

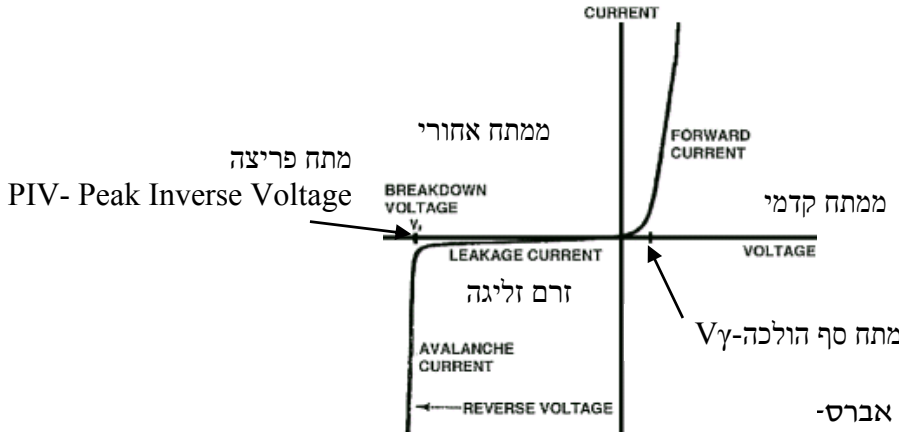
מגמת אלקטרוניקה
מרצה : מתי דוד

ביה"ס להנדסאים

דף נוסחאות אלקטרוניקה תקבילית

1. הדיודה :

א. אופיין דיודה :



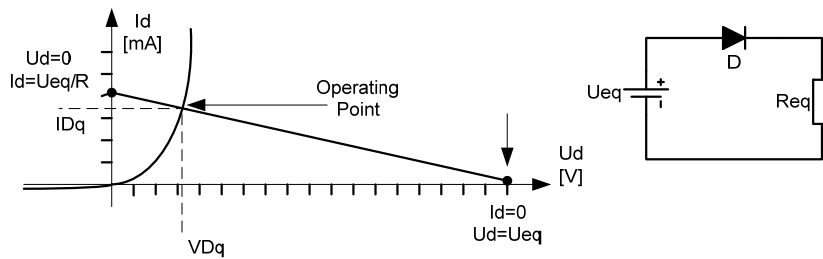
ב. משוואת הדיודה - משוואת אברס-

$$I_D = I_{OP} \times \left(\ell^{\frac{V_d}{\eta \times V_{Th}}} - 1 \right) \begin{cases} V_d > 0 \rightarrow I_D \cong I_{OP} \times \ell^{\frac{V_d}{\eta \times V_{Th}}} \\ V_d < 0 \rightarrow I_D \cong -I_{OP} \end{cases}$$

ג. מתח תרמי -

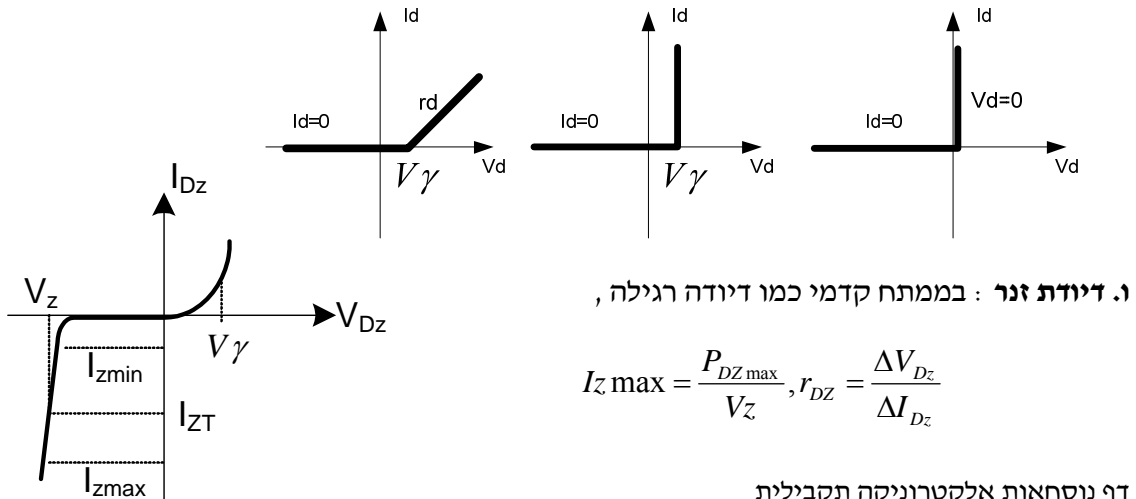
$$V_{Th} = \frac{K \times T}{q} \Big|_{T = 27^\circ C} \cong 0.026V$$

