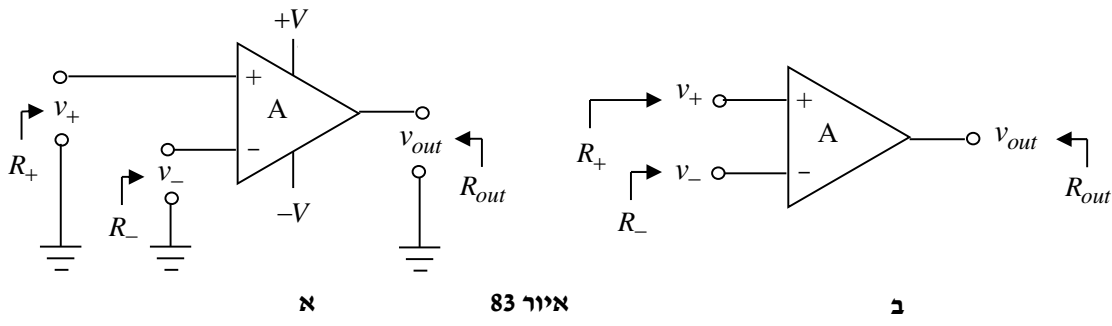


מגבר שרת (Operational Amplifier)

מגבר שרת הוא מגבר בעל תכונות יסוד אשר מאפשר לנו לתכנן מעגלים מבלי שנדרש להתחשב במדויק בתכונות המגבר עצמו. כל מגבר שרת יספק למעשה את אותם הביצועים כשהוא משולב באותו המעגל. לפני שנפנה לניתוח של מעגלים מבוססי מגבר שרת, נלמד לנתח את התצורות הבסיסיות של מגברי שרת בשיטות שונות. בהמשך נשתמש בשיטות הני"ל, לצורך ניתוח של מעגלים. תחילה נזכור בפירוט כמה מאפייני יסוד הקשורים למגברי שרת. איור 83 מתאר מגבר שרת, כאשר מתחי הכניסה והמוצא מיוחסים לפוטנציאל האדמה. במקרים רבים, במקום מתח הספקה בין $+V$ לאדמה, ניתן למגברי שרת מתח הספקה סימטרי בין $+V$ ל- $-V$, כך שיהיה מסוגל לספק אותות מוצא חיוביים ושליילים כאחד.



בהמשך לא נציין יותר את חיבורי האדמה (שהיא פוטנציאל ייחוס אפס) ואת מתחי ההספקה, אך הכוונה תמיד תהיה שכל המתחים מיוחסים לאדמה, אלא אם כן צוין אחרת באופן מפורש. אם כן, איור 83א' שקול לאיור 83ב. נציין ב- R_+ , R_- ו- R_{out} את ערך ההתנגדות הפנימית של המגבר בין הדקי "+", "-", והדק המוצא (בהתאמה), לבין האדמה.

הגבר דיפרנציאלי: בהקשר שלנו מגבר שרת הוא מגבר מתח דיפרנציאלי, כאשר ההגבר הדיפרנציאלי A_{diff} מקיים

$$v_{out} = A_{diff}(v_+ - v_-) \quad (138)$$

וכאשר A_{diff} הוא מספר חיובי גדול מאד, בסדר גודל של 100,000 ויותר. לצורך ניתוח ותכנון מעשי, בדרך כלל אפשר להשתמש בקירוב $A_{diff} \approx \infty$.

הדק לא-הופך: אם נאלץ $v_- = 0$ ע"י חיבור הדק ה "-" לאדמה, אזי משוואה (138) תקבל את הצורה

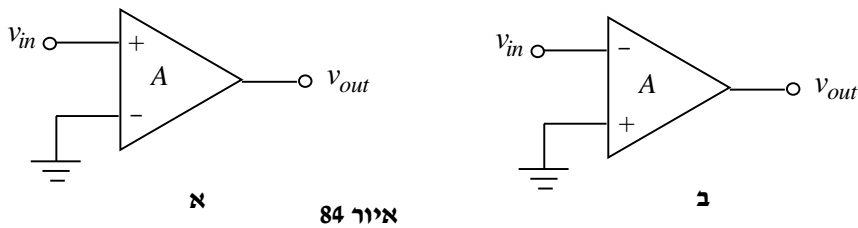
$$v_{out} = A_{diff}(v_+ - 0) = A_{diff}v_+ = A_{diff}v_{in} \quad (139)$$

כאשר $v_{in} = v_+$ הוא המתח בכניסה למגבר, כפי שמתואר באיור 84א. במקרה זה מתח המוצא ומתח הכניסה הם בעלי קוטביות זהה (סימן זהה), ולכן ההדק "+" נקרא "הדק לא-הופך". ההגבר $A = v_{out} / v_{in} = A_{diff}$, הוא חיובי והוא מכונה "ההגבר בחוג פתוח" של המגבר הלא-הופך.

הדק הופך: אם נאלץ $v_+ = 0$ ע"י חיבור הדק ה "+" לאדמה, אזי משוואה (138) תקבל את הצורה

$$v_{out} = A_{diff}(0 - v_-) = -A_{diff}v_- = -A_{diff}v_{in} \quad (140)$$

כאשר $v_{in} = v_-$ הוא המתח בכניסה למגבר, כפי שמתואר באיור 84. במקרה זה מתח המוצא ומתח הכניסה הם בעלי קוטביות הפוכה, ולכן ההדק "-" נקרא "הדק הופך". ההגבר "הדק הופך" הוא $A = v_{out} / v_{in} = -A_{diff}$, הוא שלילי והוא מכונה "ההגבר בחוג פתוח" של המגבר ההופך.



איור 84

משוב: מגבר שרת הפועל בתצורת מגבר ליניארי, תמיד יופעל בעזרת משוב שלילי על פי העקרונות שהוזכרו בהקשר לאיור 26. במצב של עבודה עם משוב שלילי, ההגבר (עם משוב) $G = v_{out} / v_{in}$, המכונה "הגבר בחוג סגור", ייקבע על פי משוואה (45). אם $|A| \equiv A_{diff} \rightarrow \infty$ ואם מתח המשוב (המוחזר) v_F הוא $v_F = \beta v_{out}$, כאשר $0 < |\beta| < \infty$, נקבל את משוואה (46) אותה נציין כאן לשם נוחיות

$$G = \frac{A}{1 - A\beta} \rightarrow -\frac{1}{\beta} \quad (141)$$

לכן, אם $|A| \rightarrow \infty$ ההגבר בחוג סגור G יהיה תלוי אך ורק ברמת הדגימה β של מתח המוצא. נציין שיש תצורות אחרות של מעגלים מבוססים על מגבר שרת, בהם לא משתמשים במשוב כלל, כמו מעגל "משווה" (comparator) המשמש להשוואת מתיחס, או משתמשים במשוב חיובי על מנת לייצר אותות, כמו במעגלי "מתנד", אך אלה לא תצורות מתאימות לעבודה כמגבר ליניארי, ועליהן נדון בנפרד.

התנגדות הדקי כניסה: ההתנגדות R_+ בכניסה להדק "+" היא גבוהה מאד. באופן מעשי, אפשר לקרב $R_+ \approx \infty$. גם ההתנגדות R_- בכניסה להדק "-" גבוהה מאד ואפשר לקרב $R_- \approx \infty$. נובע מכך שיש נתק, בין שני הדקי הכניסה של המגבר.

