

דפי עזר (נוסחאות) לבחינת אמצע/סיום הסמסטר

מעגלים אנלוגיים - 200111

גרסה 2.0, ינואר-2025

סימונים והגדרות עזר

סימון בקורס:

$$V_T = \frac{k_B \cdot T}{q} \Big|_{T=300K} \cong 0.025 [V]$$

"המתח התרמי":

$$I_D, V_D$$

סימון זרמים ומתחים באות DC (למשל דרך דיודה):

$$i_d, v_d$$

סימון זרמים ומתחים באות קטן, AC, על גבי אות ה-DC (הגדול (אות משתנה בזמן))

$$\tilde{I}_d, \tilde{V}_d$$

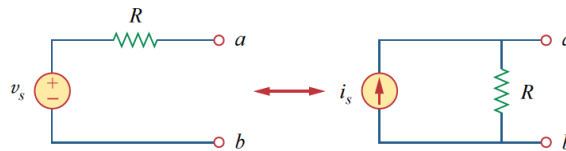
כנ"ל, אבל בסימון פאזורים:

$$i_D = I_D + i_d$$

סימון זרם כולל (DC + אות קטן):

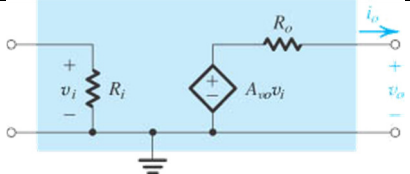
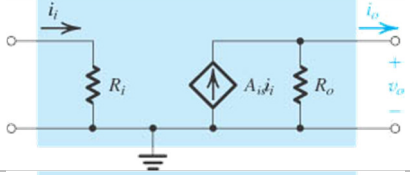
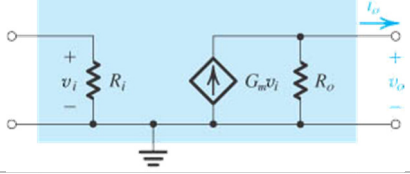
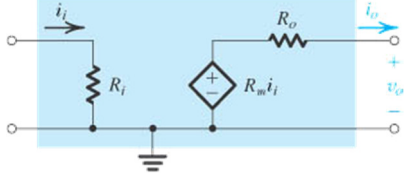
המרת מקור מתח למקור זרם ולהפך (תבנית-נורטון):

$$V_S = R \cdot I_S, \quad R = \frac{V_S}{I_S}, \quad I_S = \frac{V_S}{R}$$



1 מגברים אלקטרוניים

1.1 סוגי מגברים בסיסיים, וביטויים להגבר בריקס או בקצר:

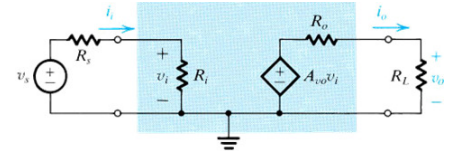
סוג מגבר	מעגל תמורה	פרמטר הגבר	מאפיין מגבר אידיאלי
מגבר מתח		הגבר מתח במוצא בריקס: $A_{v,o} = \frac{v_o}{v_i} \Big _{i_o=0} \left[\frac{V}{V} \right]$	$R_i \rightarrow \infty$ $R_o \rightarrow 0$
מגבר זרם		הגבר זרם בקצר במוצא: $A_{i,s} = \frac{i_o}{i_i} \Big _{v_o=0} \left[\frac{A}{A} \right]$	$R_i \rightarrow 0$ $R_o \rightarrow \infty$
מגבר מתח ← זרם (טרנס-מוליכות)		טרנס-מוליכות בקצר במוצא: $G_{m,s} = \frac{i_o}{v_i} \Big _{v_o=0} \left[\frac{A}{V} = S \right]$	$R_i \rightarrow \infty$ $R_o \rightarrow \infty$
מגבר זרם ← מתח (טרנס-אימפדנס)		טרנס-אימפדנס בריקס: $R_{m,o} = \frac{v_o}{i_i} \Big _{i_o=0} \left[\frac{V}{A} = \Omega \right]$	$R_i \rightarrow 0$ $R_o \rightarrow 0$



1.2 הוספת מקור מעשי בכניסה, ועומס במוצא (דוגמה אחת מתוך 4 תצורות)

בהתאם למגבר מוסיפים מחלק מתח או מחלק זרם בכניסה וביציאה, למשל במגבר מתח מוסיפים מחלקי מתח במבוא ובמוצא:

$$A_v = \frac{v_L}{v_{sig}} = \frac{v_i}{v_{sig}} \cdot A_{v,o} \cdot \frac{v_L}{v_o} = \frac{R_i}{R_{sig} + R_i} \cdot A_{v,o} \cdot \frac{R_L}{R_o + R_L} \left[\frac{V}{V} \right]$$



1.3 התנגדויות כניסה ומוצא, חד-כיווניות כן / לא :

התנגדות הכניסה :

$$R_i = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{Without Load}} \quad , \quad R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\text{With Load } R_L}$$

$R_L = 0$ for A_i or G_m
 $R_L = \infty$ for A_v or R_m

התנגדות המוצא :

$$R_o = \left. \frac{v_o}{i_o} \right|_{\text{With Ideal Source}} \quad , \quad R_{out} = \left. \frac{v_o}{i_o} \right|_{\text{With Practical Source having } R_{sig} \text{ internal resistance}}$$

$R_{sig} = \infty$ for A_i or R_m
 $R_{sig} = 0$ for A_v or G_m

אם מתקיים $R_o = R_{out}$, $R_i = R_{in}$ המגבר חד-כיווני (אין השפעת העמסות במוצא על הכניסה, ולהפך)

1.4 תגובת התדר של מגברים :

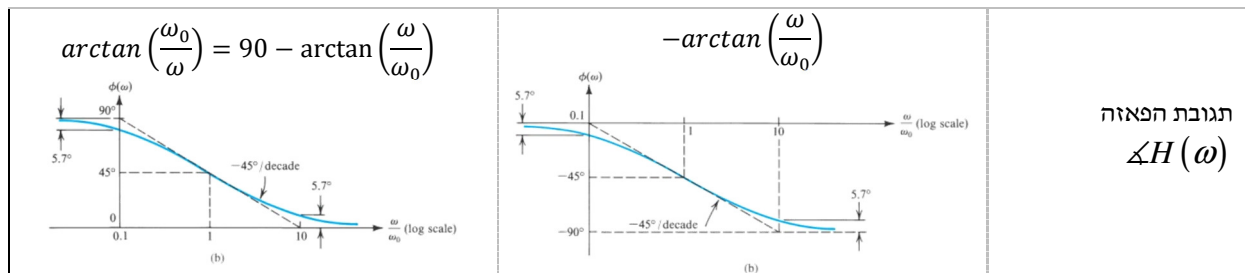
$$[dB] \triangleq 10 \log_{10} \left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{v_o}{v_i} \right)$$

הגבר ביח' dB :

$$H^{dB}(\omega) = 20 \log_{10} \left(\left| \tilde{H}(\omega) \right| \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{\tilde{V}_{out}(\omega)}{\tilde{V}_{in}(\omega)} \right)$$

תגובת תדר של מעגלים בעלי קבוע זמן יחיד :

רשת מעבירת תדרים גבוהים (HP)	רשת מעבירת תדרים נמוכים (LP)	
$H(\omega) = K \frac{j\frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{K}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}}$	$H(\omega) = \frac{K}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$	פונקציית תמסורת
"אפס" ב: $\omega = 0$ + "קוטב" בתדר $\omega = \omega_0$	"קוטב" בתדר $\omega = \omega_0$	נקודת -3dB
0	K	התנהגות אסימפטוטית כאשר $\omega \rightarrow 0$
K	0	התנהגות אסימפטוטית כאשר $\omega \rightarrow \infty$
$20 \log_{10} \left \frac{1}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}} \right $ 	$20 \log_{10} \left \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} \right $ 	$H^{dB}(\omega)$ יש להוסיף לשרטוט הזזה אנכית ע"פ גודלו של K



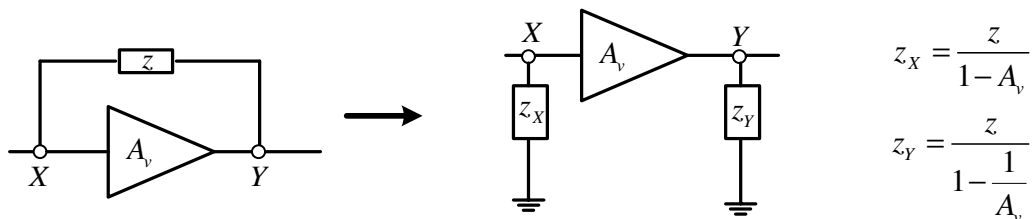
1.5 התייחסות לקבלים במעגל מגבר מבוסס רכיבים בדידים :

תחום תדירים	קבלי צימוד (טוריים) גדולים C_c	קיבולים פנימיים (קטנים) של הרכיבים
תדרים נמוכים עד DC	יש לחשב אימפדנס, משפיע על תגובת התדר בתדרים נמוכים.	מזניחים את הקיבולים הפרזיטיים
תחום תדרי ביניים	מתייחסים לקבלי צימוד כאל קצור	מזניחים את הקיבולים הפרזיטיים
תחום תדרים גבוהים	מתייחסים לקבלי צימוד כאל קצור	יש לחשב אימפדנס, משפיע על תגובת התדר בתדרים גבוהים.

