



מגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים

אלקטרוניקה תקבילית וספרתית

3.....	דבר המפמ"ר
4.....	פרק 1 - אותות תקביליים וספרתיים
28	פרק 2 - מגברי שרת
78	פרק 3 - חיישנים ומתמרים
91	פרק 4 - משווה בחוג פתוח
109	פרק 5 - דיודות
126	פרק 6 - טרנזיסטור דו־נושאי
149	פרק 7 - ספקים ומייצבי מתח
171	פרק 8 - רשת מעבירה נמוכים וגבוהים

דבר המפמ"ר

אנו עומדים בפתחה של תקופה של חידושים טכנולוגיים, אתגרים חשיבתיים והתנסויות מרתקות. במגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים אתם תחשפו לסביבת למידה מתקדמת ומשמעותית. זכרו, כי אתם חלק חשוב מהמחר ובידכם הכוח והידע לקחת חלק בפיתוח דור העתיד.

הפקדתי בידי צוות מורי המגמה, אחריות רבה, לחשוף אתכם לידע חדשני, להנחות אתכם בפרויקטים מאתגרים ולהוביל אתכם להצלחה.

שלומי אדמונד אחנין

מפמ"ר מגמות הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים ומערכות בקרה ואנרגיה

פרק 1 - אותות תקביליים וספרתיים

יעדים לימודיים

בסוף יחידת הלימוד התלמיד יהיה מסוגל לבצע את הפעולות הבאות:

- א. הגדרת המושגים: אות, אות מחזורי, אות חילופין.
- ב. אפיון וסיווג אותות לפי:
 1. מחזורי / לא מחזורי.
 2. תקבילי / ספרתי.
 3. סימטרי / אנטי-סימטרי / ללא סימטריה.
 4. חילופין / לא חילופין.
- ג. מציאת הערך המרבי, ערך "שיא לשיא" – על-פי גרף של אות.
- ד. מציאת זמן המחזור, התדירות והתדירות הזוויתית של אות סינוסואידלי לפי הפונקציה המתמטית או התיאור הגרפי שלו.
- ה. רישום משוואה של פונקציית סינוס על-פי גרף.
- ו. סרטוט תרשים עקרוני של אות סינוסואידלי לפי פונקציית האות.
- ז. מציאת הזמנים שבהם האות הסינוסואידלי מקבל ערך מרבי, ערך מזערי או ערך של אפס.
- ח. סרטוט אות סינוסואידלי באמצעות מחשב (אקסל / MATLAB / MULTISIM / אחר) – על-פי: תדירות האות, תנופתו וזווית המופע שלו.
- ט. סרטוט אות ספרתי בינארי באמצעות תוכנת הדמיה.
- י. מעבדה: הצגת תמונה של אות סינוסואידלי על-גבי סקופ ומציאת הפרמטרים שלו.
- יא. מעבדה: הצגת תמונה של אות ריבועי (ספרתי) על-גבי סקופ, מציאת התדר שלו וערכי רמות המתח.

מבוא לאותות

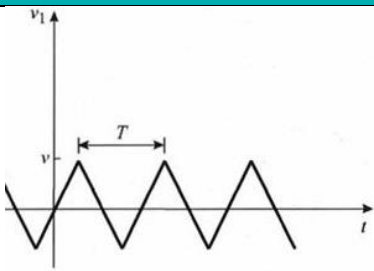
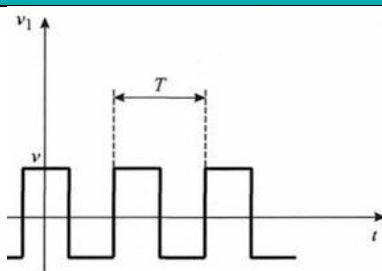
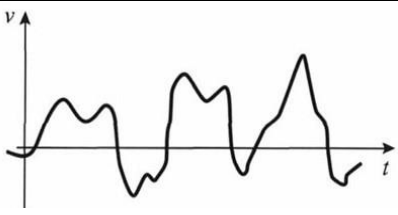
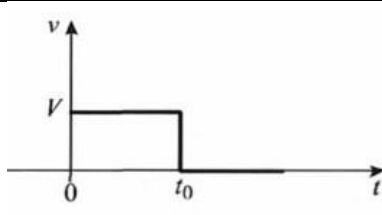
אחד היישומים העיקריים של האלקטרוניקה הוא **עיבוד מידע (information)**. מידע הוא אמצעי בשביל לתאר מצב, אירוע או מגמה. מידע על הטמפרטורה בירושלים הוא תיאור מצב, מידע על ירידת גשם בירושלים הוא תיאור אירוע, ומידע על התחממות צפויה הוא תיאור מגמה.

אות (signal) הוא גודל פיזיקלי משתנה תלוי זמן, המייצג מידע ומשמש אמצעי כדי להעביר אותו. כדי להעביר מידע על מזג האוויר בירושלים לאדם מסוים, יש להפוך אותו לאות. האות יכול להיות אופטי (כמו במדחום), קולי (הטמפרטורה המושמעת ברדיו למשל) או להופיע בכל צורה אחרת. גם אות חשמלי פירושו זרם או מתח המשתנים על-פי הזמן.

הפקת המידע מהאות הנקלטת היא צורה מסוימת של **עיבוד אות**. עליה ועל צורות נוספות של עיבוד אותות נלמד בהמשך.

כאמור, מערכות אלקטרוניות עוסקות בין היתר בעיבוד אותות. כדי שמערכת אלקטרונית תעבד אות המייצג גודל פיזיקלי כלשהו (קול, אור, טמפרטורה, תנועה וכדומה), יש להמיר אותו באות חשמלי. כדי להמיר אות כלשהו לאות חשמלי משתמשים בהתקן הנקרא **מתמר**, ועליו נלמד בפרק 3.

כפי שצוין קודם, האות הנקלט הוא גודל פיזיקלי משתנה תלוי זמן, כלומר הוא פונקציה של הזמן. אפשר לתאר אותו באמצעות ביטוי מתמטי (פונקציה) או גרף כמו זה שבאיור 1.1. קיימים סוגים רבים של אותות, ואפשר לסווג אותם לפי מאפיינים שונים. בטבלה 1 מתוארת החלוקה המקובלת של האותות על-פי המאפיינים שלהם: אות תקבילי לצד אות ספרתי; אות מחזורי לעומת אות לא מחזורי. קיימות אפשרויות רבות נוספות כדי לאפיין אותות כגון: אות חילופין – אות המשנה את הקוטביות שלו – לעומת אות לא חילופין; אות סימטרי (זוגי) או אנטי-סימטרי (אי-זוגי) לעומת כזה שאינו אחד מהם.

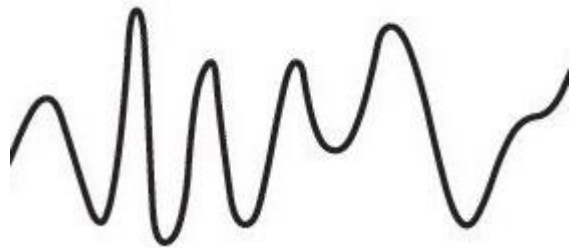
תקבילי	ספרתי	
 איור 1.1: אות תקבילי מחזורי	 איור 1.2: אות ספרתי מחזורי	מחזורי
 איור 1.3: אות תקבילי לא מחזורי	 איור 1.4: אות ספרתי לא מחזורי	

טבלה 1 חלוקת אותות לפי האפיון שלהם

אותות תקביליים מחזוריים

כפי שצוין קודם, **אות (signal)** הוא גודל פיזיקלי משתנה תלוי זמן, המייצג מידע ומשמש אמצעי כדי להעביר אותו.

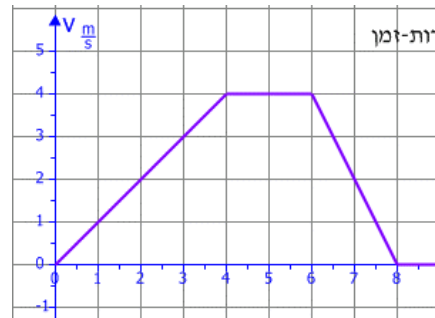
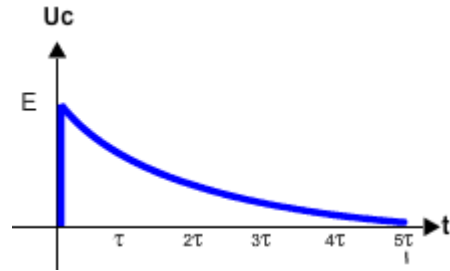
אות תקבילי (analog signal) הוא אות המוגדר בכל זמן ויכול לקבל מספר אין-סופי של ערכים. נחלק כאן בין אותות תקביליים מחזוריים ללא מחזוריים. האלקטרוניקה התקבילית מטפלת באותות תקביליים או באותות אנלוגיים. אות תקבילי יכול לקבל בכל רגע ורגע ערך אחד מתוך רצף של ערכים. כדי שיוכל לקבל ערך כלשהו מתוך הרצף הזה הוא צריך להיות מוגדר בכל רגע ורגע, כלומר אסור שיהיו "קפיצות" בערכים שלו. רוב האותות הפיזיקליים הם אנלוגיים. לדוגמה: מהירות של גוף נע בתלות בזמן. יש רציפות בערכים שמהירות זו יכולה לקבל, ולא ייתכן שהיא לא תהיה מוגדרת בכל רגע במהלך התנועה.



איור 1.2 אות אנלוגי רציף

אותות לא מחזוריים:

אות לא מחזורי (non-periodic signal) אינו חוזר על עצמו מדי פרק זמן קבוע. באיור 1.6 מתוארים כמה אותות לא מחזוריים: מתח על-פני קבל בזמן פריקה דרך נגד; אות אקראי, למשל במופץ של מקלט רדיו שלא מכוון לתחנה כלשהי – במקרה כזה נשמע רחש קבוע ברמקול; ואות המתאר מהירות של הולך רגל על-פי תלות בזמן.



איור 1.3 מספר דוגמאות של אותות אנלוגיים

אותות מחזוריים:

כשבאים לדבר על אותות מחזוריים צריך קודם כול להגדיר, שערכים של **אות מחזורי (periodic signal)** חוזרים על עצמם מדי פרק זמן קבוע. פרק הזמן הקבוע הקצר ביותר שלאחריו הם עושים את זה נקרא **זמן המחזור (period time)** של האות, ונסמן אותו באמצעות האות T .

את המחזוריות של האות אפשר לבטא באופן מתמטי בצורה הזאת:

$$(1.1) \quad g(t) = g(t + T)$$

לפי משוואה 1.1 ערך האות המחזורי $g(t)$ ברגע t שווה לערכו ברגע $(t + T)$ בעבור כל רגע ורגע. T הוא כאמור זמן המחזור של האות.

המחזור (cycle) של האות המחזורי הוא החלק בגרף שמתאר אותו במשך זמן של מחזור אחד.

באיור אפשר לראות שהאותות נבדלים זה מזה ב"צפיפות". ככל שזמן המחזור קטן יותר כך האות "צפוף" יותר, כלומר הוא חוזר על עצמו מספר רב יותר של פעמים בפרק זמן כלשהו. מספר המחזורים של האות בשנייה אחת נקרא **התדר** או **התדירות שלו (frequency)**, ונסמן אותו באמצעות האות f . התדר נתון על-ידי הביטוי:

$$(1.2) \quad f = \frac{1}{T}$$

יחידה זו נקראת **הרץ (Hertz)** ומסומנת כך: [Hz].

פונקציות הסינוס והקוסינוס מוגדרות בעבור משתנה זוויתי ומשלימות מחזור בכל זווית של 2π רדיאנים, כלומר 360° . אם זמן המחזור הוא T , אז בשנייה אחת הזווית משתנה בשיעור של:

$$(1.3) \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

ω מסמל את המהירות הזוויתית (angular velocity) או את התדירות הזוויתית

(angular frequency) של האות המחזורי. יחידת המהירות הזוויתית היא: $\frac{rad}{sec}$

הגדרה זו של המהירות הזוויתית, כלומר המכפלה שלה – 2π , חלה על כל אות מחזורי ולא דווקא על אותות סינוסואידליים.

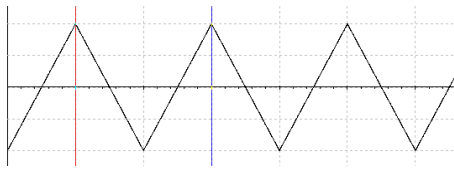
ערך השיא (peak value, maximum value) של האות הוא הערך הרגעי הגדול ביותר שלו.

עד כאן הגדרנו כמה גדלים המאפיינים כל אות מחזורי. בין האותות המחזוריים יש גם אותות המכונים אותות חילופין.

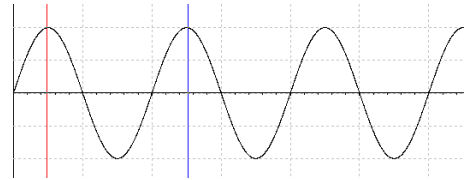
אות חילופין (alternating signal) הוא אות מחזורי המשנה את הקוטביות שלו בכל מחזור.

אות סינוסואידלי (sinusoidal signal) הוא דוגמה לאות חילופין מחזורי – אחד האותות השימושיים והנפוצים באלקטרוניקה. אות סינוסואידלי משתנה בתלות בזמן לפי פונקציית הסינוס (או הקוסינוס).

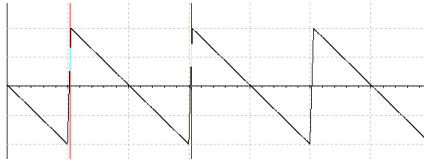
באיור 1.7 אפשר לראות כמה סוגים של אותות חילופין מחזוריים.



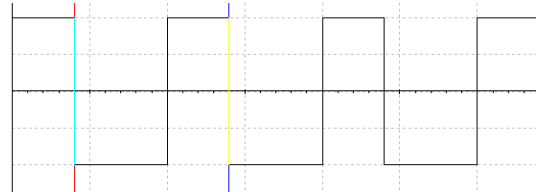
ב – אות משולש



א – אות סינוסואידלי



ד – אות שן מסור



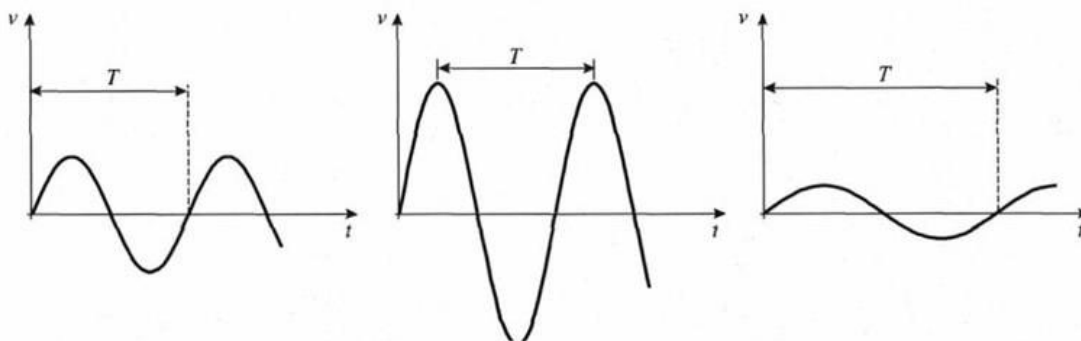
ג – אות ריבועי

איור 1.7 סוגי אותות חילופין מחזוריים

האות הסינוסואידלי

האות הסינוסואידלי הוא דוגמה לאות חילופין מחזורי – אחד האותות השימושיים והנפוצים באלקטרוניקה. כשמציינים זרם או מתח של חילופין מתכוונים לרוב לזרם או מתח המשתנים בצורה סינוסואידלית.

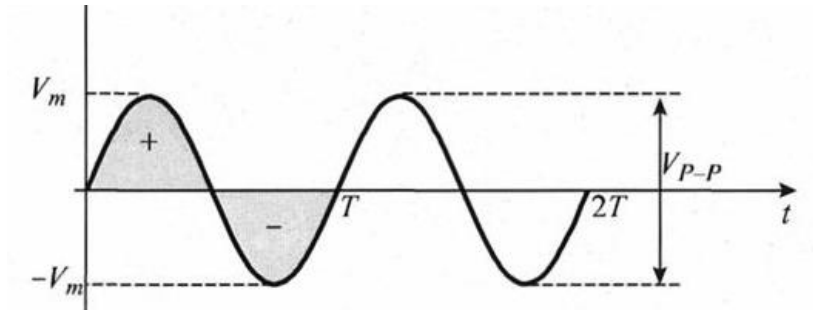
באיור 1.8 מתוארים גרפים של כמה אותות סינוסואידליים. הם משורטטים בקנה מידה זהה, וזמני המחזור של האותות מסומנים בהם.



איור 1.8 אותות סינוסואידליים

נגדיר אם כן עוד כמה גדלים המאפיינים אותות סינוסואידליים. לצורך ההגדרות ניעזר באות מתח סינוסואידלי מאיור 1.8 הנתון על-ידי המשוואה הבאה:

$$(1.4) \quad v(t) = V_m \cdot \sin(\omega t)$$



איור 1.9 הגרף של האות: $v(t) = V_m \cdot \sin(\omega t)$

ההפרש בין הערך הגדול ביותר של האות לערך הקטן ביותר שלו נקרא **ערך השיא לשיא (peak to peak value)** של האות הסינוסואידלי. הוא מסומן כך: V_{p-p} .

גודל השווה למחצית ערך השיא לשיא של האות נקרא **התנופה (amplitude)** שלו. הוא מסומן כך: V_m . התנופה וערך השיא לשיא מסומנים באיור 1.9.

הערך הממוצע (average value) של האות מתקבל מחישוב השטח הכלוא בין מחזור אחד שלו לציר ה-x וחילוק התוצאה בזמן המחזור (T). יש לשים לב ששטח הנמצא מעל ציר ה-x נחשב שטח חיובי, ושטח הנמצא מתחת ציר ה-x נחשב שטח שלילי.

על-פי איור 1.9 אפשר לראות, שהערך הממוצע של אות סינוסואידלי הוא אפס.

ההספק הממוצע (average power) שאות סינוסואידלי יוצר בצרכן, מתקבל מחישוב האנרגיה שהוא מעביר לו במשך מחזור אחד וחילוק התוצאה בזמן המחזור (T).

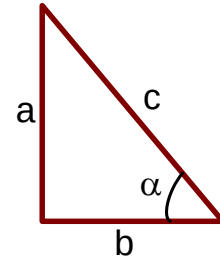
ערך יעיל (אפקטיבי) של אות סינוסואידלי מוגדר בתור מתח (או זרם) ישר היוצר בצרכן הֶסֶפֶק שווה, כמו ההספק הממוצע שהאות הסינוסואידלי עצמו יוצר בצרכן זה. אפשר לחשב את הערך האפקטיבי של האות הסינוסואידלי לפי המשוואה הבאה:

$$(1.5) \quad V_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

חזרה – פונקציית סינוס

בלימודי הטריגונומטריה ראיתם, שפונקציית הסינוס היא היחס במשולש ישר-זווית בין הניצב מול הזווית ליתר – כמתואר באיור 1.10.

$$\sin(\alpha) = \frac{a}{c} = \frac{\text{ניצב מול הזווית}}{\text{יתר}}$$

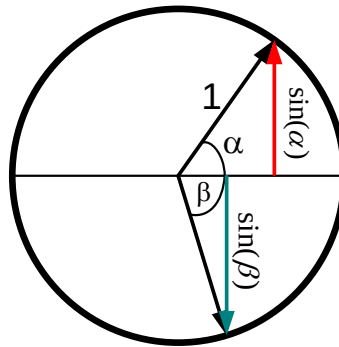


איור 1.10 הגדרת פונקציית הסינוס במשולש ישר-זווית

הגדרה זו של פונקציית הסינוס מוגבלת לזוויות בתחום של 0 עד 90 בלבד. כדי להרחיב את פונקציית הסינוס גם לזוויות שליליות ולזוויות הגדולות מ-90, אפשר לייצג אותה באמצעות רכיב ה-y של מחוג במעגל היחידה – כמתואר באיור 1.11.

$$\sin(\alpha) > 0$$

$$\sin(\beta) < 0$$



איור 1.4 תיאור פונקציית הסינוס במעגל היחידה

כעת נראה את הייצוג הגרפי של פונקציית הסינוס באמצעות גרף, כמתואר באיור 1.12. הגרף מתאר את ערך רכיב ה-y של מחוג במעגל היחידה, המצוי בזווית מסוימת (α) מציר ה-x. מן הגרף אפשר להסיק את הנתונים הבאים:

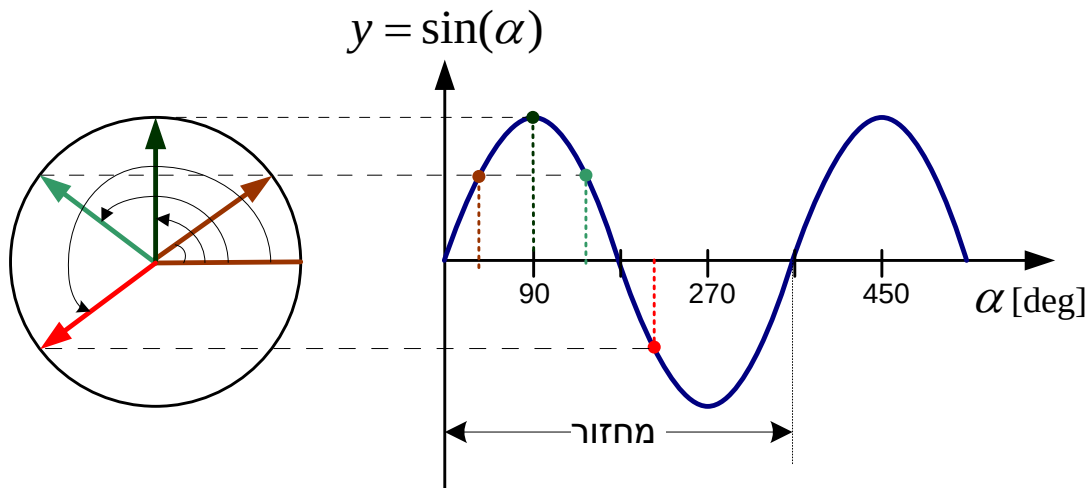
1. בזווית של 0° מקבלים: $y = \sin(0^\circ) = 0$.

2. בזווית של 90° מקבלים: $y = 1$.

3. בזווית של 180° מקבלים שוב: $y = 0$.

4. בזווית של 270° או -90° מקבלים: $y = -1$.

מחוג היחידה חוזר לנקודת ההתחלה כעבור 360° , ומכאן לומדים שמחזור של אות סינוס הוא 360° .



איור 1.12 ייצוג גרפי של פונקציית סינוס

עד כאן סרטטנו את גרף הפונקציה בעבור זוויות המוגדרות ביחידת המידה מעלות. זה המקום לציין שיש יחידת מידה נוספת לזוויות, והיא נקראת **רדיאן (radian)**.

הקשר בין מדידת זווית במעלות למדידת זווית ברדיאנים

מעלה היא יחידת מידה למדידת זוויות. במעגל יש 360 מעלות, כלומר 1° היא זווית של

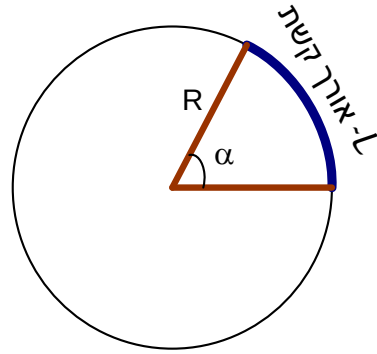
$$\frac{1}{360} \text{ מהמעגל.}$$

רדיאן היא יחידת מידה חסרת ממד למדידת זוויות.

$1[\text{rad}]$ מסמל זווית היוצאת ממרכז המעגל, וקשת באורך רדיוס המעגל יוצרת אותה. מפני שהיקף מעגל הוא $2\pi R$ יש בו 2π רדיאנים.

$$1[\text{rad}] \approx 57.3[\text{deg}]$$

באופן כללי נגדיר זווית הנמדדת ברדיאנים בעזרת היחס בין אורך הקשת לרדיוס המעגל, כמתואר באיור 1.13.



$$\alpha[rad] = \frac{L}{R} = \frac{\text{אורך קשת}}{\text{רדיוס}}$$

איור 1.13 הגדרת הזווית ברדיאנים

יש אפשרות להמיר זווית הנתונה לנו ברדיאנים לזווית במעלות, וגם להפך:

1. אם α נתונה ברדיאנים ונרצה לקבל אותה במעלות, אפשר להשתמש בנוסחה

הזאת:

$$\alpha_{[deg]} = \alpha_{[rad]} \times \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

2. אם α נתונה במעלות ונרצה לקבל אותה ברדיאנים, אפשר להשתמש בנוסחה

הזאת:

$$\alpha_{[rad]} = \alpha_{[deg]} \times \left(\frac{\pi}{180} \right)$$

עד עכשיו טיפלו בפונקציית סינוס טריגונומטרית, אבל זה המקום לציין שבעצם אנחנו מעוניינים בהגדרה של אות סינוסואידלי המתנהג כפונקציית סינוס. לפיכך נגדיר תחילה כמה מושגים בסיסיים באותות מחזוריים.

תיאור כללי של אות סינוסואידלי

אם הזווית α משתנה בקצב קבוע על-פי הזמן אפשר לרשום: $\alpha = \omega \cdot t$, ואז פונקציית הסינוס תיחשב לפונקציה התלויה בזמן. במצב הזה אפשר לראות שאות הסינוס חסום בין הערך המרבי 1 לערך המזערי -1.

$$y(t) = \sin(\omega \cdot t)$$

אם נרצה להציג אות סינוסואידלי בעל ערך מרבי הגדול מ-1 וערך מזערי הקטן מ-1, נוכל

לרשום את האות בצורה הזאת:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

הגודל A מייצג את התנופה או את המְשָׁרַעַת (אמפליטודה) של האות.
האות הסינוסואידלי הוא כידוע אות מחזורי, וסרטוט הגרף תלוי במידה ניכרת בנקודת הזמן
שבה החלטנו להתחיל את המדידה. לכן הגרף לא חייב להתחיל תמיד בנקודה $(0,0)$.
במקרה הזה נוכל לרשום את המשוואה של האות הסינוסואידלי בצורה הכללית ביותר:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

הגודל ϕ מציין את **הסחת המופע (פְּזָה)** של האות [=הזזה בציר הזמן].
נרשום לדוגמה את הביטוי של המתח הסינוסואידלי. במצב הזה נוכל לרשום:

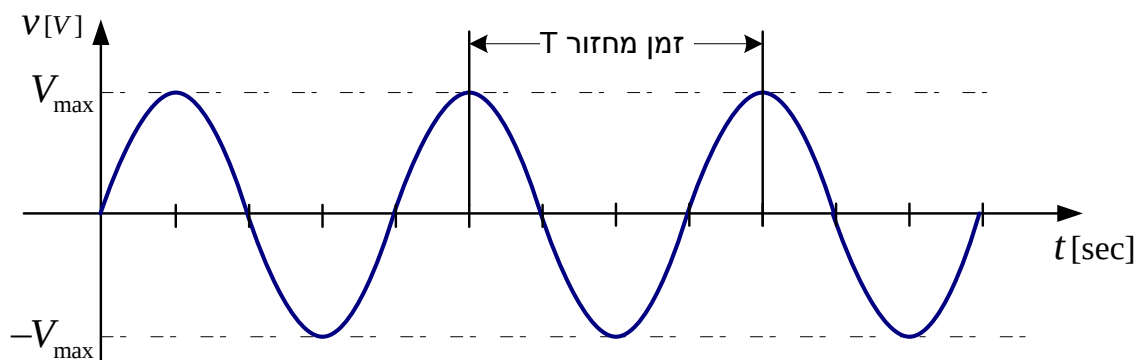
$$v(t) = V_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

V_m – **תנופה, מְשָׁרַעַת (amplitude)**: מציין את המתח המרבי שאליו האות מגיע.

f – **תדירות (frequency)**: מציין את מספר המחזורים של האות בשנייה אחת, אפשר
לחשב אותו לפי התדירות הזוויתית ω .

ϕ – **מופע (phase)**: מציין באיזה ערך האות מתחיל בעבור זמן אפס.

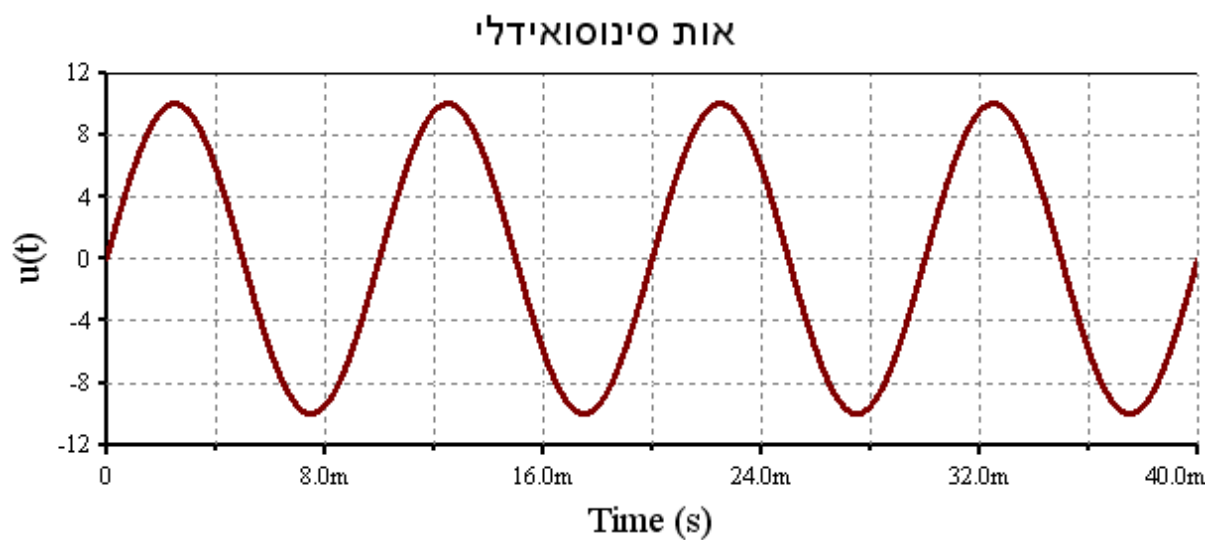
באיור 1.14 מתואר ייצוג גרפי של אות סינוסואידלי על-פי הצורה: $v(t) = V_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$



איור 1.14 תיאור גרפי של אות סינוסואידלי כללי

דוגמה 1: הצגת אות סינוסואידלי הכולל ערכים

לאחר הצבת הערכים: $\phi = 0$, $\omega = 200\pi$ [rad/sec], $U_m = 10$ [V], מקבלים את האות
המוצג באיור 1.15.



איור 1.15 גרף של אות סינוסואידלי לפי נתונים

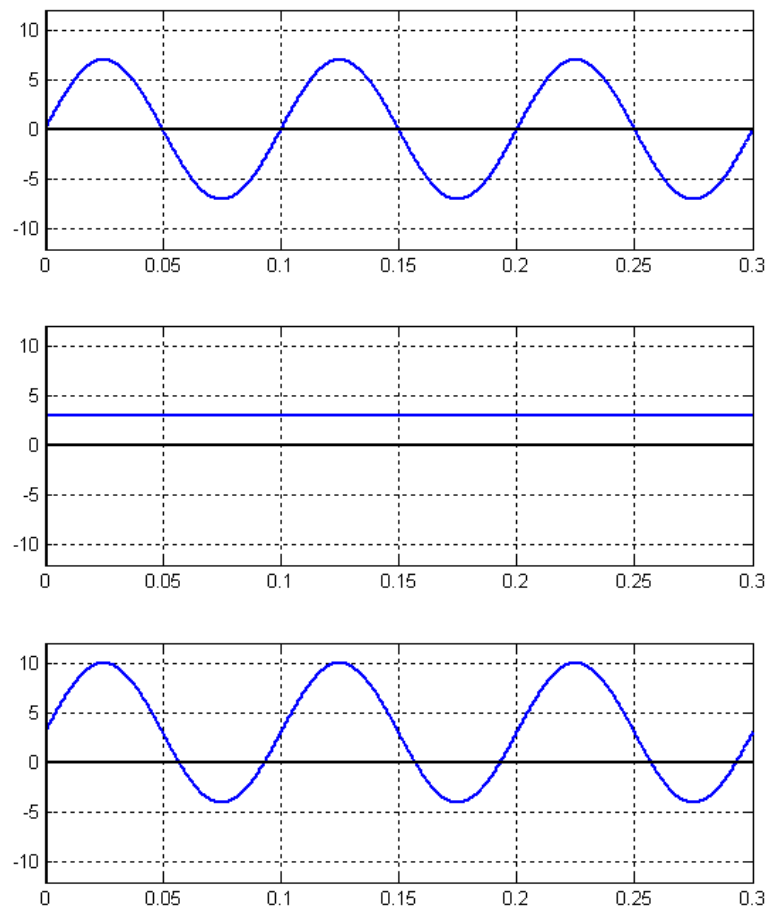
כמו שאפשר להסיח את האות הסינוסואידלי בציר הזמן הקרוי מופע, ככה אפשר לעשות גם בציר העוצמה. במצב הזה מוסיפים לו ערך קבוע, ונדגים זאת באמצעות אות מתח סינוסואידלי.

רכיב DC של אות AC:

לאות הסינוסואידלי אפשר להוסיף רכיב DC פנימי, המציין באיזו מידה צריך להעלות אותו מעל ציר ה-x מבחינה גרפית. התיאור המתמטי נתון על-ידי הביטוי:

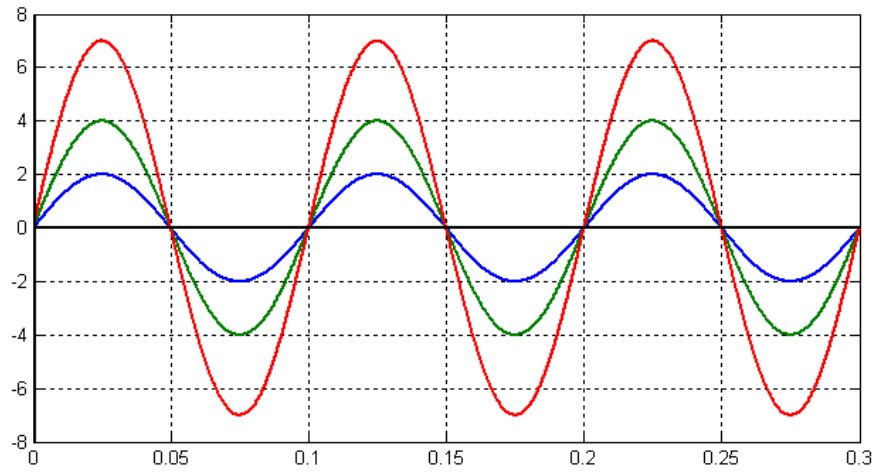
$$(1.6) \quad v(t) = V_{DC} + V_m \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

הגרפים הנתונים באיור 1.16 מתארים את רכיב ה-DC של האות (קבוע) ורכיב ה-AC של האות (סינוס), ובהמשך מצורף קוד ה-MATLAB שבאמצעותו סורטטו הגרפים.

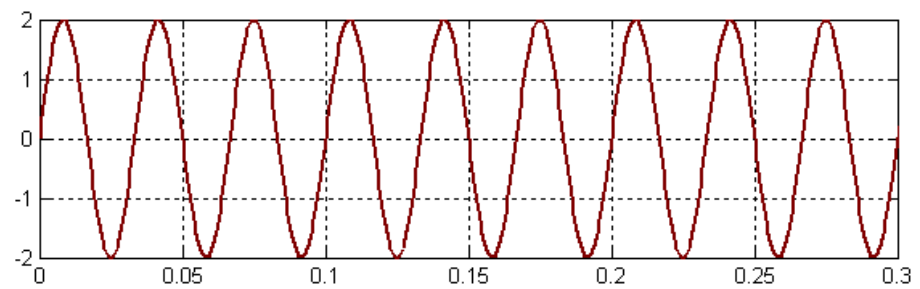
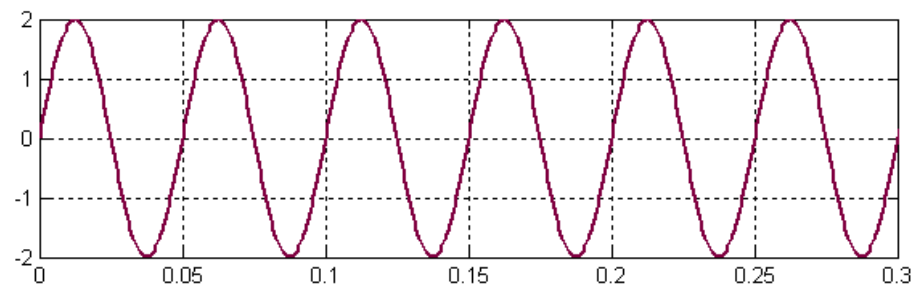
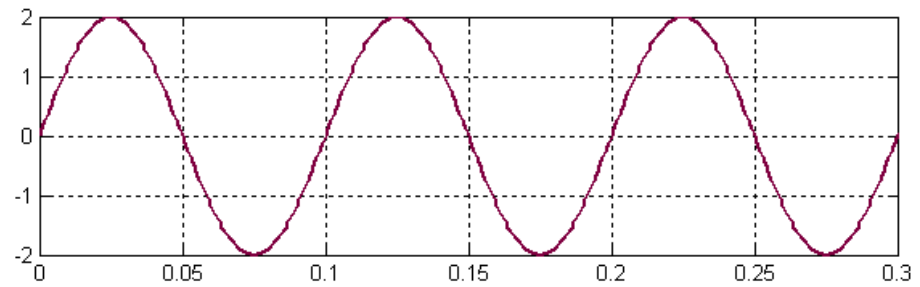


איור 1.16 אות סינוסואידלי הכולל רכיב DC

באיורים 1.17–1.18 מתוארים גרפים של כמה אותות סינוסואידליים. האותות האלה שונים בפרמטר אחד בלבד בכל פעם – תדירות או תנופה (עוצמה).



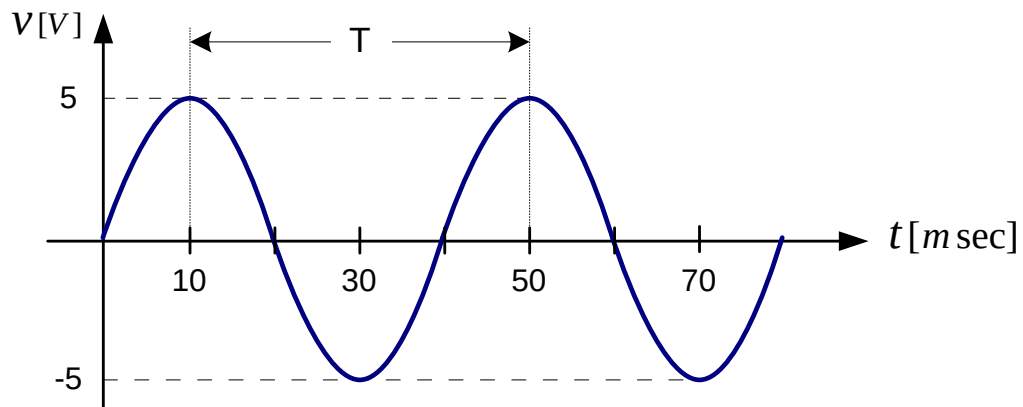
איור 1.17 אותות סינוסואידליים בעלי תדירות זהה, מופע זהה ועוצמה שונה



איור 1.18 אותות סינוסואידליים בעלי עוצמה זהה, מופע זהה ותדירות שונה

תרגיל מספר 1 : מציאת משוואת האות לפי תיאור גרפי

נתון לפניכם האות:



איור לתרגיל מספר 1

מצאו את משוואת האות.

פתרון

משוואת האות מבטאת את הצורה: $v(t) = V_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$

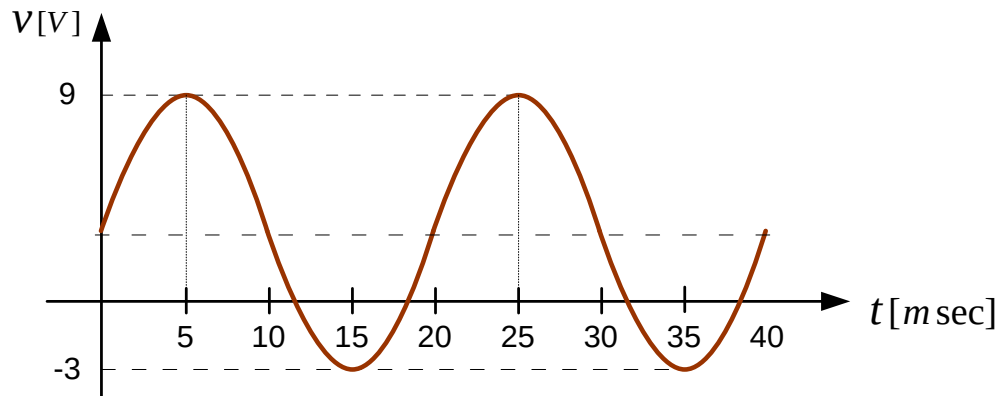
ומתוך הגרף: $V_{\max} = 5[V]$; $\phi = 0$

$$T = 40 \text{ msec} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.04} = 50\pi [\text{rad/sec}]$$

ולכן משוואת האות היא: $v(t) = 5 \cdot \sin(50\pi \cdot t) [V]$

תרגיל מספר 2: מציאת משוואת האות לפי תיאור גרפי הכולל רכיב DC

נתון לפניכם האות:



איור לתרגיל מספר 2

מצאו את משוואת האות.

פתרון

משוואת האות מבטאת את הצורה: $v(t) = V_{DC} + V_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$

על כן בציר העוצמה מתקיים: $V_m = \frac{9 - (-3)}{2} = 6[V]$, $V_{DC} = \frac{9 + (-3)}{2} = 3[V]$

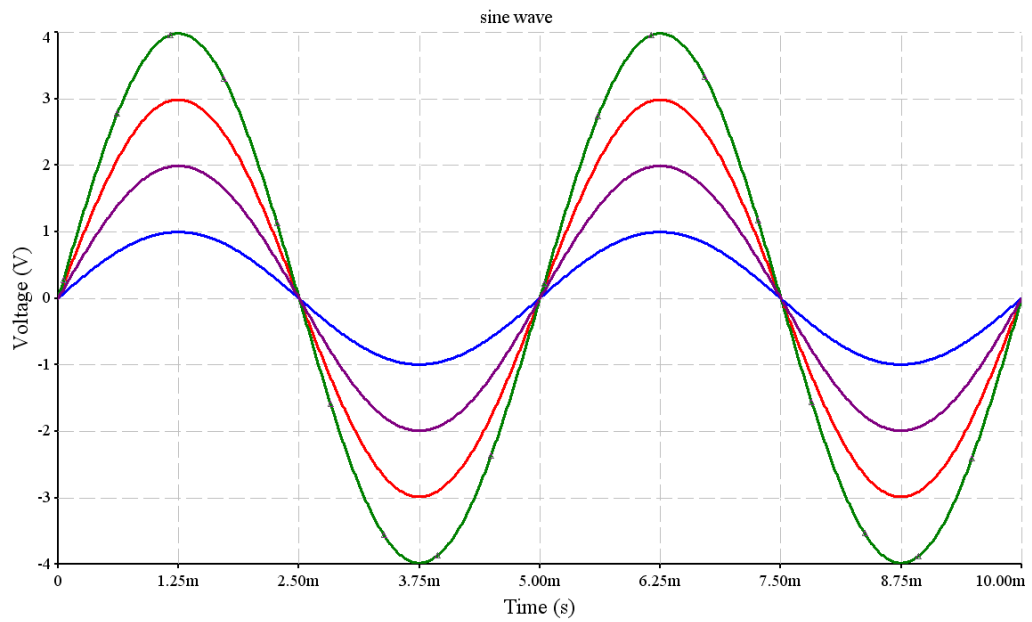
ובציר הזמן מתקיים: $T = 20 \text{ msec} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.02} = 100\pi [\text{rad/sec}]$

לפיכך משוואת האות תהיה: $v(t) = 3 + 6 \cdot \sin(100\pi \cdot t) [V]$

איורים 1.19–1.21 מתארים מיני אותות סינוסואידליים.

$u(t) = 4 \cdot \sin(2\pi \cdot 200 \cdot t)$, $u(t) = 3 \cdot \sin(2\pi \cdot 200 \cdot t)$

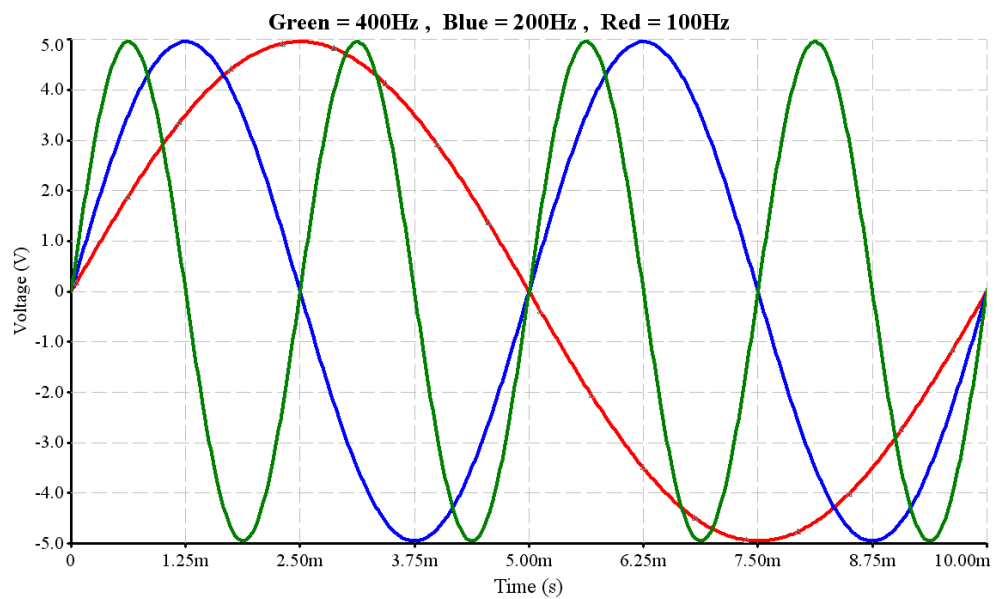
$u(t) = 2 \cdot \sin(2\pi \cdot 200 \cdot t)$, $u(t) = 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 200 \cdot t)$



איור 1.19 אותות סינוסואידליים בעלי תדירות זהה, מופע זהה ועוצמה שונה

$$u(t) = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 400 \cdot t) , \quad u(t) = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 200 \cdot t)$$

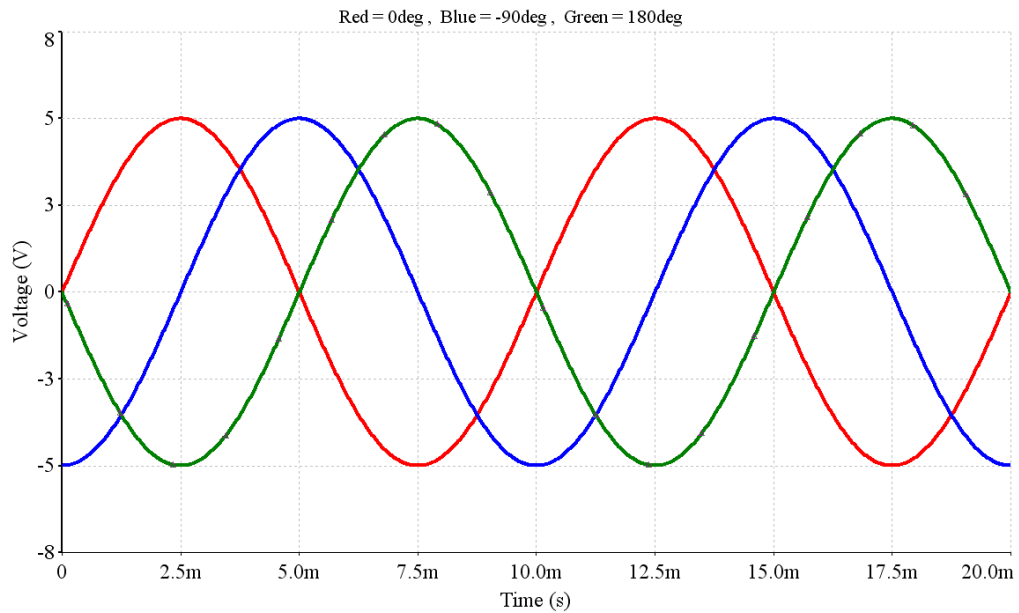
$$u(t) = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 100 \cdot t)$$



איור 1.20 אותות סינוסואידליים בעלי עוצמה זהה, מופע זהה ותדירות שונה

$$u(t) = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 100 \cdot t + 0) , \quad u(t) = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 200 \cdot t + \pi/2)$$

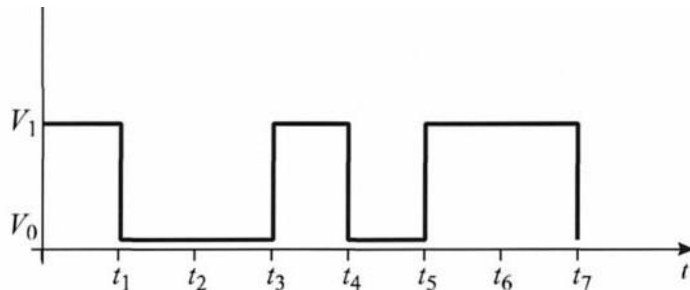
$$u(t) = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 400 \cdot t + \pi)$$



איור 1.21 אותות סינוסואידליים בעלי עוצמה זהה, תדירות זהה ומופע שונה

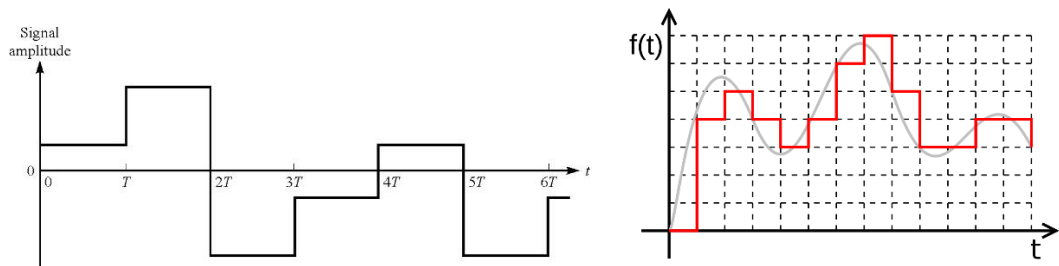
אותות ספרתיים

אות ספרתי (digital signal) יכול לקבל מספר מסוים (סופי) של ערכים, ובזה הוא שונה מאות תקבילי. לדוגמה: שני ערכים, שלושה ערכים או עשרים ערכים. האות הספרתי הבינארי הוא אות שימושי, היכול לקבל ערך אחד מתוך שניים בלבד. V_0 – מצוין את המצב הספרתי '0'; V_1 – מצוין את המצב הספרתי '1'. האות הספרתי ומערכות ספרתיות המטפלות באותות ספרתיים, נמצאים כיום בשימוש נרחב בכל תחומי האלקטרוניקה – ממיתוג מערכות הספק ועד למחשבים ולמערכות תקשורת מחשבים. באיור 1.22 מתואר אות ספרתי בינארי. האות V_0 יכול למעשה לקבל כל ערך: אפס, שלילי או חיובי, והאות V_1 יכול לקבל גם-כן כל ערך השונה מהערך של V_0 .



איור 1.5 אות ספרתי בינארי

באיורים 1.23 א' ו-1.23 ב' מתוארים אותות ספרתיים שמספר הרמות שלהם גבוה מ-2.



איור 1.26 אותות ספרתיים – מספר הרמות גבוה מ-2.

תרגול

בחנו את עצמכם – אותות מחזוריים ואותות סינוסואידליים

- מנוע חשמלי משלים סיבוב אחד במשך 20msec. מספר הסיבובים של המנוע בשנייה אחת הוא:
 - 20 סיבובים.
 - 50 סיבובים.
 - 5 סיבובים.
 - אי-אפשר לחשב.
- גוף עושה חמישה סיבובים במשך 2sec. תדירות הסיבוב של הגוף היא:
 - 2.5 הרץ.
 - 0.4 הרץ.
 - 5 הרץ.
 - 2 הרץ.
- מנוע של מכונית מסתובב 3,000 סיבובים בדקה. תדירות הסיבוב של המנוע היא:
 - 300 הרץ.
 - 18,000 הרץ.
 - 50 הרץ.
 - 3,000 הרץ.
- דיסק מסתובב במהירות זוויתית של 8π rad/sec. הוא משלים סיבוב שלם ב:
 - 4 שניות.
 - 0.25 שניות.
 - 4π שניות.
 - 2 שניות.
- מחזור של מתח חילופין סינוסואידלי מוגדר בתור פרק זמן החולף בין:
 - נקודה אחת שבה ערך המתח הרגעי שווה לאפס, לנקודה סמוכה שבה ערך המתח הרגעי שווה למתח השיא החיובי.
 - נקודה אחת שבה ערך המתח הרגעי שווה לאפס, לנקודה סמוכה שבה ערך המתח הרגעי שווה למתח השיא השלילי.
 - שתי נקודות סמוכות, שבהן המתח הרגעי שווה לאפס.
 - שתי נקודות סמוכות, שבהן המתח הרגעי שווה למתח השיא החיובי.
- התדירות של זרם החילופין הסינוסואידלי מציינת את:
 - ההבחנה בין זרם ישר לזרם חילופין.
 - מספר הפעמים שהזרם משנה בהן את כיוונו במשך שנייה אחת.
 - מספר המחזורים של הזרם בשנייה אחת.
 - מספר הפעמים שהזרם מתאפס בהן במשך שנייה אחת.

שאלות "מלא את החסר":

- זווית של π רדיאן שקולה לזווית של מעלות.

8. זווית של $\pi/6$ רדיאן שקולה לזווית של מעלות.

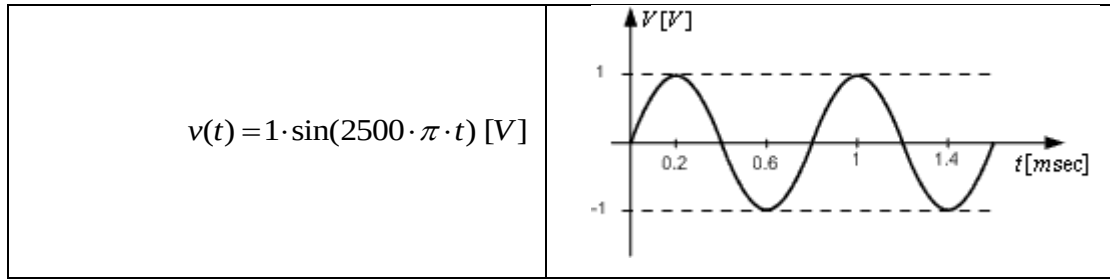
9. זווית של 120 מעלות שקולה לזווית של π רדיאן.

10. זווית של 270 מעלות שקולה לזווית של π רדיאן.

שאלת התאמה

11. לפניכם שתי עמודות. העמודה הראשונה מכילה גרפים של כל מיני אותות סינוסואידליים, ובעמודה השנייה רשומים הביטויים של האותות האלה. עליכם להתאים בין פונקציית האות לגרף שלו.

פונקציה מתמטית	גרף של אות סינוסואידלי
$v(t) = 0.3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2500 \cdot t) [V]$	
$v(t) = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 125 \cdot t) [V]$	
$v(t) = 0.3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2500 \cdot t + \frac{\pi}{2}) [V]$	
$v(t) = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 125 \cdot t - \frac{\pi}{2}) [V]$	
$v(t) = 1 \cdot \sin(5000 \cdot \pi \cdot t) [V]$	



שאלות חישוב – תרגול עצמי

1. גוף משלים סיבוב אחד במשך 0.25sec. כמה סיבובים יעשה בשנייה אחת?
2. גוף משלים שלושה סיבובים במשך 2sec. מהי תדירות הסיבוב?
3. מנוע חשמלי מסתובב 3,000 סיבובים בדקה. חשבו את התדירות ואת המהירות הזוויתית.
4. דיסק מסתובב במהירות זוויתית של 80 rad/sec. מהו זמן המחזור של הדיסק ומהי התדירות שלו?
5. זווית נשענת על קשת באורך 60cm במעגל שרדיוסו 0.5m. מה הגודל שלה ברדיאנים?
6. השלימו את הטבלה הבאה:

זווית במעלות	30°		270°		1°
זווית ברדיאנים		$\pi/4$ [rad]		1 [rad]	$\pi/6$ [rad]

7. נתון שתדירות של תנועה הרמונית פשוטה שווה ל-4Hz. חשבו את זמן המחזור ואת המהירות הזוויתית.
8. בטבלה הבאה נתונים מספר תדרים. חשבו את זמני המחזור ורשמו אותם ביחידות של (s, ms, μ s) לפי הצורך.

תדירות	20 Hz	2 kHz	50 kHz	0.1 Hz	125 kHz	500 kHz
זמן המחזור						

9. הָעֵתֶּק של גוף הנע בתנועה הרמונית פשוטה נתון בביטוי הבא כפונקציה של הזמן:

$$x(t) = 0.2 \cdot \sin(6\pi t) \text{ [m]}$$

- א. קבעו את מִשְׁרְעַת התנועה.
- ב. קבעו את תדירות התנועה.
- ג. מצאו כמה זמן יעבור עד שיגיע הגוף לנקודה $[x = 0.05\text{m}]$ בפעם הראשונה.
- ד. מצאו כמה זמן יעבור עד שיגיע הגוף מנקודה $[x = 0.2\text{m}]$ לנקודה $[x = -0.2\text{m}]$.
- ה. סרטטו גרף של התנועה $x(t)$ וציינו את הערכים הרלוונטיים.

10. נתון אות מתח חילופין סינוסואידלי הנגזר מהצורה: $u(t) = 14.1 \cdot \sin(31.4 \cdot 10^3 t) [V]$

מצאו את:

א. תדירות האות.

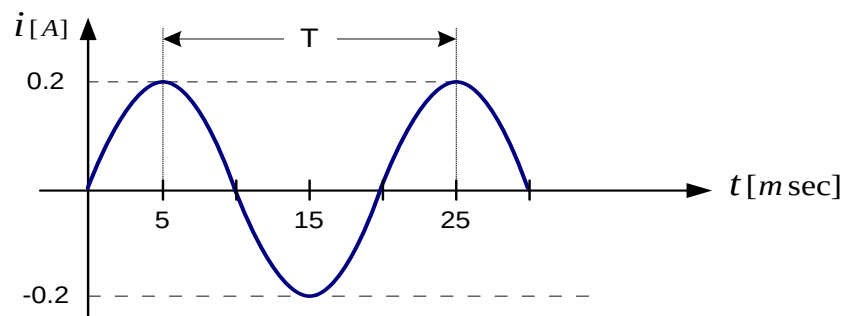
ב. זמן המחזור.

ג. זווית המופע.

ד. התנופה (אמפליטודה) של האות.

ה. המתח בנקודות הזמן: $t_1 = 20 \mu s$, $t_2 = 60 \mu s$

11. באיור הבא מתואר אות זרם חילופין.



מצאו את:

א. תדירות האות והתדירות הזוויתית שלו.