התנגדות מוצא: התנגדות המוצא של המגבר נמוכה מאד. באופן מעשי נוכל לקרב $R_{out} \approx 0$. נובע מכך שאם נחבר במוצא המגבר עומס בעל אימפדנס קטן ככל שיהיה, הדבר כלל לא ישפיע על המתח המוצא.

קצר וירטואלי: ראינו ש- $A_{diff} \approx \infty$, לכן, עבור כל מתח מוצא סופי $|v_{out}| < \infty$, יש תמיד מתח זניח בין הדקי הכניסה כי $v_+ - v_- = v_{out} / A_{diff} \approx v_{out} / \infty = 0$. נובע מכך ש- $v_+ \approx v_-$, ולכן אומרים שיש "קצר וירטואלי" בין שני הדקי הכניסה. הקצר הוא "וירטואלי" כי שתי הכניסות נמצאות תמיד באותו מתח ($v_+ = v_-$ כאילו יש קצר ביניהן), אבל יש בניהן נתק ולא זורם דרכן כל זרם. כפי שנראה בהמשך, עובדת קיומו של קצר וירטואלי, מאד מקלה על הניתוח וההבנה של הפעולה של מעגלים מבוססי מגברי שרת.

מגבר שרת אידיאלי: מגבר המקיים את התנאים $R_{out} \approx 0, R_+, R_- \approx \infty, A_{diff} \approx \infty$ מכונה "מגבר שרת אידיאלי"

תצורות חיבור בסיסיות של מגבר שרת

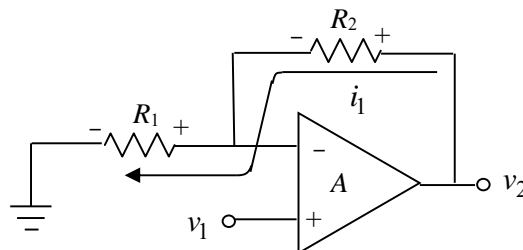
נתח כעת שתי תצורות בסיסיות של מגברים מבוססי מגבר שרת בשתי שיטות שונות:

- בהסתמך על קיומו של הקצר הוירטואלי – שיטה זו מתאימה רק אם שניתן לקרב $A_{diff} \approx \infty$

- בהסתמך על עקרונות המשוב ומשוואה (141) – שיטה זו מתאימה תמיד, ובפרט עבור $A_{diff} \leq \infty$.

מגבר לא-הופך

ניתוח בעזרת שימוש בקצר הוירטואלי: איור 85 מתאר את תצורת מגבר לא-הופך



איור 85

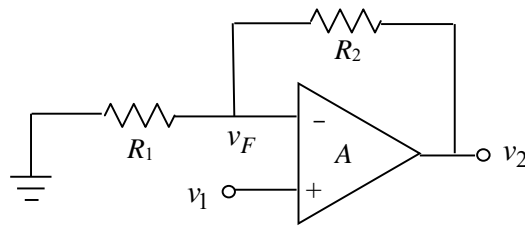
מתח הכניסה v_1 מחובר ישירות להדק הלא-הופך (+). בגלל הקצר הוירטואלי, אותו מתח v_1 מופיע גם בהדק ההופך (-), ולכן דרך הנגד R_1 זורם זרם $i_1 = v_1 / R_1$. מההדק ההופך לא מגיע כל זרם כי $R_- = \infty$, ולכן, על פי חוק קירכהוף, כל הזרם הזורם דרך R_1 חייב להגיע דרך נגד R_2 . על פי כוון הזרימה, המתחים על פני שני הנגדים הינם בעלי אותה קוטביות, ולכן המתח v_2 הוא בקוטביות זהה ל- v_1 . מכאן:

- כפי שראינו $i_1 = v_1 / R_1$
- המתח על פני הנגד R_2 הוא $i_1 R_2$
- המתח על פני הנגד R_1 הוא v_1

על פי חוק קירכהוף מתח המוצא הוא $v_2 = v_1 + i_1 R_2 = v_1 + \frac{v_1}{R_1} R_2$. הגבר המתח הוא $G = \frac{v_2}{v_1}$, לכן

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (142)$$

ניתוח בהסתמך על עקרונות המשוב: איור 86 מתאר את המגבר במקרה ש- $A_{diff} < \infty$. גם במקרה זה אנו נניח שהתנגדות הכניסה למגבר גבוהה מאד (למשל דרגת הכניסה של המגבר יכולה להיות זוג MOSFET דיפרנציאלי).



איור 86

אם $R_2 = \infty$, אנחנו מקבלים את התצורה של איור 84, ללא תלות בערך של R_1 כי דרך הנגד לא זורם זרם, וההדק ההופך בפוטנציאל האדמה. לכן ההגבר בחוג פתוח חיובי והוא $A = A_{diff}$.

אם $R_2 < \infty$ יש משוב, ומתח המשוב בהדק הלא-הפך הוא $v_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_2$. מתח זה מוחסר ממתח הכניסה v_1 , כי

$v_2 = A(v_1 - v_F)$. אם נסמן ב- v_{in} את סה"כ המתח בכניסת המגבר (המתח בין הדק "+" להדק "-"), נוכל לרשום

$$v_{in} = v_1 - v_F = v_1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_2 = v_1 + \beta v_2 \Rightarrow v_F = -\beta v_2$$

ע"י השוואת המקדמים נוכל לכתוב $\beta = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}$. היות ו- A חיובי ו- β שלילי, אזי המכפלה $A\beta$ שלילית, ולכן

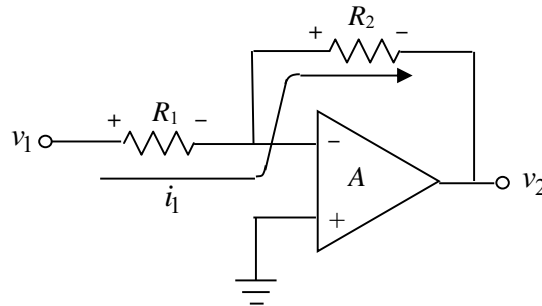
המשוב שלילי . ההגבר בחוג סגור נתון ע"י (141), והוא

$$G = \frac{A}{1 - A\beta} = \frac{A_{diff}}{1 + A_{diff} \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (143)$$

אם $A_{diff} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \gg 1$, אזי (143) מקבל את הצורה $G \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$ כפי שקיבלנו בניתוח הקודם ובהתאם ל-(142).

