



משרד התעשייה המכהן וההעסקה  
אגף בכיר להכשרה ולפיתוח כח - אדם

המכון הממשלתי להכשרה טכנולוגית - היי-טק

מחלקת הבחינות

**חוברת עזר לבחינת הגמר הממלכתית**

**באלקטרוניקה ספרתית**

אין להוסיף לחוברת העזר דבר כלשהו, כולל הערות בכתב-יד

בתוקף מ- תשס"ד ינואר 2004

מהדורה 1

**כתב וערך: מהנדס יאיר חדאד - מכללת חיל הקשר.**

**הנחיה: א. לבנה - מפקח על החשמל  
והאלקטרוניקה במה"ט.**

**יעוץ מקצועי:**

**מהנדס קובי גולדברג - מכללת חיל הקשר.**

**מהנדס יובל בק - אוניברסיטת ת"א.**

חוברת זו נכתבה בהוקרה לאחראי קורס הנדסאים  
במכללת חיל הקשר

## **רנ"ג חיים אלפסי ז"ל**

נהרג בצומת צריפין  
בתאריך יב' באלול תשס"ג 9.9.2003  
יהי זכרו ברוך

## תוכן - העתיים

|     |                                       |
|-----|---------------------------------------|
| 04  | 1. ייצוג מספרים בקסיסים שונים         |
| 11  | 2. אלגברה פולימית ושערים לואיים       |
| 14  | 3. הצגת פונקציות פולימיות וצמצומן     |
| 17  | 4. מערכות ספרתיות צירופיות שונות      |
| 24  | 5. מערכות ספרתיות סדרתיות שונות       |
| 28  | 6. רכיבים צירופיים מתוכנתים           |
| 32  | 7. מכונות מצבים                       |
| 39  | 8. צורות גל בסיסיות במעגלים ספרתיים   |
| 44  | 9. תכונות רכיבים הימניים (קבל וסלייל) |
| 46  | 10. משוואת הדפקים היסודית             |
| 47  | 11. רשת מעבירה גבוהים (High Pass)     |
| 51  | 12. רשת מעבירה נמוכים (Low Pass)      |
| 55  | 13. מנחת מקולל                        |
| 57  | 14. רכיבי מיתוג                       |
| 64  | 15. מעגלי קטימה (Clipping)            |
| 66  | 16. מעגלי ריתוק (Claping)             |
| 71  | 17. משווא אנלוגי (Comparator)         |
| 75  | 18. מעגלי תזמון                       |
| 79  | 19. ממירים $f/v$ - $v/f$              |
| 86  | 20. מעגלי המרה A/D , D/A              |
| 99  | 21. משפחות לואיות                     |
| 107 | 22. נוסחאות בחשאל ופמתמטיקה           |



## 1. ייצוג מספרים בסיסיים שונים

### בסיסי ספירה

בבסיס ספירה  $r$  קיימות  $r$  ספרות, כאשר כל ספרה  $a$  בתחום:  $0 \leq a \leq r-1$ .

אם  $r > 10$  משתמשים בנוסף לספרות  $0, 1, \dots, 9$ , גם באותיות  $A, B, C, \dots$ .

בבסיס  $r$  לכל ספרה יש משקל שהוא חזקה של  $r$ . החזקה נקבעת על פי מיקומה של הספרה במספר:

כל ספרה משמאל לנקודה (בשלם), המשקל מופיע בחזקה חיובית של  $r$ .

כל ספרה מימין לנקודה (בשבר), המשקל מופיע בחזקה שלילית של  $r$ .

באופן חישובי, המקדמים של מספר המיוצג לפי בסיס  $r$  מוכפלים בחזקות של  $r$ :

$$(a_n a_{n-1} \dots a_2 a_1 a_0 . a_{-1} a_{-2} \dots a_{-m})_r = a_n \cdot r^n + a_{n-1} \cdot r^{n-1} + \dots + a_2 \cdot r^2 + a_1 \cdot r^1 + a_0 \cdot r^0 + a_{-1} \cdot r^{-1} + a_{-2} \cdot r^{-2} + \dots + a_{-m} \cdot r^{-m}$$

ערכי המקדמים  $a_j$  יכולים לנוע בין 0 ל-  $(r-1)$ .

### בסיסים מקובלים במערכות ספרתיות

|          |             |           |
|----------|-------------|-----------|
| $r = 2$  | (בסיס - 2)  | בינארי    |
| $r = 8$  | (בסיס - 8)  | אוקטלי    |
| $r = 16$ | (בסיס - 16) | הקסדצימלי |

### השוואת מספרים בבסיסים שונים

| עשרוני<br>(בסיס 10) | בינארי<br>(בסיס 2) | אוקטלי<br>(בסיס 8) | הקסדצימלי<br>(בסיס 16) |
|---------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| 00                  | 00000              | 00                 | 00                     |
| 01                  | 00001              | 01                 | 01                     |
| 02                  | 00010              | 02                 | 02                     |
| 03                  | 00011              | 03                 | 03                     |
| 04                  | 00100              | 04                 | 04                     |
| 05                  | 00101              | 05                 | 05                     |
| 06                  | 00110              | 06                 | 06                     |
| 07                  | 00111              | 07                 | 07                     |
| 08                  | 01000              | 10                 | 08                     |
| 09                  | 01001              | 11                 | 09                     |
| 10                  | 01010              | 12                 | 0A                     |
| 11                  | 01011              | 13                 | 0B                     |
| 12                  | 01100              | 14                 | 0C                     |
| 13                  | 01101              | 15                 | 0D                     |
| 14                  | 01110              | 16                 | 0E                     |
| 15                  | 01111              | 17                 | 0F                     |
| 16                  | 10000              | 20                 | 10                     |
| 17                  | 10001              | 21                 | 11                     |
| :                   | :                  | :                  | :                      |

### המרת מספר שלם מבסיס עשרוני לבסיס r כלשהו

ראשית נחלק את המספר העשרוני ב- r. נרשום את המנה והשארית. את המנה נחלק שוב ב- r, ונקבל מנה ושארית חדשות. נמשיך תהליך זה, עד שהמנה המתקבלת היא 0. המספר בבסיס r הוא אוסף כל השאריות בסדר מהאחרונה לראשונה.

### דוגמה:

| פעולה חשבונית | מנה שלמה | שארית |       |
|---------------|----------|-------|-------|
| 50 : 2 =      | 25       | 0     | LSB ↑ |
| 25 : 2 =      | 12       | 1     |       |
| 12 : 2 =      | 6        | 0     |       |
| 6 : 2 =       | 3        | 0     |       |
| 3 : 2 =       | 1        | 1     |       |
| 1 : 2 =       | 0        | 1     | MSB   |

לכן:

$$(50)_{10} = (110010)_2$$

### המרת מספר מבסיס $r$ כלשהו לבסיס עשרוני

באופן חישובי המקדמים של מספר המיוצג בסיס  $r$  מוכפלים בחזקות של  $r$  בהתאם למיקום הספרה במספר:

$$(a_n a_{n-1} \dots a_2 a_1 a_0 . a_{-1} a_{-2} \dots a_{-m})_r = a_n \cdot r^n + a_{n-1} \cdot r^{n-1} + \dots + a_2 \cdot r^2 + a_1 \cdot r^1 + a_0 \cdot r^0 + a_{-1} \cdot r^{-1} + a_{-2} \cdot r^{-2} + \dots + a_{-m} \cdot r^{-m}$$

דוגמה:

$$(3402.3)_5 = 3 \cdot 5^3 + 4 \cdot 5^2 + 0 \cdot 5^1 + 2 \cdot 5^0 + 3 \cdot 5^{-1} = 477.6$$

לכן:

$$(3402.3)_5 = (477.6)_{10}$$

### הפיכת מספר בינארי לאוקטלי ולהיפך

מחלקים את המספר הבינארי לשלושות, ממירים כל שלשה בינארית בנפרד לספרה אוקטלית.

$$\left( \begin{array}{ccccccccc} 010 & 110 & 001 & 101 & 011 & . & 111 & 100 & 100 \\ 2 & 6 & 1 & 5 & 3 & & 7 & 4 & 4 \end{array} \right)_2 = (26153.744)_8$$

מספר בינארי המורכב ממספר סיביות שאיננו מתחלק ב-3, ניתן להשלים ע"י הוספת אפסים משמאל לשלם ו/או מימין לשבר. בהמרה הפוכה כל ספרה במספר האוקטלי מומרת לשלשה בינארית.

### הפיכת מספר בינארי להקסדצימלי ולהיפך

מחלקים את המספר הבינארי לרביעיות, ממירים כל רביעייה בינארית בנפרד לספרה הקסדצימלית.

$$\left( \begin{array}{ccccccccc} 0010 & 1100 & 0110 & 1011 & . & 1111 & 0010 & & \\ 2 & C & 6 & B & & F & 2 & & \end{array} \right)_2 = (2C6B.F2)_{16}$$

מספר בינארי המורכב ממספר סיביות שאיננו מתחלק ב-4, ניתן להשלים ע"י הוספת אפסים משמאל לשלם ו/או מימין לשבר. בהמרה הפוכה כל ספרה במספר ההקסדצימלי מומרת לרביעייה בינארית.

## ייצוג מספרים שליליים

### א. שיטת גודל וסימן

שיטה בה מוסיפים ספרת סימן מצד שמאל למספר. 0 ייצג מספר חיובי, ו-1 ייצג מספר שלילי.

$$(-N)_r = [(r-1) a_{n-1} \dots a_1 a_0 \cdot a_{-1} a_{-2} \dots]$$

למשל, כאשר מדובר על בסיס 2 ( $r=2$ ):

$$(+1101.011)_2 = (01101.011)_2$$

$$(-1101.001)_2 = (11101.011)_2$$

### ב. משלים ל- $(r-1)$

המשלים נוצר ע"י החסרת כל ספרה מ- $(r-1)$ .

$$(-N)_r = [\bar{a}_{n-1} \dots \bar{a}_1 \bar{a}_0 \cdot \bar{a}_{-1} \bar{a}_{-2} \dots]$$

$$\bar{a} = (r-1) - a \quad \text{כאשר:}$$

למשל, כאשר מדובר על בסיס 2 ( $r=2$ ). עבור המשלים ל-1, יש לבצע עבור כל סיבית בנפרד את החישוב  $\bar{a} = 1 - a$ , כלומר להפוך כל 1 ל-0 וכל 0 ל-1:

$$(-01101.001)_2 = (10010.110)_2$$

### ג. משלים ל- $r$

המשלים נוצר ע"י החסרת המספר כולו מ- $r^n$  (כאשר  $n$  הוא מספר הספרות של המספר). ניתן לקבל את המשלים ל- $r$ , ע"י חיבור של 1 למשלים ל- $(r-1)$ . אם מדובר בשבר, יש לחבר מספר בעל "1" יחיד בספרת השבר הימנית ביותר למשלים ל- $(r-1)$ .

$$(-N)_r = r^n - (N)_r$$

למשל, כאשר מדובר על בסיס 2 ( $r=2$ ). המשלים ל-2 בדוגמה הבאה יהיה:

$$(-011.10)_2 = (2^3)_{10} - (011.10)_2 = (1000.00)_2 - (011.10)_2 = (100.10)_2$$

## הצגת מספר שלילי בשיטת המשלים ל-2

$$-A = (\overline{A} + 1) = (\text{המשלים ל-1 של } A) = (\text{המשלים ל-2 של } A) = (\text{ערך שלילי של } A)$$

במערכת בה מוצגים מספרים חיוביים ושליליים באורך מילה נתון, מבחינים בין מספר חיובי למספר שלילי באמצעות ה- MSB:

מספר חיובי  $MSB = 0$

מספר שלילי  $MSB = 1$

אם נעבוד בבסיס 2 באורך מילה של 3 סיביות, כאשר חצי מהמספרים חיוביים וחצי שליליים נקבל:

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 101 | 110 | 111 | 000 | 001 | 010 | 011 |
| -4  | -3  | -2  | -1  | 0   | 1   | 2   | 3   |

## עקרון החיסור בשיטת המשלים ל-2

במקום לחסר את Y מ-X ניתן להוסיף ל-X את המשלים ל-2 של Y:

$$X - Y = X + (-Y) = X + (\text{המשלים ל-2 של } Y)$$

## גלישה (Overflow)

סיכום שני מספרים באורך מילה בעלת n סיביות, כאשר מתקבלת תוצאה שאיננה ניתנת להצגה באורך מילה כזאת.

זיהוי הגלישה מתבצע ע"י השוואת שתי סיביות הנשא אחרונות, המתקבלות בתהליך הסיכום (הנשא מה- MSB וזה שלפניו).

אם 2 סיביות הנשא שונות - יש גלישה.

אם 2 סיביות הנשא זהות - אין גלישה.

## דוגמה לגלישה:

$$\begin{array}{r} 3 \\ + 2 \\ \hline 5 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 011 \\ + 010 \\ \hline 101 \end{array}$$

$$101 = -3 \neq 5$$

### צפנים

צופן משקלי - צופן בו ניתן לייחס לכל סיבית משקל קבוע.

### צפנים עשרוניים

הצגת מספר עשרוני בצורה בינארית, ע"י הצגת כל ספרה עשרונית כצירוף של 4 סיביות או יותר בחוקיות מסוימת.

### טבלה המציגה קודים שונים וערכם העשרוני

| ספרה עשרונית | (BCD) 8421 | Excess-3 | 84-2-1  | 2421    | (Biquinary) 5043210 |
|--------------|------------|----------|---------|---------|---------------------|
| 0            | 0000       | 0011     | 0000    | 0000    | 0100001             |
| 1            | 0001       | 0100     | 0111    | 0001    | 0100010             |
| 2            | 0010       | 0101     | 0110    | 0010    | 0100100             |
| 3            | 0011       | 0110     | 0101    | 0011    | 0101000             |
| 4            | 0100       | 0111     | 0100    | 0100    | 0110000             |
| 5            | 0101       | 1000     | 1011    | 1011    | 1000001             |
| 6            | 0110       | 1001     | 1010    | 1100    | 1000010             |
| 7            | 0111       | 1010     | 1001    | 1101    | 1000100             |
| 8            | 1000       | 1011     | 1000    | 1110    | 1001000             |
| 9            | 1001       | 1100     | 1111    | 1111    | 1010000             |
| 10 - 15      | לא קיים    | לא קיים  | לא קיים | לא קיים | לא קיים             |

### הערה

בטבלה לעיל צופן XS-3 הוא היחיד שאינו צופן משקלי.

### דוגמה

$$(536)_{10} = (0101\ 0011\ 0110)_{BCD} = (1000\ 0110\ 1001)_{XS-3}$$

### צפנים בינאריים

הצגת מספר בינארי, כצירוף של סיביות בחוקיות מסוימת.

### קוד גריי (Gray Code)

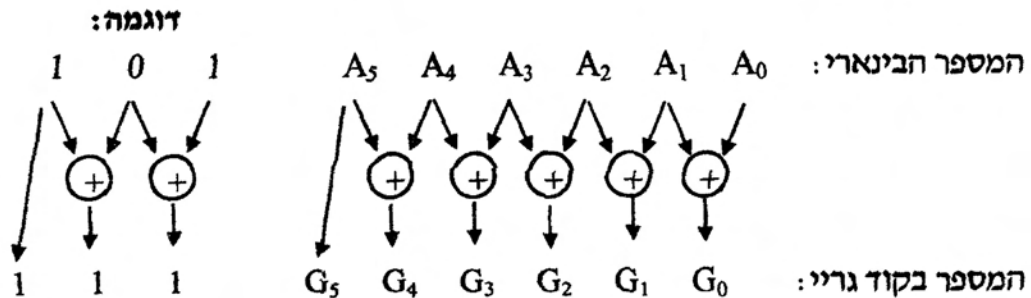
קוד גריי הנו קוד למספרים בינאריים, קוד המציג את המספר הבינארי בצורה שונה. העיקרון של קוד גריי הוא שכל מספר שונה מקודמו בסיבית אחת בלבד.

טבלה המייצגת את קוד גריי ל - 3 סיביות

| מספר בינארי | קוד גריי |
|-------------|----------|
| 000         | 000      |
| 001         | 001      |
| 010         | 011      |
| 011         | 010      |
| 100         | 110      |
| 101         | 111      |
| 110         | 101      |
| 111         | 100      |

קיימת שיטה כללית להפיכת כל מספר בינארי לקוד גריי:

הסיביות עוברות פעולת XOR, בהתאם לתרשים להלן, מלבד סיבית ה- MSB המועתקת כפי שהיא.

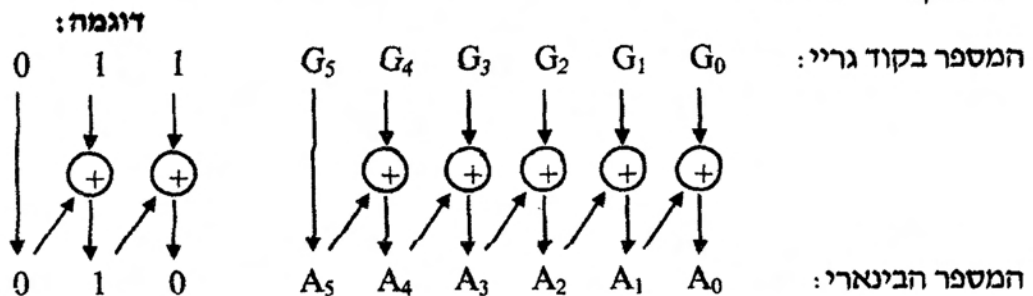


ניתן לרשום את ההמרה ע"י הנוסחה:

$$G_i = A_i \oplus A_{i+1}$$

קיימת שיטה כללית להפיכת קוד גריי למספר בינארי:

הסיביות עוברות פעולת XOR, בהתאם לתרשים להלן, מלבד סיבית ה- MSB המועתקת כפי שהיא.



ניתן לרשום את ההמרה ע"י הנוסחה:

$$A_i = G_i \oplus A_{i+1}$$

## 2. אלקטרה בוליאנית ושערים לוגיים

### פעולות בוליאניות בסיסיות

א. NOT (INVERT) (היפוך)

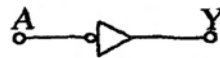
טבלת אמת

| A | Y |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

סימון

$$Y = \bar{A}$$

שער לוגי



ב. OR ("או")

טבלת אמת

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

סימון

$$Y = A + B$$

שער לוגי



ג. AND ("וגם")

טבלת אמת

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

סימון

$$Y = A \cdot B$$

שער לוגי





## פעולות בוליאניות בסיסיות - המשך

ד. (OR + NOT) NOR

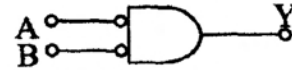
טבלת אמת

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

סימון

$$Y = \overline{A + B}$$

שער לוגי



ה. (AND + NOT) NAND

טבלת אמת

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

סימון

$$Y = \overline{A \cdot B}$$

שער לוגי



ו. (Exclusive OR) XOR

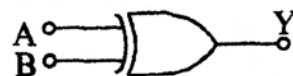
טבלת אמת

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

סימון

$$Y = A \oplus B = A \cdot \overline{B} + \overline{A} \cdot B$$

שער לוגי



## פעולות בוליאניות בסיסיות - המשך

ז. (Exclusive NOR) XNOR

| טבלת אמת                                                                                                                                                                                                                                 | סימון | שער לוגי |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |                                                                                                                  |                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <table border="1"> <tr> <th>A</th><th>B</th><th>Y</th></tr> <tr> <td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr> <td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr> <td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> | A     | B        | Y | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | $Y = A \oplus B = A \cdot \overline{B} + \overline{A} \cdot B$ $Y = A \cdot B + \overline{A} \cdot \overline{B}$ |  |
| A                                                                                                                                                                                                                                        | B     | Y        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |                                                                                                                  |                                                                                    |
| 0                                                                                                                                                                                                                                        | 0     | 1        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |                                                                                                                  |                                                                                    |
| 0                                                                                                                                                                                                                                        | 1     | 0        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |                                                                                                                  |                                                                                    |
| 1                                                                                                                                                                                                                                        | 0     | 0        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |                                                                                                                  |                                                                                    |
| 1                                                                                                                                                                                                                                        | 1     | 1        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |                                                                                                                  |                                                                                    |

## כללי יסוד באלגברה בוליאנית

|                                           |                                             |                |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------|
| $X + 0 = X$                               | $X \cdot 0 = 0$                             | א. כלל האפס    |
| $X + 1 = 1$                               | $X \cdot 1 = X$                             | ב. כלל האחד    |
| $X + X = X$                               | $X \cdot X = X$                             | ג. כלל השוויון |
| $X + \overline{X} = 1$                    | $X \cdot \overline{X} = 0$                  | ד. כלל ההיפוך  |
| $X + Y = Y + X$                           | $X \cdot Y = Y \cdot X$                     | ה. כלל החילוף  |
| $X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$               | $X \cdot (Y \cdot Z) = (X \cdot Y) \cdot Z$ | ו. כלל הקיבוץ  |
| $X \cdot (Y + Z) = X \cdot Y + X \cdot Z$ | $X + Y \cdot Z = (X + Y) \cdot (X + Z)$     | ז. כלל הפילוג  |

## כללי צמצום

|                                    |                                          |    |
|------------------------------------|------------------------------------------|----|
| $X + X \cdot Y = X$                | $X \cdot (X + Y) = X$                    | ח. |
| $X + \overline{X} \cdot Y = X + Y$ | $X \cdot (\overline{X} + Y) = X \cdot Y$ | ט. |

## כללי דה-מורגן

|                                                      |                                                      |    |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----|
| $\overline{X + Y} = \overline{X} \cdot \overline{Y}$ | $\overline{X \cdot Y} = \overline{X} + \overline{Y}$ | י. |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----|

הערה: כל אחד מהכללים לעיל ניתן להרחבה, עבור מספר גדול יותר של משתנים.

### 3. הצגת פונקציות בוליאניות ו-3N1N

הפונקציה הבוליאנית היא משתנה בוליאני, שערכו תלוי בצירוף הערכים של משתני הפונקציה.

ערך הפונקציה יכול להיות אחת מהאפשרויות הבאות: "1", "0" או  $\phi$  (don't care). צמצום הפונקציה יכול להתבצע על פי כללי הצמצום של האלגברה הבוליאנית, או באמצעות מפת קרנו. הערך  $\phi$  יכול לעזור בצמצום הפונקציה, יכול לשמש כערך של "1" או "0" בהתאם לצרכים.

#### טבלת אמת

דוגמה לפונקציה:  $F(A, B, C)$

| מס' | A | B | C | F      | $F_1$ | $F_2$ |
|-----|---|---|---|--------|-------|-------|
| 0   | 0 | 0 | 0 | 0      | 0     | 0     |
| 1   | 0 | 0 | 1 | $\phi$ | 0     | 1     |
| 2   | 0 | 1 | 0 | 1      | 1     | 1     |
| 3   | 0 | 1 | 1 | 0      | 1     | 0     |
| 4   | 1 | 0 | 0 | 1      | 0     | 1     |
| 5   | 1 | 0 | 1 | 0      | 0     | 0     |
| 6   | 1 | 1 | 0 | $\phi$ | 0     | 1     |
| 7   | 1 | 1 | 1 | 1      | 1     | 1     |

#### תכניות קנוניות

א. סכום מכפלות סטנדרטיות - סכום של כל המכפלות הסטנדרטיות (Minterm),

עבורן הערך של הפונקציה הוא "1". הדוגמה להלן מתייחסת לטבלה לעיל.

$$F_1(A, B, C) = \sum(2, 3, 7) = m_2 + m_3 + m_7 = \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C} + ABC$$

ב. מכפלת סכומים סטנדרטיים - מכפלה של כל הסכומים הסטנדרטיים (Maxterm),

עבורן הערך של הפונקציה הוא "0". תדוגמה להלן מתייחסת לטבלה לעיל.

$$F_2(A, B, C) = \Pi(0, 3, 5) = M_0 \cdot M_3 \cdot M_5 = (A + B + C) \cdot (A + \overline{B} + \overline{C}) \cdot (\overline{A} + B + \overline{C})$$

## מפות קרנו

א. תבנית של מפת קרנו ל-2 משתנים:  $F(A,B)$

|           |   | $\bar{A}$ |    | $A$ |    |
|-----------|---|-----------|----|-----|----|
|           |   | 0         | 1  | 0   | 1  |
| $\bar{B}$ | 0 | 00        | 01 | 10  | 11 |
|           | 1 | 00        | 01 | 10  | 11 |

ב. תבנית של מפת קרנו ל-3 משתנים:  $F(A,B,C)$

|           |   | $\bar{A}\bar{B}$ |     | $\bar{A}B$ |     | $A\bar{B}$ |     | $AB$ |     |
|-----------|---|------------------|-----|------------|-----|------------|-----|------|-----|
|           |   | 00               | 01  | 10         | 11  | 00         | 01  | 10   | 11  |
| $\bar{C}$ | 0 | 000              | 010 | 110        | 100 | 001        | 011 | 101  | 111 |
|           | 1 | 000              | 010 | 110        | 100 | 001        | 011 | 101  | 111 |

ג. תבנית של מפת קרנו ל-4 משתנים:  $F(A,B,C,D)$

|                  |    | $\bar{A}\bar{B}$ |      | $\bar{A}B$ |      | $A\bar{B}$ |      | $AB$ |      |
|------------------|----|------------------|------|------------|------|------------|------|------|------|
|                  |    | 00               | 01   | 10         | 11   | 00         | 01   | 10   | 11   |
| $\bar{C}\bar{D}$ | 00 | 0000             | 0100 | 1100       | 1000 | 0001       | 0101 | 1101 | 1001 |
|                  | 01 | 0000             | 0100 | 1100       | 1000 | 0001       | 0101 | 1101 | 1001 |
| $\bar{C}D$       | 10 | 0010             | 0110 | 1110       | 1010 | 0011       | 0111 | 1111 | 1011 |
|                  | 11 | 0010             | 0110 | 1110       | 1010 | 0011       | 0111 | 1111 | 1011 |

הערה: A מציג את ספרת ה-MSB לכלל המפות קרנו (בעמוד זה ובעמוד הבא).

ד. תבנית של מפת קרנו ל-5 משתנים:  $F(A,B,C,D,E)$ , בצורה דו-מימדית.

| ABC              |    | $\bar{A}$        | $\bar{A}$        | $\bar{A}$   | $\bar{A}$   | A                | A           | A                | A           |
|------------------|----|------------------|------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| DE               |    | 00               | 01               | 11          | 10          | 00               | 01          | 11               | 10          |
| $\bar{D}\bar{E}$ | 00 | 00000<br>0       | 00100<br>4       | 01100<br>12 | 01000<br>8  | 11000<br>24      | 11100<br>28 | 10100<br>20      | 10000<br>16 |
| $\bar{D}E$       | 01 | 00001<br>1       | 00101<br>5       | 01101<br>13 | 01001<br>9  | 11001<br>25      | 11101<br>29 | 10101<br>21      | 10001<br>17 |
| DE               | 11 | 00011<br>3       | 00111<br>7       | 01111<br>15 | 01011<br>11 | 11011<br>27      | 11111<br>31 | 10111<br>23      | 10011<br>19 |
| $D\bar{E}$       | 10 | 00010<br>2       | 00110<br>6       | 01110<br>14 | 01010<br>10 | 11010<br>26      | 11110<br>30 | 10110<br>22      | 10010<br>18 |
|                  |    | $\bar{B}\bar{C}$ | $\bar{B}\bar{C}$ | BC          | $\bar{B}C$  | $\bar{B}\bar{C}$ | BC          | $\bar{B}\bar{C}$ | $\bar{B}C$  |

תבנית של מפת קרנו ל-5 משתנים:  $F(A,B,C,D,E)$ , בצורה תלת-מימדית.

| BC               |    | $\bar{B}\bar{C}$ | $\bar{B}C$ | $\bar{B}\bar{C}$ | $\bar{B}C$  |
|------------------|----|------------------|------------|------------------|-------------|
| DE               |    | 00               | 01         | 11               | 10          |
| $\bar{D}\bar{E}$ | 00 | 00000<br>0       | 00100<br>4 | 01100<br>12      | 01000<br>8  |
| $\bar{D}E$       | 01 | 00001<br>1       | 00101<br>5 | 01101<br>13      | 01001<br>9  |
| DE               | 11 | 00011<br>3       | 00111<br>7 | 01111<br>15      | 01011<br>11 |
| $D\bar{E}$       | 10 | 00010<br>2       | 00110<br>6 | 01110<br>14      | 01010<br>10 |

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 10000 | 10100 | 11100 | 11000 |
| 16    | 20    | 28    | 24    |
| 10001 | 10101 | 11101 | 11001 |
| 17    | 21    | 29    | 25    |
| 10011 | 10111 | 11111 | 11011 |
| 19    | 23    | 31    | 27    |
| 10010 | 10110 | 11110 | 11010 |
| 18    | 22    | 30    | 26    |

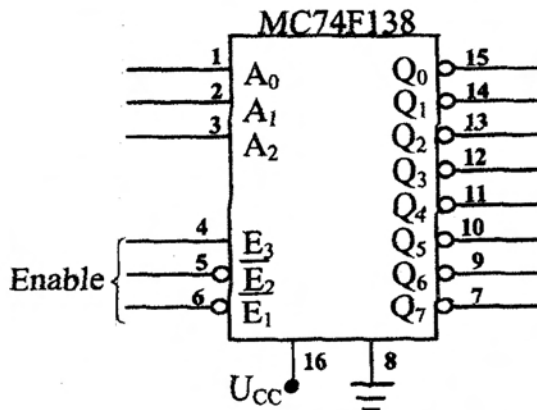
### מקרים מיוחדים

- מפת קרנו מלאה ב- "1" - הפונקציה שווה ל- "1".
- מפת קרנו מלאה ב- "0" - הפונקציה שווה ל- "0".
- מפת קרנו מסודרת כלוח שחמט - הפונקציה היא XOR/XNOR.
  - זיהוי XOR - "0" במקום 0 בטבלה (והמשך הסידור כלוח שחמט).
  - זיהוי XNOR - "1" במקום 0 בטבלה (והמשך הסידור כלוח שחמט).

## 4. אצרכות ספרתיות צירופיות שונות

### א. מפענח (Decoder)

המפענח הינו רכיב ספרתי המאפשר עי"י מבואות Enable. מבואות המפענח  $A_0-A_2$  (סביות צופן) מקבלות קוד בינארי, קוד הקובע באיזה רגל במוצא  $\overline{Q_0} - \overline{Q_7}$  תתקבל רמה "0".



H - HIGH (לוגי "1")

L - LOW (לוגי "0")

X - DON'T CARE

### טבלת אמת

|            | כניסות           |                  |                  |       |       |       | יציאות           |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|            | איפשר            |                  |                  | צופן  |       |       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| N          | $\overline{E_1}$ | $\overline{E_2}$ | $\overline{E_3}$ | $A_2$ | $A_1$ | $A_0$ | $\overline{Q_0}$ | $\overline{Q_1}$ | $\overline{Q_2}$ | $\overline{Q_3}$ | $\overline{Q_4}$ | $\overline{Q_5}$ | $\overline{Q_6}$ | $\overline{Q_7}$ |
| סימט מפענח | H                | X                | X                | X     | X     | X     | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                |
|            | X                | H                | X                | X     | X     | X     | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                |
|            | X                | X                | L                | X     | X     | X     | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                |
| 0          | L                | L                | H                | L     | L     | L     | L                | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                |
| 1          | L                | L                | H                | L     | L     | H     | H                | L                | H                | H                | H                | H                | H                | H                |
| 2          | L                | L                | H                | L     | H     | L     | H                | H                | L                | H                | H                | H                | H                | H                |
| 3          | L                | L                | H                | L     | H     | H     | H                | H                | H                | L                | H                | H                | H                | H                |
| 4          | L                | L                | H                | H     | L     | L     | H                | H                | H                | H                | L                | H                | H                | H                |
| 5          | L                | L                | H                | H     | L     | H     | H                | H                | H                | H                | H                | L                | H                | H                |
| 6          | L                | L                | H                | H     | H     | L     | H                | H                | H                | H                | H                | H                | L                | H                |
| 7          | L                | L                | H                | H     | H     | H     | H                | H                | H                | H                | H                | H                | H                | L                |

כניסה  
Active Low

כניסה  
Active High

יציאות Active Low

מפענח בינארי -  $k$  סיביות צופן  $\Leftarrow 2^k$  יציאות מפוענחות.