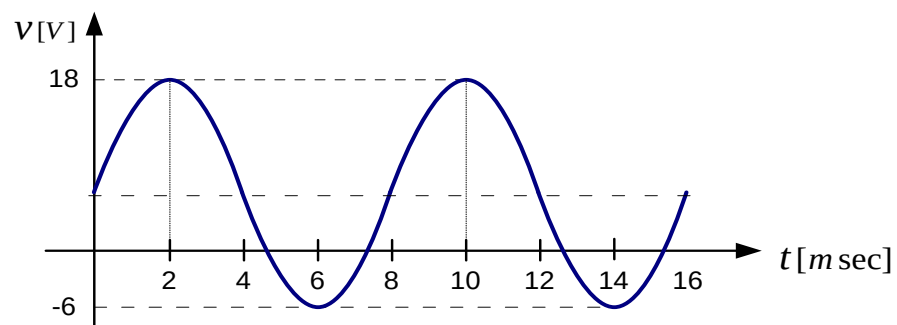
ב. המשרעת של אות הזרם.

ג. הזרם היעיל.

רשמו את משוואת האות.

12. באיור מתואר מתח, שהתלות שלו בזמן נתונה בביטוי הבא:

$$u(t) = A + B \cdot \sin(\omega t + \phi) [V]$$



מצאו את:

א. התדירות הזוויתית של האות – ω .

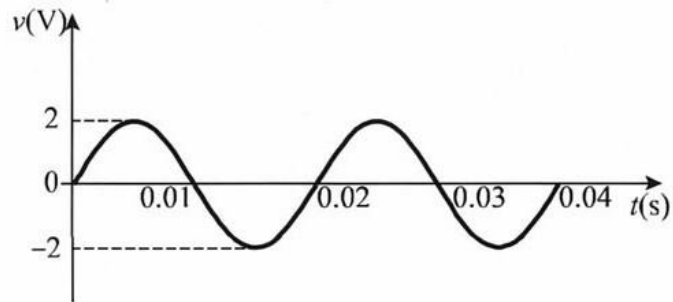
ב. המשרעת של אות המתח – B .

ג. זווית המופע – ϕ .

ד. רכיב ה-DC של האות – A.

לאחר מציאת כל המקדמים, רשמו את משוואת האות.

13. באיור הבא נתון גרף של אות מתח סינוסואידלי.



א. מהו זמן המחזור של האות?

ב. מהו תדר האות?

ג. מהי התדירות הזוויתית שלו?

ד. מהו ערך השיא לשיא?

ה. מהי תנופת האות?

ו. מהו הערך היעיל שלו?

פרק 2 - מגברי שרת

יעדים לימודיים

בסוף יחידת הלימוד התלמיד יהיה מסוגל לבצע את הפעולות הבאות:

אפיוני מגבר שרת בחוג פתוח

- א. סרטוט סימול סכמתי הכולל שני הדקי כניסה, הדק מוצא והדקים של מתחי הזנה.
- ב. זיהוי ההדקים של מגבר השרת וציון התפקידים שלהם.
- ג. סרטוט חיבור של שני מקורות הזנה למקורות מתח מעשיים.
- ד. רישום התכונות של מגבר שרת אידאלי (התנגדות כניסה – ∞ , התנגדות מוצא – 0, הגבר חוג פתוח – ∞ , רוחב סרט – ∞).
- ה. נתינת הסבר מדוע נדרשת התנגדות מבוא אין-סופית ממגבר מתח אידאלי.
- ו. נתינת הסבר מדוע נדרשת התנגדות מוצא אפסית ממגבר מתח אידאלי.
- ז. ציון היתרון של הגבר חוג פתוח אין-סופי בתכנון מגבר עם משוב שלילי.
- ח. הסברת המושג רוחב סרט אין-סופי בתור תכונה של מגבר שרת אידאלי.

מגבר הופך מופע, מגבר עוקב מופע ומגבר יחידה

- א. סרטוט תרשים חשמלי של מגבר הופך מופע, של מגבר עוקב מופע ושל מגבר יחידה.
- ב. בניית מעגל חשמלי עם מגבר שרת מעשי על-פי הסרטוט החשמלי.
- ג. חישוב הגבר המתח במגבר הופך מופע, במגבר עוקב מופע ובמגבר יחידה.
- ד. תכנון מגבר הופך / עוקב מופע וחישוב ערכי הנגדים שיש לחבר אליו לפי גודל ההגבר.
- ה. חישוב מתח המוצא על-פי מתח המבוא וערכי הנגדים במגבר הופך מופע, במגבר עוקב מופע ובמגבר יחידה.
- ו. סרטוט אות המוצא המתקבל לפי מתח המבוא הסינוסואידלי וערכי הנגדים במגבר הופך מופע ובמגבר עוקב מופע.
- ז. חישוב הזרמים בנגדי המשוב לפי מתח המבוא במגבר הופך מופע ובמגבר עוקב מופע.
- ח. רישום התכונות של מגבר יחידה (הגבר מתח, התנגדות מבוא, התנגדות מוצא).

מגבר מסכם, מגבר מחסר ומעגלים של מגברי שרת כלליים

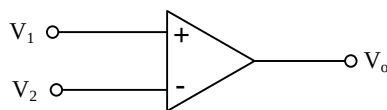
- א. זיהוי תצורת החיבור של המגבר: מחבר / מחסר / מסכם משוקלל / מחסר משוקלל.
- ב. תכנון מגבר מחבר / מחסר וחישוב ערכי הנגדים על-פי: $v_o(t) = v_1(t) \pm v_2(t)$.
- ג. תכנון מגבר מסכם / מחסר משוקלל וחישוב ערכי הנגדים על-פי: $v_o(t) = A \cdot v_1(t) \pm B \cdot v_2(t)$.
- ד. חישוב מתחים וזרמים על הנגדים במגבר מחבר או מחסר.
- ה. חישוב וסרטוט של אות המוצא המתקבל במגבר מחבר או מחסר, אם אותות המבוא מורכבים ממתח DC וממתח AC.

אפיוני מגבר שרת בחוג פתוח

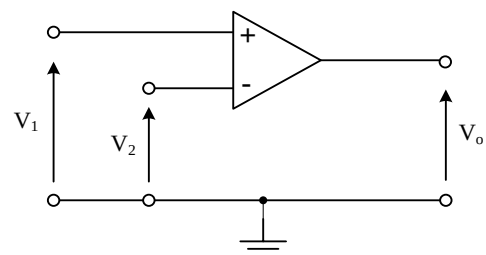
מגבר שרת (operational amplifier) הוא אחד מאבני הבניין החשובות בהרבה מעגלים אלקטרוניים. מגבר השרת בנוי למעשה ממספר גדול של **טרנזיסטורים** ונגדים, המורכבים על פיסת **צורן** (סיליקון) קטנה **במעגל משולב**. מגבר השרת נבנה לראשונה בתור רכיב שנועד בשביל חישובים במחשבים האנלוגיים, ולכן הוא נקרא מגבר אופרטיבי. השתמשו בו כדי לעשות פעולות מתמטיות כגון חיבור, חיסור וכפל.

סימול מגבר השרת במעגל:

סימול מגבר השרת מתואר באיור 2.1. למגבר שני הדקי מבוא (נוסף על ההדק המשותף למבוא ולמוצא) והדק מוצא. אחד מהדקי המבוא מסומן במינוס (-) והשני בפלוס (+).



ב. סימול מקובל של מגבר שרת



א. סימול של מגבר שרת עם הדק משותף
איור 2.1 סימול של מגבר שרת

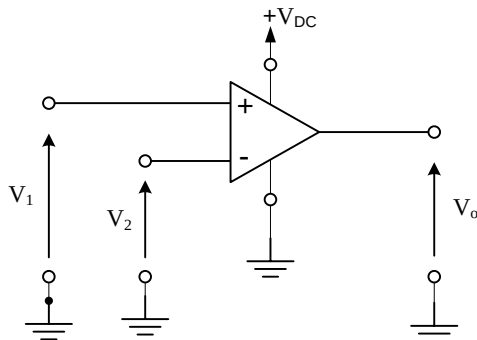
ההדקים המתוארים באיור הם:

V_1, V_2 – מתחי המבוא; V_o – מתח המוצא.

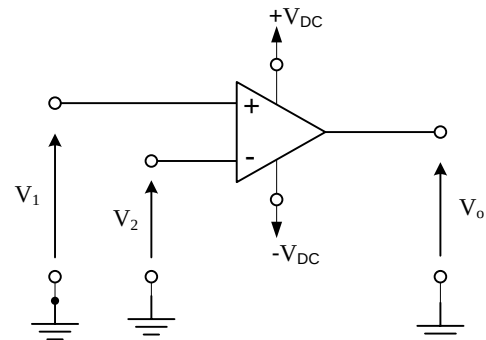
נוסף על שלושת הדקי האותות יש למגבר השרת שני הדקי הזנה, המאפשרים לו להתחבר למקורות של מתח ישר.

באיור 2.2 מתוארות שתי אפשרויות של חיבור למקורות הזנה. אפשרות אחת היא מגבר שרת המוזן משני מקורות של מתח ישר: מקור מתח חיובי $+V_{DC}$ ומקור מתח שלילי $-V_{DC}$.

האפשרות השנייה היא מגבר שרת המוזן ממקור מתח אחד.
 למגבר השרת יכולים להיות עוד הדקים, אבל לא נפרט אותם בשלב זה.
 הדקי ההזנה מתוארים באיור הבא, והם לא מסורטטים בדרך כלל.



אפשרות 2: מקור הזנה אחד



אפשרות 1: שני מקורות הזנה

איור 2.2 חיבור של מקורות הזנה למגבר שרת

מגבר השרת הוא **מגבר מתח (amplifier)**, המגביר את ההפרש בין מתחי המבוא. תיאור
 ההגבר נתון על-ידי הנוסחה:

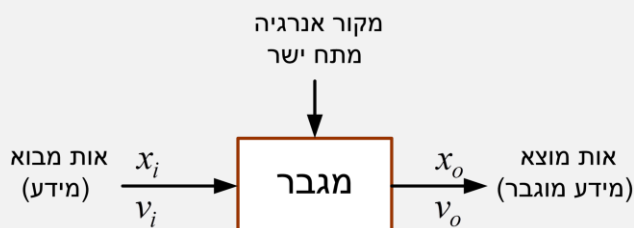
$$A_v = \frac{v_o}{v_1 - v_2} \text{ or } A_v = \frac{v_o}{v^+ - v^-}$$

ההדק המסומן בפלוס נקרא **הדק המבוא הלא מִהפֵךְ (non-inverting input)**, וסימונו: v^+ .
 ההדק המסומן במינוס נקרא **הדק המבוא המִהפֵךְ (inverting input)**, וסימונו: v^- .

מגבר

מגבר הוא מערכת אלקטרונית המגבירה מתח או זרם, או את שניהם. במבוא המגבר מוכנס אות בעל תנופה קטנה, ובמוצא שלו מתקבל אות בעל תנופה גדולה. כדי שהמגבר יוכל לפעול נדרש מקור אנרגיה חיצוני – מקור מתח ישר.

אפשר לתאר מערכת הגברה באמצעות תרשים מלבנים:



דוגמה: מגבר שמע

מגבר שמע למשל משמש במגוון רחב של מוצרים, כמו במערכת סטריאו ביתית או לשם הגברה במופעים. התפקיד של מגבר השמע הוא להגביר את עוצמת הקול.

היחס בין אות המוצא לאות המבוא מבטא את **הגבר המגבר (gain of amplification)**, ואפשר לתאר אותו באמצעות הנוסחה:

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} ; A_I = \frac{i_o}{i_i}$$

A_V – מייצג הגבר מתח.

A_I – מייצג הגבר זרם.

במהלך הלימודים (בשלב זה) נחשיב את מגבר השרת למגבר אידיאלי. התכונות של מגבר שרת אידיאלי הן:

1. **הגבר** (A_{v0}) – ההגבר של מגבר שרת אידאלי הוא אין-סופי.
 כלומר כל הפרש בין מתחי המבוא של המגבר, קטן ככל שיהיה, יתורגם למתח אין-סופי באזור המוצא שלו.
2. **התנגדות מבוא** (R_{in}) – התנגדות המבוא של מגבר שרת אידאלי היא אין-סופית.
 כלומר עוצמת הזרם אל כל אחד מהדקי המבוא של מגבר השרת תהיה אפס.
3. **התנגדות מוצא** (R_{out}) – התנגדות המוצא של מגבר שרת אידאלי היא אפס.
 כלומר מתח המוצא נשאר קבוע בעבור כל זרם שמגבר השרת מספק [בכל עומס שהוא].
4. **רוחב פס, BW** – רוחב הפס של מגבר שרת אידאלי הוא אין-סופי.
 כלומר הגבר המגבר לא תלוי בתדר העבודה.
 אפשר לזכור את ארבעת הסעיפים הללו בצורה מקוצרת:

$$R_{out} \rightarrow 0 \quad R_{in} \rightarrow \infty \quad A_{v0} \rightarrow \infty \quad BW \rightarrow \infty$$

תרגול

- לפני שנמשיך הלאה נבחן את הידיעות שלנו כרגע בנושא האפיונים של מגבר שרת.
1. השלימו את המשפט:
 הגבר מתח מציין את היחס בין _____ (מתח המוצא, זרם המוצא, זרם המבוא, מתח המבוא) ובין _____ (מתח המוצא, זרם המוצא, זרם המבוא, מתח המבוא).
 השלימו את המשפט:
 2. הדק המבוא המסומן בפלוס (+) נקרא _____ (הדק המבוא הלא מהפך, הדק המבוא המהפך, כניסת מתח הזנה חיובי, אפשר לתת לו שם כרצוננו).
 השלימו את המשפט:
 3. במגבר שרת אידאלי התנגדות המבוא שואפת ל- _____ (אפס, התנגדות הסוללה, אין-סוף, 100 אום) והתנגדות המוצא שואפת ל- _____ (אפס, התנגדות הסוללה, אין-סוף, 100 אום).
 התאימו את השם לסימון המקובל.
 4. **השמות:** התנגדות מבוא, התנגדות מוצא, הגבר חוג פתוח.
הסימונים המקובלים: R_{out} R_{in} A_{v0}

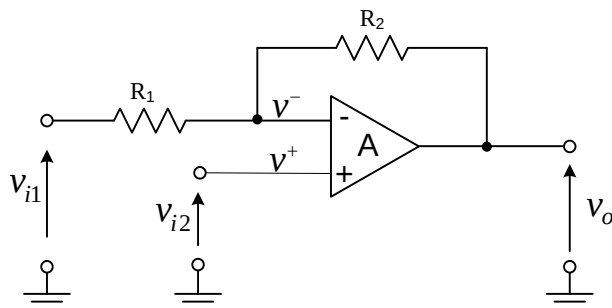
שם	סימון מקובל

יישומים של מגברי שרת

בסעיפים 2.2–2.6 נציג כמה יישומים שיש להם מגבר שרת בחוג סגור (הסבר למונח זה יבוא בהמשך), ובפרק 4 נציג יישום של מגבר שרת בחוג פתוח.

מגבר הופך מופע

בסעיף זה נתאר אחד מתוך שני מעגלים נפוצים מאוד עם מגברי שרת, אבל לפני שנתחיל בדיון ובהסבר נכיר את המושג **מגבר שרת בחוג סגור**.
באיור 2.3 אפשר לראות מגבר שרת ושני נגדים. הנגד R_2 מחבר בין הדק המוצא של מגבר השרת לכניסה המהפכת. הוא נקרא **נגד משוּב**, משום שהוא מקשר בין מוצא המגבר לכניסה שלו. מצב זה יוצר חוג (מעגל) סגור עם המגבר.



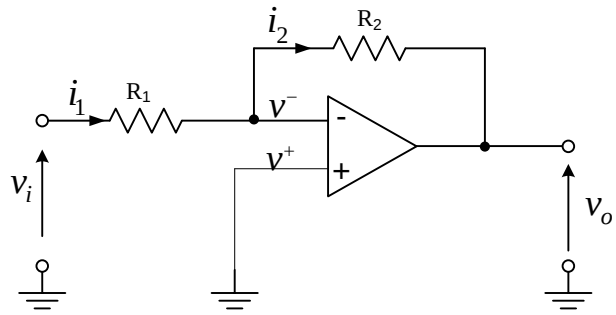
איור 2.3 תצורה של מגבר שרת בחוג סגור

במצב הזה נוכל לרשום: $v_o = A(v^+ - v^-)$

אם $v_o < \infty$ (בעל ערך סופי – לא רווי) ומתקיים גם $A \rightarrow \infty$, נקבל $v^+ - v^- = 0$ (**בדקו**

מדוע?)

כלומר נקבל מצב שבו אין הפרש פוטנציאלים (מתח) בין ההדק המהפך להדק הלא מהפך. למצב הזה קוראים **קצר מדומה** או **קצר וירטואלי (virtual short circuit)**.
ראוי להדגיש שאמנם לא קיים זרם בין הדקי המבוא (התנגדות כניסה אין-סופית), אך יש מתח זהה ביחס לאדמה. אסור לגרום קצר אמיתי בין ההדקים.
באיור 2.4 אפשר לראות חיבור של מגבר שרת בתצורה של "הופך מופע".



איור 2.4 מגבר שרת הופך מופע

המעגל הזה מתאר מגבר שרת בחוג סגור, שבו ההדק הלא מהפך מחובר לאדמה (כלומר: $v^+ = 0$). במגבר בחוג סגור יש קצר מדומה (כלומר: $v^+ - v^- = 0$), ולכן נקבל תוצאה כאילו ההדק המהפך מחובר לאדמה (כלומר: $v^- = 0$). אדמה כזאת נקראת **אדמה מדומה (virtual ground)**, ואסור לחבר אליה באופן פיזי את ההדק השלילי. הניתוח החשמלי של המעגל הוא:

$$i_1 = \frac{v_i - v^-}{R_1} \quad ; \quad i_2 = \frac{v^- - v_o}{R_2}$$

במעגל הזה $v^+ = 0$ ויש מצב של "אדמה מדומה", לכן נקבל: $v^- = 0$. כמו כן, לא נכנס זרם למגבר (התנגדות כניסה אינסופית). אז $i_1 = i_2$ ומקבלים:

$$\frac{v_i}{R_1} = \frac{-v_o}{R_2}$$

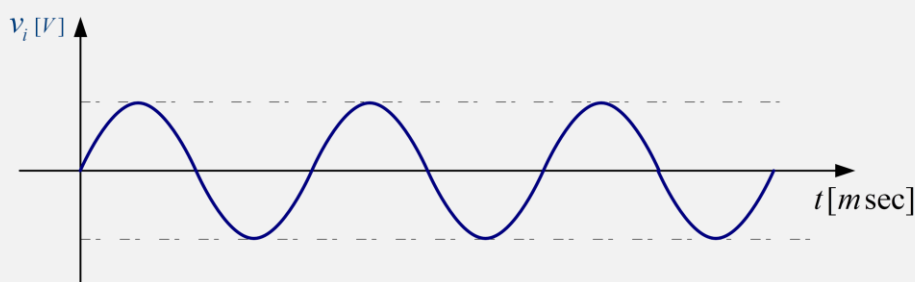
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

לפי התוצאה שקיבלנו הגבר המתח הוא שלילי, וערכו תלוי בערכי הנגדים (R_1, R_2).

הגבר מתח שלילי פירושו – היפוך מופע.

היפוך מופע – נבחין בין שני מקרים:

במקרה הראשון אות הכניסה הוא מתח ישר. אם ייכנס מתח חיובי נקבל במצב כזה מתח שלילי במוצא, וכן להפך. המקרה השני נפוץ ושימושי יותר, והוא מתרחש כשאות הכניסה יכול להשתנות בתלות בזמן. נניח שנתון לנו אות מן הצורה הבאה:



לאות הזה יש שלושה מאפיינים:

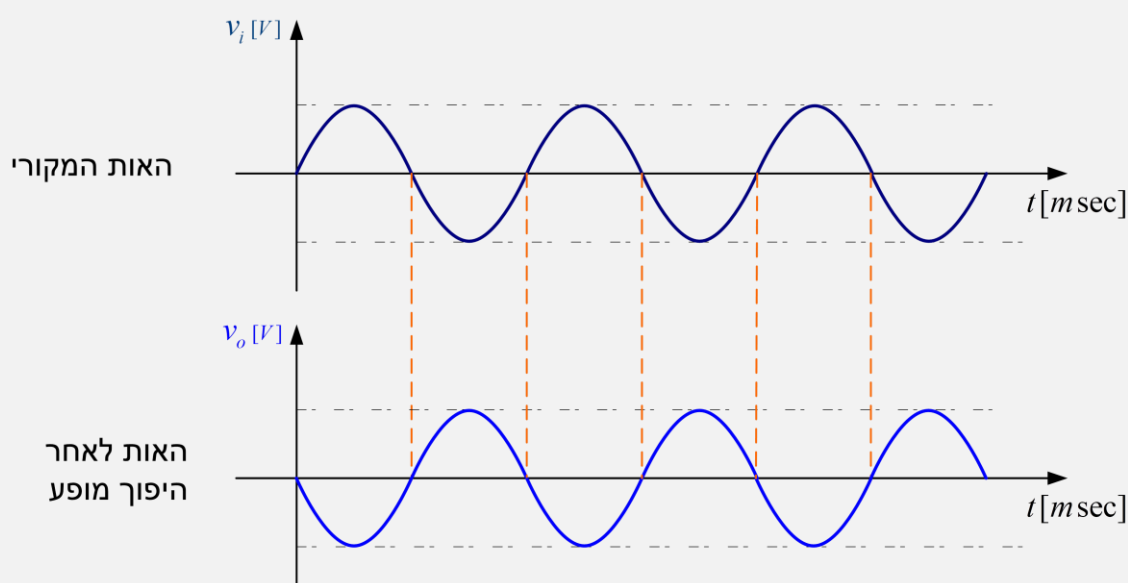
- אפשר לראות שהוא חסום, כלומר יש לו ערך מרבי וערך מזערי (מושג הנקרא ערך שיאי).
- הוא יכול להתכווץ או להימתח בציר הזמן (מושג הנקרא תדר האות – ההסבר בהמשך).
- האות המתואר באיור עובר בנקודה (0,0) ומתחיל עם מתח חיובי. במצב כזה נאמר שיש לו זווית מופע (פֶּזָה) של 0° .

כמו כן, אפשר לראות שהאות חוזר על עצמו בפרקי זמן קבועים. לכן הוא ייקרא אות מחזורי, ולפרק זמן קבוע שכזה נקרא זמן מחזור.

המעוניינים בהסבר מפורט יותר יכולים לקרוא על **אות סינוסואידלי**.

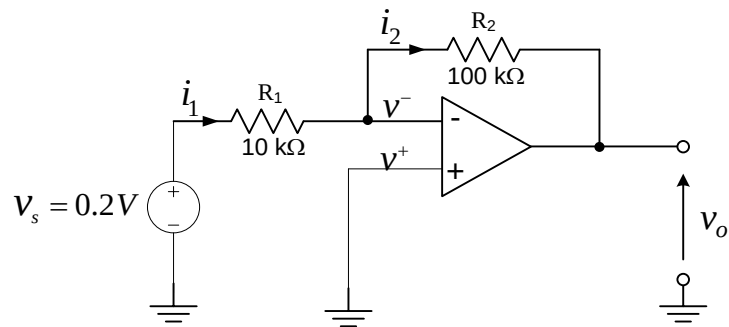
אם ניקח את האות המתואר באיור ונהפך את המופע שלו (את שני הפרמטרים האחרים, ערך שיא ותדירות, לא משנים) – נקבל את התוצאה הזאת [ראו בעמוד הבא]: היכן שהיה באות הכניסה מתח חיובי יתקבל באות המוצא מתח שלילי, ולהפך.

היפוך מופע נקרא גם הפרש מופע של 180° בין אות המוצא לאות המבוא.



שאלה לדוגמה

באיור נתון מגבר עם חיבור הופך מופע:



א. חשבו את הגבר המגבר.

פתרון

מדובר בתצורה של מגבר הופך מופע. הנוסחה של הגבר המתח לפי ההסבר ברקע

$$\text{העיוני היא: } A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \text{, ולכן } A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{100k}{10k} = -10$$

הערה: הגבר מתח הוא גודל המבטא יחס בין מתחים, ולכן הוא חסר יחידות.

ב. חשבו את עוצמת הזרם בנגד העומס.

פתרון

נגד העומס הוא R_2 , והזרם דרכו זהה לזה שזורם דרך R_1 .

$$i_2 = i_1 = \frac{v_i - v^-}{R_1} = \frac{0.2 - 0}{10k} = 0.02mA = 20\mu A$$

ג. חשבו את מתח המוצא.

פתרון

הגבר המתח מתאר את היחס בין מתח המוצא למתח המבוא. אם נשנה את הנושא

בנוסחה נקבל:

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{v_o}{v_i} \\ \Rightarrow v_o &= A_v \cdot v_i \\ v_o &= -10 \cdot 0.2 = -2V \end{aligned}$$

הדמיות

השפעתם של שינוי ערך באחד הנגדים (או בשניהם) ושל מתח המקור על מתח המוצא ועל

הגבר המגבר בתצורה מהפכת ("הופך מופע").

*אופן החישוב של מתח המוצא לפי הנוסחאות מהרקע העיוני:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{תצורה מהפכת:}$$

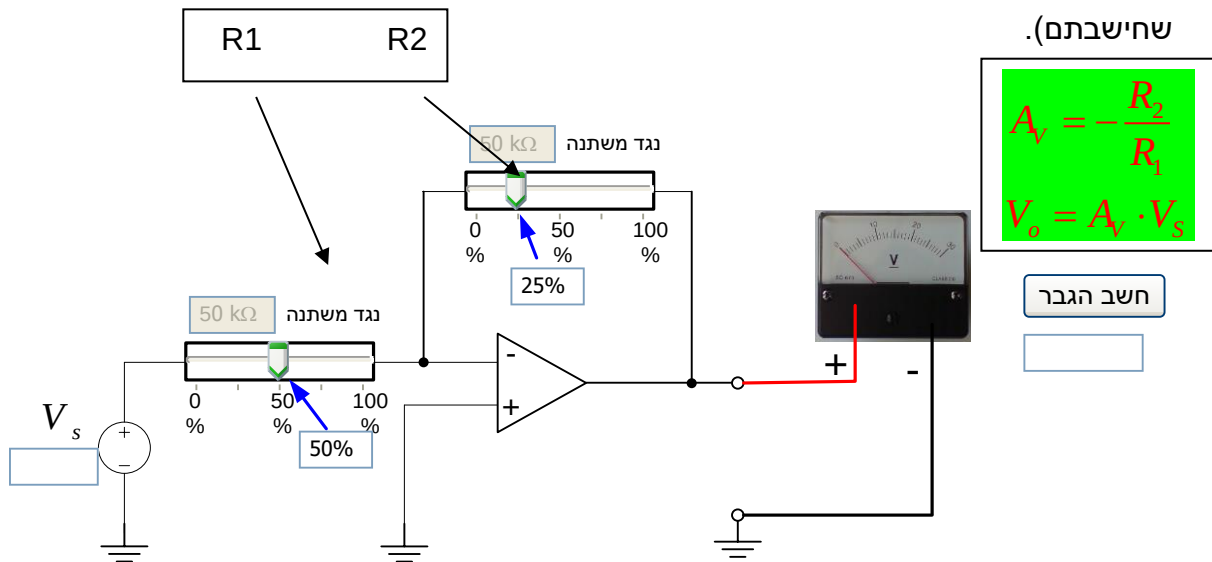
מוצג כאן מעגל עם אפשרות של הדמיה.

אפשר להכניס ערך למקור המתח (להגביל אותו: $-5 < V_i < +5$), וערכי הנגדים יכולים להשתנות (נגד משתנה). התוצאה תוצג בצורה ויזואלית (מד מתח אנלוגי כמו שמוצג באיור או דיגיטלי – הצגת ערך מספרי), וקיים בנוסף לחצן המאפשר את חישוב ההגבר ואת הצגתו. אם קשה להשתמש בנגד אחד אפשר להחליף אותו בנגד אחר. אפשר לבחור בנגדים כ-5 ערכים שונים.

מעגל הדמיה מספר 1: מגבר הופך מופע ללא מתחי רוויה

לפניכם מגבר בתצורה מהפכת. בהדמיה זו נבדוק את ההשפעה של נגדי המעגל על גודל ההגבר ועל מתח המוצא. במעגל מופיעים שני נגדים משתנים בעלי ערך של $50k\Omega$. אם תזיזו את הזחלן (ראו חץ כחול) ישתנה הערך של הנגד ויוצג באחוזים. למשל, אם הזחלן ממוקם על 25% כמו שמתואר באיור, משמעות הדבר היא שיש לנגד ערך של $25\% \cdot 50k\Omega = 12.5k\Omega$.

כל מה שעליכם לעשות בהדמיה הוא להכניס ערך למתח המבוא (V_s) ולשנות את הנגדים כרצונכם, ואז יוצג ערכו של מתח המוצא על-גבי מד-המתח. מומלץ לחשב את ההגבר על-פי הערכים של מתח המוצא ושל מתח המבוא. לאחר מכן יש ללחוץ על "חשב הגבר", ואז תקבלו את הערך המבוקש (בדקו אם הערך הזה תואם לערך שחישבתם).



מעגל הדמיה מספר 2: מגבר הופך מופע עם מתחי רוויה

לפניכם מגבר בתצורה מהפכת עם מתחי הזנה, כלומר במצבים מסוימים הוא ייכנס למצב רוויה. בהדמיה זו נבדוק את ההשפעה של נגדי המעגל על גודל ההגבר, על מתח המוצא ועל זיהוי מצב הרוויה של המגבר. במעגל מופיעים שני נגדים משתנים בעלי ערך של $50\text{k}\Omega$. אם תזיזו את הזחלן (ראו חץ כחול) ישתנה הערך של הנגד ויוצג באחוזים. למשל, אם הזחלן ממוקם על 25% כמו שמתואר באיור, משמעות הדבר היא שיש לנגד ערך של $25\% \cdot 50\text{k}\Omega = 12.5\text{k}\Omega$.

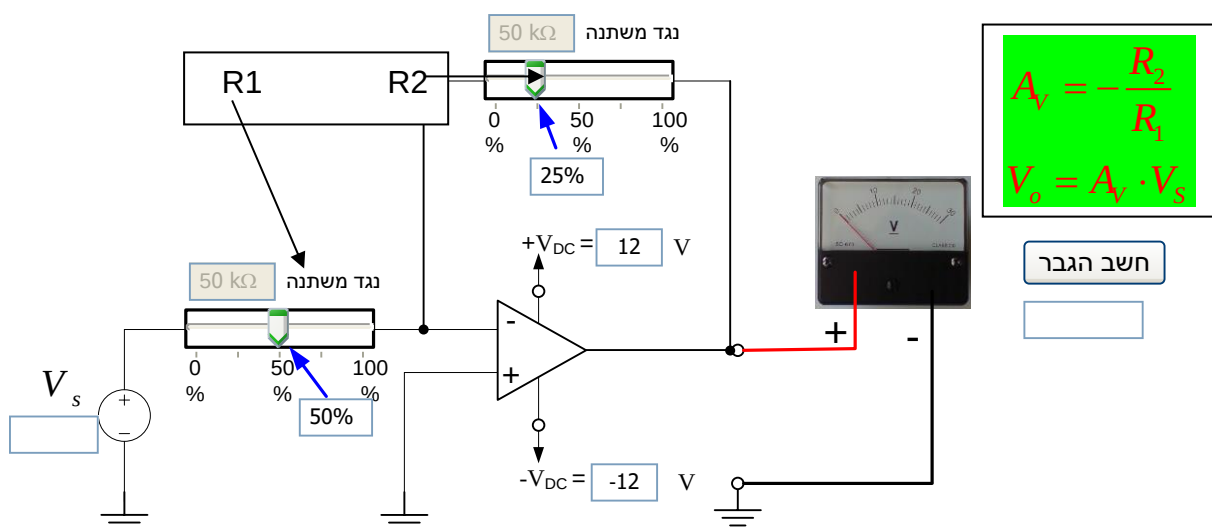
כל מה שעליכם לעשות בהדמיה הוא להכניס ערך למתח המבוא (V_s) ולשנות את הנגדים כרצונכם, ואז יוצג ערכו של מתח המוצא על-גבי מד-המתח. כמו כן, אתם רשאים לשנות את מתחי ההזנה מ- $\pm 12\text{V}$ לערכים אחרים ולבדוק את השפעתם.

מומלץ לחשב את ההגבר על-פי הערכים של מתח המוצא ושל מתח המבוא. לאחר מכן יש ללחוץ על "חשב הגבר", ואז תקבלו את הערך המבוקש (בדקו אם הערך הזה תואם לערך שחישבתם).

(במעגל הזה יוצג הערך של מתח המוצא לפי מתחי הרוויה של המגבר. אם המגבר במצב רוויה ולוחצים על הלחצן "חשב הגבר", תוצג ההודעה: "המגבר נמצא ברוויה").
מתי המגבר נמצא במצב רוויה?

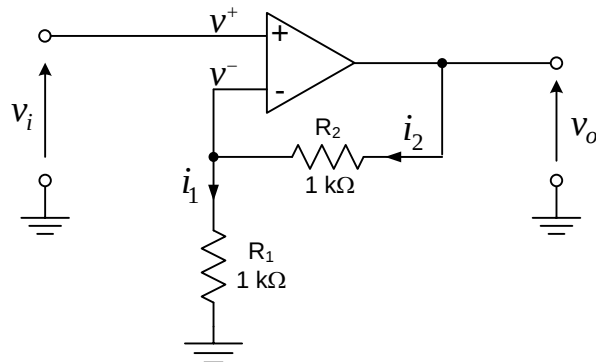
אם $V_o > +V_{DC}$ אז "המגבר ברוויה חיובית" $V_o = +V_{DC}$.

אם $V_o < -V_{DC}$ אז "המגבר ברוויה שלילית" $V_o = -V_{DC}$.



מגבר עוקב מופע

באיור 2.5 מתואר מעגל עקרוני של מגבר שרת בחיבור עוקב מופע.



איור 2.5 מגבר עוקב מופע

המעגל הזה מתאר מגבר שרת בחוג סגור, שבו ההדק הלא מהפך מחובר למקור v_i (כלומר: $v^+ = v_i$). במגבר בחוג סגור יש קצר מדומה (כלומר: $v^+ - v^- = 0$), ולכן נקבל: $v^- = v_i$. ניתוח חשמלי:

$$i_1 = \frac{v^- - 0}{R_1} \quad ; \quad i_2 = \frac{v_o - v^-}{R_2}$$

למגבר לא נכנס זרם (התנגדות כניסה אין-סופית), אז $i_1 = i_2$ ולכן נקבל:

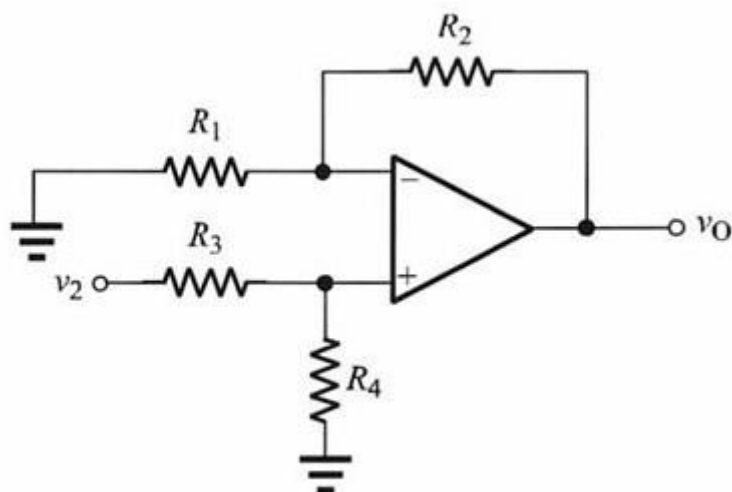
$$\frac{v_i}{R_1} = \frac{v_o - v_i}{R_2}$$

אחרי הפישוט של המשוואה מקבלים:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

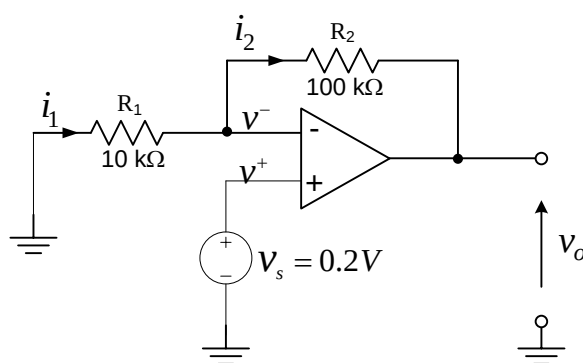
לפי התוצאה שקיבלנו הגבר המתח הוא חיובי, והערך שלו תלוי בערכי הנגדים (R_1, R_2). כמו כן, ערכו גדול תמיד מ-1.

מגבר עוקב מופע עם מחלק מתח



שאלה לדוגמה

באיור מתואר מגבר שרת עם חיבור עוקב מופע:



א. חשבו את הגבר המגבר.

פתרון

מדובר בתצורה של מגבר לא הופך מופע. הנוסחה של הגבר המתח לפי ההסבר ברקע

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{100k}{10k} = 11 \text{ ולכן } A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \text{ העיוני היא:}$$

הערה: הגבר מתח הוא גודל המבטא יחס בין מתחים, ולכן הוא חסר יחידות.

ב. חשבו את עוצמת הזרם בנגד העומס.

פתרון

נגד העומס הוא R_2 , והזרם דרכו זהה לזה שזורם דרך R_1 .

$$i_2 = i_1 = \frac{0 - v^-}{R_1} = \frac{0 - 0.2}{10k} = -0.02mA = -20\mu A$$

הערה: משמעות הסימן מינוס בזרם היא שהכיוון שלו מנוגד לזה שבסרטוט.

ג. חשבו את מתח המוצא.

פתרון

הגבר המתח מתאר את היחס בין מתח המוצא למתח המבוא. אם נשנה את הנושא בנוסחה נקבל:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$
$$\Rightarrow v_o = A_v \cdot v_i$$
$$v_o = 11 \cdot 0.2 = 2.2V$$

הדמיות

השפעתם של שינוי ערך באחד הנגדים (או בשניהם) ושל מתח המקור על מתח המוצא ועל הגבר המגבר בתצורה לא מהפכת ("עוקב מופע").

*אופן החישוב של מתח המוצא לפי הנוסחאות מהרקע העיוני:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{תצורה לא מהפכת:}$$

מוצג כאן מעגל עם אפשרות של הדמיה.

אפשר להכניס ערך למקור המתח (להגביל אותו: $-5 < V_i < +5$), וערכי הנגדים יכולים להשתנות (נגד משתנה). התוצאה תוצג בצורה ויזואלית (מד מתח אנלוגי כמו שמוצג באיור או דיגיטלי – הצגת ערך מספרי), וקיים בנוסף לחצן המאפשר את חישוב ההגבר ואת הצגתו. אם קשה להשתמש בנגד אחד אפשר להחליף אותו בנגד אחר. אפשר לבחור בנגדים כ-5 ערכים שונים.

מעגל הדמיה מספר 4: מגבר עוקב מופע עם מתחי רוויה

לפניכם מגבר בתצורה לא מהפכת עם מתחי הזנה, כלומר במצבים מסוימים הוא ייכנס למצב רוויה. בהדמיה זו נבדוק את ההשפעה של נגדי המעגל על גודל ההגבר, על מתח המוצא ועל זיהוי מצב הרוויה של המגבר. במעגל מופיעים שני נגדים משתנים בעלי ערך של $50k\Omega$. אם תזיזו את הזחלן (ראו חץ כחול) ישתנה הערך של הנגד ויוצג באחוזים. למשל, אם הזחלן ממוקם על 25% כמו שמתואר באיור, משמעות הדבר היא שיש לנגד ערך של $25\% \cdot 50k\Omega = 12.5k\Omega$.

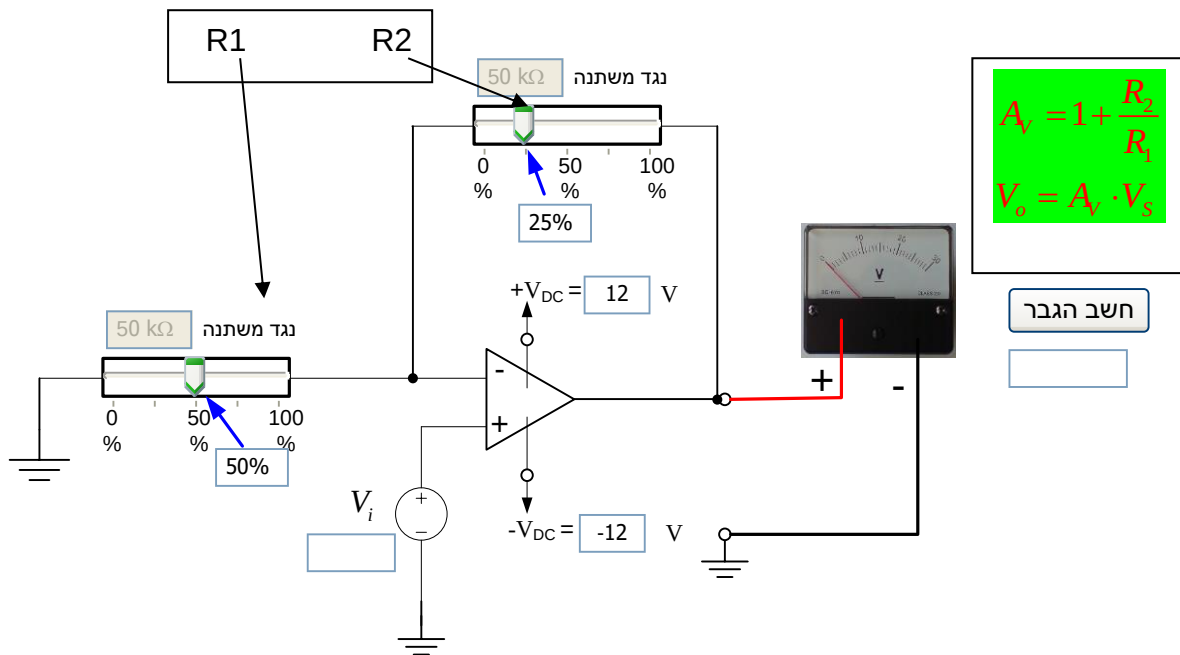
כל מה שעליכם לעשות בהדמיה הוא להכניס ערך למתח המבוא (V_s) ולשנות את הנגדים כרצונכם, ואז יוצג ערכו של מתח המוצא על-גבי מד-המתח. כמו כן, אתם רשאים לשנות את מתחי ההזנה מ- $\pm 12V$ לערכים אחרים ולבדוק את השפעתם.

מומלץ לחשב את ההגבר על-פי הערכים של מתח המוצא ושל מתח המבוא. לאחר מכן יש ללחוץ על "חשב הגבר", ואז תקבלו את הערך המבוקש (בדקו אם הערך הזה תואם לערך שחישבתם).

(במעגל הזה יוצג הערך של מתח המוצא לפי מתחי הרוויה של המגבר. אם המגבר במצב רוויה ולוחצים על הלחצן "חשב הגבר", תוצג ההודעה: "המגבר נמצא ברוויה").
מתי המגבר נמצא במצב רוויה?

אם $V_o > +V_{DC}$ אז "המגבר ברוויה חיובית" – $V_o = +V_{DC}$.

אם $V_o < -V_{DC}$ אז "המגבר ברוויה שלילית" – $V_o = -V_{DC}$.



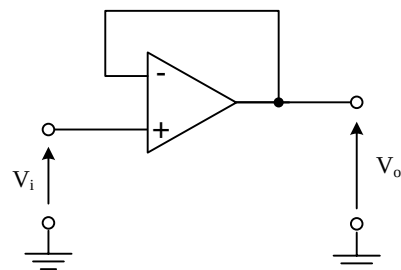
מגבר חוצץ (יחידה)

מגבר יחידה (חוצץ – buffer) משמש בדרך כלל כדי לחבר מקור בעל התנגדות גבוהה לעומס בעל התנגדות נמוכה. התכונות הנדרשות ממנו הן התנגדות כניסה גבוהה מאוד (אידיאלי – התנגדות אין-סופית), כדי שלא ייכנס זרם לחוצץ, והתנגדות מוצא נמוכה מאוד (אידיאלי – התנגדות אפסית).

באיור מתואר חיבור של מגבר שרת המשמש בתור חוצץ ונקרא גם עוקב מתח, כי המתח במוצא עוקב אחרי המתח שבמבוא. חיבור זה הוא למעשה בתצורה הלא מהפכת, שבה הערך של נגד המשוב (הנגד המחובר בין המוצא לכניסה) הוא $R_2 = 0$ וערכו של הנגד האחר הוא $R_1 \rightarrow \infty$ (נֶתֶק).

אם נציב את הערכים האלה בנוסחה שקיבלנו בעבור התצורה הלא מהפכת נקבל:

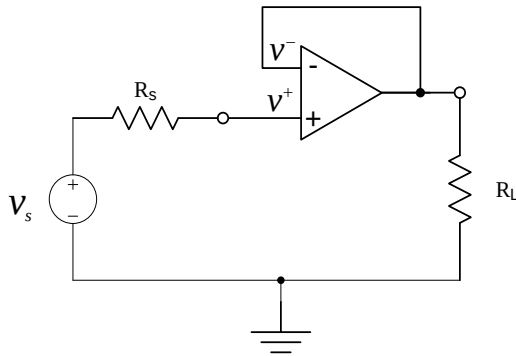
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + 0 = 1$$



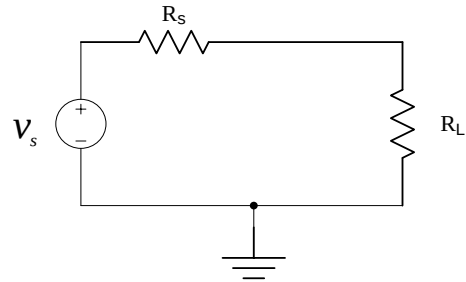
תרגול

חשבו את מתח העומס המתקבל (למשל ברמקול) בזמן חיבור ישיר למקור בעל התנגדות כניסה, ופעם נוספת בשילוב של מגבר יחידה.

נתוני המעגל: מתח המקור – $v_s = 2V$, התנגדות מקור המתח – $R_s = 80\Omega$, התנגדות העומס – $R_L = 20\Omega$.



מעגל ב – חיבור העומס עם חוצץ



מעגל א – חיבור העומס באופן ישיר

חישובים:

מעגל א:

מעגל טורי – חישובי המתחים והזרמים:

$$R_T = R_s + R_L = 80 + 20 = 100\Omega$$

$$I = \frac{v_s}{R_T} = \frac{2}{100} = 0.02 A$$

$$v_{R_L} = I \cdot R_L = 0.02 \cdot 20 = 0.4V$$

$$v_{R_L} = 0.4V$$

*אפשר לחשב באמצעות מחלק מתח.

מעגל ב:

לא נכנס זרם למגבר השרת, ולכן:

$$v^+ = v_s$$

זה מגבר בחוג סגור כי קיים קצר מדומה:

$$v^+ = v^-$$

$$v_{R_L} = v^- \quad \text{מתח העומס:}$$

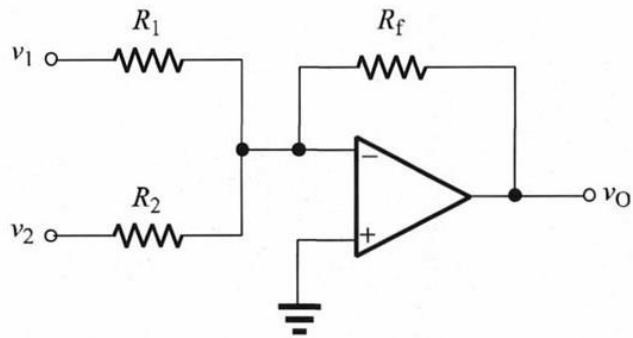
$$\Rightarrow v_{R_L} = v_s \quad \text{מסקנה:}$$

$$v_{R_L} = 2V$$

מגבר מסכם

בסעיף הזה נראה איך עושים פעולת חיבור באמצעות מגבר שרת.

באיור 2.6 מתואר מעגל שיש לו שני מבואות ומוצא אחד. נמצא את הקשר בין המתחים שבשני המבואות (v_1 , v_2) למתח שבמוצא (v_o).

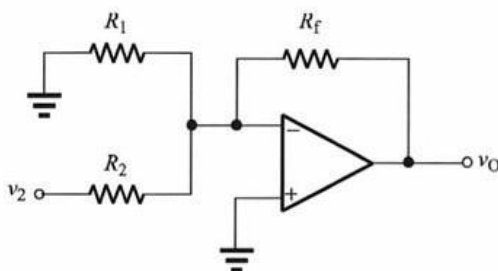


איור 6.0. מגבר מסכם

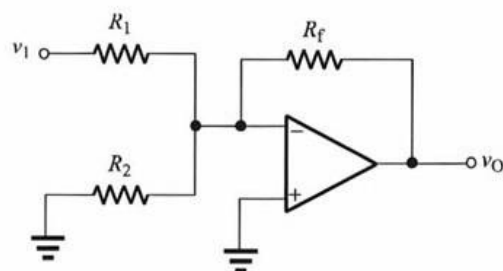
כדי להגיע לפתרון אפשר להיעזר במשפט ההרכבה: המתח במוצא של מעגל לִינְאָרִי הוא הסכום האלגברי של כל המתחים הנוצרים שם, כי כל מקור פועל לחוד כשיתר המקורות מאופסים.

נאפס את v_2 בעזרת חיבורו לאדמה (גרימת קֶצֶר) ונמצא את v_{o1} – מתח המוצא שעתידי להתקבל בגלל v_1 אם $v_2 = 0V$.

ניעזר באיור 2.7א'. באיור הזה רואים שאפשר להשמיט את R_2 , מפני שהפוטנציאלים בשני הקצוות אפסיים – הקצה האחד מחובר לאדמה, והקצה השני מחובר לאדמה מדומה.



ב. תרומת v_2 למתח המוצא



א. תרומת v_1 למתח המוצא

איור 2.7 תרומת מתחי המבוא לאות המוצא

אחרי שנשמיט את R_2 נקבל מגבר שרת בחיבור הופך מופע, ולכן:

$$v_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot v_1$$

באופן דומה חיברנו באיור 2.7ב' לאדמה את R_1 (גם אותו אפשר להשמיט). תרומת v_2 למתח המוצא תהיה:

$$v_{o2} = -\frac{R_f}{R_2} \cdot v_2$$

ואז מתח המוצא, כלומר הסכום האלגברי של כל המתחים הנוצרים שם, יהיה:

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} = \left(-\frac{R_f}{R_1} \cdot v_1 \right) + \left(-\frac{R_f}{R_2} \cdot v_2 \right)$$

המעגל המתואר באיור 2.7 נקרא **מסכם משוקלל (weighted summer)**, משום שהוא

מסכם את מתחי המבוא אבל נותן משקל שונה לכל מתח.

נצטרך לבחור נגדים זהים כדי לקבל מעגל מחבר מהצורה הזאת:

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} = -(v_1 + v_2)$$

את ההוכחה נשאיר לקורא.

אפשר להכליל את התוצאה בעבור n כניסות, ואז נקבל:

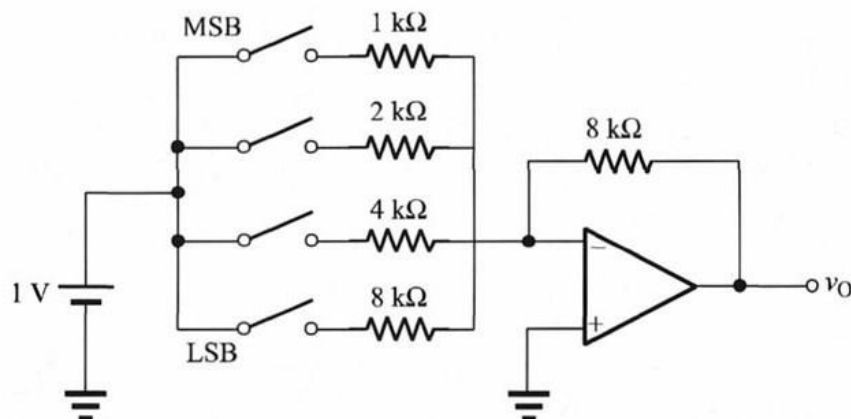
$$v_o = v_{o1} + v_{o2} + v_{o3} + \dots + v_{o,n} = \left(-\frac{R_f}{R_1} \cdot v_1 \right) + \left(-\frac{R_f}{R_2} \cdot v_2 \right) + \left(-\frac{R_f}{R_3} \cdot v_3 \right) + \dots + \left(-\frac{R_f}{R_n} \cdot v_n \right)$$

תרגיל לדוגמה

באיור מתואר מעגל של מגבר שרת בתצורה מסכמת משוקללת. יש להניח שכל המפסקים סגורים.

א. חשבו את מתח המוצא.

ב. למה יכול מעגל כזה לשמש?



פתרון

א. נציב את הנתונים בנוסחה:

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} + v_{o3} + \dots + v_{o,n} = \left(-\frac{R_f}{R_1} \cdot v_1 \right) + \left(-\frac{R_f}{R_2} \cdot v_2 \right) + \left(-\frac{R_f}{R_3} \cdot v_1 \right) + \dots + \left(-\frac{R_f}{R_n} \cdot v_2 \right)$$

$$v_o = \left(-\frac{8}{1} \cdot 1 \right) + \left(-\frac{8}{2} \cdot 1 \right) + \left(-\frac{8}{4} \cdot 1 \right) + \left(-\frac{8}{8} \cdot 1 \right) = -15V$$

ב. המעגל הזה יכול לשמש בתור ממיר של מספר בִּינָרִי למספר עשרוני. מתח המוצא מציין את הערך העשרוני.

תרגול

הציעו תוספת למעגל המסכם המשוקלל הנתון באיור 2.6, שבעזרתה יתקבל מתח מוצא במופע (פזה) זהה למתחי המבוא. מתחי המבוא יכולים להיות מתחי DC, מתחי AC או שניהם יחד.

תרגיל נוסף לדוגמה

נניח שבמגבר מסכם בעל שני מבואות כל הערכים של הנגדים זהים, כלומר: $R_1 = R_2 = R_f = 10k\Omega$. נתון ש: $v_1 = 5V$, $v_2 = 5\sin(\omega t)V$. חשבו את מתח המוצא המתקבל וסרטטו אותו.

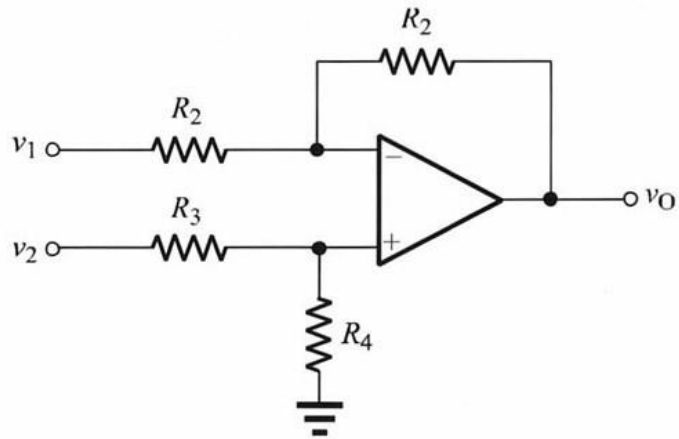
פתרון

מתח המוצא המתקבל נתון בביטוי הבא:

$$v_o = -v_1 - v_2 = -5 - 5\sin(\omega t)V$$

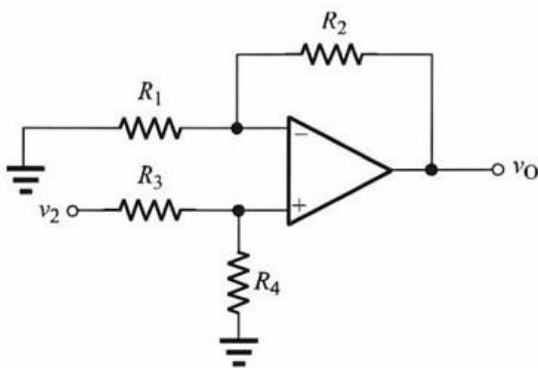
מגבר מחסר (מגבר הפרש)

בסעיף הזה נראה איך עושים פעולת חיסור באמצעות מגבר שרת. באיור 2.8 מתואר מעגל שיש לו שני מבואות ומוצא אחד. נמצא את הקשר בין המתחים שבשני המבואות (v_1 , v_2) למתח שבמוצא (v_o).

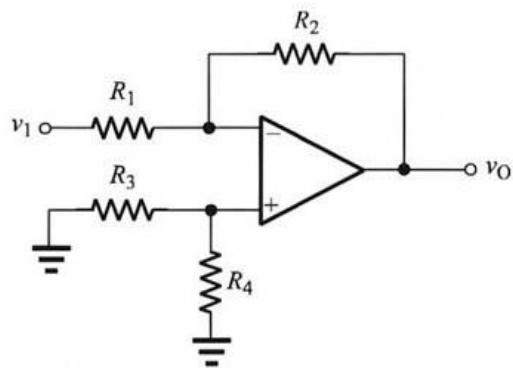


איור 8. מגבר מחסר

כדי להגיע לפתרון אפשר להיעזר במשפט ההרכבה או בשיטת מתחי צמתים. כאן נשתמש במשפט ההרכבה. נאפס את v_2 בעזרת חיבורו לאדמה (גרימת קצור) ונמצא את v_{o1} – מתח המוצא שעתיד להתקבל בגלל v_1 אם $v_2 = 0V$.



ב



א

איור 2.9 תרומת מתחי המבוא לאות המוצא

ניעזר באיור 2.9א'. באיור הזה אפשר לזהות חיבור של מגבר הופך מופע. נגדים R_3 ו- R_4 לא משפיעים על המעגל, מפני שהזרם בהם אפסי (נשאיר את ההוכחה לקורא). ולכן:

$$v_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_1$$

כעת נאפס את v_1 ונמצא את v_{o2} – מתח המוצא החלקי, הנגרם בגלל v_2 . לפי איור 2.9ב' איפסנו את v_1 (חיברנו אותו לאדמה), ואפשר לזהות בו חיבור של מגבר עוקב מופע. התצורה המופיעה כאן כוללת מחלק מתח בין הנגדים R_3 ו- R_4 . תרומת v_2 למתח המוצא תהיה:

$$v_{o2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_2$$

ואז מתח המוצא, כלומר הסכום האלגברי של כל המתחים הנוצרים שם, יהיה:

$$v_o = v_{o2} + v_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_2$$

אמנם קיבלנו פעולת חיסור בין V_2 ל- V_1 , אולם כל אחד מהמתחים האלה מוכפל בגורם אחר.

נשאלת השאלה: האם אפשר לקבל מתח מוצא יחסי **להפרש** המתחים ($V_2 - V_1$) ומהו התנאי

לזה? התשובה היא חיובית, והתנאי הוא שהגורם המכפיל את V_1 $\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$ והגורם המכפיל את

V_2 $\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\right)$ יהיו שווים (וככה נוכל להוציא גורם משותף מחוץ לסוגריים):

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

נפתח את הסוגריים בביטוי הימני ונקבל:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

נכנס את האיברים הכוללים את הגורם $\frac{R_2}{R_1}$ לצד שמאל של המשוואה ונוציא אותו מחוץ

לסוגריים:

$$\frac{R_2}{R_1} \left(1 - \frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

מכנה משותף:

$$\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4}\right) = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

נכפול את שני אגפי המשוואה ב- $\frac{R_3 + R_4}{R_3}$ ונקבל:

$$(5-5) \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

המסקנה היא: אם נקפיד שיחס הנגדים $\frac{R_2}{R_1}$ יהיה שווה ליחס הנגדים $\frac{R_4}{R_3}$, נקבל הגבר שתלוי

בהפרש המתחים ($V_2 - V_1$) בלבד:

$$(5-6) \quad v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

מגבר המקיים את משוואה (5-6) נקרא **מגבר הפרש (differential amplifier)**.

הגבר מתח בדציבלים

טווח ההגבר של מגברים הוא גדול מאוד. הגבר יכול לנוע מניחות (אות חלש) ועד להגברה של מאות אלפים. במערכת צירים לינארית (עם הפרשים שווים בין השנתות) קשה להציג במפורט טווח גדול כליכ של הגברים, באופן שיהיה אפשר להבדיל בין ההגברים השונים ולקרוא את הערך שלהם.

