



מעגלים ליניאריים

044142

סיכום הקורס

תוכן עניינים

3	.....דיודה
4	.....טרנזיסטור MOS
5	.....טרנזיסטור בי-פולארי
7	.....תגובת התדר
7	.....מגברים
7	.....Common Source, MOS טרנזיסטור
8	.....Common Drain, MOS טרנזיסטור
9	.....Common Gate, MOS טרנזיסטור
10	.....Common Collector, מגבר ביפולרי
11	.....Common Emitter, מגבר ביפולרי
12	.....Common Base, מגבר ביפולרי
13	.....מגברים דיפרנציאליים (מגברי הפרש)
18	.....משוב

דיודה

זרם הדיודה:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

התנגדות דינאמית:

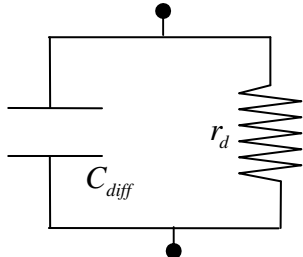
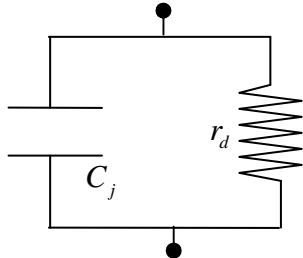
$$r_d = \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1} = \frac{kT}{qI_0} \Big|_{I=I_D} = \frac{kT}{qI_D}$$

בממתח קדמי, קיבול הדיפוזיה דומיננטי

$$C_{diff} = \frac{\tau_F}{r_d}$$

בממתח אחורי, קיבול הצומת דומיננטי

$$C_j \sim \frac{1}{\sqrt{V}}$$

הערות	סכמת תמורה	
		ממתח קדמי
		ממתח אחורי

טרנזיסטור MOS

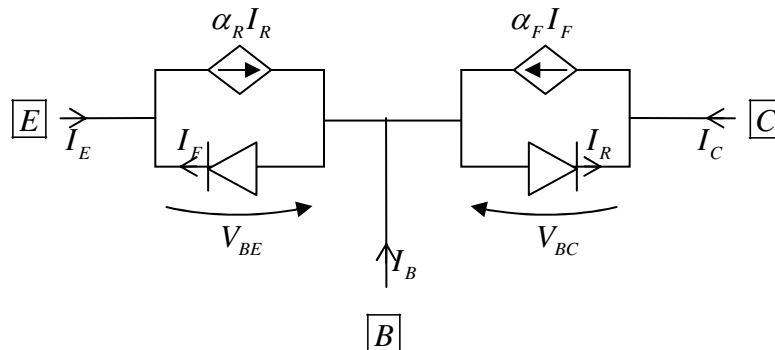
PMOS		NMOS		טרנזיסטור / פרמטר
Depletion	Enhancement	Depletion	Enhancement	
				סכמה חשמלית
$V_{T,0} > 0$	$V_{T,0} < 0$	$V_{T,0} < 0$	$V_{T,0} > 0$	מתח סף התחלתי
$K \triangleq \frac{1}{2} \mu_h^* \frac{W}{L} C_{Oxide}$		$K \triangleq \frac{1}{2} \mu_e^* \frac{W}{L} C_{Oxide}$		קבוע הטרנזיסטור
$V_T = V_{T,0} - |\gamma| \left( \sqrt{|V_{SB}|} + |2\phi_F| - \sqrt{|2\phi_F|} \right)$		$V_T = V_{T,0} + |\gamma| \left( \sqrt{|V_{SB}|} + |2\phi_F| - \sqrt{|2\phi_F|} \right)$		מתח סף כולל אפקט מצע
$V_{GS} > V_T$		$V_{GS} < V_T$		מצבי הולכה
$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$		$V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$		
$V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$		$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$		
$K \left((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right)$				זרם הטרנזיסטור במצב ליניארי
$K (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$				זרם הטרנזיסטור במצב רוויה
$g_m = 2K |V_{GS} - V_T| (1 + \lambda V_{DS}) = \frac{2I_{DS}}{V_{GS} - V_T} = 2\sqrt{KI_{DS}}$				מוליכות באות קטן ברוויה
$r_0 = \frac{dV_{DS}}{dI_{DS}} = \left| \frac{V_A}{I_{DS}} \right|$				התנגדות r_0 במצב רוויה
$r_{0,linear} = \frac{1}{2K (V_{GS} - V_T - V_{DS})}$				התנגדות r_0 במצב אוהמי
$\lambda = \frac{1}{|V_A|}$				מקדם התקצרות התעלה
$\gamma < 0$		$\gamma > 0$		מקדם אפקט המצע
				סכמת תמורה לאות קטן

טרנזיסטור בי-פולארי

$\beta \triangleq \frac{\alpha}{1-\alpha}$	הגבר זרם	τ_B	זמן המעבר בבסיס
$\alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{ES}$	הפיכות	$\alpha \triangleq b\gamma$	מקדם המעבר