מגבר הופך

ניתוח בעזרת שימוש בקצר הוירטואלי: איור 87 מתאר את המגבר ההופך



איור 87

מתח הכניסה מחובר לנגד R_1 . ההדק הלא-הופך (+) מחובר לאדמה, ולכן בגלל הקצר הוירטואלי, גם ההדק ההופך (-) נמצא בפוטנציאל האדמה. נובע מכך שדרך הנגד R_1 זורם זרם $i_1 = v_1 / R_1$. דרך ההדק ההופך לא זורם כל זרם כי $R_- = \infty$, ולכן, על פי חוק קירכהוף, כל הזרם הזורם דרך R_2 חייב להגיע דרך נגד R_1 . על פי כוון הזרימה, המתחים על פני שני הנגדים הינם בעלי אותה קוטביות, אבל כאן המתח v_2 הוא בקוטביות הפוכה ל- v_1 . מכאן:

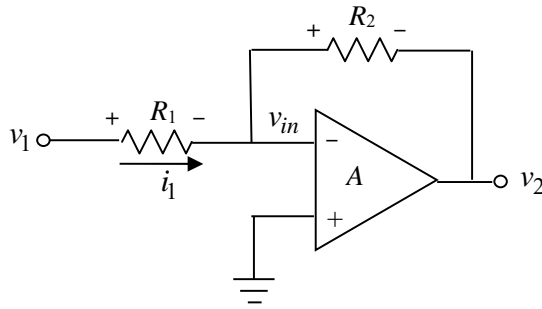
- כפי שראינו $i_1 = v_1 / R_1$
- המתח על פני הנגד R_2 הוא $i_1 R_2$
- מתח המוצא v_2 הוא בקוטביות הפוכה למתח הכניסה v_1 .

היות וההדק ההופך (-) נמצא בפוטנציאל אדמה, על פי חוק קירכהוף מתח המוצא הוא $v_2 = -i_1 R_2 = -\frac{R_2}{R_1} v_1$. הגבר

המתח הוא $G = \frac{v_2}{v_1}$, לכן

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \quad (144)$$

ניתוח בהסתמך על משווא: איור 88 מתאר את המגבר מקרה ש- $A_{diff} < \infty$.



איור 88

אם $R_2 = \infty$, אנחנו מקבלים את התצורה של איור 84, ללא תלות בערך של R_1 , כי דרך הנגד לא זורם זרם, וההדק ההופך (-) הוא בפוטנציאל חיובי, v_1 . ההגבר בחוג פתוח הוא שלילי והוא $A = -A_{diff}$. לכן אם v_1 חיובי, גם ההדק ההופך (-) יהיה בפוטנציאל חיובי, ואז v_2 יהיה שלילי. אם $R_2 < \infty$ יש משוב, וסה"כ הזרם הזורם דרך R_1 הוא $i_1 = \frac{v_1 - v_2}{R_2 + R_1}$.

אם נסמן ב- v_{in} את סה"כ המתח בכניסה להדק ההופך, על פי חוק קירכהוף נקבל

$$v_{in} = v_1 - i_1 R_1 = v_1 - \frac{v_1 - v_2}{R_2 + R_1} R_1 = \frac{v_1 R_2 + v_2 R_1}{R_2 + R_1} = v_1' + \frac{R_1}{R_2 + R_1} v_2 = v_1' + \beta v_2$$

כאשר סימנו $v_1' = \frac{R_2}{R_2 + R_1} v_1$. שימו לב ש v_1' הוא מתח הכניסה למגבר שההגבר שלו בחוג פתוח הוא $A = -A_{diff}$.

ע"י השוואת מקדמים נקבל $\beta = \frac{R_1}{R_2 + R_1}$. היות ו- $A < 0$ ו- $\beta > 0$, המכפלה $A\beta$ שלילית, והמשוב שלילי.

ההגבר בחוג סגור עבור האות v_1' נתון ע"י (143), כלומר

$$G' = \frac{v_2}{v_1'} = \frac{A}{1 - A\beta} = \frac{-A_{diff}}{1 + A_{diff} \frac{R_1}{R_2 + R_1}}$$

על ידי הצבת הביטוי $v_1' = \frac{R_2}{R_2 + R_1} v_1$ נקבל את ההגבר בחוג סגור עבור v_1 כמו בנייתוח הקודם

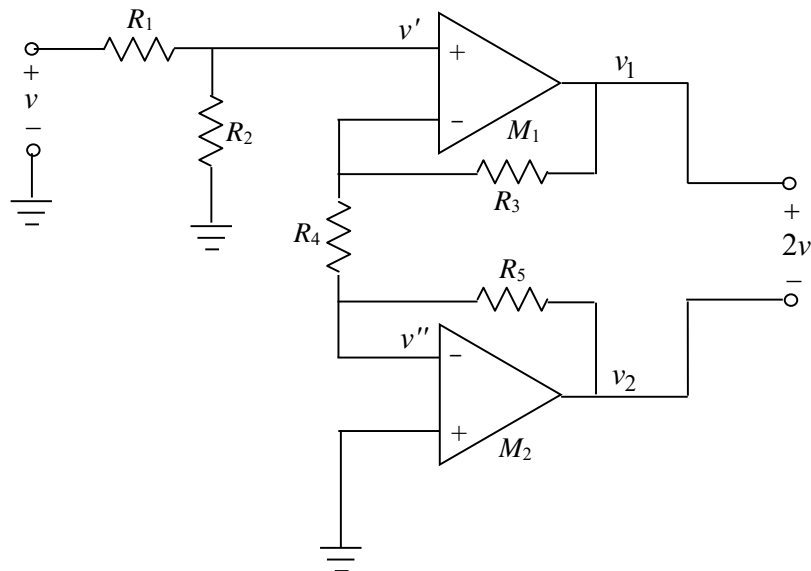
$$G = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{v_1'} \times \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{-A_{diff}}{1 + A_{diff} \frac{R_1}{R_2 + R_1}} \times \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (145)$$

אם $A_{diff} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \gg 1$, אזי (145) מקבל את הצורה $G \approx -\frac{R_2}{R_1}$ כמו בנייתוח הקודם וב- (144).

דוגמת יישום: דוחף מאוזן בעזרת מגברי שרת

המעגל שנתח ממיר אות מתח ac לא-מאוזן (מיוחס לאדמה) לאות ac מאוזן (לא מיוחס לאדמה). מעגל זה, המכונה "דוחף מאוזן" (Balanced Driver), ומכונה גם "מגבר מיכשור" (Instrumentation Amplifier), משמש בסיס למספר רב של יישומיים בתחומי תקשורת נתונים ומעבדה. נתח תצורה פשוטה ועקרונית של המעגל, המתוארת באיור 89.