אם נבחר שנתות שההפרשים ביניהן גדולים לא נוכל להבחין בהגברים הקטנים, ואם נבחר שנתות שההפרשים ביניהן קטנים – נצטרך לסרטט מערכות צירים ענקיות כדי לסמן בהן את ההגברים הגדולים. לדוגמה, אם ננסה לסרטט במערכת צירים אחת את שלושת ההגברים הללו: $A_1 = 0.1$, $A_2 = 100$, $A_3 = 100,000$ – נראה שהדבר כמעט בלתי אפשרי. כדי להתגבר על הבעיה נוהגים לבטא הגברים גם בסולם לוגריתמי באופן הבא בעזרת יחידה הנקראת **בל**:

$$A_p(\text{bel}) = \log A_p$$

כדי שלא נעסוק בהגברים עם ערכים של שברים כגון 0.2Bel או 0.3Bel, הוגדרה יחידה קטנה יותר – **הדציבל**, שהוא עשירית הבל (כפי שדצימטר הוא עשירית המטר). יחידת הדציבל מסומנת כך: **dB**.

$$1\text{dB} = \frac{1}{10}\text{Bel} \quad \rightarrow \quad A_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log A_p$$

שאלה 2.1

בטאו בדציבלים את הגברי המתח הבאים:

א. 100	ה. 10^{-7}	ט. $\frac{1}{2}$
ב. 10	ו. 500	
ג. 10^5	ז. -100	
ד. 1	ח. -40	

שאלה 2.2

להלן הגברי הספק המבוטאים ב-dB. בטאו את ההגברים האלה בתור יחס הספקים.

- א. 50 dB
- ב. 32 dB
- ג. 0 dB
- ד. -15 dB
- ה. 0.25 dB
- ו. -0.25 dB
- ז. -10 dB

מגברים רב-דרגתיים עם מגברי שרת

תרגול

לפניכם כמה שאלות הבנה וכמה שאלות חישוב. מומלץ להשיב על השאלות האלה לפני המעבר לפרק הבא. בהצלחה!
השלימו את המשפטים שלפניכם:

- נגד המשוב של מגבר בתצורה מהפכת מחובר _____
(בין הדק המוצא להדק המבוא המסומן ב"-" / בין הדק המוצא להדק המבוא המסומן ב"+" / בין הדק המבוא המסומן ב"-" להדק המבוא המסומן ב"+" / לנגד המחבר את אות הכניסה להדק המסומן ב"-").
- כדי לקבל הגבר של 6 במגבר עוקב מופע נדרש יחס נגדים של _____ ל-1.

3. כדי להגדיל הגבר של מגבר הופך מופע פי 3 (בערך מוחלט) נדרש _____
(להגדיל / להקטין) את נגד המשוב פי _____

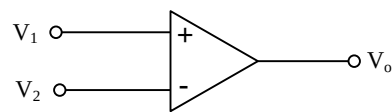
4. כדי לקבל הגבר של 8 במגבר הופך מופע נדרש יחס נגדים של _____ ל-1.

לפניכם משפט, שבו צריך להשלים את המילים החסרות כדי לתאר את המאפיינים של מגבר יחידה.

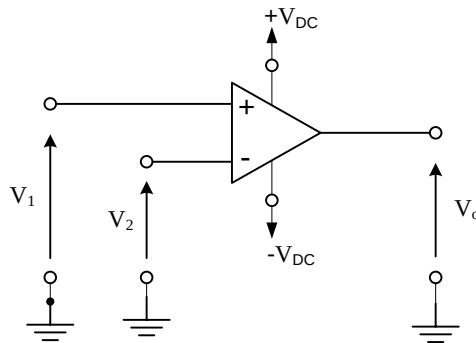
המשפט:

מגבר יחידה (חוצץ) הוא מקרה פרטי של מגבר _____ (הופך מופע / לא הופך מופע / בחוג פתוח), שבו הערך של נגד המשוב (R_2) שואף ל- _____ (אין-סוף / אפס / ערכו של R_1) והערך של הנגד השני (R_1) שואף ל- _____ (אין-סוף / אפס / ערכו של R_2).

סיכום



הסימול המקובל של מגבר שרת במעגל:



הסימול המקובל של מגבר שרת עם מקורות הזנה במעגל:

התכונות של מגבר שרת אידאלי:

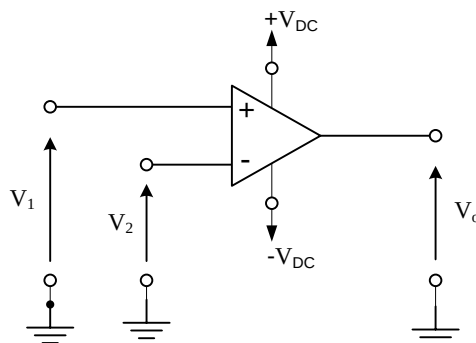
ההגבר של מגבר שרת אידאלי הוא אין-סופי. $A_{V0} \rightarrow \infty$

התנגדות המבוא של מגבר שרת אידאלי היא אין-סופית. $R_{in} \rightarrow \infty$

התנגדות המוצא של מגבר שרת אידאלי היא אפס. $R_{out} \rightarrow 0$

שימושים:

משווה בחוג פתוח

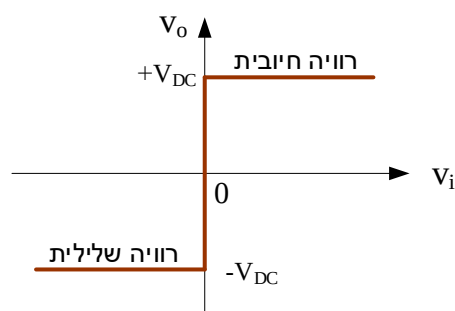


$$v_1 = v_2 \Rightarrow v_o = 0$$

$$v_1 > v_2 \Rightarrow v_o = +V_{DC}$$

$$v_1 < v_2 \Rightarrow v_o = -V_{DC}$$

*המתח השלילי יכול להיות אפס.



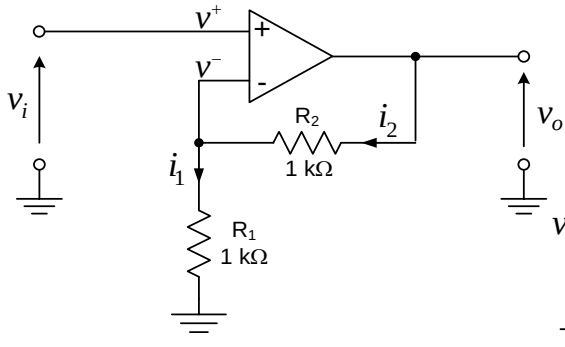
תיאור גרפי – אופיין תמסורת של משווה:

מגבר שרת בחוג סגור

קצר מדומה (קצר וירטואלי) – מצב שבו יש מתח זהה בהדק החיובי (+) ובהדק השלילי (-)

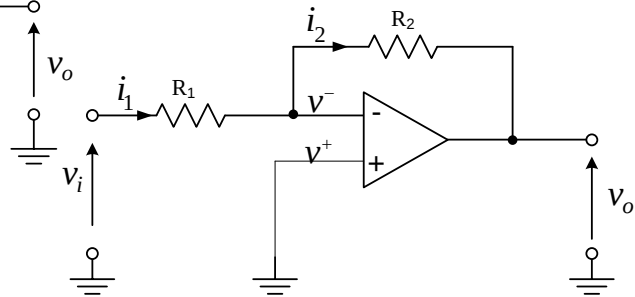
ביחס לאדמה, כלומר: $V^+ = V^-$.

תצורה לא מהפכת:



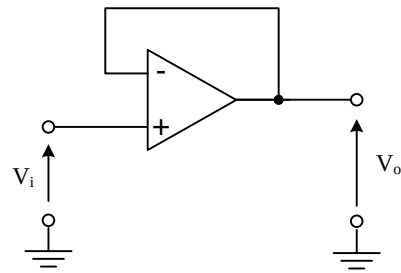
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

תצורה מהפכת:



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

מגבר (חוצץ) יחידה



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + 0 = 1$$

$$V_o = V_i$$

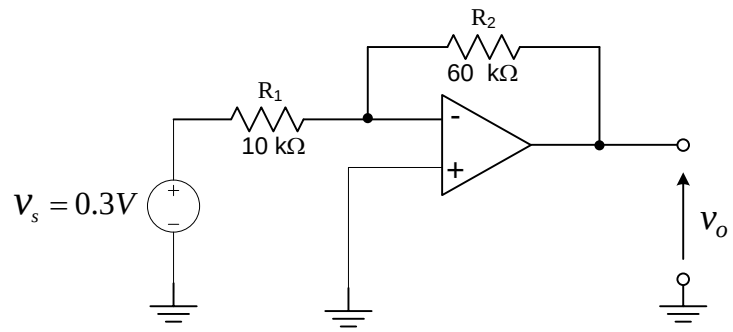
✍️ בחנו את עצמכם

לפניכם עשר שאלות. מומלץ להשיב עליהן כדי לבדוק את הידיעות שלכם. בשש השאלות הראשונות עליכם להשלים את המשפטים, ואחריהן יש ארבע שאלות חישוב. השלימו את המשפטים האלה (שאלות 1–6):

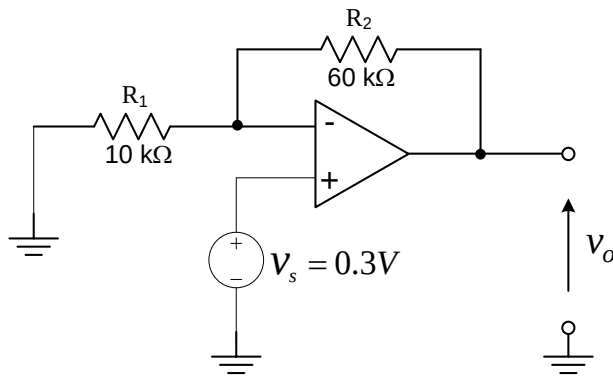
1. הגבר מתח מציין את היחס בין _____ (מתח המוצא, זרם המוצא, זרם המבוא, מתח המבוא) ל- _____ (מתח המוצא, זרם המוצא, זרם המבוא, מתח המבוא).
2. הגבר זרם מציין את היחס בין _____ (מתח המוצא, זרם המוצא, זרם המבוא, מתח המבוא) ל- _____ (מתח המוצא, זרם המוצא, זרם המבוא, מתח המבוא).
3. במגבר שרת אידאלי התנגדות המבוא שואפת ל- _____ (אפס, התנגדות הסוללה, אין-סוף, 100 אום), והתנגדות המוצא שואפת ל- _____ (אפס, התנגדות הסוללה, אין-סוף, 100 אום).
4. מתח המוצא המרבי שיכול להתקבל במוצא של משווא בחוג פתוח הוא: _____ (תלוי במתחי הכניסה, 20 וולט, אפס, מתח רוויה חיובי, מתח ההזנה הנמוך).
5. כדי לקבל הגבר של 11 במגבר עוקב מופע נדרש יחס נגדים של _____ ל-1.
6. כדי לקבל הגבר של (-4) במגבר הופך מופע נדרש יחס נגדים של _____ ל-1.

בשאלות 7–10 אתם נדרשים לחשב את הערכים החסרים במגברים ולרשום את התוצאה במקום המיועד לזה.

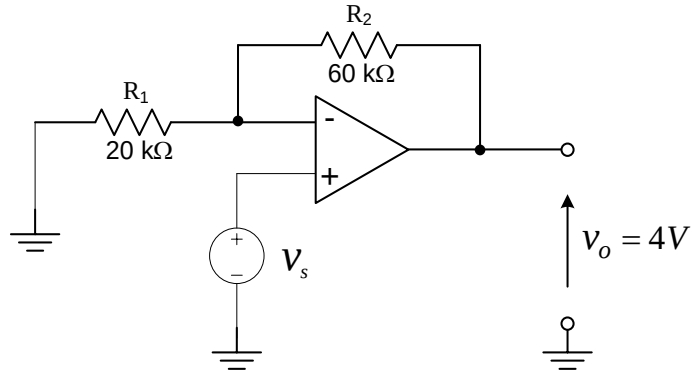
7. מתח המוצא של המגבר המתואר באיור הוא _____ וולט.



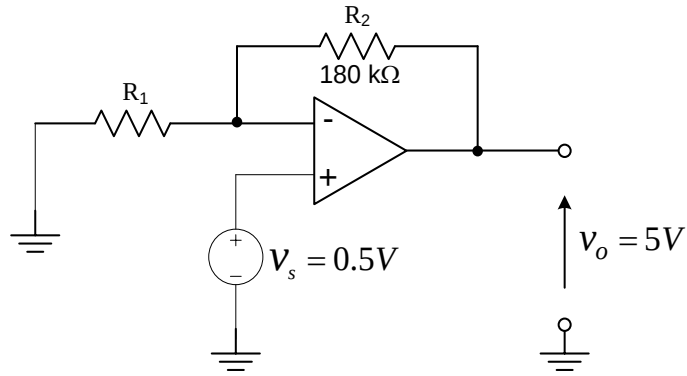
8. מתח המוצא של המגבר המתואר באיור הוא _____ וולט.



9. מתח המבוא של המגבר המתואר באיור הוא _____ וולט.

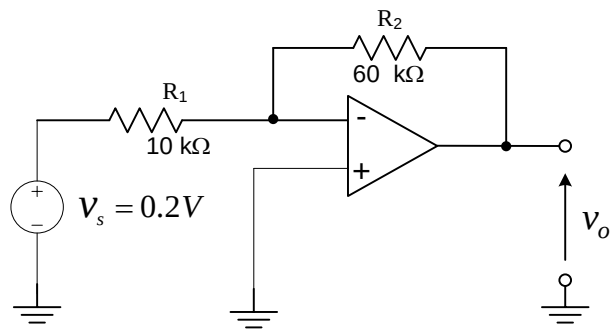


10. הערך הנדרש בנגד R_1 כדי לקבל את הערכים המצוינים במעגל הוא _____ $k\Omega$.

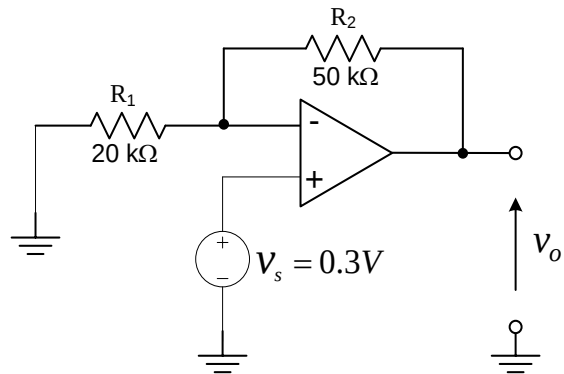


קובץ שאלות לתרגול נוסף

1. סרטטו מגבר שרת (עם מתחי הזנה ובלי מתחי הזנה) ורשמו בסרטוט את התכונות של מגבר שרת אידאלי: R_i , R_o , A_v .
2. סרטטו את אופיין התמסורת $V_o = f(V_i)$ של מגבר שרת אידאלי בחוג פתוח.
3. סרטטו תרשים של מגבר בתצורה מהפכת ורשמו בו את הביטוי של הגבר המתח A_v .
4. סרטטו תרשים של מגבר בתצורה לא מהפכת ורשמו בו את הביטוי של הגבר המתח A_v .
5. תכננו מגבר בתצורה מהפכת בעל הגבר של (-10) באמצעות שימוש בנגדים שההתנגדות שלהם היא $100k\Omega$ בלבד. השתמשו במספר מזערי של נגדים.
6. סרטטו בעבור כל אחד מהסעיפים הבאים מעגל, ובו מגבר שרת העונה על הדרישות הנתונות:
 - א. הגבר: (-10) התנגדות כניסה: $R_1 = 1k\Omega$
 - ב. הגבר: (-1)
 - ג. הגבר: (-0.1) התנגדות כניסה: $R_1 = 10k\Omega$
7. חשבו את מתח המוצא בכל אחד מהמגברים המתוארים באיורים:



איור א



איור ב

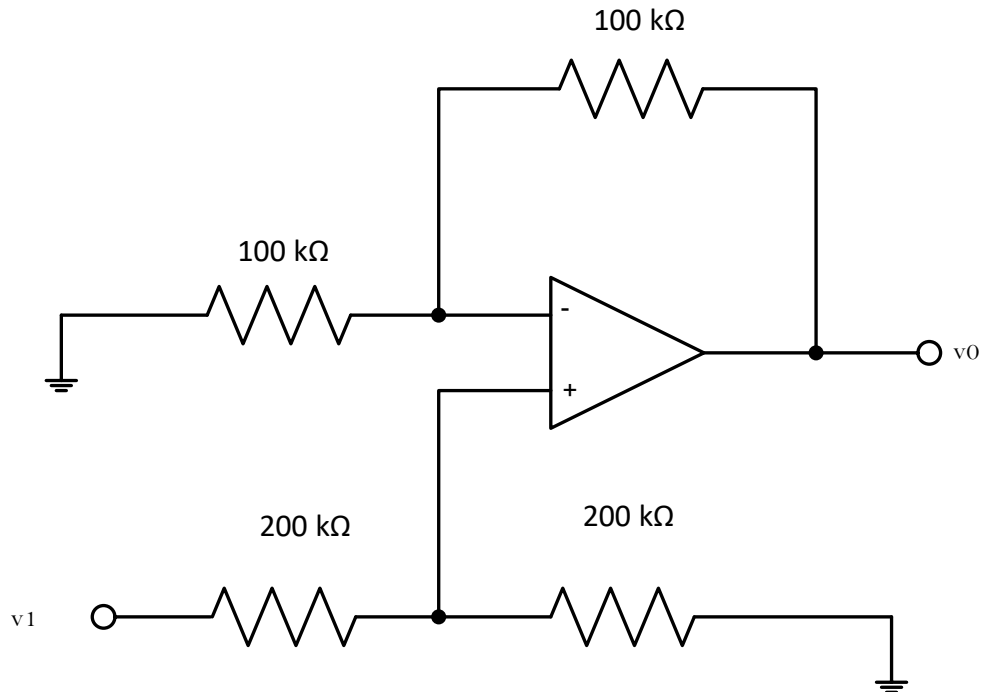
8. תכננו מגבר בתצורה לא מהפכת בעל הגבר של 10 באמצעות שימוש בנגדים שההתנגדות שלהם היא $100\text{k}\Omega$ בלבד. השתמשו במספר מזערי של נגדים.
9. סרטטו בעבור כל אחד מהסעיפים הבאים מעגל, ובו מגבר שרת העונה על הדרישות הנתונות:

- | | | | |
|----|-------|-----|--------------------------|
| א. | הגבר: | 10 | $R_1 = 1\text{k}\Omega$ |
| ב. | הגבר: | 1.5 | |
| ג. | הגבר: | 2 | $R_2 = 10\text{k}\Omega$ |

תרגילים נוספים:

שאלה 2.10

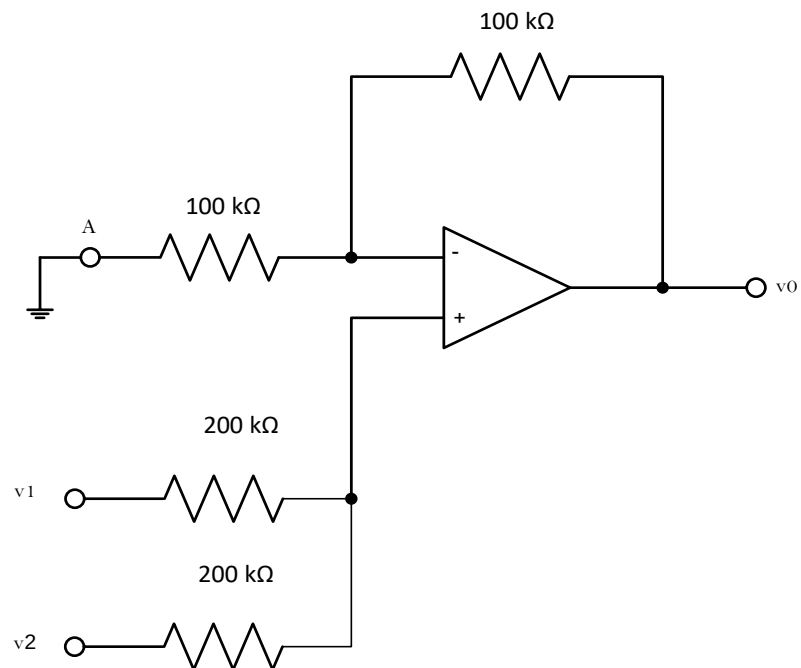
מצאו את ההגבר V_O/V_1 של המעגל המוצג באיור:



איור 2.10 איור לשאלה 2.10

שאלה 2.11

א. בטאו את V_O כפונקציה של V_1 ו- V_2 במעגל המוצג באיור:



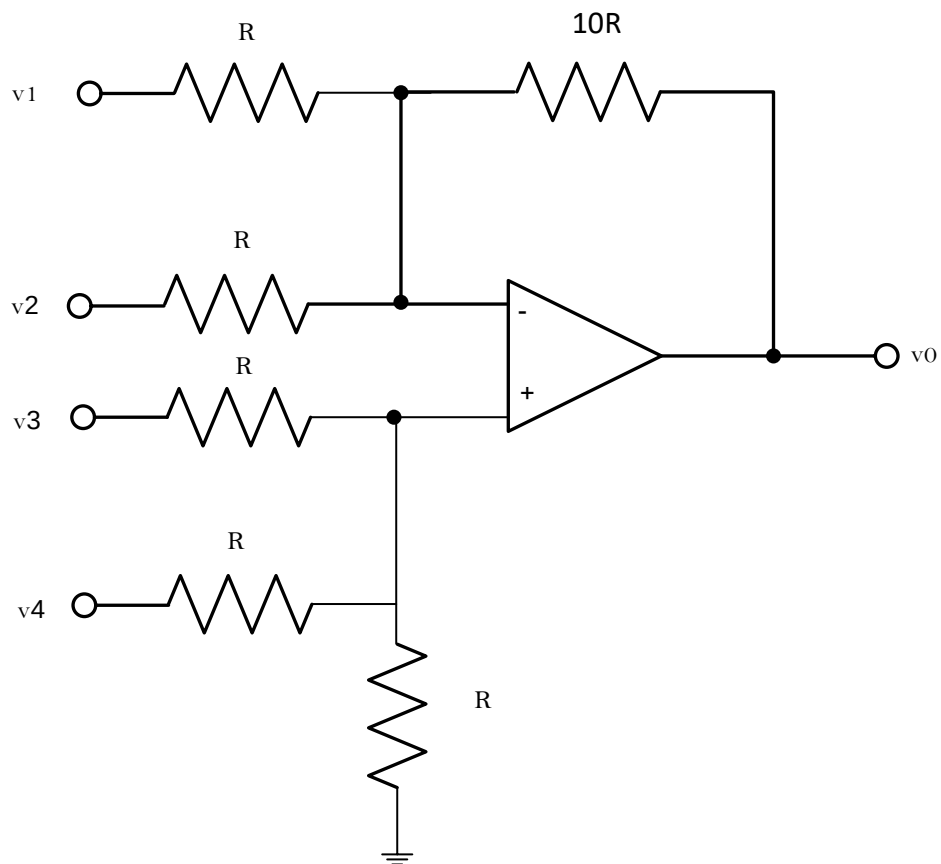
איור 2.11 איור לשאלה 2.11

א. מנתקים את הנקודה A מן האדמה ומחברים אותה למתח מבוא שלישי, V_3 .

בטאו את V_O כפונקציה של V_1, V_2 ו- V_3 .

שאלה 2.12

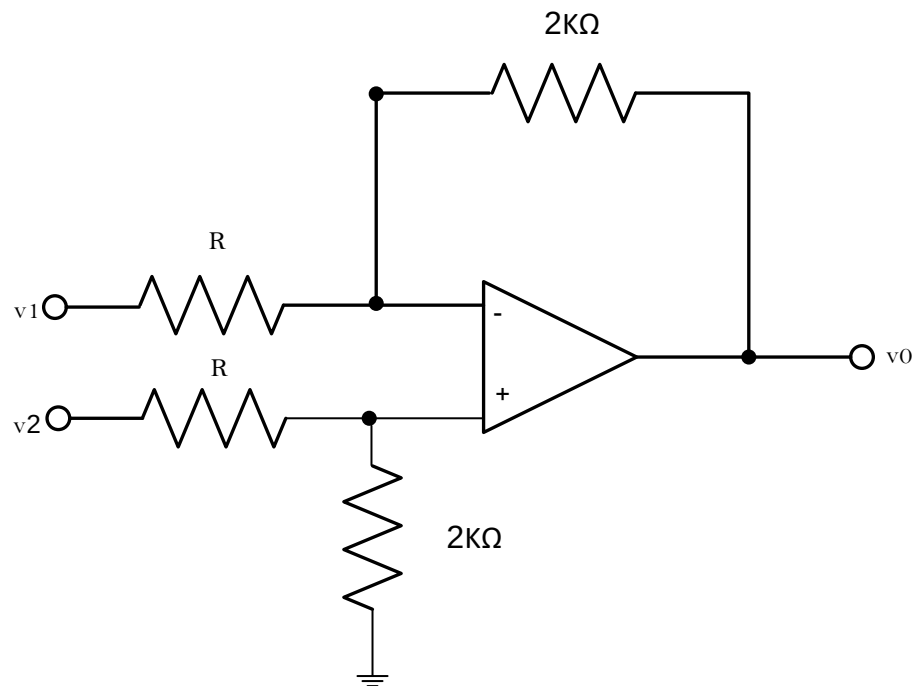
חשבו את מתח המוצא V_O במעגל המוצג באיור – הניחו שמגבר השרת אידיאלי.



איור 2.12 איור לשאלה 2.12

שאלה 2.13

נתון מגבר הפרש, הבנוי סביב מגבר שרת אידאלי כמו שמופיע באיור:



איור 2.13 איור לשאלה 2.13

א. מצאו את V_O לפי התלות בין V_1 ל- V_2 .

ב. סרטטו זה מתחת לזה את V_1 , את V_2 ואת האות במוצא (V_O) בתלות בזמן, כאשר

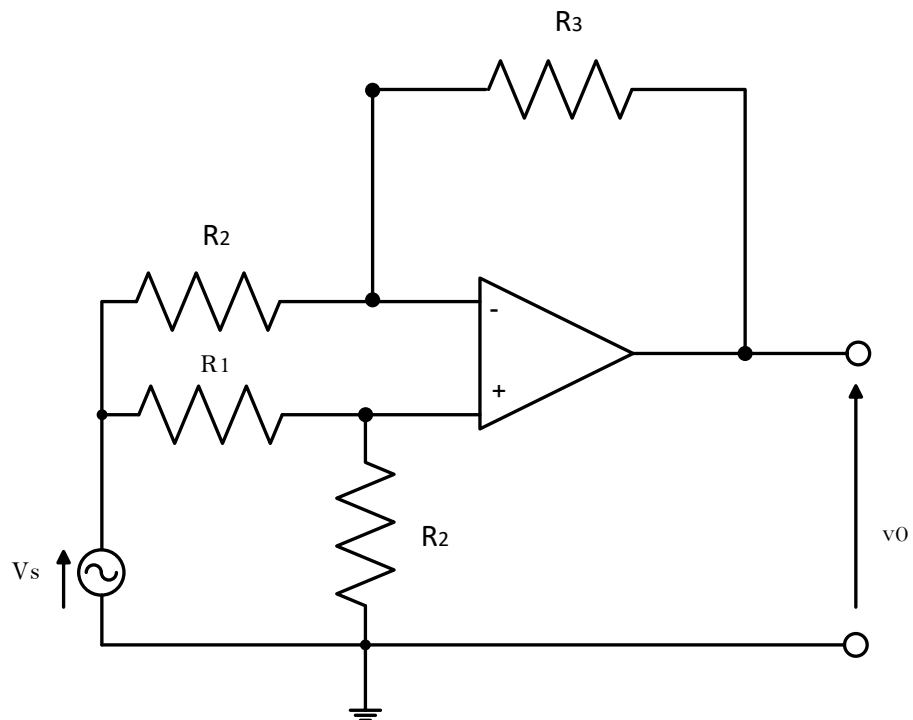
נתון:

V_1 הוא מתח ישר שלילי שגודלו 1V.

V_2 הוא מתח סינוסיאדלי, סימטרי סביב 0V ותנופתו 2V.

שאלה 2.14

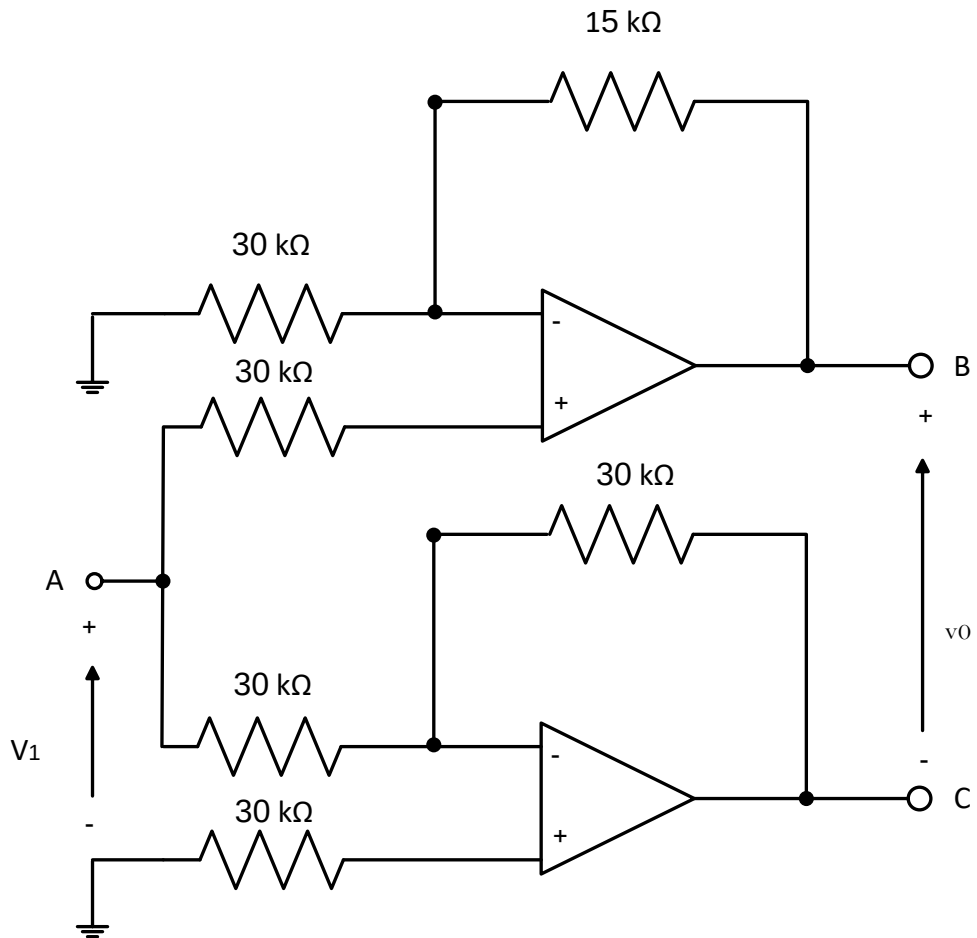
נתון מעגל, כמו שמסורטט באיור. חשבו את מתח המוצא, V_O :



איור 2.14 איור לשאלה 2.14

שאלה 2.15

- א.** סרטטו בעבור המעגל הנתון באיור את צורות הגל בנקודות B ו-C וכן את מתח המוצא (V_O), כאשר בנקודה A מסופק מתח סינוסואידלי שמתחו משיא לשיא הוא 2V. הניחו שמגברי השרת הם אידיאליים.
- ב.** מצאו את הגבר המתח V_O/V_1 .

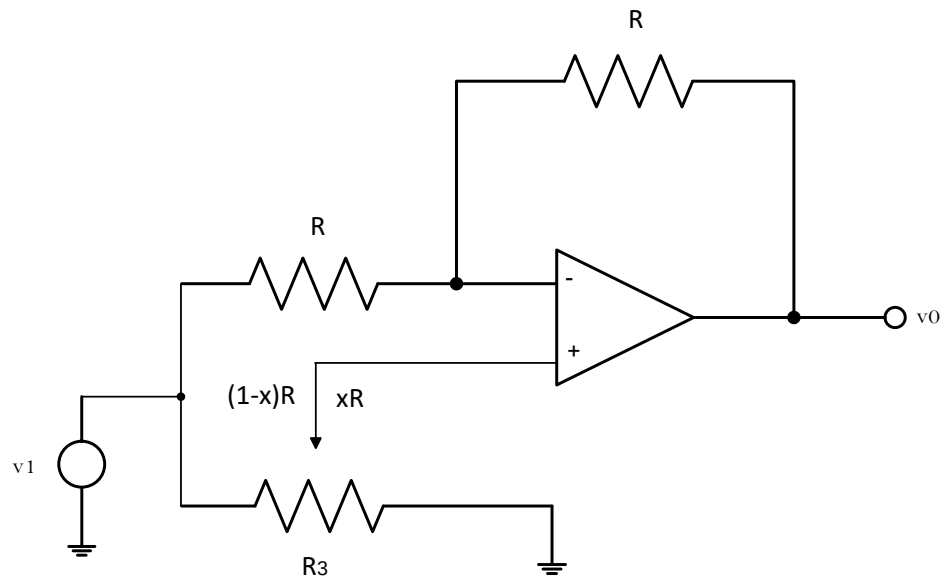


איור 2.16 איור לשאלה 2.16

- ג. מצאו את המתח (משיא לשיא) ואת הערך היעיל של האות הסינוסואידלי הגדול ביותר שהמוצא של המעגל מסוגל לספק. הניחו שמתחי הרוויה הם $\pm 15\text{V}$.
- ד. מהו לדעתכם תפקידו של המעגל?

שאלה 2.17

המעגל שבאיור כולל מגבר שרת אידאלי.



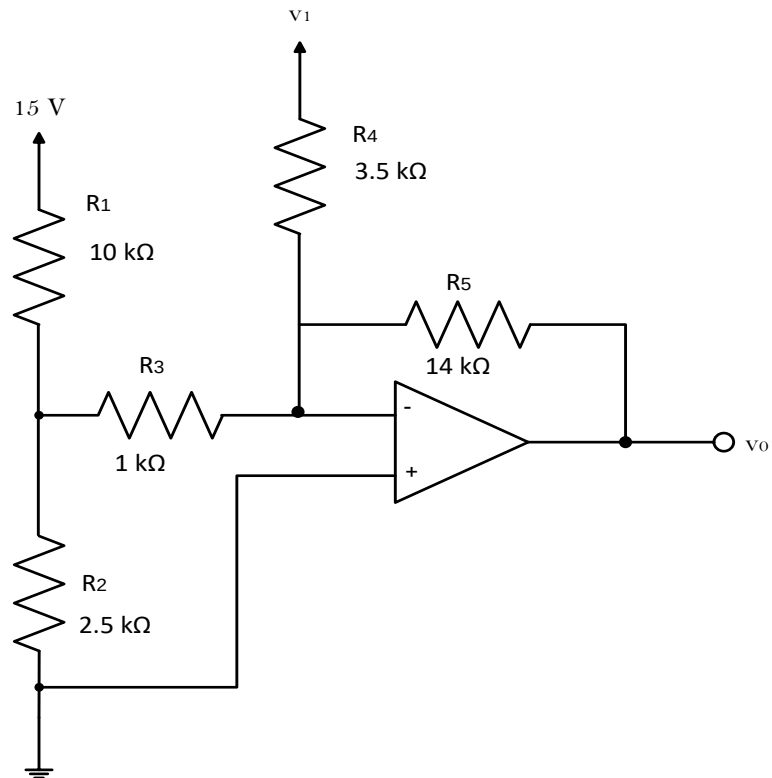
איור 2.17 איור לשאלה 2.17

בעזרת הפוטנציומטר R_3 אפשר לשנות את התמסורת של המעגל.

בטאו את $AV = v_0/v_1$ כפונקציה של מיקום זחלן הפוטנציומטר (x) ושל רכיבי המעגל.

שאלה 2.18

באיור מסורטט מעגל הכולל מגבר שרת אידאלי.

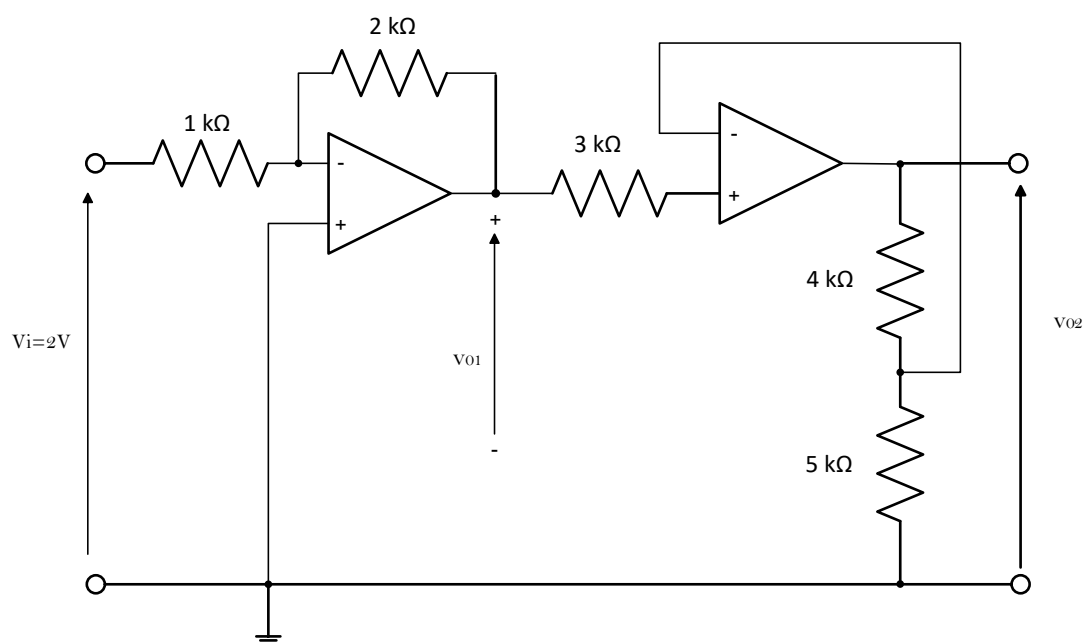


איור 2.18 איור לשאלה 2.18

חשבו את מתח המוצא V_0 כאשר $V_1 = 0$ וכאשר הוא שווה ל- $V_1 = -1$ V.

שאלה 2.19

המגבר הבא בנוי מרכיבים אידאליים.



איור 2.19 איור לשאלה 2.19

א. מצאו ביטויים להגברים: $\frac{v_{02}}{v_1}$, $\frac{v_{02}}{v_{01}}$, $\frac{v_{01}}{v_1}$.

ב. מצאו את V_{01} , V_{02} .

שאלה 2.20

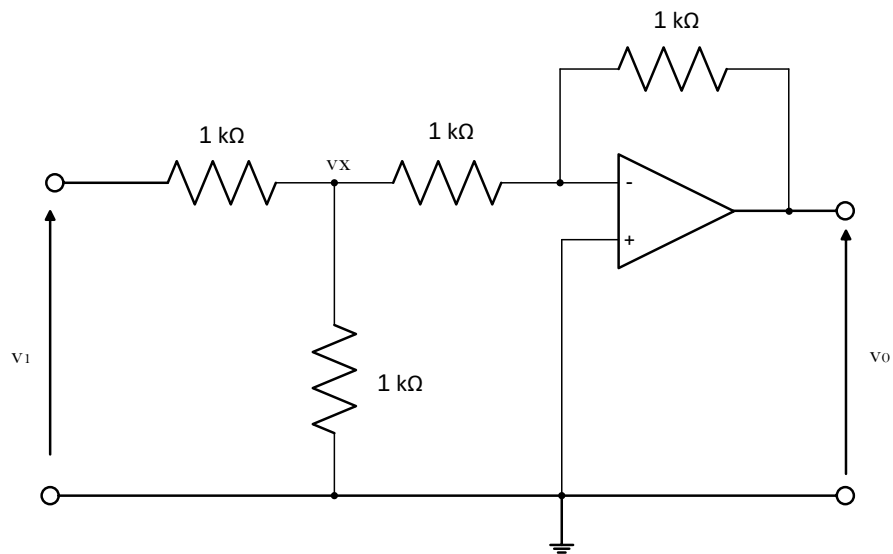
המעגל שבאיור הבא כולל מגבר שרת אידאלי.

חשבו את ההגברים:

א. $\frac{V_0}{V_X}$

ב. $\frac{V_0}{V_1}$

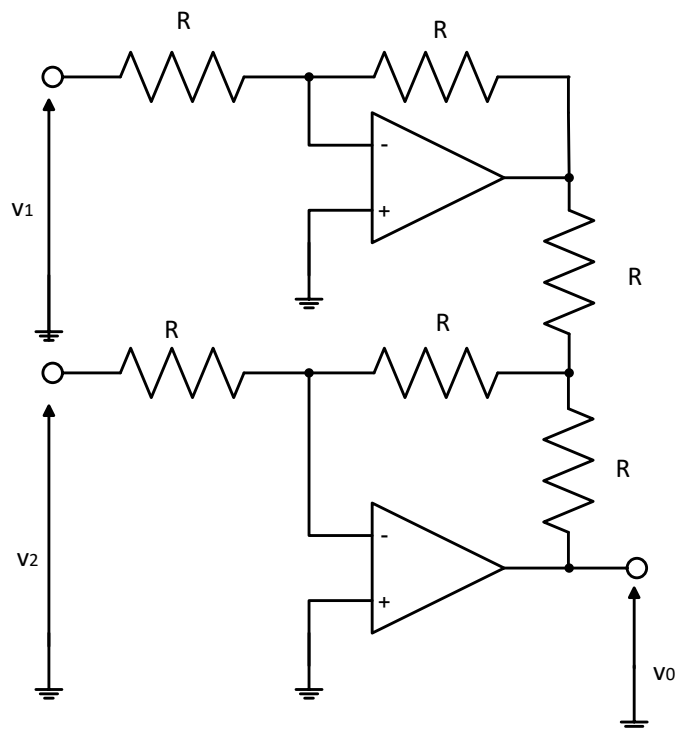
ג. $\frac{V_1}{V_X}$



איור 2.20 איור לשאלה 2.20

שאלה 2.21

א. פתחו ביטוי לאות שבמוצא (v_0) לפי התלות שלו ב- v_1 וב- v_2 במעגל שבאיור (הניחו שמגברי השרת הם אידאליים).



איור 2.21 איור לשאלה 2.21

ב. שנו נגד אחד במעגל באופן שמתח המוצא יהיה תלוי בהפרש $(v_1 - v_2)$.

שאלה 2.22

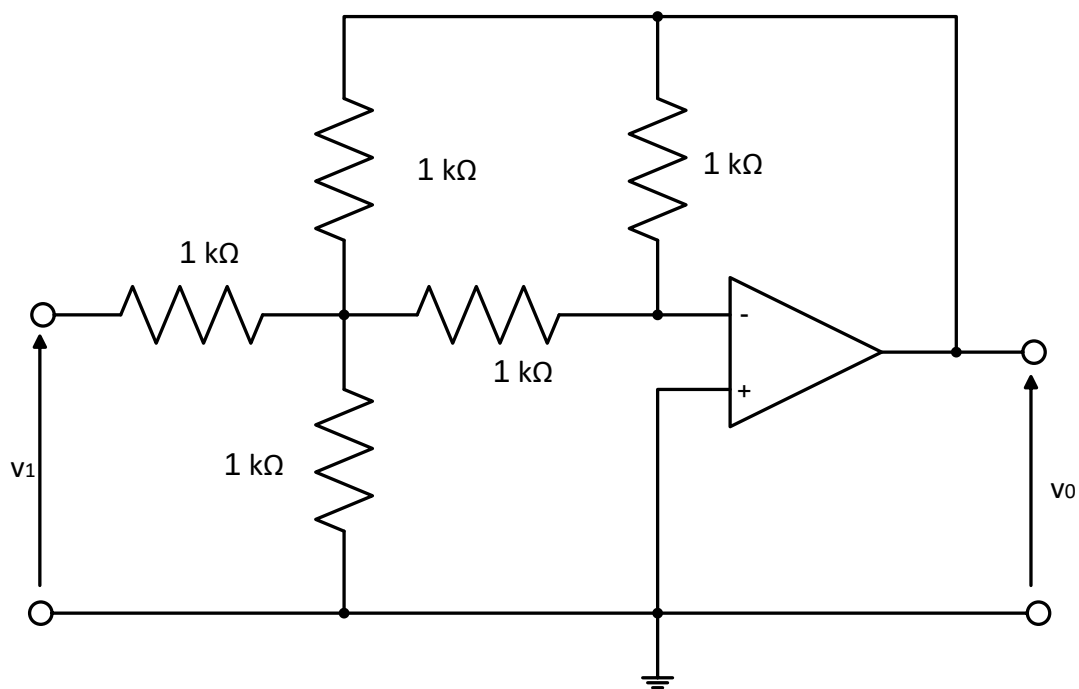
המעגל הבא כולל מגבר שרת אידאלי.

חשבו את ההגברים:

א. $\frac{V_0}{V_X}$

ב. $\frac{V_X}{V_1}$

ג. $\frac{V_0}{V_1}$



איור 2.22 איור לשאלה 2.22

שאלה 2.23

המעגל הבא כולל מגבר שרת אידיאלי.

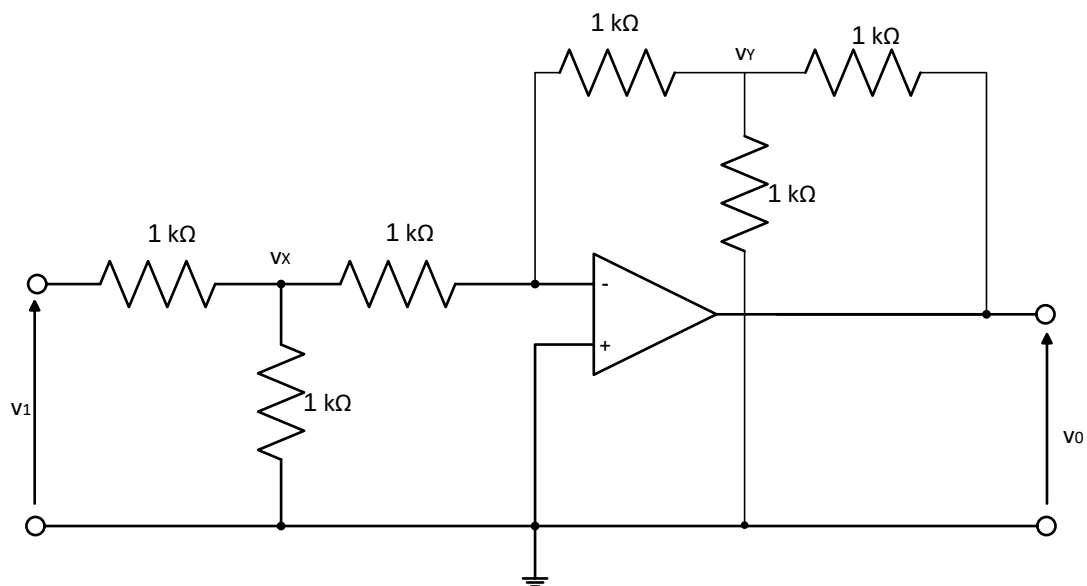
חשבו את ההגברים:

א. $\frac{V_1}{V_X}$

ב. $\frac{V_0}{V_1}$

ג. $\frac{V_X}{V_Y}$

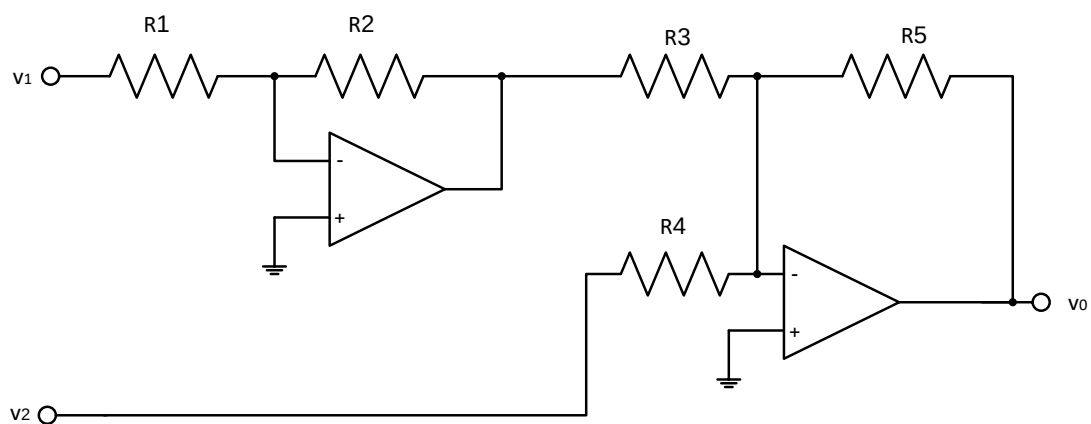
ד. $\frac{V_0}{V_Y}$



איור 2.23 איור לשאלה 2.23

שאלה 2.24

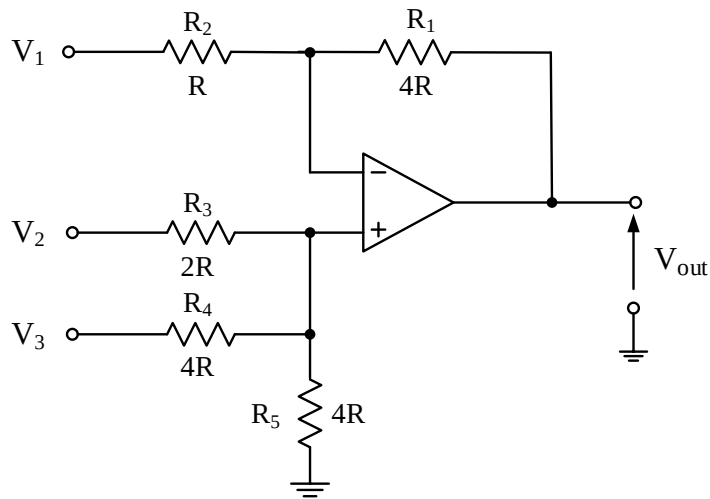
המעגל הבא כולל מגברי שרת אידאליים. מצאו ביטוי בעבור V_0 :



איור 2.24 איור לשאלה 2.24

שאלה 2.25

באיור לשאלה מתואר מעגל הגברה בעל שלושה מבואות של מתח: V_1 , V_2 ו- V_3 . מגבר השרת הוא אידאלי.

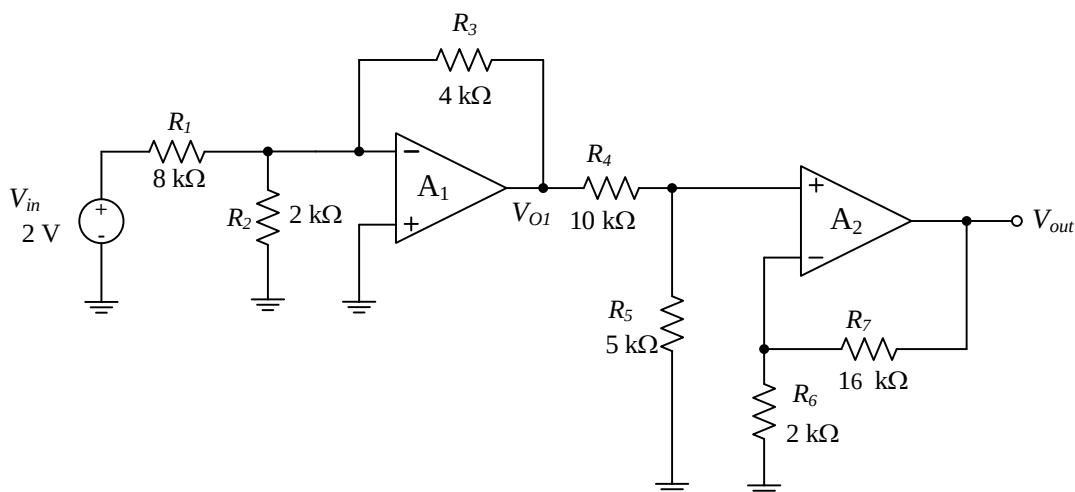


איור 2.25 איור לשאלה 2.25

- א. בטאו את מתח המוצא V_{out} על-פי התלות שלו במתחים: V_1 , V_2 ו- V_3 .
- ב. נתון ש: $V_1 = 2V$, $V_2 = 0V$, $V_3 = 1V$. חשבו את מתח המוצא.
- ג. נתון ש: $V_1 = 1\sin(\omega t)$, $V_2 = V_3 = 1V$. חשבו את מתח המוצא V_{out} המתקבל כפונקציה של הזמן וסרטטו אותו. ציינו על-גבי הסרטוט שלכם ערכים רלוונטיים של מתחים.

שאלה 2.26

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי, ובו שני מגברי שרת אידאליים.

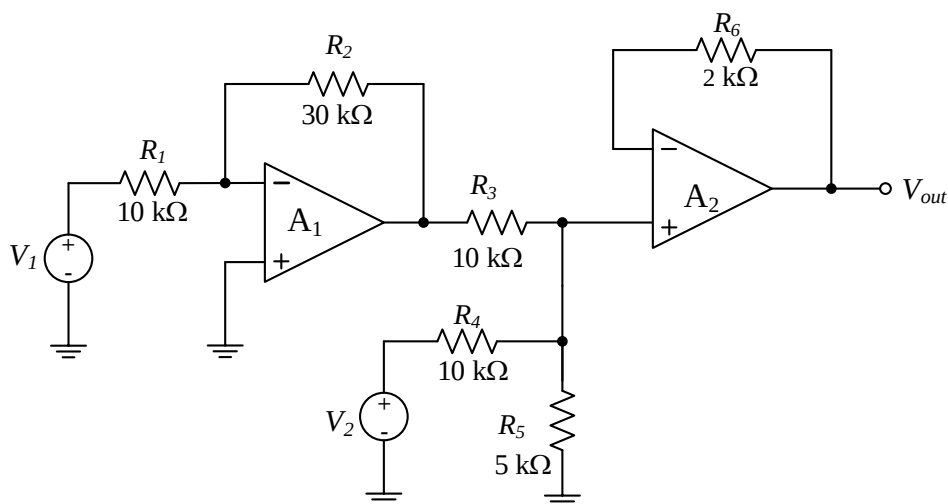


איור 2.26 איור לשאלה 2.26

- חשבו את המתח במוצא של מגבר השרת הראשון V_{O1} .
- חשבו את מתח המוצא V_{out} .
- חשבו את הזרם (גודל וכיוון) שזורם דרך הנגד R_5 .

שאלה 2.27

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי, ובו שני מגברי שרת אידאליים.

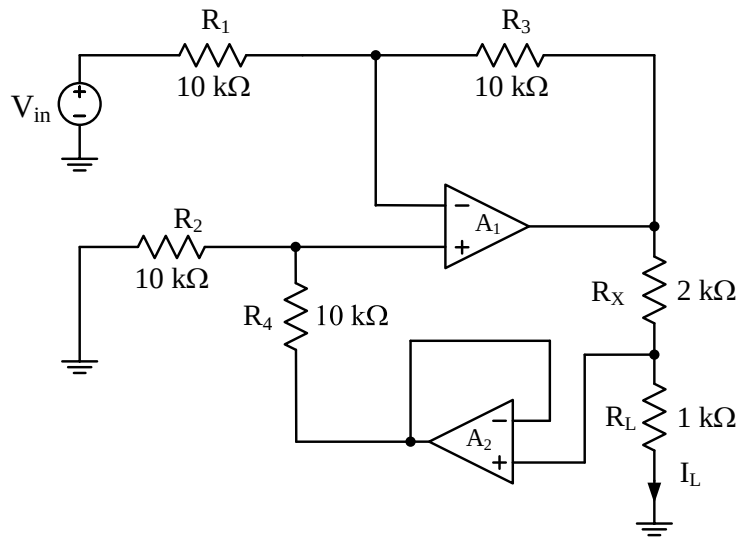


איור 2.26 איור לשאלה 2.26

- רשמו את התפקיד של המגבר A_1 ואת התפקיד של המגבר A_2 .
- נתון ש: $V_1 = 2V$, $V_2 = 0V$. חשבו את מתח המוצא V_{out} .
- רשמו ביטוי של מתח המוצא על-פי התלות שלו במתחים של המבוא: V_1 , V_2 .

שאלה 2.28

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי שמשמש כדי להמיר מתח לזרם. מגברי השרת הם אידאליים.

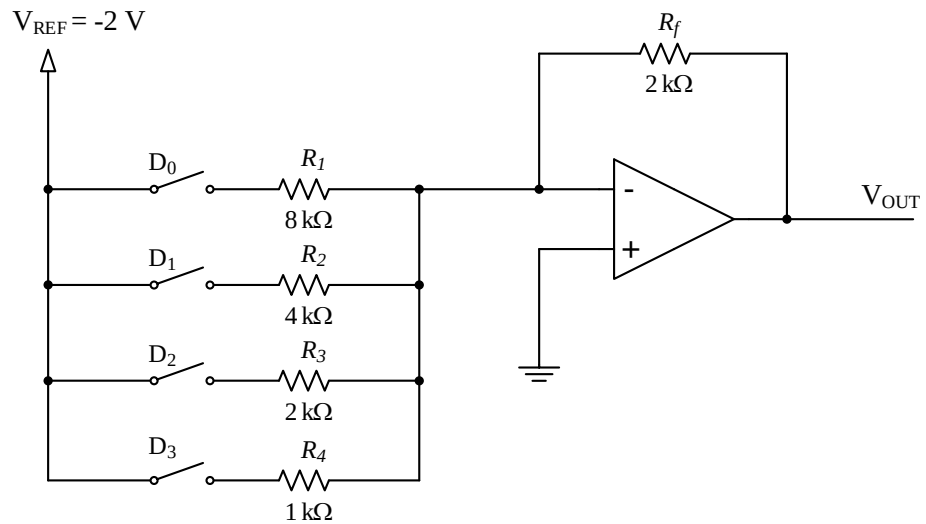


איור 2.28 איור לשאלה 2.28

- נתון: $V_{in} = 4V$. חשבו את הזרם I_L , שמסומן באיור.
- רשמו ביטוי לזרם של המוצא I_L לפי התלות שלו במתח המקור V_{in} וברכיבי המעגל.
- הוכיחו שזרם המוצא I_L לא תלוי בערך של הנגד R_L .

שאלה 2.29

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי שמשמש כדי להמיר ערך ספרתי לערך אנלוגי. מגברי השרת הם אידאליים.

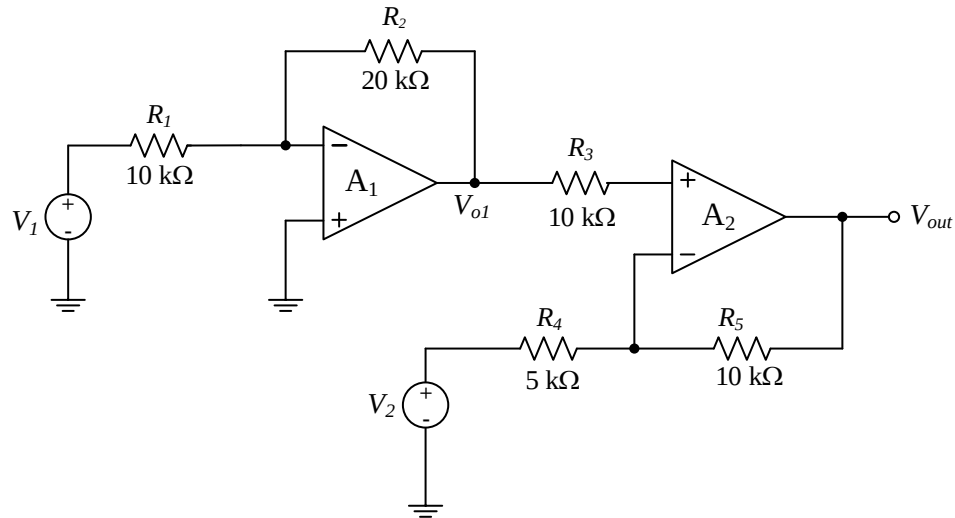


איור 2.29 איור לשאלה 2.29

- א. המפסק D_0 סגור, וכל השאר פתוחים. חשבו את מתח המוצא.
- ב. כל המפסקים סגורים. חשבו את מתח המוצא.
- ג. נתון שמתח המוצא הוא: $V_O = 5.5V$. מצאו את המצבים של המפסקים.