NPN	PNP	
$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_h W_B N_{A,B}}{D_e W_E N_{D,E}}}$	$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_e W_B N_{D,B}}{D_h W_E N_{A,E}}}$	נצילות ההזרקה
$b = 1 - \frac{W_B^2}{2D_e \tau_e} = 1 - \frac{\tau_B}{\tau_e}$	$b = 1 - \frac{W_B^2}{2D_h \tau_h} = 1 - \frac{\tau_B}{\tau_h}$	גורם המעבר בבסיס
$I_E = -I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right) + \alpha_R I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right)$	$I_E = I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right)$	זרם ב Emitter
$I_C = \alpha_F I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{kT}} - 1 \right)$	$I_C = -\alpha_F I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) + I_{CS} \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1 \right)$	זרם ב Collector
$I_{ES} = \frac{qAD_{e,B} \bar{n}_{p,B}}{w_B} + \frac{qAD_{h,E} \bar{p}_{n,E}}{L_{h,E}}$ $I_{CS} = \frac{qAD_{e,B} \bar{n}_{p,B}}{w_B} + \frac{qAD_{h,C} \bar{p}_{n,C}}{L_{h,C}}$	$I_{ES} = \frac{qAD_{h,B} \bar{p}_{n,B}}{w_B} + \frac{qAD_{e,E} \bar{n}_{p,E}}{L_{e,E}}$ $I_{CS} = \frac{qAD_{h,B} \bar{p}_{n,B}}{w_B} + \frac{qAD_{e,C} \bar{n}_{p,C}}{L_{e,C}}$	זרמי הזליגה

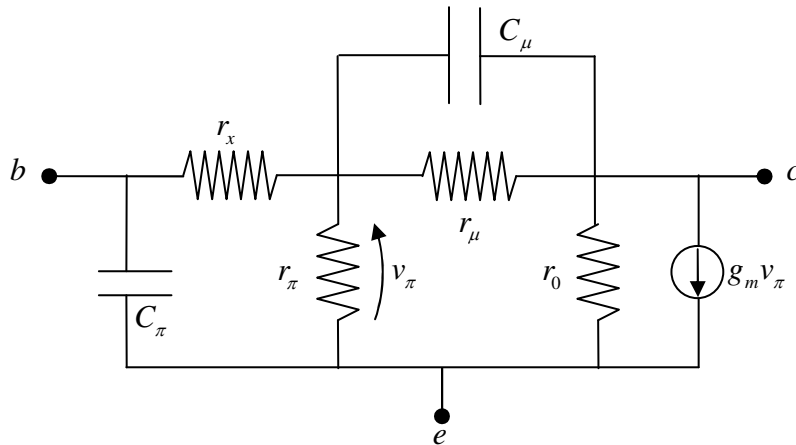
מודל אברס-מול עבור NPN :



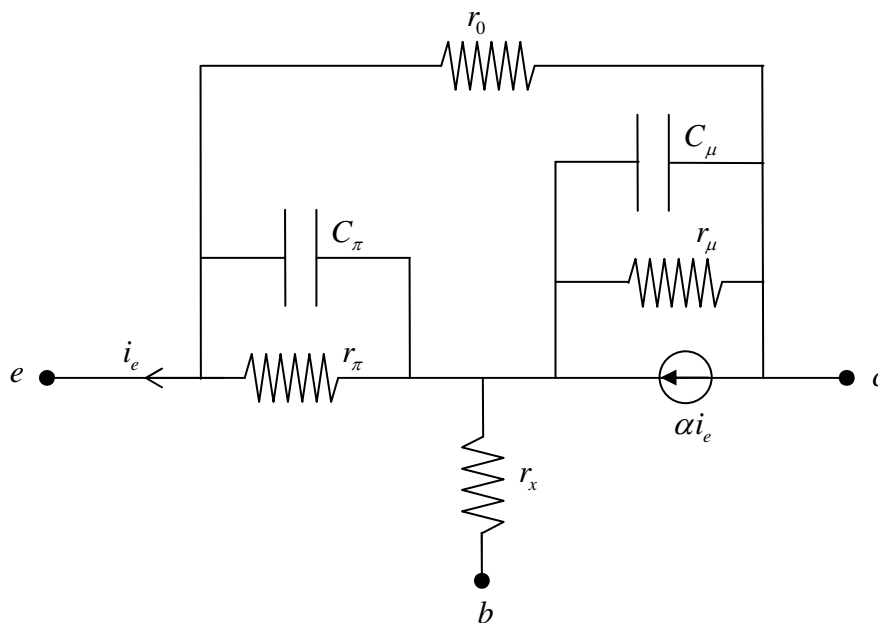
להלן תחומי העבודה, כאשר כיווני המתחים והזרמים נקבעו כך שעבור מצב פעיל קדמי, כולם חיוביים.

