

דוח מכין 4 – Cascode

מגישים:

אור שאול

אריאל רנה

1. א. נשתמש במודל אות קטן כדי לחשב את היחס $R_0 = \frac{v_t}{i_t}$:

$$V_E = i_t \cdot (R_E \parallel R_\pi), \quad i_t = \frac{V_{CE}}{r_0} + g_m V_\pi, \quad V_c = V_t, \\ V_\pi = V_{BE} = -V_E = -i_t (R_E \parallel r_\pi)$$

נציב ונקבל:

$$i_t = \frac{v_t - i_t (R_E \parallel r_\pi)}{r_0} - g_m \cdot i_t (R_E \parallel r_\pi) \rightarrow v_t = i_t (r_0 + (R_E \parallel r_0) + g_m r_0 (R_E \parallel r_0))$$

לכן:

$$R_0 = \frac{v_t}{i_t} = (r_0 + (g_m r_0 + 1)(R_E \parallel r_\pi))$$

ב. על מנת שהקירוב הזה יתקיים, ההנחה הבאה צריכה להתקיים: $g_m r_0 \gg 1$. כדי שזה יוכל להתקיים, צריך שהפרמטר β יהיה גדול מאוד.

ג.

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}, \quad r_\pi = \frac{\beta + 1}{g_m} = \frac{V_T(\beta + 1)}{I_C} \rightarrow R_0 = r_0 + R_E \parallel r_\pi + g_m r_\pi \cdot \frac{R_E r_0}{R_E + r_\pi}$$

נניח שמתקיים $R_E \ll r_{pi}$:

$$R_0 \cong r_0 + r_\pi + (\beta + 1) \cdot r_0$$

$$r_0 \gg R_E \rightarrow r_{0,max} = \beta r_0$$

ד. כאשר נחליף את הBJT בMOS לא יהיה הבדל, מאחר והנחנו $R_0 = \infty$, לכן בשניהם אין זרמי בסיס ומודל האות הקטן שלהם זהה.

2. א. ראי זרם פשוט:

$$I_{ref} = I_S e^{\frac{V_{EB1}}{V_T}}, \quad I_{out} = I_S e^{\frac{V_{EB2}}{V_T}} \rightarrow \frac{I_{out}}{I_{ref}} = e^{\frac{V_{EB2} - V_{EB1}}{V_T}}$$

$$V_{B1} = V_{B2} \rightarrow \frac{I_{out}}{I_{ref}} = e^{\frac{V_{E2} - V_{E1}}{V_T}}$$

אם הנגדים המחוברים לאמיטרים שווים, מתקיים $\frac{I_{out}}{I_{ref}} = 1$.

ראי זרם ווילסון:

התשובה עבור ראי זרם ווילסון זהה לתשובה עבור ראי זרם פשוט, לכן מתקבל $\frac{I_{out}}{I_{ref}} = 1$.

ראי זרם MOS:

$$I_{DS_{1,2}} = k(V_{GS} - V_T)^2 \text{ נניח ששני הטרנזיסטורים ברוויה ולכן}$$

מתוך KVL:

$$V_G = -I_{DS_1} \cdot R, \quad V_S - I_{DS_1} \cdot R_1 = V^-$$

נציב את שני המתחים:

$$I_{DS} = k(-I_{DS_1} \cdot R - I_{DS_1} \cdot R_1 - V^- - V_T)^2$$

נקבל משוואה ריבועית:

$$k(R + R_1)^2 \cdot I_{out}^2 + (-1 + 2k(R + R_1)(V_t + V^-)) \cdot I_{out} + k(V_T + V^-)^2$$

אם יהיו ערכים מוגדרים לפרמטרים, אפשר למצוא את הזרם.

