

## תוכן העניינים:

2	אלקטרוניקה ספרתית
2	אפנון רוחב סרט - PWM
2	כללי
2	סיכום כללי:
5	שאלות:
10	תשובות סופיות:

# אלקטרוניקה ספרתית

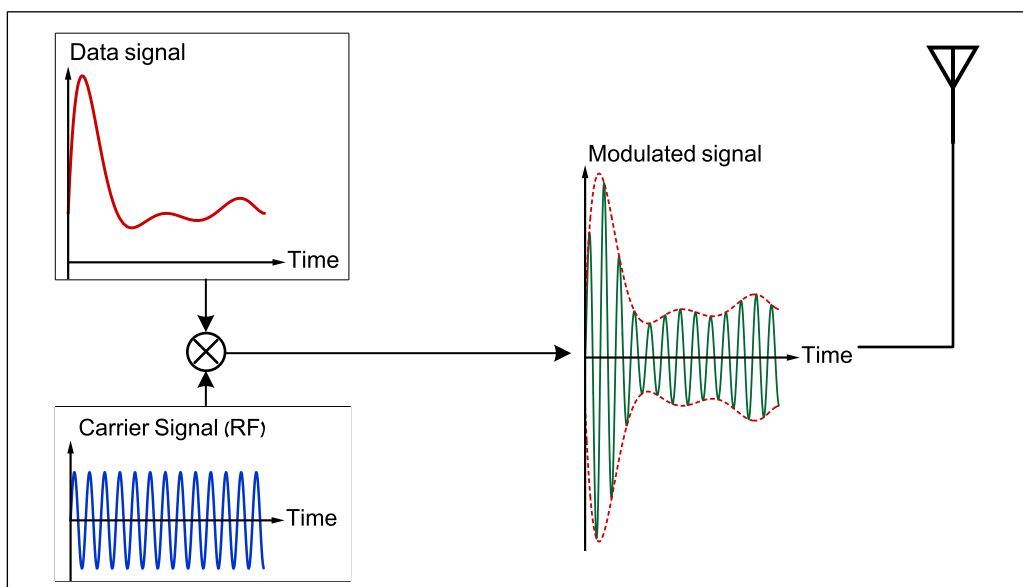
## אפנון רוחב סרט - PWM

כללי:

סיכום כללי:

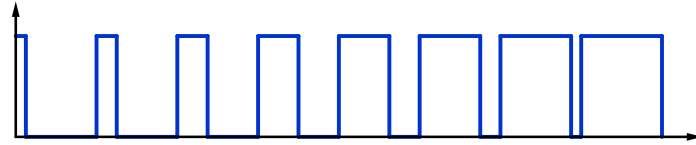
אפנון:

מטרת מערכות תקשורת היא העברת אות מידע (data signal) מנקודה אחת לנקודה אחרת. היות ואותות מידע הם לרוב בטווח תדרים נמוך (בין Hz ל-kHz בודדים) יש צורך להלביש אותם על אות רדיו (RF Signal) אותו ניתן לשדר. לתהליך הלבשת אות המידע על אות רדיו קוראים אפנון (Modulation). באפנון של אות מידע בוחרים אות מחזורי ידוע כלשהו (אות סינוס, אות ריבועי וכו') ומשנים את אחד הפרמטרים שלו בהתאם לאות המידע. לאות הרדיו קוראים גם אות נשא (Carrier signal). כך, בשידור אות הרדיו המאופנן, הצד הקולט מסוגל לבצע את התהליך ההפוך (Demodulation) ולחלץ את המידע מאות הנשא.



## אפנון רוחב סרט - PWM:

אפנון רוחב סרט, PWM - Pulse Width Modulation, הוא שיטה להלבשת אות מידע על גבי פולס ריבועי מחזורי, כך שערך המתח הרגעי של אות המידע קובע את רוחב הפולס של האות הריבועי בכל מחזור.



### מושגים:

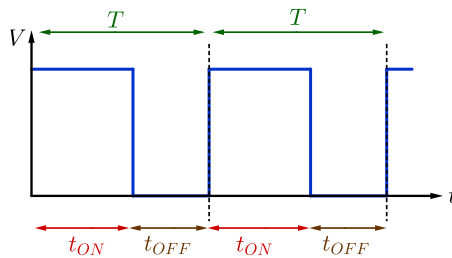
- תדר וזמן מחזור:
  - תדר האות  $f$  הינו התדר הבסיסי של האות המחזורי ונמדד ב-Hz.
  - מחזור האות  $T$  הינו משך הזמן של מחזור שלם של האות ונמדד ב-sec.