ד. קו עבודה -



ה. קרובים של דיודה :

1. דיודה אידיאלית - קצר, נתק 2. דיודה אידיאלית + מתח סף הולכה 3. ד"א + V_γ, r_D



ו. דיודת זנר : בממתח קדמי כמו דיודה רגילה,

$$I_{z \max} = \frac{P_{DZ \max}}{V_z}, r_{DZ} = \frac{\Delta V_{Dz}}{\Delta I_{Dz}}$$

דף נוסחאות אלקטרוניקה תקבילית

מחבר : מתי דוד, © כל הזכויות שמורות, אין להעתיק או לשכפל בכל צורה, ללא אישור בכתב מהמחבר

1. השפעת הטמפר' על הדיודה : $I_{op}(T_2) = I_{op}(T_1) \times 2^{\frac{T_2-T_1}{10}}$, $\frac{\Delta V_d}{\Delta T} \approx -2 \frac{mV}{^\circ C}$

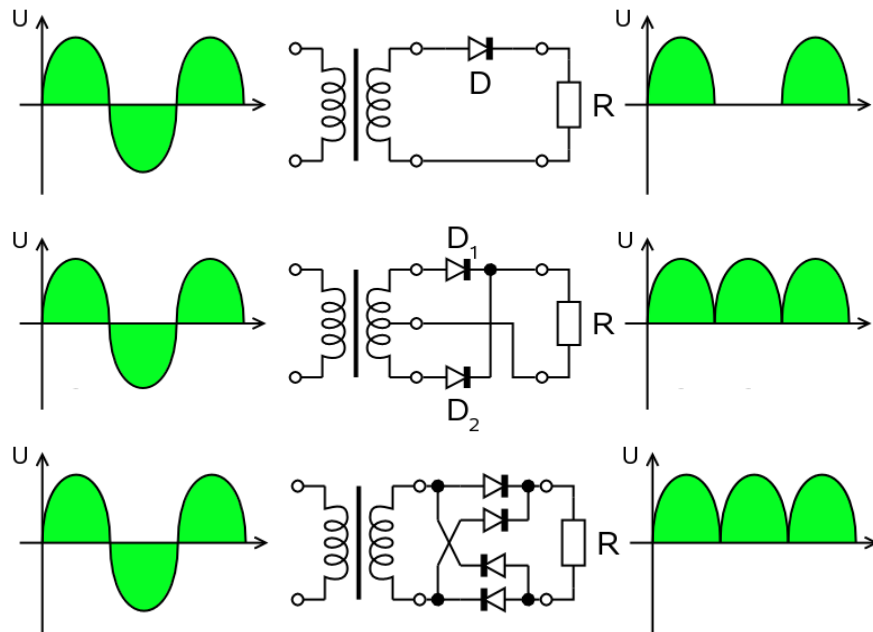
2. התנגדות סטטית ודינאמית : $r_D = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.026}{I_d}$, $R_D = \frac{V_d}{I_d}$

3. הספק הדיודה : $P_D = V_d \times I_d$

2. ספקים :

א. מתאם מתחים - שנאי : $\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$

ב. סוגים של מיישרים : חד דרכי , דו דרכי וגשר



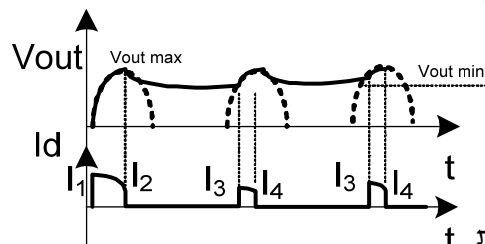
ג. מתח ממוצע : חד דרכי : $V_{out_{AV}} = \frac{V_{out_{max}}}{\pi}$, דו דרכי : $V_{out_{AV}} = \frac{2 \times V_{out_{max}}}{\pi}$

ד. גליות : $\Delta V_{out} = \frac{I_{out_{AV}}}{f \times C} \cong \frac{V_{out_{max}}}{f \times C \times R_L + 0.5}$