נראה שהדוחף בנוי משילוב של מגבר לא-הופך ומגבר הופך, שניהם מיושמים בעזרת מגברי שרת. אות הכניסה v לדוחף (האות הרצוי) מייצג את הנתונים אותם יש להעביר, למשל, בתקשורת אינטרנט קווית בעזרת אות מודם (MODEM). אות זה נוצר במעגלים המקומיים של ציוד הנתונים, והוא אות מתח חילופין (סינוסואידלי) יחסי לאדמה. אות המוצא של הדוחף הוא הפרש המתחים בין שני המגברים M_1 ו- M_2 , ואיננו נמדד יחסית לפוטנציאל האדמה, אלא רק כהפרש המתחים בין שני קווי המוצא. אות כזה מכונה "אות מאוזן" או "צף". המוטיבציה לשימוש באות מאוזן, נובעת מהעובדה שעל גבי קווי הנתונים (שהינם בעלי התנגדות טורית לא אפסית) מתפתחים לעיתים קרובות רעשים חשמליים חזקים, הגורמים לשיבוש האותות הרצויים. רעשים כאלה נוצרים כתוצאה מהפרעות סביבתיות, כגון רעשים חשמליים הנגרמים ע"י מעגלים אלקטרוניים סמוכים בתוך ציוד הנתונים עצמו, או גורמים חיצוניים, כגון מנועים חשמליים, קווי מתח גבוה, שידורי רדיו, ברקים, וכו'. הפרעות אלה חודרות בדרכים שונות אל קווי הנתונים, ויוצרות מתחים פרזיטיים ביחס לפוטנציאל האדמה. כאשר קווי הנתונים בנויים מזוג גידים קרובים פיזית, בכל אחד משני הגידים מתפתחים מתחי הפרעה זהים יחסית לפוטנציאל האדמה. בגלל שאות המוצא המאוזן הוא הפרש המתחים בין שני הגידים, כל הפרעה שהיא זהה בשני הגידים תימחק בפעולת החיסור. כנגד זאת, אם דואגים שהאות הרצוי יופיע בגיד אחד בפאזה הפוכה יחסית לגיד השני (בסימן הפוך), פעולת החיסור תגביר פי שתיים את המתח של האות הרצוי. בכך משיגים שיפור דרמטי ביחס אות לרעש, אשר הינו הגורם העיקרי הקובע את איכות הקליטה, ואת טווח הקשר.



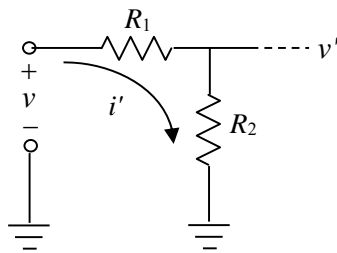
איור 89

ניתוח פעולת מעגל הדוחף המאוזן (איור 89)

היות וביישומים אמיתיים המגברים M_1 ו- M_2 בדוחף המאוזן הם מגברי שרת, נוכל להסתמך על הגישה של הקצר הוירטואלי. האות הרצוי נכנס למחלק המתח הבנוי מהנגדים R_1 ו- R_2 (איור 90). היות והתנגדות הכניסה של מגבר שרת

היא אינסופית, הזרם דרך הנגד R_2 הוא $i' = \frac{v}{R_1 + R_2}$, ולכן

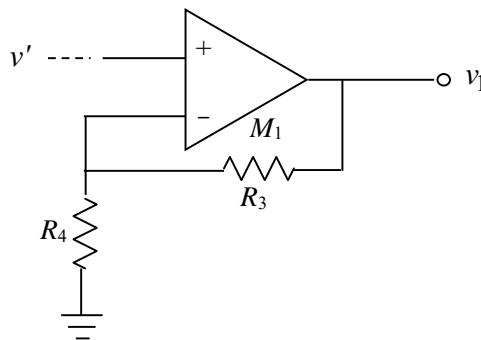
$$v' = i' R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \quad (146)$$



איור 90

בגלל הקצר הוירטואלי, הכניסה ההופכת (-) של M_2 נמצאת בפוטנציאל האדמה, ולכן $v'' = 0$. כתוצאה מכך הקצה התחתון של נגד R_4 שבאיור 89 נמצא בפוטנציאל האדמה, ולכן למעגל המבוסס על M_1 יש תצורה של מגבר לא-הופך עם אות כניסה v' . מכאן, וע"י הצבה ב- (146), מתח המוצא של M_1 יחסית לאדמה הוא

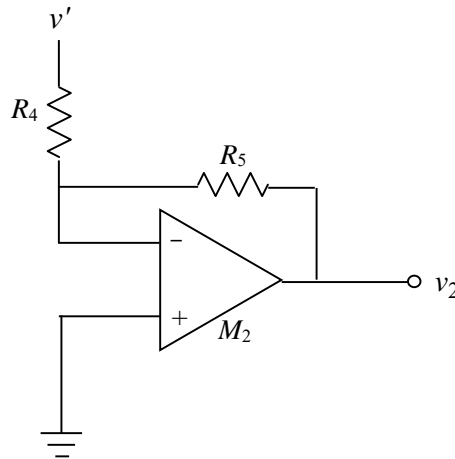
$$v_1 = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) v' = \frac{R_4 + R_3}{R_4} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \quad (147)$$



איור 91

בגלל הקצר הוירטואלי, המתח בהכניסה ההופכת (-) של M_1 הוא v' . כתוצאה מכך, הקצה העליון של נגד R_4 שבאיור 92 נמצא בפוטנציאל v' , ולמעגל המבוסס על M_2 יש תצורה של מגבר הופך עם מתח כניסה v' . מכאן, ע"י הצבה ב- (146), מתח המוצא של M_2 יחסית לאדמה הוא

$$v_2 = -\frac{R_5}{R_4} v' = -\frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \quad (148)$$



איור 92

מתוך (147) ו- (148) נקבל

$$v_1 - v_2 = \left(\frac{R_4 + R_3}{R_4} + \frac{R_5}{R_4} \right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \quad (149)$$

אם נבחר ערכים

$$R_5 = 2R, \quad R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad (150)$$

נקבל

$$v_1 - v_2 = 2v \quad (151)$$

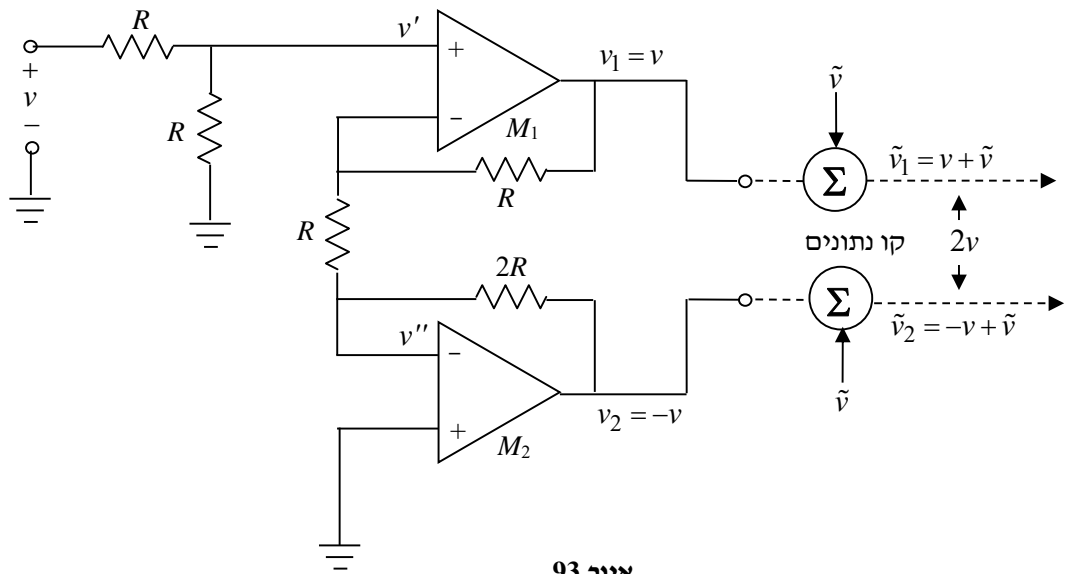
אות המוצא של כל אחד משני המגברים M_1 ו- M_2 , הינו מתח יחסי לאדמה, וכל אחד מתחבר לאחד משני הגידים של קו הנתונים. אם לאורך קו הנתונים נוספת לכל גיד הפרעת מתח זהה \tilde{v} יחסית לפוטנציאל האדמה, אזי, כפי שמתואר באיור 93, סה"כ המתחים יחסית לאדמה בקצוות הרחוקות של הקו יהיו

$$\tilde{v}_1 = v + \tilde{v} \quad (152)$$

$$\tilde{v}_2 = -v + \tilde{v} \quad (153)$$

אבל אם נמדוד את המתח בין שני הגידים של הקו, ההפרעה \tilde{v} תיעלם, ונקבל מתח "צף", נקי מהפרעה, שאיננו מיוחס לפוטנציאל האדמה, וערכו

