

Elektronik - 2

Kaynaklar :

- * Design with operational amplifiers and analog integrated circuits
3rd Edt., Sergio Franco, McGraw Hill
- * Microelectronics, Circuit Analysis and Design
D.A. Neamen, 4th Edt., McGraw Hill
- * Fundamentals of Microelectronics, 2nd Edt.
Behzad Razavi, Wiley, 2013

İletişim

mm.istanbullu@gmail.com

Elektronik - 1

→ Yarıiletken devre elemanları

- * Diyot
- * FET → JFET
- * BJT → MOSFET

* Fiziksel ve elektronik yapıları

* Çalışma karakteristikleri

* Büyük (DC) ve küçük (AC) işaret modelleri

* Kuvvetlendirici

* Frekans cevabı

Elektronik - 2

→ Farklı kuvvetlendiriciler

* BJT ve MOSFET

→ OPAMP (operational amplifier)

→ Geribesleme

→ Stabilité

→ Opamp uygulamaları

* Eviren, evirmeyen kuvvetlendiriciler

* Toplayıcı, fark ölçücü devreler

* Türev-integral ölçücü

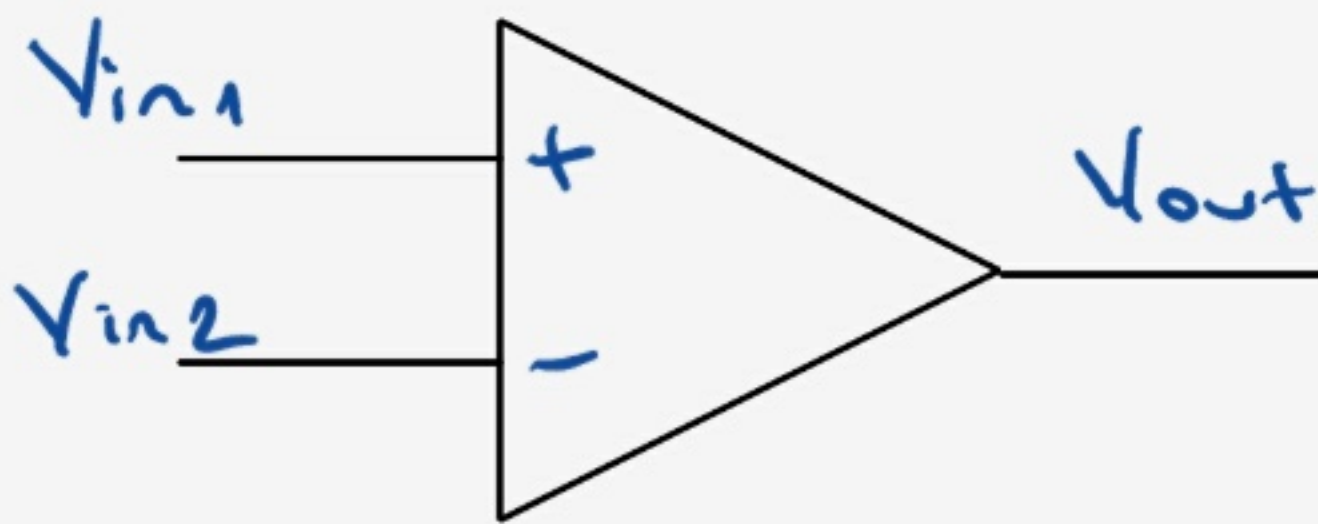
* Hassas gerilim ve toml dolgu devreleri

* Schmitt Trigger

* Karşılaştırmalar

- * Osilatörler
- * Enstrumantasyon kuvvetlendirici
- * I-V, V-I dönüştürücü
- * Aktif filtreler
- * Güç kuvvetlendiriciler

= OPAMP =



Integrated Circuit (IC)

- * Entegre devre
- * Tümleşik devre

$$(V_{in1} - V_{in2}) \cdot A \rightarrow V_{out}$$

Fark
alıcı

Kuvvetlendirici

Güç
Kartı

Fark
Kuvvetlendirici

- * BJT'li F.K
- * MOSFET'li F.K

BJT, MOSFET

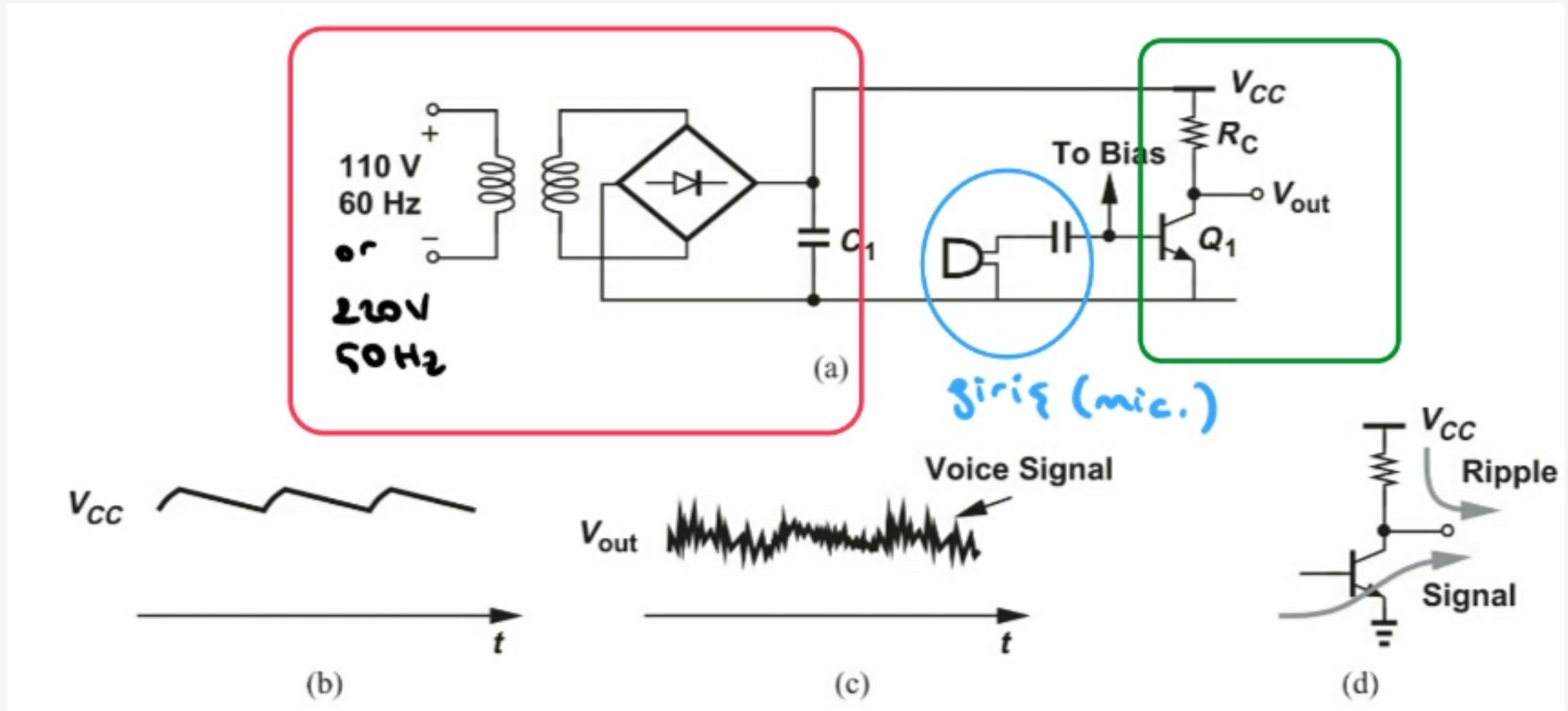
- * CE
- * CB vs.
- * CC

Eletronik
1

Güç Kuv.

- * A sınıfı
- * B sınıfı
- * C, D, AB

Farklı Güçlendiriciler



Dc Analiz (Vc)

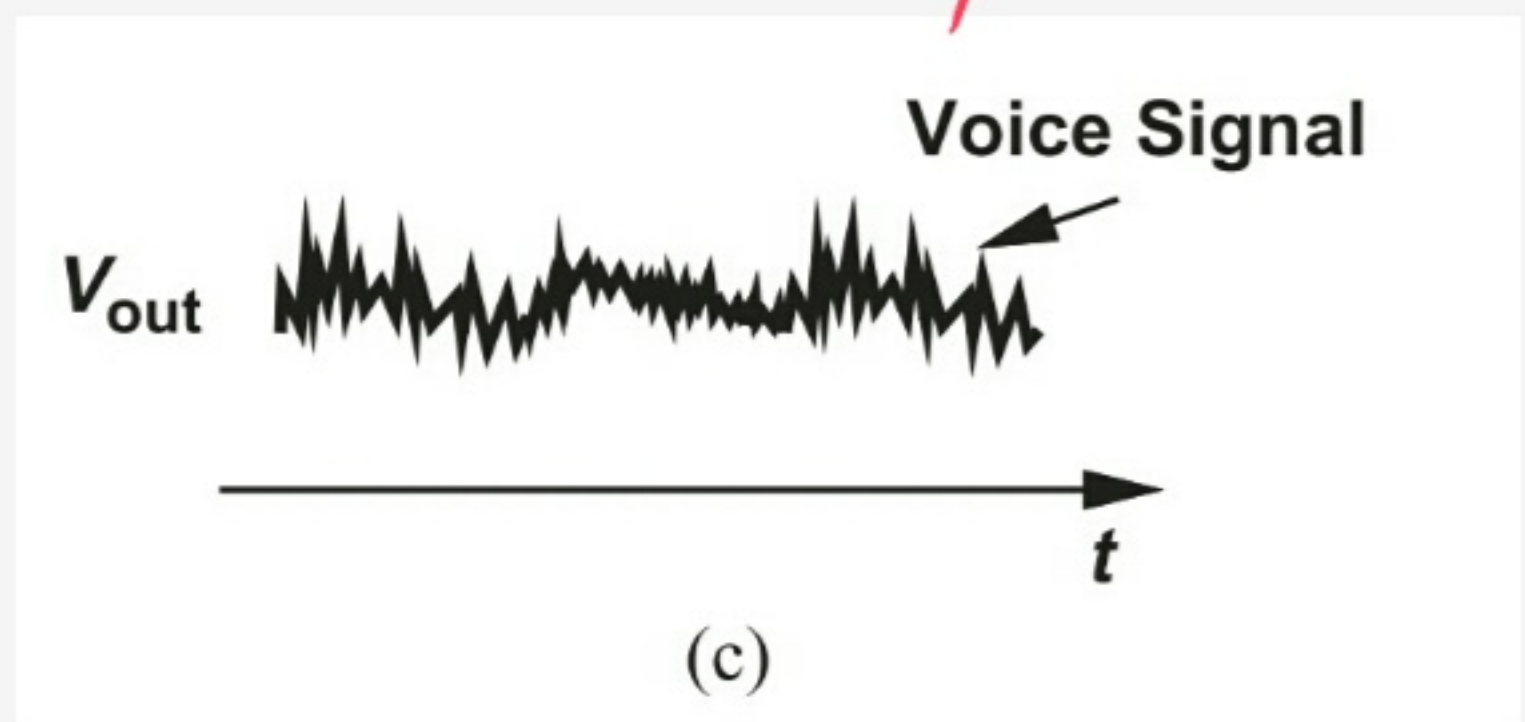
$$V_{out} = V_{cc} - I_c R_c$$

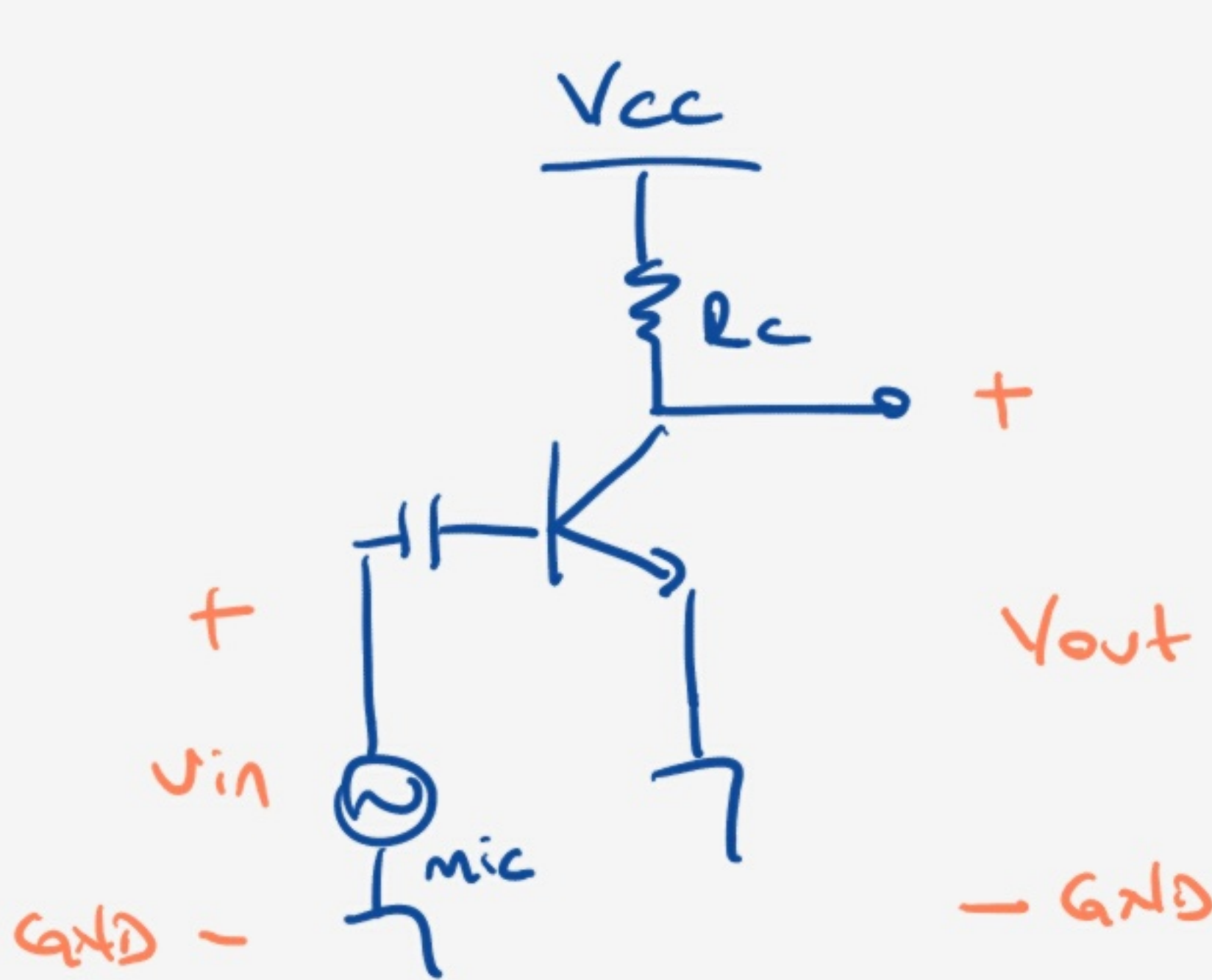
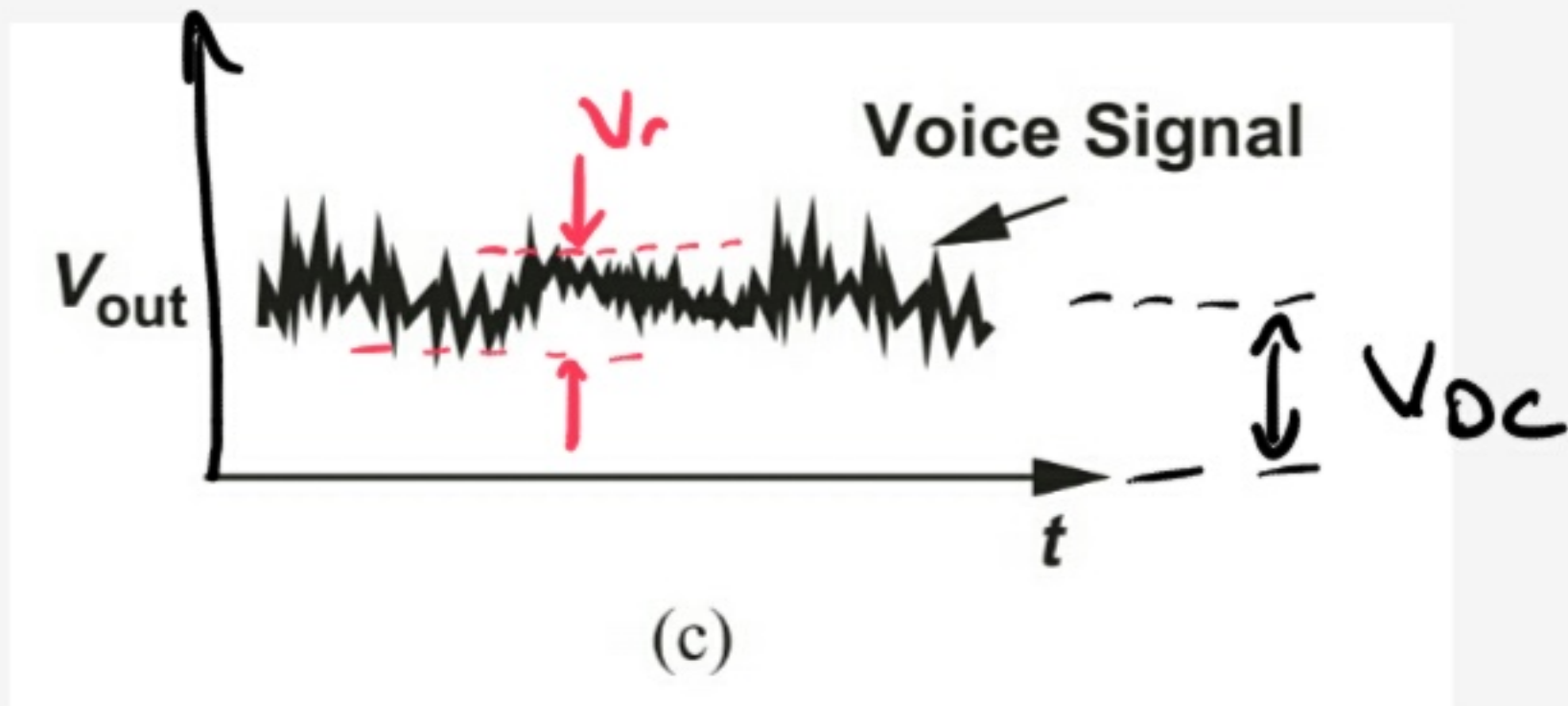
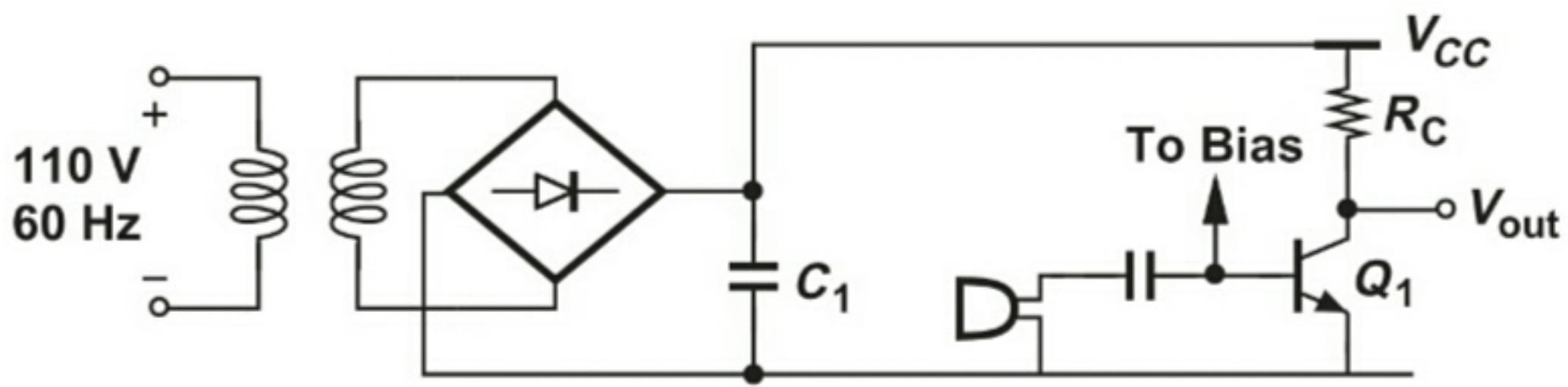
+

Ac Analiz (Vc)

$$V_{out} = A \cdot V_{in}$$

Problem?

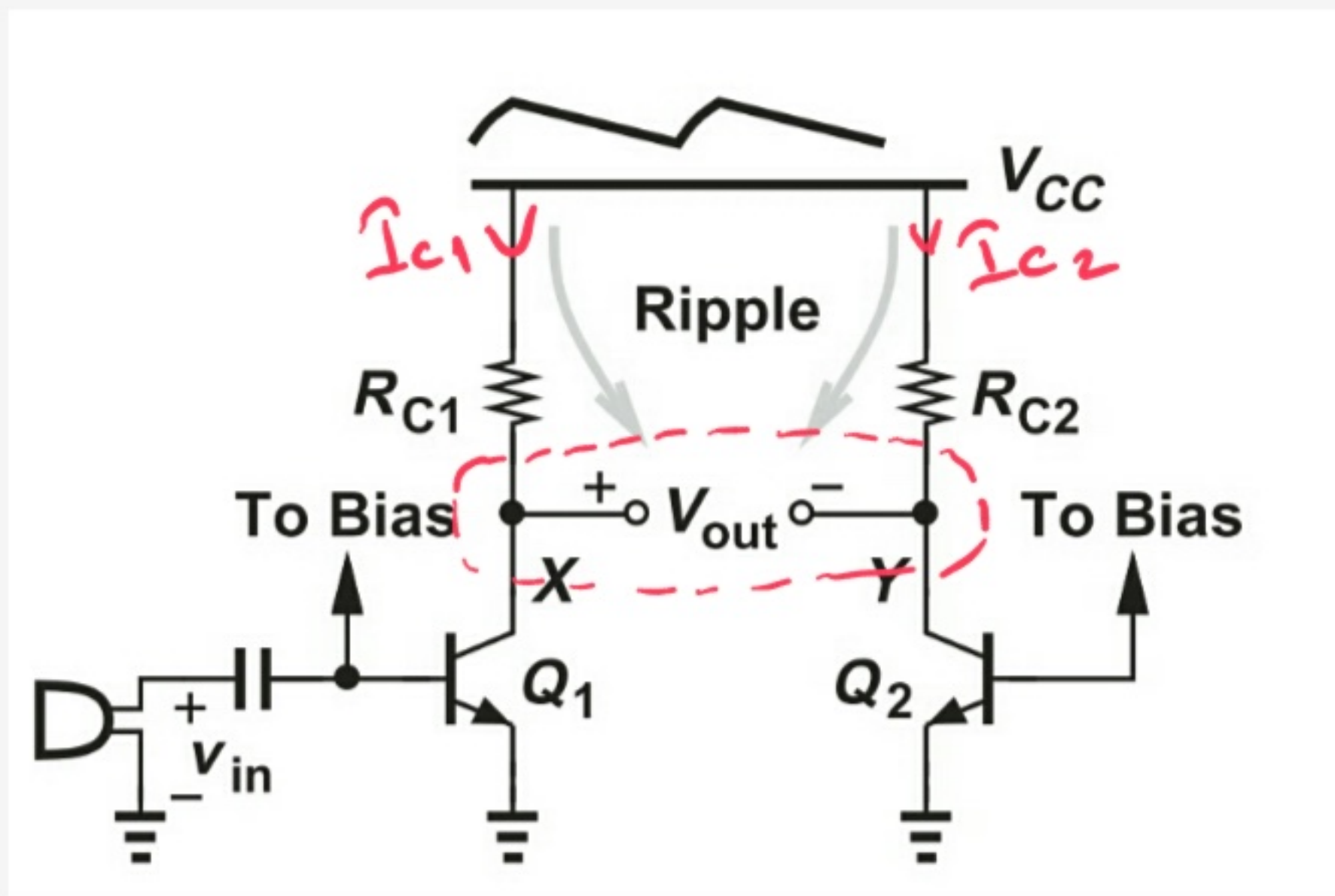




$$V_{out} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

referans olarak topuak
almırsa

farklı bir referans
?



$$V_x = V_{cc} - I_{c1} R_{c1} + A \cdot v_{in}$$

$$V_y = V_{cc} - I_{c2} R_{c2}$$

* Transistörler özdeş ise

* $R_{c1} = R_{c2}$ seçilirse

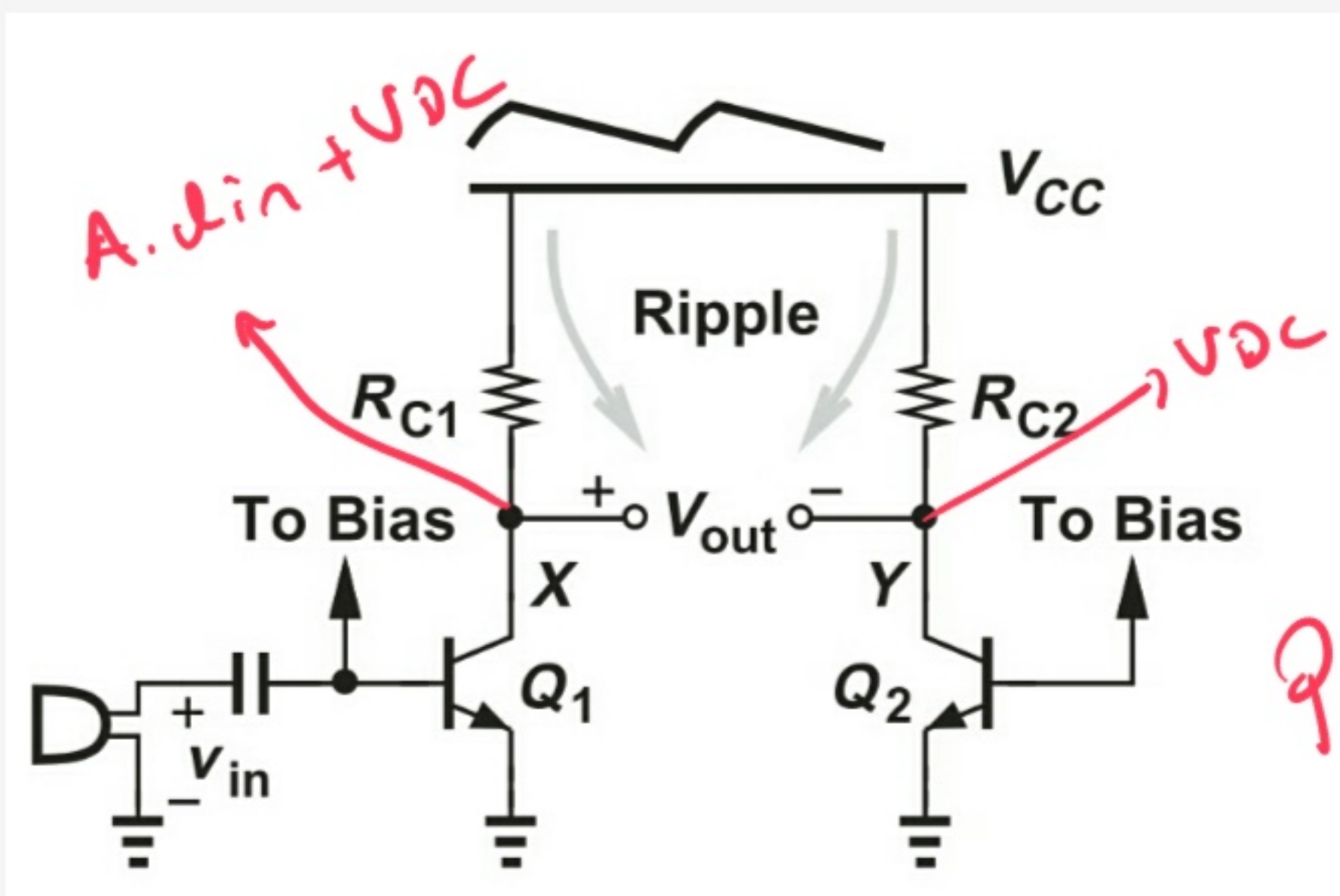
simetrik!

$$I_{c1} = I_{c2}$$

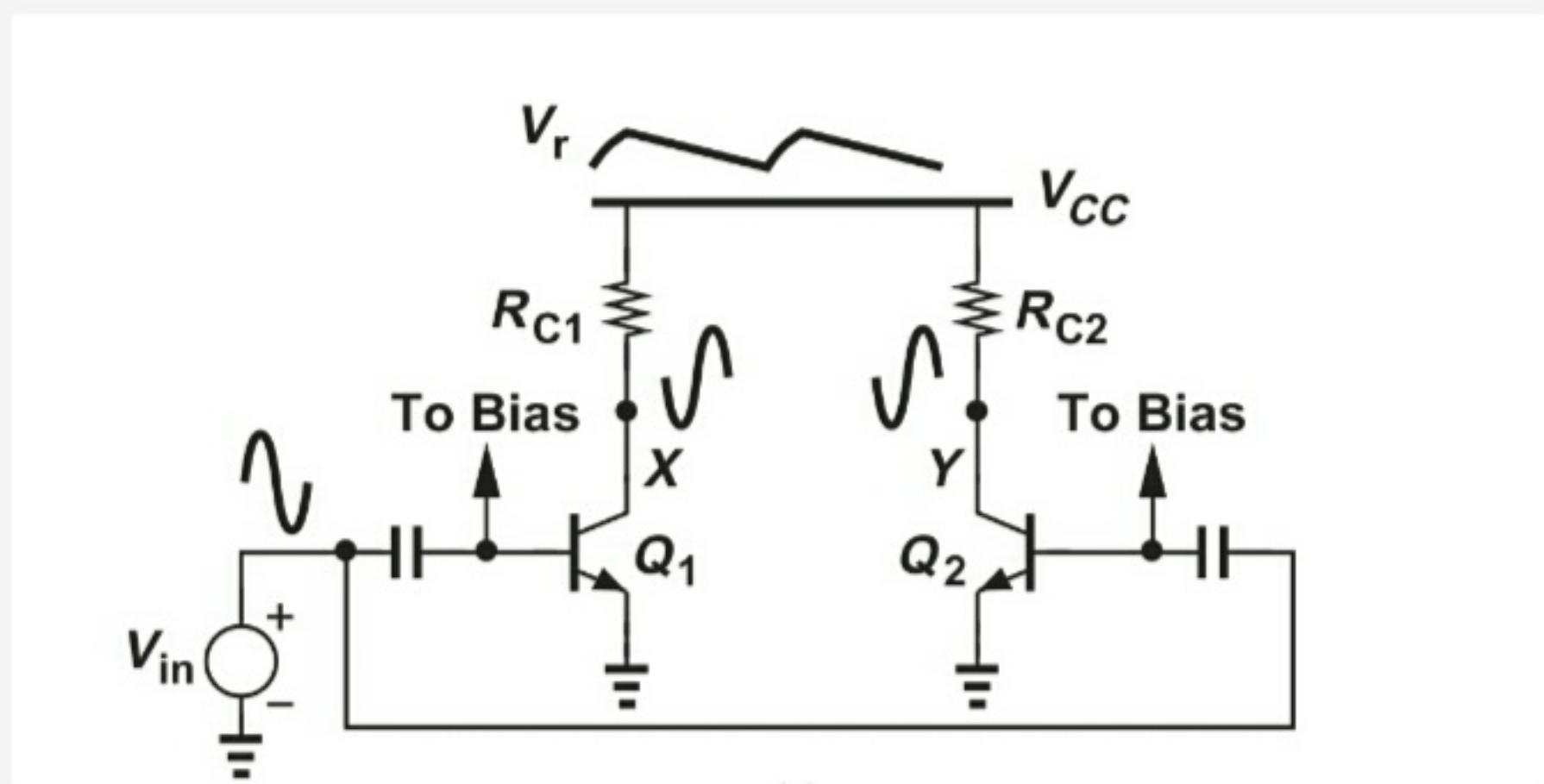
Bu durumda,

$$V_x - V_y = V_{cc} - I_{c1} R_{c1} + A \cdot v_{in} - V_{cc} + I_{c2} R_{c2}$$

$$V_x - V_y = A \cdot v_{in} \quad \checkmark$$



1. Senaryo



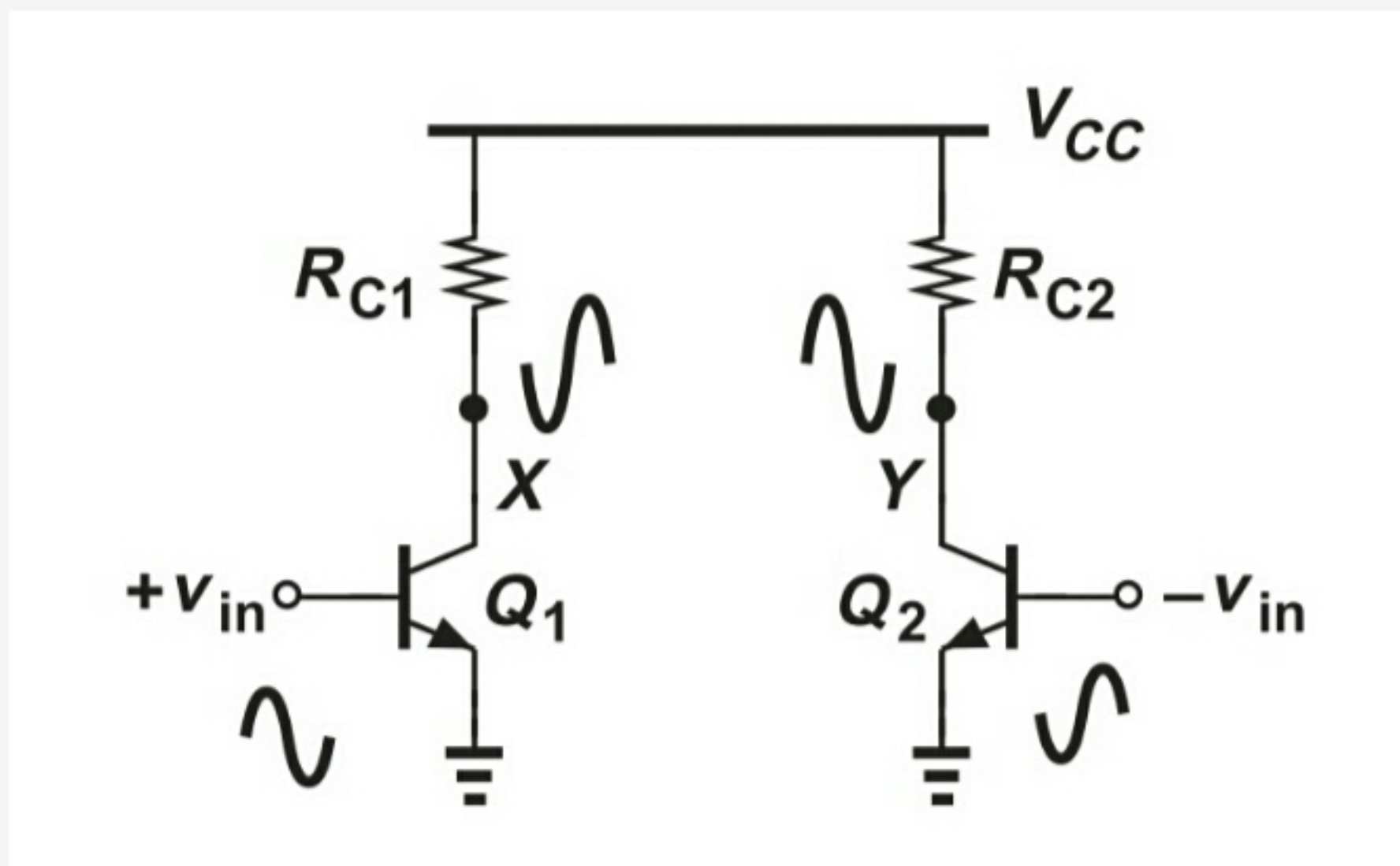
$$V_x = V_{DC} + A \cdot \sin \quad (V_{DC} = V_{CC} - I_C R_C)$$

$$V_y = V_{DC} + A \cdot \sin$$

$$V_x - V_y = 0$$

X

2. Senaryo



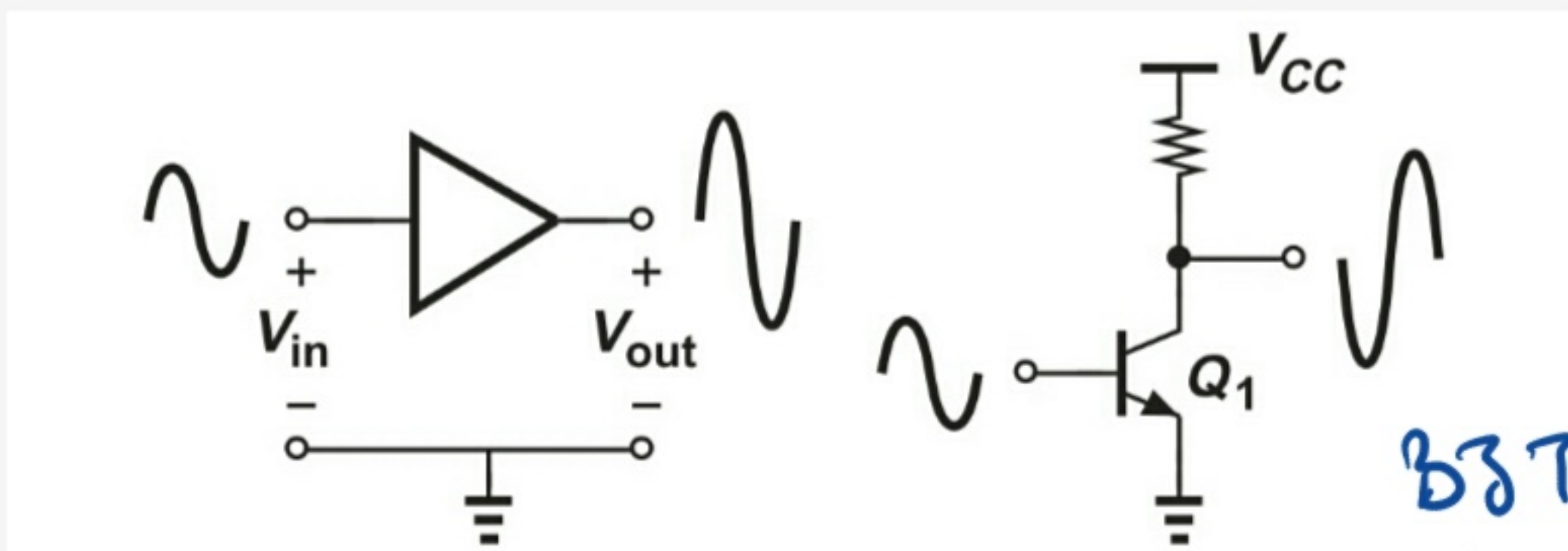
$$V_x = V_{DC} + A \cdot u_{in}$$

$$V_y = V_{DC} - A \cdot u_{in}$$

$$V_x - V_y = \underline{2A \cdot u_{in}}$$

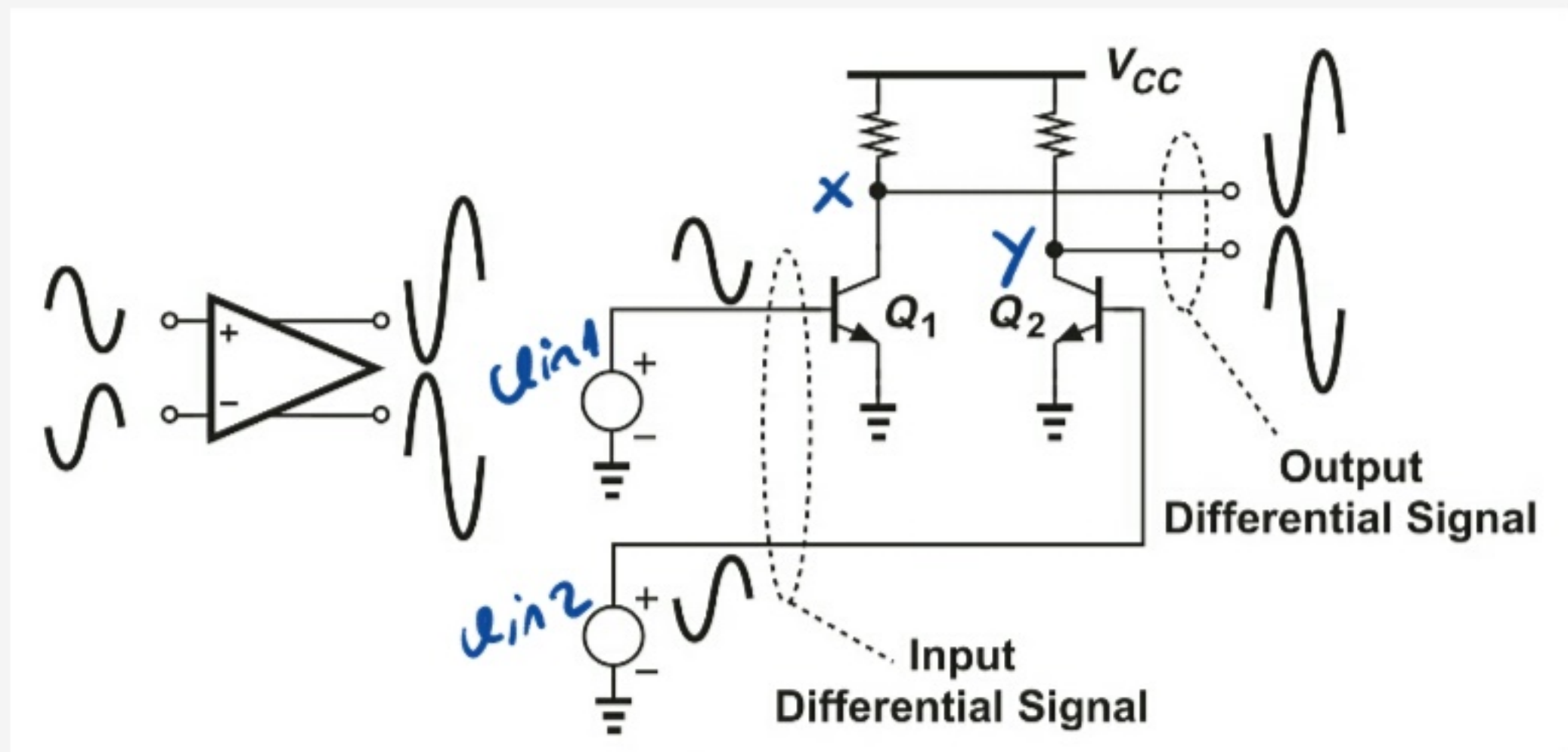


Teke Günlük Devreler (Single-ended)



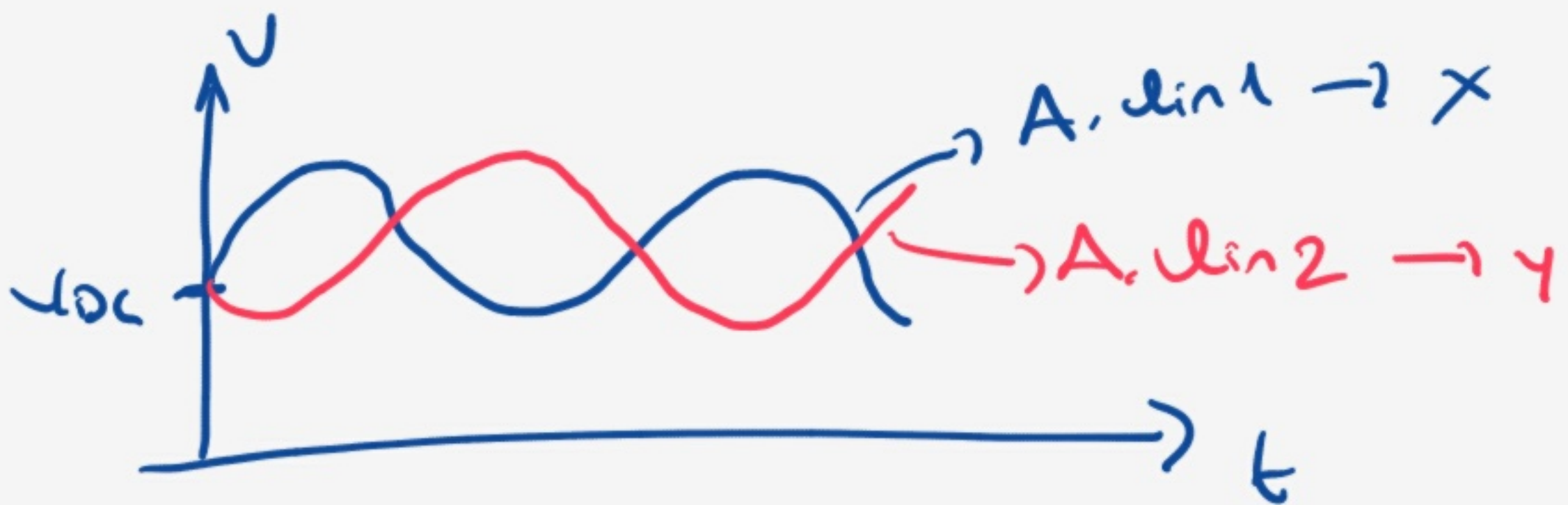
BJT kırı
↪ MOS kırı

Çift Çıkışlı Devreler (Two-side, double-ended)



$$V_x = V_{DC} + A \cdot v_{in1}$$

$$V_y = V_{DC} - A \cdot v_{in2} \quad (v_{in2} = -v_{in1})$$



V_x ve V_y 'deki ortak izareti?

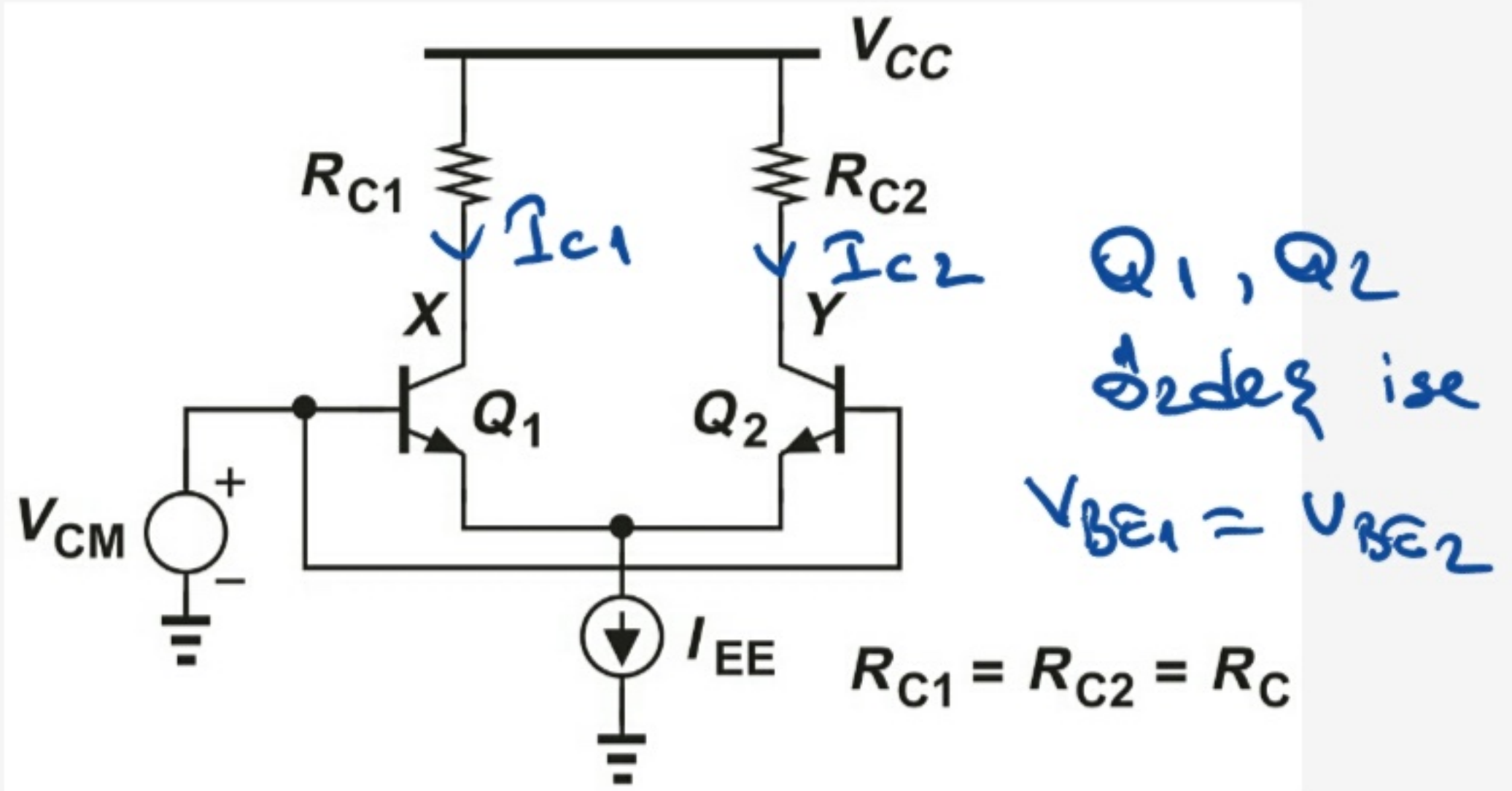
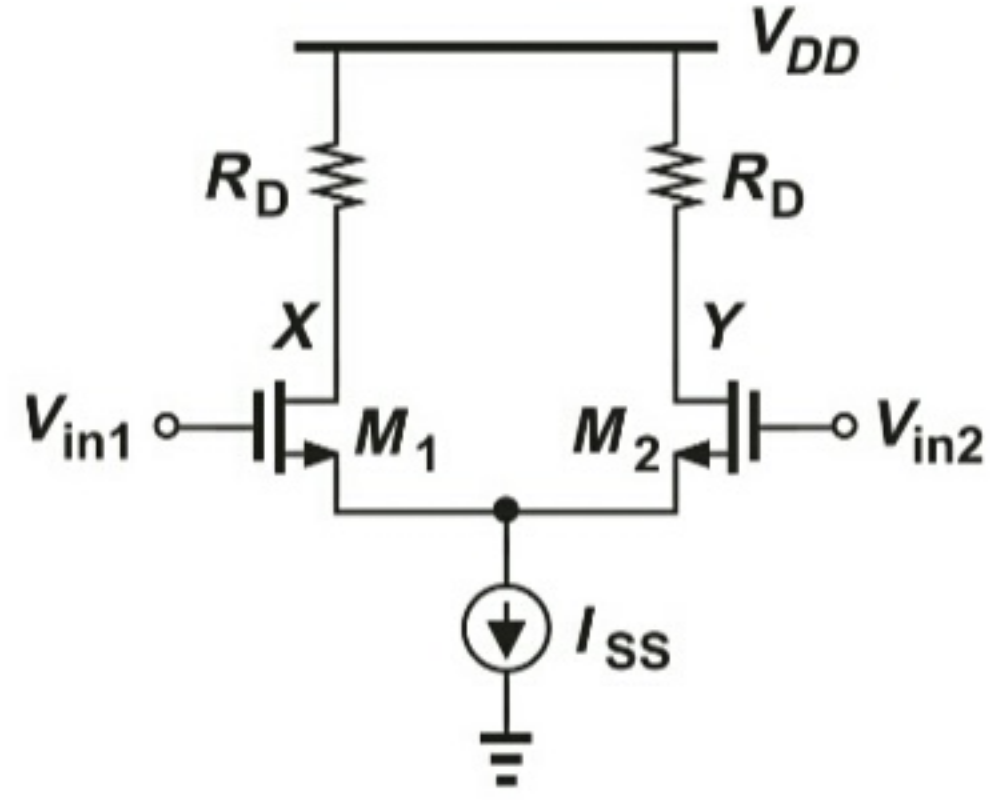
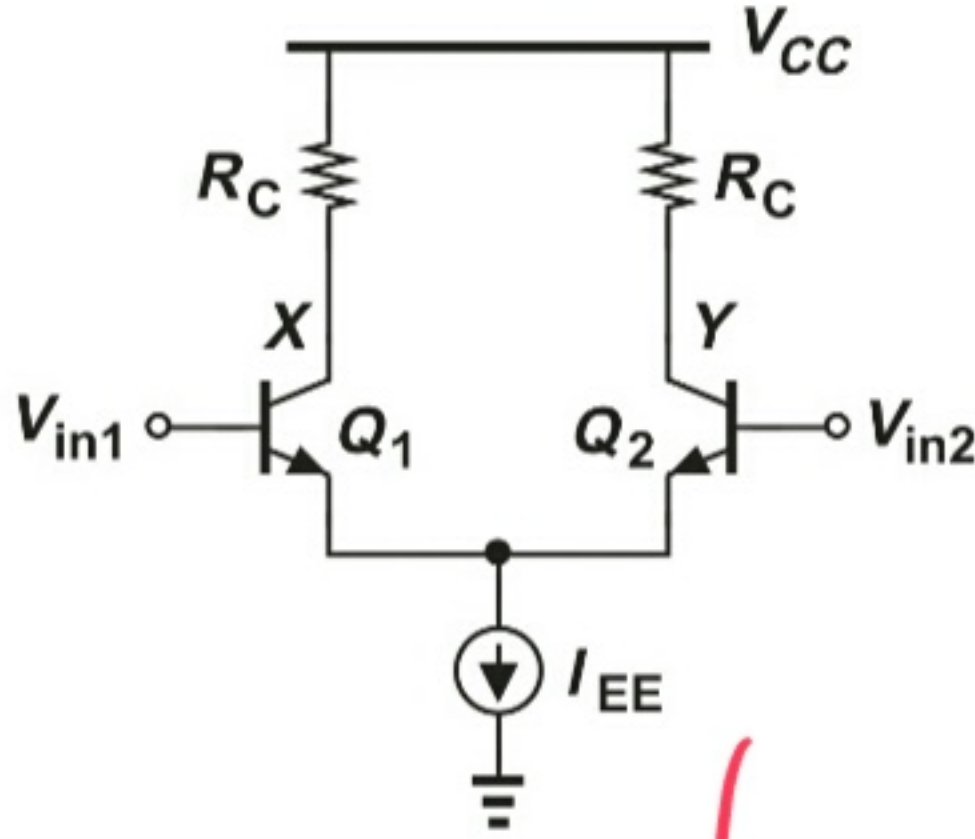
$V_{DC} \rightarrow$ ortak mod izareti
(common mode), (V_{cm})

$$V_{cm} = V_{DC}$$

Fark Aifti (Differential Pair)

BJT

MOSFET



$$I_{C1} + I_{C2} = I_{EE} \quad (\text{Kirchoff's law})$$

ise

$$V_X = V_Y = V_{CC} - \frac{I_{EE}}{2} \cdot R_C$$

* Devrenin giriş gerilimleri eşit olursa çıkış gerilimleri de eşit olur.

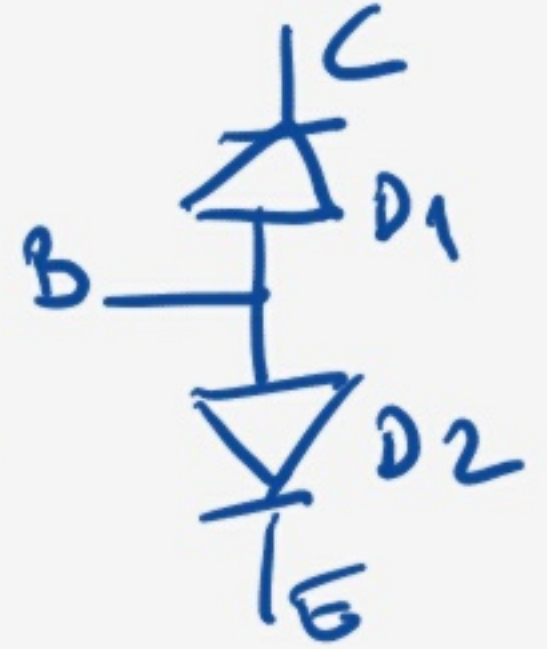
* Devreye uygulanan "sıfır" fark girişi "sıfır" fark çıkışına neden olur.

* Transistörün girişine uygulanan bir işaretli kuvvetlendirebilmesi için "ileri aktif bölgede" çalışması gerekmektedir.

* Bu nedenle fork çiftindeki BJT'lerin saturasyona girmemesi için;

$$V_{CC} - \frac{I_{EE}}{2} R_C \geq V_{CEM}$$

olması gerekir.