1.6 משפט מילר :

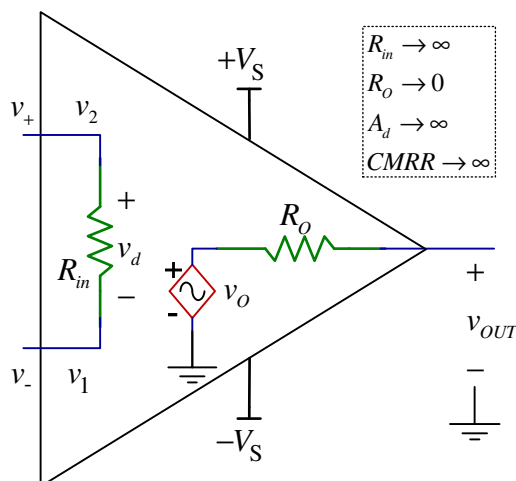
בהינתן שני צמתים X ו Y שמוגדר ביניהם הגבר מתח $A_v = \frac{V_Y}{V_X}$.

אז אם מחובר אימפדנס Z בין X ל Y כך שהוא לא משנה את A_v , אז ניתן לפרק את האימפדנס שבמשוב, Z, לשני אימפדנסים המחוברים בצמתים X ו Y.



2 מגברי-שרת

2.1 מגבר אידיאלי



- התנגדות כניסה אינסופית, ולכן זרם הכניסה: $i_{in} = 0$

$$v_{I,d} = v_2 - v_1$$

$$v_{I,cm} = \frac{1}{2}(v_2 + v_1)$$

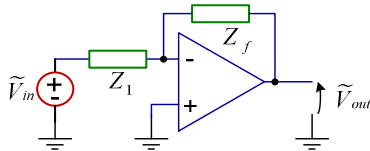
$$v_o = A_d \cdot v_{I,d} + A_{cm} \cdot v_{I,cm}$$

$$CMRR = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right|$$

- בהינתן שקיים משוב, ומתח המוצא עוקב ליניארית אחרי המבוא, קיימת תופעת "קצר וירטואלי" $v_+ \approx v_-$

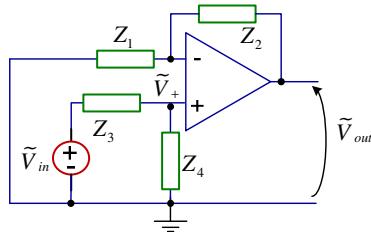
- ההגבר הדיפרנציאלי שואף לאינסופי, ולכן הגבר ליניארי מתקיים אך ורק אם מוסיפים משוב שלילי (מהמוצא לכניסה ההופכת)

2.2 מעגלי הגבר בסיסיים:



$$\frac{\tilde{V}_{out}}{\tilde{V}_{in}}(\omega) = -\frac{Z_f}{Z_1}$$

מגבר הופך:

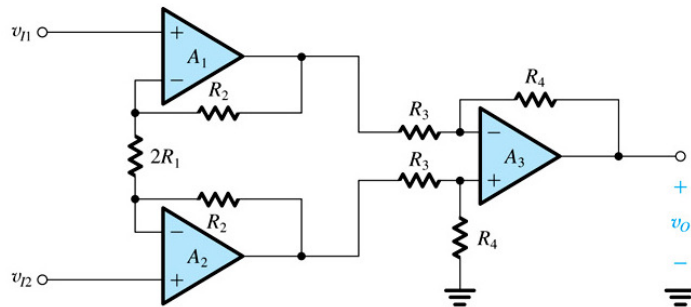


מגבר הפרש:

$$\frac{\tilde{V}_{out}}{\tilde{V}_{in}}(\omega) = \left(\frac{Z_4}{Z_4 + Z_3} \right) \cdot \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) = \frac{Z_2}{Z_1} \left(\frac{1 + Z_1/Z_2}{1 + Z_3/Z_4} \right)$$

2.3 מגבר מכשור רפואי:

בדי"כ הנגד $2R_1$ הוא נגד חיפוי (המסומן R_g)



$$v_O = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) (v_{I,2} - v_{I,1})$$

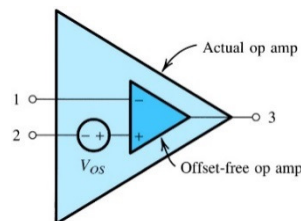
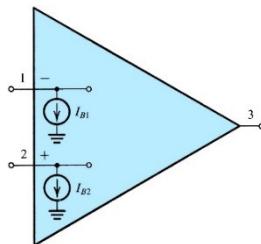
2.4 מתחי וזרמי היסט

מתח ההיסט בכניסה: V_{OS}

זרם ההיסט בכניסה מוגדר ע"י:

$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$



2.5 תגובה לאות גדול:

קצב מעקב מקסימלי של שינוי מתח המוצא:

$$SR = \left. \frac{dv_O}{dt} \right|_{\max}$$

$$f_M = \frac{SR}{2\pi |\tilde{V}_o|}$$

תדר עבודה מקסימלי:



3 מסננים אקטיביים

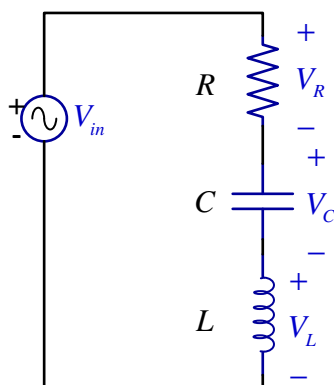
3.1 מסנני סדר ראשון מבוססי מגבר שרת

Filter Type and $T(s)$	s-Plane Singularities	Bode Plot for $ T $	Passive Realization	Op Amp-RC Realization
(a) Low pass (LP) $T(s) = \frac{a_0}{s + \omega_0}$			$CR = \frac{1}{\omega_0}$ DC gain = 1	$CR_2 = \frac{1}{\omega_0}$ DC gain = $-\frac{R_2}{R_1}$
(b) High pass (HP) $T(s) = \frac{a_1 s}{s + \omega_0}$			$CR = \frac{1}{\omega_0}$ High-frequency gain = 1	$CR_1 = \frac{1}{\omega_0}$ High-frequency gain = $-\frac{R_2}{R_1}$
(c) General $T(s) = \frac{a_1 s + a_0}{s + \omega_0}$			$(C_1 + C_2)(R_1 // R_2) = \frac{1}{\omega_0}$ $C_1 R_1 = \frac{a_1}{a_0}$ DC gain = $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ HF gain = $\frac{C_1}{C_1 + C_2}$	$C_2 R_2 = \frac{1}{\omega_0}$ $C_1 R_1 = \frac{a_1}{a_0}$ DC gain = $-\frac{R_2}{R_1}$ HF gain = $-\frac{C_1}{C_2}$

3.2 מסננים מסדר שני מבוססי מעגלי תהודה, RLC כדוגמה פאסיבית

ניתן להתייחס לפונקציית התמסורת כלפי כל אחד משלושת מתחי הרכיבים, כדוגמה למערכת עם שני קטבים צמודים קומפלקסים:

$$\omega_0 = \sqrt{1/LC}, \quad Q_0 = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$$



$$\text{LP: } \frac{V_C(\omega)}{V_{in}(\omega)} = \frac{Z_C}{Z_C + R + Z_L} = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 + j\omega \cdot \frac{\omega_0}{Q_0} - \omega^2} = \frac{\omega_0^2}{(s - p_1) \cdot (s - p_2)}$$

$$\text{HP: } \frac{V_L(\omega)}{V_{in}(\omega)} = \frac{Z_L}{Z_C + R + Z_L} = \frac{-\omega^2}{\omega_0^2 + j\omega \cdot \frac{\omega_0}{Q_0} - \omega^2} = \frac{s^2}{(s - p_1) \cdot (s - p_2)}$$

$$\text{BP: } \frac{V_R(\omega)}{V_{in}(\omega)} = \frac{Z_R}{Z_C + R + Z_L} = \frac{j\omega \cdot \frac{\omega_0}{Q_0}}{\omega_0^2 + j\omega \cdot \frac{\omega_0}{Q_0} - \omega^2} = \frac{s \cdot \frac{\omega_0}{Q_0}}{(s - p_1) \cdot (s - p_2)}$$

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_0}{2Q_0} \pm j\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_0^2}}$$

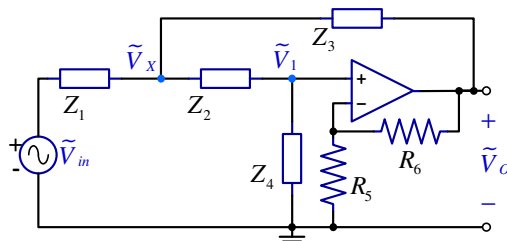


Filter Type and $T(s)$	s-Plane Singularities	$ T $
(a) Low pass (LP) $T(s) = \frac{a_0}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ DC gain = $\frac{a_0}{\omega_0^2}$		
(b) High pass (HP) $T(s) = \frac{a_2 s^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ High-frequency gain = a_2		
(c) Bandpass (BP) $T(s) = \frac{a_1 s}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ Center-frequency gain = $\frac{a_1 Q}{\omega_0}$		

3.3 מסנן Sallen Key

מסנן Sallen-Key מאפשר מימוש מסננים מסדר שני, באמצעות אימפדנסים משתנים (בד"כ נגדים וקבלים בלבד)

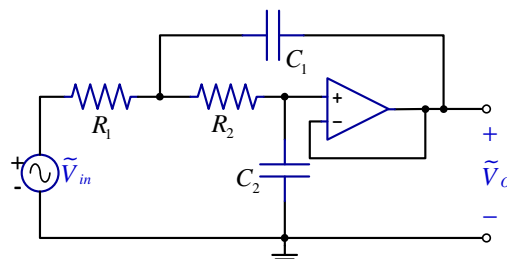
כללי



$$K = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = K \cdot \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_4 + Z_1 Z_4 (1 - K)}$$

