

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסת חשמל



מעבדה 1,1 ח'

מגברי שרת 1

מבוא, מעגלים בסיסיים  
ופרמטרים של מעגלי שרת מעשיים

חומר רקע

גרסה 1.12

אביב 2017

מחבר: יאן לרון

גרסה אחרונה - אברהם קפלן



## תוכן עניינים

4.....	1	מבוא למגברי שרת
4.....	1.1	הצורך במגברי שרת
5.....	1.2	עקרון המשוב
8.....	1.3	התפתחות מגברי שרת
8.....	1.4	מבנה מגברי שרת
10.....	1.5	חיבור מתחי אספקה למגבר שרת
11.....	1.6	אריזות של מגברי שרת
11.....	1.7	מגבר שרת אידיאלי ולא אידיאלי
12.....	1.8	אופיין מעבר של מגבר שרת
13.....	1.9	מגבר שרת ברוויה
14.....	2	מעגלים בסיסיים עם מגבר שרת אידיאלי
14.....	2.1	מגבר הופך מופע
16.....	2.2	מגבר עוקב מופע
17.....	2.3	מגבר חוצץ - BUFFER
17.....	2.4	מגבר מסכם הופך מופע
18.....	2.5	מגבר הפרש בסיסי
20.....	3	פרמטרים של מגברי שרת מעשיים
20.....	3.1	מגברי שרת LM311
21.....	3.2	מתח היסט OFFSET VOLTAGE
27.....	3.3	זרמי ממתח וזרם היסט
30.....	3.4	זרם מוצא מירבי $I_{o(max)}$
30.....	4	תגובת תדר של מגבר שרת
30.....	4.1	התיאור הגרפי של תגובת התדר
31.....	4.2	רוחב סרט - BANDWIDTH
35.....	3.5	תגובת המגבר לשינוי באות הכניסה - SLEW RATE
36.....	4.3	מדידת SLEW RATE
36.....	4.4	איך משפיע ה- S.R. על אות המוצא?
37.....	4	השוואת מגברים LF411, LM741
37.....	5	ביבליוגרפיה
38.....	6	נספח א - הסבר דפי יצרן של מגבר שרת UA741
38.....	6.1	מגברי שרת UA741 / LF 411
50.....	7	נספח ב - מעגלים אנלוגיים: כללי בניה
50.....	8	נספח ג' - מעגלים אנלוגיים: גילוי ותיקון תקלות
50.....	10.1.	מתחי וזרמי ספקים
51.....	10.2.	צב"ד - ציוד בדיקה
51.....	10.3.	בדיקה "חזותית" מכנית חוזרת של המעגל
51.....	10.4.	החלפת רכיבים
51.....	10.5.	מעקב אותות באמצעות הסקופ
51.....	10.6.	פנה למדריך

# 1 מבוא למגברי שרת

## 1.1 הצורך במגברי שרת

כל הרכיבים האלקטרוניים סובלים מפיזור פרמטרים משמעותי ביותר. אם ניקח לדוגמא דפי יצרן של טרנזיסטור ביפולרי, נראה שהפרמטר המשמעותי ביותר שלו - הגבר זרם  $\beta$  (או  $h_{FE}$ ) אינו קבוע ומשתנה באופן משמעותי כמתואר באיור 11-א:

$h_{FE}$	DC Current Gain	$I_C = 0.1\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}$	35		
		$I_C = 1.0\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}$	50		
		$I_C = 10\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}$	75		
		$I_C = 10\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}, T_a = -55^\circ\text{C}$	35		
		$I_C = 150\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}^*$	100	300	
		$I_C = 150\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}^*$	50		
		$I_C = 500\text{mA}, V_{CE} = 10\text{V}^*$	40		

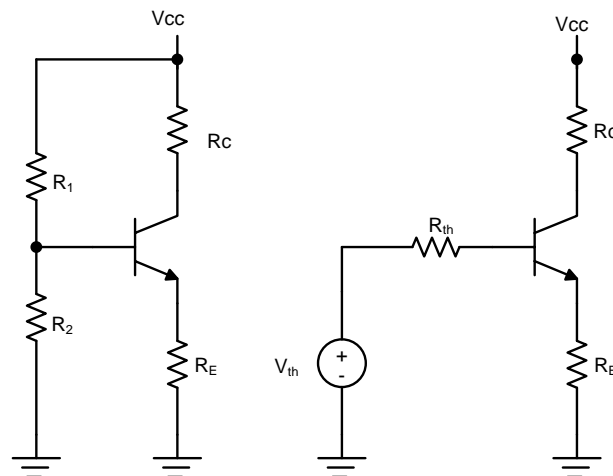
איור 11-א - פרמטר  $\beta$  בטרנזיסטור 2N2222

בנוסף לפיזור פרמטרים בין רכיב לרכיב, הגבר זרם  $\beta$  משתנה עם שינויי טמפרטורה, שינוי נקודת עבודה ועוד.

המתכנן של מעגלי הגברה עם טרנזיסטורים חייב לדאוג שהתכנון יעמוד בשני קריטריונים עיקריים:

- נקודת עבודה של הטרנזיסטורים חייבת להיות זהה ויציבה בכל המעגלים.
- ההגבר של כל מגבר חייב להיות אחיד וקבוע.

בלימודיך במסגרת מקצוע "מעגלים ליניאריים" למדת לתכנן נקודת עבודה יציבה לטרנזיסטור ביפולרי. מעגל הממתח המבטיח בתנאים מסוימים יציבות נקודת עבודה מורכב מ-4 נגדים כמתואר באיור:



איור 1 ב מעגל ממתח לטרנזיסטור ביפולרי והתמרת תבנית של מעגל הבסיס

מתוך ניתוח המעגל זרם הקולקטור  $I_C$  שווה ל:

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{th} - V_{BE})}{R_{th} + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

כפי שרואים  $\beta$  משפיעה על נקודת העבודה של הטרנזיסטור.

מתברר שעל ידי בחירה נבונה של ערכי הנגדים ניתן להקטין את השפעת שינוי  $\beta$  על זרם הקולקטור. אם נתכנן את המעגל כך שמתקיים התנאי:

$$(\beta + 1) \cdot R_E \gg R_{th}$$

נקבל:

$$I_C \approx \frac{\beta \cdot (V_{th} - V_{BE})}{(\beta + 1) \cdot R_E} = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E}$$

מכיוון והערך של  $\beta$  גבוה (סדר גודל של עשרות או מאות), היחס  $\frac{\beta}{\beta + 1}$  שואף ל-1 כך שבקירוב טוב

נוכל לרשום:

$$I_C \approx \frac{\beta \cdot (V_{th} - V_{BE})}{(\beta + 1) \cdot R_E} = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E} \approx \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} - V_{BE}}{R_E}$$

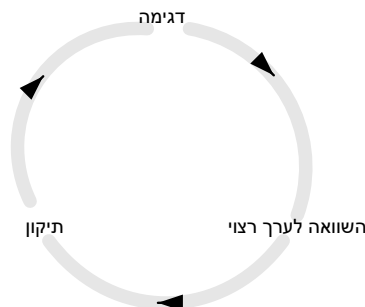
כפי שרואים, זרם קולקטור  $I_C$  אינו מושפע מ- $\beta$  !

## 1.2 עקרון המשוב

המנגנון השומר את זרם הקולקטור  $I_C$  קבוע הוא מנגנון משוב המבוסס על 3 פעולות:

- דגימה של הערך המצוי
- השוואה לערך הרצוי
- תיקון

כמתואר באיור 1-:



איור 1-ג תהליך דגימה, השוואה ותיקון במערכות בקרה עם משוב

במעגל שבאיור (המעגל המקורי) הזרם  $I_C$  נדגם על ידי נגד  $R_E$ . אם מסיבה כלשהי זרם  $I_C$  עולה (לדוגמא: החלפת טרנזיסטור לטרנזיסטור מאותו סוג אך עם הגבר זרם  $\beta$  גבוה יותר), המתח על פני נגד  $R_E$  יעלה וכתוצאה מכך יעלה גם המתח בבסיס של טרנזיסטור  $V_B$ . עליית מתח  $V_B$  גורמת לירידת מפל מתח על נגד  $R_1$  ועלייה במפל מתח על נגד  $R_2$ . ירידת מפל המתח על נגד  $R_1$  גורמת לירידת הזרם  $I_{R1}$  דרך הנגד ועליית המתח על הנגד  $R_2$  גורמת לעליית זרם  $I_{R2}$  דרך הנגד ולכן הזרם הזורם לבסיס הטרנזיסטור  $I_B$  קטן:

$$I_B = I_{R1}(\downarrow) - I_{R2}(\uparrow) \Rightarrow I_B(\downarrow)$$

ומכיוון זרם הקולקטור במצב פעיל הוא  $I_C = \beta \cdot I_B$ , זרם הקולקטור יקטן ויחזור לערכו המקורי (או כמעט לערכו המקורי).

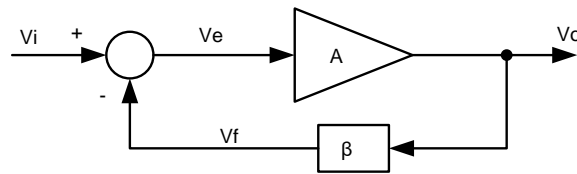
אם הטרנזיסטור הוחלף לטרנזיסטור בעל הגבר זרם  $\beta$  נמוך יותר, ברגע הראשון זרם  $I_C$  יורד. המתח על פני הנגד  $R_E$  יורד וכתוצאה מכך יורד גם המתח בבסיס של טרנזיסטור  $V_B$ . ירידת מתח  $V_B$  גורמת לעלייה במפל המתח על נגד  $R_1$  וירידה במפל המתח על נגד  $R_2$ . עליית מפל המתח על נגד  $R_1$  גורמת לעליית הזרם  $I_{R1}$  דרך הנגד, וירידת המתח על נגד  $R_2$  גורמת לירידת הזרם  $I_{R2}$  דרך הנגד ולכן הזרם הזורם לבסיס הטרנזיסטור  $I_B$  עולה.

$$I_B = I_{R1}(\uparrow) - I_{R2}(\downarrow) \Rightarrow I_B(\uparrow)$$

ומכיוון זרם הקולקטור במצב פעיל הוא  $I_C = \beta \cdot I_B$ , זרם הקולקטור יעלה.

המנגנון עובד בצורה תקינה כל עוד מתקיים התנאי  $(\beta + 1) \cdot R_E \gg R_{th}$ , והיחס  $\frac{\beta}{\beta + 1}$  שואף ל-1.

נתאר עכשיו את מנגנון המשוב בצורה כללית יותר. את תהליך דגימת ערך רצוי, השוואה לערך מצוי ותיקון נשליך על מעגל אלקטרוני הבנוי ממגבר A (לא יציב ומשתנה) ורשת משוב  $\beta$  כמתואר באיור 7-1:



איור 7-1 תרשים מלבנים של מעגל אלקטרוני עם משוב

במעגל שבאיור 1- מתח המוצא  $V_o$  נדגם ע"י רשת משוב  $\beta$  המפיקה מתח משוב  $V_f$ .

$$V_f = \beta \cdot V_o$$

מתח זה עובר השוואה (חיסור) עם מתח המבוא  $V_i$  כך שמתח שגיאה  $V_e$  שנוצר שווה ל:

$$V_e = V_i - V_f$$

מתח השגיאה נכנס למגבר A ולכן מתח המוצא  $V_o$  שווה ל:

$$V_o = A \cdot V_e$$

נחשב את התמסורת (ההגבר) של המעגל בחוג סגור:  $A_v = \frac{V_o}{V_i}$  ע"י הצבת משוואות:

$$V_o = A \cdot V_e = A \cdot (V_i - V_f) = A \cdot (V_i - \beta \cdot V_o) = A \cdot V_i - A \cdot \beta \cdot V_o$$

$$V_o \cdot (1 + A \cdot \beta) = A \cdot V_i$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta}$$

אם נדאג שהגבר A של המגבר יהיה גדול מאוד כך ש:  $A \cdot \beta \gg 1$  נוכל לרשום:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} \approx \frac{A}{A \cdot \beta} = \frac{1}{\beta}$$

כלומר ההגבר של המעגל עם משוב (הגבר בחוג סגור) אינו תלוי כלל בערכו של הגבר המגבר A (כל עוד הוא גדול) אלא רק ברשת משוב  $\beta$  !!!  
ותמסורת המתארת יחס בין מתח שגיאה  $V_e$  למתח מבוא  $V_i$  נתונה ע"י:

$$\frac{V_e}{V_i} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_e}{V_o} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} \cdot \frac{1}{A} = \frac{1}{1 + A \cdot \beta}$$

וכאשר מתקיים התנאי  $A \cdot \beta \gg 1$ , נקבל שהתמסורת שואפת לאפס:

$$\frac{V_e}{V_i} = \frac{1}{1 + A \cdot \beta} \xrightarrow{A \cdot \beta \gg 1} \frac{1}{A \cdot \beta} \rightarrow 0$$

כלומר לא ייווצר מתח שגיאה.

כדי לקיים את התנאי  $A \cdot \beta \gg 1$  נדרש:

- מגבר בעל הגבר A גבוה מאוד
- מגבר מתח (התנגדות מבוא גבוהה מאוד, התנגדות מוצא נמוכה מאוד)
- כניסת מגבר הפרשית

שלושת הדרישות מגדירות בעצם את התכונות הבסיסיות של מגבר השרת Operational Amplifier. מגבר שרת הוא מגבר מתח בעל הגבר מתח גבוה מאוד, התנגדות מבוא גבוהה מאוד והתנגדות מוצא נמוכה מאוד. למגבר יש שתי כניסות ובכניסת המגבר היא כניסת הפרשית המחשבת את הפרש בין שני מתחי מבוא.

### 1.3 התפתחות מגברי שרת

מגבר השרת הראשון נבנה בשנת 1948 והיה מבוסס על שפופרות. מגבר שרת עם שפופרות (דגם מתקדם יותר משנת 1953) מתואר באיור 1-:



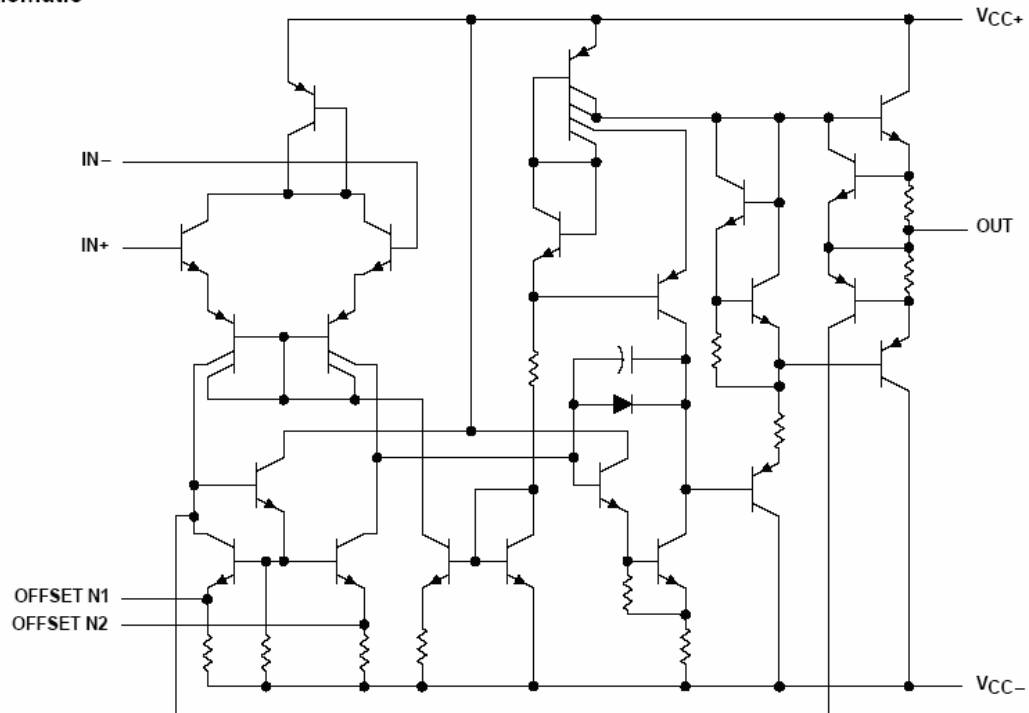
איור 1-ה מגבר שרת עם שפופרות

השימוש העיקרי של מגברי שרת היה במחשבים אנלוגיים. מחשבים אנלוגיים דימו פעולת מערכות בתחומים הנדסיים רבים ע"י בניית מעגלים אלקטרוניים בעלי אותן משוואות דיפרנציאליות ואלגבריות כמו מערכות אמיתיות. "התיכנות" אז בוצע ע"י חיווט ושינוי ערכי הרכיבים המחוברים למגברי השרת.

### 1.4 מבנה מגברי שרת

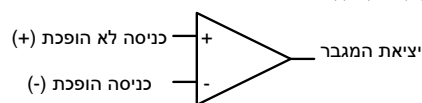
באיור 1-ב מתואר מבנה פנימי של מגבר שרת  $\mu A741$ :

schematic



איור 1-ב מבנה פנימי של מגבר שרת  $\mu A741$

הסימון המקובל למגבר שרת מתואר באיור 1-ג:

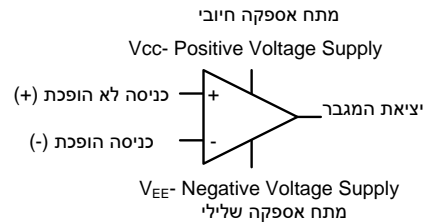


איור-1 ג סימון של מגבר שרת



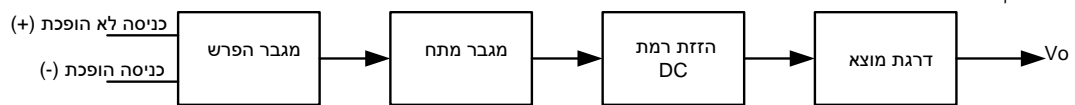
בפועל, כל מגבר שרת חייב לקבל הזנת מתחי אספקה (לרוב מתחים סימטריים  $\pm V$  או מתח אספקה בודד).