שאלה 2.30

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי שיש לו שני מגברי שרת אידאליים.

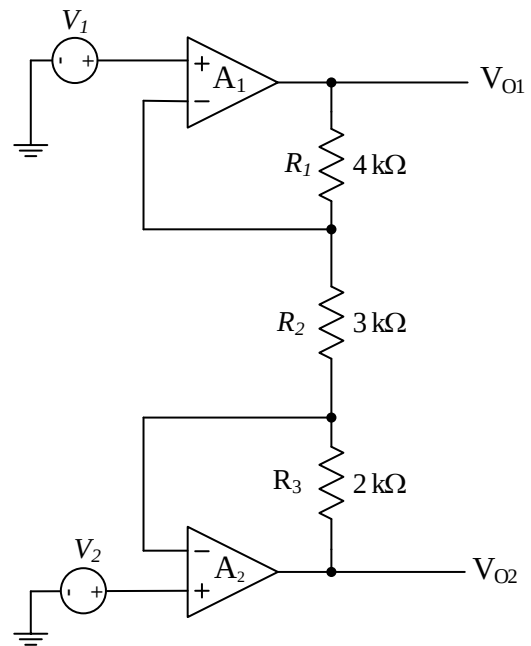


איור 2.30 איור לשאלה 2.30

- א. בטאו את המתח במוצא של המגבר הראשון V_{o1} ואת מתח המוצא V_{out} על-פי התלות שלהם במתחים של המבוא: V_1, V_2 .
- ב. נתון ש: $V_1 = 1V$. חשבו את הערך ואת הקוטביות במקור V_2 , שיידרשו לכם כדי לקבל מתח מוצא של $0V$.
- ג. נתון ש: $V_1 = 1V, V_2 = 3 \cdot \sin(\omega t)$. חשבו את מתח המוצא V_{out} המתקבל כפונקציה של הזמן וסרטטו אותו. ציינו על-גבי הסרטוט שלכם ערכים רלוונטיים של מתחים.

שאלה 2.31

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי עם שני מגברי שרת אידאליים.



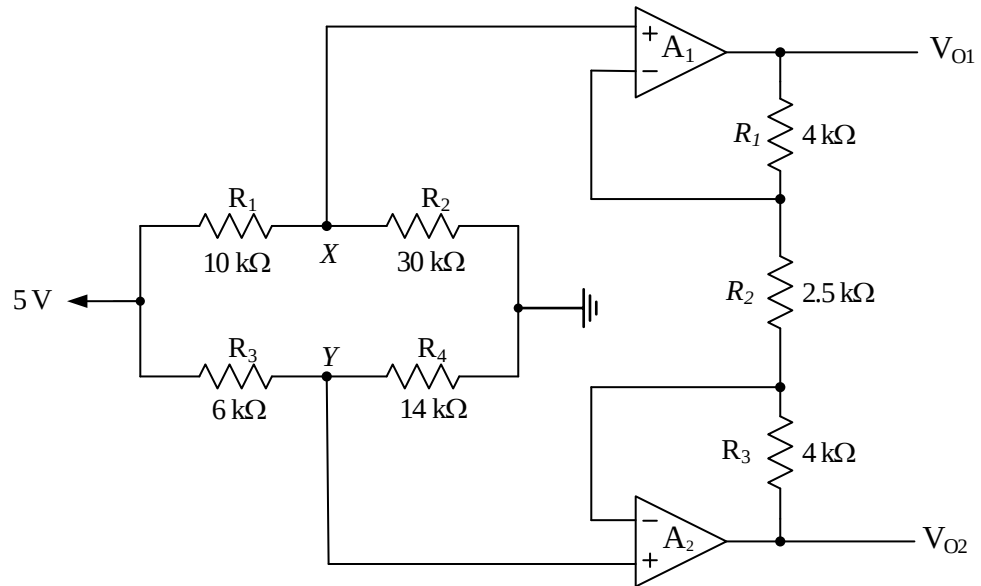
איור 2.31 איור לשאלה 2.31

נתון ש: $V_1 = 3.6V$, $V_2 = 3.3V$.

- חשבו את הזרם (גודל וכיוון) שעובר בנגד R_2 .
- חשבו את המתחים האלה: V_{O1} , V_{O2} .

שאלה 2.32

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי, ולו שני מגברי שרת אידאליים.



איור 2.32 איור לשאלה 2.32

- חשבו את המתח בנקודות X ו-Y, שמופיעות באיור.
- חשבו את הזרם (גודל וכיוון) שזורם בנגד R_2 .
- חשבו את המתחים הבאים: V_{O1} , V_{O2} .
- חשבו את הערך הדרוש לנגד R_4 כדי שיתקבל: $V_{O1} - V_{O2} = 0V$.

פרק 3 - חיישנים ומתמרים

יעדים לימודיים

בסוף יחידת הלימוד התלמיד יהיה מסוגל לבצע את הפעולות הבאות:

המרת אותות פיזיקליים

- א.** ציון דוגמה אחת לפחות של חיישן (או מתמר) הממיר תנועה לאות חשמלי ולהפך.
- ב.** ציון דוגמה אחת לפחות של חיישן (או מתמר) הממיר אות אופטי לאות חשמלי ולהפך.
- ג.** ציון דוגמה אחת לפחות של חיישן (או מתמר) הממיר אות תרמי לאות חשמלי ולהפך.
- ד.** ציון דוגמה של חיישן (או מתמר) הממיר אות אקוסטי (קול) לאות חשמלי ולהפך.

חיישן RTD: אופיין המתאר את תלות ההתנגדות בטמפרטורה,

מעגלי יישום.

- א.** חילוץ התנגדות ה-RTD בטמפרטורה הנתונה מתוך אופיין תלות ההתנגדות בטמפרטורה.
- ב.** ניתוח מעגל הכולל חיישן RTD ומשווה בחוג פתוח.
- ג.** ניתוח מעגל הכולל חיישן RTD ומגבר הופך מופע (או לא הופך מופע).

חיישן LDR: אופיין המתאר את תלות ההתנגדות בעוצמת האור,

מעגלי יישום.

- א.** חילוץ התנגדות ה-LDR בתאורה הנתונה מתוך אופיין תלות ההתנגדות בעוצמת האור.
- ב.** ניתוח מעגל הכולל חיישן LDR ומשווה בחוג פתוח.
- ג.** ניתוח מעגל הכולל חיישן LDR ומגבר הופך מופע (או לא הופך מופע).

3.1 מבוא

מי לא מכיר את המדחום הביתי, זה שעשוי מזכוכית? כשרוצים למדוד חום תוחבים את המדחום לתוך הפה, מחכים שתי דקות או שלוש, שולפים אותו ומתבוננים בתוצאה שעל הצג. האם ניסיתם לחשוב איך היא מתקבלת? ובכן, בתוך המדחום נמצא **חיישן (sensor)** **חום**, ובו גולת זכוכית המכילה כספית. מן הגולה נמשכת נימת זכוכית דקיקה. כשהכספית מתחממת הנפח שלה גדל, והיא מתפשטת לתוך נימת הזכוכית. ההתפשטות הזאת תלויה במידת ההתחממות של הכספית, ויצרני המדחום צריכים רק לסמן את השנתות המתאימות על-גבי סרגל המתכת הזעיר שליד נימת הזכוכית.

קיימים חיישנים אחרים הדומים לחיישן החום הזה, וגם הם יודעים לתרגם גודל פיזיקלי בלתי קריא לגודל פיזיקלי שאפשר לקרוא אותו או להתבונן בו. יש חיישני אור – היודעים לתרגם את עוצמת האור שמסביב למתח חשמלי – ויש גם חיישני לחץ, חיישני מהירות, חיישני משקל ועוד.

לא תמיד מעניין אותנו **למדוד** גודל פיזיקלי. לפעמים אנחנו רק רוצים **להמיר** אותו בגודל פיזיקלי אחר ביחס ישר לגודל המקורי. בטלפון הסלולרי למשל נעשית המרה של הקול שלנו לאות חשמלי, המשודר אל האנטנה הסלולרית הקרובה. רכיב או מכשיר הממיר גודל פיזיקלי אחד לגודל פיזיקלי אחר נקרא **מתמר**.

כאן המקום להזכיר חיישנים המשמשים בתפקיד **גלאים (detectors)** כדי להתריע על סכנה או על תקלה. בין הידועים שבהם: גלאי עשן, הנמצאים בכל בניין משרדים או באולמות אירועים; גלאי מתכות, למשל בבדיקות ביטחוניות בשדות תעופה; גלאי שקר בחקירות משטרה; גלאי מוקשים לשימוש צבאי ועוד. ההבדל בין גלאי לחיישן הוא שחיישן מודד את הגודל הפיזיקלי שבמבוא שלו, ואילו הגלאי רק מודיע אם קיימת תופעה מסוימת או לא. לפניכם כמה מושגים הקשורים בהמרת אותות:

אות (signal) – גודל פיזיקלי התלוי בזמן ומייצג מידע.

אות חשמלי – זרם או מתח המשתנים בתלות בזמן.

מתמר (transducer) – התקן הממיר אות פיזיקלי מסוים לאות חשמלי או להפך.

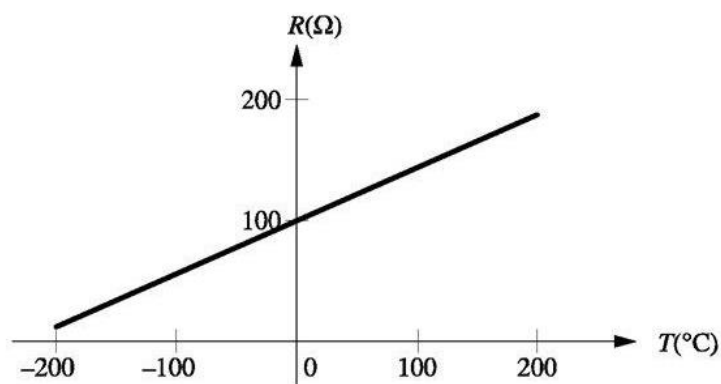
חיישן (sensor) – בהתקן הזה מנצלים תכונה פיזיקלית של החומר שהוא עשוי ממנו, כדי להמיר את הגודל הפיזיקלי הנמדד לגודל פיזיקלי אחר.

מערכת אלקטרונית – עוסקת בין היתר בעיבוד אותות. כדי שמערכת אלקטרונית תעבד אות פיזיקלי כלשהו, יש להמיר אותו תחילה לאות חשמלי.

3.2 חיישן חום

נתמקד בסוג אחד של חיישני חום – נגדים תלויי טמפרטורה. באנגלית המונח המקובל הוא: **Resistance Temperature Detector**, ובקיצור **RTD**. אמנם כל הנגדים משנים את הערך שלהם לפי שינויי הטמפרטורה (חלקם גדל וחלקם קטן), אך ה-RTD מצטיין בתלות ליניארית בטמפרטורה.

באיור 3.1 מתוארת תלות אופיינית כזאת של חיישן **PT100 (Platinum Thermometer)**. זה אחד מחיישני הטמפרטורה המסחריים, מקבוצת חיישני ה-RTD הנפוצים ביותר. לחיישן הזה יש חוט תיל מפלטינה עם התנגדות של 100Ω בטמפרטורה של 0°C והתנגדות של 138.5Ω בטמפרטורה של 100°C . כלומר מקדם הטמפרטורה של החיישן הוא $0.385\Omega/^{\circ}\text{C}$.

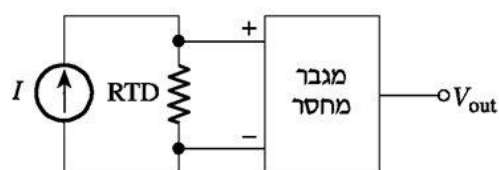


איור 3.1 אופיין התנגדות טמפרטורה של חיישן PT100

לפי הגרף ערך ההתנגדות בטמפרטורה של 0°C הוא $R_0 = 100\Omega$. יצרני ה-RTD נוהגים לייצר נגדים בעלי התנגדויות (R_0) של 100Ω , של 500Ω ושל $1,000\Omega$ – ולפרסם את השתנות ההתנגדות בטבלה מפורטת עם שינויי טמפרטורה של מעלה אחת. אפשר לראות באיור 3.1 למשל, שההתנגדות בטמפרטורה של 200°C היא כ- 180Ω . אבל אם נעיין בטבלאות היצרן נלמד שההתנגדות המדויקת היא 177.23Ω . הדיוק הזה בתהליך הייצור מתאפשר בין היתר בזכות החומר המשובח שהנגד עשוי ממנו, פלטינה למשל. בדוגמה שלפניכם מתוארת שיטה עקיפה למדידת טמפרטורה. באמצעות מקור זרם מדויק מזרימים ב-RTD זרם קבוע, ואז מקבלים בין הקצוות שלו מתח המשתנה מבחינה ליניארית לפי שינויי הטמפרטורה.

דוגמה

באיור 3.2 מתואר מעגל למדידת טמפרטורה, הגבר המגבר המחסר הוא $A = 1$. הערך של מקור הזרם הוא $I_s = 1\text{mA}$, ונגד ה-RTD הוא כמו זה שבאיור 3.1.



איור 10. מעגל למדידת טמפרטורה

חשבו את מתח המוצא בטמפרטורה של 0°C ובטמפרטורה של 200°C .

פתרון

בטמפרטורה של 0°C נקבל:

$$V_o = A \cdot (V^+ - V^-) = A \cdot V_{\text{RTD}} = A \cdot I_s \cdot R_{\text{RTD}}$$

$$V_o(0^\circ\text{C}) = 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0.1\text{V}$$

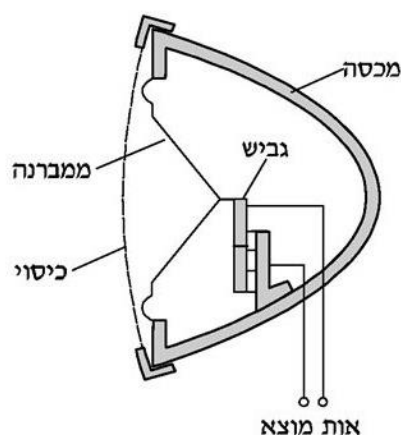
בטמפרטורה של 200°C נקבל:

$$V_o(200^\circ\text{C}) = 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 177 = 0.177\text{V}$$

3.3 חיישני קול

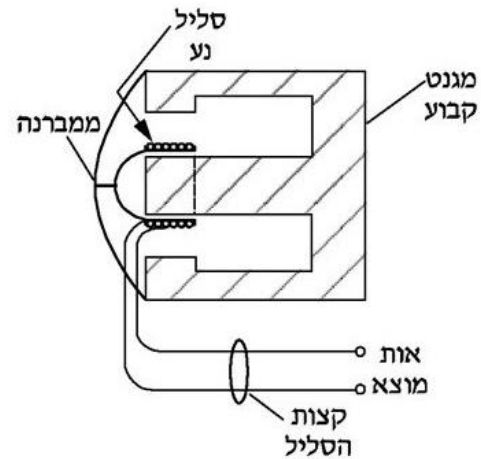
המיקרופון משמש כדי להמיר גלי קול לאות חשמלי.

אחד מסוגי המיקרופונים הוא **מיקרופון גביש**, כמו שמתואר באיור 3.3א'. גלי הקול פוגעים בממברנה רגישה, מפעילים עליה לחץ ומניעים אותה. הלחץ מועבר לגביש **פִּיִּזוֹ-אַלֶקְטְרִי**, גביש המפתח **כוח אלקטרו־מניע (כא"מ)** כשמופעל עליו לחץ. הכא"מ מתפתח בגביש ביחס ללחץ המופעל עליו. בדרך הזאת הכא"מ או המתח במוצא המיקרופון משתנים לפי העוצמה של גלי הקול שהגיעו לממברנה של המיקרופון.



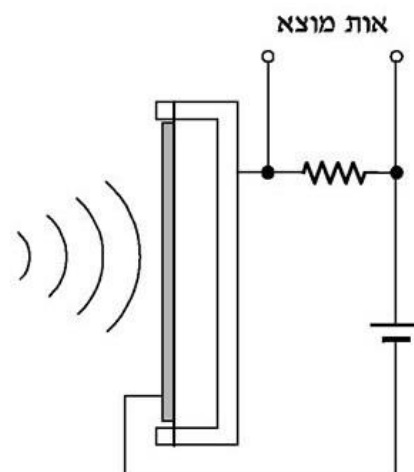
איור 20.א' מיקרופון גביש

סוג אחר של מיקרופון הוא **מיקרופון מגנטי**. הבסיס שלו הוא סליל הנמצא בשדה מגנטי, כמו שמתואר באיור 3.3ב'. במיקרופון כזה הממברנה מחוברת לסליל, והתנודות שלה מועברות אליו. מפני תנועת הסליל בשדה המגנטי נוצר כ"מ מושרה בין הקצוות שלו. לכן גם במיקרופון כזה מתח המוצא משתנה לפי העוצמה של גלי הקול שהגיעו לממברנה.



איור 30.ב' מיקרופון מגנטי

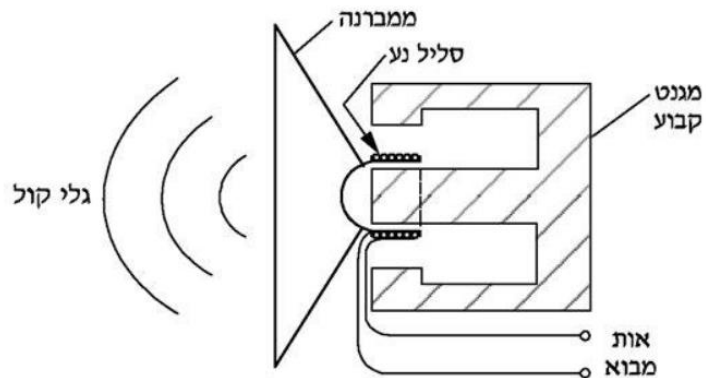
סוג המיקרופונים הנפוץ ביותר הוא **המיקרופון הקיבולי (condenser microphone)**, כמו שמתואר באיור 3.3ג'. הממברנה היא לוח אחד מתוך כמה לוחות של קבל, הטעון במתח הסוללה. כשגל קול פוגע בממברנה, היא זזה ומשנה את הקיבול. בגלל שינוי הקיבול נוצרים במעגל שינויי זרם, המתורגמים על-פני הנגד לאות מוצא חשמלי.



איור 30.ג' מיקרופון קיבולי

הרמקול הוא מתמר הממיר אות חשמלי לגלי קול. הוא בנוי מממברנה מתנועת, שתפקידה ליצור את גלי הקול באוויר, ומהתקן המניע אותה על-פי השינויים באות החשמלי.

יש כל מיני סוגים של רמקולים, והם נבדלים זה מזה באופן יצירת הכוחות הדרושים כדי להניע את הממברנה. **ברמקול מגנטי (דינמי)** מהסוג המתואר באיור 3.4, הממברנה מחוברת לסליל נייד. הסליל נמצא בשדה מגנטי שנוצר בין קטבים של מגנט. כשזורם זרם דרך הסליל, פועל עליו כוח – הסליל נע ומניע את הממברנה. ההנעה של הממברנה יוצרת גלי קול.



איור 3.0. רמקול מגנטי

ברמקול גביש הממברנה מחוברת **לגביש פִּיִּזו־אַלֶקְטְרִי**, שהפעולה שלו הפוכה מהפעולה של המיקרופון. מתח משתנה המחובר לגביש גורם לו להפעיל על הממברנה לחץ יחסי. בעקבות זאת הממברנה זזה ויוצרת גלי קול.

ברמקול אֶלֶקְטְרו־סְטָטִי הממברנה מחוברת בין לוחות של קבל. השדה החשמלי שבין הלוחות האלה גורם לה לנוע וליצור גלי קול.

3.4 חיישן אור

ברכיבים אלקטרו־אופטיים קיים קשר בין קרינת האור הנבלעת או נפלטת מהרכיב לתכונות החשמליות של החומר שממנו הוא עשוי. אחד השימושים של ההתקנים האלה הוא במערכות המגלות את עוצמת האור, מודדות אותו וממירות אותו לאות חשמלי.

האור הנראה הוא קרינה אלקטרו־מגנטית, בערך בתחום **אורכי הגל:**

$$0.38 \mu m < \lambda < 0.78 \mu m$$

יחידת המדידה של עוצמת האור היא **הקנְדֵּלָה [cd]**, אבל בדרך כלל נאפיין את העוצמה באמצעות ההספק החשמלי (**בָּוֶאט**) שנמדד בגלאי האור.

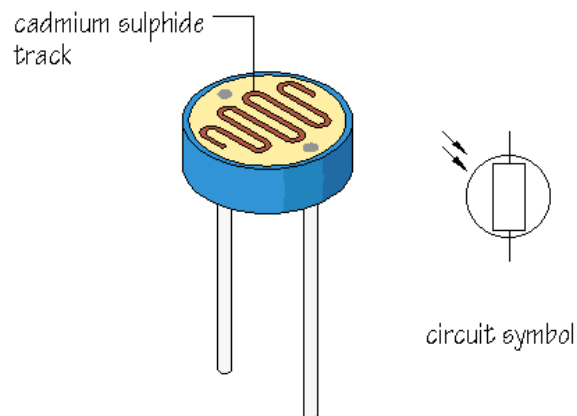
את הרכיבים האלקטרו־אופטיים אפשר לחלק לשלוש קבוצות:

א. התקנים שבגלל הפצת אורם משתנה ההתנגדות החשמלית שלהם או נוצר הפרש מתחים היוצר זרם חשמלי – כמו תא שמש, פוטו-דיודה, פוטו-טרנזיסטור, נגד רגיש לאור (LDR).

ב. התקנים הפולטים אור או משנים את העוצמה שלו כשעובר דרכם זרם חשמלי. לדוגמה: דיודה פולטת אור (LED) ודיודת לייזר.

ג. מאפְּנִים אלקטרו-אופטיים – בהתקנים האלה אפשר לשלוט על אלומת האור היוצאת (למשל: תדירות, תנופה, מופע) לפי התלות באות המבוא. בחלק הזה נכיר מתמר הממיר את אופטי לאות חשמלי באמצעות שימוש בחיישן. החיישן הזה משנה את ההתנגדות שלו לפי עוצמת האור המוקרנת עליו – נגד רגיש לאור (LDR). **נגד רגיש לאור (LDR – Light Dependent Resistor)** הוא רכיב המשנה את ההתנגדות שלו על-פי עוצמת ההפצה של האור ועל-פי אורך הגל (צבע האור). אחד החומרים שבהם משתמשים כדי ליצור נגד רגיש לאור הוא **קַדְמִיּוּם סולְפִיד cadmium (sulphide)**.

נניח שאנחנו עובדים עם LDR באור לבן, ולכן נעסוק רק בתלות של ההתנגדות בעוצמת ההפצה של האור. באיור המצורף מתואר מבנה פנימי של LDR והסימול הסכמתי שלו.



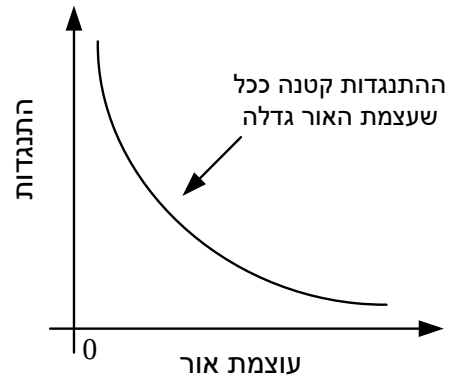
איור 40. מבנה פנימי של LDR והסימול הסכמתי שלו

התמונה לקוחה מהאתר: <http://www.doctronics.co.uk/images/vdiv1.gif>

מלימודי תורת החשמל ידוע לנו שההתנגדות (R) של LDR תלויה בהתנגדות סגולית (ρ), באורך הגל (L) ובשטח החתך (A), לפי הנוסחה הבאה:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

ההתנגדות הסגולית של החומר שממנו עשוי נגד ה-LDR משתנה לפי העוצמה של האור. ראוי לציין שהקשר בין ההתנגדות הסגולית לעוצמה של האור אינו ליניארי (ראו מסגרת), ואפשר לתאר אותו באמצעות האופיין העקרוני הבא:



איור 50. אופייני עקרוני של התנגדות התלוייה בעוצמת האור בנגד LDR

ערכים אופייניים: התנגדות ה-LDR באור יום היא כ- $1k\Omega$, ובחושך – מעל $5M\Omega$.

קשר לינארי

תלות לינארית בין שני גדלים פיזיקליים היא קשר מתמטי המתנהג לפי הפונקציה: $y = k \cdot x$.

y , x – גדלים פיזיקליים, k – פרמטר קבוע.

ובמילים אחרות: אם נכפיל למשל את x פי 5 בקשר לינארי, אז גם y יוכפל פי 5.

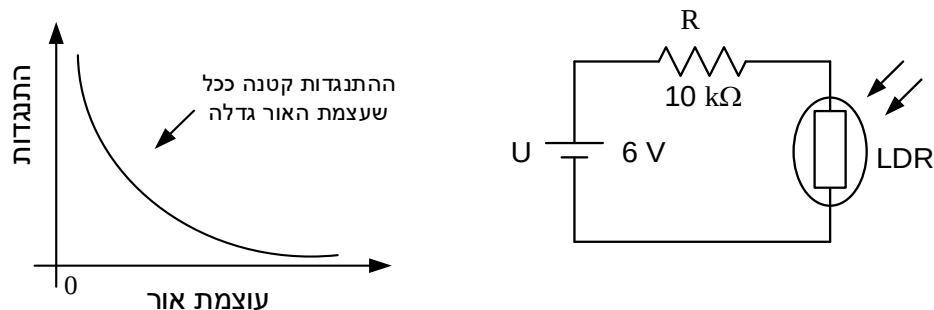
במעגל טורי עם כמה נגדים יש יחס לינארי בין מתח המקור למפל המתח על אחד הנגדים.

חוק אום הוא קשר לינארי בין עוצמת הזרם למתח החשמלי: $I = \frac{1}{R} \cdot U$.

שאלות חישוב

שאלה 1

במעגל המתואר באיור הנגד רגיש לאור (LDR). ככל שעוצמת האור גדולה יותר ההתנגדות שלו קטנה יותר.



בעוצמת אור מסוימת התקבל מתח של 4V על הדקי ה-LDR.

- א. חשבו במצב הזה את ההתנגדות ה-LDR ואת עוצמת הזרם במעגל.
- ב. האם מפל המתח על הדקי ה-LDR יגדל / יקטן / לא ישתנה, אם נגדיל את עוצמת האור המוקרנת? נמקו את תשובתכם.

פתרון

$$I = \frac{U - V_{LDR}}{R} = \frac{6 - 4}{10 \cdot 10^3} = 0.2 \text{ mA}$$

א.

$$R_{LDR} = R_T - R = \frac{U}{I} - R = \frac{6}{0.2 \cdot 10^{-3}} - 10 \cdot 10^3 = 20 \text{ k}\Omega$$

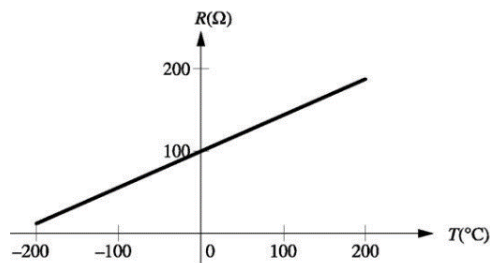
ב. עוצמת האור גדלה, התנגדות ה-LDR קטנה ← מפל המתח על הדקי ה-LDR קטן.

שאלה 2

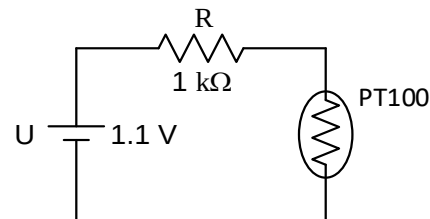
באיור א' נתון מעגל חשמלי עם חיישן טמפרטורה מסוג PT100.

באיור ב' מתואר אופיין התנגדות הטמפרטורה של החיישן.

מקדם הטמפרטורה של החיישן הוא: $0.385 \Omega/^\circ\text{C}$.



איור ב'



איור א'

א. חשבו את התנגדות החיישן בטמפרטורה של 50°C ובטמפרטורה של 100°C .

ב. חשבו את עוצמת הזרם במעגל בטמפרטורה של 50°C .

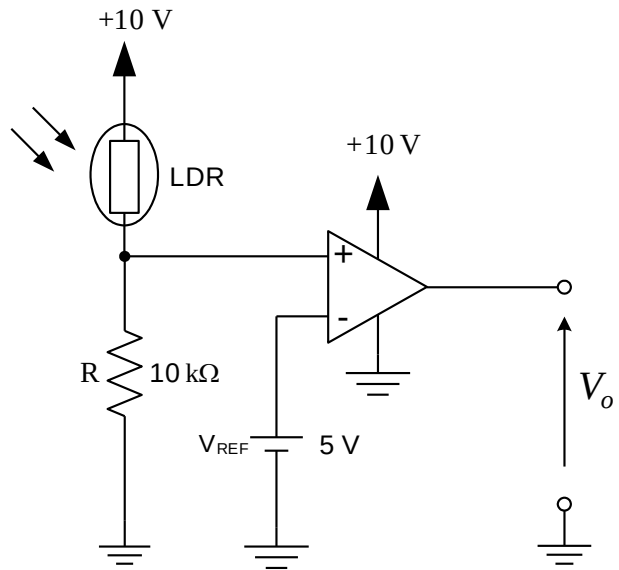
ג. חשבו את מפל המתח על החיישן בטמפרטורה של 100°C .

ד. חשבו את הטמפרטורה שבה המתח על החיישן יהיה 0.1 V .

שאלה 3

באיור מתואר מעגל שתפקידו לגלות אור באמצעות LDR ומגבר שרת. בחושך נמדדה

התנגדות של $R_{LDR} = 2 \text{ M}\Omega$, ובאור יום (תאורת החדר) נמדדה התנגדות של $R_{LDR} = 1 \text{ k}\Omega$.

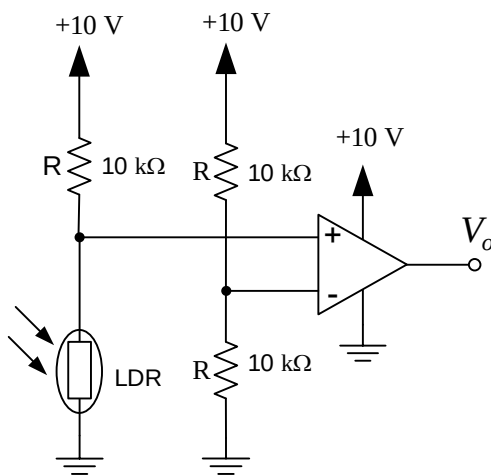


א. הסבירו את עקרון הפעולה של המעגל.

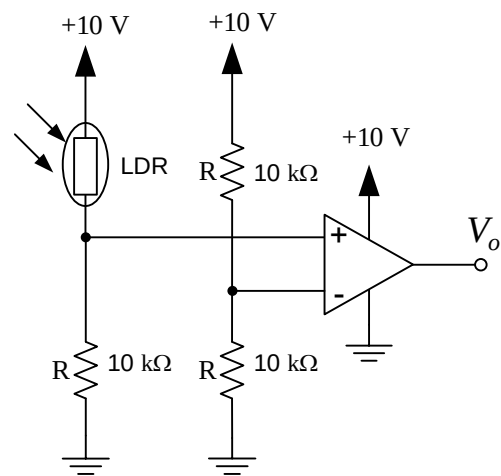
ב. חשבו את מתח המוצא של מגבר השרת בחושך ובאור.

שאלה 4

באיור נתונים שני מעגלים שתפקידם לגלות אור.



איור ב'

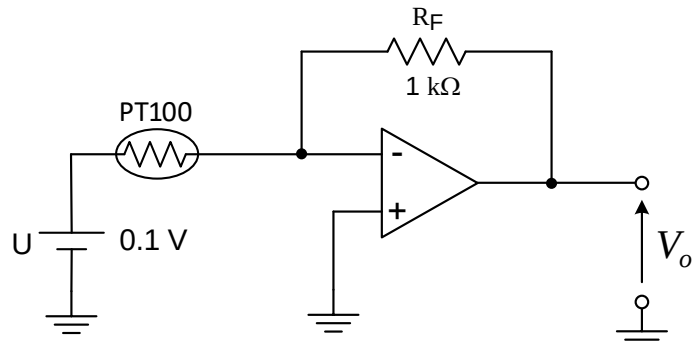


איור א'

ציינו באיזה מעגל יהיה מתח מוצא של 10V אם נגד ה-LDR נמצא בחושך. נמקו את תשובתכם.

שאלה 5

באיור מתואר מתמר הממיר טמפרטורה למתח חשמלי. אופיין חיישן הטמפרטורה (PT100) נתון באיור.



א. חשבו את מתח המוצא בטמפרטורות הבאות: 100°C , 50°C , 0°C .

ב. חשבו את הטמפרטורה שבה מתקבל מתח מוצא של -0.65V .

פתרון

א. המגבר בשאלה הוא הופך מופע, ולכן נשתמש בביטוי הזה כדי לחשב את מתח

המוצא בטמפרטורות הנתונות לנו:

$$V_o = -U \cdot \frac{R_F}{R_{PT100}}$$

$$V_o = -U \cdot \frac{R_F}{R_{(0)}} = -0.1 \cdot \frac{1000}{100} = -1\text{V} \leftarrow R_{(0)} = 100\Omega \text{ של } 0^{\circ}\text{C} \text{ נקבל:}$$

$$V_o = -U \cdot \frac{R_F}{R_{(50)}} = -0.1 \cdot \frac{1000}{119.25} = -0.8386\text{V} \leftarrow R_{(50)} = 119.25\Omega \text{ של } 50^{\circ}\text{C} \text{ נקבל:}$$

$$V_o = -U \cdot \frac{R_F}{R_{(100)}} = -0.1 \cdot \frac{1000}{138.5} = -0.722\text{V} \leftarrow R_{(100)} = 138.5\Omega \text{ של } 100^{\circ}\text{C} \text{ נקבל:}$$

$$V_o = -U \cdot \frac{R_F}{R_{PT100}}$$

ב. נעשה חישוב מהסוף להתחלה:

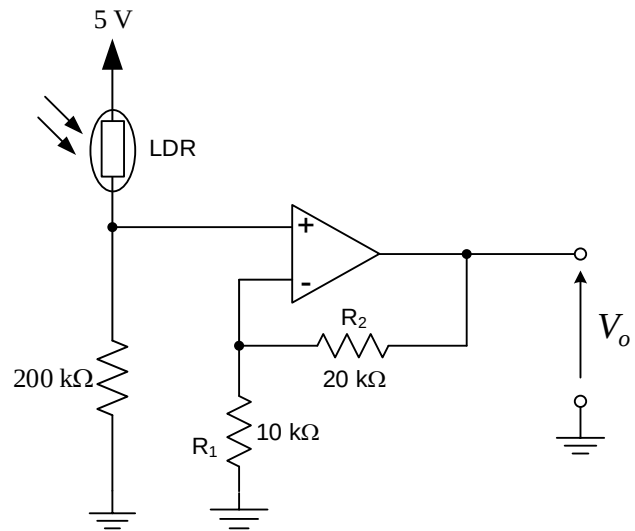
$$-0.65 = -0.1 \cdot \frac{1000}{R_{PT100}} \Rightarrow R_{PT100} = 153.8\Omega$$

$$R_{PT100} = R_{(0)} + 0.385 \cdot T$$

$$153.8 = 100 + 0.385 \cdot T \Rightarrow T = 139.9^{\circ}\text{C}$$

שאלה 6

באיור מתואר מתמר הממיר עוצמת אור למתח חשמלי. מגבר השרת הוא אידאלי.



- א. חשבו את מתח המוצא כשה-LDR נמצא בחושך ($R_{LDR} = 2M\Omega$).
- ב. חשבו את מתח המוצא כשמאירים על ה-LDR בפנס ($R_{LDR} = 1k\Omega$).
- ג. חשבו את התנגדות ה-LDR אם נמדד מתח של 6V.

פרק 4 - משווה בחוג פתוח

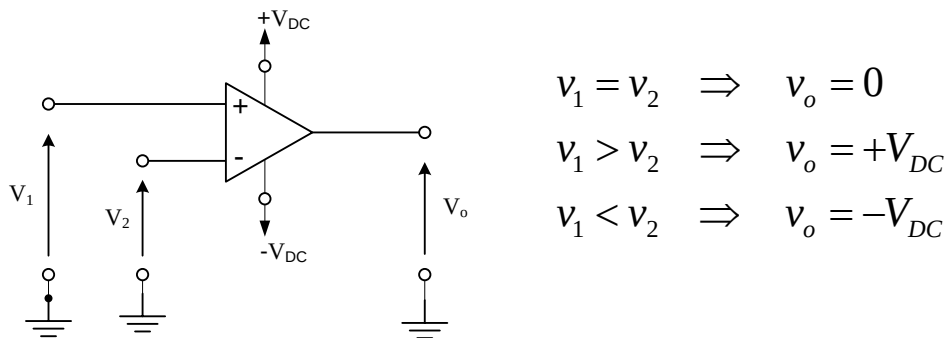
יעדים לימודיים

בסוף יחידת הלימוד התלמיד יהיה מסוגל לבצע את הפעולות הבאות:

- א. זיהוי מתח הסף של משווה בחוג פתוח.
- ב. ציון מתחי הרוויה של משווה בחוג פתוח אידאלי לפי מתחי ההזנה.
- ג. סרטוט אופיין מעבר של מעגל נתון: מעגל שכניסת אות המבוא שלו בהדק (+) ומעגל שכניסת אות המבוא שלו בהדק (-).
- ד. סרטוט אות המוצא של משווה בחוג פתוח על-פי אות המבוא ומתח הייחוס.
- ה. חישוב מתח הייחוס של משווה בחוג פתוח שיש לו מקור מתח ושני נגדים (או פוטנציומטר – נגד משתנה).
- ו. עריכת כמה חישובים במעגלים עם משווה בחוג פתוח וחיישן כלשהו.
- ז. זיהוי של משווה חלון.
- ח. עריכת כמה חישובים במשווה חלון.
- ט. בניית מעגל משווה באמצעות תוכנת הדמיה וחיבור מכשירים אליו, כמו מחולל אותות ומשקף תנודות.

המשווה הבסיסי

מגבר שרת בחוג פתוח יכול לשמש בתור משווה (comparator) בין האותות המתקבלים בשני המבואות שלו. משווה הוא מעגל אלקטרוני שתפקידו להשוות בין שני מתחים באזור הכניסות, למשל V_1 , V_2 . תוצאת ההשוואה היא אות ספרתי, שהערך שלו מתאים לרמה הלוגית '1' אם $V_1 > V_2$ ולרמה הלוגית '0' אם $V_1 < V_2$. המתחים המייצגים במוצא את הרמות הלוגיות תלויים במתחי ההזנה של המשווה. כזכור אחת מהתכונות של מגבר שרת היא הגבר אין-סופי, ותכונה נוספת היא הגבר הפרשי. לכן בעבור כל מתח הפרשי (קטן ככל שיהיה) המוכפל בהגבר אין-סופי – מתח המוצא המתקבל הוא אין-סופי. כמו בכל מערכת אלקטרונית או פיזיקלית מתחי ההזנה של מגבר שרת מגבילים אותו, כלומר הוא נכנס לרוויה. על כן כשהמתח ההפרשי בכניסות הוא חיובי מתקבל במוצא מתח השווה בקירוב למתח של מקור ההזנה החיובי (רוויה חיובית), וכשהמתח ההפרשי שלילי מתקבל במוצא מתח השווה בקירוב למתח של מקור ההזנה השלילי (רוויה שלילית). נתאר את זה באמצעות איור 4.1 וברישום מתמטי:



איור 4.1 משווה בחוג פתוח

לדוגמה:

נתון מגבר שרת המשמש בתור משווה. המגבר מחובר למתחי הזנה של $\pm 12V$. בכניסות של

המשווה מופיעים המתחים האלה: $v_1 = 0.3V$, $v_2 = 0.2V$.

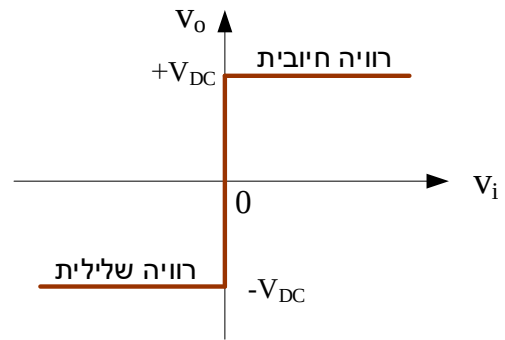
מתח המוצא המתקבל במקרה הזה הוא: $v_o = +V_{DC} = 12V$.

הסיבה: המתח בהדק הלא מהפך של מגבר השרת גדול יותר מהמתח בהדק המהפך.

אופיין תמסורת (אופיין מעבר) של משווה בחוג פתוח

במערכות אלקטרוניות רבות, ובמגברים בפרט, נהוג לתאר את הקשר בין אות המבוא לאות המוצא באמצעות גרף. גרף כזה נקרא **אופיין התמסורת** (characteristic transfer) או אופיין המעבר של המשווה.

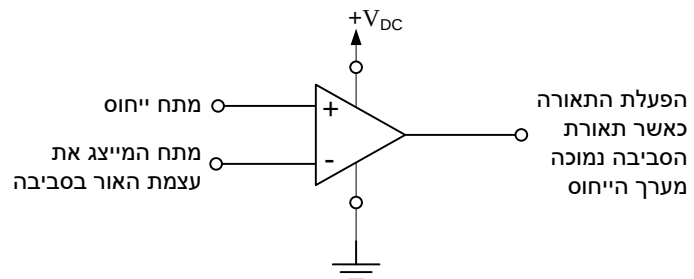
על-פי הכתוב בנוסחאות שלעיל אפשר לתאר את האופיין בצורה הבאה:



איור 4.2 אופיין תמסורת – משווה בחוג פתוח

שימושים:

קיימות מערכות רבות המשתמשות במשווה. נציג כאן דוגמה אחת מחיי היום-יום, תאורת הרחוב למשל. בתאורת הרחוב יש משווה הבודק את עוצמת האור שבסביבה. אם היא נמוכה מעוצמת האור (עוצמת הייחוס) שהוגדרה, המתג של התאורה מופעל. אפשר להציג את זה באמצעות התרשים הבא:

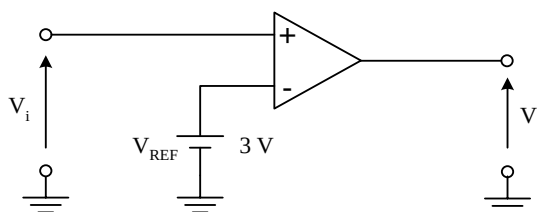


איור 10. העיקרון של פעולת תאורת הלילה באמצעות משווה

תרגיל דוגמה מספר 1

במעגל שבאיור יש מגבר שרת אידאלי. מתחי הרוויה של מגבר השרת הם:

$$V_{OL} = 0V, V_{OH} = +10V$$

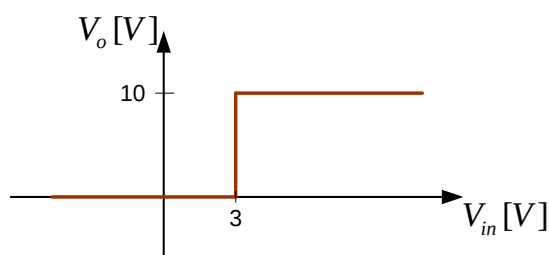


איור 20. איור א' לתרגיל דוגמה מספר 1

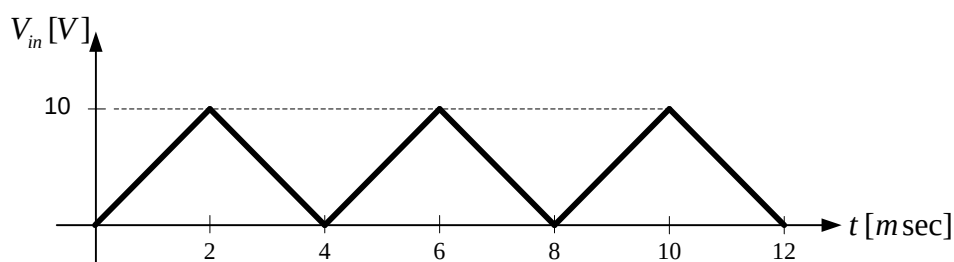
א. סרטטו את אופיין המעבר $V_o = f(V_i)$ של המעגל הנתון.

פתרון

מתחי הרוויה של המגבר נתונים בגוף השאלה: $V_{OL} = 0V, V_{OH} = +10V$, ומתח הסף הוא $3V$ – מתחתיו המגבר נמצא ברוויה שלילית ומעליו הוא יהיה ברוויה חיובית. לכן צורת הגרף היא:



למבוא של המעגל מספקים גל משולש, כמו שמתואר באיור הבא:

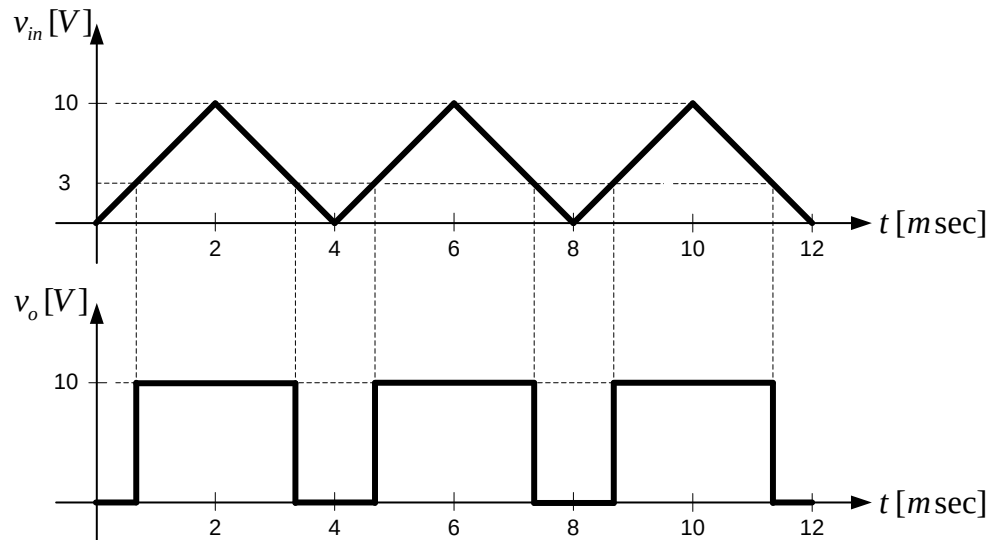


איור 30. איור ב' לתרגיל דוגמה מספר 1

סרטטו מתחת לאיור גרף המתאר את מתח המוצא המתאים (V_o) .

פתרון

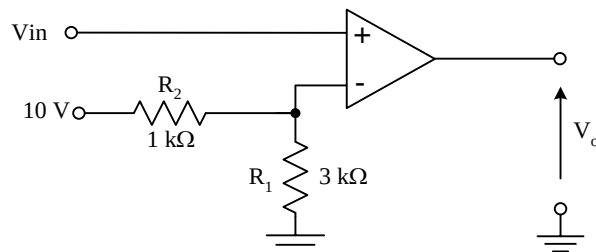
נסמן קו אופקי ליד המספר 3 בציר ה-y, ובכל נקודת חיתוך עם הגרף נמתח קו אנכי אל ציר ה-x (מתח המוצא בתלות בזמן). במקומות שבהם מתח הכניסה נמוך מ-3V – מתח המוצא הוא אפס, ובמקומות שבהם מתח הכניסה גבוה מ-3V – מתח המוצא הוא 10V. התוצאה הסופית מופיעה באיור הבא:



תרגיל דוגמה מספר 2

במעגל המתואר באיור יש מגבר שרת אידאלי. מתחי הרוויה של מגבר השרת הם:

$$V_{OL} = 0V, V_{OH} = +10V$$



איור 40. איור א' לתרגיל דוגמה מספר 2

א. חשבו את מתח הייחוס.

פתרון

במעגל הזה נתון מקור מתח ושני נגדים (R_1, R_2), שהתפקיד שלהם הוא לקבוע את מתח הייחוס. מתח הייחוס הוא המתח על הנגד R_1 . נשתמש בתכונת מגבר השרת: התנגדות הכניסה היא אינסופית, ולכן זרם הכניסה למגבר הוא אפס.

על-פי זה אפשר להסיק שהנגדים (R_1, R_2) מחוברים בטור, ולפיכך נרשום:

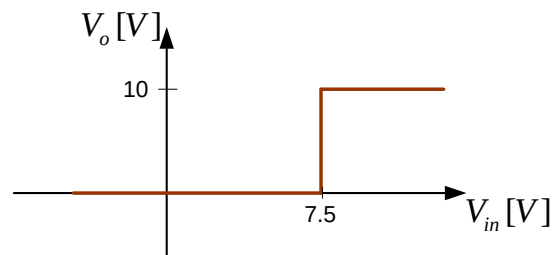
$$V_{R1} = 10 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{3k}{3k + 1k} = 7.5V \quad (\text{כלל מחלק המתח})$$

ב. סרטטו את אופיין המעבר $V_o = f(V_{in})$ של המעגל הנתון.

פתרון

במעגל הזה קיבלנו שמתח הייחוס הוא $7.5V$ ומתחי הרוויה הנתונים הם:

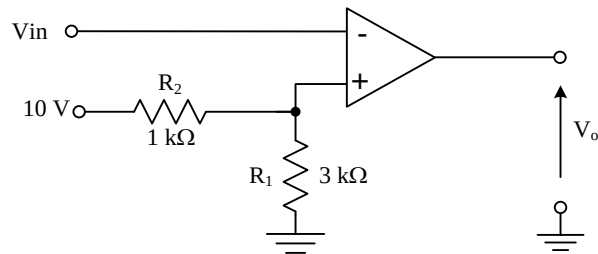
$V_{OL} = 0V$, $V_{OH} = +10V$. לכן נקבל:



איור 50. איור ב' לתרגיל דוגמה מספר 2

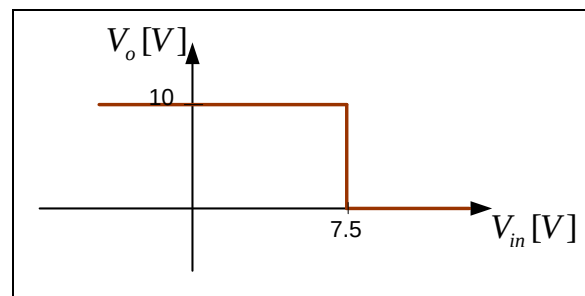
תרגיל 4.1

סרטנו את אופיין המעבר $V_o = f(V_{in})$ של המשווה הנתון בדוגמה מספר 2, כשמחליפים את ההדק (+) עם ההדק (-) בצורה הבאה:



איור 60. איור לתרגיל 4.1

תשובה:



התכונות של משווה אידאלי

התכונות של משווה אידאלי דומות לתכונות של מגבר שרת אידאלי הפועל בחוג פתוח. בעזרת סקירה של התכונות האלה נבין את ההבדלים בין המשווה למגבר.

- א. אופיין מעבר –** נגדיר את מתח המבוא (V_{in}) בתור הפרש בין המתחים של שני ההדקים: $V_1 - V_2$. אופיין המעבר של משווה אידאלי, המתאר את התלות בין מתח המוצא למתח המבוא, יראה כמו שמתואר באיור 4.3.
- ב. זמן תגובה –** הזמן החולף מהרגע שבו אות המבוא של המשווה הופך מחיובי לשלילי או להפך ועד לרגע שבו אות המוצא של המשווה מחליף מצב. במשווה אידאלי זמן התגובה הוא אפסי.
- ג. התנגדות מבוא –** אין סופית.
- ד. התנגדות מוצא –** אפסית.

השימושים של משווה בסיסי

א. ריבוע של צורת גל באמצעות משווה

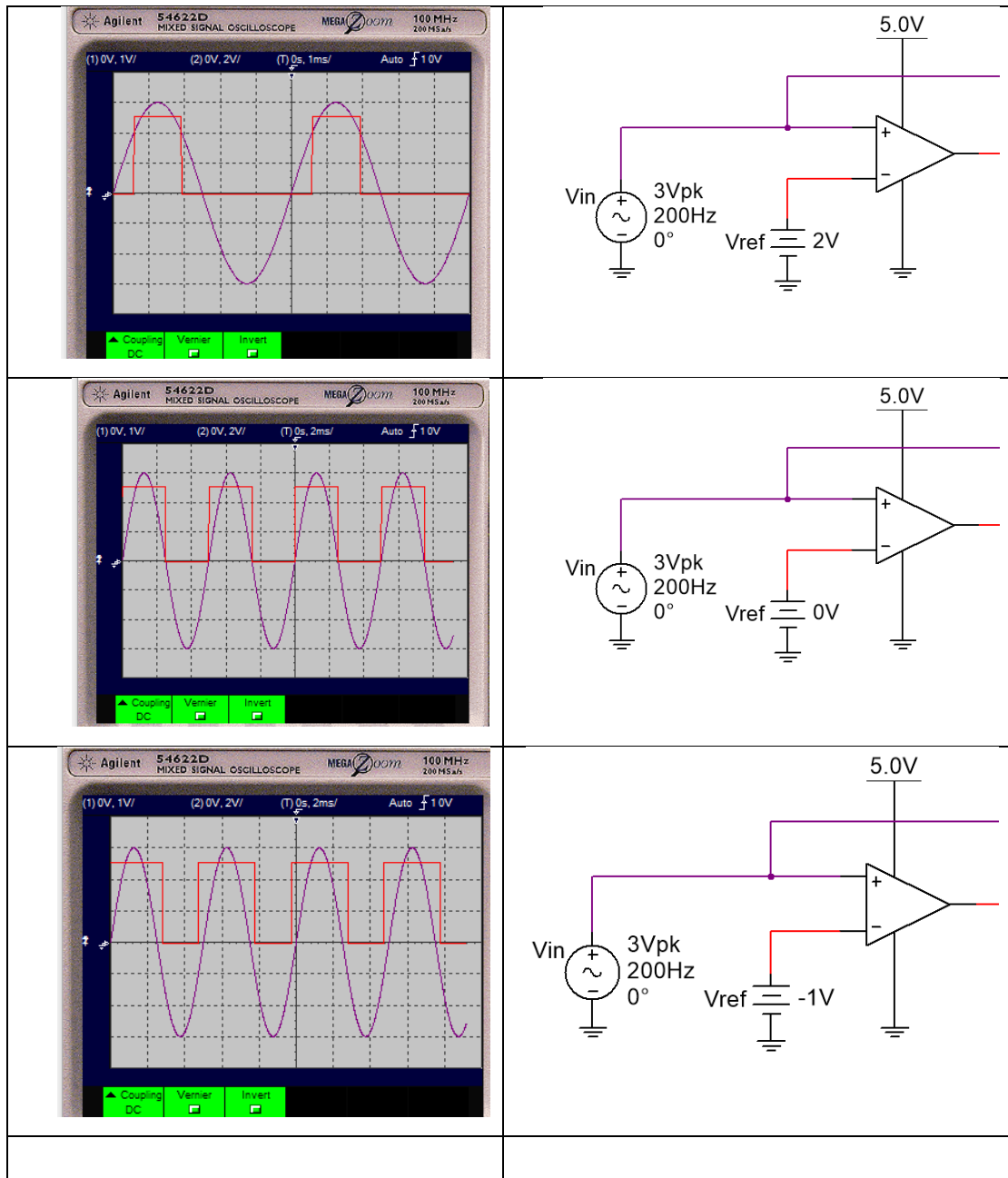
באיורים הבאים נראה איך אפשר לייצר גל ריבועי באמצעות משווה, כשאות המבוא הוא אות סינוסואידלי.

אם נשנה את מתח הייחוס, נשנה גם את מחזור הפעולה (duty cycle) של האות הריבועי.
 עיון באיורים האלה ימחיש לנו את הריבוע של אות סינוסואידלי באמצעות משוואה במחזורי פעולה למיניהם:

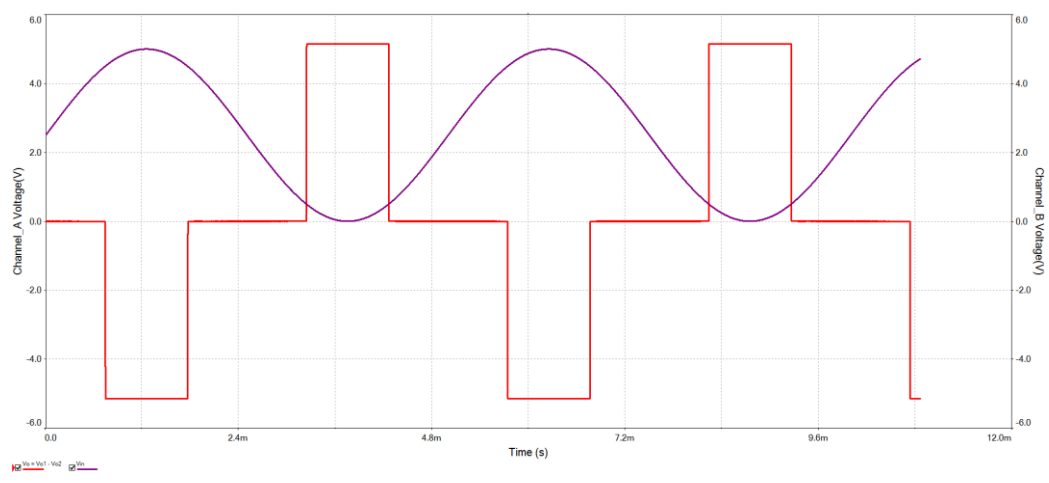
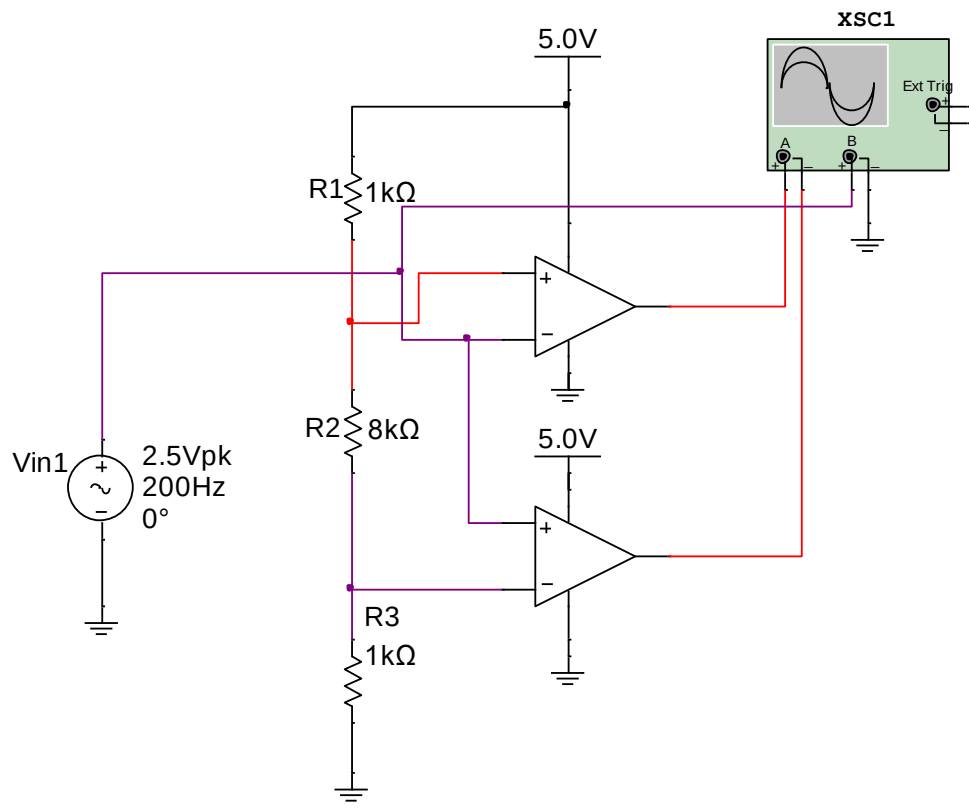
כאשר $V_{ref} > 0V$ $\leftarrow D.C\% < 50\%$

כאשר $V_{ref} = 0V$ $\leftarrow D.C\% = 50\%$

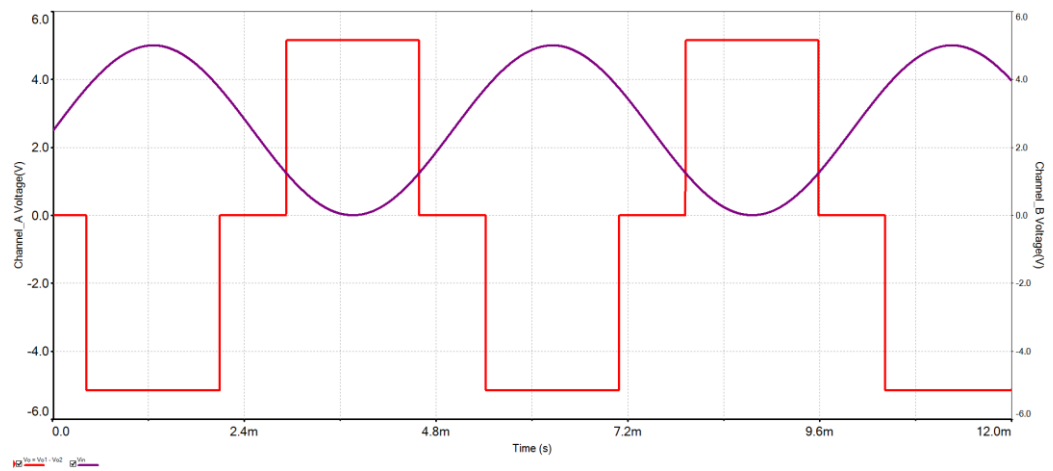
כאשר $V_{ref} < 0V$ $\leftarrow D.C\% > 50\%$



ב. גלאי חלון – נושא שאינו בתוכנית הלימודים של התיכון.



