

יאן לרון

אלקטרוניקה תקבילית

נושאים מתקדמים

חלק א

הוצאת שורש

הוצאת שורש (אלי מיטב)

052 – 2671210

email: elmtv@netvision.net.il

web: <http://shoresh.sfarim.net>



©

כל הזכויות שמורות למחברים ולמוציא לאור
אין לצלם מספר זה ללא אישור מהמוציא לאור
צילום מספר זה ללא אישור הינו עבירה על החוק
(ויותר חשוב: זה גם לא הוגן)

ספר "אלקטרוניקה תקבילית – נושאים מתקדמים" חלקים א' ו-ב' נותן מענה ללומד מקצוע "אלקטרוניקה תקבילית" בנושאים הפחות פופולריים ושאינם (כמעט) מכוסים בספרות מקצועית בשפה העברית.

הספר נכתב לאוכלוסיית הלומדים לתואר הנדסאי אלקטרוניקה הנבחנים בבחינה חיצונית במקצוע "אלקטרוניקה תקבילית". חלק מהנושאים הורחב מעל לרמה שנדרשת בלימודי הנדסאים כדי להתאים את הספר גם לסטודנטים הלומדים מקצוע "אלקטרוניקה תקבילית" או "מעגלים ליניאריים" במוסדות להשכלה גבוהה.

הספר בא לתת מענה גם לסטודנטים וגם למרצים למקצוע. הספר בהחלט מיועד גם ללימוד עצמי. מסיבה זו החומר העיוני מלווה בהרבה מאוד דוגמאות פתורות. בסוף כל פרק מופיעים תרגילים שאת פתרונם המלא ניתן למצוא בסוף הספר. מתוך נסיוני, צירוף שאלה עם פתרון צמוד מפתה את הלומד לרוץ ולהסתכל ישר בפתרון במקום לפתור את התרגיל בכוחות עצמו.

כמות התרגילים משתנה מפרק לפרק בהתאם לקושי.

ההסברים בספר מלווים בתוצאות שהתקבלו בתוכנת סימולציה למעגלים אנלוגיים PSpice. שילוב תוצאות הסימולציה עוזר להבהרת נושאים מסוימים. תוצאות הסימולציה יכולות לאמת את התוצאות המחושבות או גם להצביע על הפער בין פתרון מקורב והתנהגות אמיתית של המעגל. חשוב לציין שכמעט כל החישובים במקצוע "אלקטרוניקה תקבילית" מבוססים על קירובים והזנחות. לרוב התוצאות החישוביות תואמות את התוצאות המתקבלות במעגל מעשי. במקרים מסוימים יכול להיווצר פער בין ההתנהגות של מעגל מעשי והתוצאות החישוביות. אני ממליץ בחום למרצים של המקצוע להשתמש בכלי סימולציה ככלי עזר ללימוד המקצוע.

כתיבת הספר הייתה משימה לא פשוטה. הנושאים בספר אינם מכוסים בצורה מלאה באף ספר בנושא. נעשה מאמץ רב ללכד את החומר מתוך ספרות, מידע אינטרנטי וכמובן מתוך פיתוחים עצמיים של חלק מהנושאים תוך שימוש בכלי סימולציה במידת הצורך. המטרה היא להביא לקורא את כל שלבי הניתוח של מעגלים ולא תוצאות סופיות כפי שמקובל בהרבה מאוד ספרים. במקרים בודדים, כאשר פיתוח התוצאות היה מפרך במיוחד ניתנו רק תוצאות סופיות.

תודה מיוחדת לאשתי, **ברוריה**, על התמיכה והעידוד הרבים שקבלתי בזמן הכתיבה ועל קריאה של כל החומר ותיקון שגיאות לשוניות רבות.

למרות כל הנסיונות להימנע מטעויות, אין ספק שהספר מכיל אותם. אשמח מאוד לקבל הערות והארות גם ממרצים ובמיוחד מסטודנטים. עדכונים/תיקונים/שיפורים יופיעו באתר שלי תחת "ספרים שלי".

אני מאחל לכל הקוראים לימוד מהנה !!