- מתקיים:  $T = \frac{1}{f}$ .

- זמני פולס (נמדדים ב-sec):

- $t_{ON}$  הוא משך הזמן בו האות מוחזק על '1' לוגי במחזור אחד.
- $t_{OFF}$  הוא משך הזמן בו האות מוחזק על '0' לוגי במחזור אחד.

- מתקיים:  $t_{ON} + t_{OFF} = T$ .



- ה-D.C. (Duty Cycle) מוגדר בתור החלק היחסי (באחוזים) בו האות הריבועי מוחזק

על '1' לוגי מתוך זמן המחזור של האות. כלומר:  $D.C.(\%) = \frac{t_{ON}}{T} \cdot 100$ .

- הקשר שבין המתח הממוצע ל-D.C.:  $V_{avg} = V_S \cdot D.C.$

**דוגמה:**

אות המוצא של מעבד הוא PWM עם ערך 1 לוגי המתאים למתח של 5V וערך 0 לוגי המתאים ל-0V. מה הוא ערך המתח היוצא מהמעבד עבור:

א.  $D.C. = 45\%$

ב.  $D.C. = 10\%$

ג.  $D.C. = 80\%$

רוצים לקבוע D.C. המתאים למתח של 3.2V, מהו ה-D.C. המתאים?  
אם תדר המעבד הוא  $f = 2\text{kHz}$ , מה הם זמני ה- $t_{ON}$  ו- $t_{OFF}$  עבור ה-D.C. שמצאתם?

**יתרונות של שידור מידע באמצעות PWM:**

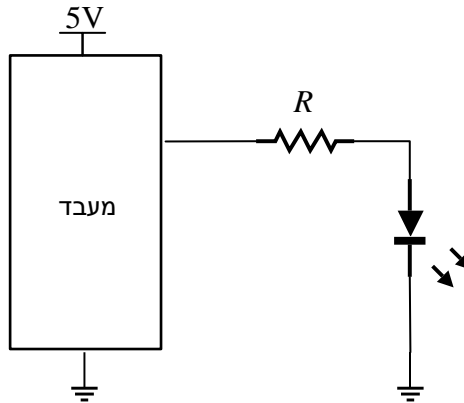
- ממזערים איבוד אנרגיה.
- נשארים דיגיטליים.
- ניתן להעביר אותות שונים.

**חסרונות של שידור מידע ב-PWM על פני אות ישיר (AC או DC):**

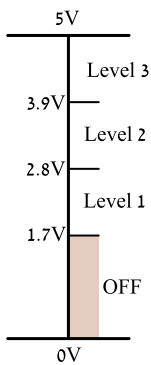
- חשופים לדלתאות בשינויי הזרמים והמתחים.
- דורש מעגל אלקטרוני מורכב יותר, הכולל רכיבים כדוגמת IGBT ו-SCR אשר מסוגלים להתנהג כמפסקים שנפתחים ונסגרים מהר מאוד. זאת על מנת לבצע את המודולציה הנדרשת.

שאלות:

- 1) רוצים לבנות מעבד אשר שולט בבהירות של דיודה פולטת אור (LED) לפי 3 רמות הארה. לשם כך משתמשים במעבד, בנגד ובדיודה פולטת אור כמתואר באיור הבא. ידוע כי הדיודה נדלקת עבור  $V_D = 1.7V$  וכי זרם העבודה המקסימלי המותר הוא  $I_{Dmax} = 8mA$ . המעבד מחובר למתח הזנה של 5V.



- א. מה הוא ערך הנגד המתאים על מנת שהלד לא יעבור את הזרם המירבי המותר.  
 ב. בכדי לשלוט בהארה, אות המוצא מהמעבד הוא מסוג PWM.



תדר האות הוא  $f = 16MHz$ .