בעבור $R2 = 2k\Omega$



תכננו את מחזור הפעולה באופן שבו זמן הערך השלילי יהיה קטן יותר מזמן הערך החיובי.

בחנו את עצמכם – משווה בחוג פתוח

לפניכם כמה שאלות, השיבו עליהם ובדקו את ההבנה שלכם. אם השבתם תשובה לא נכונה על שאלה מסוימת, מומלץ לחזור לחלק העיוני ולקרוא אותו שוב.

1. השלימו את המשפט:

מתח המוצא המרבי במוצא של משווה בחוג פתוח הוא _____ (תלוי במתחי הכניסה, 20 וולט, אפס, מתח רוויה חיובי, מתח ההזנה הנמוך).

2. השלימו את המשפט:

התכונות המאפשרות למגבר שרת בחוג פתוח לשמש בתור משווה הן: הוא מגבר הפרשי בעל _____ (התנגדות כניסה אין־סופית, התנגדות מוצא אפסית, הגבר אין־סופי).

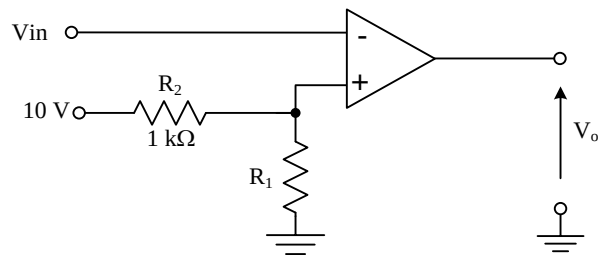
3. השלימו את המשפט:

כדי לקבל רוויה שלילית במוצא של משווה כשמתח הייחוס מחובר למבוא החיובי (הכניסה הלא מהפכת), המתח במבוא השלילי (הכניסה המהפכת) צריך להיות _____ (גדול מ-, קטן מ-, שווה ל-) מתח הייחוס.

שאלות חישוב בסיסיות

לפניכם שתי שאלות חישוב בנושא של משווה בחוג פתוח.

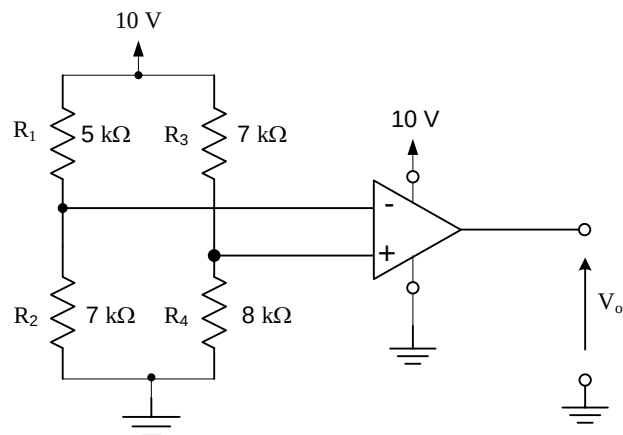
4. בעבור המעגל שבאיור הזה:



נדרש מתח ייחוס של 8V. לכן הערך של הנגד R1 צריך להיות _____ אום.

עזרה: ראו את הפתרון של תרגיל דוגמה מספר 2.

5. נתון המעגל הבא:



המתח במוצא של המשווה הוא _____ V.

קודם כול צריך לחשב את המתח בהדק (+) ובהדק (-). הנגדים R1 ו-R2 מחוברים בטור, והנגדים R3 ו-R4 גם כן מחוברים בטור.

רמז

$$v^- = 10 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad v^+ = 10 \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

$$v^- = 10 \cdot \frac{7k}{5k + 7k} \quad v^+ = 10 \cdot \frac{8k}{7k + 8k}$$

$$v^- = 5.833V \quad v^+ = 5.333V$$

$$v^- > v^+ \Rightarrow V_o = 0V$$

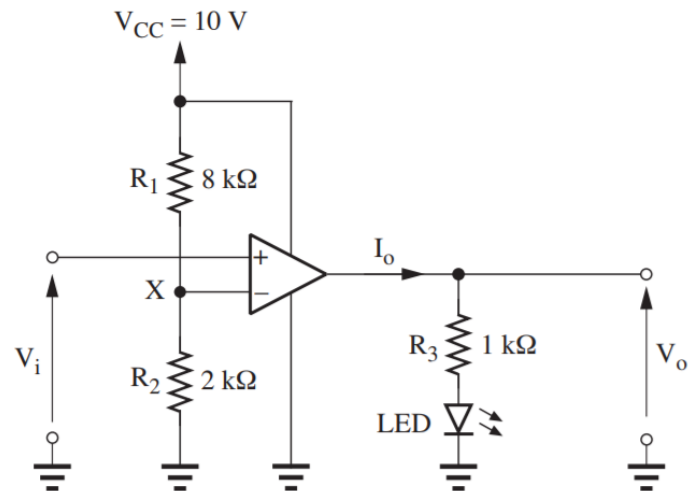
פתרון מלא

שאלות חישוב – תרגול עצמי

אוסף השאלות הבא דומה בסגנון שלו לשאלות בחינות הבגרות, בהצלחה!

שאלה 4.1

באיור נתון מעגל חשמלי. מגבר השרת שבמעגל הוא אידאלי.



א. חשבו את המתח בנקודה X.

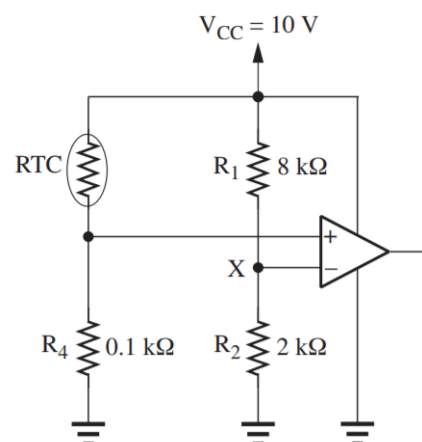
ב. סרטטו את אופיין המעבר $V_o = f(V_i)$ של המעגל.

ג. מתח העבודה של ה-LED הוא $V_{LED} = 1.8V$, חשבו את זרם המוצא I_o .

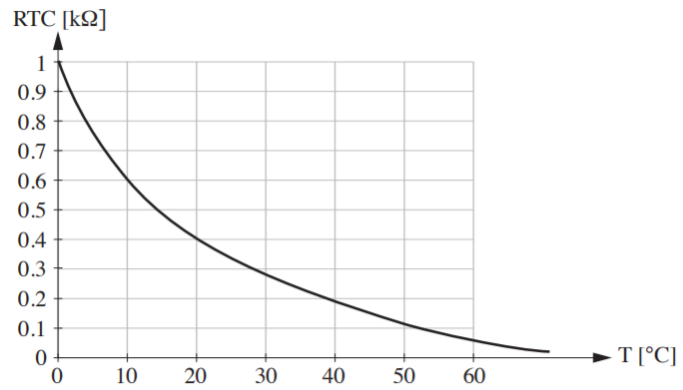
ד. נדרש מתח ייחוס של 4V, הציעו שני שינויים אפשריים כדי להשלים את המטלה הזאת.

שאלה 4.2

באיור א' נתון מעגל חשמלי. מגבר השרת שבמעגל הוא אידאלי. חיישן הטמפרטורה (RTC) שבמעגל הוא נגד תלוי טמפרטורה. באיור ב' מתואר האופיין של החיישן בתור פונקציה של ההתנגדות על-פי טמפרטורת הסביבה.



איור א' – המעגל החשמלי



איור ב' – אופיין RTC

א. חשבו את מתח המוצא בטמפרטורות הבאות:

1. $T_1 = 10^\circ\text{C}$

2. $T_2 = 40^\circ\text{C}$

ב. מצאו באיזו טמפרטורה מתח המוצא מחליף את המצב שלו (מגבוה לנמוך או מנמוך לגבוה).

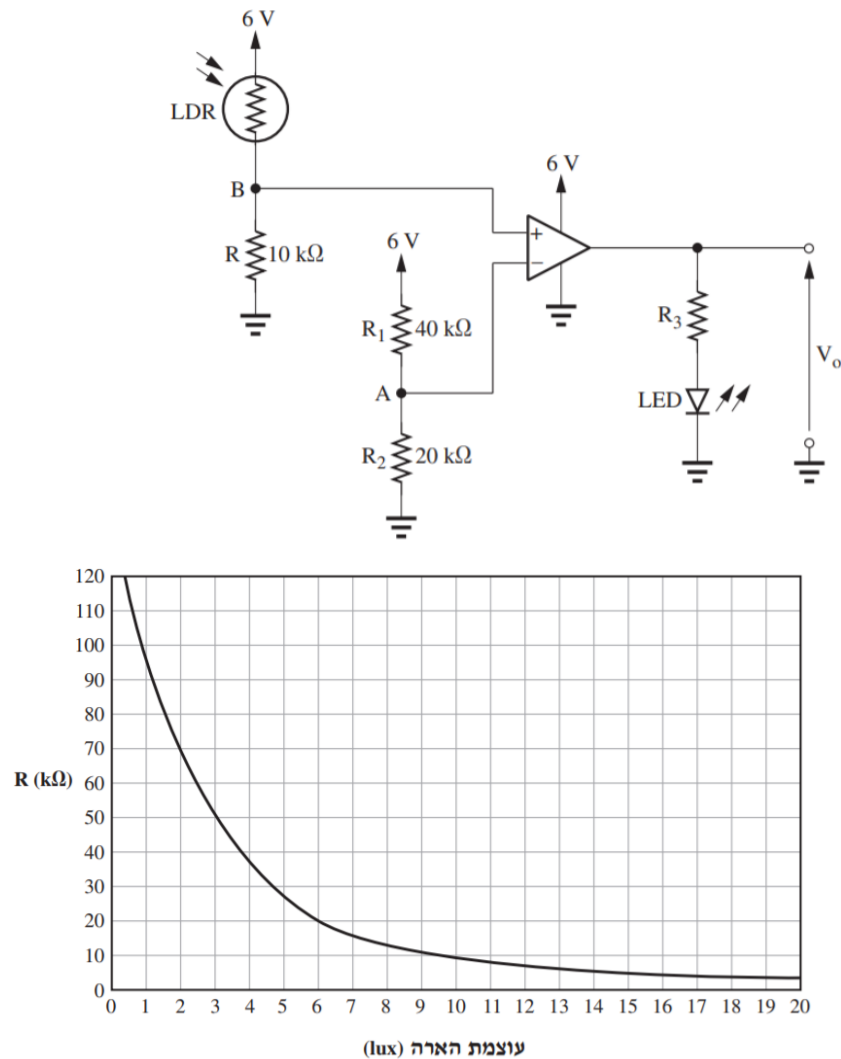
ג. השלימו את המשפט: ככל שהטמפרטורה עולה ההתנגדות של נגד ה-RTC _____ (קטנה, גדלה, נשארת ללא שינוי). לכן המתח בכניסה של מגבר השרת $V^{(+)}$ _____ (קטן, גדל, נשאר ללא שינוי).

ד. הציעו שתי פעולות שצריך לעשות כדי לשנות את מתח המוצא מ-V0 ל-V10 או להפך בטמפרטורה של 40°C .

שאלה 4.3

באיור א' נתון מעגל חשמלי עם נגד רגיש לאור (LDR) ונורית חיווי מסוג LED, המאפשרת לנו לדעת את העוצמה של הפצת האור עליו. נתון: $V_{LED} = 1.5V$. מגבר השרת שבמעגל הוא אידיאלי.

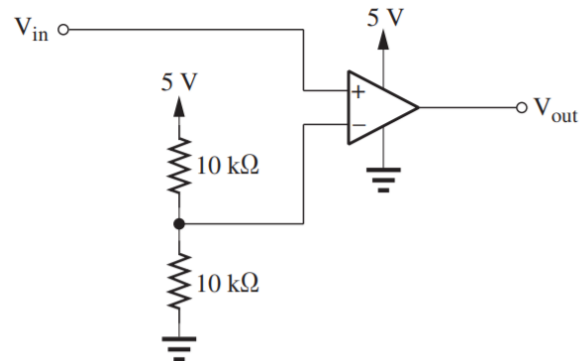
באיור ב' מתואר גרף של פונקציה, המראה את השתנות ההתנגדות של נגד ה-LDR לפי עוצמת האור המופץ עליו.



- א. איזה תחום של ערכי מתח יש בנקודה B כשנורית ה-LED פועלת?
- ב. מצאו את תחום הערכים של עוצמת הפצת האור (ביחידות lux) שנורית ה-LED פועלת בו.
- ג. האם נורית ה-LED פועלת כשעוצמת הפצת האור על נגד ה-LDR היא נמוכה או גבוהה? נמקו את התשובה שלכם.
- ד. הציעו שינוי במעגל, שבעקבותיו נורית ה-LED תפעל במצב הפוך לזה שבסעיף ג' (יש יותר מפתרון אחד – הציעו שני פתרונות שונים).

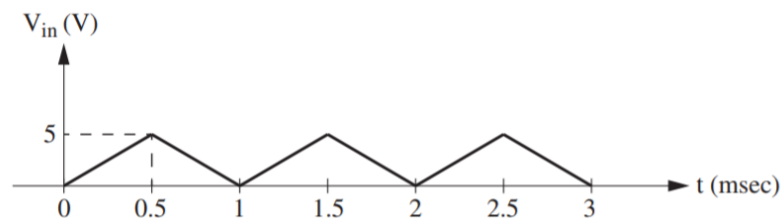
שאלה 4.4

את השאלה הזאת צריך לפתור באמצעות תוכנת הדמיה.
באיור א' נתון מעגל חשמלי. מגבר השרת שבמעגל הוא אידאלי.



איור א' – מעגל חשמלי

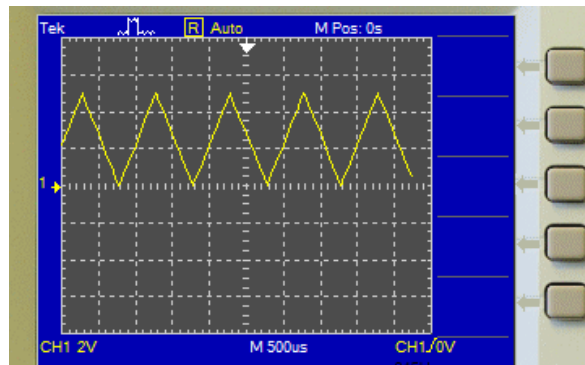
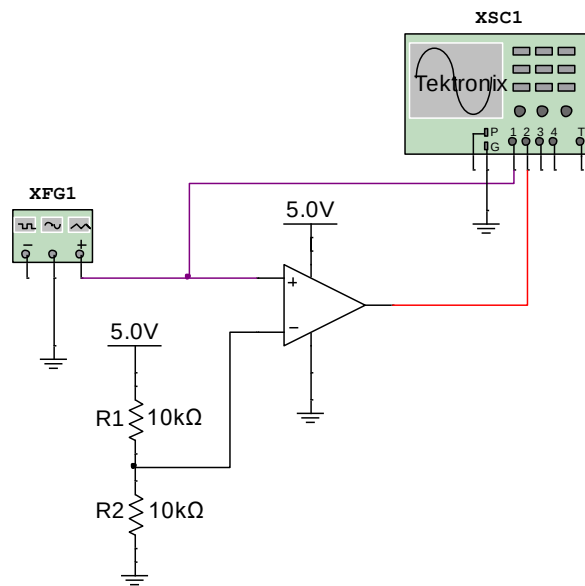
למבוא המעגל מסופק אות משולש מחזורי, כמו שמתואר באיור ב':



איור ב' – אות מבוא משולש

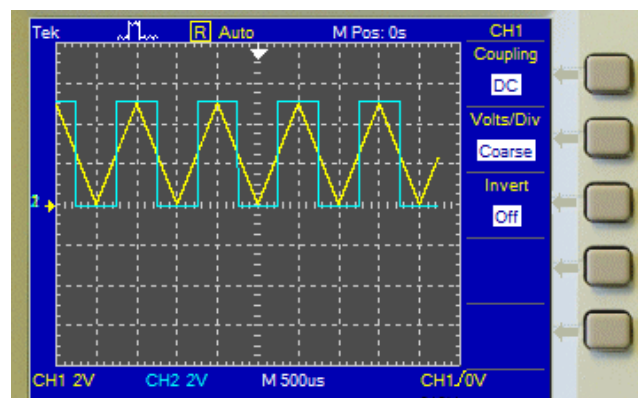
- א. כווננו את מחולל האותות עד שתקבלו את האות הנתון באיור ב'. הציגו אותו לאחר מכן על-גבי משקף התנודות.
- ב. חברו את אות המבוא למעגל המתואר באיור והציגו את אות המוצא שקיבלתם. ציינו את הערכים של בורר ה-Volt/Div ושל בורר ה-Time/Div במשקף התנודות.

פתרון 4.4 – באמצעות תוכנת ההדמיה MULTISIM



Time/Div = 0.5msec/Div

Volt/Div = 2V/Div : **אות המבוא:**



אות המבוא ואות המוצא לפי הצבעים

קישורים למושגים

חוג פתוח – כשאין קשר חיצוני בין המוצא לכניסה.

חוג סגור – כשיש קשר חיצוני בין המוצא לכניסה. למגברי שרת המשמשים לצורכי הגברה מחובר נגד.

מתחי רוויה (saturation voltages)

כדי לאפשר פעולה תקינה של מגבר צריך לחבר אותו למתחי הזנה (מתח ישר) – בדרך כלל האחד יהיה חיובי והשני שלילי. מתחי ההזנה מגבילים את מתח המוצא של המגבר. כלומר אם מתחי ההזנה הם $\pm V_{DC}$, אז מתח המוצא לא יכול להיות גדול יותר מ- $+V_{DC}$ או קטן יותר מ- $-V_{DC}$.

בדרך כלל הערך המרבי של מתח המוצא במעגלים מעשיים קטן ב-1V (בערך) מהמתח החיובי $+V_{DC}$, והערך המזערי שלו גדול ב-1V (בערך) מהמתח השלילי $-V_{DC}$. הערכים האלה נקראים מתחי הרוויה של המגבר.

פרק 5 - דיודות

5.1 יעדים לימודיים

בסוף יחידת הלימוד התלמיד יהיה מסוגל לבצע את הפעולות הבאות:

- א. סרטוט הסימול של הדיודה, ציון ההדקים שלה וציון כיוון ההולכה.
- ב. רישום מצבי הפעולה של דיודה אידאלית.
- ג. סרטוט אופיין זרם-מתח של דיודה אידאלית.
- ד. סרטוט אופיין זרם-מתח של דיודה מעשית.
- ה. סרטוט מודל מקורב של דיודה – מודל מפל מתח קבוע.
- ו. חישוב נקודת העבודה של הדיודה במעגל טורי שיש בו מקור מתח, נגד ודיודה – לפי מודל מפל מתח קבוע.
- ז. שימושי דיודה:
 - מיישר חד-דרכי – סרטוט מעגל וצורות גלים בעבור דיודה אידאלית ולפי מודל מפל מתח קבוע.
 - מיישר דו-דרכי (גשר דיודות) – סרטוט מעגל וצורות גלים בעבור דיודה אידאלית ולפי מודל מפל מתח קבוע.
 - ח. חישוב נקודת העבודה של דפ"א (LED) במעגל טורי שיש בו מקור מתח, נגד ודיודה.
 - ט. תכנון הערכים של מעגל בסיסי הנחוץ לשם הפעלה תקינה של דפ"א (LED).

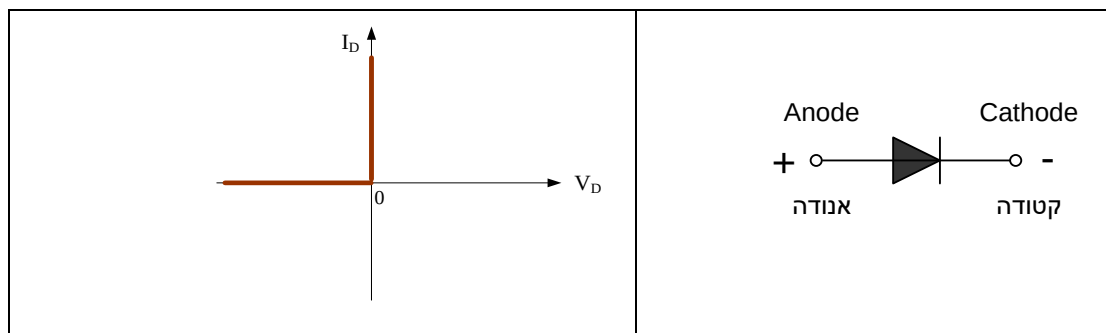
5.2 מבוא

בפרק שלפנינו נכיר את הדיודה (diode). הדיודה היא רכיב חשמלי חד-כיווני (unidirectional) בעל שני הדקים – כלומר יש בה עדיפות להולכת זרם בכיוון אחד בלבד. בהמשך הפרק נראה איך משתמשים בתכונה הזאת במעגלים חשמליים. בחלק הראשון של הפרק נכיר את המאפיינים החשמליים של הדיודה, כלומר את הקשר בין המתח שעל-פני הדיודה לזרם הזורם דרכה. אחרי כן נדון בצורת השילוב של הדיודה במעגלים חשמליים ונכיר כמה יישומים בסיסיים שלה. *דיודת זנר תופיע בפרק 7 – ספקים ומייצבי מתח.

5.3 דיודה אידאלית

דיודה אידאלית היא רכיב חשמלי המשמש בתור מוליך חד-כיווני. בכיוון האחד מוליך מושלם (כלומר קצר) ונתק בכיוון ההפוך.

הסימול של הדיודה במעגל חשמלי ואופיין זרם המתח של דיודה אידאלית נתונים לפניהם באיור 5.1 א' ובאיור 5.1 ב'.



איור 5.1 ב' – אופיין זרם-מתח בדיודה אידאלית

איור 5.1 א' – סימול של דיודה

שמות ההדקים של הדיודה הם: **אַנוֹדָה (anode)** – הדק חיובי, **קַתוֹדָה (cathode)** – הדק שלילי. כיוון ההולכה הוא כמו כיוון החץ, מן האנודה אל הקתודה.

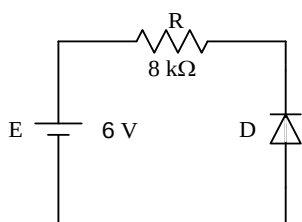
הסבר האופיין:

מִמְתָּח קִדְמִי (כשהמתח חיובי) – הדיודה במצב של הולכה (**conduction**). היא מוליכה זרם ואין עליה מפל מתח, כלומר $V_D = 0V$.

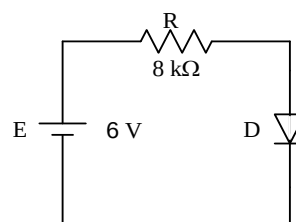
מִמְתָּח אַחֲרִי (כשהמתח שלילי) – הדיודה במצב של קטעון (**cut-off**). בעצם נוצר כאן נְתָק, כלומר $I_D = 0A$, ולא משנה מהו מפל המתח על הדיודה.

5.1 דוגמה

במעגלים הבאים הדיודות אידאליות, חשבו את עוצמת הזרם בכל אחד מהם.



מעגל ב'



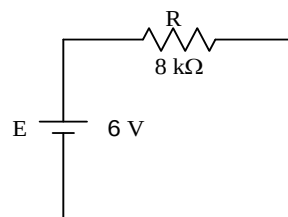
מעגל א'

פתרון

במעגל א' הדיודה בהולכה, ולכן נסרטט במקומה קו קצר. מעגל התמורה ייראה כמו באיור.

עוצמת הזרם במעגל תהיה:

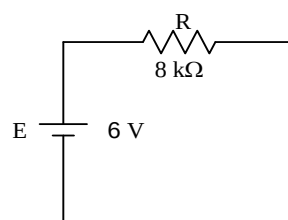
$$I = \frac{E}{R} = \frac{6}{8 \cdot 10^3} = 0.75 \text{ mA}$$



במעגל ב' הדיודה בקיטעון, ולכן נסמן במקומה נתק במעגל. מעגל התמורה ייראה כמו באיור.

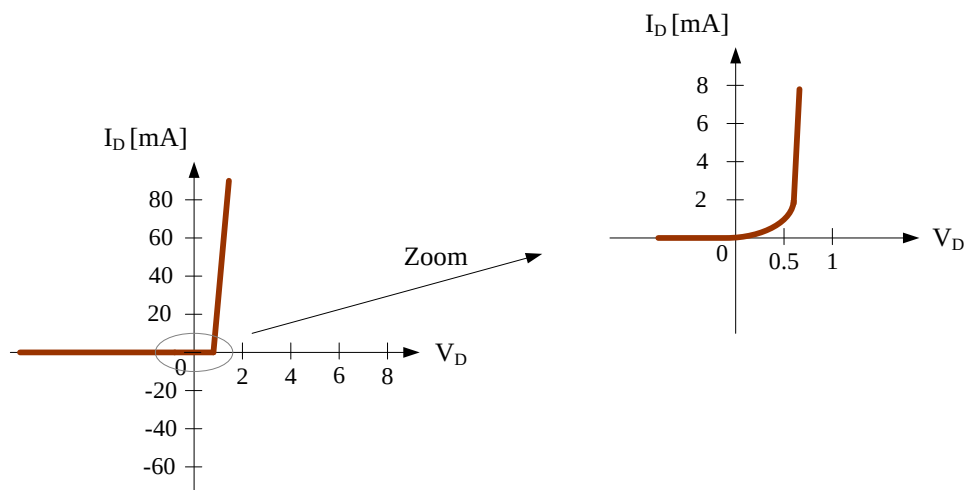
במצב הזה אין זרם במעגל, ולכן:

$$I = 0 \text{ A}$$



5.4 דיודה מעשית

האופיין של הדיודה המעשית שונה מזה של הדיודה האידיאלית, והוא נראה כך:



הסבר האופיין:

בעבור זרמים חיוביים המתח על-פני הדיודה המעשית גדול מאפס, וזה מה שמבדיל אותה מהדיודה האידאלית. לפי האופיינים כשהדיודה נמצאת ב־מִמְתָּח קִדְמִי הנמוך מ-0.5V בערך, הזרם בה הוא אפסי; ומעל למתח של בערך 0.6V אפשר לראות שיש עלייה תלולה בזרם. כדי לפשט את החישוב נהוג לקבוע, שהערך של המִמְתָּח הקִדְמִי בעבור דיודת סיליקון הוא כ-0.7V. כלומר נסתכל עליה כמו על מפל מתח קבוע. ב־מִמְתָּח אַחֲרֵי הדיודה אינה מבודד מושלם, ולכן הזרם לא מאופס לגמרי. הזרם הזה נקרא זרם זליגה, והוא נמדד בסדר גודל של **ננו-אמפרים** ($1nA = 10^{-9} A = 10^{-6} mA = 10^{-3} \mu A$).

5.5 מודלים של דיודה

בסעיף הקודם ראינו ש־המִמְתָּח הקִדְמִי בדיודה מעשית הוא בערך 0.7V. לפי ההערכה הזאת אפשר לחשב את הזרם ואת המתחים במעגלים פשוטים הכוללים דיודות, כמו זה שבאיור 3.3.

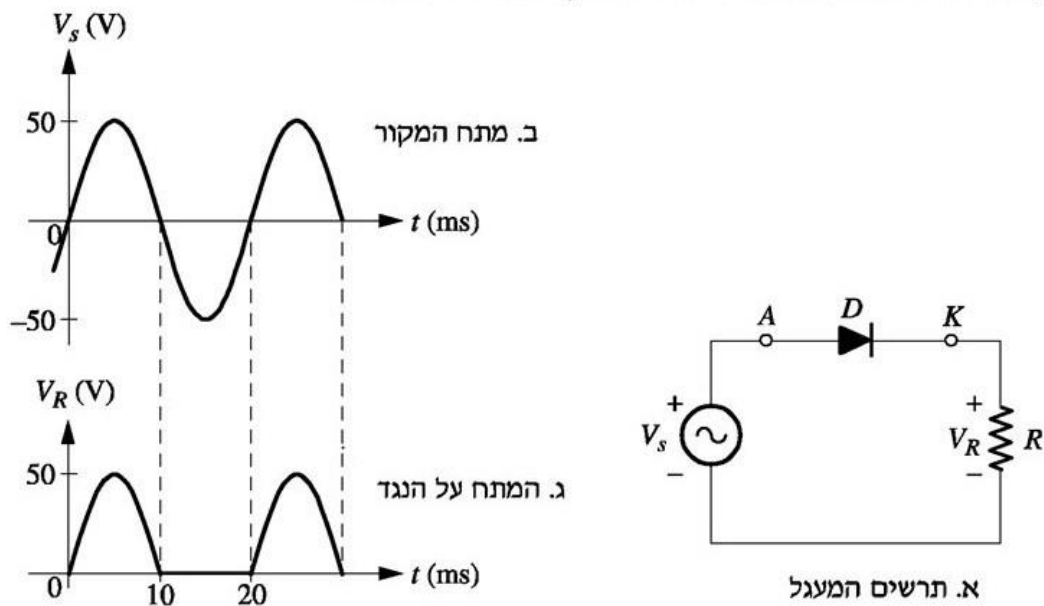
אולם מובן שלא כל המעגלים הם פשוטים, לא כולם יש רק דיודה ונגד. במקרים כאלה הערך המקורב של 0.7V לא יספיק, ונצטרך לעשות חישוב מדויק יותר. לעומת זאת יש מקרים שבהם אפשר להסתפק בהערכה מדויקת פחות ולהסתכל על הדיודה כמו על קֶצֶר. לכל מקרה כזה מתאים **מודל (model)** מסוים של דיודה, כפי שנראה בהמשך. מודל הוא מעגל חשמלי, שההתנהגות שלו דומה מאוד להתנהגות של הרכיב שהוא מתאר.

מודל הדיודה האידאלית

במודל של הדיודה האידאלית נסתכל על דיודה ב־מִמְתָּח קִדְמִי כמו על קֶצֶר, ועל דיודה ב־מִמְתָּח אַחֲרֵי – כמו על נתק (מִתְּג חד-כיווני). זה המודל הפשוט ביותר, ולמעשה כבר הכרנו אותו בסעיף 3.2. איור 3.6 חוזר ומתאר את הסימול של הדיודה האידאלית ואת האופיין שלה. השימוש במודל של הדיודה האידאלית מתאים למעגלים שבהם המתח על הדיודה ב־מִמְתָּח הקִדְמִי (0.7V) הוא זניח. בסעיף הזה ובסעיפים הבאים נציג ניתוח של מעגל אב-טיפוס לפי סוגי המודלים. מעגל כזה מתואר באיור 3.7.

באיור 3.9 א' נתון תרשים עקרוני של מעגל דיודי למתח חילופין. מתח המקור מתואר באיור 3.9 ב'. יש להניח שהדיודה אידאלית, ולכן במחצית החיובית של מתח המקור המחזורי היא בעצם קצר. המסקנה היא שמתח המקור נופל כאן במלואו על הנגד. אבל במחצית השלילית של מתח המקור המחזורי הדיודה היא נתק, ולכן הזרם במעגל וגם המתח על הנגד

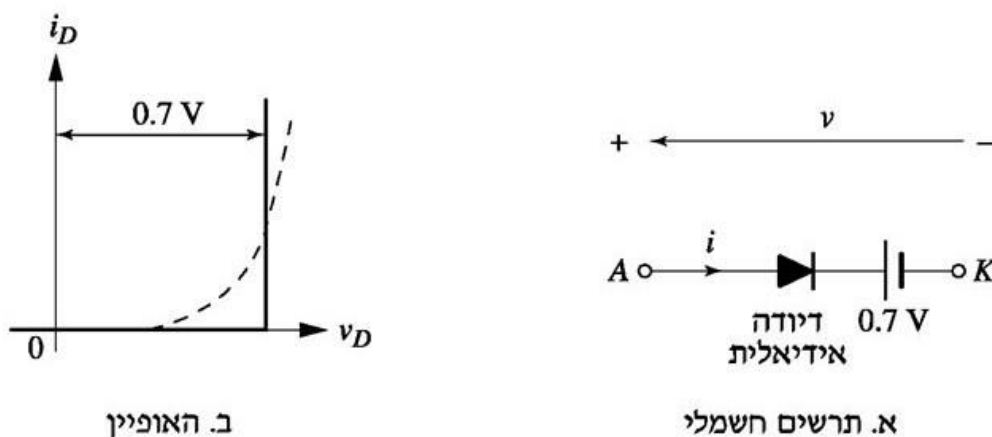
הם אפסיים. המתח על הנגד מתואר באיור 3.9ג'. צורת הזרם בנגד זהה לצורת המתח המופעל עליו. אם כן, ברור לנו שהזרם בנגד הוא חיובי תמיד – כלומר חד-כיווני.



איור 3.9 מעגל דיודי למתח חילופין – מודל הדיודה האידיאלית

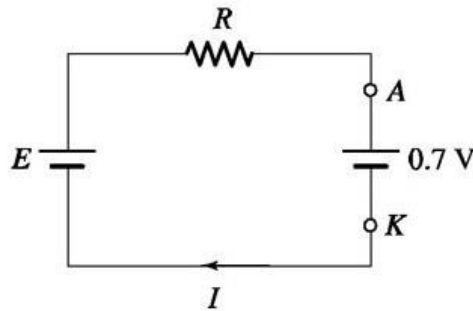
מודל מפל המתח הקבוע

המודל של מפל המתח הקבוע מייצג בעצם את הכלל הנלמד, שלפיו הממתח הקדמי של דיודה מעשית הוא בערך $0.7V$. המודל הזה מתואר באיור 3.10א' באמצעות דיודה אידיאלית, המחוברת במעגל טורי לסוללה עם מתח של $0.7V$. האופיין המתאים מתואר באיור 3.10ב' בקו מלא, ואילו האופיין של דיודה מעשית מופיע לשם השוואה בקו מרוסק.



איור 3.10 מודל מפל המתח הקבוע

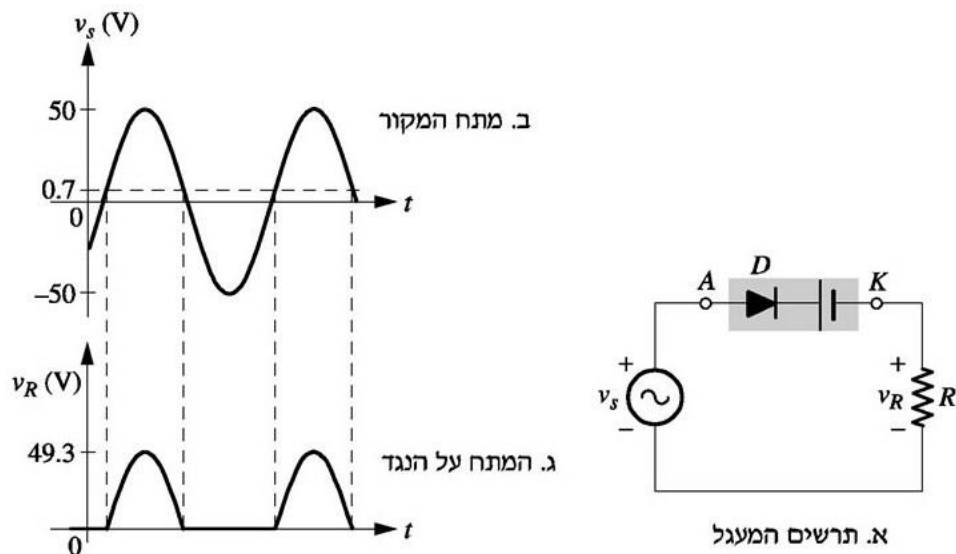
אם נמיר את הדיודה שבאיור 3.7 (מעגל האב-טיפוס) במודל המתח הקבוע, נקבל את המעגל שבאיור 3.11. שימו לב, אין כאן דיודה אידאלית מפני שלמעשה היא קצר בממתח קדמי.



איור 3.11 מעגל תמורה לפי מודל מפל המתח הקבוע

3.4 דוגמה

נסתכל על הדיודה במעגל שבאיור 3.9' כאילו היא בעלת מפל מתח קבוע. מעגל התמורה המתאים, מתח המקור ומתח הנגד מתוארים באיור 3.12. נקודה K ונקודה A באיור א' מציינות את ההדקים של הדיודה המעשית. אין לנו כמובן גישה לקתודה של הדיודה האידאלית, משום שהיא קיימת רק בתאוריה בתור מודל. נשים לב שיש מתח על הנגד רק כשמתח המקור גדול מ-0.7V. העובדה הזאת מומחשת באיור 3.12' ובאיור 3.12 ג' בעזרת הקווים המרוסקים. כשהדיודה מוליכה המתח על הנגד קטן ממתח המקור בשיעור של 0.7V, שהוא הגודל של מפל המתח על ה"סוללה" המופיעה במודל.



5.6 יישומים של דיודה

עד כאן למדנו להכיר כמה תכונות חשובות של דיודת הצורן:

א. חד-כיוונית.

ב. מתח בממתח קדמי של כ-0.7V.

לכל התכונות הללו יש יישומים רבים. התכונה הבסיסית ביותר של הדיודה היא החד-כיוונית שלה, ובסעיף הזה נרחיב על היישום העיקרי של התכונה הזאת. כדי לפשט את ההסבר נניח שהדיודות הן אידאליות.

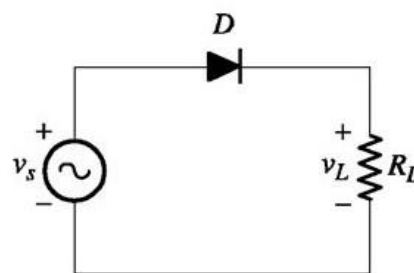
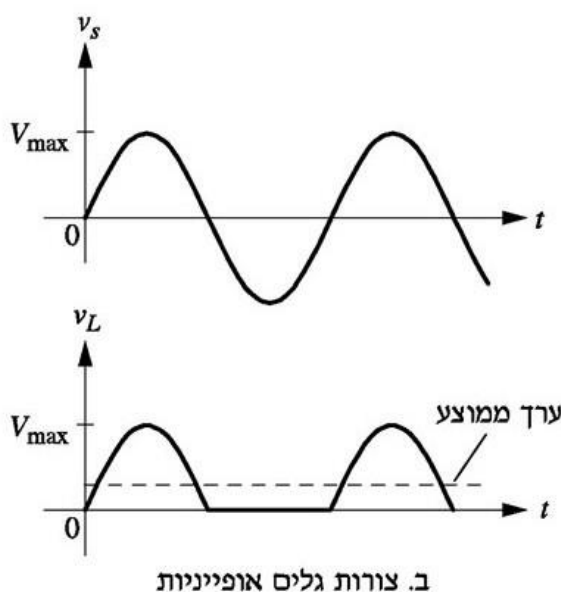
מעגלי יישור של מתח חילופין

מתח החילופין הוא המקור הזמין ביותר של אנרגיה חשמלית כיום – בין אם חברת החשמל מספקת אותו, ובין אם זה נעשה באמצעות גנרטור מקומי. יחד עם זאת, מעגלים רבים זקוקים למתח ישר. כדי להמיר את מתח החילופין במתח החד-כיווני משתמשים במעגלי יישור.

הבסיס לכל מעגל יישור הוא הדיודה, כי היא גורמת לזרם בנקודת העומס להיות חד-כיווני. קיימים שני סוגים של מעגלי יישור: מיישרי חצי-גל ומיישרי גל שלם.

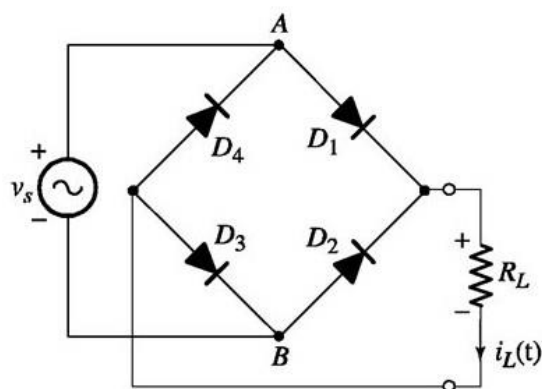
מיישר חצי-גל (half-wave rectifier) מתואר באיור 3.16 א.

המיישר הזה מורכב מדיודה יחידה, שהזרם לנקודת העומס R "חייב" לעבור בה (לכן הוא גם נקרא **מיישר חד-דרכי**). הדיודה חוסמת את הזרם ומעבירה אותו לסירוגין בצורת "פעימות", ועל כן המתח על נקודת העומס (כמו שמתואר באיור 3.16) נקרא מתח "פועם".

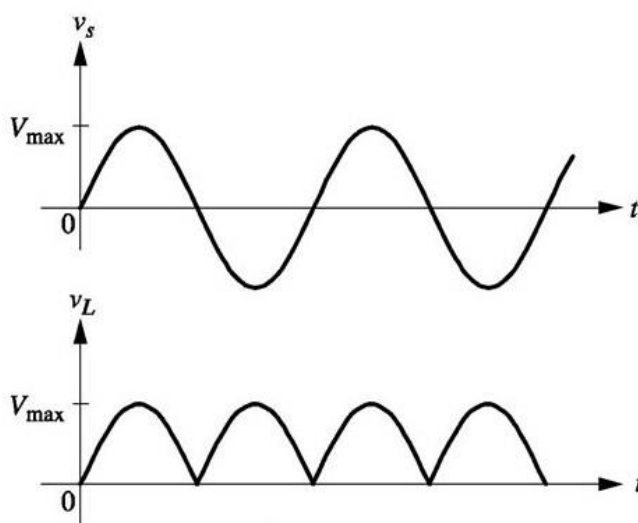


א. תרשים המעגל

איור 3.16 מיישר חצי-גל



א. תרשים המעגל



ב. צורות גלים

איור 3.17 מיישר גל שלם (מיישר גשר)

מיישר גל שלם (full-wave rectifier) נקרא גם מיישר גשר (bridge rectifier), בגלל

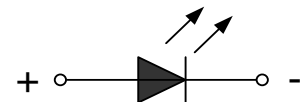
צורת הפריסה של הדיודות. נסביר את דרך הפעולה שלו.

במחצית הראשונה של מחזור מתח החילופין, הפוטנציאל בנקודה A גבוה מזה שבנקודה B. לכן הדיודות D₁ ו-D₃ מוליכות, ואילו הדיודות D₂ ו-D₄ חסומות. לפיכך הזרם זורם מנקודה A דרך D₁ לנקודת העומס R, ממשיך דרך D₃ לנקודה B ומגיע משם בחזרה אל מקור המתח. במחצית השנייה של מחזור מתח החילופין, הפוטנציאל בנקודה B גבוה מזה שבנקודה A. הפעם הדיודות D₂ ו-D₄ מוליכות, ואילו הדיודות D₁ ו-D₃ חסומות. לפיכך הזרם זורם מנקודה B דרך D₂ לנקודת העומס R, ממשיך דרך D₄ לנקודה A ומגיע משם בחזרה אל מקור המתח.

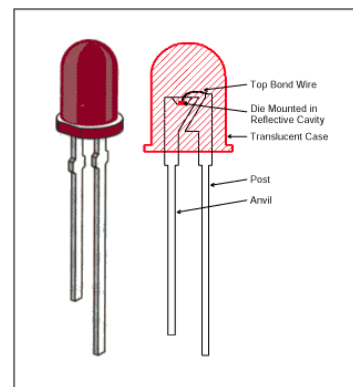
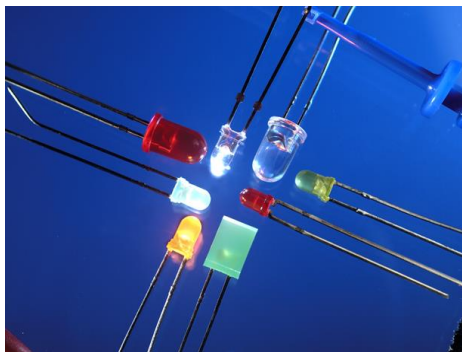
הזרם בנגד זורם בכל מקרה באותו הכיוון, כלומר הוא חד-כיווני כמו המתח על הנגד. לזרם ולמתח יש צורה של גל שלם, והיא מתוארת באיור 3.17ב'. לזרם במיישר גל שלם יש שתי דרכים אפשריות כדי להגיע מהמקור לנקודת העומס, מפני כן הוא מכונה גם **מיישר דו-דרכי**.

5.7 דיודה פולטת אור – דפ"א (LED)

דיודה פולטת אור (LED – Light Emitting Diode) היא דיודה בעלת תכונות ייחודיות. אם נזרים בה זרם קדמי נוכל בעצם להפיק אור. דפ"א מורכבת מחומר מוליך למחצה, השונה מהחומר שהדיודה הרגילה עשויה ממנו. הדיודה הנפוצה הרגילה עשויה מצורן (סיליקון), אולם דפ"א עשויה לרוב מגליום-אסניד. המתח על-פני דיודה רגילה בממתח קדמי הוא כ-0.7V, ואילו בדפ"א המתח הוא כ-1.5V. הסימול של דפ"א מתואר באיור:



לדיודה פולטת אור יש כל מיני גדלים ומגוון של צבעים (התמונות לקוחות מאתרי אינטרנט, לחצו עליהן כדי לקבל את הקישור):



מעט על היתרונות של דפ"א:

- א. גודל פיזי קטן** – גודל הדיודה הוא מילימטרים אחדים, ואפשר למזער אותה עוד יותר כדי ליצור התקנים אלקטרו־אופטיים מורכבים יותר.
- ב. צבע אור מוגדר** – כל דיודה פולטת אור בצבע מוגדר (אורך גל מוגדר).
- ג. נצילות גבוהה** – נדרש הקפק נמוך מאוד כדי להפעיל אותה (מילי־ואטים).
- ד. יש לה עמידות מכנית** בפני מכות וזעזועים.
- ה. אורך החיים שלה נמדד במאות אלפי שעות.**
- ו. הזמן הדרוש כדי לגרום ל-LED להפיץ אור יכול להגיע למיקרו־שניות, ולכן אפשר להשתמש בדפ"א בתור מקור של פולסי אור לצרכים שונים.**

בגלל היתרונות הרבים של דיודות פולטות אור ובגלל האפשרות לייצר LED המקרין אור בכל מיני צבעים, אפשר לראות שהשימוש בהן הולך וגדל.

למשל: בתאורה מתקבלת נצילות גבוהה כי הנורה צריכה הספק נמוך יותר; משתמשים בנורות LED בברזים ובמקלחונים כדי להאיר את המים החמים באדום ואת המים הקרים בכחול; טלוויזיות עוברות לטכנולוגיית LED, ובעקבות זאת העובי שלהן הוא רק כסנטימטר אחד – ועוד.



סיכום

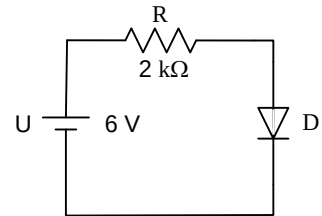
דיודה אידאלית היא רכיב חשמלי המשמש בתור מוליך חד-כיווני. בכיוון האחד יש מוליך מושלם (כלומר קצר) ובכיוון ההפוך יש נתק.

דיודה מעשית: כדי לפשט את החישוב נהוג לקבוע, שהערך של הממתח הקדמי בעבור דיודת סיליקון הוא כ-0.7V. כלומר נסתכל עליה כמו על מפל מתח קבוע.

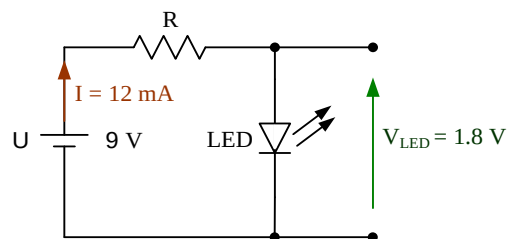
דיודה פולטת אור [דפ"א] (**LED – Light Emitting Diode**) היא דיודה, שאם מזרים בה זרם קדמי נוכל בעצם להפיק אור. המתח על-פני דיודה כזאת הוא כ-1.5V.

בחנו את עצמכם

1. באיור מתואר מעגל חשמלי ובו מקור מתח ישר, דיודה ונגד.
הדיודה מייצגת מפל מתח קבוע של $0.7V$.



2. עוצמת הזרם במעגל הנתון היא _____.
במעגל להפעלת דפ"א (LED) נתון, שעוצמת הזרם היא $12mA$ ומפל המתח על-פני הדפ"א הוא $1.8V$.



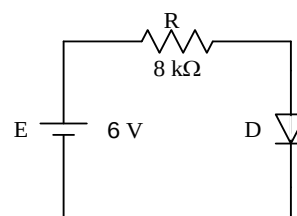
- הערך הנדרש של הנגד במעגל הזה הוא _____.

קובץ שאלות לתרגול נוסף

1. הסבירו בקצרה מהי דיודה פולטת אור (LED) וסרטטו את הסימול שלה.
2. תנו שלושה שימושים לפחות של LED (דפ"א) בחיי היום-יום.

שאלה 5.1

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי עם דיודה.



איור 5.1? איור לשאלה 5.1

חשבו את נקודת העבודה של הדיודה, כלומר את המתח ואת הזרם, במקרים האלה:

א. דיודה אידיאלית.

ב. דיודה לפי מודל מפל מתח קבוע של $0.7V$.

ג. דיודה לפי מודל מקור מתח של $V_g = 0.6V$ והתנגדות של $r_d = 50\Omega$.

תשובה

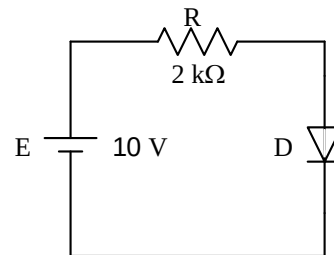
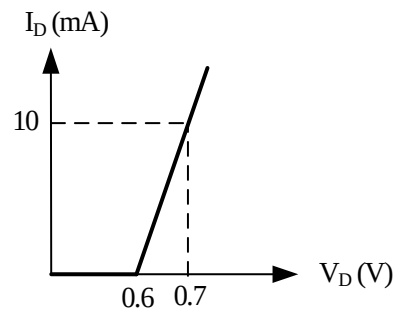
א. $V_D = 0V$, $I_D = 0.75mA$

ב. $V_D = 0.7V$, $I_D = 0.6625mA$

ג. $V_D = 0.6335V$, $I_D = 0.6708mA$

שאלה 5.2

באיור א' לשאלה זו מתואר מעגל חשמלי ובו דיודה, ובאיור ב' מתואר אופיין מקורב של הדיודה לפי מודל מקור מתח ונגד.



איור א'

איור ב'

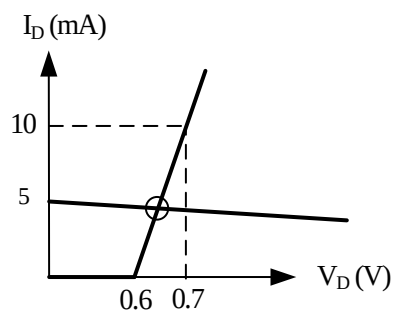
איור 5.2?? איור לשאלה 5.2

- חשבו את ערכי הפרמטרים של מודל מקור המתח ושל הנגד.
- חשבו את נקודת העבודה של הדיודה.
- העתיקו את אופיין הדיודה וסרטטו את קו העבודה.
- הסבירו איך אפשר למצוא את נקודת העבודה של הדיודה בגרף שסרטטתם.

תשובה

א. $V_g = 0.6V$, $r_d = 10\Omega$

ב. $V_D = 0.6468V$, $I_D = 4.6766mA$

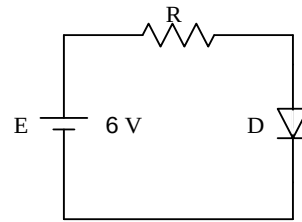


ג.

- ד. בגרף מוצגת נקודת החיתוך בין האופיין של הדיודה לקו העבודה.

שאלה 5.3

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי עם דיודה.
נתוני הדיודה הם: $V_D = 0.75V$ (מודל מפל מתח קבוע)



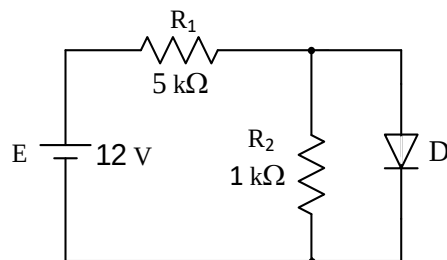
איור 5.3 לשאלה 5.3

חשבו את הערך הנדרש לנו בנגד R כדי שהזרם הדיודה יהיה $15mA$.

תשובה: $R = 350\Omega$

שאלה 5.4

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי שבו יש דיודה.
נתוני הדיודה לפי מודל מפל מתח קבוע הם: $V_D = 0.7V$



איור 5.4 לשאלה 5.4

א. חשבו את הזרם שעובר דרך הנגד R_2 .

ב. חשבו את נקודת העבודה של הדיודה.

תשובה:

א. $I_{R_2} = 0.7mA$

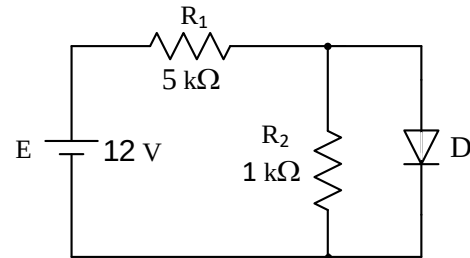
ב. $V_D = 0.7V$, $I_D = 1.56mA$

שאלה 5.5

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי ולו דיודה.

הדיודה פועלת לפי מודל מקור מתח ונגד.

נתוני המודל: $V_g = 0.7V$, $r_d = 50\Omega$.



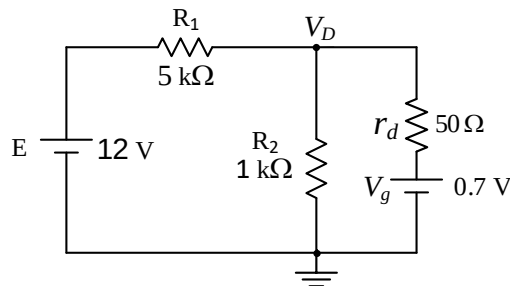
איור לשאלה 5.5

א. חשבו את נקודת העבודה של הדיודה.

ב. חשבו את הזרם שעובר דרך הנגד R_2 .

פתרון מלא

א. כדי להגיע לפתרון של השאלה הזאת נסרטט מעגל תמורה.



$$\frac{V_D - E}{R_1} + \frac{V_D}{R_2} + \frac{V_D - V_g}{r_d} = 0$$

$$\frac{V_D - 12}{5000} + \frac{V_D}{1000} + \frac{V_D - 0.7}{50} = 0 \quad \text{לפי שיטת מתחי הצמתים:}$$

$$V_D - 12 + 5V_D + 100V_D - 70 = 0$$

$$V_D = 0.7736V$$

$$I_D = \frac{V_D - V_g}{r_d} = \frac{0.7736 - 0.7}{50} = 1.472 \text{ mA} \quad \text{חישוב הזרם } I_D:$$

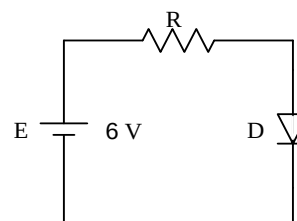
$$I_{R_2} = \frac{V_D}{R_2} = \frac{0.7736}{1000} = 0.7736 \text{ mA} \quad \text{ב. חישוב הזרם } I_{R_2}:$$

שאלה 5.6

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי עם דיודה.

נתוני הדיודה: $V_D = 0.75V$ (מודל מפל מתח קבוע)

הדיודה פועלת לפי מודל מפל מתח קבוע. כמו כן נתון ש: $I_{D,max} = 25mA$, $I_{D,min} = 0.2mA$



איור 5.6?? איור לשאלה 5.6

חשבו את התחום הנדרש לנו בערכי הנגדים כדי להגיע לפעולה תקינה של המעגל.

פתרון מלא:

$$R_{max} = \frac{E - V_D}{I_{D,min}} = \frac{6 - 0.75}{0.2 \cdot 10^{-3}} = 26.25 k\Omega$$

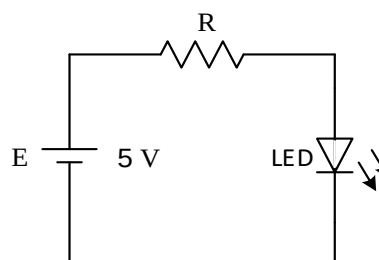
$$R_{min} = \frac{E - V_D}{I_{D,max}} = \frac{6 - 0.75}{25 \cdot 10^{-3}} = 210 \Omega$$

$$210 \Omega < R < 26.25 k\Omega$$

שאלה 5.7

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי שיש לו דפ"א (דיודה פולטת אור).

נתוני הדפ"א הם: $V_{LED} = 1.8V$, $I_{LED} = 8mA$



איור 5.7??? איור לשאלה 5.7

חשבו את הערך הנדרש בנגד R כדי שהמעגל יפעל באופן תקין.