מפענח לא בינארי -  $k$  סיביות צופן  $\Leftarrow$  פחות מ-  $2^k$  יציאות מפוענחות.

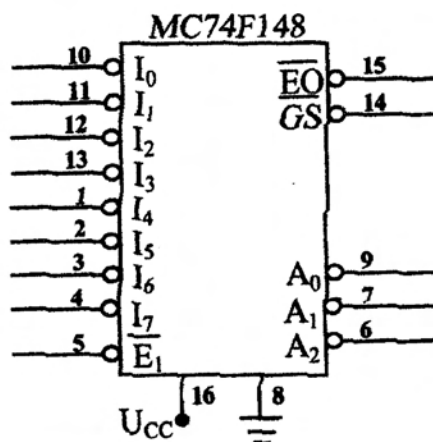
דוגמה למפענח לא בינארי: מפענח עשרוני - 4 סיביות צופן, 10 יציאות מפוענחות).

## ב. מקודד (Encoder)

המקודד מבצע פעולה הפוכה לפעולת המפענח. במוצא המקודד נקבל צירוף בינארי המתאים למספרו של הדק המבוא (במצב פעיל).

במבואות המקודד מופיעים רמות לוגיות שונות, רמה לוגית "0" שמופיעה באחת המבואות, קובעת את מצב יציאות המקודד  $\overline{A_0} - \overline{A_2}$ , בהתאם למבוא בה היא הופיעה.

במקודד בעל עדיפויות (Priority Encoder), אם יותר ממבוא אחד פעיל, יקבע הצירוף במוצא עפ"י המבוא בעל העדיפות הגבוהה ביותר מבין המבואות הפעילים.



H - HIGH (לוגי "1")

L - LOW (לוגי "0")

X - DON'T CARE

טבלת אמות

| כניסות           |       |       |       |       |       |       |       |       | יציאות          |                  |                  |                  |                 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| $\overline{E_1}$ | $I_0$ | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_4$ | $I_5$ | $I_6$ | $I_7$ | $\overline{GS}$ | $\overline{A_2}$ | $\overline{A_1}$ | $\overline{A_0}$ | $\overline{EO}$ |
| H                | X     | X     | X     | X     | X     | X     | X     | X     | H               | H                | H                | H                | H               |
| L                | H     | H     | H     | H     | H     | H     | H     | H     | H               | H                | H                | H                | L               |
| L                | X     | X     | X     | X     | X     | X     | X     | L     | L               | L                | L                | L                | H               |
| L                | X     | X     | X     | X     | X     | X     | L     | H     | L               | L                | L                | H                | H               |
| L                | X     | X     | X     | X     | X     | L     | H     | H     | L               | L                | H                | L                | H               |
| L                | X     | X     | X     | X     | L     | H     | H     | H     | L               | L                | H                | H                | H               |
| L                | X     | X     | X     | L     | H     | H     | H     | H     | L               | H                | L                | L                | H               |
| L                | X     | X     | L     | H     | H     | H     | H     | H     | L               | H                | L                | H                | H               |
| L                | X     | L     | H     | H     | H     | H     | H     | H     | L               | H                | H                | L                | H               |
| L                | L     | H     | H     | H     | H     | H     | H     | H     | L               | H                | H                | H                | H               |

### ג. מרבב (בורר) - Multiplexer (Selector)

מרבב בדומה לבורר או מרכזיה, גורם לניתוב של אחת מכניסות המבוא  $I_0-I_7$ .

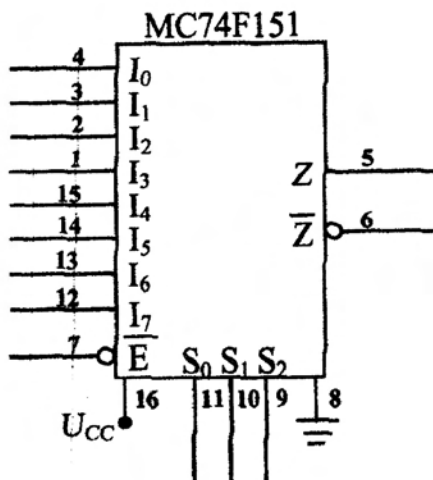
למוצא  $Z$ , בהתאם לקוד שמופיע במבואות  $S_0-S_2$ .

H - HIGH (לוגי "1")

L - LOW (לוגי "0")

X - DON'T CARE

#### טבלת אמת

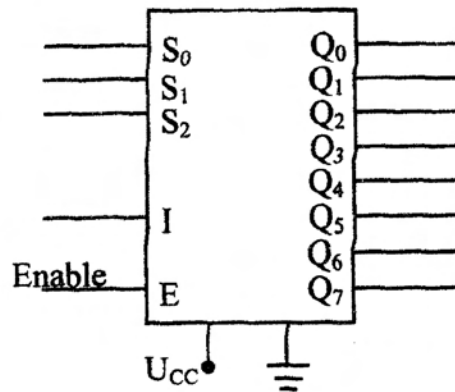


| כניסות    |       |       |       | יציאות      |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| $\bar{E}$ | $S_2$ | $S_1$ | $S_0$ | $\bar{Z}$   | $Z$   |
| H         | X     | X     | X     | H           | L     |
| L         | L     | L     | L     | $\bar{I}_0$ | $I_0$ |
| L         | L     | L     | H     | $\bar{I}_1$ | $I_1$ |
| L         | L     | H     | L     | $\bar{I}_2$ | $I_2$ |
| L         | L     | H     | H     | $\bar{I}_3$ | $I_3$ |
| L         | H     | L     | L     | $\bar{I}_4$ | $I_4$ |
| L         | H     | L     | H     | $\bar{I}_5$ | $I_5$ |
| L         | H     | H     | L     | $\bar{I}_6$ | $I_6$ |
| L         | H     | H     | H     | $\bar{I}_7$ | $I_7$ |



## ד. מפלג (Demultiplexer)

המפלג מבצע פעולה הפוכה לפעולת המרובב. גורם לניתוב של המבוא I לאחת היציאות  $Q_0-Q_7$ , בהתאם לקוד המופיע במבואות  $S_0-S_2$ .



H - HIGH (לוגי "1")

L - LOW (לוגי "0")

X - DON'T CARE

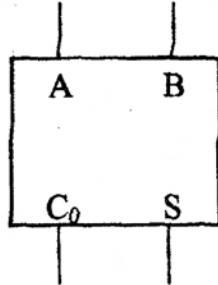
### טבלת אמת

| כניסות |       |       |       | יציאות |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| E      | $S_2$ | $S_1$ | $S_0$ | $Q_7$  | $Q_6$ | $Q_5$ | $Q_4$ | $Q_3$ | $Q_2$ | $Q_1$ | $Q_0$ |
| L      | X     | X     | X     | H      | H     | H     | H     | H     | H     | H     | H     |
| H      | L     | L     | L     | L      | L     | L     | L     | L     | L     | L     | I     |
| H      | L     | L     | H     | L      | L     | L     | L     | L     | L     | I     | L     |
| H      | L     | H     | L     | L      | L     | L     | L     | L     | I     | L     | L     |
| H      | L     | H     | H     | L      | L     | L     | L     | I     | L     | L     | L     |
| H      | H     | L     | L     | L      | L     | L     | I     | L     | L     | L     | L     |
| H      | H     | L     | H     | L      | L     | I     | L     | L     | L     | L     | L     |
| H      | H     | H     | L     | L      | I     | L     | L     | L     | L     | L     | L     |
| H      | H     | H     | H     | I      | L     | L     | L     | L     | L     | L     | L     |

### ה. חצי מסכם (Half Adder)

רכיב לוגי המבצע סיכום בינארי, ללא התחשבות בנשא מפעולה קודמת.

#### טבלת אמת

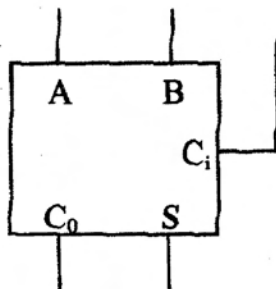


| כניסות |   | יציאות    |                       |
|--------|---|-----------|-----------------------|
| A      | B | סכום<br>S | נשא<br>C <sub>0</sub> |
| L      | L | L         | L                     |
| L      | H | H         | L                     |
| H      | L | H         | L                     |
| H      | H | L         | H                     |

### ו. מסכם מלא (Full Adder)

רכיב לוגי המבצע סיכום בינארי מלא, כולל נשא מפעולת חיבור קודמת.

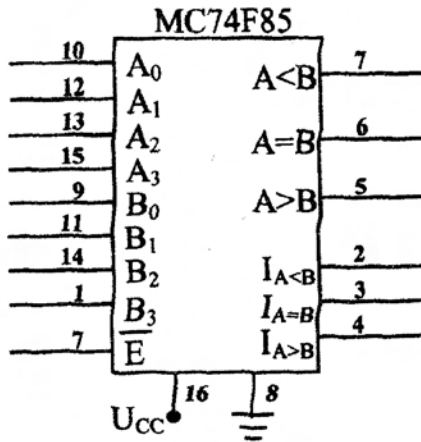
#### טבלת אמת



| כניסות |   |                | יציאות    |                       |
|--------|---|----------------|-----------|-----------------------|
| A      | B | C <sub>i</sub> | סכום<br>S | נשא<br>C <sub>0</sub> |
| L      | L | L              | L         | L                     |
| L      | L | H              | H         | L                     |
| L      | H | L              | H         | L                     |
| L      | H | H              | L         | H                     |
| H      | L | L              | H         | L                     |
| H      | L | H              | L         | H                     |
| H      | H | L              | L         | H                     |
| H      | H | H              | H         | H                     |

## 2. משווא (Comparator)

רכיב המבצע השוואה בין שני מספרים בינאריים, תוצאת ההשוואה מאפשרת לדעת האם המספרים שווים אחד לשני, או מי גדול מבין השניים.



H - HIGH (לוגי "1")

L - LOW (לוגי "0")

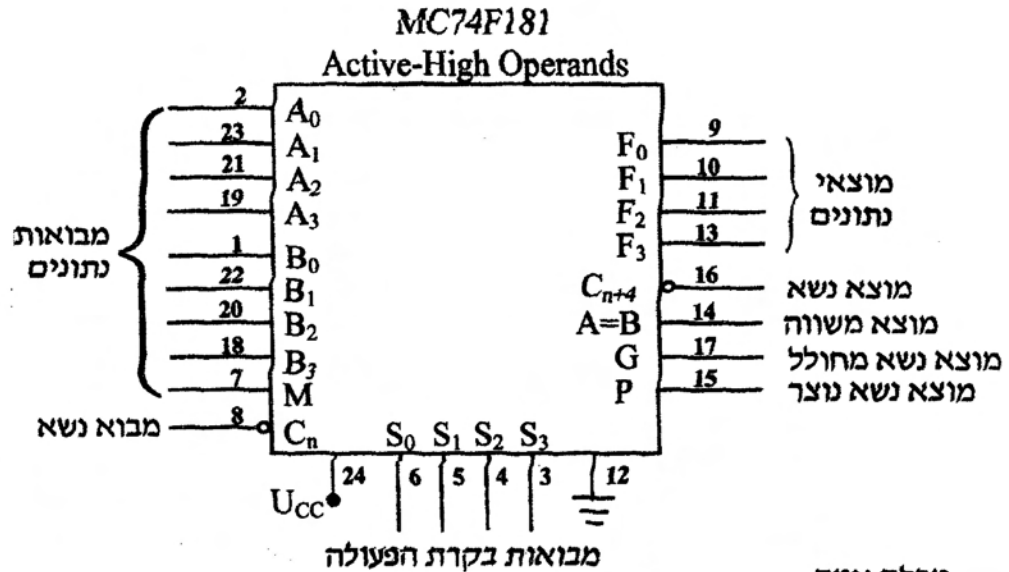
X - DON'T CARE

טבלת אמת

| השוואת כניסות |            |            |            | הרחבת כניסות |           |           | יציאות |       |       |
|---------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|-----------|--------|-------|-------|
| $A_3, B_3$    | $A_2, B_2$ | $A_1, B_1$ | $A_0, B_0$ | $I_{A>B}$    | $I_{A<B}$ | $I_{A=B}$ | $A>B$  | $A<B$ | $A=B$ |
| $A_3>B_3$     | X          | X          | X          | X            | X         | X         | H      | L     | L     |
| $A_3<B_3$     | X          | X          | X          | X            | X         | X         | L      | H     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2>B_2$  | X          | X          | X            | X         | X         | H      | L     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2<B_2$  | X          | X          | X            | X         | X         | L      | H     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1>B_1$  | X          | X            | X         | X         | H      | L     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1<B_1$  | X          | X            | X         | X         | L      | H     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0>B_0$  | X            | X         | X         | H      | L     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0<B_0$  | X            | X         | X         | L      | H     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0=B_0$  | H            | L         | L         | H      | L     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0=B_0$  | L            | H         | L         | L      | H     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0=B_0$  | L            | L         | H         | L      | L     | H     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0=B_0$  | X            | X         | H         | L      | L     | H     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0=B_0$  | H            | H         | L         | L      | L     | L     |
| $A_3=B_3$     | $A_2=B_2$  | $A_1=B_1$  | $A_0=B_0$  | L            | L         | L         | H      | H     | L     |

### ח. יחידה אריתמטית לוגית (Arithmetic Logic Unit)

MC74F181 מבצע פעולות חשבוניות ולוגיות, על מספרים בינאריים בני 4 - סיביות.



**טבלת אמת**

| Mode Select Inputs |                |                |                | M = H<br>Logic Function<br>F <sub>n</sub> Outputs | M = L C <sub>n</sub> = H <sup>*</sup><br>Arithmetic<br>F <sub>n</sub> Outputs |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| S <sub>0</sub>     | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> |                                                   |                                                                               |
| L                  | L              | L              | L              | $F = \overline{A}$                                | $F = A$                                                                       |
| L                  | L              | L              | H              | $F = \overline{A + B}$                            | $F = A + B$                                                                   |
| L                  | L              | H              | L              | $F = \overline{AB}$                               | $\overline{BF} = A +$                                                         |
| L                  | L              | H              | H              | $F = 0$                                           | $F = \text{minus } 1$                                                         |
| L                  | H              | L              | L              | $F = \overline{AB}$                               | $\overline{BF} = A \text{ plus } A$                                           |
| L                  | H              | L              | H              | $F = \overline{B}$                                | $\overline{BF} = (A + B) \text{ plus } A$                                     |
| L                  | H              | H              | L              | $F = A \oplus B$                                  | $F = A \text{ minus } B \text{ minus } 1$                                     |
| L                  | H              | H              | H              | $F = \overline{AB}$                               | $\text{minus } 1 \text{ } \overline{ABF} =$                                   |
| H                  | L              | L              | L              | $F = \overline{A + B}$                            | $F = A \text{ plus } \overline{AB}$                                           |
| H                  | L              | L              | H              | $F = \overline{A \oplus B}$                       | $F = A \text{ plus } B$                                                       |
| H                  | L              | H              | L              | $F = B$                                           | $\text{plus } \overline{AB} (A + \overline{B}) F =$                           |
| H                  | L              | H              | H              | $F = \overline{AB}$                               | $F = \overline{AB} \text{ minus } 1$                                          |
| H                  | H              | L              | L              | $F = 1$                                           | $F = A \text{ plus } A^{**}$                                                  |
| H                  | H              | L              | H              | $F = A + \overline{B}$                            | $F = (A + B) \text{ plus } A$                                                 |
| H                  | H              | H              | L              | $F = A + B$                                       | $\text{plus } A (A + \overline{B}) F =$                                       |
| H                  | H              | H              | H              | $F = A$                                           | $F = A \text{ minus } 1$                                                      |

\* כאשר C<sub>n</sub> = L המוצאים F<sub>n</sub> מקבלים תוספת של הערך אחד (+1) לתוצאה.

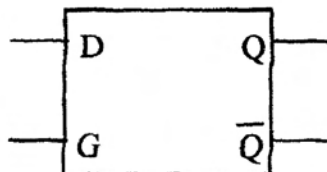
\*\* כל ביט מוזן שמאלה (כלומר מוכפל ב-2).

## 5. מצרכות ספרותיות סדרתיות שונות

א. דילגלגים (Flip Flops) ונועלים (Latches)

(1) נועל D - (D Latch)

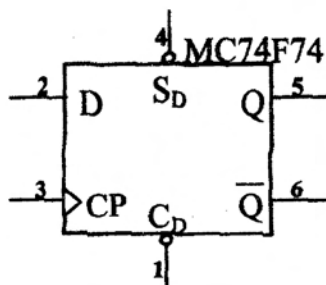
טבלת אמת



| G | D | Q |
|---|---|---|
| H | L | L |
| H | H | H |
| L | X | Q |

(2) דילגלג D - (D Flip Flop)

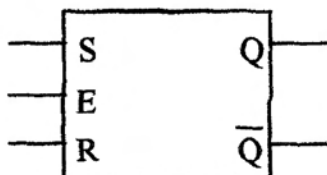
טבלת אמת



| S <sub>D</sub> | C <sub>D</sub> | CP | D | Q | Q̄ |
|----------------|----------------|----|---|---|----|
| L              | L              | X  | X | H | H  |
| L              | H              | X  | X | H | L  |
| H              | L              | X  | X | L | H  |
| H              | H              | H  | X | Q | Q̄ |
| H              | H              | L  | X | Q | Q̄ |
| H              | H              | ↑  | L | L | H  |
| H              | H              | ↑  | H | H | L  |

(3) נועל SR - (SR Latch)

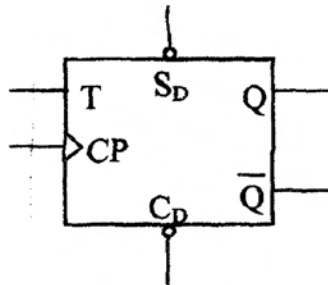
טבלת אמת



| E | S | R | Q          | Q̄ |
|---|---|---|------------|----|
| L | X | X | Q          | Q̄ |
| H | L | L | Q          | Q̄ |
| H | L | H | L          | H  |
| H | H | L | H          | L  |
| H | H | H | צירוף אסור |    |

#### (T Flip Flop) - T דלגלג (4)

##### טבלת אמת

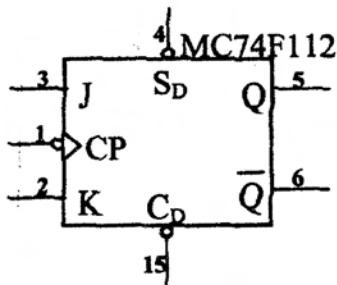


| $S_D$ | $C_D$ | CP         | T | Q         | $\bar{Q}$ |
|-------|-------|------------|---|-----------|-----------|
| L     | H     | X          | X | H         | L         |
| H     | L     | X          | X | L         | H         |
| H     | H     | H          | X | Q         | $\bar{Q}$ |
| H     | H     | L          | X | Q         | $\bar{Q}$ |
| H     | H     | $\uparrow$ | L | Q         | $\bar{Q}$ |
| H     | H     | $\uparrow$ | H | $\bar{Q}$ | Q         |

שעון לדלגלג - דירבון קצה חיובי (Positive Edge Trigger).

#### (JK Flip Flop) - JK דלגלג (5)

##### טבלת אמת



| $S_D$ | $C_D$ | CP           | J | K | Q         | $\bar{Q}$ |
|-------|-------|--------------|---|---|-----------|-----------|
| L     | L     | X            | X | X | H         | H         |
| L     | H     | X            | X | X | H         | L         |
| H     | L     | X            | X | X | L         | H         |
| H     | H     | H            | X | X | Q         | $\bar{Q}$ |
| H     | H     | L            | X | X | Q         | $\bar{Q}$ |
| H     | H     | $\downarrow$ | L | L | Q         | $\bar{Q}$ |
| H     | H     | $\downarrow$ | L | H | L         | H         |
| H     | H     | $\downarrow$ | H | L | H         | L         |
| H     | H     | $\downarrow$ | H | H | $\bar{Q}$ | Q         |

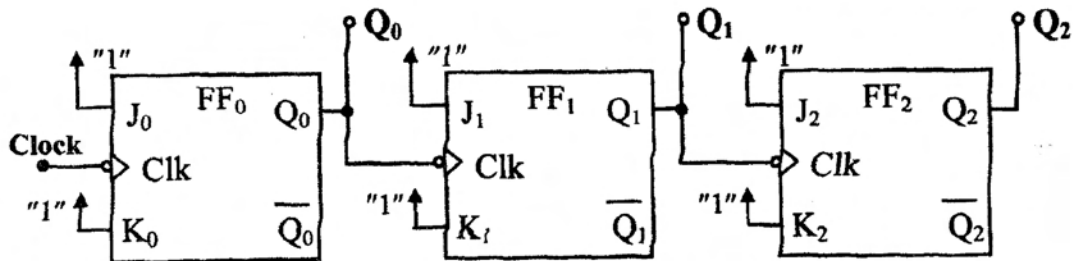
שעון לדלגלג - דירבון קצה שלילי (Negative Edge Trigger).

### ב. מונים

#### 1) מונה אסינכרוני

מונה בו קיים לפחות דלגלג אחד שאינו מחובר ישירות לשעון המרכזי.

#### מונה אסינכרוני פשוט



| Clock | MSB   |       | LSB   |
|-------|-------|-------|-------|
| ↓     | $Q_2$ | $Q_1$ | $Q_0$ |
| 0     | L     | L     | L     |
| 1     | L     | L     | H     |
| 2     | L     | H     | L     |
| 3     | L     | H     | H     |
| 4     | H     | L     | L     |
| 5     | H     | L     | H     |
| 6     | H     | H     | L     |
| 7     | H     | H     | H     |

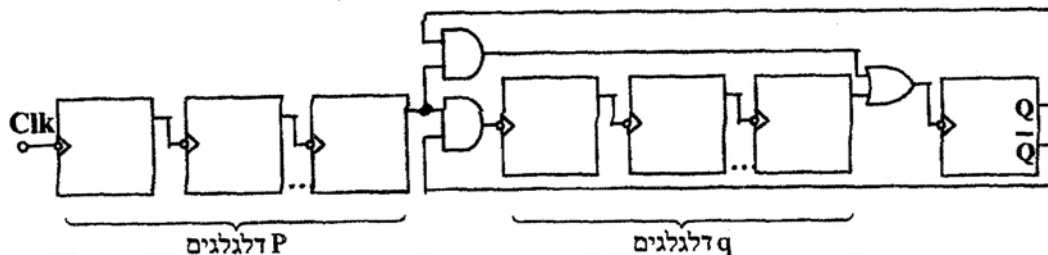
$k$  - דלגלגים נותנים אפשרות למנייה מכסימלית של  $N = 2^k$  מצבים (0 עד  $2^k - 1$ ).

מספר המצבים הקיימים במונה - נקראים המחזור של המונה.

במונה אסינכרוני בעל מחזור  $N \neq 2^k$ , ניתן לממש באמצעות מכונת מצבים, או ע"י חיבור כלל הדלגלגים לרגל Clear במנייה מסויימת, באמצעות חיבור שערים לוגים.

#### מונה אסינכרוני עם חסימה

כאשר קיים צורך במונה אסינכרוני בעל מחזור  $N \neq 2^k$ , ניתן לבצע זאת ע"י חסימה:



כל הדלגלגים מסוג T מספר הדלגלגים :  $k = p + q + 1$

מחזור המונה :  $N = 2^p * (2^q + 1)$

מונה שבו כל מבואות השעון של הדלגלים מתחברים ישירות (במקביל) לשעון המרכזי.

**(3) מונה טבעתי (מונה ג'ונסון טבעתי - Ring Counter)**

The diagram shows three D flip-flops, labeled  $FF_0$ ,  $FF_1$ , and  $FF_2$ , connected in a shift register configuration. The output  $Q_0$  of  $FF_0$  is connected to the input  $D$  of  $FF_1$ . The output  $Q_1$  of  $FF_1$  is connected to the input  $D$  of  $FF_2$ . The output  $Q_2$  of  $FF_2$  is the final output. All three flip-flops share a common clock signal ( $Clk$ ) and a common reset signal ( $\overline{Reset}$ ). The reset signal is connected to the  $\overline{S_D}$  input of  $FF_0$ , the  $\overline{C_D}$  input of  $FF_1$ , and the  $\overline{C_D}$  input of  $FF_2$ . The outputs are labeled  $Q_0$ ,  $Q_1$ , and  $Q_2$ .

27



## 6. רכיבים צירופיים מתוכנתים

רכיבים מתוכנתים מאפשרים לממש פונקציות צירופיות, בעלות מספר רב של משתנים במעגל משולב יחיד.

### ישנם סוגים שונים למעגלים משולבים בדי תכנות

א. מערך לוגי בר תכנות מסוג PLD - Programmable Logic Device  
רכיב שנצרב ע"י היצרן.

- 1 ROM - Read Only Memory (רכיב - ROM 74ALS244A).
- 2 PAL - Programmable Array Logic (רכיב - 20L8).
- 3 PLA - Programmable Logic Arrays (רכיב - F153).

ב. מערך לוגי בר תכנות מסוג FPLA - Field Programmable Logic Arrays  
רכיב שנצרב ע"י המשתמש.

ג. מערך לוגי בר תכנות מסוג GAL - Generic Array Logic  
רכיב שנצרב ע"י המשתמש ומאפשר בנוסף מחיקה בצורה חשמלית.

ד. מערך לוגי בר תכנות מסוג EPLD - Erasable Programmable Logic Arrays  
רכיב שנצרב ע"י המשתמש ומאפשר בנוסף מחיקה בצורה אולטרה סגולה.

ה. רכיבים מתוכנתים מורכבים - רכיב מסוג PLD לתכנון מערכות גדולות עם נפח תכנות גדול.

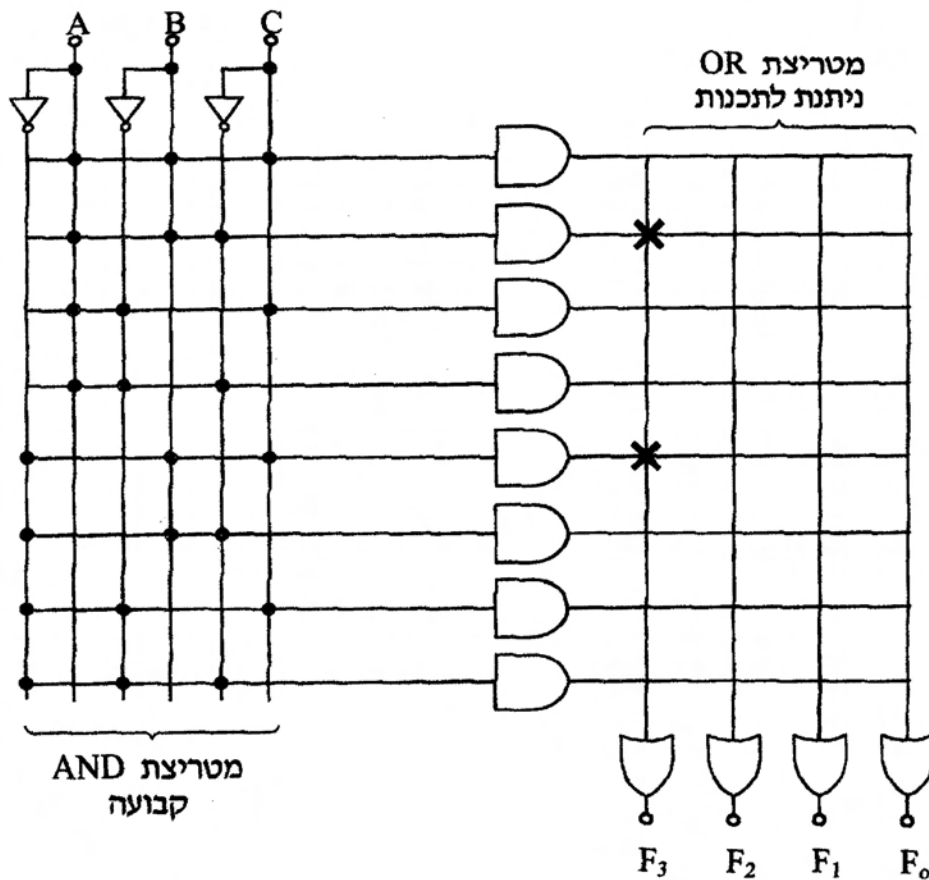
- 1 CPLD - Complex Programmable Logic Device (רכיב - MAX7000).
- 2 FPGA - Field Programmable Gate Arrays (רכיב - XC4000).

## פירוט המעגלים השונים

### א. ROM (Read Only Memory)

רכיב תכנות מסוג ROM הינו רכיב משולב שאינו ניתן למחיקה (קיימות משפחות נוספות עם פרמטרים נוספים EPROM, E<sup>2</sup>PROM, PROM).  
הרכיב מורכב משתי מטריצות: מטריצת AND ומטריצת OR, כאשר מטריצת ה- AND קבועה ומטריצת ה- OR ניתנת לתכנות (לצריבה).

### דוגמה למערך



בדוגמה לעיל הפונקציה המתקבלת היא:

$$F_3 = ABC + \bar{A}\bar{B}C$$

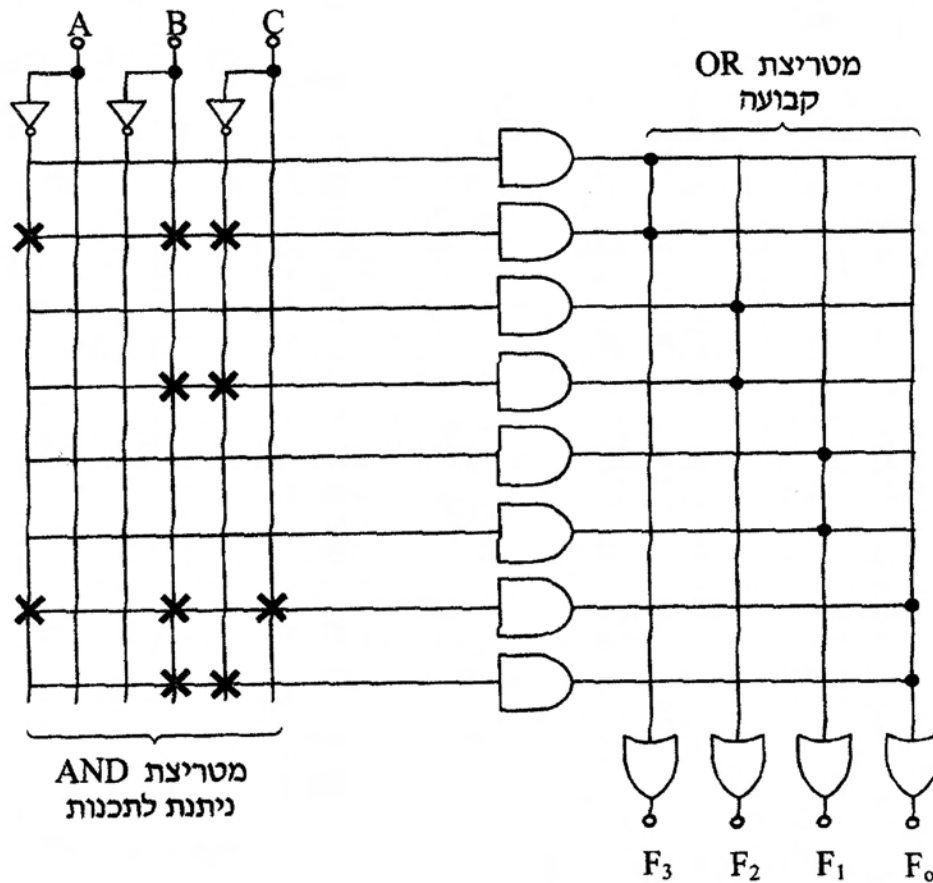
x - חיבור מתוכנת.

• - חיבור קבוע.

## ב. PAL (Programmable Array Logic)

רכיב תכנות מסוג PAL הינו רכיב משולב מסוג LSI המהווה מערך שערים דו-שלבי. הרכיב מורכב משתי מטריצות: מטריצת AND ומטריצת OR, כאשר מטריצת ה-OR קבועה ומטריצת ה-AND ניתנת לתכנות (לצריבה).