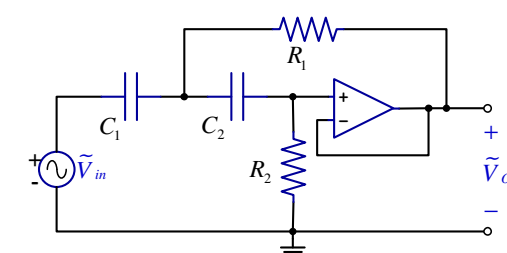
דוגמה
LP



$$\frac{\tilde{V}_o}{\tilde{V}_{in}}(s) = \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{1}{C_1} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}, \quad \frac{\omega_0}{Q_0} = \frac{1}{C_1 \cdot (R_1 \parallel R_2)}$$

דוגמה
HP



$$\frac{\tilde{V}_o}{\tilde{V}_{in}}(s) = \frac{s^2}{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} + s \cdot \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) + s^2}$$

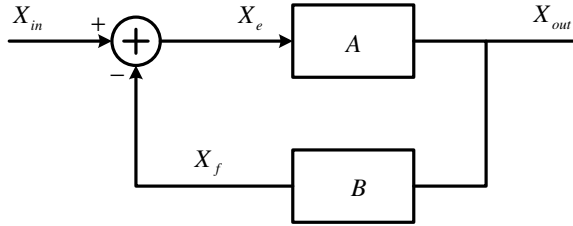
$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}, \quad \frac{\omega_0}{Q_0} = \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$



4 רשתות משוב (שלילי)

4.1 משוואות החוג, וההגבר כולל ההעמסה :

$$A_f \equiv \frac{X_{out}}{X_{in}} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad (A\beta \gg 1) \quad \cong \quad \frac{1}{\beta}$$



4.2 השפעת המשוב על אימפדנס הכניסה והמוצא וטופולוגיות המשוב השונות :

	X_f	X_{in}	X_{out}	סכימה	התנגדויות כניסה ומוצא
SIPO	v_f	v_{in}	v_{out}		$R_{in,f} = (R_{in,A} + R_{11,B} + R_S)(1 + AB) - R_S$ $G_{out,f} = \left(\frac{1}{R_{O_{out,A}}} + G_{22,B} + G_L\right)(1 + AB) - G_L$
SISO	v_f	v_{in}	i_{out}		$R_{in,f} = (R_{in,A} + R_{11,B} + R_S)(1 + AB) - R_S$ $R_{out,f} = (R_{O,A} + R_{22,B} + R_L)(1 + AB) - R_L$
PIPO	i_f	i_{in}	v_{out}		$G_{in,f} = (G_{in,A} + G_{11,B} + G_S)(1 + AB) - G_S$ $G_{out,f} = \left(\frac{1}{R_{O_{out,A}}} + G_{22,B} + G_L\right)(1 + AB) - G_L$
PISO	i_f	i_{in}	i_{out}		$G_{in,f} = (G_{in,A} + G_{11,B} + G_S)(1 + AB) - G_S$ $R_{out,f} = (R_{O,A} + R_{22,B} + R_L)(1 + AB) - R_L$

4.3 שלבי ניתוח מעגל משוב הכולל העמסות (כלומר רשת המשוב אינה רק מקור מבוקר אידיאלי):

- זיהוי סוג המשוב: דגימת מתח (PO) או דגימת זרם (SO), החזרת מתח (SI) או החזרת זרם (PI).

$$\beta = \frac{X_f}{X_{out}} \quad \text{חישוב B (ללא העמסות) :}$$

- חישוב העמסת העומס עקב רשת המשוב שיש להוסיף בכניסה / במוצא

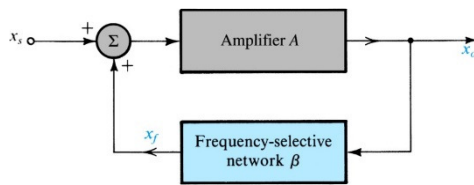
העמסת B במוצא $R_{22,B} = R_{out,B}$	העמסת B בכניסה $R_{11,B} = R_{in,B}$
✓ PI - מקצרים את הכניסה	✓ PO - מחליפים את R_L בקצר
✓ SI - מנתקים את הכניסה	✓ SO - מחליפים את R_L בנתק

$$A' = \left. \frac{X_{out}}{X_{in}} \right|_{B=0} \quad \text{חישוב הגבר הפתוח A' תוך התחשבות בהעמסת המשוב :}$$

- חישוב הגבר החוג $A'B$ (loop gain)
- חישוב ההגבר בחוג סגור, כמו גם התנגדויות המוצא והכניסה עקב ההעמסות.

5 מתנדנים ומחוללי אות (אנלוגיים)

5.1 עיקרון התנודות, Backhausen criterion: (שימו לב, זהו כעת משוב חיובי):



$$A_f(j\omega) = \frac{1}{1 - A\beta} \xrightarrow{\omega \rightarrow \omega_{osc.}} \infty$$

$$L(j\omega = j\omega_{osc}) = A(j\omega) \cdot \beta(j\omega) \rightarrow 1$$

$$\Rightarrow |L(j\omega_{osc})| \approx 1 \quad \angle L(j\omega_{osc}) = 0$$

תדר התנודות נקבע ע"פ תנאי הפאזה !

בד"כ מתכננים את $|L(j\omega_{osc})|$ להיות מעט גבוה מ 1, ומוסיפים מנגנון "דחיסת" הגבר. (למשל קטימה ע"י דיודות)

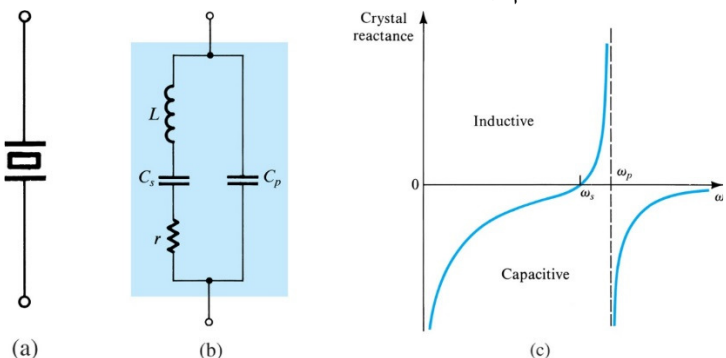
5.2 מתנדנים סינסיסואידליים

דוגמאות עקרוניות:

מתנד גבישי Pierce	מתנד הסחת פאזה	מתנד גשר Wein
תדר התהודה של הגביש ; $\omega_{osc.} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ $C = \frac{C_S \cdot C_T}{C_S + C_T},$ $C_T = C_p + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$	תנאי פאזה לתנודות : $H(\omega) = \frac{\tilde{V}_3}{\tilde{V}_{out}}$ $\angle H(\omega = \omega_{osc.}) = \pi$ $f_0 = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC}$ מתקבל בד"כ עבור	תנאי פאזה לתנודות : $\omega_{osc.} = \frac{1}{RC}$
	תנאי הגבר החוג לתנודות : $ K = \frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{ H(\omega = \omega_{osc.}) } \approx \frac{1}{29}$	תנאי הגבר חוג לתנודות : $\frac{R_2}{R_1} = 2$

לא מתוארים כאן מתנדי Hartley / Colpitts או ארכיטקטורות מורכבות

מודל לגביש פיזיאלקטרי :



6 מגברים חד-דרגתיים על בסיס MOSFET

C_{ox}	=	קיבול התחמוצת ליח' שטח
μ^*	=	ניידות נושאי המטען בתעלת האינברסיה (כלומר בפני השטח)
W	=	רוחב הטרנזיסטור
L	=	אורך התעלה
V_t	=	מתח הסף של הטרנזיסטור

6.1 NMOS באות גדול, כולל זרם ישר :

$$v_{OV} = v_{GS} - V_t$$

$$k_n' = C_{ox} \mu_e^*$$

$$I_{DS} = 0$$

$$i_{DS} = k_n' \left(\frac{W}{L} \right) \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

$$i_{DS} = \frac{1}{2} k_n' \left(\frac{W}{L} \right) \cdot (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda \cdot v_{DS})$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda \cdot I_{DS}} = \frac{V_A}{I_{DS}}, \quad V_A = V_A' \times L$$

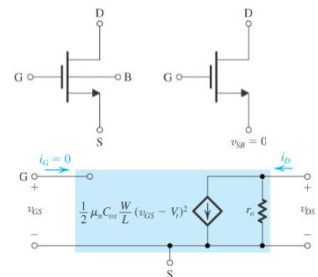
מגדירים "יתר מתח" (Over Voltage) להיות :

מוליכות המעבר של תהליך הייצור המסוים :

בתחום הקטעון ; $v_{OV} < 0$:

בתחום הליניארי ; $0 < v_{DS} < v_{OV}$:

בתחום הרוויה ; $0 < v_{OV} < v_{DS}$:



אפקט התקצרות התעלה והתנגדות המוצא של הטרנזיסטור :

6.2 PMOS באות גדול, כולל זרם ישר :

כיוון הזרם כמו גם כיווני המתחים מתהפכים. $(I_{DS} = -I_{SD}, v_{GS} = -v_{SG}, v_{DS} = -v_{SD})$