תשובה: $R = 400 \Omega$

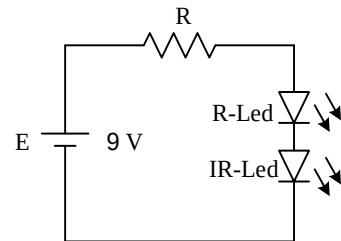
שאלה 5.8

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי עם 2 דיודות פולטות אור: האחת בצבע אדום והשנייה בעלת קרניים אינפרה אדומות (IR).

נתוני הדפ"א האדומה: $I_{LED} = 15\text{mA}$, $V_{LED} = 2.1\text{V}$

נתוני הדפ"א התת-אדומה (IR): $I_{LED} = 15\text{mA}$, $V_{LED} = 1.4\text{V}$

חיברו את שתי הדיודות בטור, כמתואר באיור.



איור 5.8 לשאלה 5.8

חשבו את הערך הנדרש לנו בנגד R כדי להגיע לפעולה תקינה של הדיודות.

תשובה: $R = 367\ \Omega$

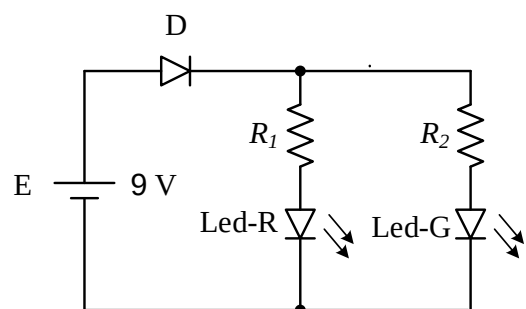
שאלה 5.9

באיור לשאלה מתואר מעגל חשמלי, שבו דיודה רגילה ודיודות פולטות אור (אדום וירוק).

נתוני הדפ"א האדומה: $I_{LED} = 20\text{mA}$, $V_{LED} = 2.1\text{V}$

נתוני הדפ"א הירוקה: $I_{LED} = 15\text{mA}$, $V_{LED} = 3.1\text{V}$

נתוני הדיודה: $V_D = 0.7\text{V}$



איור 5 לשאלה 5.9

חשבו את הערכים הנדרשים בנגדים (R_1 , R_2) כדי שהמעגל יפעל כראוי.

תשובה:

$$R_{Red} = 310\ \Omega, \quad R_{Green} = 347\ \Omega$$

פרק 6 - טרנזיסטור דו־נושאי

יעדים לימודיים

בסוף יחידת הלימוד התלמיד יהיה מסוגל לבצע את הפעולות הבאות:

- א. סרטוט הסימולים הסכמתיים של טרנזיסטור מסוג NPN ושל טרנזיסטור מסוג PNP.
- ב. זיהוי ההדקים של הטרנזיסטור: קולט, פולט ובסיס.
- ג. רישום הקשרים המתמטיים בין הזרמים של הטרנזיסטור במצב פעיל: I_B , I_C , I_E .
- ד. זיהוי שלושת מצבי הפעולה של הטרנזיסטור: פעיל, רוויה וקיטעון.
- ה. חישוב נקודת העבודה של מעגל עם טרנזיסטור במצב פעיל וחיבור C.E עם מקדם עצמי (עם נגד R_E ובלי נגד R_E).
- ו. סרטוט קו העבודה של מעגל עם טרנזיסטור בחיבור C.E (עם נגד R_E ובלי נגד R_E).
- ז. מציאת פתרון גרפי לנקודת עבודה באמצעות קו העבודה ואופייני הטרנזיסטור.
- ח. סרטוט מעגל תמורה מופשט (h_{ie} , h_{fe}) של טרנזיסטור לאות חילופין.
- ט. חישוב הגבר המתח בחיבור C.E (Common Emitter).
- י. חישוב הגבר הזרם בחיבור C.E.
- יא. הסבר התפקיד של קבל הצימוד (בין המגבר למקור ובין המגבר לעומס) ושל קבל העקיפה (קבל המקביל לנגד R_E).
- יב. סרטוט מתח המוצא של מגבר עם טרנזיסטור בחיבור C.E (עם קבל צימוד ובלי קבל צימוד).
- יג. בדיקה אם תנאי הרוויה מתקיים בטרנזיסטור ($\beta I_B > I_C$).
- יד. סרטוט מעגל בסיסי של טרנזיסטור הפועל בתור מתג.
- טו. תכנון מעגל של טרנזיסטור הפועל בתור מתג (הערך של ספק הכוח והנגדים R_B , R_C).
- טז. ניתוח מעגל הפעלה של דפ"א (LED) באמצעות טרנזיסטור הפועל בתור מתג.

6.1 מבוא

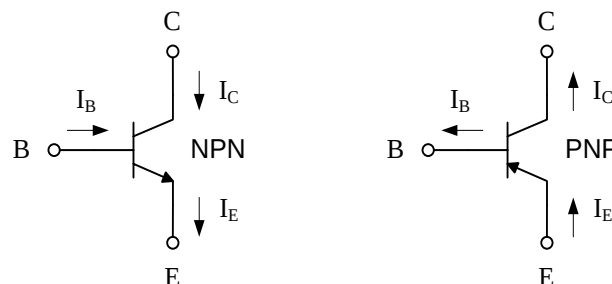
ב-23 בדצמבר 1947 הומצא במעבדות "בֵּל" שבארצות־הברית התקן חשמלי זעיר, ששינה לחלוטין את פניה של האלקטרוניקה. האלקטרוניקה המודרנית מבוססת במידה רבה על ההמצאה ה"קטנה" הזאת, הנקראת **טרַנְזִיסְטוֹר (transistor)**: שילוב של המילים **transfer** (resistor-ו).
כעבור שנים מעטות התברר שהחשיבות של ההמצאה רבה כל־כך, עד שבשנת 1956 הוענק לשלושת החוקרים שהמציאו אותה (ג'ון ברדין, וולטר בראטיין וויליאם שוקלי) פרס נובל לפיזיקה.

בזכות המצאת הטרנזיסטור יכלו להקטין את ממדי המכשירים האלקטרוניים במידה ניכרת, להפחית את צריכת ההספק שלהם ולשפר את הביצועים שלהם. יתר על כן, הטרנזיסטור אפשר את ההמצאה של מכשירים אלקטרוניים רבים מאוד, שעדיין לא היו קיימים בעידן השפופרות. לעומת זאת, מפני המכשירים החדשים שפותחו נערמו דרישות רבות לפני החוקרים של הטרנזיסטורים, וככה הלכה והשתכללה לה טכנולוגיית הייצור שלהם. הדברים הגיעו למצב כזה, שכיום אפשר לשלב מיליוני טרנזיסטורים על-גבי פיסת צורן בגודל סנטימטר רבוע אחד בלבד!

התחום הראשון שבו התרחשה השפעת גומלין בין הטרנזיסטור למכשירים האלקטרוניים היה תחום האלקטרוניקה הבידורית. לאחר שפיתחו את הטרנזיסטור ושיפרו אותו במשך כמה שנים, יצאו לשוק מכשירי רדיו קטנים (בגודל ספר בערך) עם צריכת הספק נמוכה (ואטים אחדים), שבהמשך היו גם ניידים וניזונו מסוללות. המכשירים האלה הכילו טרנזיסטורים במקום שפופרות וכונו "רדיו-טרנזיסטורים". במהלך השנים שחלפו מקלטי הרדיו התמזערו בהדרגה, עד שהגיעו לממדים של שעון יד. מאז מכנים מקלטי רדיו זעירים בשם "טרנזיסטור" בשפה המדוברת. אבל בשפה המקצועית טרנזיסטור הוא כמובן רכיב ההגברה החשמלי. תחום אחר שמהפכה של ממש התחוללה בו, הוא תחום המחשבים. בגלל שכלול טכנולוגיית המזעור של הטרנזיסטורים הצליחו לפתח את המחשב האישי (PC) – הנמצא כמעט בכל בית ואפילו במשרדים, במפעלים ובמוסדות. כיום אפשר לרכוש מחשבי כף-יד (palm), ששמן מעיד על הגודל שלהם. יש להם רמת זיכרון וכוח חישוב של מחשב בגודל חדר מהעידן שלפני המצאת הטרנזיסטור.

6.2 מבנה הטרנזיסטור ועקרון הפעולה שלו

טרנזיסטור ביפולרי או דו־נושאי או דו־קוטבי (Bipolar Junction Transistor – BJT) הוא התקן בעל שלושה הדקים. ה**בסיס** שלו (**Base**) מוזן בזרם חשמלי, המווסת את הזרם בין הפולט (**Emitter**) לקולט (**Collector**). יש שני סוגים של טרנזיסטור דו־נושאי, והסימולים המקובלים שלהם נתונים לפניכם באיור:



בטרנזיסטור מסוג **NPN** זרם הבסיס I_B וזרם הקולט I_C נכנסים לטרנזיסטור, וזרם הפולט I_E יוצא ממנו. לעומת זאת בטרנזיסטור מסוג **PNP** זרם הבסיס I_B וזרם הקולט I_C יוצאים מן הטרנזיסטור, וזרם הפולט I_E נכנס אליו.

בכל מקרה אפשר לרשום כך את המשוואה של הזרמים בצומת: $I_E = I_B + I_C$ (חוק הזרמים של קירכהוף).

לטרנזיסטור שני שימושים עיקריים:

שימוש אחד הוא להגברה: זרם קטן מוזרם לבסיס וגורם לזרם גדול יותר "בעל צורה זהה" לזרם מהקולט לפולט.

השימוש השני הוא בתור "מתג": זרם מוזרם (או לא מוזרם) לבסיס וגורם ל"קצר" או ל"נתק" בין הדק הקולט להדק הפולט.

לטרנזיסטור הביפולרי יש שלושה מצבי פעולה, והם תלויים בזרמים המפעילים אותו:

מצב קיטעון (cutoff) – במצב הזה כמעט שלא מרגישים את זרם הבסיס, ולכן אין זרם מהקולט לפולט. בטרנזיסטור יש מצב של נתק בין הדק הקולט C להדק הפולט E.

מצב פעיל (active) – במצב הזה הזרם בין הדק הקולט C להדק הפולט E הוא יחסי (בערך) לזרם בהדק הבסיס I_B , אבל הרבה יותר גדול ממנו. במצב הזה הטרנזיסטור הוא בעצם מגביר לינארי, ואפשר לתאר את הקשר באמצעות הנוסחה: $I_C = \beta I_B$. הפרמטר β מייצג את גודל ההגברה, והוא אופייני לכל טרנזיסטור.

במצב הזה אפשר להסתכל על הצומת בין הבסיס לפולט כמו על דיודה, והוא נמצא במצב קדימי ($V_{BE} > 0$). לכן נוכל להשתמש בערך המקורב שנקבע בשביל הדיודה, כלומר:

$$V_{BE} \cong 0.7V$$

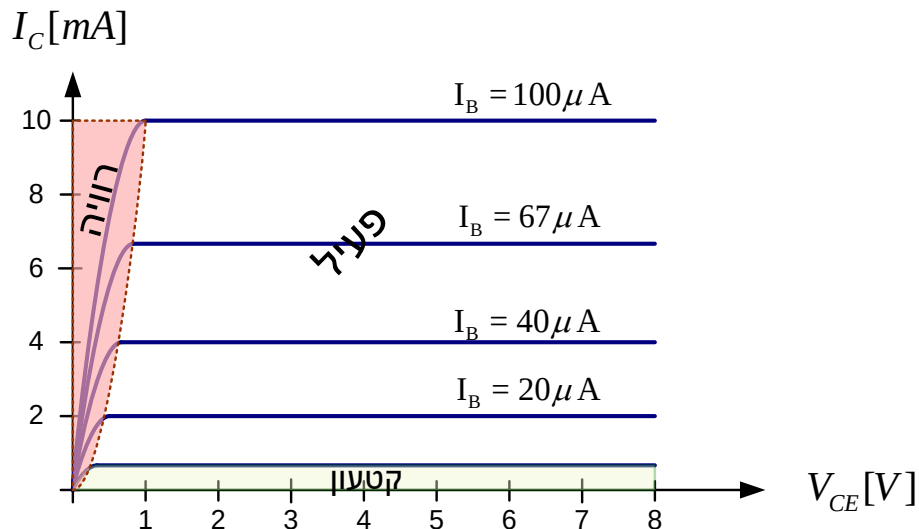
מצב רוויה (saturation) – הטרנזיסטור מגיע למצב הזה, כשיש זרם בסיס די גדול והזרם בין הקולט לפולט לא יכול לגדול עוד. אז הטרנזיסטור הוא "קצר" בין הדק הקולט להדק הפולט, וזאת הנוסחה של הקשר במקרה הזה: $I_C < \beta I_B$.

אפשר לתאר את מצבי הפעולה של הטרנזיסטור באמצעות איור ולהציג בו את האופייניים $I_C = f(V_{CE})$ בעבור כמה ערכים של I_B . האיור הזה מתאים לטרנזיסטור ביפולרי שבו $\beta = 100$.

בתחום הפעיל האופיינים מקבילים לציר ה-x, כלומר הערך של הזרם I_C נשאר קבוע למרות שינוי המתח V_{CE} .

בתחום הרוויה רואים ש: $I_C < \beta I_B$, ועוצמת הזרם I_C תלויה בערך של V_{CE} .

תחום הקיטעון הוא האזור שבו הזרם I_C שואף לאפס.



הרחבה: מבנה הטרנזיסטור ועקרון הפעולה שלו

המבנה של טרנזיסטור צומת דו-נושאי הוא מעין "כריך" תלת-שכבתי של מוליך למחצה. מוליך למחצה הוא חומר עם הרבה מטענים חשמליים חופשיים, אבל המספר שלהם קטן מאוד לעומת הכמות הקיימת במוליכים כמו מתכות. דוגמה נפוצה של חומר מוליך למחצה היא הצורן (silicon). יש שני סוגים של טרנזיסטורים דו-נושאים, כמו שמתואר באיור 4.4. תיאור השכבות באיור הזה הוא סכמתי בלבד, ובמציאות המבנה מורכב יותר.

טרנזיסטור **NPN** בנוי משכבה דקה מאוד של מוליך למחצה מסוג **P** עם מטענים חופשיים **חיוביים** (**P = Positive**), הנתונה בין שתי שכבות עבות של מוליך למחצה מסוג **N** עם מטענים חופשיים **שליליים** (**N = Negative**). טרנזיסטור **PNP** בנוי משכבה דקה מאוד של מוליך למחצה מסוג **N**, הנתונה בין שתי שכבות עבות של מוליך למחצה מסוג **P**.

שכבת הביניים הדקה מכונה **בסיס (base)**, ולשתי השכבות החיצוניות והעבות קוראים **קולט (collector)** ו**פולט (emitter)**. ההדקים החיצוניים מחוברים לשלוש השכבות האלה באמצעות מגע של מתכת. הם נקראים הדקי הבסיס, הדקי הקולט והדקי הפולט. במשטחים שבהם הבסיס נפגש עם הפולט או עם הקולט נוצרים שני צמתים של **PN**: צומת הפולט (בין הבסיס לפולט) וצומת הקולט (בין הבסיס לקולט). פעולת הטרנזיסטור מבוססת על פעולת הגומלין בין שני הצמתים הללו. לפני שנרחיב בעניין הזה, נתבונן בסימולים של הטרנזיסטור המובאים באיור 4.4.

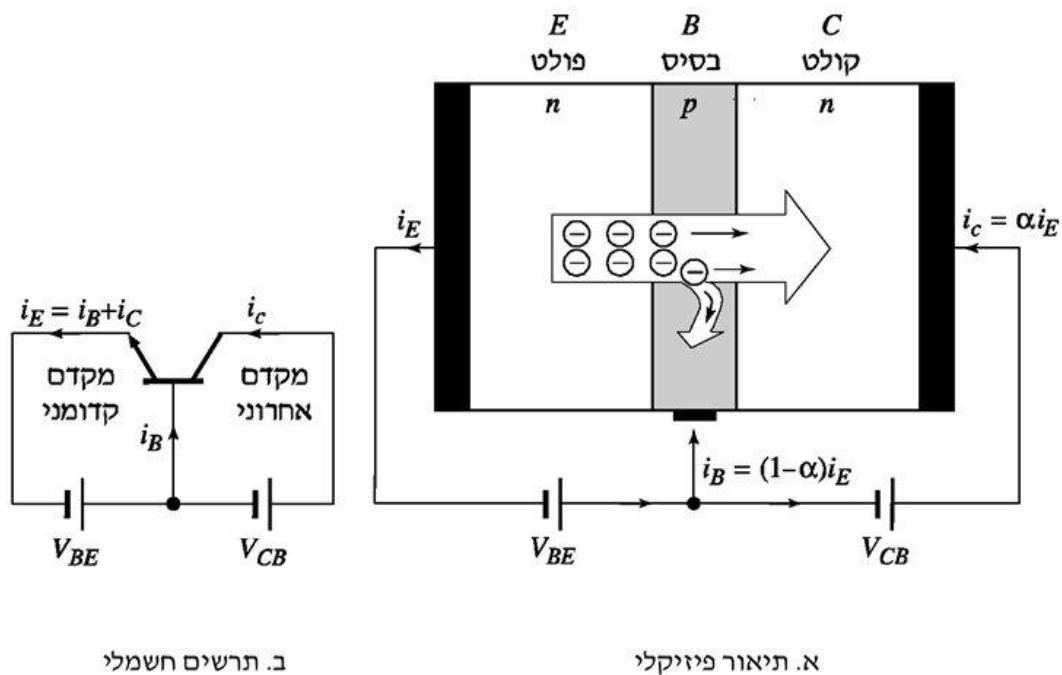
לפי הסימול יש שלושה הדקים: הבסיס הוא ההדק האמצעי, ההדק של הפולט מסומן בחץ, והקולט הוא ההדק השלישי. סוג הטרנזיסטור קובע את כיוון החץ בהדק הפולט: בטרנזיסטור **NPN** הצד החיצוני של צומת הפולט הוא **N**, ולכן החץ פונה החוצה (מפני שזה הכיוון המועדף של הזרם בצומת **PN**). הסימול בטרנזיסטור **PNP** הוא הפוך.

בהסברים שיינתנו בהמשך נדון בהרחבה רק בטרנזיסטורים של **NPN**. לכל אורך הספר נתעסק רק בטרנזיסטורים העשויים מצורן (סיליקון), כי השימוש בהם היום נרחב הרבה יותר לעומת טרנזיסטורי הגרמניום.

קודם כול נדון במצב שבו אפשר להשתמש בטרנזיסטור בתור מגבר – המצב הזה נקרא **מצב פעיל (active-mode)**.

4.3.1 המצב הפעיל

מצב הפעולה העיקרי של הטרנזיסטור הוא המצב הפעיל, המתואר באיור 4.5:



איור 4.5 הזרמים בטרנזיסטור במצב הפעיל

כדי למקדם את הצמתים בכיוונים הדרושים משתמשים בשני מקורות מתח חיצוניים: V_{CB} ו- V_{BE} . נתבונן קודם בצומת של הפולט, הנמצא במפתח קדמי (כלומר: הפוטנציאל הגבוה מחובר לחומר מסוג **P**, והפוטנציאל הנמוך – לחומר מסוג **N**). האלקטרונים נמשכים מן הפולט (סוג **N**) אל הבסיס (סוג **P**) בהשפעת השדה החשמלי שנוצר בצומת, ומטענים חיוביים נמשכים בכיוון ההפוך.

בטרנזיסטור מעשי הרמה של המטענים החופשיים בפולט גבוהה בהרבה מהרמה של המטענים החופשיים בבסיס. לכן במקרה שלנו (**NPN**) הכמות של האלקטרונים הנמשכים לבסיס גדולה בהרבה מהכמות של המטענים החיוביים הנמשכים לפולט. מכאן לומדים שהזרם בצומת של הפולט (המכונה זרם הפולט – i_E) מורכב למעשה מאלקטרונים הנפלטים מן הפולט אל הבסיס. האלקטרונים האלה נראים בבסיס של החץ הרחב המצויר באיור 4.5.

אחרי שעברו בתוך הבסיס ממשיכים האלקטרונים בדרכם לעבר הצומת קולט-בסיס (ובקיצור צומת הקולט), הנמצא ב־מִמְתָּח אֲחוּרִי. כשהם מגיעים לצומת הזה הם נסחפים לצד N (הקולט), המחובר לפוטנציאל חיובי. במילים אחרות, החלק הזה של זרם האלקטרונים שנקלט בקולט הוא הרוב המכריע של זרם הקולט i_c . הדבר הזה מתבטא באיור 4.5 בראש-החץ השמן החודר לקולט.

החלק היחסי מזרם הפולט שהצליח לעבור את הבסיס "בשלום", כלומר בלי שמטענים חיוביים ינטרלו אותו, תלוי ברוחב של הבסיס ובכמות המטענים החיוביים שיש בו. מסמלים אותו באמצעות α , והערך שלו הוא בין אפס לאחד. ככל שהבסיס צר יותר ודל במטענים חיוביים, יותר אלקטרונים מצליחים להגיע מן הפולט אל הקולט. לכן הערך של α קרוב יותר לאחד. כפי שנראה בהמשך, צריך שהערך של α יהיה קרוב ככל האפשר לאחד כדי לקבל הגברה.

הרוחב של אזור הבסיס הוא בעצם כמיקרון אחד (אלפית המילימטר). כמו כן כפי שכבר ציינו, ריכוז המטענים החופשיים החיוביים שבבסיס נמוך בהרבה מזה שבקולט. לכן בטרנזיסטורים מעשיים אפשר לקבל ללא קושי מיוחד ערך של $\alpha = 0.99$, ובטרנזיסטורים בעלי תכונות טובות במיוחד הערך שמקבלים הוא עד $\alpha = 0.999$.

מתוך האלקטרונים שנפלטו מן הפולט מגיעים לקולט למעלה מ-99 אחוזים. העובדה הזאת מומחשת באיור 4.5 באמצעות חצים, המייצגים את הזרמים. לפיכך אם זרם הפולט הוא i_E אז זרם הקולט יהיה αi_E , ושארית הזרם $(1-\alpha)i_E$ חייבת לזרום בהדק הבסיס. אם כן, נוכל לרשום את הקשר בין זרם הפולט לזרם הבסיס:

$$(4-1) \quad i_B = (1-\alpha)i_E$$

מאידך גיסא קיים גם הקשר:

$$(4-2) \quad i_C = \alpha i_E$$

מתוך משוואות (4-1) ו-(4-2) נוכל לרשום:

$$(4-3) \quad i_C = \alpha \frac{i_B}{1-\alpha} = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_B$$

נסמן:

$$(4-4) \quad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

ונקבל:

$$(4-5) \quad i_C = \beta i_B$$

הפרמטר β מציין פי כמה גדול זרם הקולט מזרם הבסיס. זו הסיבה שבגללה הוא נקרא **הגבר הזרם של הטרנזיסטור (transistor current gain)**. הגודל של β נגזר כמובן מן הגודל של α , והוא משתנה בצורה חדה עקב כל שינוי קטן ב- α . נבהיר את זה בדוגמה הבאה:

דוגמה 4.1

בעבור טרנזיסטור מסוים נתון ש: $\alpha = 0.99$.

א. ציינו כמה אחוזים מזרם הפולט מגיעים לקולט וכמה יגיעו לבסיס שלו.

ב. חשבו את הזרם של הטרנזיסטור.

ג. הסבירו כיצד ישתנה הגבר הזרם אם α משתנה ל-0.995.

פתרון

א. לקולט מגיעים 99% מזרם הפולט. לבסיס – 1%.

ב. לפי נוסחה (8-4):

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0.99}{1 - 0.99} = 99 \cong 100$$

ג.

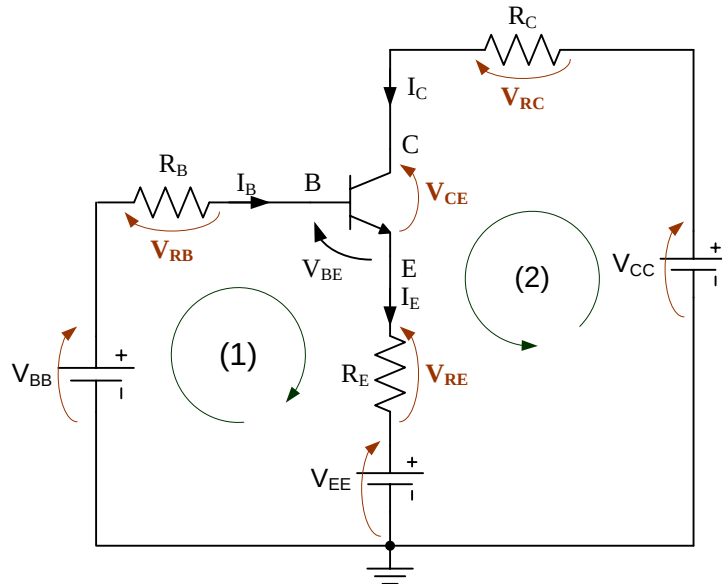
$$\beta = \frac{0.995}{1 - 0.995} \cong 200$$

6.3 ניתוח תנאי העבודה של טרנזיסטור בזרם ישר

חיבור פולט-משותף

ניתוח הפעולה של טרנזיסטור בזרם ישר

נתון המעגל הכללי הבא:



נניח שבמעגל זה ידועים ערכי הנגדים, ערכי מקורות המתח ונתוני הטרנזיסטור: V_{BE} , β .
נדרש לחשב את ערכי הזרמים I_B , I_C , I_E ואת מפל המתח V_{CE} .

פתרון

נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף.

בעבור חוג מספר 1: $V_{BB} - V_{R_B} - V_{BE} - V_{R_E} - V_{EE} = 0$

בעבור חוג מספר 2: $V_{CC} - V_{R_C} - V_{CE} - V_{R_E} - V_{EE} = 0$

שימוש בחוק אום: $V_{R_B} = I_B \cdot R_B$; $V_{R_C} = I_C \cdot R_C$; $V_{R_E} = I_E \cdot R_E$

שימוש בחוק הזרמים של קירכהוף: $I_E = I_B + I_C$

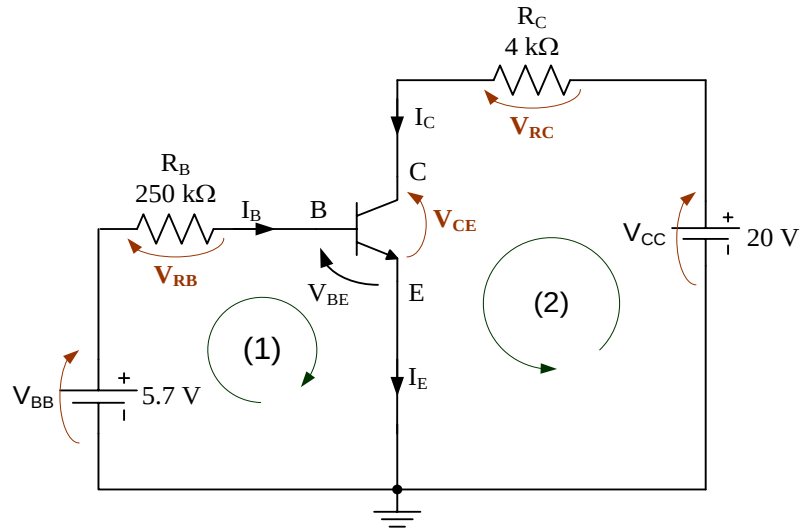
נניח שהטרנזיסטור עובד באזור הפעיל, כלומר: $I_C = \beta I_B$.

אם נציב ערכים מספריים במשוואות האלה, נקבל את זרמי המעגל ואת מתחי המעגל.

דוגמה מספר 1:

נתון: $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7V$

חשבו את נקודת העבודה של הטרנזיסטור. (I_C , V_{CE}).



חוג מספר 1

שימוש בחוק המתחים של קירכהוף: $V_{BB} - V_{R_B} - V_{BE} = 0$

שימוש בחוק אום: $V_{R_B} = I_B \cdot R_B$

ואז נקבל:
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5.7 - 0.7}{250k} = 20 \mu A$$

חוג מספר 2

שימוש בחוק המתחים של קירכהוף: $V_{CC} - V_{R_C} - V_{CE} = 0$

שימוש בחוק אום: $V_{R_C} = I_C \cdot R_C$

בהנחה שהטרנזיסטור עובד באזור הפעיל, כלומר: $I_C = \beta I_B = 100 \cdot 20 \mu A = 2 mA$

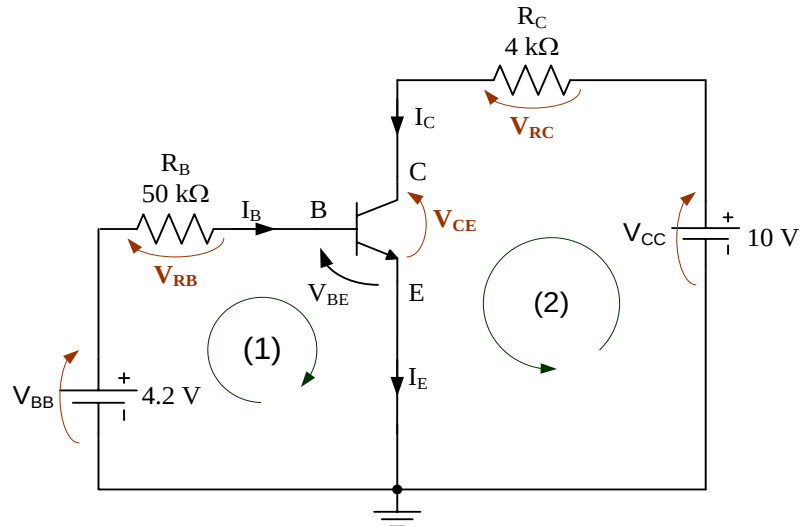
מקבלים:
$$V_{CE} = V_{CC} - V_{R_C} = 20 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^3 = 12V$$

ולכן נקודת העבודה של הטרנזיסטור היא: $I_C = 2 mA$, $V_{CE} = 12V$

דוגמה מספר 2

נתון: $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7V$

חשבו את נקודת העבודה של הטרנזיסטור (I_C, V_{CE}) .



חוג מספר 1

שימוש בחוק המתחים של קירכהוף: $V_{BB} - V_{R_B} - V_{BE} = 0$

שימוש בחוק אום: $V_{R_B} = I_B \cdot R_B$

ואז נקבל: $I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{4.2 - 0.7}{50k} = 70 \mu A$

חוג מספר 2

שימוש בחוק המתחים של קירכהוף: $V_{CC} - V_{R_C} - V_{CE} = 0$

שימוש בחוק אום: $V_{R_C} = I_C \cdot R_C$

בהנחה שהטרנזיסטור עובד באזור הפעיל, כלומר: $I_C = \beta I_B = 100 \cdot 70 \mu = 7 mA$

מקבלים: $V_{CE} = V_{CC} - V_{R_C} = 10 - 7 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^3 = -18V$

במצב פעיל המתח הוא $V_{CE} > 0$, ולכן ההנחה הבסיסית שהטרנזיסטור נמצא במצב פעיל – שגויה.

עכשיו נחשב שוב את הזרמים ואת המתחים של המעגל, אבל הפעם נניח שהטרנזיסטור נמצא במצב רוויה. במצב כזה הטרנזיסטור מתנהג כמו "קצר", ולכן: $V_{CE} \cong 0.2V$. נרשום מחדש את המשוואה של המתחים בעבור חוג מספר 2 ונקבל: $V_{CC} - V_{R_C} - V_{CE} = 0$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{10 - 0.2}{4k} = 2.45mA$$

מציאת נקודת העבודה בשיטה הגרפית

את נקודת העבודה של הטרנזיסטור (זרם ומתח) נמצא בשיטה גרפית – באמצעות האופיינים שלו. השיטה הזאת תיתן לנו מבט כללי יותר על תנאי העבודה של הרכיב ותאפשר לנו להגיע לניתוח איכותי ומהיר של השפעות סוגי הפרמטרים על נקודת העבודה. אנחנו עוסקים כזכור בטרנזיסטור עם חיבור פולט-משותף, כפי שמופיע באיור 4.12. במילים אחרות, הקשר בין i_C ל- V_{CE} מוגדר בצורת גרף בעבור כל זרם בסיס נתון. אולם קיים גם קשר לינארי בין שני הגדלים האלה, ולמען הנוחיות נציג אותו במשוואה (4-14):

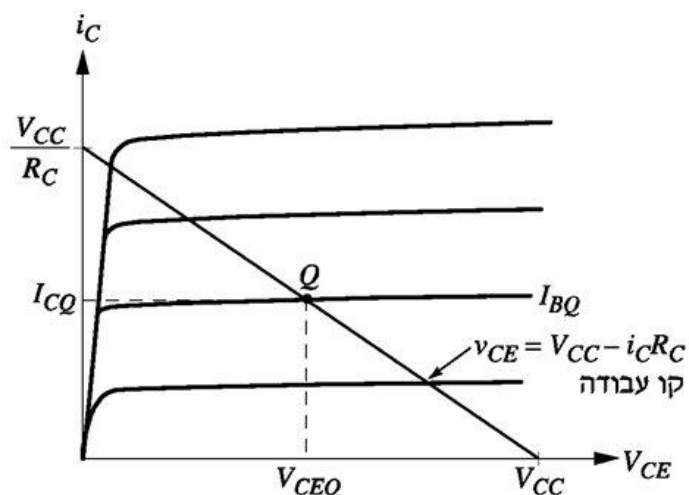
$$V_{CE} = V_{CC} - i_C R_C \quad (4-14)$$

אם נסרטט גרף של המשוואה הזאת על-גבי מערכת הצירים (ציר X: V_{CE} , ציר Y: i_C) נקבל קו ישר, כמו שמתואר באיור 4.12. הקו הישר הזה נקרא **קו העבודה (loadline)** של הטרנזיסטור.

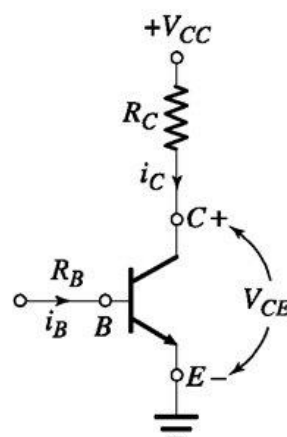
ממשוואה (4-14) רואים שכאשר $i_C = 0$, אז $V_{CE} = V_{CC}$; וכאשר $V_{CE} = 0$, אז $i_C = V_{CC}/R_C$. לכן נקודות החיתוך של הקו הישר עם הצירים הן: V_{CC} על הציר האופקי ו- V_{CC}/R_C על הציר האנכי, כמו שמתואר באיור 4.12.

כשהטרנזיסטור מחובר לנגד R בתצורה של פולט-משותף, המתח והזרם שלו חייבים לקיים את הקשר הלינארי שהנגד מכתוב וגם את הקשר המתואר באופייני המוצא. הדבר הזה נעשה בנקודה אחת בלבד – נקודת המפגש של הקו הישר עם אופיין המוצא המסומן באות I, כמו שמתואר באיור 4.12. הנקודה הזאת נקראת **נקודת העבודה (operating-point)** או **נקודת המנוחה (quiescent-point)**, והיא מסומנת באות Q.

המתח הישר מסומן באותיות V/v, והזרם הישר מסומן באותיות I/i. נשים לב שכדי לקבוע את נקודת העבודה, רק אופיין אחד מעניין אותנו מבין כל אופייני המוצא. האופיין הזה מתאים לזרם הקיים בבסיס, i_B . כזכור, נגדי המקדם R_B ו- R_C קובעים את הזרם הזה באמצעות המשוואה (4-10).



ב. תיאור גרפי

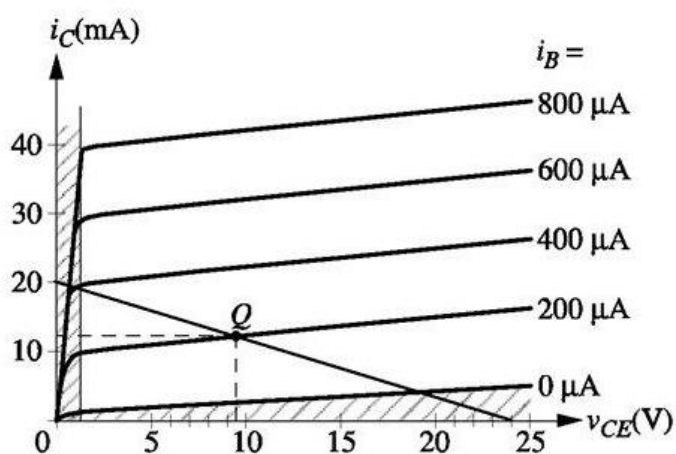


א. תרשים חשמלי

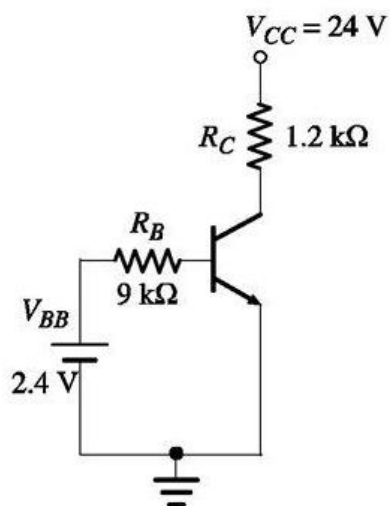
איור 4.12 קו העבודה

דוגמה

בדוגמה הזאת נמצא בדרך גרפית את נקודת העבודה שחישבנו בדוגמה 4.4. נציג שוב את המעגל (איור 4.13) – אופייני המוצא מתוארים באיור 4.13ב'. נשים לב שעל-פי האופיינים הגבר הזרם הוא כ-50, כמו הנתון בדוגמה 4.4.



ב. אופייני מוצא



א. תרשים חשמלי

איור 4.13 מציאת נקודת עבודה

פתרון

נציב את ערכי V_{CC} ו- R_C במשוואה (4-13) ונקבל את משוואת קו העבודה:

$$V_{ce} = V_{cc} - I_C R_C = 24 - 1.2I_C$$

נקודות החיתוך של קו העבודה הן $24V$ על הציר האופקי ו- $20mA$ על הציר האנכי, כמו

שמתואר באיור 4.13 ב'. את קו העבודה אנחנו מעבירים בין הנקודות האלה.

את זרם הבסיס חישבנו בדוגמה 4.3, והוא $0.2mA$, כלומר $I_{BQ} = 200\mu A$. לכן נתעניין

באופייין המסומן $200\mu A$. מנקודת העבודה המתקבלת על-גבי האופייין הזה נסיק:

$$I_{CEQ} = 12mA$$

$$V_{CEQ} = 9V$$

חיבור פולט-משותף עם מקדם עצמי

בסעיף 4.5.1 ראינו שנקודת העבודה תלויה בערכי הנגדים של הבסיס ושל הקולט (R_B , R_C)

ובערך של הגבר הזרם (β). נקודת העבודה יכולה לזוז אם הערכים האלה ישתנו בשל

התחממות (שינויי טמפרטורה). השינויים האלה עלולים להביא אותה לאזור בלתי רצוי כגון

רוויה או קיטעון. בעצם גם אזורים שיש בהם מתח גדול או זרם גדול אינם רצויים, מפני שזה

יוצר הספק גדול והתחממות בלתי רצויה של הטרנזיסטור.

שיקולים אלו ואחרים (שעליהם נלמד בהמשך) מובילים למסקנה פשוטה: יש למקם את

נקודת העבודה באמצע קו העבודה ולדאוג שיהיה לה **ייצוב (stabilization)**, כלומר למזער

את התזוזות שלה. השיטה המקובלת כדי לייצב אותה היא באמצעות חיבור של נגד פולט, כי

הסיבה העיקרית לתזוזה שלה במעגל עם מקדם קבוע (איור 4.11) היא הפוטנציאל הקבוע

של הפולט.

במעגל המתואר באיור 4.14 א' הפולט מחובר להארקה דרך נגד פולט, R_E . צורת החיבור

הזאת נקראת "מעגל פולט-משותף עם **מקדם עצמי (self-bias)**", והיא ממתנת את

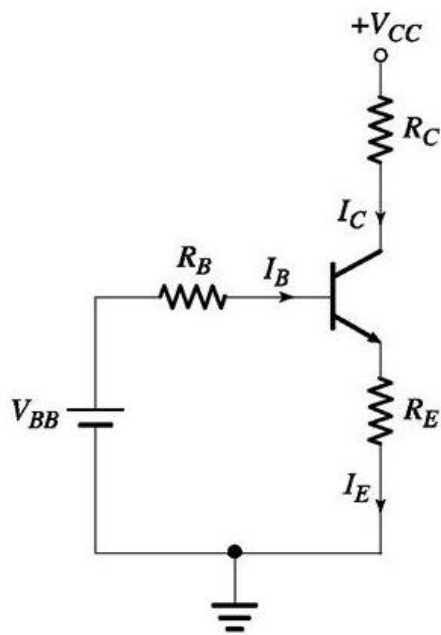
התזוזות בנקודת העבודה כפי שנראה בהמשך.

נניח שהזרם בקולט גדל מסיבה כלשהי (בעקבות הקטנה של R למשל). זרם הפולט יגדל גם

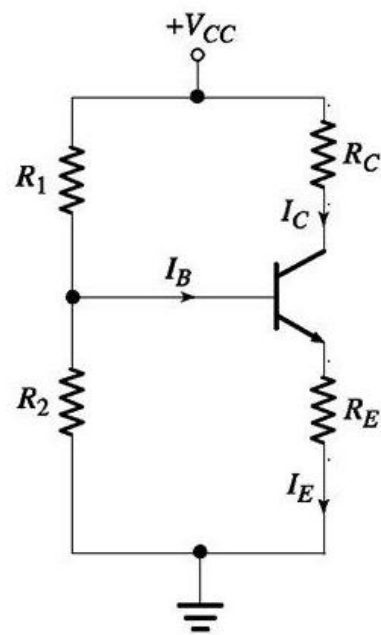
הוא, משום שהוא שווה בקירוב לזרם הקולט. על כן פוטנציאל הפולט יעלה, והמתח בינו ובין

הבסיס יקטן. הדבר יקטין את זרם הבסיס, וגם הזרם בקולט יקטן. כלומר יש כאן משוב

שלילי, שהמגמה שלו היא לבטל את עליית הזרם בקולט. הבה נראה את זה במדויק.



ב. שקול לפי תבנית



א. תרשים חשמלי

לפי ההסבר בסעיף 4.3.1 קיים:

$$(4-16) \quad I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = (\beta + 1)I_B$$

נציב את (4-16) ב- (4-15) ונקבל:

$$(4-17) \quad V_{BB} = R_B \cdot I_B + 0.7 + R_E(\beta + 1)I_B$$

נחלץ את I_B :

$$(4-18) \quad I_B = \frac{V_{BB} - 0.7}{R_B + (\beta + 1)R_E}$$

לשם השוואה נרשום שוב את משוואה (4-10) בעבור מעגל עם מקדם קבוע:

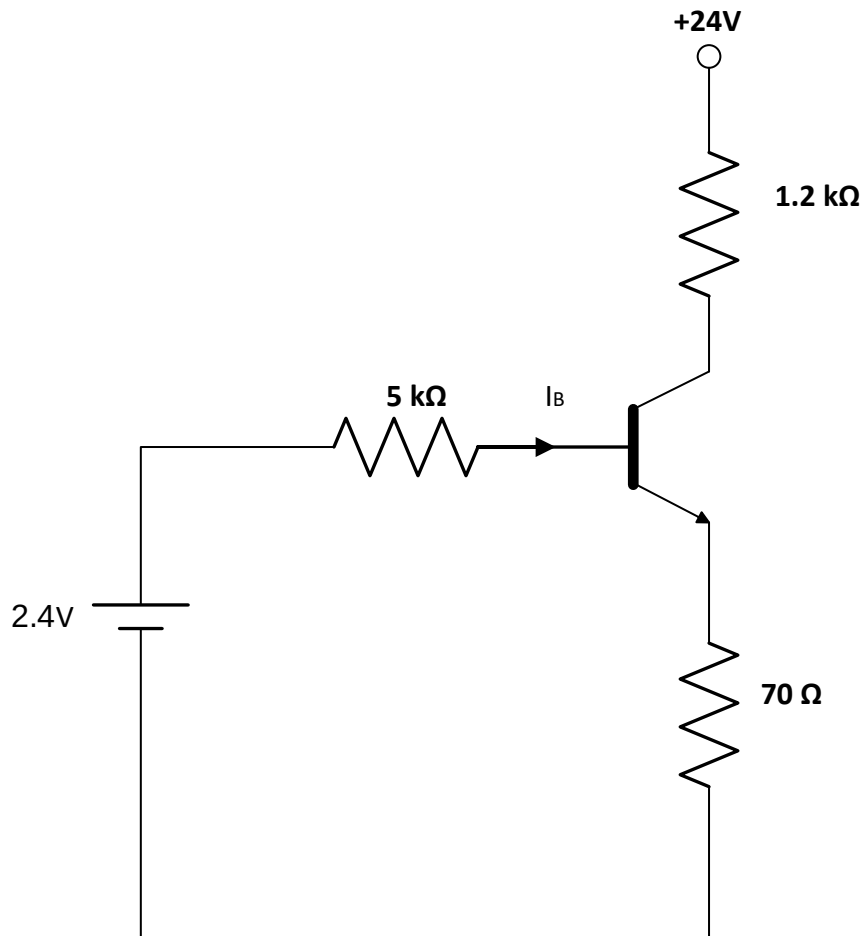
$$(4-19) \quad I_B = \frac{V_{BB} - 0.7}{R_B}$$

ברור שאם $(\beta + 1)R_E$ במכנה של (4-18) לא זניח יחסית ל- R_B , אז כל שינוי ב- R_B ישפיע

במשוואה הזאת פחות מאשר במשוואה (4-19), שבה R_B הוא הביטוי היחיד במכנה.

4.6 דוגמה

באיור 4.15 מתואר מעגל עם מקדם עצמי. כיצד ישתנה זרם הבסיס, אם נגד הבסיס יקטן פי שניים?



איור 4.15 מעגל עם מקדם עצמי לדוגמה 4.6

פתרון

נחשב את הערך של זרם הבסיס בעזרת משוואה (4-18):

$$I_B = \frac{V_{BB} - 0.7}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{2.4 - 0.7}{5,000 + 51 \times 70} = 200 \mu A$$

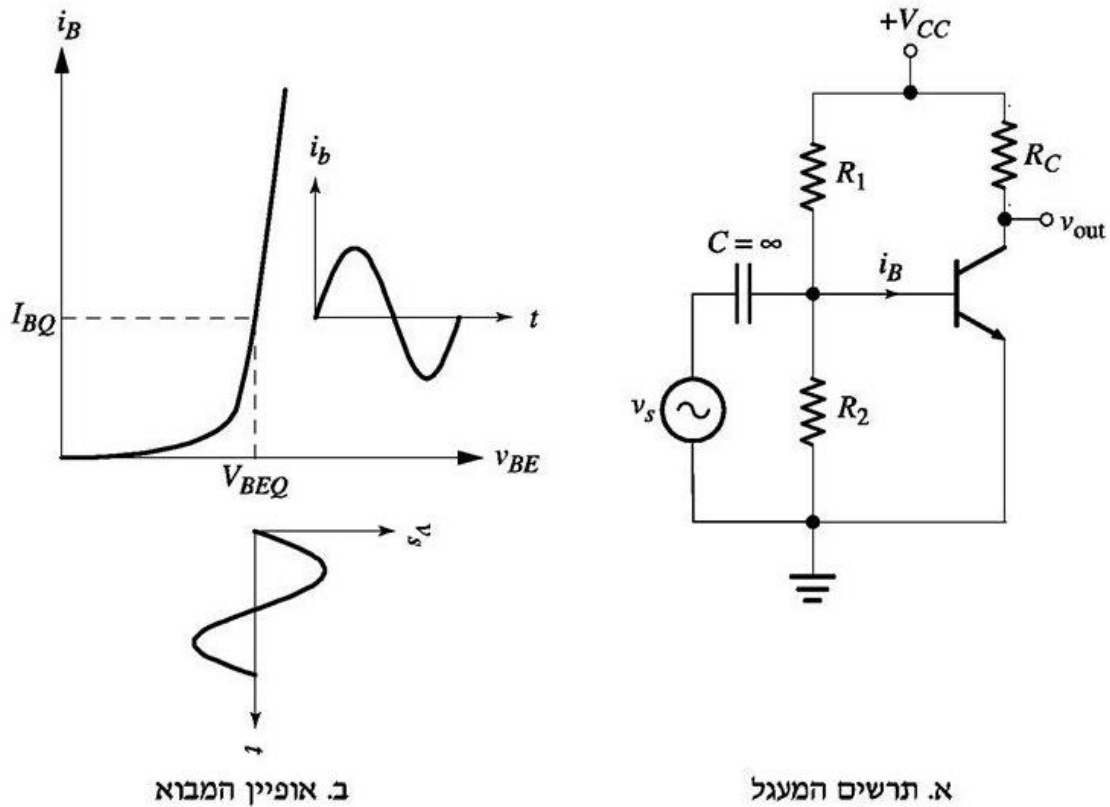
כעת נניח ש- $R_B = 2.5 k\Omega$ כלומר פי שניים, נחשב את זרם הבסיס החדש:

$$I_B = \frac{2.4 - 0.7}{2,500 + 51 \times 70} = 283 \mu A$$

כלומר זרם הבסיס גדל ב-40%. אפשר להראות שבלי נגד פולט זרם הבסיס היה משתנה בערך ב-100%.

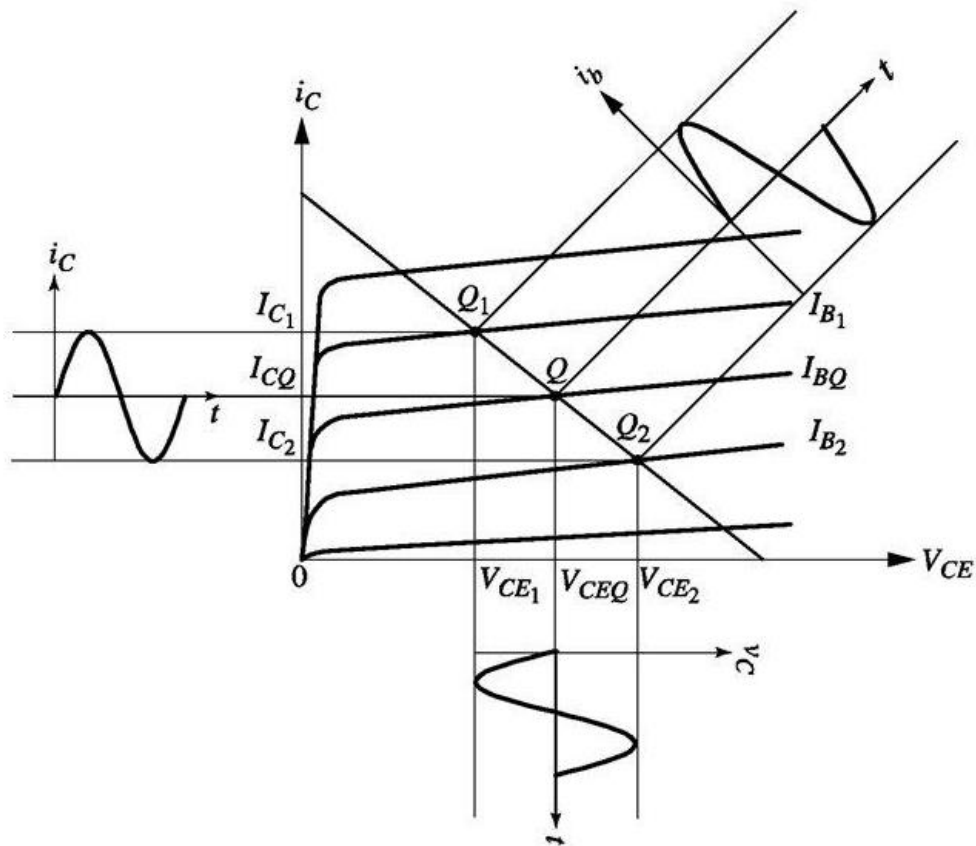
6.4 הפעולה של טרנזיסטור באות קטן

עד עכשיו התעסקנו בתנאים של הזרם הישר בטרנזיסטור. בסעיף הזה נבדוק מה קורה כשמחברים לבסיס שלו מתח חילופין בעל תנופה קטנה, כלומר **אות קטן (small-signal)**, כמו שמתואר באיור 4.17א'.



המקור של מתח החילופין באיור 4.17א' (v_s) הוא אידאלי. הקיבול של הקבל הוא אין-סופי, והוא מתפקד בתור קצר לזרם חילופין. לכן מקור המתח נאלץ להפעיל שינויי מתח סינוסואידליים על הצומת שבין הפולט לקולט, כמו שמתואר באיור 4.17ב'. אופיין הצומת דומה לזה של דיודה רגילה, אז אם שינויי המתח קטנים די הצורך – גם שינויי הזרם הם סינוסואידליים. שינויי הזרם האלה מסומנים באות i . השינויים במתח ובזרם מתרחשים כמובן סביב נקודת העבודה.

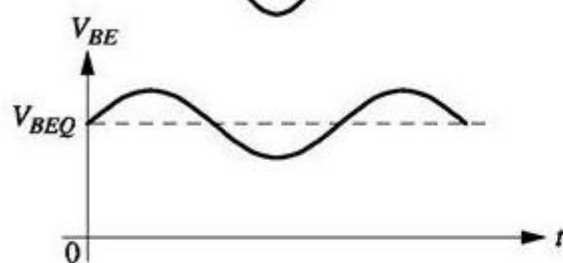
עתה נבדוק מה קורה במוצא, כלומר בקולט. נתבונן באיור 4.18:



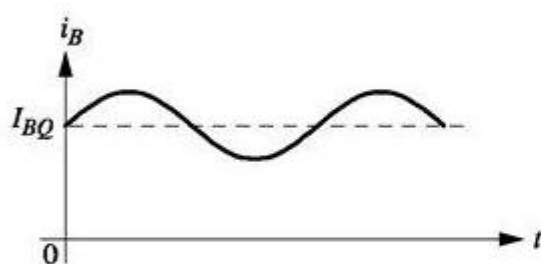
מפני השינויים בזרם הבסיס נקודת העבודה זזה מ- Q_1 ל- Q_2 . כלומר זרם הקולט משתנה בין I_{C1} ל- I_{C2} , ומתח הקולט משתנה בין V_{CE1} ל- V_{CE2} . ברור לנו משיקולים גיאומטריים שאם אופייני המוצא מקבילים, השינויים של הזרם ושל המתח בקולט הם סימטריים. מכאן אנחנו מבינים שהשינויים האלה הם גם סינוסואידליים. נשים לב שבזמן שהמתח V_{BE} גָּדַל גם הזרמים בבסיס ובקולט גָּדְלוּ, אבל המתח בקולט קטן. לכן הצורה של מתח החילופין בקולט הפוכה במופע שלה מזו שבבסיס. באיור 4.19 מתוארים המתחים השונים זה מתחת לזה.



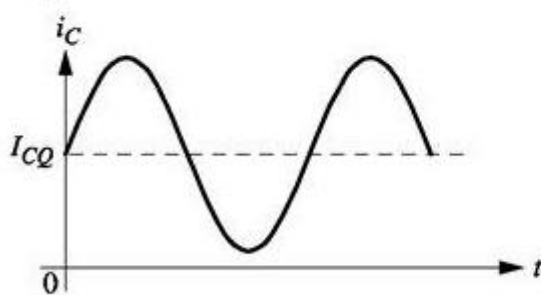
א. מתח ומקור



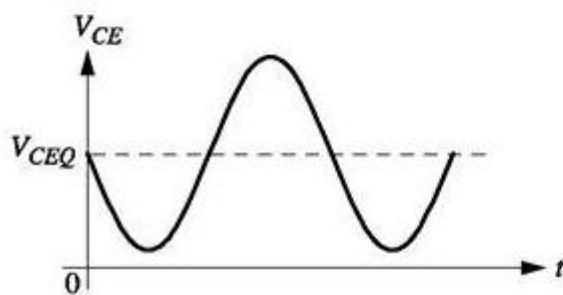
ב. מתח הבסיס



ג. זרם הבסיס



ד. זרם הקולט



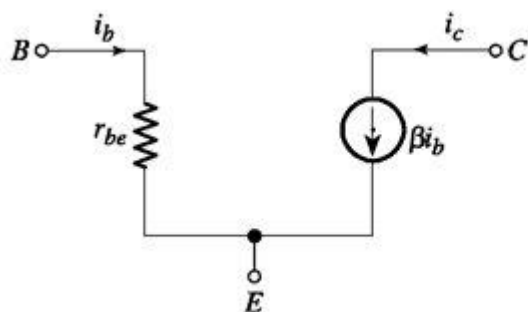
ה. מתח הקולט

מעגל תמורה לטרנזיסטור באות קטן

נניח שעומד לרשותנו מגבר פולט-משותף, ואנחנו ממקדמים אותו (to bias) לנקודת עבודה "טובה" – כלומר נקודה הממוקמת בערך במרכז התחום הפעיל של הטרנזיסטור. עתה עלינו לנתח את פעולת ההגברה של המעגל ולוודא שהוא מתאים למטרה שלו (למשל: הגברת אות שמע במגבר סטראופוני). אם הוא לא מתאים, עלינו לתכנן אותו בדרך שתענה על הדרישות. כפי שלמדנו בתחילת הדרך (פרק 2 בכרך א, חלק I), התכונות העיקריות של המגבר הן:

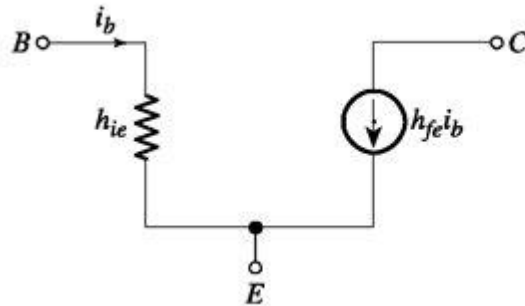
- א. הגבר – הגבר מתח, הגבר זרם והגבר הספק.
- ב. ההתנגדויות של המבוא ושל המוצא.
- ג. אופיין התמסורת – התכונה הזאת מתארת את התלות של אות המוצא באות המבוא. אופיין התמסורת של מגבר הוא לינארי (בקירוב) בתחום המוגבל סביב נקודת העבודה. בשני הקצוות של התחום הזה מופיעות רוויות, הגורמות לאות להתעוות.
- ד. תגובת התדר – התכונה הזאת מתארת את התלות של ההגברים ושל הסחות המופע בתדר.

החלפת הטרנזיסטור במעגל תמורה לאות קטן מאפשרת לנו לנתח את פעולת ההגברה הכוללת של המעגל בכלים המוכרים לנו מהלימודים הקודמים שלנו. בסעיף הזה נתמקד בחישוב מפורט של כל ההגברים וההתנגדויות במבוא ובמוצא של מעגל בתצורת פולט-משותף עם תדר נמוך. קודם כול נציג את המודלים העיקריים של האות הקטן, ואחר כך נחשב באמצעותם את ההגבר במעגל. באיור 4.21 מתואר מודל מפורט לאות קטן.



הצומת בין הבסיס לפולט נשאר כל הזמן בממתח קדמי. לכן קיימת מבחינת האות הזה התנגדות דינמית (כלומר התנגדות לאות קטן), ונכנה אותה r . בנוגע לענף הקולט: מקור הזרם המבוקר נובע מהעובדה, שבעבור זרם חילופין קטן בבסיס (i_b) מקבלים בקולט זרם גדול פי β (βi_b). חשוב לציין, שמעגל התמורה באיור 4.21 מתאים לטרנזיסטור NPN וגם לטרנזיסטור PNP. בדפי הנתונים של הטרנזיסטור לא נהוג בעצם לרשום את הפרמטרים r ו- β , אלא פרמטרים אחרים הנקראים פרמטרי h ("h parameters"). לפרמטרים האלה יש קשר הדוק עם r

ועם β , והם נובעים ממודל כלליים (hybrid) תאורטי – ומכאן גם הסימון h . לא נדון במודל הכלליים המלא, אלא רק בתיאור מפורט שלו הנתון באיור 4.22. למעשה המודל הזה זהה למודל הפיזיקלי שבאיור 4.21.