### דוגמה למערך



בדוגמה לעיל הפונקציה המתקבלת היא:

$$\begin{cases} F_0 = \overline{A}BC + B\overline{C} \\ F_2 = B\overline{C} \\ F_3 = \overline{A}B\overline{C} \end{cases}$$

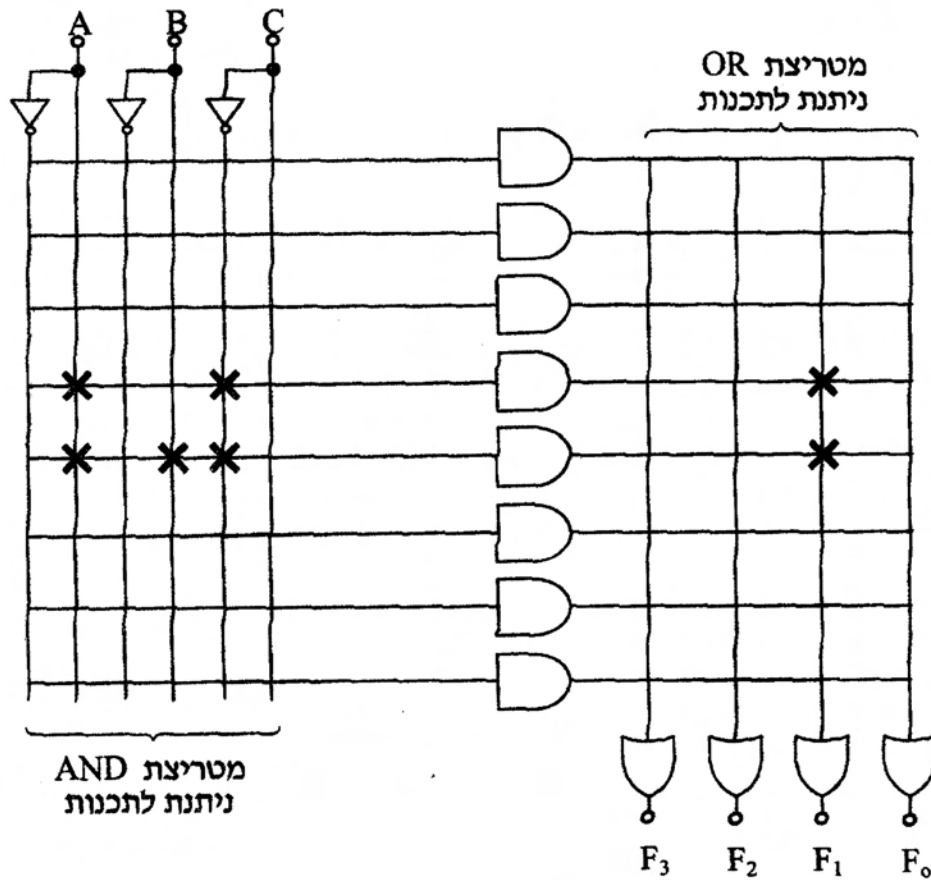
× - חיבור מתוכנת.

• - חיבור קבוע.

### ג. PLA (Programmable Logic Arrays)

רכיב תכנות מסוג PLA הינו רכיב משולב מסוג LSI המהווה מערך שערים דו-שלבי. הרכיב מורכב ממטריצת AND וממטריצת OR, כאשר שתי המטריצות ניתנות לתכנות (לצריבה).

#### דוגמה למערך



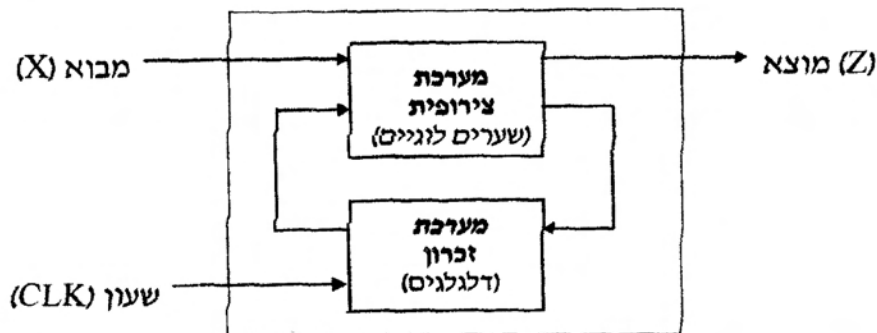
בדוגמה לעיל הפונקציה המתקבלת היא:

$$F_1 = A\bar{C} + AB\bar{C}$$

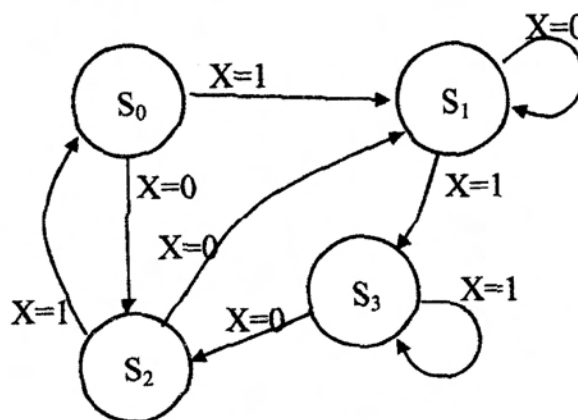
x - חיבור מתוכנת.

## 7. מכולות מצבים

### מבנה עקרוני של מכולת מצבים



### דוגמה לדיאגרמת מצבים



טבלת המעברים מתארת את דיאגרמת המצבים בצורת טבלה במקום בצורה גרפית.  
להלן טבלת מעברים של הדוגמה לעיל עבור המצבים:  $X=0$  ועבור  $X=1$ .

| P.S.  | N.S.  |       |
|-------|-------|-------|
|       | $X=0$ | $X=1$ |
| $S_0$ | $S_2$ | $S_1$ |
| $S_1$ | $S_1$ | $S_3$ |
| $S_2$ | $S_1$ | $S_0$ |
| $S_3$ | $S_2$ | $S_3$ |

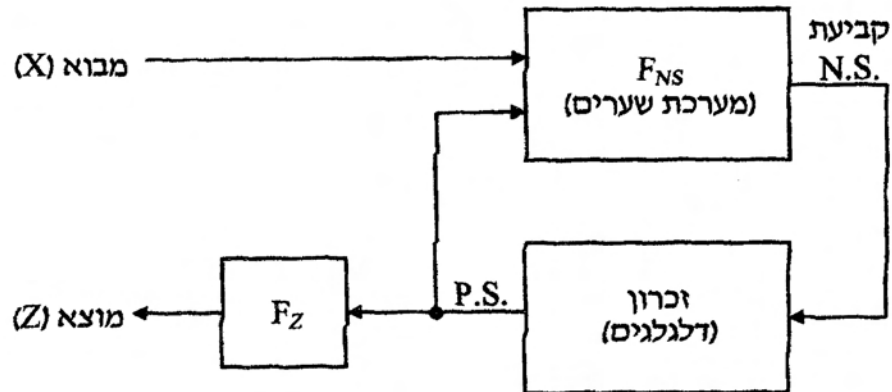
המצב הנוכחי מסומן בטבלה ע"י P.S. (Present State).

המצב הבא מסומן בטבלה ע"י N.S. (Next State).

## מכונות מצבים

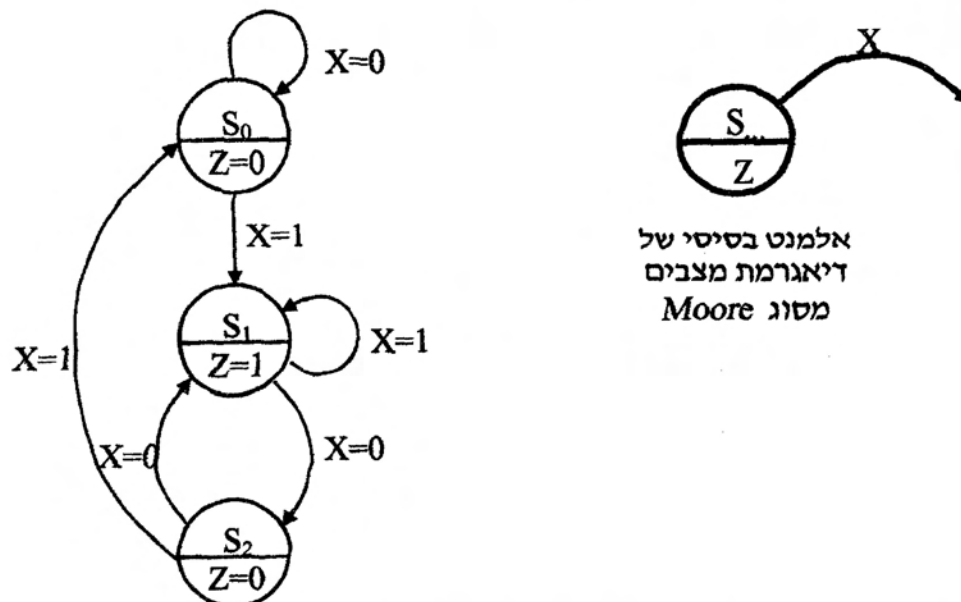
קיימים שני סוגים עקרוניים של מכונות מצבים: Mealy ו- Moore.

### צורה עקרונית של מערכת מסוג Moore



במערכת מסוג Moore המוצא תלוי אך ורק במצב בו נמצאים מוצאי הדלגלים.

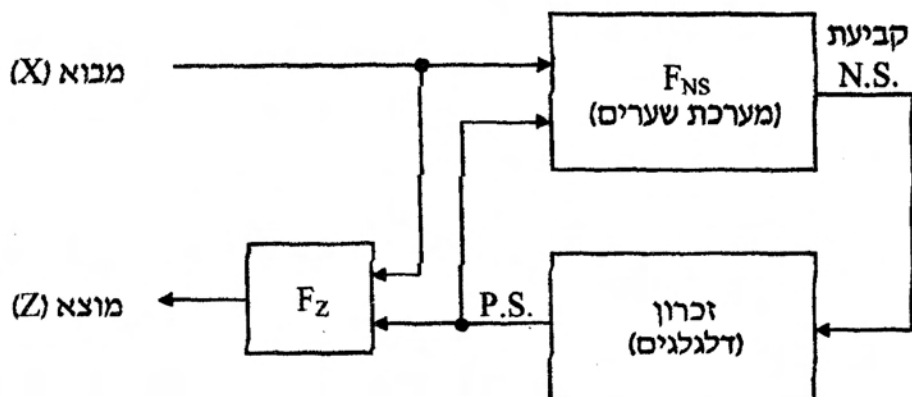
דיאגרמת מצבים של מכונה מסוג Moore נראית בצורה הבאה:



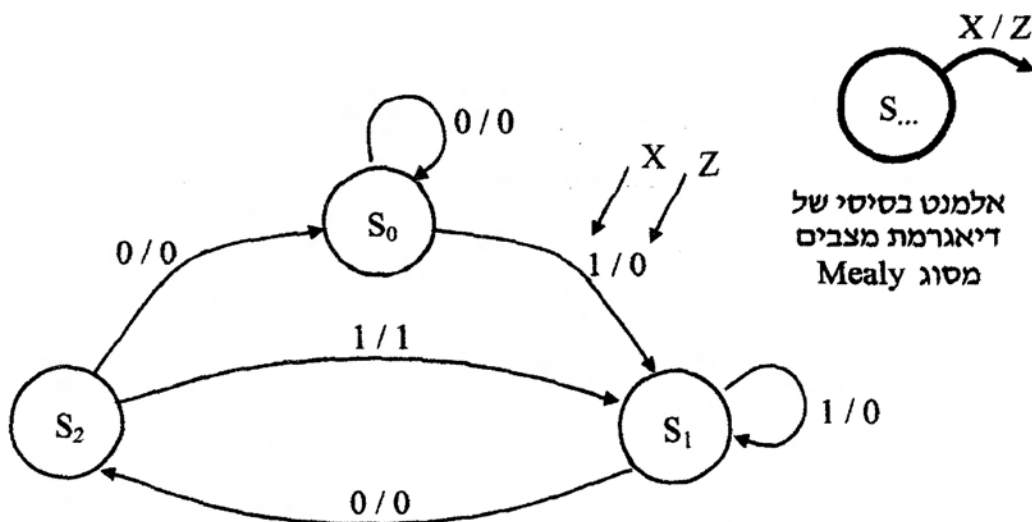
להלן טבלת מצבים של מערכת מסוג Moore עבור הדוגמה שלעיל:

| P.S.           | N.S.           |                | Z |
|----------------|----------------|----------------|---|
|                | X=0            | X=1            |   |
| S <sub>0</sub> | S <sub>0</sub> | S <sub>1</sub> | 0 |
| S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>1</sub> | 1 |
| S <sub>2</sub> | S <sub>1</sub> | S <sub>0</sub> | 0 |

### צורה עקרונית של מערכת מסוג Mealy



במערכת מסוג Mealy המוצא תלוי גם במצב בו נמצאים מוצאי הדלגלים וגם במבוא.  
דיאגרמת מצבים של מכונה מסוג Mealy נראית בצורה הבאה:



להלן טבלת מצבים של מערכת מסוג Mealy עבור הדוגמה לעיל:

| P.S.           | N.S.           |                | Z   |     |
|----------------|----------------|----------------|-----|-----|
|                | X=0            | X=1            | X=0 | X=1 |
| S <sub>0</sub> | S <sub>0</sub> | S <sub>1</sub> | 0   | 0   |
| S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>1</sub> | 0   | 0   |
| S <sub>2</sub> | S <sub>0</sub> | S <sub>1</sub> | 0   | 1   |

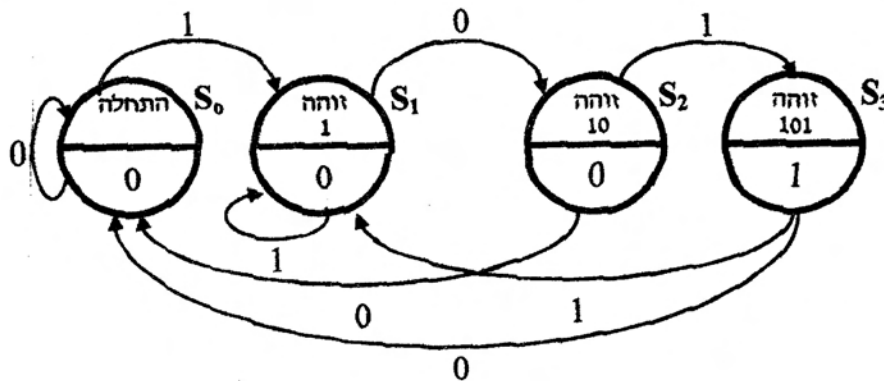
## שלבי התכנון של מערכת סדרתית

תפקידו של מתכנן מערכת סדרתית לתאר את דיאגרמת המצבים של המערכת, ולממשה באמצעים המתאימים ביותר שעומדים לרשותו.  
עם קבלת דרישות התכנון, על המתכנן לנתח את דרישות התכנון ולחבין את מבנה המערכת הדרושה (מכונת מצבים או מערכת צידושים רגילה).  
המימוש מתבצע בשלבים הבאים:

### א. דיאגרמת המצבים

יש לבחור את סוג המכונה: מכונה מסוג Moore או Mealy.  
יש לשרטט דיאגרמת מצבים המתארת את המערכת הנדרשת, ע"י מערכת קטנה (מצומצמת) ככל האפשר.  
דוגמה:

זיהוי הסדרה 101 בסדרת סיביות אינסופית (נבנה מכונה מסוג Moore).



### ב. טבלת מצבים

יש לתרגם את דיאגרמת המצבים לטבלת מצבים, המתארת את המעבר ממצב למצב כתלות במבוא, ואת מוצא המערכת בצורה של טבלה.  
בדוגמה לעיל:

| P.S.           | N.S.           |                | Z |
|----------------|----------------|----------------|---|
|                | X=0            | X=1            |   |
| S <sub>0</sub> | S <sub>0</sub> | S <sub>1</sub> | 0 |
| S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>1</sub> | 0 |
| S <sub>2</sub> | S <sub>0</sub> | S <sub>3</sub> | 0 |
| S <sub>3</sub> | S <sub>0</sub> | S <sub>1</sub> | 1 |



### ג. הקצאות מצבים + טבלת מעברים

הקצאת מצבים היא בחירת סימול בינארי מסוים (כגון: 00, 01, 10, 11) לכל

אחד מהמצבים שבטבלת המצבים (כגון:  $S_0, S_1, S_2, S_3$ ).

מספר הביטים בסימול הבינארי, יהיה מספר הדלגלים הדרוש למימוש.

#### הקצאת מצבים:

|            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|
| $Q_1Q_0$   | $Q_1Q_0$   | $Q_1Q_0$   | $Q_1Q_0$   |
| $S_0 - 00$ | $S_1 - 01$ | $S_2 - 10$ | $S_3 - 11$ |

טבלת מעברים היא הצגה של טבלת המצבים עם הסימונים הבינאריים שהוקצו למצבים.

#### טבלת המעברים:

| P.S.<br>$Q_1Q_0$ | N.S.              |                   | Z |
|------------------|-------------------|-------------------|---|
|                  | $X=0$<br>$Q_1Q_0$ | $X=1$<br>$Q_1Q_0$ |   |
| 0 0              | 0 0               | 0 1               | 0 |
| 0 1              | 1 0               | 0 1               | 0 |
| 1 0              | 0 0               | 1 1               | 0 |
| 1 1              | 0 0               | 0 1               | 1 |

### ד. טבלת עירור לדלגלג

המימוש מתבצע ע"י דלגלים מהסוג: SR, JK, T, D. יש לבנות טבלת עירור לדלגלג שנבחר. טבלת עירור הנה טבלה המראה את הערכים הדרושים בכניסות הדלגלג, על מנת לקבל את כל אחד מהמעברים האפשריים של הרמה שבמוצאו

( $0 \rightarrow 0, 0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 1$ ).

#### טבלת עירור לדלגלג D-FF:

| (N.S)<br>$Q_{n+1}$ | D |
|--------------------|---|
| 0                  | 0 |
| 1                  | 1 |

טבלת עירור לדלגלג T-FF:

| (P.S)<br>$Q_n$ | (N.S)<br>$Q_{n+1}$ | T |
|----------------|--------------------|---|
| 0              | 0                  | 0 |
| 0              | 1                  | 1 |
| 1              | 0                  | 1 |
| 1              | 1                  | 0 |

טבלת עירור לדלגלג SR-FF:

| (P.S)<br>$Q_n$ | (N.S)<br>$Q_{n+1}$ | S      | R      |
|----------------|--------------------|--------|--------|
| 0              | 0                  | 0      | $\phi$ |
| 0              | 1                  | 1      | 0      |
| 1              | 0                  | 0      | 1      |
| 1              | 1                  | $\phi$ | 0      |

טבלת עירור לדלגלג JK-FF:

| (P.S)<br>$Q_n$ | (N.S)<br>$Q_{n+1}$ | J      | K      |
|----------------|--------------------|--------|--------|
| 0              | 0                  | 0      | $\phi$ |
| 0              | 1                  | 1      | $\phi$ |
| 1              | 0                  | $\phi$ | 1      |
| 1              | 1                  | $\phi$ | 0      |

### טבלת עירור למערכת

ה.

טבלת העירור למערכת, מתארת את הרמות הלוגיות הדרושות במבואות העירור של הדלגלים, על מנת ליישם את טבלת המעברים.

דוגמה עם דלגלג SR-FF:

| P.S. |                |                | N.S.           |                |                |                |                |                |   |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
| X    | Q <sub>1</sub> | Q <sub>0</sub> | Q <sub>1</sub> | Q <sub>0</sub> | S <sub>1</sub> | R <sub>1</sub> | S <sub>0</sub> | R <sub>0</sub> | Z |
| 0    | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | φ              | 0              | φ              | 0 |
| 0    | 0              | 1              | 1              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 0 |
| 0    | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | φ              | 0 |
| 0    | 1              | 1              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 1              | 1 |
| 1    | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | φ              | 1              | 0              | 0 |
| 1    | 0              | 1              | 0              | 1              | 0              | φ              | φ              | 0              | 0 |
| 1    | 1              | 0              | 1              | 1              | φ              | 0              | 1              | 0              | 0 |
| 1    | 1              | 1              | 0              | 1              | 0              | 1              | φ              | 0              | 1 |

טבלת מעברים

טבלת עירור למערכת

### מימוש המערכת הצירופית

ו.

יש לבנות מפות קרנו עבור מבואות הדלגלים ועבור המוצא Z. מבואות הדלגלים תלויים במוצאי הדלגלים (Q<sub>3</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>1</sub>, Q<sub>0</sub>) ומבוא המערכת (X). המוצא Z במכונת מצבים מסוג Moore תלוי במוצאי הדלגלים, ובמכונת מצבים מסוג Mealy תלוי במוצאי הדלגלים ובמבוא (X).

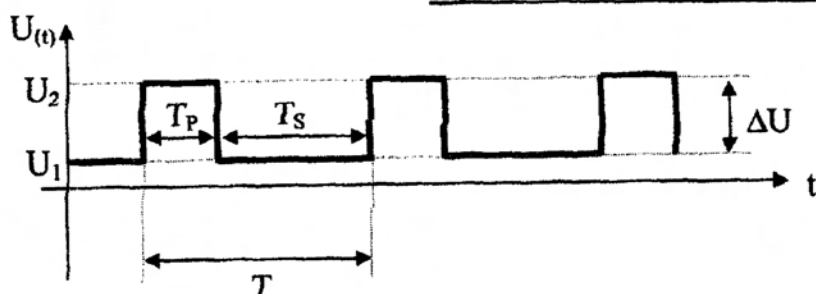
### שרטוט המערכת כולה

ז.

יש לשרטט את הדלגלים יחד עם המערכת הצירופית הקובעת את מבואותיהם ואת המוצא Z.

## 8. צורות על בסיסיות במעצבים ספרתיים

### גל ריבועי מחזורי - Square Wave



$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{U_1^2 \cdot T_S + U_2^2 \cdot T_P}{T}}$$

$$U_{\text{ave}} = \frac{U_1 \cdot T_S + U_2 \cdot T_P}{T}$$

$\Delta U = U_2 - U_1$  : (Pulse Amplitude) גובה הדופק

$T_P$  : (Pulse Width) משך הדופק

$T_S$  : (Space Width) משך הרווח

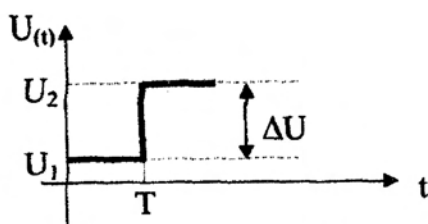
$T = T_P + T_S$  : זמן המחזור

$f$  : תדירות

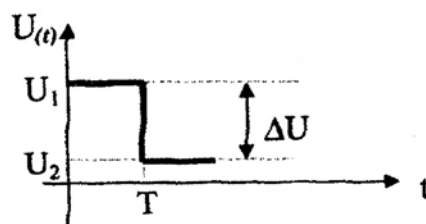
$$f = \frac{1}{T}$$

$$\text{Duty Cycle} = \frac{T_P}{T} \cdot 100\% = \frac{T_P}{T_P + T_S} \cdot 100\%$$

### פונקצית מדרגה - Step



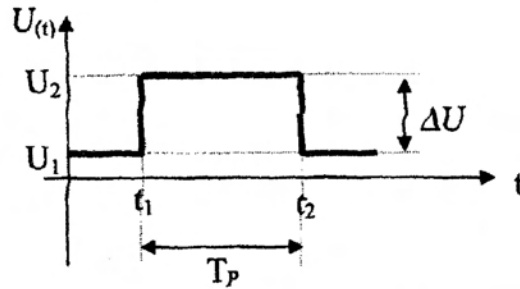
מדרגה חיובית



מדרגה שלילית

$$U(t) = \begin{cases} U_1 & t < T \\ U_2 & t \geq T \end{cases}$$

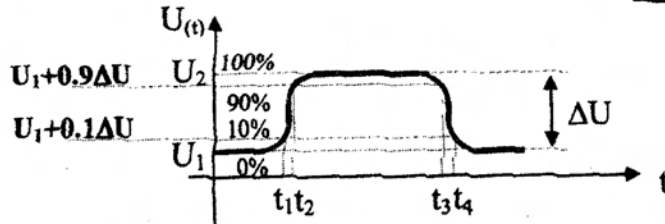
## דופק מלבני



$$U(t) = \begin{cases} U_1 & t < t_1 \text{ או } t > t_2 \\ U_2 & t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases}$$

מדרגה חיובית מתקבלת בזמן  $t_1$ , מדרגה שלילית מתקבלת בזמן  $t_2$ .

## דופק מלבני לא אידיאלי



במדרגה חיובית זמן העלייה (Rise Time) מוגדר:  $t_r = t_2 - t_1$

במדרגה שלילית זמן הירידה (Fall Time) מוגדר:  $t_f = t_4 - t_3$

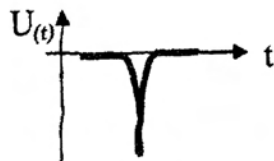
$$\begin{cases} U_{(t1)} = U_{(t4)} = U_1 + 0.1 \cdot \Delta U \\ U_{(t2)} = U_{(t3)} = U_1 + 0.9 \cdot \Delta U \end{cases}$$

## פונקצית הלם - Impulse

$$\begin{cases} T_p \rightarrow 0 \\ \Delta U \rightarrow \infty \end{cases}$$

דופק מלבני שבו:  $\Delta U \cdot T_p = 1$   
 $T_p$  - רוחב אפקטיבי של הפולס.  
 $\Delta U$  - גובה אפקטיבי של המתח.

## פונקצית הלם לא אידיאלית

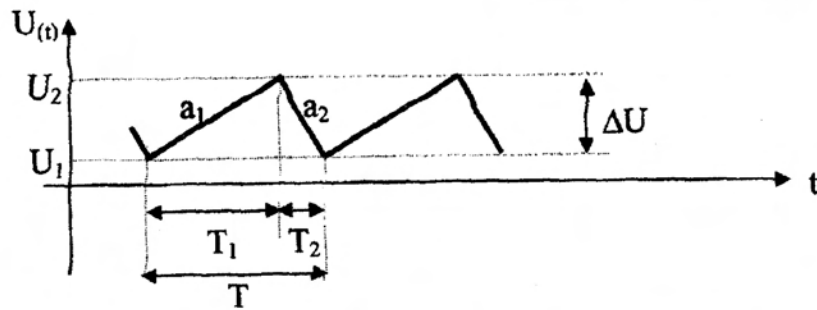


פונקצית הלם שלילית



פונקצית הלם חיובית

## גל משולש - Triangular Wave



$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(U_2 - U_1)^2}{3} + U_1 \cdot U_2}$$

$$U_{\text{ave}} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

$a_1$  - שיפוע בעליה במשך זמן  $T_1$ .

$a_2$  - שיפוע בירידה במשך זמן  $T_2$ .

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{U_2 - U_1}{T_1} \\ a_2 = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{U_1 - U_2}{T_2} = -\frac{U_2 - U_1}{T_2} \end{cases}$$

זמן המחזור:  $T = T_1 + T_2$

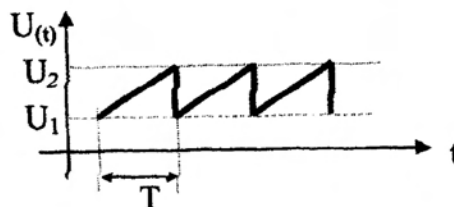
תדירות:  $f$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}$$

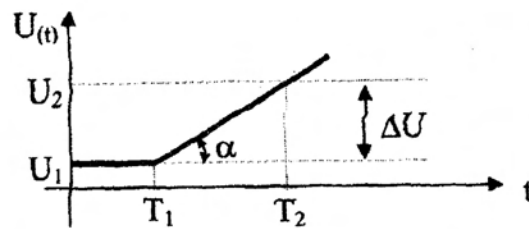
### מקרים פרטיים

גל משולש סימטרי מתקבל כאשר  $T_1 = T_2$  ( $a_1 = |a_2|$ ).

גל שן משור (Sawtooth Wave) מתקבל כאשר  $T_2 \rightarrow 0$  ( $a_2 \rightarrow -\infty$ ).



### פונקצית שיפוע - Ramp

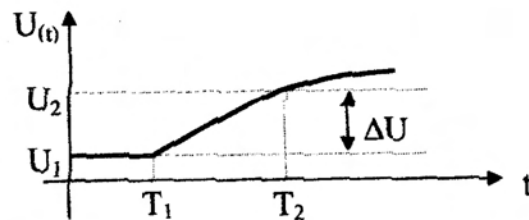


$$U(t) = \begin{cases} U_1 & t < T_1 \\ U_1 + a \cdot (t - T_1) & T_1 \leq t < T_2 \end{cases}$$

### השיפוע

$$a = \tan \alpha = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta U}{T_2 - T_1}$$

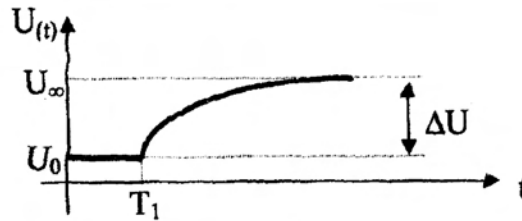
### פונקצית שיפוע לא אידיאלית



### שגיאת השיפוע היחסית

$$e_s = \frac{\left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=T_1} - \left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=T_2}}{\left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=T_1}}$$

## פונקציה אקספוננציאלית - Exponential Function



$$U(t) = \begin{cases} U_0 & t \leq T_1 \\ U_\infty - [U_\infty - U_0] \cdot e^{-\frac{t-T_1}{\tau}} & t \geq T_1 \end{cases}$$

ערך התחלתי:  $U_0 = U(t=T_1)$

ערך סופי:  $U_\infty = U(t \rightarrow \infty)$

קבוע זמן:  $\tau$

פונקציה אקספוננציאלית עולה:  $U_\infty > U_0$

פונקציה אקספוננציאלית יורדת:  $U_\infty < U_0$

### מקרים פרטיים

א. כאשר  $U_0 = 0$  נקבל:

$$U(t) = U_\infty \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{t-T_1}{\tau}} \right]$$

ב. כאשר  $U_\infty = 0$  נקבל:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t-T_1}{\tau}}$$

ג. זמן עליה או ירידה:

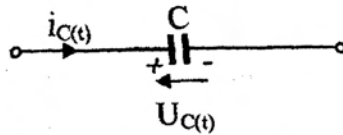
$$t_r = t_f = 2.2\tau$$

$U(t)$  - ערך של הפונקציה התלויה בזמן, הפונקציה יכולה לתאר מתח (U) או זרם (I).



## 9. תכונות רכיבים האלקטריים (קבל וסליד)

### הקבל



לקבל יש תכונה לאגור מטענים, נוהגים לסמן את קיבול הקבל באות  $C$ .  
המטען האגור בקבל תלוי ביחס ישר למתח  $U_C$  השורר בין הדקיו וקיבולו  $C$ .  
ככל שהמתח והקיבול גבוהים יותר, כך יהיה המטען האגור בקבל גדול יותר.

$$Q = U_C \cdot C$$

|       |                                          |
|-------|------------------------------------------|
| $[C]$ | $Q$ - המטען הנאגר בקבל ביחידות "קולון"   |
| $[V]$ | $U_C$ - המתח על הדקי הקבל ביחידות "וולט" |
| $[F]$ | $C$ - הקיבול של הקבל ביחידות "פרד"       |

### הקשר בין הזרם למתח בקבל

$$\begin{cases} U_{C(t)} = \frac{Q_{C(t)}}{C} = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_{C(t)} \cdot dt + U_{C(0)} \\ i_{C(t)} = C \cdot \frac{dU_{C(t)}}{dt} \end{cases}$$

### תכונות הקבל

א. במתח קבוע (D.C) הקבל מתנהג כנתק, לאחר סיום תופעות המעבר -  $5\tau$ .  
ב. בשינוי מתח פתאומי (Transient), הקבל מהווה קצר עבור השינוי, המתח עליו אינו משתנה בצורה פתאומית  $U_{C(t_0+)} = U_{C(t_0-)}$ , הזרם דרכו יכול לקבל שינוי פתאומי.

ג. כאשר בקבל זרם זרם קבוע, המתח עליו משתנה בצורה ליניארית.

$$\Delta Q = \Delta U_C \cdot C = I_C \cdot \Delta t$$

ד. בחיבורים מיוחדים ניתן להגיע לשינוי פתאומי במתח הקבל.