בנוסף, הגדלים שהופכים סימן הם : $V_t, V_A, \lambda, \gamma$

$$v_{OV} = v_{GS} - V_{t, PMOS} = -(v_{SG} - |V_{t, PMOS}|)$$

$$k_p' = C_{ox} \mu_h^*$$

$$I_{SD} = 0$$

$$i_{SD} = k_p' \left(\frac{W}{L} \right) \left[(v_{SG} - |V_{t, P}|) v_{SD} - \frac{1}{2} v_{SD}^2 \right]$$

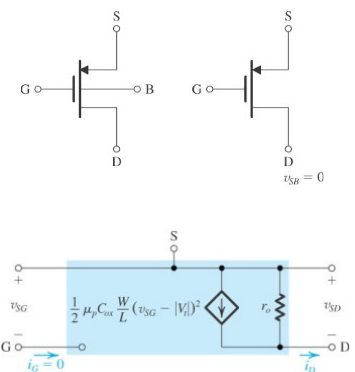
$$i_{SD} = \frac{1}{2} k_p' \left(\frac{W}{L} \right) \cdot (v_{SG} - |V_{t, P}|)^2 (1 + \lambda \cdot v_{SD})$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda \cdot I_{DS}} = \frac{V_A}{I_{DS}} = \frac{|V_A|}{I_{SD}}, \quad V_A = V_A' \times L$$

בתחום הקטעון ; $0 > v_{OV}$:

בתחום האוהמי ; $0 > v_{DS} > v_{OV}$:

בתחום הרוויה ; $0 > v_{OV} > v_{DS}$:



אפקט התקצרות התעלה והתנגדות המוצא של הטרנזיסטור :

שינוי V_t עקב אפקט המצע :

$$V_t = V_{t,0} (V_{SB}=0) + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} + \frac{2\phi_F}{q}} - \sqrt{\frac{2\phi_F}{q}} \right)$$

($V_{SB} \neq 0$, קיים הפרש מתח בין ה-Source למצע) :

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{Si}\epsilon_0} \sqrt{N_{A,D}}}{C_{ox}}$$



6.3 פרמטרים אופייניים באות קטן, בהנחת מצב רוויה, בטרנזיסטור MOSFET:

מוליכות המעבר של ה-MOSFET, כתגובה לשינויים במתח V_{GS} :

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} = 2 \cdot \frac{1}{2} k' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)(1 + \lambda \cdot v_{DS}) = 2 \frac{I_{DS}}{(v_{GS} - V_t)} = \frac{2I_{DS}}{v_{OV}}$$

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_{DS}}$$

התנגדות המוצא:

מוליכות המעבר של ה-MOSFET, עקב אפקט המצע:

$$g_{mb} = \frac{\partial i_D}{\partial v_{BS}} \bigg|_{\substack{v_{GS}=Const. \\ v_{DS}=Const.}} = \chi \cdot g_m = \frac{\gamma}{2 \sqrt{V_{SB} + \frac{2\phi_F}{q}}} \cdot g_m$$

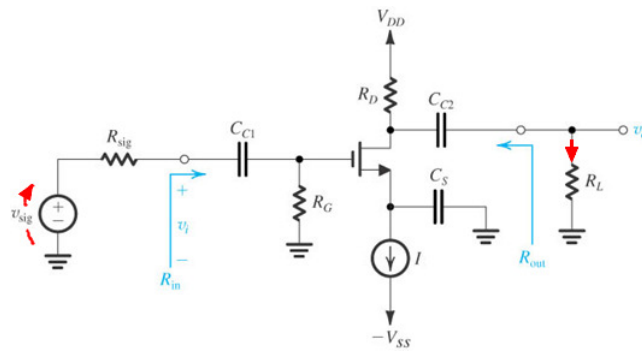
סכימאות התמורה לאות קטן:

סכימת T (פחות נוחה כאשר נוסף אפקט מצע)	סכימת π , כולל אפקט מצע, והתנגדות מוצא

6.4 ההתנגדות המשוקפת באות קטן, בהנחת מצב רוויה בהדקים Source ו-Drain

R_{in}^{Source}	R_{in}^{Drain}
ההתנגדות בהדק ה-Source, היא התנגדות המוצא של הטרנזיסטור בחיבור CD, ומאידך התנגדות הכניסה בחיבור CG	ההתנגדות בהדק ה-Drain, היא התנגדות המוצא של מקור הזרם הטרנזיסטורי בחיבורי CS ו-CG
$R_{in}^{Source} = \frac{r_o + R_D}{1 + r_o(g_m + g_{mb})} \xrightarrow{r_o \rightarrow \infty} \frac{1}{g_m + g_{mb}} \xrightarrow{\text{without bulk effect}} \frac{1}{g_m}$	$R_{in}^{Drain} = R_S + r_o [1 + R_S(g_m + g_{mb})]$ עבור חיבור ללא נגד R_S (למשל מגבר CS ללא נגד ניוון), נקבל: $R_{in}^{Drain} = r_o$

6.5 מגבר לאות קטן על בסיס MOS בחיבור Common Source (CS), ללא נגד ניוון :



$$R_{in} = R_G$$

$$R_{out} = R^{Drain} \parallel R_D = r_o \parallel R_D$$

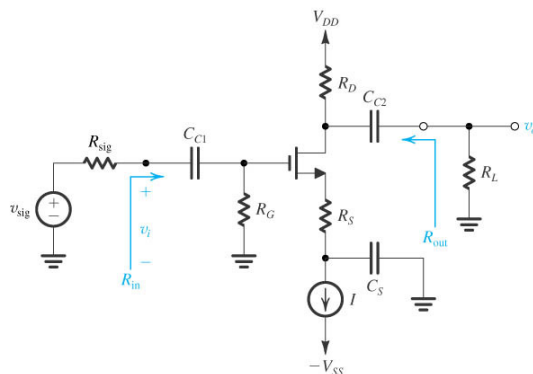
$$G_{m,s} = \left. \frac{i_{out}}{v_{sig}} \right|_{R_L=0} = \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \cdot -g_m$$

$$A_v = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \cdot g_m \cdot (r_o \parallel R_D \parallel R_L)$$

אם מזניחים את R_{sig} , ומניחים r_o גדול מאוד, אזי הגבר המתח הוא :

$$A_v = \left. \frac{v_{out}}{v_{sig}} \right|_{R_L \neq 0} \approx -g_m \cdot (R_D \parallel R_L)$$

6.6 מגבר לאות קטן על בסיס MOS בחיבור Common Source (CS), כולל נגד ניוון :



$$R_{in} = R_G$$

$$R_{out} = R^{Drain} \parallel R_D$$

$$G_{m,s} = \left. \frac{i_{out}}{v_{sig}} \right|_{R_L=0} = \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \cdot -g_m \cdot \frac{r_o}{R^{Drain}}$$

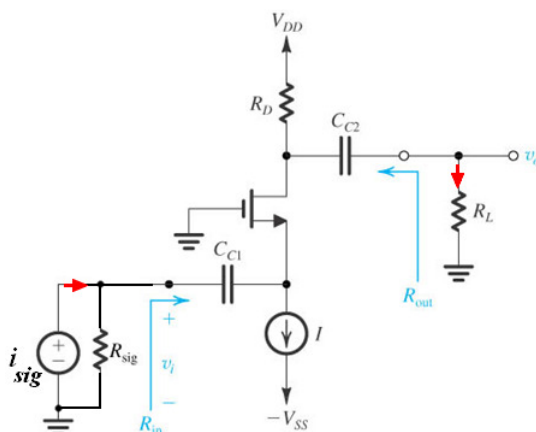
$$A_v = \left. \frac{v_{out}}{v_{sig}} \right|_{R_L \neq 0} = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \cdot g_m \cdot \frac{r_o}{R^{Drain}} \cdot (R^{Drain} \parallel R_D \parallel R_L)$$

$$\approx -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \cdot \frac{g_m}{1 + R_S(g_m + g_{mb})} \cdot (R^{Drain} \parallel R_D \parallel R_L)$$

אם מזניחים את R_{sig} , ומניחים אפקט מצע, ומניחים r_o גדול מאוד, אזי הגבר המתח הוא :

$$A_v = \left. \frac{v_{out}}{v_{sig}} \right|_{R_L \neq 0} \approx -\frac{1}{\frac{1}{g_m} + R_S} (R_D \parallel R_L) \approx -\frac{R_D \parallel R_L}{R_S} \quad R_S \gg \frac{1}{g_m}$$

6.7 מגבר לאות קטן על בסיס MOS בחיבור Common Gate (CG) :



$$R_{in} = R^{Source} = \frac{r_o + (R_D \parallel R_L)}{1 + r_o(g_m + g_{mb})} \approx \frac{1}{g_m}$$

$$R_{out} = R^{Drain} \parallel R_D$$

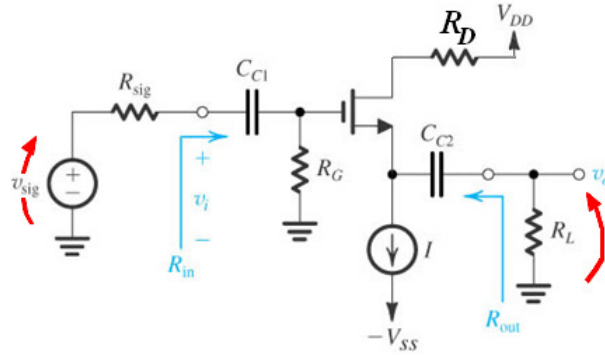
$$A_{i,s} = \left. \frac{i_{out}}{i_{sig}} \right|_{R_L=0} = \frac{R_{sig}}{R^{Source} + R_{sig}} \rightarrow 1$$

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{sig}} = \frac{R_{sig}}{R^{Source} + R_{sig}} \cdot 1 \cdot \frac{R^{Drain} \parallel R_D}{R_L + (R^{Drain} \parallel R_D)}$$