ה. זרם הדיודה :

$$I_D(t=0) = I_1 = 2 \times \pi \times f \times C \times V_{out_{max}} , I_D(t=T/4) = I_2 = I_4 = \frac{V_{out_{max}}}{R_L}$$

$$I_D(t) \Big|_{V_{out} - \min} = I_3 = 2 \times \pi \times f \times C \times V_{out_{max}} \times \cos\left(\arcsin\left(\frac{V_{out_{min}}}{V_{out}}\right)\right) + \frac{V_{out_{min}}}{R_L}$$



דף נוסחאות אלקטרוניקה תקבילית מחבר : מתי דוד, © כל הזכויות שמורות, אין להעתיק או לשכפל בכל צורה, ללא אישור בכתב מהמחבר

ו. מייצבים, הגדרות : יציבות $Sv_{ability} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}$, התנגדות יציאה $R_{out} = -\frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{out}}$

ז. מייצב זר + נגד : יציבות - $Sv = \frac{r_{DZ} \parallel R_L}{r_{DZ} \parallel R_L + R_Z}$, התנגדות יציאה : $R_{out} = r_{DZ} \parallel R_Z$

$$\frac{V_Z}{\frac{V_{in\ min} - V_Z}{R_Z} - I_Z\ min} < R_L < \frac{V_Z}{\frac{V_{in\ max} - V_Z}{R_Z} - I_Z\ max} : \text{גבולות נגד העומס}$$

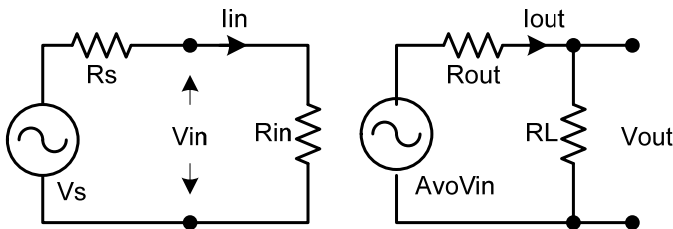
3. מבוא למגברים :

א. הגדרות הגברים : $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$, $A_i = \frac{I_{out}}{I_{in}} = A_v \times \frac{R_{in}}{R_L}$, $A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = A_v \times A_p$

ב. הגברים לוגריתמיים :

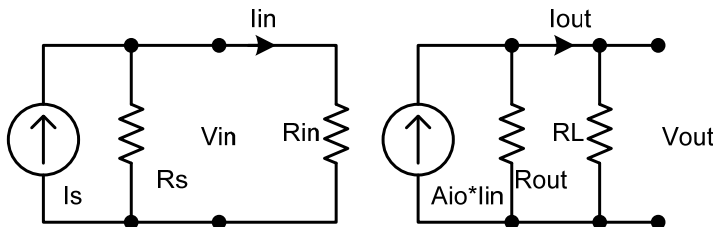
$$A_v (db) = 20 \times \log\left(\left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right|\right), A_i (db) = 20 \times \log\left(\left|\frac{I_{out}}{I_{in}}\right|\right), A_p (db) = 10 \times \log\left(\left|\frac{P_{out}}{P_{in}}\right|\right)$$

ג. סוגי מגברים :



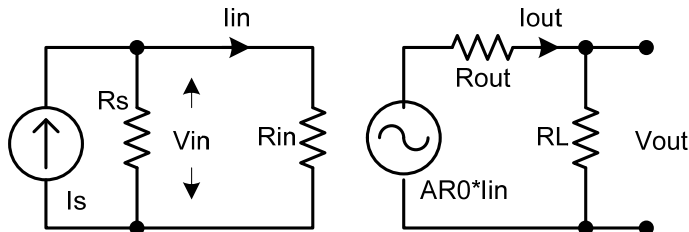
מגבר מתח : אידיאלי - $R_{in} = \infty, R_{out} = 0$

$$A_{Vs} = \frac{V_{out}}{V_s} = A_{vo} \times \frac{R_L}{R_L + R_{out}} \times \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s}$$