נשים לב שהמציינים של פרמטרי ה- h מורכבים מצירוף של שתי אותיות:

- א. סוג הפרמטר – התנגדות מבוא (in) ותמסורת קדימה (forward).
- ב. אופן החיבור של הטרנזיסטור – פולט-משותף (emitter), קולט-משותף (collector) או בסיס-משותף (base). למשל: h הוא התנגדות המבוא לטרנזיסטור במעגל תמורה עם תצורה של בסיס-משותף. כאן המקום לציין שמעגלים עם פרמטרים של h קיימים בעבור שלוש תצורות החיבור (CC, CE, CB).

נביא את ההגדרה המדויקת של פרמטרי ה- h בעבור חיבור של פולט-משותף:

$$(4-24) \quad h_{ie} \equiv \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE}=\text{const}}$$

$$(4-25) \quad h_{fe} \equiv \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE}=\text{const}}$$

ממשוואה (4-24) רואים שמגדירים את h באמצעות החלוקה של מתח החילופין שבמבוא בזרם החילופין שבמבוא.

כלומר זאת התנגדות המבוא לאות קטן (small signal input resistance). הסימון 0

$v_{ce} =$ מציין שהחישוב נעשה בעבור קצר (לאות קטן) במוצא. באופן דומה אפשר לראות

במשוואה (4-25), שהפרמטר h הוא הגבר הזרם לאות קטן (gain)

(small signal current). גם כאן החישוב נעשה בעבור קצר (לאות קטן) במוצא.

ראוי לציין שתיאורים בעזרת מעגלי h מקובלים על כל היצרנים, והם בוחרים לאפיין

באמצעותם את הטרנזיסטורים שהם מייצרים. לכן נשתמש בייצוג הזה בהמשך כדי לנתח

מעגלי הגברה.

✎ תרגול (באמצעות הדמיה)

[קישור להדמיה](#)

לפניכם מעגל של טרנזיסטור בזרם ישר. נדרש מכם להציב תחילה את הערכים ולחשב את זרמי המעגל ואת מתחי המעגל בעצמכם בעזרת רישום בכתב. קבעו את מצב הפעולה של הטרנזיסטור על סמך תוצאות החישוב. כדי לבדוק את התוצאות הציבו את הערכים במקומות המתאימים והפעילו את ההדמיה.

תרגיל 1: $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7V$

$$V_{CC} = 12V; \quad V_{EE} = 0V; \quad V_{BB} = 5.2V; \quad R_1 = 2k\Omega; \quad R_2 = 1k\Omega$$

תרגיל 2: $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7V$

$$V_{CC} = 12V; \quad V_{EE} = 0V; \quad V_{BB} = 5.2V; \quad R_1 = 6k\Omega; \quad R_2 = 1k\Omega$$

תרגיל 3: $\beta = 50$, $V_{BE} = 0.7V$

$$V_{CC} = 20V; \quad V_{EE} = 4V; \quad V_{BB} = 8V; \quad R_1 = 3k\Omega; \quad R_2 = 1k\Omega$$

LED / תכנון מעגל של טרנזיסטור המפעיל נורה

בשלב הזה של הלימודים נתרכז בהפעלת הטרנזיסטור. כמו כל רכיב להגברת זרם, נשתמש בו כדי להפעיל צרכנים בעלי הספקים גבוהים למדיי כגון נורות.

המשימה:

לרשותנו מערכת אלקטרונית היכולה לזהות מוצרים פגומים במפעל. כשהיא מצליחה לאתר מוצר פגום, המערכת מפיקה במוצא שלה מתח של 5V וזרם מרבי של 10mA. כדי להציג את החיווי המתאים עלינו להפעיל נורת התראה. הנורה הזאת פועלת במתח של 12V, וצריכת ההספק שלה היא 3W.

פתרון:

לפני שנתחיל במלאכת התכנון ניזכר לרגע במושג הספק חשמלי, המצוין על-גבי מכשירים רבים ועל הנורה עצמה בפרט.

הגדרת ההספק: כמות העבודה ליחידת זמן (תיאור פיזיקלי) $[W] = \frac{[J]}{[sec]}$ $P = \frac{W}{t}$

כשבאים לתאר את ההספק החשמלי, אפשר לחשב אותו באמצעות המתח והזרם:

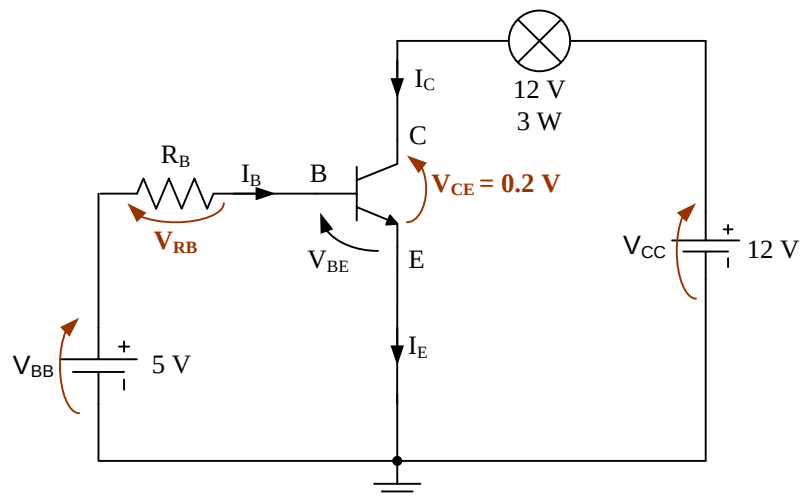
$$P = U \cdot I \quad [W] = [V] \cdot [A]$$

לכן אפשר לחשב מנתוני השאלה את עוצמת הזרם הדרושה כדי להפעיל את הנורה:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3}{12} = 0.25 A$$

כעת נחבר את הנורה למעגל עם טרנזיסטור ונדאג שהוא יימצא בתחום הרוויה שלו.

נתוני הטרנזיסטור: $\beta = 100$



חוג מספר 1

נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף ובחוק אום:

$$V_{R_B} = I_B \cdot R_B, \quad V_{BB} - V_{R_B} - V_{BE} = 0$$

ואז נקבל:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{R_B} < 10 mA$$
$$\Rightarrow R_B > 430 \Omega$$

הנחה: מעניין אותנו לעבוד בתחום הרווייה, ולכן: $I_C = 0.25 A$.

$$\beta I_B > I_C \Rightarrow I_B > \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow I_B > \frac{0.25}{100} = 2.5 mA \quad \text{כמו כן נדרש:}$$

$$2.5 mA < I_B < 10 mA ; V_{R_B} = 4.3 V$$

$$\Rightarrow 1.72 k\Omega > R_B > 430 \Omega$$

בחירת נגד שהערך שלו הוא כ- $1k\Omega$ עומדת בדרישות המערכת.

פרק 7 - ספקים ומייצבי מתח

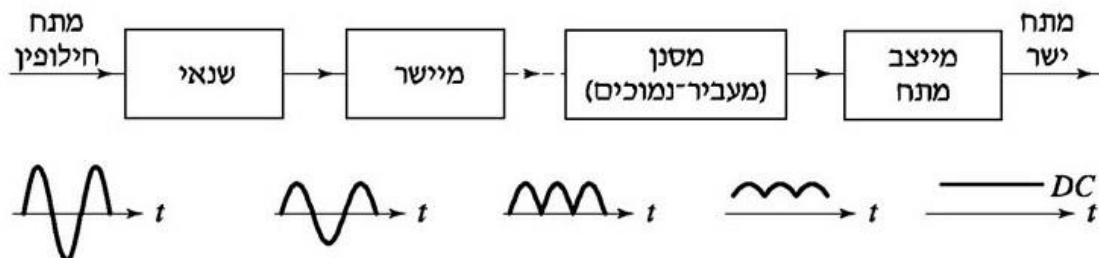
עד כאן למדנו על מעגלים אלקטרוניים שונים כגון מגברים, שניזונים ממקורות מתח ישר כלשהם. הנחנו שמקורות המתח שמזינים את המעגלים הם אידאליים, כלומר שהמתח במקור לא משתנה על-פי הפונקציה של הזמן או לפי הפונקציה של הזרם הנצרך. אבל בעצם זה מצב אידאלי שמשמש לנו בתור מודל, והוא לא קיים במציאות.

בלימודי "תורת החשמל" הכרנו את **הסוללה** (battery) – מקור מתח ישר מעשי, אבל לא אידיאלי. חוסר האידיאליות התבטא בירידה של מתח בסוללה בזמן שהזרם הנצרך עולה. את ירידת המתח הזאת ייחסנו ל**התנגדות הפנימית** של הסוללה.

בפרק הזה נכיר מקור מתח ישר אחר, נפוץ יותר: **ספק הכוח** (power supply). מדובר במעגל שניזון ממתח **החילופין** של רשת החשמל הארצית ומפיק מתח **ישר**. הרבה מכשירים חשמליים שמטרתם לשמש אותנו בחיי היום-יום, כגון טלוויזיה ומחשב, מכילים ספק כוח. חיבור המכשיר לרשת החשמל מאפשר הספקה של מתח ישר למעגלים השונים שלו באמצעות ספק הכוח.

כמו לסוללה, גם לספק הכוח יש התנגדות פנימית. היא גורמת למתח המוצא לרדת במידה כלשהי בזמן שהזרם הנצרך עולה. בנוסף, מתח המוצא משתנה לפי הפונקציה של הזמן – כלומר הוא מכיל רכיבי חילופין. כדי להתקרב למקור מתח אידאלי צריך לייצב את המתח במוצא, זאת אומרת להקטין את השינויים החלים בו בהתאם לפונקציה של הזרם או של הזמן. ספק כוח כזה נקרא ספק כוח מיוצב (stabilized power supply). בפרק הזה נכיר את המבנה של ספקי כוח מיוצבים.

באיור 7.1 מופיע תרשים מלבנים של ספק כוח מיוצב, ומתחת לכל מלבן – צורות הגל האופייניות לו. מסיבות שיובהרו בהמשך, סרטטנו את החץ שמקשר בין המיישר למסנן בקו מרוסק.



איור 7.1 תרשים מלבנים של ספק כוח מיוצב

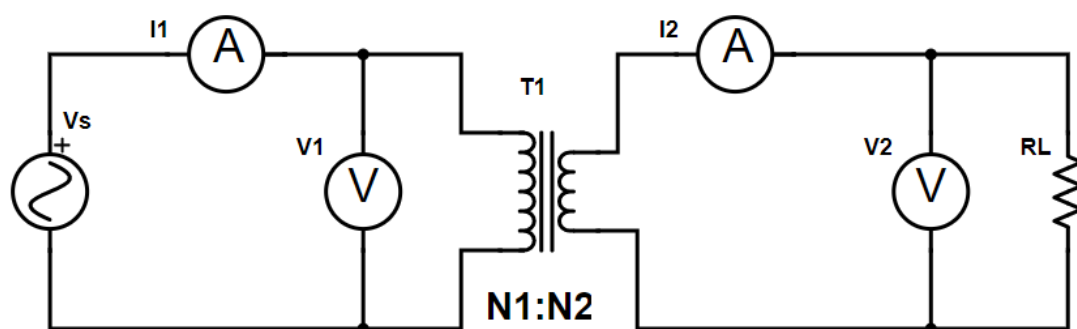
נסביר את התפקיד של כל מלבן בספק הכוח הזה.

7.1 שנאי

לרוב, המתח הישר שאנו מעוניינים לקבל במוצא של ספק הכוח קטן מאוד ביחס למתח הרשת (230V, לעומת ערך השיא של המתח שהוא 325V). הורדת המתח באמצעות שנאי לא כרוכה בבזבז רב של אנרגיה, והיא מאפשרת לנו לעבוד עם רכיבים שמופעלים במתחים נמוכים יותר.

שנאי אידאלי

שנאי כזה עשוי משני סלילים שכרוכים סביב גרעין (ליבה). הגרעין עשוי מלוחות ברזל שיש ביניהם בידוד חשמלי. איור 7.2 מתאר את סמל השנאי ואת אופן החיבור שלו אל מקור המתח ואל נגד העומס. הסליל שמקור המתח מחובר אליו נקרא סליל ראשוני, וזה שנגד העומס R_L מחובר אליו נקרא סליל משני (שניוני). המספרים שמייצגים את הכריכות, את המתח ואת הזרם בסליל הראשוני מסומנים ב- V_1, N_1 ו- I_1 בהתאמה. המספרים שמייצגים את הכריכות, את המתח ואת הזרם בסליל המשני מסומנים ב- V_2, N_2 ו- I_2 בהתאמה.



איור 7.2 תרשים של חיבורי שנאי

שנאי אידאלי מעביר את כל האנרגיה ממקור המתח V_s או מנגד העומס R_L באופן כזה, שבו הספק העומס יהיה שווה להספק המקור:

$$(7-1) \quad P_S = P_L$$

$$(7-2) \quad V_1 I_1 = V_2 I_2$$

היחס a בין המתח במוצא של השנאי ובין המתח בכניסה, תלוי ביחס בין מספר הכריכות בסליל המשני למספר הכריכות בסליל הראשוני:

$$(7-3) \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = a$$

היחס בין הזרם במוצא של השנאי ובין הזרם בכניסה, תלוי ביחס בין מספר הכריכות בסליל הראשוני למספר הכריכות בסליל המשני:

$$(7-4) \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{a}$$

דוגמה 7-1 חישובי מתח וזרם בשנאי

השנאי הנתון לפניכם מחובר למקור מתח של $230V$ ולעומס התנגדוטי של $R_L = 100\Omega$. מספר הכריכות בסליל הראשוני הוא $2,300$. בסליל המשני יש 230 כריכות.

- חשבו את המתח על נגד העומס.
- חשבו את הזרם בנגד העומס.
- חשבו את ההספק שמתפתח בנגד העומס.
- חשבו את הזרם שנצרך מהמקור.
- חשבו את ההספק שנצרך מהמקור.

פתרון

המתח בסליל הראשוני: $V_1 = 230V$

מספר הכריכות בסליל הראשוני: $N_1 = 2300$

מספר הכריכות בסליל המשני: $N_2 = 230$

א. נציב במשוואה 7-3: $V_2/230 = 230/2300$

מפתרון המשוואה נקבל: $V_2 = 23V$

ב. נחשב את הזרם לפי חוק אום: $I_L = I_2 = V_2/R_L = 230mA$

ג. הספק העומס: $P_L = I_2 V_2 = 5.29W$

ד. נציב במשוואה 7-4: $0.23/I_1 = 2300/230$

מפתרון המשוואה נקבל: $I_1 = 23mA$

ה. הספק המקור: $P_S = I_1 V_1 = 5.29W$

אפשר לראות שעל-פי התוצאות בסעיפים ג' ו-ה', ההספק שמושקע שווה להספק שנצרך.

תרגול

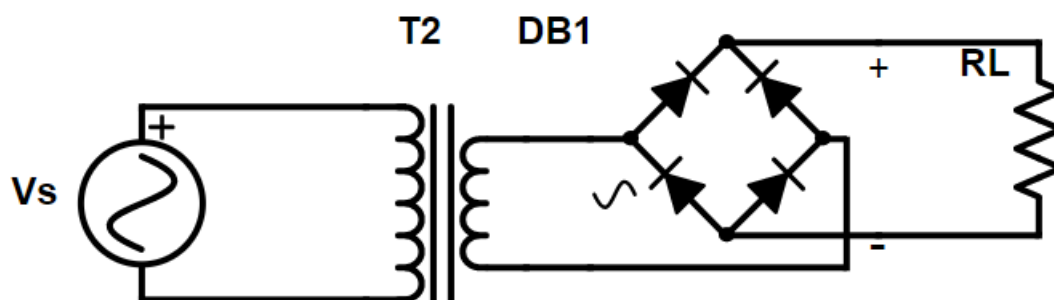
שאלה 7.1

שנאי מחובר בסליל הראשוני למתח של $230V$. בנגד עומס של $R_L = 9\Omega$ שמחובר לסליל המשני של השנאי, נמדד מתח מוצא של $18V$. מספר הכריכות בסליל הראשוני הוא 920 .

- כמה כריכות יש לסליל המשני?
- מה עוצמת הזרם בנגד העומס?
- מה עוצמת הזרם בסליל הראשוני?
- מה ההספק של נגד העומס?

7.2 מיישר

במבוא של המיישר מתקבל מתח חילופין, שהממוצע שלו הוא אפס. במוצא של המיישר המתח הוא חד-כיווני, והממוצע שלו שונה מאפס – כמו שתואר לעיל באיור 7.1. מתח כזה מכיל גם רכיב חילופין ניכר. המיישר עשוי מארבע דיודות, והמבנה שהן יוצרות נקרא גשר דיודות. איור 7.3 מציג את גשר הדיודות ואת החיבור שלו אל מוצא השנאי.



איור 7.3 תרשים של חיבור גשר הדיודות אל השנאי

עקרון הפעולה של מיישר גל-שלם¹

במחצית החיובית של מתח המקור הזרם עובר במסלול האדום, ואילו במחצית השלילית של המחזור הזרם עובר במסלול הכחול. בשני המקרים הזרם בנגד נע מלמעלה למטה בקוטביות המתאימה, על-פי הסימון בגשר הדיודות.

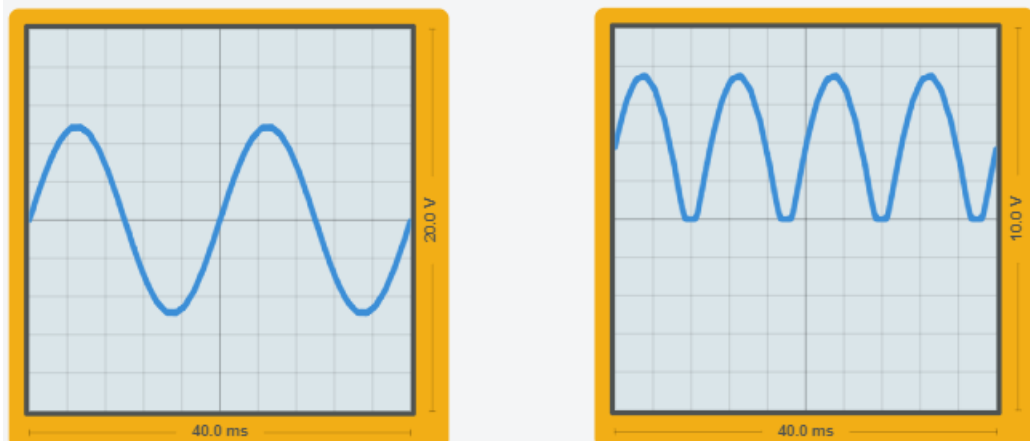
איור 7.4 מסלולי הזרם בגשר הדיודות

איור 7.5 מציג את אות המתח במבוא של הגשר (החלק השמאלי באיור) ואת אות המתח המיושר במוצא של הגשר (החלק הימני באיור) ביחס לזמן. אפשר לראות שהממוצע של המתח בכניסה אל הגשר הוא אפס, מכיוון שהחלקים (החיובי והשלילי) שווים בעוצמתם. אבל הממוצע של המתח ביציאה מן הגשר הוא ערך חיובי, וכאשר V_m הוא מתח השיא הערך שלו הוא: $V_{AV} = 2V_m/\pi$.

למשל, לאחר יישור באמצעות גשר דיודות המתח הממוצע ברשת החשמל בישראל יהיה:

$$V_{AV} = 2 \cdot 325/\pi = 206.9V$$

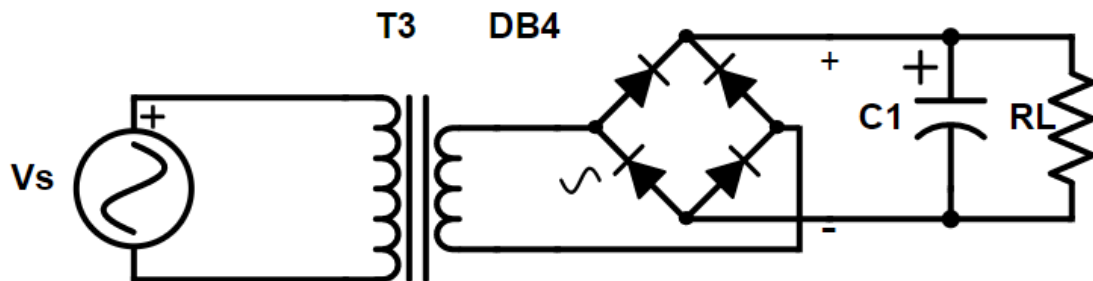
¹ במיישר גל-שלם משתמשים בשני החלקים של אות המתח – מחצית אחת חיובית ומחצית אחת שלילית. במיישר חצי-גל משתמשים רק בחלק אחד של אות המתח (חיובי או שלילי).



איור 7.5 אותות המתח בכניסה וביציאה מגשר הדיודות

מסנן מעביר-נמוכים

התפקיד של המסנן הוא לדכא במידה רבה את רכיב החילופין ולהקטין אותו, לעומת הרכיב הישר (הממוצע). צורת הגל במוצא של המסנן מתוארת באופן סמלי באיור 7.1, והיא מכונה אדווה (ripple) בגלל הדמיון שלה לצורה של גל על-פני מים שקטים. המסנן עשוי מקבל, שצורת החיבור שלו לנגד העומס היא במקביל. הערך של הקבל נקבע על-פי התדר של אות המתח ועל-פי צריכת הזרם של נגד העומס. איור 7.6 מתאר את תרשימים החיבורים של השנאי עם מיישר גשר הדיודות והמסנן.



איור 7.6 תרשימים ספק הכוח.

עוצמת האדווה ΔV במוצא של המסנן מחושבת על-פי הנוסחה הזאת:

$$\Delta V \cong \frac{V_{Om}}{2R_L C f}$$

כאשר:

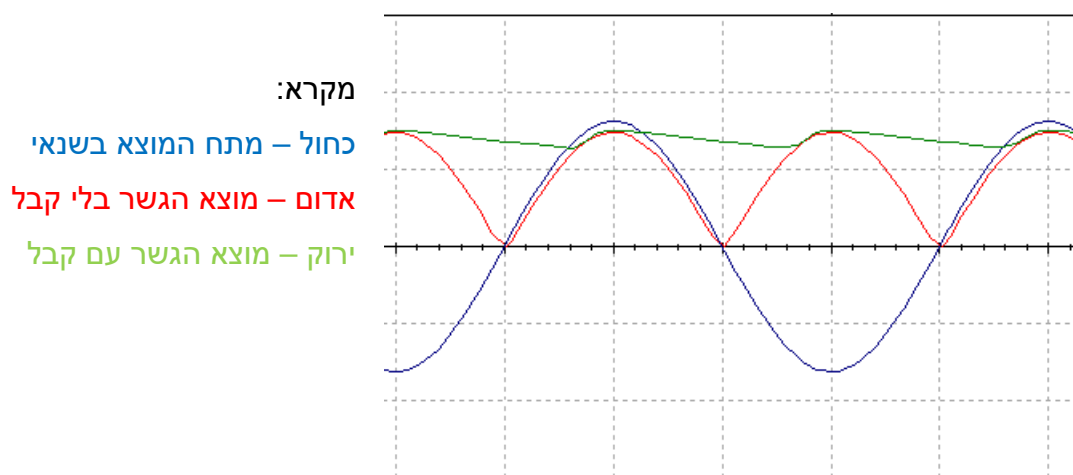
f – התדר של אות המתח [Hz]

V_{Om} – הערך של המתח המרבי במוצא [V]

C – הערך של הקבל [F]

R_L – נגד העומס [Ω]

באיור 7.7 מוצגות צורות גל במוצא של שנאי, בנגד עומס בלי קבל ובנגד עומס עם קבל. כפי שאפשר לראות, במוצא של השנאי צורת גל המתח (כחול) היא של אות חילופין. כשנמדוד את המתח על-פני נגד העומס ללא קבל הסינוס, נקבל מתח מיושר (אדום) בתדירות הגבוהה פי 2 מאות של מתח חילופין בעל כיוון אחד בלבד. לאחר הוספת הקבל במוצא של הגשר יתקבל מתח (ירוק) שנע בתדירות זהה קרוב לשיאו של המתח המיושר. ההפרש בין הערך המרבי לערך המזערי במוצא של המסנן מגדיר את עוצמת האדווה של המתח הישר שמתפתח על נגד העומס.



איור 7.7 צורות הגלים בספק הכוח

דוגמה 7-2 חישוב המתח והאדווה בנגד העומס

נתון לפניכם מעגל כמו זה שמתואר באיור 7.6. השנאי וגשר הדיודות הם אידיאליים. נתוני המעגל:

$$V_S = 230V \quad N_1/N_2 = 10/1 \quad C = 470\mu F \quad R_L = 100\Omega$$

- חשבו את המתח היעיל והמרבי במוצא של השנאי.
- חשבו את עוצמת המתח של האדווה במוצא של השנאי.

פתרון

- לפי היחס $V_2/230 = 1/10$ נקבל $V_2 = 23V$. הערך $230V$ מייצג את הערך היעיל, אז גם המתח במוצא של השנאי מחושב כמו ערך יעיל. לכן המתח המרבי במוצא של השנאי הוא: $V_{Om} = \sqrt{2} \cdot V_2 = 35.53V$
- ב. $\Delta V \cong V_{Om}/(2R_L C f) = 35.53/(2 \cdot 100 \cdot 470\mu \cdot 50) = 6.92V$

תרגול

שאלה 7.2

- הציעו דרך כדי להקטין את מתח האדווה שמתפתח על נגד העומס.

ב. הראו על-פי הנתונים של דוגמה 7.2 את הערך של מתח האדווה לפי הדרך שהצעתם.

רמז: התבוננו בנוסחת החישוב של מתח האדווה. איזה פרמטר אפשר לשנות?

שאלה 7.3

תלמיד נדרש לבדוק את מידת ההשפעה של צריכת הזרם במעגל. הוא חיבר בשביל זה למעגל המתואר באיור 7.6 רכיבים עם הנתונים הבאים וחישב את עוצמת המתח של האדווה.

$$V_S = 100V \quad N_1/N_2 = 10/1 \quad C = 1000\mu F \quad R_L = 100\Omega$$

לאחר מכן התלמיד החליף את נגד העומס בנגדים $R_L = 150\Omega$ ו- $R_L = 75\Omega$ וחישב מחדש בכל פעם את עוצמת המתח של האדווה.

א. חשבו את עוצמת המתחים של האדווה בעבור הנגדים.

ב. חשבו את זרם העומס המרבי בעבור כל אחד מהם.

ג. הציגו את התוצאות שלכם בטבלה מסכמת: ערך הנגד, ערך הזרם המרבי וערך האדווה.

ד. קבעו לפי תוצאות החישוב שלכם איך משפיעה צריכת הזרם של הנגד על עוצמת המתח של האדווה.

7.3 מייצב מתח

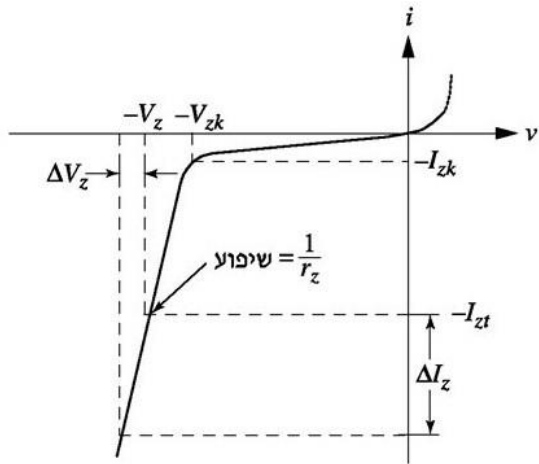
כפי שראינו האדווה במוצא של המסנן תלויה בצריכת הזרם של נגד העומס. היא משתנה ביחס ישר לצריכת הזרם, ככל שהצריכה גדולה יותר גם עוצמת האדווה גדולה יותר. התפקיד העיקרי של המייצב הוא להקטין אותה ככל האפשר, באופן שהמתח במוצא של המייצב יהיה ישר, "נקי" ככל האפשר מאדוות ובלתי־תלוי בזרם של נגד העומס. כמו כן, המייצב אמור לדאוג שרמת המתח הישר במוצא של המסנן תהיה קבועה כמה שיותר ובלתי־תלויה ברמה הממוצעת של המתח במבוא.

אפשר לממש מייצב מתח בכל מיני שיטות: מייצב מתח מקבילי, מייצב מתח טורי ומייצב מתח ממותג.²

בהמשך הפרק נדון במייצב מתח מקבילי ובמייצב מתח טורי.

רוב מייצבי המתח שאנחנו משתמשים בהם היום מבוססים בדרכי זז או אחרת על דיודת זנר. הגדלים העיקריים של דיודות הזנר מתוארים באיור 7.8.

² מייצב מתח ממותג הוא הטכנולוגיה הנפוצה כיום בתחום ספקי הכוח. הנושא הזה חורג מגבולות יחידת הלימוד, ולכן לא נדון בו.



איור 7.8 גדלים אופייניים של דיודת זנר

V_z מתח הפריצה הנומינלי של הדיודה. המתח הזה נתון עבור זרם מסוים שמכונה I_{zt} .

I_{zm} הזרם האחורי המרבי שמותר להזרים בדיודה, בלי לגרום לה נזק.

P_z ההספק המרבי שמותר לפזר בדיודה, בלי לגרום לה נזק.

$$(7-5) P_z \cong I_z V_z$$

I_{zk} הזרם האחורי המזערי הדרוש לדיודה, כדי שתהיה במצב פריצה ותשמור על מידה סבירה של ייצוב המתח. הערך שלו נבחר באופן שרירותי על-ידי יצרנים, אך בדרך כלל הוא נע בין 0.5mA ל-1mA בדיודות עם הספק נמוך.

V_{zk} המתח המתאים לזרם I_{zk} על-גבי אופיין הדיודה. המתח V_{zk} והזרם I_{zk} מגדירים את נקודת ה"ברך" על-גבי האופיין.

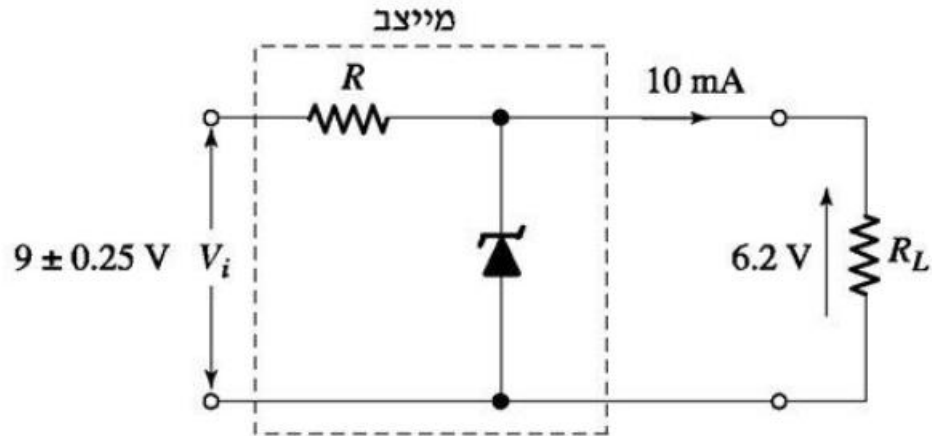
I_{zt} זרם אחורי באזור העבודה המקובל של הדיודה. בדרך כלל הוא כ-1/3 או כ-1/4 מהזרם המרבי שלה. בזרם הזה היצרן מציין את מתח הפריצה הנומינלי V_z .

מייצב מתח נקרא מקבילי (shunt regulator) כשהמתח במוצא מופק במקביל לרכיב הייצוב. מייצב מתח מקבילי פשוט, מבוסס על חיבור נגד העומס במקביל לדיודת זנר. מכיוון שאופיין הפריצה תלול מאוד המתח על הדיודה (ובו בזמן גם על נגד העומס) לא משתנה כמעט, גם כשהזרם עצמו משתנה בתחום רחב. נבחר את זה בדוגמה הבאה.

דוגמה 7-3 מייצב מתח מקבילי פשוט

באיור 7.9 נתון מייצב זנר. נגד העומס שלו צורך 10mA ומופעל ממקור מתח של 6.2V . המתח במבוא בלתי־מיוצב ומשתנה בתחום של $9 \pm 0.25\text{V}$. מתח הפריצה של דיודת הזנר הוא 6.2V וההספק המרבי שלה הוא 250mW .

הזרם המינימלי: $I_{zk} = 2\text{mA}$ $I_{zt} = 5\text{mA}$



איור 7.9 מייצב זנר

- חשבו את התחום המותר של הערכים בנגד R .
- חשבו את ההספק המרבי שיכול להתפתח בנגד R .
- האם ההספק המרבי של הדיודה מתאים למעגל?

פתרון

- אנחנו מניחים שהדיודה פועלת בזרם שהיצרן המליץ עליו, כלומר 5mA . דרך הנגד R חייבים להגיע בכל תנאי זרם של 10mA לנגד העומס וזרם של 5mA למייצב הזנר. המצב הגרוע ביותר מבחינה זו יהיה כשהמתח במבוא הוא מינימלי. לכן נדרש לנו:

$$\frac{V_{i,min} - V_z}{R} \geq 10\text{mA} + 5\text{mA} = 15\text{mA}$$

$$R \leq \frac{8.75 - 6.2}{0.015} = 170\Omega = R_{max}$$

כל נגד בעל ערך קטן מ- 170Ω יבטיח לנו שדיודת הזנר תיפרץ, ושהזרם דרכה יהיה 5mA או יותר.

הערך המזערי של הנגד R נקבע לפי הזרם המרבי שמותר להזרים בדיודה. את עוצמת הזרם הזה אפשר למצוא באמצעות נוסחה (7-5):

$$I_{zm} \approx \frac{P_z}{V_z} = \frac{0.25}{6.2} = 40.3\text{mA}$$

מבחינת הדיודה המצב הגרוע ביותר הוא כשזרם נגד העומס עומד על אפס, וכל הזרם מופנה אליה. הערך המרבי של הזרם שעובר בדיודה יתקבל עבור מתח מבוא מרבי בנגד R מזערי. נדרש שהערך הזה לא יהיה יותר מ-40.3mA:

$$\frac{9.25 - 6.2}{R} \leq 40.3mA$$

$$R \geq \frac{3.05}{0.0403} = 75.6\Omega = R_{min}$$

נסכם את תחום הערכים של הנגד R:

$$75.6\Omega \leq R \leq 170\Omega$$

ב. ההספק המרבי יתפזר בנגד R כשיזרום בו זרם מרבי, כלומר כשהמתח במבוא יהיה מרבי.

$$P_{max} = \frac{(V_{i,max} - V_z)^2}{R} = \frac{(9.25 - 6.2)^2}{170} \approx 55mW$$

ג. ההספק המרבי יתפזר בדיודת הזר כשיזרום בה זרם מרבי. דבר זה יקרה אם נגד העומס ינותק מסיבה כלשהי ומתח המבוא יהיה מרבי, כלומר: $V_i = 9.25V$. אז הזרם המרבי יהיה אם כן:

$$I_{z,max} = \frac{V_{i,max} - V_z}{R} = \frac{9.25 - 6.2}{170} = 17.94mA$$

וההספק שיתפזר בדיודה יהיה:

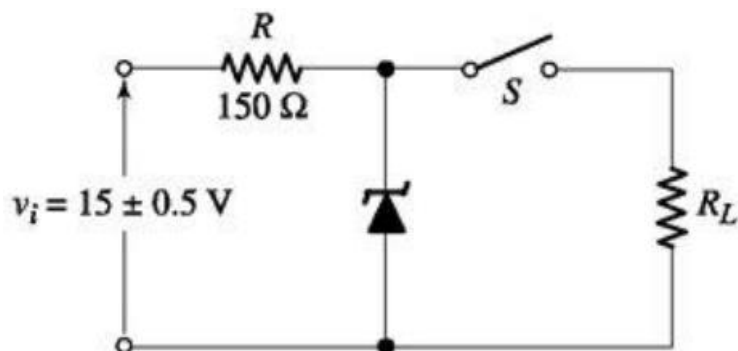
$$P_{z,max} = I_{z,max}V_z = 17.94mA \times 6.2 = 111.2mW$$

ההספק הזה קטן מ-250mW, ולכן הדיודה מתאימה למעגל.

 תרגול

7.4 שאלה

באיור 7.10 מתואר מייצב זנר. המתג S מאפשר לנו לחבר את הזרם לנגד העומס או לנתק אותו.



איור 7.10

המתח הנומינלי של דיודת הזנר הוא $V_z = 8.2V$, והזרם המזערי שנדרש לעבור דרכה הוא

$$I_{zk} = 1mA$$

חשבו את:

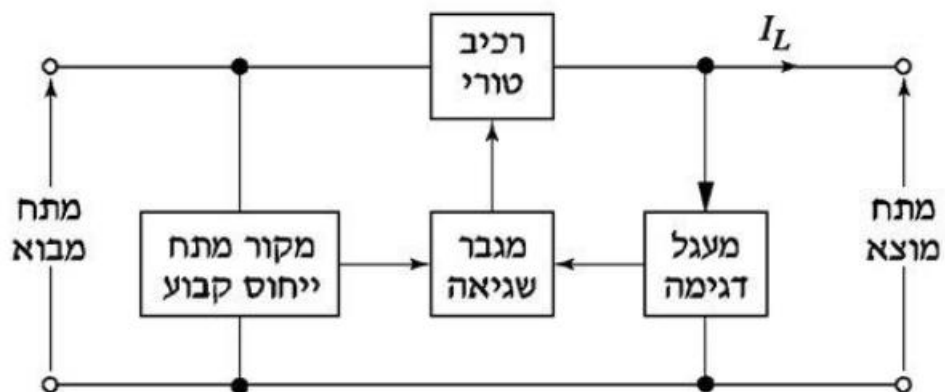
א. הערך המזערי המותר בנגד העומס R_L .

ב. ההספק המרבי שיכול להתפתח בדיודה ובנגד R .

עליכם להתחשב בעובדה, שהעומס יכול להשתנות בעקבות פתיחה או סגירה של המתג S .

במייצב זנר מתח האדווה על-פני נגד העומס קטן בהרבה ממתח האדווה שבמבוא של המייצב. מתח אדווה נמוך על-פני נגד העומס מחייב נגד R גדול ככל האפשר, אולם נגד כזה מגביל את הזרם בנגד העומס.

הפתרון לבעיה הזאת מבוסס על ייצוב טורי עם משוב, כמו שמתואר באיור 7.11. כמו בכל מערכת הפועלת במעגל סגור, הרעיון הבסיסי כאן הוא לייצב את המוצא על ערך ייחוס שייקבע מראש. המתח של המוצא נדגם במעגל הדגימה ומוחזר בתור משוב למגבר השגיאה, שלמבוא האחר שלו מחובר מקור מתח ייחוס קבוע. המגבר מפיק אות שגיאה ומזין אותו לרכיב הייצוב הטורי, שמשנה בהתאם את זרם נגד העומס.



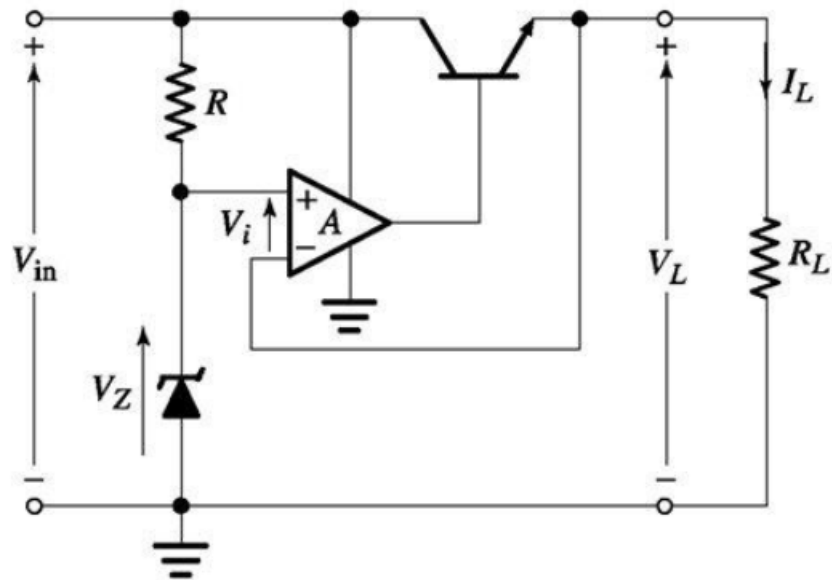
איור 7.11 המבנה העקרוני של מייצב טורי עם משוב

המתח שמעגל הדגימה מפיק הוא יחסי למתח המוצא, ומערכת כזו יכולה להיות גם מחלק מתח פשוט.

כשמתח המוצא ממעגל הדגימה משתנה, המגבר משנה גם הוא את מתח המוצא שלו וגורם לרכיב הטורי לשנות את מידת ההולכה שלו. בעקבות השינוי ברכיב הטורי משתנה מתח המוצא של המייצב, אבל במגמה הפוכה מזו של השינוי הראשוני: ירידה במתח של המוצא תגרום לרכיב הטורי להוליך יותר, וככה יעלה המתח במוצא. עלייה במתח של המוצא תגרום לרכיב הטורי להוליך פחות, וככה יירד המתח במוצא.

7.4 מימוש מייצב טורי עם מגבר שרת

באיור 7.12 מתואר מימוש של המעגל העקרוני שהוצג באיור 7.11.



איור 7.12 מימוש של ייצוב טורי עם משוב שלילי באמצעות מגבר שרת

מגבר השגיאה הוא מגבר השרת שעליו האות A – היא מסמלת את ההגבר שלו. הרכיב הטורי הוא טרנזיסטור. נניח שזרם העומס (I_L) גדל מסיבה כלשהי. זה יגרום לעליית מתח בפולט של הטרנזיסטור. מגבר השגיאה מגביר את עליית המתח הזאת, והיא מתורגמת לירידת מתח בבסיס של הטרנזיסטור בגלל פעולת ההיפוך של המגבר. הירידה של המתח בבסיס מועברת לפולט ומקטינה את מגמת העלייה של המתח בפולט, שנבעה מהגידול בזרם העומס. ככל שההגבר של המגבר (A) יהיה גדול יותר, הפעולה של תיקון המתח בפולט תהיה מהירה יותר והמתח במוצא יהיה יציב יותר. המצב האידאלי כמובן הוא כזה שיש בו ערך אינסופי של A, כפי שמוסבר להלן.

חישוב מתח המוצא של מעגל עם הגבר אינסופי

כידוע, מגבר שרת עם משוב שלילי נוטה להקטין את מתח המבוא שלו (V_i) עד למינימום. הערך המינימלי הזה קטן ככל שהגבר החוג הפתוח של המגבר (A) גדול יותר. אם כן, במגבר שרת שהגבר המתח שלו הוא אינסופי – המתח V_i שואף לאפס. מכאן נובע שמתח המוצא הוא:

$$(7-6) \quad V_L = V_Z - V_i \cong V_Z$$

דוגמה 7-4 מייצב מתח טורי

באיור 7.12 מתואר מעגל של מייצב מתח. נתוני המעגל הם:

$$V_Z = 6.8V ; V_{in} = 15 \pm 0.4V$$

מגבר השרת אידאלי, זרם המוצא המרבי שלו הוא 8mA. בטרנזיסטור: $\beta = 100$.
חשבו את:

- הערך הדרוש בנגד R כדי לקבל את תנאי העבודה המומלצים של דיודת הזנר.
- המתח במוצא של המעגל.
- הערך המזערי ביותר של R_L שאותו מותר עדיין לחבר למעגל.
- ההספק של הפיזור בטרנזיסטור.

פתרון

$$R = \frac{V_{in} - V_Z}{I_Z} = \frac{15 - 6.8}{0.005} = 1.64k\Omega \quad \text{א.}$$

ב. מפני שהמגבר הוא אידאלי ופועל עם משוב שלילי $-V_i = 0$. ואז:

$$V_L = V_Z - V_i = V_Z = 6.8V$$

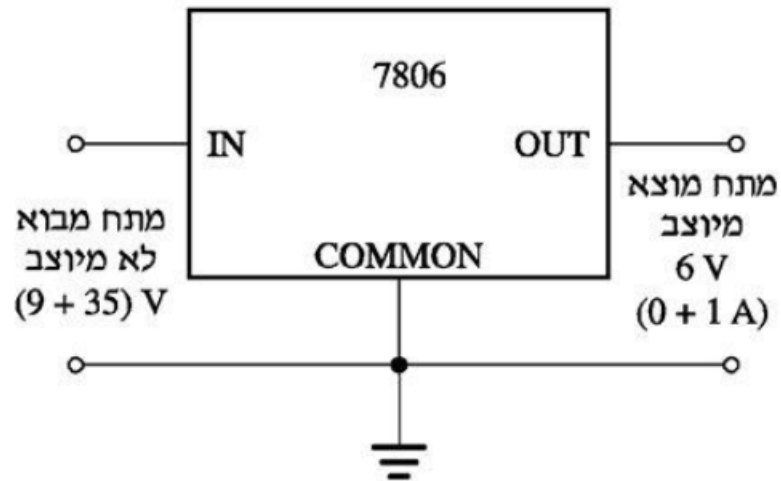
ג.

$$R_{L,min} = \frac{V_L}{I_{L,max}} = \frac{V_L}{(\beta + 1)I_{B,max}} = \frac{6.8}{101 \times 8mA} \cong 8.5\Omega$$

$$P_{D,max} = I_{C,max} \cdot V_{CE,max} = 800mA(V_{in,max} - V_L) \quad \text{ד.}$$

$$P_{D,max} = 800mA(15.4 - 6.8) = 6.88W$$

סדרת המייצבים 78XX מפיקה מתחים קבועים (fixed). הקידומת 78 מציינת מתח חיובי. האותיות XX הן בעצם מתח המוצא. למשל: 7812 הוא מייצב שמפיק מתח חיובי של 12V. המתחים התקניים במשפחה הזאת הם: 5V, 6V, 8V, 12V, 15V, 18V, 24V. לכל המייצבים האלה יש אריזה עם שלושה הדקים, והשימוש בהם דורש הבנה של נתוני היצרן בלבד – לדוגמה: מתח מבוא מרבי ומזערי, זרם מוצא מרבי וכו'. באיור 7.13 מוצג תיאור של מייצבים מהמשפחה הזאת. ליד ההדקים מצוינים הנתונים הבסיסיים שלהם. בטבלה שאחרי האיור מופיעים נתונים של המייצב 7806A. האות הנוספת (A) מציינת את תחום הטמפרטורות שבו המייצב יכול לפעול, כפי שמצוין בהערה 1 בתחתית הטבלה.



איור 7.13 תיאור עקרוני של המייצב מהמשפחה 78XX

נסביר את הנתונים העיקריים של הטבלה לפי סדר הופעתם:

1. הנתון הראשון בטבלה הוא **מתח המוצא** (output voltage) בערך האופייני לו (Typ), כלומר 6V. נתון זה נבדק בתנאים שמופיעים מעל הטבלה, כלומר $I_o = 1A$, $V_{in} = 11$. כפי שרואים בטבלה היצרן מבטיח שהפיזור של מתח המוצא בין רכיבים מאותו הסוג, שמיוצרים במפעל שלו, לא יעלה על $\pm 0.12V$; זאת אומרת $\pm 5\%$ מהערך הנקוב.
2. הנתון השני מציין עד כמה המתח של המוצא מתפזר בין הרכיבים האחרים בתנאים של מתחי מבוא וזרמי מוצא השונים זה מזה. מידת הפיזור האפשרית לא עולה על $\pm 0.24V$; זאת אומרת $\pm 10\%$ מהערך הנקוב.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

($V_{in} = 11\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to T_{high} [Note 1], unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	5.75	6.0	6.25	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) 8.0 Vdc $\leq V_{in} \leq 21\text{ Vdc}$ 9.0 Vdc $\leq V_{in} \leq 21\text{ Vdc}$	V_O	5.7 —	6.0 —	6.3 —	Vdc
Line Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 2) 8.0 Vdc $\leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$ 9.0 Vdc $\leq V_{in} \leq 21\text{ Vdc}$	Reg_{line}	— —	0.5 0.8	24 12	mV
Load Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 2) 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg_{load}	—	1.3	30	mV
Quiescent Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_B	—	3.3	8.0	mA
Quiescent Current Change 8.0 Vdc $\leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$ 5.0 mA $\leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	— —	0.3 0.088	1.3 0.5	mA
Ripple Rejection 9.0 Vdc $\leq V_{in} \leq 19\text{ Vdc}$, $f = 120$	RR	58	65	—	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	—	2.0	—	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) 10 Hz $\leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	—	10	—	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1\text{ kHz}$	r_o	—	0.9	—	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	—	0.2	—	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	—	2.2	—	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	—	-0.3	—	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

NOTES: 1. $T_{low} = -40^\circ\text{C}$ for MC78XXAC,C $T_{high} = +125^\circ\text{C}$ for MC78XXAC,C

2. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

באדיבות חברת MOTOROLA

3. ייצוב כנגד שינויים במתח המבוא – Line Regulation

השינוי הזה קורה במתח המוצא ביחידות של mV, עבור תחום נתון של שינוי במתח המבוא. לדוגמה: כשהמתח במבוא משתנה בתחום של $25V \pm 8.6V$ והזרם בנגד העומס נשמר בקביעות ($I_o = 500mA$), המתח במוצא משתנה רק ב-5mV. מפני שלא נאמר אחרת מדובר בכל תחום הטמפרטורות, שמצוינות לפניכם בהערה 1 בתחתית הטבלה. שימו לב! 5mV הוא הערך האופייני (Typ), ובמקרה קיצוני – השינוי עלול להגיע ל-60mV!

4. ייצוב כנגד שינויים בזרם העומס – Load Regulation

השינוי הזה קורה במתח המוצא ביחידות של mV, עבור תחום נתון של שינוי בזרם של נגד העומס. לדוגמה: בטמפרטורות החדר ($25^\circ C$), כשהזרם בנגד העומס משתנה בתחום של $1.5A \pm 5mA$ – מתח המוצא משתנה ב-1.3mV בלבד. שוב, הערך הזה אופייני, ובמקרה הקיצוני השינוי עלול להגיע ל-100mV.

5. זרם רגיעה – Quiescent Current

הזרם הזה זורם מההדק COMMON אל הארקה של המעגל. הערך האופייני של זרם הרגיעה הוא 3.3mA.

6. שינוי זרם הרגיעה – Quiescent Current Change

זה שינוי שקורה בזרם הרגיעה ביחידות של mA, עבור תחום נתון של שינוי במתח של המבוא או בזרם של המוצא. לדוגמה: בטמפרטורות החדר עבור תחום מתחים של $21V \pm 8.6V$ במבוא – זרם הרגיעה ישתנה לכל היותר ב-0.8mA.

7. דחיית האדווה – Ripple Rejection

זה היחס בין העוצמה של האדווה במבוא המייצב לעוצמה של האדווה במוצא המייצב. היחס הזה נמדד ביחידות של dB.

$$RR = 20 \log \frac{\Delta V_i}{\Delta V_o} \quad (7-7)$$

שימו לב! היצרן מודד דיכוי של אדווה סינוסואידלית במבוא בתדר של 120Hz.

8. מתח מזערי לפעולה – Dropout Voltage

זה הפרש מזערי של מתחים שחייב להתקיים בין המבוא למוצא, כדי להבטיח פעולה תקינה של המייצב. הערך האופייני בטבלה הוא 2V.

9. התנגדות מוצא – Output Resistance

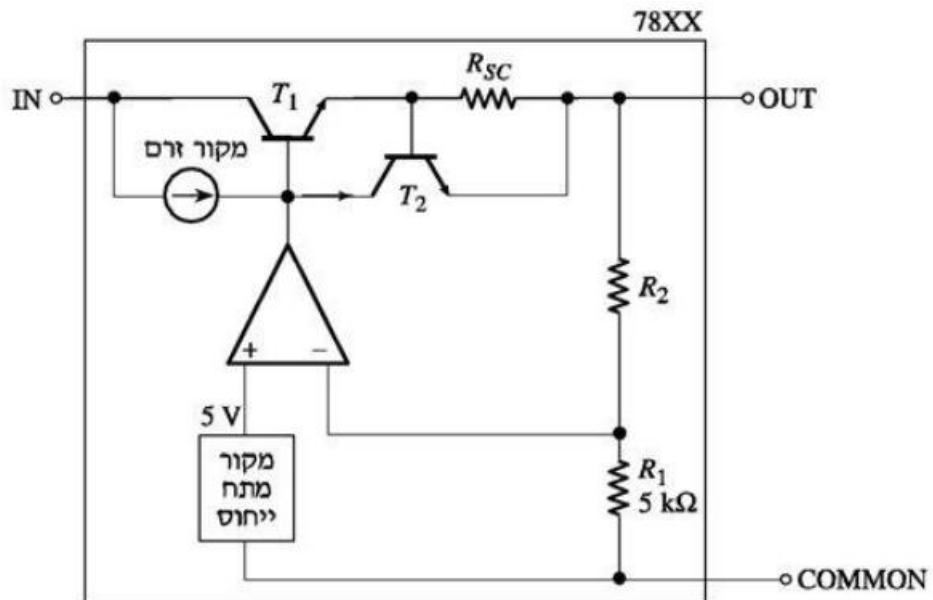
זאת ההתנגדות הדינמית במוצא. הגודל האופייני בטבלה הוא $0.9\text{m}\Omega$. פירוש הדבר למשל הוא, ששינוי של 100mA בזרם של המוצא יגרום שינוי של 0.09mV בלבד במתח של המוצא.

10. מוצא (רגעי) מרבי – Peak Output Current

זה הזרם המרבי במוצא, בתנאי שהוא קיים למשך זמן קצר ביותר (דופק זרם). הערך האופייני שלו בטבלה הוא 2.2A .

7.5 המבנה הפנימי של המייצב 78XX

איור 7.14 מתאר באופן סכמתי את המבנה הפנימי של המייצב 78XX .



איור 7.14 המבנה הפנימי של מייצבי הסדרה 78XX

לרכיב הזה שלושה הדקים בלבד. הם מסומנים כך: IN, OUT ו-COMMON. העובדה הזאת הופכת אותו לרכיב פשוט ונוח להפעלה.

הטרנזיסטור T_1 ממלא את תפקיד הרכיב הטורי. דרכו ודרך הנגד R_{SC} עובר זרם העומס, שמחבר בין ההדק OUTPUT להדק COMMON.

הנגד R_{SC} והטרנזיסטור T_2 יכולים להגביל את הזרם. ברגע שהעומס של הזרם גדול, המתח על הנגד R_{SC} עולה לסביבות ה- 0.7V . טרנזיסטור T_2 נכנס לפעולה ומקטין את הזרם בבסיס של טרנזיסטור T_1 . בעקבות זאת קטן זרם העומס.

הנגדים R_1 ו- R_2 הם נגדי משוב, שקובעים את המתח בהדק ה-(-) של המגבר. ערכו של הנגד R_2 קובע את מתח המוצא של המייצב. מתח הייחוס הוא 5V, ולכן המתח של המוצא יתקבל לפי הנוסחה הבאה:

$$V_{out} = 5(1 + \frac{R_2}{5k\Omega})$$

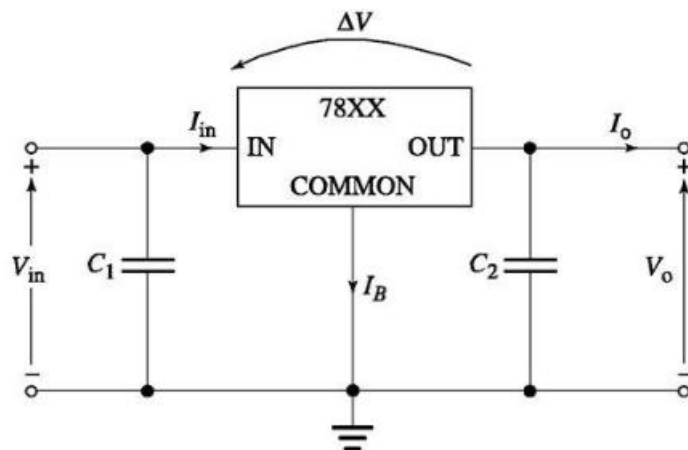
אם $R_2 = 0$, המייצב הוא 7805. אם $R_2 = 10k\Omega$, המייצב הוא 7815.

המקור של הזרם נועד לספק את זרם הבסיס לטרנזיסטור T_1 . זה רכיב של המייצב שלא הכרנו עד עכשיו, והוא יכול לשפר את הביצועים במעגל; לא נדון בניתוח הפעולה של מקור הזרם.

7.6 יישומים של מייצבי מתח משולבים

מייצב בסיסי

המייצב הבסיסי מתואר באיור 7.15. שימו לב, מתוך ההדק COMMON יוצא זרם רגיעה (quiescent current), I_B , וזרם אל הארקה של המעגל. הערך של הזרם הזה מפורט אצל היצרן (ראו טבלת נתונים של 7806), והוא ייקבע באמצעות צריכת הזרם הפנימית של המעגל ושל הנגדים R_1 ו- R_2 – כפי שמתואר באיור 7.14. עבור הרכיב 7806, הערך האופייני לזרם כזה הוא 3.3mA (בטמפרטורה של 25°C).



איור 7.15 מייצב בסיסי

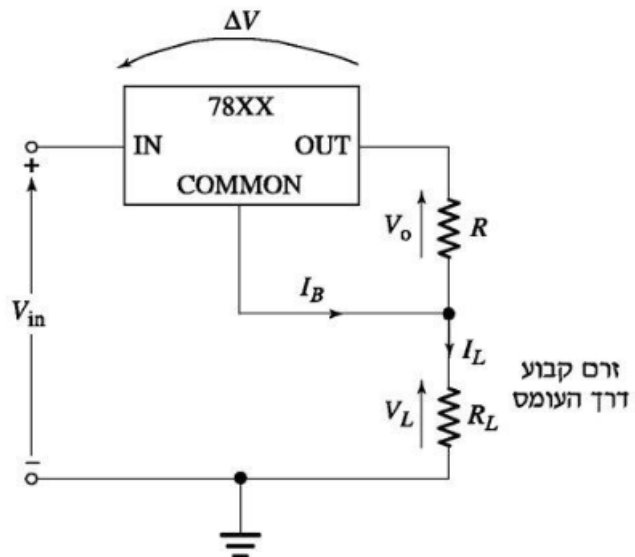
המתח במבוא V_{in} צריך להיות גדול יותר מהמתח שבמוצא, לפחות בשיעור של ΔV על-פי הציון של היצרן. בטבלאות הנתונים מופיע הנתון הזה בשם dropout voltage. הערך האופייני למתח הזה עבור הרכיב 7806 (ראו טבלת נתונים) הוא 2V. אם $\Delta V > 2V$, המתח בין הקולט לפולט בטרנזיסטור T_1 (איור 7.14) יהיה נמוך מדי, והטרנזיסטור לא יהיה באזור הפעיל.

הקבל C_2 משפר את התגובה של המייצב לשינויים פתאומיים בעומס ומונע תנודות במעגל. הקבל C_1 נחוץ כדי לסנן רעשים (אותות טפיליים בתדרים גבוהים) כשהמוליכים שבין המייצב ובין המיישר הם ארוכים.

הזרם של המוצא I_o שווה בקירוב טוב מאוד לזרם של המבוא, I_{in} (בזרמי מוצא גדולים), מכיוון שזרם הרגיעה זניח בהשוואה לזרם המוצא (מיליאמפרים בודדים לעומת מאות מיליאמפרים).

המייצב בתור מקור זרם קבוע

אם נחבר נגד חיצוני למייצב, אפשר להפוך אותו למקור זרם קבוע – כמו שמתואר לפניכם באיור 7.16.