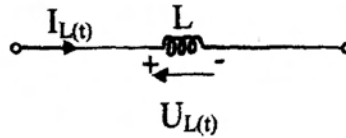
### האנרגיה החשמלית האגורה בקבל

$$W_C = \frac{1}{2} C U_C^2$$

### היגב הקבל במעגל עם מקור סינוס

$$Z_C = -jX_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC}$$

## הסליל



לסליל יש תכונה לאגור שטף חשמלי, נוהגים לסמן את השראות הסליל באות L. השטף המגנטי האגור בסליל תלוי ביחס ישר לזרם I הזורם דרכו והשראות הסליל. ככל שהזרם וההשראות גבוהים יותר, כך יהיה גדול יותר השטף החשמלי האגור בסליל.

$$\lambda = L \cdot I = \Phi \cdot N$$

|      |                                               |
|------|-----------------------------------------------|
| [A]  | I - הזרם הנאגר בסליל ביחידות "אמפר"           |
| [H]  | L - ההשראות של הסליל ביחידות "הנרי"           |
| [T]  | N - מספר הכריכות בסליל                        |
| [Wb] | $\Phi$ - שטף מגנטי האגור בסליל ביחידות "וובר" |
| [Wb] | $\lambda$ - שטף שלוב ביחידות "וובר"           |

## הקשר בין הזרם למתח בסליל

$$\begin{cases} i_{L(t)} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t U_{L(t)} \cdot dt + I_{L(0)} \\ U_{L(t)} = L \cdot \frac{di_{L(t)}}{dt} \end{cases}$$

## תכונות הסליל

- במתח קבוע (D.C) הסליל מתנהג כקצר, לאחר סיום תופעות המעבר -  $5\tau$ .
- בשינוי מתח פתאומי (Transient), הסליל מהווה נתק עבור השינוי, הזרם עליו אינו משתנה בצורה פתאומית  $I_{L(t0+)} = I_{L(t0-)}$ , המתח עליו יכול לקבל שינוי פתאומי.
- כאשר המתח על הסליל קבוע, הזרם משתנה בצורה ליניארית.

$$\Delta \lambda = U_L \cdot \Delta t = L \cdot \Delta I$$

## האנרגיה החשמלית האגורה בסליל

$$W_L = \frac{1}{2} L I_L^2$$

## היגב הסליל במעגל עם מקור סינוס

$$Z_L = jX_L = j\omega L = j2\pi fL$$

## 10. מולקת הדפקים היסודית

משוואת הדפקים משמשת לפתרון (חישוב מתח זרם) במעגלי RC ו-RL, מעגלים בעלי קבוע זמן יחיד. משוואת הדפקים הינה פתרון של המשוואה הדיפרנציאלית המתארת את המעגל החשמלי. את משוואת הדפקים ניתן להציג בשני אופנים. מהמשוואה ניתן לחשב מתח או זרם כלשהו במעגל, לאחר שמתבצע שינוי פתאומי (מיתוג) במתח או בזרם שבמעגל.

### משוואת הדפקים היסודית (בשני האופנים)

$$\begin{cases} X_{(t)} = X_{\infty} - [X_{\infty} - X_0] e^{-t/\tau} \\ t = \tau \cdot \ln \frac{X_{\infty} - X_0}{X_{\infty} - X_{(t)}} \end{cases}$$

- $X$  משתנה המתאר ערך של זרם או מתח (U, I).
- $X_0$  הערך ההתחלתי של המשתנה  $X$ .
- $X_{\infty}$  הערך הסופי (לאחר התייצבות המעגל) של המשתנה  $X$ .
- $X_{(t)}$  ערך המשתנה  $X$  בזמן כלשהו  $t$ .
- $\tau$  קבוע הזמן. מחושב בהתאם לסוג המעגל:  $\tau = R_{eq} \cdot C$  או  $\tau = L/R_{eq}$ .
- $t$  זמן. הזמן בו קיים הערך  $X_{(t)}$ .
- $R_{eq}$  ההתנגדות השקולה ש"רואה" הקבל/הסליל בין הדקיו, כאשר כל מקורות האנרגיה משותקים (מקורות מתח קצר, מקורות זרם נתק).

### שיטה לפתרון מעגלים בעזרת משוואת הדפקים היסודית

- א. יש לפשט את המעגל ע"י צמצומו (בשיטת תבנית או בשיטה אחרת), לקבלת מעגל פשוט  $R_{eq}C$  או  $R_{eq}L$ .
- ב. יש לחשב את קבוע הזמן של המעגל, בהתאם למעגל המתקבל.
- ג. בהתאם למעגל יש לחשב את הערך ההתחלתי והערך הסופי, של הזרם/מתח שאותו רוצים לחשב ברכיב הנדרש.
- ד. יש לחשב את הערך הנדרש מתוך אחת ממשוואות הדפקים היסודית, בהתאם לנתונים הקיימים.

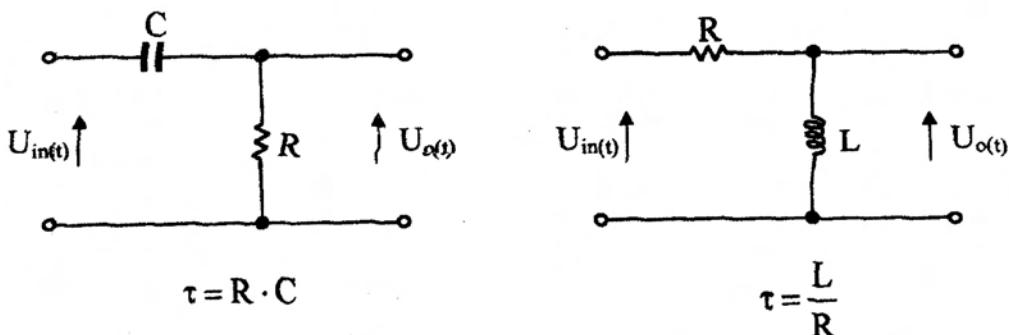
## 11. רשת מעבירה גבוהים (High Pass)

### תכונות

א. בעברת הטרנזינט - בקבלת קפיצה במתח המבוא, תתקבל קפיצה באותו הגודל והכיוון במתח המוצא.

ב. חסימה של הרכיב הישר - עבור אותות מבוא ישרים (קבועים לאורך זמן מסוים) מתח המוצא ישאף לאפס.

### רשתות מעבירות גבוהים



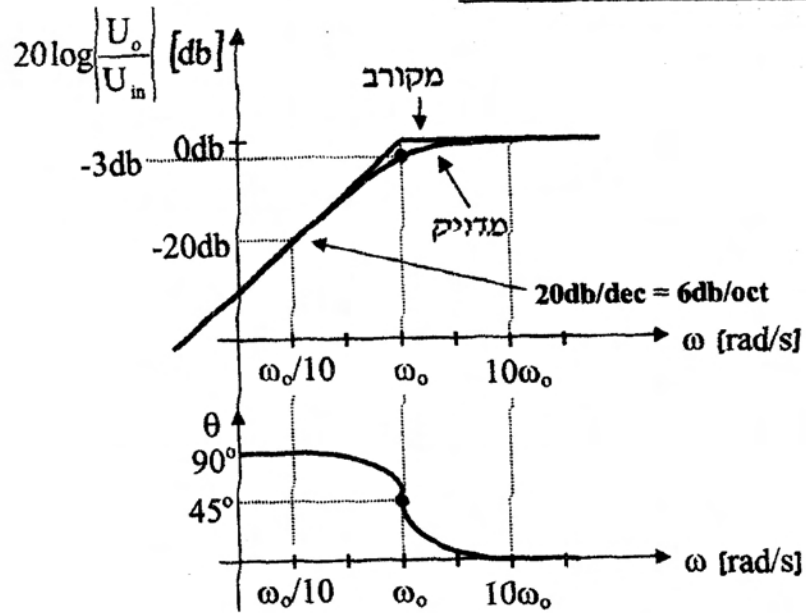
### תגובת רשת מעבירה גבוהים לאות סינוס

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_{o(j\omega)}}{U_{in(j\omega)}} \approx \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \\ \omega_0 = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\underbrace{RC}_{\text{רשת RC}}} = \frac{R}{\underbrace{L}_{\text{רשת RL}}} \end{array} \right.$$

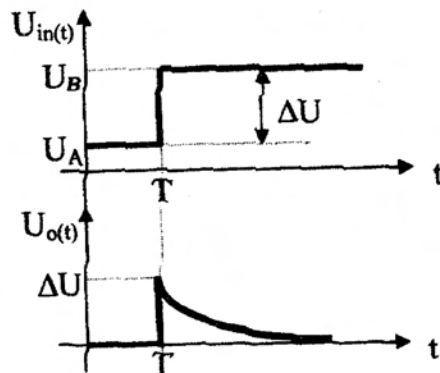
$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{U_o}{U_{in}} \right| = \frac{\frac{\omega}{\omega_0}}{\sqrt{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \\ \theta = 90 - \arctg \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \end{array} \right.$$

$\omega_0$  - תדר חצי התספק.

### הענות התדר של רשת מעבירה גבוהים:



### תגובת רשת מעבירה גבוהים לאות מדרגה



### התנהגות מתח המוצא

מתח המוצא לפני קבלת המדרגה:  $U_{o(t=T-)} = 0 \text{ v}$

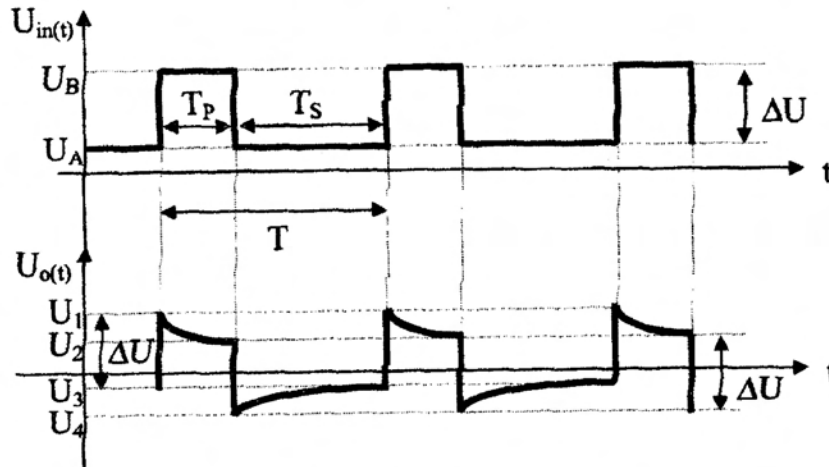
מתח המוצא לאחר קבלת המדרגה:

$$\begin{cases} U_{o(t=T+)} = \Delta U = U_B - U_A \\ U_{o(t)} = \Delta U \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}} \quad t > T \end{cases}$$

הערה: עד לזמן  $t = T$  לא היה שינוי נוסף זמן רב.

תגובת רשת מעבירה גבוהים לגל ריבועי (מצב מתמיד - Steady state)

מתח המוצא ינוע תמיד סביב ארבע רמות מתח. שתי רמות מתח תמיד יהיו חיוביות ושתי רמות מתח תמיד יהיו שליליות.  
בכל מקרה במוצא מעביר גבוהים רכיב ה- D.C הוא אפס.



חישוב המתחים  $U_1, U_2, U_3, U_4$  מבוצע מתוך המשוואות להלן.

$$\begin{cases} U_1 = U_3 + \Delta U \\ U_2 = U_1 \cdot e^{\frac{-T_P}{\tau}} \\ U_3 = U_4 \cdot e^{\frac{-T_S}{\tau}} \\ U_4 = U_2 - \Delta U \end{cases}$$

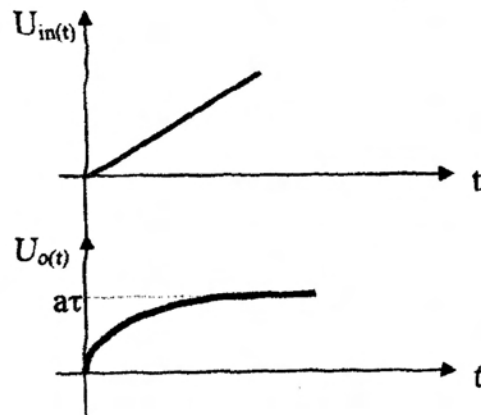
במקרה של גל ריבועי סימטרי:

$$T_P = T_S = \frac{T}{2}$$

האות ביציאה יהיה גם סימטרי:

$$\begin{cases} U_4 = -U_1 \\ U_3 = -U_2 \end{cases}$$

### תגובת רשת מעבירה גבוהים למתח שיפוע



מתח המבוא מוגדר בצורה הבאה:

$$U_{in(t)} = at$$

מתח המוצא המתקבל כתוצאה מקבלת מתח שיפוע במבוא הוא:

$$U_{o(t)} = a\tau \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

### מקרה פרטי:

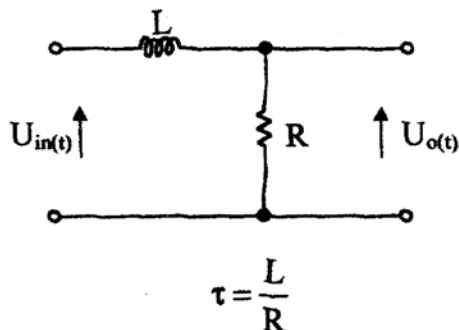
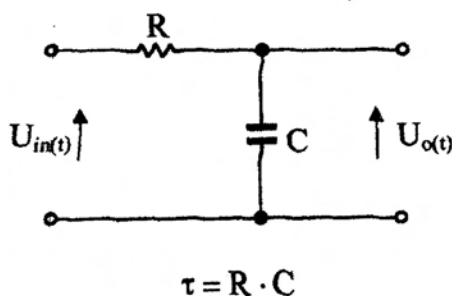
כאשר מתקיים התנאי  $t \gg \tau$ , המעגל מתפקד בקירוב כגוזר (Differentiator). מוציא המוצא יהיה יחסי לגזרת של מתח המבוא.

## 12. רשת מעבירה נמוכים (Low Pass)

### תכונות

- א. קיימת רציפות במתח המוצא (אין קפיצות מתח).  
 ב. העברת הרכיב הישר - עבור אותות כניסה ישירים (קבועים לאורך זמן מסוים) מתח המוצא ישאף למתח המקור.

### רשתות מעבירות נמוכים



### תגובה לאות סינוס

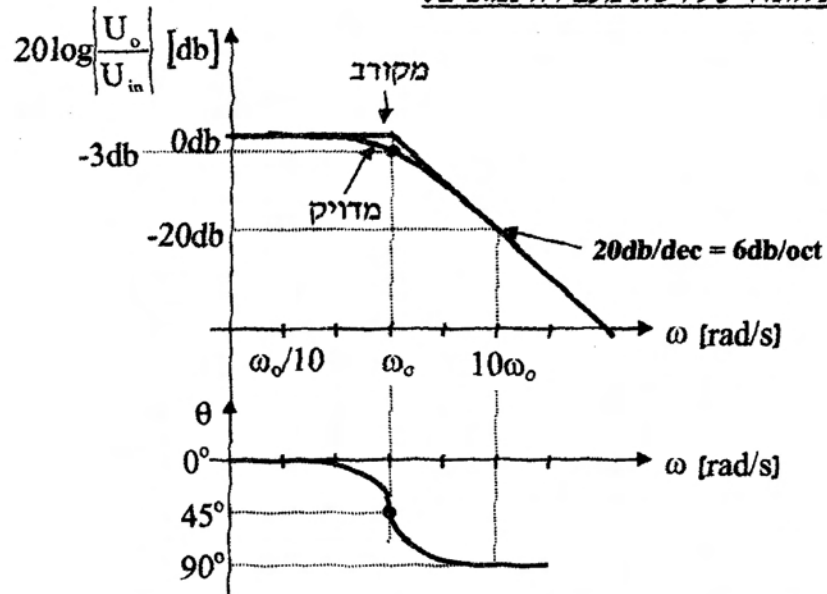
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_{o(j\omega)}}{U_{in(j\omega)}} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \\ \omega_0 = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\underbrace{RC}_{\text{רשת RC}}} = \frac{R}{\underbrace{L}_{\text{רשת RL}}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{U_o}{U_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \\ \theta = -\arctg \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \end{array} \right.$$

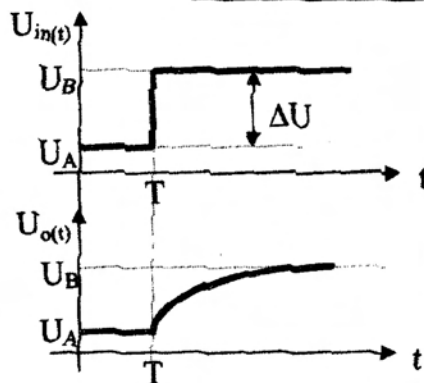
$\omega_0$  - תדר חצי ההספק.



### הענות התדר של רשת מעבירה נמוכים:



### תגובת רשת מעבירה נמוכים לאות מדרגה



### התנהגות מתח המוצא

מתח המוצא לפני קבלת המדרגה:  $U_{o(t=T-)} = U_A$

מתח המוצא לאחר קבלת המדרגה:

$$\begin{cases} U_{o(t=T+)} = U_A \\ U_{o(t)} = U_B - (U_B - U_A) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}} & t \geq T \end{cases}$$

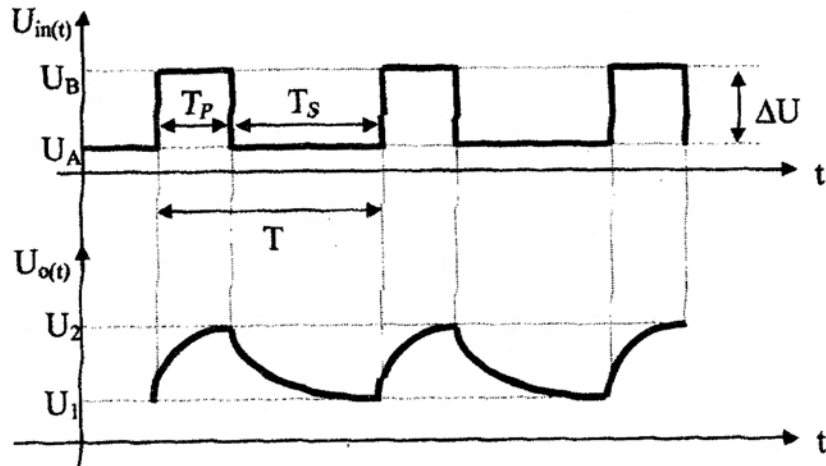
### התכונות בתגובה לאות מדרגה

א. בזמן שינוי מתח המבוא, מתח המוצא נשאר ללא שינוי.

ב. במצב של מתח ישר (D.C) במבוא, מתח המוצא ישאף אקספוננציאלית למתח המקור.

**תגובת רשת מעבירה נמוכים לגל ריבועי (מצב מתמיד - Steady state)**

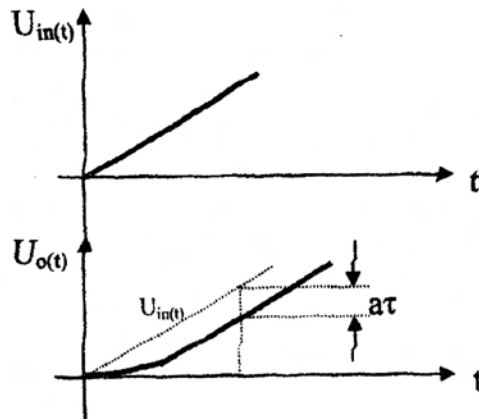
מתח המוצא ינוע **תמיד** סביב שתי רמות מתח. המתח הגבוה **תמיד** קטן מהערך העליון של מתח המבוא ( $U_B$ ). המתח הנמוך **תמיד** גדול מהערך התחתון של מתח המבוא ( $U_A$ ).



חישוב המתחים  $U_1$ ,  $U_2$  מבוצע מתוך המשוואות להלן.

$$\begin{cases} U_1 = U_A - (U_A - U_2) \cdot e^{\frac{-T_S}{\tau}} \\ U_2 = U_B - (U_B - U_1) \cdot e^{\frac{-T_P}{\tau}} \end{cases}$$

### תגובת רשת מעבירה נמוכים למתח שיפוע



מתח המבוא מוגדר בצורה הבאה :

$$U_{in(t)} = at$$

מתח המוצא המתקבל כתוצאה מקבלת מתח שיפוע הוא :

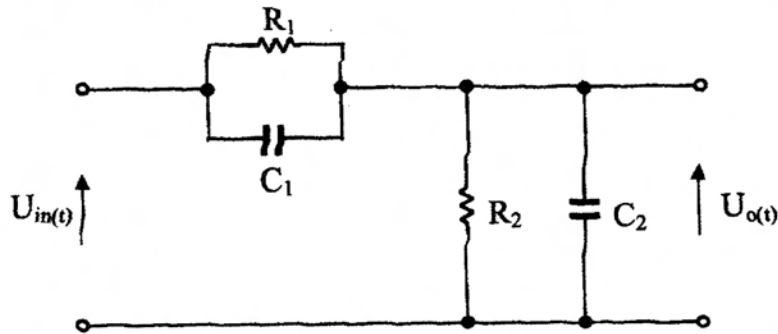
$$U_{o(t)} = at - a\tau \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

### מקרה פרטי :

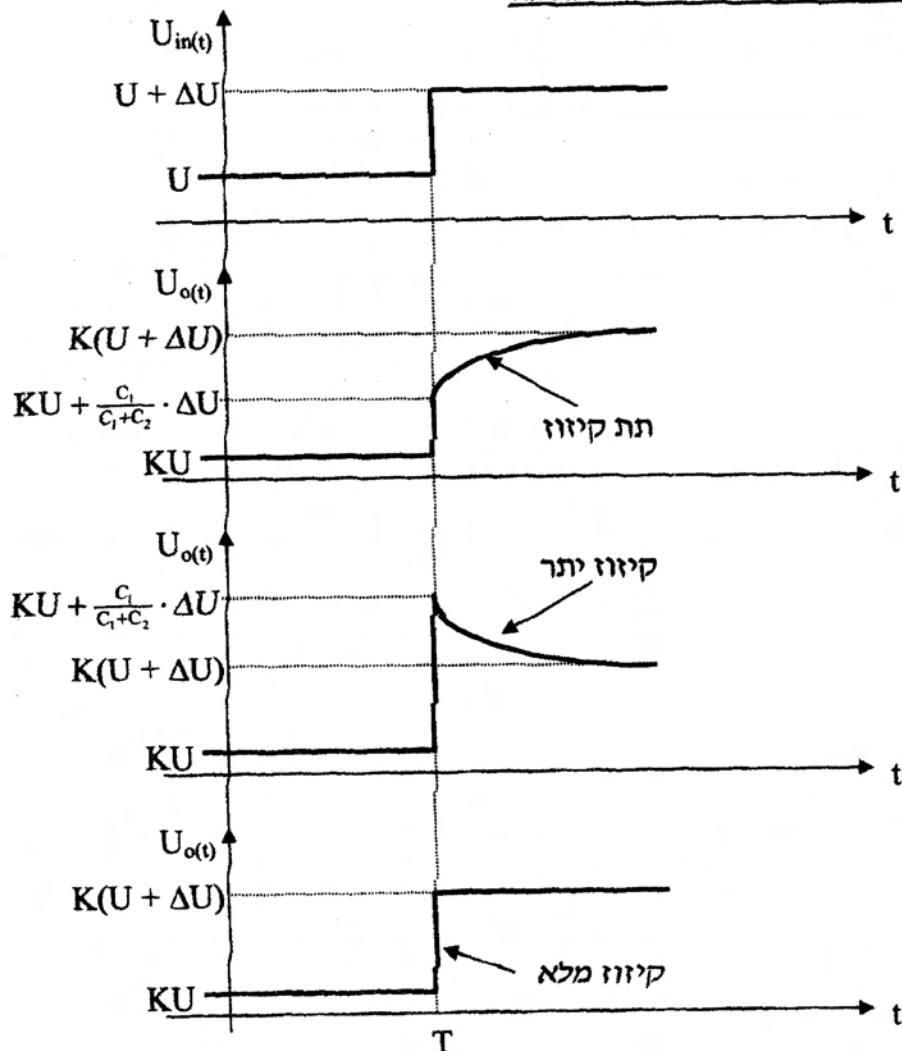
כאשר מתקיים התנאי  $t \ll \tau$ , המעגל מתפקד בקירוב כאינטגרטור (Integrator). מתח המוצא יהיה יחסי לאינטגרל של מתח המבוא.

### 13. מנחת מקולל

מעגל הנמצא במכשירי מדידה (כגון פרוב של סקופ), ומאפשר קבלת קפיצות מתח חדות ע"י קיזוז הקיבול הפנימי של הסקופ. כתוצאה מכך מתקבלת הנחתה למתח המבוא, ההנחתה תלויה במצב הבורר (הבורר הינו נגד משתנה - אחד משני הנגדים  $R_1$  או  $R_2$ ).



תגובת מנחת מקיזוז לאות מבוא מדרגה



### מתח המוצא המתקבל

$$\begin{cases} U_{O(t=T^+)} = U_{O(t=T^-)} + \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \Delta U \\ U_{O(\infty)} = U_{O(t=T^-)} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \Delta U \end{cases}$$

K - מקדם הניחות של המנחת.

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

### תנאים לסוגי הקיזוז השונים

$$\begin{cases} U_{O(t=T^+)} = U_{O(\infty)} & \text{קיזוז מלא} \\ U_{O(t=T^+)} > U_{O(\infty)} & \text{קיזוז יתר} \\ U_{O(t=T^+)} < U_{O(\infty)} & \text{תת קיזוז} \end{cases}$$

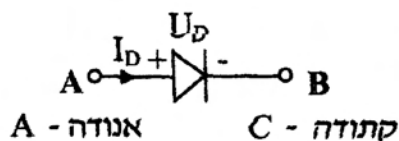


$$\begin{cases} C_1 R_1 = C_2 R_2 & \text{קיזוז מלא} \\ C_1 R_1 > C_2 R_2 & \text{קיזוז יתר} \\ C_1 R_1 < C_2 R_2 & \text{תת קיזוז} \end{cases}$$

# 14. רכיבי איתול

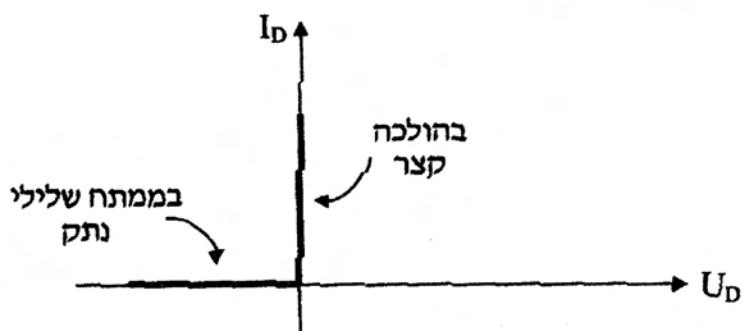
## דיודה

### סימול סכמתי של דיודה

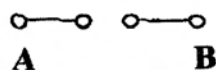


קיימים מספר מודלים לפתרון בעיות (קירובים של המודל האמיתי)

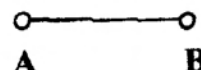
### מודל I (דיודה אידיאלית)



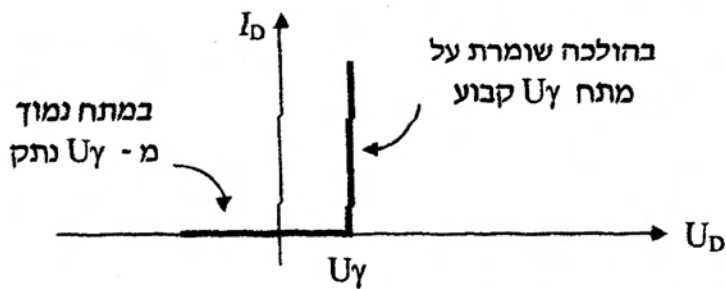
#### במתח שלילי נתק



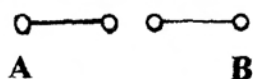
#### בהולכה קצר



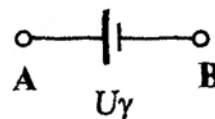
### מודל II (סוללה $U_\gamma$ )



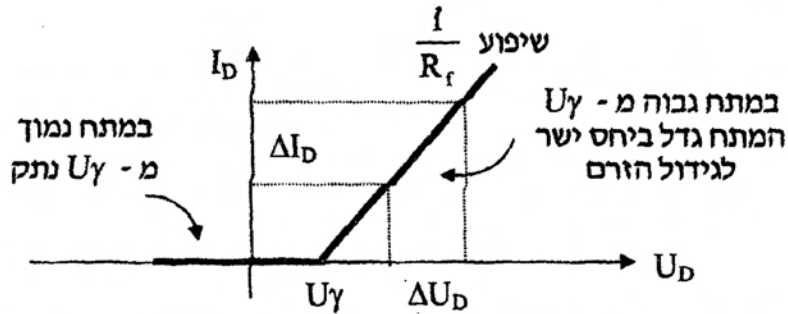
#### בחיבור מתח קטן מ- $U_\gamma$ נתק



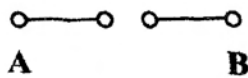
#### בהולכה מתח קבוע שווה ל- $U_\gamma$



### מודל III (סוללה וגגד)

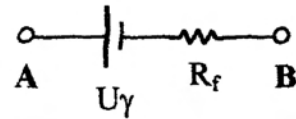


בחיבור מתח קטן מ-  $U_\gamma$  נתק



$$R_R = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \rightarrow \infty$$

בחיבור מתח חיובי גדול מ-  $U_\gamma$

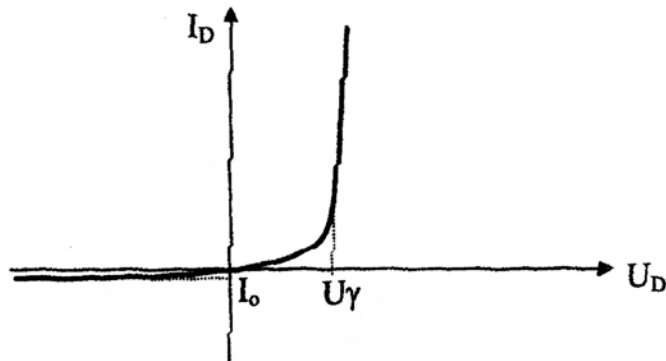


$$R_f = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D}$$

$0.2\text{v} - 0.3\text{v} = U_\gamma$  (עבור חומר גרמניום).

$0.6\text{v} - 0.7\text{v} = U_\gamma$  (עבור חומר סיליקון).

### מודל IV מעשי



$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{\frac{U_D}{\eta U_T}} - 1 \right)$$

$$U_D = \eta \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{I_D}{I_0} + 1 \right)$$

$I_0$  - זרם הזליגה/הזרם האחורי (בעל תלות חזקה בטמפרטורה).

$U_T$  - קבוע התלוי בטמפרטורה (בטמפרטורת החדר גודלו 26mV).

$\eta$  - בקירוב אחד עבור דיודת גרמניום ושתיים עבור דיודת סיליקון.

$U_D$  - המתח על פני הדיודה בין האנודה לקתודה.

$I_D$  - הזרם דרך הדיודה.

### מאפייני הדיודה המעשית

$$\begin{cases} U_T = \frac{k_B \cdot T}{q} = \frac{T}{11600} [V] \\ T = T(^{\circ}C) + 273 \end{cases}$$

$q$  - מטען אלקטרון  $1.6 \cdot 10^{-19} [C]$

$T$  - טמפרטורה במעלות קלווין

$k_B$  - קבוע בולצמן  $1.38 \cdot 10^{-23} \left[ \frac{J}{^{\circ}K} \right]$

$U_T \cong 26mV$  בטמפרטורת החדר ( $25^{\circ}C$ ).

### תלות הזרם האחורי $I_0$ בטמפרטורה

$$I_{O(T2)} \cong I_{O(T1)} \cdot 2^{\left( \frac{T_2 - T_1}{10} \right)}$$

זרם הזליגה גדל בקירוב פי 2, על כל עליה של  $10^{\circ}C$ .