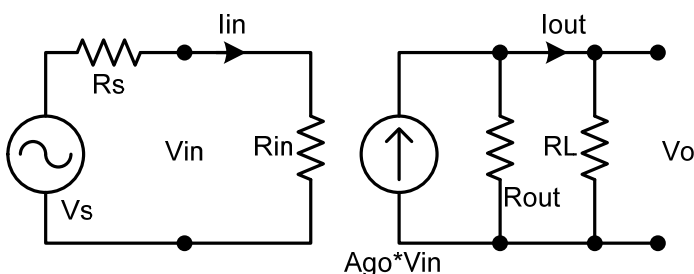
מגבר זרם : אידיאלי - $R_{out} = \infty, R_{in} = 0$

$$A_{Is} = \frac{I_{out}}{I_s} = A_{io} \times \frac{R_{out}}{R_L + R_{out}} \times \frac{R_s}{R_{in} + R_s}$$



מגבר התנגדות- אידיאלי - $R_{out} = 0, R_{in} = 0$

$$A_{Rs} = \frac{V_{out}}{I_s} = A_{ro} \times \frac{R_L}{R_L + R_{out}} \times \frac{R_s}{R_{in} + R_s}$$

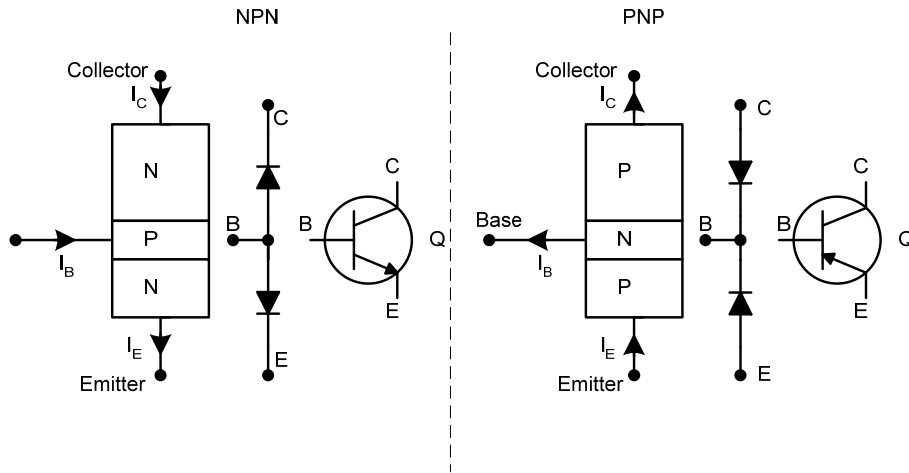


מגבר מוליכות : אידיאלי - $R_{out} = \infty, R_{in} = \infty$

$$A_{Gs} = \frac{I_{out}}{V_s} = A_{go} \times \frac{R_{out}}{R_L + R_{out}} \times \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s}$$

4. טרנזיסטורים ביפולריים:

א. מבנה הטרני'



ב. זרמים : $I_C = \beta \times I_B = \alpha \times I_E, I_E = I_B + I_C = (\beta + 1) \times I_B, \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$

ג. זרמי זליגה: $I_C = \beta \times I_B + (\beta + 1) \times I_{CBO}$

ד. מצבי הטרני' : קטעון הטרני' נתק - $|V_{be}| < |V_{\gamma}| \rightarrow I_C = I_B = 0, |V_{CE}| = V_{CC}$

רוויה הטרני' כ"קצר" - $|V_{be}| > |V_{\gamma}| \rightarrow I_C < I_B \times \beta, |V_{CEsat}| \cong 0.2V$

פעיל הטרני' כמגבר - $|V_{be}| = |V_{\gamma}| \rightarrow I_C = I_B \times \beta, |V_{CEsat}| < |V_{CE}| < V_{CC}$

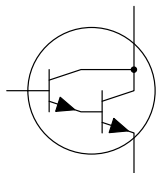
ה. נקודת עבודה :

זרם בסיס בקונפיגורציה סטנדרטית טרני' NPN :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{\gamma} \times \left(1 + \frac{R_{B1}}{R_{B2}}\right)}{R_{B1} + R_E \times (1 + \beta) \times \left(1 + \frac{R_{B1}}{R_{B2}}\right)}$$

בטרני' מסוג PNP יש להחליף את R_{B1} ב R_{B2} .

