot T_I}$$

- İlk terim ideal integral alıcı transfer fonksiyonu
- İkinci terim integrasyon kondansatörünün kaçak akımlarına ilişkin hatayı belirtmektedir.
- Üçüncü terim, işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancının sonlu olmasından kaynaklanan bir terimdir.
- Dördüncü terim ise yüksek frekans hatasını göstermekte ve işlemsel kuvvetlendiricinin açık çevrim kazancının frekansa bağımlı olmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

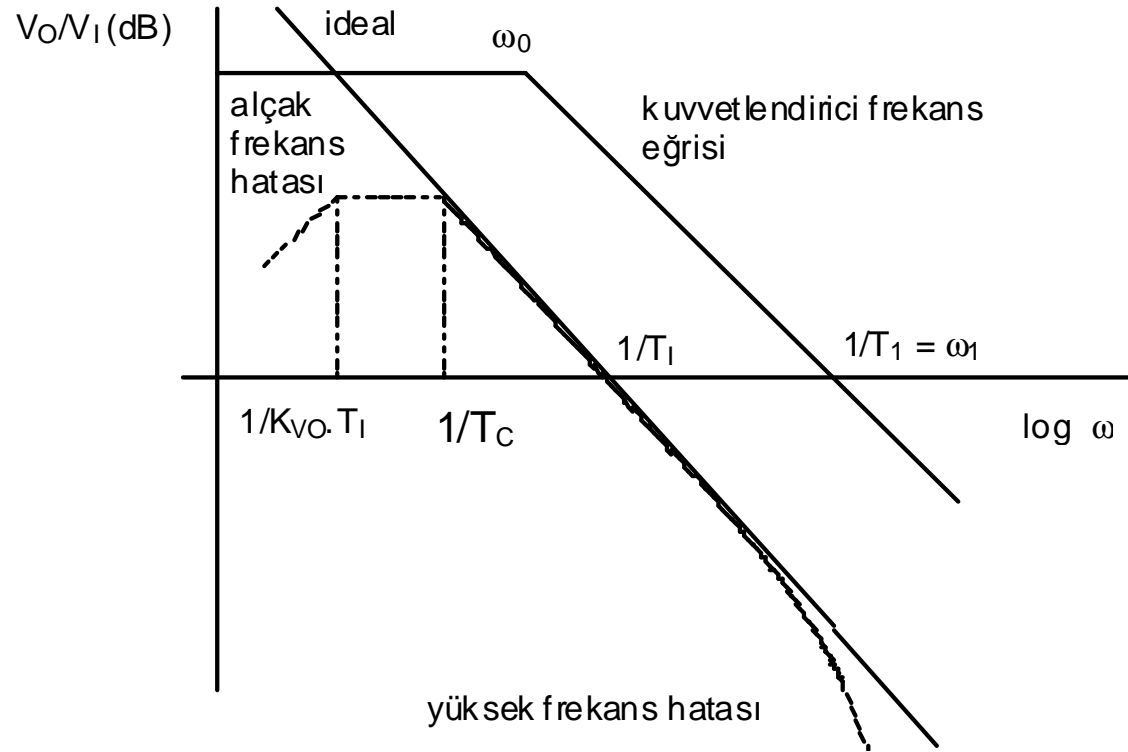


$$\omega T_1 \gg 1 \text{ ve } \omega_1 = \omega_0 \cdot K_{VO}$$

$$\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0} \frac{1 + sT_1}{1 + sK_{VO}T_1}} \approx \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_1}}$$

$$T_C \gg T_I \gg T_1, T_C = R_2 \cdot C_2, T_1 = \frac{1}{\omega_1}$$

İntegral alıcı geniş bir bölge içerisinde ideale yakın davranır



İdeal olmayan integral alıcının frekans cevabı

Devrenin ideal durumda zaman domenindeki cevabı

$$v_o(t) = -V_I \frac{t}{T_I}$$

Alçak frekans hatası

$$v_o(t) = -V_I \frac{T_C}{T_I} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_C}\right) \right] \approx -V_I \frac{t}{T_I} \left[ 1 - \frac{t}{2 \cdot T_C} \right]$$

hatası nedeniyle ortaya çıkacak bağıl hata

$$\frac{\Delta v_o(t)}{v_o(t)} = -\frac{t}{2 \cdot T_C}$$

$K_{VO}$  açık çevrim kazancı yeteri kadar büyük değilse,  $T_C$  ve  $K_{VO} \cdot T_I$  aynı mertebede