סימון מגבר שרת הכולל את הדקי מתחי האספקה מתואר באיור 1-ד:



איור 1-ד סימון מגבר שרת עם הדקי אספקת מתח

מבנה עקרוני של מגבר שרת מתואר באיור 1-ה:



איור 1-ה מבנה עקרוני של מגבר שרת

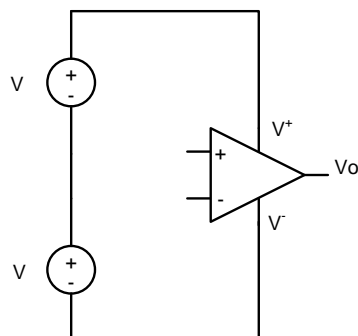
בדרגה הראשונה מגבירים את הפרש המתחים  $V_2 - V_1$ . הדגש הוא על שמירת CMRR גבוה (יחס בין הגבר אות הפרשי להגבר אות משותף) ועל יצירת התנגדות מבוא גבוהה. את התנגדות המבוא הגבוהה ניתן להבטיח ע"י בניית דרגה דיפרנציאלית עם מגבר דרלינגטון (שני טרנזיסטורים ביפולריים בטור) או דרגת FET.

הדרגה השנייה של המגבר אחראית על יצירת הגבר מתח גבוה. ניתן להשיג הגבר גבוה ע"י החלפת נגד עומס  $R_L$  במקור זרם בעל התנגדות גבוהה מאוד ובכך ליצור הגבר מתח גבוה. בדרגה הבאה מזיזים את רמת מתח DC לאפס כך שכאשר מתחי המבוא הם אפס, מתח המוצא יהיה שווה לאפס. הדרגה האחרונה במגבר השרת אחראית על יכולות הספק המוצא.

## 1.5 חיבור מתחי אספקה למגבר שרת

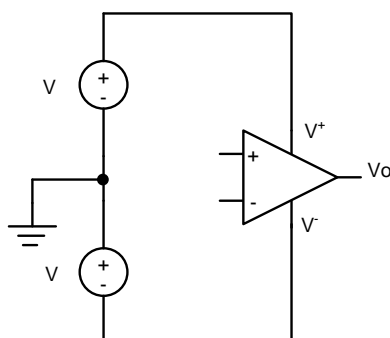
מגבר שרת הוא מעגל אלקטרוני המבוסס על טרנזיסטורים ולכן כדי להפעיל את הרכיב יש לחבר מתח אספקה. לרוב מגברי השרת נדרש מתח אספקה ביפולרי סימטרי כלומר מתחים  $\pm V$ .

חיבור מתחים המקובל ביותר למגברי שרת מורכב משני מקורות מתח עם נקודת חיבור משותפת כמתואר באיור 1-1:



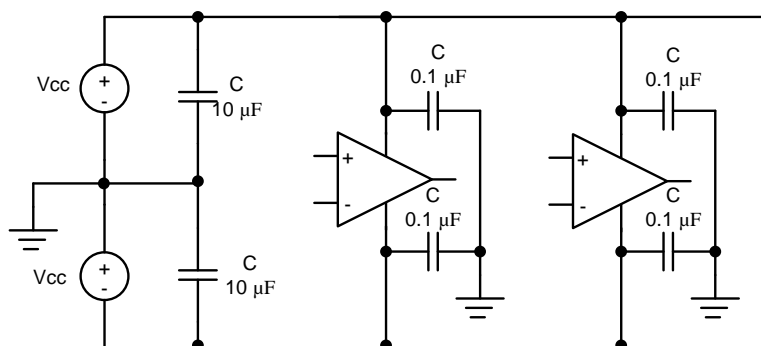
איור 1-1 חיבור מתחי אספקה למגבר שרת

רצוי להאריק את מתחי האספקה וליצור חיבור המגדיר חד משמעית את מתחי האספקה כלפי אדמה כמתואר באיור 1-2:



איור 1-2 חיבור מתחי אספקה מאורקים למגבר שרת

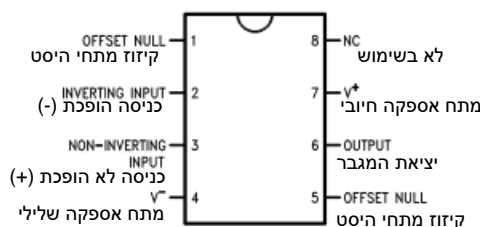
כדי לייצב את מתח האספקה רצוי לחבר קבלים בערך  $0.1 \mu F$  בין מתח אספקה (חיובי ושלילי) ובין אדמה לכל מגבר שרת. בנוסף יש לחבר במקביל לספק כוח קבלים אלקטרוליטיים בעלי ערך טיפוסי של  $10 \mu F$  כמתואר באיור 1-3:



איור 1-3 חיבור קבלים לשיפור ייצוב מתח האספקה למגברי שרת

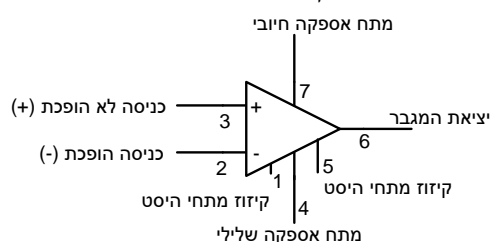
## 1.6 אריזות של מגברי שרת

האריזה המקובלת ביותר למגבר שרת בודד היא אריזת (Dual In Package) DIP בעלת 8 הדקים המתוארת באיור 1-ט:



איור 1-ט סידור רגליים במגבר שרת אופייני

באיור 1-י מתואר מגבר שרת אופייני עם סימון רגליים:



איור 1-י מגבר שרת - תיאור רגליים

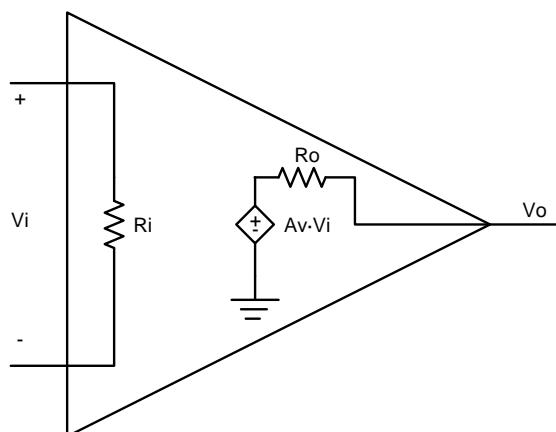
## 1.7 מגבר שרת אידיאלי ולא אידיאלי

ניתוח רוב המעגלים המשלבים מגברי שרת נעשה בהנחה שמגבר שרת הוא אידיאלי.

מגבר שרת אידיאלי הוא מגבר מתח בו:

- התנגדות מבוא שואפת לאינסוף - לא נכנסים זרמים לכניסות המגבר.
- התנגדות מוצא שואפת לאפס.
- הגבר מתח בחוג פתוח שואף לאינסוף.
- יחס דחיית אות משותף CMRR שואף לאינסוף.

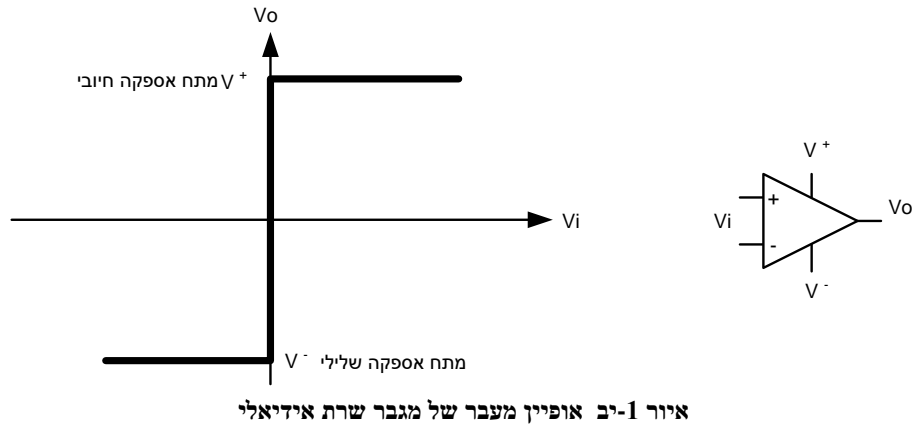
מעגל תמורה של מגבר שרת לא אידיאלי מתואר באיור 1-יא:



איור 1-יא מעגל תמורה של מגבר שרת לא אידיאלי

## 1.8 אופיין מעבר של מגבר שרת

באיור 1-יב מתואר אופיין מעבר של מגבר שרת אידיאלי:

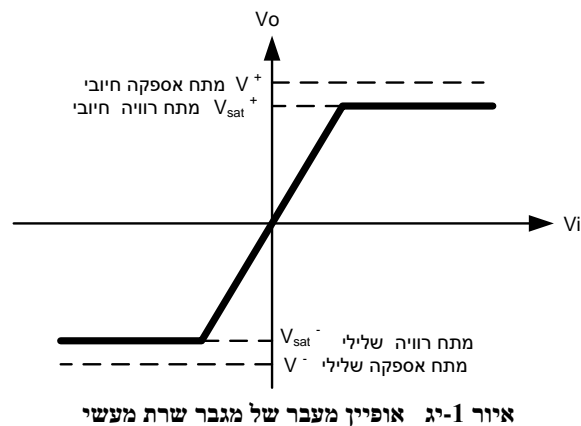


מכיוון והגבר של מגבר שרת אידיאלי שואף לאינסוף, כל מתח  $V_i$  יגרום למתח מוצא:

$$V_o = A_{OL} \cdot V_i \rightarrow \infty$$

מתחי מוצא של מגבר שרת מוגבלים ע"י מתחי אספקה  $V^+$  ו- $V^-$  ולכן עבור מתח מבוא חיובי  $V_i$  המגבר יכנס לרוויה חיובית ו- $V_o = V^+$ . כאשר מתח מבוא  $V_i$  שלילי המגבר יכנס לרוויה שלילית ו- $V_o = V^-$ .

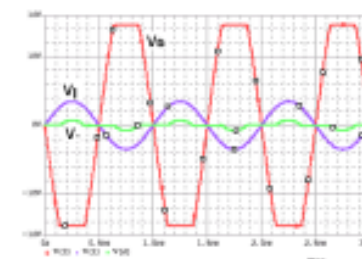
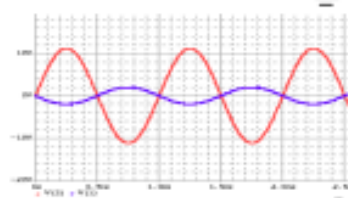
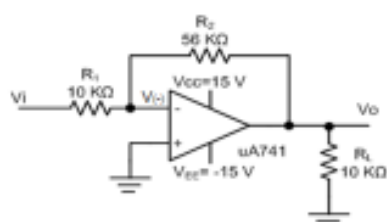
במגברי שרת מעשיים הגבר המתח אינו אינסופי וגם מתחי המוצא לא מגיעים למתחי האספקה. בגלל חוסר האיזון פנימי ההגבר אינו עובר דרך הראשית. אופיין מעבר של מגבר שרת מעשי מתואר באיור 1-יג:



## 1.9 מגבר שרת ברוויה

מתחי מוצא של מגבר שרת מוגבלים ע"י מתחי אספקה  $V^+$  ו-  $V^-$  ומעשית אף נמוכים מהם. במצב רוויה לא נשמרת התכונה שהפרש הפוטנציאלים בין שתי כניסות המגבר שווה ל- 0V. או בקיצור - אין יותר "אדמה וירטואלית"

### מגברי שרת - ניסוי 1



מעגל מס' 1: רוויה

נתון: בציר מעגל מגבר הופך:

$$\frac{V_{(-)} - V_i}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_2} = 0$$

מחוק הזרמים בצומת  $V_{(-)}$  נובע:

$$V_{(-)} = V_i * \frac{R_2}{R_1 + R_2} - |V_o| * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

לכן המתח בכניסה ההופכת:

אם:  $|V_i * (R_2/R_1)| \leq$  מתח רוויה

אז: 1. אות היציאה תקין:  $V_o = V_i * (-R_2/R_1)$

2.  $V_{(-)} = V_{(+)} (= 0V)$  כי כל שינוי ב  $V_i$  מתקזז ע"י שינוי מתאים ב  $V_o$ .

אם:  $|V_i * (R_2/R_1)| \geq$  מתח רוויה

אז: 1. אות היציאה יקטע וערכיו המכסימלי והמינימלי יהיו שווים למתחי הרוויה של המגבר.

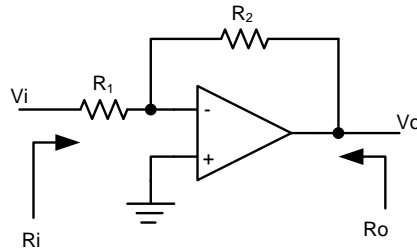
2.  $V_{(-)} \neq V_{(+)}$  כי שינוי ב  $V_i$  לא מאפשר שינוי מתאים ב  $V_o$  מאחר והוא קבוע במתח הרוויה.

## 2 מעגלים בסיסיים עם מגבר שרת אידאלי

נכיר עכשיו מספר מעגלים בסיסיים עם מגבר שרת.

### 2.1 מגבר הופך מופע

מגבר הופך מופע בסיסי מתואר באיור 2-:



איור 2-א מגבר הופך מופע

במעגל קיים משוב שלילי ולכן נוכל להניח:

מכיוון ומתח המוצא  $V_o$  הוא סופי, הפרש המתחים בין כניסות המגבר שווה לאפס. (במעגל בקרה כללי

$$\left(\frac{V_e}{V_i} = 0\right) \text{ התמסורת } A \cdot \beta \rightarrow \infty \text{ עם משוב ראינו שכאשר}$$

בגלל התנגדות המבוא הגבוהה מאוד לא נכנסים זרמים לכניסות המגבר.

המתח בכניסה הלא הופכת של המגבר שווה לאפס - הכניסה מחוברת לאדמה. קיומו של משוב שלילי מבטיח שאין הפרש מתחים בין כניסות המגבר ולכן המתח בכניסה ההופכת יהיה שווה גם לאפס. נהוג לומר שעקב המשוב המאלץ שיוויון בין מתח בכניסה לא הופכת ומתח בכניסה ההופכת, בכניסה ההופכת נוצרת "אדמה מדומה" או "אדמה וירטואלית". המתח בכניסה ההופכת של המגבר שווה לאפס למרות שהכניסה אינה מחוברת לפוטנציאל אפס.

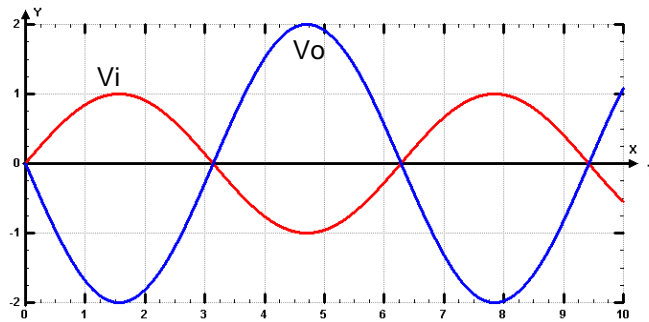
משוואת הזרמים היוצאים מצומת הכניסה ההופכת:

$$\frac{V_{(-)} - V_i}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_2} + I_{B(-)} = 0$$

$$\frac{0 - V_i}{R_1} + \frac{0 - V_o}{R_2} + 0 = 0$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i, \quad A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

כפי שרואים, ההגבר  $A_v$  תלוי אך ורק ביחס הנגדים החיצוניים. לפרמטרים של מגבר שרת אין השפעה כלשהי על ההגבר. סימן (-) בהגבר מצביע על היפוך מופע: מתח המוצא הפוך למתח המבוא (מוזז בזווית  $180^\circ$ ) כמתואר באיור 2-:



איור 2-ב תיאור מתחי מבוא ומוצא במגבר הופך מופע בעל הגבר 2

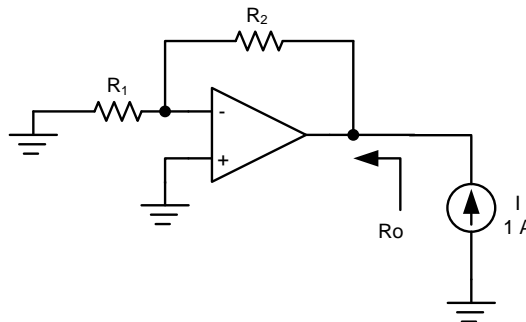
### התנגדות מבוא

נחשב את התנגדות המבוא של המגבר:

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{\frac{V_i - V_{(-)}}{R_1}} = \frac{V_i}{\frac{V_i - 0}{R_1}} = R_1$$

### התנגדות מוצא

למציאת התנגדות המוצא  $R_o$  נאפס את המקור  $V_i$  ונכניס מקור בוחן  $1A$  במוצא כמתואר באיור 2-ג:



איור 2-ג מעגל לחישוב התנגדות מוצא

המתח בכניסה ההופכת שווה לאפס ולכן דרך נגד  $R_1$  לא זורם זרם (הנגד נמצא בין אדמה וירטואלית ובין האדמה). בהנחה שלא נכנס זרם לכניסת המגבר, גם דרך נגד  $R_2$  לא זורם זרם ולכן מפל המתח על שני הנגדים שווה לאפס ולכן מתח מוצא  $V_o$  שווה ל:

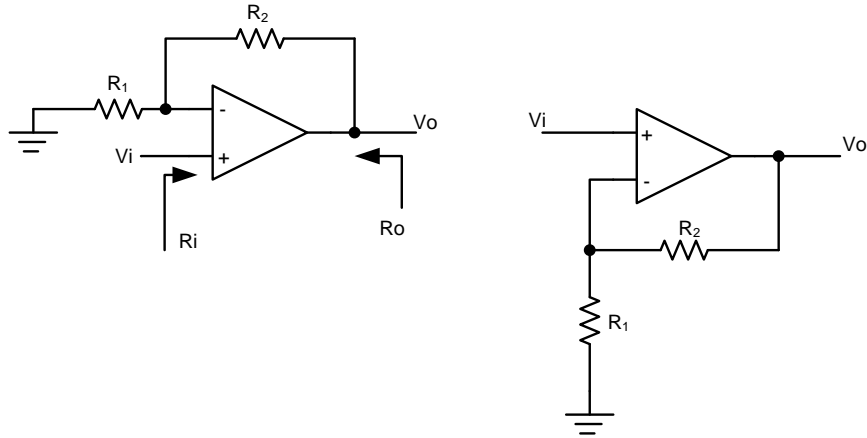
$$V_o = V_{R1} + V_{R2} = 0 + 0 = 0V$$

ולכן:

$$R_o = \frac{V_o}{I} = \frac{0}{1} = 0\Omega$$

## 2.2 מגבר עוקב מופע

מגבר עוקב מופע מתואר בשתי צורותיו ב: Error! Reference source not found.



