

יאן לרון

אלקטרוניקה תקבילית

נושאים מתקדמים

חלק ב

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)

	פרק 6: משוב שלילי	.6
1	מבוא	6.1
2	משוואת משוב האידיאלי	6.2
4	רגישות המגבר	6.3
5	השפעת משוב שלילי על העיוותים	6.4
7	השפעת משוב שלילי על רוחב סרט של המגבר	6.5
10	סיווג מגברים	6.6
15	חיבורים של משוב	6.7
32	שילבים בניתוח מעגלי משוב	6.8
35	דוגמאות	6.9
128	תרגילים	
	פרק 7: מתנדים סינוסוידלים לתדר גבוה	.7
157	מבוא	7.1
157	מתנד סינוסוידלי	7.2
163	מתנדים הרמוניים לתדר גבוה	7.3
163	מעגלי תהודה מקביליים וטוריים	7.4
168	מתנדי LC	7.5
172	מתנד קולפיץ	7.6
185	מתנד הרטליי	7.7
201	מתנד Clapp	7.8
206	מתנדים סינוסוידלים עם גביש	7.9
212	תרגילים	
	פרק 8: ניתוח מגברים בתדר נמוך	.8
219	מבוא	8.1
222	תדר מחצית ההספק	8.2
223	דיאגרמת בודה Bode	8.3
224	פונקציית תמסורת	8.4
244	ניתוח מגבר אמיתר משותף בתדר נמוך	8.5

254	תגובת תדר של מגבר בסיס משותף בתדר נמוך	8.6
259	תגובת תדר של מגבר קולקטור משותף בתדר נמוך	8.7
264	תגובת מגבר מקור משותף Common Source בתדר נמוך	8.8
270	תגובת מגבר שער משותף Common Gate בתדר נמוך	8.9
275	תגובת מגבר שפך משותף Common Drain בתדר נמוך	8.10
279	תרגילים	

פרק 9: ניתוח מגברים בתדר גבוה **9**

287	מבוא	9.1
290	מעגלי תמורה לתדר גבוה	9.2
291	תדר קטעון Cut off frequency	9.3
293	ניתוח מגבר אמיתר משותף בתדר גבוה	9.4
305	תגובת תדר של מגבר בסיס משותף בתדר נמוך	9.5
311	תגובת תדר של מגבר קולקטור משותף בתדר נמוך	9.6
315	ניתוח מגברים המבוססים טרנזיסטורי FET בתדר גבוה	9.7
316	תגובת מגבר מקור משותף Common Source בתדר גבוה	9.8
325	תגובת מגבר שער משותף Common Gate בתדר גבוה	9.9
330	תגובת מגבר שפך משותף Common Drain בתדר גבוה	9.10
335	תרגילים	

פרק 10: מעגלי מתח ייחוס Voltage References **10**

341	מבוא	10.1
342	דיודת זנר	10.2
345	מעגלי מתח ייחוס	10.3
352	דוגמאות לרכיבי מתח ייחוס	10.4
359	תרגילים	

פרק 11: רכיבים למדידת טמפרטורה **11**

363	מבוא	11.1
363	אופן השפעת טמפרטורה על מוליכים למחצה	11.2
367	מעגל המפיק מתח מוצא יחסי לטמפרטורה מוחלטת	11.3

370	גשש טמפרטורה בעל 2 הדקים עם מתח יחסי לטמפרטורה המוחלטת	11.4
373	רכיב LM135	11.5
377	מתמר טמפרטורה בעל 2 הדקים המפיק זרם יחסי לטמפרטורה מוחלטת	11.6
381	רכיב AD590 של חברת Analog Devices	11.7
383	תרגילים	

12. פרק 12: מגברי הספק

391	מבוא	12.1
392	מיון מגברי הספק	12.2
397	ניתוח מגבר class A	12.3
404	ניתוח מגבר class A עם צימוד שנאי	12.4
415	מגבר הספק class B	12.5
428	מגבר הספק class AB	12.6
450	נתונים של טרנזיסטור הספק ביפולרי	12.7
456	טרנזיסטור הספק מסוג DMOS ו- VMOS	12.8
463	יציבות ממתח – מכפל V_{BE}	12.9
469	תרגילים	