Örnek

BJT'li bir fork çiftinde $I_{EE} = 1mA$ ve yük dirençleri $1k\Omega$ ise bu fork çiftinin girişlerine uygulatabilecek maks. ortak mod işaretli kaç volttur? ($V_{CC} = 12$ olsun)

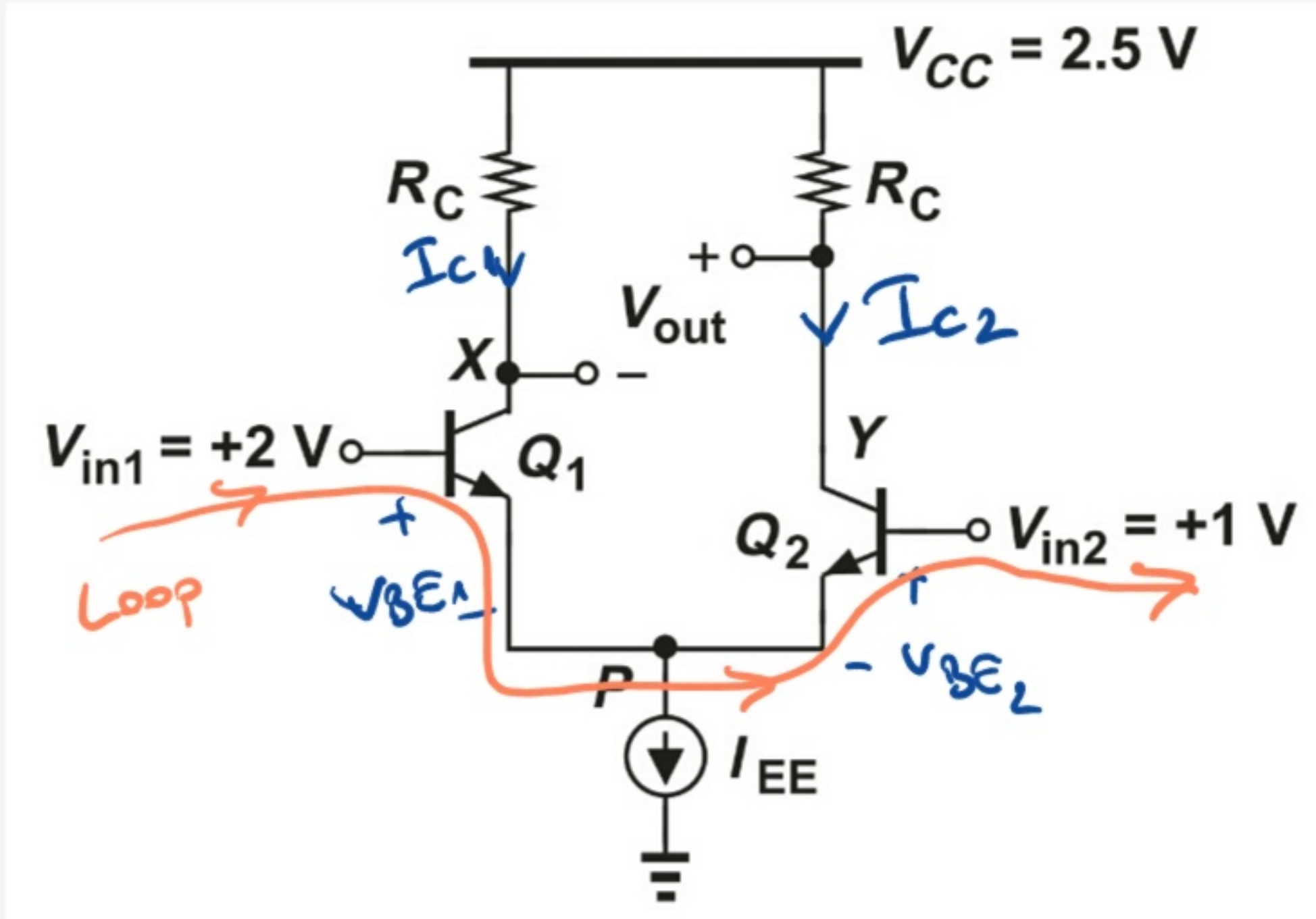
$$V_{CC} - V_{CEM} \geq \frac{I_{EE}}{2} R_C \text{ olmalı}$$

Ö halde

$$12 - V_{CEM_{max}} = \frac{1mA}{2} \cdot 1k\Omega = 0.5V \text{ olur.}$$

$$V_{CEM_{max}} = 12 - 0.5 = 11.5V$$





$$V_{in1} - V_{BE1} + V_{BE2} - V_{in2} = 0$$

$$V_{in1} - V_{in2} = \underbrace{V_{BE1} - V_{BE2}}_{\Delta V_{BE}}$$

0 halde, eğer

1. Durum

$$V_{in1} = V_{in2} \text{ ise } V_{BE1} = V_{BE2} \text{ olur.}$$

Devre dengededir. (in equilibrium)

2. Durum

$$V_{in1} > V_{in2} \text{ ise } \Rightarrow \hat{I}_{C1} \text{ artar}$$

$$\hat{I}_{C1} + \hat{I}_{C2} = \hat{I}_{EE} \text{ old. için}$$

$$\hat{I}_{C2} \text{ azalır}$$

Hatırla!

$$\hat{I}_C = \beta \cdot \hat{I}_B$$

2. Durum (devam)

$V_{in1} > V_{in2}$ ise Q_2 tr. $\Rightarrow$ OFF

Bu durumda $I_{C1} = I_{EE}$ olur.

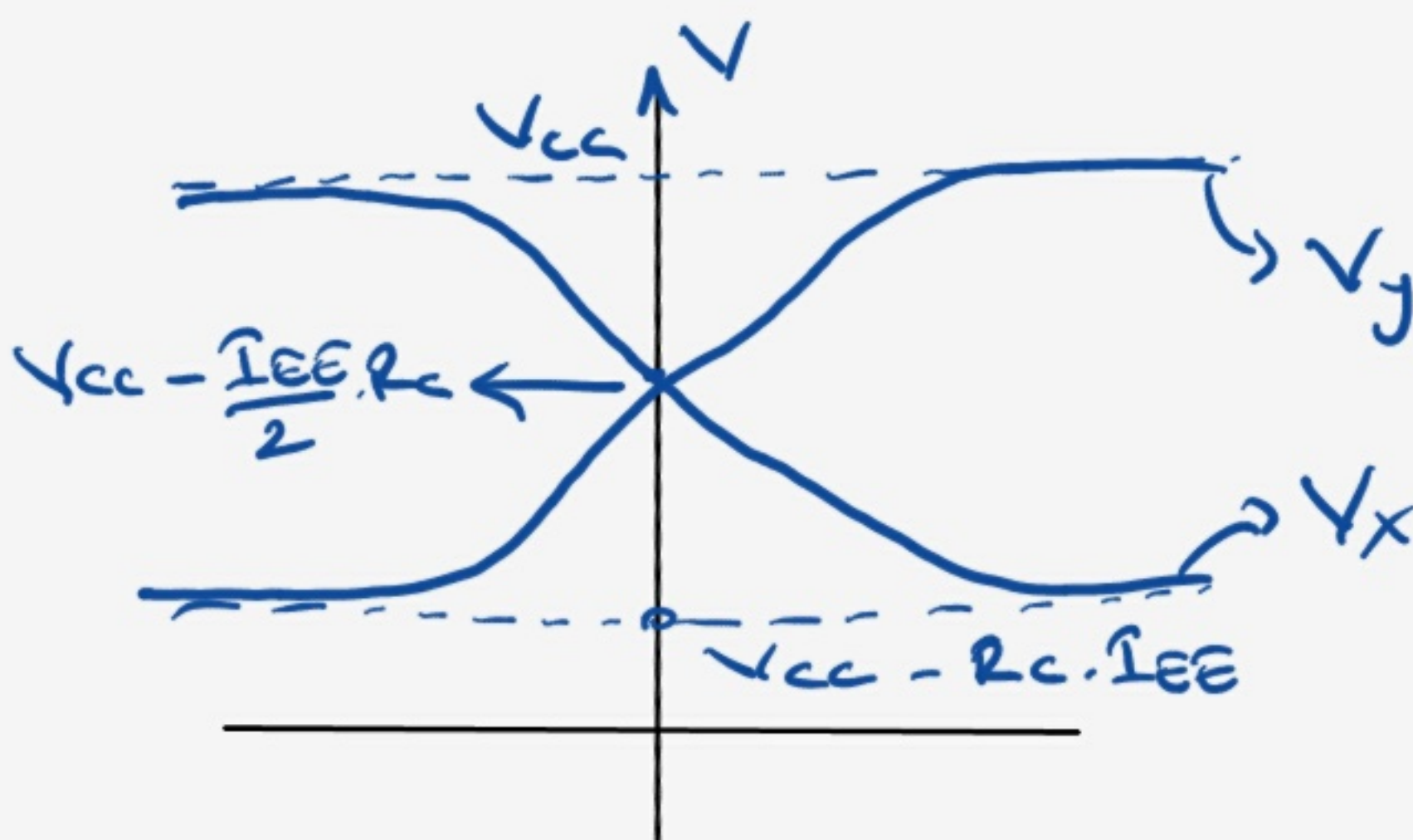
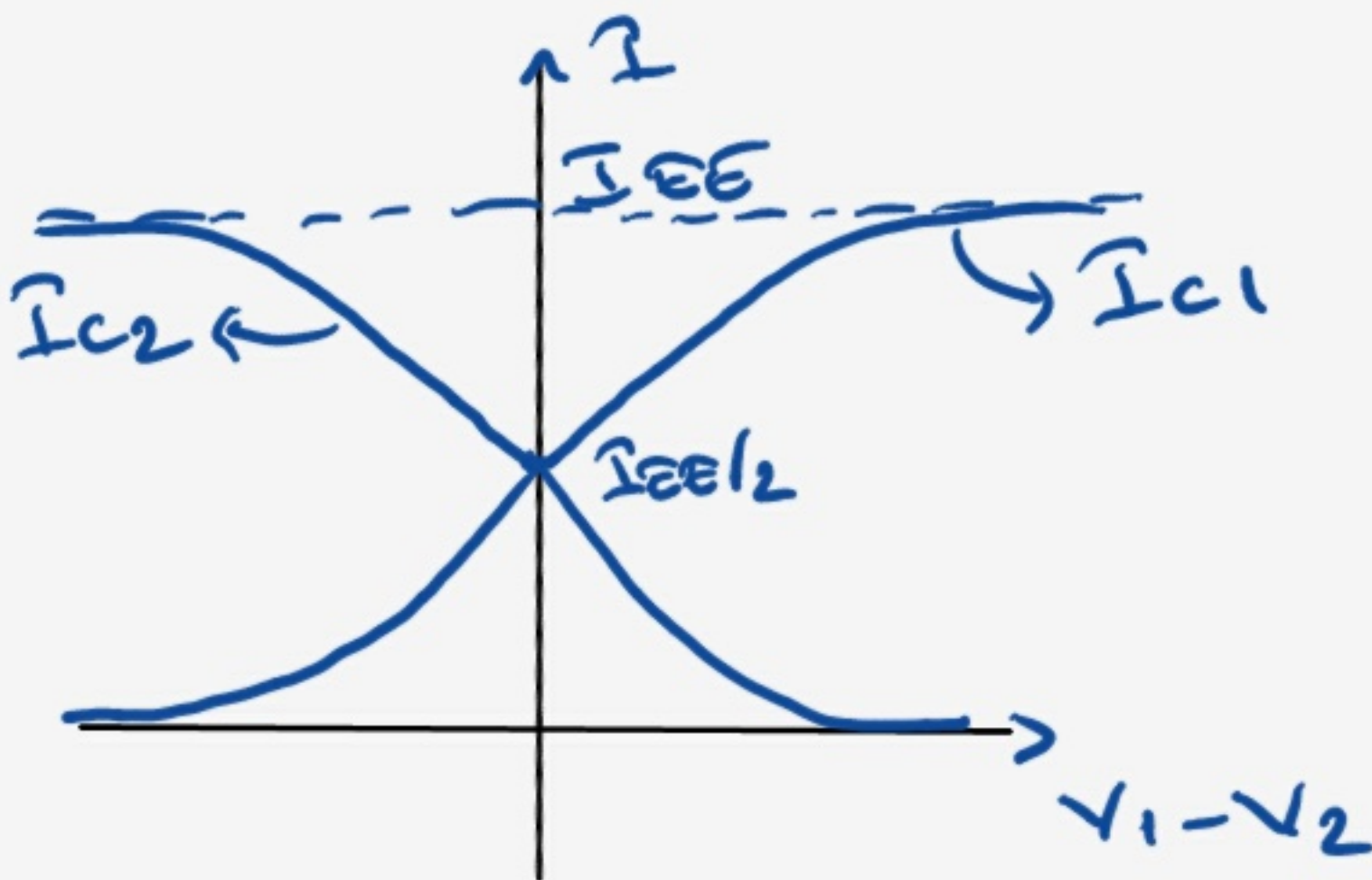
3. Durum

$V_{in1} < V_{in2}$ ise $\Rightarrow I_{C1}$ azalır

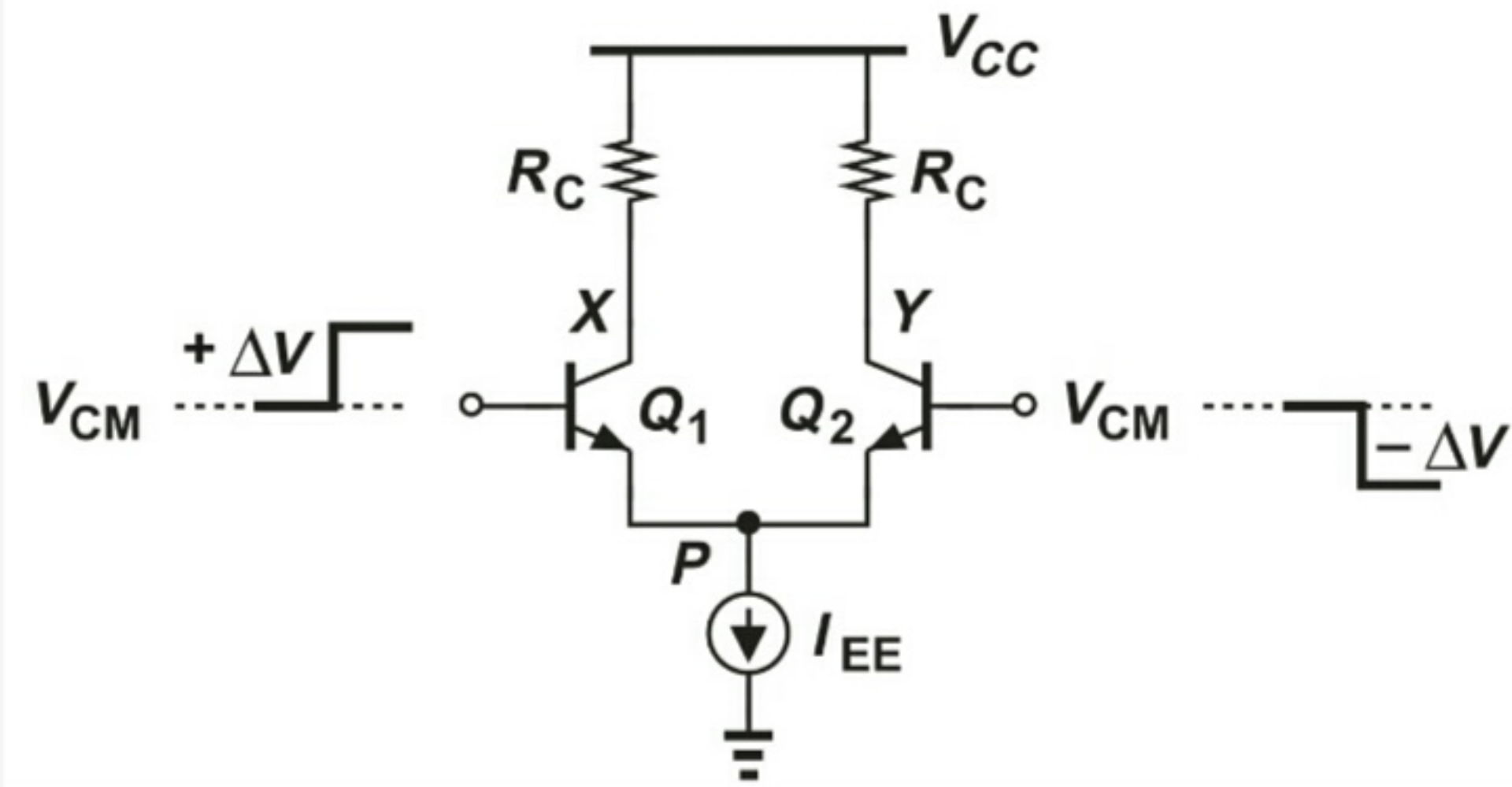
$\Downarrow$

I_{C2} artar.

$V_{in1} < V_{in2}$ ise Q_1 tr. $\Rightarrow$ OFF



4. Durum



Diğer 3 durumdan farklı olarak, fark kuvvettendirici devresindeki transistörlerin base girişleri çok küçük miktarda (ΔV) değiştirilirse; örneğin

Q_1 'in base girişi $V_{CM} + \Delta V$

Q_2 'nin base girişi $V_{CM} - \Delta V$ olursa

$$I_{C1} = \frac{I_{EE}}{2} + \Delta I$$

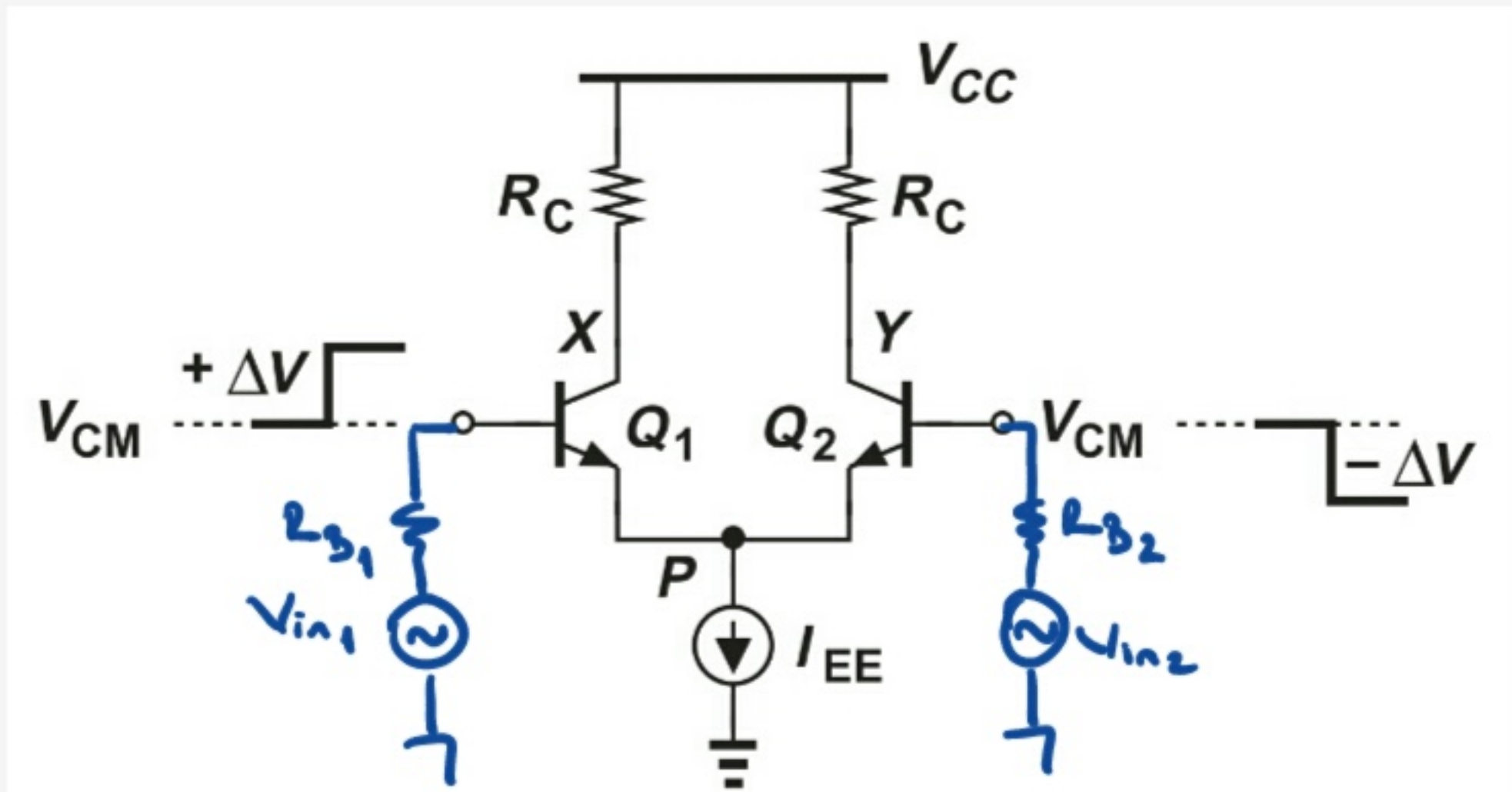
$$I_{C2} = \frac{I_{EE}}{2} - \Delta I \quad \text{olacaktır. O halde}$$

$$\begin{aligned} V_X - V_Y &= (V_{CC} - R_C \left(\frac{I_{EE}}{2} + \Delta I \right)) - (V_{CC} - R_C \left(\frac{I_{EE}}{2} - \Delta I \right)) \\ &= -2 \Delta I R_C \end{aligned}$$

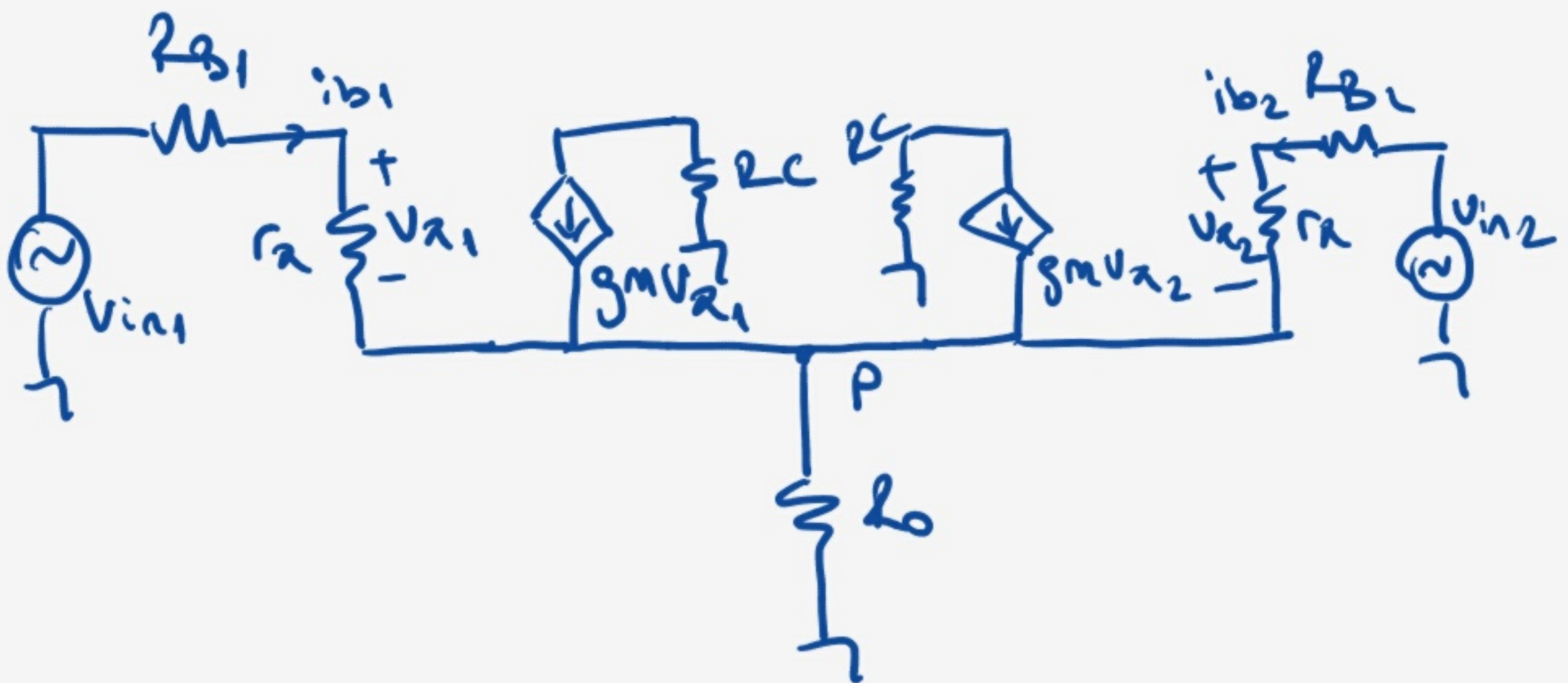
elde edilir. (DC olarak)

Bu durumu analiz etmek için devrenin küçük işaret devresini incelemelidir.

Küçük İmpedans Analizi



Devrenin AC eşdeğeri:



P noktasına Kirchhoff denklemini uygularsak

$$\frac{V_{\pi 1}}{r_{\pi}} + g_m V_{\pi 1} + g_m V_{\pi 2} + \frac{V_{\pi 2}}{r_{\pi}} - \frac{V_P}{R_L} = 0$$

Hatırlatma!

$$V_{\pi 1} = i_{b1} \cdot r_{\pi}$$

$$g_m V_{\pi} = \beta \cdot i_b$$

$$g_m r_{\pi} = \beta$$

Böylece eşitliklerden dözenlenirse;

$$V_{x1} \left(\frac{1+\beta}{r_x} \right) + V_{x2} \left(\frac{1+\beta}{r_x} \right) = \frac{V_P}{R_o} \quad \dots (*)$$

$$\frac{V_{x1}}{r_x} = \frac{V_{in1} - V_P}{r_x + R_o} \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{V_{x2}}{r_x} = \frac{V_{in2} - V_P}{r_x + R_o} \quad \dots \textcircled{2}$$

1 ve 2 eşitlikleri (*)'da yerine konursa

$$(V_{in1} + V_{in2} - 2V_P) \left(\frac{1+\beta}{r_x + R_o} \right) = \frac{V_P}{R_o}$$

elde edilir. V_P çözülürse;

$$V_P = \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2 + \frac{r_x + R_o}{(1+\beta) \cdot R_o}} \quad \dots \textcircled{3}$$

Tek taraftan çıkış alınırsa (mesela V_y)

$$V_y = V_o = -(g_m V_{x2}) R_c = \frac{-\beta \cdot R_c (V_{in2} - V_P)}{r_x + R_o}$$

④

3. denklem 4'te yerine konulursa;

5

$$V_o = \frac{-\beta \cdot R_c}{r_\pi + R_B} \left\{ \frac{V_{in2} \left(1 + \frac{r_\pi + R_B}{(1+\beta) R_o} \right) - V_{in1}}{2 + \frac{r_\pi + R_B}{(1+\beta) R_o}} \right\}$$

elde edilir. Eğer devrede kullanılan eleman

kaynağı ideal ise $R_o = \infty$ olur. Bu durumda

$$V_o = \frac{-\beta \cdot R_c}{r_\pi + R_B} \left\{ \frac{V_{in2} \left(1 + \frac{r_\pi + R_B}{(1+\beta) R_o} \right) - V_{in1}}{2 + \frac{r_\pi + R_B}{(1+\beta) R_o}} \right\}$$

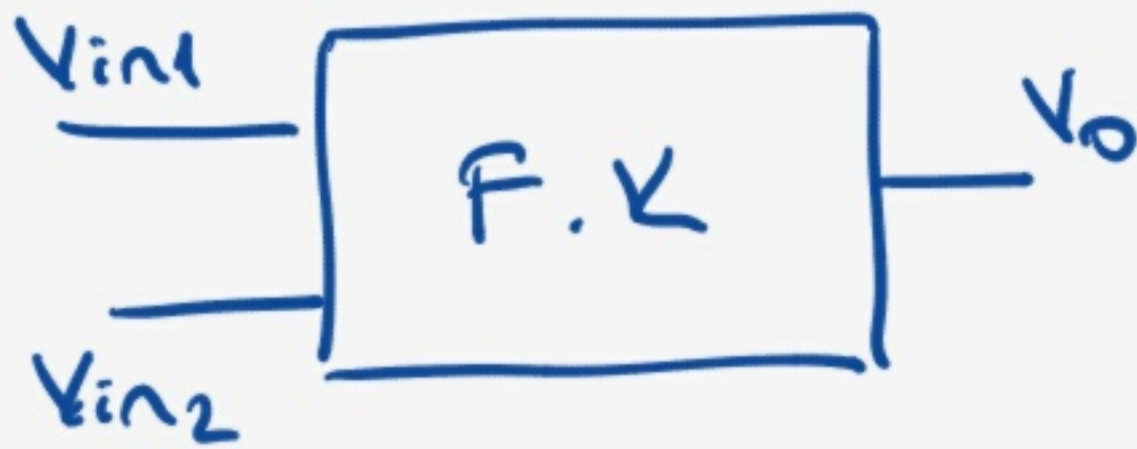
$$V_o = \frac{-\beta R_c (V_{in2} - V_{in1})}{2(r_\pi + R_B)}$$

olur.

Devrenin kazancı için $A = \frac{V_o}{V_{in}}$

$$A_d = \frac{V_o}{V_d} = \frac{V_o}{(V_{in1} - V_{in2})} = \frac{\beta \cdot R_c}{2(r_\pi + R_B)}$$

↓
fark mod
kazancı



çıkış gerilim kazancı

$$V_o = A (V_{in1} - V_{in2})$$

$$V_d = V_{in1} - V_{in2}$$

↳ fark mod giriş işareti

$$V_{cm} = \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$

↳ ortak mod giriş işareti

$$V_{in1} = V_d + V_{in2}$$

$$V_{in1} = 2V_{cm} - V_{in2}$$

$$V_d + V_{in2} = 2V_{cm} - V_{in2}$$

$$2V_{in2} = 2V_{cm} - V_d$$

$$V_{in2} = V_{cm} - \frac{V_d}{2} \quad \text{--- (6)}$$

$$V_{in1} = V_{cm} + \frac{V_d}{2} \quad \text{--- (7)}$$

Süperpozisyon teoremine göre b ve f ideli V_{in1} ve V_{in2} ifadeleri 5 nolu genel denklemlerde yerine konulabilir. Böylece;

$$V_o = \frac{\beta R_c}{2(r_\pi + R_B)} \cdot V_d - \frac{\beta \cdot R_c}{r_\pi + R_B + 2(1+\beta)R_o} \cdot V_{cm}$$

elde edilir. (Ara işlemleri yapınız.)

Daha önce $A_d = \frac{\beta R_c}{2(r_\pi + R_B)}$ bulunmuştur.

Bu durumda

$$V_o = A_d V_d + A_{cm} \cdot V_{cm}$$

olur.

0 halde

$$A_{cm} = \frac{-\beta \cdot R_c}{r_\pi + R_B + 2(1+\beta)R_o}$$

alum kaynağı

İdeal alum kaynağı ise;

$$R_o = \infty \rightarrow A_{cm} = 0$$

ideal değil ise;

$$R_o \neq \infty \rightarrow A_{cm} \neq 0$$

Ortak Mod Bastırma Oranı

Common Mode Rejection Ratio, CMRR

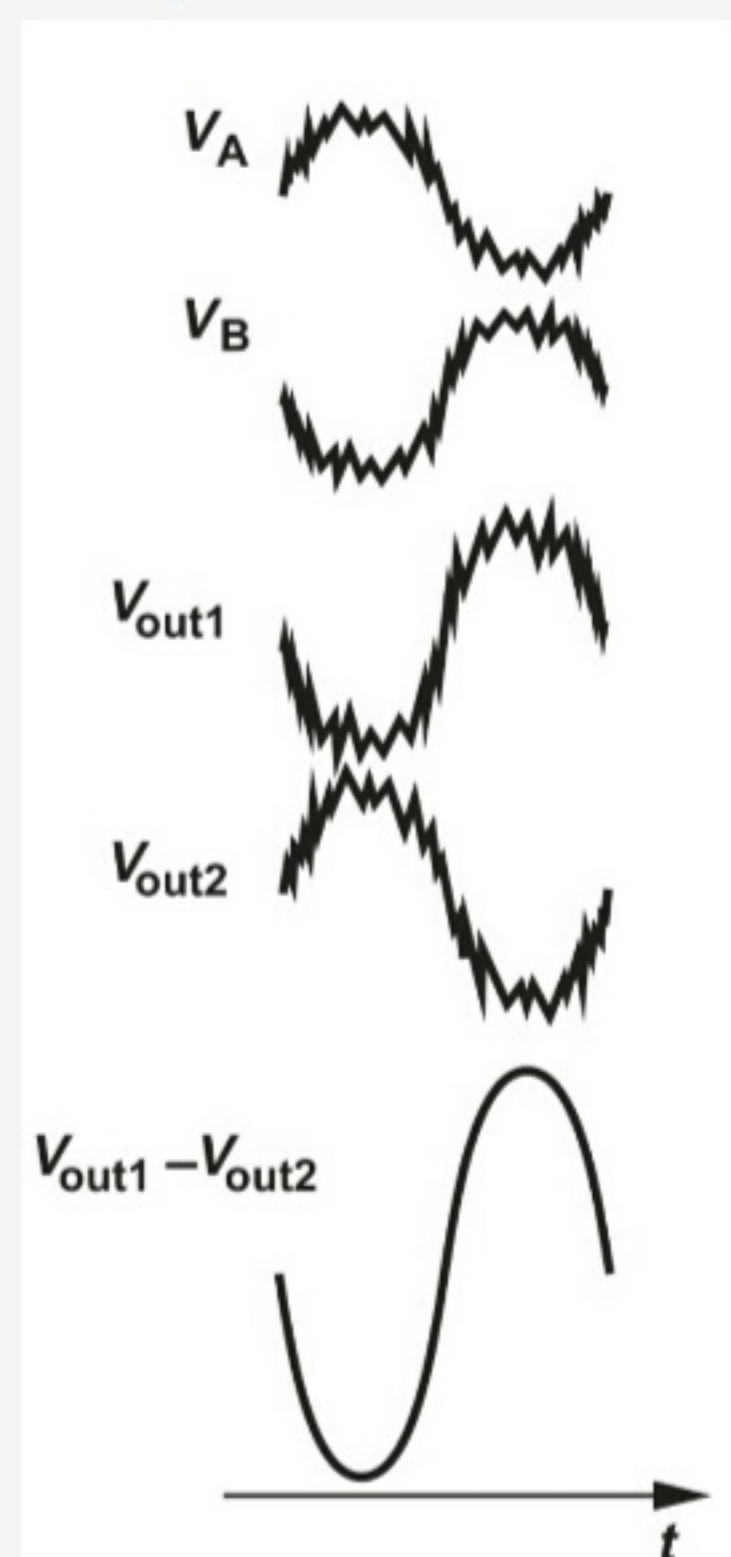
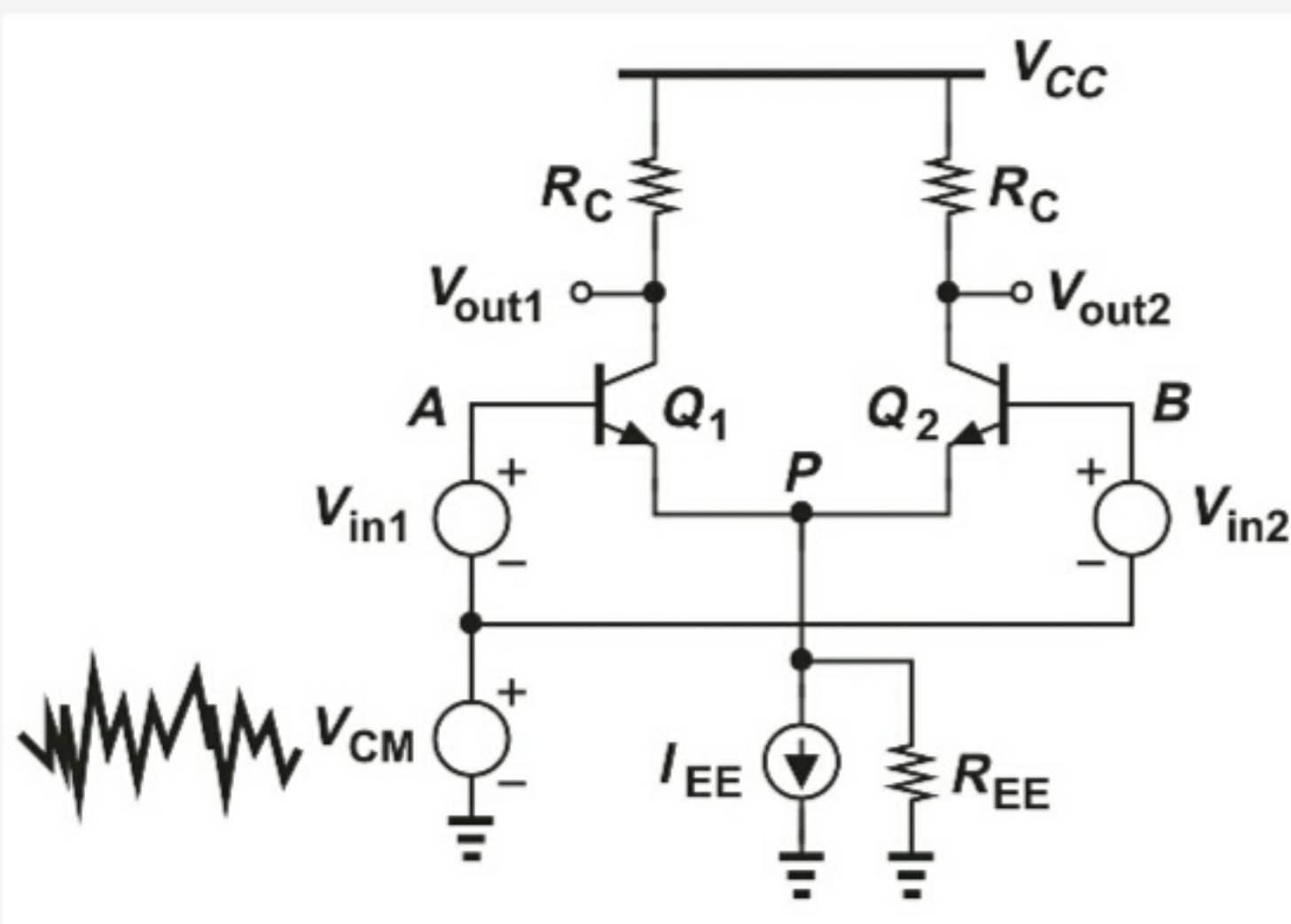
$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right|$$

idealde $A_{cm} = 0 \rightarrow CMRR = \infty$

gerçekte $A_{cm} \neq 0 \rightarrow CMRR \neq \infty$

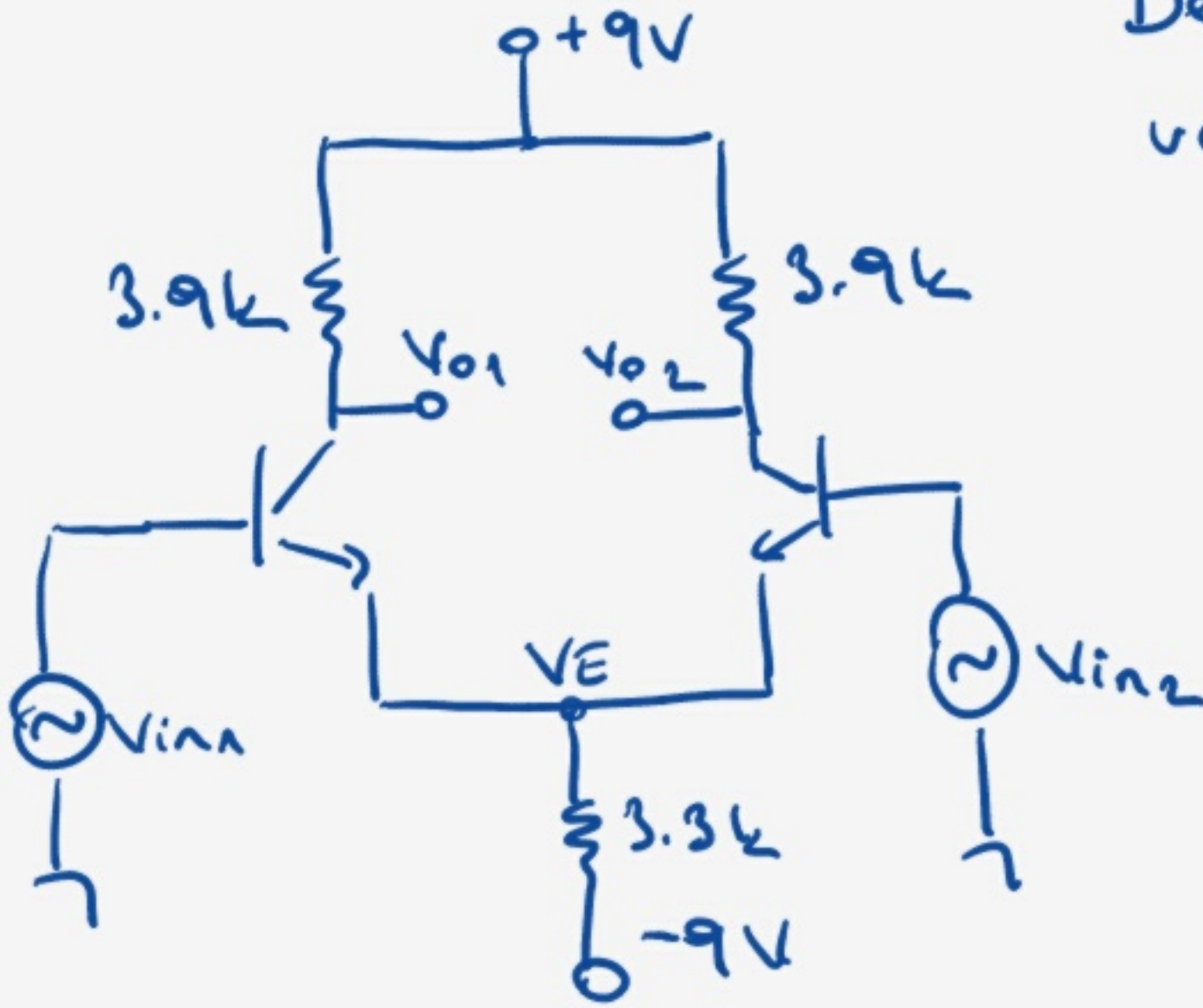
$$CMRR_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right|$$

$$CMRR = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2(1+\beta)R_o}{r_x + R_B} \right)$$



Örnek

Devredeki DC akım
ve gerilimlerini hesaplayınız



$$\hat{I}_E = \frac{-V_{BE} + V_{EE}}{R_E} = \frac{-0.7 + 9}{3.3k} = 2.5 \text{ mA}$$

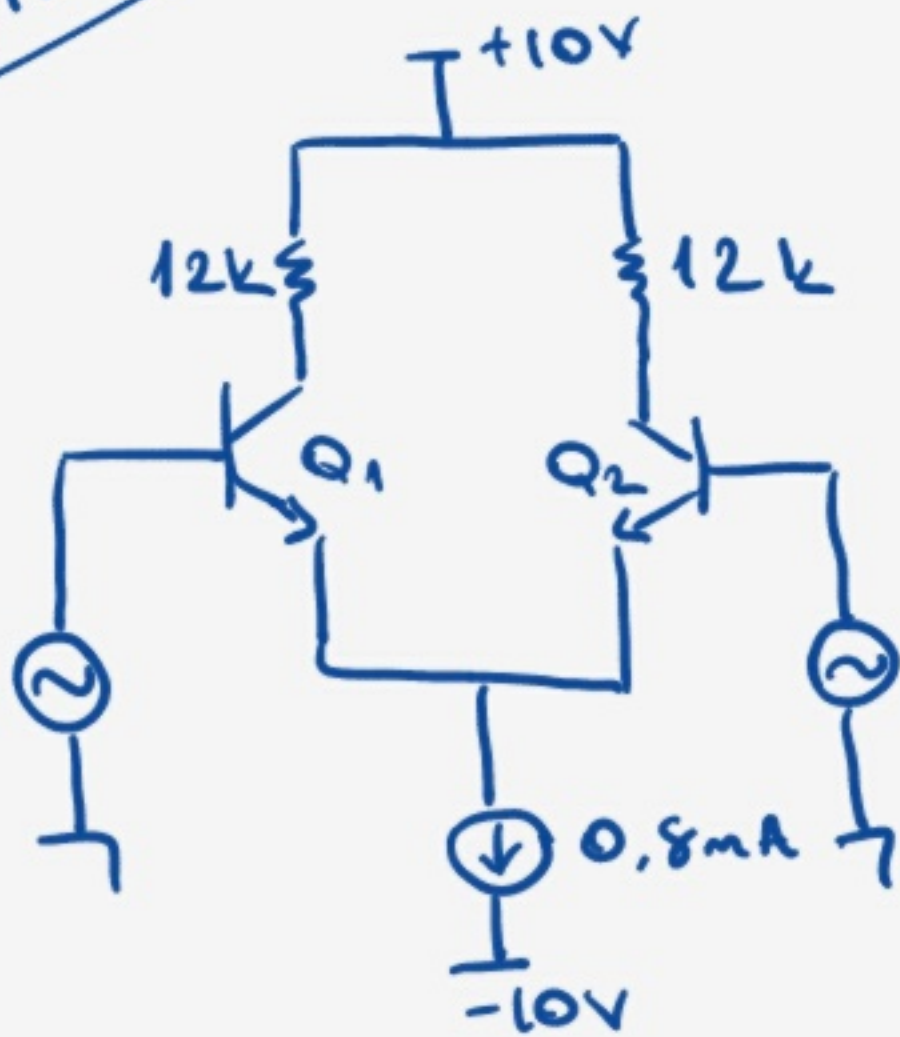
Transistörler özdeş ise,

$$\hat{I}_{C1} = \hat{I}_{C2} = \frac{\hat{I}_E}{2} = 1.25 \text{ mA}$$

O halde,

$$\begin{aligned} V_{O1} = V_{O2} &= V_{CC} - \hat{I}_C R_C \\ &= 9 - 1.25 \cdot 10^{-3} \cdot 3.9 \cdot 10^3 \\ &= 4.1 \text{ V} \end{aligned}$$

4
Örnekle



$$\beta = 100, R_o = 25k\Omega$$

$$V_A = \infty, r_o = 0 \text{ olsun}$$

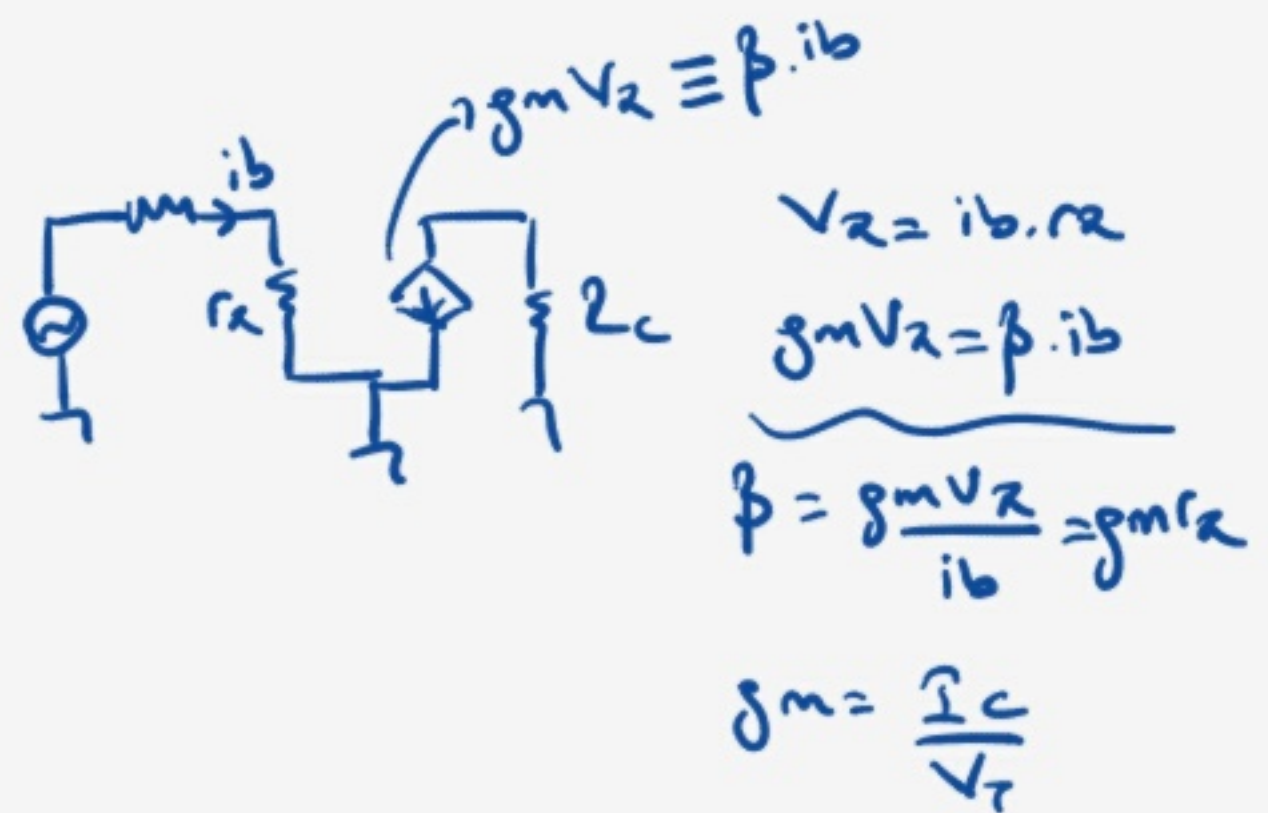
Devrede tek aktif iken;

$$V_{C2} = ?$$

$$A_d = \frac{\beta \cdot R_c}{2(r_x + r_o)} \rightarrow 0$$

$$A_d = \frac{g_m R_c}{2} = \frac{I_c \cdot R_c}{2V_T}$$

$$= \frac{0.4mA \cdot 12k}{2(0.026mV)} = 92.3$$



$$A_{cm} = \frac{-\left(\frac{I_o R_c}{2V_T}\right)}{1 + \frac{(1+\beta)I_o R_o}{\beta \cdot V_T}} = \frac{-\frac{0.8m \cdot 12k}{2 \cdot 0.026m}}{1 + \frac{(1+100) \cdot 0.8m \cdot 25k}{100 \cdot 0.026m}} = -0.237$$

$$CMLL = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| = \left| \frac{92.3}{-0.237} \right| = 389$$

$$CMLL_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| = 51.8 \text{ dB}$$

Örnek:

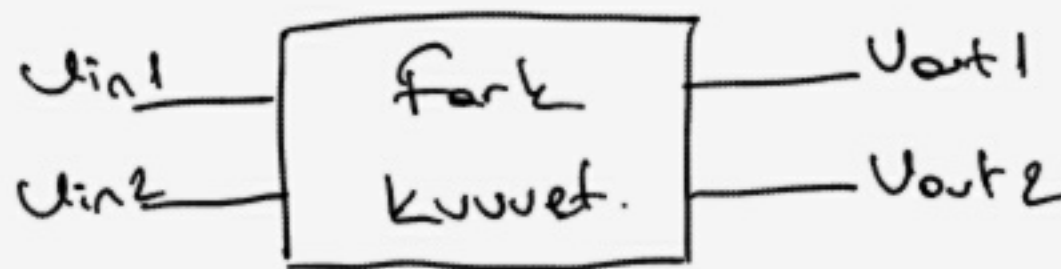
Bir önceli dersteli f.k devrsine ($A_d = 92.5$, $A_{cm} = -0.237$), aşığıdaki gırızlar uygulanırse;

	Gırış ışıareti	Fark mod ışıareti	Ortak mod ışıareti	Çıkış ışıareti
1. Durum	$V_1 = 10 \sin \omega t$ $V_2 = -10 \sin \omega t$	$20 \sin \omega t$	0	$V_o = 1.846 \sin \omega t$
2. Durum	$V_1 = 20 \sin \omega t$ $V_2 = -20 \sin \omega t$	$40 \sin \omega t$	0	$V_o = 3.692 \sin \omega t$
3. Durum	$V_1 = 210 \sin \omega t$ $V_2 = 190 \sin \omega t$	$20 \sin \omega t$	$200 \sin \omega t$	$V_o = 1.799 \sin \omega t$
4. Durum	$V_1 = 220 \sin \omega t$ $V_2 = 180 \sin \omega t$	$40 \sin \omega t$	$200 \sin \omega t$	$V_o = 3.645 \sin \omega t$
5. Durum	$V_1 = 200 \sin \omega t$ $V_2 = 200 \sin \omega t$	0	$200 \sin \omega t$	$V_o = -0.0474 \sin \omega t$

$$V_o = A_d \cdot V_d + A_{cm} \cdot V_{cm}$$

SÖNÜCLER

1. ve 2. durumda ortak mod ışıareti sıfırdır. Bu durumda çıkış gerilimi doğrudan fark mod gırızları ile orantılıdır.
- 1-3 ve 2-4 durumları kıyaslanırsa, fark mod gırızları aynı olmasına rağmen çıkış gerilimleri eşit değildir.
* Ortak mod gırız ışıareti çıkış gerilimini etkiler.
4. durum ile 3. durumda ortak mod ışıareti aynı olmasına rağmen fark mod ışıareti iki katına çıktığında çıkış gerilimi iki katına çıkmamıştır.
* Ortak mod gırız ışıareti varsa, çıkış gerilimi fark mod gırız gerilimi ile lineer olarak orantılı değildir.
5. durumda fark mod ışıareti olmamasına rağmen, kuvvetlendirici ideal olmadığı için ($A_{cm} \neq 0$) çıkış ışıareti sıfırdan farklıdır.



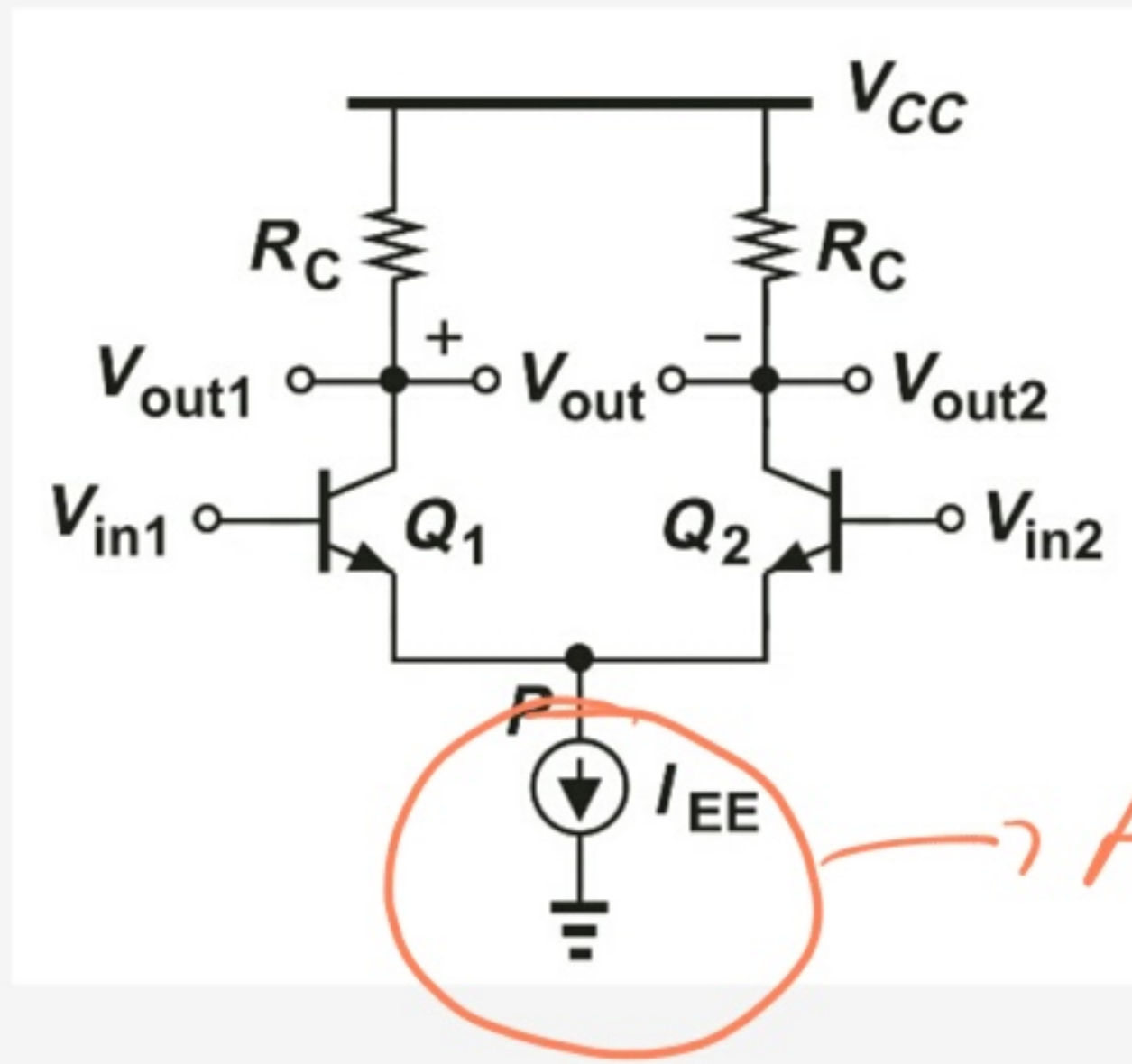
$$V_o = (V_{out1} - V_{out2}) = A \cdot (V_{in1} - V_{in2})$$

$$= A_d \cdot V_d + A_{cm} \cdot V_{cm}$$

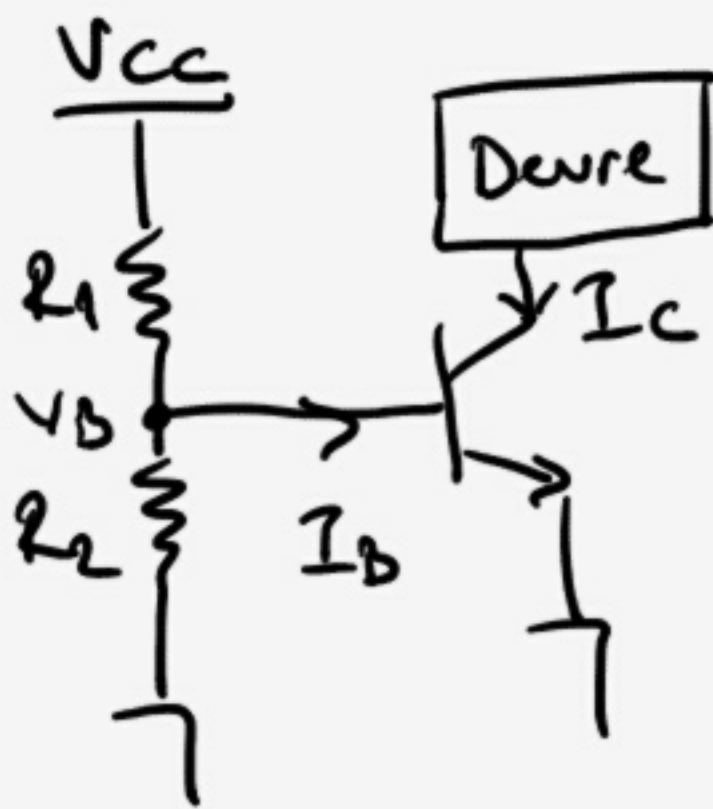
ideal

gerçek

Farklı Kuvvetlendiricisi



Akım kaynağı?