ב. נשתמש במודל אות קטן עבור כל מגבר ונמצא את התנגדויות המוצא:

ראי זרם פשוט:

$$R_0 = r_{0_2} + (g_{m_2} r_{0_2} + 1) \left(R_2 \parallel \left(r_{\pi_2} + R_1 \parallel \frac{1}{g_m} \right) \right)$$

נניח ש $r_{\pi} \gg R_1 \parallel \frac{1}{g_m}$ ולכן:

$$R_0 = r_{0_2} + (g_{m_2} r_{0_2} + 1)(R_2 \parallel r_{\pi_2})$$

ראי זרם ווילסון:

$$\begin{aligned} R_0 &= r_{0_3} + (1 + g_{m_3} r_{0_3}) \left(r_{\pi} \parallel \left(R_2 + \frac{1}{g_{m_2}} \right) \parallel (r_{\pi} + (\beta + 1)R_1) \right) \\ &\cong r_{0_3} + (1 + g_{m_3} r_{0_3}) \left(r_{\pi} \parallel \left(R_2 + \frac{1}{g_{m_2}} \right) \right) \end{aligned}$$

ראי זרם MOS:

חישבנו את הביטוי הזה בשאלה 1:

$$R_{out} = r_0 + (1 + g_{m_2} r_0) \cdot R_2$$

ג. התנגדות המוצא של ראי זרם ווילסון גבוהה יותר משל האחרים, שעבורם התנגדויות המוצא דומות.

יחס הזרמים בין שני ענפי ראי זרם עם טרנזיסטורי BJT תלוי ב β .

היחס בין זרם המוצא לזרם הרפרנס בוויילסון יותר טוב מפני שהטרנזיסטור הנוסף של ראי זרם זה מייצב יותר טוב את נקודת העבודה.

ד. עומס אקטיבי הוא מעגל או רכיב המחובר למעגל אחר, המשמש כעומס ומתפקד בצורה לא לינארית אך מספק זרם יציב. במילים אחרות, ניתן לומר שהעומס האקטיבי מספק או צורך זרם למעגל מבלי להיות תלוי ישירות במתח הנופל עליו.

ה. כאשר מבצעים ניתוח DC, העומס האקטיבי קובע את נקודת העבודה של המעגל, וחשוב שהתנגדותו תהיה נמוכה כדי שלא תשפיע על העומס. לעומת זאת, בעת ניתוח AC, נרצה שהתנגדותו שלו תהיה גבוהה כדי שלא ישפיע על המתח שנופל על המעגל. אז נבדוק את התנהגותו בהתאם לשאר מרכיבי המעגל.

ו. היתרון העיקרי של עומס אקטיבי הוא היכולת שלו להתנהג באופן שונה ב-AC וב-DC. בשונה מנגד רגיל, עומס אקטיבי מאפשר לקבוע נקודת עבודה רצויה ולשפר את ההגבר, תוך צריכת הספק DC מופחתת.

ז. לעומס אקטיבי ולראי זרם יש התנגדות גבוהה באות קטנות אז לא יהיה הבדל משמעותי עבור הגבר המעגל.

3. א. נשתמש בנוסחאות הבאות לחישוב ההתנגדויות:

$$R_{0,BJT} = r_{0_2} + (1 + g_{m_2} r_{0_2}) \left[r_{\pi_2} \parallel \left(R_1 + r_{0_1} + (1 + g_{m_1} r_{0_1}) (r_{\pi_1} \parallel R_2) \right) \right]$$

$$R_{0,BiCMOS} = r_{0_2} + (1 + g_{m_2} r_{0_2}) \left[r_{\pi_2} \parallel (R_1 + r_{ds_1} + (1 + g_{m_1} r_{ds_1}) R_2) \right]$$

ב. עבור BJT, ההגבר הכולל A הוא:

$$A = A_{CE} \cdot A_{CB} = -\frac{g_{m_1}}{g_{m_2}} \cdot g_{m_2} R_0 = -g_{m_1} R_0$$

מכאן ש- G_m הוא:

$$G_m = \frac{i_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out}}{R_0} \cdot \frac{1}{V_{in}} = -g_{m_1}$$

ג. עבור BiCMOS ההגבר הכולל A הוא:

$$A = A_{CS} \cdot A_{CG} = -\frac{g_{m_1}}{g_{m_2}} \cdot g_{m_2} R_0 = -g_{m_1} R_0$$