13. פרק 13: פיזור הספק ברכיבים אלקטרוניים

485	מבוא	13.1
486	מודל לפיזור חום ברכיב אלקטרוני	13.2
500	תרגילים	
503	פרק 6: משוב שלילי – פתרון תרגילים	
587	פרק 7: מתנדים סינכרויזציה לתדר גבוה	
595	פרק 8: ניתוח מגברים בתדר נמוך	
611	פרק 9: ניתוח מגברים בתדר גבוה	
619	פרק 10: מעגלי מתח ייחוס Voltage References	
623	פרק 11: רכיבים למדידת טמפרטורה	
633	פרק 12: מגברי הספק	
655	פרק 13: פיזור הספק ברכיבים אלקטרוניים	

נספחים

- 657 נספח א: מעגל תמורה של טרנזיסטור ביפולרי – h פרמטרים
- 659 נספח ב: שיקוף התנגדויות בטרנזיסטור ביפולרי
- 661 נספח ג: מעגל תמורה של טרנזיסטורי FET
- 662 נספח ד: שיקוף התנגדות בטרנזיסטור FET
- 665 **נספח ה'**
- 667 **ביבליוגרפיה**

פרק 6: משוב שלילי

6.1 מבוא

שילוב של משוב שלילי במעגלים אלקטרוניים הוא נפוץ מאוד בגלל מספר יתרונות בולטים. היתרון החשוב ביותר של משוב שלילי הוא ייצוב הגבר של מגבר כנגד שינויים בפרמטרים של הרכיבים האלקטרוניים הנגרמים עקב:

- פיזור פרמטרים של הרכיבים האלקטרוניים.

רוב הרכיבים האלקטרוניים סובלים מפיזור פרמטרים. דוגמאות בולטות הם

טרנזיסטור ביפולרי בו גורם ההגברה ב-DC β (h_{FE}) וגורם הגברה בזרם חילופין h_{fe}

יכולים להשתנות במאות אחוזים.

- שינוי מתחי אספקה

שינוי מתח אספקה או אי יציבות של מתחי אספקה משפיע על הפרמטרים של הרכיבים האקטיביים.

- שינוי טמפרטורה

תכונות של רכיבים אלקטרוניים משתנים עם שינויי טמפרטורה.

- הזדקנות רכיבים אלקטרוניים.

הגיל "עושה את שלו" והביצועיים של רכיבים אלקטרוניים יורדים עם הזמן. השוני יכול להיות בתכונות רעש של הרכיב ובתכונות אחרות.

יתרון נוסף של שימוש במשוב שלילי הוא הקטנת העיוותים. תכונה זו מאפשרת בניית מגבר באיכות טובה וזו הסיבה שבכל מגבר שמע, יש מערכות משוב רבות.

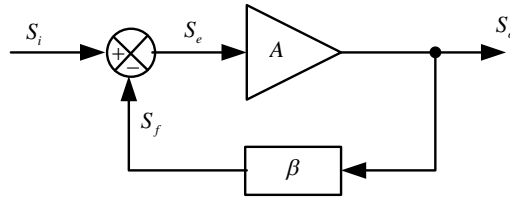
בנוסף, שימוש במשוב שלילי מגדיל את רוחב הסרט של המגבר. מסיבה זו ניתן לראות משובים במגברים המשולבים במערכות תקשורת שונות.

למשוב שלילי יש גם מספר חסרונות:

- ירידה בהגבר הכללי של המעגל. ככל שהמשוב "חזק" יותר, כלומר ככל שהמשוב משפר את התכונות של המגבר כך הוא מקטין את ההגבר הכללי של המעגל.
- הוספת משוב יכולה לגרום לחוסר יציבות ותנודות במעגל.