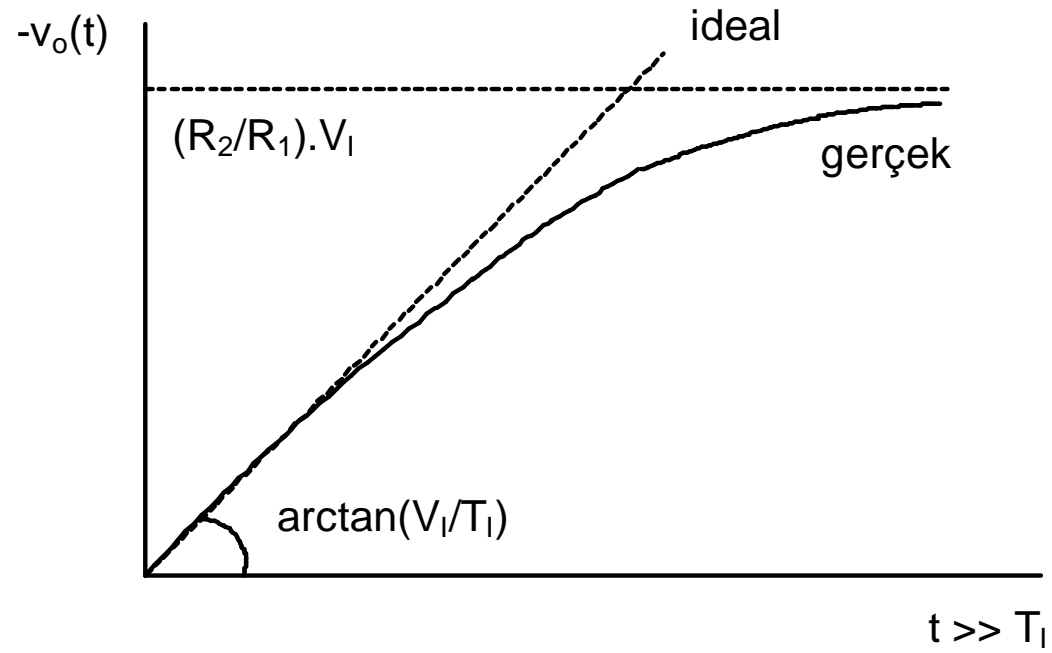
$$v_o(t) = -V_I \frac{T_C \cdot K_{VO}}{K_{VO} \cdot T_I + T_C} \left[ \exp\left(-\frac{t}{K_{VO} \cdot T_I}\right) + \exp\left(-\frac{t}{T_C}\right) \right]$$

yeteri kadar küçük t süreleri için

$$v_o(t) = -\frac{V_I}{T_I} t \left[ 1 - \frac{t}{2} \left( \frac{1}{K_{VO} \cdot T_I} + \frac{1}{T_C} \right) \right]$$

Çıkış geriliminde ortaya çıkacak bağıl hata

$$\frac{\Delta v_o(t)}{v_o(t)} = -\frac{t}{2} \left( \frac{1}{K_{VO} \cdot T_I} + \frac{1}{T_C} \right)$$



## Yüksek frekans hatasının basamak yanıtına etkisi

$$v_o(t) = -V_I \frac{t}{T_I}$$

olacağı yerde

$$v_o(t) = -\frac{V_I}{T_I} \left[ t - T_I \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_I}\right) \right) \right]$$

Giriş sinüs biçimli ve  $\omega$  frekanslı bir işaret uygulanırsa

$$V_o(\omega) = -\frac{V(\omega)}{j\omega T_I} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_I}}$$

İdeal haldeki yanıt

$$V_o(\omega) = -\frac{V_I(\omega)}{j\omega T_I}$$

İki yanıt arasındaki fark, genlik hatası ve faz hatası ile verilir.