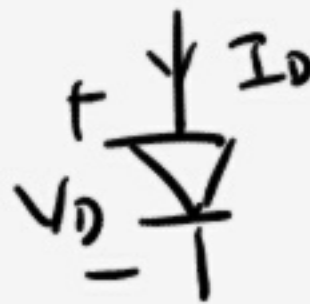
$$I_B \propto V_B$$

$$V_B \propto V_{CC}$$

Kaynak batarya

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$V_{CC} \downarrow \quad V_B \downarrow \quad I_B \downarrow \quad I_C \downarrow$$



$$I_D = I_S \left(e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

$$I_B = I_S \left(e^{\frac{q \cdot V_{BE}}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

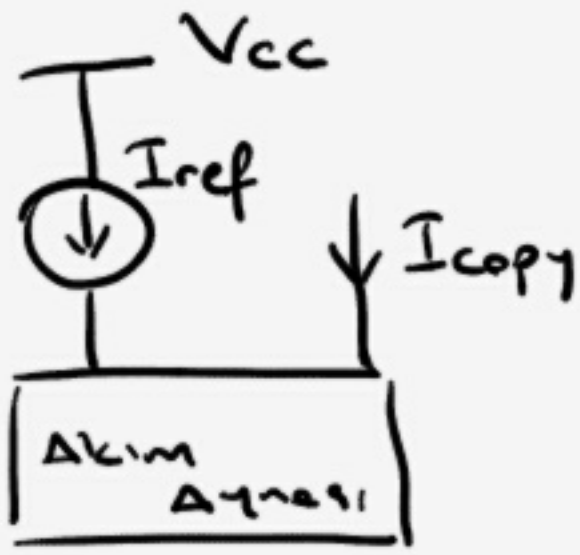
Hatırla!
 $\frac{k \cdot T}{q} = V_T$
 $\approx 26 \text{ mV}$

Bataryanın azalması?

Sıcaklığın değişmesi?

* I_C, I_D sabit değil!

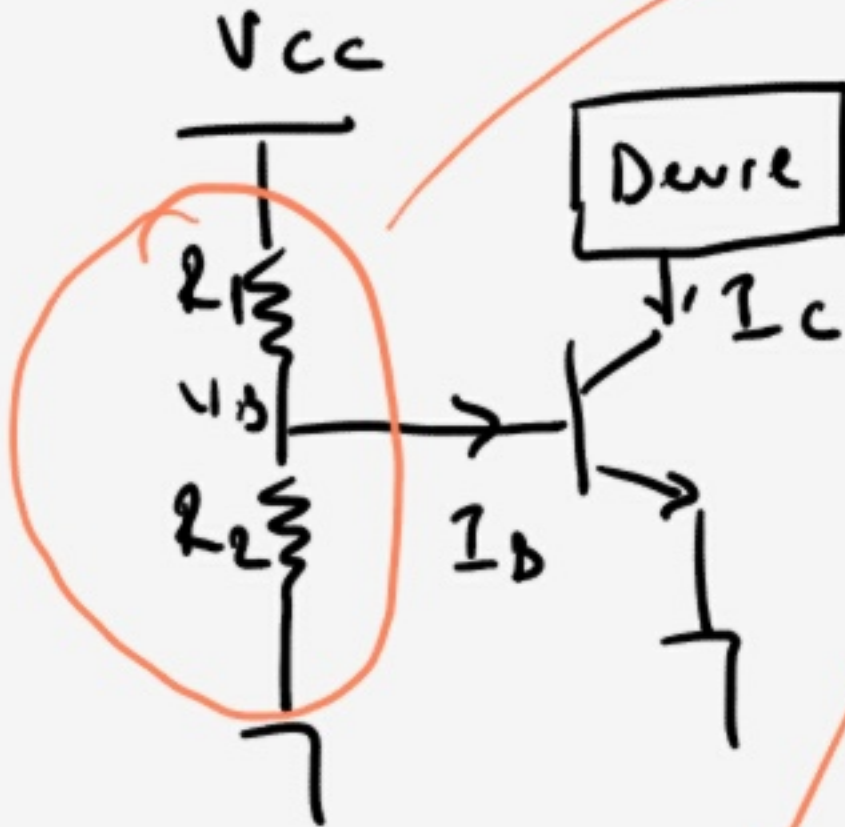
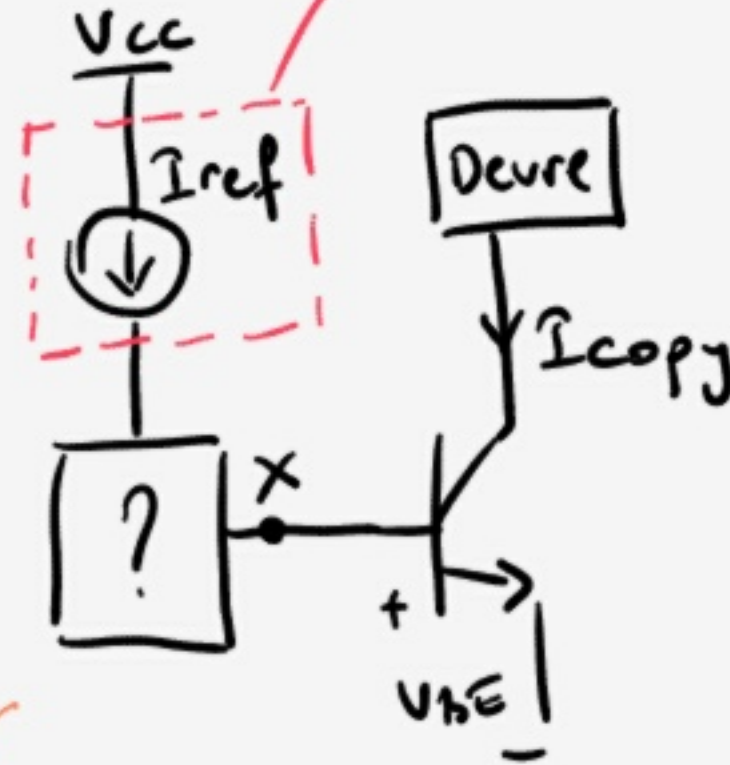
Akım Aynası



$$I_{ref} = I_{copy}$$

Bandgap
reference
circuit

araştır!



Hatırla:



$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

$n \rightarrow 1-2$ arasında

$$\approx I_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

$$V_x = V_{BE}$$

$$I_{copy} = I_S e^{\frac{V_x}{V_T}}, \quad I_{copy} = I_{ref}$$

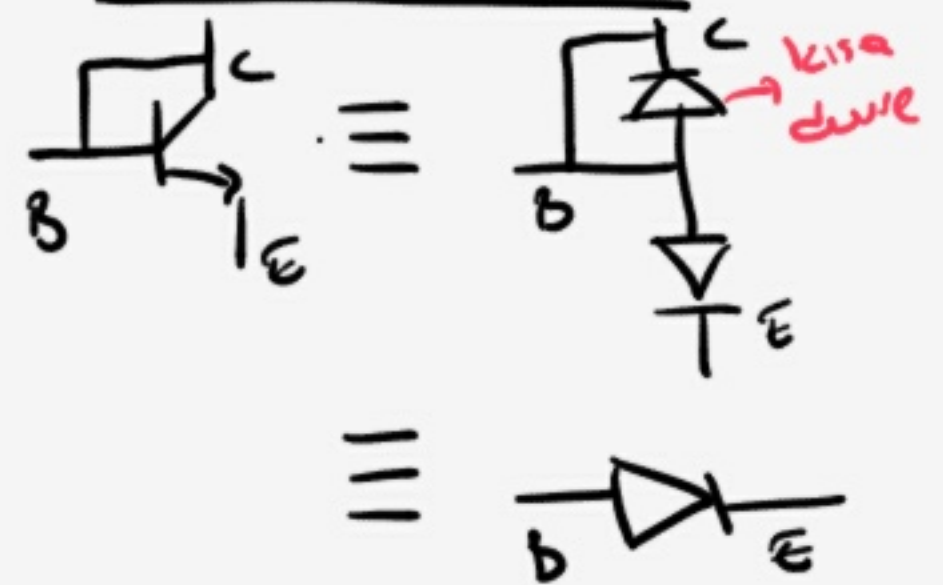
$$\ln I_{ref} = \ln I_S + \frac{V_x}{V_T}$$

$$V_x = V_T \cdot \ln \frac{I_{ref}}{I_S}$$

olmalıdır.

klasik!

Diğer bağlı BJT

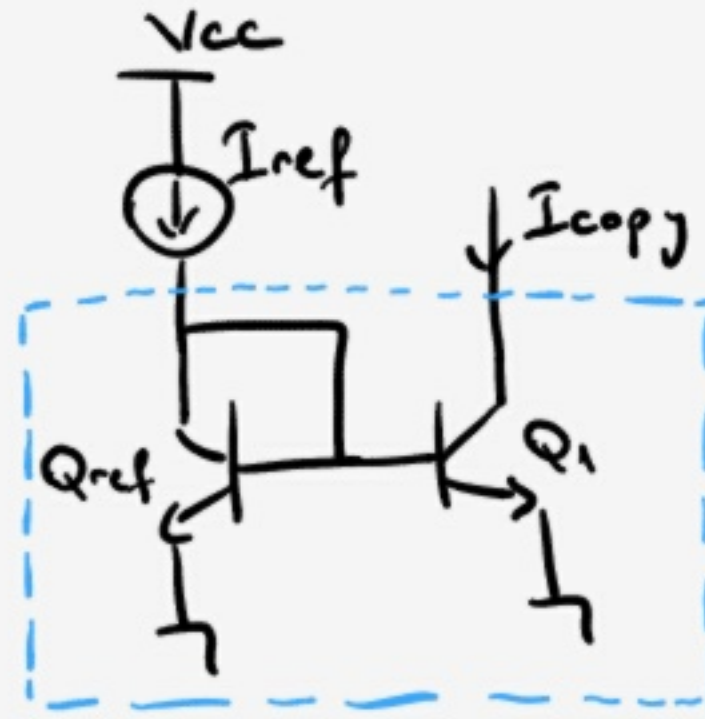
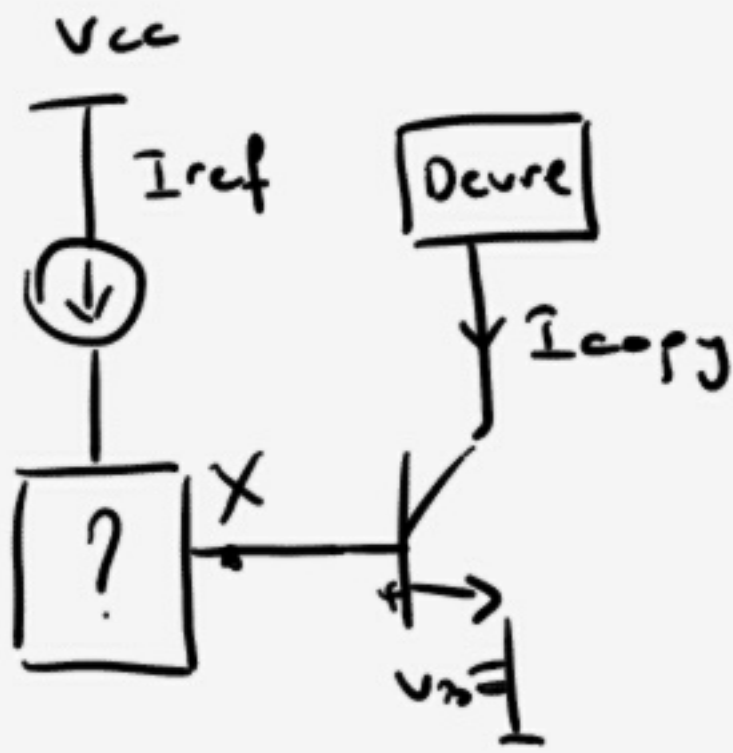


$$I_B = I_{ref}$$

$$I_{ref} = I_S \cdot e^{\frac{V_1}{V_T}}$$

$$V_1 = V_T \cdot \ln \frac{I_{ref}}{I_S}$$

aynı yapı



Akım
aynası

* Q₁ tri's, Q_{ref} tri's üzerinden akan akımı "aynalar", "kopyalar".

Q_{ref} için

$$V_x = V_T \ln \frac{I_{ref}}{I_s}$$

Q₁ için

$$I_{copy} = I_{s1} \cdot e^{\frac{V_x}{V_T}}$$

Q_{ref}, I_{ref}'in doğal logaritmasını alarak V_x'i elde eder

Q₁ ise V_x'i exponential (e^{V_x}) şeklinde alarak I_{copy}'yi elde eder.

$$I_{ref} = I_{s_{ref}} e^{\frac{V_x}{V_T}} \Rightarrow e^{\frac{V_x}{V_T}} = \frac{I_{ref}}{I_{s_{ref}}}$$

$$I_{copy} = I_{s1} e^{\frac{V_x}{V_T}} \Rightarrow e^{\frac{V_x}{V_T}} = \frac{I_{copy}}{I_{s1}}$$

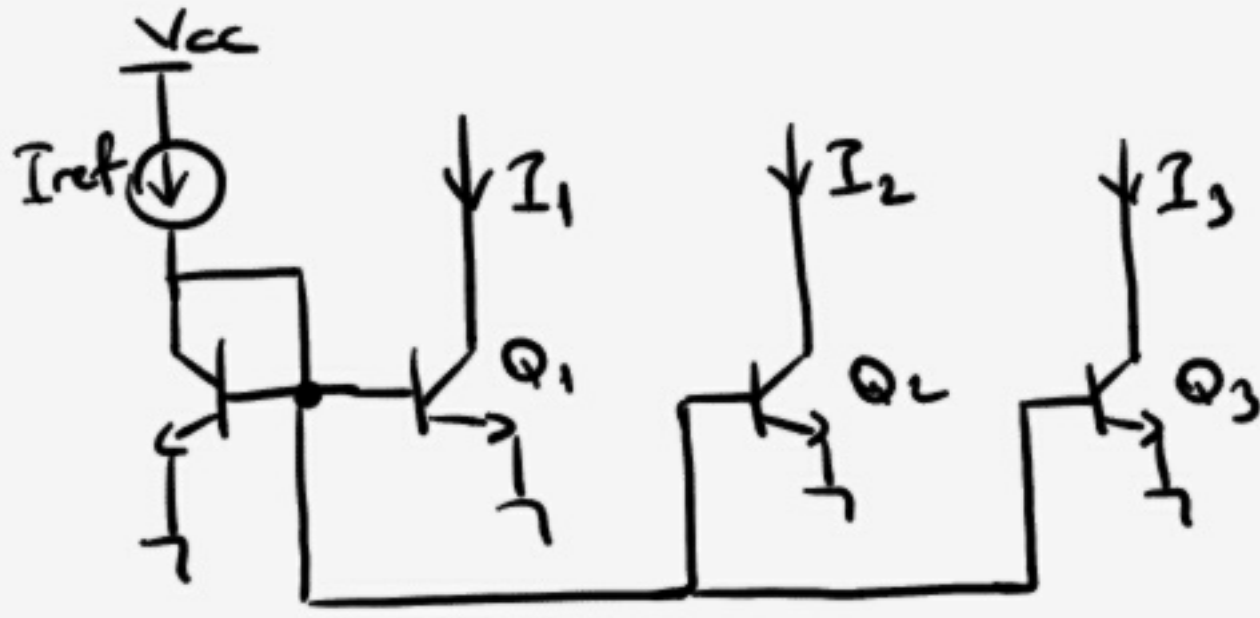
$$\frac{I_{ref}}{I_{s_{ref}}} = \frac{I_{copy}}{I_{s1}} \Rightarrow I_{copy} = I_{s1} \cdot \frac{I_{ref}}{I_{s_{ref}}}$$

Q₁ ve Q_{ref} eş transistör ise;

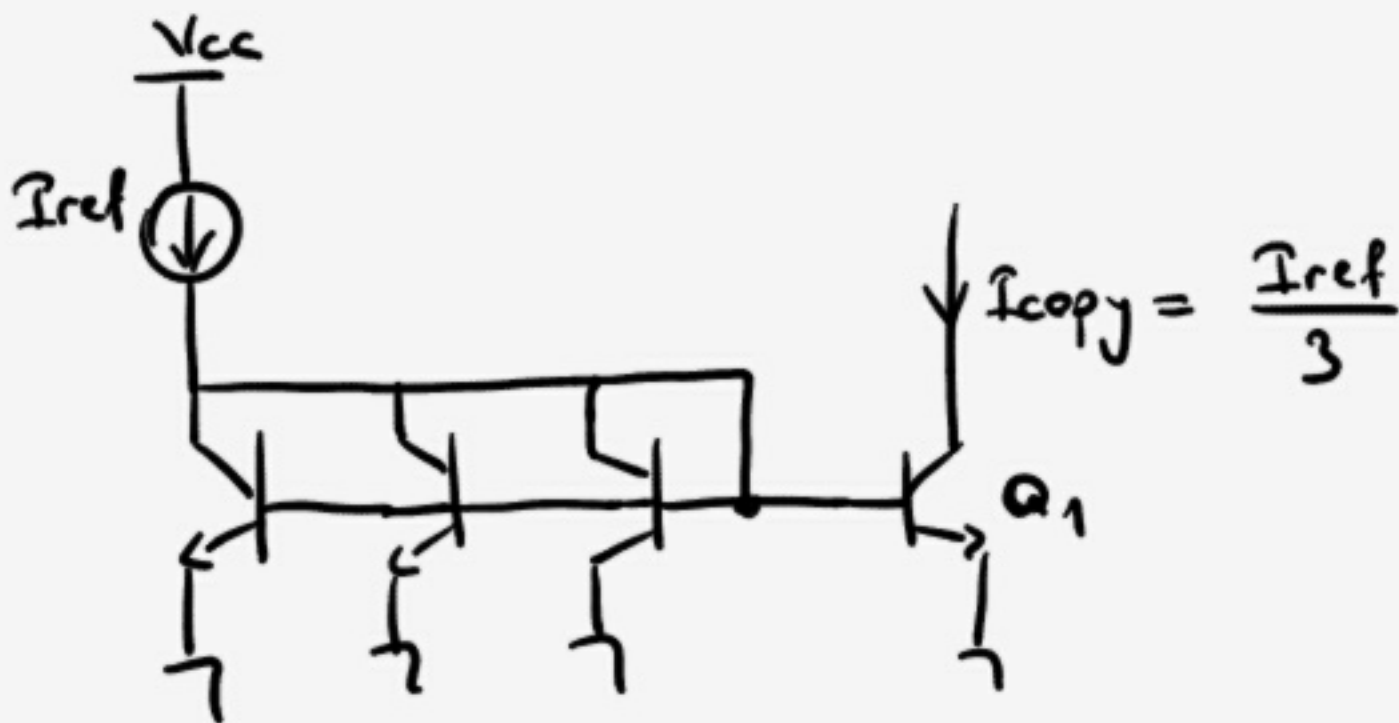
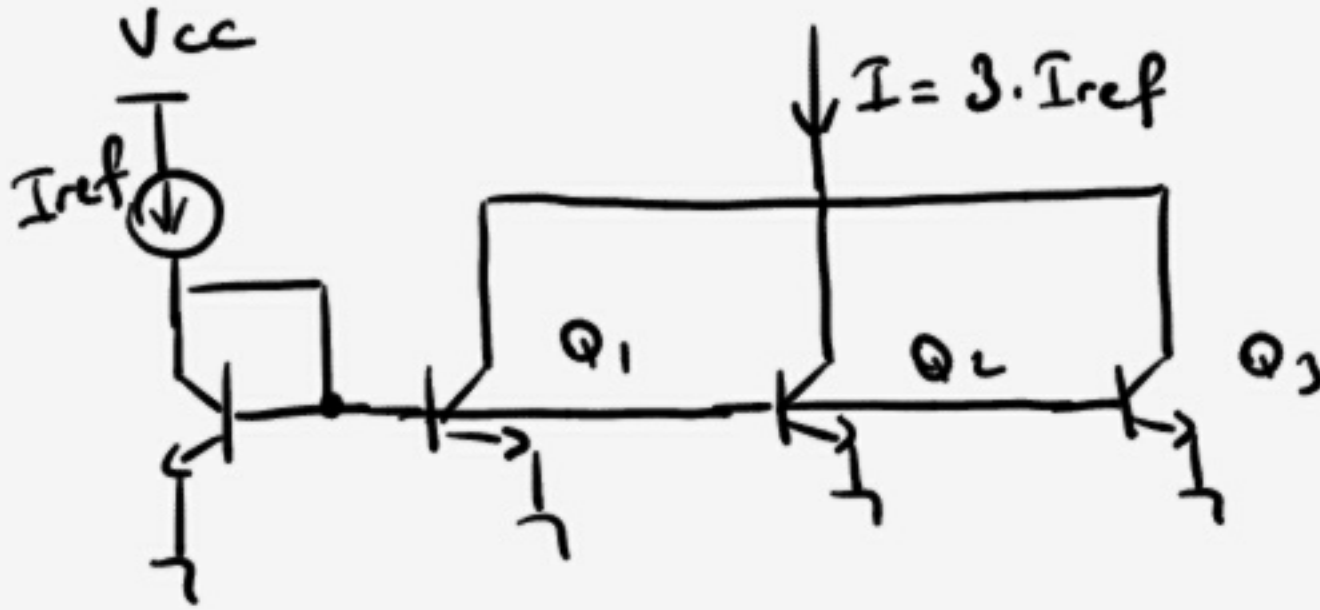
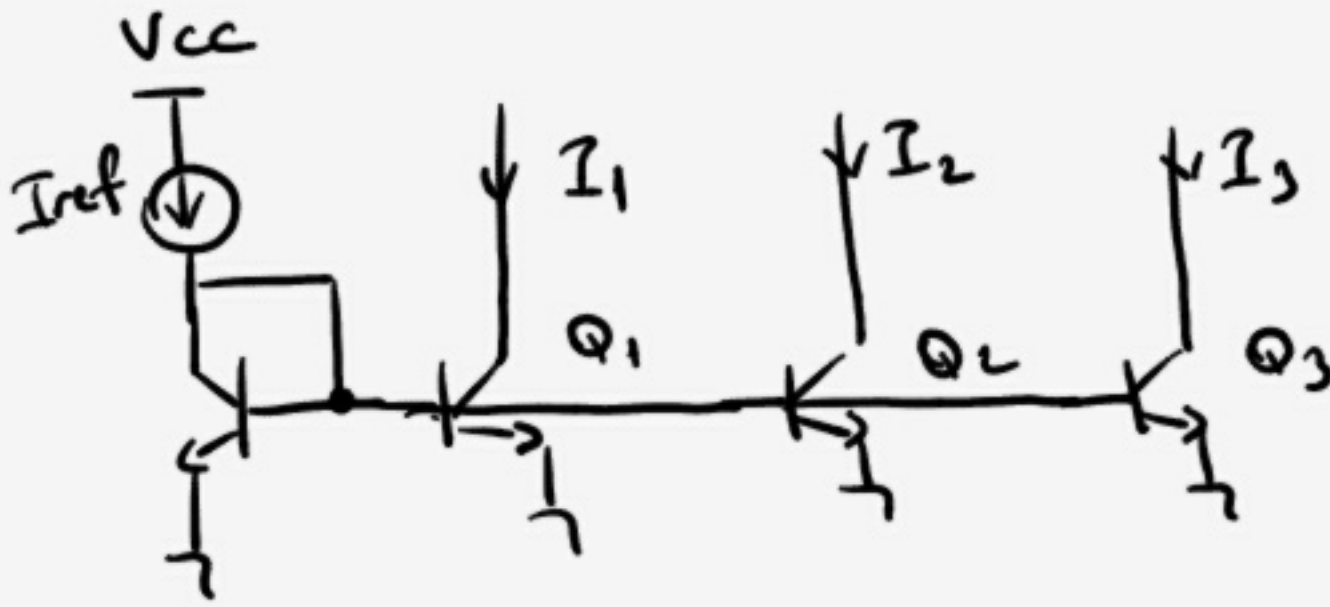
$$\underline{I_{copy} = I_{ref}} \quad \text{dur.}$$

↓
sabit akım !

Birde fazla aynalamaya gerekirse;



↓ Basit gösterim



Örnek:

$$V_{CC} = 12V$$

$$1.1k$$

$$I = ?$$

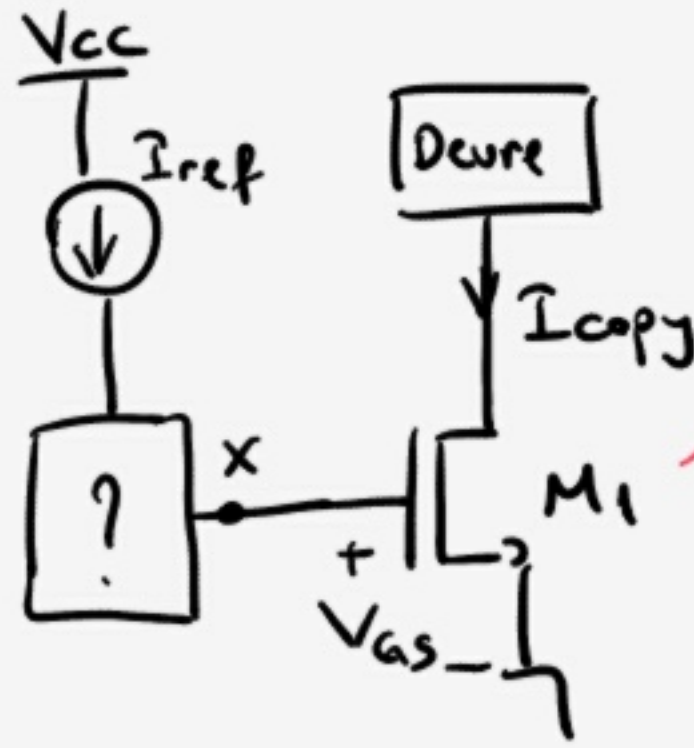
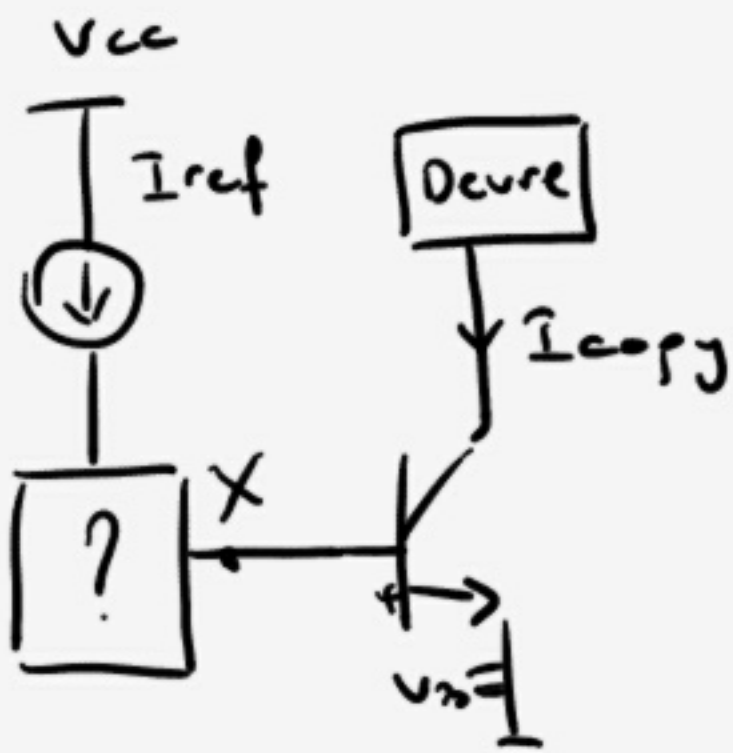
$$V_{BE_{on}} = 0.7V$$

$$V_{CC} - I_{ref} \cdot 1.1k - 0.7 = 0$$

$$I_{ref} = I = \frac{12 - 0.7}{1.1k}$$

$$= 10.27mA$$

MOSFET'li Akım Aynası



her zaman
saturasyonda
gelişmektedir!

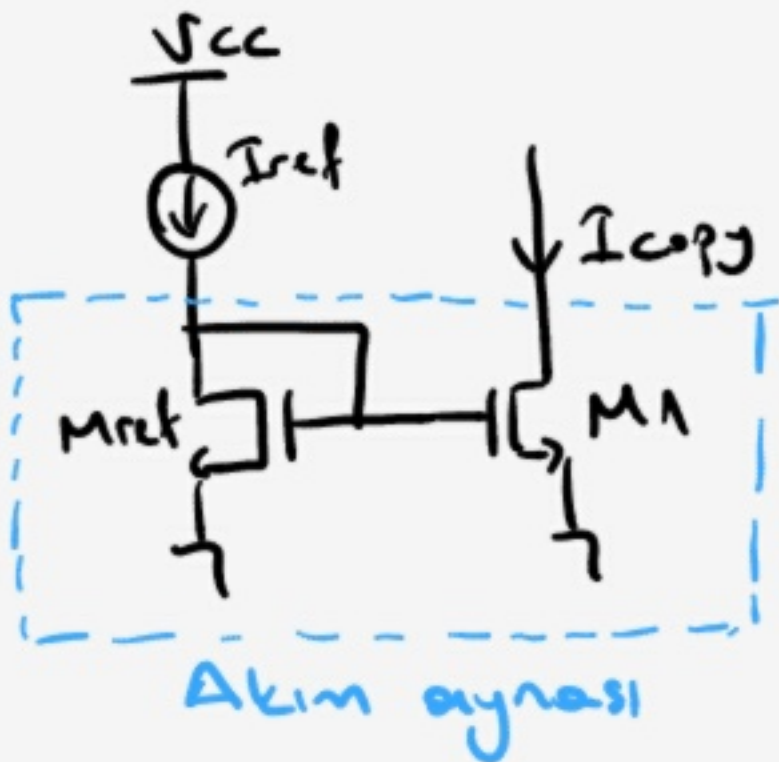


$$I_{ref} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_x - V_{TH})^2$$

$$V_x = \sqrt{\frac{2 I_{ref}}{\beta}} + V_{TH}$$

Hatırla:

$$\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) = \beta$$



Mref, Iref'in karesinin alarak
Vx'i elde eder

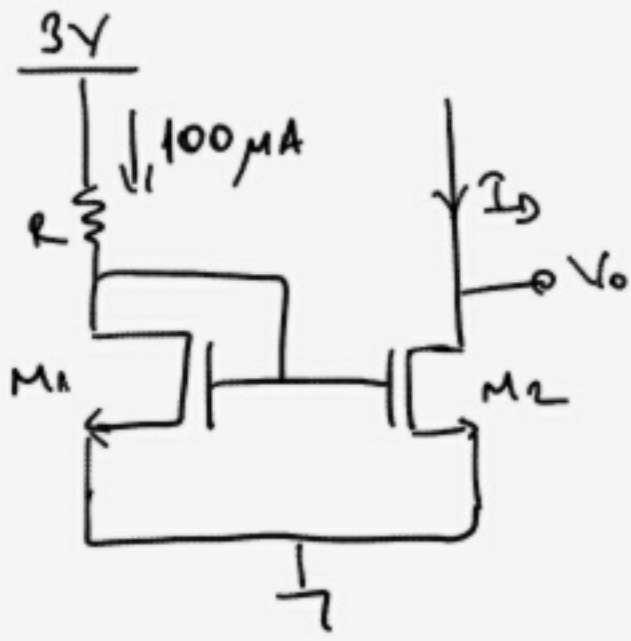
M1 ise Vx'in karesini kullanarak
Icopy'yi elde eder.

$$I_{ref} = (\beta_{ref}/2) \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$I_{copy} = (\beta_1/2) \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

MOSFET'ler özdeş ise β ve V_{TH} 'lar özdeş olur. $\Rightarrow I_{ref} = I_{copy}$

Örnek:



M1 ve M2 transistörleri eşdeğer

kanal uzunlukları $L = 1 \mu\text{m}$

kanal genişlikleri $W = 10 \mu\text{m}$

$V_{TH} = 0.7\text{V}$, $\mu_n C_{ox} = k'_n = 200 \mu\text{A/V}^2$

$R = ?$

$V_{Omin} = ?$

$$I_D = I_{ref} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$100 \cdot 10^{-6} = \frac{1}{2} 200 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$(V_{GS} - V_{TH})^2 = 0.1 \rightarrow V_{GS} - V_{TH} = 0.316\text{V}$$

$\downarrow$
0.7

$$V_{GS} \approx 1\text{V}$$

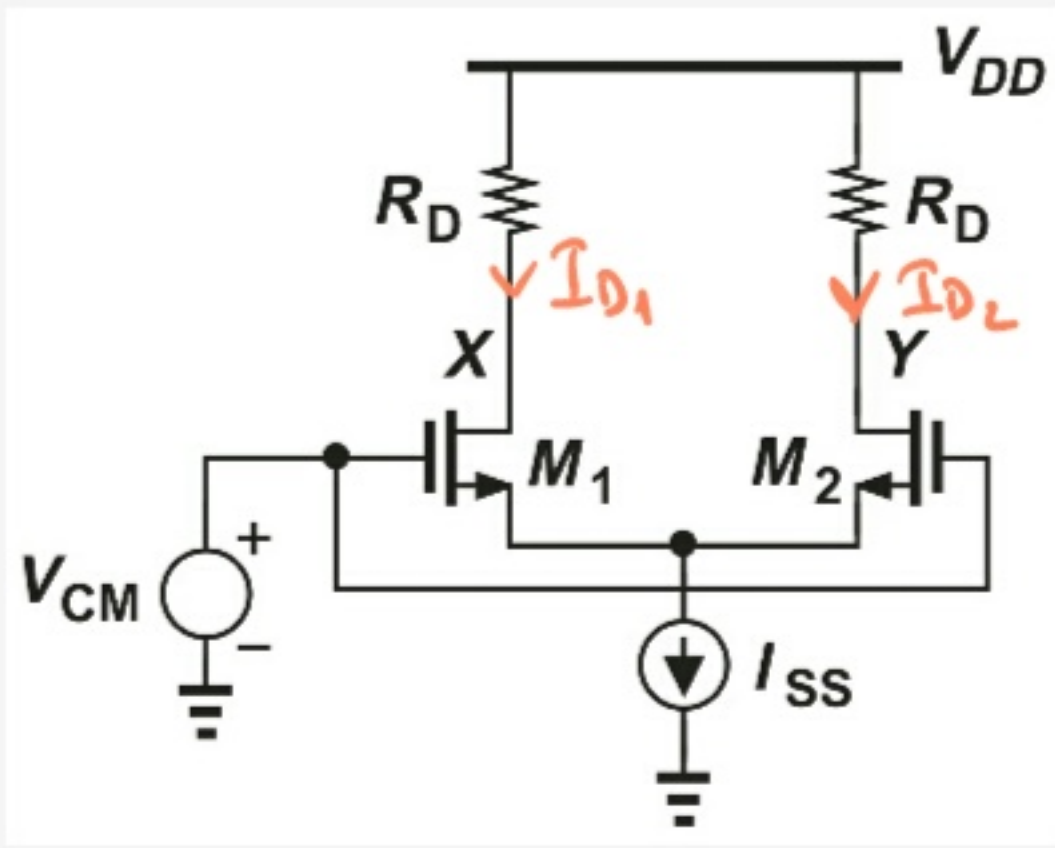
$$R = \frac{V_{DD} - V_{GS}}{I_{ref}} = \frac{3 - 1}{100 \mu\text{A}} = 20\text{k}\Omega$$

Tüm transistörler saturasyonda çalışmalı;
0 halde;

$$V_{DS} \geq \underbrace{V_{GS} - V_{TH}}_{0.316} \text{ olmalı}$$

$$V_{Omin} = V_{DSmin} = 0.316\text{V}$$

MOSFET fark kuvvetlendirici



$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{SS}}{2}$$

$$V_X = V_Y = V_{DD} - R_D \cdot \frac{I_{SS}}{2}$$

Denge durumunda

$$I_D = \frac{\beta}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$V_{GS} - V_{TH} = \sqrt{\frac{I_{SS}}{\beta}}$$

* Bütün transistörler sat. da çalışmalı,

Hatırla:

Sat. şartı

$$V_D \geq V_{GS} - V_{TH}$$

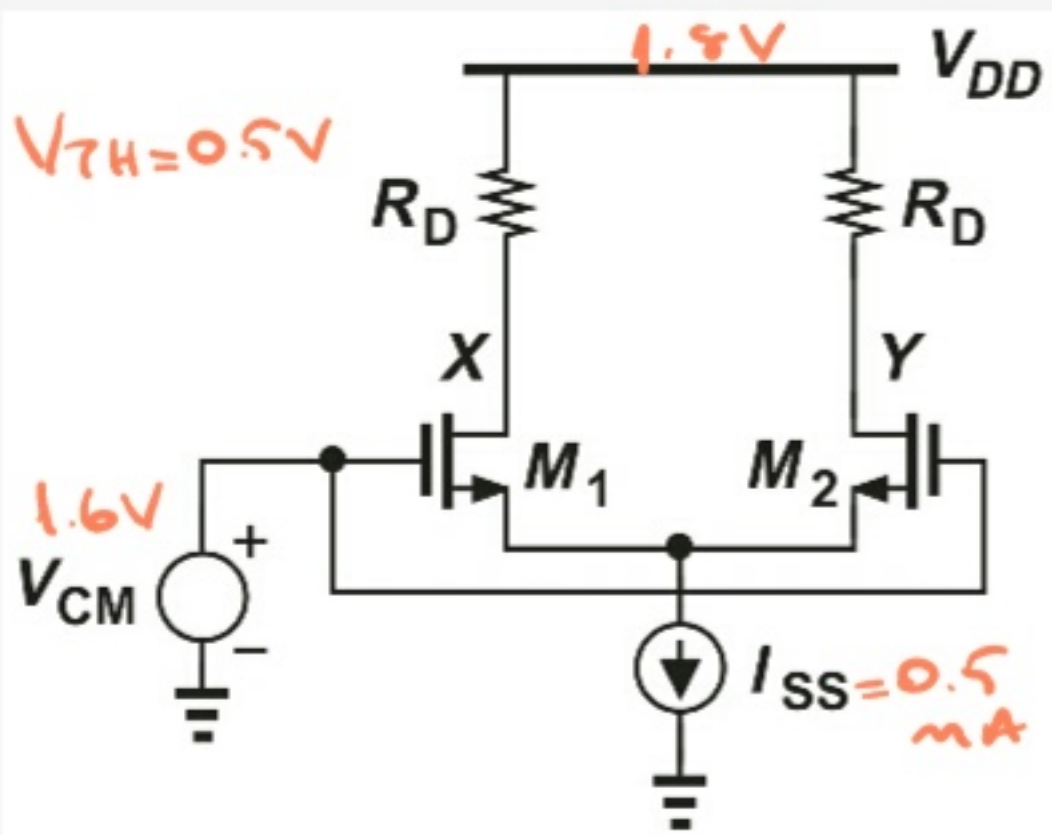
$$V_{DD} \geq V_{GS} - V_{TH}$$

$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot \frac{I_{SS}}{2} \quad \text{idi, o halde;}$$

$$V_{DD} - R_D \cdot \frac{I_{SS}}{2} > V_{CM} - V_{TH}$$

olmalıdır.

Örneğ:



R_D en büyük kaç olabilir?

$$V_{DD} - R_D \cdot \frac{I_{SS}}{2} > V_{CM} - V_{TH}$$

$$1.8 - R_D \cdot 0.25m > 1.6 - 0.5$$

$$0.7 > R_D \cdot 0.25m$$

$$\underline{2.8k > R_D} \quad \text{olmalıdır.}$$

MOSFET Girişleri için;

$$V_{in1} > V_{in2} \text{ ise}$$

M2 tr. $\rightarrow$ OFF olur.

Bu durumda;

$$V_x = V_{DD} - 20 \cdot I_{SS}$$

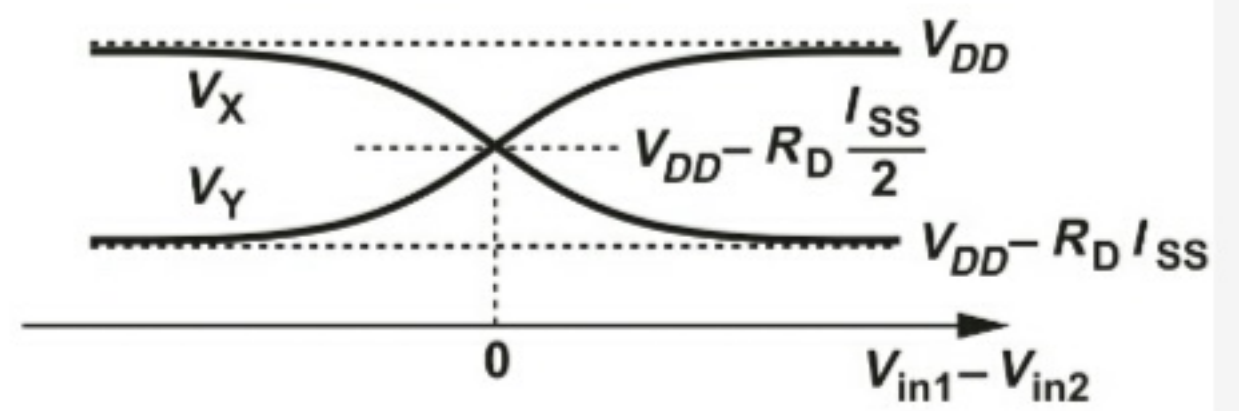
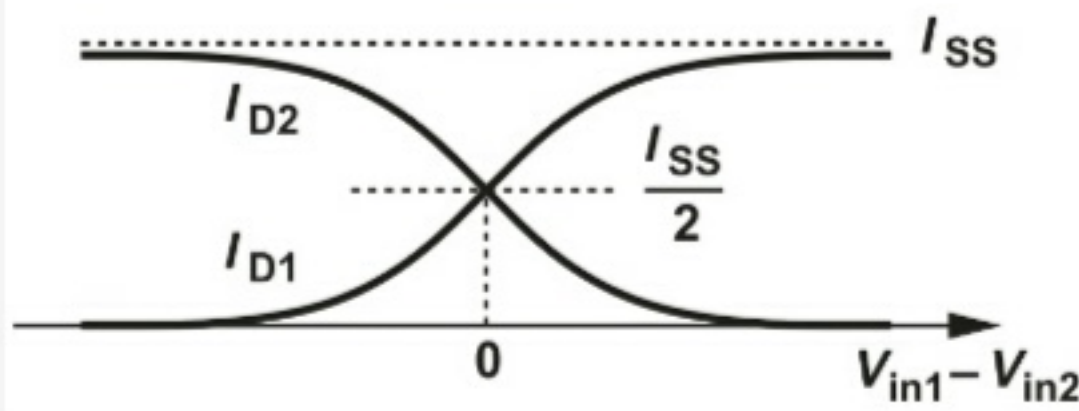
$$V_y = V_{DD} \text{ olur.}$$

$$V_{in2} > V_{in1} \text{ ise}$$

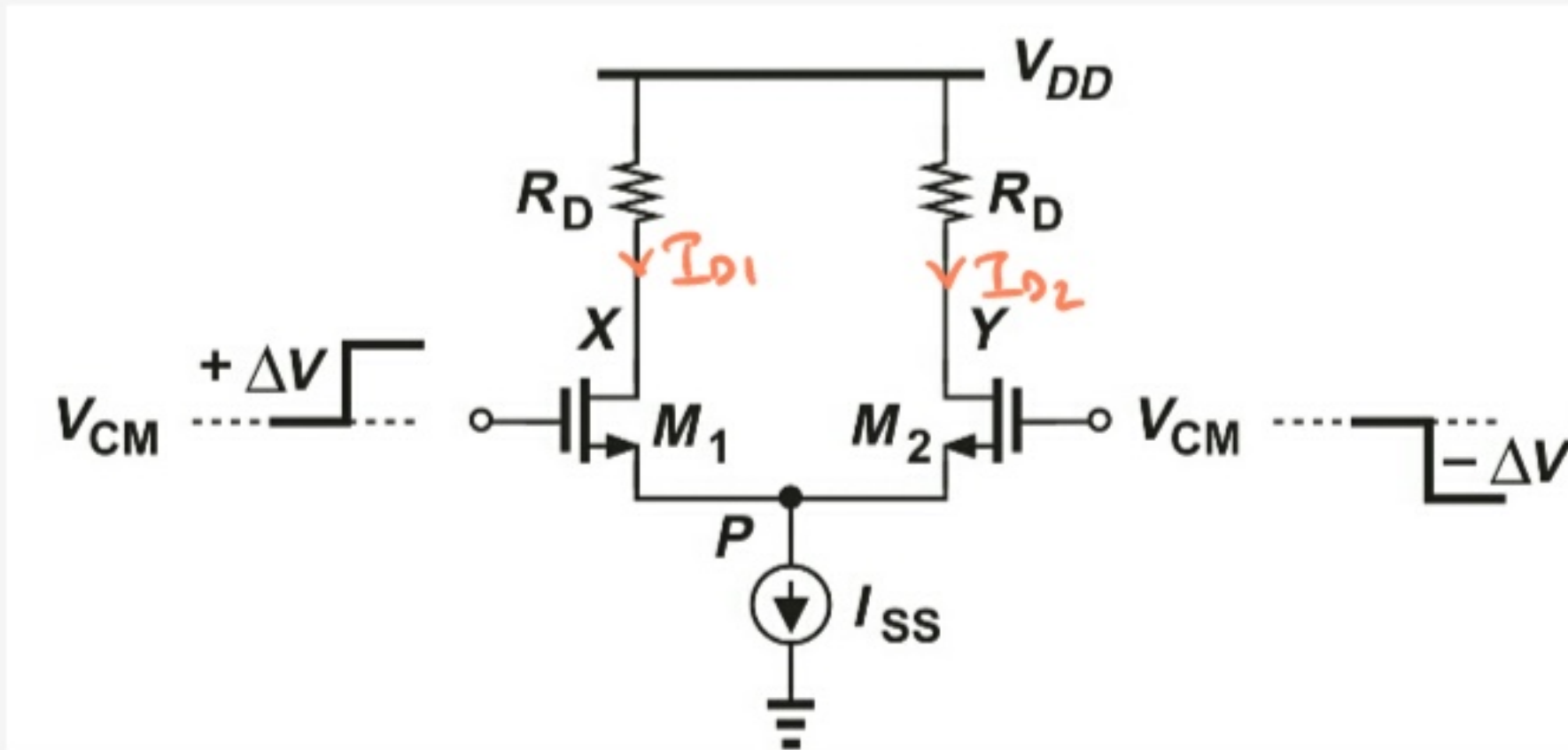
M1 tr. $\rightarrow$ OFF

$$V_x = V_{DD}$$

$$V_y = V_{DD} - 20 \cdot I_{SS} \text{ olur.}$$



③ V_{in1} V_{in2} 'den biraz (ΔV kadar) büyük ise,



$$V_{G1} = V_{CM} + \Delta V \Rightarrow \Delta I_{D1} = g_m \Delta V$$

$$V_{G2} = V_{CM} - \Delta V \Rightarrow \Delta I_{D2} = -g_m \Delta V$$

$$\Delta V_x = \underbrace{g_m \Delta V \cdot R_D}_{\Delta I_{D1}}, \quad \Delta V_y = -\underbrace{g_m \Delta V \cdot R_D}_{\Delta I_{D2}}$$

$$\Delta V_x - \Delta V_y = -2g_m \Delta V \cdot R_D$$

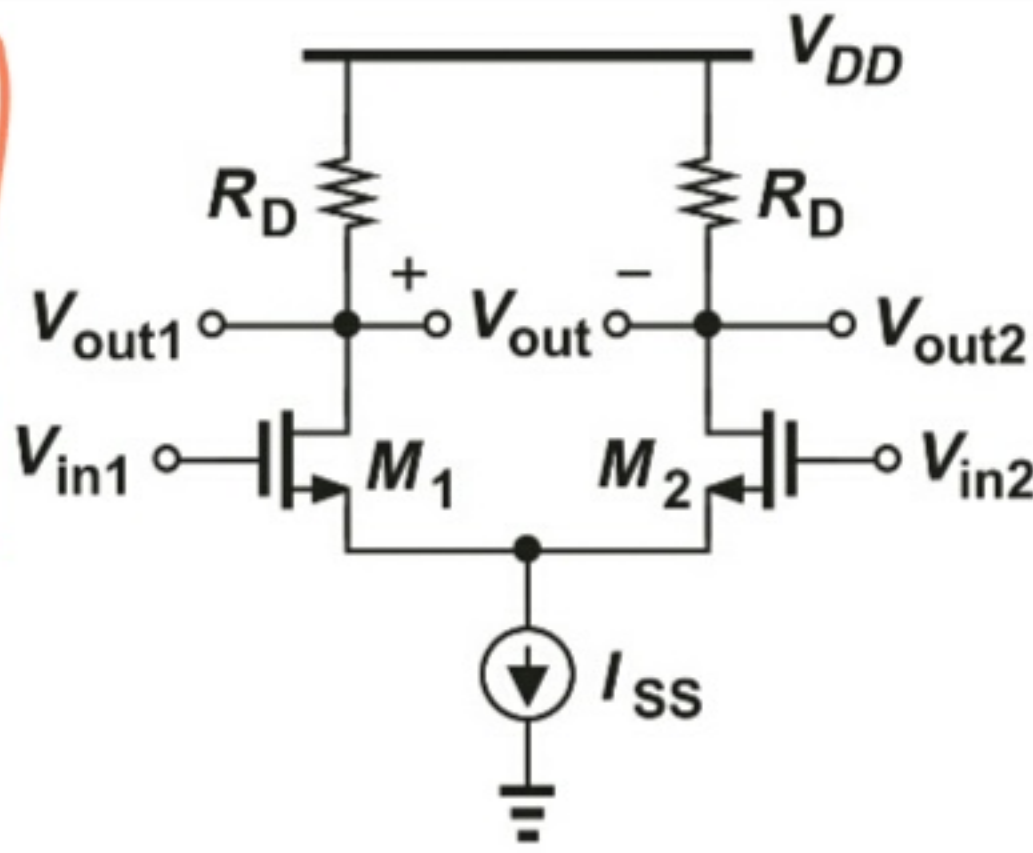
$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\Delta V_x - \Delta V_y}{\Delta V_{in1} - \Delta V_{in2}} = \frac{-2g_m \Delta V \cdot R_D}{2\Delta V} = -g_m \cdot R_D$$

Küçük İmpedans Eşdeğeri

Hatırla:

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

$$V_{cm} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$



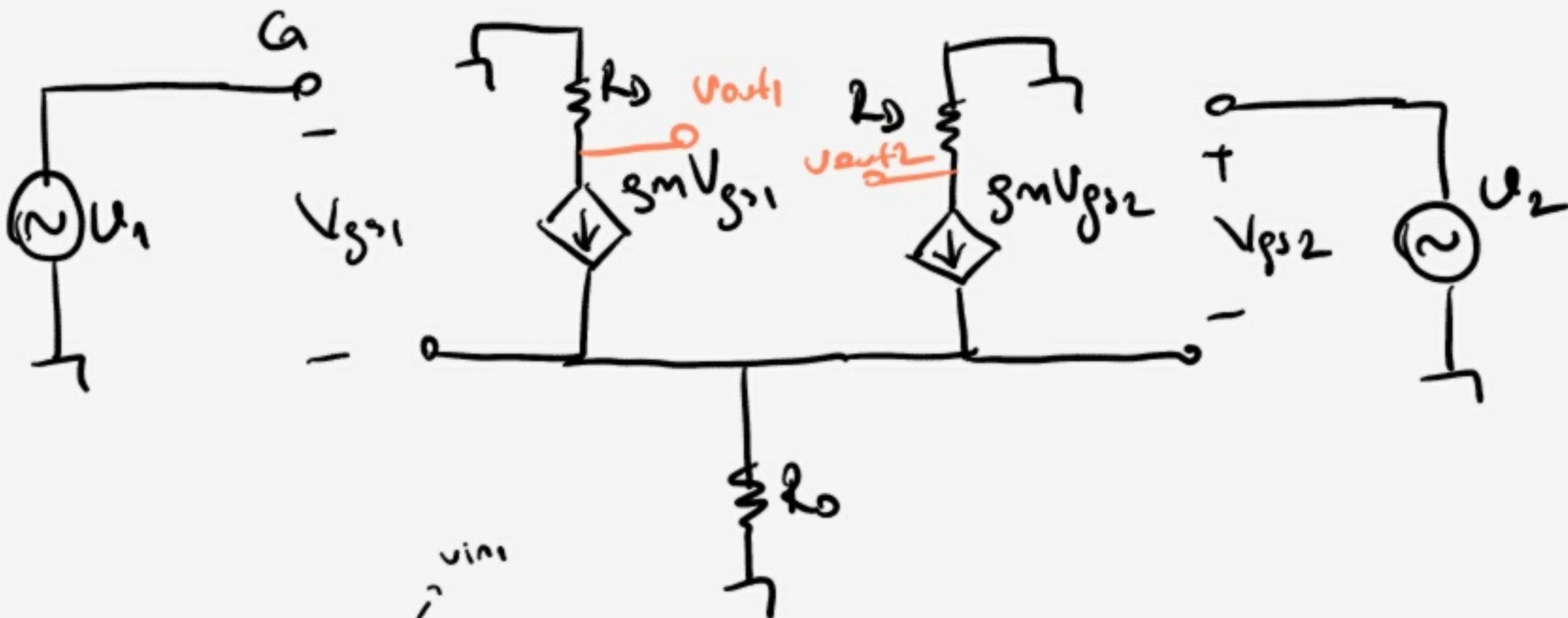
$$V_{in1} = V_{DC} + V_1$$

$$V_{in2} = V_{DC} + V_2$$

$$V_o = A_d \cdot V_{dm} + A_c \cdot V_{cm}$$

$$A_d = \frac{V_o}{V_{dm}} \bigg|_{V_{cm}=0}$$

$$A_c = \frac{V_o}{V_{cm}} \bigg|_{V_{dm}=0}$$



$$V_{out1} = -g_m \cdot V_{gs1} \cdot R_D$$

$$V_{out2} = g_m \cdot V_{gs2} \cdot R_D$$

$$A_v = \frac{V_{out1} - V_{out2}}{V_{in1} - V_{in2}}$$

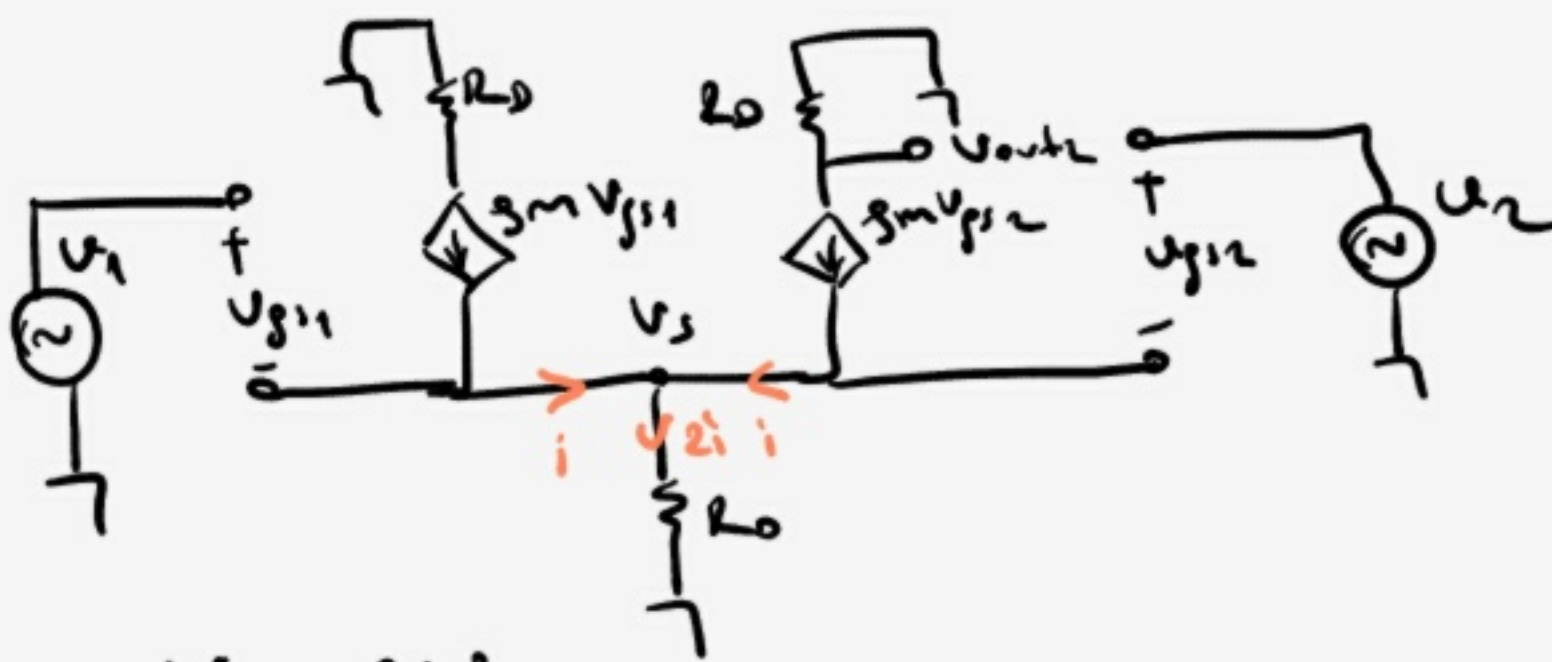
$$= \frac{-g_m \cdot R_D \cdot (V_{gs1} - V_{gs2})}{V_{in1} - V_{in2}}$$

$$= \boxed{-g_m \cdot R_D}$$

çift taraflı çıkış için

Tek taraflı çıkış alırsan $\rightarrow A_v = \frac{-g_m \cdot R_D}{2}$

Ontok Mod izretiti i gin



$$V_s = 2i \cdot f_0$$

Tez torafton ahiye olursa;

$$U_{\text{ext}2} = -i, 2 \rightarrow \quad , \quad i = g_m \vee g_d$$

$$U_{gs1} = U_1 - 2iR_o$$

$$= V_{cm} - 2iR_o$$

$$i = g m v_{g,1} = g m (v_{cm} - i 2.2)$$

$$1 + 1.2 \text{ kg} = \text{kg} \underbrace{V_{g,1}}_{V_{cm}}$$

$$i(1 + 2R_0 g_m) = g_m \cdot V_{cm}$$

$$i = \frac{g_m V_{cm}}{1 + 2g_m R_o} \Rightarrow V_{out2} = -i \cdot R_o = \frac{-g_m V_{cm} \cdot R_o}{1 + 2g_m R_o}$$

$$V_{out2} = A_d \cdot V_{dm} + A_c \cdot V_{cm}$$

$$V_{out2} = \frac{g_m R_D}{2} \cdot V_{in} - \frac{g_m R_D}{1 + 2g_m R_D} \cdot V_{cm}$$

$$CMR_2 = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| = \frac{\frac{\cancel{g_m r_o}}{2}}{\frac{\cancel{g_m r_o}}{1 + 2g_m r_o}} = \frac{1}{2} (1 + 2g_m r_o)$$

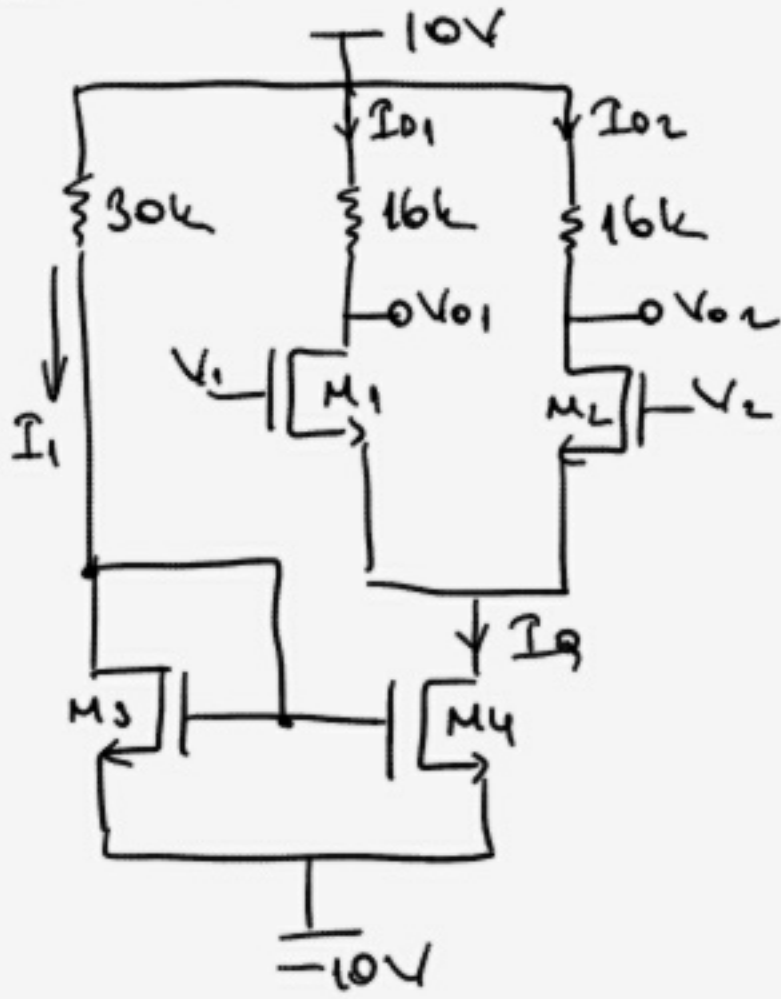
Hatırla:

$$g_m = \beta \cdot (V_{GS} - V_{TH})$$

$$\beta/2 = \kappa \wedge = \mu \wedge \cos\left(\frac{\omega}{c}\right)$$

$$g_m = \sqrt{2 \cdot \beta I_D}$$

Örnek:



$$\beta_1 = \beta_2 = 0.2 \text{ mA/V}^2$$

$$\beta_3 = \beta_4 = 0.6 \text{ mA/V}^2$$

Tüm tr. için $\lambda = 0$ ve $V_{TH} = 1V$

a) Devrenin düzgün çalışabilmesi için uygulanabilecek ortak mod giriş işaretinin aralığını bulunuz.

b) M_4 için $\lambda = 0.01 \text{ V}^{-1}$ ise A_{dm} , A_{cm} , $CMRR$ bulunuz.

$$a) I_1 = \frac{20 - V_{GS4}}{30k}$$

$$I_1 = \frac{\beta_3}{2} \cdot (V_{GS4} - \underbrace{V_{TH}}_1)^2$$

$$I_1 = 0.3m (V_{GS4} - 1)^2$$

$$\frac{20 - a}{30k} = 0.3m \cdot a^2 + 0.3m - 0.6m \cdot a$$

$$\Rightarrow I_1 = 0.3m (V_{GS4}^2 + 1 - 2V_{GS4})$$

$$20 - a = 9a^2 + 9 - 18a$$

$$I_1 = 0.3m V_{GS4}^2 + 0.3m - 0.6m V_{GS4}$$

$V_{GS4} = a$ olsun

$$9a^2 - 17a - 11 = 0$$

$$9V_{GS4}^2 - 17V_{GS4} - 11 = 0$$

$$V_{GS4} = 2.4V \quad I_1 = 0.587mA$$

$$I_1 = I_0 = 0.587mA$$

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_0}{2} = 0.293mA$$

$$I_{D1} = \frac{\beta_1}{2} (V_{GS1} - V_{TH})^2$$

Hatırla:

$$g_m = \beta (V_{GS} - V_{TH})$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D}$$

$$2\beta_1 \cdot I_{D1} = \beta^2 (V_{GS1} - V_{TH})^2$$

$$V_{GS1} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D1}}{\beta}} + V_{TH}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 0.293m}{0.2m}} + 1 = 2.71V$$

$$V_{01} = V_{02} = 10 - I_{D1} \cdot 16k$$

$$= 10 - (0.293m \cdot 16k) = 5.31V$$

$$I_{D1} = I_{D2} \Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2} = 2.71V$$

Maks. ortak mod girişi M_1 ve M_2 'nin sat. geçiş noktasına geldiği değerdir. O halde;

$$V_{DS1} = V_{DS2} = V_{DS1}(sat) = V_{GS1} - V_{TH} = 2.71 - 1 = 1.71V$$

Böylece;

$$V_{cm(max)} = V_{01} - V_{DS1}(sat) + V_{GS1} = 5.31 - 1.71 + 2.71 = 6.31V$$

Min. ortak mod işareti M_3 'ün sat. geçiş noktasına geldiği olur

$$V_{DS4} = V_{DS4}(sat) = V_{GS4} - V_{TH} = 2.4 - 1 = 1.4V$$

Böylece;

$$V_{cm(min)} = V_{GS1} + V_{DS4}(sat) - 10 = 2.71 + 1.4 - 10 = -5.89V$$

$$-5.89V \leq V_{cm} \leq 6.31V$$

b) Mu tr. $\rightarrow$ akım kaynağı

$$\downarrow$$

akım kaynağı $\rightarrow R_0 = \frac{1}{\lambda \cdot I_Q} = \frac{1}{(0.01)(0.587)} = 170 \text{ k}\Omega$

$$A_d = g_m \frac{R_D}{2} = \sqrt{2 \beta I_D} \cdot \frac{R_D}{2}$$

$$= \sqrt{2 \cdot 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 0.587 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{16 \cdot 10^3}{2} = 3.87$$

$$A_{cm} = \frac{-g_m R_D}{1 + 2g_m R_0} = -0.047$$

$$CMRR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{3.87}{0.047} \right) = 38.31 \text{ dB}$$

Farklı Güçlendiricilerin Genel Özellikleri

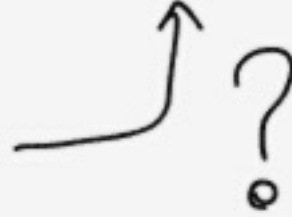
- * By-pass ve coupling (koplej) kapasitörlerinin kullanılmasına ihtiyaç duymaz.
- * Yüksek DC kazanç sağlar.
- * Çok katlı güçlendirici yapmak için elverişlidir.
- * Tümleşik devre (integrated circuit) yapılarında kullanılmaya uygundur.
- * Stoklik duyarlılığı azdır.
- * İki giriş, iki çıkışı olduğundan diferansiyel çalışmaya uygundur.
- * Bant genişliği yüksektir.