מצב הולכה	ממתחי הדיודות NPN	מתחי טרנזיסטור NPN	מתחי טרנזיסטור PNP	הקשר בין זרמי הטרנזיסטור
קיטעון	BE בממתח אחורי BC בממתח אחורי	$V_{BE} < V_{BE,ON}$	$V_{EB} < V_{EB,ON}$	זרמי זליגה בלבד
פעיל קדמי	BE בממתח קדמי BC בממתח אחורי	$V_{BE} = V_{BE,ON}$ $V_{CE} > V_{BE,ON}$	$V_{EB} = V_{EB,ON}$ $V_{EC} > V_{EB,ON}$	$I_C = \beta_F I_B = \alpha_F I_E$ ניתן להניח כי הטרנזיסטור עדיין פעיל קדמי עבור $(I_C = \beta_F I_B)$ עבור $V_{CE} > V_{CE,Sat}$
רוויה	BE בממתח קדמי BC בממתח קדמי	$V_{BE} = V_{BE,Sat}$ $V_{CE} = V_{CE,Sat}$	$V_{EB} = V_{EB,Sat}$ $V_{EC} = V_{EC,Sat}$	$I_C < \beta_F I_B$
פעיל אחורי	BE בממתח אחורי BC בממתח קדמי	$V_{BC} = V_{BC,ON}$ $V_{CE} < 0$	$V_{CB} = V_{CB,ON}$ $V_{EC} < 0$	$I_E = -\beta_R I_B = \alpha_R I_C$

סכמת תמורה לאות קטן, עבור טרנזיסטור ביפולארי במצב פעיל
 סכמת π (עדיף להשתמש כאשר ידוע המתח בפולט)



סכמת T (עדיף להשתמש כאשר ידוע המתח בבסיס)



פרמטרים

$\alpha \triangleq \frac{i_c}{i_e}$	$\beta \triangleq \frac{i_c}{i_b}$	
$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$	$\beta = \frac{1}{1-\alpha}$	
	$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{q I_C}{kT}$	
	$r_0 = \frac{V_A}{I_C}$	
$r_\pi = (\beta+1)r_e$	$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{kT}{q} \frac{\beta}{I_C}$	$r_e = \frac{\alpha}{g_m}$

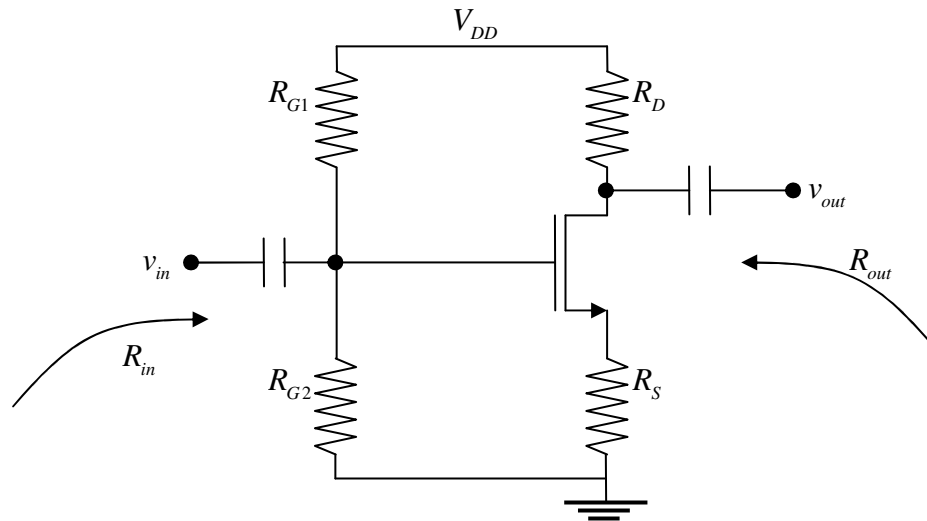
תגובת התדר

קבלים קטנים	קבלים גדולים	תדרים נמוכים
נתק	משתתפים	תדרים ביניים
נתק	קצר	תדרים גבוהים
משתתפים	קצר	

מגברים

טרנזיסטור MOS, Common Source

סכמת המגבר:



פרמטרים:

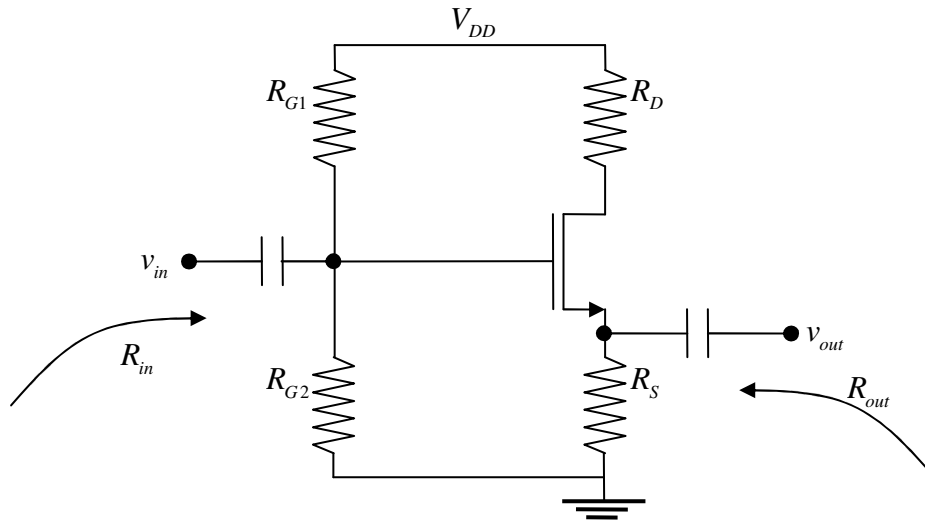
הגבר מתח $A_v \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in}}$	התנגדות יציאה R_{out}	התנגדות כניסה R_{in}
$-\frac{g_m r_0 R_D}{((g_m + g_{mb})r_0 R_S + R_S + r_0 + R_D)}$	$((g_m + g_{mb})r_0 R_S + R_S + r_0) \parallel R_D$	$R_{G1} \parallel R_{G2}$