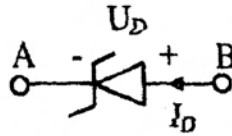
$T_1$  - טמפרטורה כלשהי בה ערך הזרם ידוע.

$T_2$  - טמפרטורה בה מעוניינים לדעת את ערכו של הזרם.

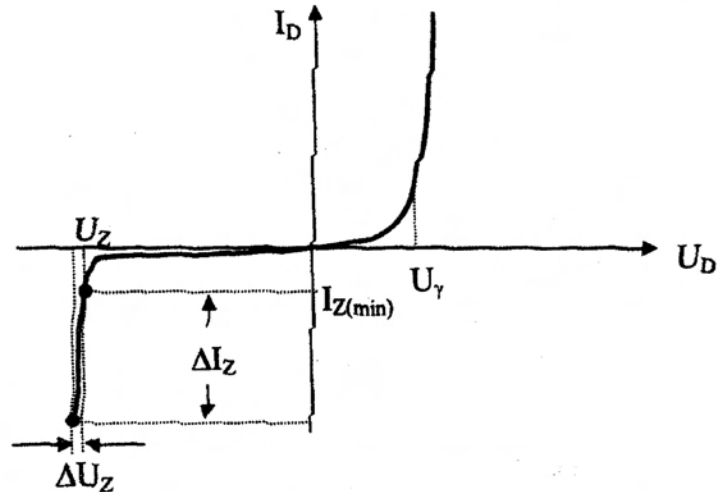


## דיודת זנר

### סימול סכמתי של דיודת זנר



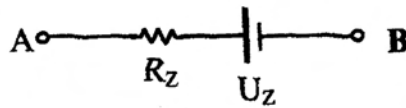
### אופייין זרם - מתח של דיודת זנר



$U_Z$  - מתח הפריצה הטומינלי של הדיודה, כפי שנתון ע"י היצרן.

### מודל מקורב לדיודת זנר במצב פריצה (במתח שלילי)

במתח שלילי הקטן ממתח  $U_Z$  (גדול בערך מוחלט), ניתן לתאר את הדיודה באמצעות המודל הבא:



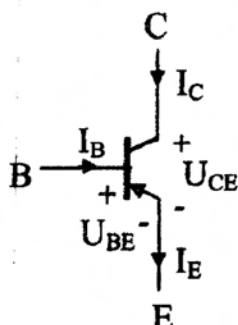
$$\begin{cases} R_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \\ P_{Z(max)} = I_{Z(max)} \cdot U_Z \end{cases}$$

$R_Z$  - התנגדות דינמית של הדיודה במצב פריצה, בדיודה אידיאלית  $R_Z = 0\Omega$ .

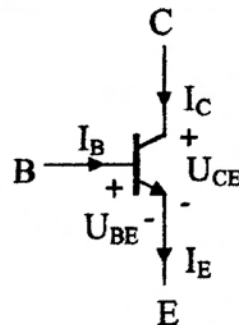
$I_{Z(max)}$ ,  $P_{Z(max)}$  - הספק וזרם מכסימליים היכולים להתפתח בדיודה.

## טרנזיסטור ביפולר

### סימול סכמתי של טרנזיסטור pnp

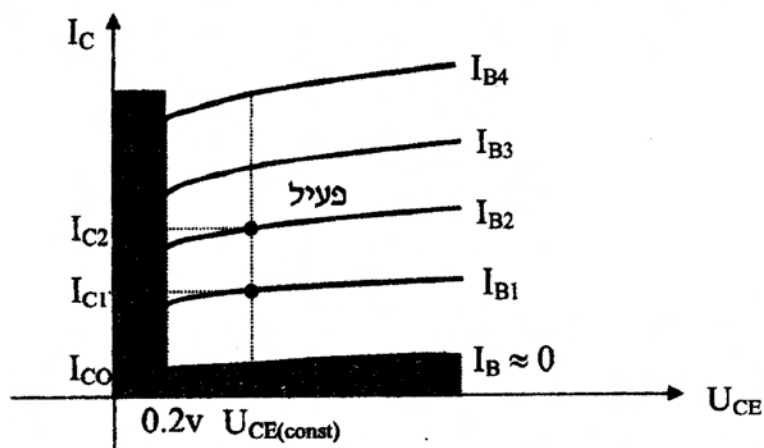


### סימול סכמתי של טרנזיסטור npn



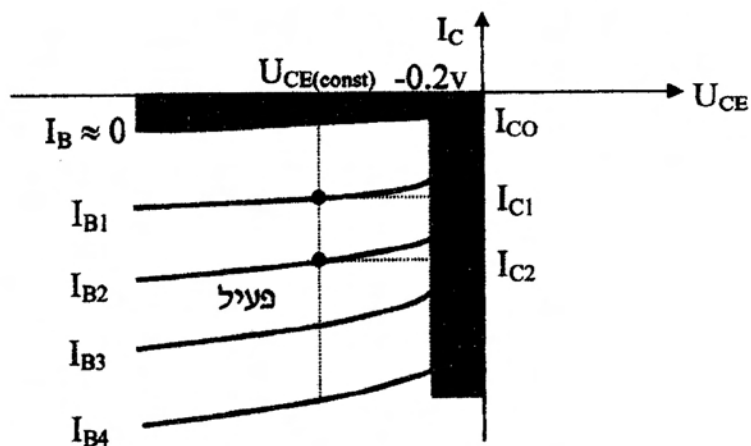
### אופייני מתח זרם של טרנזיסטור npn

אופיין מוצא: תלות בין  $I_C$  ל-  $U_{CE}$  (עבור ערכי  $I_B$  שונים).



### אופייני מתח זרם של טרנזיסטור pnp

אופיין מוצא: תלות בין  $I_C$  ל-  $U_{CE}$  (עבור ערכי  $I_B$  שונים).



### הערה:

באופן מעשי נהוג להשתמש בדביע הראשון, לשני סוגי הביפולר.

### מצבי עבודה של הטרנזיסטור

- א. קטעון -  $I_C = I_{CEO} \cong 0$ ,  $U_{BE} < U_{BE\ on}$ ,  $I_B = 0$
- ב. פעיל -  $I_C \cong \beta \cdot I_B$ ,  $U_{BE} \cong U_{BE\ on}$ ,  $U_{CE} > U_{CE\ sat}$
- ג. רוויה -  $I_C < \beta \cdot I_B$ ,  $U_{BE} \cong U_{BE\ sat}$ ,  $U_{CE} \cong U_{CE\ sat}$

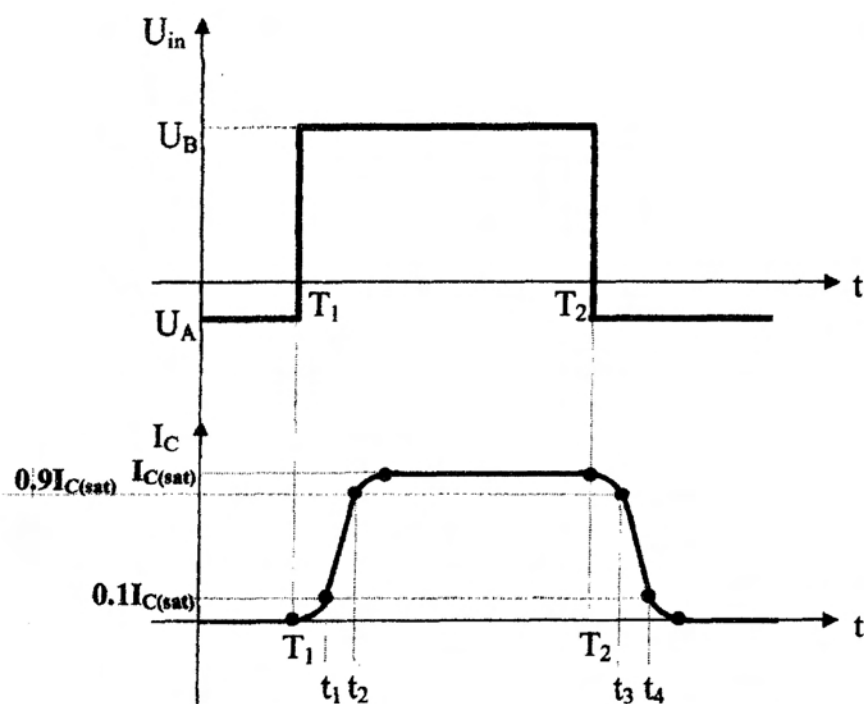
### מקדם עומק הרוויה

$$\lambda = \frac{\beta \cdot I_B}{I_{C\ sat}}$$

### קשרים בין מקדמי הגברה של הטרנזיסטור

$$\begin{cases} \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \\ \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \end{cases}$$

- $I_B$  - זרם הבסיס.
- $I_C$  - זרם קולקטור (קולט).
- $I_E$  - זרם אמיטר (פולט).
- $\beta, \alpha$  - מקדמי ההגברה של הטרנזיסטור.



$$t_d = t_1 - T_1$$

Delay time

זמן חשהייה

$$t_r = t_2 - t_1$$

Rise time

זמן עליה

$$t_s = t_3 - T_2$$

Storage time

זמן איחסון

$$t_f = t_4 - t_3$$

Fall time

זמן ירידה

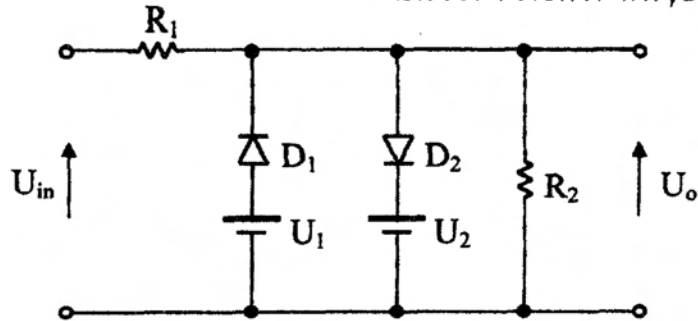
## 15. מצפי קטימה (Clipping)

### שלבים לניתוח מעגלי קטימה

- א. ניתוח אופיין המעבר הסטטי של המוצא, מתבצע כאשר מתח המבוא משתנה בתחום:  $-\infty < U_{in} < +\infty$ .
- ב. יש לספור את מספר הדיודות המופיעות במעגל הקטימה.
- ג. בהנחה שקיימות  $k$  דיודות במעגל, יתקבלו  $k$  נקודות שבירה, כלומר  $k+1$  קטעים באופיין (בהסתכלות על כל תחום המתחים).  
בדוגמה המופיעה בעמוד הבא, קיימות שתי דיודות, לכן יתקבלו שתי נקודות שבירה ושלושה קטעים (1, 2, 3).  
הערה: קיימות דוגמאות חריגות בהם הכלל אינו מתקיים.
- ד. כל קטע באופיין מתואר ע"י מעגל תמורה הנגזר ממעגל הקטימה. בכל אחד ממעגלי התמורה יש להתייחס לכל הדיודות שבמצב OFF כנתק ולכל הדיודות שבמצב ON כקצר.
- ה. מתוך כל אחד ממעגלי התמורה, ניתן לחשב את מתח המוצא ואת תחום מתחי המבוא בהם מתקבל מעגל התמורה (כתלות בתנאים של הדיודות - אידיאלית/ לא אידיאלית).
- ו. מתח המוצא יהיה פונקציה של מתח המבוא ושל רכיבי מעגל התמורה הרלוונטי לקטע המנותח.
- ז. אופיין המעבר הסטטי של המעגל ישורטט בהתאם לתחומי המתחים של הקטעים שיוגדרו ע"י מעגלי התמורה לכל קטע.

### דוגמה למעגל קטימה

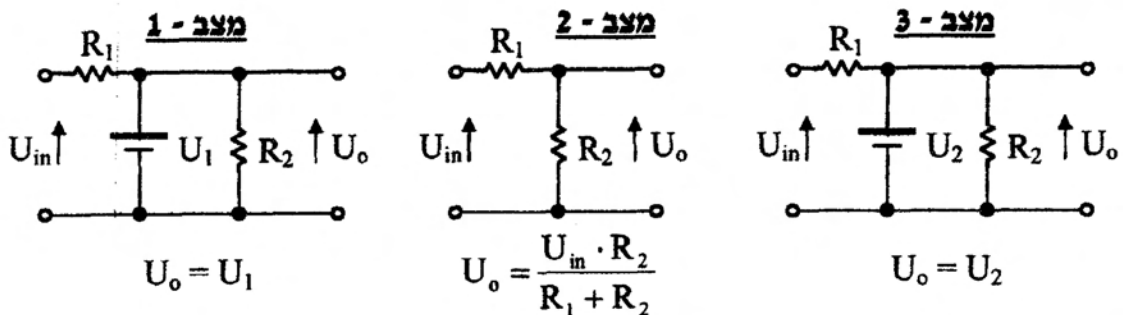
הנחה:  $U_2 > U_1$ , והדיודות אידיאליות.



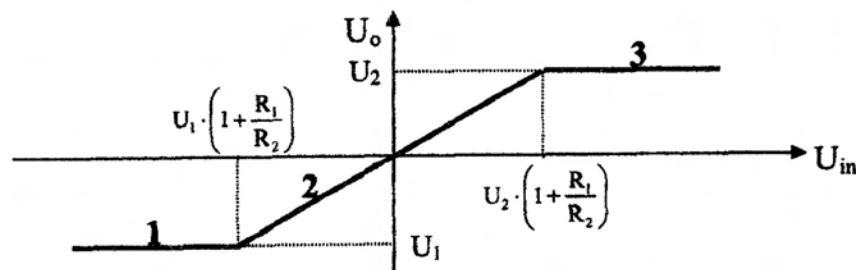
### טבלת מצבי דיודות

| מצב | מתח מוצא - $U_o$                     | $D_2$ | $D_1$ | מתח מבוא - $U_{in}$                                                                    |
|-----|--------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | $U_1$                                | נתק   | קצר   | $-\infty < U_{in} \leq \frac{U_1 \cdot (R_1 + R_2)}{R_2}$                              |
| 2.  | $\frac{U_{in} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ | נתק   | נתק   | $\frac{U_1 \cdot (R_1 + R_2)}{R_2} \leq U_{in} \leq \frac{U_2 \cdot (R_1 + R_2)}{R_2}$ |
| 3.  | $U_2$                                | קצר   | נתק   | $\frac{U_2 \cdot (R_1 + R_2)}{R_2} \leq U_{in} < +\infty$                              |

### מעגלי תמורה



### אופיין מעבר סטטי



תערה: הגרף מניח  $U_2 > 0$ ,  $U_1 < 0$ .

## 16. מצפי ריתוק (Clamping)

### שלבים לניתוח מעגלי ריתוק

א. זהה את מעגל הריתוק, כך שיכיל רשת H.P עם דיודה המחוברת במוצא המעגל.

ב. בדוק את צורת חיבור הדיודה במעגל.

דיודה שהקתודה מכוונת כלפי מטה (בהתאם לשרטוט בעמוד הבא), תגרום למעגל לרתק את השיא העליון של מתח המבוא סביב האפס, את השיא התחתון תוריד לרמה שלילית. רמת ה - D.C של האות במוצא שלילית.

דיודה שהקתודה מכוונת כלפי מעלה (בהתאם לשרטוט בעמוד 69), תגרום למעגל לרתק את השיא התחתון של מתח המבוא סביב האפס, את השיא העליון תעלה לרמה חיובית. רמת ה - D.C של האות במוצא חיובית.

ג. חשב את קבוע הזמן של המעגל.

כאשר קבוע הזמן  $T \gg \tau$ , צורת האות במוצא תנוע סביב ארבע רמות מתח. שתי רמות מתח תמיד יהיו חיוביות ושתי רמות מתח תמיד יהיו שליליות. (כאשר הדיודה אידיאלית שתי הרמות השליליות או החיוביות ירותקו לאפס).

כאשר קבוע הזמן  $T \ll \tau$ , צורת האות במוצא תנוע סביב ארבע רמות מתח. כך ששתי רמות מתח יהיו סביב אפס וולט. שתי רמות מתח נוספות יהיו אחת חיובית והשנייה שלילית. ניתן לראות את אות המוצא כשני פולסים אחד חיובי והשני שלילי. (כאשר הדיודה אידיאלית, הרמה החיובית או השלילית תרותק לאפס).

ד. יש לחשב את נקודות אות המוצא בהתאם לנוסחאות המופיעות בעמודים הבאים. בהתאם לסוג מעגל הריתוק.

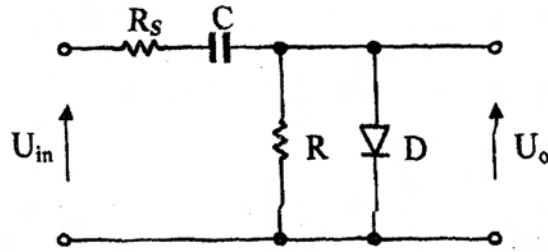
ה. שרטט את אות המוצא תוך התחשבות בתתי הסעיפים הבאים :

1) מעגל הריתוק מרתק את אחד משיאי מתח המבוא סביב לאפס, כך שרמת ה - D.C של אות המוצא יהיה חיובי או שלילי (תלוי בכיוון חיבור הדיודה במעגל הריתוק).

2) המעגל אינו קוטם צד כלשהו, טרנזיאנט אחד עובר במלואו - חיובי או שלילי. (הטרנזיאנט במוצא אינו מופיע במלואו, בגלל חלוקת מתח בין הנגדים).

מעגל ריתוק - ריתוק שיא עליון ("מוריד" את מתח המבוא למטה)

הנחה לדיודה:  $R_f \ll R \ll R_r$ .

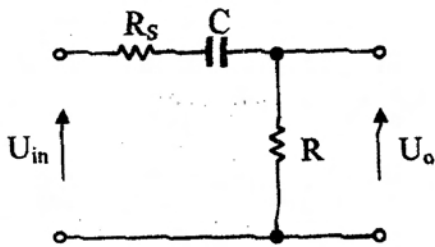


$R_f$  - התנגדות ההולכה של הדיודה.

$R_r$  - התנגדות אי הולכה של הדיודה.

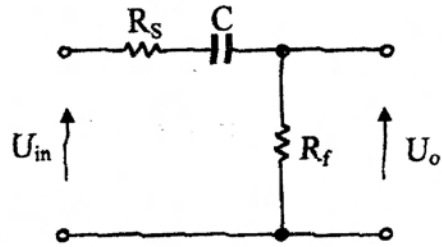
מעגלי תמורה

מצב 1 -



$D$  - אי בהולכה,  $U_o < 0$

מצב 2 -



$D$  - הולכה,  $U_o > 0$

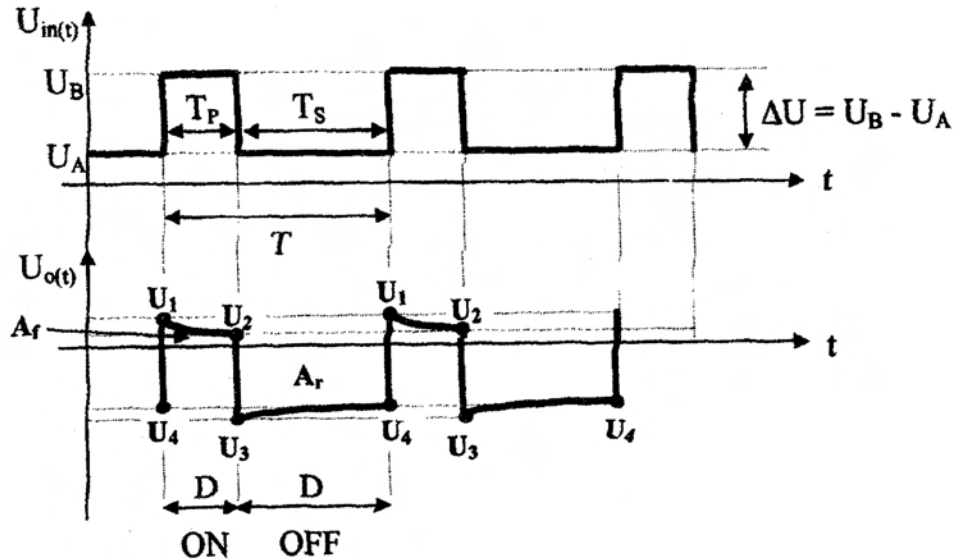
$$\begin{cases} R \parallel R_f \cong R_f \\ R \parallel R_r \cong R \end{cases}$$

במידה והדיודה אידיאלית נקבל:

$$\begin{cases} R_f = 0 \\ R_r \rightarrow \infty \end{cases}$$



גרף המתאר את מתח המוצא בתלות במתח המבוא



חישוב המתחים  $U_1, U_2, U_3, U_4$  מבוצע מתוך המשוואות להלן.

$$\begin{cases} U_1 = \left[ \frac{R_s + R}{R} \cdot U_4 + \Delta U \right] \cdot \frac{R_f}{R_s + R_f} \\ U_2 = U_1 \cdot e^{\frac{-T_P}{\tau_r}} \\ U_3 = \left[ \frac{R_s + R_f}{R_f} \cdot U_2 - \Delta U \right] \cdot \frac{R}{R_s + R} \\ U_4 = U_3 \cdot e^{\frac{-T_s}{\tau_r}} \\ \begin{cases} \tau_r = (R_s + R_f) \cdot C \\ \tau_r = (R_s + R) \cdot C \end{cases} \end{cases}$$

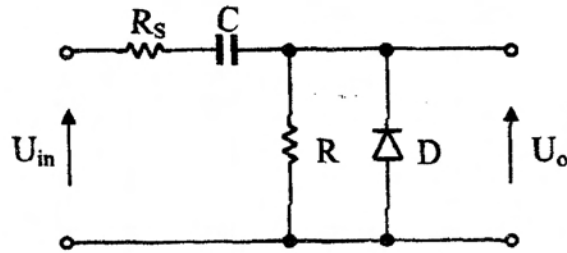
יחס שטחים על גרף המוצא:

$$\frac{A_f}{A_r} = \frac{R_f}{R}$$

מיחס הנגדים ניתן לדעת את צורת אות המוצא.

מעגל ריתוק - ריתוק שיא תחתון ("מעלה" את מתח המבוא למעלה)

הנחה לדיודה:  $R_f \ll R \ll R_r$ .

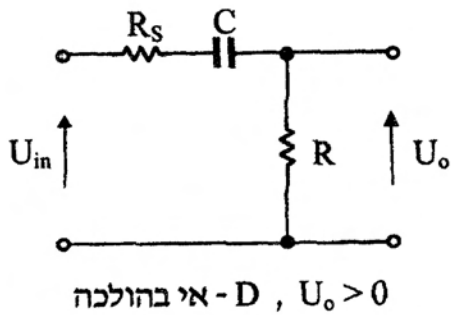


$R_f$  - התנגדות ההולכה של הדיודה.

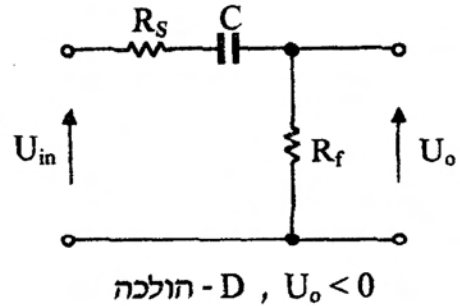
$R_r$  - התנגדות אי הולכה של הדיודה.

מעגלי תמורה

מצב 1 -



מצב 2 -

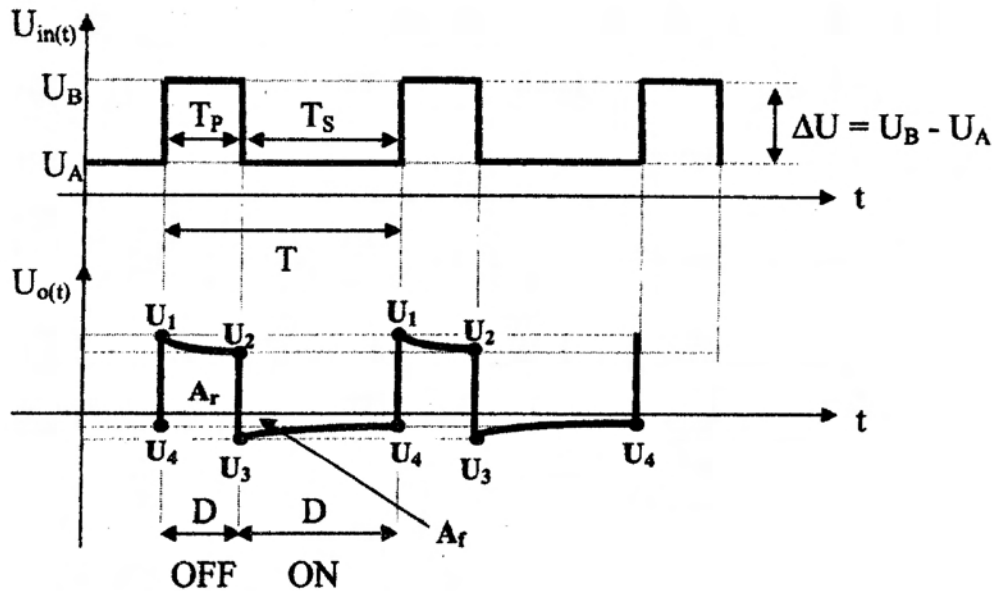


$$\begin{cases} R \parallel R_r \cong R_f \\ R \parallel R_r \cong R \end{cases}$$

במידה והדיודה אידיאלית נקבל:

$$\begin{cases} R_f = 0 \\ R_r \rightarrow \infty \end{cases}$$

גרף המתאר את מתח המוצא בתלות במתח המבוא



חישוב המתחים  $U_1, U_2, U_3, U_4$  מבוצע מתוך המשוואות להלן.

$$\begin{cases} U_1 = \left[ \frac{R_s + R_f}{R_f} \cdot U_4 + \Delta U \right] \cdot \frac{R}{R_s + R} \\ U_2 = U_1 \cdot e^{\frac{-T_P}{\tau_r}} \\ U_3 = \left[ \frac{R_s + R}{R} \cdot U_2 - \Delta U \right] \cdot \frac{R_f}{R_s + R_f} \\ U_4 = U_3 \cdot e^{\frac{-T_S}{\tau_r}} \\ \begin{cases} \tau_f = (R_s + R_f) \cdot C \\ \tau_r = (R_s + R) \cdot C \end{cases} \end{cases}$$

יחס שטחים על גרף המוצא:

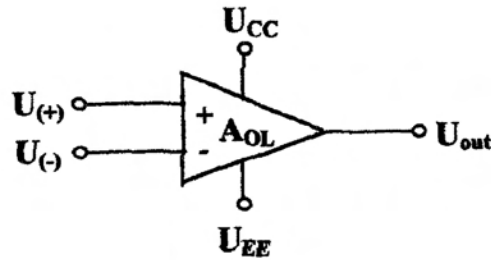
$$\frac{A_f}{A_r} = \frac{R}{R_f}$$

מיחס הנגדים ניתן לדעת את צורת אות המוצא.

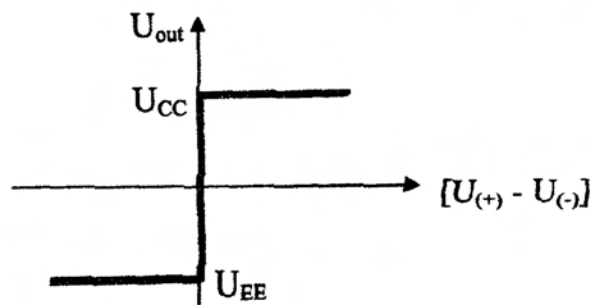
## 17. מעולה אנלוגי (Comparator)

מגבר שרת - כמשווה אנלוגי

סימון המגבר:



אופיין מעבר - מגבר שרת אידיאלי:



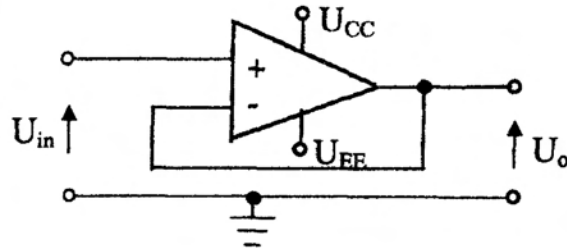
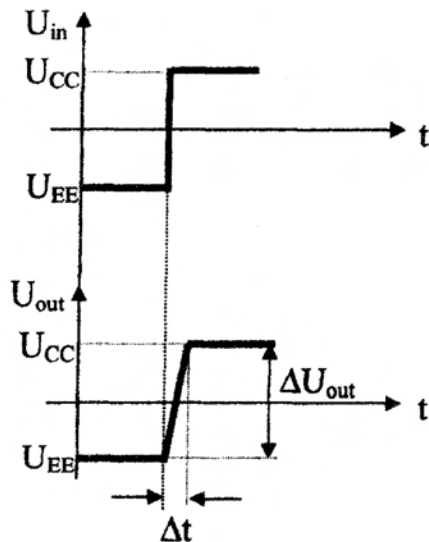
$$U_{out} = \begin{cases} U_{CC} & U_{(+)} > U_{(-)} \\ U_{EE} & U_{(+)} < U_{(-)} \end{cases}$$

הערה:

בד"כ המתח  $U_{CC} > 0$  והמתח  $U_{EE} < 0$ .

### (Slew Rate) S.R

זהו קצב השינוי המירבי, בו יכול להשתנות מתח המוצא של מגבר שרת.  
קצב השינוי נמדד כתגובה לאות מבוא המשתנה מ-  $U_{EE}$  ל-  $U_{CC}$ , עם חיבור של  
משוב יחידה.  $U_{CC}$  ו-  $U_{EE}$  הם שני מתחי ספקי ה- D.C של המעגל.



$$S.R = \text{SlewRate} = \left| \frac{dU_{out}}{dt} \right|_{\text{Max}} \cong \frac{\Delta U_{out}}{\Delta t}$$

### הערות:

- לפעמים ה- S.R למדרגה חיובית שונה מ- S.R למדרגה שלילית, יצרנים מספקים את שני הערכים.
- יצרנים נוהגים לספק S.R גם עבור הגברים גדולים מאוד.

### (Full Power Bandwidth) FPBW

התדר המירבי שבו מסוגל המעגל להפיק (במוצאו), אות סינוס בעל התנופה המירבית  
ללא עיוותים. במעגל שבו  $|U_{CC}| = |U_{EE}| = U$ :

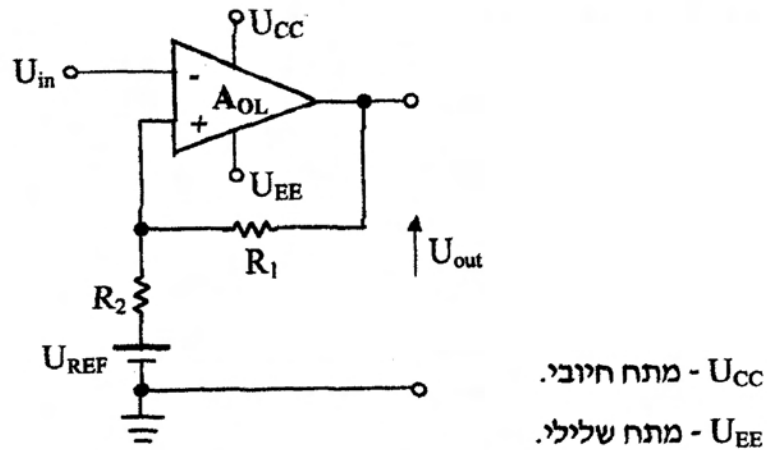
$$FPBW = f_{\text{max}} = \frac{S.R}{2\pi \cdot U}$$

### הערה:

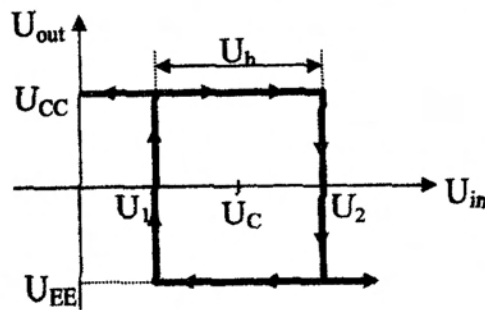
- $BW_{CL}$  - רוחב הסרט לאות קטן לאותות סינוס (ניתוח מעגלים לאות קטן).  
 $FPBW$  - רוחב הסרט לאותות גדולים ( $BW_{CL} > FPBW$ ).