6.2 משוואת המשוב האידיאלי

באיור 6.1 מתואר מעגל כללי עם משוב:



איור 6.1: מעגל כללי עם משוב

באיור 6.1 אות S_i הוא אות מבוא, אות S_o הוא אות מוצא ואות S_f הוא אות משוב. במעגלים חשמליים/אלקטרוניים האותות יכולים להיות מתח או זרם באופן בלתי תלוי (כלומר אות מוצא S_o יכול להיות מתח ואות משוב S_f יכול להיות זרם או להיפך). לרשת המשוב (בדרך כלל פאסיבית – מורכבת מנגדים וקבלים) יש פונקציית תמסורת β והיא דוגמת את אות המוצא S_o ומחזירה לכניסה אות משוב S_f . בכניסה אות משוב S_f מחוסר מאות המבוא S_i לחישוב אות השגיאה S_e .

מתוך איור 6.1 נוכל לרשום את 3 המשוואות הבאות:

$$S_e = S_i - S_f$$

$$S_f = \beta \cdot S_o$$

$$S_o = A \cdot S_e$$

נחשב את התמסורת של המערכת בחוג סגור $A_f = \frac{S_o}{S_i}$:

$$S_o = A \cdot S_e = A \cdot (S_i - S_f) = A \cdot (S_i - \beta \cdot S_o) = A \cdot S_i - A \cdot \beta \cdot S_o$$

$$S_o(1 + A \cdot \beta) = A \cdot S_i$$

ולכן התמסורת בחוג סגור תהיה:

$$A_f = \frac{S_o}{S_i} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta}$$

להגבר A_f קוראים "הגבר חוג סגור"

הביטוי $A \cdot \beta$ נקרא "הגבר של החוג הפתוח". כאשר מתקיים התנאי בו $A \cdot \beta \gg 1$ נוכל לרשום:

$$A_f = \frac{S_o}{S_i} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} \xrightarrow{A \cdot \beta \gg 1} \frac{1}{\beta}$$

כלומר כאשר הגבר החוג הפתוח גדול מאוד, הגבר החוג הסגור תלוי אך ורק בתמסורת של רשת המשוב.

מכון ורשת המשוב מורכבת בדרך כלל מרכיבים פאסיביים יציבים, ההגבר בחוג סגור יהיה קבוע ויציב.

אם נרשום את התמסורת בין אות השגיאה S_e ואות המבוא S_i נקבל:

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{S_e}{S_o} \cdot \frac{S_o}{S_i} = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{1 + \beta \cdot A} \xrightarrow{\beta \cdot A \gg 1} 0$$

כלומר מתח השגיאה קרוב מאוד לאפס ולכן אות המשוב S_f שווה לאות המבוא S_i .

6.3 רגישות המגבר

ברוב המקרים המעשיים, הגבר קדמי A אינו ידוע באופן מדויק. ההגבר תלוי בטמפרטורה, בתנאי ההפעלה ובפרמטרים של הרכיבים האקטיביים. כפי שנאמר, תפקיד המשוב השלילי הוא להקטין את השינויים בהגבר הכללי של המגבר הנגרמים כתוצאה מפיזור פרמטרים וסיבות נוספות.

נמצא את רגישות המגבר לשינויים בהגבר A :

$$\begin{aligned} S_{A_f}^A &= \frac{A}{A_f} \cdot \frac{dA_f}{dA} = \frac{A}{A} \cdot \frac{d}{dA} \left(\frac{A}{1 + \beta \cdot A} \right) = \\ &= (1 + \beta \cdot A) \cdot \frac{1 \cdot (1 + \beta \cdot A) - A \cdot \beta}{(1 + \beta \cdot A)^2} = \frac{1}{1 + \beta \cdot A} \end{aligned}$$

כלומר כאשר $(1 + \beta \cdot A)$ גדול מאוד, הרגישות שווה לאפס. במילים אחרות, ההגבר בחוג סגור לא יהיה רגיש לשינויים בהגבר בחוג פתוח.