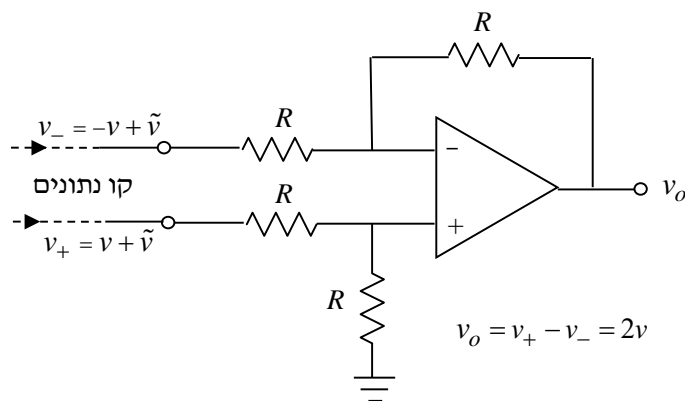
$$\tilde{v}_1 - \tilde{v}_2 = v + \tilde{v} - (-v + \tilde{v}) = 2v \quad (154)$$



איור 93

קליטת האות מדוחף מאוזן

ראינו שאות המוצא של דוחף מאוזן הינו "צף", ועל מנת לקלוט את האותות מתוך קו הנתונים, תוך סילוק הפרעות שחדרו לקו בדרך, יש לבצע חיסור בין האותות הנקלטים בכל אחד משני גידי הקו יחסית לאדמה. פעולה זו ניתנת לביצוע בדרכים שונות, שאחת מהן היא שימוש במגבר הפרש כפי שמתואר במעגל שבאיור 94.



איור 94

מגבר ההפרש הוא שילוב של תצורת מגבר הופך ותצורת מגבר לא-הופך על גבי מגבר שרת יחיד, והוא ממיר אות כניסה מאוזן לאות מוצא לא-מאוזן (אות מתח יחסי לאדמה). כדי לראות זאת נשתמש בעקרון הסופרפוזיציה. נזכור שעקרון זה (המתקיים בכל מערכת ליניארית), קובע שבמקרה שלנו מתח המוצא של מגבר ההפרש, הוא סכום של מתחי המוצא הנובעים מכל כניסה בנפרד, כאשר הכניסה האחרת מקוצרת לאדמה. על פי עקרון זה אם נציב $v_- = 0$ נקבל תצורה של מגבר לא-הופך, כאשר מתח הכניסה להדק הלא-הופך הוא $v_+ / 2$. לכן מרכיב מתח המוצא בגלל v_+ הוא

$$v_o|_{v_- = 0} = \frac{v_+}{2} \left(1 + \frac{R}{R} \right) = v_+ \quad (155)$$

אם נציב $v_+ = 0$ נקבל תצורה של מגבר הופך, כי דרך ההדק הלא-הופך לא זורם זרם ולכן הדק זה בפוטנציאל האדמה. מתח הכניסה לנגד הוא v_- . מרכיב מתח המוצא הנובע מ- v_- הוא

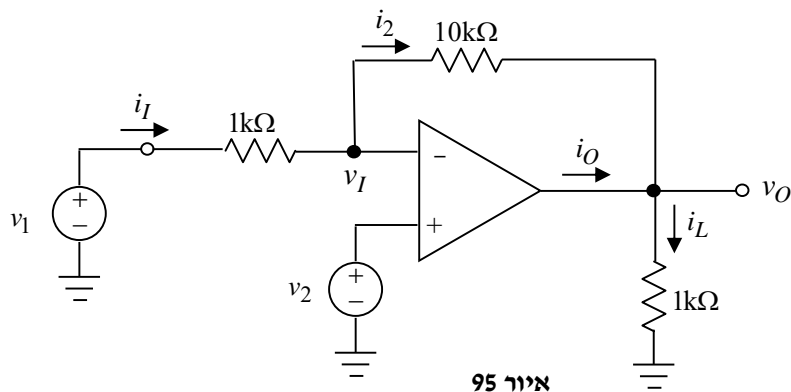
$$v_o|_{v_+ = 0} = -v_- \frac{R}{R} = -v_- \quad (156)$$

לכן על פי עקרון הסופרפוזיציה סה"כ נקבל

$$v_o = v_o|_{v_- = 0} + v_o|_{v_+ = 0} = v_+ - v_- = v + \tilde{v} - (-v + \tilde{v}) = 2v \quad (157)$$

היות ואות ההפרעה \tilde{v} היה זהה בשני הגידים של הקו, הוא מסולק ע"י פעולת החיסור.

תרגיל 21: מגבר שרת אידיאלי



איור 95

עבור המעגל שבאיור 95 חשבו את הערכים של $v_I, v_O, i_I, i_2, i_L, i_O$ עבור שני מצבים:

א. כאשר $v_1 = 1V, v_2 = 0$.

ב. כאשר $v_1 = 0, v_2 = 1V$.

פתרון:

א. כאשר $v_1 = 1V, v_2 = 0$ אזי $v_I = 0, i_I = \frac{1V}{1k\Omega} = 1mA, i_2 = i_I = 1mA, v_O = -i_2 \times 10k\Omega = -10V$

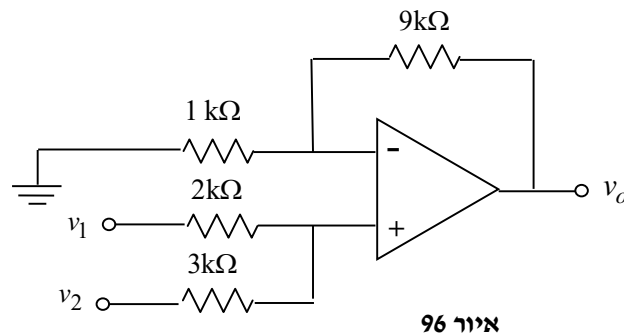
$$i_O = i_L - i_2 = -11mA, i_L = \frac{v_O}{1k\Omega} = -10mA$$

ב. כאשר $v_1 = 0, v_2 = 1V$ ואם נשמור על סימון הכוונים של הזרמים, אזי

$$i_2 = i_I = -1mA, i_I = -\frac{1V}{1k\Omega} = -1mA, v_I = 1V$$

$$i_O = i_L - i_2 = 12mA, i_L = \frac{v_O}{1k\Omega} = 11mA, v_O = v_1 - i_2 \times 10k\Omega = 1V - (-1mA) \times 10k\Omega = 11V$$

תרגיל 22: ניתוח מגבר שרת אידיאלי בעזרת סופרפוזיציה



א. השתמשו בעקרון ההרכבה (סופרפוזיציה) כדי למצוא ביטוי למתח המוצא של המעגל באיור 96 בתלות במתחים v_1, v_2 .