יאן לרון

אוגוסט 2010

	פרק 1: מקורות זרם Current Sources	.1
1	מבוא	1.1
3	ראי זרם Current Mirror	1.2
10	מקור זרם עם 3 טרנזיסטורים	1.3
12	מקור זרם Wilson	1.4
15	מקור זרם Widlar	1.5
23	ראי זרם לזרמים ממושקלים	1.6
29	מקורות זרם עם טרנזיסטורי MOSFET	1.7
38	מקורות זרם עם טרנזיסטורי JFET	1.8
41	תרגילים	
	פרק 2: מגברי הפרש Differential Amplifiers	.2
49	מבוא	2.1
52	מגבר הפרש בסיסי	2.2
76	איזון מגברי הפרש	2.3
94	אופיין מעבר של מגבר הפרש ביפולרי	2.4
97	מגבר הפרש עם דרגת דרלינגטון	2.5
110	מגבר הפרש עם טרנזיסטור JFET	2.6
120	אופיין מעבר של מגבר הפרש עם טרנזיסטור JFET	2.7
123	מגברי הפרש עם טרנזיסטור MOSFET	2.8
127	תרגילים	
	מייצבי מתח דיסקרטיים Voltage Regulators	.3
159	מבוא	3.1
165	גורמי ייצוב של מייצב מתח	3.2
167	מייצבי מתח מקביליים	3.3
176	מייצבי מתח טוריים	3.4
188	מייצבי מתח טרנזיסטורים עם משוב	3.5
199	מייצב מתח טורי עם מגבר שרת	3.6

208	מעגלים להגבלת זרם המוצא	3.7
220	Overvoltage Protection הגנת מתח יתר	3.8
223	תרגילים	

4. מייצבי מתח עם רכיבים מוכללים

Integrated Circuits Voltage Regulators

251	מבוא	4.1
253	בניית מייצב עם מתח מוצא מבוקר בעזרת מייצב למתח קבוע	4.2
255	תכנון עם מייצבי מתח קבועים	4.3
262	הסבר דפי יצרן של מייצב מתח 78XX	4.4
268	הכרת מייצב מתח 723	4.5
276	דפי יצרן של מייצב 723	4.6
284	מעגלים עם מייצב מתח 723	4.7
313	תרגילים	

5. מייצבי מתח ממותגים Switched Voltage Regulators

325	מבוא	5.1
330	מייצב מתח מסוג step down (buck)	5.2
338	מייצב מתח מסוג step up (boost)	5.3
343	מייצב מתח מסוג buck – boost	5.4
348	תיאור מייצב מתח ממותג מונוליטי LT1070/LT1071	5.5
354	תרגילים	

פתרון תרגילים

357	פרק 1: מקורות זרם
365	פרק 2: מגברי הפרש
487	פרק 3: מייצבי מתח דיסקרטיים
535	פרק 4: מייצבי מתח עם רכיבים מוכללים

נספחים

- 549 נספח א: מעגל תמורה של טרנזיסטור ביפולרי – h פרמטרים
- 551 נספח ב: שיקוף התנגדויות בטרנזיסטור ביפולרי
- 553 נספח ג: מעגל תמורה של טרנזיסטורי FET
- 554 נספח ד: שיקוף התנגדות בטרנזיסטור FET

ביבליוגרפיה

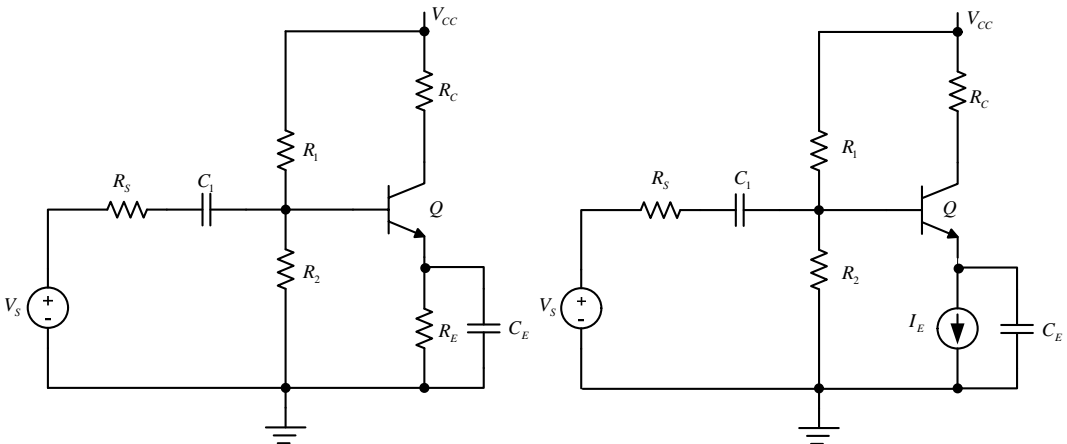
פרק 1: מקורות זרם – Current Sources

1.1 מבוא

מקורות זרם נפוצים מאוד במעגלים אלקטרוניים דיסקרטיים ובמעגלים משולבים כגון מגברי שרת, ממירי D/A, ממירי A/D ועוד. ניתן לציין שני שימושים עיקריים של מקורות זרם:

1. יצירת ממתח למעגלי הגברה.