נמצא את הרגישות של המגבר לשינויים ברשת המשוב β :

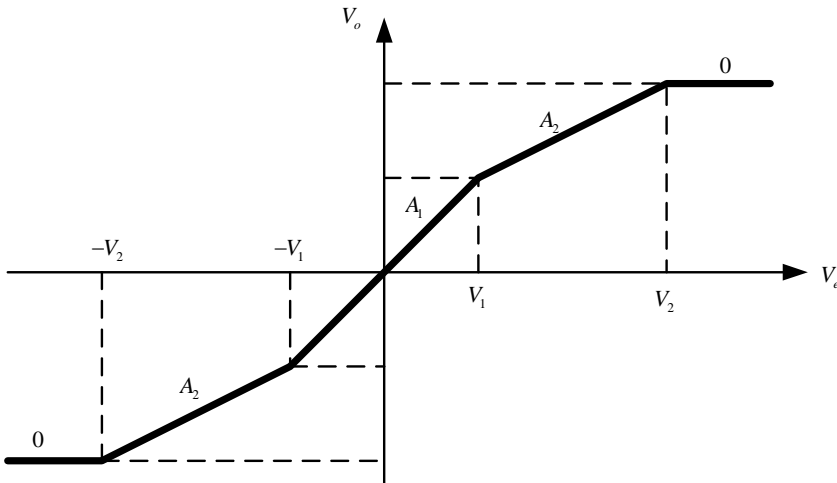
$$\begin{aligned} S_{A_f}^\beta &= \frac{\beta}{A_f} \cdot \frac{dA_f}{d\beta} = \frac{\beta}{A} \cdot \frac{d}{d\beta} \left(\frac{A}{1 + \beta \cdot A} \right) = \\ &= \frac{\beta \cdot (1 + \beta \cdot A)}{A} \cdot \frac{0 - A \cdot A}{(1 + \beta \cdot A)^2} = -\frac{\beta \cdot A}{1 + \beta \cdot A} \xrightarrow{\beta \cdot A \gg 1} -1 \end{aligned}$$

רגישות -1 רומזת על השפעה ישירה של שינוי במשוב על המוצא של המעגל. סימן שלילי מרמז על מגמת שינוי הפוכה: הגדלת β גורמת להקטנת ההגבר A_f ולהיפך.

6.4 השפעת משוב שלילי על העיוותים

ראינו ששינויים בהגבר הקדמי A אינם משפיעים (כמעט) על ההגבר בחוג סגור A_f . תכונה זו מרמזת על יכולת של רשת המשוב להקטין את העיוותים. העיוותים נגרמים עקב שינוי בשיפוע של המגבר הקדמי A . מכוון והמשוב מקטין את השפעת ההגבר הקדמי A על הגבר בחוג סגור A_f , הרי ששינויים בשיפוע של ההגבר הקדמי לא ישפיעו על ההגבר בחוג סגור.

נניח שהמגבר הבסיסי הוא בעל אופיין לא ליניארי כמתואר באיור 6.2:



איור 6.2: אופיין לא ליניארי של מגבר בסיסי

ההגבר באופיין המגבר מקבל 3 ערכים שונים: כאשר מתח המבוא קטן יחסית $-V_1 < V_i < +V_1$, ההגבר שווה ל- A_1 , כאשר מתח המבוא בגבולות $V_1 < V_i < V_2$ (או $-V_2 < V_i < +V_2$) ההגבר קטן לערך A_2 , וכאשר המתח מגיע לערך גדול ממתח V_2 (או קטן מ- $-V_2$) ההגבר שווה לאפס.

