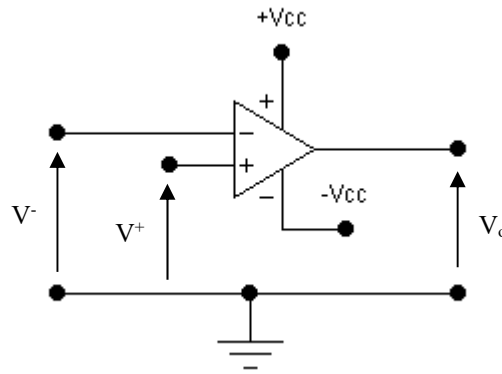


מגבר שרת



מגבר שרת – סוג של מגבר הפרש, בעל תכונות מיוחדות.

מגבר שרת אידיאלי:

1. מגבר מתח אידיאלי – $R_i = \infty$; $R_o = 0$.

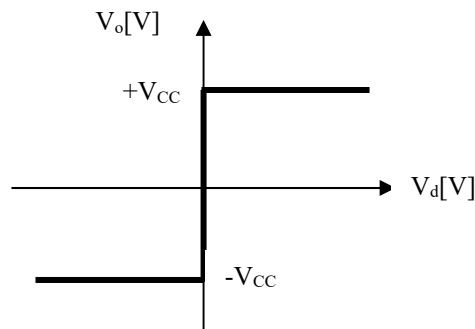
2. מגבר הפרש אידיאלי – $A_c = 0 \rightarrow CMRR = \infty$.

3. ההגבר ההפרשי – $A_d = V_o/V_d = V_o/(V^+ - V^-) = \infty$.

במגבר מעשי, ההגבר ההפרשי A_d ויחס דחיית האות המשותף $CMRR$ הינם בעלי ערך סופי, אך ערכם גבוה מאד, ולכן בחישובים המעשיים מניחים, בדרך כלל, כי המגבר אידיאלי.

אופיין מעבר של מגבר שרת אידיאלי:

תרשים גרפי המתאר את מתח המוצא בתלות במתח המבוא ההפרשי.



מאחר שההגבר ההפרשי אינסופי, יהיה שיפוע הגרף, המייצג את ההגבר, אף הוא אינסופי (קו ניצב). כתוצאה מכך, יימצא המגבר או במצב של רווייה חיובית ($V_o = +V_{CC}$), או במצב של רווייה שלילית ($V_o = -V_{CC}$), בהתאם לכיוונו של מתח המבוא ההפרשי, והתחום הדינמי של המגבר (תחום מתחי המבוא, עבורו קיים הגבר) יהיה אפס. במגבר מעשי יהיה השיפוע גדול, אך לא אינסופי והתחום הדינמי יהיה קטן מאד – סדר גודל של מילי וולטים ופחות. מגבר מסוג זה מוגבל לשימוש כמשווה מתחים:

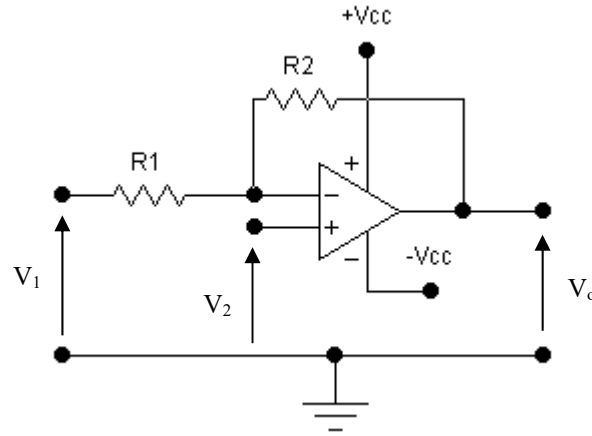
$$V^+ > V^- \rightarrow V_d > 0 \rightarrow V_o = +V_{CC}$$

$$V^+ < V^- \rightarrow V_d < 0 \rightarrow V_o = -V_{CC}$$

כדי להרחיב את תחום השימושים במגבר שרת, יש להוסיף לו משוב שלילי, אשר יקטין את הגבר המתח שלו, ומצד שני, יביא את פונקציית המעבר לכך שתהיה תלויה ברכיבי המשוב בלבד.

