Elektronik II

Kaskod ve fark yükselteçleri

Orijinal not: Ders4.pdf

UYARI Bu belge, el yazısı ders notlarından Claude (Anthropic) yardımıyla dijitale aktarılmıştır. Yardımcı kaynak olarak hazırlanmıştır; hata veya eksik içerebilir. Lütfen orijinal notları ve ders kaynaklarını esas alın.

NOTICE *This document was transcribed from handwritten lecture notes with the help of Claude (Anthropic). It is meant as a supplementary resource and may contain errors or omissions. Always check against the original notes and official course material.*

Not: Orijinal dosyadaki basılı sayfalar (s. 4, 5, 11) dijitalleştirilmedi; yalnızca el yazısı sayfalar aktarıldı.

orj. s. 1

The MOS cascode

$$g_{m2}V_{gs2} = g_{m1}v_i \Rightarrow v_{gs2} = \frac{g_{m1}v_i}{g_{m2}}$$

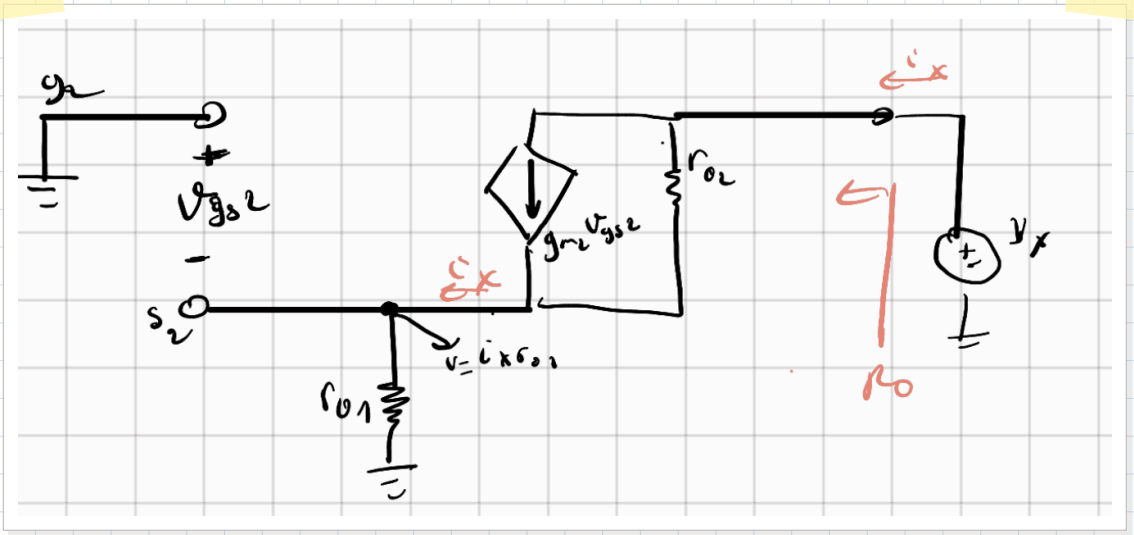
$$i_o = g_{m2}v_{gs2} + \frac{v_{gs2}}{r_{o2}}$$

$$i_o = g_{m2}\frac{g_{m1}v_i}{g_{m2}} + \frac{g_{m1}v_i}{g_{m2}r_{o2}}$$

$$i_o = g_{m1}v_i\left(1 + \frac{1}{g_{m2}r_{o2}}\right)$$

$$\frac{i_o}{v_i} = g_{m1}$$

Now, replacing Q_2 with its hybrid π mode and applying a test voltage v_x to the output node results in the equivalent circuit shown in.