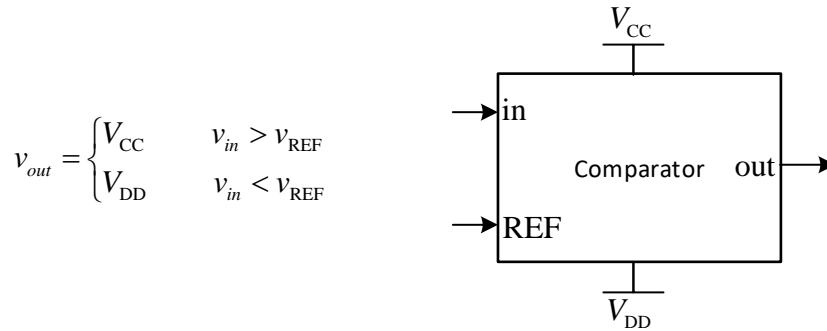
מחלקים את עוצמת הארת הלד ל-3 רמות לפי סכמת המתחים הבאה:

- i. מה הוא ה-Level בו מתקבלת העוצמה החזקה ביותר ומהו ה-Level בו מתקבלת העוצמה הנמוכה ביותר?
- ii. מה הוא ה-D.C. המתאים לכל רמת מתח?
- iii. מהם זמני ה- $t_{ON}$  וה- $t_{OFF}$  בכל רמת מתח?
- iv. באיזו רמה תהיה עוצמת ההארה עבור  $t_{ON} = 40ns$ ?

ג. קבע אלו מהפעולות הבאות נכונות ואלו שגויות. נמק את טענתך.

- i. שינוי מתח ההזנה ל-8.2V ובחירת נגד מתאים, ישפיעו על עוצמת ההארה.
- ii. שינוי תדר אות PWM של המעבד ל- $f = 4MHz$  ישנה את מספר עוצמות ההארה.
- iii. שינוי תדר אות PWM של המעבד ל- $f = 4MHz$  ישנה את עוצמות ההארה בכל רמה.
- iv. שינוי ערך הנגד ל- $R = 1\Omega$  לא יגרור כל שינוי בעוצמות ורמות ההארה.

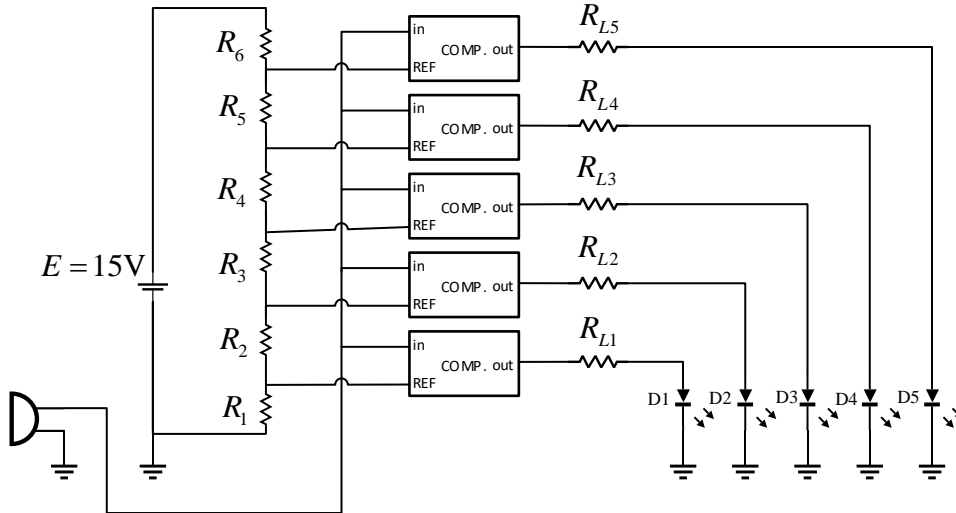
2) נתון רכיב אלקטרוני הנקרא משווה גודל (Comparator). הרכיב מורכב מ-2 כניסות אנלוגיות,  $v_{REF}$  ו-  $v_{in}$ , ומוצא דיגיטלי אחד אשר מוציא ערך של 1 או 0 לוגי (כאשר 1 לוגי מתאים למתח ההזנה של הרכיב ו-0 לוגי מתאים לערך האדמה של הרכיב). להלן סכמה עקרונית של משווה גודל:



כדי לבחון את ההתנהגות המשווה מחברים אותו למתח הזנה של  $8V$  ולאדמה ורטואלית של  $-8V$ . בכניסה  $v_{in}$  מכניסים אות סינוס בתדר של  $f = 1\text{KHz}$  ובמשרעת של  $8V$ .