מכאן ש- G_m הוא:

$$G_m = -g_{m_1}$$

ד. עבור BJT:

$$A_v = -g_{m_1} R_0 = -g_{m_1} [r_{0_2} + (1 + g_{m_2} r_{0_2})(r_{\pi_2} || r_{0_1})]$$

עבור BiCMOS:

$$A_v = -g_{m_1} R_0 = -g_{m_1} [r_{0_2} + (1 + g_{m_2} r_{0_2})(r_{\pi_2} || r_{ds_1})]$$

ה. במקרה זה של ה-MOS, מתקיים $R_{in} \rightarrow \infty$, כיוון שאין זרם דרך השער לעומת ה-BJT.

ו. ביחס להגבר, לבאפר יש הגבר הקרוב ל-1, כלומר, הוא משפיע באופן זניח על האות הנכנס. מבחינת תגובה בתדר, קיבול הכניסה שלו אינו מושפע מאפקט מילר שמצמצם את רוחב הסרט בקונפיגורציית CE. בנוסף, יש לו בידוד גבוה יחסית בין הכניסה ליציאה, מה שמוביל למשוב קטן וליציבות גבוהה.

ז. היתרונות הם: הגבר גבוה, רוחב סרט גדול, יציבות גבוהה, והתנגדות כניסה גבוהה.

4. א. "העמסת מקור אות אפס" מתייחסת למצב שבו בדיקה אידיאלית אינה שואבת שום זרם ממקור האות, שהוא נקודת הבדיקה. המשמעות היא שכדי שלא יזרום זרם כלל, על הבדיקה להיות בעלת עכבה אינסופית. עם זאת, בפועל, לא ניתן להשיג עכבה אינסופית מכיוון שהבדיקה חייבת לשאוב כמות קטנה של זרם כדי ליצור מתח אות בכניסת האוסילוסקופ.

ב. נורות פלורסנט ומנועי מאווררים הם חלק מהמקורות הרבים של רעש חשמלי בסביבת המעבדה. השימוש בבדיקה מפוצה מומלץ מכיוון שהיא מגנה על האות מפני רעשים אלו בצורה יעילה יותר מאשר חיבורי BNC.

ג. רוחב פס הוא טווח התדרים שעבורו מיועדים אוסילוסקופ או ה-probe. מחוץ לטווח זה עלולות להתרחש תוצאות מדידה לא רצויות או בלתי צפויות.

ד. מגבלות טווח דינמי: לכל ה-probes יש מגבלת בטיחות במתח גבוה שאסור לעבור אותה. כדי למנוע סכנות בטיחותיות ונזק פוטנציאלי ל-probe, חשוב להיות מודעים למתחים הנמדדים ולמגבלות המתח של ה-probe בשימוש. בנוסף, לאוסילוסקופים יש טווחי רגישות משרעת המגדירים את טווח האותות עבור רזולוציית מדידה סבירה. ניתן להרחיב את הטווח הדינמי של האוסילוסקופ למתחים גבוהים יותר באמצעות attenuating probe. העמסת מקור: כדי לפתח מתח אות בכניסת האוסילוסקופ, ה-probe חייב לשאוב זרם אות כלשהו. זה יוצר עומס בנקודת הבדיקה שיכול לשנות את האות המועבר לאוסילוסקופ. שני סוגי העמסה הם התנגדות וקיבול, אותם ניתן לייצג כנגדים וקבלים במקביל למקור האות. כדי למזער את השפעתם, נשאף לבחור נגד עם התנגדות גבוהה וקבל עם קיבול נמוך.

5. א. הכניסה Q_{11} היא הכניסה הופכת המופע, מאחר והיא עוברת בהגבר שלילי של Common Source ואז עוברת בהגבר חיובי של Common base. היות וזה מגבר דיפרנציאלי אז הכניסה Q_{10} לא הופכת מופע.

ב. מאחר והתנגדות הכניסה של טרנזיסטורי MOS היא אינסופית, נוכל למדל אותם להיות נתקים ולחבר מקור בוחן דיפרנציאלי ונקבל $R_{in} = 2 [M\Omega]$.