הערות:

- הנגד במקור, R_S , נקרא נגד ניוון

טרנזיסטור MOS, Common Drain

סכמת המגבר:

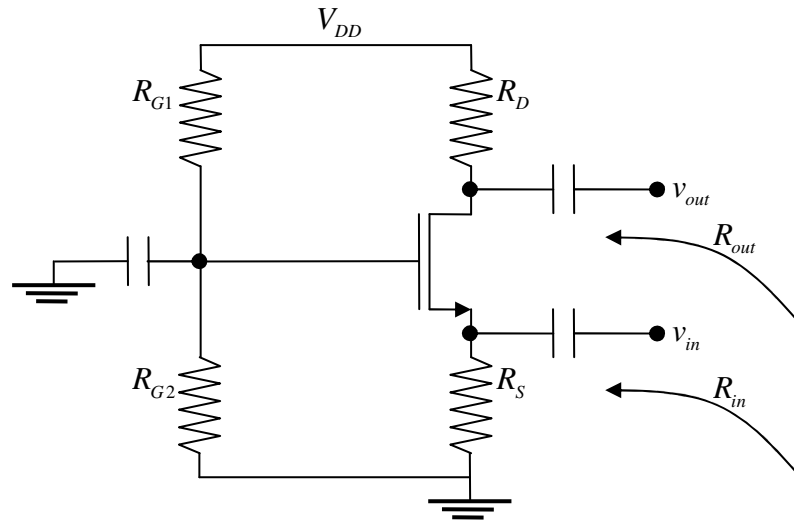


פרמטרים:

הגבר מתח	התנגדות יציאה	התנגדות כניסה
$A_v \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in}}$	R_{out}	R_{in}
$\frac{g_m r_0 R_S}{((g_m + g_{mb}) r_0 R_S + R_S + r_0 + R_D)}$	$\frac{R_S (r_0 + R_D)}{R_D + r_0 R_S (g_m + g_{mb}) + R_S + r_0}$	$R_{G1} \parallel R_{G2}$

טרנזיסטור MOS, Common Gate

סכמת המגבר:



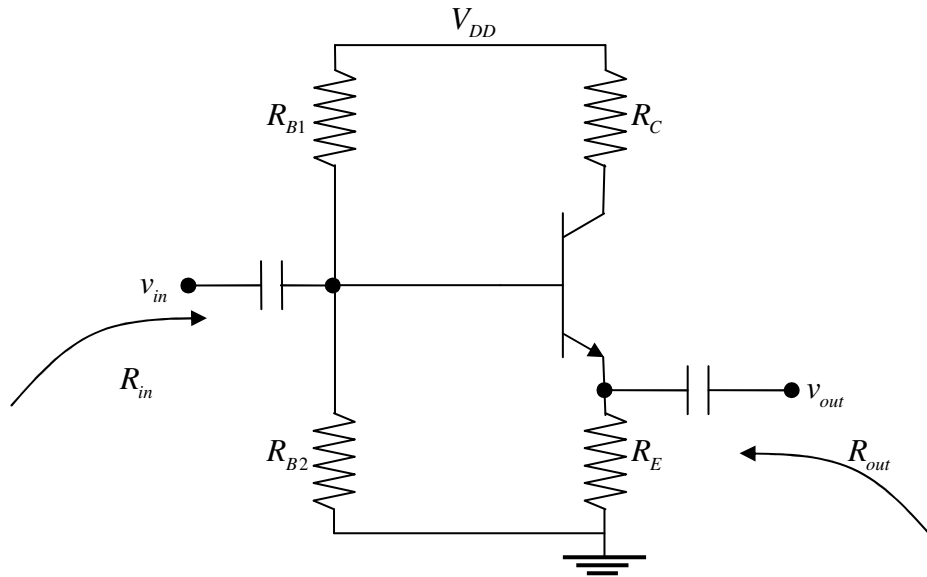
פרמטרים:

הגבר מתח	התנגדות יציאה	התנגדות כניסה
$A_v \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in}}$	R_{out}	R_{in}
$\frac{R_D (1 + (g_m + g_{mb}) r_0)}{R_D + r_0}$	$(r_s \parallel R_S + r_0 g_m (r_s \parallel R_S)) \parallel R_D$	$\frac{R_S (r_0 + R_D)}{R_D + r_0 R_S (g_m + g_{mb}) + R_S + r_0}$