מגבר עוקב מופע

למעגל יש משוב שלילי ולכן הפרש המתחים בין כניסות המגבר שווה לאפס. המתח בכניסה ההופכת שווה למתח המבוא  $V_i$ . משוואת הזרמים היוצאים מצומת הכניסה ההופכת:

$$\begin{aligned} \frac{V_i - 0}{R_1} + \frac{V_i - V_o}{R_2} &= 0 \\ R_2 \cdot V_i + R_1 \cdot V_i &= R_1 \cdot V_o \\ V_o &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_i = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_i \\ A_v = \frac{V_o}{V_i} &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

מגבר עוקב מופע מסוגל רק להגביר את מתח המבוא (מגבר הופך מופע יכול להגביר כאשר  $R_2 > R_1$  ולהנחית כאשר  $R_2 < R_1$ ).

### התנגדות מבוא

התנגדות המבוא  $R_i$  של מגבר עוקב מופע שואפת לאינסוף מכיוון שלא זורם זרם לכניסות המגבר.

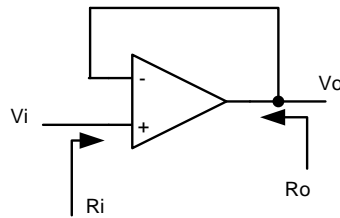
### התנגדות מוצא

התנגדות המוצא  $R_o$  של מגבר עוקב מופע שווה לאפס (כאשר מאפסים את מקור מבוא  $V_i$  מתקבל אותו מעגל כמו באיור 2-).



## 2.3 מגבר חוצץ - Buffer

כאשר רוצים להבטיח התנגדות מבוא גבוהה והתנגדות מוצא נמוכה למטרות חציצה בין דרגות הגברה או להבטחת התנגדות מבוא גבוה למעגל, משתמשים בחוצץ buffer המתואר ב **Error! Reference source not found.**



חוצץ buffer

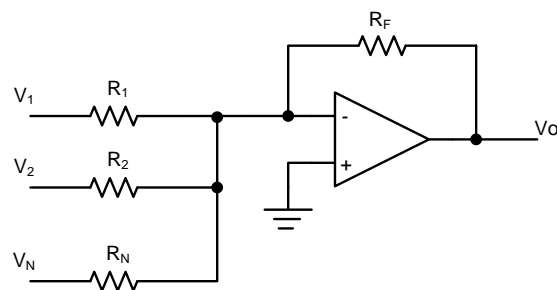
מ. **Error! Reference source not found.** רואים שלמעגל משוב יחידה. מכון והפרש המתחים בין כניסות המגבר שווה לאפס ומתח בכניסה הופכת שווה למתח המוצא נקבל:

$$V_o = V_i$$

התנגדות המבוא של המגבר אינסופית והתנגדות המוצא שואפת לאפס.

## 2.4 מגבר מסכם הופך מופע

מגבר מסכם הופך מופע מתואר ב. **Error! Reference source not found.**



מגבר מסכם הופך מופע

בגלל משוב שלילי המתח בכניסה ההופכת שווה לאפס (אדמה וירטואלית) ולכן משוואת הזרמים היוצאים מצומת כניסה הופכת היא:

$$\frac{0 - V_1}{R_1} + \frac{0 - V_2}{R_2} + \dots + \frac{0 - V_N}{R_N} + \frac{0 - V_o}{R_F} = 0$$

מן המשוואה ניתן לחלץ את מתח המוצא:

$$V_o = - \left( \frac{R_F}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_F}{R_2} \cdot V_2 + \dots + \frac{R_F}{R_N} \cdot V_N \right)$$

ואם כל הנגדים שווים נקבל:

$$V_o = -(V_1 + V_2 + \dots + V_N)$$

אחד השימושים של מעגל מסכם הוא מעגל המבצע ממוצע על מתחי המבוא. אם נניח שכל נגדי מבוא שווים:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_N = R$$

וערכו של נגד המשוב שווה ל:

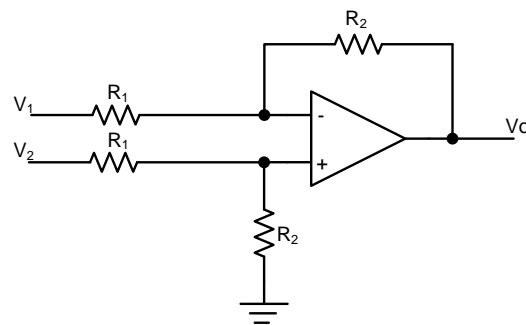
$$R_F = \frac{R}{N}$$

נקבל:

$$V_o = -\left(\frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N}\right)$$

## 2.5 מגבר הפרש בסיסי

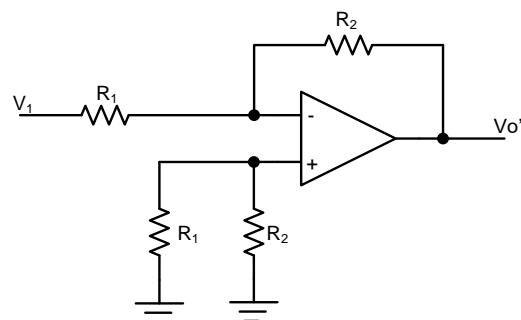
מגבר הפרש בסיסי מתואר ב. **Error! Reference source not found.**



מגבר הפרש בסיסי

ננתח את המעגל בשיטת הסופרפוזיציה: מתברר שמעגלים רבים המשלבים מגברי שרת בנויים מאבני יסוד בסיסיים כגון מגבר הופך מופע ומגבר עוקב מופע.

נאפס את מקור  $V_2$  כמתואר ב. **Error! Reference source not found.**

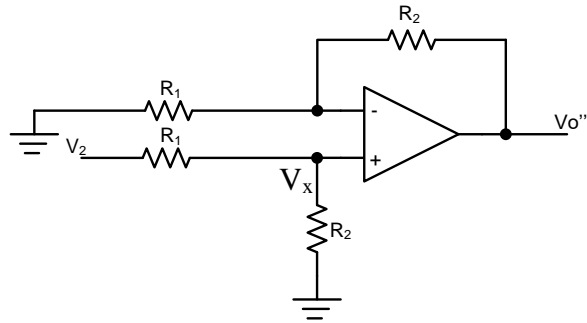


מגבר הפרש - איפוס מתח  $V_2$

מכיוון ולכניסת המגבר לא זורם זרם, לא זורם זרם דרך נגדים  $R_1$  ו-  $R_2$  המחוברים לכניסה הלא הופכת ולכן המתח בכניסה הלא הופכת שווה לאפס. מתקבל מגבר הופך מופע ולכן:

$$V_o' = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1$$

נאפס כעת את מתח  $V_1$  כמתואר ב. **Error! Reference source not found.**



מגבר הפרש - איפוס מתח  $V_1$

עבור מתח  $V_x$  זהו מגבר עוקב מופע. את מתח  $V_x$  נחשב לפי מחלק מתח (לא נכנס זרם לכניסה הלא הופכת של המגבר):

$$V_x = V_2 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

-1

$$V_o'' = V_x \cdot \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) = V_2 \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_2$$

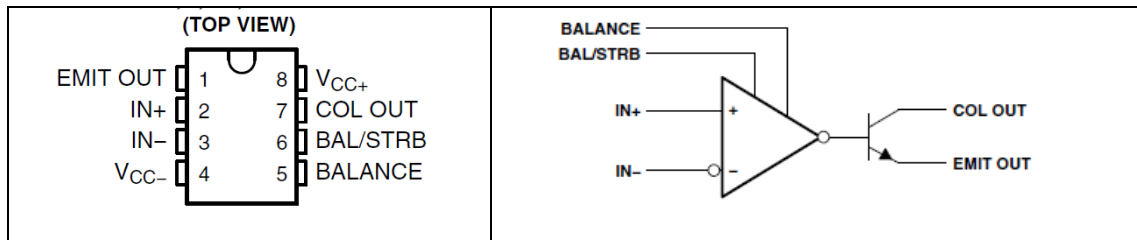
ולכן:

$$V_o = V_o' + V_o'' = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot V_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

מעגל זה פועל בצורה טובה רק בתנאי שערכי הנגדים מאוד מדויקים.

### 3 פרמטרים של מגברי שרת מעשיים

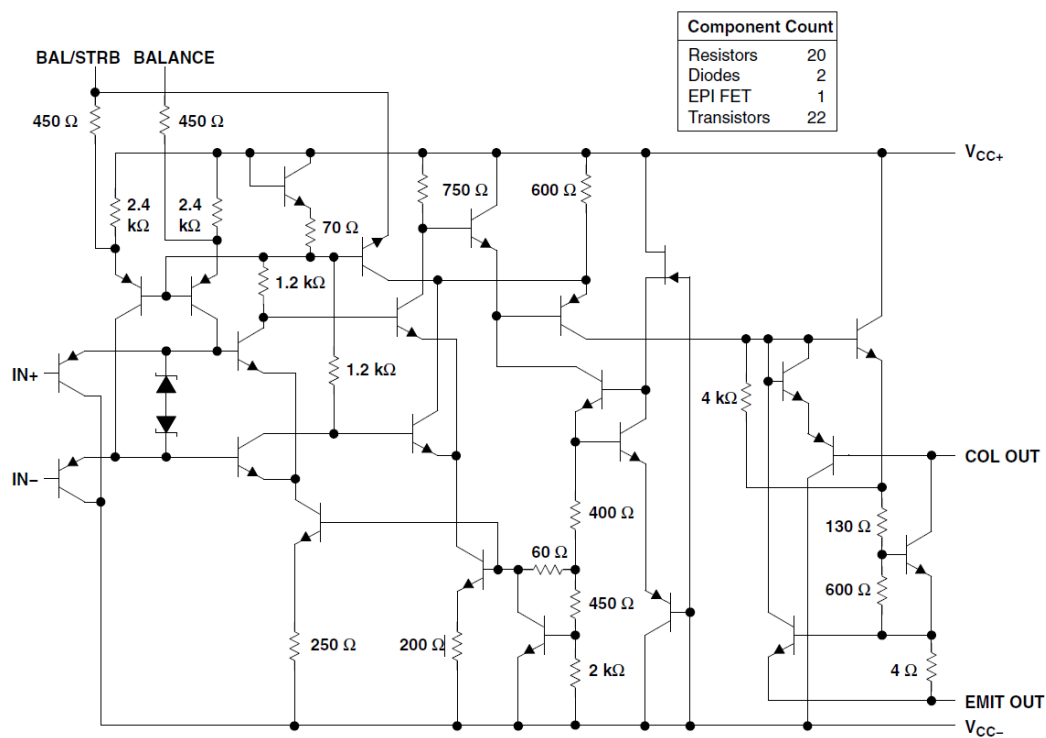
#### 3.1 מגברי שרת LM311



<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm311.pdf>

מעגל משווה, מוצא המעגל מכיל טרנסיסטור "צף" כך שניתן לחברו לכל מתחי ספק, משמש כמשווה ולא כמגבר

schematic



All resistor values shown are nominal.

תכונות מעשיות של מגבר שרת ניתן לחלק ל-3 קבוצות:

#### • תכונות DC:

- מתח היסט Offset Voltage
- זרמי ממתח Bias Currents
- זרם היסט Offset Current
- הגבר  $A_{OL}(0)$  בחוג פתוח

- תכונות ac:
  - תגובת תדר של מגבר שרת – רוחב סרט Bandwidth
  - קצב מירבי של שינוי מתח המוצא – Slew Rate
- מגבלות הספק:
  - זרם מוצא מירבי  $I_{o(max)}$
  - אופייני המוצא
  - PSRR
- יחס דחיית אות משותף CMRR

### 3.2 מתח היסט Offset Voltage

במגבר שרת אידיאלי הקשר בין מתחי המבוא ומתח המוצא נתון ע"י:

$$V_o = A_{OL} \cdot (V_{(+)} - V_{(-)}) = A_{OL} \cdot V_i$$

כאשר:

$V_{(+)}$  - מתח בכניסה לא הופכת של מגבר שרת

$V_{(-)}$  - מתח בכניסה הופכת של מגבר שרת

$A_{OL}$  - הגבר בחוג פתוח

כאשר  $V_{(+)} = V_{(-)} = 0V$  נקבל  $V_o = 0V$ .

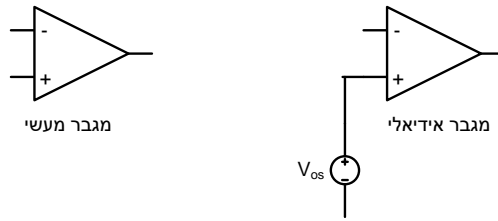
במגבר שרת מעשי, בגלל המבנה המורכב וחוסר תאום בין הרכיבים הפנימיים המרכיבים אותו, נוצר חוסר סימטריה ומתח המוצא אינו שווה ל-0, למרות שמתחי המבוא שווים לאפס.

אם רוצים לאפס את מתח המוצא כאשר  $V_i = 0$ , יש להוסיף מקור מתח במבוא. מתח שנוסף במבוא אשר גורם ל-  $V_o = 0V$  יהיה שווה למתח ההיסט בכניסה  $V_{os}$  של המגבר. אי לכך הקשר בין מתחי מבוא ומתח מוצא במגבר מעשי הוא:

$$V_o = A_{OL} \cdot (V_i - V_{os})$$

מתח  $V_{os}$  הוא מתח DC קטן שגודלו הטיפוסי הוא מספר מילי וולטים. מגברים פשוטים הם בעלי מתחי היסט מרביים של  $10\text{ mV}$ . במגברים מיוחדים (מגברי שרת מדויקים ומגברי מכשור) מתחי ההיסט נמוכים מאוד וערכם נע בגבולות  $(10 \div 100)\mu V$ . מתח היסט יכול להיות חיובי או שלילי וגודלו אקראי בתחום שמציין היצרן. בדפי נתונים רשום גודלו הטיפוסי והמכסימלי של מתח זה בתנאי סביבה סטנדרטיים ובכל תחום טמפרטורת העבודה.

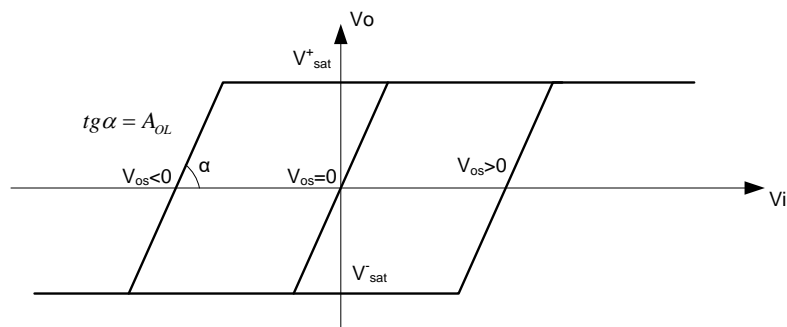
לניתוח השפעת מתחי היסט על ביצועי מעגלים מבוססי מגברי שרת, נוכל להחליף את המגבר המעשי במגבר אידיאלי עם מקור מתח DC בלתי תלוי  $V_{os}$ , המחובר בטור לאחת הכניסות כמתואר באיור 3-א:



איור 3-א ייצוג מתח היסט בסכמת תמורה

מקובל לחבר את מקור  $V_{os}$  בטור לכניסה הלא הופכת של המגבר.