ג. לפי הנחת השאלה $r_0, \beta \rightarrow \infty$, לכן אין זרמי בסיס.

$$V_{out,max} = V^+ - V_{CE_7} - V_{BE_6} = 15 - 0.2 - 0.7 = 14.1 [V]$$

$$V_{out,min} = V_{B_8} - V_{BE_9} + V_{CE_9} = \frac{1.6k}{1.6k + 8k} V^+ - V_{BE_9} + V_{CE_9} = 2.5 - 0.7 + 0.2 = 3 [V]$$

ד.

$$ABC = 393, \quad DEF = 662, \quad r_{0_{NPN}} = 89.3 [k\Omega], \quad r_{0_{PNP}} = 116.2 [k\Omega]$$

$$R_{out} = R_{out_7} \parallel R_{out_9},$$

$$R_{0_9} = r_{0_9} + (1 + g_{m_9} \cdot r_{0_9})(r_{\pi_9} \parallel R_{0_{11}}) \cong r_{0_9} + r_{0_9} \beta$$

$$= 89.3 \cdot 10^3 (1 + 256) = 22.95 [M\Omega]$$

יש ראי זרם ווילסון שמורכב מטרנזיסטורים 5,6,7 ולכן:

$$R_{out_7} = \frac{\beta}{2} r_{0_7} = 90.5 \cdot 116.2 \cdot 10^3 = 10.5 [M\Omega]$$

$$R_{out} = R_{0_9} \parallel R_{out_7} = 10.5 \cdot 10^6 \parallel 22.95 \cdot 10^6 = 7.204 [M\Omega]$$

ה. בגלל הירידה בהתנגדות העומס, המעגל עשוי לפעול בצורה לא תקינה כי ייתכן שהטרנזיסטורים יעברו למצב קיטעון ויצאו ממצב הפעולה התקין של המעגל. גם אם המעגל יפעל, עלולות להתקבל מדידות שגויות עקב הירידה בערך התנגדות המוצא של המעגל.

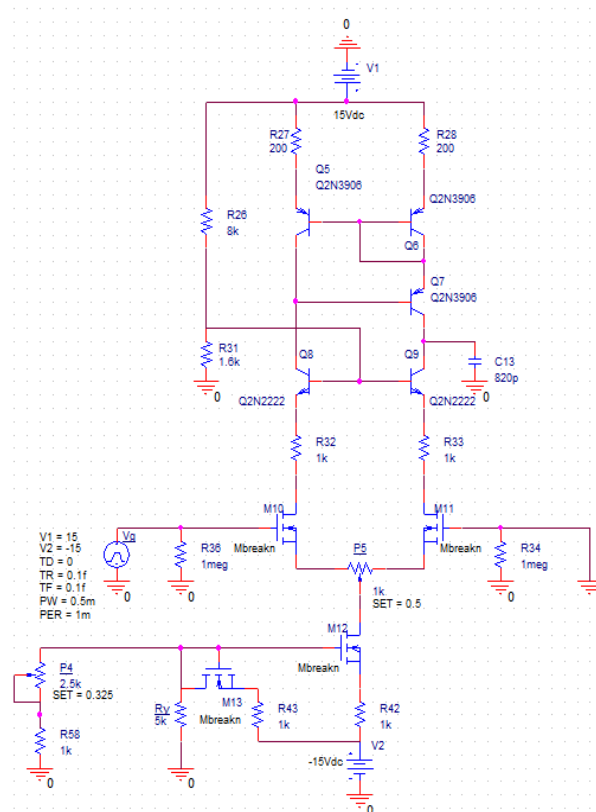
ו.

$$V_{scope} = \frac{15 \cdot 4.01 \parallel 1}{4.01 \parallel (0.68 + 1)} = 10.14 [V]$$

$$V_{meter} = \frac{15 \cdot 4.01 \parallel 10}{4.01 \parallel (0.68 + 10)} = 14.73 [V]$$

6.