הערות

- התנגדות המקור: r_s

מגבר ביפולרי, Common Collector



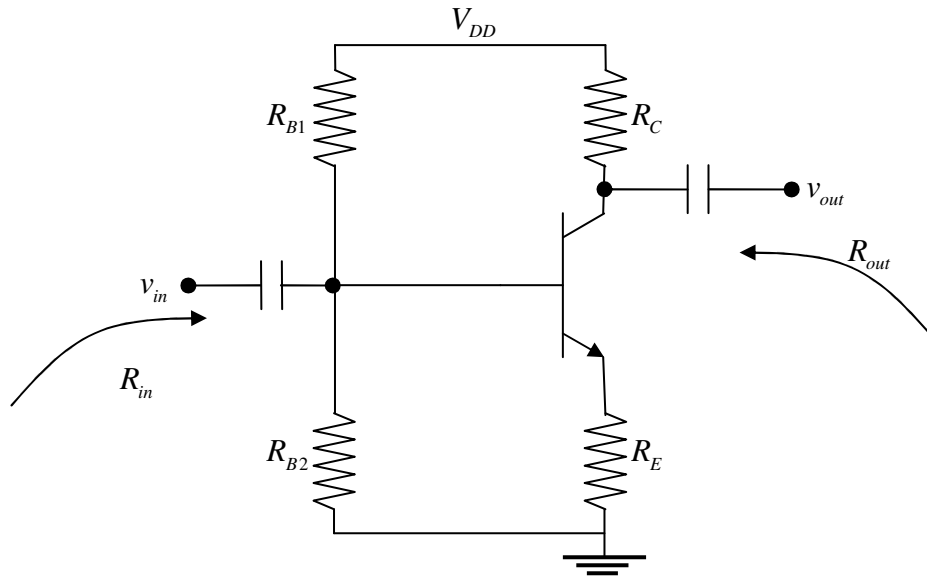
הנחות:

$$r_{\mu} \rightarrow 0$$

פרמטרים:

הגבר מתח $A_v \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in}}$	התנגדות יציאה R_{out}	התנגדות כניסה R_{in}
$\frac{1}{1 + \frac{(r_0 + R_E + R_C)(r_x + r_{\pi})}{r_0 R_E (\beta + 1)}}$	$\frac{R_E (r_x + r_{\pi})(r_0 + R_C)}{(r_0 + R_E + R_C)(r_x + r_{\pi}) + r_0 R_E (\beta + 1)}$	$R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel \left(r_x + r_{\pi} + \frac{r_0 R_E (\beta + 1)}{R_C + R_E + r_0} \right)$

מגבר ביפולרי, Common Emitter



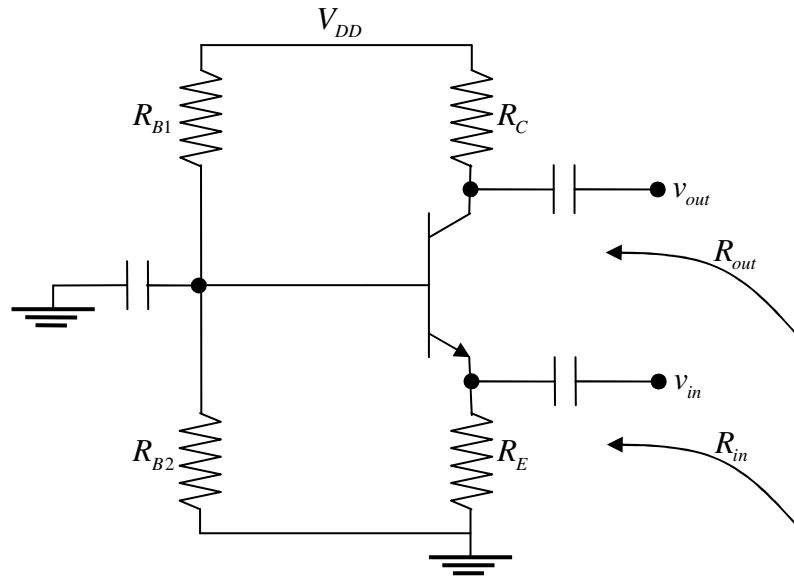
הנחות:

$$r_\mu \rightarrow 0$$

פרמטרים:

הגבר מתח $A_v \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in}}$	התנגדות יציאה R_{out}	התנגדות כניסה R_{in}
$-\frac{g_m r_\pi (r_0 \parallel R_C)}{r_x + r_\pi + R_E (\beta + 1)}$	$r_0 \parallel R_C$	$R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel \left(r_x + r_\pi + \frac{r_0 R_E (\beta + 1)}{R_C + R_E + r_0} \right)$

מגבר ביפולרי, Common Base



הנחות:

- $r_x = 0$
- $r_o, r_\mu \rightarrow 0$

פרמטרים:

הגבר מתח $A_v \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in}}$	התנגדות יציאה R_{out}	התנגדות כניסה R_{in}
$g_m R_C$	R_C	$R_E \parallel ((\beta + 1)r_\pi)$

מגברים דיפרנציאליים (מגברי הפרש)