אם מזניחים אפקט מצע, ומניחים r_o גדול מאוד, אזי הגבר המתח הוא :

$$A_v = \left. \frac{v_{out}}{v_i} \right|_{R_L \neq 0} = \frac{1}{\frac{1}{g_m} + R_{sig}} (R_D \parallel R_L)$$

6.8 מגבר לאות קטן על בסיס MOS בחיבור Common Drain (CD) :



$$R_{in} = R_G$$

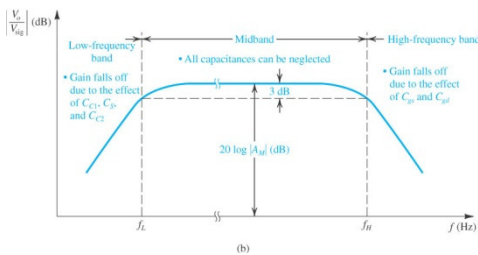
$$R_{out} = R_{Source}$$

$$G_{m,s} = \left. \frac{i_{out}}{v_{sig}} \right|_{R_L=0} = g_m \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_D}{r_o}} \approx g_m$$

$$A_{v,0} = \left. \frac{v_{out}}{v_{sig}} \right|_{R_L=\infty} = \frac{g_m}{g_m + g_{mb} + \frac{1}{r_o}} \rightarrow 1$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{sig}} = \frac{g_m}{g_m + g_{mb} + \frac{1}{r_o}} \cdot \frac{R_L}{R_{Source} + R_L}$$

7 תגובת התדר של טרנזיסטורים (MOSFET) ושל מגברים חד-דרגתיים



A_M = הגבר המתח לאות קטן של מגבר חד-דרגתי בתחום תדרי הביניים

f_H = התדר הגבוה מתחום תדרי הביניים בו ההגבר קטן ב: 3dB

f_L = התדר הנמוך מתחום תדרי הביניים בו ההגבר קטן ב: 3dB

BW = רוחב הסרט, התחום בו ההגבר אינו יורד ביותר מ: -3dB מאשר

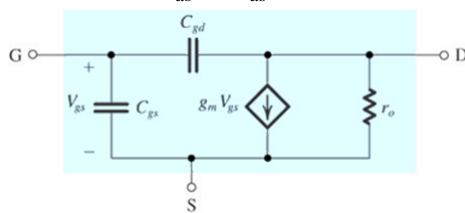
$$BW = f_H - f_L \text{ , ולכן } A_M$$

f_T = התדר בו ההגבר של הטרנזיסטור כרכיב בדיד, קטן לכדי הגבר יחידה

7.1 מודל, של MOSFET, באות קטן לתדרים גבוהים :

מודל של הטרנזיסטור כרכיב בדיד :

ללא אפקט מצע, ובהזנחת $C_{db} = C_{ds}$, המודל לתדר גבוה :



L_{ov} - אורך החפיפה בין השער ל: Drain, Source
 (בערך 0.05-0.1 יחסית לאורך התעלה L)
 ואזי, גודל שאר הקיבולים (בהנחת משטר רוויה):

$$C_{gs} \approx \frac{2}{3} W L \cdot C_{ox} + W L_{ov} \cdot C_{ox}$$

$$C_{gd} \approx C_{ov} = W L_{ov} \cdot C_{ox}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

$$C_{j, sb} = \frac{C_{sb0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{SB}}{V_0}}} , C_{j, db} = \frac{C_{db0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{DB}}{V_0}}}$$

$$f_T - \text{תדר הגבר יחידה} : \frac{\tilde{I}_o}{\tilde{I}_i}(f = f_T) \rightarrow 1$$

גודל קיבולי הצמתים :

7.2 מודל של BJT, באות קטן לתדירים גבוהים :

מודל של הטרנזיסטור כרכיב ביד:

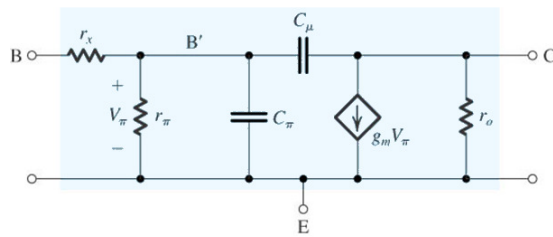
C_π - קיבול צומת BE (ממתח קדמי):

$$C_\pi = C^{BE} = C_{diff,e} + C_{j,e} = (\tau_F \cdot g_m) + C_{j,e}$$

$$= (\tau_F \cdot g_m) + \frac{C_{j,e0}}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{0e}}\right)^m} \approx (\tau_F \cdot g_m) + (2 \cdot C_{j,e0})$$

C_μ - קיבול צומת BC (ממתח אחורי):

$$C_\mu = C^{BC} = C_{j,c} = \frac{C_{j,c0}}{\left(1 + \frac{V_{CB}}{V_{0c}}\right)^m}, \quad m = 0.3 - 0.5$$



r_x - התנגדות אוהמית של הבסיס

f_T - תדר הגבר יחידה; $\beta(f = f_T) \rightarrow 1$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)}$$

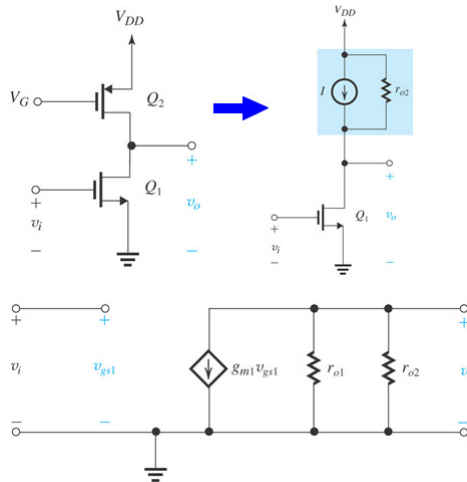
7.3 תגובת התדר באות קטן של מגברי MOSFET בתצורת CS או BJT בתצורת CE:

טרנזיסטור MOS בחיבור CS ללא נגד ניוון	טרנזיסטור בי-פולרי בחיבור CE ללא נגד ניוון
$R_{sig}' = R_G \parallel R_{sig}$	$R_{sig}' = r_\pi \parallel [r_x + (R_B \parallel R_{sig})]$
$C_{in} = C_{gs} + C_{gd} [1 + g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_L)]$	$C_{in} = C_\pi + C_\mu [1 + g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)]$
$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot R_{sig}' \cdot C_{in}}$	$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot R_{sig}' \cdot C_{in}}$
$f_L = f_{p1} + f_{p2} + f_{p3} \approx f_{p2}$	$f_L = f_{p1} + f_{p2} + f_{p3} \approx f_{p2}$
$f_{p1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{C1} \cdot (R_G + R_{sig})}$	$f_{p1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{C1} \cdot [(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig}]}$
קוטב עיקרי (בד"כ):	קוטב ראשון ועיקרי:
$f_{p2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_S \left(R_S \parallel \frac{1}{g_m} \right)} \xrightarrow{R_S=0} \frac{g_m}{2\pi \cdot C_S}$	$f_{p2} = \frac{g_m}{2\pi \cdot C_E \cdot \left[r_e + \frac{(R_B \parallel R_{sig})}{(\beta + 1)} \right]}$
$f_{p3} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{C2} \cdot (R_D + R_L)}$	$f_{p3} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{C2} \cdot (R_C + R_L)}$

8 עומס אקטיבי ומגברי Cascode

8.1 עומס אקטיבי – החלפת נגדים בטרנזיסטור בחיבור בתצורת מקור זרם

ניתן להחליף את נגד העומס בטרנזיסטור (PMOS) בממתח קבוע שמשמש כמקור זרם. (מקור DC עם התנגדות מקבילית גבוהה)



סכימת אות גדול :

מציאת נקודת העבודה (מתח מוצא DC) ;
מבוסס על חישוב זרם ה DC בנפרד לכל טרנזיסטור
ושיפועי הגרף i_{DS} vs v_{DS} .

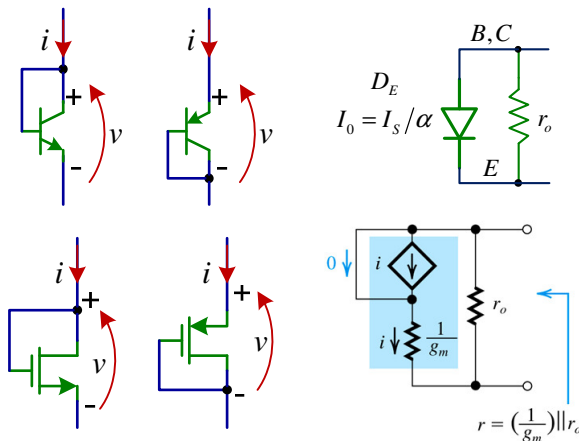
$$V_{OUT} = (I_{D1} - I_{D2}) r_{o1} \parallel r_{o2} + V_{DD} \frac{r_{o2}}{r_{o2} + r_{o1}}$$

סכימת אות קטן והגבר :

$$A_{V,O} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m \cdot (r_{o1} \parallel r_{o2})$$

8.2 עומס אקטיבי – החלפת נגדים בטרנזיסטור בחיבור בתצורת "דיודה"

דרך מקובלת להגדיר נגד "קטן", היא לחבר טרנזיסטור כהתקן 2 הדקים, ע"י קצר בין C ל- B, או D ל- G ;



באות קטן
 $r = r_e \parallel r_o$

במקרה הבי-פולרי נישאר עם דיודת
הצומת BE :