$$A_f = A / (1 + \beta \cdot A) = 1 / \beta \quad \leftarrow \quad A = \infty \quad \text{עבור}$$

מעגל בסיסי של מגבר שרת עם משוב שלילי:



כתוצאה מהוספת המשוב השלילי, מתקבל הגבר מתח סופי, ומתח המוצא יהיה, על כן, בתחום: $-V_{CC} < V_o < +V_{CC}$. כלומר, המגבר לא ייצא במצב של רווייה, ולכן:

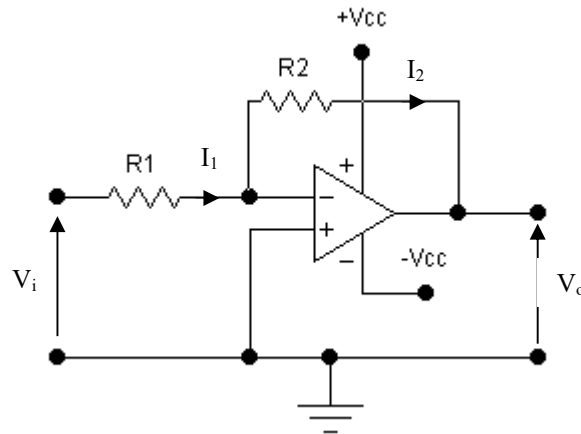
$$V_d = V^+ - V^- = V_o / A_d = V_o / \infty = 0 \rightarrow V^+ = V^-$$

תופעה זו, שבה קיים שיוויון בין שני מתחי המבוא למגבר, נקראת – אדמה וירטואלית (Virtual Ground). תופעה זו קיימת אך ורק במגבר שרת עם משוב שלילי. במגבר מעשי, ההגבר ההפרשי מקבל ערך סופי, ולכן קיים הפרש בין מתחי המבוא למגבר, אך הפרש זה קטן מאד (סדר גודל - מילי וולטים), מאחר שההגבר ההפרשי גדול מאד.

מהמעגל הבסיסי ניתן ליצור שתי תצורות הגברה בסיסיות:

1. מגבר מהפך

במגבר זה מתח המבוא V_2 מקוצר לאדמה ומתח המבוא V_i מחובר למבוא V_1 .



$$V^+ = 0 \rightarrow V^- = 0$$

מאחר שהתנגדות המבוא למגבר גבוהה מאד, יהיה זרם המבוא למגבר אפסי, ולכן: $I_1 = I_2$

$$(V_i - V^-) / R_1 = (V^- - V_o) / R_2 \rightarrow (V_i - 0) / R_1 = (0 - V_o) / R_2$$

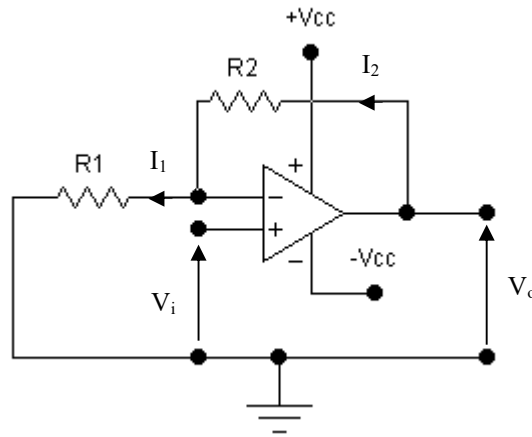
$$A_v = V_o / V_i = -R_2 / R_1$$

מן המשוואה שלעיל, ניתן לראות כי הגבר המתח שלילי (היפוך מופע) ותלוי ביחס שבין ערכי שני הנגדים במעגל. על כן, ניתן לקבוע את ההגבר בערך כלשהו בין $-\infty$ לבין $+\infty$, והגבר זה יהיה מדויק ויציב כמידת הדיוק והיציבות של הנגדים.