נקודת עבודה מיטבית : להוצאת מתח מוצא בעל אמפליטודה מרבית - $V_{ce_opt} \cong 0.5 \times V_{CC}$

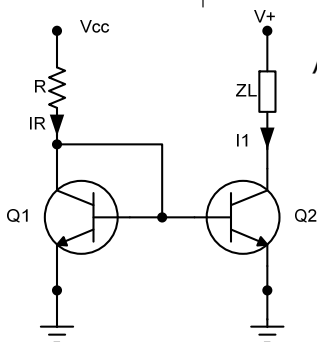


ו. חיבור דרלינגטון : להגדלת הגבר הזרם

$$\beta_T = (\beta_1 + 1) \times (\beta_2 + 1) - 1, V_{\gamma_T} = 2 \times V_{\gamma}, V_{cesat_T} \cong V_{\gamma} + V_{cesat}$$

ז. ראי זרם : ליצירת מקור זרם קבוע, הטרני' זהים ובעלי $\beta \gg 1$

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_{\gamma}}{R} \cong I_1$$

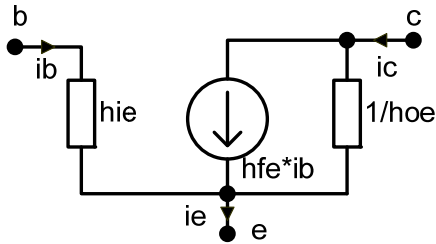


דף נוסחאות אלקטרוניקה תקבילית

מחבר : מתי דוד, © כל הזכויות שמורות, אין להעתיק או לשכפל בכל צורה, ללא אישור בכתב מהמחבר

ח. יציבות נקודת עבודה : כמה תלויה נקודת העבודה באחד מערכי אחד מנגדי המעגל או הטרני

$$S_{VCE}^{\beta} = \frac{\Delta V_{ce}}{\Delta \beta}, S_{VCE}^{Rc} = \frac{\Delta V_{ce}}{\Delta R_c} \quad \text{לדוגמא:}$$



ט. סכימת תמורה לאות קטן NPN=PNP :
 $hoe = 0$ - ברירת המחדל, $hie = \frac{0.026}{I_B}$

ע"מ לצייר סכימת תמורה לאות קטן, יש לקצר את מקורות המתח בלתי תלויים (הספקים) ואת הקבלים הקיימים במעגל, ניתוק מקורות הזרם הבלתי תלויים.

י. חישוב התנגדות כניסה ויציאה : על סכימת תמורה לאות קטן

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}}, R_{out} = \frac{V_{Test}}{I_{Test}} \Big|_{R_L \rightarrow \infty, V_{in} = 0}$$

יא. השוואה בין שלושת חיבורי הטרני' הבסיסיים

לטרני' 3 חיבורים בסיסיים, אמיטר או בסיס או קולקטור משותף, לכל חיבור יש את התכונות משלו, נוסף גם את המקרה של אמיטר משותף ללא קבל אמיטר.
הערה : רק במעגל אמיטר משותף התחשבתי במוליכות היציאה של הטרני' - hoe

אמיטר משותף ללא קבל אמיטר	C.E. - אמיטר משותף	המשתנה/מעגל
$R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel (hie + (hfe + 1) \times R_E)$	$R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel hie$	התנגדות כניסה - Rin
R_c	$R_c \parallel hoe^{-1}$	התנגדות יציאה - Rout
$\frac{-hfe \times (R_c \parallel R_L)}{hie + (hfe + 1) \times R_E}$	$\frac{-hfe \times (R_c \parallel R_L \parallel hoe^{-1})}{hie}$	הגבר מתח - Av

קולקטור משותף - C.C.	בסיס משותף - C.B.	המשתנה/מעגל
$R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel (hie + (hfe + 1) \times R_E \parallel R_L)$	$R_E \parallel \frac{hie}{hfe + 1}$	התנגדות כניסה - Rin
$R_E \parallel \frac{hie}{hfe + 1}$	R_c	התנגדות יציאה - Rout
$\frac{(hfe + 1) \times R_E \parallel R_L}{hie + (hfe + 1) \times R_E \parallel R_L} \cong 1$	$\frac{hfe \times (R_c \parallel R_L)}{hie}$	הגבר מתח - Av

קולקטור משותף - C.C.	בסיס משותף - C.B.	אמיטר משותף ללא קבל אמיטר	אמיטר משותף - C.E.	המשתנה/מעגל
גבוהה	נמוכה מאוד	גבוהה	בינונית	התנגדות כניסה
נמוכה מאוד	בינונית	בינונית	בינונית	התנגדות יציאה
אין	טוב	נמוך	טוב	הגבר מתח
טוב	אין	נמוך	טוב	הגבר זרם
אין	אין	יש	יש	היפוך מופע