באות קטן:
 $r = \left(\frac{1}{g_m} \right) \parallel r_o$

MOSFET הוא בחירה נפוצה יותר,
למימוש נגד קטן, הזרם/מתח עליו
נקבעים ע"י המתח/זרם המאולצים,
והתנגדותו נקבעת ע"י היחס W/L .
בהנחה שניתן להזניח (או לא קיים)
אפקט מצע :

8.3 מגבר קסקוד MOS

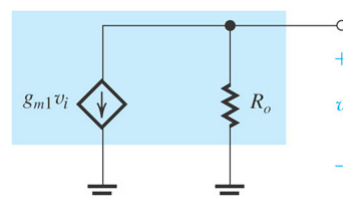
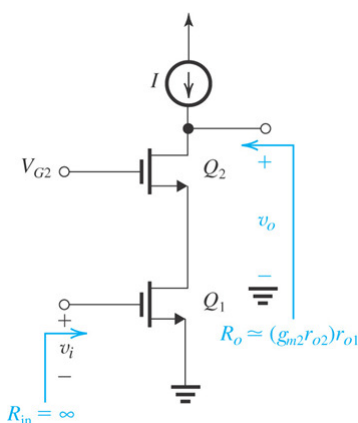
בנוסף למקור הזרם, דרגת ה- CS מחוברת למוצא דרך דרגת CG שמשמשת חוצץ זרם :

$$R_o = R_{in,2}^{Drain} = r_{o1} + r_{o2} + r_{o1} \cdot r_{o2} \cdot (g_{m2} + g_{mb2}) \approx r_{o1} \cdot r_{o2} \cdot (g_{m2} + g_{mb2})$$

$$G_{m,s} = \frac{i_{out}}{v_i} \Big|_{R_L=0} = g_{m1} \cdot \frac{r_{o1}}{r_{o1} + R_{in,2}^{source}} \approx g_{m1}$$

$$A_{v,0} = \frac{v_{out}}{v_{sig}} \Big|_{R_L=\infty} = G_{m,s} \cdot R_o \approx [r_{o1} \cdot g_{m1}] \cdot [r_{o2} (g_{m2} + g_{mb2})]$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{sig}} \Big|_{R_L \neq 0} = G_{m,s} \cdot (R_o \parallel R_L)$$



8.4 מימוש ראי זרם

על מנת לממש מקור זרם כמעט אידיאלי נעזר ב"ראי-זרם"
ראי זרם עקרוני מבוסס MOS :

$$\frac{I_o}{I_{REF}} \cong \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$

באופן עקרוני, יחס הזרמים הוא :

אם נלקח בחשבון התקצרות התעלה של Q2 עקב $V_{DS,2}$ משמעותי :

$$I_o = I_{REF} \cdot \left(\frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \right) \cdot \left(1 + \frac{V_o - V_{GS}}{V_{A2}} \right)$$

9 מגברי הפרש - מבוא

9.1 צמד MOS הפרשי עם עומס התנגדותי

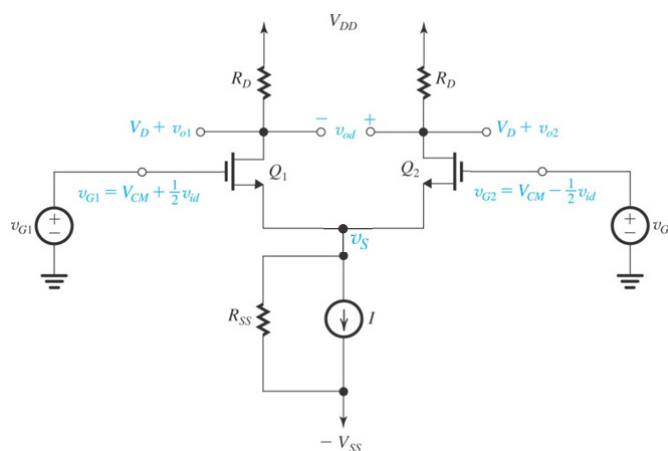
נק' עבודה סימטרית, כניסה משותפת ב-DC :

$$V_{CM} - V_S = V_{GS} = V_{OV} + V_t$$

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

תחום האות ההפרשי הגדול (בין רוויות) :

$$-\sqrt{2} V_{OV} \leq v_{i,d} \leq \sqrt{2} V_{OV}$$



$$A_d = \frac{v_{o,2} - v_{o,1}}{v_{i,d}} = g_m R_D, \quad \left\{ g_m = g_{m,1} = g_{m,2} = \frac{I}{V_{OV}} \right\}$$

הגבר לאות קטן דיפרנציאלי :

$$A_{cm,d} = \frac{v_{o,2}}{v_{i,cm}} = \frac{v_{o,1}}{v_{i,cm}} = \left(\frac{g_m R_D}{1 + g_m 2R_{SS}} - \frac{g_m R_D}{1 + g_m 2R_{SS}} \right) \cong \left(\frac{R_D}{2R_{SS}} - \frac{R_D}{2R_{SS}} \right)$$

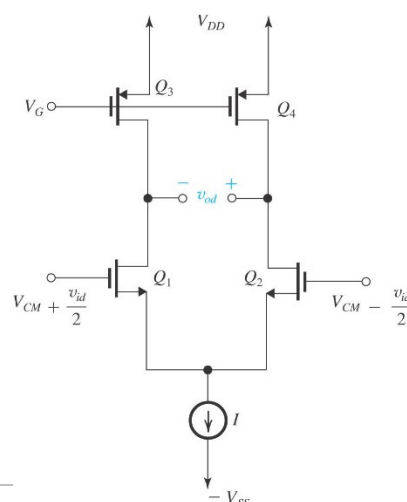
הגבר לאות קטן משותף :

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \rightarrow \infty$$

יחס דחיית האות המשותף ההפרשי :

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \cong \frac{\frac{1}{2} g_m R_D}{\frac{R_D}{2R_{SS}}} = g_m R_{SS}$$

CMRR יחסית למוצא יחיד :



9.2 צמד MOS הפרשי עם עומס אקטיבי

ביטויים זהים לסעיף הקודם, למעט העובדה שיש
להחליף את R_D בהתנגדות העומס האקטיבי :

$$r_{o,3} = r_{o,4}$$

ולכן :

$$A_d = \frac{v_{o,2} - v_{o,1}}{v_{i,d}} = g_m \cdot (r_{o1} \parallel r_{o3})$$

9.3 צמד MOS הפרשי עם עומס ראי-זרם

על מנת לאפשר מוצא יחיד במקום מוצא הפרשי מסתמכים על עומס ראי זרם :

הגבר הפרשי :

$$A_d = \frac{v_{o,2} - v_{o,1}}{v_{i,d}} \cong g_m \cdot (r_{o2} \parallel r_{o4}) , \left\{ g_m = g_{m,1} = g_{m,2} = \frac{I}{V_{OV}} \right\}$$

הגבר לאות משותף :

$$v_{o,cm} = \frac{-g_{m,2} \cdot v_{i,cm} \cdot (r_{o,2} \parallel r_{o,4})}{1 + g_{m,2} \cdot 2R_{SS}} + \frac{g_{m,1} \cdot v_{i,cm} \cdot \left(r_{o,1} \parallel \left(\frac{1}{g_{m,3}} \parallel r_{o,3} \right) \right)}{1 + g_{m,1} \cdot 2R_{SS}} \cdot g_{m,4} \cdot (r_{o,2} \parallel r_{o,4})$$

$$\approx -v_{i,cm} \frac{1}{2g_{m,4} \cdot R_{SS}} \Rightarrow A_{cm} \approx -\frac{1}{2 \cdot g_{m,4} \cdot R_{SS}}$$

ולכן יחס דחיית האות המשותף (בקירוב) :

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \approx \frac{g_{m,2} \cdot (r_{o,2} \parallel r_{o,4})}{\frac{1}{2g_{m,4} R_{SS}}} = g_{m,2} \cdot (r_{o,2} \parallel r_{o,4}) \cdot 2g_{m,3} R_{SS}$$

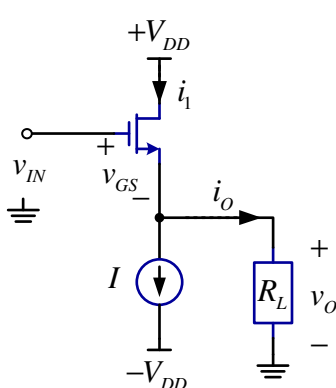
10 מגברי הספק

10.1 סוגי Class שונים ונצילות

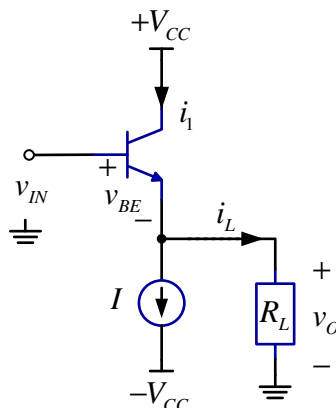
מגבר הספק Class A :

למעשה משמש חוצץ מתח, $v_o \approx v_{IN}$, עם יכולת הזנת הספק לתוך אימפדנס נמוך מאד (ולכן זרם גבוה)