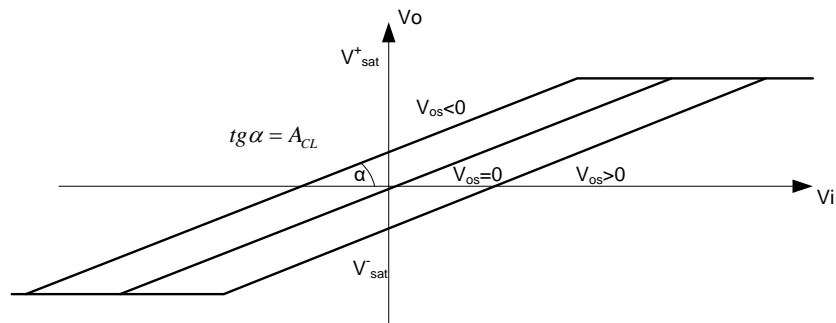
איור 3-ב מתאר אופיין של מגבר שרת בחוג פתוח ואת השפעת מתח ההיסט על האופיין:



איור 3-ב השפעת מתח היסט על אופיין מעבר של מגבר בחוג פתוח

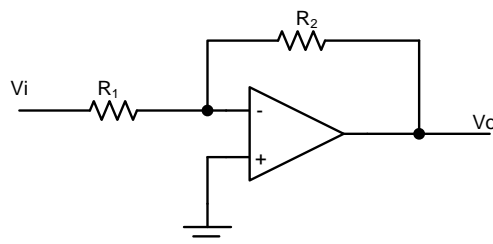
כפי שניתן לראות, המעבר בין רוויה שלילית וחיובית אינו מתרחש בדיוק כאשר  $V_i = 0 V$ .

אם נסתכל על אופיין המעבר של מעגל בחוג סגור נקבל אופיין בעל שיפוע קטן יותר, כמתואר באיור 3-ג:



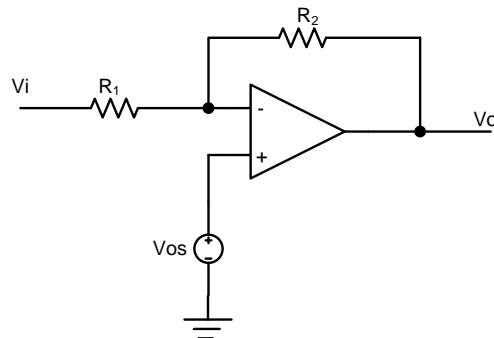
איור 3-ג השפעת מתח היסט על אופיין מעבר של מגבר בחוג סגור

ככל שההגבר בחוג סגור  $A_{cl}$  גדול יותר, מתח המוצא הנובע ממתח ההיסט יהיה גדול יותר. נתבונן על מעגל מגבר הופך מופע המתואר באיור 3-ד:



איור 3-ד מגבר הופך מופע

נבחן את השפעת מתח ההיסט. נחליף את מגבר שרת במגבר שרת אידיאלי ומקור מתח DC המייצג את מתח ההיסט כמתואר באיור 3-ה:



איור 3-ה מגבר הופך מופע עם מתח היסט

ע"י סופרפוזיציה נקבל:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{os}$$

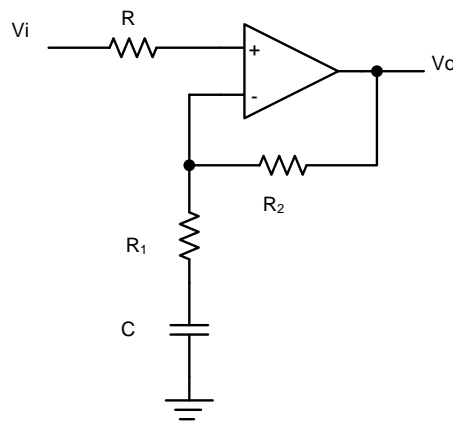
כלומר עבור  $V_i = 0V$  נקבל:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{os}$$

ככל שהמגבר בחוג סגור  $\left(-\frac{R_2}{R_1}\right)$  גדול יותר, כך מתח המוצא הנובע ממתח  $V_{os}$  יהיה גדול יותר.

### קיצוז מתח היסט

ברוב המקרים, ובמיוחד כאשר אות מבוא הוא אות גדול יחסית לערכו של מתח ההיסט, השפעת מתח  $V_{os}$  על ביצועי המעגל תהיה זניחה. בנוסף לכך קיימים מגברים מדויקים בעלי מתחי היסט נמוכים ביותר, ואז השפעת מתחי היסט על מתח המוצא תהיה נמוכה ביותר. דרך נוספת להקטין את השפעת מתחי היסט הוא לבנות מגבר ac. מכיון ומתח ההיסט הוא מתח DC, ניתן לבטל את השפעתו ע"י צימוד ac המתבצע ע"י קבלים. דרך זו טובה רק כאשר המגבר מיועד למתחי ac בלבד. מגבר ac מתואר באיור 3-ו:



איור 3-ו מגבר ac

ההגבר של המגבר שווה ל:

$$A_{CL} = 1 + \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}}$$

ומכוון ועבור אותות DC עכבה של קבל  $\frac{1}{j\omega C}$  שווה לאינסוף, ההגבר של אות DC יהיה שווה ל- 1 וההגבר של אות חילופין יהיה:

$$A_{ac} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

אות חילופין יוגבר ואילו מתח ההיסט יישאר בערכו המקורי ולכן השגיאה של מתח ההיסט קטנה יחסית ככל שהגבר ac גדול יותר.

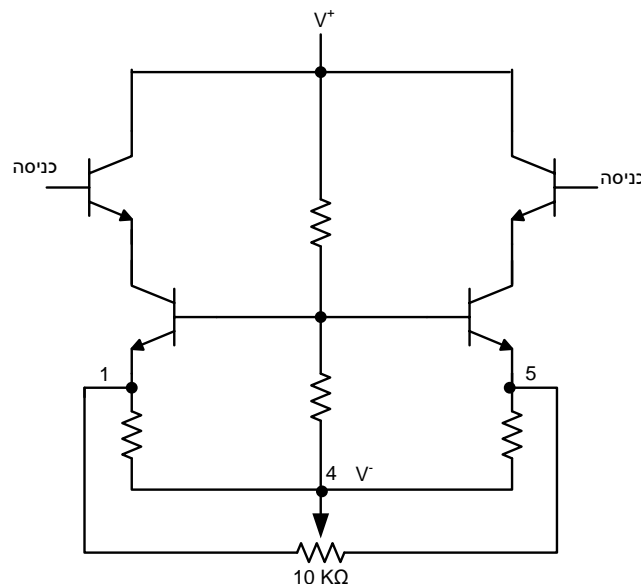
### רשתות קיזוז

ראינו 2 דרכים לביטול השפעת מתחי היסט:

- שימוש במגבר מדויק עם מתחי היסט זניחים
- בניית מגבר ac

במקרים בהם לא ניתן להשתמש במגבר איכותי (ויקר...) או במקרים בהם נדרשת הגברה של אותות DC ו- ac, יש לבצע קיזוז של מתח ההיסט ע"י רכיבים חיצוניים שמחוברים למגבר.

במגברים רבים (LM741, TL081, ...LF411) קיימים הדקי קיזוז מיוחדים (הדק 1 והדק 5). היצרן ממליץ לחבר בין ההדקים הנ"ל פוטנציומטר  $10\text{ K}\Omega$ , כאשר את הזחלן מחברים למתח אספקה שלילי (הדק 4). עקרון הקיזוז מתואר באיור 3-2:

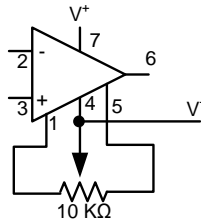


איור 3-2 קיזוז מתח היסט במגבר שרת

שינוי מצב הזחלן יגרום לשינוי מאזן הזרמים. איזון הזרמים יביא לביטול אי סימטריה בדרגת ההפרש.



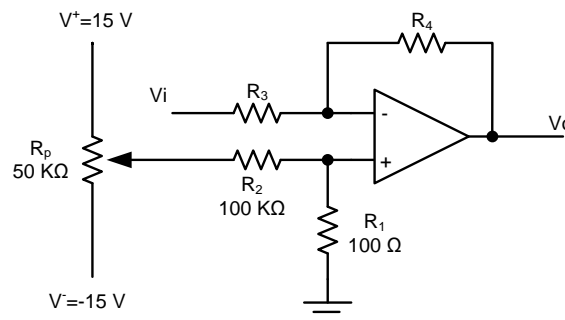
חיבור פוטנציומטר למגבר שרת מתואר באיור 3-ה:



איור 3-ה קיזוז מתח היסט ע"י חיבור פוטנציומטר להדקים 1, 5

לצורך הקיזוז מאפסים את כניסות המעגל (ולא את כניסות המגבר). ע"י מדידת מתח במוצא ניתן לכייל את הפוטנציומטר למצב בו  $V_o = 0 V$ .

במגברים בהם אין הדקי קיזוז מיוחדים ניתן לחבר רשתות קיזוז שונות. רשתות אלה נתונות בדרך כלל ע"י היצרן. באיור 3-ט מתוארת שיטה לקיזוז מתחי היסט במגבר הופך מופע:



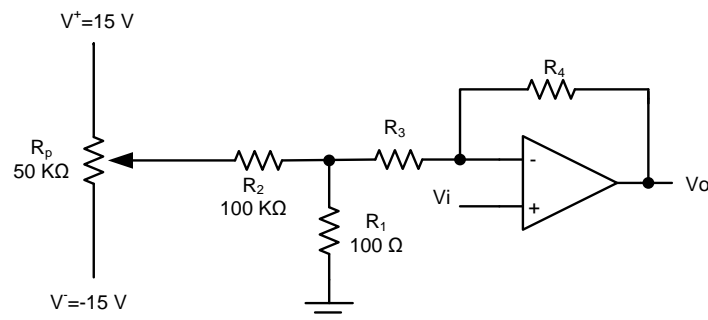
איור 3-ט קיזוז מתח היסט במגבר הופך מופע

המתחים בכניסה הלא הופכת נעים בגבולות:

$$-15mV < V_{(+)} < +15mV$$

תחום זה מספיק כדי לקזוז את מתח ההיסט ברוב המגברים. ניתן לשנות את תחום המתחים ע"י שינוי נגד  $R_1$ .

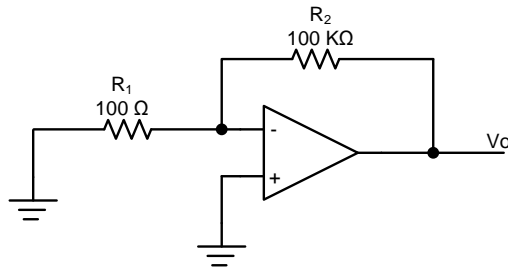
ניתן לבצע קיזוז מתח ההיסט גם בהדק כניסה הופכת. באיור 3-י מתואר מגבר עוקב מופע עם רשת לקיזוז מתח ההיסט:



איור 3-י קיזוז מתח היסט במגבר עוקב מופע

## מדידת מתח היסט

ניתן למדוד את מתח ההיסט במבוא Input Offset Voltage ע"י מדידת מתח המוצא במגבר בהעדר אות מבוא. בגלל גודלו הקטן של מתח ההיסט נבנה מגבר בעל הגבר גבוה כמתואר באיור 3-יא:



איור 3-יא מעגל למדידת מתח היסט  $V_{os}$

המתח במוצא המעגל שווה ל:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{os} = \left(1 + \frac{100}{0.1}\right) \cdot V_{os} = 1001 \cdot V_{os}$$

המתח שמתקבל במוצא יהיה בסדר גודל של וולטים ולא נתקשה למדוד אותו. ע"י חלוקת מתח המוצא בהגבר המעגל נקבל את הערכו של מתח ההיסט  $V_{os}$ .

### 3.3 זרמי ממתח וזרם היסט

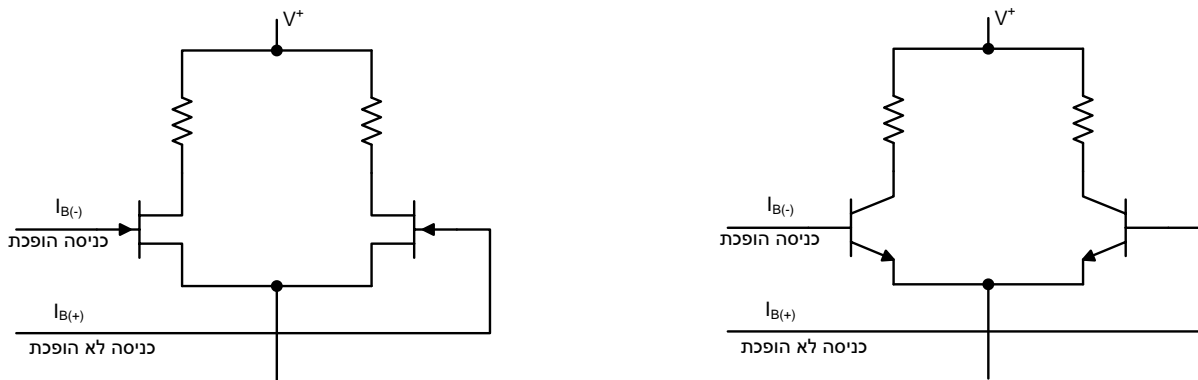
עד עכשיו הנחנו שלתוך כניסות של מגבר שרת לא זרם זרם. הדרגה הראשונה של מגבר שרת היא דרגת הפרש. דרגה זו בנויה בדרך כלל ע"י דרגת דרלינגטון במגברי שרת ביפולריים או ע"י טרנזיסטורי FET במגברים עם כניסות JFET, ולכן הזרמים הנכנסים לתוך הכניסות קטנים מאוד. בגלל אי תאום בין טרנזיסטורי המבוא, זרם שנכנס לכניסה ההופכת של המגבר אינו שווה לזרם שנכנס לכניסה הלא הופכת של המגבר. מכיוון והזרמים האלה גורמים להפעלת הטרנזיסטורים באזור הפעיל הם נקראים זרמי ממתח Bias Current.

נשרטט את הדרגה הראשונה של מגבר שרת ונסמן את הזרמים הנכנסים:

$I_{B(-)}$  - זרם הנכנס לכניסה הופכת

$I_{B(+)}$  - זרם הנכנס לכניסה הלא הופכת

כמתואר באיור 3-:



איור 3-א דרגת מבוא של מגבר שרת

מעשית הזרמים  $I_{B(-)}$  ו-  $I_{B(+)}$  אינם זהים. נגדיר את הממוצע בין הזרמים הנ"ל כזרם ממתח Bias Current ונסמנו כ-  $I_B$ :

$$I_B = \frac{I_{B(-)} + I_{B(+)}}{2}$$

גודלו של זרם זה הוא בגבולות  $(1nA \div 1\mu A)$  במגברים ביפולריים וכ-  $1 pA$  במגברי שרת עם כניסות FET.

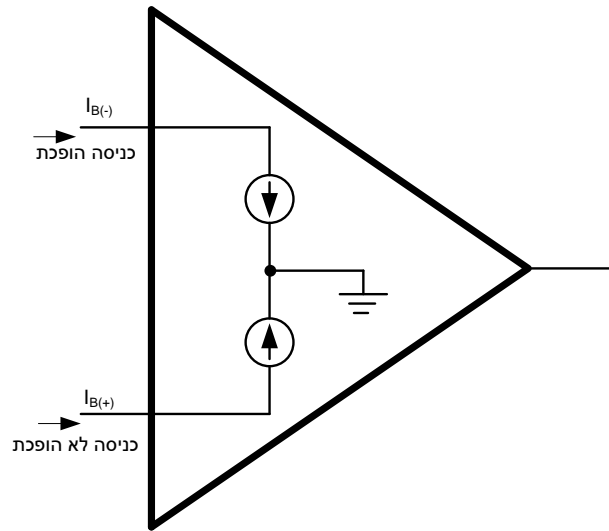
ההפרש בין זרמי הממתח מוגדר כזרם היסט Offset Current ומסמן כ-  $I_{os}$ :

$$I_{os} = |I_{B(+)} - I_{B(-)}|$$

היצרנים מציינים את ערכם של הזרמים  $I_B, I_{os}$  בטמפרטורה  $25^\circ C$  ובתחום מלא של טמפרטורות עבודה. מתוך דפי יצרן ניתן לראות שהיחס  $\frac{I_B}{I_{os}}$  שווה בערך ל- 4 במגברי שרת עם כניסות ביפולריות.

- עמוד 27 - מגברי שרת 1 חומר רקע

כדי לבחון את השפעת זרמי הממתח על מתח המוצא נבנה מודל לזרמי הממתח. איור 3- מתאר את מגבר השרת עם זרמי הממתח:

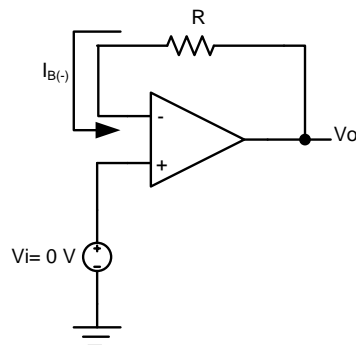


איור 3-ב מודל של מגבר שרת עם זרמי הממתח

בניתוח המעגל נניח כי יתר תכונות המגבר אידיאליות.