המעגל שמימשנו ב-PSPICE:



איור 6

6.1

את ה-Slew Rate נחשב במעבדה באופן הבא: חִין גל ריבועי למעגל דרך מחולל האותות, ונבחר אמפליטודה גבוהה מספיק כך שתתקבל קטימה של אות המוצא ושיפוע אות המוצא יהיה Slew Rate.

6.2

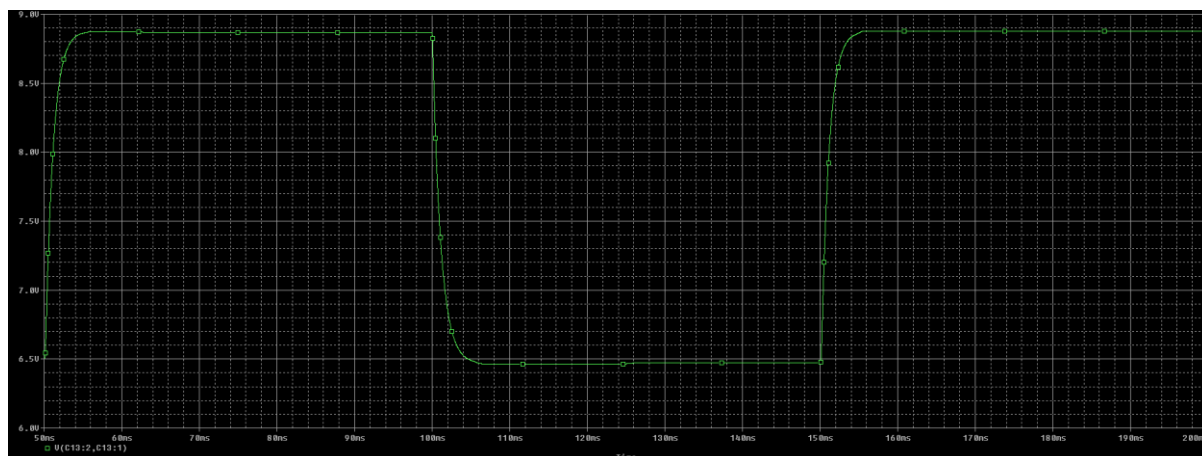
כמו שמוסבר בשאלה, רק באחד הענפים במעגל יזרום זרם, לכן אם נשתמש בהנחה $r_0 = \infty$, נקבל:

$$V_{0,max} \cdot C = I_C = I_{ref} \rightarrow V_{0,max} = \frac{I_{ref}}{C} \rightarrow Slew Rate = \frac{I_{ref}}{C}$$

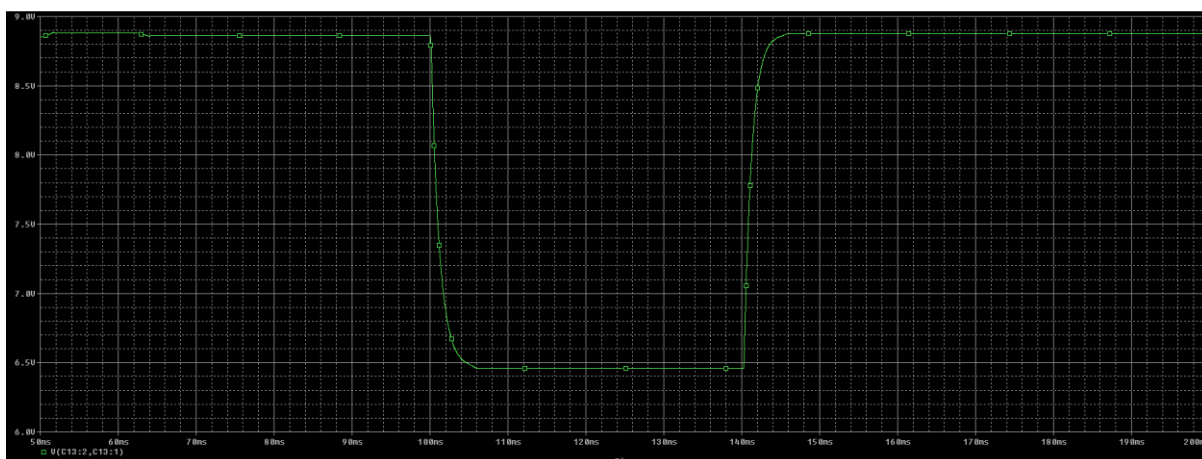
6.3

6.3.1

נבחר גל מהצורה הבאה: $f = 10 \text{ Hz}$, $A = 1 \text{ mV}$, $Duty \text{ Cycle} = 50\%$, $T_{rise} = T_{fall} = 0.1 \text{ ms}$