orijinal çizim, s. 1

$$R_o = \frac{v_x}{i_x}, \qquad -v_{gs2} = i_x r_{o1}$$

$$\begin{aligned} v_x &= (i_x - g_{m2} v_{gs2})\, r_{o2} + i_x r_{o1} \\ &= i_x r_{o2} + g_{m2}\, i_x r_{o1} r_{o2} + i_x r_{o1} \\ \Rightarrow \quad v_x &= i_x (r_{o2} + r_{o1} + g_{m2}\, r_{o2} r_{o1}) \end{aligned}$$

and $R_o = \dfrac{v_x}{i_x} = r_{o1} + r_{o2} + g_{m2}\, r_{o2} r_{o1}$

orj. s. 2

$R_o \simeq (g_{m2} r_{o2})\, r_{o1}$ because the last term will dominate[1]

This expression has a simple and elegant interpretation. The CG transistor Q_2 raises the output resistance of the amplifier by the factor $(g_{m2} r_{o2})$, which is its intrinsic gain. At the same time, the CG transistor simply passes the current $(g_{m1} v_i)$ to the output node. Thus the CG or cascode transistor very effectively ?*realizes* the objectives we set for the current buffer with $K = A_{o2} = g_{m2} r_{o2}$.

> **Şekil:** Kitaptan yapıştırılmış basılı şekil. Solda kaskod yükselteç: altta Q_1 (girişi v_i), üstte Q_2 (gate'i V_{G2} ile beslenmiş); d_2 düğümünden yüke giden *To Load* oku, Q_2'nin source'undan aşağı bakan Kr_{o1} oku ve Q_1'in drain'inden aşağı bakan r_{o1} oku. Sağda açık mavi kutuda eşdeğer devre: $g_{m1} v_i$ akım kaynağı ile paralel Kr_{o1} direnci, çıkış d_2 (*To Load*).
> *(orijinal notta, s. 2)*

$$\begin{aligned} A_{vo} &= \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_{m1} v_i R_o}{v_i} = -g_{m1} R_o \\ &= -(g_{m1} r_{o1})(g_{m2} r_{o2}) \end{aligned}$$

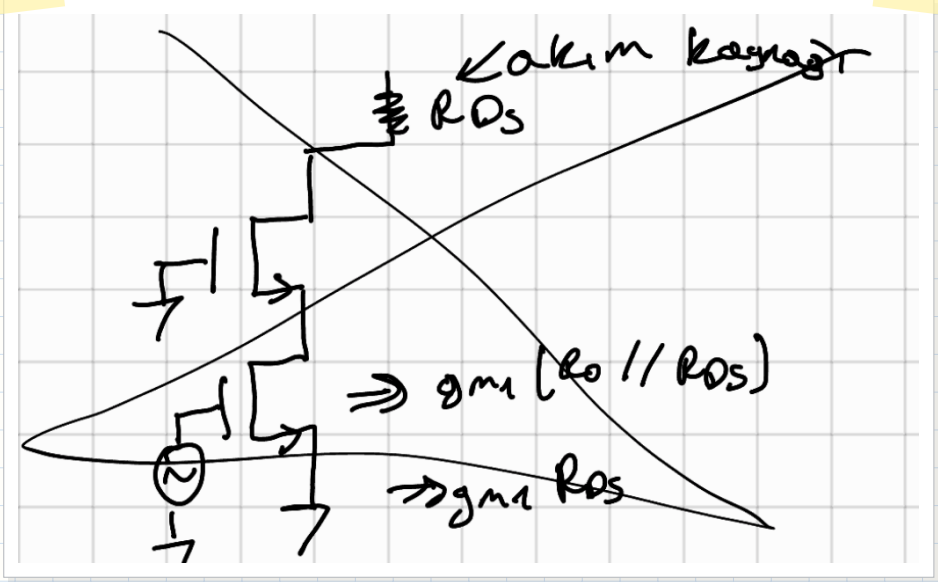
For the case $g_{m1} = g_{m2} = g_m$ and $r_{o1} = r_{o2} = r_o$