פרמטרי מגבר דיפרנציאלי באופן כללי :

$$v_{out} = A_d v_{in,d} + A_c v_{in,c}$$

כאשר מגדירים

$$v_{in,d} \triangleq v_{in,1} - v_{in,2} \quad v_{out,d} \triangleq v_{out,1} - v_{out,2}$$

$$v_{in,c} \triangleq \frac{1}{2}(v_{in,1} + v_{in,2}) \quad v_{out,c} \triangleq \frac{1}{2}(v_{out,1} + v_{out,2})$$

ואז מתקבל

$$v_{in,1} = v_{in,c} + \frac{1}{2}v_{in,d} \quad v_{out,1} = v_{out,c} + \frac{1}{2}v_{out,d}$$

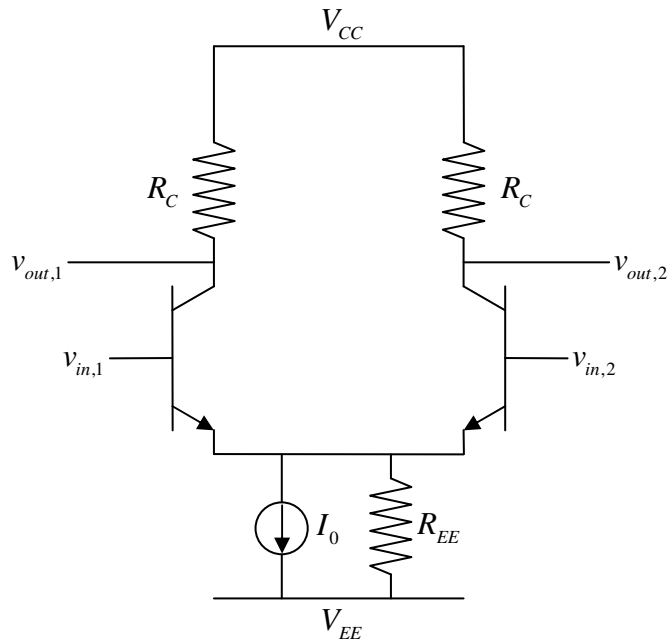
$$v_{in,2} = v_{in,c} - \frac{1}{2}v_{in,d} \quad v_{out,2} = v_{out,c} - \frac{1}{2}v_{out,d}$$

מגדירים יחס דחיית אופן משותף :

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

או בדציבלים :

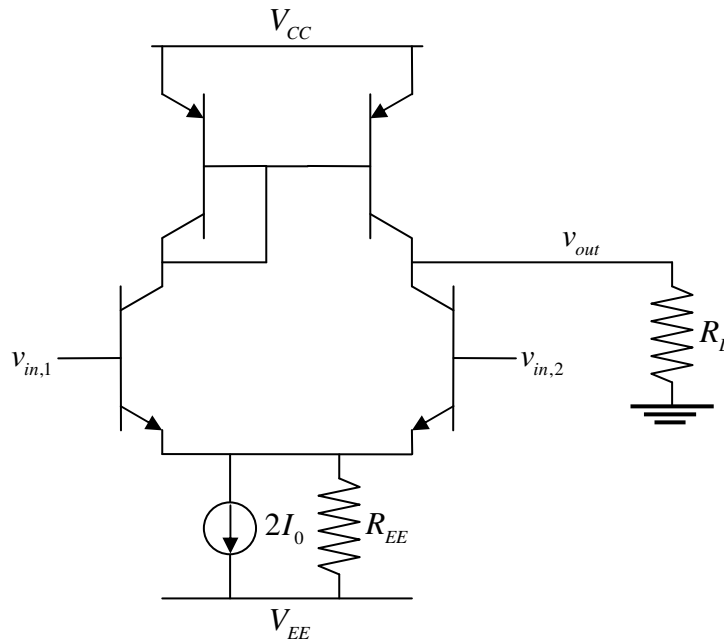
$$CMRR = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$



פרמטרים :

הגבר מתח דיפרנציאלי $A_{v,dm} \triangleq \frac{v_{out,dm}}{v_{in,dm}}$	התנגדות יציאה דיפרנציאלית $R_{out,dm} \triangleq \frac{v_{out,d}}{i_{out}}$	התנגדות כניסה דיפרנציאלית $R_{in,dm} \triangleq \frac{v_{in,dm}}{i_{in,dm}}$
$-g_m (R_C \parallel r_o)$	$2(R_C \parallel r_o)$	$2r_\pi$
הגבר מתח משותף $A_{v,cm} \triangleq \frac{v_{out,cm}}{v_{in,cm}}$	התנגדות יציאה משותפת $R_{out,cm} \triangleq \frac{v_{out,cm}}{i_{out,cm}}$	התנגדות כניסה משותפת $R_{in,cm} \triangleq \frac{v_{in,cm}}{i_{in,cm}}$
$-\frac{g_m R_C}{1 + 2g_m R_{EE}}$	$\frac{1}{2} R_C$	$\frac{1}{2} r_\pi + (1 + \beta) R_{EE}$
	$CMRR \triangleq \left| \frac{A_{v,dm}}{A_{v,cm}} \right|$	
	$1 + 2g_m R_{EE}$	