יד. חיבור קסקדי של מגברים: תוך התחשבות בעומס של כל דרגה: $A_{VT} = A_{V1} \times A_{V2} \times A_{V3} \dots$

5. משפחת FET:

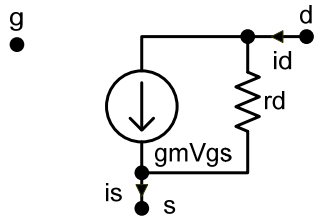
א. טרני JFET

$$I_{DS} = I_{DSS} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} = 2 \times \frac{I_{DSS}}{|V_P|} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) \equiv g_{m0} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{2 \times \sqrt{I_{DSS} \times I_{DS}}}{|V_P|}$$

תנאי לרוויה: $V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$

סכימת תמורה של הטרני לאות קטן:

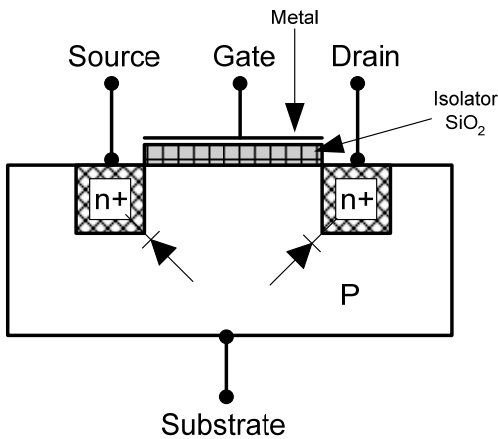


הגבר המתח בחיבור מקור משותף:

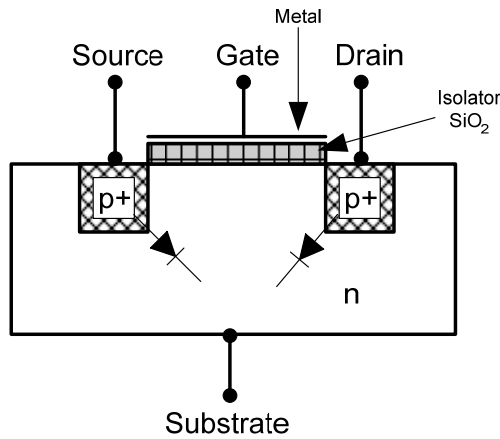
$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-gm \times V_{GS} \times rd \parallel Rd \parallel R_L}{V_{GS}} = -gm \times rd \parallel Rd \parallel R_L$$

ב. טרני Mosfet העשרה:

Enhancement Mosfet N-Ch



Enhancement Mosfet P-Ch



$$I_{DS} = K \times (V_{GS} - V_{Th})^2 \rightarrow$$

$$gm = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} = 2 \times K \times |V_{GS} - V_{Th}|$$

6. מגברי הפרש :

א. הגדרות :

מתחי כניסה הפרשי (דיפרנציאלי) : $V_{ind} = V_{in_1} - V_{in_2}$

מתח כניסה משותף (Common) $V_{inc} = \frac{V_{in_1} + V_{in_2}}{2}$

מתח יציאה : $V_{out} = A_{vd} \times V_{ind} + A_{vc} \times V_{inc}$

$$V_{out} = V_{in_1} \times \left(A_{vd} + \frac{1}{2} A_{vc} \right) - V_{in_2} \times \left(A_{vd} - \frac{1}{2} A_{vc} \right)$$

איכות מגבר ההפרש – יחס דחית האות המשותף –

$$CMRR = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \rightarrow CMMR(db) = 20 \log \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$

ב. הגברים :

$$A_{vd_1} = \left. \frac{V_{out_1}}{V_{ind}} \right|_{V_{inc}=0} = \frac{V_{out_1}}{2V_s} = \frac{-hfe_1 \times R_{C_1} \parallel R_L}{2(R_B + hie_1)}$$

$$A_{vd_2} = \left. \frac{V_{out_2}}{V_{ind}} \right|_{V_{inc}=0} = \frac{V_{out_2}}{2V_s} = \frac{hfe_2 \times R_{C_2} \parallel R_L}{2(R_B + hie_2)}$$