$$A_{vo} = -(g_m r_o)^2 = A_o^2$$

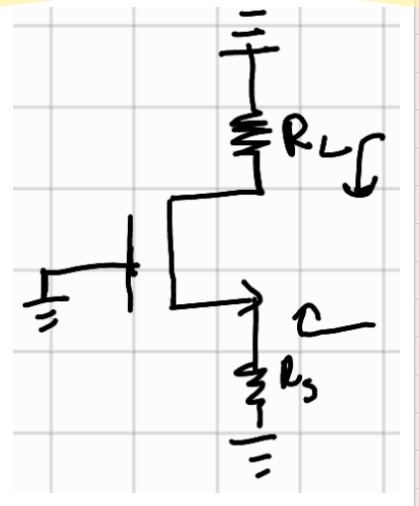
Thus cascoding results is increasing the gain magnitude from A_o to A_o^2

orj. s. 3

[1] Bu ifade, kırmızı bir çizgiyle sayfanın altındaki A_{vo} denklemindeki R_o'ya bağlanmış.



orijinal çizim, s. 3



orijinal çizim, s. 3

$$R_o = r_o + R_s + g_m r_o R_s$$
$$= r_o + (1 + g_m r_o) R_s$$

$$R_{in} = \frac{r_o + R_L}{1 + g_m r_o}$$
$$\simeq \frac{1}{g_m} + \frac{R_L}{1 + g_m r_o}$$

Şekil: Kitaptan yapıştırılmış basılı şekil: üç NMOS'lu kaskod yükselteç. V_{DD}'den inen akım kaynağı I, çıkış v_o en üstteki Q_3'ün drain'inde; Q_3 (gate V_{G3}), Q_2 (gate V_{G2}) ve Q_1 (gate v_i) üst üste, Q_1'in source'u toprakta. Mavi etiketler: Q_3'ün altına $(g_{m3}r_{o3})(g_{m2}r_{o2})r_{o1} = A_0^2\, r_o$, Q_2'nin altına $(g_{m2}r_{o2})r_{o1}$, Q_1'in altına r_{o1}. *(orijinal notta, s. 3)*

Supply gerilimi bizi limitliyor, mosfetlerin üzerindeki gerilim düşümünden dolayı

orj. s. 6

Şekil: Kitaptan yapıştırılmış basılı şekil: dört BJT'li kaskod yükselteç. V_{CC} altında sırayla Q_4 (baz V_{B4}), Q_3 (baz V_{B3}), çıkış düğümü v_o, Q_2 (baz V_{B2}) ve Q_1 (baz girişi v_i, emiter toprakta). Mavi etiketler: $\mathcal{R}_{op} = (g_{m3}r_{o3})(r_{o4}\|r_{\pi3})$, $\mathcal{R}_{on} = (g_{m2}r_{o2})(r_{o1}\|r_{\pi2})$, $A_v = -g_{m1}(\mathcal{R}_{on}\|\mathcal{R}_{op})$, $\mathcal{R}_{in} = r_{\pi1}$. *(orijinal notta, s. 6)*

$r_{\pi3}$ because $r_{o4} \gg r_{\pi3}$

$$r_{\pi3} = g_{m3}r_{o3}\frac{\beta+1}{g_{m3}} \simeq \beta\, r_{o3}{}^{2}$$

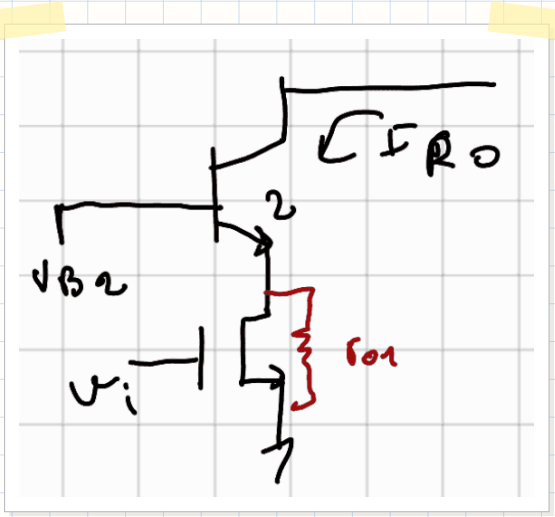
$$r_\pi = (\beta+1)\,r_e \qquad r_e = \frac{V_T}{I_E}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \qquad r_e = \frac{1}{g_m}$$