OE, OK ve OB'lı Kuvvetlendiricilerin Genel Özellikleri

	Akım kazancı	Gerilim kazancı	Giriş direnci	Çıkış direnci	Faz farkı
Ortak emiterli	$A_I > 1$	$A_V > 1$	Orta $k\Omega$	Büyük $k\Omega$	Var
Ortak kolektörlü	$A_I > 1$	$A_V \approx 1$	Büyük $k\Omega$	Küçük $\approx 50\Omega$	Yok
Ortak bazlı	$A_I \approx 1$	$A_V > 1$	Küçük $\approx 20\Omega$	Büyük $M\Omega$	Yok

Opamp'ta istenen özellikler

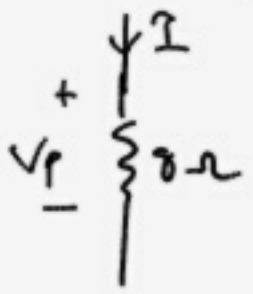
- * Çok büyük giriş empedansı
- * Çok küçük çıkış empedansı
- * Çok büyük gerilim kazancı



Çıkış Kartları ve Gsa Kuvvetlendiricileri

- * OE, OK, OB'lı kuvvetlendiriciler yüksek güçlü uygulamalar için yeterli mi?

Örneğin: 8Ω 'lık bir hoparlöre $1W$ gsa sağlanmak için gerekli olan çıkış akımı ve gerilimi nedir?



$$P = V_{rms} \cdot I = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

$$P = \left(\frac{V_p}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot \frac{1}{R} \Rightarrow 1W = \frac{V_p^2}{2} \cdot \frac{1}{8}$$

$$\Rightarrow V_p = 4V \longrightarrow \text{hoparlör üzerindeki gerilimin tepe değeri}$$

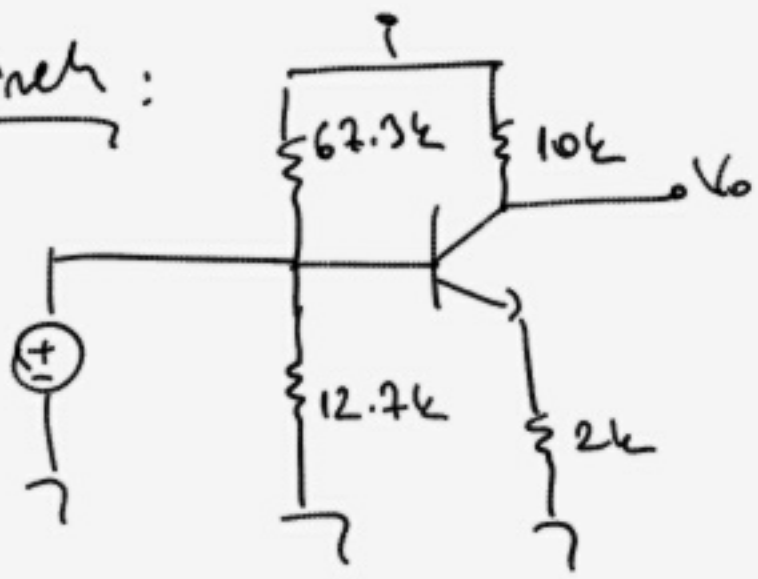
$$I = \frac{4V}{8} = 0.5A$$

$$\longrightarrow \text{hoparlör üzerindeki akımın tepe değeri}$$

Sorular

- 1) Kuvvetlendirici tarafından sürülmesi gereken dinamik önceli derslerde görülen tipik (yüzlerce / binlerce Ω) değerlerden çok daha düşük değere sahiptir.
- 2) Bu örnekteki akım değeri önceli derslerde karşılaşılan tipik akım değerlerinden (mA) çok büyüktür.
- 3) Kuvvetlendirici tarafından üretilen gerilim küçük işaret değil büyük işaretlerdir. Bu nedenle bunun büyük işaret durumu iyi anlaşılmalıdır.
- 4) Kaynaktan alınacak olan güç (1W) önceli karşılaştığımız değerlerden çok büyüktür.
- 5) Böyle büyük gerilim ve akımları taşıyan transistörler çok ısınabilir. Bu transistörler bu sıcaklıklarla başa çıkabilmeli ve buna uygun tasarlanmalıdır.

Örnek:



$$V_{CC} = 12V$$

$$\beta = 120, V_A = \infty$$

$$V_{BE(on)} = 0.7V$$

$$A_v = ?$$

$$A_v \approx -\frac{R_C}{R_E} = -5$$

$$V_{TH} = 12 \cdot \frac{12.7}{12.7 + 62.3} = 1.905V$$

$$R_{TH} = 12.7k \parallel 62.3k = 10.68k\Omega$$

$$I_B = \frac{1.905 - 0.7}{10.68 + 121.2k} = 0.00477mA = 4.77\mu A$$

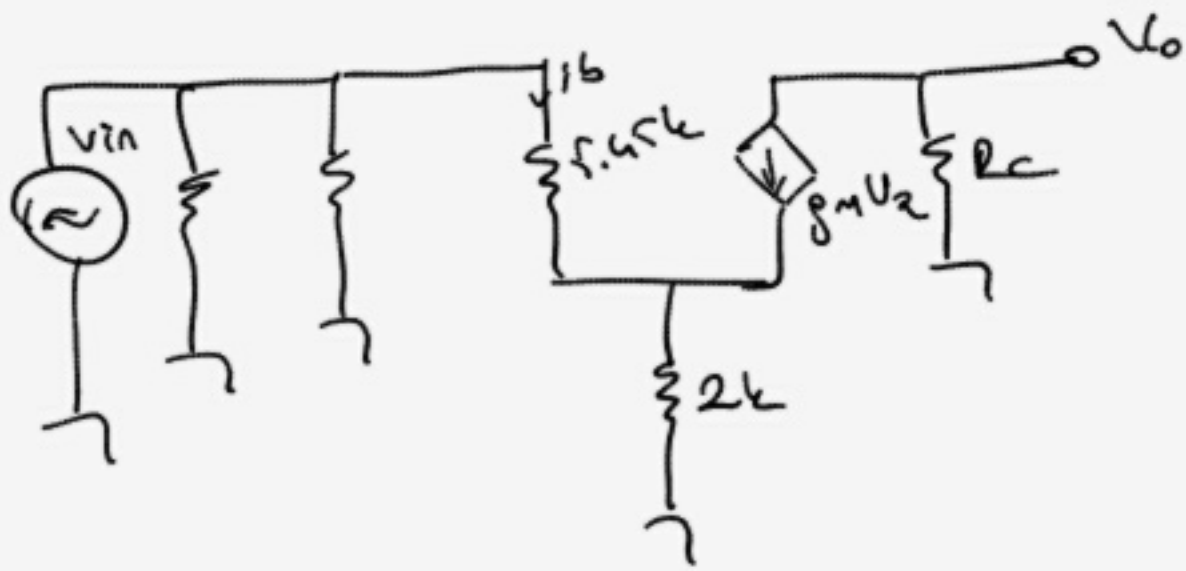
$$I_C = \beta \cdot I_B = 0.572mA$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0.572}{0.026} = 22mA/V$$

$$r_\pi = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C} = \frac{120 \cdot 0.026}{0.572} = 5.45k\Omega$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{\infty}{0.572} = \infty$$

K.i. AC analiz

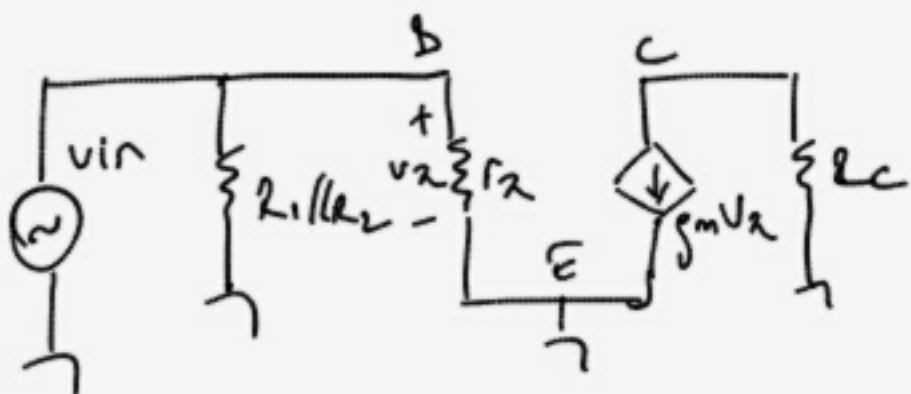


$$v_o = -g_m \cdot v_x \cdot R_C$$

$$i_b = \frac{v_{in}}{r_\pi + (1+\beta)R_E}$$

$$v_x = r_\pi i_b$$

* A_v'i artırma için R_E'ye paralel bir kondansatör eklersek:



$$v_{in} = v_x \text{ dir.}$$

$$v_o = -g_m v_x \cdot R_C$$

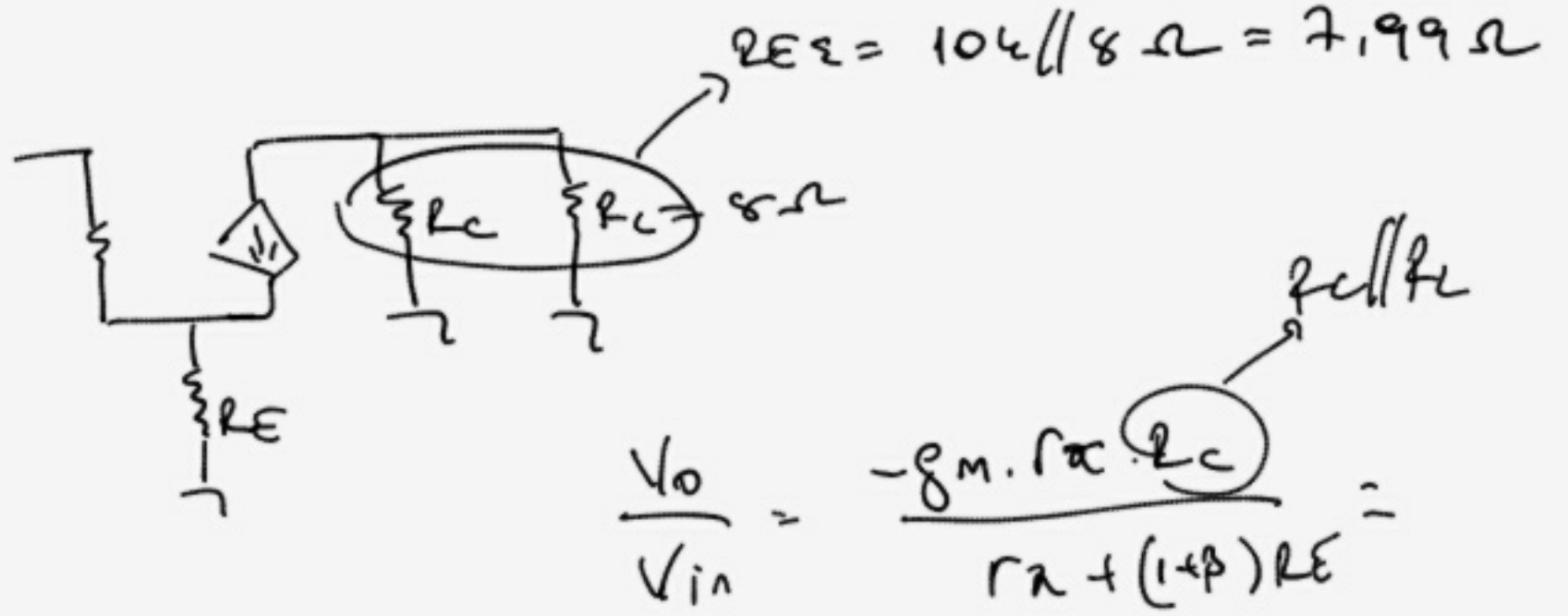
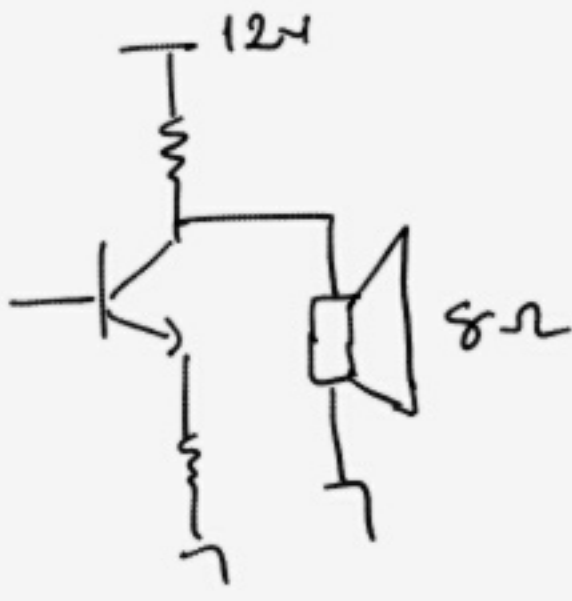
$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{-g_m v_x \cdot R_C}{v_x} = -g_m R_C = 22mA/V \cdot 10k = 220 //$$

$$v_o = -g_m \cdot r_\pi \cdot \frac{v_{in}}{r_\pi + (1+\beta)R_E} \cdot R_C$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{-g_m \cdot r_\pi \cdot R_C}{r_\pi + (1+\beta)R_E} = \frac{-22m \cdot 5.45k \cdot 10k}{5.45k + 242k} = \frac{1199k}{247.45k} = 4.84$$

$$A_v = 4,84 \text{ ise;}$$

Bu devrenin çıkışına 8Ω 'lık bir hoparlör bağlarsa $A_v = ?$



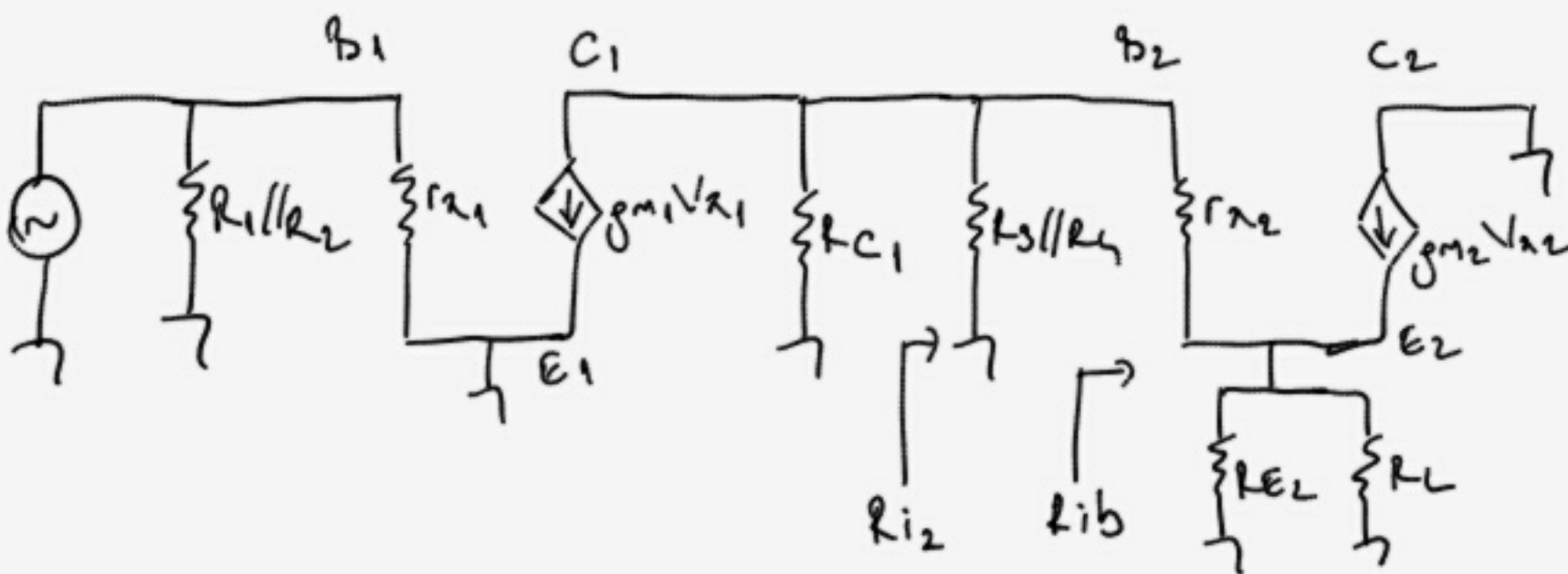
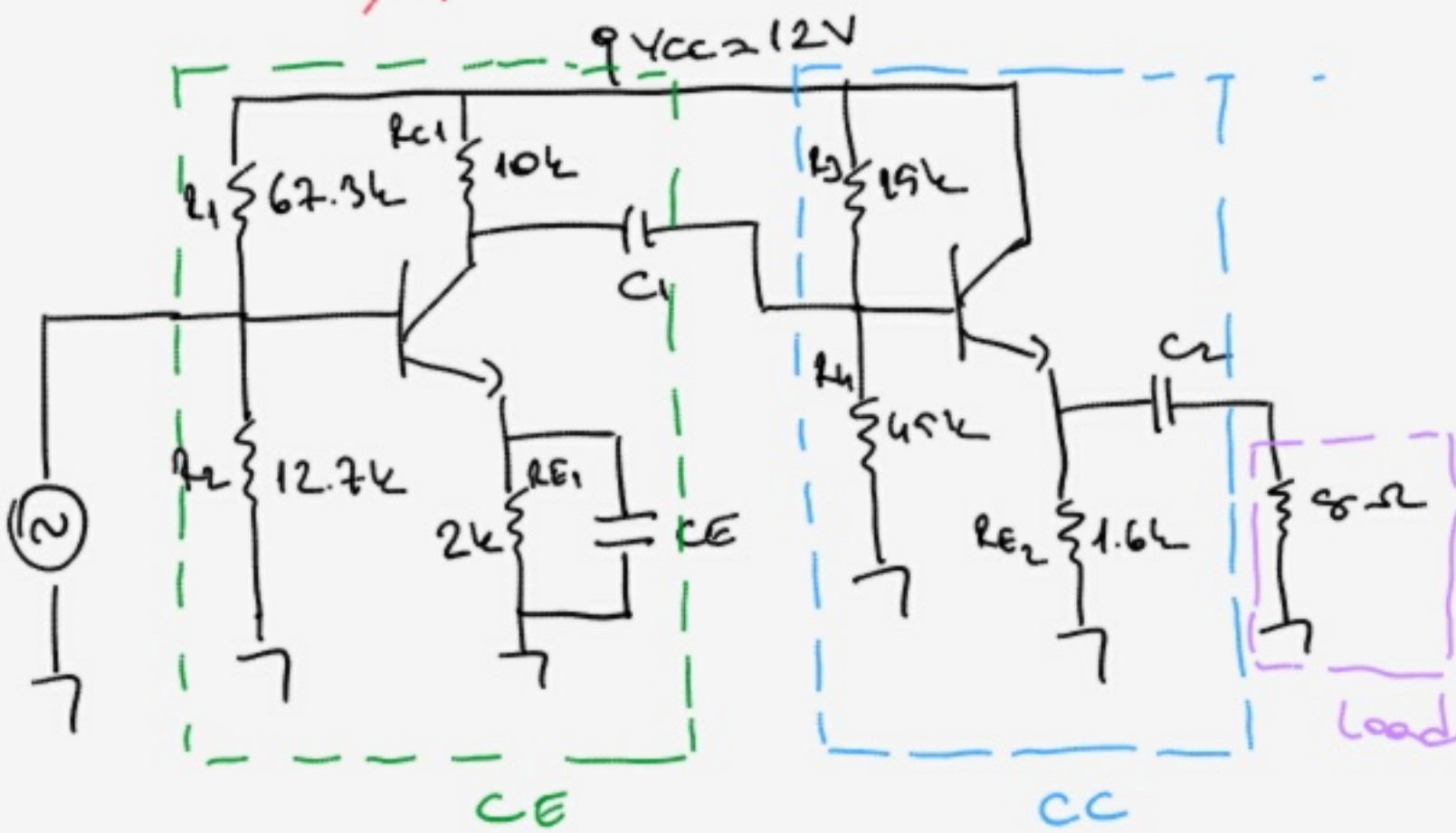
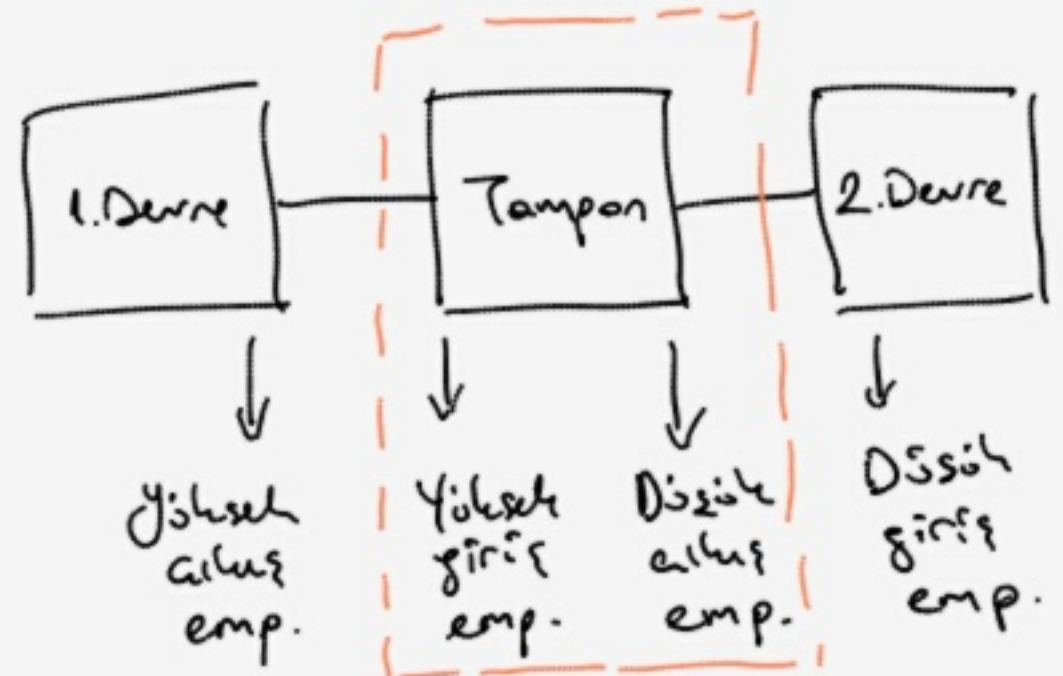
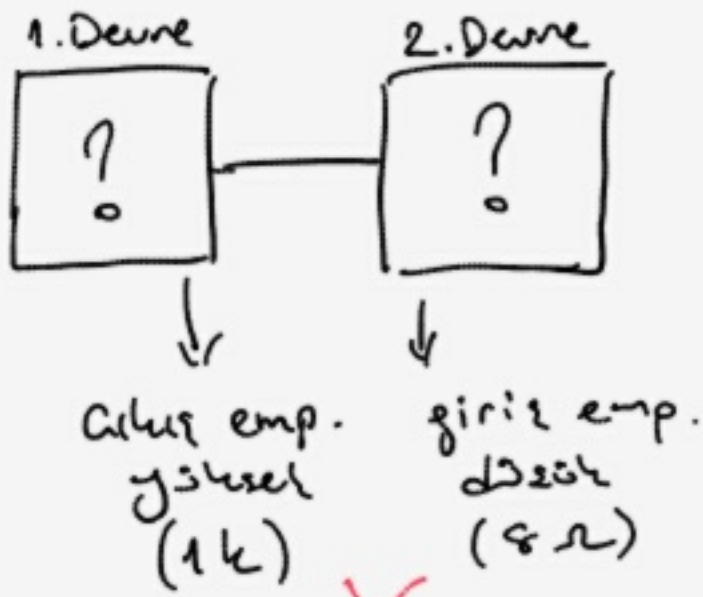
$$= \frac{-22\text{m} \cdot 5,45\text{k} \cdot 7,99}{5,45\text{k} + 24\text{k}} = \frac{958}{242,45\text{k}} = -0,004$$

* Bypass kapasitörü varsa;

$$V_o = -g_m V_{\pi} (R_C || R_L)$$

$$V_{in} = V_{\pi}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = -g_m \frac{(R_C || R_L)}{7,9\text{k}} = -22\text{mA/V} \cdot 7,9\Omega = 0,174$$



Toplam gerilim kazancı;

$$A_v = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

$$A_{v1} = -g_{m1} (R_{C1} || R_{i2})$$

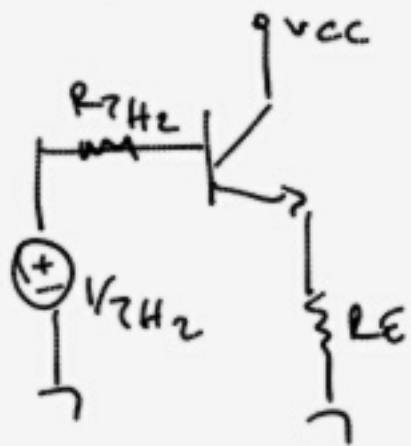
$$R_{i2} = R_{B2} || R_{E2} || R_{i3}$$

$$R_{i3} = r_{\pi 3} + (1 + \beta) (R_{E3} || R_L)$$

O.K' Devenin Analiz

$$V_{TH2} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot V_{CC} = \left(\frac{45}{45 + 15} \right) \cdot 12 = 9V$$

$$R_{TH2} = R_3 // R_4 = 15 // 45 = 11.25 k\Omega$$



$$I_{B2} = \frac{9 - 0.7}{11.25 + (120)(1.6)} = 0.0405 mA$$

$$I_{C2} = I_{B2} \cdot \beta = 4.86 mA$$

$$g_{m2} = \frac{4.86}{0.026} = 187 mA/V$$

$$r_{\pi 2} = \frac{120 \cdot 0.026}{4.86} = 0.642 k\Omega$$

$$r_{o2} = \frac{\infty}{I_C} = \infty$$

$$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$A_{V1} = -g_{m1} (R_{C1} // R_{i2})$$

$$R_{i2} = R_3 // R_4 // R_{ib}$$

$$R_{ib} = r_{\pi 2} + (1 + \beta)(R_{E2} // R_L)$$

$$R_{ib} = 0.642 + (1 + 120) \cdot \left(\frac{1.6k // 8}{7.96} \right)$$

$$= 1.605 k\Omega$$

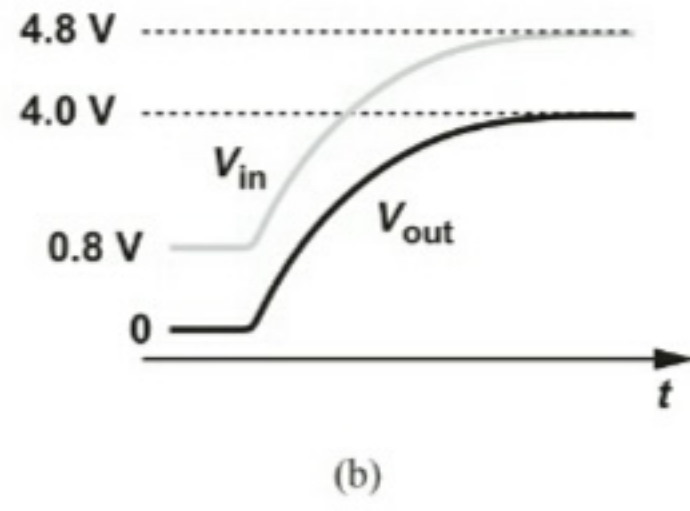
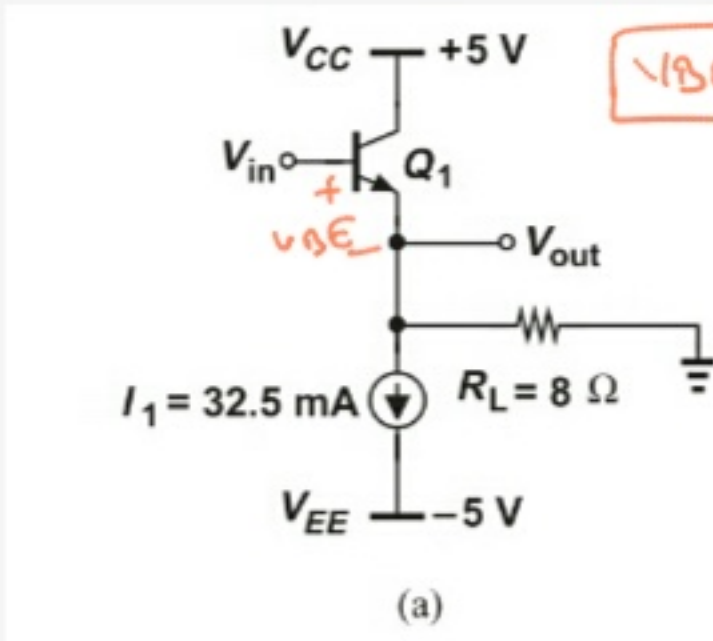
$$R_{i2} = 15 // 45 // 1.605 = 1.4k\Omega$$

$$A_{V1} = -g_{m1} (R_{C1} // R_{i2}) = -22m \left(\frac{10^4 // 1.4k}{1.23k} \right)$$
$$= -27.06$$

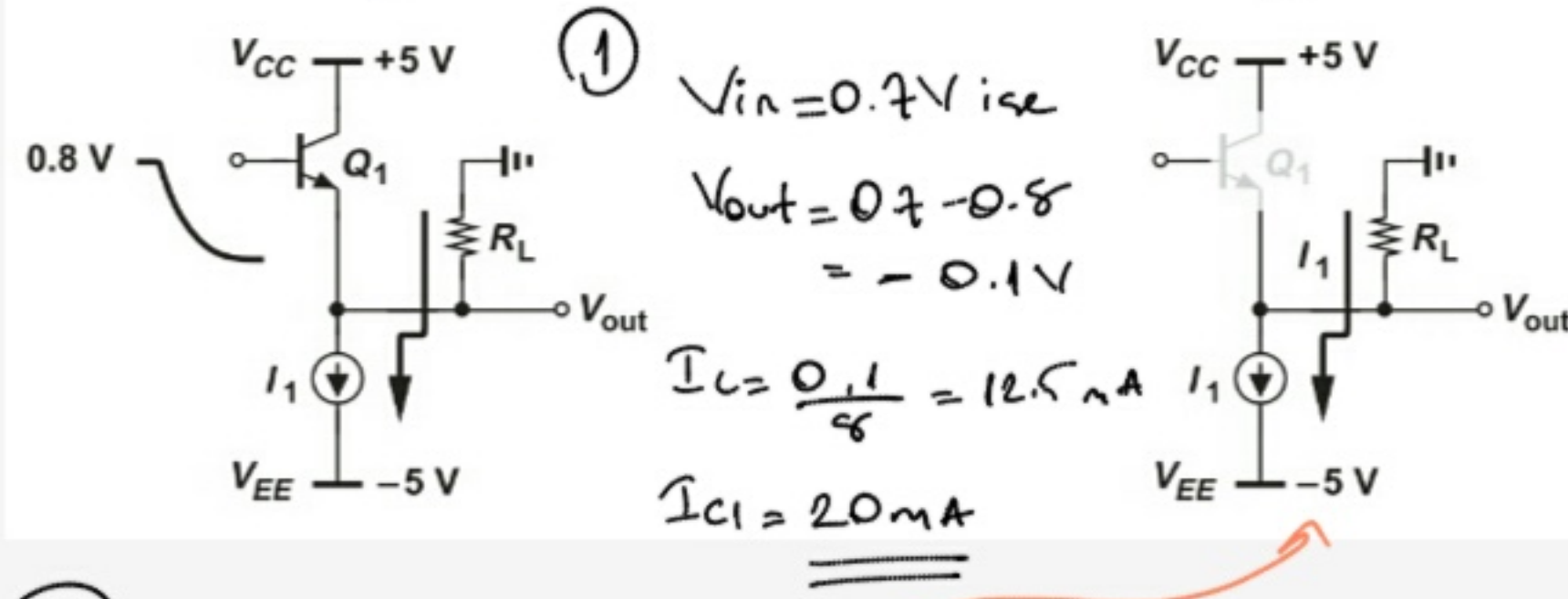
$$A_{V2} = \frac{V_{o2}}{V_{in2}} = \frac{g_{m2} V_{\pi 2} (R_{E2} // R_L)}{r_{\pi 2} + g_{m2} V_{\pi 2} (R_{E2} // R_L)} \approx 0.976$$

$$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2} = -27.06 \cdot 0.976 = -26.41$$

OK'ls (Emitter izleyici) Devrenin Analizi



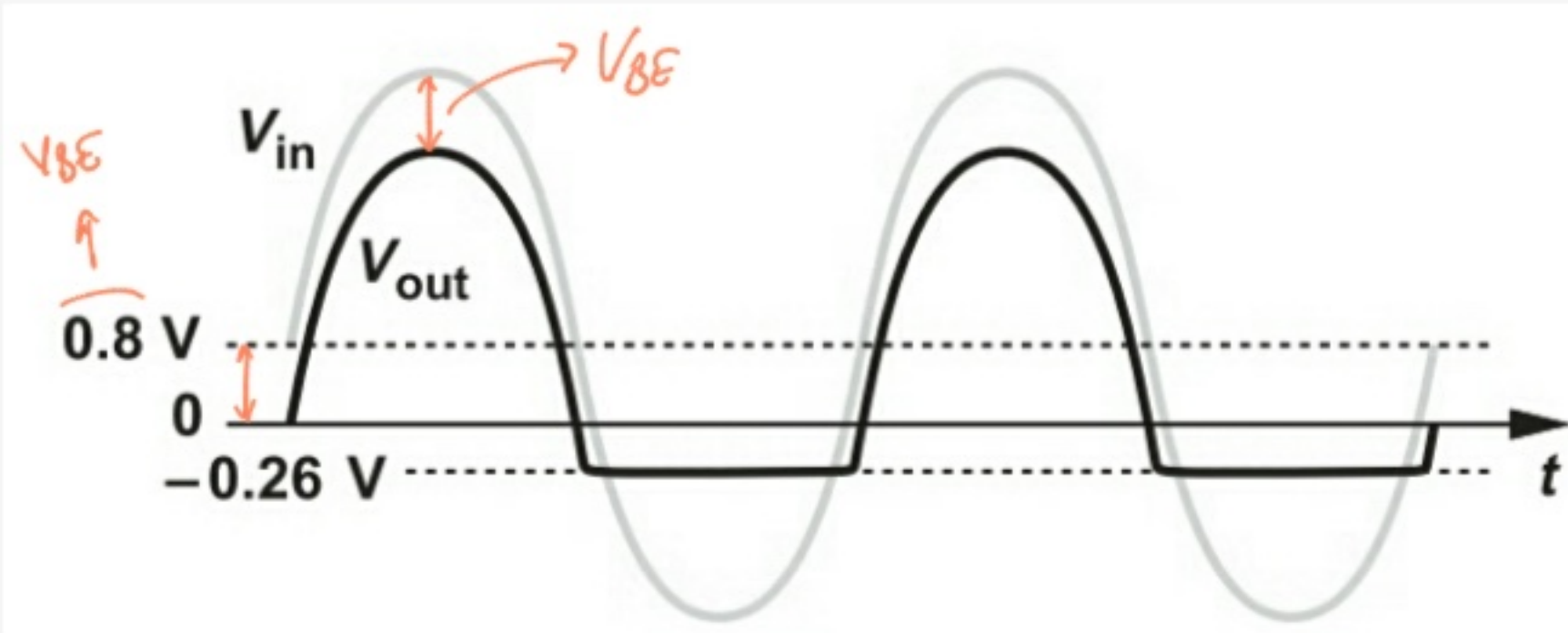
$V_{in} = 0.8V$ ise
 $V_o = 0V, I_L = 0$
 $I_{C1} = 32.5mA$



(2) $V_{in} = 0.6V$ ise
 $V_o = -0.2V$ olur
 $I_L = \frac{0.2}{8} = 25mA$
 $I_{C1} = 7.5mA$ olur

- * Giriş gerilimi azaldıkça Q_1 'den akan I_{C1} akımı giderek azalıyor.
- * Belirli bir değere kadar sonra I_{C1} daha da azalacak ve Q_1 OFF hale gelecektir.

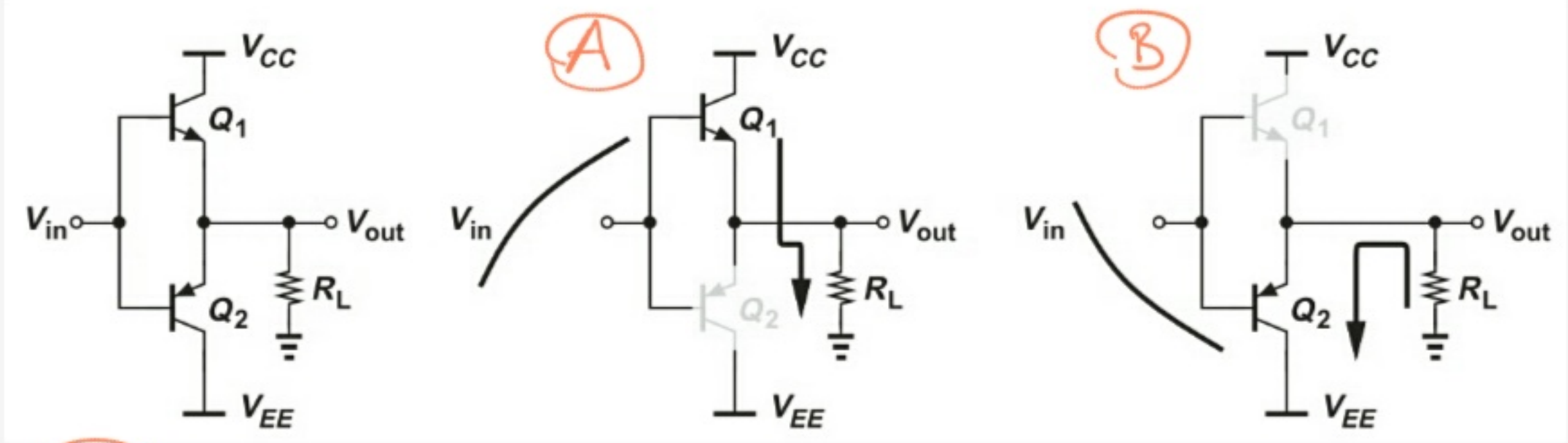
↓
 tüm akım R_L üzerinden geçecek.
 $V_{out} = -I_L R_L = -260mV$ olur.



- * Devrenin girişine uygulanan işaret aklısta elde edilemedi.
- * Aklı işaretli bozuldu. → distorsiyon?

! İşaretin (-) alternansı ne olacak?

Push-Pull Devresi



A

V_{in} yeteri kadar (+) ise;

$Q_1 \rightarrow ON \rightarrow \text{emiter izleyici} \rightarrow V_{out} = V_{in} - |V_{BE1}|$
(0.4)

$Q_2 \rightarrow OFF$

PUSH
(it)

B

V_{in} yeteri kadar (-) ise;

$Q_1 \rightarrow OFF$

$Q_2 \rightarrow ON \rightarrow \text{emiter izleyici} \rightarrow V_{out} = V_{in} + |V_{BE2}|$
(0.4)

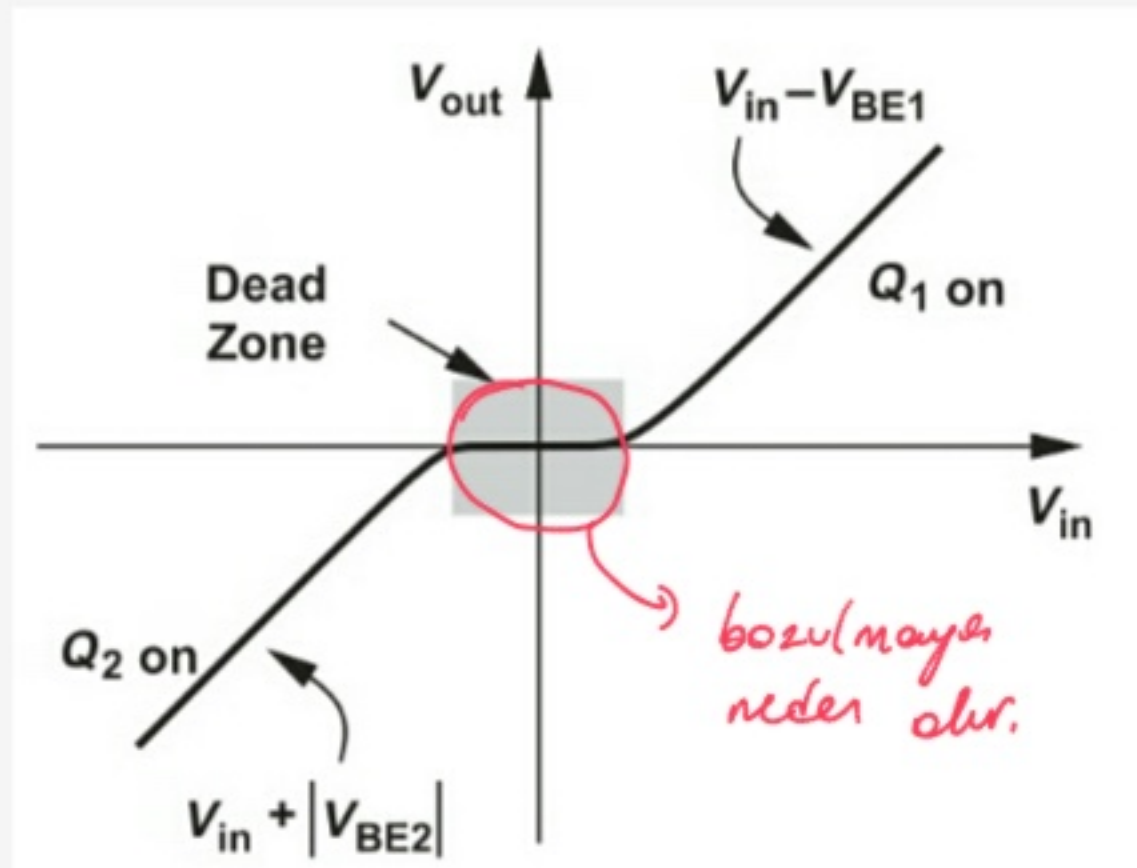
PULL
(çek)

* V_{in} yeterince (+) ya da yeterince (-) değilse?
(0V civarında iken)

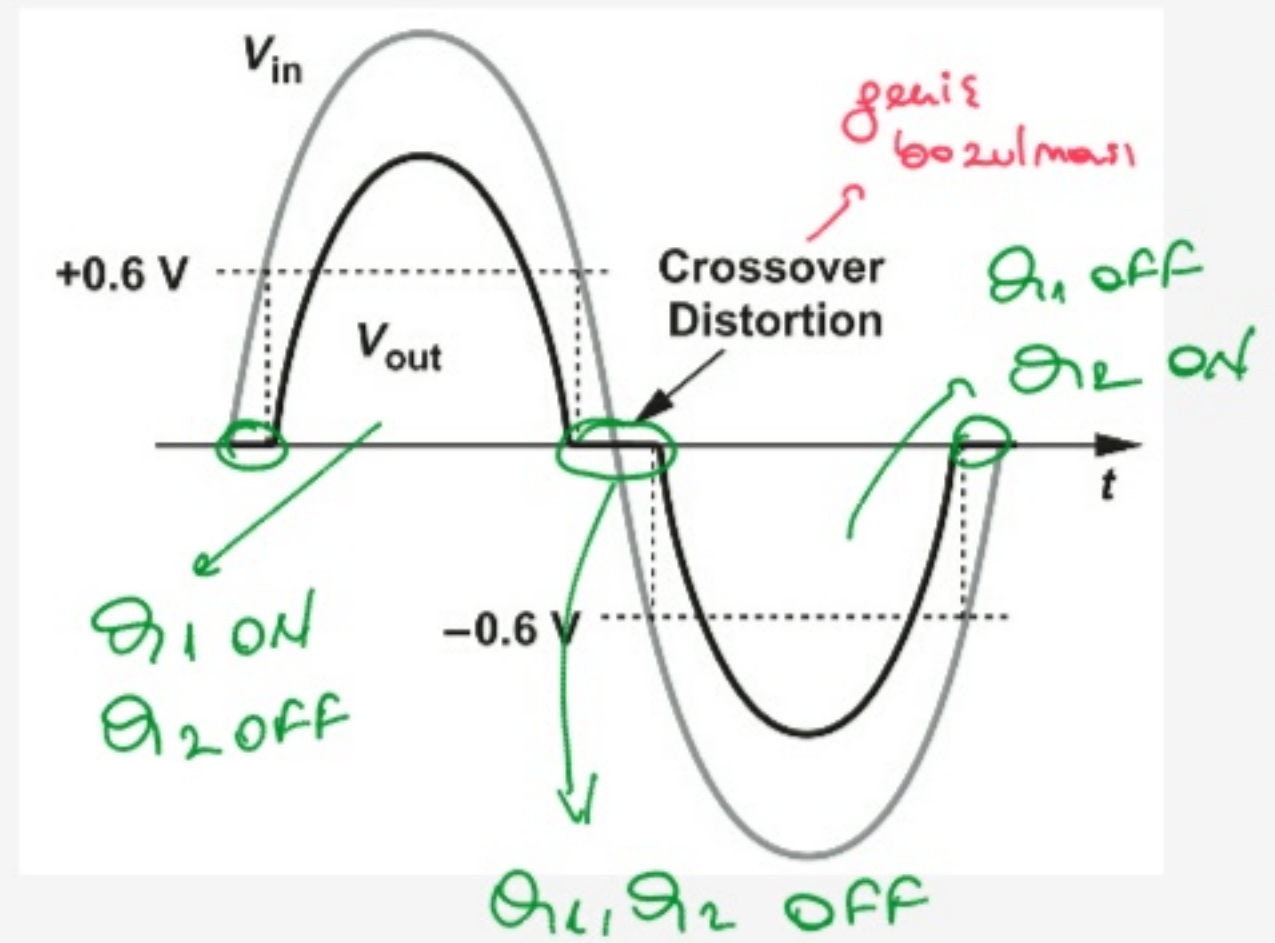
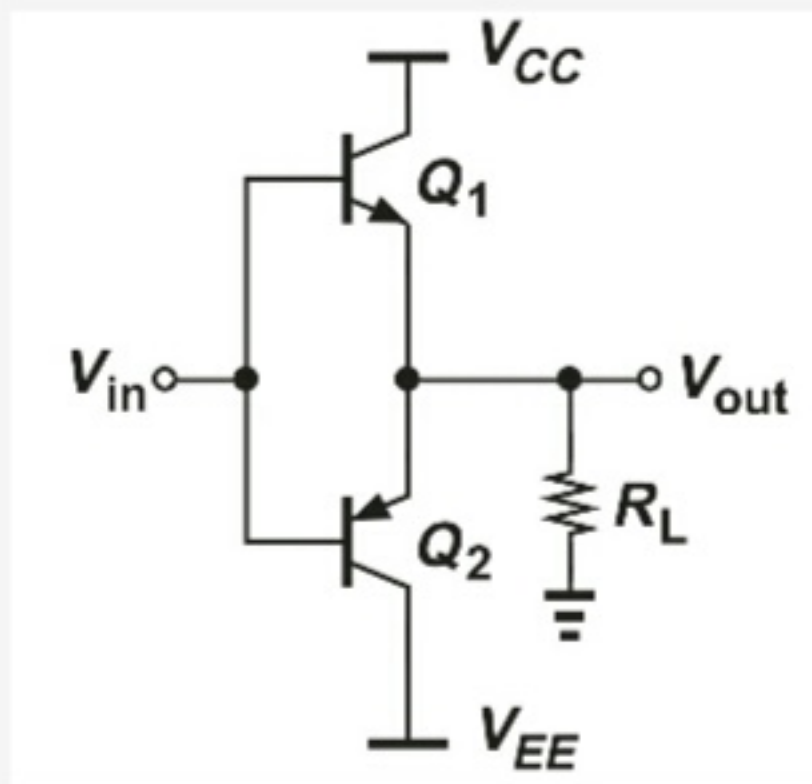
⇓