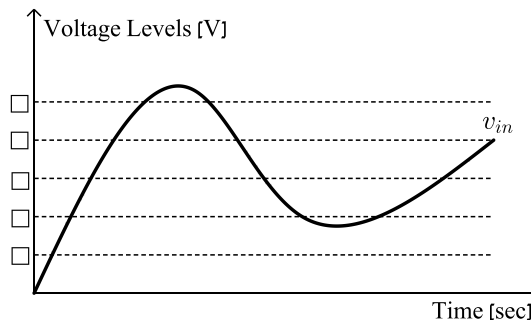
- כיצד יראה מוצא המשווה עבור  $v_{REF} = 0V$ ? מהו סוג האות המתקבל במוצא? מה הוא ה-D.C. של האות ומה הוא תדרו?
- כיצד יראה מוצא המשווה עבור  $v_{REF} = 2V$ ? מהו סוג האות המתקבל במוצא? מה הוא ה-D.C. של האות ומה הוא תדרו?
- רוצים לקבל במוצא המשווה אות מסוג PWM עם  $\text{D.C.} = 70\%$ . מה צריך להיות  $v_{REF}$  לפי נתוני השאלה?
- כיצד תשתנה התשובות לסעיפים א-ג אם במקום אדמה ווירטואלית נחבר את המשווה להארקה של  $0V$ ? (כלומר:  $V_{DD} = 0V$ )

3) תלמיד הנדסה החליט לבנות מערך של 5 לדים (LEDs) אשר יתארו את עוצמת הרעש הנקלט דרך מיקרופון כמתואר באיור הבא:

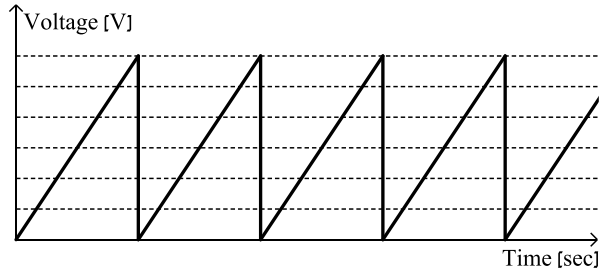


באיור מופיעים הרכיבים החשמליים הבאים:

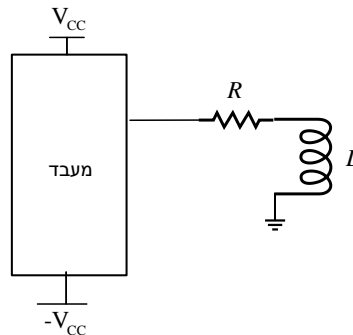
- מיקרופון אשר קולט את אות הקול מהסביבה הנדגמת.
  - מעגל עם נגדים זהים  $R_1, R_2, \dots, R_6$  ומקור מתח של 15V.
  - משווי-גודל זהים (Comparators) המחוברים למתח של 15V ולאדמה 0V (לא מופיע באיור).
  - לדים אדומים D1, ..., D5 ונגדים  $R_{L1}, R_{L2}, \dots, R_{L5}$  המחוברים אליהם בטור.
- א. הסבר את פעולת המעגל.
- ב. מצא ערכי הנגדים  $R_1, R_2, \dots, R_6$  מתאימים שיחלקו את עוצמת אות הקול הנקלט לרמות שוות.
- ג. ללדים מתח הפעלה משתנה לפי מיקומם:  $1 \leq k \leq 5: V_D(k) = 1.8 + 0.1k \text{ V}$ .  
 וזרם עבודה מירבי של  $1 \leq k \leq 5: I_{D_{\max}}(k) = 10 + 4k \text{ mA}$ .  
 מה צריכים להיות ערכי הנגדים  $R_{L1}, R_{L2}, \dots, R_{L5}$  שיבטיחו כי הלדים לא יעברו את הזרם המירבי?
- ד. בתרשים הזמני שלפניך מופיע אות מתח במקטע זמן מסוים. השלם את רמות המתח בציר האנכי, חלק את האות לתחומים וציין כמה לדים יפעלו בכל תחום.



ה. בניסוי שערך התלמיד, נקלט דרך המיקרופון אות שעוצמתו מתאימה לגל שיני מסור מחזורי בתחום  $[0V : 15V]$ , ראה איור למטה. האם ניתן לומר כי אופן הארת הלדים יכול להיות מתואר ע"י PWM? אם כן, מה הוא ה-D.C. של כל לד? אם לא – נמק.