### השפעת זרם $I_{B(-)}$ על מתח המוצא

באיור 3- מתואר חוצץ פשוט:



איור 3-ג השפעת זרם  $I_{B(-)}$  על מתח המוצא

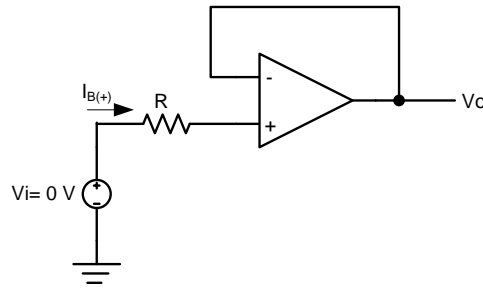
המשוב השלילי גורם לשוויון מתחי המבוא של המגבר, ולכן אם  $V_i = 0V$ , מתח המוצא שווה:

$$V_o = R \cdot I_{B(-)}$$

### השפעת זרם $I_{B(+)}$ על מתח המוצא

נבחן את השפעת זרם  $I_{B(+)}$  במעגל חוצץ המתואר ב

איור 3-ד:



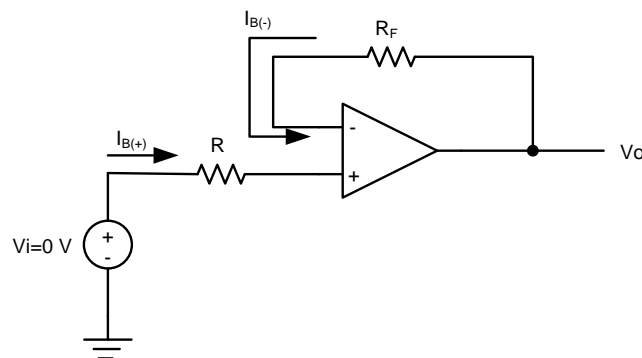
איור 3-2 השפעת זרם  $I_{B(+)}$  על מתח המוצא

מכוון ו-  $V_i = 0 \text{ V}$ , המתח במוצא צריך להיות שווה לאפס (בהנחת מגבר שרת אידיאלי). בגלל שזרם  $I_{B(+)}$  הזורם דרך התנגדות R, נוצר מפל מתח על הנגד ולכן המתח במוצא יהיה:

$$V_o = -I_{B(+)} \cdot R$$

### השפעת זרם $I_{os}$ על מתח המוצא

מכוון והזרמים  $I_{B(-)}$  ו-  $I_{B(+)}$  כמעט זהים, ניתן ע"י בחירה נכונה של נגדים לצמצם את השפעת הזרמים על מתח המוצא. נבחר מעגל עוקב מתח המתואר באיור 3-3:



איור 3-3 השפעת זרם  $I_{os}$  על מתח המוצא

מתוך ניתוח המעגל נקבל:

$$V_o = -R \cdot I_{B(+)} + R_F \cdot I_{B(-)}$$

אם נניח שהזרמים  $I_{B(-)} = I_{B(+)}$  נראה שתנאי לאיפוס מתח המוצא הוא  $R = R_F$ . בכל מקרה השפעת זרמי ממתח מצטמצמת להשפעת זרמי היסט שהם נמוכים יותר. הכלל אומר שכדי לקזז את השפעת זרמי הממתח יש לדאוג שהתנגדות DC הנראית מהדקי המבוא (הדק כניסה הופכת והדק כניסה לא הופכת) של המגבר תהיה זהה.

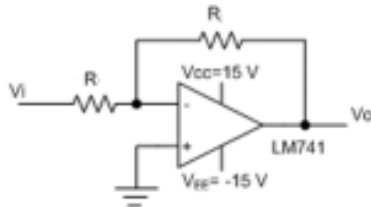
דרך נוספת להקטנת השפעת זרמי ממתח היא לבחור מגברי שרת עם כניסות FET. זרם הזורם לתוך השער של טרנזיסטור FET הוא קטן ביותר.

ראינו שהשפעת זרמי ממתח היא יחסית לגודלם של הנגדים דרכם זורם הזרם. הקטנת ערך הנגדים תקטין את השפעת זרמי הממתח.

### 3.4 זרם מוצא מירבי $I_{o(max)}$

## מגברי שרת - ניסוי 1

מטרת הניסוי: לבדוק מהו תחום הערכים האופטימלי של נגדי המגבר



נתון המעגל שבציור שהגברו 1-  
אות הכניסה,  $V_i$ , סינוס בעל אמפליטודה 20Vpp.

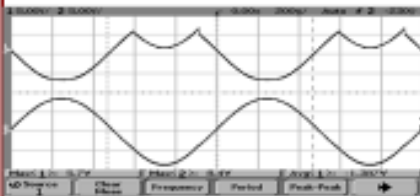
1. נבחר  $R = 220\Omega$

הזרם ביציאת המגבר כאשר  $V_i = \pm 10V$

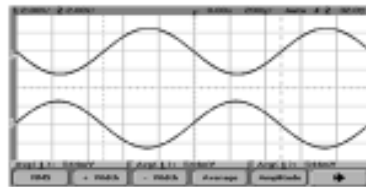
$$I_R = (V_i - V_o) / 2R = \pm 20 / 440 = \pm 45mA$$

לפי דף הנתונים של המגבר, זרם זה גדול מהזרם המכסימלי שיציאת המגבר יכולה להזרים.

Electrical Characteristics (Note 3) (Continued)										
Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C		
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ C$ $T_{AMB} \leq T_A \leq T_{MAX}$	10	25	35		25			25	
		10		40						



בגלל מגבלת זרם מכסימלי, נקבל ביציאה אות מעוות.



ללא מגבלת זרם מכסימלי, היינו מקבלים:

6

## 4 תגובת תדר של מגבר שרת

### 4.1 התיאור הגרפי של תגובת התדר

במערכות שמע הביצועים של המעגלים מתוארים בדרך כלל ע"י תיאור תגובת תדר. תגובת תדר של המערכת מתארת את ההגבר בערך מוחלט  $|A|$  (בדרך כלל הגבר מתח  $A_v$ ), ואת הפרש המופע שנוצר בין מתח המבוא למתח המוצא כפונקציה של תדר. בדרך כלל התיאור הוא לתחום רחב מאוד של תדרים (לדוגמא: תחום השמע נע בין 20 Hz עד 20000 Hz, כלומר היחס בין התדר הגבוה ביותר והנמוך ביותר הוא 1000:1). אם נרצה לתאר גרפית את תגובת האוזן האנושית נצטרך נייר מאוד ארוך לתיאור כל התחום. על מנת "לדחוס" תחום רחב של תדרים משתמשים בסקלה לוגיריתמית. המרווחים בין התדרים מוגדרים בדקדוק, כאשר דקדה Decade הוא מרווח בין שני תדרים  $f_1$  ו-  $f_2$  בעלי יחס

$$\frac{f_2}{f_1} = 10. \text{ כך מרווח בין } 20 \text{ Hz ל- } 20000 \text{ Hz מורכב מ-3 דקדות בלבד:}$$

$$\begin{aligned} &20 \div 200 \\ &200 \div 2000 \\ &2000 \div 20000 \end{aligned}$$

ההגבר של המערכת יכול להשתנות בצורה קיצונית בתדרים שונים. גם כאן יש צורך ב"דחיסה" על מנת לאפשר תיאור ההגבר בצורה גרפית. פעולת הדחיסה נעשית ע"י שימוש ביחידות דציבלים Decibel.

הגדרת הגבר מתח ביחידות דציבלים היא:

$$A_v(dB) = 20 \cdot \log_{10} A_v$$

ולכן:

$$0.1 \Leftrightarrow -20 \text{ dB}$$

$$1 \Leftrightarrow 0 \text{ dB}$$

$$10 \Leftrightarrow 20 \text{ dB}$$

$$100 \Leftrightarrow 40 \text{ dB}$$

$$1000 \Leftrightarrow 60 \text{ dB}$$

כלומר תחום ההגברים 10000:1 מתואר בעזרת יחידות חדשות בסקלה ליניארית בין -20 לבין +60 דציבלים.

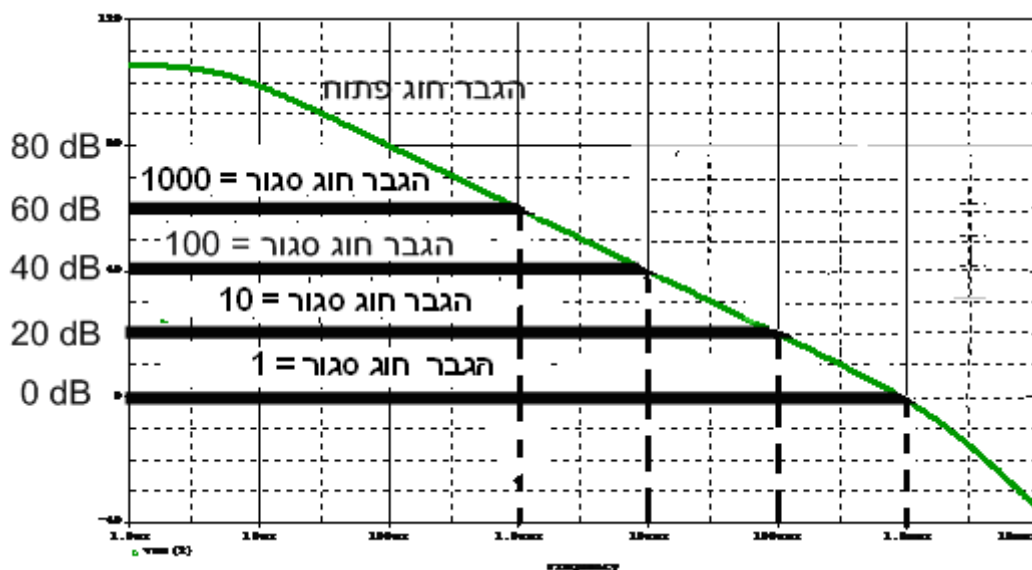
יחידות דציבל שימושיות מאוד למדידות עוצמות רעש – שוב בגלל התחום הדינמי העצום.

גרף תגובת התדר הוא תיאור ההגבר ביחידות dB וזווית כפונקציה של תדר.

## 4.2 רוחב סרט - Bandwidth

מגבר שרת הוא מגבר DC כלומר ההגבר המירבי שלו הוא בתדרים הנמוכים. מתברר שהחל מתדר  $f_1$  (מאוד נמוך – ערך אופייני 10 Hz) ההגבר בחוג פתוח של המגבר יורד בקצב קבוע עד לתדר  $f_2$  (גבוה מאוד – סדר גודל של MHz). בגלל שההגבר בתדר נמוך הוא מאוד גבוה והירידה בהגבר היא בקצב 20 dB/dec (כלומר התקדמות מתדר מסוים  $f$  לתדר  $10 \cdot f$  מלווה בהנחתה פי 10), ניתן להשתמש במגבר גם להגברת אותות ac, כל עוד נוכל להניח כי  $A \cdot \beta \gg 1$ .

תיאור ההגבר בחוג פתוח של מגבר שרת LM741 מתואר באיור 4-א:



איור 4-א הגבר בחוג פתוח של מגבר שרת LM741

מתוך הגרף רואים שתגובת תדר של מגבר שרת מגבילה את רוחב הסרט של המעגלים בחוג סגור. על הגרף שבאיור 4-א מתוארים קווי הגבר עבור מעגלים בעלי הגבר (בחוג סגור) של 10, 100, 1000 ו-1. ההשפעה של הגבלת תדר של המגבר מתחילה בתדר בו האופיין של ההגבר בחוג פתוח נחתך עם ההגבר בחוג סגור. בנקודת החיתוך תהיה הנחתה של 3 dB - כלומר ההגבר בתדר זה יורד ל-

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \text{ מערכו המקורי.}$$

נפתח את הקשר בין רוחב סרט של מעגל בחוג סגור, רוחב סרט של מגבר שרת בחוג פתוח, הגבר של המעגל בחוג סגור בתדרים נמוכים והגבר של המגבר שרת בחוג פתוח בתדרים נמוכים.  
נגדיר:

$BW_{CL}$  - רוחב סרט של מעגל בחוג סגור.

$BW_{OL}$  - רוחב סרט של מגבר שרת בחוג פתוח.

$A_{CL}(0)$  - הגבר של המעגל בחוג סגור בתדרים נמוכים (DC).

$A_{OL}(0)$  - הגבר של המגבר שרת בחוג פתוח בתדרים נמוכים (DC).

בהנחה שלמגבר שרת יש קוטב דומיננטי בתדר  $f_{OL}$ , נוכל לרשום את פונקציית תמסורת של המגבר שרת כ:

$$A_{OL}(f) = A_{OL}(0) \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{OL}}}$$

רוחב סרט של החוג הסגור ניתן לחשב מתוך נוסחת המשוב:

$$\begin{aligned} A_{CL}(f) &= \frac{A_{OL}(f)}{1 + \beta \cdot A_{OL}(f)} = \frac{A_{OL}(0) \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{OL}}}}{1 + \beta \cdot A_{OL}(0) \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{OL}}}} = \frac{A_{OL}(0)}{1 + j \frac{f}{f_{OL}} + \beta \cdot A_{OL}(0)} = \\ &= \frac{A_{OL}(0)}{1 + \beta \cdot A_{OL}(0)} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{OL} \cdot (1 + \beta \cdot A_{OL}(0))}} = A_{CL}(0) \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{CL} \cdot (1 + \beta \cdot A_{OL}(0))}} \end{aligned}$$

מכאן שתדר מחצית ההספק של החוג הסגור שווה ל:

$$f_{CL} = f_{OL} \cdot (1 + \beta \cdot A_{OL}(0))$$

$$1 + \beta \cdot A_{OL}(0) = \frac{f_{CL}}{f_{OL}}$$

לפי משוואת המשוב:



$$A_{CL}(0) = \frac{A_{OL}(0)}{1 + \beta \cdot A_{OL}(0)}$$

$$1 + \beta \cdot A_{OL}(0) = \frac{A_{OL}(0)}{A_{CL}(0)}$$

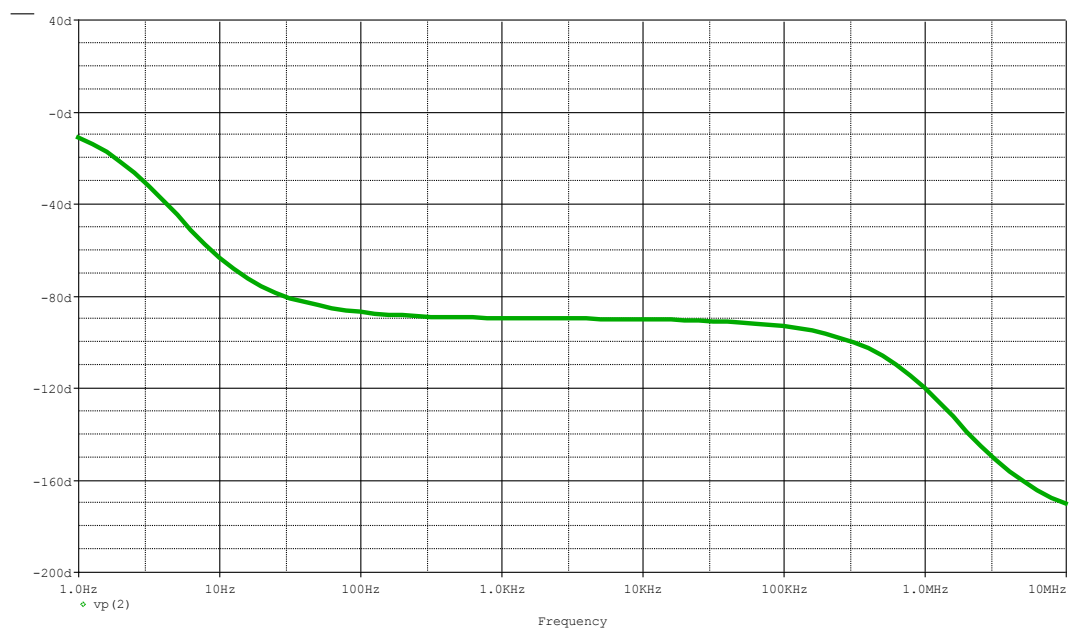
נציב את הביטוי ליחס התדרים:

$$1 + \beta \cdot A_{OL}(0) = \frac{A_{OL}(0)}{A_{CL}(0)} = \frac{f_{CL}}{f_{OL}} = \frac{BW_{CL}}{BW_{OL}}$$

$$A_{OL}(0) \cdot BW_{OL} = A_{CL}(0) \cdot BW_{CL}$$

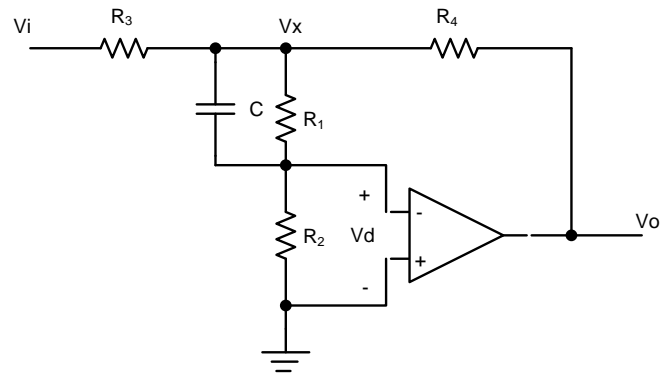
בניסוי נוכיח שככל שהגבר בחוג סגור גבוה יותר כך רוחב הסרט של המגבר קטן.

בנוסף להגבר בחוג פתוח שקטן ככל שהתדר עולה, זווית המופע בין אות מבוא לאות המוצא משתנה גם כפונקציה של תדר. באיור 4-ב מתוארת תגובת זווית של מגבר שרת בחוג פתוח.