Şekil: Kitaptan yapıştırılmış basılı şekiller. (a) Bazı v_i ile sürülen, emiterinde $\mathcal{R}_e$ olan BJT; kolektöre bakan çıkış direnci $\mathcal{R}_o = r_o + (\mathcal{R}_e\|r_\pi) + g_m r_o(\mathcal{R}_e\|r_\pi) \simeq r_o[1 + g_m(\mathcal{R}_e\|r_\pi)]$. (b) Bazı toprağa bağlı BJT; kolektörde $\mathcal{R}_L$ (üst ucu toprakta), emiterde $\mathcal{R}_e$: $\mathcal{R}_o = r_o + (\mathcal{R}_e\|r_\pi) + g_m r_o(\mathcal{R}_e\|r_\pi) = r_o + (1 + g_m r_o)(\mathcal{R}_e\|r_\pi)$ ve $\mathcal{R}_{in} = \dfrac{r_o + \mathcal{R}_L}{1 + \frac{1}{\alpha}g_m r_o + \frac{\mathcal{R}_L}{r_\pi}} \simeq r_e + \dfrac{\mathcal{R}_L}{1 + g_m r_o}$, $\mathcal{R}_L \ll \beta r_o$ için. *(orijinal notta, s. 6)*

orj. s. 7

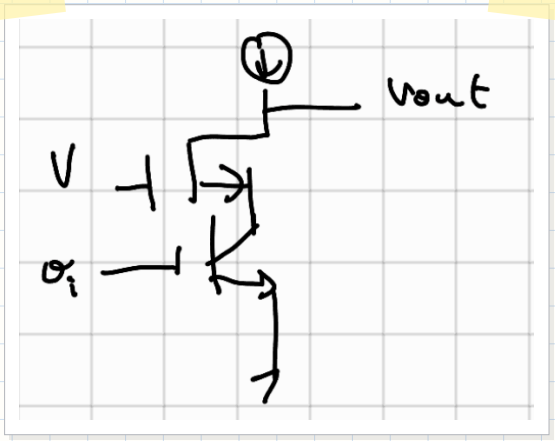
[2] Pay ve paydadaki g_{m3} çizilerek sadeleştirilmiş.



orijinal çizim, s. 7

$$= r_{o2} + (1 + g_m r_o)(R_E \parallel r_\pi)$$
$$= r_{o2} + (1 + g_{m2} r_{o2})(r_{o1} \parallel r_\pi)$$