## משווא עם שחל מהפך (שמידט טריגר)

משווא עם עניבת היסטרוזיס.



אופיין המעגל - מגבר שרת אידיאלי:



$$\begin{cases} U_{(+)} = \frac{U_{REF}R_1 + U_{out}R_2}{R_1 + R_2} \\ U_2 = U_{(+)}|_{U_{out}=U_{CC}} = \frac{U_{REF}R_1 + U_{CC}R_2}{R_1 + R_2} \\ U_1 = U_{(+)}|_{U_{out}=U_{EE}} = \frac{U_{REF}R_1 + U_{EE}R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_C = \frac{1}{2}(U_2 + U_1) \\ U_h = U_2 - U_1 \end{cases}$$

$U_C$  - מרכז חלון ההיסטרוזיס.

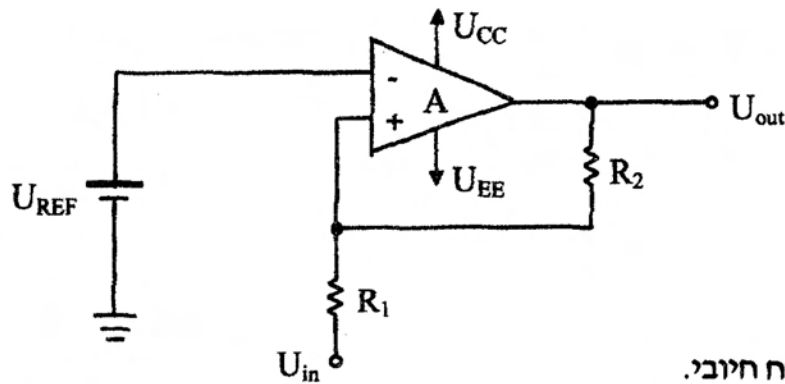
$U_h$  - רוחב חלון ההיסטרוזיס.

$U_1$  - מתח סף בזמן ירידת מתח המבוא, הגורם לשינוי מתח המוצא.

$U_2$  - מתח סף בזמן עליית מתח המבוא, הגורם לשינוי מתח המוצא.

## משווה עם שחל לא מהפך (שמידט טריג'ר)

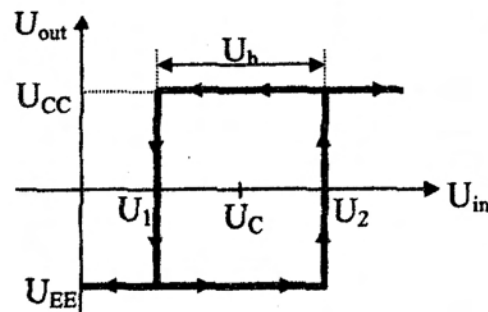
משווה עם עגיבת היסטריזיס.



$U_{CC}$  - מתח חיובי.

$U_{EE}$  - מתח שלילי.

## אופיון המעגל - מגבר שרת אידיאלי:



$$\begin{cases} U_2 = U_{in} \Big|_{\substack{U_{(+)}=U_{REF} \\ U_{out}=U_{EE}}} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{EE} \\ U_1 = U_{in} \Big|_{\substack{U_{(+)}=U_{REF} \\ U_{out}=U_{CC}}} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{CC} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_C = \frac{1}{2}(U_2 + U_1) \\ U_h = U_2 - U_1 \end{cases}$$

$U_C$  - מרכז חלון ההיסטריזיס.

$U_h$  - רוחב חלון ההיסטריזיס.

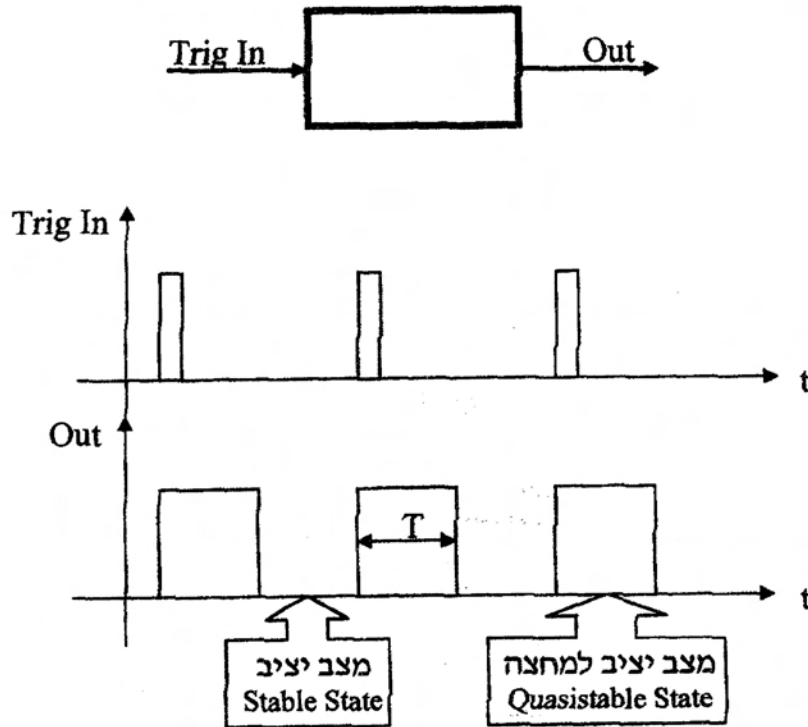
$U_1$  - מתח סף בזמן ירידת מתח המבוא, הגורם לשינוי מתח המוצא.

$U_2$  - מתח סף עליית מתח המבוא, הגורם לשינוי מתח המוצא.

## 18. מעגלי תזמון

### סוגי מעגלי תזמון

א. רב רסט חד יציב (Monostable - Triggered Mode)



במוצא המעגל נשמרת רמה לוגית אחת קבועה ("0" או "1") הנקראת המצב היציב. ניתן לעבור לרמה השנייה לפרק זמן מוגדר ע"י חודאה (דירבון) מצב זה נקרא המצב היציב למחצה. לאחר פרק זמן זה יחזור האות במוצא לרמה הלוגית היציבה.

#### Non Retriggerable Monostable

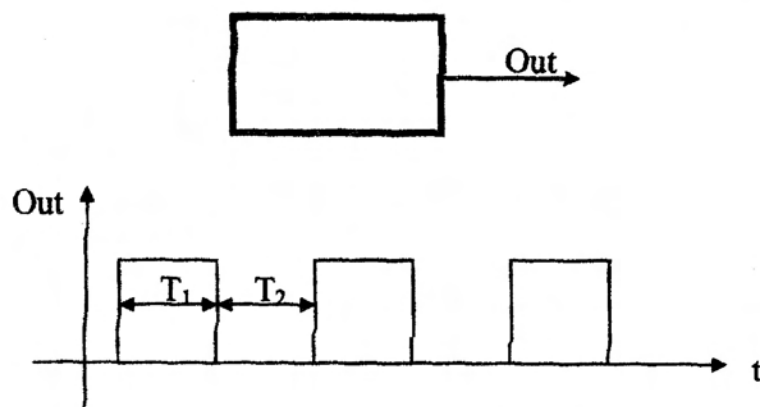
מעגל חד יציב שאיננו ניתן לדירבון מחדש, כאשר הוא נמצא במצב היציב למחצה. במעגל זה נדרש זמן השהייה מסוים בין סיום המצב היציב למחצה ועד שניתן לתת פולס דירבון נוסף ב - Trig In.

#### Retriggerable Monostable

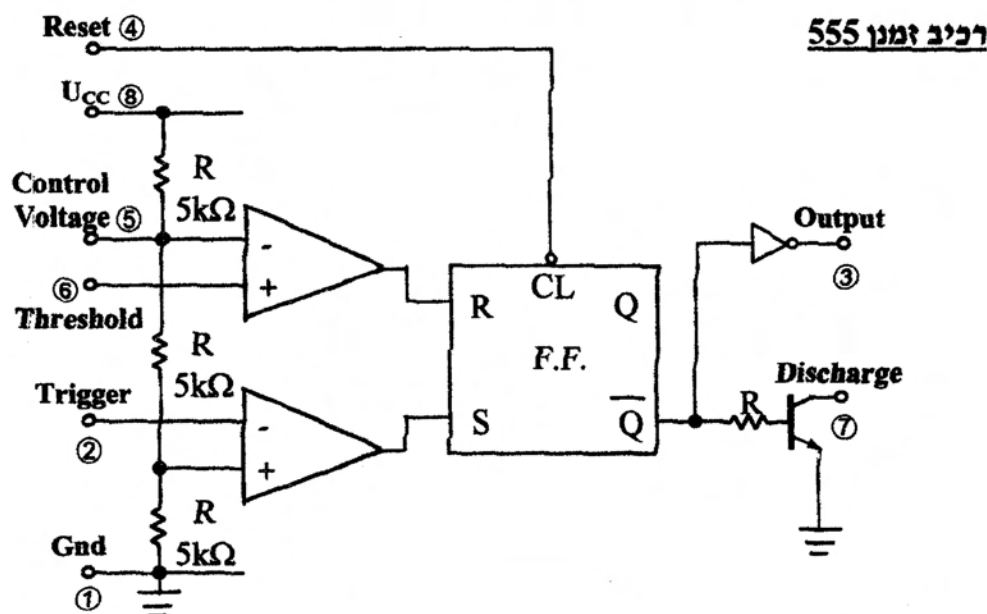
מעגל חד יציב שניתן לדירבון מחדש, גם כאשר הוא מצוי במצב היציב למחצה. במעגל זה אין זמן מינימלי בין פולסי המבוא (Trig In).



## ב. רב רטט אל יציב (Astable Multivibrator)

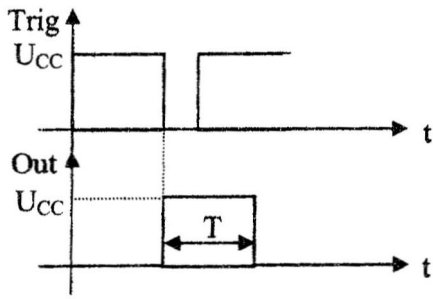
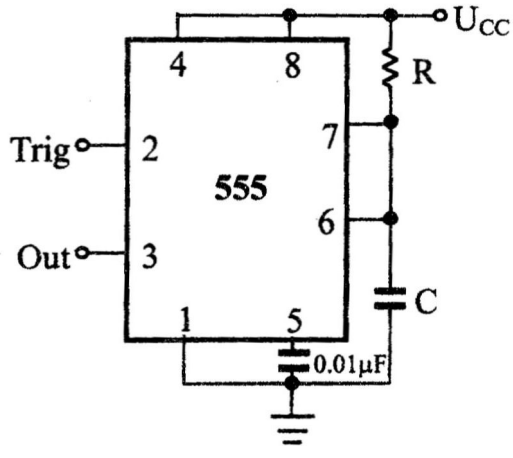
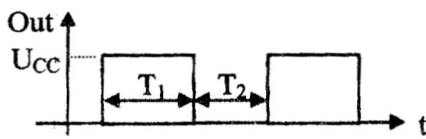
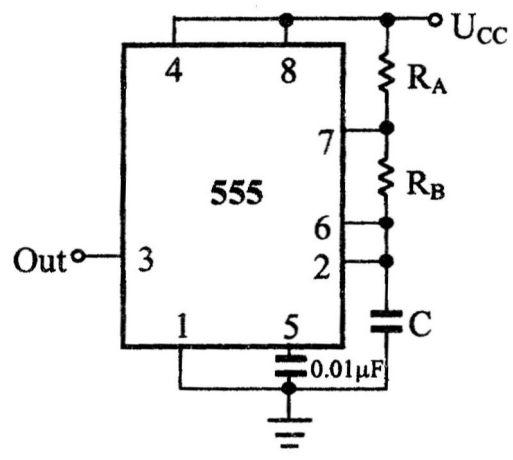
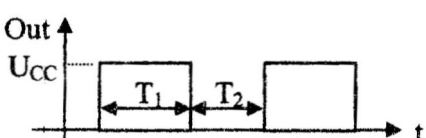
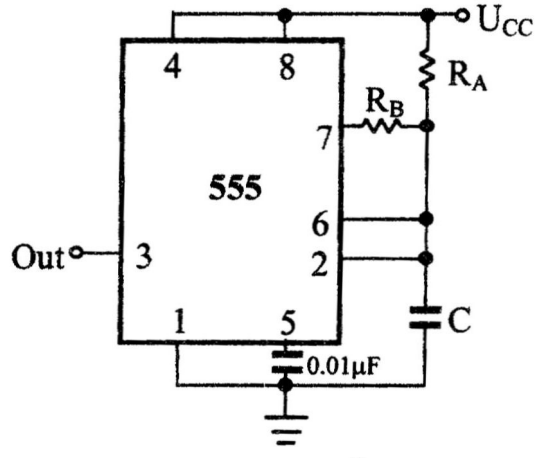


במוצא המעגל מקבלים שתי רמות לוגיות למחצה ("0" או "1"), המעגל מתנדנד בצורה אוטומטית בין שני המצבים. התהליך חוזר על עצמו ללא הפסקה ללא צורך בדירבון חיצוני. משך זמן השהייה  $T_1$  ו-  $T_2$  בכל רמה נקבעת ע"י רכיבי המעגל. מעגלים מסוג זה ניתן למצוא, לדוגמה: בכלי רכב בשימוש לאיתות או למגבים.

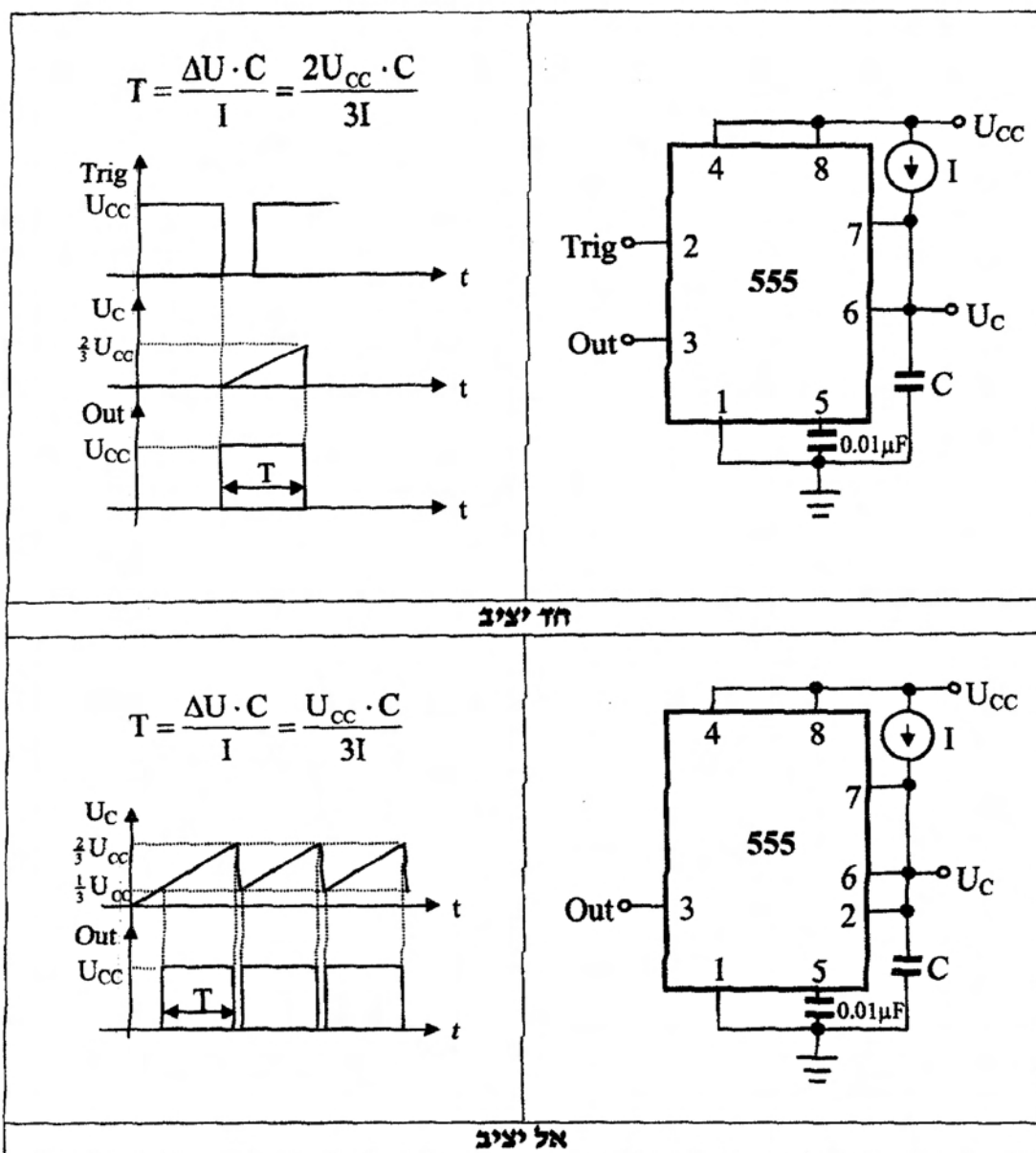


- רגל 1 - אדמה.
- רגל 2 - פעילה במתח קטן מ-  $1/3 U_{CC}$  וגורמת ל- "1" ברגל 3 ונתק ברגל 7.
- רגל 3 - מתח המוצא  $U_o$ .
- רגל 4 - רגל Reset (פעילה בנמוך - "0").
- רגל 5 - מתח ייחוס. כשאינה בשימוש תקוצר לאדמה דרך קבל (עבור AC).
- רגל 6 - פעילה במתח גדול מ-  $2/3 U_{CC}$  וגורמת ל- "0" ברגל 3 וקצר לאדמה ברגל 7.
- רגל 7 - פורקת את הקבל החיצוני, כאשר הטרוניסטור הפנימי מתחיל את הפריקה מאזור הפעיל ומסיים ברוויה.
- רגל 8 - מתח הספק  $U_{CC}$ .

# חיבורים אופייניים לרכיב 555

| נוסחאות                                                                                                                                                                                                                                                                                        | מעגלי תזמון                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $T = RC \cdot \ln 3$                                                                                                                                                                                          |    |
| חד יציב                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                      |
| $\begin{cases} T_1 = (R_A + R_B) \cdot C \cdot \ln 2 \\ T_2 = R_B \cdot C \cdot \ln 2 \end{cases}$ $T = T_1 + T_2 = (R_A + 2R_B) \cdot C \cdot \ln 2$ $f = \frac{1}{T}$ $50\% < \text{Duty Cycle} < 100\%$  |   |
| אל יציב                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                      |
| $T_1 = R_A \cdot C \cdot \ln 2$ $T_2 = \frac{R_A R_B C}{R_A + R_B} \ln \frac{R_B - 2R_A}{2R_B - R_A}$ $T = T_1 + T_2$ $0\% < \text{Duty Cycle} < 100\%$                                                     |  |
| אל יציב                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                      |

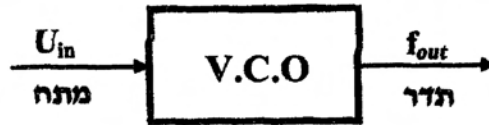
# חיבורים שונים של הרכיב 555 - המשך



## 19. מחירי (f/v - 1 v/f)

א. ממיר מתח לתדר v/f - מתנד מבוקר מתח (VFC) V.C.O

מתנד מבוקר מתח (Voltage Controlled Oscillator), הינו מעגל הממיר אות מתח (מתח ישר) לתדר בתדר במוצא.



שינוי במתח  $U_{in}$  גורם לשינוי בתדר אות המוצא  $f_{out}$ .

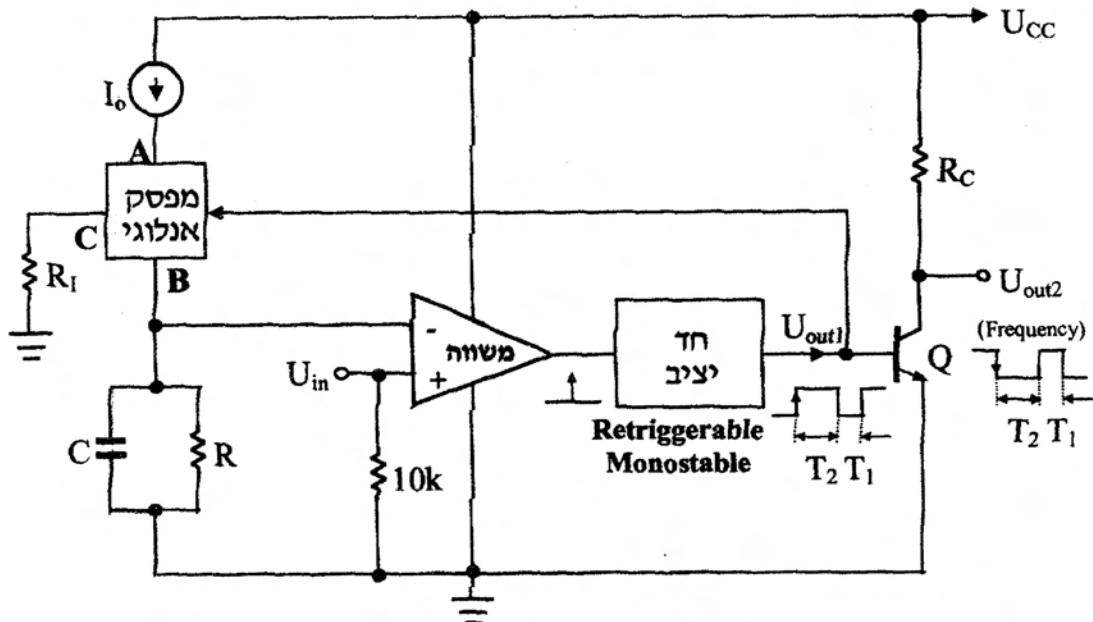
בממיר ליניארי (אידיאלי)

$$f_{out} = f_k + k \cdot U_{in}$$

$f_k$  - תדר בסיסי של אות המוצא, כאשר  $U_{in} = 0$ .

$k$  - קבוע ההמרה ממתח לתדר.

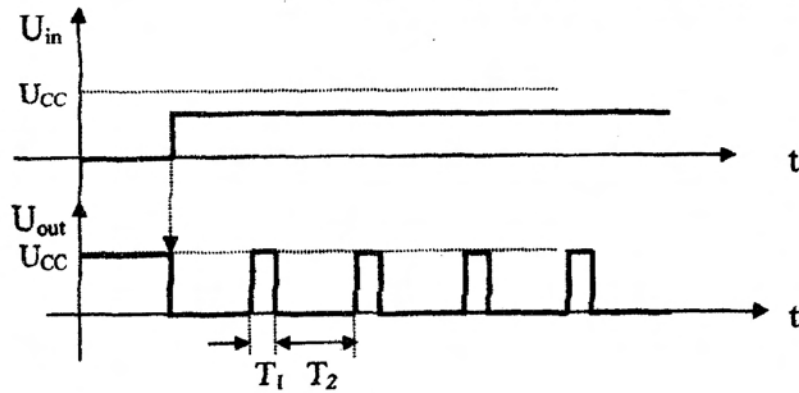
מעגל עקרוני



$U_{in}$  - מתח מבוא ( $0 < U_{in} < U_{CC}$ ).

הערה: תנאי הכרחי לפעולה  $I_0 R > U_{in}$ .

גרף המתאר את מתח המוצא בתלות במתח המבוא



$$\begin{cases} T_2 = \text{אורך הפולס של החד יציב} \\ T_1 = RC \cdot \ln \frac{I_0 R - (I_0 R - U_{in}) \cdot e^{-\frac{T_2}{RC}}}{U_{in}} \end{cases}$$

תדר במוצא הממיר

$$\begin{cases} f_{out} = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{RC \cdot \ln \frac{I_0 R - (I_0 R - U_{in}) \cdot e^{-\frac{T_2}{RC}}}{U_{in}} + T_2} \\ I_0 R > U_{in} \end{cases}$$

תנאי הכרחי לפעולה:

עבור חד יציב שאינו ניתן לדירבון מחדש (Non Retriggerable Monostable), קיים תנאי נוסף על מנת שהממיר יפעל.

$$C < \frac{-T_2}{R \cdot \ln \left( 1 - \frac{U_{in}}{I_0 R} \right)}$$

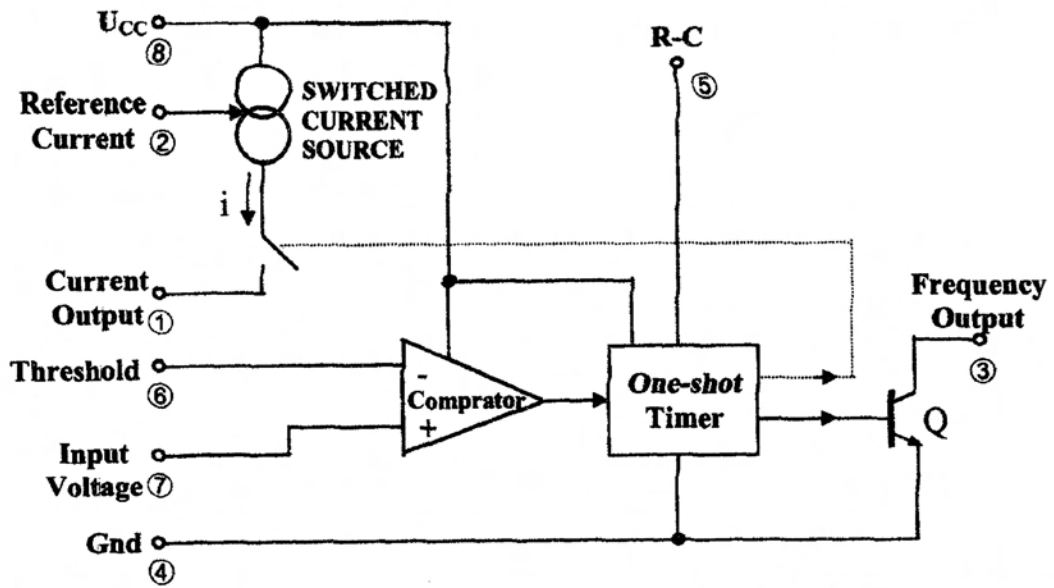
קבוע ההמרה

$$k = \frac{f_{out}}{U_{in}}$$

$f_{out}$  - תדר המוצא.

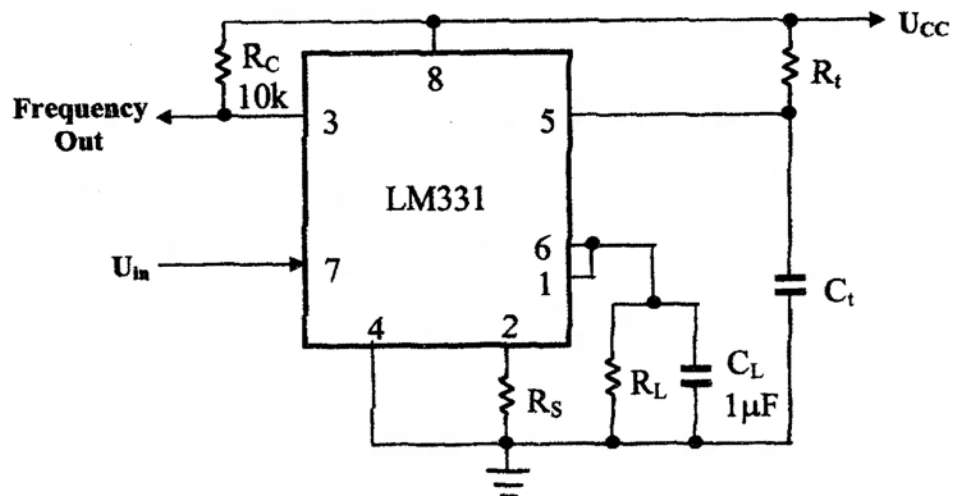
$U_{in}$  - מתח במבוא הממיר.

### רכיב ממיר מתח לתדר LM331



- רגל 1 - יציאת זרם דרך מפסק אנלוגי.  
 רגל 2 - חיבור לנגד שקובע את גודל הזרם במקור זרם.  
 רגל 3 - יציאת תדר מוצא.  
 רגל 4 - חיבור לאדמה.  
 רגל 5 - מתח ייחוס שקובע את זמן החד יציב.  
 רגל 6 - חיבור חיצוני לקבל וגודל שקובע את תחום חשתנות תדר המוצא.  
 רגל 7 - מתח מבוא הקובע את תדר המוצא.  
 רגל 8 - מתח הספק  $U_{CC}$ .

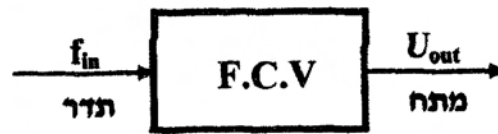
### חיבור אופייני לרכיב LM331



$$f_{out} = \frac{U_{in}}{2.09V} \cdot \frac{R_s}{R_L} \cdot \frac{1}{R_t C_t}$$

### ב. ממיר $f/v$ - מתח מבוקר תדר F.C.V

מתח מבוקר תדר (Frequency Controlled Voltage), הינו ממיר הממיר את אות המבוא (את התדר של האות) למתח במוצא.



שינוי בתדר גורם לשינוי במתח המוצא.

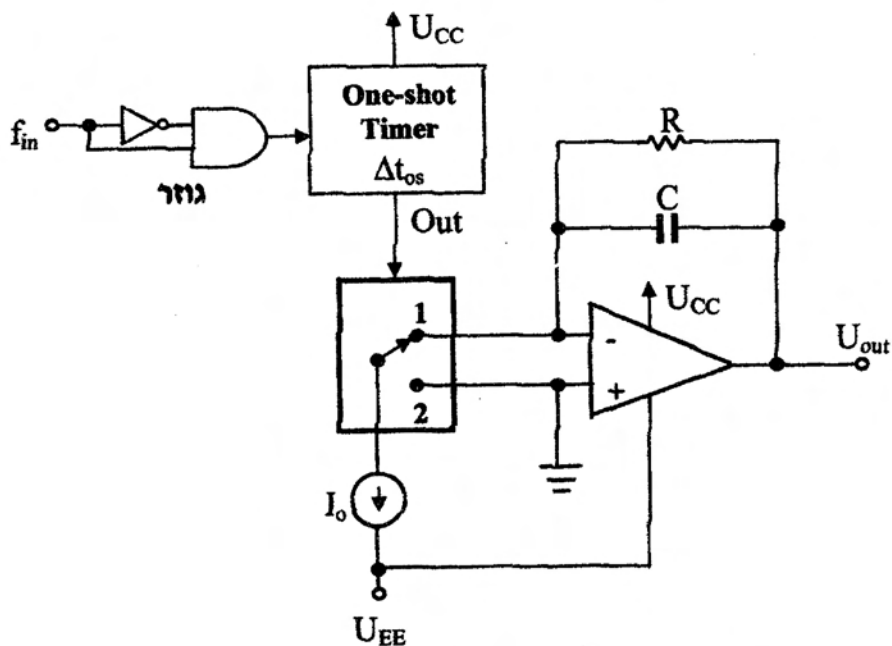
$$U_{out} = U_k + k \cdot f_{in}$$

$U_k$  - מתח בסיסי של המתח ביציאה.

$k$  - קבוע ההמרה מתדר למתח.

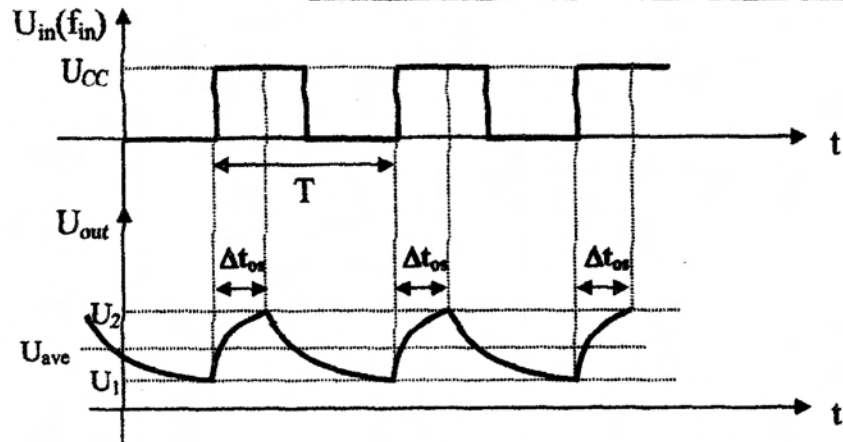
### מעגל עקרוני

תנאי הכרחי לפעולה תקינה של המעגל  $\Delta t_{os} < T$ .