במעגלי הגברה שונים שהכרת: מגבר אמיתר משותף Common Emitter, מגבר בסיס משותף Common Base ומגבר עוקב Common Collector תנאי להגברה ליניארית הוא שהטרנזיסטורים חייבים להימצא באזור הפעיל. ראינו ששינוי של β (h_{FE}) הנובע מפיזור פרמטרים של הטרנזיסטורים ושינויי טמפרטורה משפיעים על נקודת העבודה וכאשר מעגל ממתח לא מתוכנן כראוי יתכן ששינוי פרמטרים ו/או שינויי טמפרטורה יגרמו לטרנזיסטור להיכנס למצב רוויה או קטעון. כדי למנוע מצב שכזה, ניתן לאלץ את נקודת עבודה של טרנזיסטור ההגברה ע"י הוספת מקור זרם שאינו רגיש לשינויי β או טמפרטורה. באיור 1.1 מתואר מגבר CE (אמיתר משותף) עם ממתח הממומש ע"י נגדים בלבד וממתח המשלב מקור זרם:



איור 1.1: מגבר CE עם ממתח נגדים וממתח המשלב מקור זרם

מקור זרם I_E הוא מקור זרם קבוע ולכן זרם הקולקטור I_C של הטרנזיסטור Q שווה ל:

$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I_E$$

אם נניח $\beta \gg 1$ ניתן להניח שזרם הקולקטור I_C יהיה קבוע.

שימוש במקורות זרם ליצירת נקודת עבודה יציבה נפוץ מאוד בתכנון מעגלים ליניאריים ומבטיח סטיות קטנות מאוד בנקודת עבודה של המעגלים כנגד שינויי פרמטרים של הרכיבים האקטיביים, שינויי מתח אספקה ושינויי טמפרטורה.

2. בניית עומס לדרגת ההגברה

בניתוח לאות קטן של המגברים השונים ראינו שהגבר המתח מוכתב בין היתר ע"י ערך נגד העומס R_L . הביטוי להגברת מתח במגבר CE המתואר באיור 1.1 שווה ל:

$$A_{vi} = -h_{fe} \cdot \frac{R_L}{h_{ie}}$$

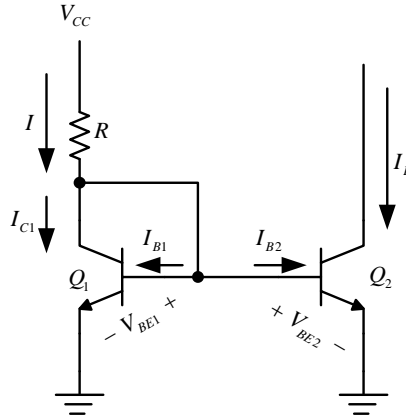
ככל שערך נגד העומס R_L גדול יותר, הגבר מתח של המגבר גדול יותר. כדי להבטיח הגבר גדול יש לשלב נגדי עומס בעלי ערך גדול מאוד. שילוב נגד בעל התנגדות גדולה יוצר שתי בעיות:

- א. יש להגדיל את מתח האספקה כדי למנוע מצב רוויה של הטרנזיסטור.
- ב. מימוש נגד גדול במעגל משולב בעייתי מאוד מכיוון ונדרש שטח מל"מ (מוליך למחצה) גדול מאוד למימוש הנגד. באופן מעשי לא בונים נגדים בעלי ערך גדול ממספר עשרות $k\Omega$ במעגל משולב. החלפת נגד העומס R_L במקור זרם בעל התנגדות גבוהה מאוד תגדיל את הגבר המתח באופן משמעותי מבלי לשנות את מתח האספקה.

בפרק זה נכיר וננתח מספר מקורות זרם הנפוצים במעגלים אלקטרוניים.