$$A_{vd_3} = \left. \frac{V_{out_3}}{V_{ind}} \right|_{V_{inc}=0} = \frac{V_{out_1} - V_{out_2}}{V_{ind}} = A_{vd_1} - A_{vd_2}$$

$$A_{vc_1} = \left. \frac{V_{out_1}}{V_{inc}} \right|_{V_{ind}=0} = \frac{V_{out_1}}{V_s} = \frac{-hfe_1 \times R_{C_1} \parallel R_L}{R_B + hie_1 + 2R_E \times (hfe_1 + 1)}$$

$$A_{vc_2} = \left. \frac{V_{out_2}}{V_{inc}} \right|_{V_{ind}=0} = \frac{V_{out_2}}{V_s} = \frac{-hfe_2 \times R_{C_2} \parallel R_L}{R_B + hie_2 + 2R_E \times (hfe_2 + 1)}$$

$$A_{vc_3} = \left. \frac{V_{out_3}}{V_{inc}} \right|_{V_{ind}=0} = \frac{V_{out_1} - V_{out_2}}{V_{inc}} = A_{vc_1} - A_{vc_2}$$

7. משוויים

א. חלון הופך מופע :

Hysteresis _ Inverter _ Comparator :

$$V_{HL} = V_{out_{sat(+)}} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{ref} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{LH} = V_{out_{sat(-)}} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{ref} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$W = |V_{HL} - V_{LH}| = (V_{out_{sat(+)}} - V_{out_{sat(-)}}) \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{cnt} = (V_{out_{sat(+)}} + V_{out_{sat(-)}}) \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{ref} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

דף נוסחאות אלקטרוניקה תקבילית

מחבר : מתי דוד, © כל הזכויות שמורות, אין להעתיק או לשכפל בכל צורה, ללא אישור בכתב מהמחבר

ב. משווה חלון שאינו הופך מופע :

Hysteresis_Non_Inverter_Comparator :

$$V_{HL} = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - V_{out_{sat(+)}} \times \frac{R_1}{R_2}$$

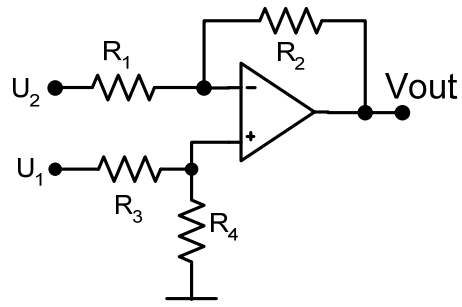
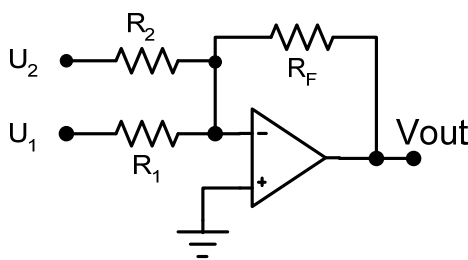
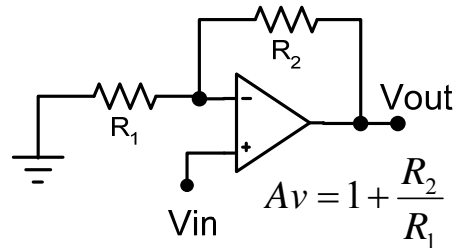
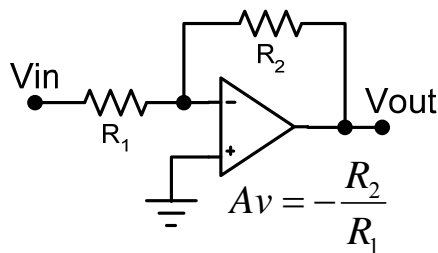
$$V_{LH} = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - V_{out_{sat(-)}} \times \frac{R_1}{R_2}$$

$$W = V_{LH} - V_{HL} = (V_{out_{sat(+)}} - V_{out_{sat(-)}}) \times \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{cnt} = \frac{V_{LH} + V_{HL}}{2} = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - (V_{out_{sat(+)}} + V_{out_{sat(-)}}) \times \frac{R_1}{2R_2}$$

8. מגבר במשוב שלילי : $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_{VOL}}{1 + \beta \times A_{VOL}}$