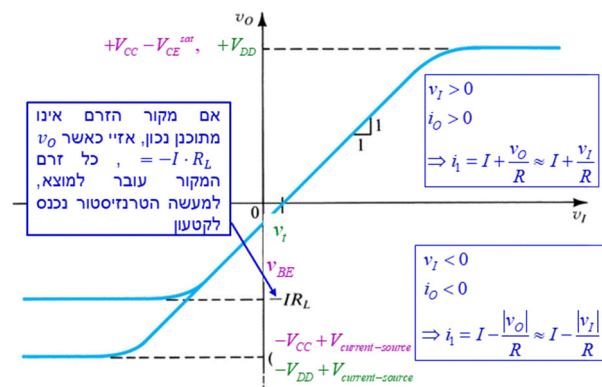
MOS



BJT



עקום חוצץ המתח



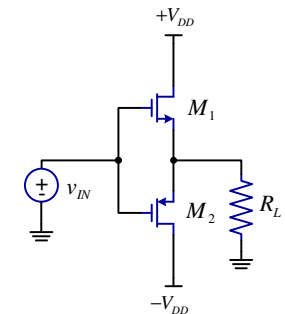
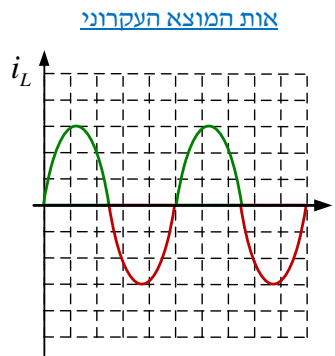
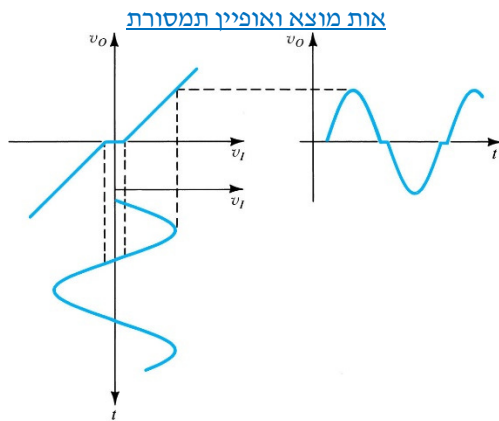
יעילות צריכת ההספק :

$$\eta = \frac{P_L}{P_{TOT}} = \frac{P_L}{P_S} \cong \frac{\frac{1}{2} |\tilde{V}_{out}|^2}{2V_{DD} I} \xrightarrow{I_{Source\ optimal} = V_{CC}/R_L} \frac{|\tilde{V}_{out}|^2}{2 \frac{V_{DD}^2}{R_L}} < 0.25 \xrightarrow{V_{OUT, optimal} = V_{DD}} \eta^{MAX} = 0.25$$

מגבר הספק Class B :

מבנה push-pull :

מעגל עקרוני



אם מזניחים את אפקט ה"קטימה" בתחום המעבר, אזי נצילות ההספק היא :

$$\eta \equiv \frac{P_L}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{|\tilde{V}_o|^2}{R_L}}{2 \times \frac{V_{CC} \cdot |\tilde{V}_o|}{\pi R_L}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{|\tilde{V}_o|}{V_{CC}} \xrightarrow{V_{O,optimal} = V_{CC}} \eta^{MAX} = \frac{\pi}{4} = 0.78$$

ההספק על שני טרנזיסטורים ההספק מקיים :

ביטוי להספק

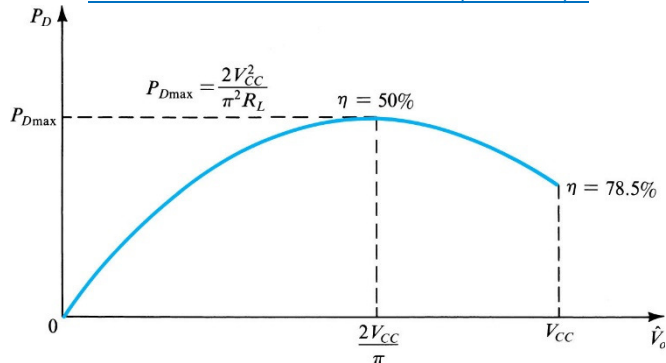
$$P_D = P_S - P_L = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{|\tilde{V}_o|}{R_L} V_{CC} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|\tilde{V}_o|^2}{R_L}$$

הנקודה החמורה ביותר : (נצילות יורדת ל 50%) :

$$|\tilde{V}_o|_{P_{Dmax}} = \frac{2}{\pi} V_{CC}$$

$$P_{DNmax} = P_{DPmax} = \frac{P_{DPmax}}{2} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L}$$

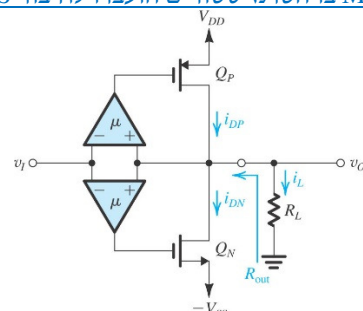
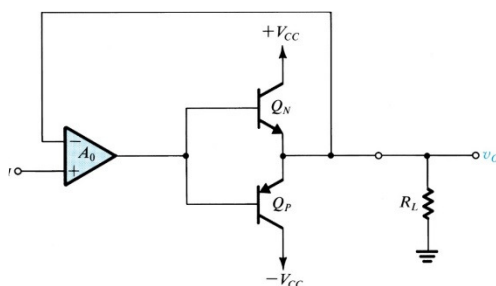
עקום ההספק של הטרנזיסטורים נגד משרעת המוצא



10.2 מעגל הספק הכולל משוב (מגברי שגיאה)

MOS בו הטרנזיסטורים הועברו לחיבור CS

BJT עקרוני



$$R_{OUT} = \frac{1}{\frac{1}{r_{O,2}} + \frac{1}{r_{O,1}} + g_{m,1} \cdot \mu + g_{m,2} \cdot \mu} \cong \frac{1}{\mu} \frac{1}{(g_{m,1} + g_{m,2})}$$

$$\text{Gain Error} = \frac{v_o - v_i}{v_o} = -\frac{V_{ov}}{4\mu \cdot i_Q \cdot R_L}$$

($v_o = 0$ כלומר , בעומס , כאשר אין זרם בטרנזיסטורים)

11 דיודות ומעגלי דיודה

11.1 דיודת PN

זרם בדיודה מעשית (I_S מסמן מה שבד"כ מסומן I_0), כאשר n מקדם אי האידיאליות :

$$i_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{v_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$

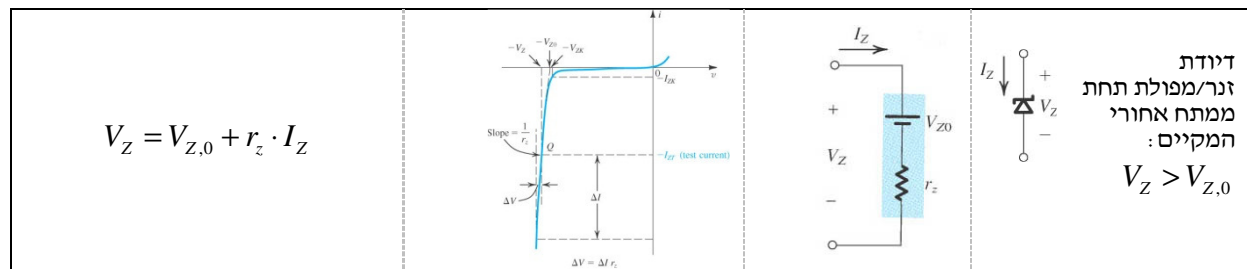
11.2 דיודת PN - מודלים שונים לתיאור ההולכה הקדמית

סוג מודל	מעגל שקול	אופיין זרם-מתח	מודל מתמטי
דיודה אידיאלית			$v < 0 \Rightarrow i = 0$ $i > 0 \Rightarrow v = 0$
מודל מפל מתח 0.7V קבוע			for $i_D > 0$: $v_D = 0.7V$
מודל לאות קטן כאשר I_D, V_D נקבעים ע"י משוואת הזרם בדיודה מעשית, ועליהם נוסף שינוי של mV בודדים ; v_d			$r_d = n \cdot \frac{V_T}{I_D}$ $i_D = I_D + i_d = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] + \frac{v_d}{r_d}$ בממתח קדמי:

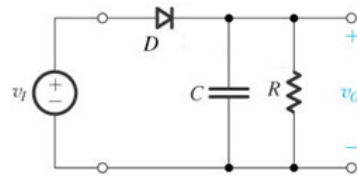
11.3 הרחבת מודל הדיודה באות קטן (על בסיס הקורס במוליכים למחצה) – במקום הנגד r_d בלבד

ממתח קדמי	ממתח אחורי
$C_{diff} = \frac{\tau^*}{r_d}, \quad \tau^* = \left(\frac{1}{\tau_f^{N-side}} + \frac{1}{\tau_f^{P-side}} \right)^{-1}$	$C_J = C_J(V_D = 0) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{V_D}{V_{bi}}\right)^m} = C_{J,0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{V_D}{V_{bi}}\right)^m}$
$r_d = n \cdot \frac{V_T}{i_D}$	$R_S = \text{התנגדות האיזור הנייטרלי} + \text{מגעים}$

11.4 מודל ליניארי למקוטעין עבור זנר/מפולת



11.5 מעגלי יישור :



$$V_r = \frac{V_{peak}}{f \cdot RC}$$

$$V_r = \frac{V_{peak}}{2f \cdot RC}$$

במקרה של מעגל המוזן ממוצא
 של מעגל יישור חצי גל, כמו באיור משמאל,
 האדווה (ripple) במוצא מעגל יישור תהייה:

האדווה (ripple) במוצא מעגל יישור, אשר מוזן
 בגל מיושר יישור גל מלא (לא משורטט) :



12 נספח – (מחוץ לחומר הקורס) - מגברים חד-דרגתיים על בסיס טרנזיסטור בי-פולרי (BJT)