$$R_i = V_i / I_i = R_1$$

התנגדות המבוא למגבר:

במגבר זה מתח המבוא V_1 מקוצר לאדמה ומתח המבוא V_i מחובר למבוא V_2 .



$$V^+ = V_i \rightarrow V^- = V_i$$

מאחר שהתנגדות המבוא למגבר גבוהה מאד, יהיה זרם המבוא למגבר אפסי, ולכן: $I_1 = I_2$

$$V^-/R_1 = (V_o - V^-)/R_2 \rightarrow V_i/R_1 = (V_o - V_i)/R_2$$

$$A_v = V_o/V_i = (R_1 + R_2)/R_1 = 1 + R_2/R_1$$

מן המשוואה שלעיל, ניתן לראות כי הגבר המתח חיובי (אין היפוך מופע), גדול מ-1 ותלוי ביחס שבין ערכי שני הנגדים במעגל. גם כאן ההגבר יהיה מדוייק ויציב כמידת הדיוק והיציבות של הנגדים.

$$R_i = V_i/I_i = V_i/0 = \infty \quad \text{התנגדות המבוא למגבר:}$$

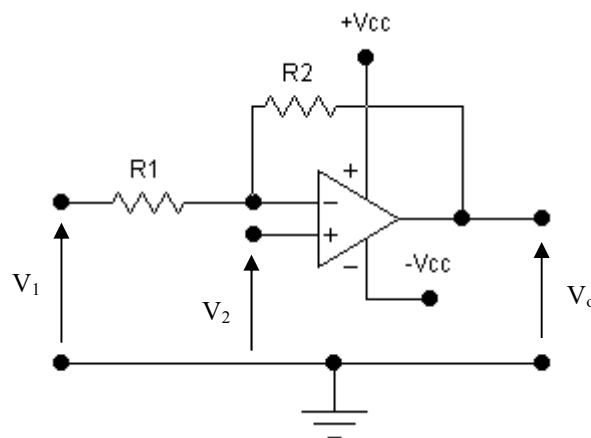
במקרה פרטי שבו $R_2 = 0$ (קצר) או $R_1 = \infty$ (נתק), נקבל $A_v = 1$.

במקרה זה, נקבל מתח מוצא שעוקב אחרי מתח המבוא גם מבחינת הגודל וגם מבחינת המופע, ולכן מגבר זה נקרא: עוקב מתח. מאחר שהתנגדות המבוא למגבר אינסופית והתנגדות המוצא אפס, מתאים מעגל זה לשימוש כחוצץ מתח (BUFFER).

ניתן לשלב, בצורות שונות בין תצורות בסיסיות אלו ולקבל מגוון של מעגלים נוספים:

מגבר עוקב - מהפך

ניתן לשלב בין שני סוגי המגברים שלעיל, אם נחבר שני מקורות מתח לשני הזקי. המבוא בהתאמה.



עפ"י עיקרון הסופרפוזיציה, נקבל:

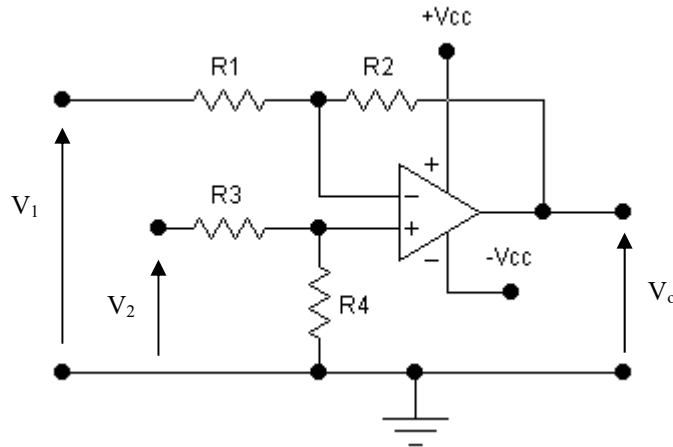
$$V_o = A_2 \cdot V_2 + A_1 \cdot V_1 = (1 + R_2/R_1) \cdot V_2 + (-R_2/R_1) \cdot V_1$$

ניתן לקבל משוואה זו גם מתוך השוואת הזרמים I_1 ו- I_2 , כפי שנעשה בסעיפים הקודמים.