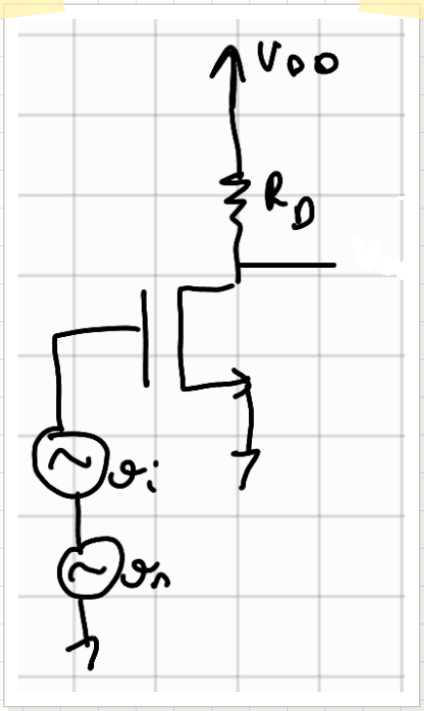
BiCMOS cascodes



orijinal çizim, s. 7

Şekil: Kitaptan yapıştırılmış basılı şekil. (a) V_{DD}'den inen akım kaynağı I ve çıkış v_o; üstte BJT Q_2 (baz V_{B2}), altta MOSFET Q_1 (gate v_i, source toprakta). (b) Akım kaynağı I ve çıkış v_o; üst üste MOSFET Q_3 (gate V_{G3}), BJT Q_2 (baz V_{B2}) ve BJT Q_1 (baz v_i). El yazısıyla çizilmiş bir ok (a) devresini işaret ediyor. *(orijinal notta, s. 7)*

Bu tercih edilir çünkü giriş direnci sonsuz



orijinal çizim, s. 7

$$V_{out} = -g_m(R_D \parallel r_o)(v_i + v_n)$$

orj. s. 8

Differential amplifier

Şekil: Kitaptan yapıştırılmış basılı şekil: MOSFET fark yükselteci. İki NMOS Q_1 ve Q_2; drain'leri R_D dirençleri üzerinden V_{DD}'ye bağlı, drain gerilimleri v_{D1}, v_{D2} ve drain akımları i_{D1}, i_{D2}; gate'leri sırasıyla toprağa göre v_{G1} ve v_{G2} kaynaklarıyla sürülüyor; ortak source düğümünden $-V_{SS}$'e giden I akım kaynağı.
(orijinal notta, s. 8)

$$v_{G1} = \frac{v_i}{2} + v_n$$

$$v_{G2} = -\frac{v_i}{2} + v_n$$

$$V_{diffout} = A_V(V_{G1} - V_{G2})$$

$$\frac{I}{2} = \frac{1}{2}k'_n\frac{W}{L}(v_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{ov} = V_{GS} - V_t$$

$$\frac{I}{2} = \frac{1}{2}k'_n\frac{W}{L}V_{ov}^2$$

$$V_{ov} = \sqrt{\frac{I}{k_n'(W/L)}}$$

$$v_{D1} = v_{D2} = V_{DD} - \frac{I}{2}R_D$$

$$\max(V_{CM}) = V_t + V_{DD} - \frac{I}{2}R_D$$
$$\min(V_{CM}) = -V_{SS} + V_{CS} + V_t + V_{ov}$$

$$V_{GS} \geq V_t$$
$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_{tn}$$
$$V_{CM,max} = V_D + V_{tn}$$
$$\| \; V_{GS}$$

orj. s. 9

> **Şekil:** Kitaptan yapıştırılmış basılı fark yükselteci şekli (8. sayfadaki devre); üzerine el yazısıyla eklenenler: iki gate ucunda G, iki source ucunda S; her kolun akımı için aşağı oklu $I/2$; v_{D1} düğümünün yanında $V_{DD} - R_D\frac{I_D}{2}$; akım kaynağı I'nın yanında V_{CS} (+ üstte, − altta). Q_2'nin drain tarafından sağ üste çizilen bir ok aşağıdaki $\frac{2\,I/2}{V_{ov}}$ ifadesini gösteriyor. *(orijinal notta, s. 9)*