1.2 ראי זרם – Current Mirror

מקור זרם הפשוט ביותר הוא ראי זרם Current Mirror המתואר באיור 1.2:



איור 1.2: ראי זרם פשוט

טרנזיסטורים Q_1 ו- Q_2 במעגל ראי זרם הם טרנזיסטורים זהים. מימוש ראי זרם בעזרת 2 טרנזיסטורים רגילים מאותו סוג אינו בא בחשבון: תכונות המעגל מתבססות על תאום מושלם של תכונות הטרנזיסטורים. ניתן לממש זוג טרנזיסטורים הנקראים Super Matched בעלי תכונות זהות לחלוטין. דוגמא לרכיב מסוג זה הוא רכיב LM394 של חברת National Semiconductors. קיימים בשוק רכיבים רבים ממשפחה זו.

כפי שניתן להבחין מאיור 1.2, הטרנזיסטורים Q_1 ו- Q_2 הם בעלי מתח V_{BE} זהה (האמיתרים מקוצרים לאדמה והבסיסים מקוצרים) ולכן:

$$V_{BE1} = V_{BE2}$$

שוויון במתחי בסיס – אמיתר מבטיח זרם קולקטור זהה. הקשר בין זרם הקולקטור I_C ומתח V_{BE} נתון ע"י:

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

כאשר V_T הוא מתח תרמי המוגדר כ:

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q}$$

בהנחת טרנזיסטורים זהים (זרם זליגה I_S זהה), אילוץ שוויון $V_{BE1} = V_{BE2}$ מאלץ גם שוויון בין זרמי הקולקטור: $I_{C1} = I_{C2} = I_C = I_L$.

הטרנזיסטור Q_1 מחובר כדיודה: הדק הקולקטור והדק הבסיס מקוצרים. הטרנזיסטור נמצא עדיין במצב פעיל:

$$V_{CE1} = V_{BE1} > V_{CEsat}$$

ולכן מתקיים הקשר:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

הזרם I הזורם דרך נגד R מתפצל ל-3 זרמים:

$$I = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = \beta \cdot I_B + I_B + I_B = (2 + \beta) \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{I}{2 + \beta}$$

זרם הזורם דרך העומס, I_L , שווה ל:

$$I_L = I_{C2} = \beta \cdot I_B = \beta \cdot \frac{I}{2 + \beta} = \frac{\beta}{2 + \beta} \cdot I$$

נבטא את זרם I ע"י מתח אספקה V_{CC} וערך הנגד R . נוכל לרשום את משוואת החוג ממתח האספקה עד לאדמה כ:

$$V_{CC} - R \cdot I - V_{BE} = 0$$

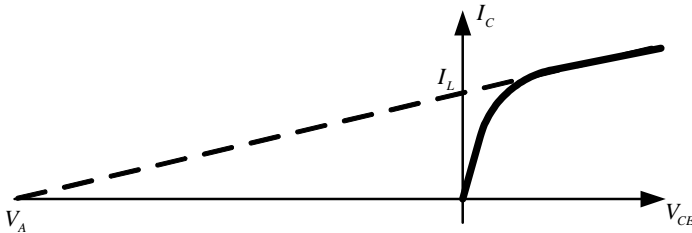
$$I = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

ולכן:

$$I_L = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

התנגדות מוצא R_o :

אחת התכונות החשובות של מקור זרם היא הערך הגבוה של התנגדות המקור. באופן תיאורתי - התנגדות של מקור זרם היא אינסופית. אם נתבונן באופיין המוצא של טרנזיסטור ביפולרי המתואר באיור 1.3:

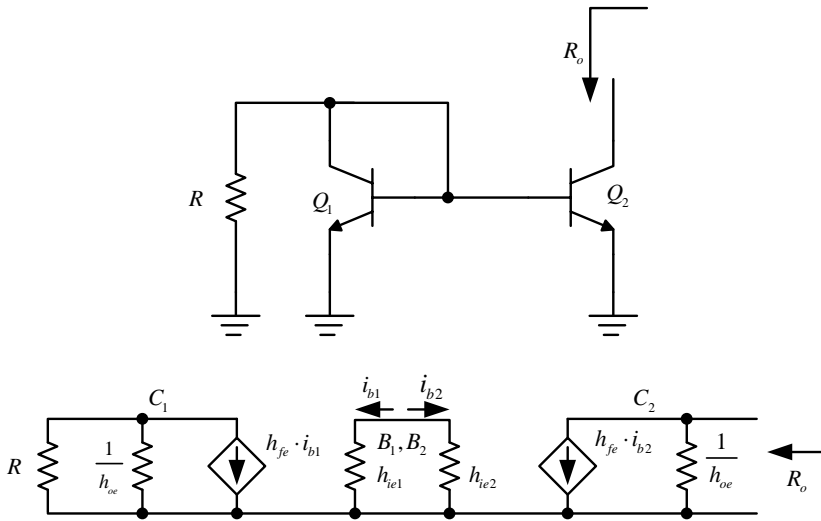


איור 1.3: אופיין מוצא של טרנזיסטור ביפולרי

נבחין שבאזור פעיל, האופיין עולה (שיפוע קטן מאוד). אם נעביר קו המהווה משיק לאופיין, הקו יחתוך את ציר V_{CE} במתח שלילי V_A הנקרא "מתח מוקדם" (Early Voltage). ניתן להגדיר את התנגדות המוצא כ:

$$R_o = \frac{|V_A|}{I_L}$$

ניתוח למציאת התנגדות מוצא R_o ניתן לבצע ע"י סכמת תמורה h פרמטרים כמתואר באיור 1.4:



איור 1.4: מעגל מוצא ומעגל תמורה h פרמטרים

מתוך התבוננות במעגל, בחלק האמצעי לא יכול להיווצר זרם (אין מקורות) ולכן $i_{b1} = i_{b2} = 0$.

לפיכך מקור זרם $h_{fe} \cdot i_{b2}$ מתאפס והתנגדות המוצא שווה ל:

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}}$$

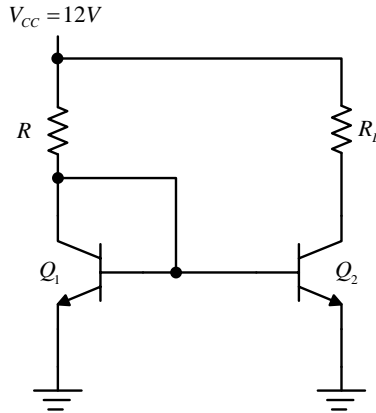
השפעת ערך הנגד R_L על מקור הזרם

בניתוח המעגל הנחנו שהטרנזיסטורים נמצאים במצב פעיל. בפועל הנחה זו אינה נכונה עבור כל ערך של נגד העומס. הגדלת נגד העומס R_L תגרוור מפל מתח גבוה יותר על הדקיו ובסופו של דבר, מתח זה יהיה קרוב למתח האספקה של המעגל. כתוצאה מכך טרנזיסטור Q_2 יכנס לריויה. זרם מרבי במוצא שווה ל:

$$I_{C(\max)} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_L}$$

דוגמא:

איור 1.5 מתאר ראי זרם:



איור 1.5: ראי זרם

א. חשב את ערכו של נגד R לקבלת $I = 1\text{mA}$.

ב. חשב את ערכו של זרם I_L .

ג. חשב התנגדות מוצא של המקור זרם.

ד. חשב את שינוי $\frac{\Delta I_L}{I}$ כאשר β משתנה ב- $\pm 20\%$ מערכו הנומינלי.

ה. מה הערך המכסימלי של נגד העומס R_L עבור המעגל מתפקד כראוי?

ו. שרטט אופייין $I_L = f(R_L)$.

תשובהא. חישוב זרם I :

$$I = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}; \quad R = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I} = \frac{12 - 0.65}{1} = 11.35 \text{ K}\Omega$$

ב. חישוב זרם I_L :

$$I_L = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I = \frac{100}{102} \cdot 1 = 0.980 \text{ mA}$$

ג. חישוב התנגדות המוצא:

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}} = \frac{1}{10\mu} = 100 \text{ K}\Omega$$

ד.