$f_{in}$  - מתח מבוא בתדר ריבועי ( $0 < f_{in} < f_{max}$ ).

גרף המתאר את מתח המוצא בתלות במתח המבוא



מתח במוצא הממיר

בהנחה שהמגבר שרת אידיאלי, נקבל:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = I_0 \cdot R \cdot \frac{e^{\frac{-1}{f_{in}\tau}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-\Delta t_{os}}{\tau}}\right)}{e^{\frac{-\Delta t_{os}}{\tau}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{f_{in}\tau}}\right)} \\ U_2 = I_0 \cdot R \cdot \frac{1 - e^{\frac{-\Delta t_{os}}{\tau}}}{1 - e^{\frac{-1}{f_{in}\tau}}} \\ \tau = RC \\ U_{out(ave)} = I_0 \cdot R \cdot f_{in} \cdot \Delta t_{os} \\ f_{max(U_2=U_{cc})} = \frac{1}{\tau \cdot \ln \left[ 1 + \frac{I_0 \cdot R \cdot \left( e^{\frac{-\Delta t_{os}}{\tau}} - 1 \right)}{U_{cc}} \right]} \end{array} \right.$$

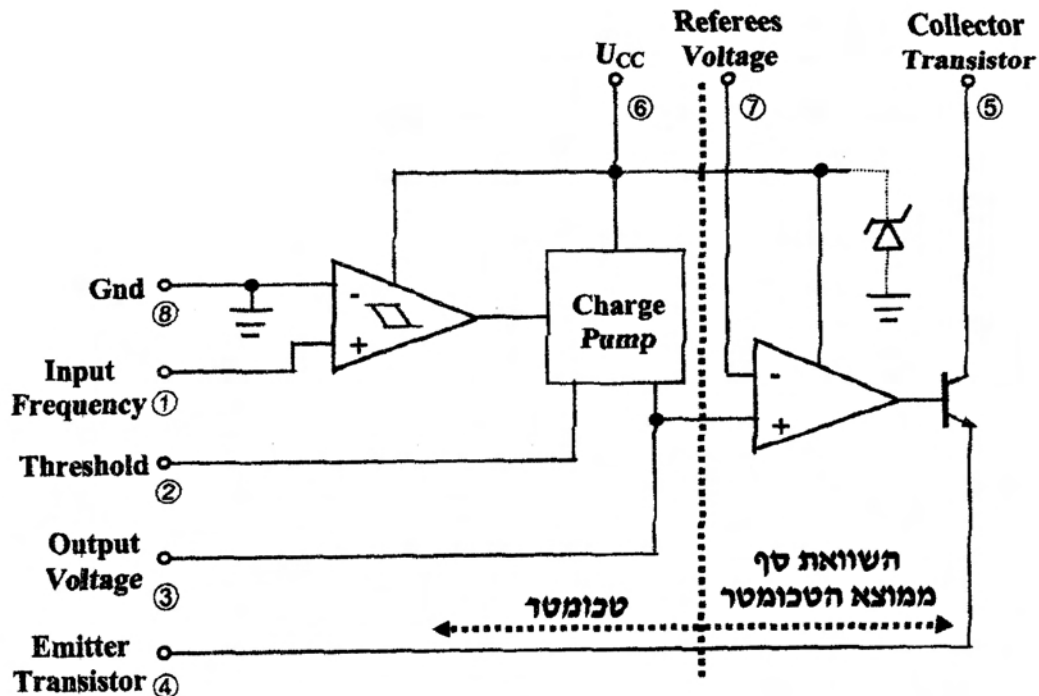
קבוע התמרה

$$k = \frac{U_{out}}{f_{in}} = I_0 \cdot R \cdot \Delta t_{os}$$

$U_{out}$  - מתח במוצא הממיר.  
 $f_{in}$  - תדר בכניסת הממיר.



## רכיב ממיר מתדר למתח LM2907/2917

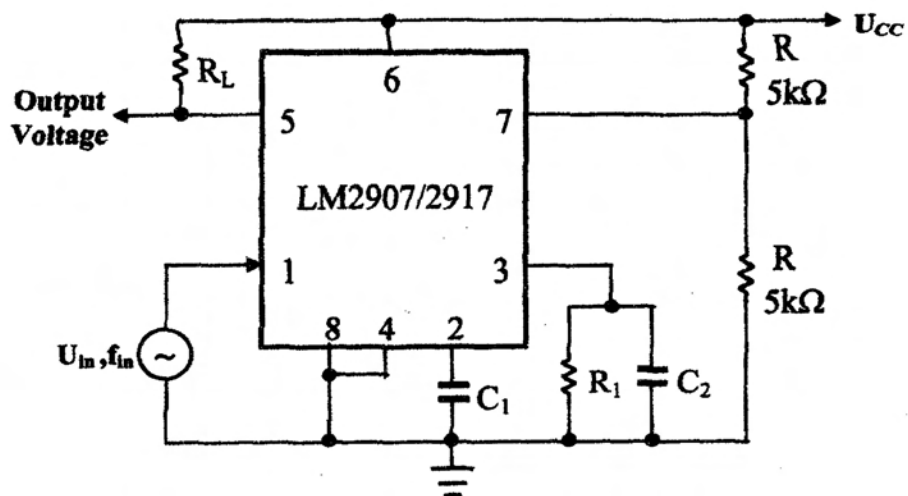


- רגל 1 - כניסת סיגנל בתחום תדר, הקובע את רמת המתח במוצא.
- רגל 2 - חיבור חיצוני לקבל המאפשרת לקבוע את סף המתח ברגל - 3, בתלות מסי פרמטרים.
- רגל 3 - מתח מוצא אנלוגי יחסי לתדר המבוא.
- רגל 4 - יציאת אמפלטוד של הטרנזיסטור, דרכו מתקבל המתח במוצא.
- רגל 5 - יציאת הקולקטור של הטרנזיסטור, יש לחבר מימתוח לטרנזיסטור.
- רגל 6 - מתח הספק  $U_{CC}$ .
- רגל 7 - מתח סף חיצוני, המאפשר השוואה מול מתח ממוצא הטכומטר (רגל 3), המאפשר קבלת התראה במעבר תדר מסוים.
- רגל 8 - חיבור לאדמה.

### הערות

מתח זה מושווה עם רמת המתח הנמצאת ברגל - 7, המגבר שרת מבצע השוואה כמגבר משווה. במוצא המגבר שרת מתקבלת רמת מתח של "1" או "0", רמה הנקבעת ע"י רמות המתח בכניסות המשווה. הטרנזיסטור המחובר למוצא המשווה מתפקד כמגבר זרם. יחידת הטכומטר מודדת בעזרת ה- charge pump את תדר הסיגנל המוכנס ברגל - 1, ומוציאה ברגל - 3 מתח יחסי לתדר זה. ה- charge pump הינו רכיב אגירה (כגון קבל) הנטען בקבלת פולסים, הפריקה מתבצעת בפרקי הזמן בין הפולסים. ככל שתדירות הפולסים גדלה המתח יהיה גבוה יותר.

### חיבור אופייני לרכיב LM2907/2917



$C_2$  - קובע את רמת הגליות ברגל - 3.

$$f_{in} \geq \frac{1}{2R_1C_1}$$

### חישוב רמת המתח במוצא

$$\begin{cases} f_{max} = \frac{i_2}{U_{CC} \cdot C_1} \\ U_{Ripple} = \frac{U_{CC}}{2} \cdot \frac{C_1}{C_2} \cdot \left( 1 - \frac{U_{CC} \cdot f_{in} \cdot C_1}{i_2} \right)_{Pk-Pk} \\ U_{out} = f_{in} \cdot U_{CC} \cdot R_1 \cdot C_1 \end{cases}$$

$i_2$  - הזרם הזורם ברגל 2 (הזרם נע בתחום  $140 - 240 \mu A$ , זרם ממוצע  $180 \mu A$ ).  
השינוי בזרם גורם לשינוי בגודל הגליות במוצא.

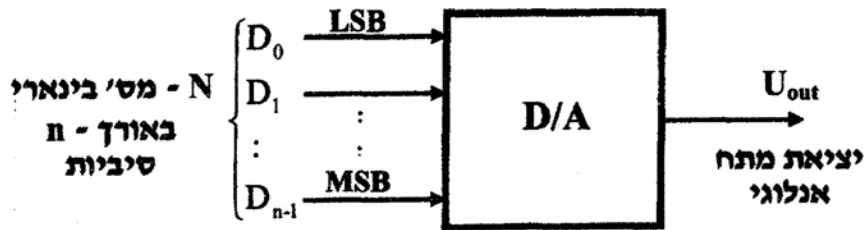
$f_{max}$  - התדר המכסימלי שניתן לקבל במוצא.

$U_{Ripple}$  - גודל הגליות במוצא.

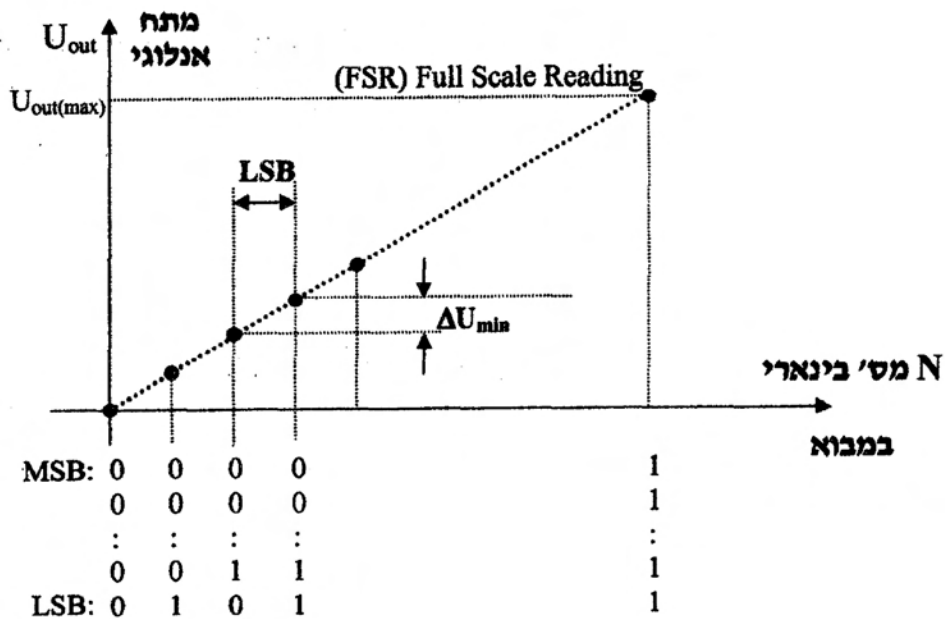
## 20. מעצבי המרה A/D , D/A

### א. ממיר D/A (DAC)

ממיר המבצע המרה של אות ספרתי לאות אנלוגי (Digital to Analog).  
ההמרה לאות אנלוגי, תלויה במספר הסיביות המייצגות את האות הספרתי. ככול  
שמספר הסיביות גדל מתקבל אות אנלוגי בעל רזולוציה גבוהה יותר.



### תלות אות המוצא האנלוגי במילת המבוא הספרתית



## הגדרות ומונחים במעגלי המרה - D/A

### (1) רזולוציה (הבחנה/הפרדה) (Resolution)

ההבחנה של ממיר D/A היא החלק מתחום הסטייה המלאה (FSR) במוצא, כאשר במילה הספרתית שבמבוא חל שינוי הקטן ביותר (LSB).  
לדוגמא: ממיר D/A בעל 8 סיביות יהיה בעל  $2^8 = 256$  מצבי מוצא שונים, במקרה זה מספר הקפיצות בתחום יהיו 255.  
ההבחנה המתקבלת תהיה  $1/255$  מתוך הסטייה המלאה.

$$\text{Resolution} = \Delta U_{\min} = \frac{\text{FSR}}{2^n - 1}$$

### (2) תחום הסטייה המלאה (FSR)

תחום הסטייה המלאה הינו ערכו המכסימלי האפשרי של האות האנלוגי במוצא הממיר. אות זה מתקבל כאשר כל סיביות המבוא נמצאות במצב של "1".

### (3) אי לינאריות (Non-Linearity)

לינאריות היא מידת היחס הישר בין עירור (מבוא) לתגובת המוצא.  
אי לינאריות של ממיר D/A הינו מצב בו לא קיים קשר של יחס בין מילת הצופן הבינארית לבין האות האנלוגי במוצא המעגל.  
סטייה זו מהקשר הישר נתונה ע"י היצרן באחוזים ב - FSR.

### (4) רגישות לטמפרטורה (Temperature-Sensitivity)

רגישות לטמפרטורה היא מידת השינוי היחסית הנגרמת באות המוצא, עבור מילה ספרתית כלשהי במבוא כאשר הטמפרטורה משתנה ב -  $1^\circ\text{C}$ .  
הרגישות נמדדת ב -  $\text{ppm}/^\circ\text{C}$  (ppm - parts per million), כלומר שינוי בגודל  $1/10^6$  מההיסט המלא לעלית טמפרטורה של מעלה אחת צלזיוס.

### (5) זרם אפס (Zero Scale Current)

זרם האפס הוא הזרם (או המתח) במוצא הממיר, כאשר במבוא כל הסיביות נמצאות במצב של "0". באופן אידיאלי לא זורם זרם במצב זה, אך באופן מעשי בכל רכיב גודל זה שונה מאפס, בגלל תופעת זליגת זרם דרך המתגים האלקטרוניים מהם בנוי הממיר.

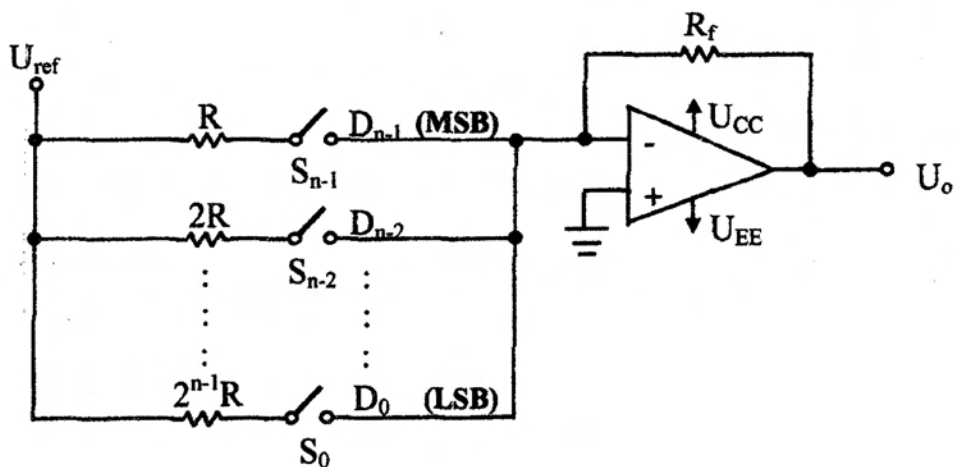
### (6) זמן התייצבות (Settling Time)

זמן ההתייצבות הינו הזמן הדרוש לאות המוצא להתייצב על הערך הסופי, בדיוק המתאים לחצי ספרת LSB מרגע שינוי האות הספרתי במבוא. זמן ההתייצבות נמדד בד"כ ע"י שינוי האות הספרתי במבוא, מערך שכולו "0" לערך שכולו "1". משך הזמן שלוקח לאות להגיע לערך של  $\frac{1}{2}\Delta U_{\min}$  - FSR, מוגדר כזמן ההתייצבות.

#### **(7) יציבות (Stability)**

מציינת את גודל שינוי האות במוצא כתלות בגורמים שונים (טמפרטורה, גיל וכו'). היציבות נמדדת עבור אות מוצא מכסימלי (FSR).

## ממיר D/A עם נגדים משוקללים בינארית



"0"  $D_k$  מפסק  $S_k$  פתוח.

"1"  $D_k$  מפסק  $S_k$  סגור.

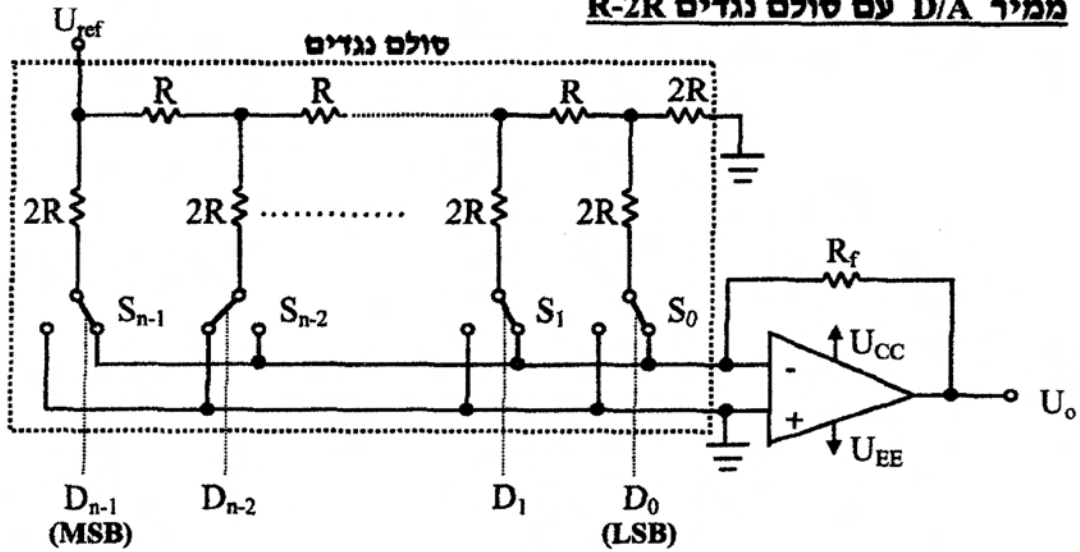
### נוסחאות

$$U_o = -\frac{U_{ref} \cdot R_f}{2^{n-1} R} \cdot [D_0 \cdot 2^0 + D_1 \cdot 2^1 + \dots + D_{n-1} \cdot 2^{n-1}] = -\frac{U_{ref} \cdot R_f \cdot N}{2^{n-1} R}$$

$$\Delta U_{min} = \frac{-U_{ref} \cdot R_f}{2^{n-1} R}$$

N - ערכו עשרוני שווה ערך לצירוף הבינארי במבוא (תלוי במצב המפסקים).

### ממיר D/A עם סולם נגדים R-2R



$D_k = "0"$  מפסק  $S_k$  מחובר שמאלה.  
 $D_k = "1"$  מפסק  $S_k$  מחובר ימינה.

### נוסחאות

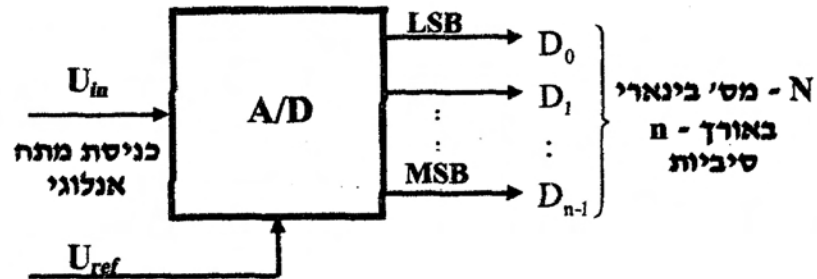
$$U_o = -\frac{U_{ref} \cdot R_f}{2^n R} \cdot [D_0 \cdot 2^0 + D_1 \cdot 2^1 + \dots + D_{n-1} \cdot 2^{n-1}] = -\frac{U_{ref} \cdot R_f \cdot N}{2^n R}$$

$$\Delta U_{min} = \frac{-U_{ref} \cdot R_f}{2^n R}$$

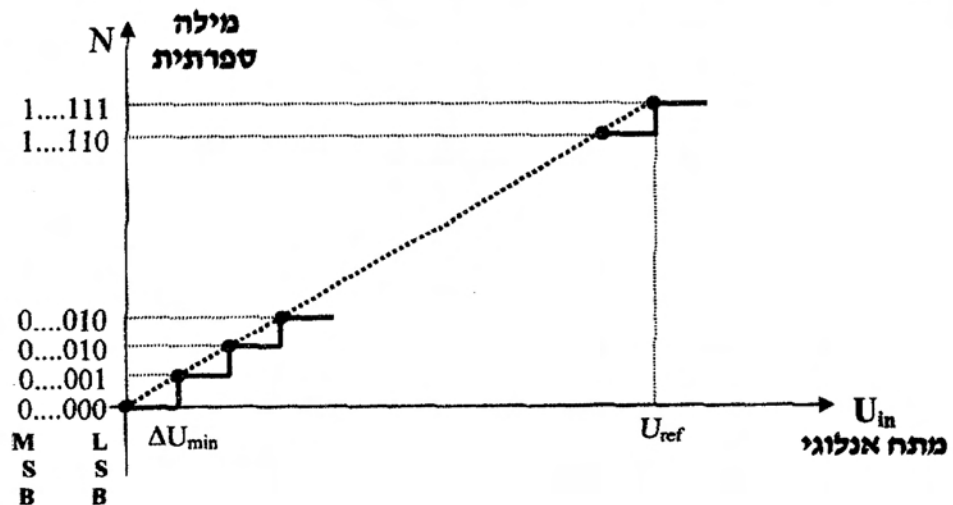
N - הערך עשרוני שווה ערך לצירוף הבינארי במבוא (תלוי במצב המפסקים).

### ב. ממיר A/D (ADC)

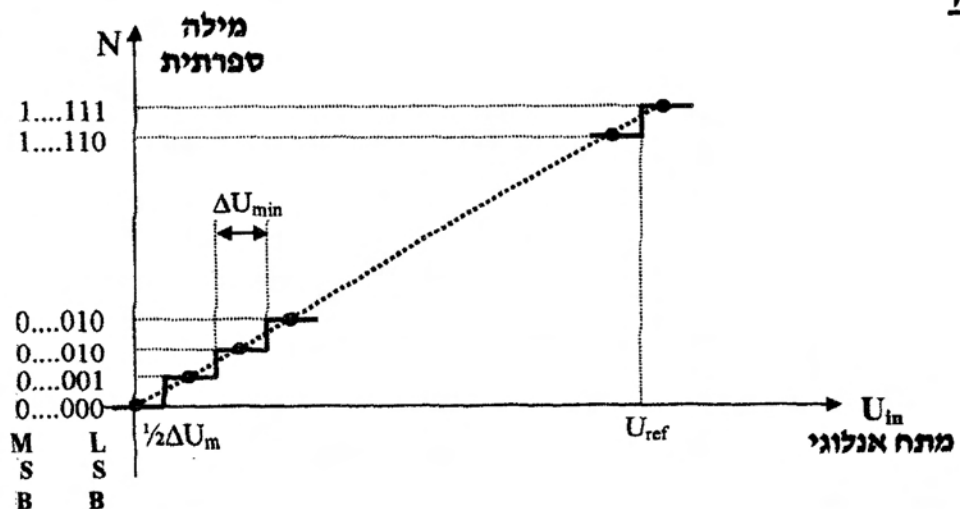
ממיר המבצע המרה של אות אנלוגי לאות ספרתי (Analog to Digital).  
ההמרה לאות ספרתי, תלויה במספר הסיביות המייצגות את האות הספרתי.  
ככול שמספר הסיביות גדל האות הספרתי חמתקבל במוצא מדויק יותר.



תלות האות הספרתי במוצא בתלות באות האנלוגי במבוא



או





## הגדרות ומונחים במעגלי המרה - A/D

### (1) לינאריות (Linearity)

ההמרה האידיאלית בין אות המבוא לאות המוצא הספרתי מתוארת ע"י קו ישר. בממירים מעשיים קיימת סטייה מהקו הישר, ככול שהסטייה קטנה כך משתפרת לינאריות הממיר. בממיר ממוצע סטייה זו מגיעה לערך של  $\pm \frac{1}{2} \text{LSB}$ .

### (2) תחום מתח המבוא (Analog Input Range)

זהו ערכו המכסימלי של האות במבוא הממיר. קיימים סוגים שונים של ממירים, ממירים המאפשרים במבוא ערכים חיוביים בלבד, בעוד שחלק אחר של הממירים מאפשר במבוא ערכים חיוביים/שליליים. ערכו המירבי של אות המבוא שווה ל-  $U_{\text{ref}}$ , במקרה זה כל הסיביות במוצא הממיר יהיו "1".

### (3) בקרה ספרתית (Digital Control)

בממירים קיימת אפשרות לשלוט על הממיר באמצעות כניסה ספרתית. כולל האפשרות לשלוט על מספר רמות סיגנלים, אותם רוצים להעביר ב- A/D.

### (4) מקדם טמפרטורה (Temperature Coefficient)

זהו ערך המציין את יציבות אות המוצא של ממירים בתלות בשינוי הטמפרטורה.

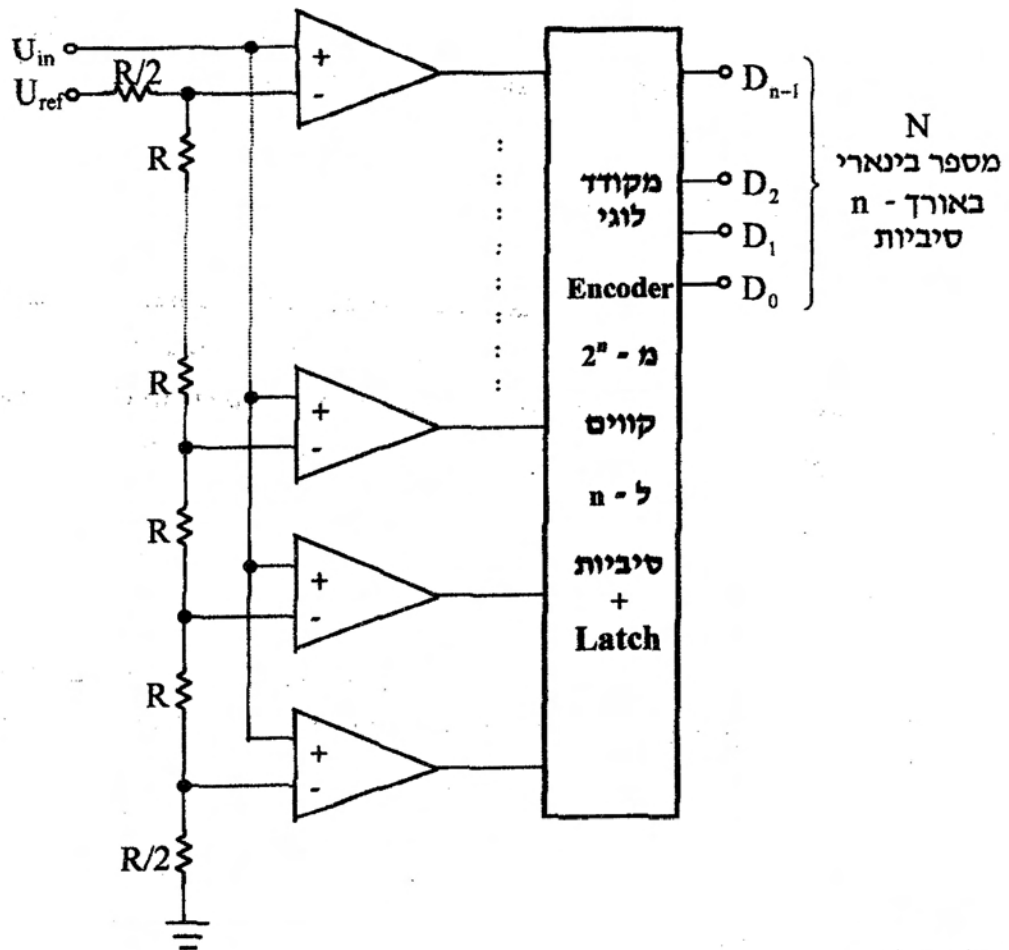
### (5) זמן המרה (Conversion Time)

זהו הזמן הנדרש לסיביות במוצא להתייצב על ערכן הנכון, החל מרגע שינוי האות האנלוגי במבוא על ערך חדש.

### (6) הבחנה (רזולוציה)

הבחנה (רזולוציה) של ממיר A/D הינה השינוי הקטן ביותר באות המבוא האנלוגי, הגורם לשינוי של המילה הספרתית במוצא. לחילופין זהו תחום הערכים הגדול ביותר של אות המבוא, השומר על אותה מילה ספרתית במוצא.

## ממיר A/D מסוג "הבזק" (מקבילי) - Flash



נוסחאות

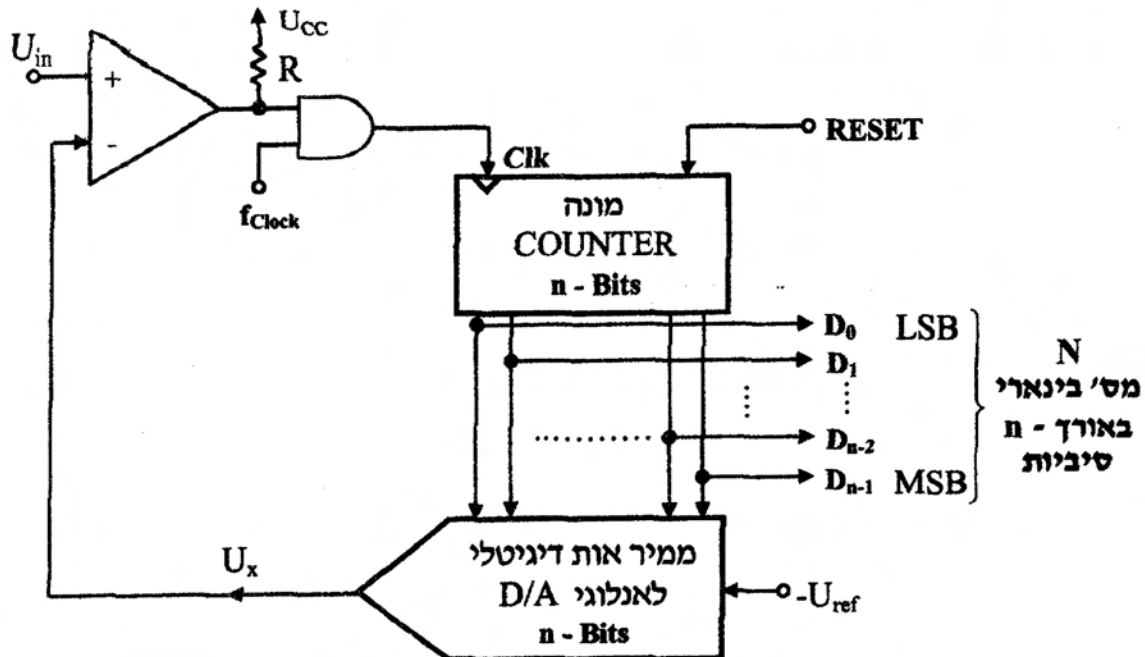
$$\begin{cases} \Delta U_{\min} = \frac{U_{\text{ref}}}{2^n} \\ N = \left\lceil \frac{U_{\text{in}}}{\Delta U_{\min}} \right\rceil \end{cases}$$

$$t_{\text{conv}} = t_{\text{pd(comp)}} + t_{\text{pd(logic)}}$$

N - ערכו העשרוני של הצירוף הבינארי במוצא.

$U_{\text{in}}$  - מתח מבוא אנלוגי. ערכו המכסימלי שווה בערך למתח  $U_{\text{ref}}$  (כדי לגרום לשינוי במשווה המשמעותי ביותר MSB).

## ממיר A/D עם משב D/A



$t_{conv}$  - זמן ההמרה למספר מסוים.

$t_{conv(max)}$  - זמן ההמרה למספר המכסימלי של המעגל.

$N$  - ערכו העשרוני של הצירוף הבינארי במוצא.

$n$  - מספר הסיביות בממיר.