במעגל זה, ההגבר A_1 וההגבר A_2 אינם זהים בערכם המוחלט, ולכן לא ניתן להתייחס למעגל זה כאל מגבר הפרש.

מגבר הפרש

כדי לקבל מגבר הפרש, יש להשוות את הערכים המוחלטים של ההגברים A_1 ו- A_2 . זאת ניתן לעשות ע"י הוספת מחלק מתח במבוא של V_2 .

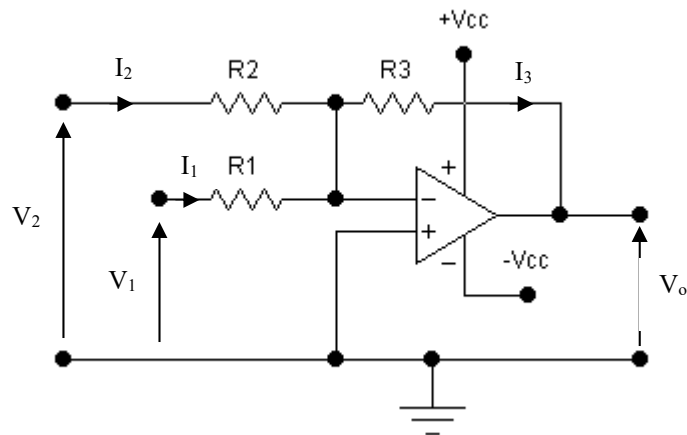


$$V^+ = V_2 \cdot R_4 / (R_3 + R_4)$$

$$V_o = V^+ \cdot (1 + R_2/R_1) - V_1 \cdot R_2/R_1 = V_2 \cdot R_4(1 + R_2/R_1) / (R_3 + R_4) - V_1 \cdot R_2/R_1$$

$$V_o = (R_2/R_1) \cdot (V_2 - V_1) = A_d \cdot V_d \quad \text{אם יתקיים היחס: } R_1/R_3 = R_2/R_4, \text{ נקבל:}$$

מגבר מסכם

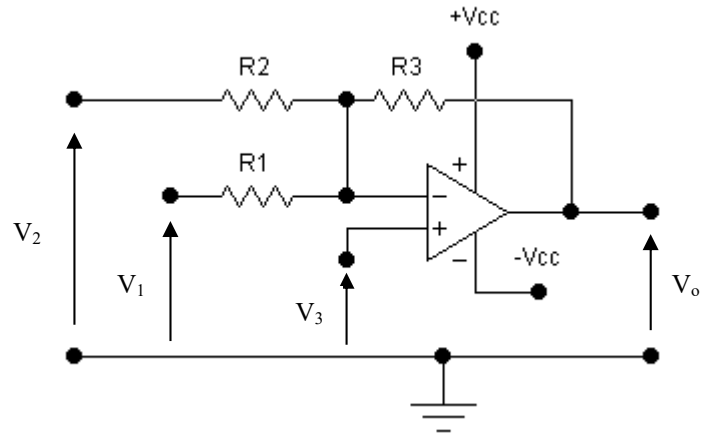


$$I_3 = I_1 + I_2$$

$$(0 - V_o) / R_3 = (V_1 - 0) / R_1 + (V_2 - 0) / R_2$$

$$V_o = -(V_1 \cdot R_3 / R_1 + V_2 \cdot R_3 / R_2) = -R_3 \cdot (V_1 / R_1 + V_2 / R_2)$$