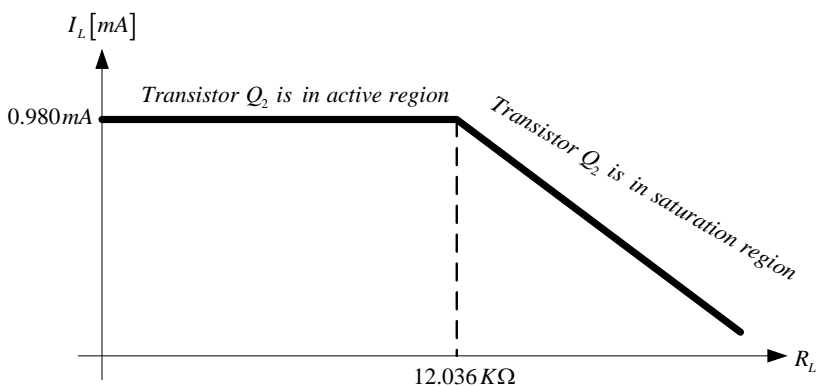
$$\frac{I_L}{I} = \frac{\beta}{\beta + 2}$$

$$\frac{\Delta I_L}{I} = \frac{\beta_{\max}}{2 + \beta_{\max}} - \frac{\beta_{\min}}{2 + \beta_{\min}} = \frac{120}{2 + 120} - \frac{80}{2 + 80} = 7.996 \cdot 10^{-3} = 0.799\%$$

ה. ערך מכסימלי של נגד העומס R_L :

$$R_{L(\max)} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_L} = \frac{12 - 0.2}{0.98} = 12.036 \text{ K}\Omega$$

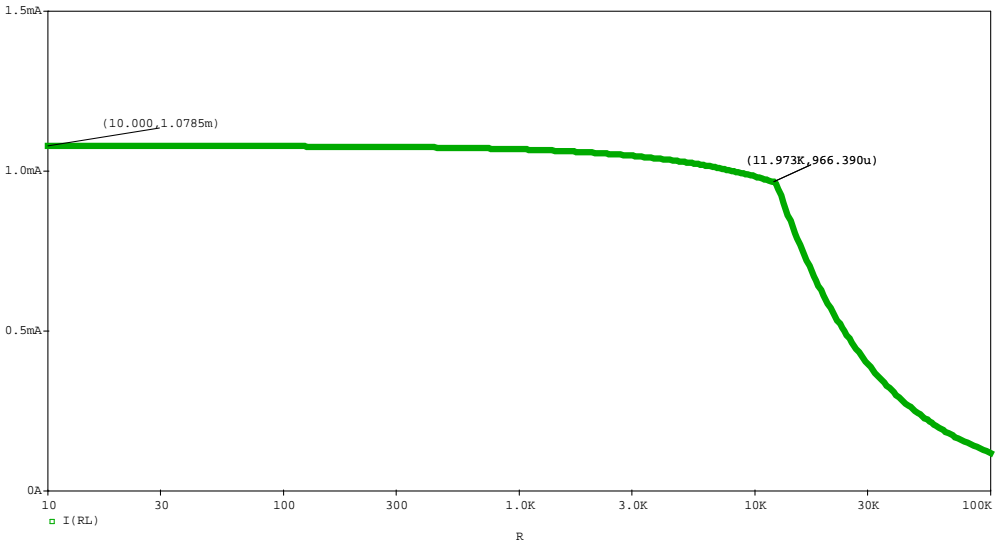
ו. אופיין המוצא מתואר באיור 1.6:



איור 1.6: אופיין $I_L = f(R_L)$

באיור 1.7 מתואר אופיין של המעגל המתקבל בניתוח המעגל בעזרת תוכנת PSpice.

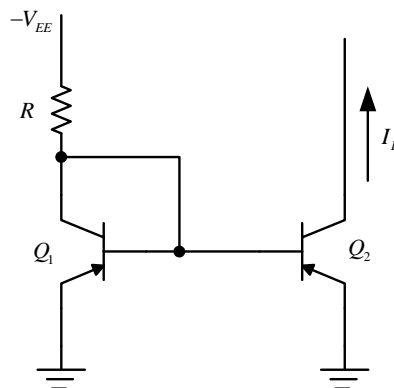
התוכנה משתמשת במודלים מדויקים של רכיבים אקטיביים.