ב. אם במעגל שבסעיף א' מנתקים מהאדמה הנגד של $1k\Omega$, ומחברים אותו למקור מתח שלישי v_3 , השתמשו בעקרון ההרכבה כדי למצוא ביטוי למתח המוצא של המעגל בתלות במתחים v_1, v_2, v_3 .

פתרון:

א. נסמן את המתח בכניסה הלא-הופכת ב- v_+ . ההגבר מהכניסה הלא-הופכת הוא

$$A_v^+ = 1 + \frac{9k\Omega}{1k\Omega} = 10$$

על פי עקרון ההרכבה, נאפס את כל אחד מהמתחים בתורו, נחשב את מתח המוצא הנגרם על ידו, נסכם את התוצאות ונקבל את המתח המוצא אותו נסמם ע"י v_O^+

$$v_O^+ = v_+|_{v_2=0} \times A_v^+ + v_+|_{v_1=0} \times A_v^+ = \frac{v_1}{3k\Omega + 2k\Omega} \times 3k\Omega \times 10 + \frac{v_2}{3k\Omega + 2k\Omega} \times 2k\Omega \times 10 = 6v_1 + 4v_2$$

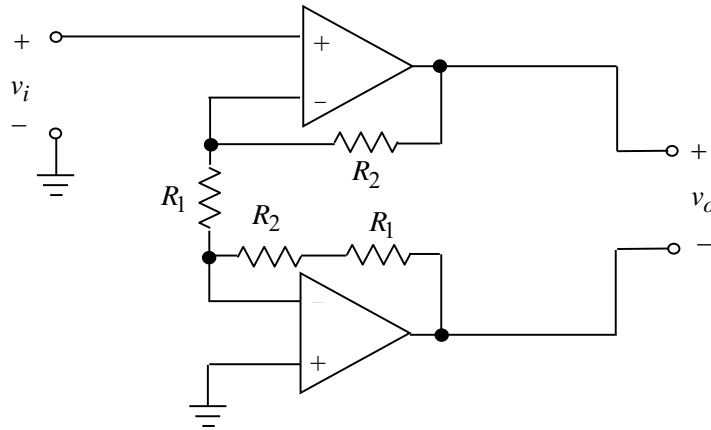
ב. על פי עקרון ההרכבה, נאפס את v_1 ואת v_2 ונחשב את מתח המוצא v_O^- הנגרם על ידי v_3 . על פי עקרום ההרכבה,

$$v_O^- = A_v^- v_3 = -9v_3 \quad \text{לכן, } A_v^- = -\frac{9k\Omega}{1k\Omega} = -9$$

$$v_O = v_O^+ + v_O^- = 6v_1 + 4v_2 - 9v_3 \quad \text{מכאן :}$$

מגברי שרת: שאלות חזרה

ש31. הניחו שמגברי השרת באיור הינם אידיאליים. v_i הוא מתח כניסה יחסית לפוטנציאל האדמה ו- v_o הוא מתח מוצא צף.



א. מצאו ביטוי להגבר $A_v = v_o / v_i$ כפונקציה של R_1 ו- R_2

תשובה:

בגלל הקצר הווירטואלי, המגבר העליון פועל בתור מגבר לא-הופך. מתח המוצא שלו v_1 נתון ע"י

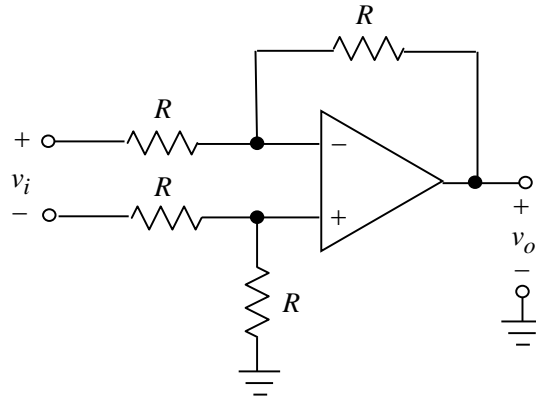
$$v_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_i$$

בגלל הקצר הווירטואלי, המגבר התחתון פועל בתור מגבר הופך. מתח המוצא שלו v_2 נתון ע"י

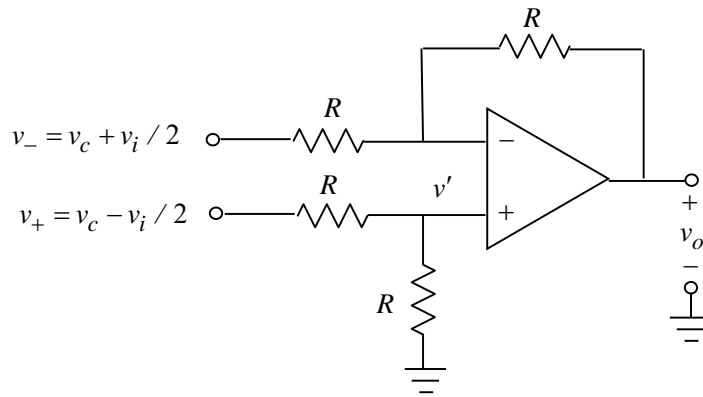
$$v_2 = -\frac{R_1 + R_2}{R_1} v_i = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_i$$

$$v_o = v_1 - v_2 = 2\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = 2\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad \text{לכן}$$

ש32. בהנחה שמגבר השרת שבאיור הינו אידיאלי, חשבו את הגבר המתח $A_v = v_o / v_i$



תשובה:



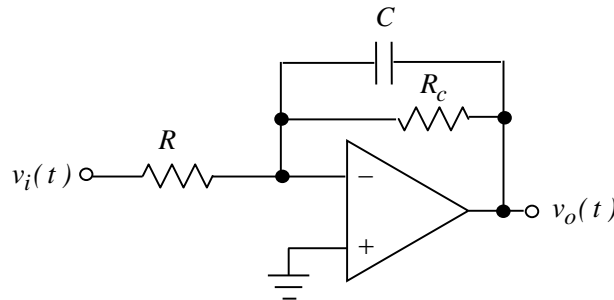
נוכל לייצג את מתח ההפרש v_i עי"י שני מתחים המיוחסים לפוטנציאל האדמה $v_+ = v_c - v_i / 2$ ו- $v_- = v_c + v_i / 2$ במקום בעזרת מתח צף, כאשר $v_- - v_+ = v_i$. כעת שהמתחים מיוחסים לאדמה, נוכל לפעול באופן דומה לחישוב שעשינו עבור איור 94 בעזרת סופרפוזיציה (שימו לב ש- v_c , המתח המשותף, לא ידוע אך אין זה משפיע):

$$v_+ \text{ מוגבר בתצורה לא הופכת, כלומר } v_o|_{v_-=0} = 2v' = v_+ , v' = \frac{v_+}{2R} \times R = \frac{v_+}{2} \Rightarrow v_o|_{v_-=0} = 2v' = v_+$$