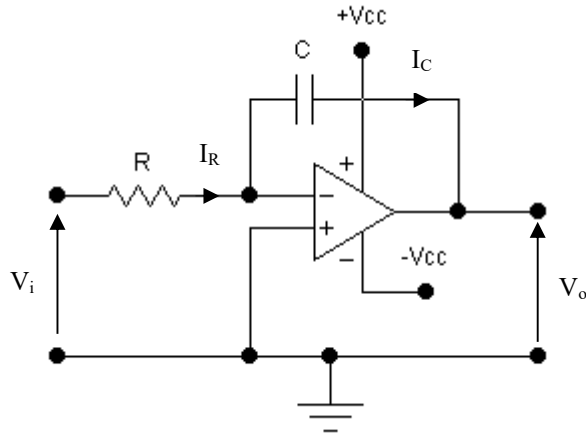
מתח המוצא מתקבל כהיפוך של סכום מתחי המבוא, כאשר כל אחד ממתחי המבוא מוכפל במקדם. במקרה של שיוויון בין הנגדים $R_1 = R_2$, נקבל הכפלת מתחי המבוא במקדם קבוע. ניתן להוסיף ענפי מבוא נוספים ולקבל סכום של כל מתחי המבוא, המוכפלים במקדמים התלויים ביחסים שבין הנגדים בהתאמה.



במעגל זה נעשה שילוב בין מגבר מסכס מהפך לבין מגבר עוקב.

עפ"י עיקרון הסופרפוזיציה, נקבל: $V_o = V_3 \cdot [1 + R_3 / (R_1 \parallel R_2)] - R_3 \cdot (V_1 / R_1 + V_2 / R_2)$

מעגל סוכס (אינטגרטור)



$$V_o = 0 - V_c = -1/C \int I_c dt = -1/C \int I_R dt = -1/C \int V_i / R dt = -1/RC \int V_i dt$$

מתח המוצא מתקבל כאינטגרל של מתח המבוא, מוכפל במקדם קבוע ובהיפוך מופע. כך, למשל, ניתן לקבל במוצא המעגל גל משולש, כאשר מתח המבוא הוא גל ריבועי.

כפי שניתן לראות מהדוגמאות שלעיל, קיים מגוון רחב ביותר של שימושים למגבר שרת. כמובן שלא ניתן לסקור כאן את כל המעגלים המתבססים על מגבר שרת. יחד עם זאת, העקרונות המנחים ניתוח של כל מעגל, המתבסס על מגברי שרת, הם אותם העקרונות:

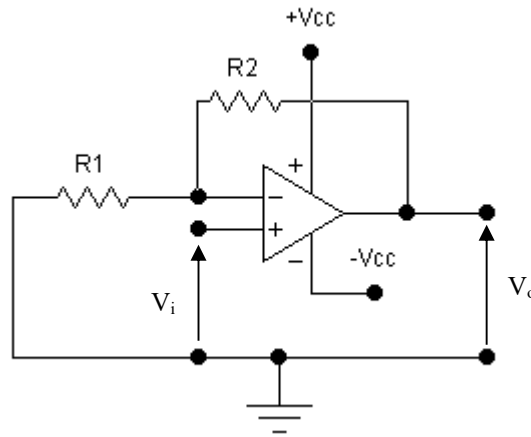
1. המתח בהדק המבוא המהפך של המגבר – V^- יהיה תמיד שווה למתח בהדק המבוא העוקב של המגבר V^+ .
2. זרמי המבוא בהדקי המגבר קטנים ביותר וניתנים להזנחה בחישובים המעשיים.
3. שאר הניתוח מתבסס על כללי תורת החשמל – חוק אוהם, חוקי קירכהוף, כללי הסופרפוזיציה, כלל תבנית וכו'.