$-0.8V < V_{in} < 0.8V \Rightarrow Q_1 \rightarrow OFF$
 $Q_2 \rightarrow OFF$

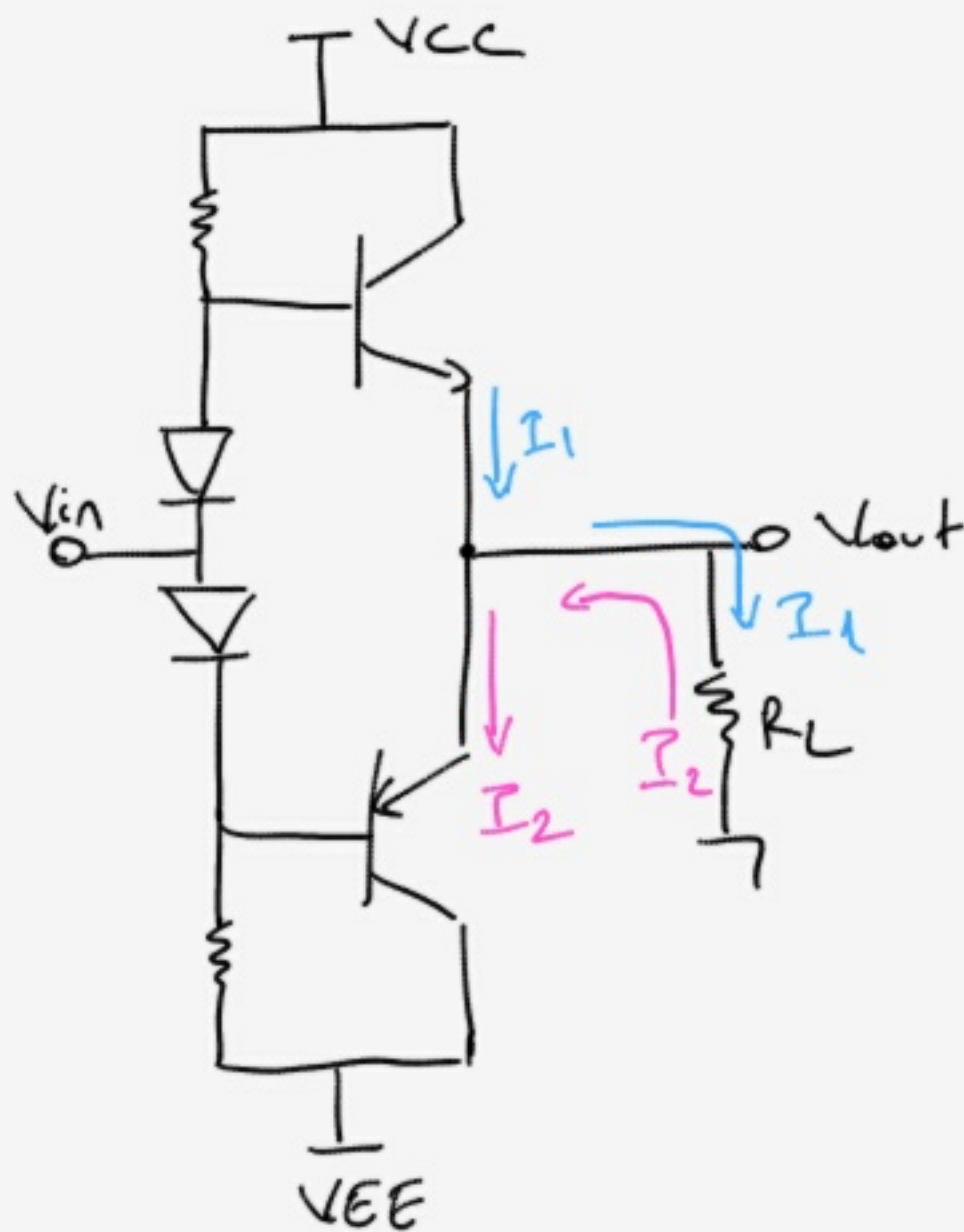
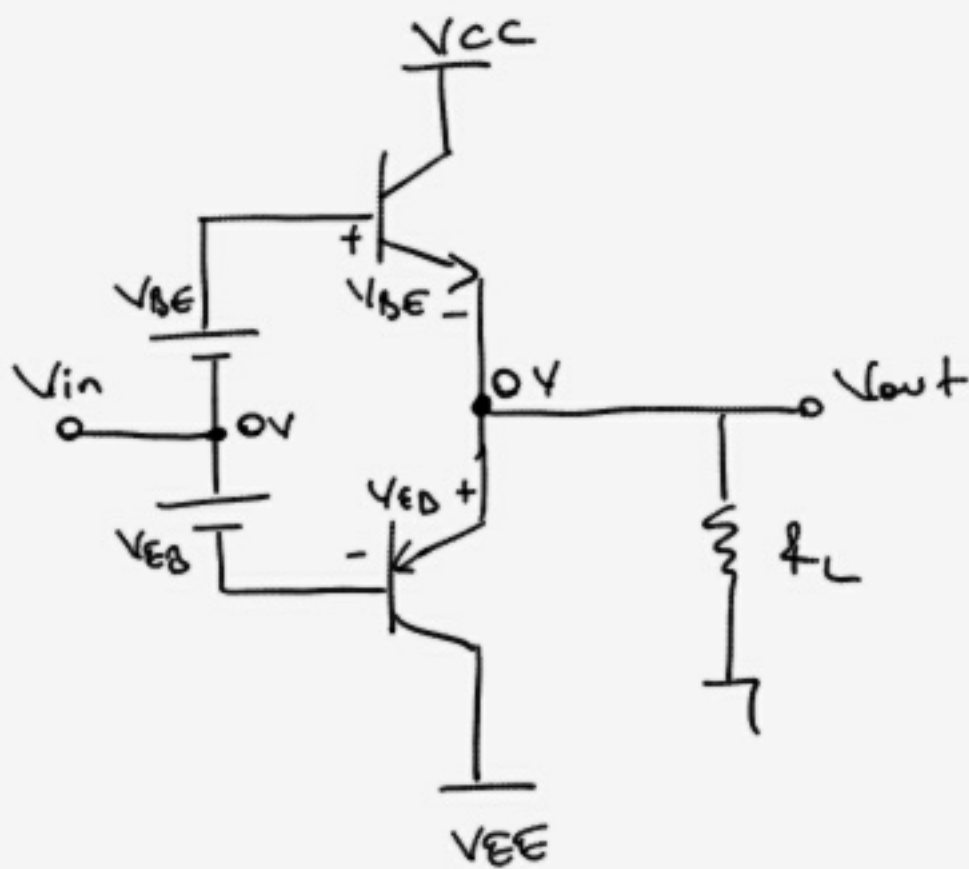
Dead Zone
(ölü bölge)



Örnek Tepe değeri 4V olan sin. izolet push-pull devresine uygulanırsa çıkış dalga formu nasıl olur? ($V_{BEon} = 0.6V$ olsun)

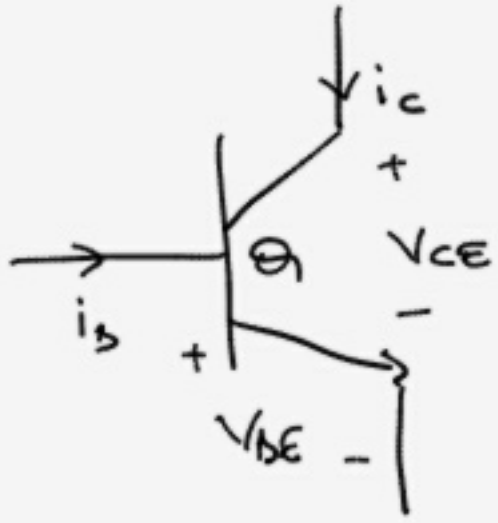


Çıkış Bozulmasının Giderilmesi



Güç Kaynaklarında Güç Hesaplamaları

⇒ BJT üzerinde harcanan güç



$$P = V \cdot I$$

$$P_Q = i_c \cdot V_{CE} + i_b \cdot V_{BE}$$

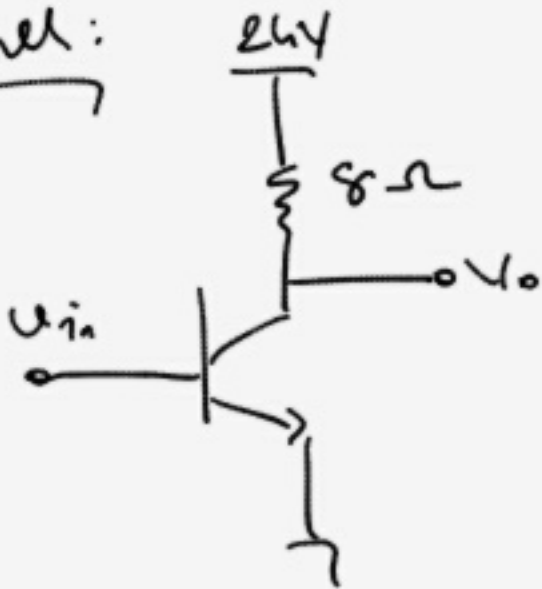
i_b çok küçük old.
ihmal edilebilir.

$$P_Q \approx V_{CE} \cdot i_c$$

ortalama
güç

$$P_{Q_{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CE} \cdot i_c dt$$

Örnek:



$$I_{C_{max}} = ?$$

$$V_{CE_{max}} = ?$$

$$P_{T_{max}} = ?$$

$$V_{CE} = 0 \rightarrow I_{C_{max}} = \frac{24}{8} = 3A$$

$$I_C = 0 \rightarrow V_{CE_{max}} = 24V$$

$$P_T = V_{CE} \cdot I_C$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \Rightarrow P_T = (V_{CC} - I_C R_C) \cdot I_C$$

$$\Rightarrow P_T = 24I_C - 8I_C^2$$

→ I_C 'ye göre türevi alınıp
0'a eşitlenirse $P_{T_{max}}$ bulunur.

$$\frac{\partial P_T}{\partial I_C} = 24 - 16I_C = 0$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{24}{16} = 1.5A$$

$$\Rightarrow V_{CE} = 24 - 8 \cdot 1.5A$$

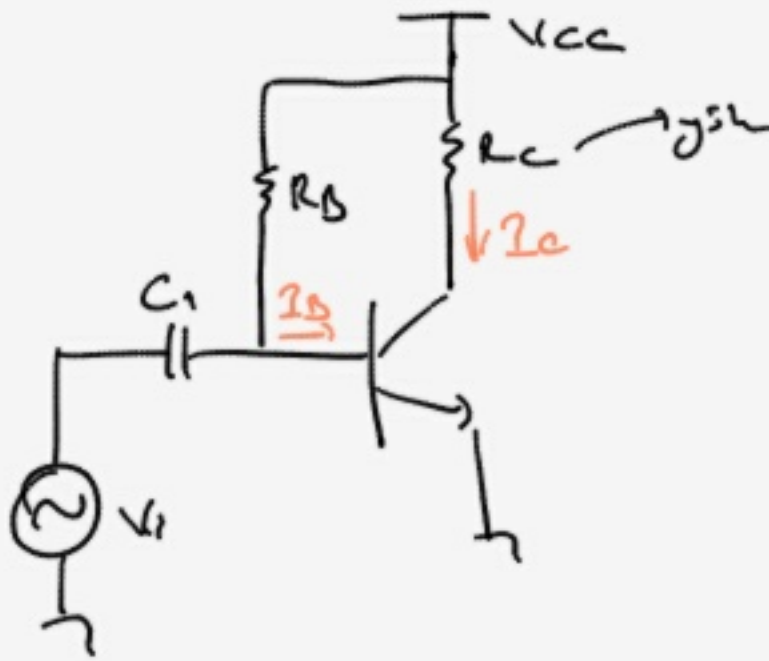
$$V_{CE} = 12V$$

$$P_{T_{max}} = 1.5A \cdot 12V = \underline{\underline{18W}}$$

Güç Kuvvetlendirici Sınıfları

1) A sınıfı kuv. (class A)

* Transistör tüm periyot boyunca güç tüketir.



$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7V}{R_B}$$

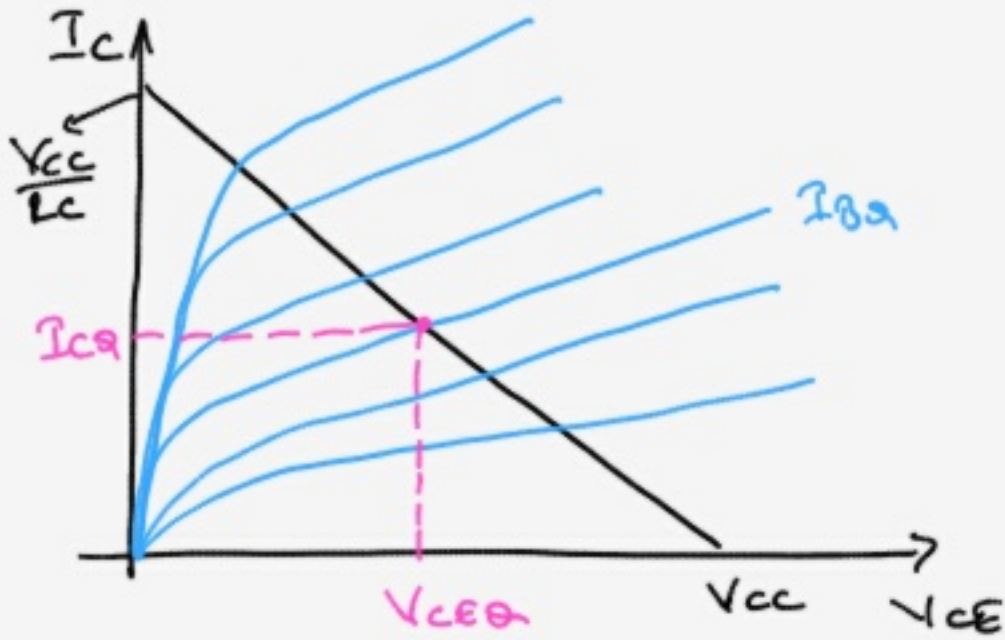
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

* Bu devre düşük güç verimi nedeniyle bir büyük izlet kuvvetlendirici olarak kullanmak için iyi bir seçenek değildir.

* Bir güç transistörünün β değeri genelde < 100

* Güç transistörü kullanan devreler büyük güç ve akım değerlerinde çalışabilir ancak çok fazla gerilim kazancı sağlamaz.



* $I_{BQ}, I_{CQ}, V_{CEQ} \rightarrow$ çalışma noktası

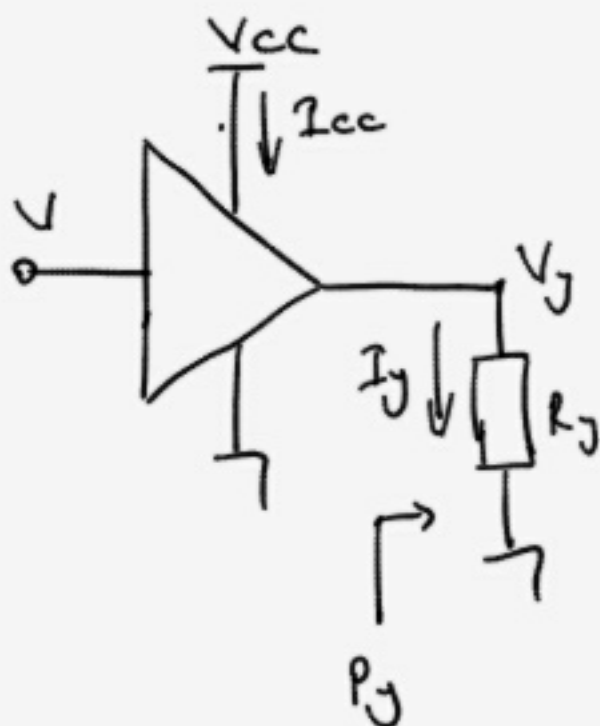
* Eğer I_{CQ} değeri $0 - \frac{V_{CC}}{R_C}$ değerlerinin tam orta noktası olacak şekilde ayarlanırsa en büyük I_C salınımı elde edilir.

* Eğer V_{CEQ} değeri $0 - V_{CC}$ değerlerinin tam orta noktasında ($V_{CC}/2$) olacak şekilde ayarlanırsa çıkış geriliminde en büyük salınım elde edilmiş olur. (max. symmetrical swing)

Verim:

- * Kaynaktan çekilen güç : P_{DA}
- * Yüke aktarılan güç : P_Y
- * Isıya harcanan güç : P_D

$$P_{DA} = P_D + P_Y \Rightarrow \eta = \frac{P_Y}{P_{DA}}$$



$$P_{DA} = V_{CC} \cdot I_{CC}$$

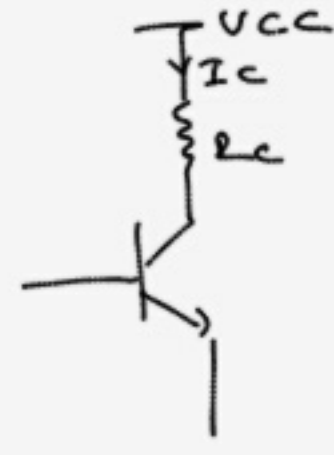
$$P_Y = V_{Yrms} \cdot I_{Yrms} = \frac{V_Y}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_Y}{\sqrt{2}} \dots \textcircled{1}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{V_Y^2}{R_Y} \dots \textcircled{2}$$

$$= \frac{1}{2} I_Y^2 R_Y \dots \textcircled{3}$$

A Sınıfı Kuvvetlendiricinin Maks. Verimi

Maks. verim için $\rightarrow$ Maks. akım $\rightarrow V_{CC}/R_C$
 $\rightarrow$ Maks. gerilim $\rightarrow V_{CC}$



$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \Rightarrow P = \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2} R_C} = \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R_C}$$

$\hookrightarrow$ Kuvvetin ürettiği güç (P_{DA})

$$P_y = V_{y,rms} \cdot I_{y,rms} \Rightarrow \frac{V_{CC}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{I_C}{2} = \frac{1}{8} V_{CC} \cdot I_{CQ}$$

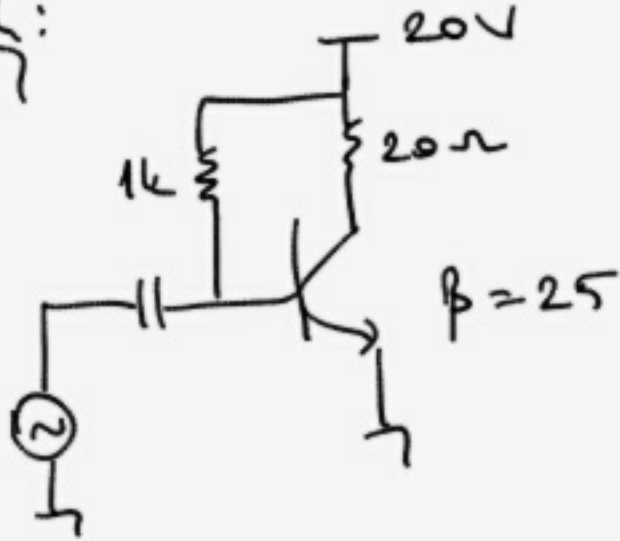
$\hookrightarrow$ max. için $\frac{V_{CC}}{2}$ olmak $\frac{I_C}{2}$

$$= \frac{1}{8} V_{CC} \cdot \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{1}{8} \frac{V_{CC}^2}{R_C}$$

$$\eta = \frac{P_y}{P_{DA}} = \frac{1/8 (V_{CC}^2/R_C)}{1/2 (V_{CC}^2/R_C)} = \frac{1}{4}$$

$$= \%25$$

Örnek:



10 mA tepe değeri bir baz akımı oluşturan bir giriş gerilimi için devrenin verimliliğini hesaplayınız.

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - 0.7V}{R_B} = \frac{20 - 0.7}{1k} = 19.3 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = 25 \cdot 19.3 \text{ mA} = 0.48 \text{ A}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 20 - 0.48 \cdot 20 = 10.4 \text{ V}$$

$$i_b = 10 \text{ mA}$$

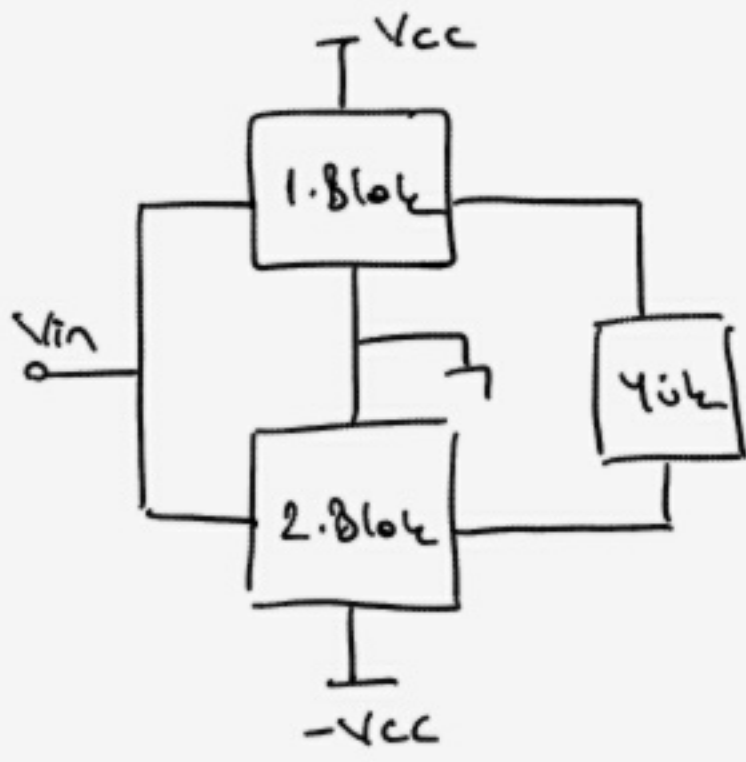
$$i_c = \beta \cdot i_b = 250 \text{ mA}$$

$$P_y(ac) = i_c^2(rms) \cdot R_C = \frac{(250 \cdot 10^{-3})^2}{2} \cdot 20 = 0.625 \text{ W}$$

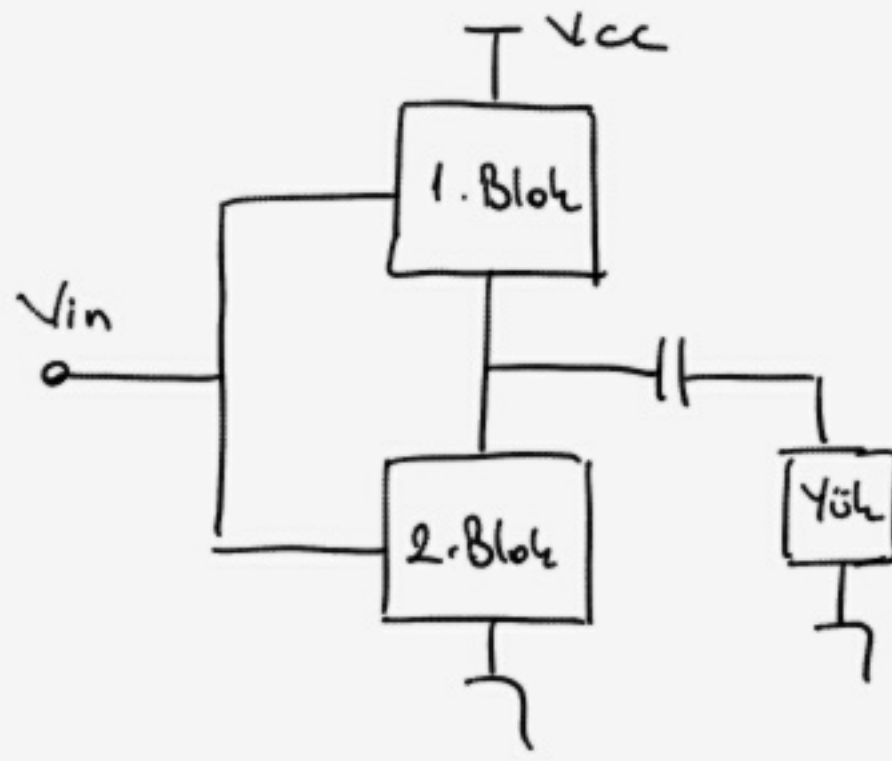
$$P_{DA} = V_{CC} \cdot I_C = 20 \cdot 0.48 = 9.6 \text{ W}$$

$$\% \eta = \frac{P_y(ac)}{P_{DA}} \times \%100 = \frac{0.625}{9.6} = \%6.5$$

2) B Sınıfı Kuşaklandırıcıda Verim



(Çift gerilim kaynağı kullanarak)



(Tek gerilim kaynağı kullanarak)

* Kuşaklandırıcının yük seçtiği güç, giriş gücünü veya DC güç sağlayan güç kaynaklarından gelir.

$$P_{DA} = V_{CC} \cdot I_{DC} \quad \begin{array}{l} \text{dc akım} \\ \text{ya da} \\ \text{ortalama akım} \end{array}$$

✓
Giriş gücü

Akım sinüsoidal ise

$$I_{DC} = \frac{2}{\pi} I(y)$$

$$P_{DA} = V_{CC} \left(\frac{2}{\pi} \cdot I(y) \right) \text{ olur}$$

Çıkış Gücü → yük aktarılan güç

$$P_y = \frac{V_y^2(rms)}{R_y} = \frac{V_y^2}{2R_y}$$

B sınıfında maksimum verim

$$\% \eta = \frac{P_y}{P_{DA}} \times 100$$

$$\% \eta = \frac{\frac{V_y^2}{2R_y}}{V_{CC} \cdot \frac{2}{\pi} I(y)} = \frac{V_y^2}{2R_y} \cdot \frac{\pi \cdot 2}{2 \cdot V_{CC} \cdot V_y} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_y}{V_{CC}} \times 100$$

yük üzerindeki gerilimin tepe değeri

$$V_y \uparrow \eta \uparrow$$

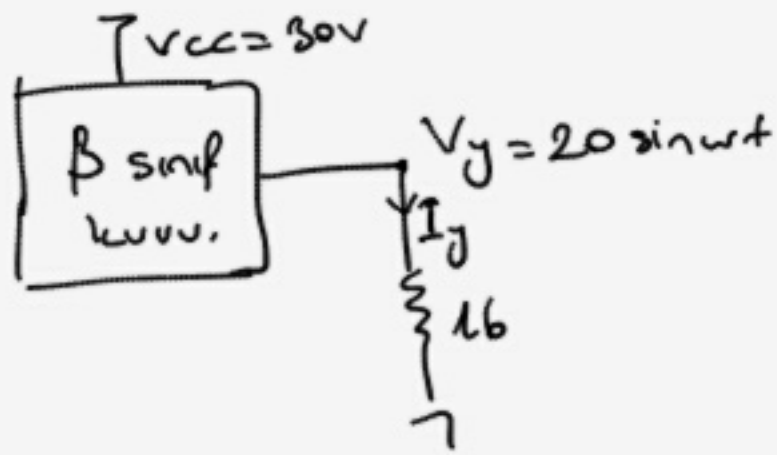
$$V_y(max) \rightarrow \eta(max)$$

$$V_y(max) = V_{CC}$$

$$\eta_{max} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{ymax}}{V_{CC}}$$

$$= \frac{\pi}{4} = \%78.5$$

Örnek: $V_{CC} = 30V$ ile beslenen bir B sınıfı kuvvetlendirici 16Ω 'lık yükte $20V$ 'lık bir tepe değerli gerilim veriyorsa devrenin verimini hesaplayınız.



$$I_g = \frac{20 \sin wt}{16} = 1.25 \sin wt$$

$$I_{dc} = \frac{2}{\pi} I_g = \frac{2}{\pi} \cdot 1.25 = 0.796 A$$

$$P_{DA} = V_{CC} \cdot I_{dc} = 30 \cdot 0.796 = 23.9 W$$

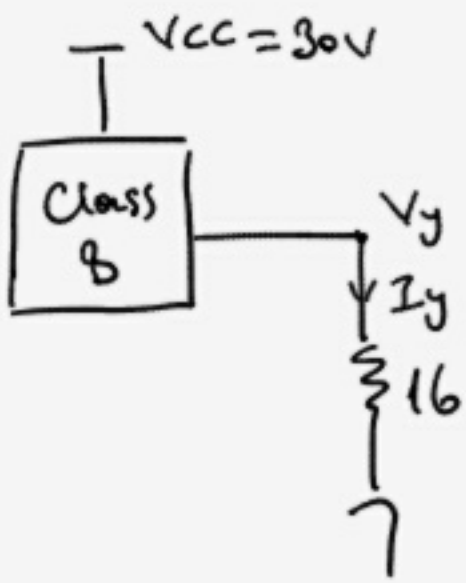
↓
seplanan güç

$$P_g = \frac{V_g^2}{2R_L} = \frac{20^2}{2 \cdot 16} = 12.5 W$$

$$\% \eta = \frac{12.5}{23.9} \cdot 100 = \%52.3 //$$

Örnek: Yukarıdaki örnekle için maksimum verimi bulunuz.

* Maks. çıkış gücü;



$$P_{gmax} \xrightarrow{?} V_{gmax} \xrightarrow{?} 30 V_{CC}$$

$$P_{gmax} = V_{gmax} \cdot I_g = \frac{V_{gmax}^2}{R_L} = \frac{V_{gmax}^2}{2R_L} = \frac{30^2}{2 \cdot 16} = 28.125 W$$

* Kaynaktan çekilen maks. güç;

$$P_{DAmax} \xrightarrow{?} V_{CC} \cdot \frac{I_{dcmax}}{2} \xrightarrow{?} V_{CC} \cdot \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{30^2}{16} = 35.81 W$$

$$\% \eta = \frac{P_g}{P_{DA}} = \frac{28.125}{35.81} \cdot 100 = \%78.5$$

Dikkat!

$$P_{DA} = V_{CC} \cdot I_{dc}$$

$$I_{dc} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_g}{R_L}$$

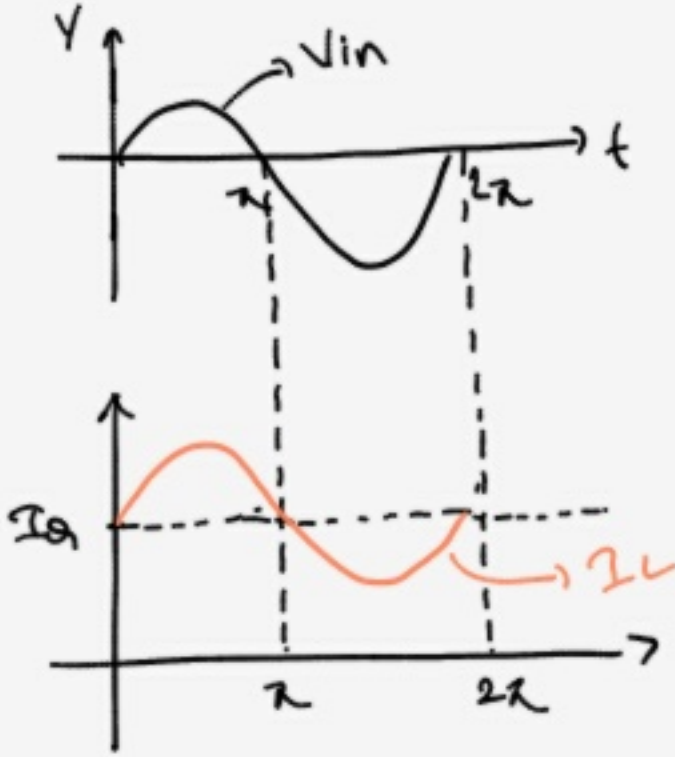
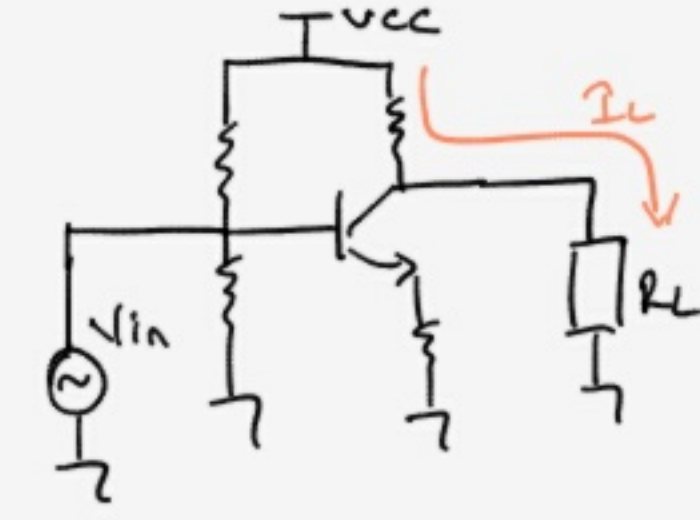
$$P_g = \frac{V_g^2}{2R_L}$$

$$\% \eta = \frac{P_g}{P_{DA}} = \frac{V_g^2 / 2R_L}{V_{CC} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V_g}{R_L}} = \frac{\pi}{4} \frac{V_g}{V_{CC}}$$

$$\Rightarrow \% \eta = \%78.5 \cdot \left(\frac{V_g}{V_{CC}} \right) \quad (V_g = 20V \Rightarrow \%52.3)$$

Güç Kuvvetlendiricilerde Sınıflar

O.E'li devre ;

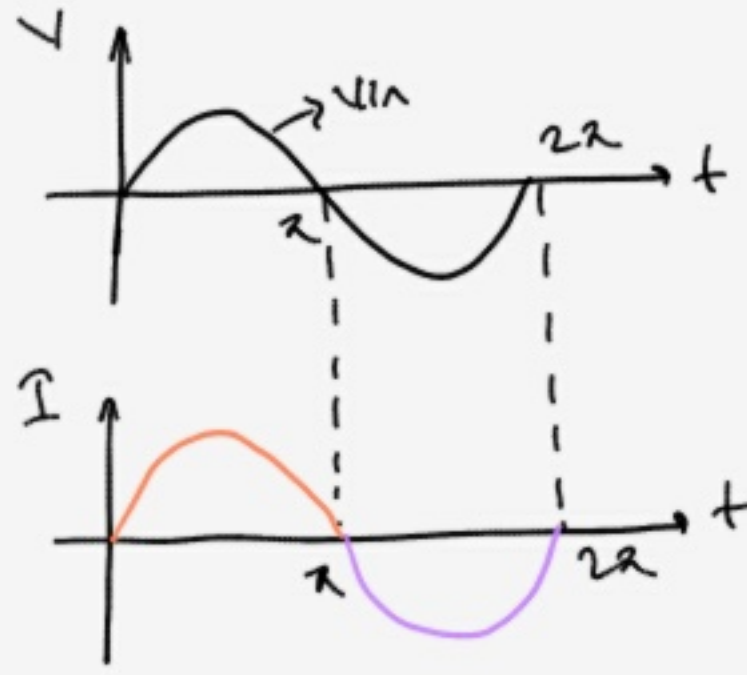
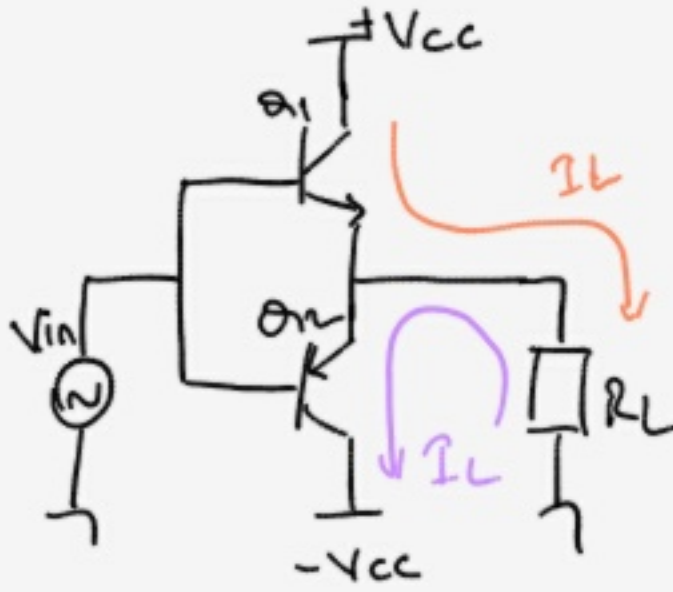


Tr. (0-2π)
aralığında çalışır

A Sınıfı
(Class A)

- * yüksek doğruluk
- * cıhızta bozulma yok
- * düşük verimli

Push-Pull Devre ;



Q1 → (0-π)
Q2 → (π-2π)
aralığında çalışır

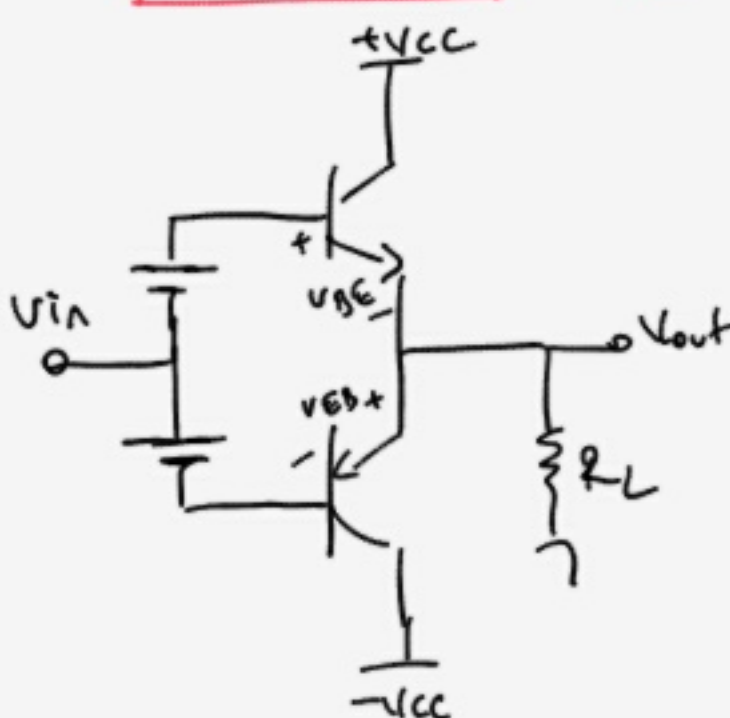
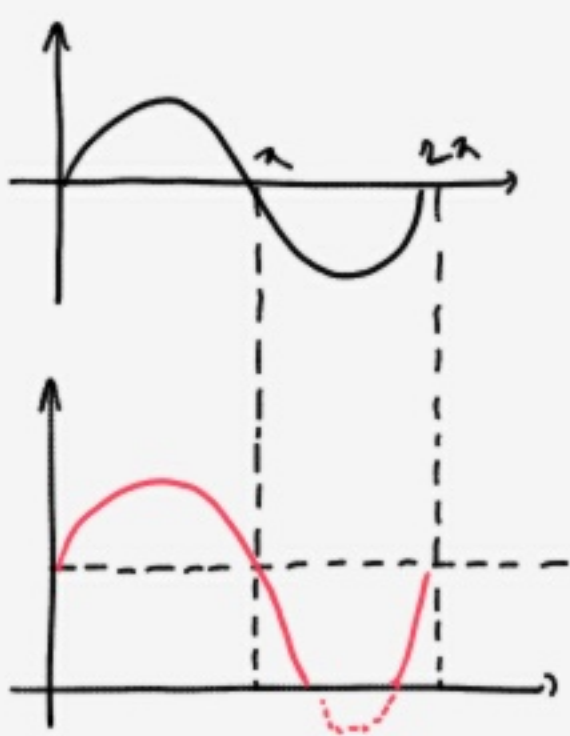
B sınıfı
(Class B)

- * doğruluk daha az
- * cıhızta bozulma var
- * yüksek verimli

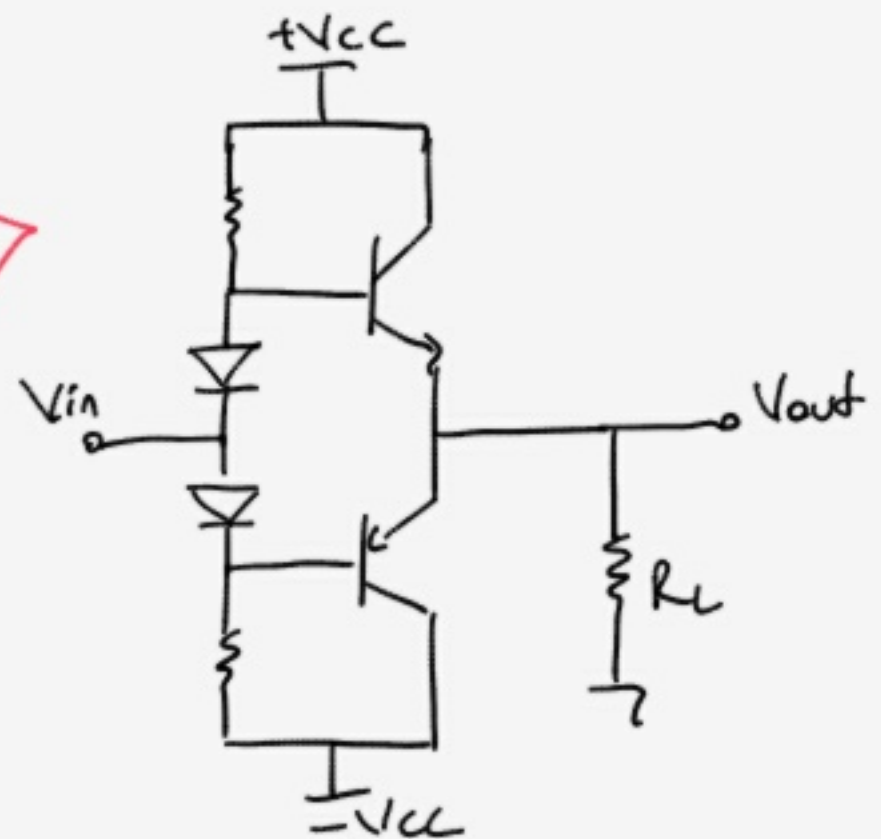
C sınıfı?

(D-E-F-T)
sınıflarını araştır !

VS
?
AB sınıfı $\pi < \theta < 2\pi$



⇒



Kuvvetlendiricilerin Temelleri

* Amplification (kuvvetlendirme) → Output = (gain) × (input)

* Loading (yükleme)

linear amplifier

$$\Rightarrow \text{Output} = (\text{gain}) \times (\text{input})$$

V I

V I

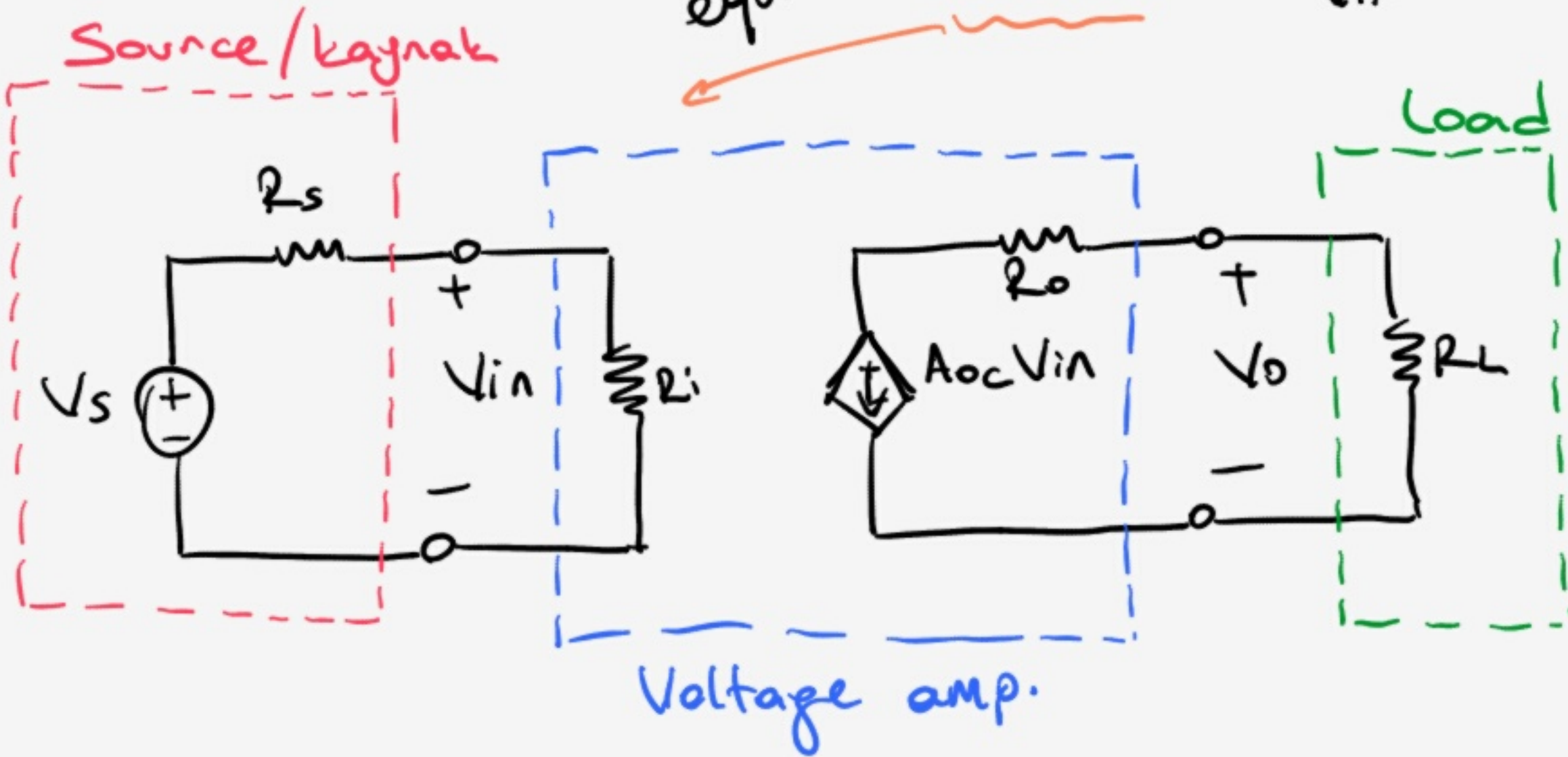
nonlinear amp. ?

- * quadratic
- * logarithmic
- * anti-log.

* Voltage amplifier → output → V_o

input → V_{in}

Thermin equivalent gain → $\frac{V_o}{V_{in}} = A \cdot V/V$



R_i : kuvvetlendiricinin giriş emp.

R_o : çıkış direnci

A_{oc} : gerilim kazancı faktörü (voltage gain factor)

R_s : kaynak direnci

A_{oc} : açık devrim gerilim kaz. (open circuit volt. gain)

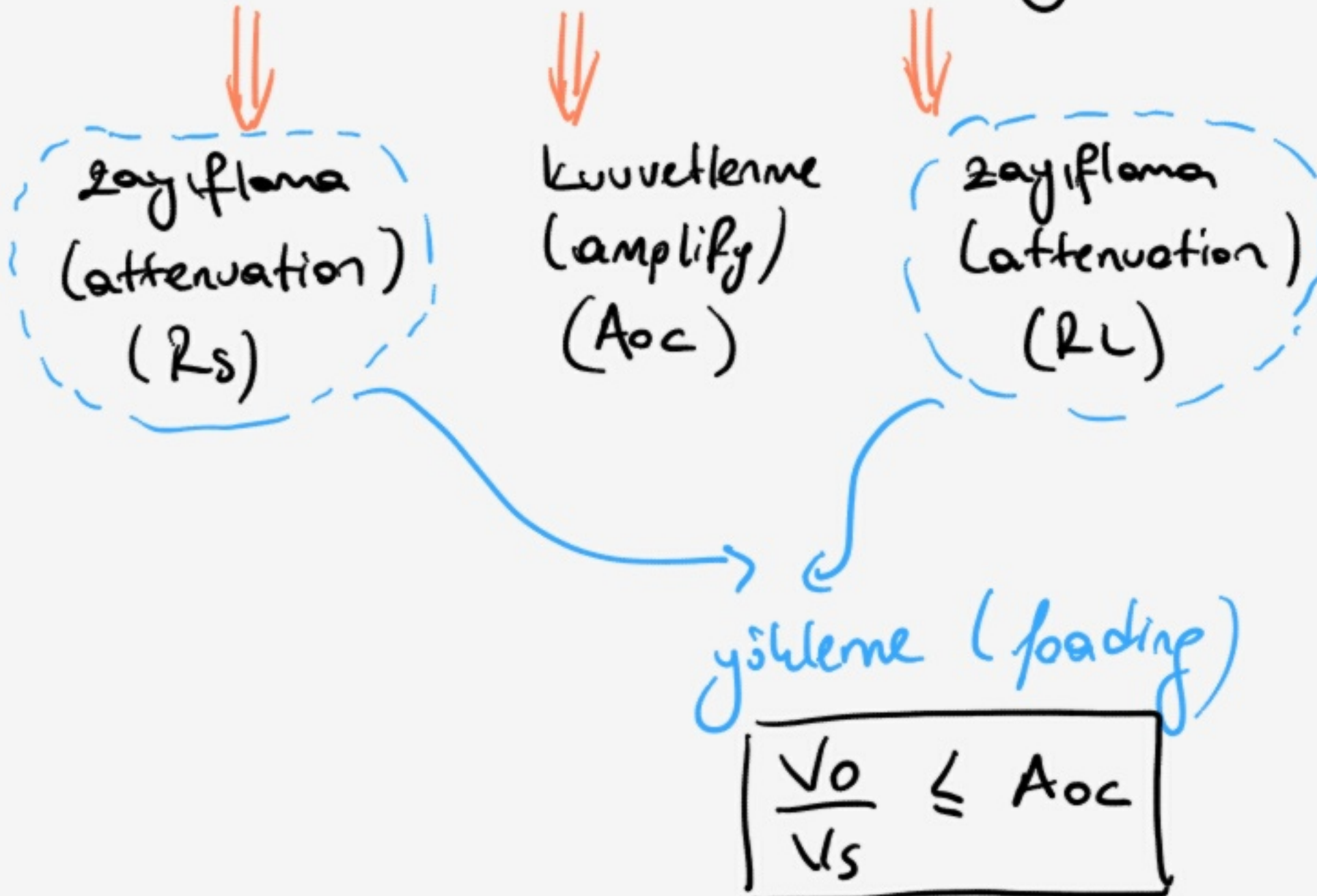
$$V_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot A_{oc} \cdot V_{in}$$

$$V_{in} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot V_s$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot A_{oc} \cdot V_{in} \\ V_{in} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot V_s \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \times A_{oc} \times \frac{R_L}{R_o + R_L} \Rightarrow \text{Kazancı (gain)} \quad (*)$$

* Yukarıdaki şekilde işaret;

kaynaktan → kuvvetlendirici → yük



Örnek: Bir kuvvetlendiricide;

$$R_i = 100k, A_{oc} = 100 V/V, R_o = 1k, R_s = 25k, R_L = 3k$$

Toplam kazanç $A = ?$

(*)'da yerine konulursa $\Rightarrow \frac{V_o}{V_s} = \frac{100}{25+100} \times 100 \times \frac{3}{1+3} = 60 V/V$ loading

$$\boxed{60 < 100}$$

$$R_s = 50k, R_L = 1k$$

$$A = \frac{V_o}{V_{in}} = 53.3 V/V$$

⇒ loading → kazanç ↓

loading = 0 dursa ⇒ kazanç = $\frac{V_o}{V_s} = A_{oc}$ olurdu.
?

$R_i = \infty$ → giristen akım almaz → gerilim düşmez → loading = 0

$R_o = 0$ → R_o üzerinde gerilim düşüşü olmaz → loading = 0

ideal amp. → teorik

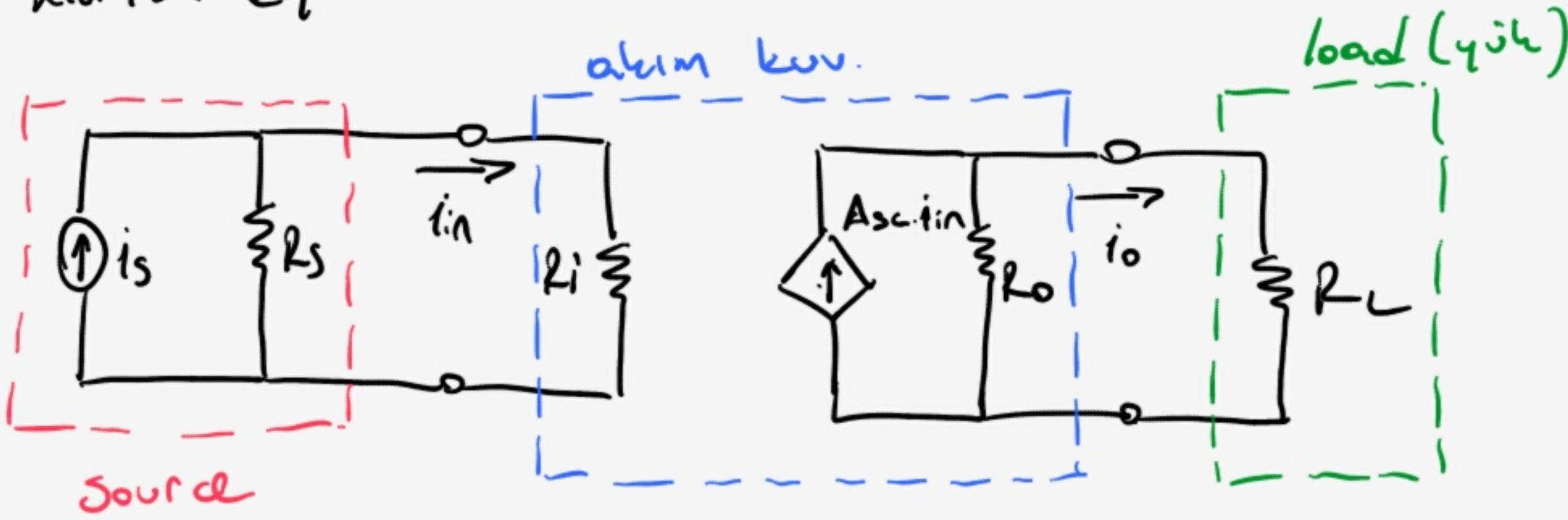
$R_i \gg R_s$

$R_o \ll R_L$

→ pratikte

* Akım kuvvetlendirici (current amp.)

Klonton eq.



$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{R_s}{R_s + R_i} \times A_{sc} \times \frac{R_o}{R_o + R_L} \quad \left(\frac{i_o}{i_s} \leq A_{sc} \right)$$

ideal durum → $R_i = 0$, $R_o = \infty$ olur.