$$v_- \text{ מוגבר בתצורה הופכת, כלומר } v_o|_{v_+=0} = -v_- , \text{ ולכן } v_o|_{v_+=0} = -v_- \Rightarrow A = -1$$

$$v_o = v_o|_{v_-=0} + v_o|_{v_+=0} = v_+ - v_- = -v_i$$

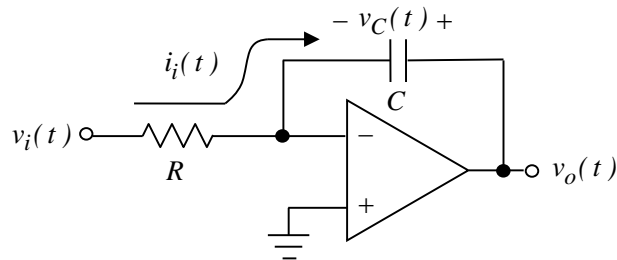
33. א. הניחו שמגבר השרת שבאיור אידיאלי ו- $R_c = \infty$, ושברגע $t = t_0$ מתח המוצא הוא $v_o(t_0)$.



הראו שהמעגל מבצע אינטגרציה עם היפוך, כלומר, שעבור $t \geq t_0$ מתקיים $v_o(t) - v_o(t_0) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t v_i(\xi) d\xi$

ב. כעת הניחו ש- $R_c < \infty$, ומצאו ביטוי לתגובת התדר $H(\omega) = V_o(\omega) / V_i(\omega)$.

תשובה:



א. בגלל הקצר הווירטואלי $i_R(t) = \frac{v_i(t)}{R}$. היות ועבור הקבל $i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$ ו- $i_C(t) = -i_R(t)$, נקבל

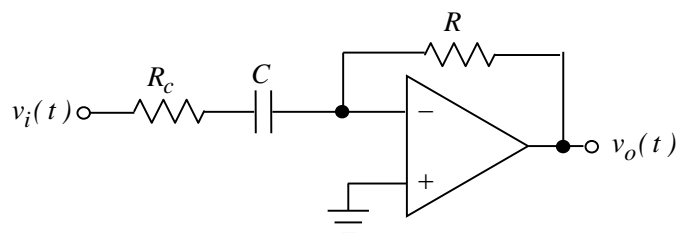
$$\frac{v_i(t)}{R} = -C \frac{dv_C(t)}{dt} \Rightarrow dv_C(t) = -\frac{1}{RC} v_i(t) dt \Rightarrow \int_{v_C(t_0)}^{v_C(t)} dv_C(\xi) = v_C(t) - v_C(t_0) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t v_i(\xi) dt$$

אבל בגלל הקצר הווירטואלי $v_o(t) = v_C(t)$ ולכן $v_C(t_0) = v_o(t_0) = V_0$ ומכאן $v_o(t) - V_0 = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t v_i(\xi) dt$

ב. בגלל הקצר הווירטואלי הכניסה ההופכת במתח אפס, והזרם דרך R הוא $I_i(\omega) = \frac{V_i(\omega)}{R}$, ולכן מתח המוצא הוא

$$V_o(\omega) = -I_i \times (R_c \parallel \frac{1}{j\omega C}) = \frac{-V_i(\omega)}{R} \times \frac{R_c \frac{1}{j\omega C}}{R_c + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{-R_c}{R} \times \frac{V_i(\omega)}{1 + j\omega R_c C} \Rightarrow H(\omega) = \frac{-R_c / R}{1 + j\omega R_c C}$$

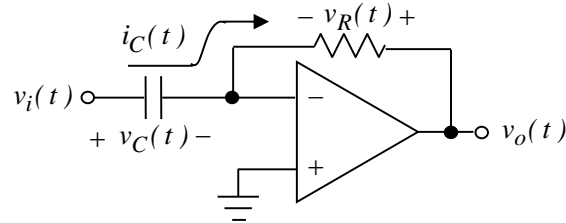
34ש. א. הניחו שמגבר השרת שבאיור אידיאלי ו- $R_c = 0$.



הראו שהמעגל מבצע גזירה עם היפוך, כלומר, $v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$.

ב. כעת הניחו ש- $R_c > 0$, ומצאו ביטוי לתגובת התדר $H(\omega) = V_o(\omega) / V_i(\omega)$.

תשובה :



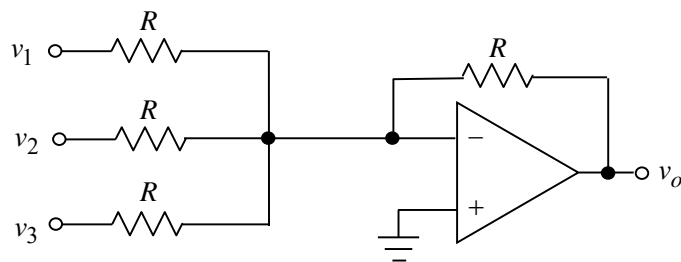
א. בגלל הקצר הווירטואלי $v_C(t) = v_i(t)$ ולכן $v_o(t) = v_R(t) - i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} = C \frac{dv_i(t)}{dt}$ מכאן
 $v_R(t) = v_o(t) = -i_C(t)R = -RC \frac{dv_i(t)}{dt} \Rightarrow v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$

ב. בגלל הקצר הווירטואלי הכניסה ההופכת במתח אפס, והזרם $I_C(\omega)$ דרך האימפדנס $R_c + 1/j\omega C$ הוא

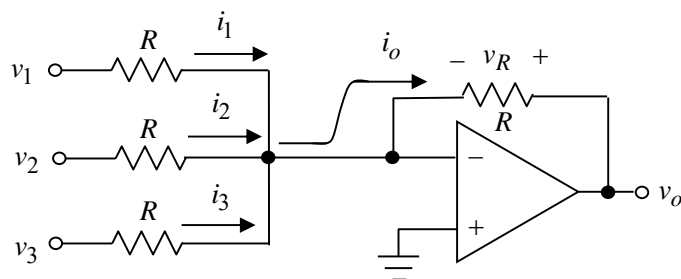
$$I_C(\omega) = \frac{V_i(\omega)}{R_c + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega C}{1 + j\omega R_c C} V_i(\omega)$$

$$V_o(\omega) = -I_C(\omega)R = \frac{-j\omega RC}{1 + j\omega R_c C} V_i(\omega) \Rightarrow H(\omega) = \frac{-j\omega RC}{1 + j\omega R_c C} \quad \text{ולכן}$$

35. הניחו שמגבר השרת שבאיור אידיאלי. הראו שמתח המוצא של המעגל הוא סכום מתחי המבוא בהיפוך סימן.