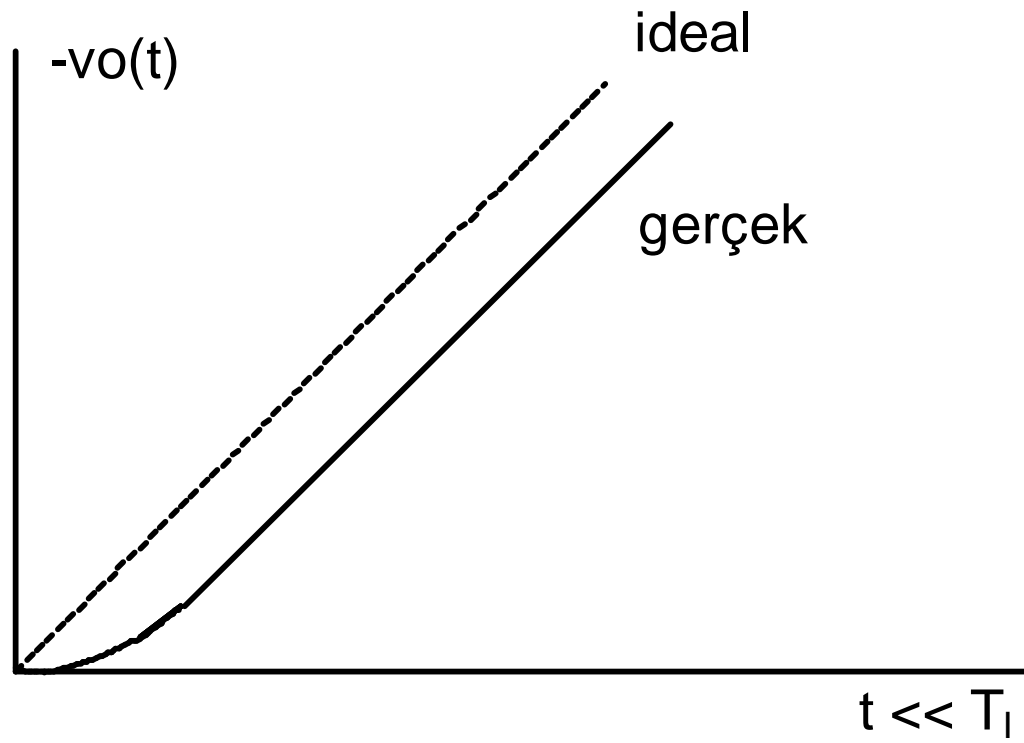
Genlik hatası

$$h_a(\omega) = -\frac{1}{2} \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2$$

faz hatası

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{\omega}{\omega_1}$$





Yüksek frekans hatası,  $R_1$  direncine paralel olarak kapasitesi  $C_1$  olan bir kondansatör bağlanarak kompanze edilebilir.

$C_1$  kapasitesinin değeri

$$C_1 = \frac{T_I}{R_1 \cdot (1 + \omega_1 \cdot T_I)} \approx \frac{1}{R_1 \cdot \omega_1}$$

YE yükselme eğimi ve  $I_O$  çıkış akımından kaynaklanana kısıtlama.

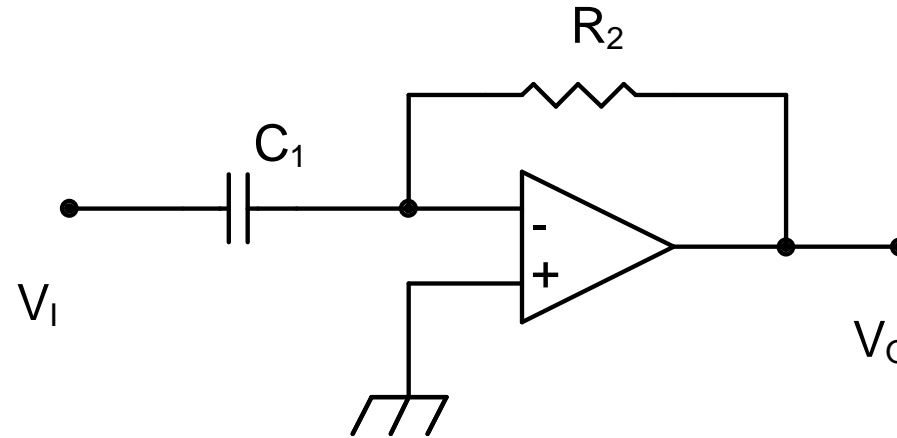
İntegral alıcının çıkış geriliminin maksimum değişim hızı