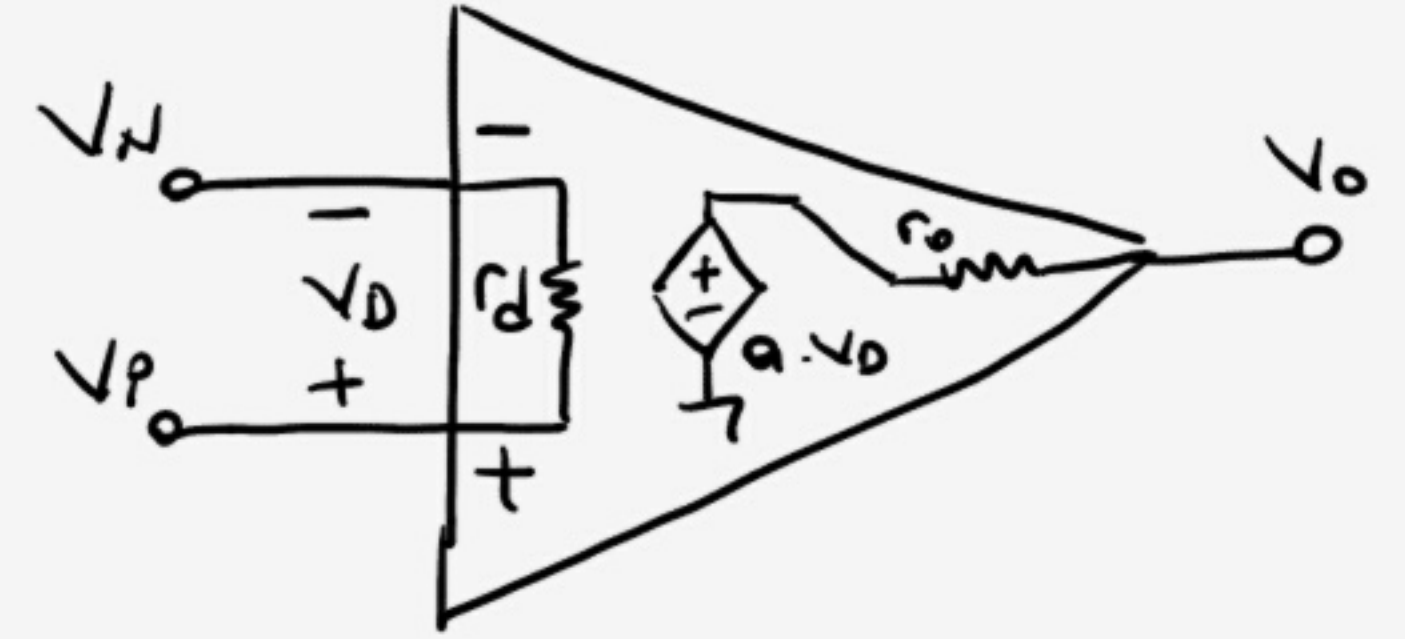
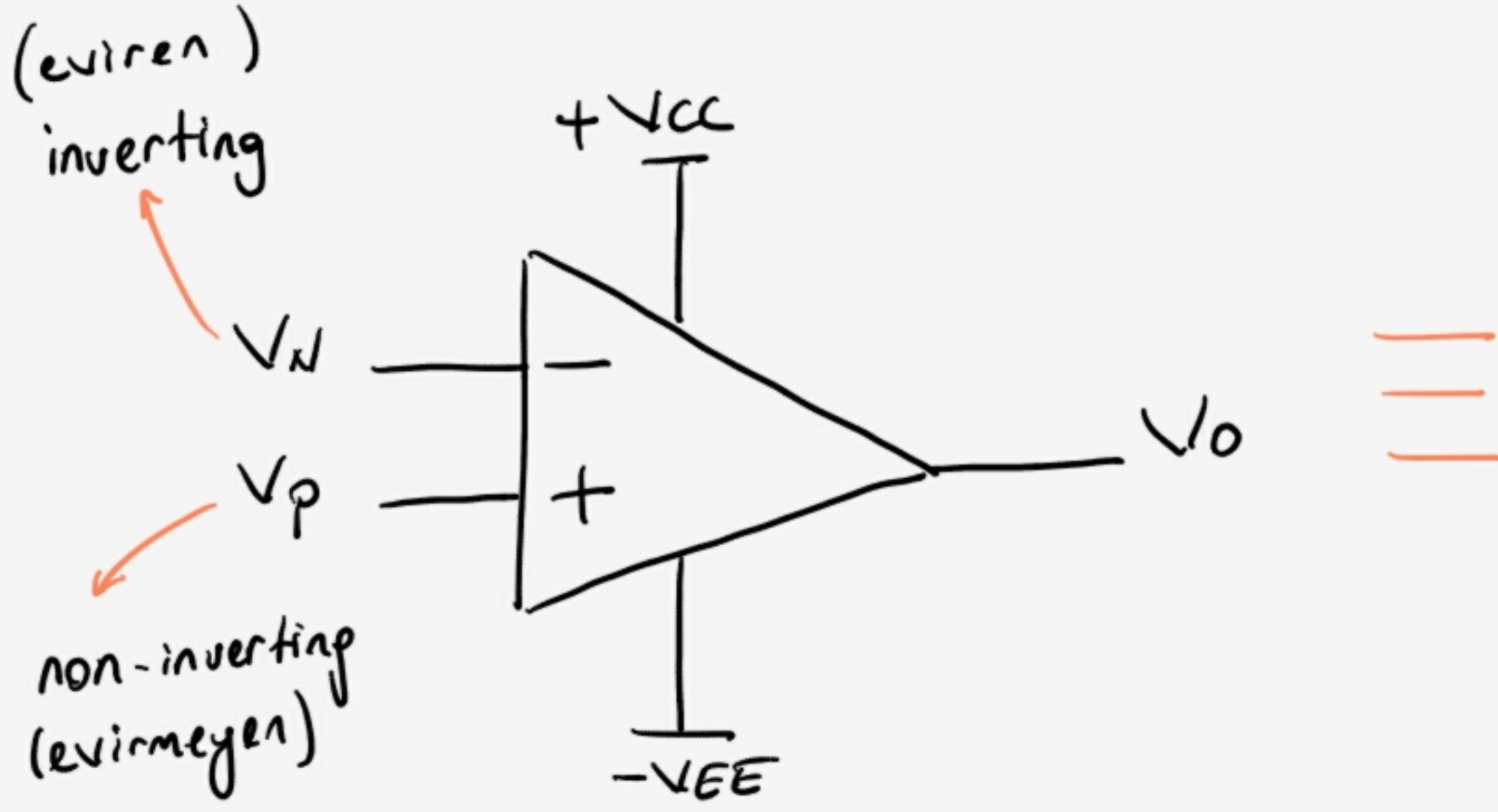
* Farklı kuvvetlendirici tiplerinin ideal karakteristikleri;

	Input	Output	Kuvv. Tipi	Kazanç	R_i	R_o
1	V_{in}	V_{out}	Gerilim	V/V	∞	0
2	i_{in}	i_{out}	Akım	A/A	0	∞
3	V_{in}	i_{out}	Trans-conductance	A/V	∞	∞
4	i_{in}	V_{out}	Trans-resistance	V/A	0	0

OPAMP (Operational Amplifier)

* Çok yüksek gerilim kazancı $\Rightarrow$ $\frac{LM741}{200.000 \text{ V/V}} \rightarrow 20 \log_{10} 200.000 = 106 \text{ dB}$
 $\hookrightarrow 200 \text{ V/mV}$

$\frac{OP-77}{12 \cdot 10^6 \text{ V/V}} \rightarrow 141.6 \text{ dB}$
 $\hookrightarrow 12 \text{ V/}\mu\text{V}$



r_d : differential input res.

a : Voltage gain

r_o : output res.

open-loop parameters
 (açık çevrim parametreleri)

$V_D = V_P - V_N$
 fark giriş
 işaret

$$V_O = a V_D = a (V_P - V_N)$$

Opamp = fark kuvv.

$$V_D = \frac{V_O}{a}$$

$\Rightarrow 741 \text{ OPAMP};$

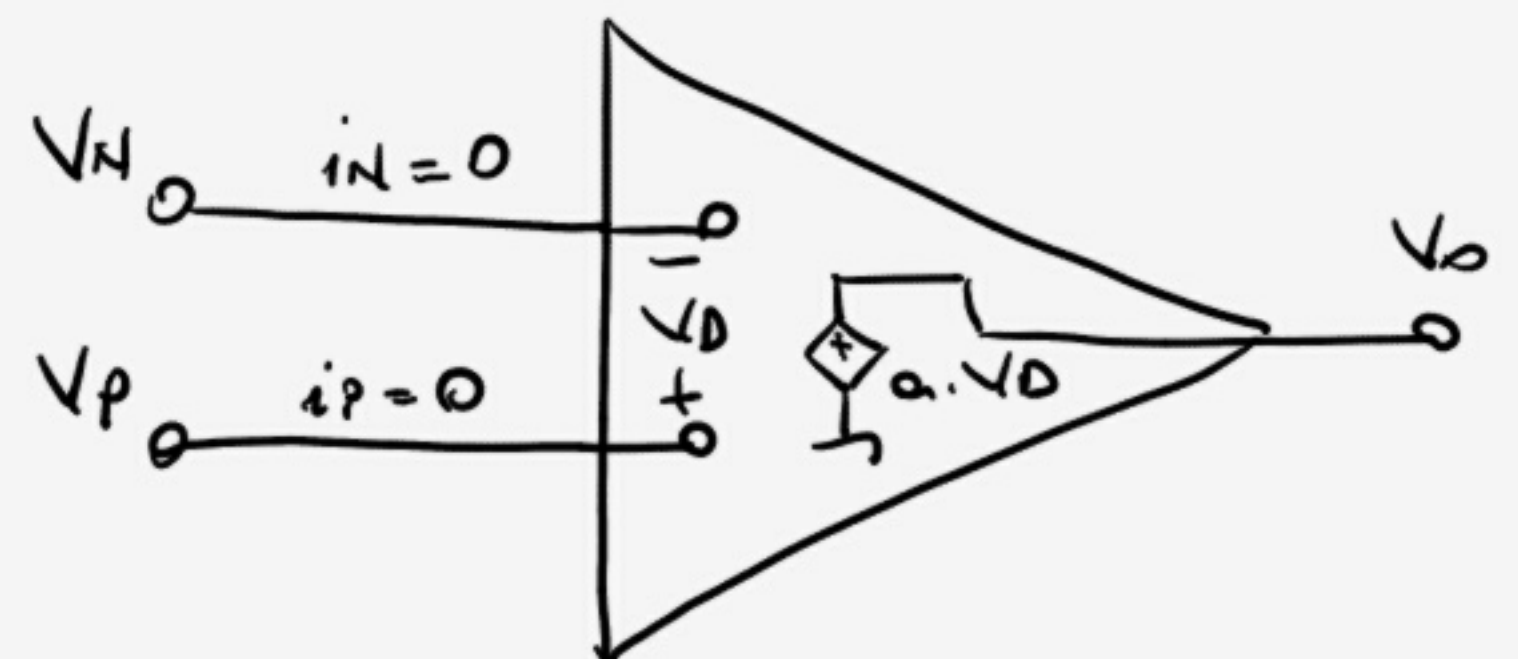
$V_O = 6 \text{ V} \Rightarrow V_D = \frac{6}{200000} = 30 \mu\text{V}$ çok küçük

$\Rightarrow OP-77; \Rightarrow V_D = \frac{6}{12 \cdot 10^6} = 0.5 \mu\text{V}$

İdeal Opamp

loading $\downarrow \rightarrow R_i$ çok büyük
 R_o çok küçük olması

Opamp $\rightarrow a = \infty$
 $r_d = \infty$
 $r_o = 0$
 $i_P = i_N = 0$



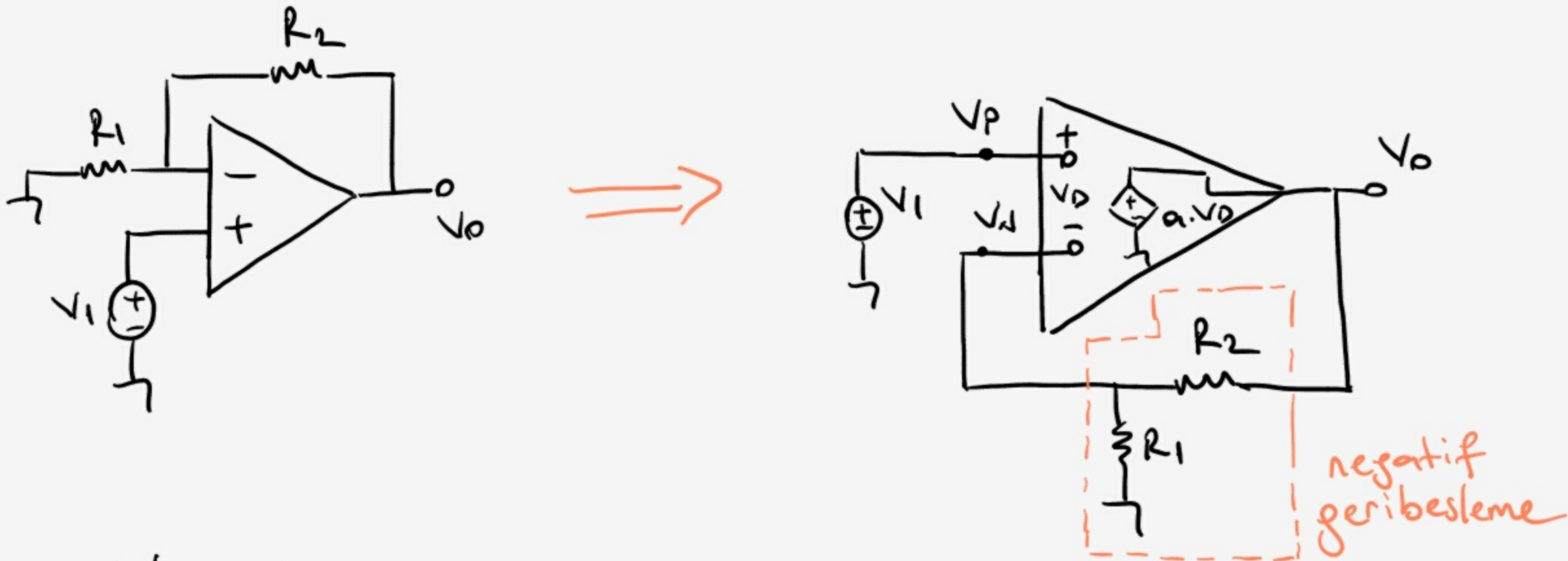
- ideal -

X

OPAMP Devreleri

* Bu noktadan itibaren opamp bir devre elemanı olarak düşünülecek, yalnızca ihtiyacı duyduğumuzda iç yapısı ile ilgilenilecektir.

⇒ Evirmeyen Kuvvetlendirici (Noninverting Amp.)



$$V_p = V_1$$

$$V_N = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_o \Rightarrow V_N = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \cdot V_o \Rightarrow V_N \text{ gerilimi } V_o' \text{ a bağılı}$$

$$V_o = a(V_p - V_N)$$

$$\Rightarrow V_o = a \left(V_1 - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \cdot V_o \right)$$

$$\Rightarrow A = \frac{V_o}{V_1} = \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}_{\text{pozitif (+)}} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) / a}}_{\text{pozitif (+)}} \quad \left. \vphantom{\frac{V_o}{V_1}} \right\} \text{ evirmeyen kuv. (noninverting amp.)}$$

a : açık çevrim kazanç (çok büyük)

A : kapalı çevrim kazanç

Örnek:

Yukarıdaki devre için;

$$V_1 = 1V, R_1 = 2k, R_2 = 18k$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) } a = 100 \text{ V/V} \\ \text{b) } a = 10^4 \text{ V/V} \\ \text{c) } a = 10^6 \text{ V/V} \end{array} \right\} V_o = ?$$

$$A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) / a} \Rightarrow$$

$$\text{a) } V_o = 10 \cdot \frac{1}{1 + \frac{10}{100}} = 9.091 \text{ V}$$

$$\text{b) } V_o = 9.990 \text{ V}$$

$$\text{c) } V_o = 9.999 \text{ V}$$

$$\frac{V_o}{V_1} \Rightarrow V_o = A \cdot 1 = A$$

İdeal Opamp Durumunda; $a = \infty$

$$A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + \frac{(1 + \frac{R_2}{R_1})}{a}} \Rightarrow A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

* Bu devrenin ($V_1 = 1V$) çıkışının $2V$ olmasını istiyorsak, basitçe dirençleri değiştirerek yeterlidir.

$$V_0 = 2V \Rightarrow A = 2 \text{ dir}$$

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 1 \Rightarrow R_2 = R_1 \text{ seçilir.}$$

(10k, 10k)

* $A = 10$ için;

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 9 \Rightarrow \begin{matrix} R_1 = 10k \\ R_2 = 90k \end{matrix} \text{ olabilir.}$$

* Kazancı onluk olarak değiştirmek isterseniz,

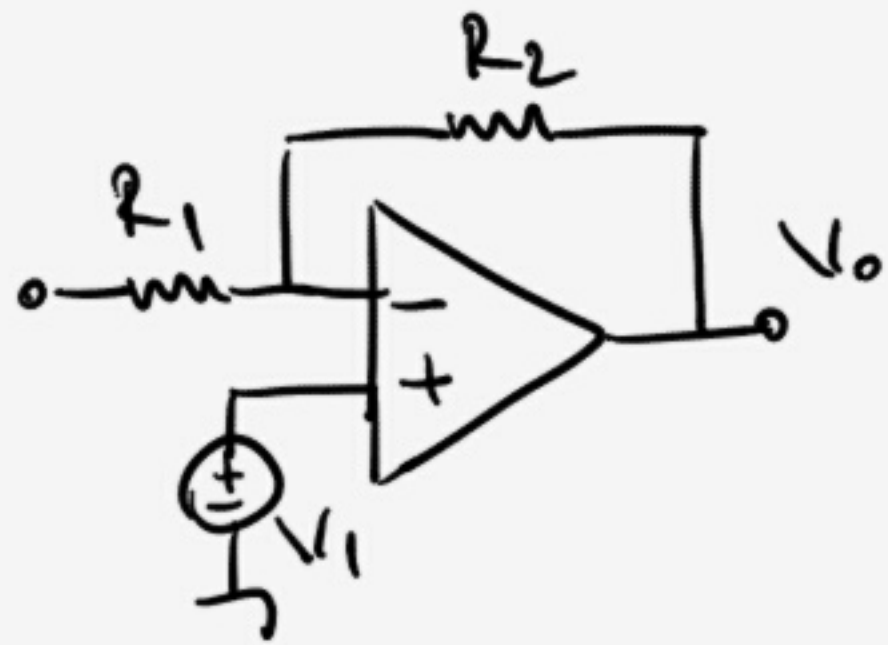
$$\left. \begin{matrix} R_1 = 10k \text{ olsun} \\ R_2 = \text{pot (100k)} \end{matrix} \right\} A \Rightarrow 1 \leq A \leq 11$$

P.S: Tüm bu kolaylığı sağlayabilmek için $a = \infty$ olmalıdır.

$\Rightarrow$ Kazanca yalnızca dirençlere bağlı olduğundan, tüm dirençler de aynı ortamda eşit oranda sıcaklıktan etkileneceğinden, kazanca sıcaklıktan bağımsızdır!

$\Rightarrow$ Bunun aksine, a (açık çevrim kazancı) opampın iç yapısındaki diot, transistör, direnç gibi elemanların karakteristiklerine bağlı olduğu için termal kayma olabilir.

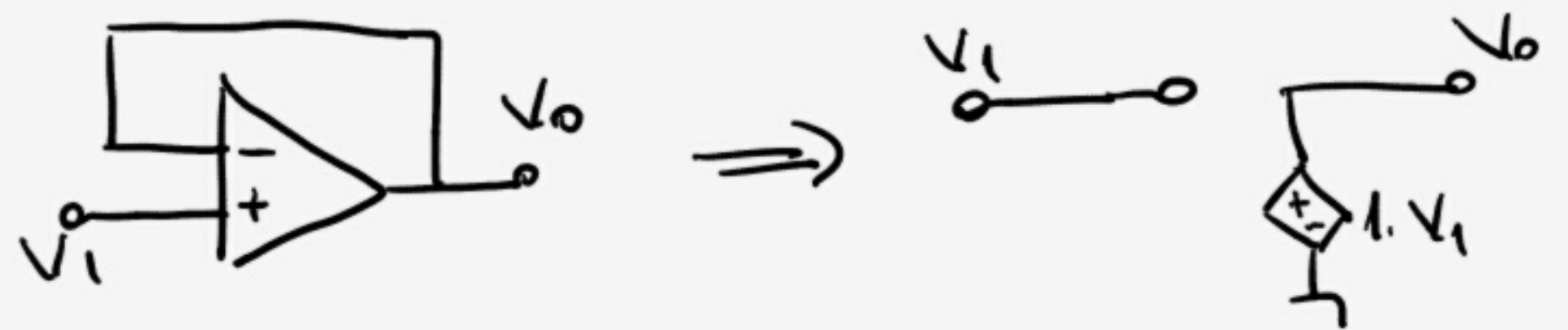
Gerilim Takipçi (Voltage Follower) / Tampon (Buffer)



$$\left. \begin{matrix} R_1 = \infty \\ R_2 = 0 \text{ olursa} \end{matrix} \right\}$$

$$A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \Rightarrow A = 1, \text{ birim kazanç (unity gain)}$$

$$A = 1, R_i = \infty, R_o = 0$$

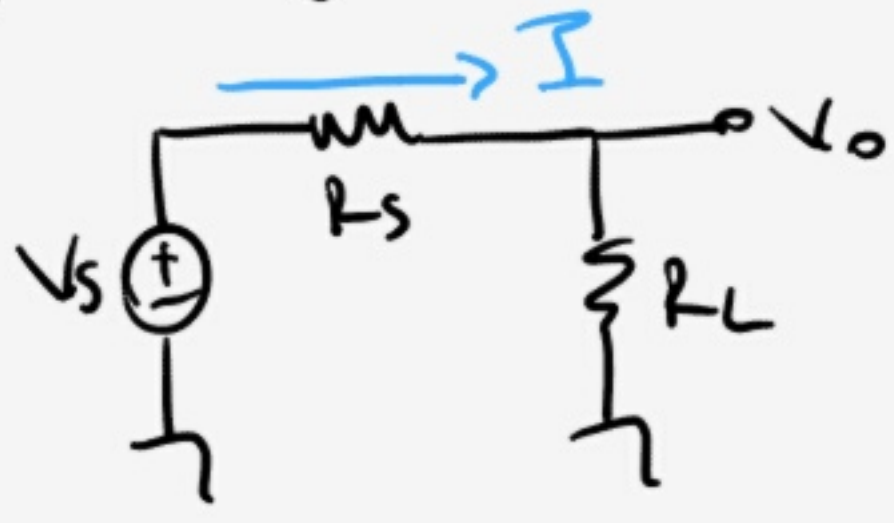


* direnç dönüştürücü (resistance transformer)

* Bir V_s kaynağını R_L yüküne bağlayacağımızı varsayalım.

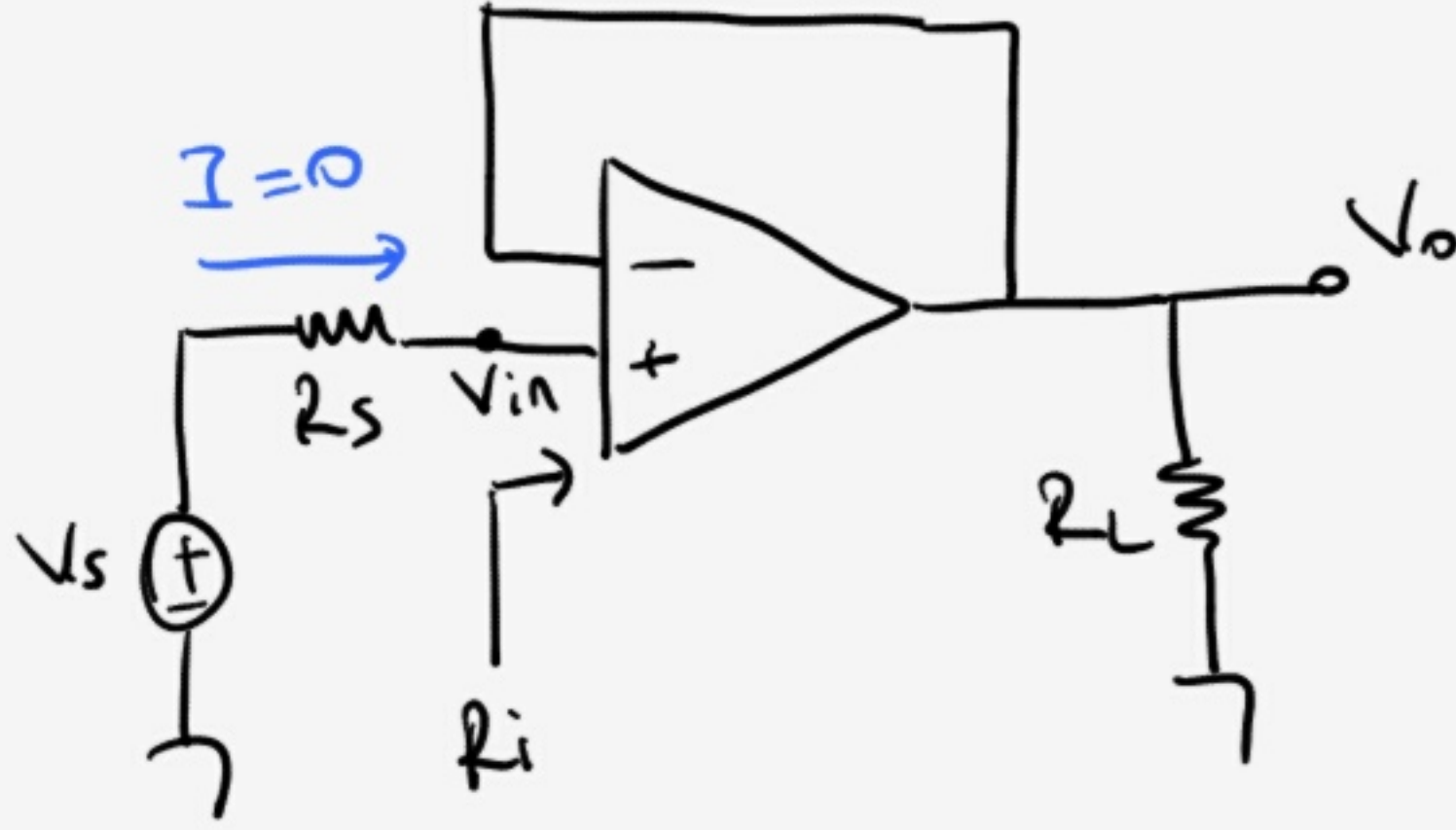
$\Rightarrow$ Kaynak ideal ise gerilim düşüşü olmadan V_s R_L 'ye bir kablo ile bağlanır.

$\Rightarrow$ Eğer kaynak ideal değilse; kaynağın R_s çıkış direnci sıfır değildir.



$$V_o = \frac{V_s}{R_s + R_L} \cdot R_L$$

(R_s üzerinde gerilim düşüşü olur.)



$R_i = \infty$ old. için,

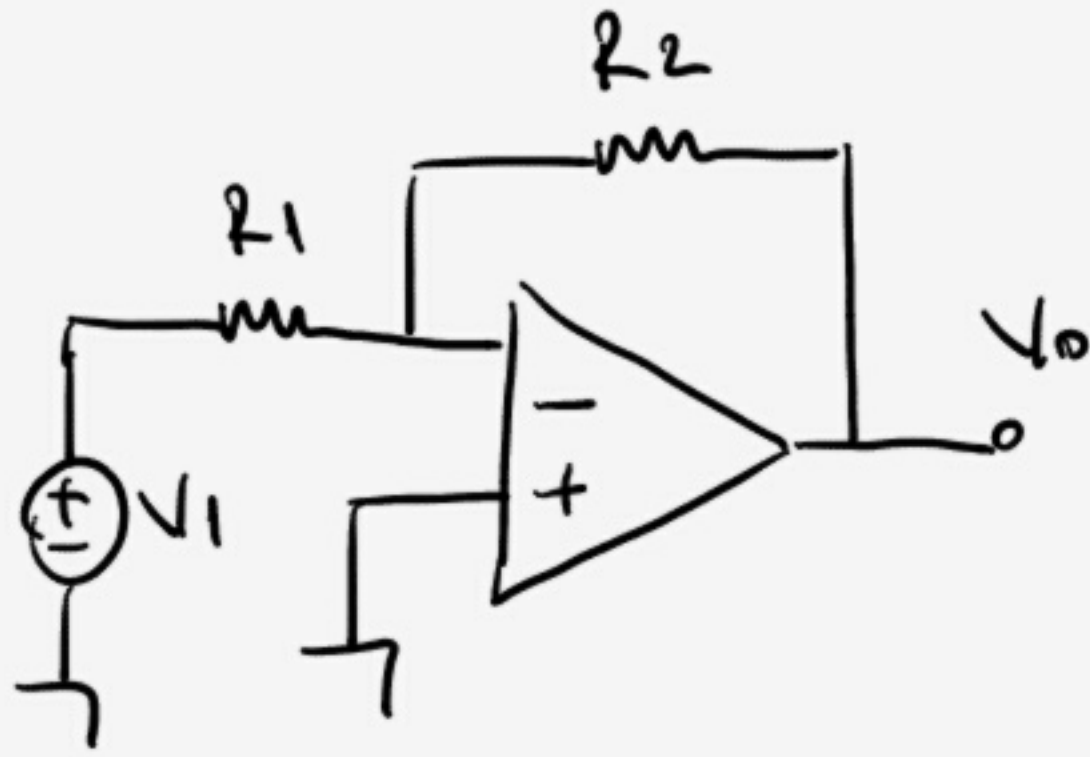
$I = 0$ dur. O halde;

$V_s = V_{in} = V_o$ olur.

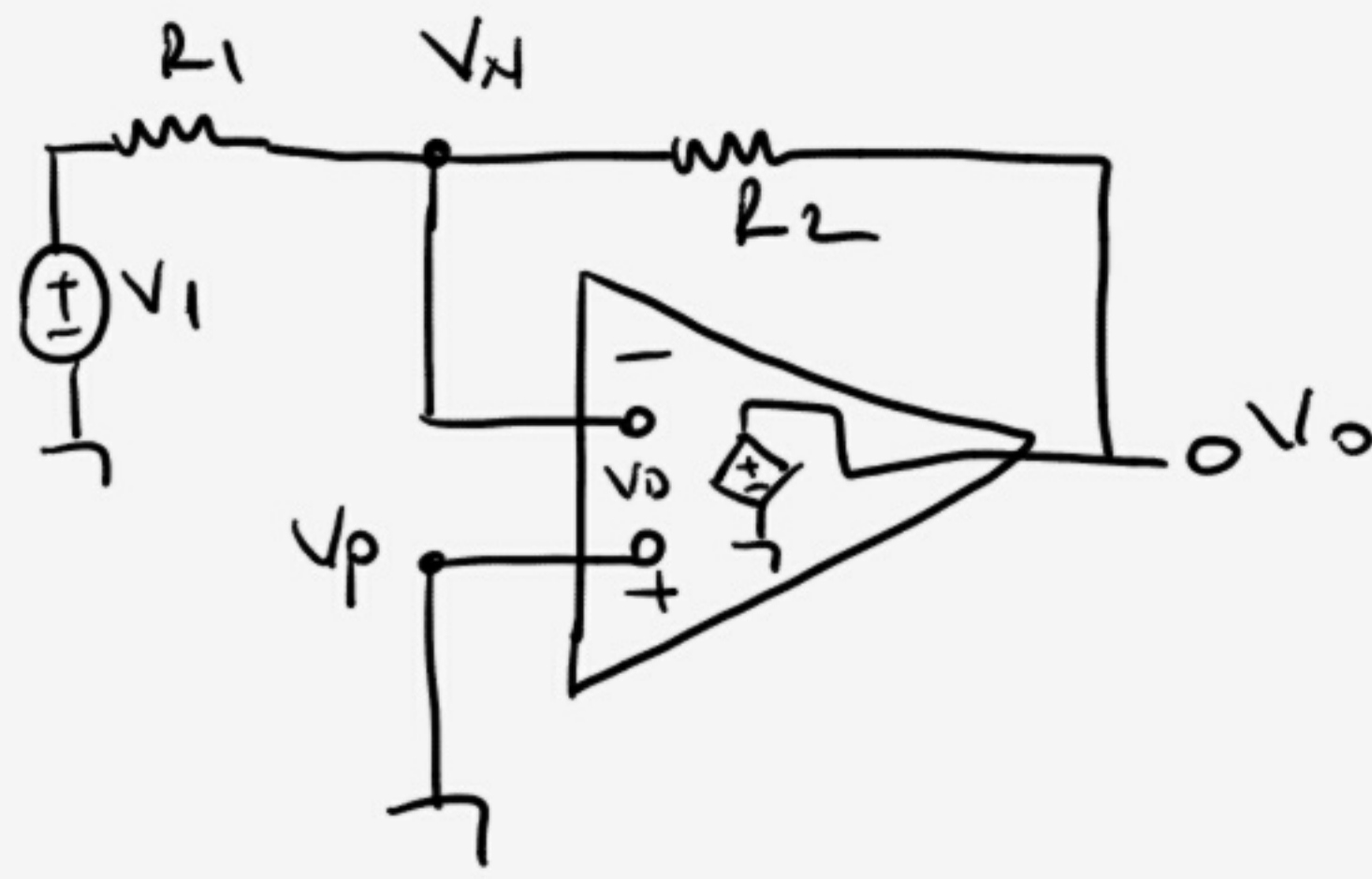
(R_s üzerinde gerilim düşüşü olmaz.)

(V_s kayıpsız olarak R_L 'ye bağlanır.)

Eviren Kuvvetlendirici (Inverting Amp.)



$\Rightarrow$



$$V_p = 0$$

$$V_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o$$

← Süperpozisyon teoremi

$$= \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} V_1 + \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} V_o$$

$$V_o = a(V_p - V_N);$$

$$V_o = a \left(\frac{-1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} V_1 - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} V_o \right)$$

$$A = \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

idealde

$$A = \frac{V_o}{V_1} = \left(\frac{-R_2}{R_1} \right) \frac{1}{1 + \left(\frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{a} \right)}$$

negatif (-)

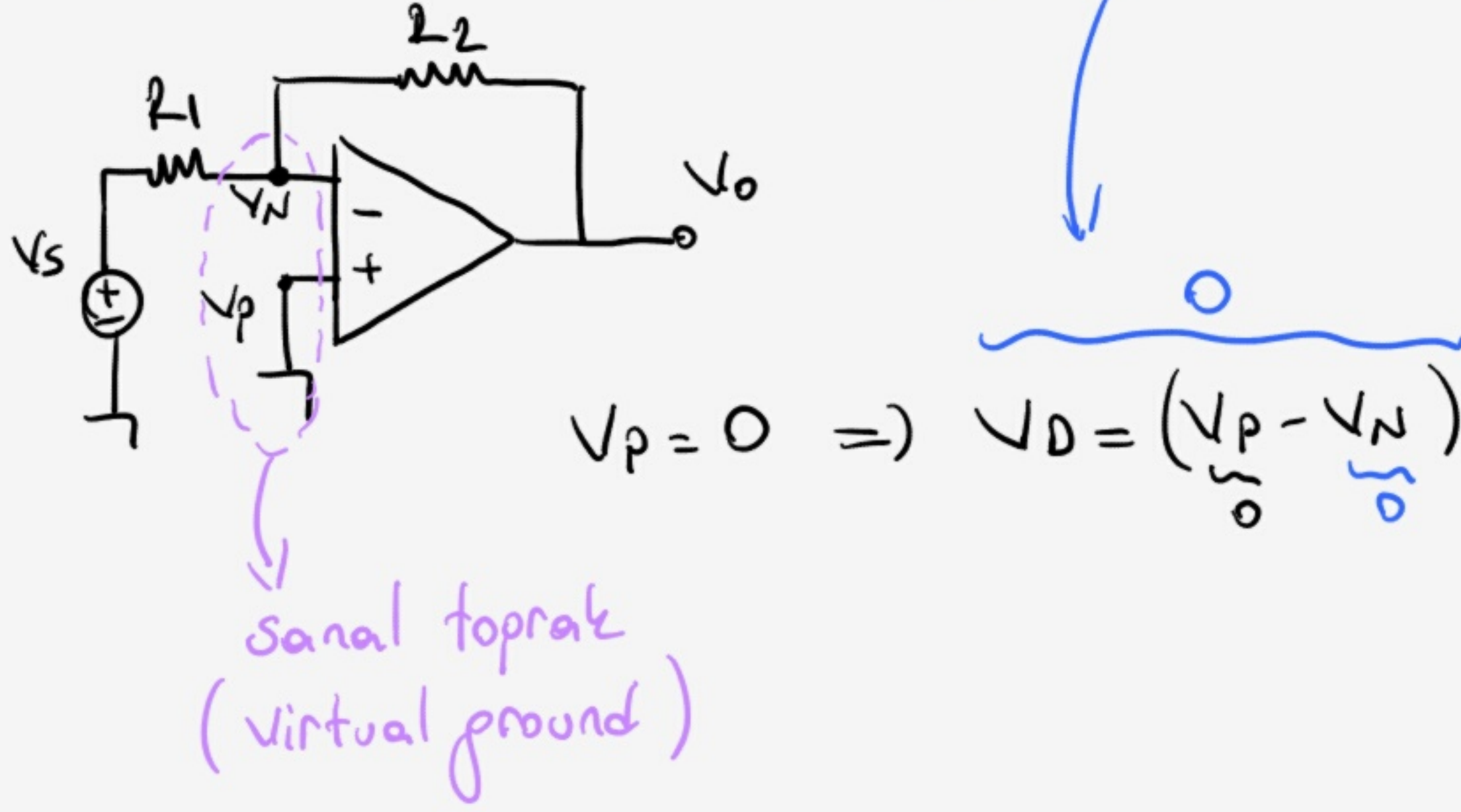
pozitif (+)

180° faz kayması
(-) eviren kuv. (inverting amp.)

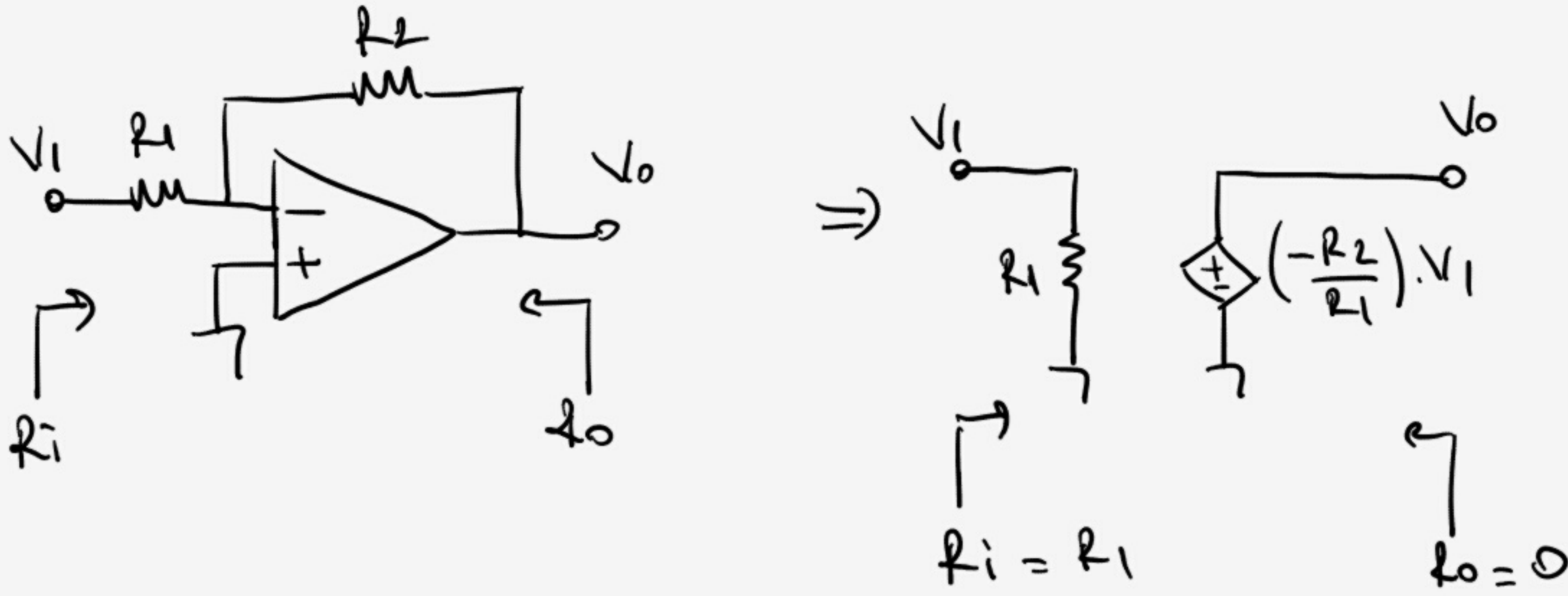
$$\Rightarrow V_o = a \cdot V_D \Rightarrow V_D = \frac{V_o}{a}$$

çok büyük
idealde ∞

↓
çok küçük
idealde 0



Giriş-Gıkış Dirençleri



İdeal Opamp'ta Devre Analizi

$$V_o = a \cdot V_D, \quad a = \infty$$

$$\Rightarrow V_D = \frac{V_o}{\infty} = 0$$

$$V_D = V_P - V_N$$

$$V_N = V_P - V_D = V_P - \frac{V_o}{\infty} \Rightarrow V_N = V_P$$

* V_N ve V_P altında birbirini
ile kısa devre olmamalarına
röpmen, sanki kısa devre
gibi görünür. ($V_P = V_N$)

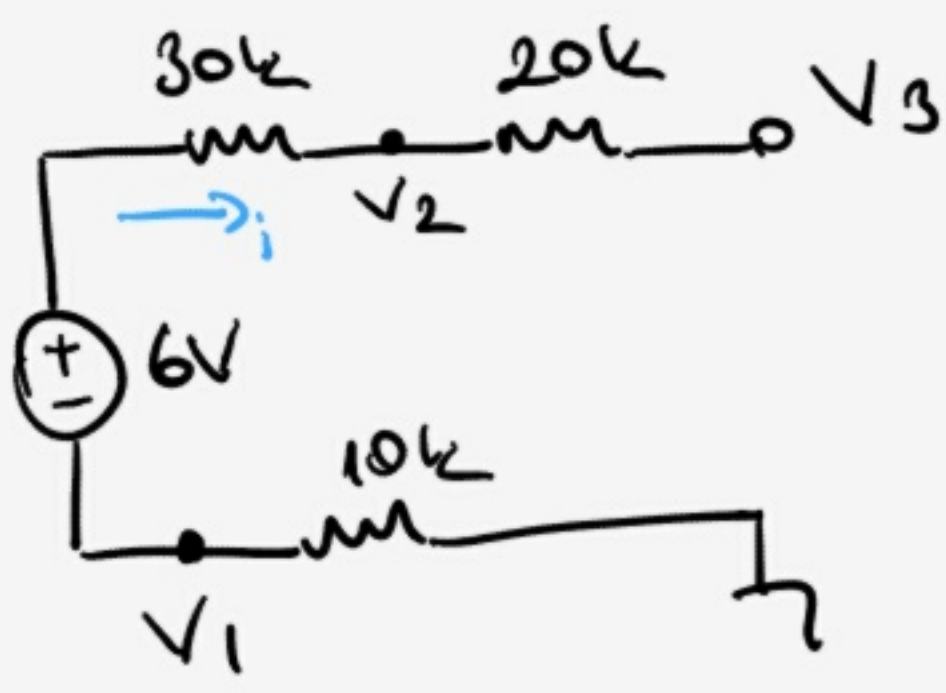
$\Rightarrow$ Giriş akımı incelenirse;

* Opamp'ın giriş direnci ∞ old. için girislerinden akım akmaz.

Bu durumda (V_N ve V_P 'nin kısa devre gibi görünmesinin aksine) V_N ve V_P açık devre gibi görünür. (gerçekte açık devre değildir)

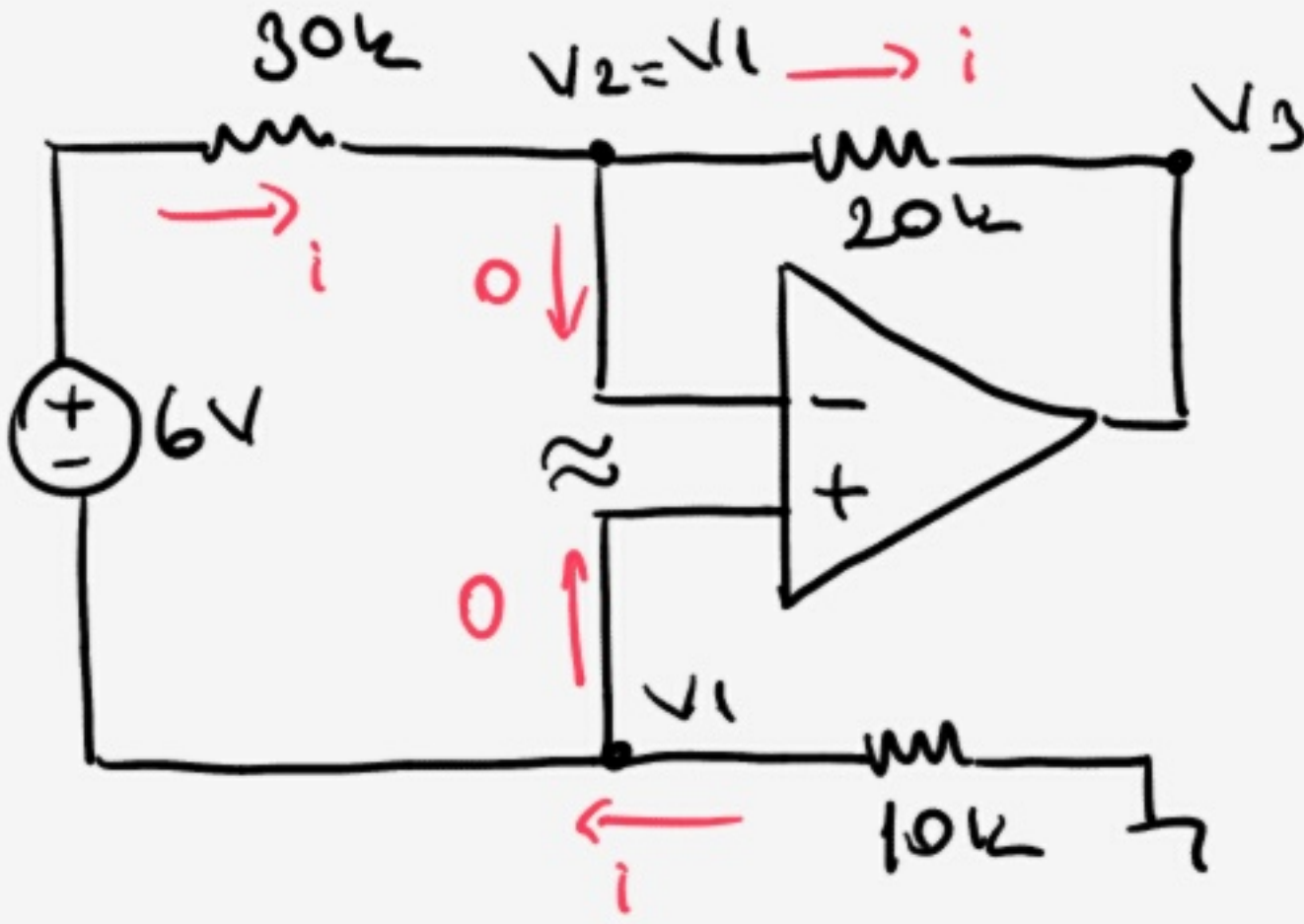
P.S : Bu duruma "sanal toprak (virtual ground)" denir.

Aşağıdaki devre göz önüne alınsa;



* Devre tamamlandığı için;
 $i=0$, $V_1=0$, $V_2=V_3=6V$
 dur.

Opamp eklenirse ne olur?



V_1 'e düğüm yazılırsa;

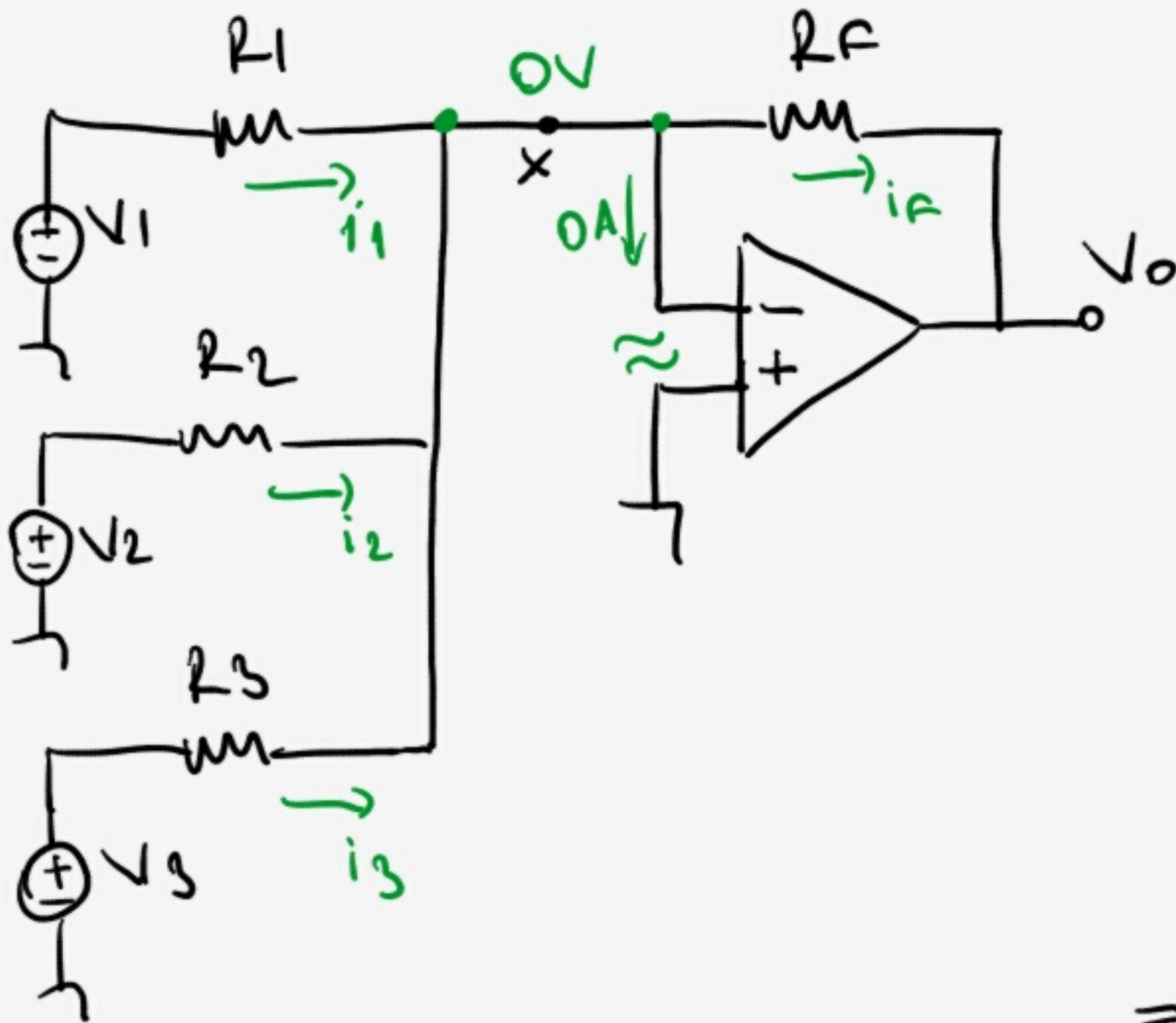
$$\frac{0-V_1}{10k} = \frac{V_1+6-V_2}{30k}, \quad V_1=V_2 \text{ idi};$$

$$V_1 = -2V$$

$$i = \frac{0-V_1}{10k} = \frac{2}{10} = 0.2 \text{ mA}$$

$$V_3 = V_2 - 20k \cdot i = -2 - 20k \cdot 0.2m = -6V$$

Toplayıcı Devre



$$i_1 + i_2 + i_3 = i_F$$

X noktasına düğüm yazılırsa;

$$\frac{V_1-0}{R_1} + \frac{V_2-0}{R_2} + \frac{V_3-0}{R_3} = \frac{0-V_0}{R_F}$$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = -\frac{V_0}{R_F}$$

$$\Rightarrow V_0 = -\left(\frac{R_F}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_F}{R_2} \cdot V_2 + \frac{R_F}{R_3} \cdot V_3\right)$$

* Çıkış gerilimi, giriş gerilimlerinin bir katsayı ile çarpımlarının toplamıdır.

* Bu katsayı ise dirençlerin oranıdır.

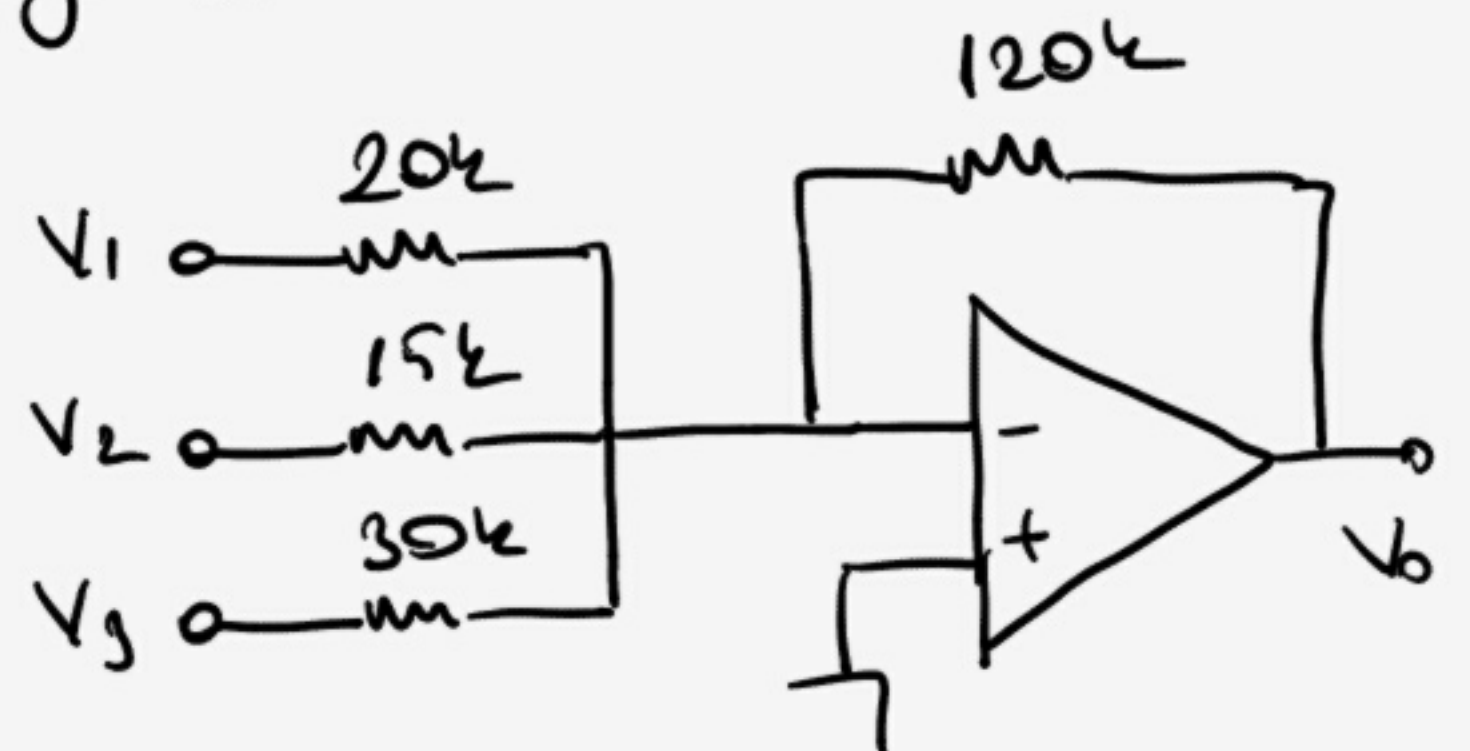
Örneği: $V_0 = -2(3V_1 + 4V_2 + 2V_3)$ devresini tasarlayınız.

$$V_0 = -6V_1 - 8V_2 - 4V_3$$

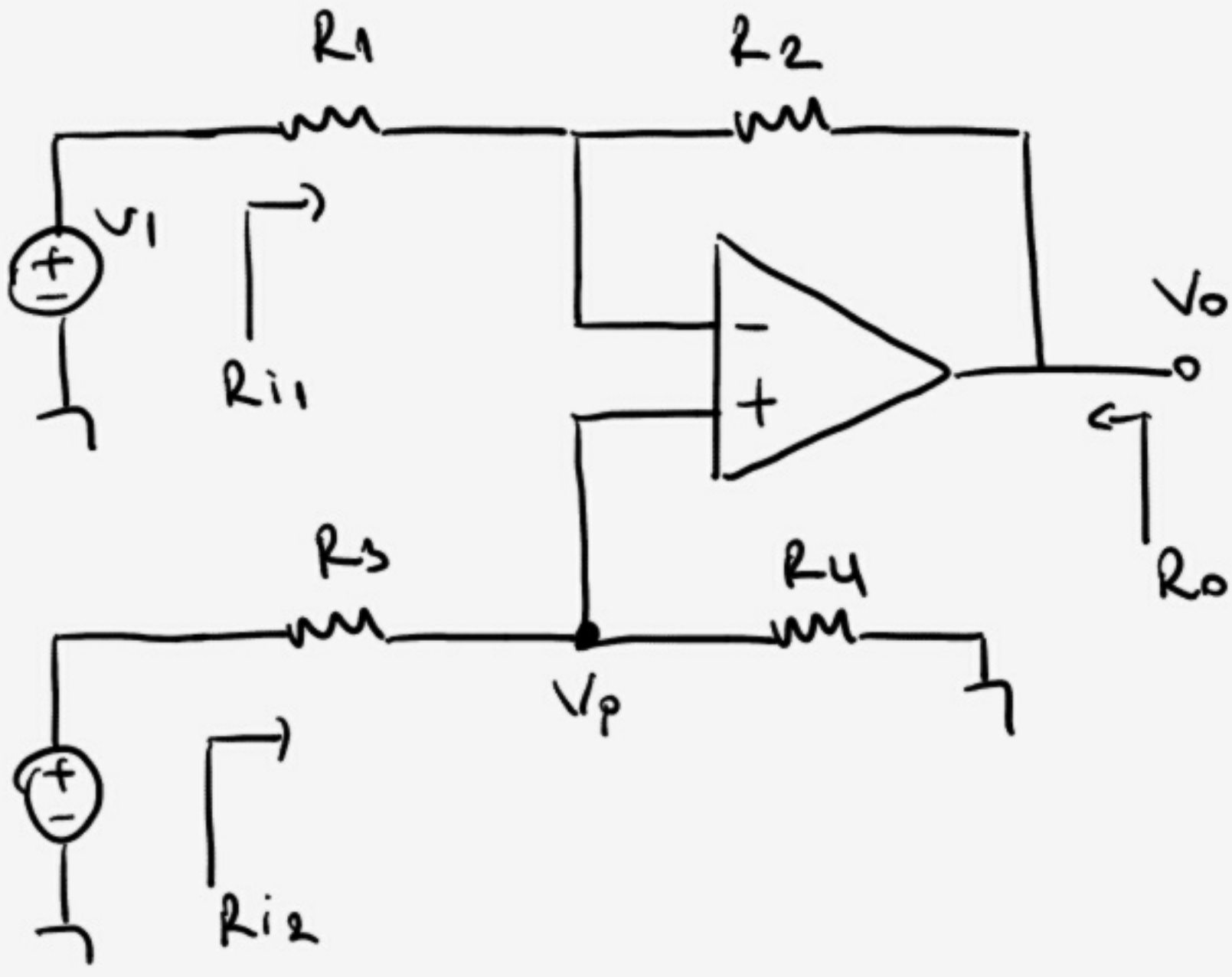
$$\Rightarrow \frac{R_F}{R_1} = 6, \quad \frac{R_F}{R_2} = 8, \quad \frac{R_F}{R_3} = 4 \text{ olmalı}$$

$R_F = 120k$ seçelim,

$$R_1 = 20k, \quad R_2 = 15k, \quad R_3 = 30k \text{ olur.}$$



Fark Alıcı Devre (Difference Amp.)



Süperpozisyon teoremine göre;

$$V_o = V_{o1} + V_{o2}$$

$V_2 = 0$
iken V_o

$V_1 = 0$
iken V_o

V_{o1} 'i bulalım ($V_2 = 0$); → (inverting amp.)

$$V_{o1} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_1, \quad R_{i1} = R_1$$

V_{o2} 'yi bulalım ($V_1 = 0$); → (noninverting amp.)