α = גורם המעבר בבסיס, בפעיל קדמי שואף ל-1 (בדי"כ ~0.99)

β = הגבר הזרם (במצב פעיל בלבד):

מתח Early (הגדלת i_C עם הגדלת V_{CE} עקב התקצרות הבסיס):

12.1 PNP / NPN באות גדול וזרם ישר:

יש לזכור שהטרנזיסטור אינו ליניארי עבור אות גדול, ונשתמש במודלים הבאים;

טרנזיסטור npn	טרנזיסטור pnp	סימון וכיוונים מוגדרים
$V_{BE} < 0, V_{BC} < 0 \Rightarrow I_B, I_C \approx 0$	$V_{EB} < 0, V_{CB} < 0 \Rightarrow I_B, I_C \approx 0$	קטעון
$V_{BE}^{on} \approx 0.5V$ $V_{BE}^{Typ.} \approx 0.7V$ $V_{BC} < V_{BC}^{on} = 0.4V \Rightarrow V_{CB} > -0.4V$ $V_{CE} > 0.3V$	$V_{EB}^{on} \approx 0.5V$ $V_{EB}^{Typ.} \approx 0.7V$ $V_{CB} < V_{CB}^{on} = 0.4V \Rightarrow V_{BC} > -0.4V$ $V_{EC} > 0.3V$	תחום פעיל קדמי
$i_B = (I_S / \beta) \cdot \exp(v_{BE} / V_T)$ $i_C = I_S \cdot \exp(v_{BE} / V_T) \cdot (1 + v_{CE} / V_A)$ $i_E = i_B + i_C \approx (\beta + 1) \cdot i_B = i_C / \alpha$ $r_o = V_A / I_C$	$i_B = (I_S / \beta) \cdot \exp(v_{EB} / V_T)$ $i_C = I_S \cdot \exp(v_{EB} / V_T) \cdot (1 + v_{EC} / V_A)$ $i_E = i_B + i_C \approx (\beta + 1) \cdot i_B = i_C / \alpha$ $r_o = V_A / I_C$	תחום רוויה
$v_{BE}^{sat} \approx 0.7 - 0.8V$ $v_{CE}^{sat} \approx 0.2V$ $i_C < \beta \cdot i_B$	$v_{EB}^{sat} \approx 0.7 - 0.8V$ $v_{EC}^{sat} \approx 0.2V$ $ i_C < \beta \cdot i_B $	

12.2 פרמטרים אופייניים באות קטן, בהנחת מצב פעיל קדמי, בטרנזיסטור בי-פולרי (BJT):

הגבר/יחס הזרמים באות קטן:

מוליכות המעבר (טרנס-אדמיטנס), לאות קטן:

ההתנגדות הדינמית לאות של צומת BE כפי שהיא משוקפת ב**בסיס** :

$$r_\pi = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{i_E=I_E} = \frac{V_T}{I_B} = \beta \frac{V_T}{I_C} = \frac{\beta}{g_m}$$

ההתנגדות הדינמית של צומת BE כפי שהיא משוקפת ב**אמיטר** :

$$r_e = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_E} \right|_{i_E=I_E} = \frac{V_T}{I_E} = \alpha \frac{V_T}{I_C} = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{r_\pi}{\beta+1}$$

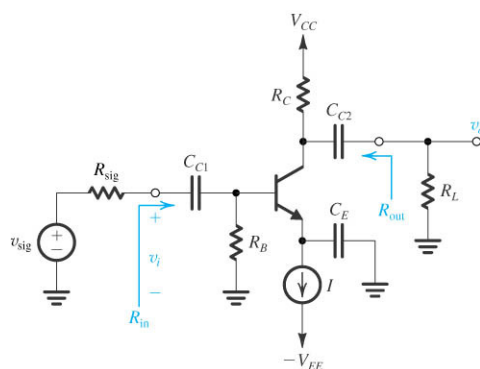
התנגדות המוצא (זהה לאות הגדול) :

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_C}$$

סכימות התמורה לאות קטן (במצב פעיל קדמי) :

גרסת $\alpha \cdot i$, $\beta \cdot i_b$	גרסת g_m , v_π	
		סכימת T (גרסה מצומצמת של מודל אברס-מול כיוון שרק צומת אחד מהשניים בממתח קדמי)
		מעבר לייצוג סכימת π

12.3 מגבר לאות קטן מבוסס BJT בחיבור Common Emitter (CE), ללא נגד ניוון :



$$R_{in} = R_B \parallel r_\pi = R_B \parallel [r_e (\beta+1)]$$

$$R_{out} = r_o \parallel R_C$$

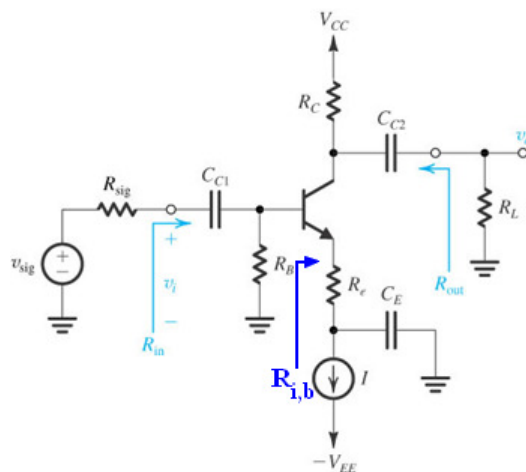
$$A_{i,s} = \left. \frac{i_o}{i_{sig}} \right|_{R_L=0} = -g_m \cdot R_{in} \cong -g_m \cdot r_\pi \cong \beta$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = -\frac{R_B \parallel r_\pi}{R_B \parallel r_\pi + R_{sig}} \cdot g_m \cdot (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

אם מזניחים את R_{sig} , ומניחים R_B , r_o גדולים, אזי הגבר המתח הוא :

$$A_v = \left. \frac{v_o}{v_{sig}} \right|_{R_L \neq 0} \cong -\alpha \cdot g_m \cdot \frac{R_C \parallel R_L}{r_e}$$

12.4 מגבר לאות קטן מבוסס BJT בחיבור Common Emitter (CE), כולל נגד ניוון באמיטר :



הפיתוחים למטה מתבססים על הזנחת r_o , כלומר $r_o \rightarrow \infty$:

$$R_{out} = r_o \parallel R_C = R_C$$

$$R_{in} = R_B \parallel R_{i,b} = R_B \parallel [(r_e + R_E)(\beta + 1)]$$

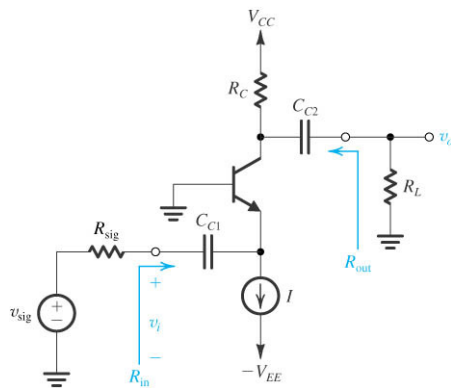
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{r_e}{r_e + R_E} = \frac{1}{1 + R_E/r_e}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = - \frac{R_B \parallel R_{i,b}}{R_B \parallel R_{i,b} + R_{sig}} \cdot \frac{(r_e \cdot g_m)}{r_e + R_E} \cdot (R_C \parallel R_L)$$

אם מזניחים את R_{sig} , ומניחים $R_E \gg r_e$, אזי הגבר המתח הוא :

$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} \bigg|_{R_L \neq 0} \approx -\alpha \cdot \frac{R_C \parallel R_L}{R_E}$$

12.5 מגבר לאות קטן מבוסס BJT בחיבור Common Base (CB), חוצץ זרם :



הפיתוחים למטה מתבססים על הזנחת r_o , כלומר $r_o \rightarrow \infty$:

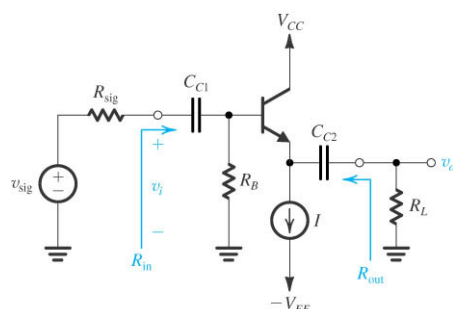
$$R_{out} = r_o \parallel R_C = R_C$$

$$R_{in} = r_e$$

$$A_{i,s} = \frac{i_o}{i_{sig}} \bigg|_{R_L=0} = \alpha \rightarrow 1$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{1}{r_e + R_{sig}} \cdot \alpha \cdot (R_C \parallel R_L) \xrightarrow{R_{sig} \rightarrow 0} \alpha \cdot \frac{(R_C \parallel R_L)}{r_e}$$

12.6 מגבר לאות קטן מבוסס BJT בחיבור Common Collector (CC), חוצץ מתח :



הפיתוחים למטה מתבססים על $R_C = 0$:

יש לשים לב שמעצם החיבור, זהו מגבר שאינו חד-כיווני :

$$R_{in} = R_B \parallel \{(\beta + 1)[r_e + (r_o \parallel R_L)]\}$$

$$R_{out} = r_o \parallel \left(r_e + \frac{R_B \parallel R_{sig}}{\beta + 1} \right)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \cdot \frac{(r_o \parallel R_L)}{\frac{R_B \parallel R_{sig}}{\beta + 1} + r_e + (r_o \parallel R_L)} \rightarrow 1$$

$$A_{i,s} = \frac{i_o}{i_{sig}} \bigg|_{R_L=0} \approx \beta + 1$$