בחוג סגור ההגבר הכללי שווה ל:

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta \cdot A}$$

הצבת הגברים A_1 ו- A_2 :

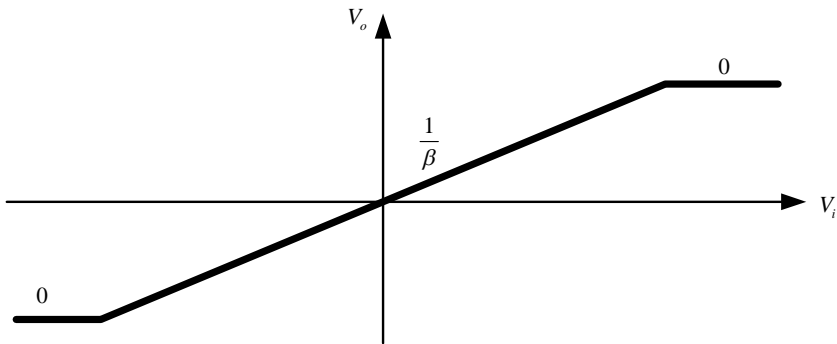
$$A_f \Big|_{A=A_1} = \frac{A_1}{1 + \beta \cdot A_1} \stackrel{\beta \cdot A_1 \gg 1}{=} \frac{1}{\beta}$$

$$A_f \Big|_{A=A_2} = \frac{A_2}{1 + \beta \cdot A_2} \stackrel{\beta \cdot A_2 \gg 1}{=} \frac{1}{\beta}$$

כמובן גם למשוב יש יכולת מוגבלת: בתחום בו ההגבר בחוג פתוח שווה לאפס התמסורת בחוג סגור תהיה:

$$A_f \Big|_{A=0} = \frac{0}{1 + \beta \cdot 0} = 0$$

באיור 6.3 מתואר אופיין הגבר של החוג הסגור:



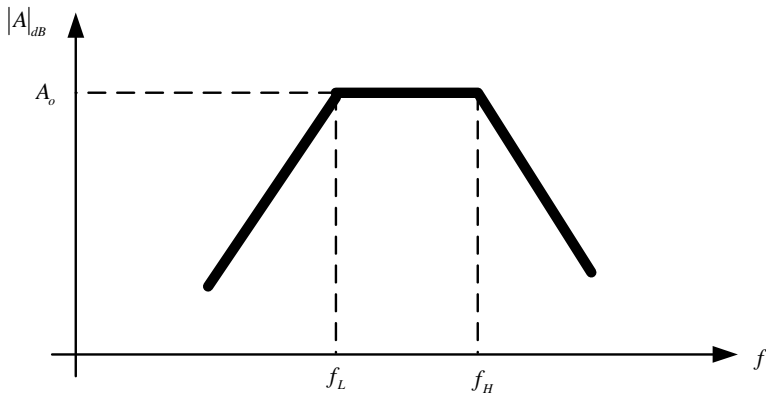
איור 6.3: אופיין הגבר של החוג הסגור

מכוון וההגבר בחוג סגור נמוך יותר, המגבר יכנס לרוויה במתחי מבוא גדולים.

6.5 השפעת משוב שלילי על רוחב סרט של המגבר

נניח שלמגבר בסיסי יש קוטב בודד בתדר נמוך ובתדר גבוה. למגבר כזה יש הגבר קבוע A בתדר ביניים.

באיור 6.4 מתוארת תגובת תדר של המגבר:



איור 6.4: תגובת תדר של מגבר

ניתוח בתדר גבוה:

ההגבר של המגבר ללא משוב מתואר ע"י:

$$A_H(f) = \frac{A}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

כאשר:

$A_H(f)$ - הגבר בחוג פתוח של המגבר הבסיסי.