$$\left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{maks} \leq \frac{I_{Omaks}}{C_2}$$

giriş akımları ve dengesizlik gerilimi etkisi

$$v_O(t) = (-V_I \pm V_{IO} + I_1 R_1) \frac{t}{T_I} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_C}\right) \right)$$

## 2.4. Türev alıcılar

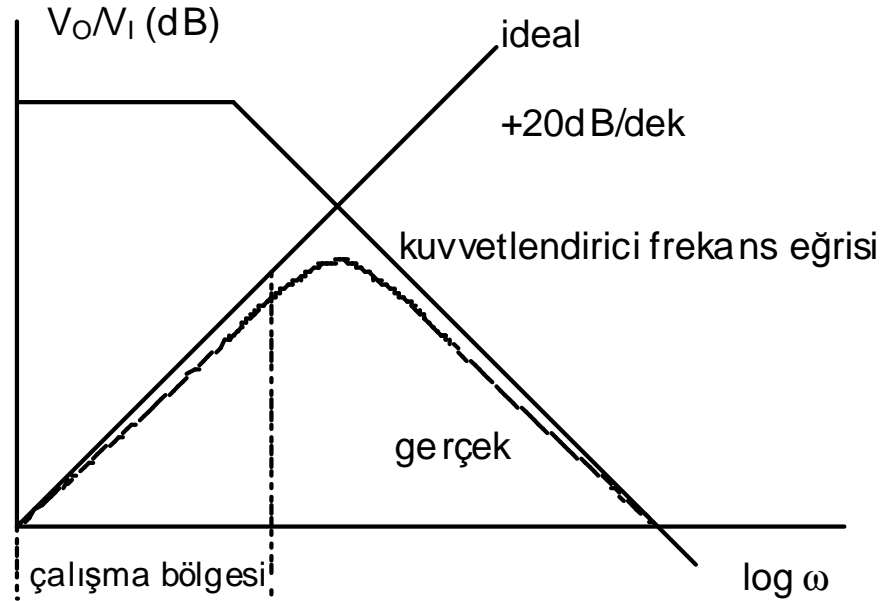


$$Z_1 = \frac{1}{sC_1} \quad , \quad Z_2 = R_2 \quad , \quad \tau_d = R_2 \cdot C_1$$

$$v_O(t) = -\tau_d \frac{dv_I(t)}{dt}$$

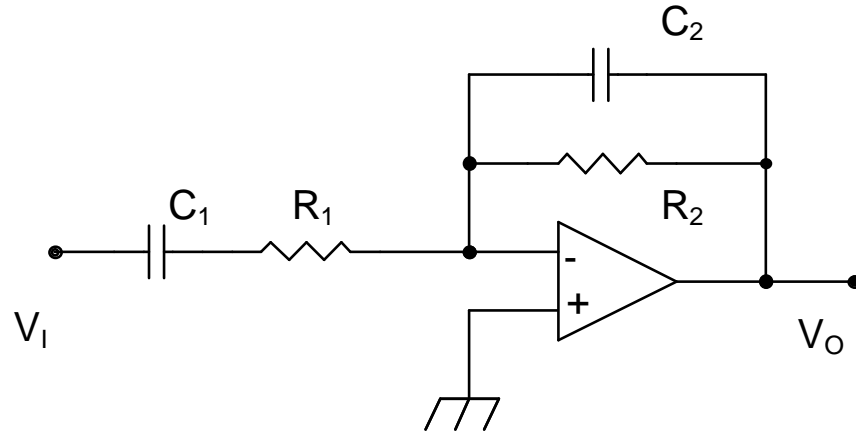
Pratikte, işlemsel kuvvetlendiricinin ideal olmaması nedeniyle, bu bağıntı tam olarak sağlanamaz