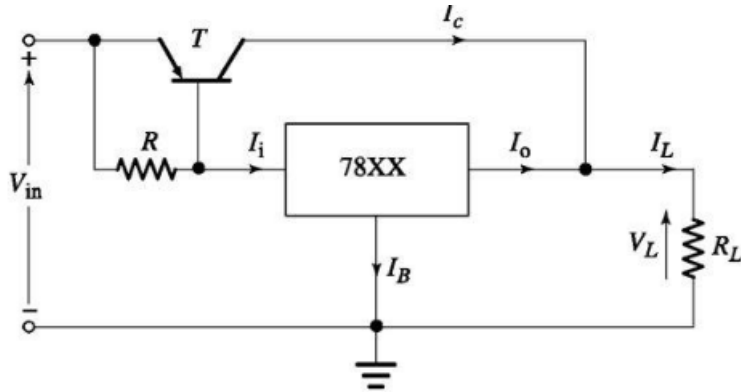
איור 7.16 שימוש במייצב 78XX כמקור זרם קבוע

המתח בין ההדקים COMMON ו-OUT במייצב הוא קבוע, והערך שלו הוא V_o . לפיכך בנגד R , שמחבר בין ההדקים האלה, זורם זרם קבוע בשיעור של $\frac{V_o}{R}$. הערך של הזרם הקבוע בנגד העומס R_L יתקבל על-פי המשוואה הזאת:

$$I_L = \frac{V_o}{R} + I_B$$

הגדלת זרם העומס

באיור 7.17 אנחנו רואים כיצד הוספה של טרנזיסטור ושל נגד מגדילה את יכולת ההספקה של הזרם אצל המייצב (מייצבים מהסדרה 78XX יכולים לספק רק זרמים של עד אמפר אחד לערך).



איור 7.17 הוספת טרנזיסטור מעמיסה זרם נוסף על המעגל

כל עוד זרם המוצא של המייצב (I_o) קטן מהערך המרבי, הזרם I_i (ששווה בקירוב טוב ל- I_o) מפיל על הנגד R מתח הקטן מ- $V_{BE,ON}$ והטרנזיסטור T נמצא בקיטעון. כשהזרם בנגד העומס יתקרב לערך המרבי שקבענו גם I_i יתקרב לערך הזה, ומפל המתח על הנגד R יכניס את הטרנזיסטור לפעולה. כל הזרם הנוסף שמעל לערך המרבי שקבענו, יעבור לנגד העומס דרך הפולט של הטרנזיסטור ודרך הקולט שלו (המתח המיוצב של המוצא לא ישתנה).

דוגמה 7-5 מייצב מתח טורי, הגדלת זרם העומס

חשבו את הערך הדרוש לנו בנגד R, כדי שבזרם של $I_o = 800mA$ הטרנזיסטור מהמעגל שבאיור 7.17 ייכנס לפעולה. $V_{in} = 20V$. המייצב הוא 7812, ומתח ההולכה של הטרנזיסטור הוא $V_{BE,ON} = 0.8V$.

א. חשבו את ההספק של הפיזור בטרנזיסטור כשהערך של העומס הוא $R_L = 3\Omega$.

פתרון

א. זרם הרגיעה I_B קטן מאוד ביחס לזרם עומס של $800mA$.

$$I_i \cong I_o = 800mA$$

על כן הטרנזיסטור נכנס לפעולה כאשר מתקיים:

$$0.8R = V_{BE,ON}$$

$$R = 0.8V / 0.8A = 1\Omega$$

ב. כאשר $R_L = 3\Omega$, זרם העומס הוא:

$$I_L = \frac{V_o}{R} = \frac{12V}{3\Omega} = 4A$$

מתוכם $0.8A$ (אמפרים) באים מהמייצב, ו- $3.2A$ (אמפרים) באים מהטרנזיסטור. אז המתח בין הפולט לקולט של הטרנזיסטור הוא:

$$V_{CE} = V_{in} - V_L = 20 - 12 = 8V$$

ולכן ההספק של הפיזור הוא:

$$P_D = I_C \cdot V_{CE} = 8 \times 3.2 = 25.6W$$

תרגול 

שאלה 7.5

חשבו את הערך של הנגד שמגביל את הזרם (R_{SC}) במייצב מתח עם הגבלת זרם של $1A$. יש להניח שהמתח של ההולכה בטרנזיסטור הגבלת הזרם הוא $0.7V$.

שאלה 7.6

התבוננו בטבלת הנתונים של המייצב $7806A$.
א. מה המתח המזערי במבוא, שיכול להבטיח לכם פעולה תקינה של המייצב?
ב. מה הזרם המרבי האפשרי במוצא של המייצב?

שאלה 7.7

הסבירו מדוע צריך שנאי במעגל של ספק כוח.

שאלה 7.8

מה התפקיד של המסנן במעגל של ספק כוח מיוצב?

שאלה 7.9

כשזרם העומס גדל, המתח הישר על העומס:

א. גדל.

ב. קטן.

נמקו את תשובתכם.

סיכום:

- ספק כוח מיוצב וספק כוח שאינו מיוצב
- שנאי, יחסי הכריכות בשנאי אידיאלי וההשפעה שלהם על המתח ועל הזרם במוצא
- גשר דיודות בתור מיישר גל שלם
- תפקידו של המסנן במוצא של המיישר
- מתח האדווה במוצא של המסנן והגורמים המשפיעים על הערך שלו
- הצורך במייצב מתח
- דיודת זנר ותפקידה בתור מייצב מקבילי

- מייצב מתח טורי ומימוש באמצעות מגבר שרת, טרנזיסטור ומקור מתח ייחוס
- הרכיב המוכלל 78XX
- שימושיו של המייצב: מייצב בסיסי, מקור זרם, הרחבת תחומו של זרם העומס.

פרק 8 - רשת מעבירה נמוכים וגבוהים

יעדים לימודיים

- א. מהו מסנן
- ב. מעגל חשמלי של מסנן מעביר נמוכים LP
- ג. קבוע זמן של מסנן LP
- ד. תגובת מסנן LP לאות מדרגת מתח – ביטוי מתמטי ותיאור גרפי
- ה. תגובת מסנן LP לאות דופק מתח – ביטוי מתמטי ותיאור גרפי
- ו. מעגל חשמלי של מסנן מעביר נמוכים HP
- ז. קבוע זמן של מסנן HP
- ח. תגובת מסנן HP לאות מדרגת מתח – ביטוי מתמטי ותיאור גרפי
- ט. תגובת מסנן HP לאות דופק מתח – ביטוי מתמטי ותיאור גרפי
- י. סימולציה של מסננים

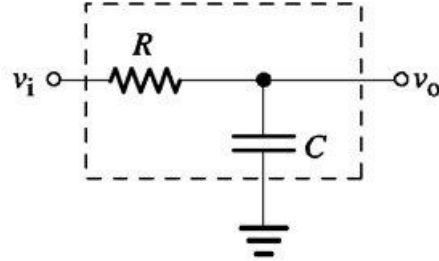
מבוא

- קבלים משמשים כמעט בכל המוצרים האלקטרוניים במגוון דרכים. באופן פשטני, ניתן לומר שקבל נטען על ידי זרם, ולאחר מכן פורק את הזרם. קבלים משמשים במעגלים התלויים בזמן, מכיוון שהטעינה והפריקה שלהם מתרחשת בפרקי זמן קבועים. ניתן למשל לחבר קבל במערכות של דיודה פולטת אור - לד (led) או שמע, וסביר להניח שכל הבהוב של הלד או זמזום של הרמקול מקורו בקבל תיזמון.
- לקבל שימושים נוספים. להלן אחדים מהם:
- קבל צימוד המשמש להפרדת המתח הישר. למשל, במעגל הכולל טרנזיסטור המשמש כמגבר נעשה שימוש בקבל כדי להפריד את אות החילופין במבוא (אות קטן) מאות המתח הישר.
 - קבל במעגלי יישור. בפרק 7 הכרנו שימוש של הקבל כמסנן מעביר נמוכים (איור 7.5), נוכחנו לראות כיצד "מפצה" הקבל על הירידה של המתח המוצא המיישר (איור 7.6). בפרק זה נדון בשימוש של הקבל במעגלי זמן בלבד.

8.1 תגובת רשת מעבירה נמוכים – LP

8.1.1 תגובה לאות מדרגה

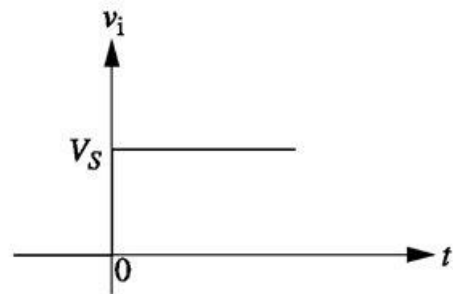
הרשת מעבירת-הנמוכים³ הבסיסית והנפוצה ביותר היא מעגל RC המתואר באיור 8.1.



איור 8.1 מעגל RC בסיסי

מתח המבוא מסומן v_i , ומתח המוצא – v_o . שניהם מיוחסים לאדמה המשותפת. הסיבה לכך שמעגל זה נקרא מעביר-נמוכים היא, שאותות סינוסואידליים בתדר נמוך כמעט ואינם מאבדים מעוצמתם בעוברם דרכו. לעומת זאת, אותות סינוסואידליים בתדר גבוה מונחתים במידה ניכרת. התדר שבו חל המפנה בהתנהגות המעגל נקבע לפי ערכי R, C, אך לא נדון כאן בתחום התדר.

אנו מתעניינים בתגובת המעגל לאות מדרגה, המתואר באיור 8.2.



איור 8.2 אות מדרגה

תגובת המעגל נתונה במשוואה (8-1), הנקראת **משוואת הדפקים היסודית**. המשוואה ניתנת ללא הוכחה.

$$(8-1) \quad v_o(t) = V_\infty - (V_\infty - V_0^+)e^{-t/\tau}$$

V_∞ הוא ערכו של מתח המוצא זמן רב ("אינסופי") אחרי הרגע $t=0$. מהתבוננות במעגל 8.1 ברור שלאחר זמן רב לא יזרום זרם בקבל, ולכן גם לא יזרום זרם בנגד. מתח המוצא יהיה V_S , כלומר הקבל יהיה טעון למתח V_S . V_0^+ הוא מתח המוצא זמן קצר מאוד ("אפסי") אחרי הזמן $t=0$. הקבל לא יכול לשנות את מתחו בקפיצה, לכן $V_0^+ = 0$.

³ רשת מעבירת-נמוכים ידועה גם בשם מסנן מעביר נמוכים (LPF – Low Pass Filter)

נציב, אפוא, את הגדלים הללו במשוואה (8-1) ונקבל:

$$v_o(t) = V_S - (V_S - 0)e^{-t/\tau} = V_S - V_S e^{-t/\tau}$$

כלומר,

$$(8-2) \quad v_o(t) = V_S(1 - e^{-t/\tau})$$

נותר רק להסביר מהו ערכו של τ . גודל זה נקרא קבוע הזמן (timeconstant) של המעגל ומחשבים אותו בעזרת משוואה (8-3):

$$(8-3) \quad \tau = R \cdot C$$

כאשר R נתון ביחידות אוהם, C – ביחידות פאראד ו- τ – בשניות.

דוגמה 8-1 חישוב ושרטוט מתח המוצא

נתון מעגל RC שבו $R=10k$, $C=0.5\mu F$. מזינים אותו במדרגת מתח בגודל 8V. רשום את משוואת אית המוצא וסרטט אותה.

פתרון

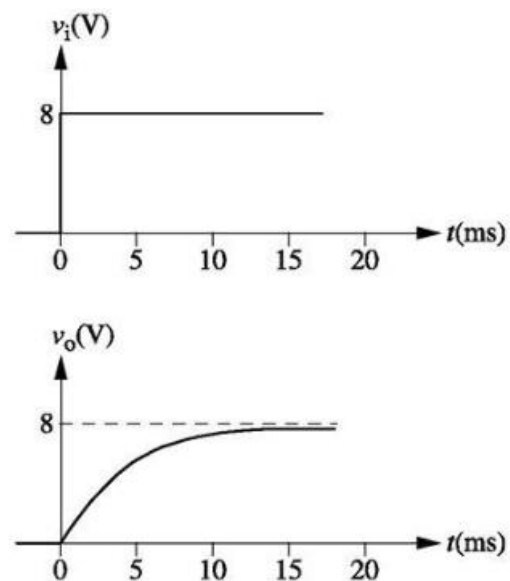
לפי משוואה (8-3):

$$\tau = R \cdot C = 10 \cdot 10^3 \times 0.5 \cdot 10^{-6} = 5 \times 10^{-3} s = 5ms$$

נציב במשוואה (8-2) ונקבל:

$$v_o(t) = 8(1 - e^{-t/5})$$

את קבוע הזמן רשמנו "5" ולא " $5 \cdot 10^{-3}$ ", מתוך הבנה שגם המשתנה t יבוטא ביחידות של מילישנייה, כך ש- $t/5$ יבטא חלוקה של מילישניות במילישניות ויתקבל כמספר טהור. אנו רואים שאות המוצא הוא פונקציה מעריכית של הזמן ותיאורו הגרפי מופיע באיור 8.3, מתחת לתיאור הגרפי של אות המבוא.



איור 8.3 סרטוט האותות בדוגמה 8.1

אנו רואים שמתח הקבל – שהוא מתח המוצא – גדל בצורה מעריכית מאפס ל-8V. זאת,

$$e^{-t/5} \rightarrow 0 \text{ כקיים } t \rightarrow \infty$$

ומה באשר לערכי ביניים של מתח המוצא?

ערך שקל לחשבו הוא $t = 5 \text{ ms}$ (כלומר ערכו של קבוע הזמן). מקבלים:

$$v_o(5) = 8(1 - e^{-1}) = 8(1 - 0.37) = 8 \times 0.63 = 5V$$

כלומר אחרי זמן השווה לקבוע הזמן, הקבל נטען ל-63% מערכו הסופי של המתח.

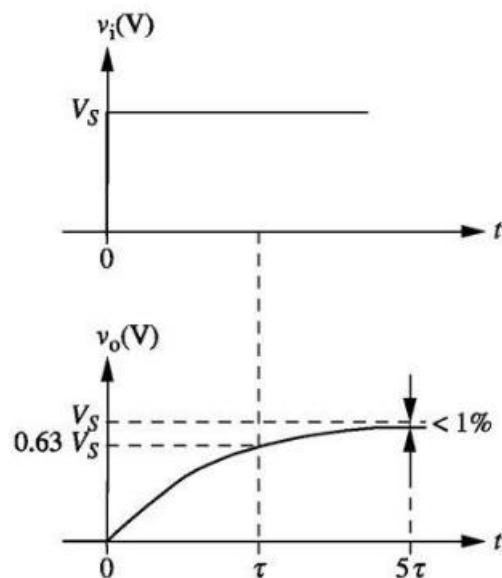
ומה קורה אחרי 5 קבועי זמן?

נציב $t = 25 \text{ ms}$ ונקבל:

$$v_o(25) = 8(1 - e^{-5}) = 8(1 - 0.007) = 8 \times 0.993 = 7.956V$$

הקבל נמצא במרחק שהוא פחות מ-1% מערכו הסופי.

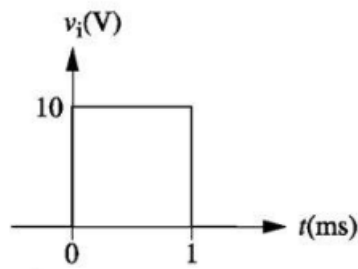
את התוצאות של דוגמה 8.1 נוכל להכליל למשוואה (8-2). באיור 8.4 מתוארות צורות הגל במבוא ובמוצא של מעגל RC כללי.



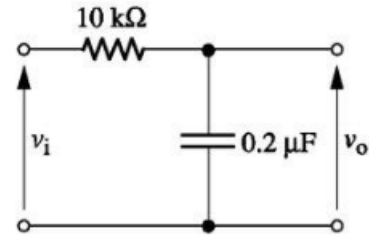
איור 8.4 תגובת RC לאות מדרגה

8.1.2 תגובה לדופק ריבועי

באיור 8.5 מתואר מעגל LP, שמתח המבוא שלו הוא דופק ריבועי (איור 6.5ב). נניח שהקבל לא היה טעון לפני קפיצת המתח של 10 V ברגע $t=0$. כדי לבטא את מתח המוצא – בתלות בזמן – נשתמש במשוואת הדפקים היסודית. לשם כך עלינו לחשב, כאמור, את V_0^+ , V_∞ ו- τ .



איור ב – דופק ריבועי במעגל המבוא



איור א – מעגל LP

איור 8.5 מעגל LP שבמבואו דופק ריבועי

נדון תחילה בקפיצת המתח, ברגע $t=0$, במעגל LP. בסעיף 8.2.1 מצאנו, למעשה, את הגדלים הבאים עבור תגובה למדרגה במעגל LP:

$$V_0^+ = 0$$

$$V_\infty = V_i$$

V_i היא הקפיצה במתח ברגע $t=0$, לכן $V_\infty = 10V$. קבוע הזמן של המעגל הוא:

$$\tau = RC = 10 \cdot 10^3 \times 0.2 \cdot 10^{-6} = 2 \times 10^{-3} s = 2ms$$

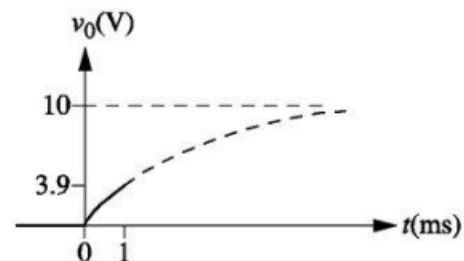
עתה נציב את V_∞ ו- V_0^+ במשוואת הדפקים היסודית, ונקבל:

$$\begin{aligned} v_o(t) &= V_\infty - (V_\infty - V_0^+)e^{-t/\tau} \\ &= 10 - 10e^{-t/2} \\ &= 10(1 - e^{-t/2}) \end{aligned}$$

נוכל לרשום:

$$(8-4) \quad v_o(t) = 10(1 - e^{-t/2})$$

באיור 8.6 מתואר $v_o(t)$, מתח המוצא בתלות בזמן. מתח המוצא משתנה לפי $10(1 - e^{-t/2})$ עד קפיצת המתח במבוא ברגע $t=1ms$. ברגע זה מתרחשת קפיצת מתח שלילית ($-10V$). נשתמש שוב במשוואת הדפקים היסודית, כדי לחשב את מתח המוצא לאחר קפיצת המתח הזו.



איור 8.6 מתח המוצא של המעגל שבאיור 8.5, מאז קפיצת המתח במבוא ברגע $t=0$, ועד קפיצת המתח ברגע $t = 1 ms$.

V_0^+ הוא עתה ערך מתח המוצא – זמן קצר לאחר קפיצת המתח ברגע $t=1\text{ms}$. מתח המוצא במעגל שבאיור 8.5 הוא המתח על הקבל. מאחר שהמתח על קבל אינו משתנה בקפיצה, נקבל כי V_0^+ שווה למתח המוצא זמן קצר לפני קפיצת המתח ברגע $t=1\text{ms}$. נציב $t = 1$ במשוואה (8-4) ונקבל:

$$V_0^+ = v(1) = 10(1 - e^{-1/2}) = 3.9V$$

אחרי הקפיצה ברגע $t=1\text{ms}$, מתח המבוא הוא אפס, והקבל פורק את מטענו דרך הנגד. אם כן, כאשר t שואף לאינסוף, המתח על הקבל הוא אפס, ומכאן שמתח המוצא הוא אפס ($V_\infty = 0$). קבוע הזמן של פריקת הקבל שווה – במעגל זה – לקבוע הזמן של טעינת הקבל, כך שאנו יכולים לשוב ולהשתמש במשוואת הדפקים היסודית ולהציב בה $t=2\text{ms}$.

במשוואת הדפקים היסודית הנחנו שהקפיצה היא ברגע $t=0$, ואילו כאן יש קפיצה נוספת ברגע $t=1\text{ms}$. האם מותר להשתמש במשוואת הדפקים היסודית גם כשהקפיצה מתרחשת ברגע השונה מאפס?

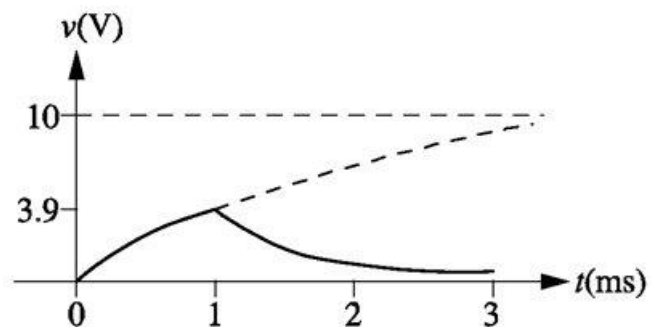
מותר אף מותר. מובן כי קביעת זמן הקפיצה היא שרירותית, ושום תופעה אינה תלויה בקביעה הזו. נרשום אפוא את משוואת הדפקים היסודית באופן כללי, כך שתתאים לזמן קפיצה כלשהו, t_p . לשם כך נרשום $(t - t_p)$ במשוואה (8-1):

$$(8-5) \quad v_o(t - t_p) = V_\infty - (V_\infty - V_0^+)e^{-(t-t_p)/\tau}$$

t_p הוא הרגע שבו מתרחשת הקפיצה, כלומר: V_0^+ הוא מתח המוצא ברגע $t = t_p$. במקרה שלנו מתרחשת קפיצה ברגע $t_p = 1\text{ms}$, ו- $V_\infty = 0$ ולכן מתח המוצא – לאחר קפיצה זו – נתון על-ידי:

$$v_o(t - 1) = V_0^+ e^{-(t-1)/\tau} = 3.9e^{-(t-1)/2}$$

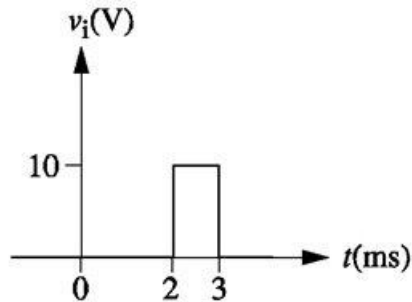
באיור 8.7 מתואר מתח המוצא – בתלות בזמן – של המעגל שבאיור 8.5. אנו רואים כי מתח המוצא באיור 8.7 עולה עד הרגע $t=1\text{ms}$, ואז הוא מתחיל לרדת; כלומר, הקבל נטען עד לרגע זה, ואז מתחיל הקבל לפרוק את מטענו.



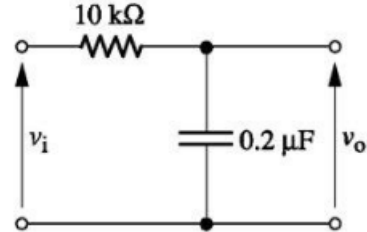
איור 8.7 מתח המוצא – בתלות בזמן – של המעגל שבאיור 8.5. מתח המבוא נתון באיור 8.5

דוגמה 8-2 חישוב ושרטוט מתח המוצא

חשב את מתח המוצא של המעגל הנתון באיור 8.8 – בכל רגע ורגע, כשמתח המבוא של המעגל הוא דופק ריבועי, כמתואר באיור 8.8ב.
א. סרטט את מתח המוצא בתלות בזמן.
הנח כי הקבל לא היה טעון לפני קפיצת המתח הראשונה.



איור ב – מתח מבוא המעגל



איור א – מעגל LP

איור 8.8 מעגל LP, שבמבואו דופק ריבועי

פתרון

עד הרגע $t=2\text{ms}$, מתח המבוא הוא אפס. ברגע זה יש קפיצת מתח במבוא. מצאנו כבר כי במעגל כזה $V_\infty = 10\text{V}$, $V_0^+ = 0$. קבוע הזמן של המעגל הוא:

$$\tau = RC = 2 \times 10^{-3}\text{s} = 2\text{ms}$$

הקפיצה אינה מתרחשת ברגע $t=0$, ולכן נשתמש במשוואה (8-5), ונציב בה את הנתונים:

$$v_o(t-2) = V_\infty - (V_\infty - V_0^+)e^{-(t-2)/\tau}$$

(t נתון ב- ms)

זהו מתח המוצא – בתלות בזמן – החל מהרגע $t=2\text{ms}$, ועד קפיצת המתח ברגע $t=3\text{ms}$.

ברגע זה יש קפיצת מתח שלילית במבוא. נמצא עתה את V_∞ ואת V_0^+ החל מן הרגע $t=3\text{ms}$. המתח על הקבל אינו משתנה בקפיצה, לכן, מתח המוצא, מיד לאחר קפיצת המתח ברגע $t=3\text{ms}$, שווה למתח המוצא זמן קצר מאוד לפני הקפיצה.

נציב את הערך $t = 3\text{ms}$ במשוואה שקיבלנו כבר עבור מתח המוצא, ונקבל כי

$$v_o(t-2)|_{t=3} = 10 - (10 - 0)e^{-(3-2)/2} = 3.9\text{V}$$

עתה נשתמש במשוואת הדפקים היסודית, החל מן הרגע $t=3\text{ms}$. מצאנו כי $V_0^+ = 3.9\text{V}$.

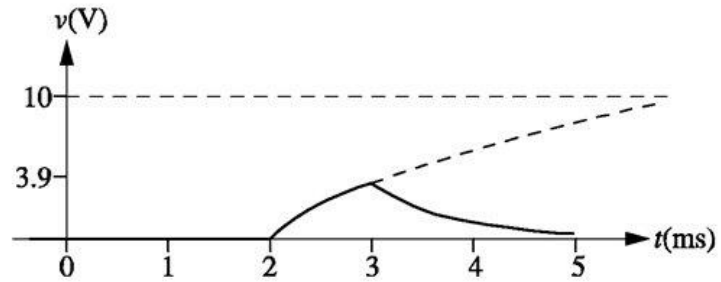
נמצא עתה את V_∞ במשוואה זו. לאחר שמתח המבוא מתאפס (אחרי הקפיצה

ברגע $t=3\text{ms}$), המתח במוצא הולך ודועך, ואחרי זמן רב ("אינסופי") הוא מתאפס. נקבל $V_\infty = 0$. קבוע הזמן אינו משתנה במעגל זה, כך שמתח המוצא – לאחר 3ms , נתון על-ידי:

$$v_o(t-3) = V_\infty - (V_\infty - V_0^+)e^{-(t-3)/\tau}$$

מתח המוצא – בתלות בזמן – מתואר באיור 8.9. קל לראות כי צורת המתח זהה לזו

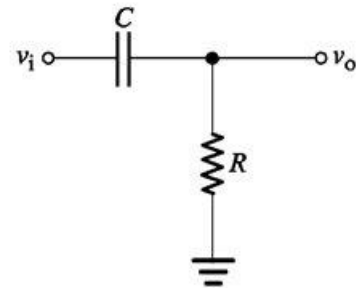
שבאיור 8.7, אלא שהמתחים מוזזים בזמן – זה ביחס לזה.



איור 8.9 מתח המוצא של המעגל המתואר באיור 8.8
גבוהים – HP

8.1.3 תגובה לאות מדרגה

הרשת מעבירת הגבוהים הבסיסית והנפוצה ביותר היא שוב רשת RC. אלא שהפעם מתח המוצא הוא המתח על גבי הנגד ולא על פני הקבל, כמתואר באיור 8.10.



איור 8.10 מעגל RC מעביר גבוהים

כפי שמרמז שמה, הרשת הזו מעבירה אותות סינוסואידליים בתדר גבוה ומנחתת אותות כאלה בתדר נמוך. מכאן שמה: High Pass - HP. כאמור, לא נדון כאן בתכונות התדר של המעגל.

עתה, נניח שלמעגל באיור 8.10 מצינים אות מדרגה. הקבל ייטען לפי משוואה (8-2). כל שנותר הוא לחשב את מתח המוצא, כלומר, את המתח על פני הנגד – כהפרש המתחים בין מתח המבוא לבין מתח הקבל:

$$v_o(t) = v_R(t) = v_i(t) - v_C(t) = v_i(t) - V_S(1 - e^{-t/\tau})$$

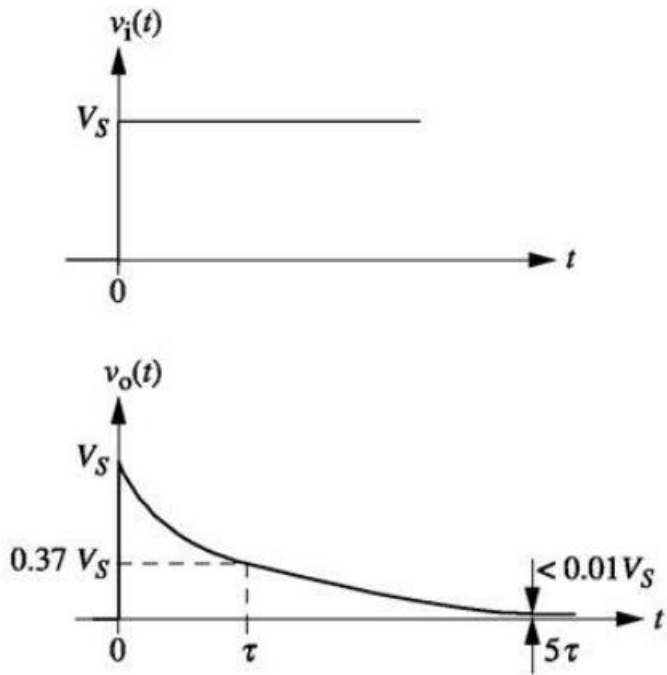
$$v_i(t) = V_S \text{ זמן } t > 0 \text{ קיים}$$

נקבל:

$$v_o(t) = V_S - V_S(1 - e^{-t/\tau})$$

$$(8-6) \quad v_o(t) = V_S e^{-t/\tau}$$

משוואה (8-6) מתארת את הביטוי הכללי למתח המוצא במוצא מעביר גבוהים, בתלות בזמן. באיור 8.11 מתוארות צורות הגל במבוא ובמוצא של המעגל המתואר באיור 8.10.



איור 8.11 צורות הגל במעביר גבוהים

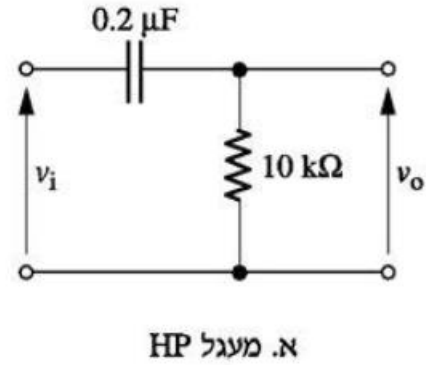
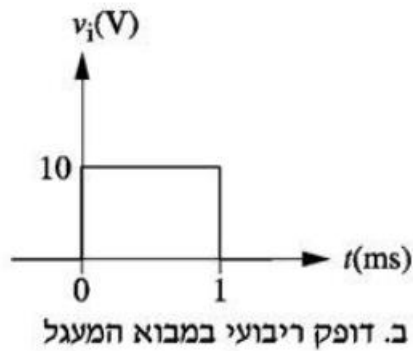
באיור 8.11 מצוין גם המתח עבור הזמן $t = \tau$ לפי משוואה (8-6) קיים הקשר :

$$(8-6) \quad v_o(\tau) = V_S e^{-1} = 0.37 V_S$$

כלומר מתח המוצא יורד לכדי 37% מערכו ההתחלתי, שהוא V_S . ולמה, בעצם, הערך ההתחלי הוא V_S ? אפשר להבין זאת מההסבר הזה :

ברגע $t=0$, מתח המבוא למעגל המתואר באיור 8.10 קופץ מאפס ל- V_S . מתח הקבל, שמלכתחילה לא היה טעון, אינו יכול לקפוץ, והוא נשאר אפס גם ברגע $t=0^+$. לכן, כל מתח המבוא – בשיעור V_S – נופל על הנגד במוצא. דהיינו $V_0^+ = V_S$. מרגע זה ואילך הקבל נטען בצורה מעריכית, ובהתאם, מתח המוצא (על הנגד) דועך בצורה מעריכית, בהתאם למשוואה (8-6).

בדומה למה שחישבנו עבור מעביר הנמוכים, עבור $t = 5\tau$, מתח המוצא של מעביר הגבוהים יורד לפחות מ-1% מערכו ההתחלתי. הדופק ריבועי באיור 8.12 מתואר מעגל HP, שמתח המבוא שלו הוא דופק ריבועי (איור 8.12 ב). נניח כי הקבל לא היה טעון לפני קפיצת המתח של 10V ברגע $t=0$. נשתמש שוב במשוואת הדפקים היסודית, כדי לבטא את מתח המוצא בתלות בזמן. לשם כך עלינו לחשב, כאמור, את V_0^+ ו- V_∞ . נניח גם כי רוחב הדופק הוא 1ms.



איור 8.12 מעגל HP שבמבואו דופק ריבועי

כאמור, ברגע $t = 0$ יש קפיצה במתח המבוא, וכיוון שמתח הקבל לא משתנה בזמן אפסי, היא עוברת למוצא של מעגל HP זה. נקבל אפוא כי $V_0^+ = 10V$.

כעבור זמן רב מקבלים כי $V_\infty = 0$. קבוע הזמן של המעגל הוא

$$\tau = 10k\Omega \times 0.2\mu F = 2ms$$

עתה נציב במשוואת הדפקים היסודית את V_0^+ ו- V_∞ , ונקבל:

$$v_o(t) = V_\infty - (V_\infty - V_0^+)e^{-t/\tau} = 10e^{-t/\tau}$$

מתח המוצא משתנה בצורה מעריכית זו, עד קפיצת המתח במבוא ברגע $t=1ms$. ברגע זה מתרחשת קפיצת מתח שלילית ($-10V$). נשתמש שוב במשוואת הדפקים היסודית, כדי לחשב את מתח המוצא לאחר קפיצת המתח. V_0^+ הוא עתה ערך מתח המוצא – זמן קצר לאחר קפיצת המתח השלילית ברגע $t=1ms$. מתח המוצא זמן קצר לפני קפיצת המתח הזו הוא:

$$v_o(1^-) = 10e^{-1/\tau} = 10e^{-1/2} = 6.07V$$

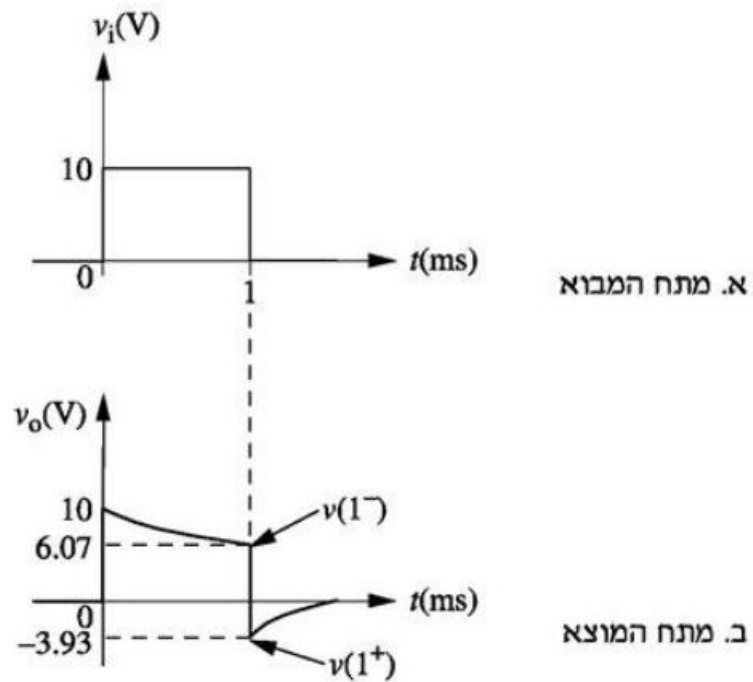
מאחר שמעגל HP מעביר למוצא את קפיצות המתח במבוא, תתקבל עתה גם במוצא קפיצת מתח שלילית ($-10V$). לכן

$$v_o(1^+) = 6.07 - 10 = -3.93V$$

לאחר הקפיצה השלילית, מתאפס מתח המבוא, ואילו מתח המוצא יתאפס כעבור זמן "אינסופי" (הקבל במעגל שבאיור 6.12 פורק את מטען דרך הנגד), ולכן נקבל $V_\infty = 0$. נציב זאת במשוואת הדפקים היסודית, ונקבל:

$$v_o(t - 1) = V_0^+ e^{-(t-1)/\tau} = -3.93e^{-(t-1)/\tau}$$

צורות הגל, במבוא ובמוצא, מתוארות באיור 8.13.



איור 8.13 מתח המבוא ומתח המוצא – בתלות בזמן – של המעגל המופיע באיור 8.12 ב

אנו רואים כי מתח המוצא באיור 8.13 קטן בצורה מעריכית לאחר קפיצת המתח ברגע $t=0$, עד הרגע $t=1\text{ms}$. ברגע זה יש קפיצה שלילית במתח המבוא, וכתוצאה מכך יש גם קפיצה שלילית במתח המוצא. מתח המוצא שוב קטן – בערכו המוחלט – בצורה מעריכית, וכעבור זמן "אינסופי" הוא מתאפס.

דוגמה 8-3 חישוב ושרטוט מתח המוצא במעגלים בעלי קבוע זמן

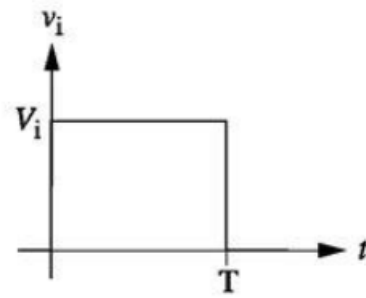
שונה

נתונים שלושה מעגלי HP, בעלי קבועי זמן שונים. מתח המבוא של כל אחד מהם הוא הדופק הריבועי שבאיור 8.14. רוחב הדופק הוא T , ונתון כי :

$$\tau_1 = T$$

$$\tau_2 \ll T$$

$$\tau_3 \gg T$$



איור 8.14 דופק ריבועי שרוחבו T

פתרון

א. מתח המוצא של המעגל שבו $\tau_1 = T$, מתואר באיור 8.15. מתח המוצא ברגע T^-

$$\text{הוא } v_o(T^-) = V_i e^{-T/\tau} = V_i e^{-1} = 0.368 V_i.$$

ב. במעגל השני נתון כי $T \ll \tau_2$. לפי משוואת הדפקים היסודית, מתח המוצא עד הרגע

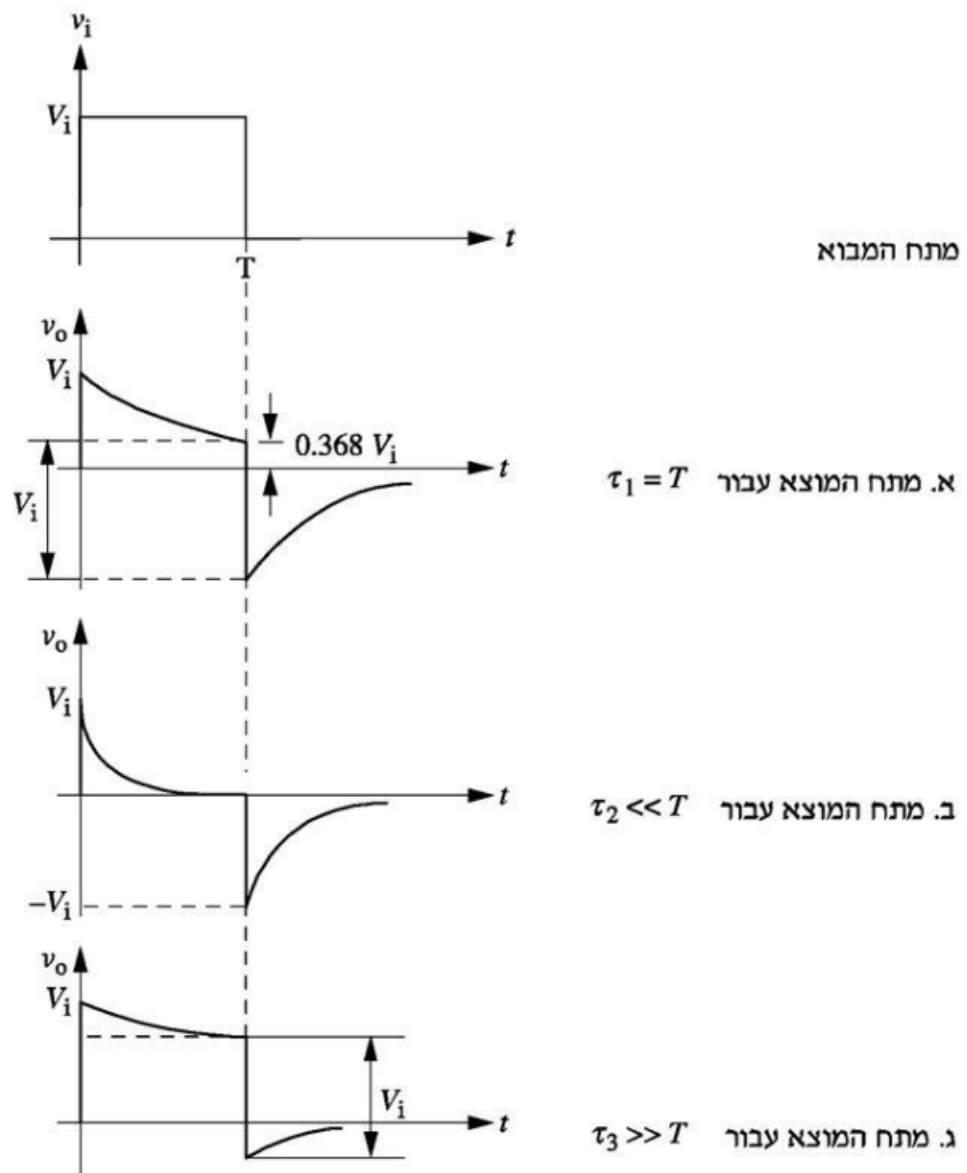
$$T \text{ נתון על-ידי: } v_o(t) = V_i e^{-t/\tau} \text{ כאשר } 0 < t < T.$$

$$\text{וברגע } T^- \text{ נקבל: } v_o(t) = V_i e^{-T/\tau}$$

נתון כי $T \ll \tau_2$, ולכן $e^{-T/\tau}$ הוא מספר קטן מאוד. מתח המוצא מתאפס, למעשה, זמן רב לפני הרגע T.

ג. במעגל השלישי $T \ll \tau_3$; מתח המוצא לא יספיק כמעט להשתנות עד הרגע T, וכך גם לאחר הקפיצה ברגע T.

שלושת הגרפים של מתח המוצא, בתלות בזמן, מתוארים באיור 8.15.



איור 8.15 מתח המוצא של מעגלי HP בעלי קבועי זמן שונים, כשמתח המבוא הוא דופק ריבועי.

סיכום מעגלי LP ו-HP

- המתח על קבל אינו משתנה בקפיצה.
- משוואת הדפקים היסודית, $v_o(t) = V_\infty - (V_\infty - V_0^+)e^{-t/\tau}$, מתארת את התלות בזמן של אות המוצא במעגל RC בעל קבוע זמן יחיד.
- משמעות הביטויים במשוואת הדפקים היסודית:
- $v_o(t)$ הוא מתח המוצא – בתלות בזמן – של המעגל.
- RC הוא קבוע הזמן של המעגל.
- V_0^+ הוא ערך מתח המוצא, זמן קצר מאוד לאחר קפיצה או לאחר שינוי במתח המבוא (למשל, סגירת מתג במעגל, קפיצה חיובית וקפיצה שלילית בדופק ריבועי).
- V_∞ הוא ערך מתח המוצא, זמן רב ("אינסופי") לאחר קפיצה במתח המבוא. הערך המקובל של הזמן הזה הוא 5τ .
- אם ידועים ערכי V_0^+ , V_∞ ו- τ במעגל, ניתן לחשב בכל רגע ורגע את אות המוצא של המעגל לאות מבוא נתון.
- מעגל RC טורי, שבו מתח המוצא הוא המתח על הקבל, הוא דוגמה למעגל מעביר נמוכים (LP).
- מעגל RC טורי, שבו מתח המוצא הוא המתח על הנגד, הוא דוגמה למעגל מעביר גבוהים (HP).
- ניתן לקבל את התגובה של מעגלי HP ו-LP לדופק ריבועי על-ידי כך שמשתמשים במשוואת הדפקים היסודית, ומחשבים – בנפרד – את התגובה לקפיצה החיובית, לקפיצה השלילית ולערך הקבוע שביניהם.

סימולציה למעגלי LP ו-HP

באתר הבא שנמצא [כאן](#) ניתן לבצע סימולציות מקוונות המסייעות בתכנון הנדסי ובניתוח של מעגלים אלקטרוניים. בפרק זה נתמקד בכלי התכנון של מסננים – Filter tool בלבד והקישור לכלי זה נמצא [כאן](#).

מבין מגוון המסננים הקיימים נתמקד במסנני RC בלבד.

- מסנן מעביר נמוכים LP הנמצא [כאן](#).
- מסנן מעביר גבוהים HP הנמצא [כאן](#).

ביצוע סימולציה למעגל LP

לאחר פתיחת הקישור נקבל דף הכולל את המעגל החשמלי וביטויים מתמטיים שונים. חלק מהביטויים מיועדים ללימודים מתקדמים. אנחנו נתייחס רק למידע המתייחס לתופעות מעבר בלבד - Transient analysis.

איור 8.16 מראה מהם האפשרויות המומלצות לביצוע הסימולציה.

תיבות לקביעת ערכי הרכיבים
 $R = \text{[]} \Omega$ $C = \text{[]} F$
p:pico, n:nano, u:micro, k:kilo, M:mega

ניתוח לפי תדר – לא נעסוק בזה
Frequency analysis
☐ Bode diagram
☒ Phase ☐ Group delay
☐ Nyquist diagram
☐ Pole, zero
☐ Phase margin
☐ Oscillation analysis
 Upper and lower frequency limits:
 $f1 = \text{[]} - f2 = \text{[]} [Hz]$ (frequency limits are optional)

ניתוח תופעות מעבר
Transient analysis
☒ Step response
☐ Impulse response
☐ Overshoot
☒ Final value of the step response
 Simulation time:
 0 - $\text{[]} [sec]$ (optional)

ניתוח לאות מדרגת יחידה
 קביעת תחום הזמן להצגת התגובה
 כפתור הפעלת החישוב
Calculate

איור 8.16 בחירת האפשרויות הרצויות

דוגמה לביצוע סימולציה

R=10k Ω C=2u F
p:pico, n:nano, u:micro, k:kilo, M:mega

נבחר בערכי רכיבים:

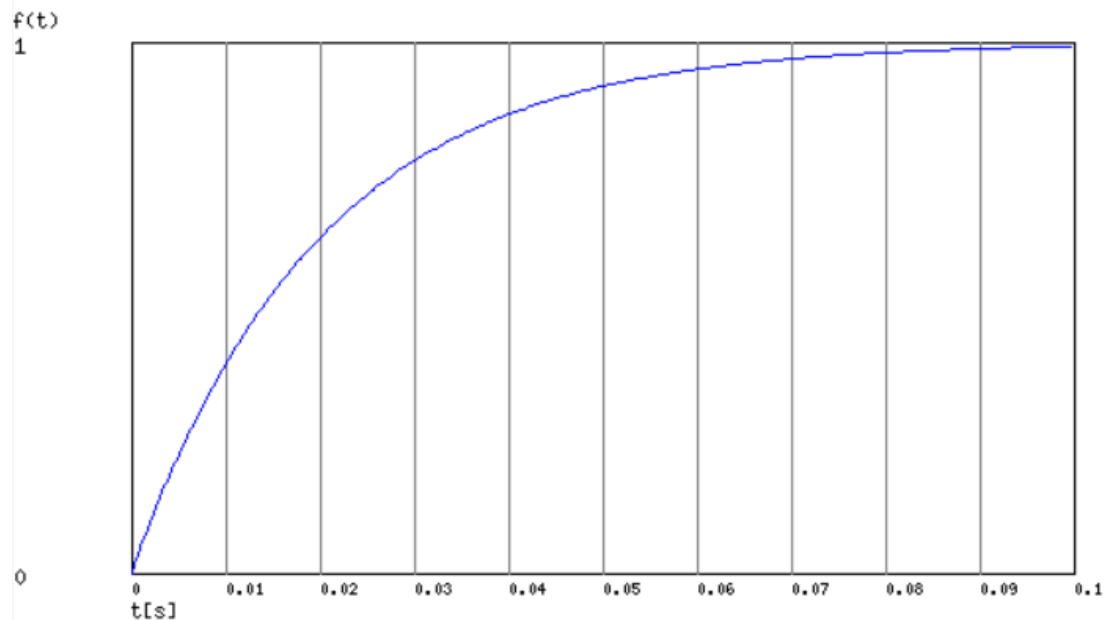
Simulation time:
0 - 0.1 [sec] (optional)

נקבע את תחום הזמן:

Calculate

ונפעיל את הסימולציה:

נתבונן בתוצאה:



קבוע הזמן של המעגל הוא $\tau = RC = 10k\Omega \times 2\mu F = 20ms$. ניתן לראות בגרף כי לאחר $t = 5\tau = 0.1s$ ערך התגובה היא כמעט 1. כלומר, התקבל הערך המרבי V_∞ .

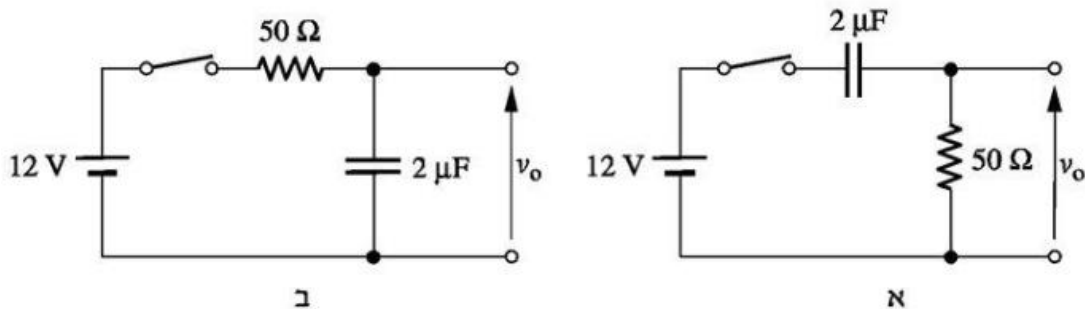
שאלה 8.1

באיור לשאלה זו נתונים שני מעגלים. ברגע $t = 0$ נסגר המתג בכל אחד מהמעגלים. נתון כי הקבלים לא היו טעונים לפני סגירת המתג.

א. חשב את קבוע הזמן של כל מעגל.

ב. חשב את V_0^+ של כל מעגל.

ג. חשב את V_∞ של כל מעגל.

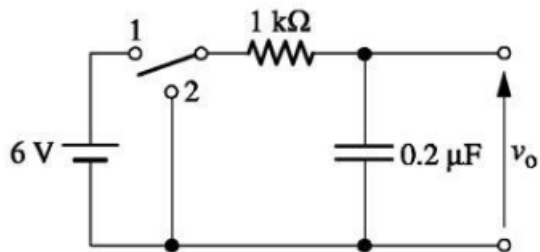


איור לשאלה 8.1

שאלה 8.2

ברגע $t = 0$ מועבר המתג במעגל שבאיור לשאלה זו למצב 1, וברגע $t = 0.1\text{ms}$ הוא מועבר למצב 2. הנח כי הקבל לא היה טעון לפני הרגע $t=0$.

חשב את מתח המוצא ברגעים 0.09ms , 0.11ms , 0.2ms , 1ms .



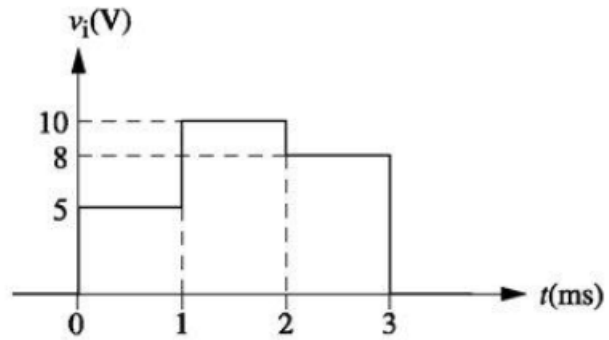
איור לשאלה 8.2

שאלה 8.3

נתון מעגל LP, שקבוע הזמן שלו הוא 0.5ms . מתח המבוא למעגל מתואר באיור לשאלה זו.

א. סרטט את מתח המבוא כסכום מדרגות.

ב. סרטט את מתח המוצא, וסמן את ערכו ברגעים 0.9ms , 1.1ms , 1.9ms , 2.1ms , 2.9ms , 3.1ms .



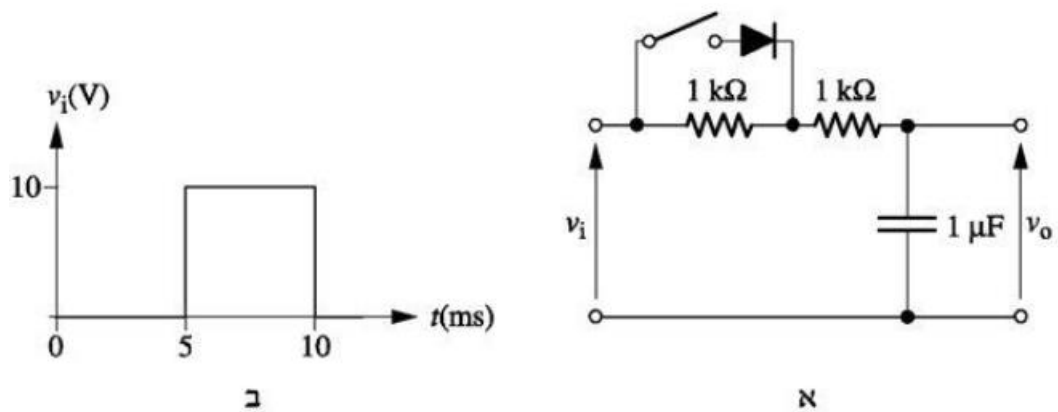
איור לשאלה 8.3

שאלה 8.4

ברגע $t = 6\text{ms}$ סוגרים את המתג במעגל שבאיור א לשאלה זו. נתון כי הקבל לא היה טעון לפני הרגע $t=0$, וכי הדיודה אידיאלית. מתח המבוא מתואר באיור ב לשאלה זו.

א. סרטט באופן איכותי את מתח המוצא של המעגל – בתלות בזמן.

ב. חשב את מתח המוצא ברגעים 1ms , 5ms , 9ms , 10.1ms .



איור לשאלה 8.4

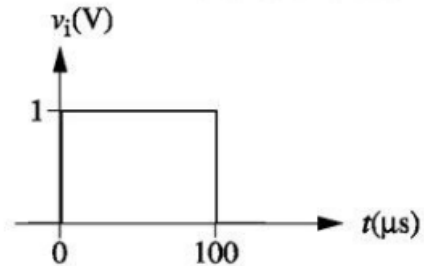
שאלה 8.5

מתח המוצא (בוולטים) של מעגל נתון על ידי:

$$v_o(t) = 1 - e^{-t/10^{-4}} \quad 0 < t < 10^{-4} \text{ s}$$

$$v_o(t) = 0.63e^{-(t-10^{-4})/10^{-4}} \quad 10^{-4} < t < 2 \times 10^{-4} \text{ s}$$

מתח המבוא – בתלות בזמן – מתואר באיור הבא.



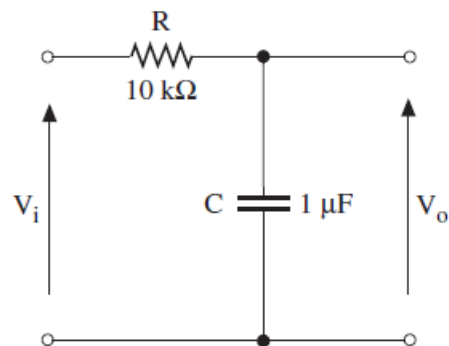
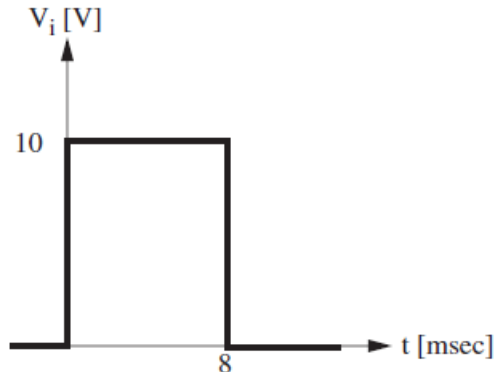
איור לשאלה 8.5

א. שרטטו מעגל טורי – הכולל נגד וקבל – המתאים לנתונים שבשאלה.

ב. קבעו ערכים עבור הקבל והנגד.

שאלה 8.6 (על פי בגרות 2006)

למעגל החשמלי שבאיור לשאלה מספקים דופק שעוצמתו 10V ורוחבו 8msec.



איור לשאלה 8.6

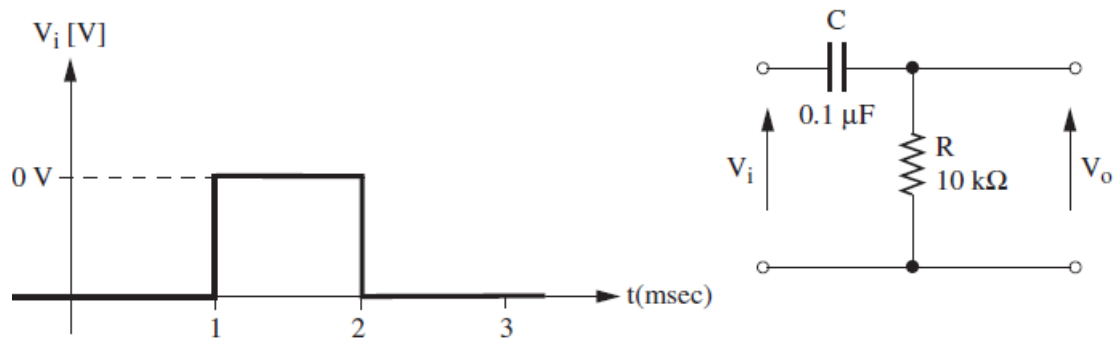
א. שרטטו את מתח המוצא V_o ביחס לאות הכניסה V_i , בתלות בזמן.

ב. חשבו את המתח המרבי אליו נטען הקבל.

ג. חשבו את מתח המוצא V_o כאשר $t=10 \text{ msec}$.

שאלה 8.8 (על פי בגרות 2007)

למעגל החשמלי שבאיור לשאלה מספקים דופק המתואר באיור לשאלה.



איור לשאלה 8.8

- א. שרטטו את מתח המוצא V_o ביחס לאות הכניסה V_i , בתלות בזמן.
- ב. חשבו את מתח המוצא V_o כאשר $t=3\text{msec}$.

שאלה 8.9

תלמיד נדרש לבצע סימולציה למסנן HP בעל קבוע זמן $\tau = RC = 1\text{msec}$ לאות מדרגת מתח בעוצמה של 1V .

- א. קבעו את ערכי הרכיבים R ו- C על מנת לקבל את קבוע הזמן הדרוש.
- ב. קבעו את תחום הזמן לסימולציה כך שנוכל להבחין בערך הסופי V_∞ אליו מגיע מתח המוצא.
- ג. בצעו את הסימולציה ובדוק אם התוצאות תואמות לערכים שקבעת.

שאלה 8.9 (רשות)

מתח המוצא (בוולטים) של מעגל נתון על ידי:

$$v_o(t) = 1 - e^{-t/0.1} \quad 0 < t < 0.1s$$

$$v_o(t) = 0.63e^{-(t-0.1)/0.1} \quad 0.1 < t < 0.3s$$

א. שרטטו את צורת אות המוצא על פי הביטוי הנתון.

את הסעיפים הבאים בצע בגיליון אלקטרוני (אקסל).

ב. חשבו את ערכי מתח המוצא עבור ערכי הזמן הבאים:

$$t=0, 0.01, 0.02, 0.03, \dots, 0.3$$

ג. הציגו את מתח המוצא בצורה גרפית.