$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_p = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \cdot V_2$$

$$R_{i2} = R_3 + R_4$$

$$R_o = 0$$

$$V_o = V_{o1} + V_{o2}$$

$$= \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1 + R_1/R_2}{1 + R_3/R_4} V_2 - V_1 \right)$$

Örneği;

$V_o = V_2 - 3V_1$ ve $R_{i2} = R_{i1} = 100k\Omega$ olan bir devre tasarlayınız

$$V_o = V_2 - 3V_1$$

burun için
 $\frac{R_2}{R_1} = 3$ olmalı

$$\Rightarrow R_1 = 100k\Omega$$

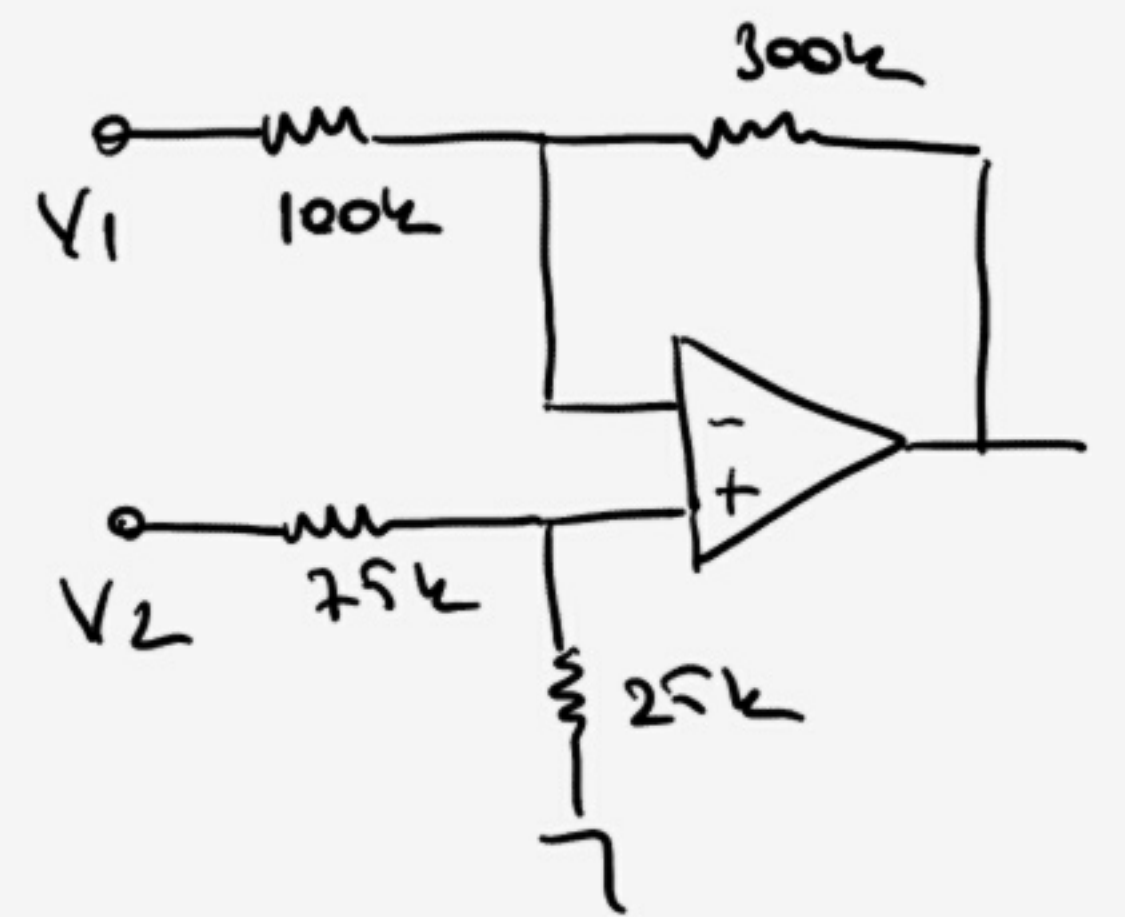
$$R_2 = 300k\Omega$$

$$\frac{V_{o2}}{V_2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) = 1 \text{ olmalı}$$

$$R_{i2} = 100k \Rightarrow R_3 + R_4 = 100k \text{ olmalı}$$

$$R_3 = 75k$$

$$R_4 = 25k$$



⇒ Fark alıcı devrede,

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} \text{ olursa}$$

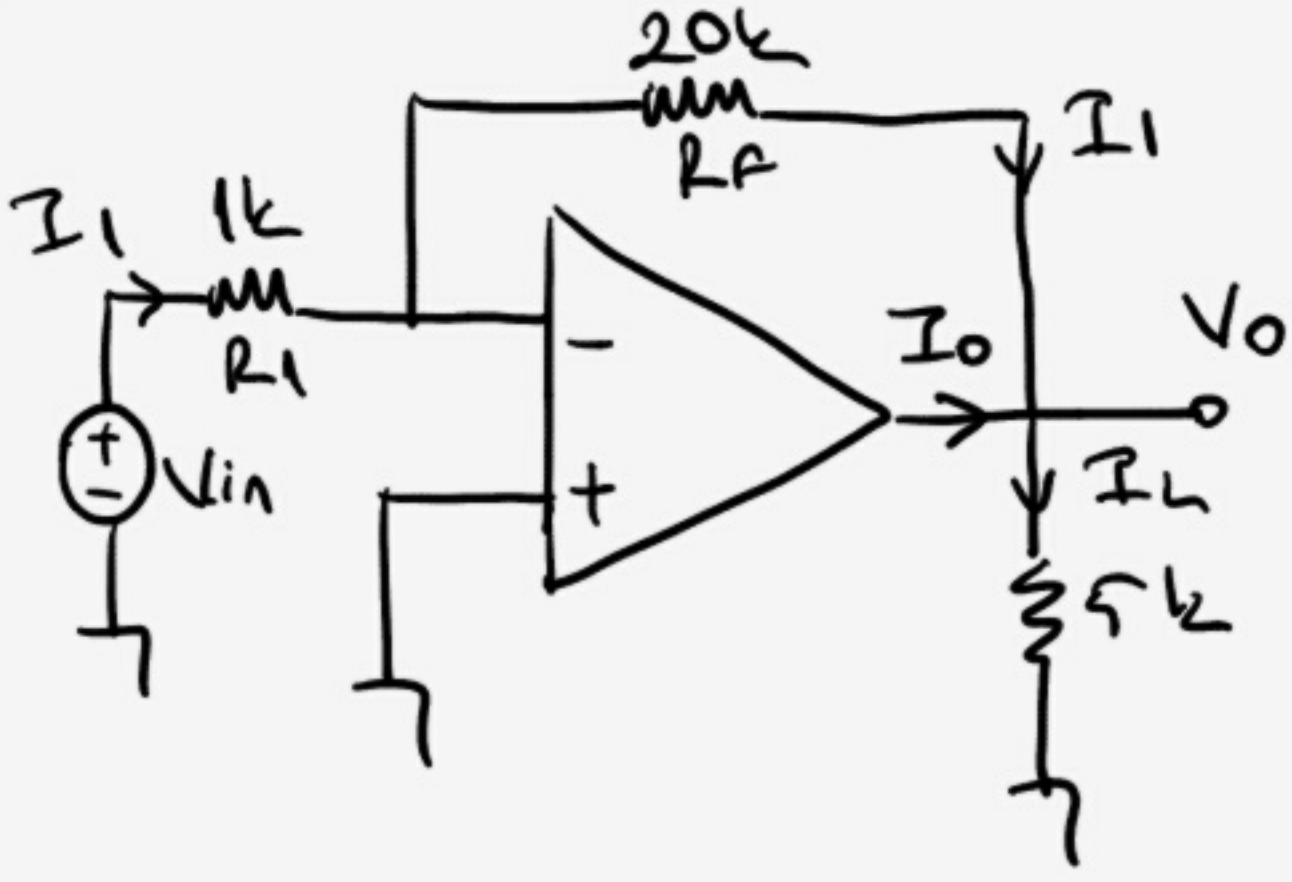
$$\Rightarrow V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(\frac{1 + \cancel{R_1/R_2}}{1 + \cancel{R_3/R_4}} \cdot V_2 - V_1 \right)$$

değeli köprü
(balanced bridge)

$$\Rightarrow V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

Örnek Sorular:

1)



$$V_{in} = 1m \sin \omega t$$

$$V_o = ?$$

$$I_L = ?$$

$$I_o = ?$$

Çözüm 1) $V_p = 0 \Rightarrow V_N = V_p = 0$

V_N 'e düğüm yazılırsa;

$$\frac{V_N - V_{in}}{R_1} + \frac{V_N - V_o}{R_f} = 0 \Rightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_{in} = -\frac{20k}{1k} \cdot V_{in}$$

$$= -20m \sin \omega t$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{-20m \sin \omega t}{5k} = -4 \mu \sin \omega t (A)$$

I_L ters yönde akıyor (sinking)

$$I_1 = \frac{V_{in} - V_N}{R_1} \Rightarrow I_1 = \frac{1m \sin \omega t}{1k} = 1 \mu \sin \omega t (A)$$

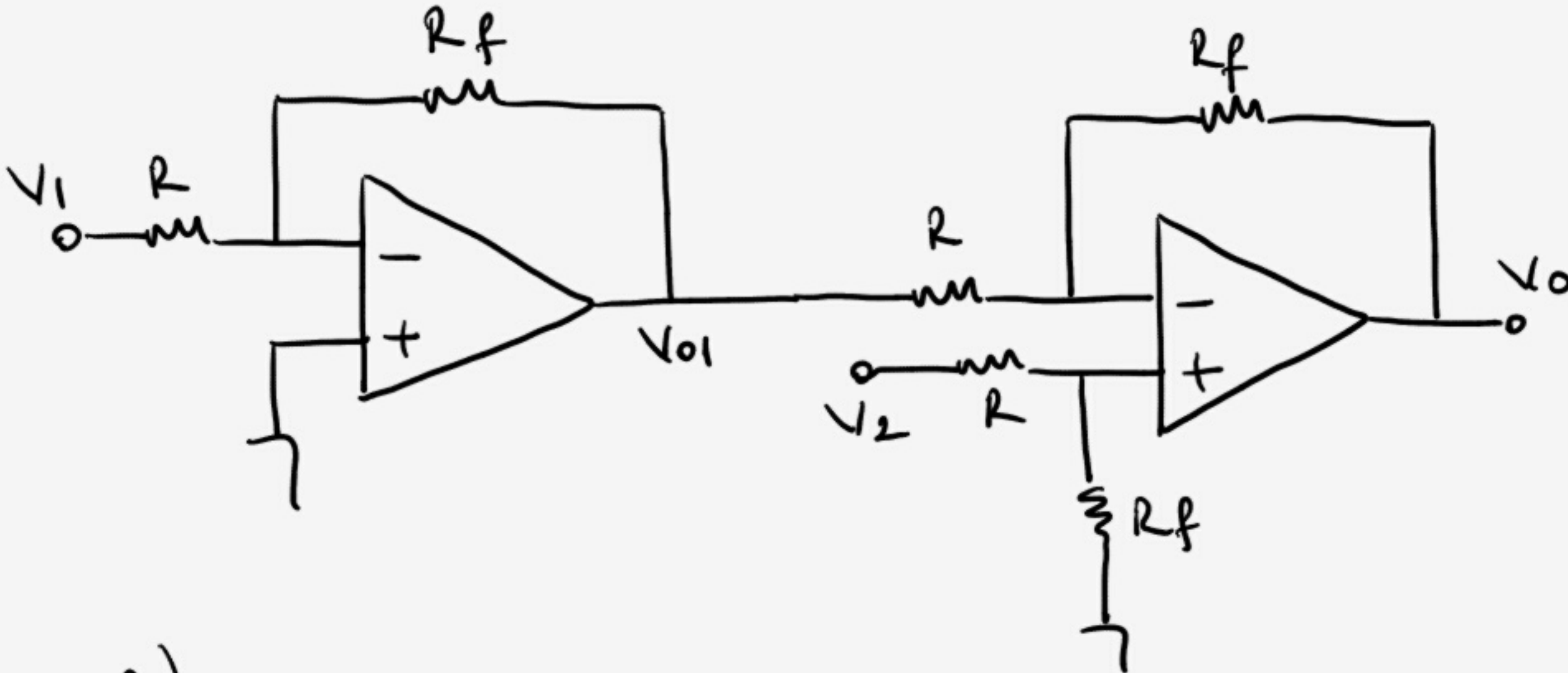
V_o 'a düğüm yazılırsa;

$$I_o + I_1 = I_L \Rightarrow I_o = I_L - I_1$$

$$\Rightarrow I_o = -4 \mu \sin \omega t - 1 \mu \sin \omega t$$

$$= -5 \mu \sin \omega t (A)$$

2)



$$V_o = a \cdot V_1 + b \cdot V_2 \text{ ise}$$

$$a = ? , b = ?$$

Çözüm 2) $\frac{V_{N1} - V_1}{R} + \frac{V_{N1} - V_{01}}{R_f} = 0 \dots \textcircled{1}$

$$V_{p1} = 0 \Rightarrow V_{p1} = V_{N1} = 0$$

$$\Rightarrow V_{01} = -\frac{R_f}{R} \cdot V_1 \dots \textcircled{2}$$

Çözüm 2) İkinci opamp için,
devam

$$\frac{V_{N2} - V_{O1}}{R} + \frac{V_{N2} - V_O}{R_f} = 0 \quad \text{--- (3)}$$

$$\frac{V_{P2} - V_2}{R} + \frac{V_{P2} - 0}{R_f} = 0 \quad \text{--- (4)}$$

V_{P2} ve V_2 için KVL yazılırsa,

$$V_{P2} = \frac{R_f}{R_f + R} \cdot V_2 \quad \text{--- (5)} \quad \text{ve} \quad V_{P2} = V_{N2}, \quad (\text{sonel tepkile})$$

(5) denklemini (3) te yerine konulursa;

$$\frac{\frac{R_f}{R_f + R} \cdot V_2 - V_{O1}}{R} + \frac{\frac{R_f}{R_f + R} \cdot V_2 - V_O}{R_f} = 0$$

$$\frac{\frac{R_f \cdot V_2 - (R_f + R) V_{O1}}{R_f + R}}{R} + \frac{\frac{R_f \cdot V_2 - (R_f + R) V_O}{R_f + R}}{R_f} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{R_f \cdot V_2 - (R_f + R) V_{O1}}{(R_f + R) \cdot R} + \frac{R_f \cdot V_2 - (R_f + R) V_O}{(R_f + R) R_f} = 0$$

$$\Rightarrow R_f^2 V_2 - R_f (R_f + R) V_{O1} + R \cdot R_f V_2 - R (R_f + R) V_O = 0$$

$$\Rightarrow V_2 R_f (R_f + R) - R_f (R_f + R) V_{O1} = R (R_f + R) V_O$$

$$\Rightarrow \frac{R_f}{R} V_2 - \frac{R_f}{R} \cdot \underbrace{V_{O1}}_{\text{(2) denklemini buraya konulursa}} = V_O$$

(2) denklemini buraya konulursa

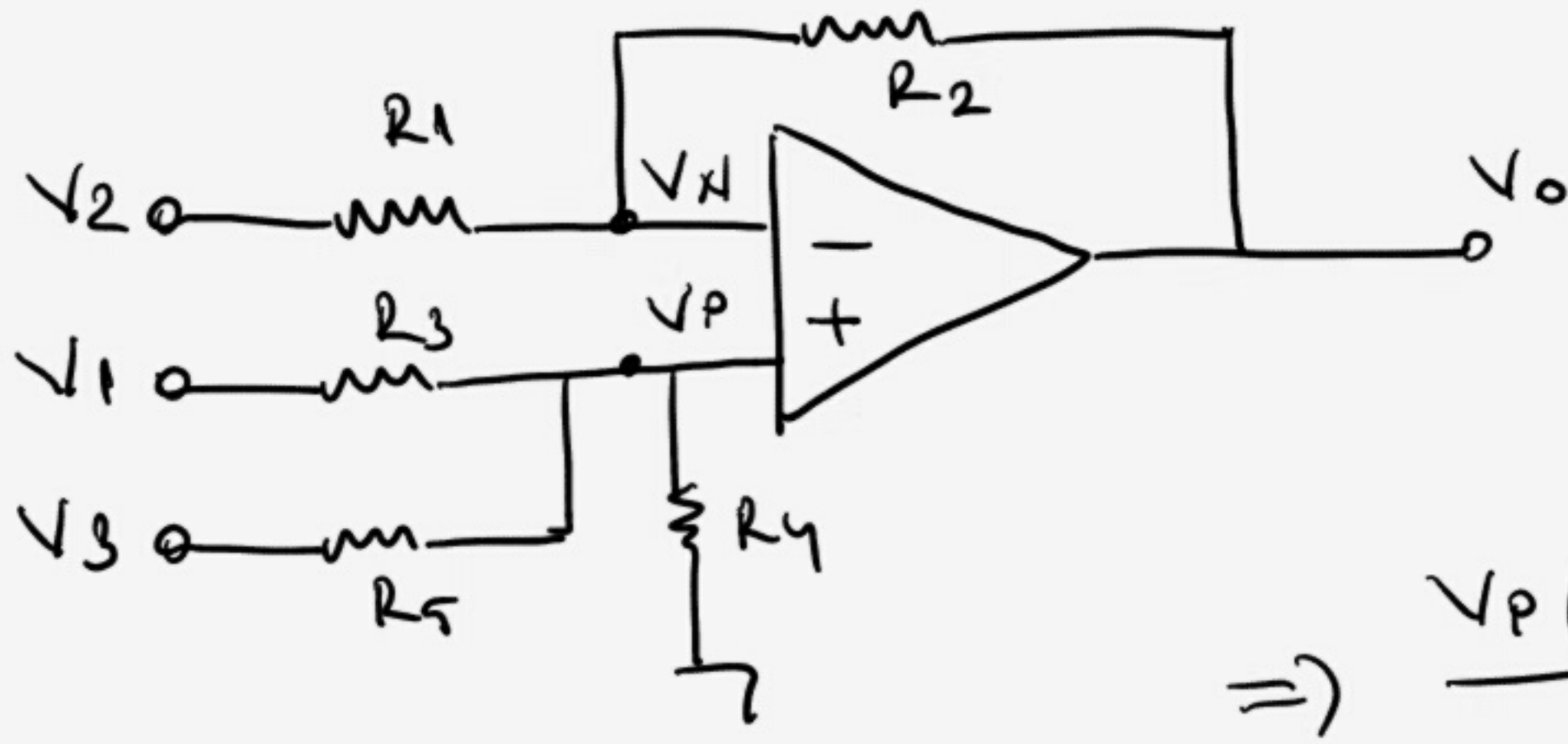
$$V_O = \frac{R_f}{R} V_2 - \frac{R_f}{R} \cdot \left(-\frac{R_f}{R} \cdot V_1 \right)$$

$$\Rightarrow V_O = \frac{R_f}{R} V_2 + \frac{R_f^2}{R^2} V_1$$

$$V_O = a \cdot V_1 + b \cdot V_2 \Rightarrow a = \frac{R_f^2}{R^2}, \quad b = \frac{R_f}{R}$$

3) $V_o = 3V_1 - 2V_2 + 4$ denklemini sağlayan opamp devresini tasarlayınız.

Çözüm 3) Fark alıcı devre olmalı için tasarım aşağıdaki gibi olmalı.



$$\frac{V_p - V_1}{R_3} + \frac{V_p - V_2}{R_1} + \frac{V_p - 0}{R_4} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{V_p (R_4 R_3 + R_3 R_1 + R_3 R_4)}{R_3 R_4 R_1} = \frac{R_4 R_3 V_1 + R_3 R_4 V_2}{R_3 R_4 R_1}$$

$$\Rightarrow V_p = \frac{R_4 R_3 V_1}{R_4 R_3 + R_3 R_1 + R_3 R_4} + \frac{R_3 R_4 V_2}{R_4 R_3 + R_3 R_1 + R_3 R_4}$$

V_N 'e KCL yazılırsa,

$$\frac{V_N - V_2}{R_1} + \frac{V_N - V_o}{R_2} = 0 \Rightarrow \frac{V_N (R_2 + R_1)}{R_1 R_2} - \frac{R_2 V_2}{R_1 R_2} = \frac{R_1 V_o}{R_1 R_2}$$

$$\Rightarrow \frac{V_N (R_2 + R_1)}{R_1 R_2} - \frac{V_2}{R_1} = \frac{V_o}{R_2}$$

$$\Rightarrow V_o = V_N \frac{(R_2 + R_1)}{R_1} - V_2 \frac{R_2}{R_1}$$

$V_N = V_p$ (sıralı toprak)

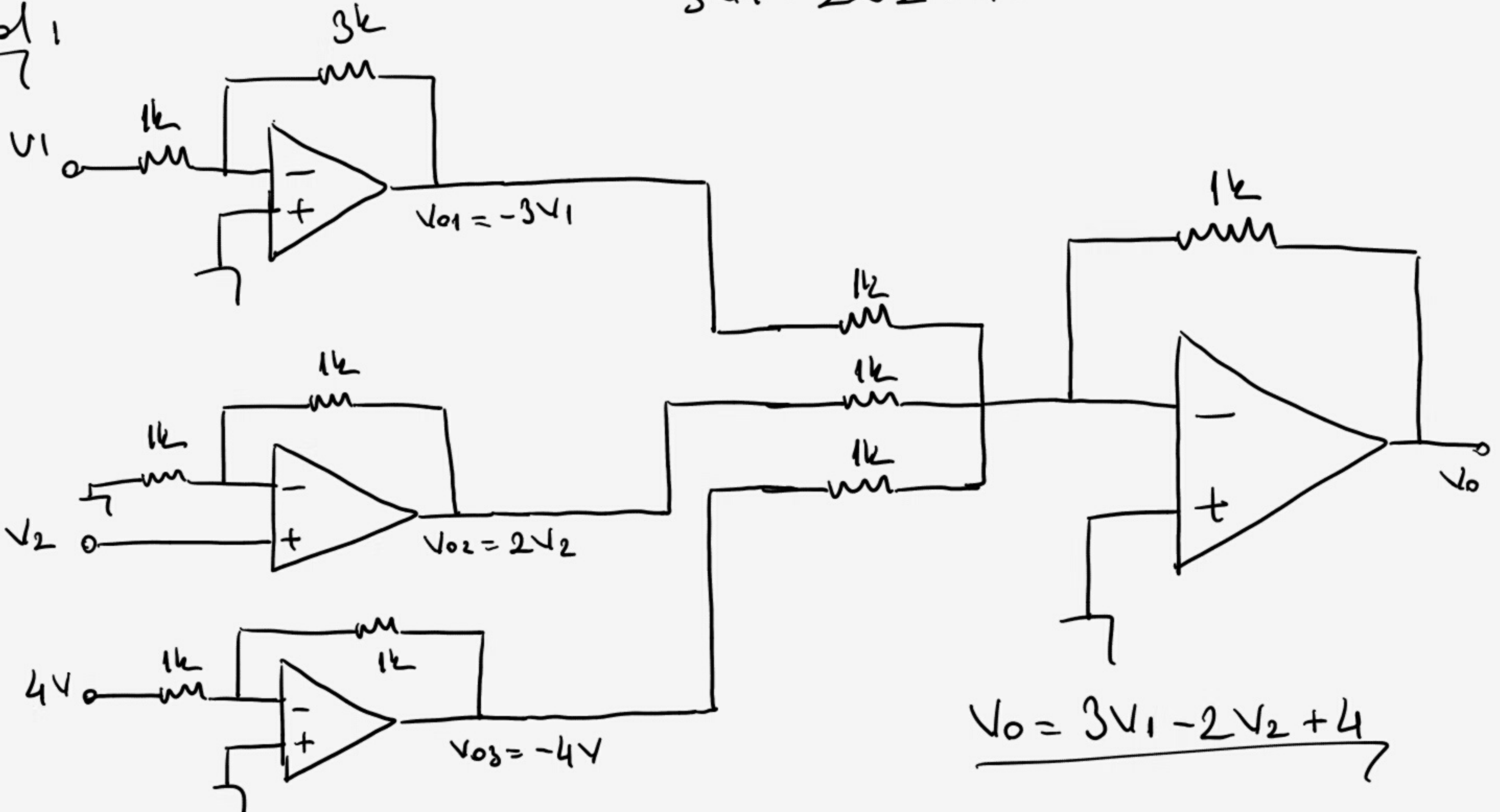
$$\Rightarrow V_o = \frac{R_4 R_3 V_1}{R_4 R_3 + R_3 R_1 + R_3 R_4} \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_1} + \frac{R_3 R_4 V_2}{R_4 R_3 + R_3 R_1 + R_3 R_4} \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_1} - V_2 \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_o = 3V_1 - 2V_2 + 4 \text{ idi}$$

* Bu denklemler kullanılarak direnç değerleri bulunur.

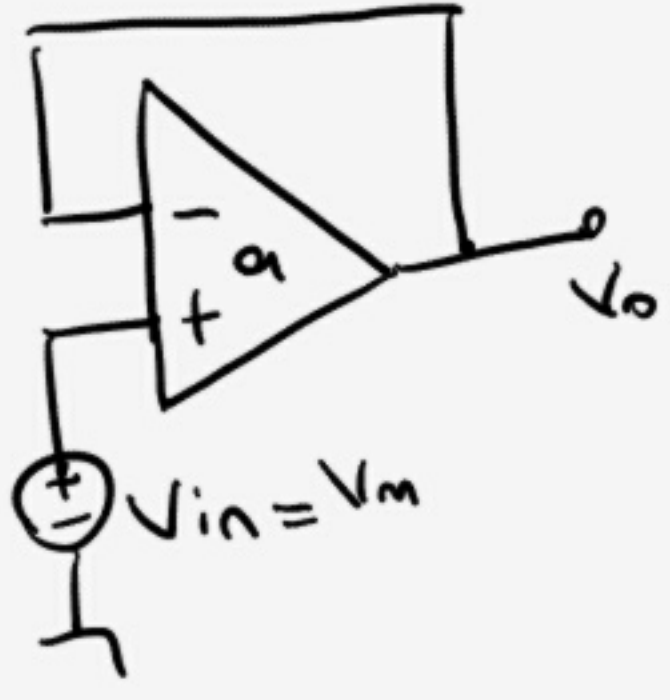
$$3V_1 - 2V_2 + 4 = V_o$$

2. Yol 1

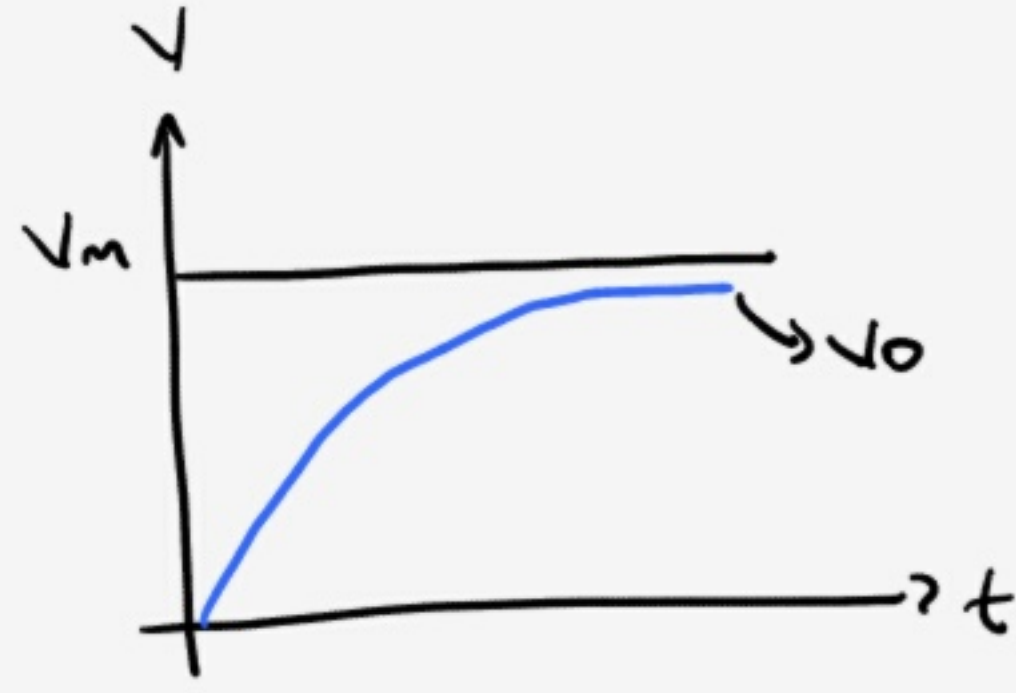


$$V_o = 3V_1 - 2V_2 + 4$$

Yükselme Zamanı (The rise time)



⇒



* V_o geriliminin, V_m 'nin %10 değerinden %90 değerine gelene kadar geçen süreye " t_r " (rise time) denir.

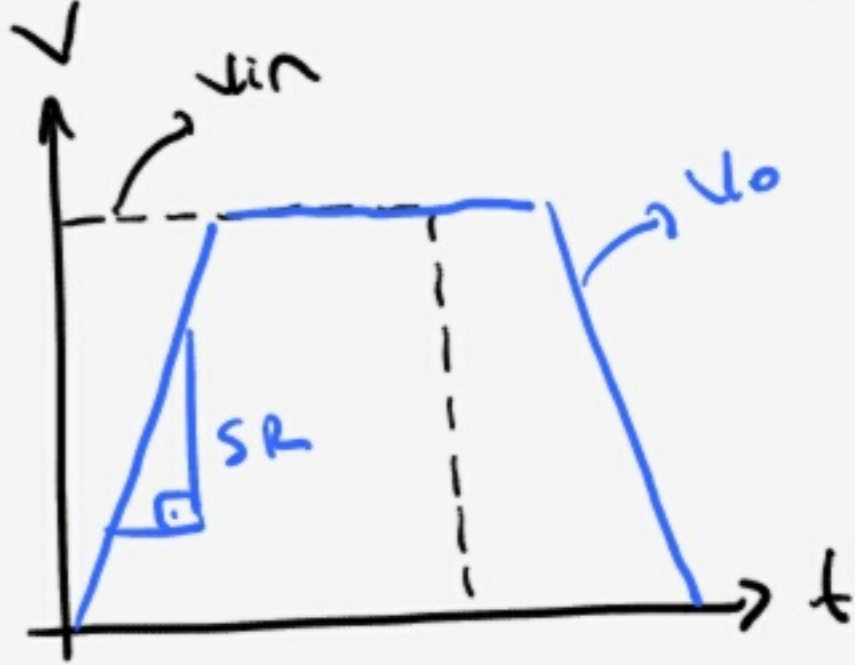


Opamp hızı !

LM741 → $t_r \approx 350\text{ns}$

Slew Rate

* V_o çıkışının sıfırdan maksimum değere gelene kadar geçen süreye dir.
(Görünür kare dalgalar uygulamaları hesaplanır)



$SR \rightarrow V/\mu s$

LM741C → $SR = 0.5 V/\mu s$

LM741E → $SR = 0.7 V/\mu s$

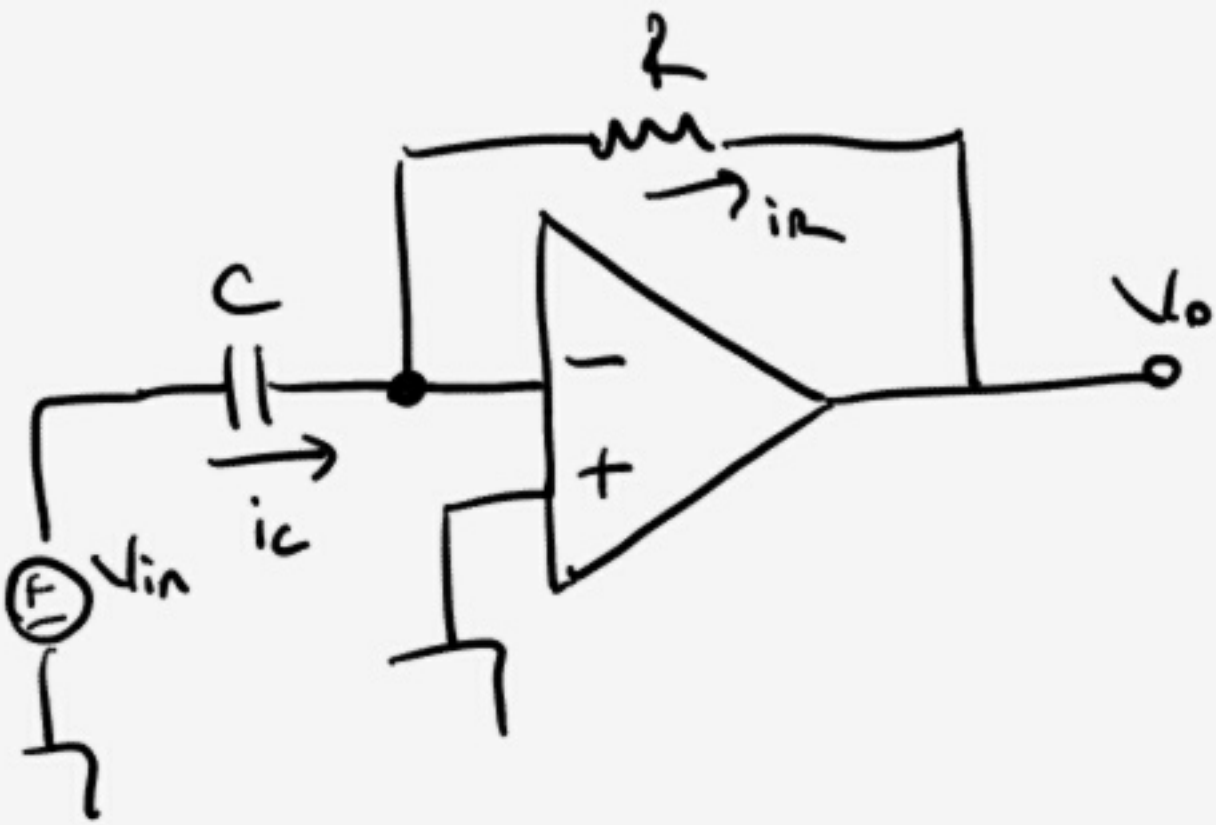


Hız ?

→ Farklı uygulamalar için farklı opamp kullanımı

$$\begin{array}{cc} 1\mu s & 0.5V \\ ? & 10V \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{cc} 1\mu s & 0.5V \\ ? & 10V \end{array}} \right\} 20\mu s$$

Türev Alıcı Devre (The Differentiation)



$$i_c = i_R$$

$$V_p = 0 \Rightarrow V_p = V_n = 0$$

$$\frac{V_n - V_{in}}{1/sC} + \frac{V_n - V_o}{R} = 0$$

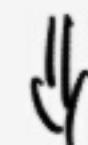
$$V_o = -sRC V_{in} \Rightarrow V_o = -RC \frac{dV_{in}(t)}{dt}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = -sRC \quad (s \rightarrow j\omega) \rightarrow \text{devre analizi derisi}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -j\omega RC$$

$$\left| \frac{V_o}{V_{in}} \right| = \omega RC \quad (\omega = 2\pi f)$$

$$A_v = \left| \frac{V_o}{V_{in}} \right| = 2\pi f RC$$



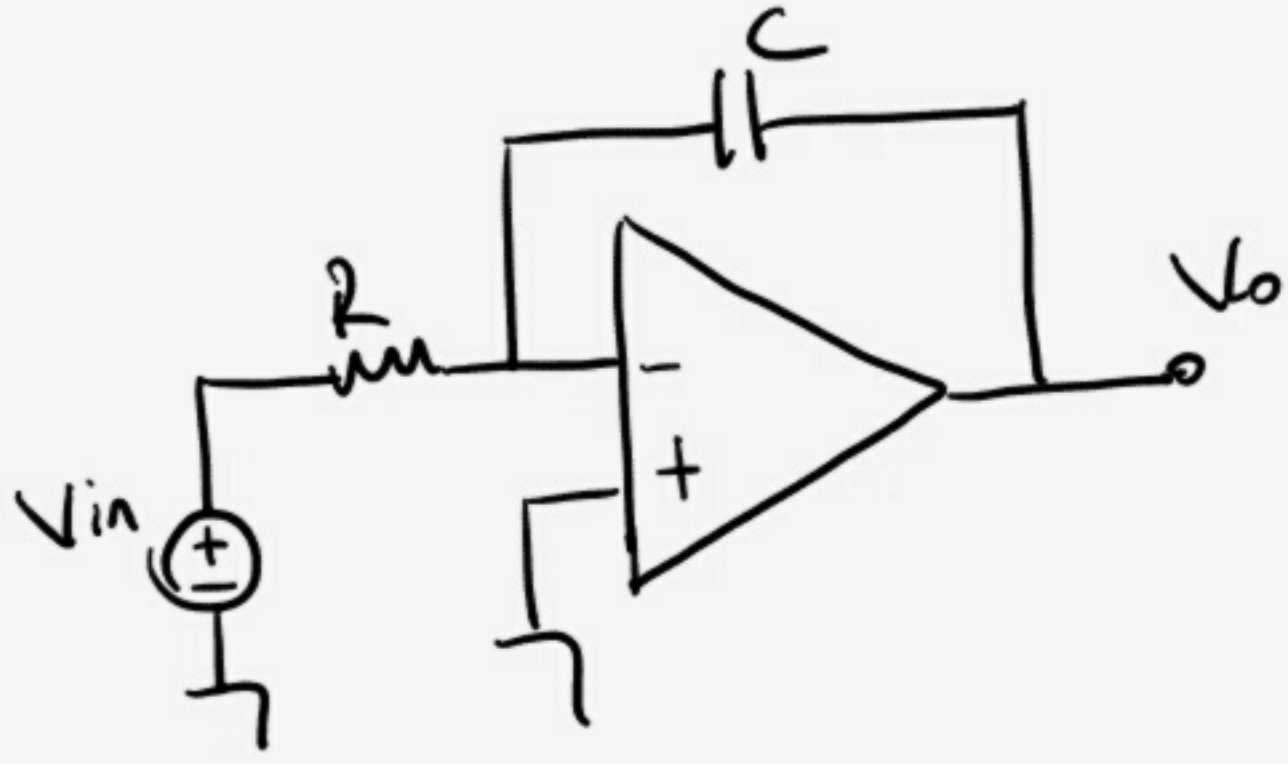
$$f = 0 \Rightarrow A_v = 0$$

$$f = \infty \Rightarrow A_v = \infty$$

yükselme geçiren filtre
(high pass filter)

Problem?

Integral Amplifier (The Integrator)



$$V_p = 0 \Rightarrow V_n = 0$$

$$\frac{V_n - V_{in}}{R} + \frac{V_n - V_o}{1/sC} = 0$$

$$V_o = -\frac{1}{sRC} V_{in} \quad \left(s = \frac{d}{dt}, \frac{1}{s} = \int dt\right)$$

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{1}{sRC}, (s = j\omega)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

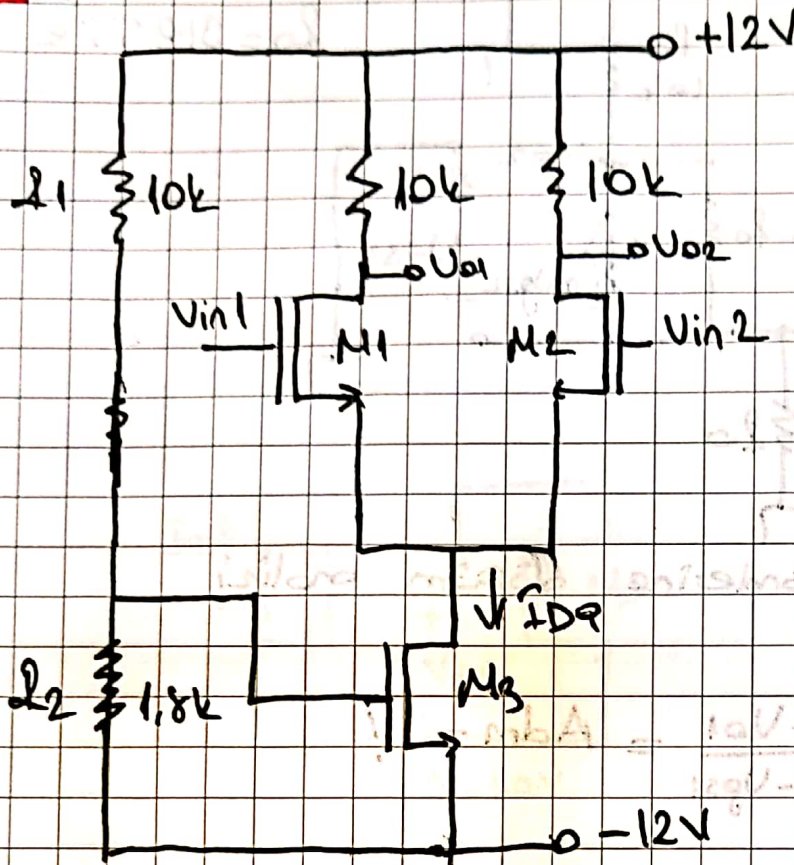
$$\left| \frac{V_o}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\omega RC} \quad (\omega = 2\pi f) \Rightarrow A_v = \frac{1}{2\pi f RC}$$

$$\hookrightarrow f = 0 \Rightarrow A_v = \infty$$

$$f = \infty \Rightarrow A_v = 0$$

Alaksh peevin filtre
(low pass filter)

2.1



$$\beta = 38 \cdot 10^{-5}$$

$$V_{TH3} = 1.2V$$

$$\lambda = 0.0028$$

$$g_m = ? \quad I_{DQ} = ?$$

$$r_o = ? \quad V_{GS3} = ?$$

Fr. hang? ~~gates~~
bipolar? ~~output~~?

$$V_{GS} = 1.8k \cdot \frac{24}{11.8k} - 12 = -8.33V$$

$$V_{S3} = -12V \Rightarrow V_{GS3} = V_{GS} - V_{S3} = -8.33 + 12 = 3.66V$$

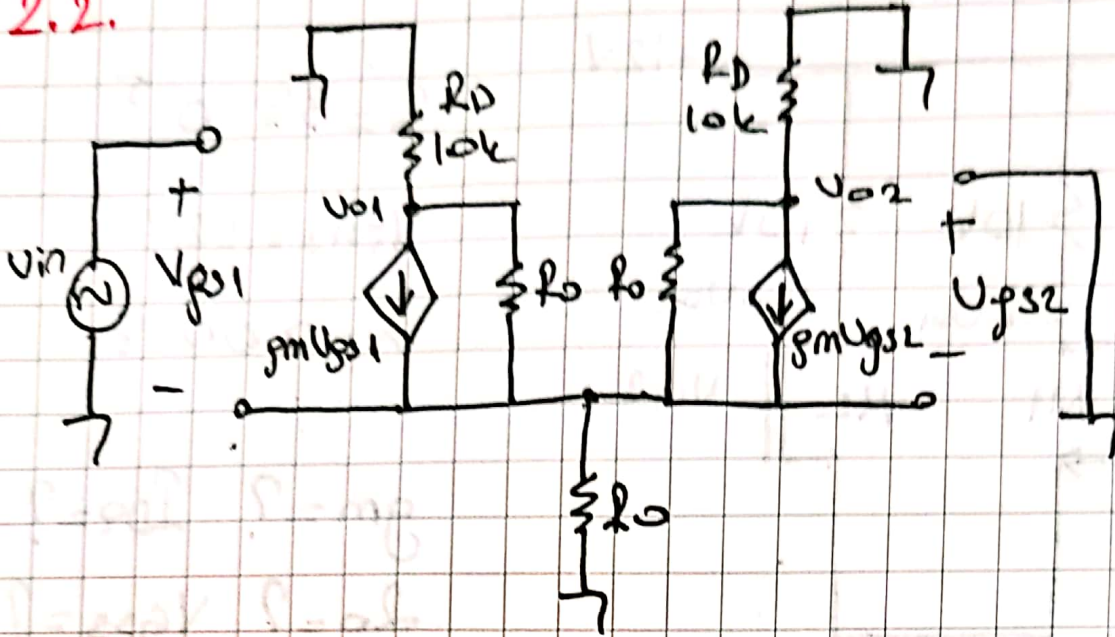
$$I_{DQ} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{38 \cdot 10^{-5}}{2} (3.66 - 1.2)^2 = 1.15mA$$

$$g_m = \sqrt{\beta I_{DQ}} = \sqrt{2 \kappa_n I_{DQ}} = 0.66m$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_{DQ}} = 310.55k$$

2.2.

$$R_o = 310,55 \text{ k}$$



V_{o1} ve V_{o2} düğümlerine düğüm analizi

uygulanarak;

$$\frac{V_{o2} - V_{o1}}{V_{ps2} - V_{ps1}} = A_{dm} = ?$$

$$\frac{V_{o1}}{R_D} + \frac{V_{o1} - V_s}{R_o} + g_m V_{gs1} = 0$$

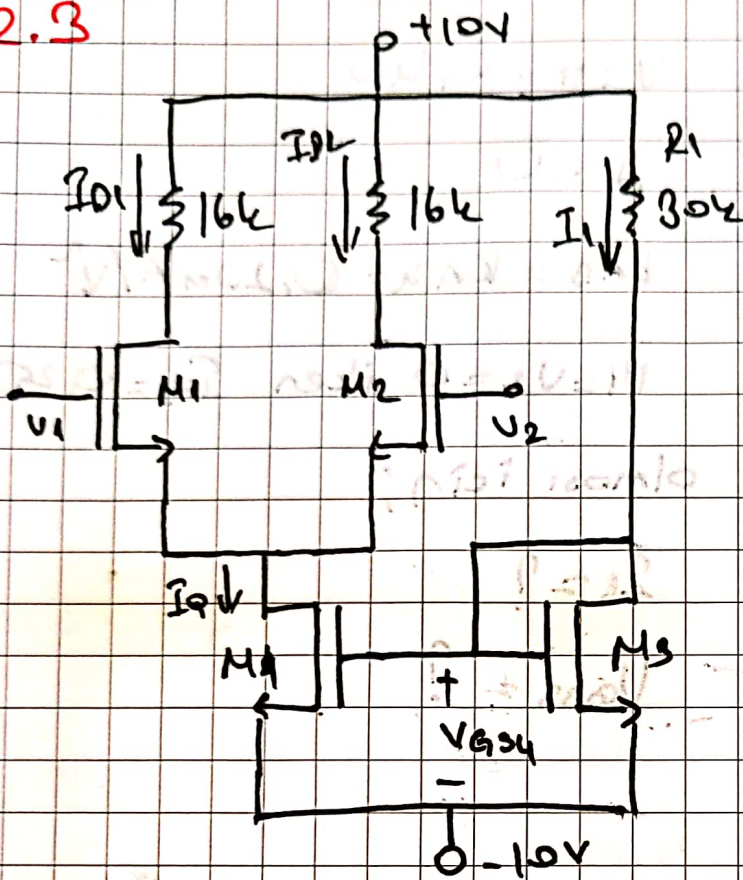
$$\frac{V_{o2}}{R_D} + \frac{V_{o2} - V_s}{R_o} + g_m V_{gs2} = 0$$

$$\frac{V_{o2} - V_{o1}}{R_D} + \frac{V_{o2} - V_{o1}}{R_o} = -g_m (V_{ps2} - V_{ps1})$$

$$(V_{o2} - V_{o1}) \cdot R_o + (V_{o2} - V_{o1}) R_D = -g_m R_D \cdot R_o \cdot V_{in}$$

$$A_{dm} = \frac{V_{o2} - V_{o1}}{V_{in}} = \frac{-g_m R_D R_o}{R_o + R_D} = -12,78$$

2.3



$$K_{n1} = K_{n2} = 0,1 \text{ mA/V}^2$$

$$K_{n3} = K_{n4} = 0,3 \text{ mA/V}^2$$

$$\lambda = 0, V_{TH} = 1$$

$$V_{GS4} = ?, I_1 = ?$$

$$I_Q = ?, I_{D1} = ?, I_{D2} = ?$$

$$I_1 = \frac{20 - V_{GS4}}{R_1}$$

$$I_1 = K_{n3} (V_{GS4} - V_{TH})^2$$

$$9V_{GS4}^2 - 17V_{GS4} - 11 = 0$$

$$V_{GS4} = 2,40 \text{ V}$$

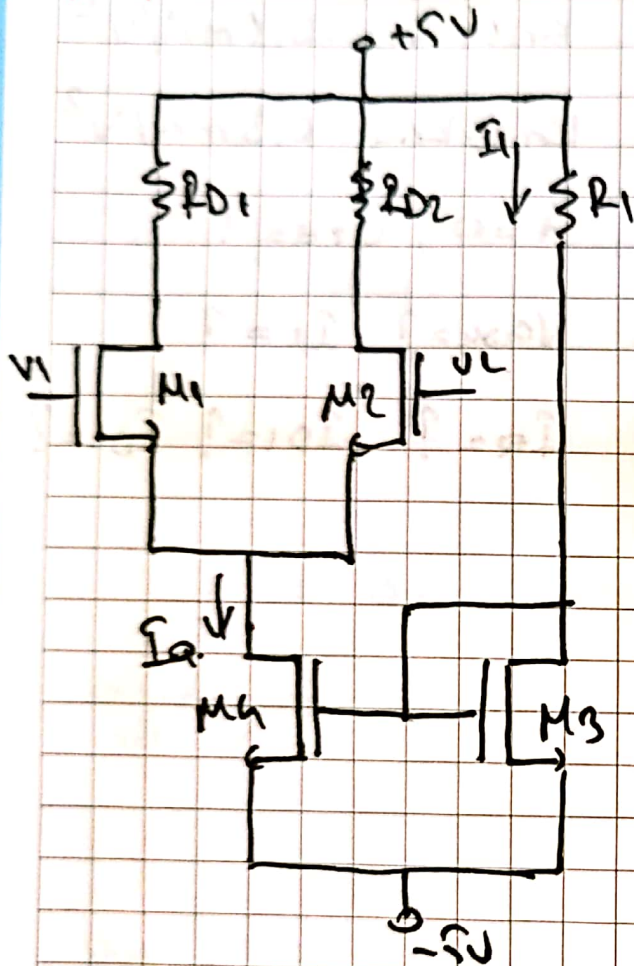
$$I_1 = 0,587 \text{ mA}$$

M3 ve M4 es bağımlıdır

$$I_1 = I_Q = 0,587 \text{ mA}$$

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_Q}{2} = 0,293 \text{ mA}$$

2.4



$$V_{TH} = 0.4 \text{ V}$$

$$\lambda = 0$$

$$K_{n3} = K_{n4} = 0.20 \text{ mA/V}^2$$

$$V_1 = V_2 = 0 \text{ iken } I_Q = 0.25 \text{ mA}$$

olması için;

$$I_1 = ?$$

$$V_{GS3} = ?$$

$$I_Q = I_1 = K_{n3} (V_{GS3} - V_{TH})^2$$

$$0.25 \cdot 10^{-3} = 0.20 \cdot 10^{-3} (V_{GS3} - 0.4)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS3} = 1.518 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{5 - 1.518 - (-5)}{0.25} = 33.9 \text{ k}\Omega$$

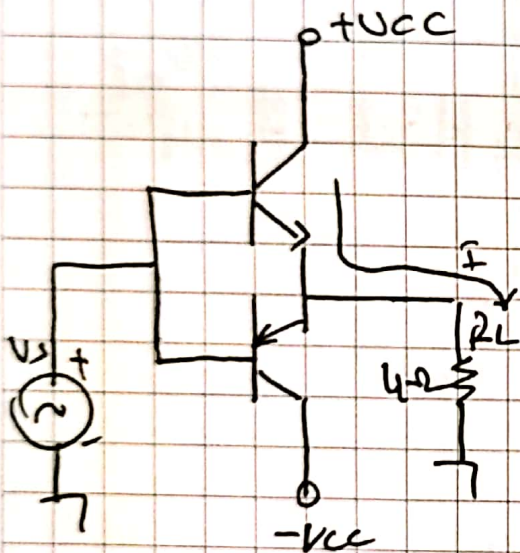
3.1. Aşağıdaki devrede $V_{CC} = 15V$ ve $R_L = 4\Omega$ olup girişlerine AC işaret uygulanmıştır.

Buna göre

a) Çıkışın gücünün max. değerini hesaplayın $P_L(max) = ?$

b) Her bir transistörde harcanan güç hesaplayın.

c) Verimi hesaplayın $\eta_{max} = ?$



a) $V_m = V_{CC}$ olursa;

$$P_L(max) = I_m \cdot V_m = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{rms}$$

$$= \frac{V_{CC}}{\sqrt{2} R_L} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{CC}^2}{2 R_L}$$

$$= \frac{15^2}{2 \cdot 4} = 28,13 \text{ W}$$

$$b) P_{DC} = V_{CC} \cdot I_{max} = V_{CC} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \rightarrow \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{V_{CC}^2}{R_L \cdot 2} = \frac{15^2}{4 \cdot 2}$$

$$2 \text{ adet DC kaynağı için} \Rightarrow \frac{2 \cdot 15^2}{4 \cdot 2} = 35,81 \text{ W} \quad \text{~~35,81~~}$$

$$P_C = P_{DC} - P_L = 35,81 - 28,13 = 7,68 \text{ W}$$

$$\text{Her bir tr. için} \Rightarrow 7,68 / 2 = 3,84 \text{ W}$$

$$c) \eta = \frac{P_L}{P_{DC}} = \frac{28,13}{35,81} = \% 78,55$$

3.2 8 Ω 'luk bir yükte ortalama 20W'lık güç sağlanacak olan 3 sınıfı bir ^{püç} kuvvetlendirici tasarlanmak isteniyor. Çıkış geriliminin saturasına girmemesi için DC püç kaynağını çıkış geriliminin maksimum değerinden 5V yüksek alınız. Buna göre ^{çıkış gerilimini ($\hat{V}_o$),} gerekli olan kaynak gerilimini (V_{cc}), her bir kaynaktan akacak olan maksimum akı (I_{omax}), her bir ^{gerilim} püç kaynağının sağladığı güç (P_{s+}, P_{s-}) ve verimi η bulunuz.

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_o^2}{R_L} \Rightarrow \hat{V}_o = \sqrt{2 \cdot P_L \cdot R_L} = \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 8} = \underline{\underline{17.9V}}$$

$$V_{cc} = \hat{V}_o + 5V \Rightarrow V_{cc} = \underline{\underline{23V}}$$

$$I_o = \frac{\hat{V}_o}{R_L} = \frac{17.9}{8} = \underline{\underline{2.24A}}$$

$$P_{s+} = P_{s-} = \frac{1}{2} \cdot I_o \cdot V_{cc} = \frac{1}{2} \cdot 2.24 \cdot 23 = \underline{\underline{16.4W}}$$

$$\text{Toplam sağlanan püç } (P_{s+}) + (P_{s-}) = 32.8W$$

$$\eta = \frac{20W}{32.8W} = \underline{\underline{\%61}}$$

3.3 Güç tepe değeri 20V olan bir B sınıfı kuvvetlendirici 16 Ω 'luk bir hoparlöre sürüyor. $V_{CC} = 30V$ olduğuna göre devreye sokulan pdc, güç ve çıkış gücü ve devrenin verimini hesaplayınız.

$$I_L = \frac{20}{16} = 1.25A \rightarrow I_{y(max)}$$

$$\text{Akım ortalaması değeri} \Rightarrow \frac{I_L}{2} = \frac{1.25}{2} = 0.625A$$

$$P_{DC} = V_{CC} \cdot I_{ort} = 30 \cdot 0.625 = 18.75W$$

Bir kaynak tarafından sağlanan güç

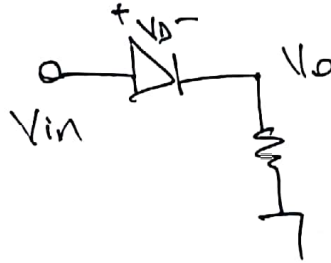
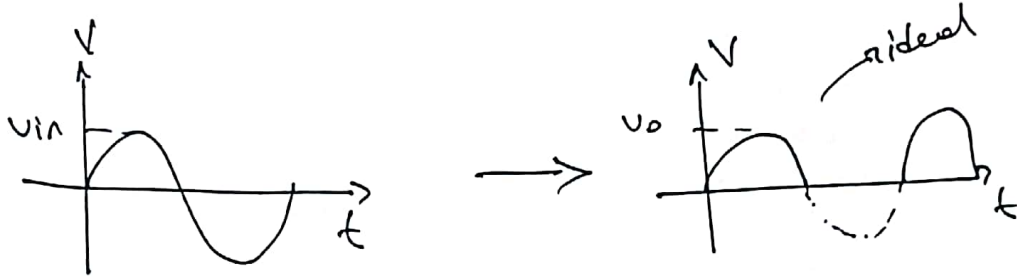
$$\text{Toplam iletilecek güç (2 kaynak) } 2 \cdot P_{DC} = \underline{\underline{23.5W}}$$

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{1}{2} \frac{20^2}{16} = \underline{\underline{12.5W}}$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_{DC}} = \frac{12.5}{23.5} = \%52.3$$

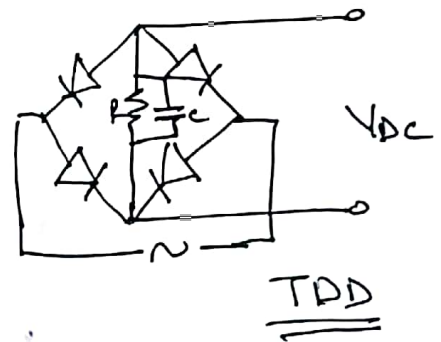
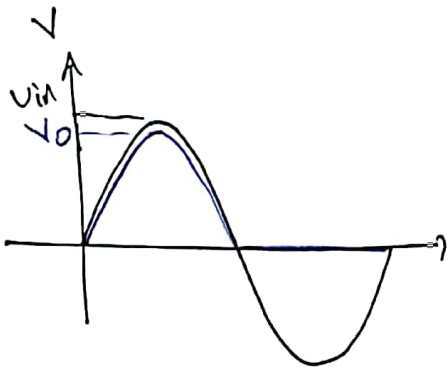
Hassas Dönüştürücüler (Precision Rectifiers)

$$\begin{aligned} V_o &= V_{in} & , & & V_{in} > 0 \\ V_o &= 0 & , & & V_{in} < 0 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Yarım dalga} \\ \text{dön. (half wave rect.)} \end{array} \right\}$$



YDD
(HWR)

Hatırla!

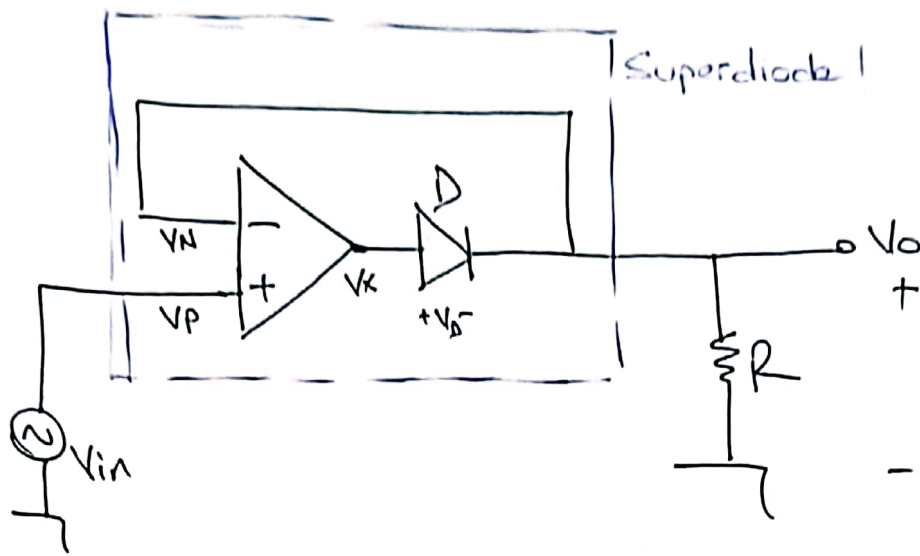


$$V_o = V_{in} - V_D \rightarrow \text{gerilim düşümü}$$

$$V_{in} > V_D \rightarrow \checkmark$$

$$V_{in} < V_D \rightarrow ?$$

$\Rightarrow$ Precision rect.
hassas dönüştürücü



$$V_x = A V_d = A (V_P - V_N)$$

$$V_P = V_{in} \quad \text{or} \quad V_N = V_o = V_x - V_o$$

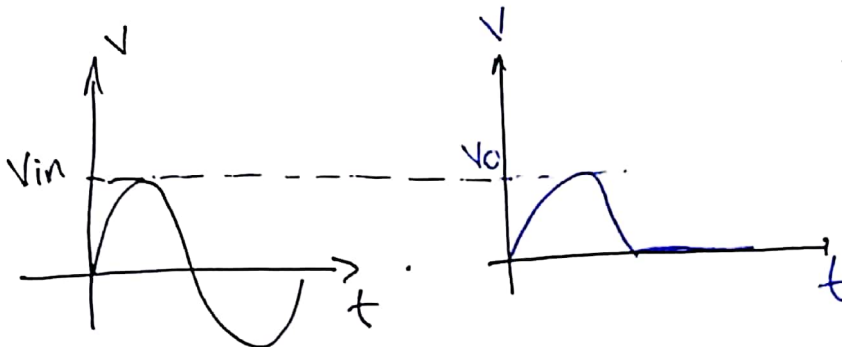
O halde;

$$V_x = A (V_{in} - (V_x - V_o))$$

$$\frac{V_x}{A} = V_{in} - \underbrace{(V_x - V_o)}_{V_o}$$

$$\frac{V_x}{A} = V_{in} - V_o \implies \underline{\underline{V_{in} = V_o}}$$

$\hookrightarrow \infty$

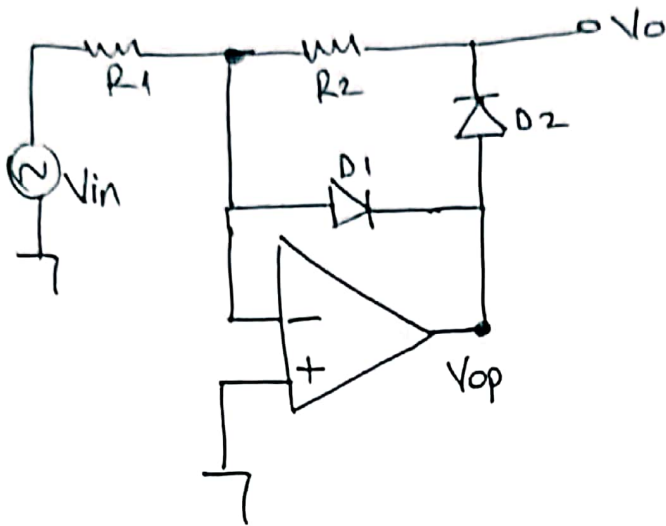


* perlim desis
yok!