איור 4-ב תגובת תדר של זווית של מגבר LM741

מעגל המאפשר למדוד את הגבר המגבר בחוג פתוח מתואר באיור 4-ג:



איור 4-ג מדידת הגבר בחוג פתוח

כדי למדוד את ההגבר בחוג פתוח יש לחבר למבוא מתח סינוסי באמפליטודה גדולה ותדר יחסית נמוך, למדוד את המתחים  $V_o$  ו-  $V_x$ . נוכל לרשום:

$$V_d = V_x \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (R_2 \ll R_1)$$

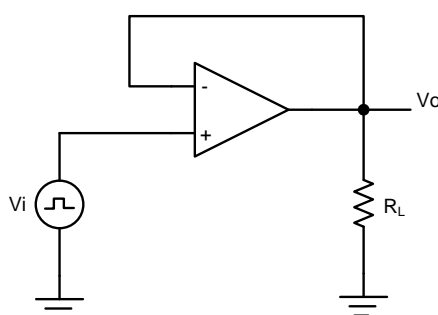
$$A_{OL} = \frac{V_o}{V_d}$$

### 3.5 תגובת המגבר לשינוי באות הכניסה - Slew Rate

כמו כל רכיב אלקטרוני, גם מגבר שרת אינו מסוגל להגיב בזמן אפס לשינויים, ולכן כאשר במבוא מופיע גל ריבועי, מתח המוצא משתנה בצורה רציפה. כאשר קצב שינוי מתח במבוא עולה על קצב מירבי של שינוי מתח במוצא, גל המוצא המתקבל יהיה עם עיוותים. קצב מירבי בו מתח המוצא יכול להשתנות נקרא Slew Rate.

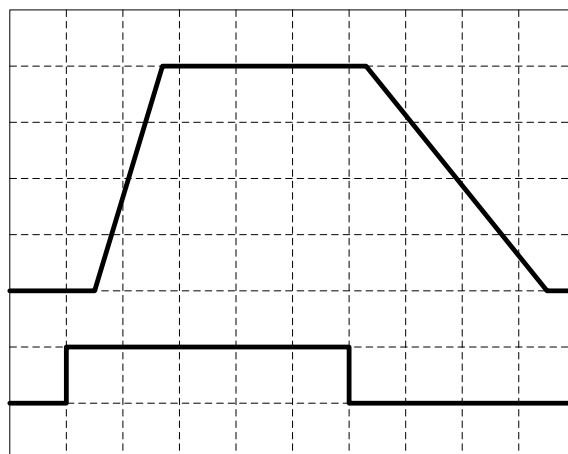
$$Slew\ Rate = \left( \frac{dV_o(t)}{dt} \right)_{\max}$$

השיטה הפשוטה ביותר למדוד S.R היא לבנות מגבר חוצץ ובמבוא לחבר גל ריבועי, כמתואר באיור איור 4-7:



איור 4-ה מדידת Slew Rate

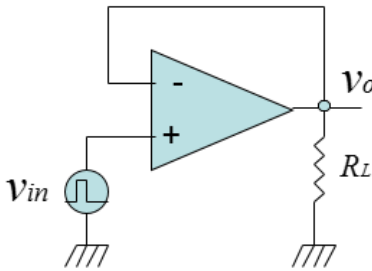
במבוא נחבר גל ריבועי עם אמפליטודה 10 V, נעלה את התדר עד למצב בו במוצא הגל מקבל צורה של גל טרפזי המתואר באיור 4-1 ואז נמדוד את קצב העליה וקצב הירידה. הקצב האיטי מביניהם הוא ה-Slew Rate של המגבר.



איור 4-1 צורת גל במוצא למדידת Slew Rate

### 4.3 מדידת Slew Rate

מודדים בעזרת המעגל הבא:



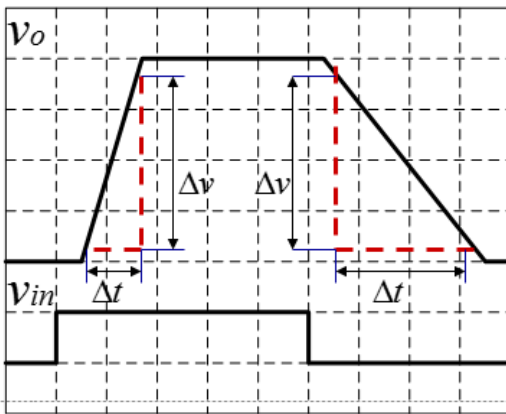
אות הכניסה הוא מעבר מהיר בעליה ובירידה.  
אות היציאה עובר מרוויה שלילית לחיובית  
ומרוויה חיובית לשלילית בהתאמה.

מודדים את השיפועים של המעברים  
בשני הכיוונים:

$$S.R. = \text{Slew Rate} = \frac{\Delta v}{\Delta t} [v/\mu \text{sec}]$$

מודדים ע"י: risetime, cursors: Quick Meas

ככל ש- S.R. גדול, העקיבה טובה יותר.  
מבין 2 הערכים מתחשבים בקטן משום  
שזהו ה- Worst Case.



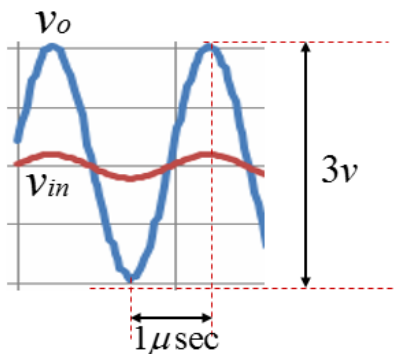
### 4.4 איך משפיע ה- S.R. על אות המוצא?

דוגמא: נתון  $S.R. = 5 v/\mu \text{sec}$

1. אם קצב העלייה הצפוי של המוצא, קטן מה- S.R.

$$\frac{3v}{1\mu \text{sec}} < S.R., \text{ אין בעיית עקיבה}$$

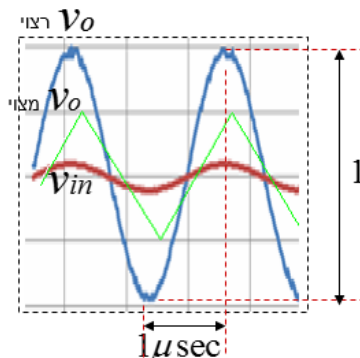
ואות המוצא יתקבל ללא עוות.



2. אם קצב העלייה הצפוי של המוצא, גדול מה- S.R.

$$\frac{10v}{1\mu \text{sec}} > S.R., \text{ של המגבר, אות המוצא לא יצליח}$$

לעקוב אחר אות הכניסה (מוכפל בהגבר) ויתקבל אות מעוות.



## 4 השוואת מגברים LM741, LF411

בטבלה הבאה מתוארים הפרמטרים העיקריים של שני המגברים וערכים טיפוסיים שלהם:

פרמטר	שם פרמטר	LM741	LF411
$V_{IO}$	מתח היסט	1 mV	0.8 mV
$I_{OS}$	זרם היסט	20 nA	25 pA
$I_{IB}$	זרם ממתח	80 nA	50 pA
$A_{OL}$	הגבר חוג פתוח	20000	200000
$R_i$	התנגדות מבוא	2 MΩ	$10^{12}$
CMRR		90 dB	100 dB
PSRR		90.5 dB (30 μV/V)	100 dB (10 μV/V)
S.R.		0.5 V/μsec	13 V/μsec
Unity Gain Bandwidth $f_u$		1 MHz	3 MHz

## 5 ביבליוגרפיה

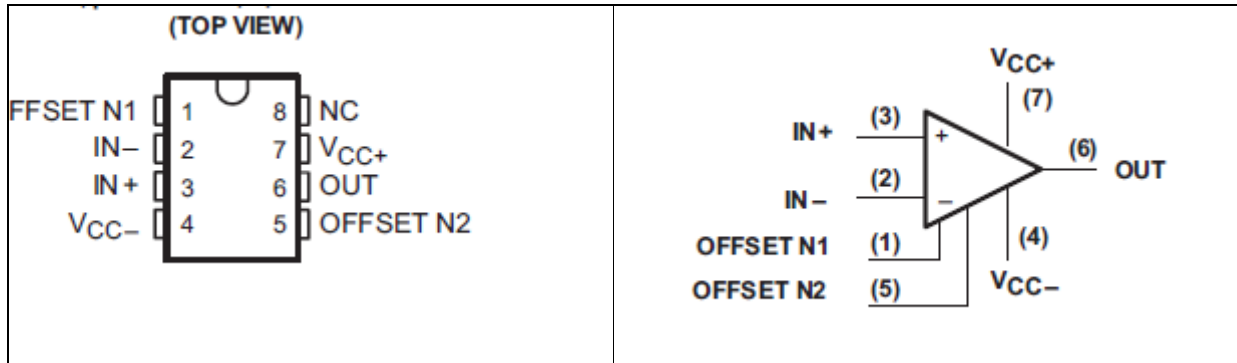
מגברי שרת:

מגבר שרת – תאוריה – יאן לרון – הוצאת שורת  
מגברי שרת – תרגילים ופתרונות – חלק א' – שלמה הימלברנט ויאן לרון – הוצאת שורש  
מגברי שרת – תרגילים ופתרונות – חלק ב' - שלמה הימלברנט ויאן לרון – הוצאת שורש

- Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits - 2ed – Sergio Franco – Mc-Graw Hill
- Intuitive Operational Amplifiers -2ed - Thomas Frederiksen– Mc-Graw Hill

## 6 נספח א - הסבר דפי יצרן של מגבר שרת $\mu A741$

### 6.1 מגברי שרת $UA741$ / $LF411$

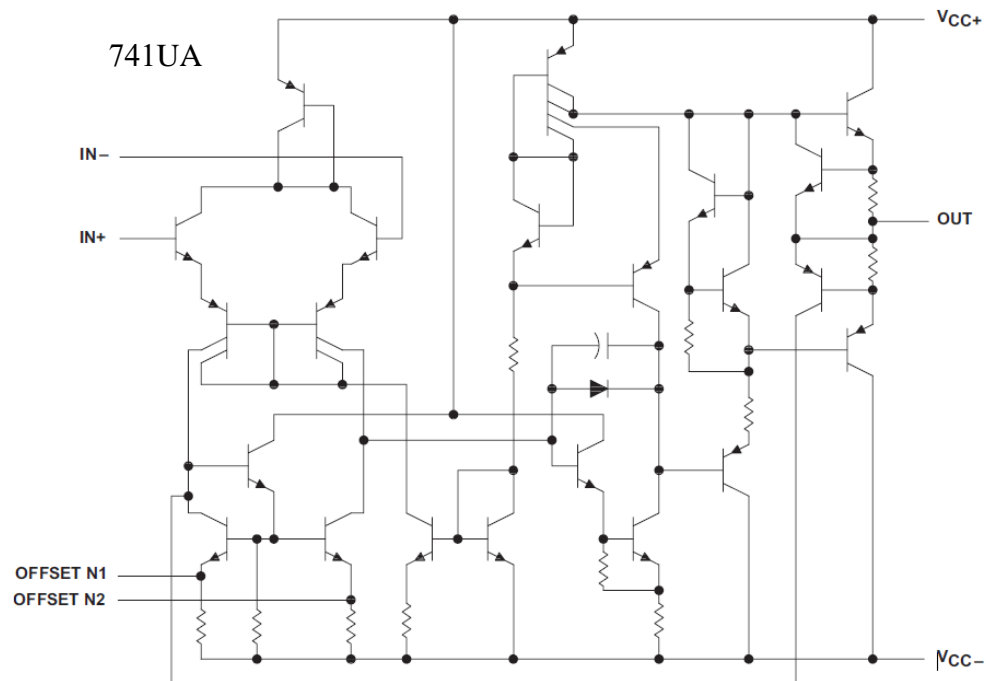


<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf411.pdf>

שני מגברי שרת זהים ב PINOUT האחד לתדר נמוך 741 והשני לתדר גבוה 411, הערה: האותיות מתארות את היצרן והן חסרות משמעות

#### 8.2 Functional Block Diagram



דף 1

# $\mu$ A741, $\mu$ A741Y GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS094A – NOVEMBER 1970 – REVISED JANUARY 1992

- Short-Circuit Protection
- Offset-Voltage Null Capability
- Large Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- No Frequency Compensation Required
- Low Power Consumption
- No Latch-Up
- Designed to Be Interchangeable With Fairchild  $\mu$ A741

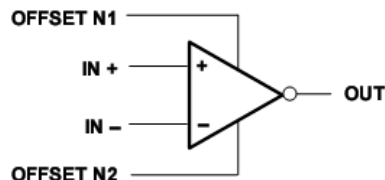
## description

The  $\mu$ A741 is a general-purpose operational amplifier featuring offset-voltage null capability.

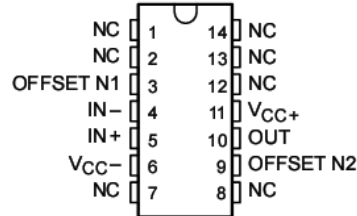
The high common-mode input voltage range and the absence of latch-up make the amplifier ideal for voltage-follower applications. The device is short-circuit protected and the internal frequency compensation ensures stability without external components. A low value potentiometer may be connected between the offset null inputs to null out the offset voltage as shown in Figure 2.

The  $\mu$ A741C is characterized for operation from 0°C to 70°C. The  $\mu$ A741I is characterized for operation from -40°C to 85°C. The  $\mu$ A741M is characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C.

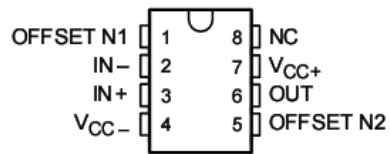
## symbol



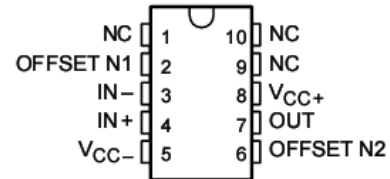
$\mu$ A741M ... J PACKAGE  
(TOP VIEW)



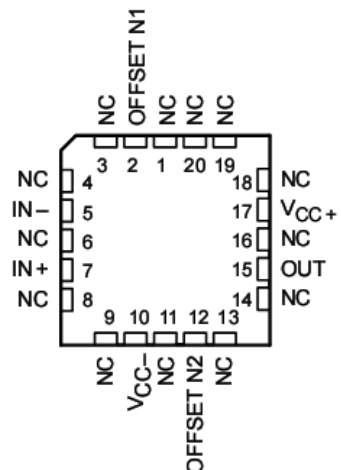
$\mu$ A741M ... JG PACKAGE  
 $\mu$ A741C,  $\mu$ A741I ... D, P, OR PW PACKAGE  
(TOP VIEW)



$\mu$ A741M ... U PACKAGE  
(TOP VIEW)



$\mu$ A741M ... FK PACKAGE  
(TOP VIEW)



בדף הראשון מפורטות התכונות הבסיסיות של מגבר שרת  $\mu A741$  (קידומת  $\mu A$  מסמנת רכיב של חברת Fairchild שפתחה את הרכיב).

### :Short Circuit Protection

הגנה מפני קצר במוצא. בזמן קצר מופעל מעגל המגביל את זרם המוצא ולכן הרכיב לא נשרף.

### :Offset Voltage Null Capability

אפשרות לקזז את מתחי ההיסט (ע"י חיבור פוטנציומטר  $10 K\Omega$  בין רגלים 1 ו-5. הזחלן של הפוטנציומטר מחובר למתח הספקה שלילי- רגל 4).

### :Large Common Mode and Differential Voltage Ranges

לרכיב 741 יש תחום רחב מאוד של מתחים משותפים ומתחי הפרש שניתן לחבר בין כניסות המגבר.

### :No Frequency Compensation Required

רכיב 741 שייך למשפחת מגברי שרת בעלי קיזוז (פיצוי) פנימי של תגובת תדר. קיזוז זה נוצר הודות לקבל פנימי הנמצא בתוך הרכיב. ברכיבים אחרים ישנם הדקים מיוחדים לחיבור קבל חיצוני (לדוגמא מגבר LM301 של חברת National Semiconductors).

### :Low Power Consumption

צריכת הספק נמוכה

### :No Latch Up

הרכיב לא "ננעל" - הסרת קצר במוצא מחזירה את הרכיב לפעולה רגילה

## דף 2

AVAILABLE OPTIONS								
TA	PACKAGED DEVICES							CHIP FORM (Y)
	SMALL OUTLINE (D)	CHIP CARRIER (FK)	CERAMIC DIP (J)	CERAMIC DIP (JG)	PLASTIC DIP (P)	TSSOP (PW)	FLAT PACK (U)	
	0°C to 70°C	uA741CD				uA741CP	uA741CPW	
-40°C to 85°C	uA741ID				uA741IP			
-55°C to 125°C		uA741MFK	uA741MJ	uA741MJG			uA741MU	

הדף השני מכיל מידע על טמפרטורות סביבה  $T_A$  (A- Ambient) בהן מותר להפעיל את הרכיבים.

- רכיבים אזרחיים ניתן להפעיל בתחום טמפרטורות סביבה  $0 \div 70^\circ C$ .
- רכיבים תעשייתיים ניתן להפעיל בתחום טמפרטורות סביבה  $-40 \div 85^\circ C$ .
- רכיבים צבאיים ניתן להפעיל בתחום טמפרטורות סביבה  $-55 \div 125^\circ C$ .

החלוקה מתבצעת לפי המספור שמצטרף לרכיב. האריזות השונות מפורטות בעמוד 1.

בעמוד זה מתוארת גם סכמה פנימית של הרכיב.

## דף 3

בדף זה מפורטים נתוני מעגל משולב של הרכיב. מתוארת ה"מסכה" של הרכיב וההדקים השונים של הרכיב. טמפרטורת צומת מירבית (TJ - Junction Temperature) היא  $150^\circ C$ .



**absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>†</sup>**

	μA741C	μA741I	μA741M	UNIT
Supply voltage, $V_{CC+}$ (see Note 1)	18	22	22	V
Supply voltage, $V_{CC-}$ (see Note 1)	-18	-22	-22	V
Differential input voltage, $V_{ID}$ (see Note 2)	±15	±30	±30	V
Input voltage, $V_I$ any input (see Notes 1 and 3)	±15	±15	±15	V
Voltage between offset null (either OFFSET N1 or OFFSET N2) and $V_{CC-}$	±15	±0.5	±0.5	V
Duration of output short circuit (see Note 4)	unlimited	unlimited	unlimited	
Continuous total power dissipation	See Dissipation Rating Table			
Operating free-air temperature range, $T_A$	0 to 70	-40 to 85	-55 to 125	°C
Storage temperature range	-65 to 150	-65 to 150	-65 to 150	°C
Case temperature for 60 seconds	FK package			260 °C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds	J, JG, or U package			300 °C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	D, P, or PW package			260 °C

דף זה מכיל טבלה ובה מפורטים הערכים המירביים שניתן לחבר לרכיב מבלי לגרום לו נזק בלתי הפיך.

מפורטים הגדלים הבאים:

$V_{cc+}$	מתח הספקה חיובי
$V_{cc-}$	מתח הספקה שלילי
$V_{ID}$	מתח הפרשי בין כניסות המגבר
$V_i$	מתח בכניסה כלשהי
	מתח מירבי בין הדקים לקיזוז מתח היסט (הדקים 1 ו-5) ובין מתח הספקה שלילי.
$T_A$	טמפרטורת הסביבה בה ניתן להפעיל את הרכיב.
$T_s$	טמפרטורת אחסנה - טמפרטורה בה ניתן לאחסן את הרכיב
$T_c$	טמפרטורת אריזה Case Temperature לזמן קצר (בזמן הלחמה)
	טמפרטורת הדקים מירבית לזמן קצר (בזמן הלחמה)

**DISSIPATION RATING TABLE**

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR	DERATE ABOVE $T_A$	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 85^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 125^\circ\text{C}$ POWER RATING
D	500 mW	5.8 mW/°C	64°C	464 mW	377 mW	N/A
FK	500 mW	11.0 mW/°C	105°C	500 mW	500 mW	275 mW
J	500 mW	11.0 mW/°C	105°C	500 mW	500 mW	275 mW
JG	500 mW	8.4 mW/°C	90°C	500 mW	500 mW	210 mW
P	500 mW	N/A	N/A	500 mW	500 mW	N/A
PW	525 mW	4.2 mW/°C	25°C	336 mW	N/A	N/A
U	500 mW	5.4 mW/°C	57°C	432 mW	351 mW	135 mW

בטבלה השנייה המופיעה בעמוד 4 מפורט הספק פיזור מירבי לפי אריזות הרכיבים וטמפרטורות שונות.

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	T <sub>A</sub> †	μA741C		μA741L, μA741M		UNIT		
				MIN	TYP	MAX	MIN		TYP	MAX
V <sub>IO</sub>	Input offset voltage	V <sub>O</sub> = 0	25°C	1		6	1		5	mV
			Full range			7.5			6	
ΔV <sub>IO(adj)</sub>	Offset voltage adjust range	V <sub>O</sub> = 0	25°C	±15			±15			mV
I <sub>IO</sub>	Input offset current	V <sub>O</sub> = 0	25°C	20		200	20		200	nA
			Full range			300			500	
I <sub>IB</sub>	Input bias current	V <sub>O</sub> = 0	25°C	80		500	80		500	nA
			Full range			800			1500	
V <sub>ICR</sub>	Common-mode input voltage range		25°C	±12	±13		±12	±13		V
			Full range	±12			±12			
V <sub>OM</sub>	Maximum peak output voltage swing	R <sub>L</sub> = 10 kΩ	25°C	±12	±14		±12	±14		V
		R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ	Full range	±12			±12			
		R <sub>L</sub> = 2 kΩ	25°C	±10	±13		±10	±13		
		R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	Full range	±10			±10			
A <sub>VD</sub>	Large-signal differential voltage amplification	R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	25°C	20	200		50	200		V/mV
		V <sub>O</sub> = ±10 V	Full range	15			25			
r <sub>i</sub>	Input resistance		25°C	0.3	2		0.3	2		MΩ
r <sub>o</sub>	Output resistance	V <sub>O</sub> = 0, See Note 5	25°C	75			75			Ω
C <sub>i</sub>	Input capacitance		25°C	1.4			1.4			pF
CMRR	Common-mode rejection ratio	V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub>	25°C	70	90		70	90		dB
			Full range	70			70			
k <sub>SVS</sub>	Supply voltage sensitivity (ΔV <sub>IO</sub> /ΔV <sub>CC</sub> )	V <sub>CC</sub> = ±9 V to ±15 V	25°C	30	150		30	150		μV/V
			Full range	150			150			
I <sub>OS</sub>	Short-circuit output current		25°C	±25	±40		±25	±40		mA
I <sub>CC</sub>	Supply current	V <sub>O</sub> = 0, No load	25°C	1.7	2.8		1.7	2.8		mA
			Full range	3.3			3.3			
P <sub>D</sub>	Total power dissipation	V <sub>O</sub> = 0, No load	25°C	50	85		50	85		mW
			Full range	100			100			

בדף זה מפורטים ערכים חשמליים אופייניים בטמפרטורה של 25°C ובתחום הטמפרטורות המותר. בטבלה מפורטים הגדלים הבאים:

שם הפרמטר	שם הפרמטר בעברית	סימון הפרמטר
Input Offset Voltage	מתח היסט במבוא	V <sub>IO</sub>
Offset Voltage Adjust Range	שינוי מתח היסט הנגרם ע"י קיזוז מתח ההיסט ע"י פוטנציומטר המחובר בין הדקים 1 ו-5	ΔV <sub>IO</sub>
Input Offset Current	זרם ההיסט. זהו הפרש בין זרמים הזורמים לכניסות המגבר: $I_{IO} =  I_{B+} - I_{B-} $	I <sub>IO</sub>
Input Bias Current	זרם ממתח (זרם ממוצע בין זרמים הזורמים לכניסות המגבר: $I_{IB} = \frac{I_{B+} + I_{B-}}{2}$ )	I <sub>IB</sub>
Common Mode Input Voltage Range	מתח משותף מירבי בכניסות	V <sub>ICR</sub>
Maximum Peak Output Voltage Swing	תנופת מתח מירבית במוצא (תלוי בנגד עומס)	V <sub>OM</sub>
Large Signal Differential Voltage Amplification	הגבר חוג פתוח לאות גדול $A_{OL}(0)$	A <sub>VD</sub>
Input Resistance	התנגדות מבוא	r <sub>i</sub>
Output Resistance	התנגדות מוצא	r <sub>o</sub>

Input Capacitance	קיבול מבוא	$C_i$
Common Mode Rejection Ratio	יחס דחיית אות משותף (יחס בין הגבר הפרש להגבר משותף)	CMRR
Supply Voltage Sensitivity	השפעת מתחי הזנה על מתח ההיסט. פרמטר זה נקרא גם PSRR	$k_{SVS}$
Short Circuit Output Current	זרם קצר במוצא	$I_{OS}$
Supply Current	זרם הנצרך מן הספק כאשר המוצא לא מועמס	$I_{CC}$
Total Power Dissipation	פיזור הספק	$P_D$
Rise Time	זמן עליה	$t_r$
Overshoot Factor	בתגובה מסדר II נוצר במוצא גל סינוס דועך. הנתון מתאר באחוזים בכמה עולה המתח במחזור הראשון מעל ערך במצב מתמיד	OSF
Slew Rate	קצב שינוי מירבי של מתח המוצא	S.R.

## דף 6

### $\mu A741$ , $\mu A741Y$ GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS094A – NOVEMBER 1970 – REVISED JANUARY 1992

**electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)**

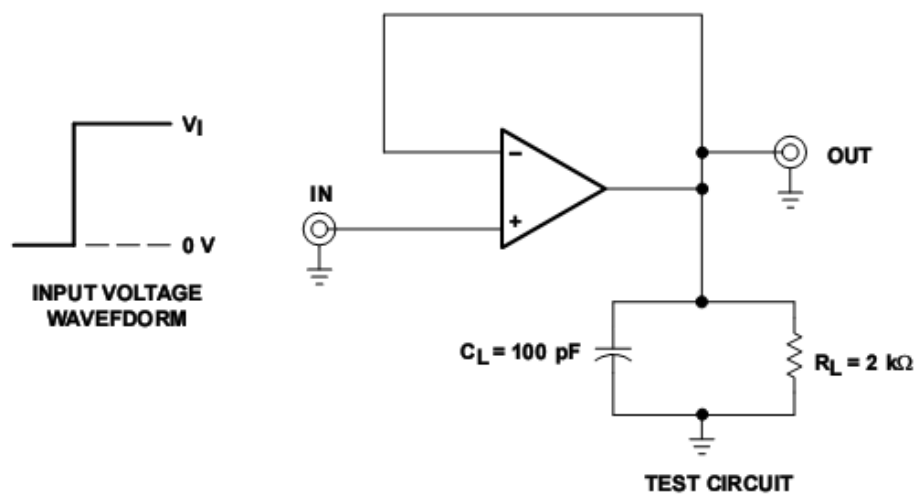
PARAMETER	TEST CONDITIONS	$\mu A741Y$			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
$V_{IO}$ Input offset voltage	$V_O = 0$		1	6	mV
$\Delta V_{IO}(\text{adj})$ Offset voltage adjust range	$V_O = 0$		$\pm 15$		mV
$I_{IO}$ Input offset current	$V_O = 0$		20	200	nA
$I_{IB}$ Input bias current	$V_O = 0$		80	500	nA
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range		$\pm 12$	$\pm 13$		V
$V_{OM}$ Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$	$\pm 12$	$\pm 14$		V
	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	$\pm 10$	$\pm 13$		
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	20	200		V/mV
$r_i$ Input resistance		0.3	2		M $\Omega$
$r_o$ Output resistance	$V_O = 0$ , See Note 5		75		$\Omega$
$C_i$ Input capacitance			1.4		pF
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$	70	90		dB
$k_{SVS}$ Supply voltage sensitivity ( $\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$ )	$V_{CC} = \pm 9\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		30	150	$\mu\text{V/V}$
$I_{OS}$ Short-circuit output current			$\pm 25$	$\pm 40$	mA
$I_{CC}$ Supply current	$V_O = 0$ , No load		1.7	2.8	mA
$P_D$ Total power dissipation	$V_O = 0$ , No load		50	85	mW

**operating characteristics,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$\mu A741Y$			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
$t_r$ Rise time	$V_i = 20\text{ mV}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$		0.3		$\mu\text{s}$
Overshoot factor	$C_L = 100\text{ pF}$ , See Figure 1		5%		
SR Slew rate at unity gain	$V_i = 10\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $C_L = 100\text{ pF}$ , See Figure 1		0.5		V/ $\mu\text{s}$

המשך עבור מגבר  $\mu A741V$

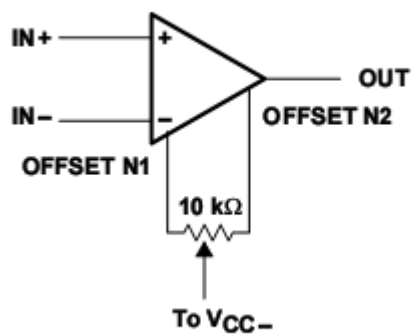
### PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



**Figure 1. Rise Time, Overshoot, and Slew Rate**

מפרט את מעגלי מדידת זמן עליה, Slew Rate ו-Overshoot

Figure 2 shows a diagram for an input offset voltage null circuit.



**Figure 2. Input Offset Voltage Null Circuit**

מפרט את אופן חיבור הפוטנציומטר לקיזוז מתחי היסט.

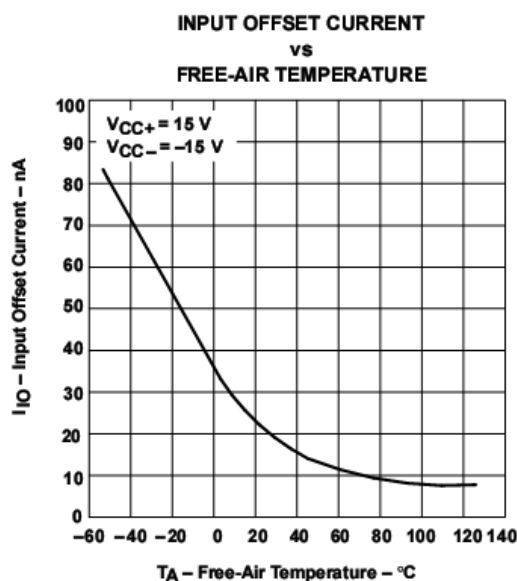


Figure 3

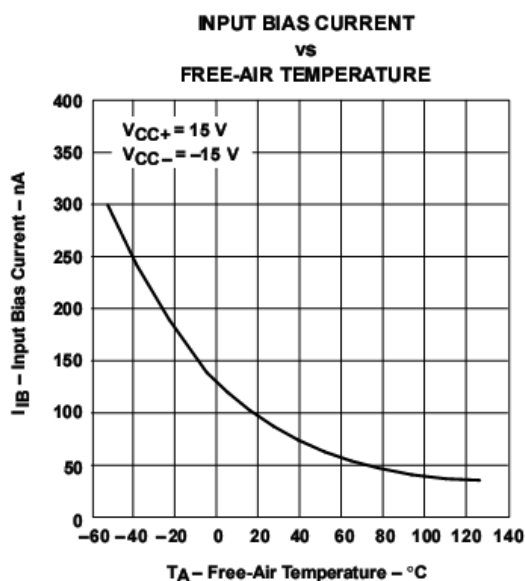


Figure 4

בגרף Fig. 3 מתוארים השינויים בזרם ההיסט במבוא בתלות בטמפרטורת הסביבה. עליית הטמפרטורה גורמת לעלייה של  $\beta$  ולכן זרם  $I_B$  קטן כדי לשמור על אותם זרמי קולקטור.

בגרף Fig. 4 מתוארים שינויי זרם ממתח במבוא בטמפרטורה  $f(T)$ .

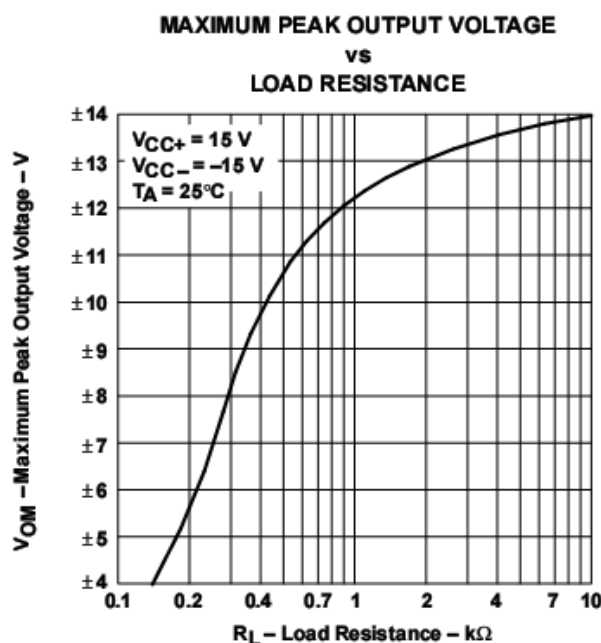
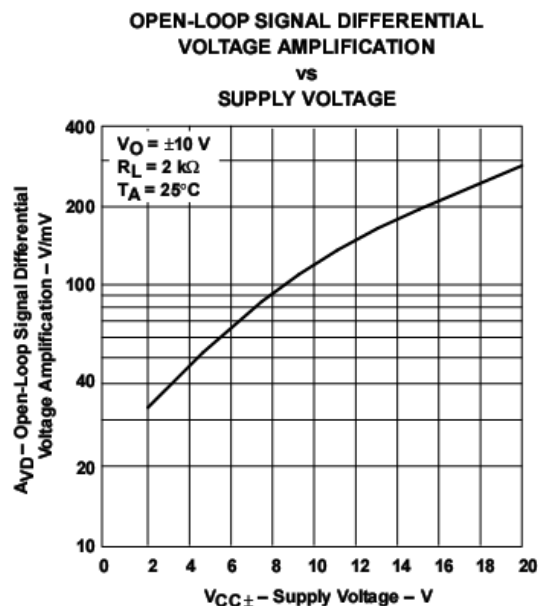
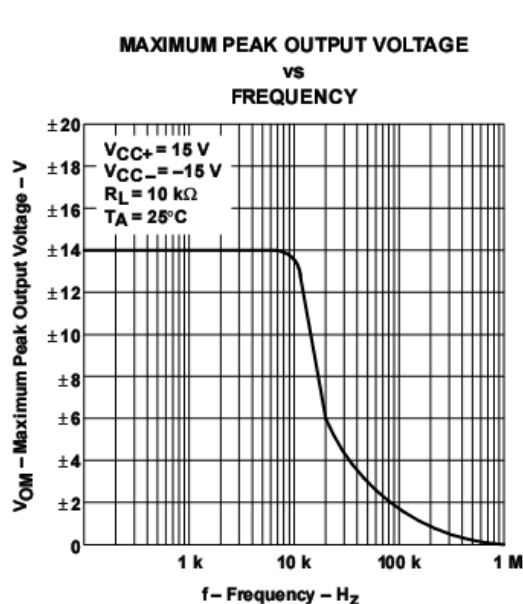


Figure 5

בגרף Fig 5 מתוארת תנופת מתח המוצא כפונקציה של נגד העומס  $R_L$ . לדוגמא במגבר לא מועמס, תנופת מתח המוצא היא  $\pm 14 V$ .