$$\frac{2\,I/2}{V_{ov}} = \frac{I}{V_{ov}}$$

$v_{D2} - v_{D1} = 0$ olur

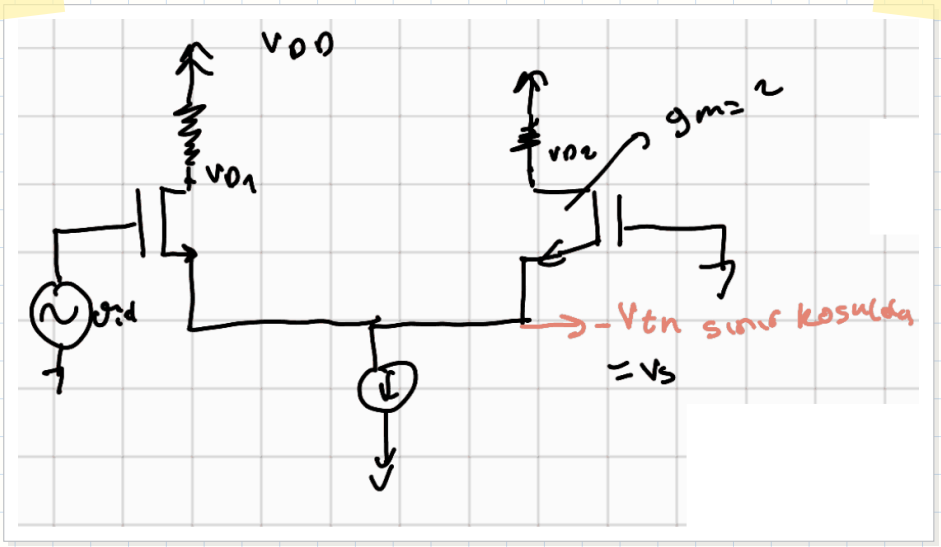
$$V_{GS} \geq V_{tn}$$
$$V_{CM} - (-(V_{CS} + V_{SS})) \geq V_{tn}$$
$$\boxed{V_{CM} \geq -V_{SS} + V_{CS} + V_{tn}}$$

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_{tn}$$
$$V_D \geq V_G - V_{tn}$$
$$V_D - V_{tn} > V_{CM}$$
$$\max(V_{CM}) = V_D - V_{tn}$$
$$= V_{DD} - \frac{I}{2}R_D\,V_{tn}$$[3]

$$-V_{SS} + V_{CS} + V_{tn} < V_{CM} < V_{DD} - \frac{I}{2}R_D - V_{tn}$$

[3] Claude notu: muhtemelen $V_{DD} - \frac{I}{2}R_D - V_{tn}$ olmalı.

orj. s. 10



orijinal çizim, s. 10

$V_{GS2} = V_{tn} \rightarrow$ limit condition

$$I = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_{tn})^2$$
$$v_{GS1} = \sqrt{2}\, V_{ov} + V_{tn}$$

$$v_{id,max} = \sqrt{2}\, V_{ov}$$
$$v_{id,min} = -\sqrt{2}\, V_{ov}$$

orj. s. 12

Şekil: Sayfanın üst kısmı basılı materyal içeriyor (ders kitabı, (8.18)–(8.24) denklemleri); dijitalleştirilmedi. El yazısı ekleme: (8.23) denkleminde karekök içindeki $(v_{id}/2)^2/V_{ov}^2$ terimi çizgiyle işaretlenmiş ve bu çizgiden denklemin yanındaki $v_{id} \ll V_{ov}$ notuna bir ok gidiyor. *(orijinal notta, s. 12)*

$$i_{D1} = \frac{I}{2} + \left(\frac{I}{V_{ov}}\right)\left(\frac{v_{id}}{2}\right)$$
$$i_{D2} = \frac{I}{2} - \left(\frac{I}{V_{ov}}\right)\left(\frac{v_{id}}{2}\right)$$

$$v_{O1} = V_{DD} - R_D i_{D1}$$
$$v_{O2} = V_{DD} - R_D i_{D2}$$
$$v_{O2} - v_{O1} = R_D i_{D1} - R_D i_{D2} = R_D (i_{D1} - i_{D2})$$