## Gerçek işlemsel kuvvetlendirici ile kurulan türev alma devresinin çalışma bölgesi.



türev alma devresinin çalışma bölgesi, bu iki karakteristiğin kesişme noktası ile sınırlı

karakteristik  $C_1$  kondansatörüne seri bir  $R_1$  direnci ve  $R_2$  direncine paralel bir  $C_2$  kondansatörü yardımıyla stabilize edilebilir.



$$(1/R_1 \cdot C_2) < \omega_1$$

$\omega_1$  işlemsel kuvvetlendiricinin birim kazanç band genişliğine karşı düşen açısal frekans

$$V_O(s) = -s \cdot R_2 \cdot C_1 \frac{1}{1 + s R_1 C_1} \frac{1}{1 + s R_2 C_2} V_I$$

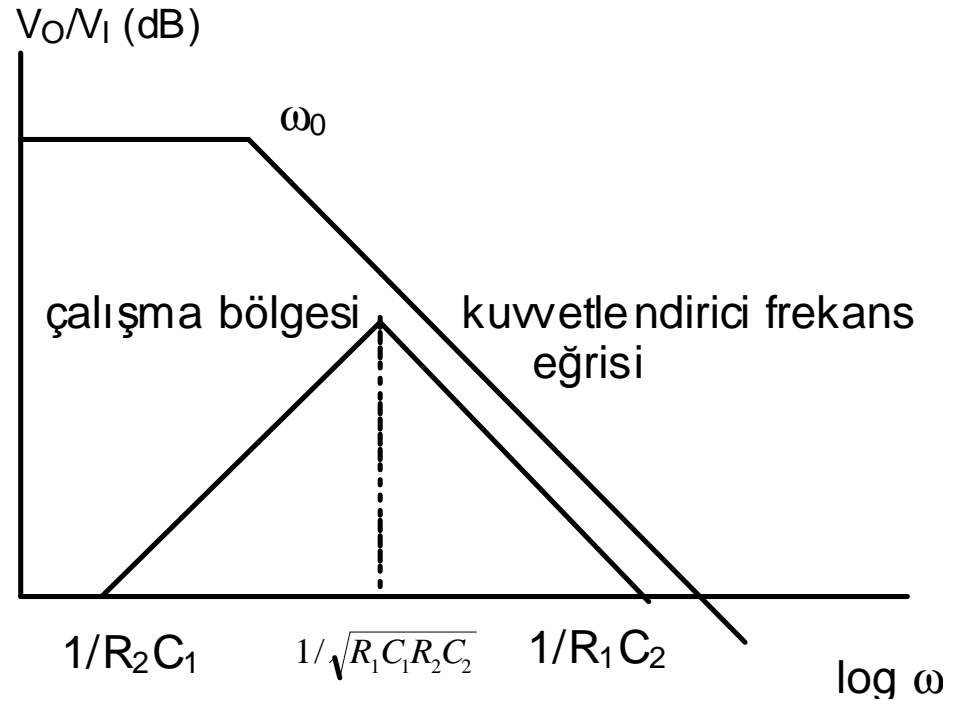
$$\tau = R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2$$

$$V_O = -s \cdot R_2 \cdot C_1 \frac{1}{(1 + \tau \cdot s)^2} V_I$$

$\omega \ll 1/\tau$  olduğu sürece, yapı ideal türev alma devresi gibi davranır.

$$V_O \approx -s \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot V_I, \quad v_O(t) = -\tau_d \frac{dv_I}{dt}$$





genlik hatası

$$h_a(\omega) = -(\omega \cdot \tau)^2$$

faz hatası

$$\varphi_h(\omega) = -2 \arctan(\omega \cdot \tau)$$