בדפי יצרן של חברות אחרות מפרידים את הגרף לשני גרפים שונים: גרף המתאר תנופת מתח חיובי וגרף המתאר תנופת מתח שלילי. בפועל ברוב המגברים אין סימטריה בתנופת מתח המוצא.

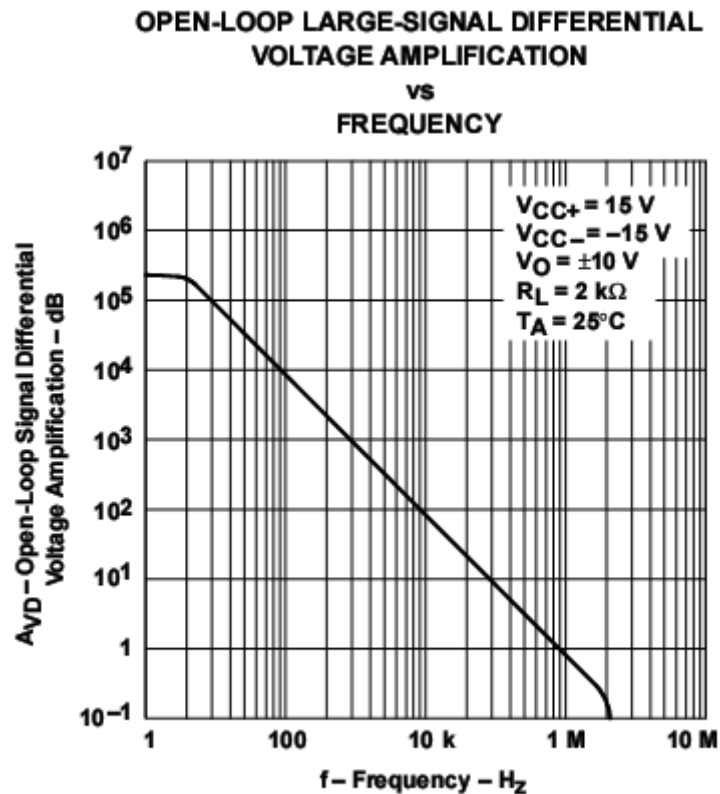


גרף Fig. 6 מתאר את תנופת המתח המירבית במוצא כפונקציה של תדר. ככל שהתדר גבוה יותר, תנופת המתח יורדת. מגבלה זו מוכתבת ע"י Slew Rate (קצב שינוי מקסימלי של מתח המוצא). לדוגמא, עבור גל ריבועי בעל תנופה במוצא  $\pm 14 V = 28 V$  זמן עלייה וזמן ירידה יהיו:

$$t = \frac{\Delta V}{S.R.} = \frac{28}{0.5V/\mu\text{sec}} = \frac{28 \cdot 10^{-6}}{0.5} = 56 \mu\text{sec}$$

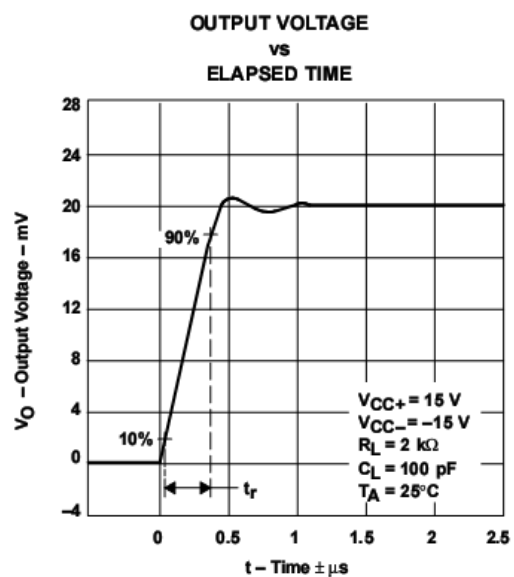
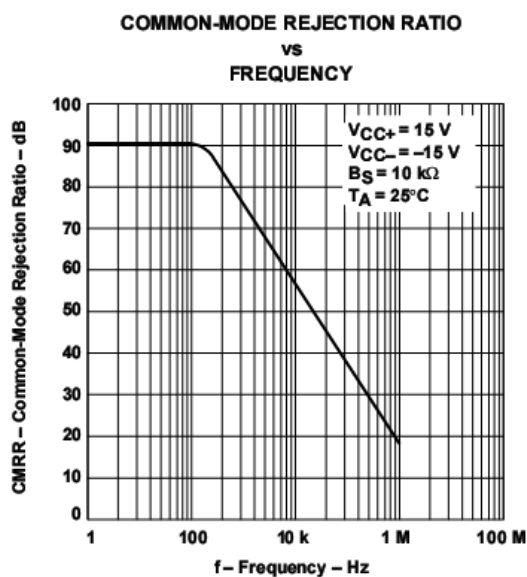
אם במבוא מחובר גל בתדר 10 KHz, מחצית זמן המחזור היא 50  $\mu\text{sec}$  ולכן הגרף מתחיל לרדת בסביבות 10 KHz.

גרף Fig. 7 מתאר את השפעת מתחי האספקה על הגבר חוג פתוח  $A_{OL}$ . נשים לב שיחידות של ציר y הן V/mV כלומר את המספרים בסקלה האנכית יש להכפיל ב-1000.



גרף Fig. 8 מתאר את ההגבר בחוג פתוח כפונקציה של תדר. הקוטב הדומיננטי הנקבע ע"י הקבל הפנימי הוא  $\approx 10\text{Hz}$ . כדי לקבוע את רוחב הסרט בחוג סגור יש להעביר על הגרף את הגבר החוג הסגור  $A_{CL}(0)$ . המפגש בין הגרפים ייתן את רוחב הסרט Bandwidth בחוג סגור (תדר ברוך 3 dB).

## 10 דף

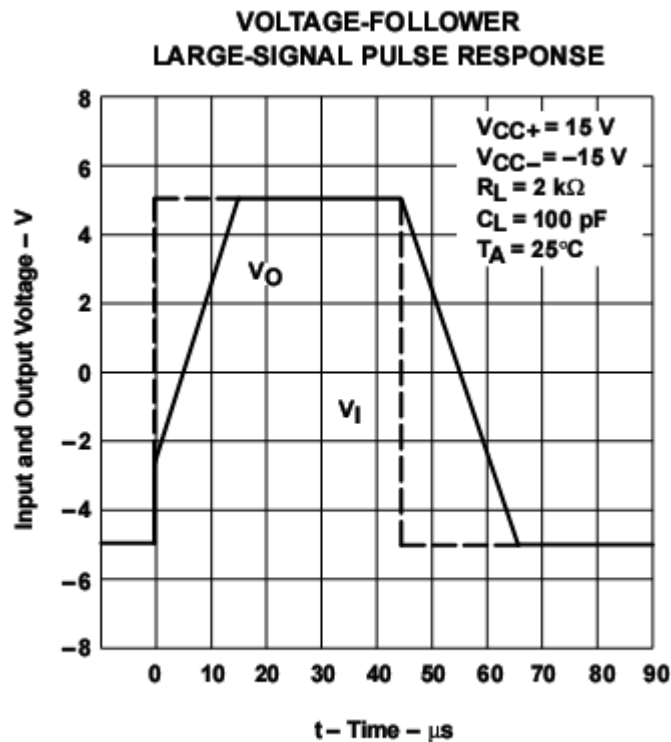


גרף Fig. 9 מתאר את CMMR כפונקציה של תדר. הגרף מראה שהחל מתדר 100 Hz היחס בין הגבר אות הפרש  $A_d$  להגבר אות משותף  $A_c$  מתחיל לקטון. בתדר גבוה 1 MHz היחס מגיע סה"כ ל-  $\approx 20dB$  כלומר ל- 10 בלבד !!

גרף Fig. 10 מתאר את תגובת מתח המוצא למדרגה במבוא (ראה מעגל בדיקה ב- Fig-1). המעגל למדידת תגובת מתח המוצא במישור הזמן מתואר בעמוד 7 של דפי יצרן. מתוך הגרף נוכל למדוד את זמן העלייה (בערך  $0.3 \mu\text{sec}$ ) ואת תגובת יתר (Overshoot) (עליית מתח מעל מצב מתמיד). מתוך הגרף רואים שהמתח המירבי הוא  $\approx 1mV$  ולכן:

$$\text{Overshoot} [\%] = \frac{V_{\max} - V_{ss}}{V_{ss}} \cdot 100 = \frac{21 - 20}{20} \cdot 100 = 5\%$$

ניתן לאמת את הנתונים ע"י נתונים בטבלאות.



גרף Fig. 11 מתאר את תגובת המעגל לפולס בודד. מתוך הגרף נוכל למדוד את קצב השינוי המירבי של מתח המוצא (Slew Rate). מתוך הגרף אנו למדים ש: התגובה של המגבר אינה סימטרית ותלויה במגמה (עליה - ירידה). את ה- Slew Rate נגדיר במקרה הגרוע ביותר- ירידת מתח. מתוך הגרף נוכל לרשום:

$$S.R. = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = \frac{5 - (-5)}{65\mu - 44\mu} = \frac{10}{21\mu} = 0.5 \frac{\text{V}}{\mu\text{sec}}$$

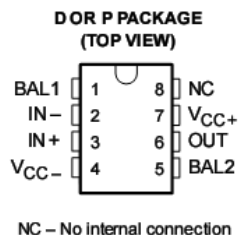
מגבר 741 הינו מגבר עם כניסות ביפולריות. אנו נשווה עכשיו מספר פרמטרים בסיסיים עם מגבר שרת בו טרנזיסטורים במבוא הם מסוג FET, לדוגמא מגבר LF411.



# LF411C JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIER

SLOS011B – MARCH 1987 – REVISED AUGUST 1994

- Low Input Bias Current . . . 50 pA Typ
- Low Input Noise Current  
0.01 pA/√Hz Typ
- Low Supply Current . . . 2 mA Typ
- High Input impedance . . .  $10^{12} \Omega$  Typ
- Low Total Harmonic Distortion
- Low 1/f Noise Corner . . . 50 Hz Typ



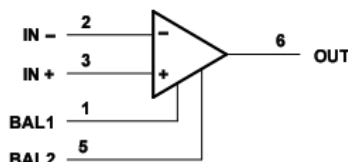
## description

This device is a low-cost, high-speed, JFET-input operational amplifier with very low input offset voltage and a maximum input offset voltage drift. It requires low supply current yet maintains a large gain-bandwidth product and a fast slew rate. In addition, the matched high-voltage JFET input provides very low input bias and offset currents.

The LF411C can be used in applications such as high-speed integrators, digital-to-analog converters, sample-and-hold circuits, and many other circuits.

The LF411C is characterized for operation from 0°C to 70°C.

## symbol



## AVAILABLE OPTIONS

T <sub>A</sub>	V <sub>IO</sub> max AT 25°C	PACKAGE	
		SMALL OUTLINE (D)	PLASTIC DIP (P)
0°C to 70°C	2 mV	LF411CD	LF411CP

The D packages are available taped and reeled. Add the suffix R to the device type (ie., LF411CDR).

## absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

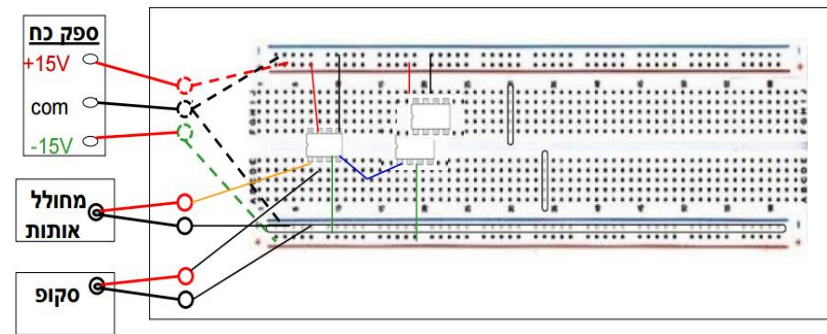
Supply voltage, V <sub>CC+</sub>	18 V
Supply voltage, V <sub>CC-</sub>	-18 V
Differential input voltage, V <sub>ID</sub>	±30 V
Input voltage, V <sub>I</sub> (see Note 1)	±15 V
Duration of output short circuit	unlimited
Continuous total power dissipation	500 mW
Operating temperature range	0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

NOTE 1: Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

נשים לב שסידור הרגליים זהה בשני המגברים. למרות שהרבה מאוד מגברים הם בעלי סידור רגליים זהה, יש תמיד לעיין בדפי יצרן לפני חיבור הרכיב.

כבר בעמוד הראשון רואים הבדלים משמעותיים בין המגברים: ברכיב LF411 זרם ממתח הוא קטן מאוד: 50 pA (לעומת 80 nA במגבר 741). התנגדות מבוא גבוהה מאוד  $10^{12}$  (לעומת  $2 M\Omega$  ערך טיפוסי במגבר 741).

## 7 נספח ב - מעגלים אנלוגיים: כללי בניה



1. שמירה על כללי השימוש בצבעי החוטים

- +15V: חוט בצבע אדום.
- -15V: חוט בצבע ירוק.
- COM (אדמה, ייחוס): חוט בצבע שחור
- כל החוטים המתחברים לאותה צומת בצבע זהה
- אין להשתמש בצבעים אלה לסיגנלים אחרים

2. מתחי ההזנה מהספק יחוברו לפסי החורים שליד הפסים הכחולים והאדומים. משורות חורים אלו יחוברו המתחים לנקודות הדרושות במעגל.
3. כניסת האות ממחולל האותות ויציאת אותות למדידה בסקופ וברמ"ס יחוברו ישירות מהנקודות על המטריצה במעגל לשקעי הבננות שעל המטריצה בלי לעבור דרך נקודות ביניים.
4. לסמן בשרטוט חוטים שחוברו כדי לא לפספס חיבורים.
5. סטודנט אחד בונה את המעגל, ובסיום הסטודנט השני בודק אותו.

## 8 נספח ג' - מעגלים אנלוגיים: גילוי ותיקון תקלות

בניתם מעגל לפי השרטוט, חיברתם את אות הכניסה ולא קיבלתם ביציאה את האות המצופה.

### 10.1 מתחי זרמי ספקים

בדוק שספק הכח דולק, וודא על התצוגה שמתחי ההספקה כנדרש והזרם לא הגיע לערך המכסימלי של הגבלת הזרם, ואינו אפס.

- אם המתחים והזרם תקינים עבור לסעיף 2.
- אם המתחים נמוכים מהמתחים שקבעתם או שהזרמים מגיעים להגבלת הזרם, יש קצר במעגל ויש לגלות את גורם הקצר.
- לשם כך נתקו את אחד החוטים על המטריצה הקרוב ביותר למקור המתח ושדרכו עובר מתח ההזנה שנפל לערך נמוך או שהזרם שלו הגיע להגבלת הזרם.
- בדוק על תצוגת הספק אם המתח והזרם חזרו לערכם התקין. אם לא, החזר את החוט למקומו ונתק חוט אחר שדרכו עובר מתח ההזנה.
- חזור על פעולה זו עד שתגלה את החוט שניתוקו מחזיר את המתח והזרם לערכם התקין.
- החזר את החוט למקומו ונתק בזה אחר זה חוטים אחרים שדרכם עובר המתח וצד אחד שלהם מתחבר לחוט הקודם שניתוקו החזיר את המתח והזרם לערכם התקין.
- המשך תהליך זה עד שתגיע לחוט שמעביר את מתח ההזנה וצד אחד שלו מתחבר לאחד הרכיבים: מגבר שרת, נגד, דיודה, קבל. שלוף מהמטריצה את התושבת שעליה נמצא הרכיב ובדוק שהמתח והזרם חוזרים לערכם התקין.
- החלף את התושבת בתושבת אחרת זהה.

### 10.2. צב"ד – ציוד בדיקה

- את מגברי השרת ניתן לבדוק עם צב"ד יעודי "בודק מגברי השרת" הנמצא במרכז המעבדה.
- בדוק את הרכיב ע"י הכנסתו לתושבת – כל שלוש הנוריות צריכות להבהב.



### 10.3. בדיקה "חזותית" מכנית חוזרת של המעגל

- כל המכשירים מכוונים כנדרש.
- הכבלים בין המכשירים לשקעי הבננות במטריצה תקינים ומחוברים היטב.
- החוטים היוצאים משקעי הבננות לחורים במטריצה: יש לוודא שיש מגע גלוי בין החוטים לשקעים. ושמכת שקע הבננה לוחצת על הנחושת ולא על הבידוד.
- 

### 10.4. החלפת רכיבים

- להחליף בזה אחר זה את כל התושבות עם הרכיבים. לאחר החלפת כל תושבת לבדוק אם המעגל פועל בצורה תקינה.
- תושבת שהתגלתה כלא תקינה, לשים בקופסת הרכיבים התקולים.

### 10.5. מעקב אותות באמצעות הסקופ

קח אחד מערוצי הסקופ, ובדוק באמצעותו את המתחים בנקודות שונות במעגל בהם אתה יודע כיצד אמור להראות האות. למשל, בכניסה השלילית של מגבר שרת המתח אמור להיות כמו המתח בכניסה החיובית (אם המגבר לא ברוויה ו/או הזרם ביציאת מגבר לא הגיע לערכו המכסימלי). מתוך תוצאות המדידה, נסה להסיק מה הגורם לתקלה.

### 10.6. פנה למדריך

תמיד כדאי לשאול "לא הביישן למד"