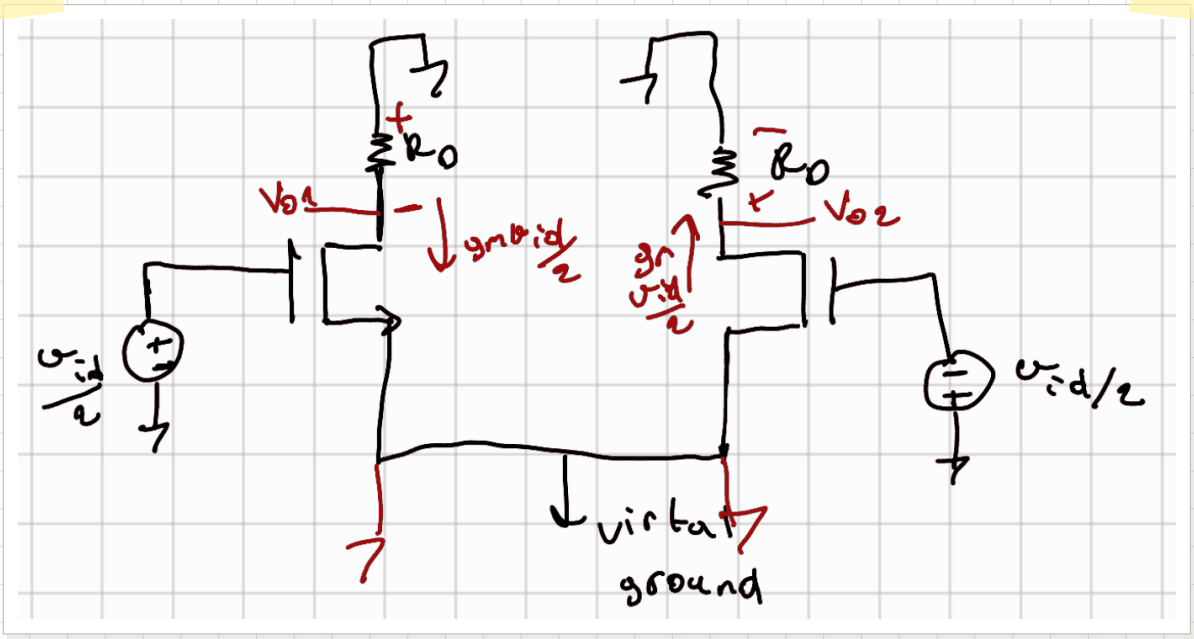
$$V_{out} = V_{O2} - V_{O1} = R_D \left[\frac{I}{V_{ov}} \cdot v_{id}\right]$$

orj. s. 13

$$\frac{v_{out}}{v_{id}} = R_D \frac{I}{V_{ov}} v_{id}$$[4]

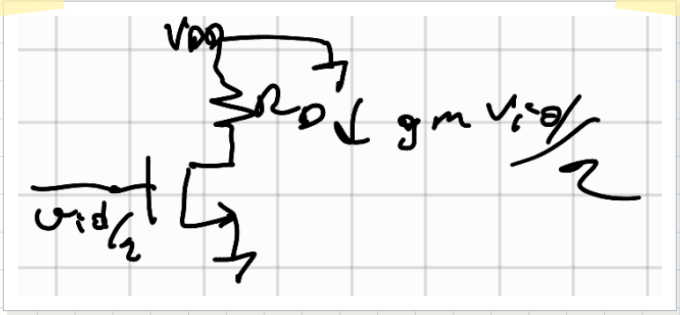
$$\frac{v_{out}}{v_{id}} = R_D \frac{I}{V_{ov}} = g_m R_D$$

Şekil: 9. sayfadaki fark yükselteci şekli, aynı el yazısı notlarıyla birlikte yeniden yapıştırılmış (gate'lerde G, source'larda S, kollarda $I/2$, v_{D1} yanında $V_{DD} - R_D \frac{I_D}{2}$, V_{CS} ve sağ üstte $\frac{2\,I/2}{V_{ov}} = \frac{I}{V_{ov}}$).
(orijinal notta, s. 13)



orijinal çizim, s. 13

ayrı ayrı çözülebilir



orijinal çizim, s. 13

[4] Claude notu: ilk satırın sağındaki v_{id} muhtemelen fazla yazılmış; sonraki satır $v_{out}/v_{id} = R_D\, I/V_{ov}$ olarak yazılmış.