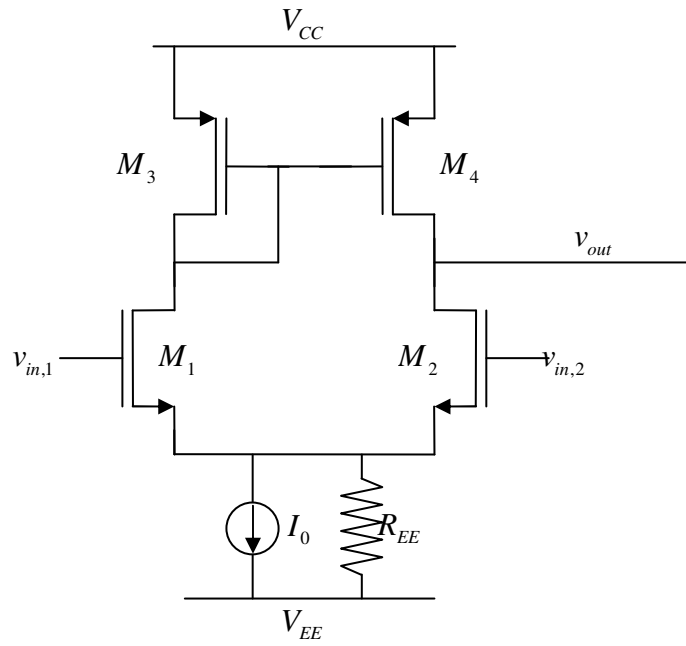
מגבר דיפרנציאלי ביפולארי עם עומס אקטיבי



פרמטרים :

הגבר מתח דיפרנציאלי	התנגדות יציאה דיפרנציאלית	התנגדות כניסה דיפרנציאלית
$A_{v,dm} \triangleq \frac{v_{out,dm}}{v_{in,dm}}$	$R_{out,dm} \triangleq \frac{v_{out,d}}{i_{out}}$	$R_{in,dm} \triangleq \frac{v_{in,dm}}{i_{in,dm}}$
$g_m R_L$		
הגבר מתח משותף	התנגדות יציאה משותפת	התנגדות כניסה משותפת
$A_{v,cm} \triangleq \frac{v_{out,cm}}{v_{in,cm}}$	$R_{out,cm} \triangleq \frac{v_{out,cm}}{i_{out,cm}}$	$R_{in,cm} \triangleq \frac{v_{in,cm}}{i_{in,cm}}$
0		
	$CMRR \triangleq 20 \log \left| \frac{A_{v,dm}}{A_{v,cm}} \right|$	
	∞	

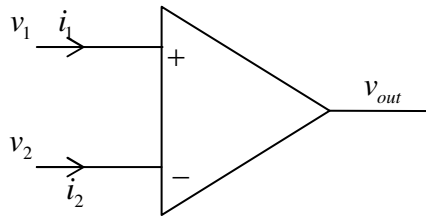
מגבר CMOS דיפרנציאלי עם עוצס אקטיבי ויציאה אחת



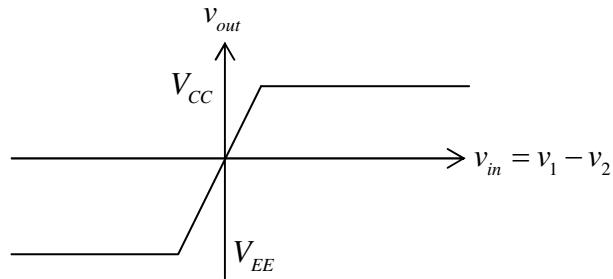
נתון: $g_{m1} = g_{m2}, g_{m3} = g_{m4}, r_{0,1} = r_{0,2} = \infty, r_{0,3} = r_{0,4}$

הגבר מתח משותף	הגבר מתח דיפרנציאלי	התנגדות יציאה
$A_{V,c} \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in,c}}$	$A_{V,d} \triangleq \frac{v_{out}}{v_{in,d}}$	$R_{out} \triangleq \frac{v_{out}}{i_{out}}$
$A_{V,c} = -\frac{r_{0,4}g_{m2}}{(1+2g_{m1}r_{0,5})(1+2g_{m4}r_{0,3})}$	$A_{V,d} = \frac{r_{0,4}}{2} \left[g_{m2} + \frac{g_{m1}g_{m4}r_{0,3}}{1+g_{m3}r_{0,3}} \right]$	$R_{out} = r_{0,4}$

מגבר שרת (Operational Amplifier)



אופייין המגבר :