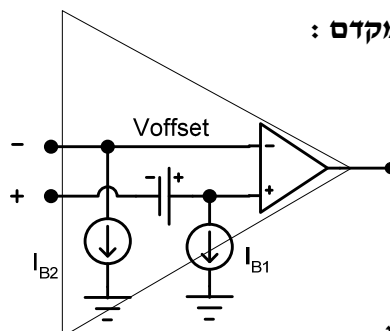
9 (מגברי שרת)
א. מעגלים בסיסיים :



$$V_{out} = -R_F \times \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \right)$$

$$V_{out} = U_1 \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1} \times U_2$$

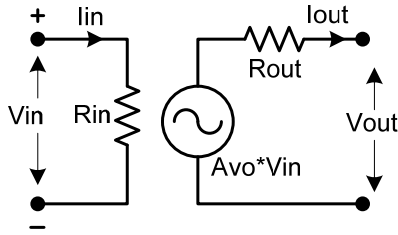
ב. בעיות מתח ההיסט וזרמי המקדם :



דף נוסחאות אלקטרוניקה תקבילית

מחבר : מתי דוד, © כל הזכויות שמורות, אין להעתיק או לשכפל בכל צורה, ללא אישור בכתב מהמחבר

ג. מעגל תמורה (מעגל שווה ערך לאות קטן - AC) :

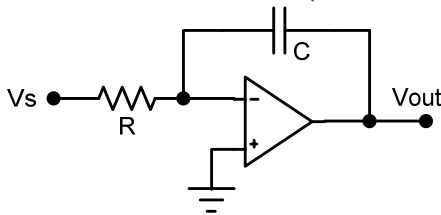


ד. הגבר במגבר הופך מופע מעשי

$$A_{V_Invertig_Amp} = \frac{V_{out}}{V_s} = \frac{-\frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in_op} \times R_L \parallel R_2 \parallel R_{out_op}}{R_1} \times \left(\frac{A_{vo}}{R_{out_op}} - \frac{1}{R_2} \right)}{1 + \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in_op} \times R_L \parallel R_2 \parallel R_{out_op}}{R_2} \times \left(\frac{A_{vo}}{R_{out_op}} - \frac{1}{R_2} \right)}$$

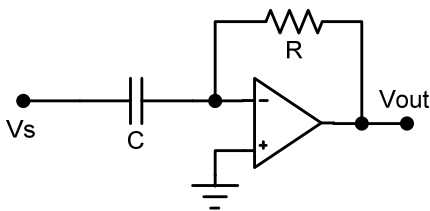
ה. הגבר במגבר שאינו הופך מופע מעשי

$$A_{V_Non_invertig} = \frac{V_{out}}{V_s} = \frac{R_2 \parallel R_L \parallel R_{out_op} \times \left(\frac{A_{vo}}{R_{out_op}} + \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in_op}}{R_{in_op}} \times \left(\frac{1}{R_2} - \frac{A_{vo}}{R_{out_op}} \right) \right)}{\left(1 - \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in_op} \times R_2 \parallel R_L \parallel R_{out_op}}{R_2} \times \left(\frac{1}{R_2} - \frac{A_{vo}}{R_{out_op}} \right) \right)}$$



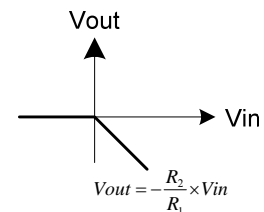
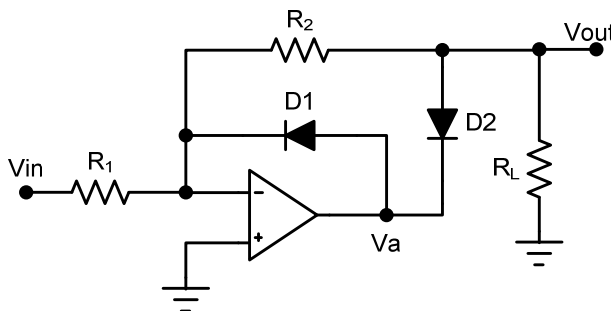
10 (גוזר אינטגרטור (סוכם)

$$V_{out}(t) = \frac{-1}{RC} \times \int V_s dt + V_{out}(0), V_{out}(s) = \frac{-1}{RC} \times \frac{1}{s} \times V_{out}(s)$$



$$V_{out}(t) = -RC \times \frac{dV_{out}}{dt}, V_{out}(s) = -RC \times s \times V_{out}(s)$$

11 (מעגלי דיודות מדויקים



בהצלחה - מתי