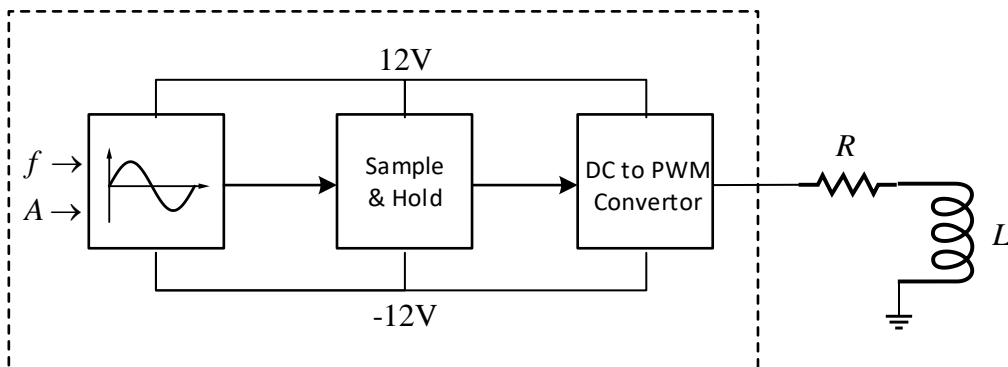
4) בשאלה זו נדבר על אות PWM מסוג מסוים הנקרא SPWM - Sine Pulse Width Modulation. אות SPWM משמש להזנת סלילים של מנועי השראה תלת-פאזיים (3 phase induction motors). האיור להלן מתאר חלקית את המעגל החשמלי הנדרש על מנת להזין סליל אחד באות SPWM.



\* הערה:

המעגל המלא כולל רכיבים נוספים כגון: גשר דיודות, מיישר מתח, ומפסקים אלקטרוניים. אולם לצורך השאלה כאן נתעלם מהם.

את פעולת המעבד ליצירת אות SPWM ניתן לחלק ל-3 שלבים, כפי שמתואר באיור הבא:





- מעגל המקבל אות סינוס בתדר  $f$  ומשרעת  $A$ .
- מעגל דוגם (Sample & Hold) אשר דוגם את אות הכניסה כל  $T$  שניות ומחזיק במשך זמן זה את ערך המתח שמדד.
- מעגל הממיר את גודל המתח שמקבל בכניסה לאות PWM עם D.C. מתאים.

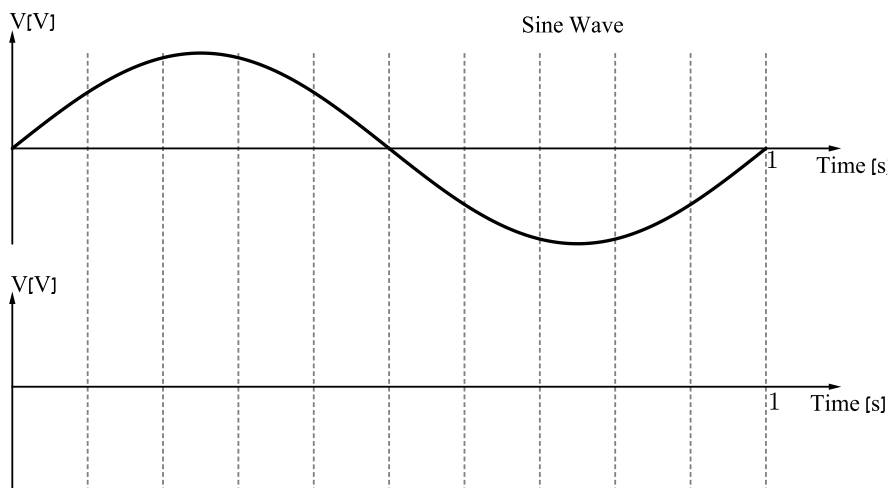
לצורך הפשטות נניח כי המעגל האחרון יוצר מחזור אחד בלבד של אות PWM עבור כל מתח כניסה שמקבל. כמו כן, ה-D.C. יחושב ביחס ל-0V כלומר:

$$v_{in} = 9V \rightarrow D.C. = \frac{9}{12} \cdot 100 = 75\%$$

$$v_{in} = -3V \rightarrow D.C. = \frac{-3}{-12} \cdot 100 = 25\%$$

כל הרכיבים מחוברים למתחי הזנה של  $[-12V : 12V]$ .