A - הגבר בתדר ביניים

f_H - תדר מחצית הספק (תדר $3dB$)

הגבר בחוג סגור יסומן כ- $A_{Hf}(f)$. ההגבר בחוג סגור נתון ע"י:

$$\begin{aligned} A_{Hf}(f) &= \frac{A_H}{1 + \beta \cdot A_H} = \frac{\frac{A}{1 + j \frac{f}{f_H}}}{1 + \frac{A}{1 + j \frac{f}{f_H}} \cdot \beta} = \frac{A}{1 + j \frac{f}{f_H} + A \cdot \beta} = \\ &= \frac{A}{1 + \beta \cdot A} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H \cdot (1 + \beta \cdot A)}} = \frac{A_f}{1 + j \frac{f}{f_H \cdot (1 + \beta \cdot A)}} \end{aligned}$$

כאשר:

A_f - הגבר חוג סגור בתדר ביניים

$f_H \cdot (1 + \beta \cdot A)$ - תדר מחצית ההספק העליון של מגבר עם משוב.

ניתן לראות יתרון וחסרון של המשוב:

יתרון: תדר מחצית הספק גדל מ- f_H (מגבר ללא משוב) ל- $f_H \cdot (1 + \beta \cdot A)$ (מגבר עם משוב).

חסרון: ההגבר בחוג פתוח A קטן מהגבר בחוג סגור $\frac{A}{1 + \beta \cdot A}$.

ניתוח בתדר נמוך:

הביטוי המתאר את תגובת התדר של מגבר בתדר נמוך נתון ע"י:

$$A_L(f) = \frac{A}{1 - j \frac{f_L}{f}}$$

נחשב את ההגבר עם משוב שלילי:

$$\begin{aligned} A_{Lf}(f) &= \frac{A_L(f)}{1 + \beta \cdot A_L(f)} = \frac{\frac{A}{1 - j \frac{f_L}{f}}}{1 + \beta \cdot \frac{A}{1 - j \frac{f_L}{f}}} = \frac{A}{1 - j \frac{f_L}{f} + \beta \cdot A} = \\ &= \frac{A}{1 + \beta \cdot A} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_L}{f \cdot (1 + \beta \cdot A)}} = \frac{A_f}{1 - j \frac{f_L}{f \cdot (1 + \beta \cdot A)}} \end{aligned}$$

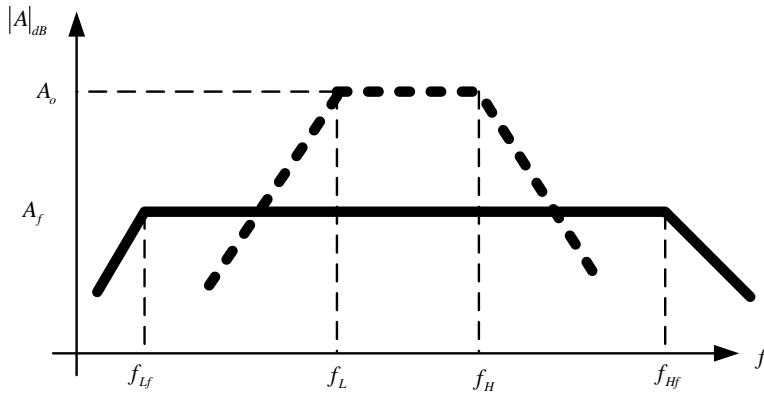
כאשר:

A_f - הגבר חוג סגור בתדר ביניים

תדר מחצית ההספק תחתון של מגבר עם משוב. $\frac{f_L}{1 + \beta \cdot A}$

תדר מחצית ההספק קטן פי $(1 + \beta \cdot A)$ ולכן רואים שרוחב הסרט גדל בשני הכיוונים.

באיור 6.5 מתוארת תגובת תדר של מגבר בחוג פתוח ובחוג סגור:



איור 6.5: תגובת תדר של מגבר בחוג פתוח ובחוג סגור

6.6 סיווג מגברים

ישנם 4 סוגי מגברים:

מגבר מתח מתח

מגבר זרם זרם

מגבר זרם מתח

מגבר מתח זרם

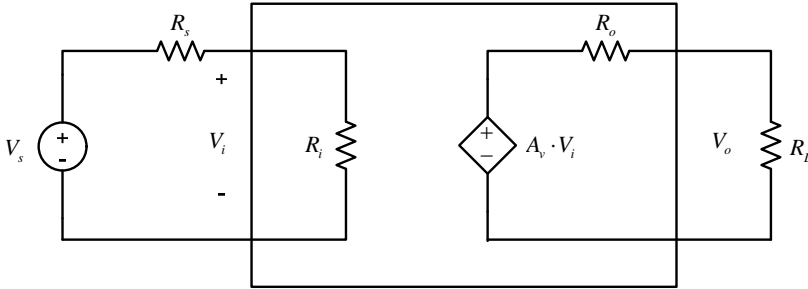
האות הראשונה מרמזת על הכניסה למגבר: במגבר מתח מתח ובמגבר מתח זרם אות המבוא הוא מתח ואילו במגבר זרם זרם ובמגבר זרם מתח אות מבוא הוא זרם.

אות השנייה מרמזת על סוג היציאה של המגבר: במגבר מתח מתח ובמגבר זרם מתח היציאה היא מתח ואילו במגבר זרם זרם ומתח זרם היציאה היא זרם.

ננתח עכשיו תכונות של כל אחד מהמגברים.

מגבר מתח מתח

מגבר מתח מתח מתואר באיור 6.6:

איור 6.6: מגבר מתח מתח

פרמטרים של המעגל:

R_i - התנגדות מבוא של מגבר מתח מתח. התנגדות מבוא חייבת להיות גדולה מאוד כדי שמרבית המתח יפול על כניסת המגבר (ולא על נגד טורי R_s) ומינימום זרם יזרום דרכו. התנאי הנדרש הוא:

$$R_i \gg R_s$$

R_o - התנגדות מוצא של מגבר מתח מתח. התנגדות המוצא חייבת להיות קטנה מאוד כדי שרוב מתח המוצא יפול על עומס R_L

$$R_o \ll R_L$$

A_v - הגבר מתח של המגבר מתח מתח בריקם. הגבר זה מוגדר כ:

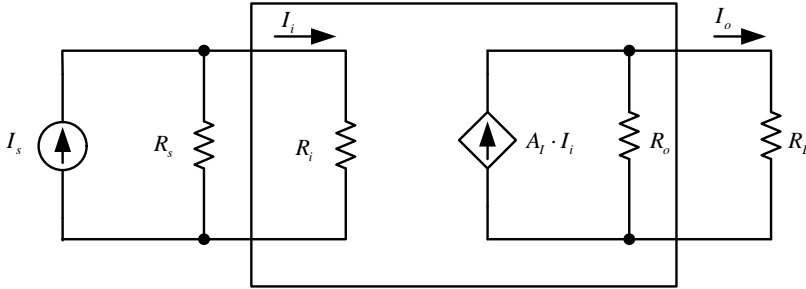
$$A_v = \left. \frac{V_o}{V_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty}$$

A_{vL} - הגבר מתח עם עומס:

$$A_{vL} = A_v \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

מגבר זרם זרם

מגבר זרם זרם מתואר באיור 6.7:

איור 6.7: מגבר זרם זרם

פרמטרים של המעגל:

R_i - התנגדות מבוא של מגבר זרם זרם. נדרוש שהתנגדות המבוא תהיה נמוכה מאוד כדי שרוב

(תיאורתית - כל) הזרם יזרום לכניסת המגבר. התנאי הנדרש הוא:

$$R_s \gg R_i$$

R_o - התנגדות מוצא של מגבר זרם זרם. נדרוש שהתנגדות המוצא של המגבר תהיה גבוהה

ככל שניתן כדי שכל זרם המוצא יזרום לכוון העומס R_L .

A_I - הגבר זרם כאשר היציאה מקוצרת ($R_L = 0$):

$$A_I = \left. \frac{I_o}{I_i} \right|_{R_L=0}$$

A_{IL} - הגבר זרם כאשר המעגל מועמס (קיים עומס R_L):

$$A_{IL} = \frac{I_L}{I_i} \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L} = A_I \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

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