תשובה :



בגלל הקצר הווירטואלי, $i_n = \frac{v_n}{R}$, $n = 1, 2, 3$, וגם $v_o = v_R$ לכן

$$i_o = i_1 + i_2 + i_3 = \frac{1}{R}(v_1 + v_2 + v_3) \Rightarrow v_o = v_R = -i_o R = -(v_1 + v_2 + v_3)$$

36. המעגל שבאיור בנוי בעזרת מגבר שרת לא אידיאלי בעל הגבר מתח בחוג פתוח $A_{diff} = 10,000$ (ראו משוואה (138)), אך עדיין אפשר לקרב התנגדות כניסה $R_+, R_- \approx \infty$ והתנגדות מוצא $R_{out} \approx 0$. בהסתמך על עקרונות המשוב,

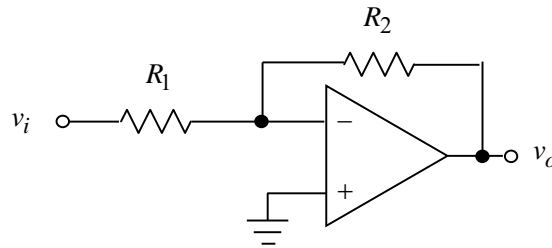
חשבו את הגבר המתח בחוג סגור $G = \frac{v_o}{v_i}$ עבור

א. $R_1 = 2k\Omega, R_2 = 20k\Omega$

ב. $R_1 = 2k\Omega, R_2 = 2M\Omega$

ג. $R_1 = 200\Omega, R_2 = 2M\Omega$

בכל אחד מהמקרים השוו את ההגבר שחישבתם להגבר G_{ideal} שהיה מתקבל אם מגבר השרת היה אידיאלי.



תשובה:

המגבר הוא מגבר הופך. על פי (145) ההגבר בחוג סגור הוא $G = \frac{-A_{diff}}{1 + A_{diff} \frac{R_1}{R_2 + R_1}} \times \frac{R_2}{R_2 + R_1}$, וההגבר האידיאלי הוא

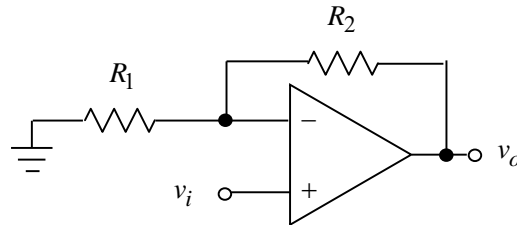
$$\text{לכן } G_{ideal} = -\frac{R_2}{R_1}$$

א. $G = \frac{-10^4}{1 + 10^4 \times \frac{2}{20+2}} \times \frac{20}{20+2} \approx \frac{-10^4}{1+910} \times 0.91 \approx -9.99, G_{ideal} = -\frac{20}{2} = -10$

ב. $G = \frac{-10^4}{1 + 10^4 \times \frac{2}{2000+2}} \times \frac{2000}{2000+2} \approx \frac{-10^4}{1+9.99} \times 0.999 \approx -909, G_{ideal} = -\frac{2000}{2} = -1000$

$$G = \frac{-10^4}{1+10^4 \times \frac{0.2}{2000+0.2}} \times \frac{2000}{2000+0.2} \approx \frac{-10^4}{1+0.999} \times 0.9999 \approx -5000, G_{ideal} = -\frac{2000}{0.2} = -10,000 \text{ ג.}$$

ש37. חזרו על תרגיל ש36 עבור המגבר שבאיור להלן



תשובה:

המגבר הוא מגבר לא- הופך. על פי (143) ההגבר בחוג סגור הוא $G = \frac{A}{1-A\beta} = \frac{A_{diff}}{1+A_{diff} \frac{R_1}{R_1+R_2}}$, וההגבר האידיאלי

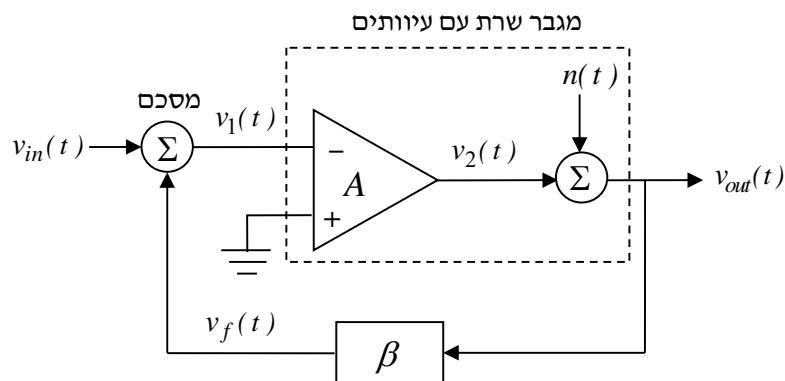
הוא $G_{ideal} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ לכן

א. $G = \frac{10^4}{1+10^4 \times \frac{2}{20+2}} \approx \frac{10^4}{1+910} \approx 10.98, G_{ideal} = 1 + \frac{20}{2} = 11$

ב. $G = \frac{10^4}{1+10^4 \times \frac{2}{2000+2}} \approx \frac{10^4}{1+9.99} \approx 909.9, G_{ideal} = 1 + \frac{2000}{2} = 1001$

ג. $G = \frac{10^4}{1+10^4 \times \frac{0.2}{2000+0.2}} \approx \frac{10^4}{1+0.9999} \approx 5000, G_{ideal} = 1 + \frac{2000}{0.2} = 10,001$

ש38. האיור מתאר מגבר משוב הבנוי ממגבר שרת לא-אידיאלי בעל הגבר דיפרנציאלי $0 < A < \infty$.



רשת המשוב $\beta > 0$, מחזירה דגימת מתח $v_f(t) = \beta v_{out}(t)$ מתוך מתח המוצא $v_{out}(t)$. שני המתחים $v_{in}(t)$ ו- $v_f(t)$ מסתכמים דרך מסכם המתח Σ , ויחדיו מהווים את אות הכניסה למגבר השרת. למגבר השרת יש עיוותים. את המגבר עם העיוותים ניתן לייצג בצורת מגבר ללא עיוותים בתוספת אות רעש $n(t)$ המייצג את העיוותים, והמתווסף ל- $v_2(t)$. הוכיחו שעבור אות מוצא $v_{out}(t)$ זהה, עיוותי המגבר עם המשוב קטנים פי $1 + \beta A$ בהשוואה לעיוותים של המגבר ללא המשוב (ללא משוב, פירושו $\beta = 0$).

תשובה:

ע"י הסתכלות באיור נוכל לכתוב

$$v_1(t) = v_{in}(t) + v_f(t) = v_{in}(t) + \beta v_{out}(t)$$

$$\begin{cases} v_2(t) = -A(v_{in}(t) + \beta v_{out}(t)) \\ v_{out}(t) = v_2(t) + n(t) \end{cases} \Rightarrow v_{out}(t) = -A v_{in}(t) - A\beta v_{out}(t) + n(t)$$

מהמשוואה האחרונה נובע

$$v_{out}(t)(1 + A\beta) = -A v_{in}(t) + n(t)$$

לכן, אם נסמן את ההגבר עם משוב ע"י A_f , נקבל $A_f = -\frac{A}{1 + A\beta}$ כי

$$v_{out}(t) = -\frac{A}{1 + A\beta} v_{in}(t) + \frac{n(t)}{1 + A\beta} = \underbrace{A_f v_{in}(t)}_{v_2(t)} + \frac{n(t)}{1 + A\beta} = v_2(t) + \frac{n(t)}{1 + A\beta}$$

כאשר במגבר ללא משוב, ועם אות זהה במוצא $v_{out}(t) = v_2(t) + n(t)$