איור 1.7: אופיין $I_L=f(R_L)$ – תוצאות סימולציה בתוכנת PSpice

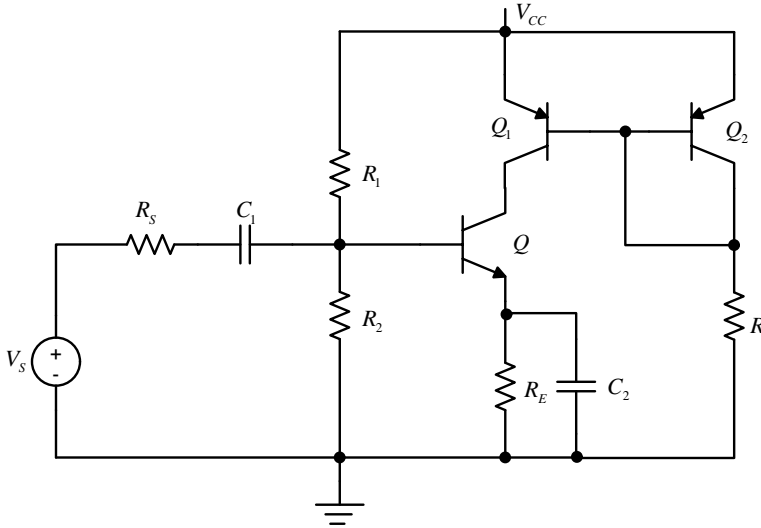
התוצאות תואמות בצורה טובה את החישובים: הזרם הזורם דרך נגד R_L שווה ל- 1.0785 mA וערך הנגד המכסימלי שווה ל- $11.973 \text{ K}\Omega$.

מקור זרם המתואר באיור 1.2 הוא מקור זרם סופג זרם current sink. בעזרת טרנזיסטורים מסוג pnp ניתן לממש מקור זרם המזרים זרם לעומס current source. באיור 1.8 מתואר מקור זרם (ראי זרם) ממומש עם טרנזיסטורי pnp:



איור 1.8: ראי זרם ממומש עם טרנזיסטורים pnp

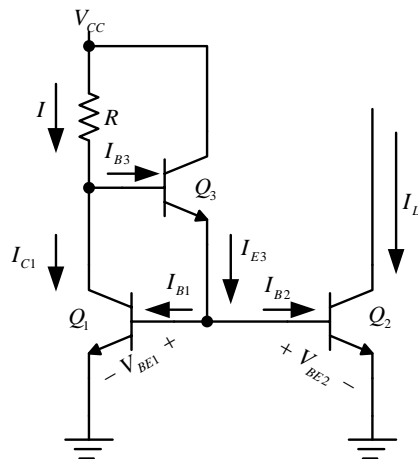
באיור 1.9 מתואר מגבר CE בו נגד עומס $R_L = R_C$ מוחלף במקור זרם:



איור 1.9: מגבר CE עם מקור זרם כעומס

1.3 מקור זרם עם 3 טרנזיסטורים

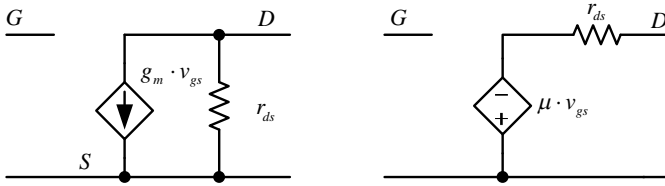
מקור זרם עם 3 טרנזיסטורים מתואר באיור 1.10:



איור 1.10: מקור זרם עם 3 טרנזיסטורים

נספח ג'מעגל תמורה של טרנזיסטור FET

מעגל תמורה של טרנזיסטור FET מתואר באיור C.1:



איור C.1: מעגלי תמורה של טרנזיסטורי FET

כאשר מוליכות מעבר g_m נתונה ע"י:

$$g_m = \frac{2 \cdot I_{DSS}}{|V_p|} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right) \quad JFET, \text{ Depletion-MOSFET}$$

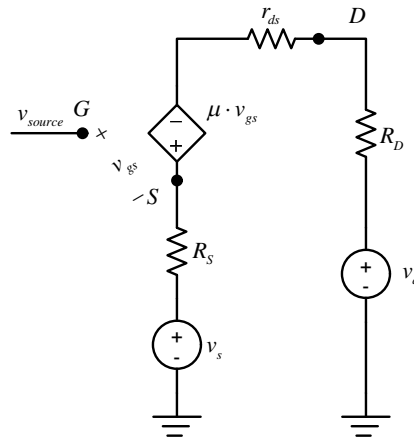
$$g_m = 2 \cdot k \cdot (V_{GS} - V_T) \quad \text{Enhancement-MOSFET}$$

-1

$$\mu = g_m \cdot r_{ds}$$

נספח ד'FET שיקוף התנגדויות בטרנזיסטור

באיור D.1 מתואר מעגל כללי:



איור D.1: מעגל כללי לטרנזיסטור FET

במעגל זה נוכל לרשום:

$$v_d - R_D \cdot i_d - r_{ds} \cdot i_d + \mu \cdot v_{gs} - i_d \cdot R_s - v_s = 0$$

$$v_{gs} = v_{source} - v_s = v_{source} - (i_d \cdot R_s + v_s)$$

$$v_d - R_D \cdot i_d - r_{ds} \cdot i_d + \mu \cdot [v_{source} - (i_d \cdot R_s + v_s)] - i_d \cdot R_s - v_s = 0$$

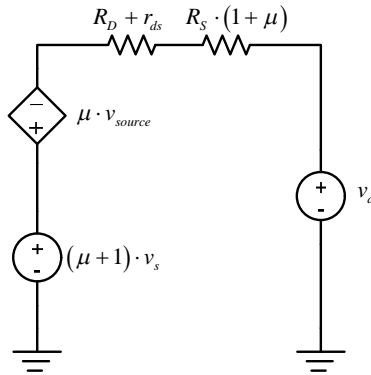
$$v_d - R_D \cdot i_d - r_{ds} \cdot i_d + \mu \cdot v_{source} - \mu \cdot R_s \cdot i_d - \mu \cdot v_s - i_d \cdot R_s - v_s = 0$$

$$v_d - R_D \cdot i_d - r_{ds} \cdot i_d + \mu \cdot v_{source} - (1 + \mu) \cdot R_s \cdot i_d - (1 + \mu) \cdot v_s = 0$$

נחליף את מתח v_d :

$$v_d = (R_D + r_{ds}) \cdot i_d + R_s \cdot (1 + \mu) \cdot i_d - \mu \cdot v_{source} + (1 + \mu) \cdot v_s$$

מעגל שניתן לבנות מתוך המשוואה שהתקבלה מתואר באיור D.2:



איור D.2: שיקוף המעגל ל- drain

מתוך המעגל רואים שהתנגדות הנמצאת ב- source משתקפת ל- drain כהתנגדות גבוהה פי $(1 + \mu)$.

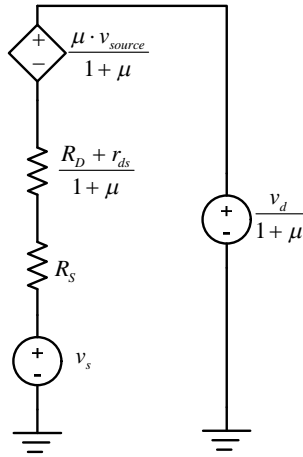
מתוך המשוואה שהתקבלה:

$$v_d - R_D \cdot i_d - r_{ds} \cdot i_d + \mu \cdot v_{source} - (1 + \mu) \cdot R_S - (1 + \mu) \cdot v_s = 0$$

נחלץ את מתח v_s :

$$v_s = \frac{v_d}{1 + \mu} - \frac{R_D + r_{ds}}{1 + \mu} + \frac{\mu}{1 + \mu} \cdot v_{source} + R_S \cdot i_d$$

מעגל שניתן לבנות מתוך המשוואה שהתקבלה מתואר באיור D.3:



איור D.3: שיקוף המעגל ל- source

כפי שניתן לראות, התנגדויות R_D ו- r_{ds} שוקפו מ- Drain ל- Source כהתנגדויות קטנות יותר פי $(1 + \mu)$.

1. Electronic Devices: Discrete and Integrated – Stephen.R. Fleeman –
Prentice Hall
2. Electronic Circuits Discrete and Integrated –
Donald.L. Schilling & Charles Belove
3. Electronic Circuit Analysis and Design – William Hayt & Gerold Neudeck
Houghton Mifflin Company
4. Microelectronic Circuits: Analysis and Design – Muhammad H. Rashid –
PUS Publishing Company
5. Microelectronic Circuits – Adel Sedra & Kenneth Smith – Saunders
College Publishing
6. Design with Operational Amlifiers and Analog Integrated Circuits –
Sergio Franco – Prentice Hall
7. Switching Power Supply Design – Abraham F. Presman – Mc Graw Hill
8. Electronics – Allan R. Hambley – Prentice Hall
9. Application of Analog Integrated Circuits – Sidney Soclof - Prentice Hall
10. Electronic Devices and Circuit Theory – Robert Boylestad & Louis
Nashelsky- Prentice Hall
11. Electronic Circuit Analysis and Design – Donald A. Neamen –
Mc Graw Hill