- א. נניח אות סינוס עם משרעת  $A = 12V$  ותדר  $f = 1Hz$ . המעגל הדוגם מבצע דגימה בכל  $T = 0.1sec$  ואילו המעגל הממיר יוצר אות PWM בכל  $T$ .
- כתוב ביטוי מתמטי לאות הסינוס.
  - לכמה מקטעים יחולק מחזור שלם של אות סינוס? כמה מקטעים הם בחצי החיובי וכמה הם בחצי השלילי?
  - כתוב את כל מתחי הדגימה שימדוד המעגל הדוגם. הנח כי הדגימה הראשונה מתבצעת בתחילת המחזור של אות הסינוס.
  - כתוב את כל ה-D.C. שיתקבלו במעגל הממיר בכל מקטע.
- ב. באיור שלפניך מופיע מחזור אחד של אות הסינוס. הוסף לגרף שמתחתיו את התיאור של אות SPWM למחזור שלם. ציין את חלוקת המקטעים ונמק את שיקולך.



- ג. המעבד שולח את האות דרך נגד  $R$  לסליל שמאפשר זרם מירבי של  $I_{\max} = 0.1A$ . מה צריך להיות ערכו של הנגד במקרה זה?  
 ד. מה היתרון בשליחת אות SPWM לסליל במקום אות הסינוס המקורי?

### תשובות סופיות:

- (1) א.  $R = 412.5\Omega$   
 ב. i. עוצמה חזקה ביותר:  $V = 3.9V$ , עוצמה נמוכה ביותר:  $V = 1.7V$   
 ב. ii. level1:  $D.C. = 34\%$ , level2:  $D.C. = 56\%$ , level3:  $D.C. = 78\%$   
 ב. iii. level2:  $t_{ON} = 35\text{ ns}$ ,  $t_{OFF} = 27.5\text{ ns}$ , level1:  $t_{ON} = 21.25\text{ ns}$ ,  $t_{OFF} = 41.25\text{ ns}$   
 level3:  $t_{ON} = 48.75\text{ ns}$ ,  $t_{OFF} = 13.75\text{ ns}$   
 ב. iv. Level 2  
 ג. טענה (i) נכונה והשאר שגויות. ראו פירוט בסרטון הוידאו.  
 (2) א. מתקבל אות PWM עם  $f = 1\text{kHz}$ ,  $D.C. = 50\%$   
 ב. מתקבל אות PWM עם  $f = 1\text{kHz}$ ,  $D.C. = 42\%$   
 ג.  $V_{REF} = -4.7V$   
 ד. ב-א וב-ב כלום לא ישתנה. ב-ג' לא ניתן לעבור  $D.C. = 50\%$   
 (3) א. ראה הסבר בסרטון הוידאו.  
 ב.  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 2.5\text{ k}\Omega$   
 ג.  $R_{L1} = 935.7\Omega$ ,  $R_{L2} = 722.2\Omega$ ,  $R_{L3} = 586.36\Omega$ ,  $R_{L4} = 492.3\Omega$ ,  $R_{L5} = 423.3\Omega$   
 ד. ראה פתרון מלא בסרטון הוידאו.  
 ה. בהחלט! כל לד יידלק לפי D.C. שונה:  
 LED 1:  $D.C. = 83.33\%$ , LED 2:  $D.C. = 66.67\%$ , LED 3:  $D.C. = 50\%$   
 LED 4:  $D.C. = 33.33\%$ , LED 5:  $D.C. = 16.67\%$   
 (4) א. i.  $v_{in}(t) = 12\sin(2\pi t)\text{ V}$   
 א. ii. 5 מקטעים חיוביים ו-5 מקטעים שליליים.  
 א. iii.  $V_0 = 0V$ ,  $V_1 = 7.05V$ ,  $V_2 = 11.41V$ ,  $V_3 = 11.41V$ ,  $V_4 = 7.05V$   
 $V_5 = 0V$ ,  $V_6 = -7.05V$ ,  $V_7 = -11.41V$ ,  $V_8 = -11.41V$ ,  $V_9 = -7.05V$   
 א. iv.  $D.C._{0,5} = 0\%$ ,  $D.C._{2,3,7,8} = 95\%$ ,  $D.C._{1,4,6,9} = 58.75\%$   
 ב. ראה השלמת גרף בסרטון הוידאו.  
 ג.  $R = 120\Omega$   
 ד. 1. חיסכון באיבוד הספק. (יעילות גדולה יותר). 2. נשארים דיגיטליים.