Superdiode

↓
problem?
?

Geliştirilmiş Yarı Difer. Difer.



① $V_{in} > 0$ için;

- * $D_1 \rightarrow ON$
- * Opamp negatif geribesleme
- * Sonuç olarak $V_{in} = 0$

$$V_{in} - V_{D1} = V_{op}$$

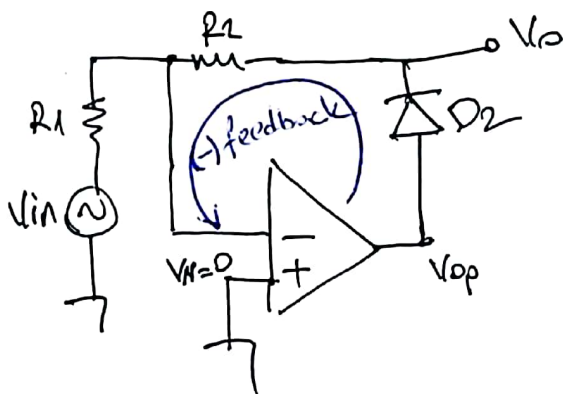
$$V_{op1} = -V_{D1}$$

* $V_{D2} \rightarrow OFF \Rightarrow V_o = 0$

② $V_{in} < 0$ için;

* $V_{op} \rightarrow V_{+sat}$

* $D_2 \rightarrow ON, D_1 \rightarrow OFF$



$$\frac{V_o - 0}{R_2} = \frac{0 - V_{in}}{R_1}$$

$$\Rightarrow V_o = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) V_{in}$$

$$V_{op} = V_o + V_{D2}$$

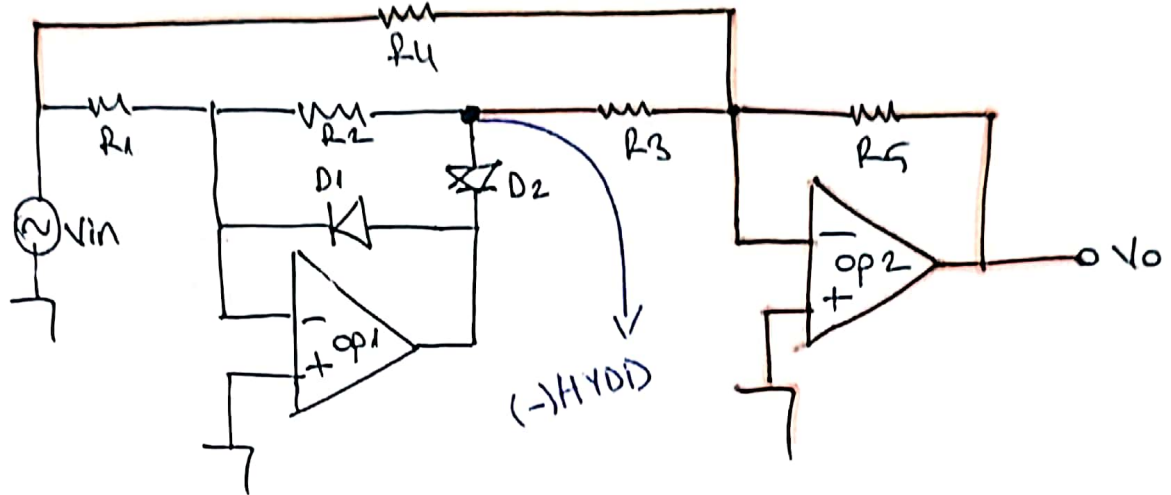
inverting
exiz 2n yd

$$V_{op} = -V_{D1}, V_o = 0, V_{in} > 0$$

$$V_{op} = V_o + V_{D2}, V_o = \frac{-R_2}{R_1} V_{in}, V_{in} < 0$$

Tam Dalga Dönüştürücü (Hassas) (Precision Full)

* İzaretin kendisiyle, yarı dalga (hassas) dönüştürücü (inverting) halini birleştirerek elde edilebilir. (1. pratik)



* Op1 → evrensel yarı dalga dönüştürücü

* Op2 → toplayıcı ($V_{in} + HYDD$)

$$V_o = \left(-\frac{R_5}{R_4}\right) V_{in} - \left(\frac{R_5}{R_3}\right) V_{HYDD}$$

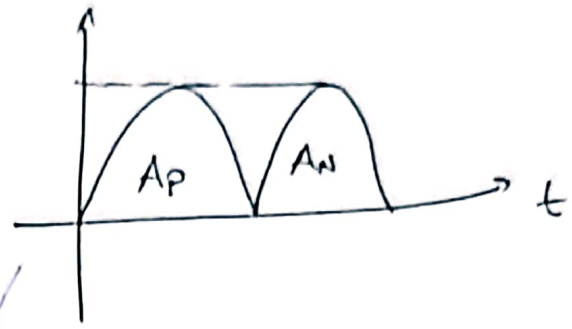
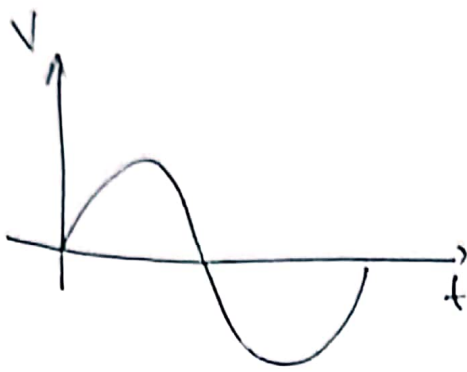
Hatırla!
(Diyetler ters bağlı)

$$V_{in} > 0, V_o = \frac{-R_2}{R_1} V_{in}$$

$$V_{in} < 0, V_o = 0$$

$$V_{in} > 0, \left(\frac{R_2 \cdot R_5}{R_1 \cdot R_3} - \frac{R_5}{R_4}\right) V_{in} = V_o$$

$$V_{in} < 0, \left(\frac{-R_5}{R_4}\right) V_{in} = V_o$$



* Korumadan esit dmsi 1w7

$$V_o = A |V_{in}|$$

$$R_1 = R_2 = R_4 = R$$

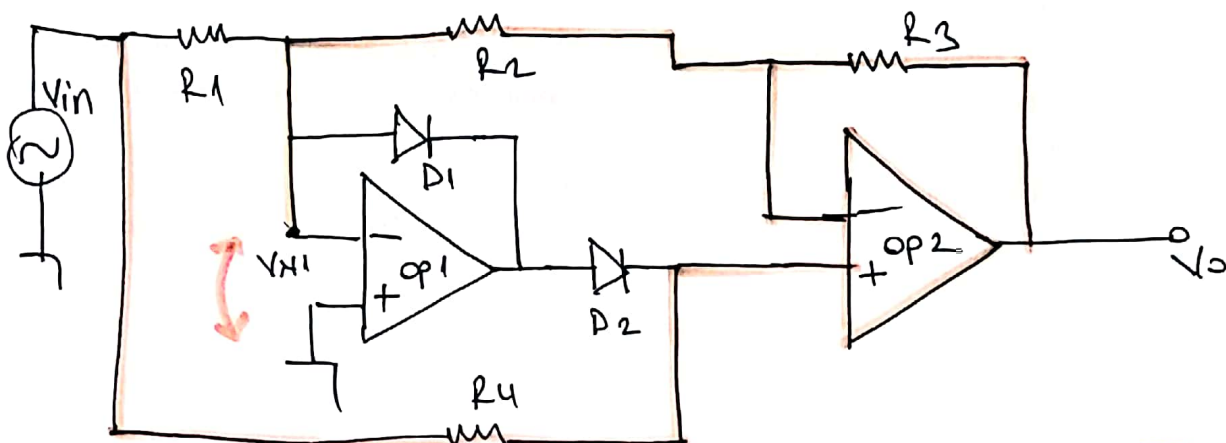
$$R_3 = R/2$$

$$R_5 = A \cdot R \rightarrow \boxed{A = \frac{R_5}{R}}$$

* Devrenin colomo derpesi
akrera derpesi ile belirlenir.

↓ tolerans ?
(R_1, R_2, R_4, R_3) →

2. Yöntem.



$$V_{in} > 0 \Rightarrow (D_1, ON), (V_{N1} = 0), (D_2, OFF) \Rightarrow V_o = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) V_{in}$$

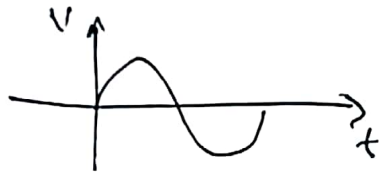
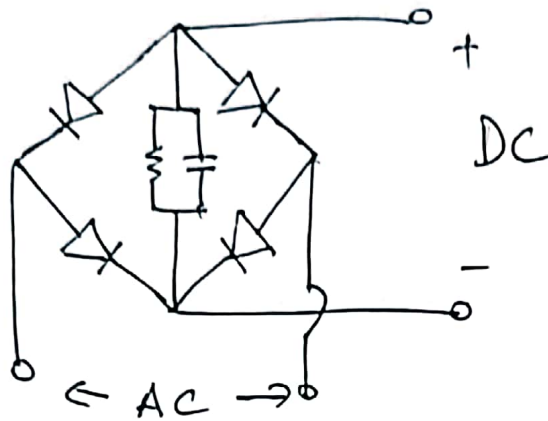
$$V_{in} < 0 \Rightarrow (D_1, OFF), (D_2, ON), (V_{N1} = 0)$$

$$\frac{0 - V_{in}}{R_1} = \frac{V_o - 0}{R_2 + R_3}$$

$$\Rightarrow V_o = \left(\frac{-(R_2 + R_3)}{R_1}\right) V_{in}$$

$$\approx \underline{\underline{R_1 = R_2}}$$

AC / DC Converter



LARGE SIGNAL

Small signal ?

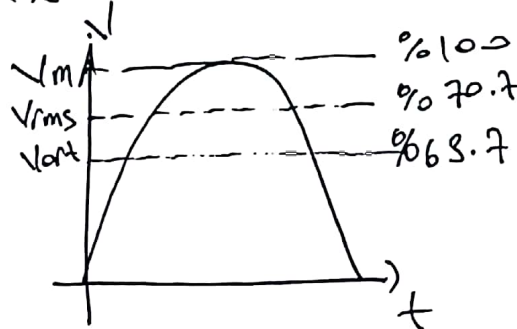
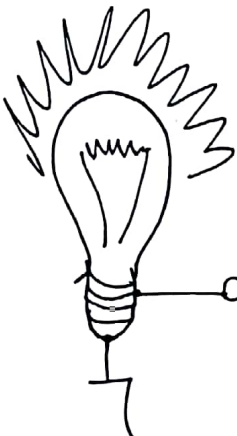
* Çarışe gelen izaretin perlipine göre DC izaret izeten bir devredir.



$$V_{ort} = \frac{1}{T} \int_0^T |V(t)| dt$$

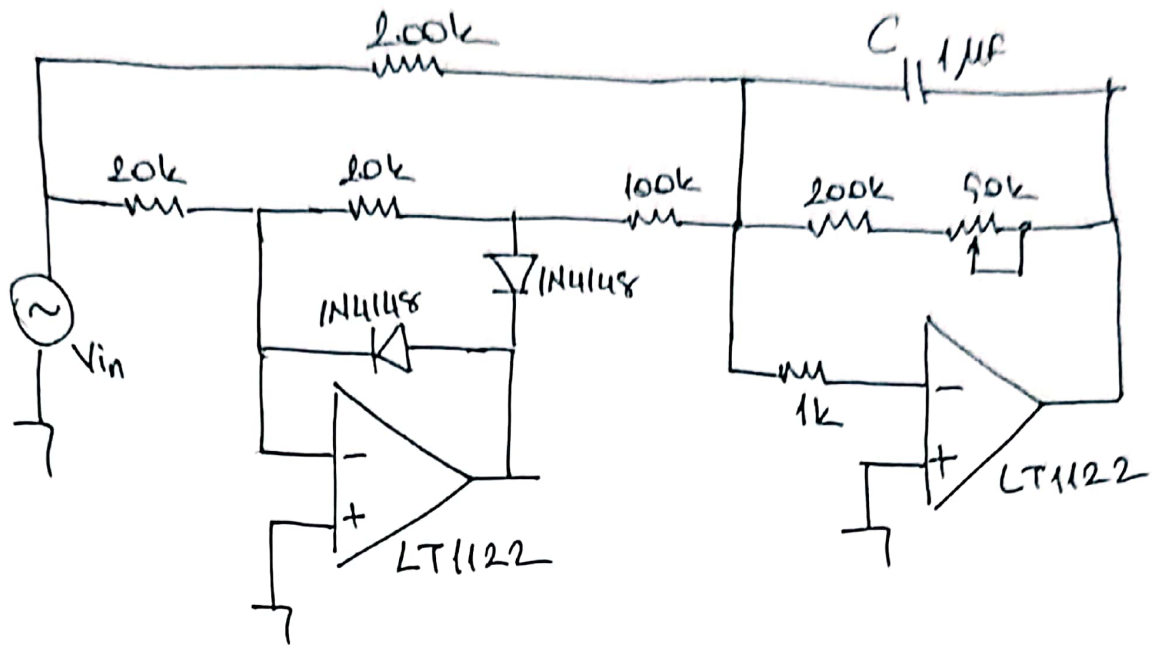
$$V(t) = V_m \sin 2\pi f t$$

$$V_{ort} = \left(\frac{2}{\pi}\right) V_m = 0.637 V_m$$



$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 V_m$$

$$\boxed{V_{ort}} \downarrow \times 1.11 \downarrow \boxed{V_{RMS}}$$



* Kazanç $\rightarrow$ 50k pot. (1.11 V/V)
(Gain)

* LPF $\rightarrow$ C (1μF) $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$
 $\downarrow$
 C'ye paralel olarak net
 dirince deperi

$\Rightarrow$ 10V peak-to-peak / 2MHz bandwidth

Enstrümantasyon Kuvvetlendirici (Instrumentation Amplifier)

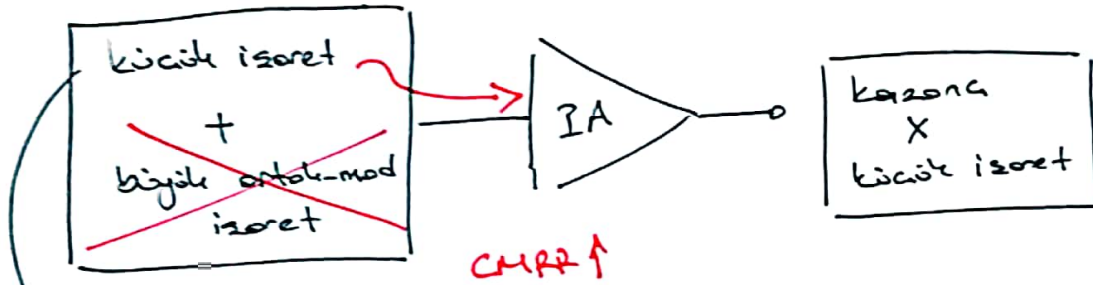
⇒ Bir IA asgari özellikleri şöyledir.

* Çok yüksek (idealde sonsuz) ortak-mod ve fark-mod giris empedansı

* Çok düşük (idealde sıfır) çıkış empedansı

* Doğru ve stabil bir kazanç

* Çok yüksek (idealde sonsuz) ortak mod bastırma oranı (CMRR)

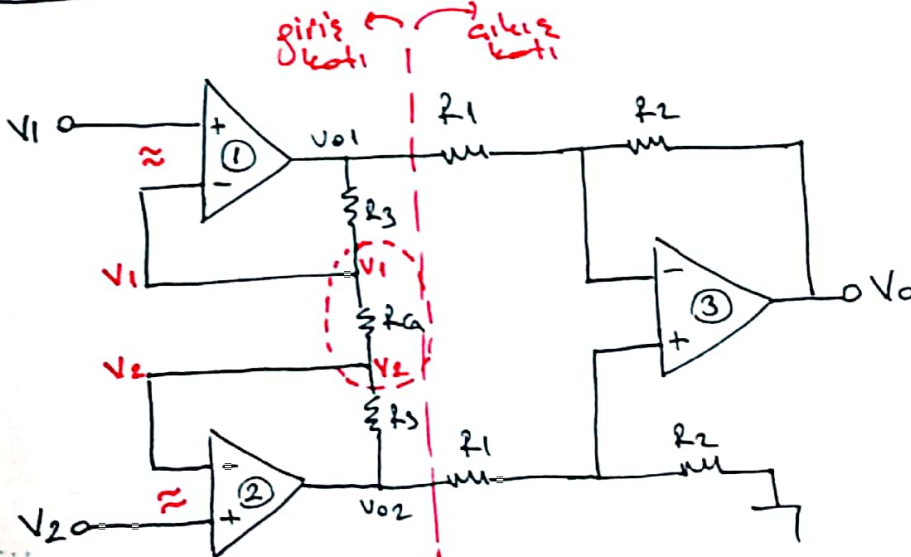


birçok kullanım alanı

* biyomedikal
* haberleşme

⇒ instrumentation

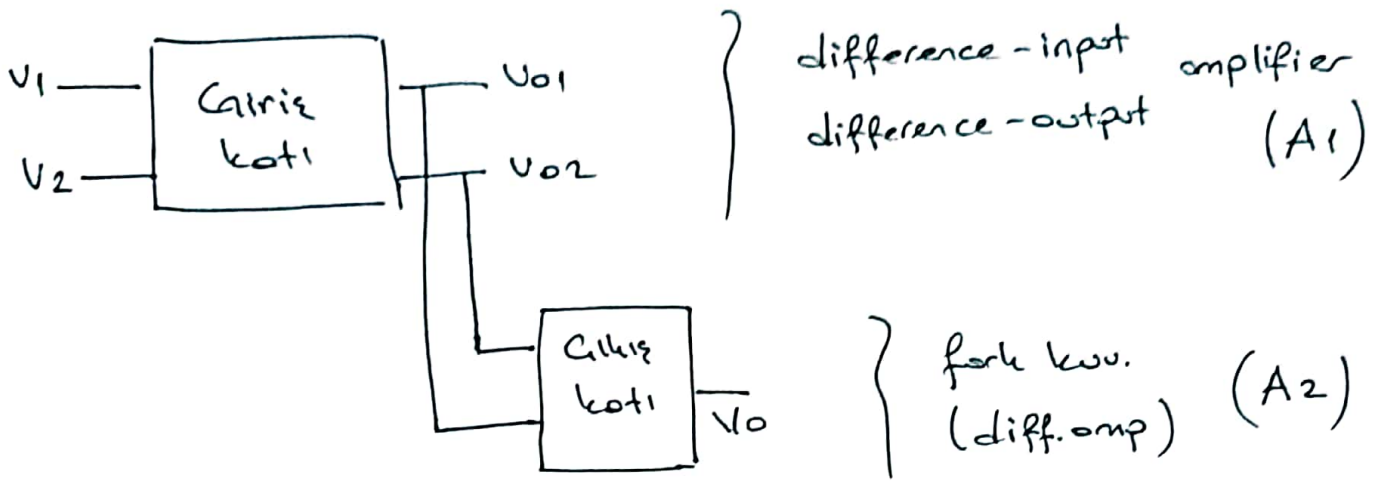
3-Opampli Enst. Kuv.



$$I_{RG} = \left(\frac{V_1 - V_2}{R_G} \right)$$

$$V_{01} - V_{02} = (2R_3 + R_G) \left(\frac{V_1 - V_2}{R_G} \right)$$

$$= \left(1 + \frac{2R_3}{R_G} \right) (V_1 - V_2)$$



$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} (V_{02} - V_{01})$$

$$V_0 = A (V_2 - V_1)$$

$$A = \underbrace{A_1 \cdot A_2}_{\text{toplam kazanç}} = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

1. opamp } evirmeyen kuv. $\Rightarrow$ çok yüksek
2. opamp } (non-inv.) giriş emp.

3. opamp $\rightarrow$ fark. kuv. $\Rightarrow$ çok düşük çıkış emp. / CMRR $\uparrow$

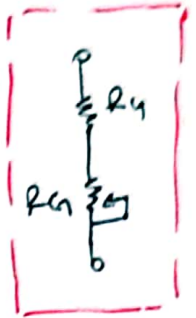
$$A = \underbrace{\left(1 + \frac{2R_3}{R_G} \right)}_{1. \text{ kat}} \underbrace{\left(\frac{R_2}{R_1} \right)}_{2. \text{ kat}} \Rightarrow \text{dirençler değiştirilerek kazanç ayarlanabilir.}$$

$\downarrow$
 R_G $\rightarrow$ fark kuv. derinliğini belirlemek için başarıyla ayarlanabilir tavsiye edilir.
 $\rightarrow$ tek ayarlı direnç (pot)

Örn: $1 < A < 1000$ kazanca sahip bir I.A tasarladım.
 $R_G = 100k\Omega$ pot. olan.

$R_G \rightarrow pot \rightarrow 0-100k\Omega$

? $\rightarrow$ seri bir ek direnç gerekir. (R_u)



$$A = A_1 \cdot A_2, \quad 1 < A < 1000$$

$\downarrow$ min $\downarrow$ max.

$$A_2 < 1 \leftarrow A_1 > 1$$

olmalı

$$A_2 = 0.5 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 0.5, \quad R_2 = 50k, \quad R_1 = 100k$$

$\Downarrow$

$$2 < A_1 < 2000 \text{ olmalı}$$

$$A_1 = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G + R_u} \right)$$

$\downarrow$
 $100k \text{ pot } (0-100k)$

$$2000 = 1 + \frac{2R_3}{R_u + 0} \Rightarrow R_u = 50\Omega$$

$R_3 = 50k$ seçilebilir.

$$2 = 1 + \frac{2R_3}{R_u + 100k} \approx 1$$

$\swarrow$ hassasiyet

$$R_1 = 100k$$

$$R_2 = 50k, \%1 \rightarrow 49.9k\Omega$$

$$R_3 = 50k, \%1 \rightarrow 49.9k\Omega$$

$$R_u = 50, \%1 \rightarrow 49.9\Omega$$

$$R_G = 100k \text{ pot.}$$

* harici elemanlar

* opamp'tan bağımsız.

kazancı $\leftarrow$ harici R_G

Andog Devices $\rightarrow$ AD522
 Burr Brown $\rightarrow$ NA101

AD522

INA101

etc.

$\Rightarrow$ IC $\Rightarrow$
(integrated
circuit)

daha iyi sonuçlar verir.

- * CMRR
- * kazanç (değiştirilebilir)
- * sonuç

bu parametrelerin daha da
içerilmesi için farklı devre
elemanları bulunur.

ÖDE

$\Rightarrow$ ileri okumalar
(further readings)

- * Instrumentation applications
 - Active load drive
 - Digitally programmable gain (PGA)
 - Output offsetting
 - Current output IAs
 - Current input IAs

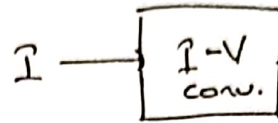
"Design with operational
amplifiers and analog
integrated circuits"

Franco, 3rd edition, 2013

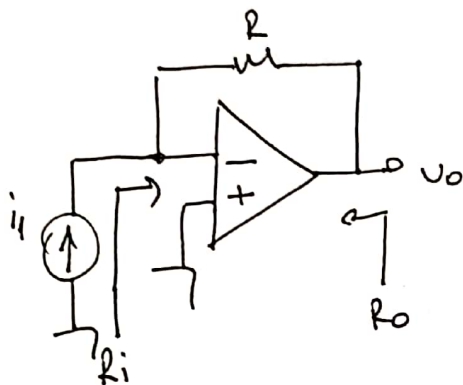
Akım - Gerilim Dönüştürücüler (Current-to-Voltage Converters)

$$I \xrightarrow{R} V$$

↳ transresistance amplifier



↳ kazanç (V/I)



$$i_1 + \frac{(V_o - 0)}{R} = 0$$

$$V_o = (-R) \cdot i_1 \text{ (V/I)}$$

↳ kazanç / hassasiyet (sensitivity)

$$1 \text{ V/mA} \Rightarrow R = 1 \text{ k}\Omega$$

$$1 \text{ V}/\mu\text{A} \Rightarrow R = 1 \text{ M}\Omega$$

pot.

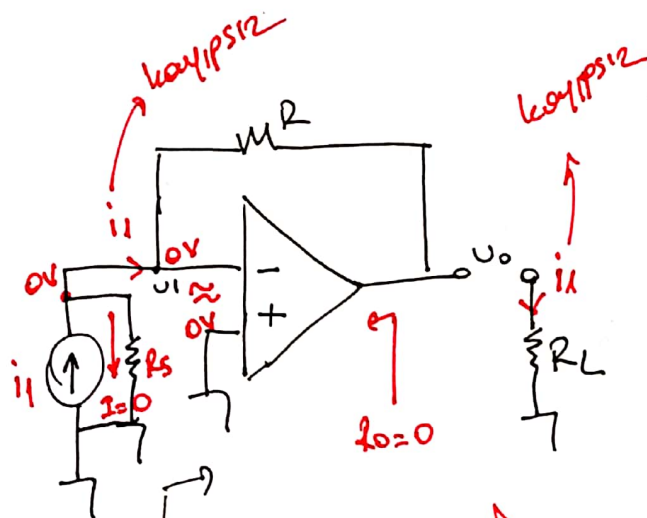
Direnç (R)

Empedans (Z)

transimpedance amp.

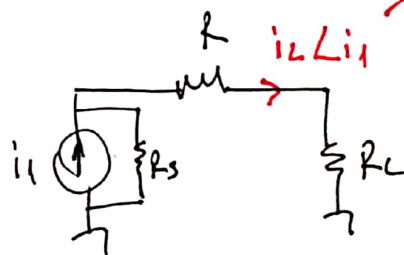
$$V_o(s) = -Z(s) i_1(s)$$

Caplace trans.



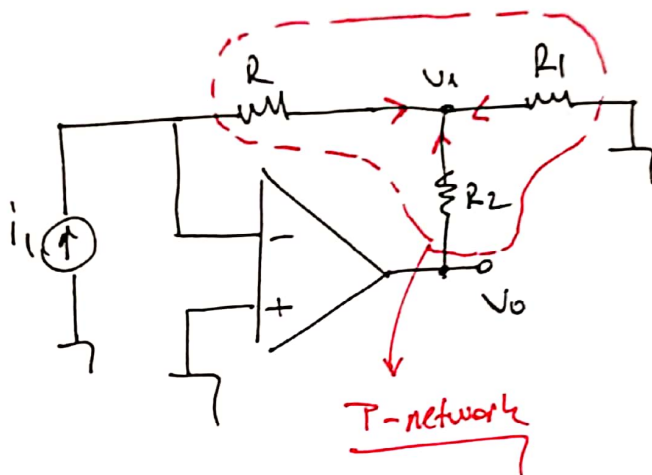
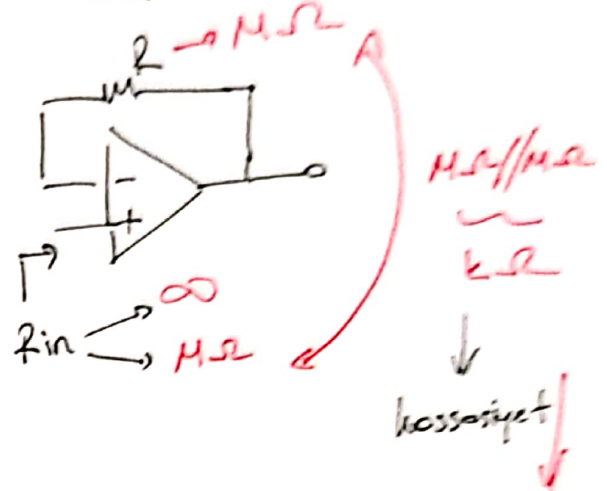
$$R_i = \frac{V_i}{i_1} \approx 0$$

$$R_s \gg R_i \rightarrow i_1 = i_s$$



Yüksek Hassasiyetli I-U Dönüştürücü

Yüksek hassasiyet $\rightarrow R \uparrow$



$$\frac{-V_1}{R} + \frac{-V_1}{R_1} + \frac{V_0 - V_1}{R_2} = 0$$

$$V_1 = -R i_1$$

$$V_0 = -k \cdot R i_1$$

$$k = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R}$$

sensitivity ✓

Fotodiyotlu Güçlendirici (Photodetector Amp.)

fotodiyot (photodiode)



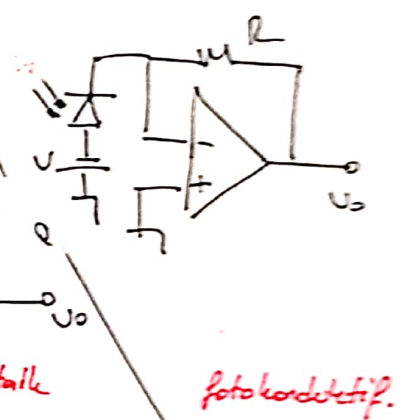
fotovoltajik
↓
ışık → gerilim

fotokondüktif
↓
ışık → dipişken iletkenlik



ışık → gerilim

ışık → akım → gerilim
fotodiyot.



fotokondüktif.

Gerilim-Akım Dönüştürücü

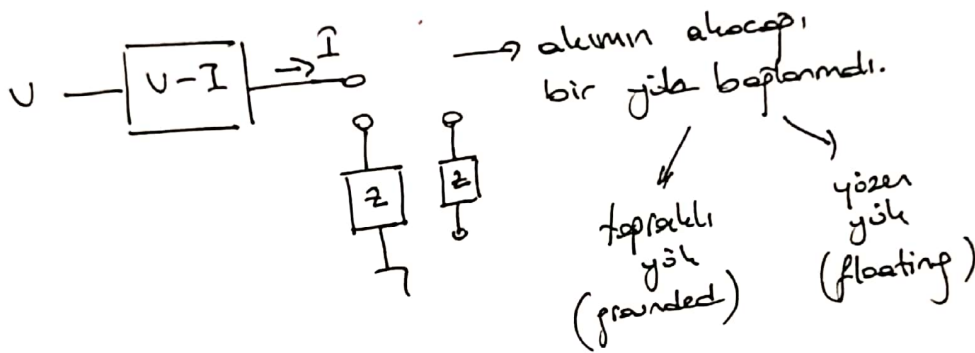
$$V \rightarrow I$$

$$\frac{1}{R}$$

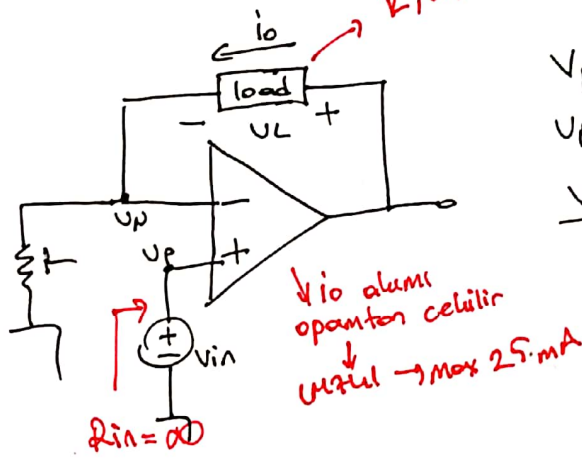
↳ transconductance amp.

$$V \rightarrow \boxed{V-I \text{ conv.}} \rightarrow I = A V$$

↳ kazanç (sensitivity) (I/V)

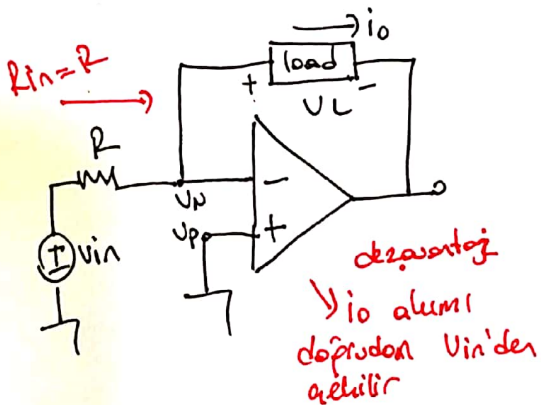


Yüzer (floating) yük Dönüştürücü

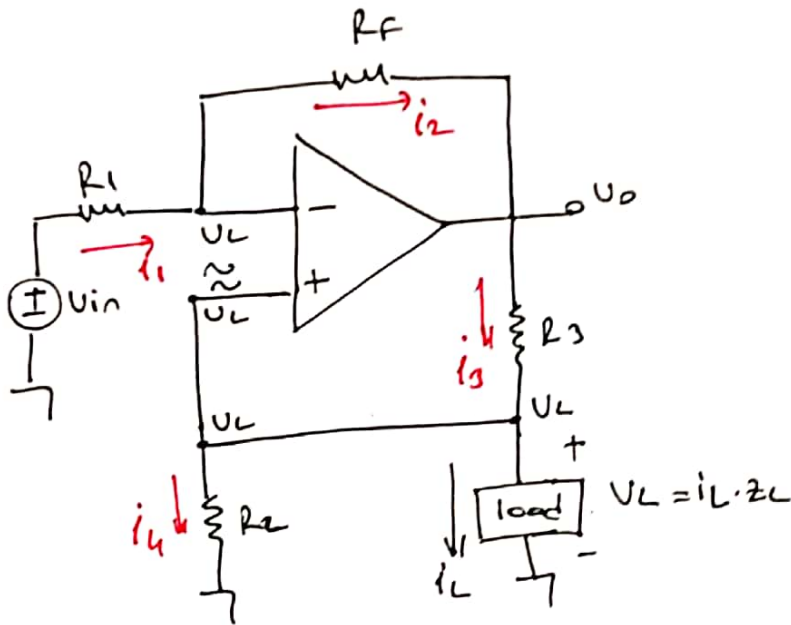


$V_{in} \rightarrow (+)$
 $V_{in} \rightarrow (-)$

↳ bidirectional / (iki yönlü)



Topraklı Yüke Dönüştürücü (Grounded-Load Conv.)



(Howland Current Pump)

Buynun terminali;

$$i_1 = i_2$$

$$\frac{V_{in} - i_L Z_L}{R_1} = \frac{i_L Z_L - V_o}{R_F} (*)$$

Buynun terminali;

$$\frac{V_o - i_L Z_L}{R_2} = i_L + \frac{i_L Z_L}{R_2} (**)$$

(*) ve (**) 'den

$$\frac{R_F}{R_1} = \left(\frac{i_L Z_L - V_{in}}{R_2} \right) = i_L + \frac{i_L Z_L}{R_2}$$

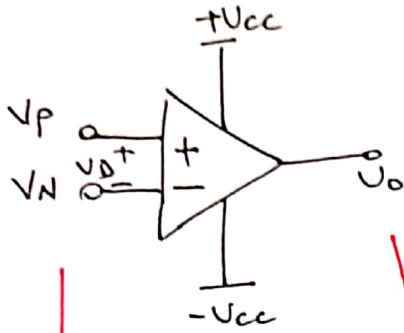
$$\Rightarrow i_L \left(\frac{R_F Z_L}{R_1 R_2} - \frac{Z_L}{R_2} \right) = V_{in} \left(\frac{R_F}{R_1 R_2} \right)$$

$$\frac{R_F}{R_1 R_2} = \frac{1}{R_2} \quad \text{dusun, ki } Z_L \text{ den bağımsızdır.}$$

$$i_L = -V_{in} \left(\frac{R_F}{R_1 R_2} \right) \equiv -\frac{V_{in}}{R_2}$$

Current pump!

GERİLİM KARŞILAŞTIRICILAR (Voltage Comparators)



$$V_o = V_{oL} \rightarrow V_p < V_n$$

$$V_o = V_{oH} \rightarrow V_p > V_n$$

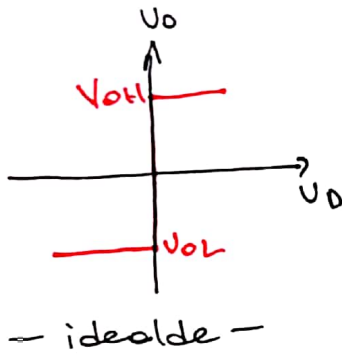
$$V_D = V_p - V_n$$

↓
giriş (analog)

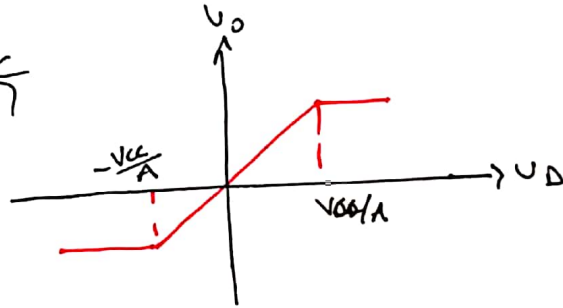
(çıkış (digital))

2 seviyeden birisi $\Rightarrow V_{oL}$
 V_{oH}

(1 bit Analog-Digital Conv.)



$\Rightarrow V_{TC}$

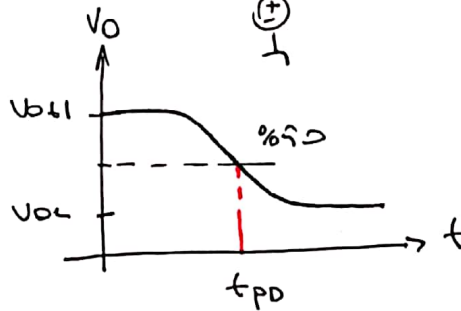
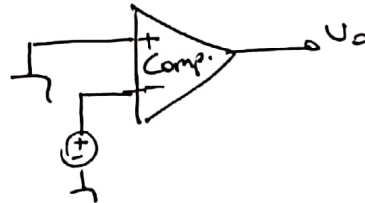


Cevap Süresi (Response Time)

$$V_p < V_n \Leftrightarrow V_p > V_n$$

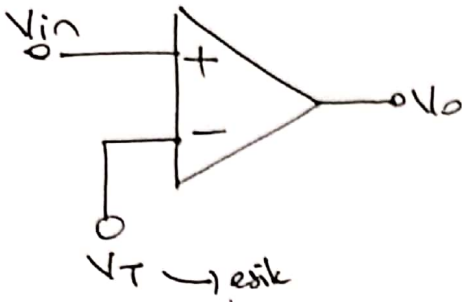
$$V_o = V_{oL} \quad V_o = V_{oH}$$

↑
cevap süresi (t_{PD})
(propagation delay)



(Yüksek hız uygulamalar için çok önemlidir.)

Opampli Gerilim Karşılaştırıcısı



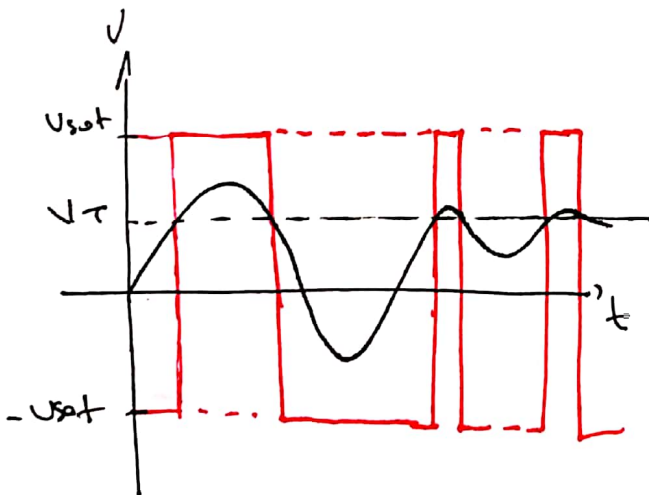
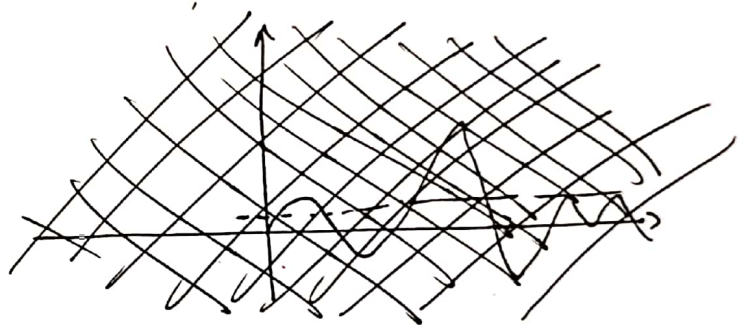
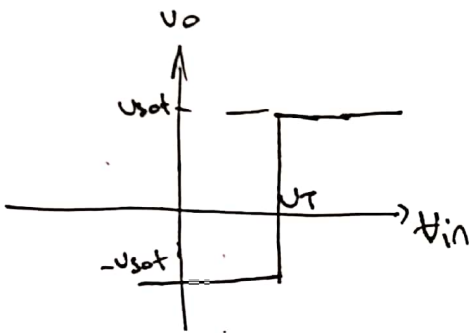
$$V_{in} < V_T \Rightarrow V_o = -V_{sat} \quad (-13V)$$

$$V_{in} > V_T \Rightarrow V_o = +V_{sat} \quad (+13V)$$

* Geribesleme yok $\rightarrow$ sat.

* V_T değerinin üstüne veya altına düşmesi önemli.

$V_T = 0 \Rightarrow$ zero crossing detector.



$\rightarrow$ SR ?

$$(M741 \rightarrow SR = 0.5V/\mu s)$$

$$\pm V_{sat} = \pm 13V$$

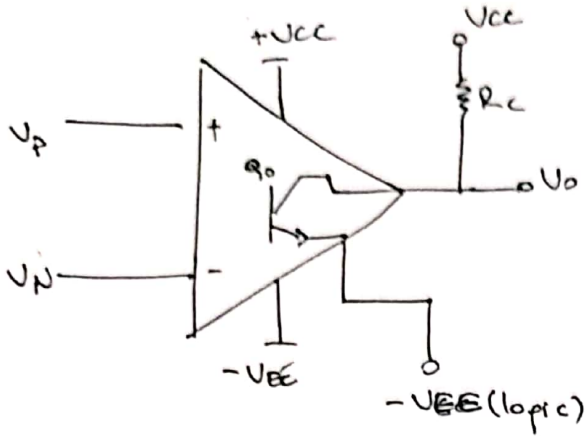
$$V_{OH} \Rightarrow V_{OL} = 26V$$

$$\frac{26V}{0.5V/\mu s} \Rightarrow 52\mu s$$

$$\downarrow \%50$$

$$t_{pd} = 26\mu s \quad ?$$

LM311 → (Comparator)



$$V_p > V_n \Rightarrow Q_o = \text{OFF}$$

$$V_p < V_n \Rightarrow Q_o = \text{ON}$$

* Çıkış seviyelerini kullanan kollar

$$5V - 0V$$

$$(+5) - (-15)$$

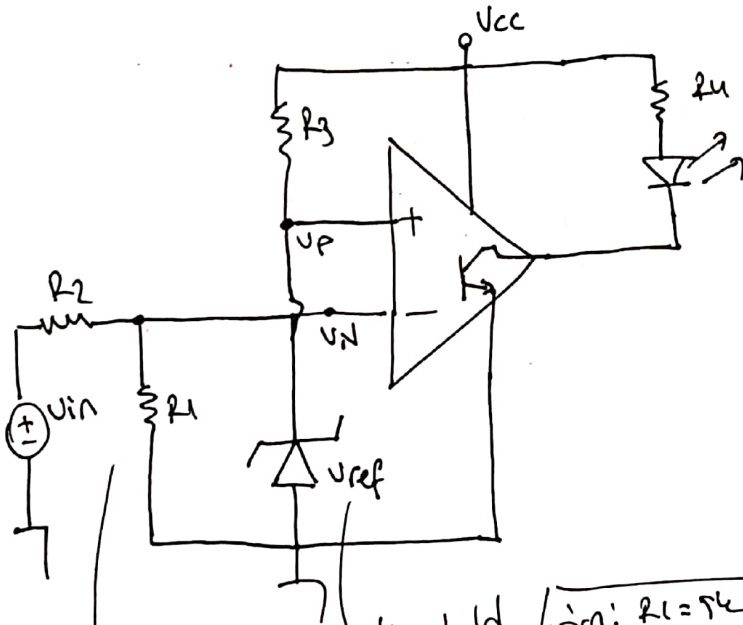
Seviye Dedektörü (Level Detector)

Seviye
geçişleri

Çıkış

- * LED
- * motor çalıştırma
- * ısıtıcı
- * interrupt (kontrolcü)

} uyarı



piriz peritiminin
seviyesini belirlemek
için

$$V_p \rightarrow V_{ref}$$

$$V_n = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_{in}$$

$$V_n < V_p \rightarrow Q_o = \text{OFF}$$

LED OFF

$$V_n > V_p \rightarrow Q_o = \text{ON}$$

LED ON

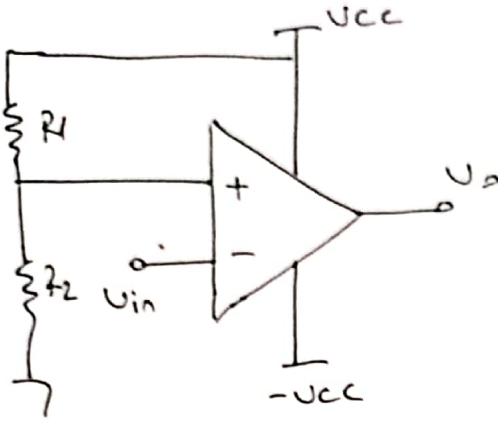
$$\text{Örn: } R_1 = 5k, R_2 = 10k, R_3 = 1k, V_{Z2} = 2.1V$$

$$I_{Zener} = \frac{12 - 2.1}{1k} = 9.9mA \Rightarrow V_p = 2.1V$$

$$V_n = V_{in} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{in} \cdot \frac{5k}{15k} = \frac{V_{in}}{3}$$

$$\frac{V_{in}}{3} < 2.1V \Rightarrow V_{in} < 6.3V \rightarrow \text{LED OFF}$$

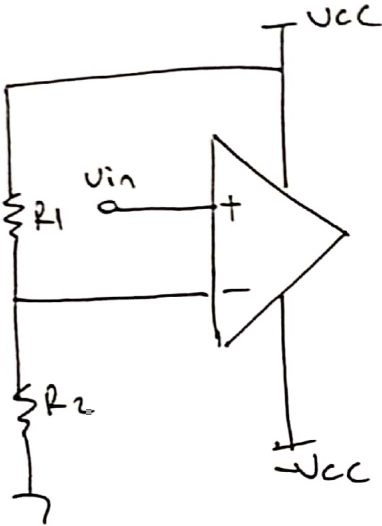
Opamp'lı Karsılaştırıcı



$$V_{in} > V_{cc} * \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow V_o = -V_{cc}$$

$$V_{in} < V_{cc} * \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow V_o = +V_{cc}$$

$\Rightarrow$ Eüren karşılaştırıcı $\leftarrow$

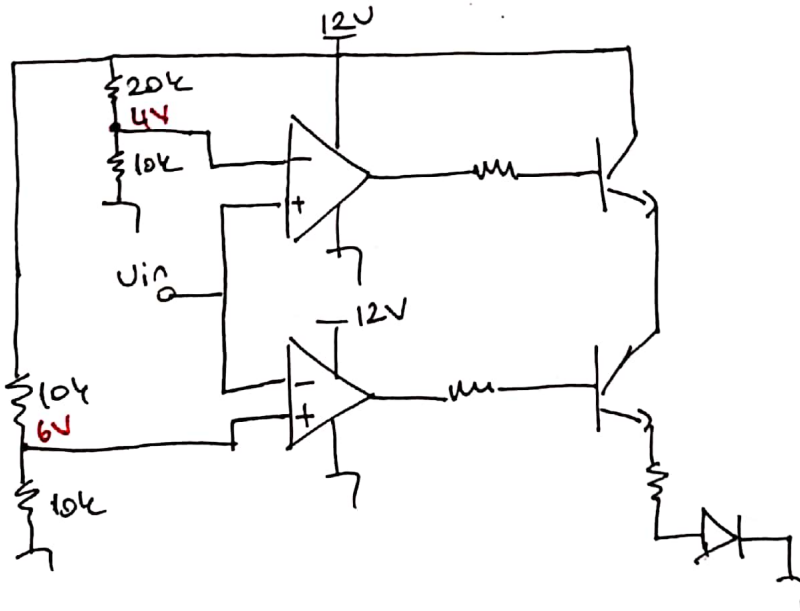


$$V_{in} > \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{cc} \Rightarrow V_o = +V_{cc}$$

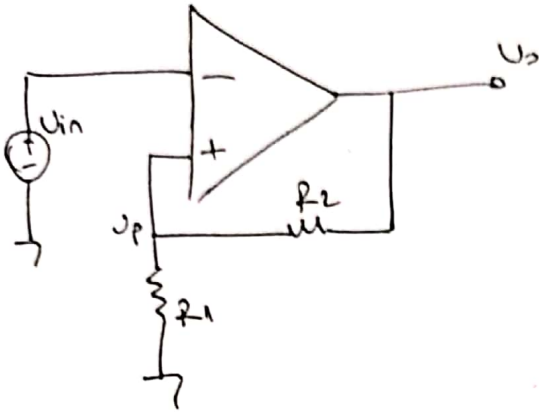
$$V_{in} < \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{cc} \Rightarrow V_o = -V_{cc}$$

$\Rightarrow$ Eürmeyen karşılaştırıcı $\leftarrow$

Örn: Çıktı işaretinin 4V-6V değeri arasında LED'i yakan devre tasarlayınız.
 $\hookrightarrow$ 2 tane threshold var $\rightarrow$ 4V, 6V $\rightarrow$ 2 karşılaştırıcı



Schmitt tetikleyici



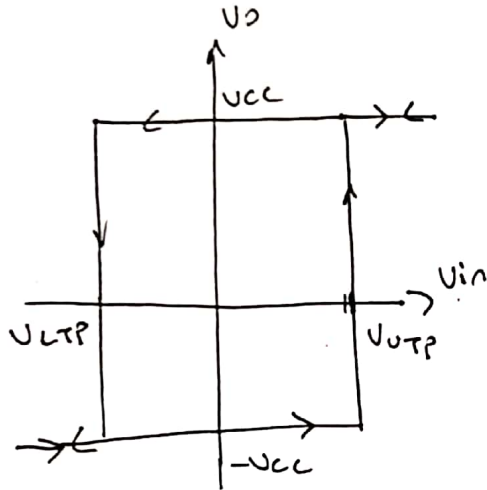
$$V_p = V_o \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \pm V_{cc} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

$$V_{in} < V_p \Rightarrow V_o = V_{cc}$$

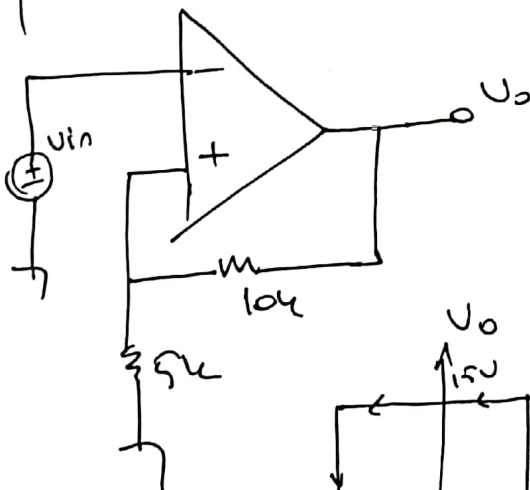
$$V_p = V_{cc} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

$$V_{in} > V_p \Rightarrow V_o = -V_{cc}$$

$$V_p = -V_{cc} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$



Örnek



$$\pm V_{cc} = \pm 15V$$

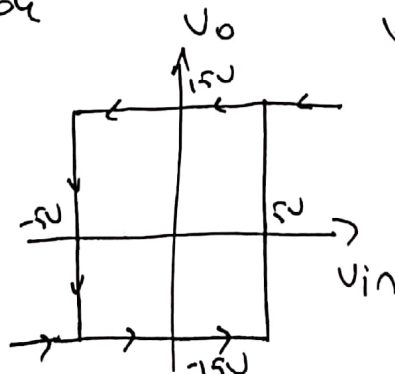
$$V_o = \pm 15V$$

$$V_p = V_o \cdot \frac{5k}{5k + 10k} = \frac{V_o}{3} \Rightarrow \pm 5V$$

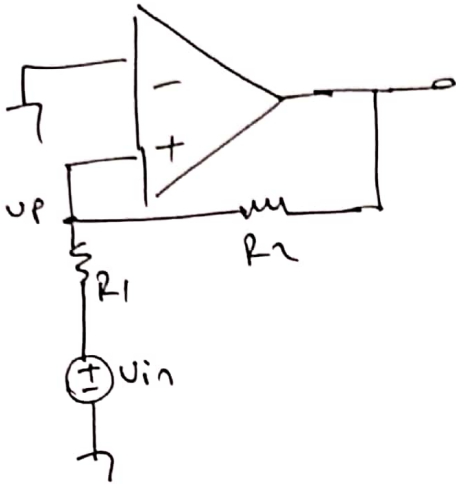
$$V_o = V_{cc} \text{ ise}$$

$$V_{in} > \frac{V_o}{3} \Rightarrow V_o = -V_{cc}$$

$$V_{in} > \frac{-V_{cc}}{3} \Rightarrow V_o = V_{cc}$$



Eviner komparator



$$V_N = 0$$

$$\frac{V_P - V_O}{R_2} + \frac{V_P - V_{in}}{R_1} = 0$$

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

$$V_P = \frac{R_1 V_O + R_2 V_{in}}{R_1 R_2} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_O + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$$

$$\Rightarrow V_P > V_N \Rightarrow V_O = V_{CC}$$

$$V_P = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$$

$$\Rightarrow V_P > 0 \text{ oldu\u011funda}$$

$$V_P = 0 \text{ oldu\u011funda} \Rightarrow V_{in} = -\frac{R_1}{R_2} V_{CC} \text{ olur.}$$

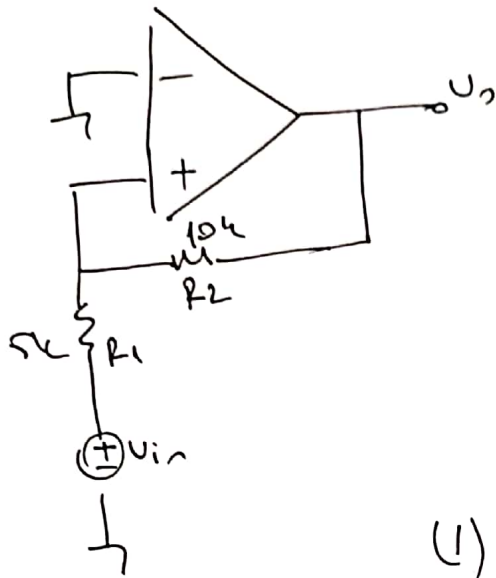
$$V_P > 0 \text{ oldu\u011fu} \Rightarrow V_{in} < -\frac{R_1}{R_2} V_{CC}$$

$$(V_O = V_{CC})$$

$$\Rightarrow V_P < V_N \Rightarrow V_O = -V_{CC}$$

$$V_{in} > \frac{R_1}{R_2} V_{CC}$$

Öm



$$\pm U_{CC} = \pm 15V$$

Histeresis ?

$$V_N = 0$$

$$\frac{V_P - V_{in}}{R_1} + \frac{V_P - V_o}{R_2} = 0$$

$$\frac{V_P - V_o}{10k} + \frac{V_P - V_{in}}{5k} = 0$$

(1) $V_P > 0$ için;

$$V_o = +U_{CC} = +15V$$

$$\frac{V_P}{10k} + \frac{V_P}{5k} - \frac{V_{in}}{5k} = \frac{15}{10k}$$

$\rightarrow V_P = V_N = 0$ için

$$V_{in} = -7.5V \text{ olur.}$$

$$V_{in} > -7.5V \Rightarrow V_o = +15V \text{ olur.}$$

(2) $V_P < 0$ için

$$V_o = -U_{EE} = -15V$$

$$\frac{V_P}{10k} + \frac{V_P}{5k} - \frac{V_{in}}{5k} = \frac{-15}{10k}$$

$\rightarrow V_P = V_N = 0$ için

$$V_{in} = 7.5V \text{ olur.}$$

$$V_{in} > 7.5V \Rightarrow V_o = -15V \text{ olur.}$$