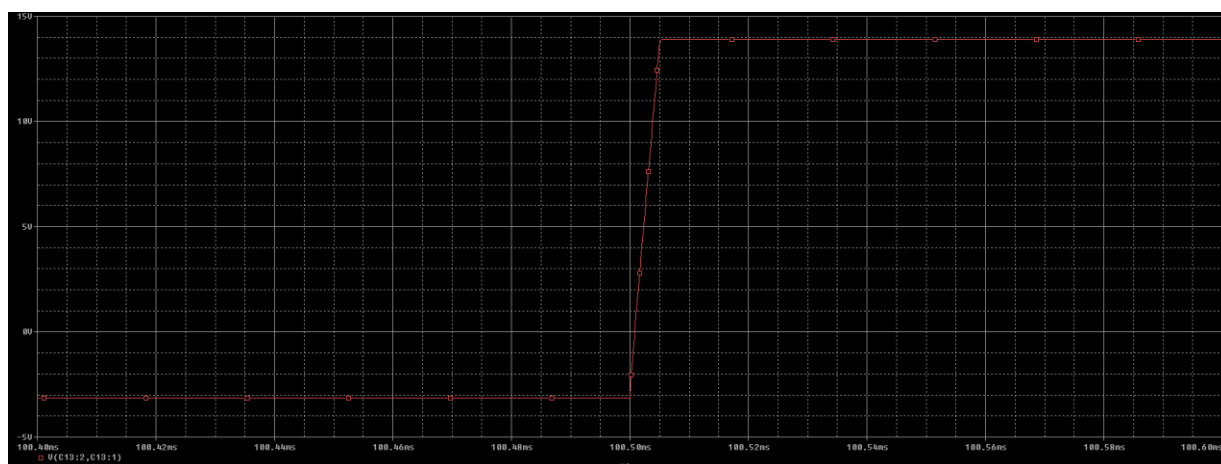
נבחר גל מהצורה הבאה: $f = 10 \text{ Hz}$, $A = 1 \text{ mV}$, $Duty \text{ Cycle} = 40\%$, $T_{rise} = 0.25 T_{fall} = 0.05 \text{ ms}$



$$I_{ref} = 3.736 \text{ mA}$$

6.3.2

כאשר המקור הוא גל ריבועי כזה: $f = 1 \text{ kHz}$, $A = 15 \text{ V}$, $Duty \text{ Cycle} = 50\%$, $T_{rise} = T_{fall} = 0.1 \text{ fs}$
המוצא שהתקבל הינו:



ניתן לראות שהעלייה היא לינארית. לכן, המעגל הינו SR-limited

כאשר המקור הוא גל ריבועי כזה: $f = 1 \text{ kHz}$, $A = 13 \text{ V}$, $Duty \text{ Cycle} = 20\%$, $T_{rise} = T_{fall} = 0.1 \text{ fs}$

המוצא שהתקבל הינו:



גם כאן ניתן לראות שהעלייה היא לינארית ולכן המעגל הינו SR-limited

6.4 משיפוע הגרפים שהם SR-limited נקבל ש $SR = 4.48 \text{ MV/sec}$

.7

7.1

מהכניסה $TP25$ למוצא $TP44$, אנחנו הולכים דרך מחלק מתח ($non \text{ inv}$), דרגת CE (inv), דרגת CC ($non \text{ inv}$) וגם דרגת הספק כן שלסיכום אנו מקבלים אות הפוך.