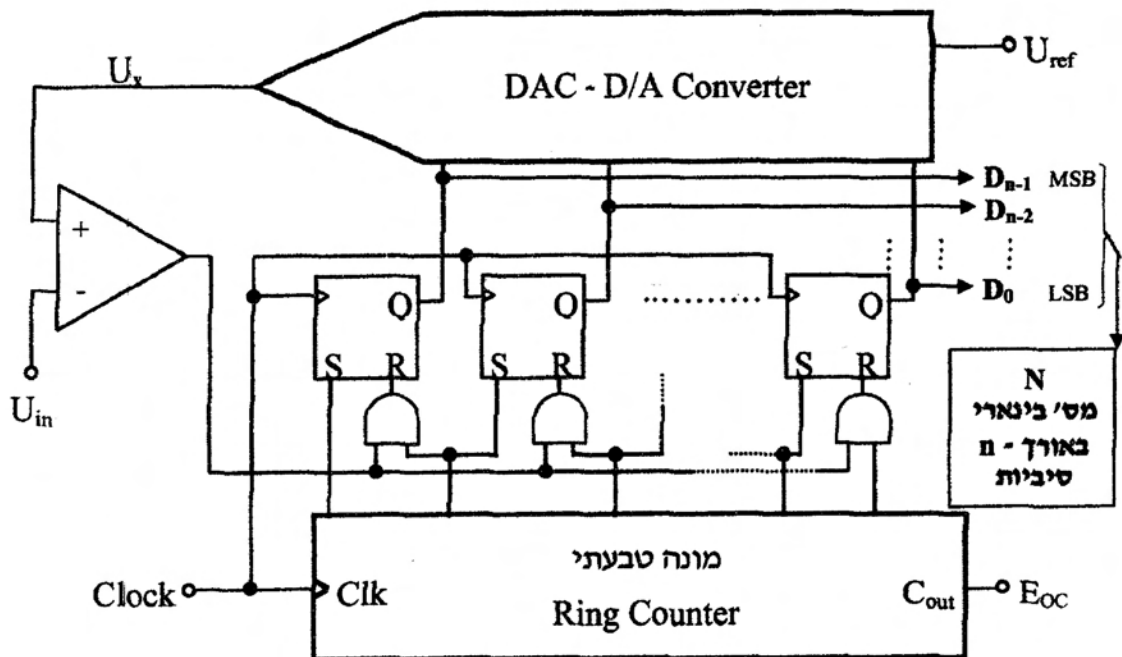
### נוסחאות

$$t_{conv} = N \cdot T_{Clock}$$

$$\begin{cases} t_{conv(max)} = (2^n - 1) \cdot T_{Clock} \\ \Delta U_{min} = \frac{U_{x(max)}}{2^n - 1} = \frac{U_{ref}}{2^n - 1} \end{cases}$$

$$N = \left\lceil \frac{U_{in}}{\Delta U_{min}} \right\rceil \quad \text{החלק השלם של}$$

**ממיר A/D בשיטת "קירוב מדורג" (Successive Approximation)**



**נוסחאות**

$$\begin{cases} \Delta U_{\min} = \frac{U_{\text{ref}}}{2^n} \\ N = \left\lceil \frac{U_{\text{in}}}{\Delta U_{\min}} \right\rceil \text{ החלק השלם של } \end{cases}$$

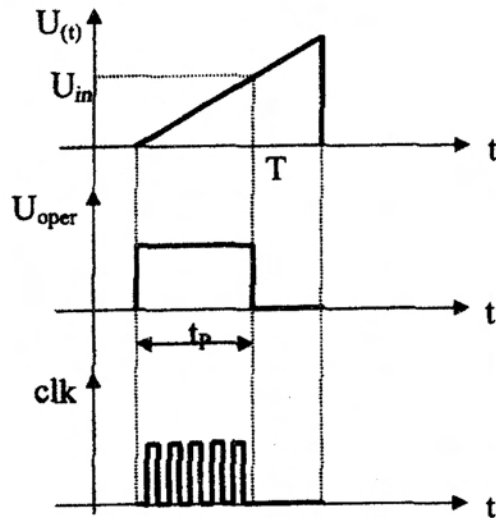
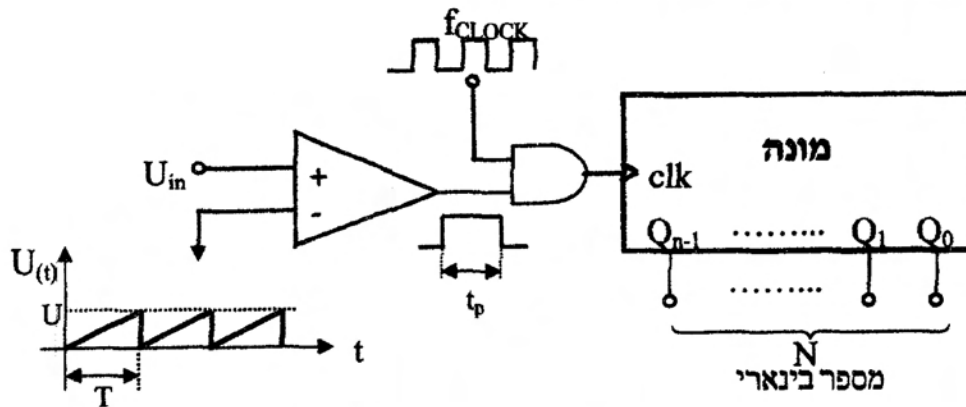
זמן המרה קבוע:

$$t_{\text{conv}} = n \cdot T_{\text{clock}}$$

N - ערכו העשרוני של הצירוף הבינארי במוצא.

n - מספר הסיביות בממיר.

## ממיר A/D ישיר (Linear Ramp)



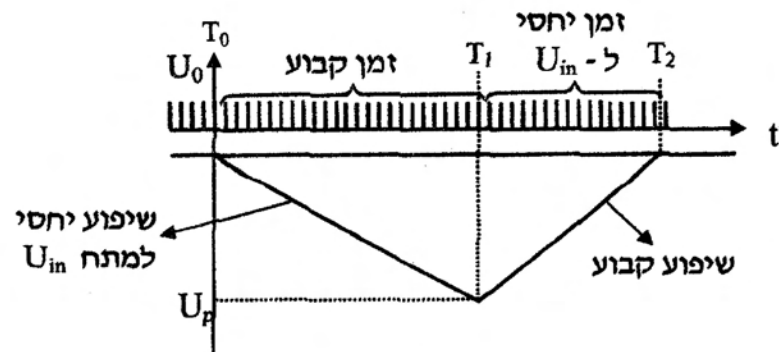
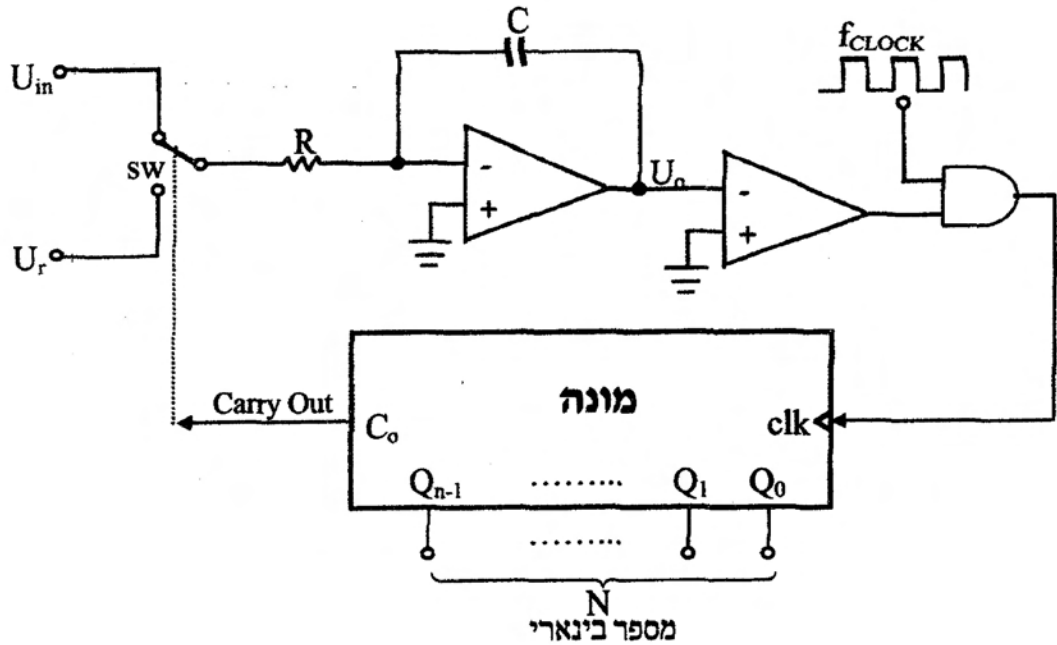
### נוסחאות

$$\begin{cases} \Delta U_{min} = \frac{U}{T \cdot f_{clk}} \\ U(t) = \frac{U}{T} \cdot t \\ t_p = \frac{T}{U} \cdot U_{in} = K U_{in} \\ f_{CLOCK} = \frac{2^n - 1}{T} \end{cases}$$

$$N = \left\lceil \frac{t_p}{T_{CLK}} \right\rceil = \left\lceil \frac{T}{U} \cdot U_{in} \cdot f_{CLK} \right\rceil$$

N - מס' העשרוני שווה ערך לצירוף הבינארי במוצא.

## ממיר A/D מסוג "שיפוע כפול" (Dual Slope)



Carry Out - מתקבל כאשר כלל יציאות Q עולות למצב "1".

המתח  $U_{in} > 0$ , המתח  $U_r < 0$ .

### נוסחאות

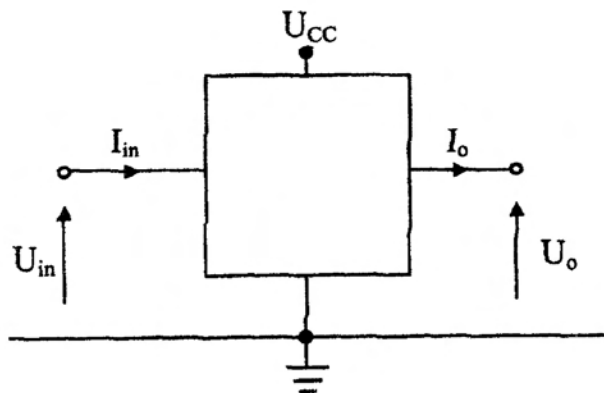
$$\begin{cases} T_1 = 2^n \cdot T_{CLK} \\ T_2 = T_1 \cdot \left( 1 + \left| \frac{U_{in}}{U_r} \right| \right) \\ t_{conv} = T_2 \\ \Delta U_{min} = \frac{U_r}{2^n} \end{cases}$$

$$N = \frac{T_2 - T_1}{T_{CLK}} = \left| \frac{U_{in}}{U_r} \right| \cdot 2^n$$

N - מס' העשרוני שווה ערך לצירוף הבינארי במוצא.

## 21. משפחות פולטיות

### שערים לוגיים - תכונות



### הגדרות

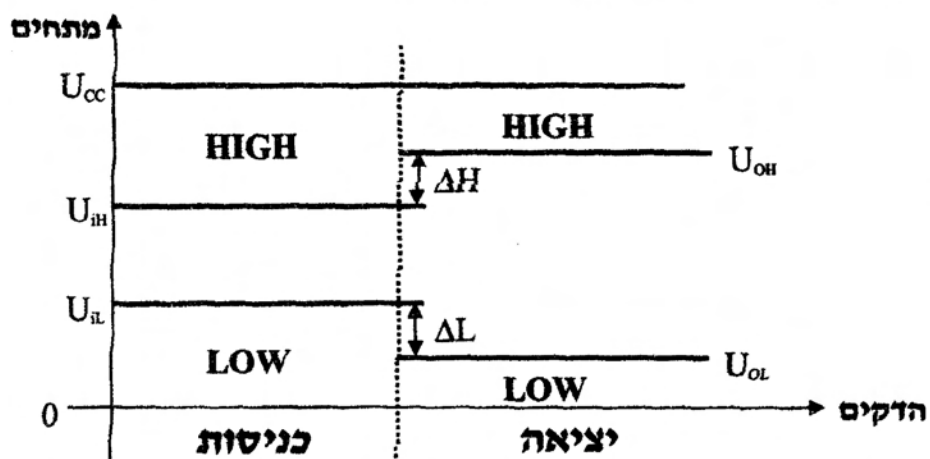
עבור מתחי המבוא והמוצא ( $U_o, U_{in}$ ) יוגדרו המצבים "1" HIGH =

ו - "0" LOW = עפ"י הגדלים הבאים:

- $U_{OH} > 0$  מתח מינימלי במוצא השער במצב HIGH.
- $U_{IH} > 0$  מתח מינימלי במבוא השער המזוהה כמצב HIGH.
- $U_{OL} > 0$  מתח מכסימלי במוצא השער במצב LOW.
- $U_{IL} > 0$  מתח מכסימלי במבוא השער המזוהה כמצב LOW.
- $I_{IH} > 0$  זרם מכסימלי במבוא השער, במצב HIGH במבוא.
- $I_{OH} < 0$  הזרם המכסימלי במוצא השער, במצב HIGH במוצא.
- $I_{IL} < 0$  זרם מכסימלי במבוא השער, במצב LOW במבוא.
- $I_{OL} > 0$  הזרם המכסימלי שהשער יכול לספק למוצא, במצב LOW במוצא.



### תחום מתחים בכניסות וביציאות של שער טימוסי



### חסינות לרעש (Noise Immunity)

הערך המוחלט של רמת אות (מתח) מינימלית בכניסת השער, שתגרום להחלפת הרמה הלוגית במוצאו.

$$\begin{cases} \Delta H = U_{OH} - U_{IH} = \text{NOISE MARGIN (HIGH)} \\ \Delta L = U_{IL} - U_{OL} = \text{NOISE MARGIN (LOW)} \end{cases}$$

$$\text{NOISE MARGIN} = \max(\Delta L, \Delta H)$$

$U_{OH} \leq U_o \leq U_{CC}$  : תחום המתחים במוצא השער במצב HIGH

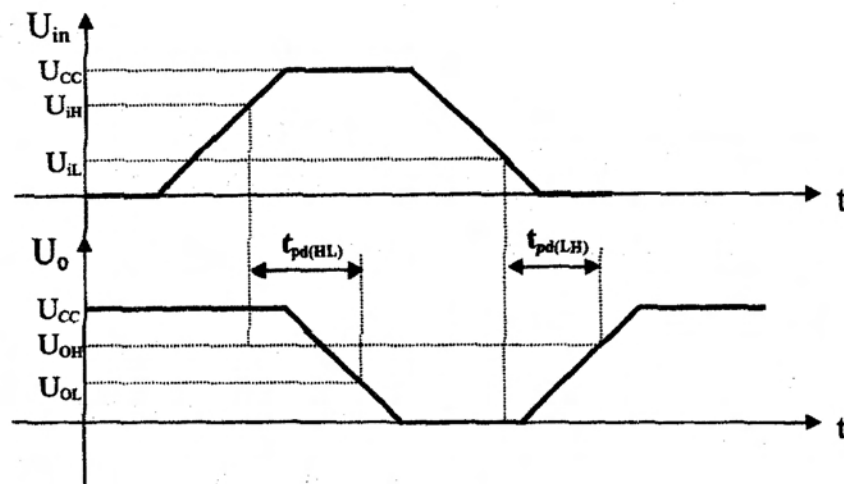
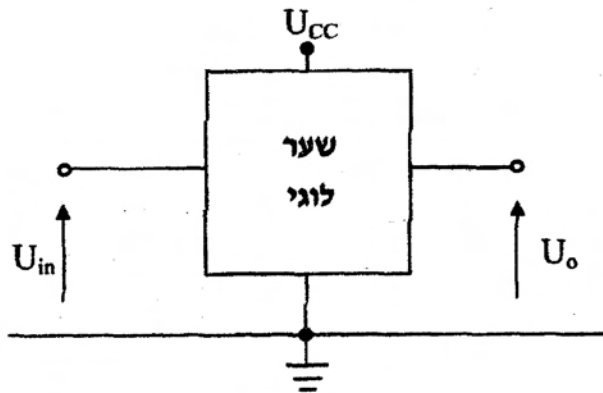
$0 \leq U_o \leq U_{OL}$  : תחום המתחים במוצא השער במצב LOW

$U_{IH} \leq U_i \leq U_{CC}$  : תחום המתחים במבוא השער המזוהה כמצב HIGH

$0 \leq U_i \leq U_{IL}$  : תחום המתחים במבוא השער המזוהה כמצב LOW

### זמן ההשהייה (Propagation Time Delay)

הזמן החולף בין שינוי הרמה הלוגית במבוא השער, ועד לשינוי הרמה הלוגית במוצאו. זמן ההשהייה מתקבל בעליה או בירידת מתח.



בחיבור שערים בשרשרת טורית, זמן ההשהייה יגדל משמעותית ויהיה תלוי במספר השערים שיחוברו.

זמן ההשהייה הכללי יהיה שווה לסכום זמני ההשהייה של כל השערים שבשרשרת.

$$t_{pd(Total)} = t_{pd(gate1)} + t_{pd(gate2)} + t_{pd(gate3)} + \dots + t_{pd(gateN)}$$

### מניפת מוצא (FAN OUT)

מספר הכניסות המכסימלי של שערים מאותה משפחה, שמותר לחבר כעומס למוצא של שער אחד, שיבטיחו שמירה על הרמות הלוגיות.

### עבור שערי TTL

$$\begin{cases} \text{F.O. (HIGH)} = \left[ \frac{I_{OH}}{I_{IH}} \text{ החלק השלם של } \right] \\ \text{F.O. (LOW)} = \left[ \frac{I_{OL}}{I_{IL}} \text{ החלק השלם של } \right] \end{cases}$$

### צריכת ההספק משער

$$\begin{cases} P_C = U_{CC} \cdot I_{CC(ave)} \\ I_{CC(ave)} = \frac{I_{CC(HIGH)} + I_{CC(LOW)}}{2} \end{cases}$$

$I_{CC(HIGH)}$  - צריכת זרם השער ממקור המתח ( $U_{CC}$ ), כאשר מוצא השער במצב HIGH.

$I_{CC(LOW)}$  - צריכת זרם השער ממקור המתח ( $U_{CC}$ ), כאשר מוצא השער במצב LOW.

חישוב הזרם הממוצע נכון בהנחה:  $\text{Duty Cycle} = 50\%$ .

במידה ולא, יש לחשב את הזרם הממוצע בצורה הבאה:

$$I_{CC(ave)} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{CC(t)} dt$$

צריכת ההספק של שער מסוג CMOS:

$$P_C = C_L \cdot U_{DD}^2 \cdot f$$

$C_L$  - העומס הקיבולי המחובר במוצא השער.

$f$  - תדר העבודה.

$U_{DD}$  - מקור המתח.

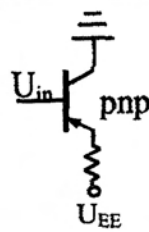
## שערים אופייניים:

### תגובת טרנזיסטורים בשערים לוגיים

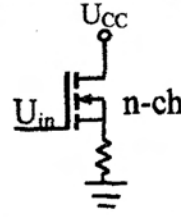
| $U_{in}$ | $U_{CE}$ |
|----------|----------|
| "0"      | נתק      |
| "1"      | קצר      |



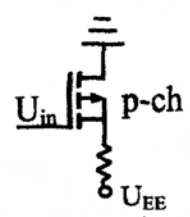
| $U_{in}$ | $U_{CE}$ |
|----------|----------|
| "0"      | קצר      |
| "1"      | נתק      |



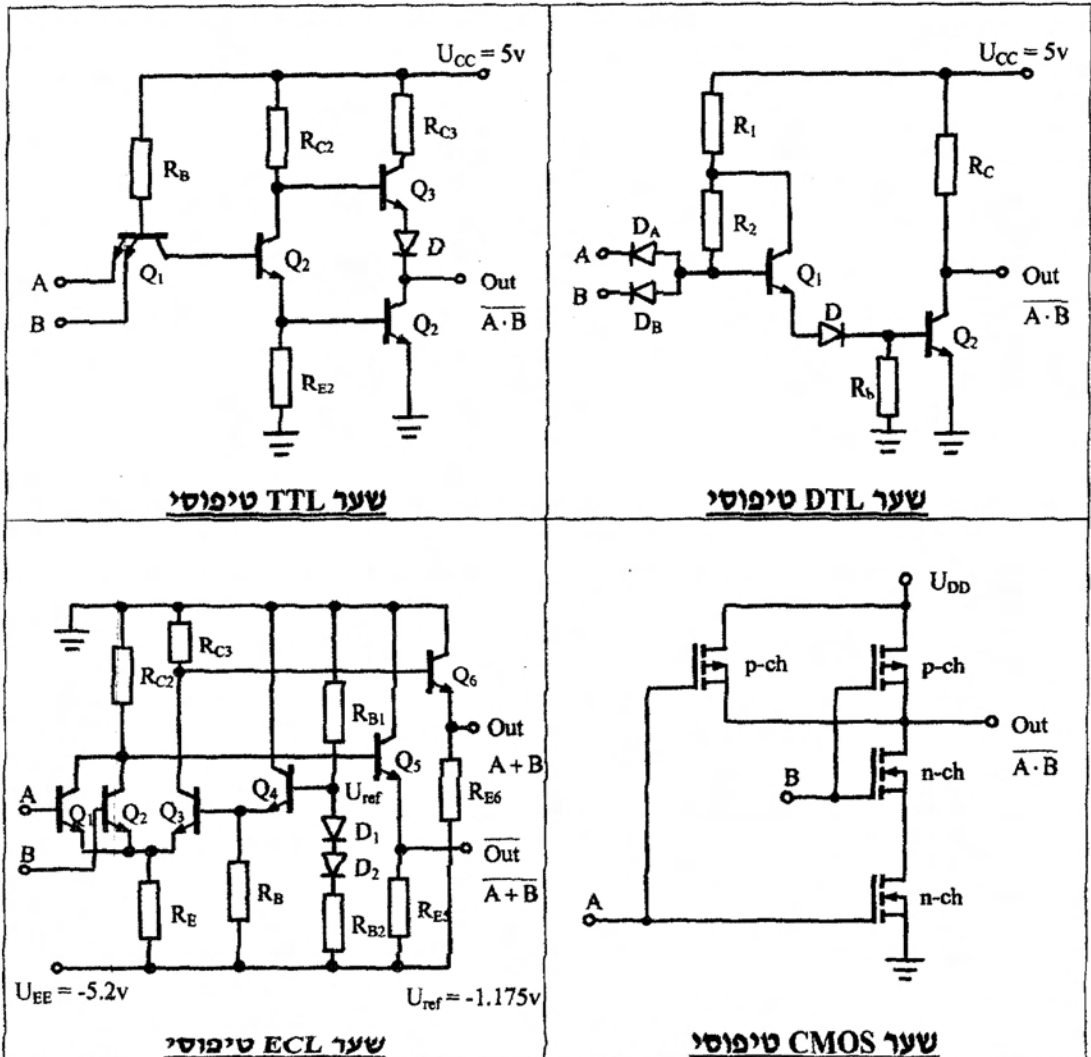
| $U_{in}$ | $U_{DS}$ |
|----------|----------|
| "0"      | נתק      |
| "1"      | קצר      |



| $U_{in}$ | $U_{DS}$ |
|----------|----------|
| "0"      | קצר      |
| "1"      | נתק      |



### טבלת שערים ממשפחות שונות



### סימון משפחות לוגיות

|      |                                                 |      |
|------|-------------------------------------------------|------|
| RTL  | - Resistor Transistor Logic                     | 1960 |
| DTL  | - Diode Transistor Logic                        | 1961 |
| HTL  | - High Threshold Logic                          | 1962 |
| TTL  | - Transistor Transistor Logic                   | 1964 |
| CMOS | - Complementary Metal Oxide Semiconductor Logic | 1975 |
| ECL  | - Emitter Coupled Logic (Current Mode Logic)    | 1975 |

### TTL משפחת

|     |                                     |      |
|-----|-------------------------------------|------|
| TTL | - Transistor Transistor Logic       | 1964 |
| LP  | - Low Power TTL                     |      |
| HS  | - High Speed TTL                    |      |
| S   | - Schottky Logic                    | 1972 |
| LS  | - Low Power Schottky Logic          | 1972 |
| AS  | - Advanced Schottky Logic           | 1981 |
| ALS | - Advanced Low Power Schottky Logic | 1981 |
| F   | - Fast Schottky TTL                 | 1984 |

### CMOS משפחת

|       |                                                  |      |
|-------|--------------------------------------------------|------|
| CMOS  | - Standard CMOS                                  | 1975 |
| HC    | - High Speed CMOS Logic                          | 1983 |
| HCT   | - High Speed CMOS TTL Compatible Inputs          | 1983 |
| FCT   | - Fast CMOS TTL Logic                            | 1984 |
| AC    | - Advanced CMOS Logic                            | 1986 |
| ACT   | - Advanced CMOS TTL Logic                        | 1986 |
| LV    | - Low Voltage CMOS Technology Logic              | 1993 |
| LVC   | - Low Voltage CMOS Technology Logic              | 1993 |
| ALVC  | - Advanced Low Voltage CMOS Technology Logic     | 1994 |
| CBT   | - Crossbar Technology Logic                      | 1994 |
| AHC   | - Advanced High Speed CMOS Logic                 | 1996 |
| AHCT  | - Advanced High Speed CMOS TTL Compatible Inputs | 1996 |
| CBTLV | - Low Voltage Crossbar Technology Logic          | 1997 |
| TVC   | - Translation Voltage Clamp Logic                |      |
| AVC   | - Advanced Very Low Voltage CMOS Logic           | 1999 |

### BI-CMOS משפחת

|      |                                         |      |
|------|-----------------------------------------|------|
| BCT  | - BiCMOS Technology Logic               | 1987 |
| ABT  | - Advanced BiCMOS Technology Logic      | 1990 |
| LVT  | - Low Voltage Technology                | 1992 |
| ALB  | - Advanced Low Voltage BiCMOS Logic     | 1995 |
| ALVT | - Advanced Low Voltage Technology Logic | 1996 |

**השוואה בין משפחות לוגיות עיקריות**

| זמן<br>השהייה<br>$t_{pd}$ | תדר<br>עבודה     | חסינות<br>לרעש | פיזור<br>הספק<br>לשער | מתח ספק          | Fan<br>Out         | פעולה<br>בסיסית<br>של<br>המעגל | הרכב<br>המעגל            | פרמטרים<br>משפחות |
|---------------------------|------------------|----------------|-----------------------|------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------|
| 12ns                      | 8M               | בינונית        | 12mW                  | $3v \pm 10\%$    | 5                  | NOR                            | גדים<br>וטרנז'י          | RTL               |
| 30ns                      | 12-<br>30M<br>Hz | טובה           | 8mW<br>or<br>12mW     | $5v \pm 10\%$    | 8                  | NAND                           | דיודות<br>וטרנז'י        | DTL               |
| 150ns                     | 4M               | מצוינת         | 55mW                  | $15 \pm 1v$      | 10                 | NAND                           | דיודות<br>זנר<br>וטרנז'י | HTL               |
| 70ns                      | 5M               | טובה<br>מאוד   |                       | $3 \pm 18v$      | 50<br>ויותר        | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | CMOS              |
| 20ns                      | 6M               | טובה<br>מאוד   | $5\mu W$              | 5v               | 50<br>ויותר        | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | HC                |
| 20ns                      | 30M              | טובה<br>מאוד   | $5\mu W$              | 5v               | 50<br>ויותר        | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | HCT               |
|                           |                  | טובה<br>מאוד   |                       | 5v               | 50<br>ויותר        | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | FCT               |
| 10ns                      | 100M             | טובה<br>מאוד   |                       | 3.3-5v           | 50<br>ויותר        | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | AC                |
| 7.5ns                     | 67M              | טובה<br>מאוד   |                       | 5v               | 50<br>ויותר        | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | ACT               |
| 15ns                      |                  |                |                       | 2.5-5v           |                    | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | LV                |
| 3.3ns -<br>8.5ns          |                  |                |                       | 1.8-3.3v         |                    | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | LVC               |
| 3ns                       | 67M              |                |                       | 1.8-3.3v         |                    | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | ALVC              |
| 6.5ns -<br>10ns           |                  |                |                       | 3.3-5v           |                    | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | AHC               |
| 5ns                       |                  |                |                       | 5v               |                    | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | AHCT              |
| 1ns                       |                  |                |                       | 2.5-3.3v         |                    | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | CBTLV             |
| 1.7ns -<br>3.2ns          |                  |                |                       | 1.8-3.3v         |                    | NOR<br>NAND                    | טרנז'י<br>MOS            | AVC               |
| 1ns                       | 400M             | בינונית        | 60mW                  | $-5.2v \pm 10\%$ | 10<br>כניסה<br>50Ω | OR<br>NOR                      | טרנז'י<br>בצימוד<br>פולט | ECL (1ns)         |
| 2ns                       | 125M             | בינונית        | 25mW                  | $-5.2v \pm 10\%$ | 25<br>כניסה<br>50Ω | OR<br>NOR                      | טרנז'י<br>בצימוד<br>פולט | ECL (2ns)         |
| 4ns                       | 70M              | בינונית        | 22mW                  | $-5.2v \pm 10\%$ | 25                 | OR<br>NOR                      | טרנז'י<br>בצימוד<br>פולט | ECL (4ns)         |

### השוואה בין משפחות לוגיות עיקריות

| זמן<br>השהייה<br>$t_{pd}$ | תדר<br>עבודה | חסיונות<br>לרעש | פיזור<br>הספק<br>לשער | מתח ספק  | Fan<br>Out | פעולה<br>בסיסית<br>של<br>המעגל | הרכב<br>המעגל  | פרמטרים<br>משפחות |
|---------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|----------|------------|--------------------------------|----------------|-------------------|
| 10ns                      | 35M          | טובה<br>מאוד    | 12mW                  | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | Standard<br>TTL   |
| 9.5ns                     | 3M           | טובה<br>מאוד    | 1mW                   | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | LP-TTL            |
| 6ns                       | 50M          | טובה<br>מאוד    | 22mW                  | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | HS-TTL            |
| 3ns                       | 125M         | טובה            | 19mW                  | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | S-TTL             |
| 33ns                      | 45M          | טובה            | 2mW                   | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | LS-TTL            |
|                           |              | טובה<br>מאוד    |                       | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | AS-TTL            |
|                           |              | טובה<br>מאוד    |                       | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | ALS-TTL           |
| 3.7ns                     | 125M         | טובה<br>מאוד    | 5.5mW                 | 5v±10%   | 10         | NAND                           | טרנזי<br>טרנזי | F-TTL             |
| 6ns                       |              |                 |                       | 5v       |            |                                | טרנזי<br>mos   | BCT               |
| 4.5ns                     | 67M          |                 |                       | 5v       |            |                                | טרנזי<br>mos   | ABT               |
| 4.5ns                     |              |                 |                       | 3.3v     |            |                                | טרנזי<br>mos   | LVT               |
| 3.5ns                     |              |                 |                       | 3.3v     |            |                                | טרנזי<br>mos   | ALB               |
| 3ns                       |              |                 |                       | 2.5-3.3v |            |                                | טרנזי<br>mos   | ALVT              |
|                           |              |                 |                       |          |            |                                |                |                   |

## 22. נוסחאות במעגל ובמתמטיקה

קבל:



$$I_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = C \cdot U'_C$$

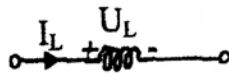
מתח הקבל

$$U_{C(t)} = U_{C(0)} + \frac{1}{C} \int_0^t I_{C(t)} \cdot dt$$

שינוי המתח על פני הקבל בהזרמת זרם קבוע דרכו

$$\Delta U_C = \frac{I}{C} \cdot \Delta t$$

סליל



$$U_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} = L \cdot I'_L$$

זרם הסליל

$$I_{L(t)} = I_{L(0)} + \frac{1}{L} \int_0^t U_{L(t)} \cdot dt$$

שינוי הזרם דרך הסליל בהפעלת מתח קבוע עליו

$$\Delta I_L = \frac{U_L}{L} \cdot \Delta t$$



### שימוש בלוגריתמים

$$\log_A C = B$$

הגדרה: אם  $A^B = C$  אזי

$$\log(AB) = \log A + \log B$$

$$\log \frac{A}{B} = \log A - \log B$$

$$\log A^B = B \log A$$

$$\log_A B = \frac{\log_c B}{\log_c A}$$

### נוסחאות כפל מקוצר

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$

$$(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

$$(a \pm b)^4 = a^4 \pm 4a^3b + 6a^2b^2 \pm 4ab^3 + b^4$$