עבור מגבר שרת אידיאלי, מתקיים :

$$r_{in} \rightarrow \infty$$

$$r_{out} \rightarrow 0$$

$$a_v \rightarrow \infty$$

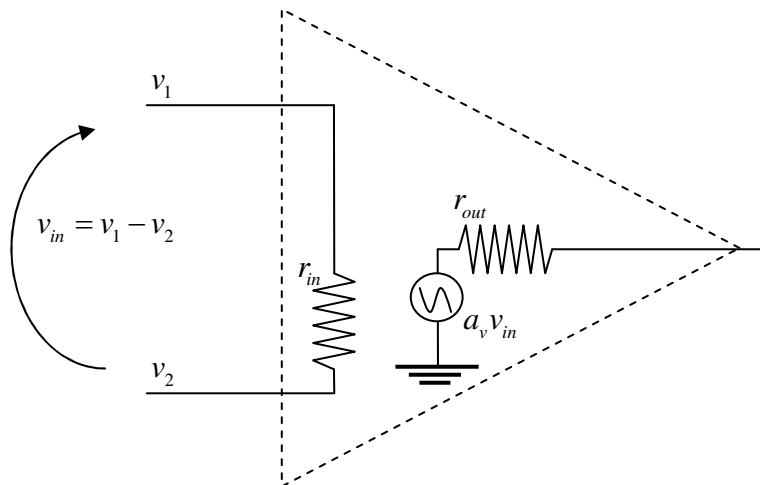
וגם מתקיים קצר וירטואלי :

$$v_1 = v_2$$

ומהתנגדות הכניסה הגבוהה :

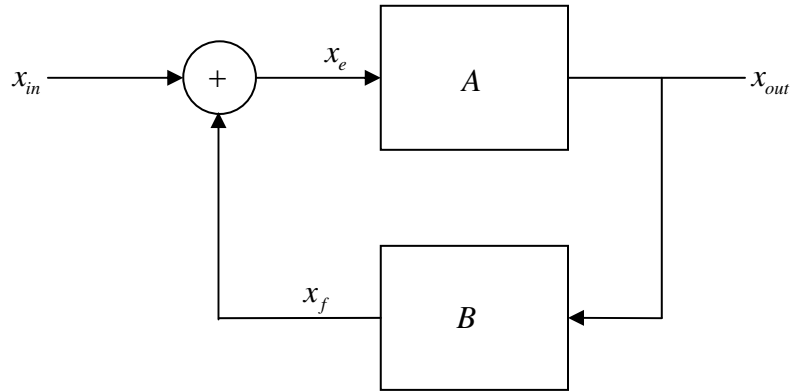
$$i_1 = i_2 = 0$$

סכמת תמורה של מגבר שרת :



משוב

סכמת משוב כללי:



קביעת סוג המשוב:

- דגימת האות במוצא (דומה לפעולת מדידה)
 - דגימה מצומת המוצא היא דגימה מקבילית של מתח (PO)
 - דגימה מחוג המוצא היא דגימה טורית של זרם (SO)
- החזרת האות לכניסה (דומה לפעולת סיכום)
 - החזרה לצומת הכניסה היא החזרה מקבילית של זרם (PI)
 - החזרה לחוג הכניסה היא החזרה טורית של מתח (SI)

הגדרות וסימונים:

r_{in}	התנגדות כניסה בחוג פתוח, בריקים
r_{out}	התנגדות מוצא בחוג פתוח, בריקים
a	הגבר בחוג פתוח, בריקים
R'_{in} / G'_{in}	התנגדות/מוליכות כניסה בחוג פתוח, כולל העמסת המשוב
R'_{out} / G'_{out}	התנגדות/מוליכות מוצא בחוג פתוח, כולל העמסת המשוב
A	הגבר בחוג פתוח, כולל העמסת המשוב
B	גורם המשוב
R_{in} / G_{in}	התנגדות/מוליכות כניסה בחוג סגור
R_{out} / G_{out}	התנגדות/מוליכות מוצא בחוג סגור
$A_f = \frac{A}{1+AB}$	הגבר בחוג סגור

חישוב התנגדויות הכניסה והיציאה של גורם המשוב B :

		$PIPO$
		$PISO$
		$SIPO$
		$SISO$

סוגי המשוב הקיימים :

משוב SIPO	אות החזרה	אות כניסה	אות מוצא	שרטוט הרשת
	v_f	v_{in}	v_{out}	
$R_{in} = R'_{in} (1 + BA) - R_S$	$B = \frac{v_f}{v_{out}}$			
$G_{out} = G'_{out} (1 + AB) - G_L$	$A = \frac{v_{out}}{v_{in}}$			
משוב SISO	אות החזרה	אות כניסה	אות מוצא	שרטוט הרשת
	v_f	v_{in}	i_{out}	
$R_{in} = R'_{in} (1 + BA) - R_S$	$B = \frac{v_f}{i_{out}}$			
$R_{out} = R'_{out} (1 + BA) - R_L$	$A = \frac{i_{out}}{v_{in}}$			
משוב PIPO	אות החזרה	אות כניסה	אות מוצא	שרטוט הרשת
	i_f	i_{in}	v_{out}	
$G_{in} = G'_{in} (1 + AB) - G_S$	$B = \frac{i_f}{v_{out}}$			
$G_{out} = G'_{out} (1 + AB) - G_L$	$A = \frac{v_{out}}{i_{in}}$			
משוב PISO	אות החזרה	אות כניסה	אות מוצא	שרטוט הרשת
	i_f	i_{in}	i_{out}	
$G_{in} = G'_{in} (1 + AB) - G_S$	$B = \frac{i_f}{i_{out}}$			
$R_{out} = R'_{out} (1 + BA) - R_L$	$A = \frac{i_{out}}{i_{in}}$			