7.2

$$V_{TP45} = V_{TP26} = V^+ \cdot \frac{20k}{20k + 13k} \cong 9.1V$$

7.3

נרצה שמוצא המגבר יהיה 0, כלומר, שמתח הכניסה יהיה שווה למתח המוצא וניתן להסיק שכאשר $V_{B,Q18} = 0.7V$ נקבל:

$$I_{C17} = \frac{15 - (V_{TP26} + 0.7)}{5.3k}, \quad I_{C17} = \frac{0.7 + 15}{5k + p_3}$$

$$\rightarrow \frac{5.2}{5.3k} = \frac{15.7}{5k + p_3} \rightarrow p_3 = 11k\Omega$$

7.4

$$r_{\pi 17} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{V_T \beta}{I_C} \cong \frac{25m \cdot 100}{1m} = 2.5k\Omega$$

$$R_{in} = r_{\pi 17} + (\beta + 1)R_{48} = 2.5k + 101 \cdot 5.3k = 537.8k\Omega$$

7.5

$$r_e = \alpha \frac{V_T}{I_C} = \frac{100}{101} \cdot \frac{25m}{1m} \approx 25\Omega$$

$$R_{out} = 0.5(r_e + R_{53}) = 0.5(22 + 25) = 23.5\Omega$$

7.6

מכיוון שהמעבר דרך דרגת ה-CE הוא הדומיננטי ביחס להגבר המתח $A \approx A_{CE}$, שכן $A_{CC} \approx 1$.

$$A_{CE} = -\frac{g_m \cdot R_C}{1 + g_m \cdot R_E}, \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1m}{25m} = 0.04$$

$$R_C = 15k \parallel [2.5k + 101(2.5k + 101 \cdot 22)] \approx 15k\Omega, \quad R_E = 5.3k\Omega$$

$$\rightarrow A_{Tot} = -\frac{0.04 \cdot 15k}{1 + 0.04 \cdot 5.3k} = -\frac{600}{213} = -2.82$$

7.7

אנו קוראים לזה "מגבר חיצ" מכיוון שהוא משמש כחיצ בין דרגות שונות במעגל. לרכיב זה יש התנגדות כניסה גבוהה והתנגדות מוצא נמוכה, והגבר המתח שלו אינו משמעותי ולכן השפעתו על המתח זניחה. תכונות אלו מבטיחות שהאות מועבר בצורה מדויקת ויעילה ללא הפרעות או עיוותים.

.8

8.1

מכיוון שהבאפר הופך את האות, אז הכניסה ה-NONINV למעשה כן הופכת את הכניסה.

8.2

$$A_{OL} = \frac{R + r}{r} \left(\frac{V_{in}}{V_y} - 3 \right) = 51 \left(\frac{V_{in}}{V_y} - 3 \right)$$

8.3

משוב שלילי. משוב חיובי יגביר את הגבר המתח עד לרוויה V^+ .

8.4

באמצעות הביטויים של A_{OL} מ-8.2 או מחשבים:

$$V_{pp} = 4V \rightarrow V_{out} = 1.34V$$

$$V_{pp} = 20V \rightarrow V_{out} = 17.35V$$

נבחר $V_{pp} = 20V$ כך שאות המוצא יהיה גלוי וקל למדידה במעבדה.

8.5

1. מכיוון שהמגבר הופך את האות, עבור משוב שלילי נחבר את זה לכניסה ה-NON-INVERTING.

2. האדמה תחובר לכניסה המהפכת.

8.6

הנגד $680k\Omega$ מתפקד כ- R_{in} של הבאפר כך שיחד עם התנגדות ה-probe מתקיים: $R_{in} = 10M \parallel 680k = 510k\Omega$.

8.7

הנגד של ה- $680k\Omega$ אינו נחוץ מכיוון שאיננו זקוקים ל-probe בנקודה זו במעגל מכיוון שהוא אינו הפלט שאנו צריכים למדוד. בנוסף, נקודות ההטיה מותאמות לאחר שחיברנו הכל כך שגם ה- biasing link אינו נחוץ ולכן נוכל לנתק אותו.