מגבר שרת מעשי

בכל הניתוחים שהוצגו עד כאן, נעשו מספר הנחות בסיסיות:

1. ההגבר ההפרשי A_d , וכן יחס דחיית האות המשותף $CMRR$ הינם בעלי ערכים אינסופיים.
 2. זרמי המבוא למגבר קטנים ביותר וניתנים להזנחה.
- נבחן עתה את השפעת הגורמים הללו על ביצועי המגבר, כאשר מדובר על מגבר שרת מעשי.

ניתוח השפעת A_d ו- $CMRR$



$$V_d = V^+ - V^- = V_i - V_o \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$V_c = (V^+ + V^-) / 2 \approx V^+ = V_i$$

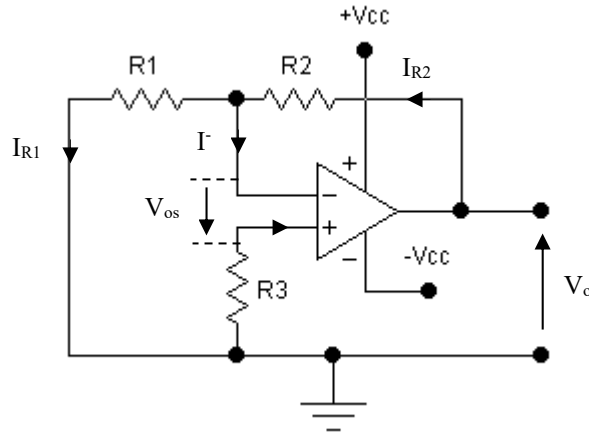
$$V_o = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c = A_d \cdot [V_i - V_o \cdot R_1 / (R_1 + R_2)] + A_c \cdot V_i = (A_d + A_c) \cdot V_i - A_d \cdot V_o \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$V_o [1 + A_d \cdot R_1 / (R_1 + R_2)] = (A_d + A_c) V_i$$

$$A_v = V_o / V_i = (A_d + A_c) / [1 + A_d \cdot R_1 / (R_1 + R_2)] = [(R_1 + R_2) / R_1] \cdot (1 + 1 / CMRR) / (1 + 1 / \beta A_d)$$

ניתוח השפעת מתח ההיסט וזרמי המקדם

במגבר שרת אידיאלי, הנמצא במצב מנוחה, כלומר מתחי המבוא שווים לאפס, נקבל גם מתח מוצא מאופס. ברם, במגבר מעשי אין איזון מוחלט בין שני הדקי המבוא ולכן מתח המוצא יהיה מוסט מן האפס. מתח ההיסט (Offset Voltage) במבוא מוגדר כמתח המבוא ההפרשי אשר יגרום לאיפוס מתח המוצא של המגבר, במצב מנוחה. מתח זה במגבר שרת מעשי הוא בסדר גודל של מספר מיליוולטים. כמו כן, יש להביא בחשבון כי בהדקי המבוא למגבר יזרמו זרמי מקדם (Bias Current), שגם הם אינם זהים בשני הדקי המבוא. ההפרש בין שני זרמי המקדם מוגדר כזרם ההיסט (Offset Current).



$$V^+ = -I^+ R_3$$

$$V^- = V^+ - V_{os} = -I^+ R_3 - V_{os}$$

$$I_{R2} = I_{R1} + I^+ \quad \text{עפ"י קירכהוף (זרמים):}$$

$$(V_o - V^-) / R_2 = V^- / R_1 + I^+$$

$$V_o = (1 + R_2/R_1) V^- + R_2 I^+ = (1 + R_2/R_1) (-I^+ R_3 - V_{os}) + R_2 I^+ = -(1 + R_2/R_1) V_{os} + R_2 I^+ - (R_1 + R_2) / R_1 \cdot (R_3 I^+)$$

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad \text{אם מתקיים:}$$

$$V_o = -(1 + R_2/R_1) \cdot V_{os} + R_2 \cdot (I^- - I^+) = -(1 + R_2/R_1) \cdot V_{os} + R_2 \cdot I_{os}$$