



נוסחאון במקצוע

מכטרוניקה

הנדסאים - הנדסת מכונות – מכטרוניקה

סמל הבחינה – 97003

מהדורה מספר 2.0

10.07.2023

מה"ט - המכון הממשלתי להכשרה בטכנולוגיה ובמדע|labor.gov.il|
דרך מנחם בגין 86 תל אביב ת.ד. 36049 מיקוד 67138|טל' 037347400.

תוכן העניינים

פרק א' – תורת הבקרה

מ"ס	נושא	עמוד
1.	מבנה כללי של דיאגרמת מלבנים בחוג סגור	8
2.	התמרות לפלס	9
3.	פונקציית תמסורת	14
4.	מודלים מתמטיים של מערכות דינאמיות	16
5.	מערכת בקרה מסדר ראשון	18
6.	מערכת בקרה מסדר שני	19
7.	יציבות של מערכות בקרה	22
8.	שגיאות במערכת הבקרה	26
9.	בקרים תעשייתיים	29
10.	נספחים	32

טבלאות

נושא	עמוד
טבלת מספר 1 - טבלת התמרות לפלס	11
טבלת מספר 2 - קשרים מתמטיים של רכיבים חשמליים	16
טבלת מספר 3 - קשרים מתמטיים של רכיבים מכאניים	17
טבלת מספר 4 - תגובת מערכת בקרה מסדר ראשון	18
טבלת מספר 5 - מערכות בקרה מסדר שני המושפעות ממקדם הריסון ξ	19
טבלת מספר 6 - פרמטרים של מערכת בקרה מסדר שני לאות מדרגת יחידה	21
טבלת מספר 7 - טבלת חישוב השגיאה לפי סוג המערכת	27
טבלה מספר 8 - משוואות בקרי P,I,D במישור הזמן	29
טבלה מספר 9 - משוואות בקרי P,I,D במישור לפלס	29
טבלה מספר 10 - משוואות בקרי PID,PD,PI במישור הזמן	30
טבלה מספר 11 - משוואות בקרי PID,PD,PI במישור לפלס	27
טבלה מספר 12 - תגובת הבקר לאות הכניסה	26

איורים

נושא	עמוד
איור מספר 1 - תרשים מלבנים של מערכת בקרה כללית עם משוב	8
איור מספר 2 - תגובת מערכת מסדר ראשון לכניסות שונות	18
איור מספר 3 -תגובת מערכת מסדר שני בתת ריסון עבור אות מדרגה	20

פרק ב' – רכיבים ומתמרים

מ"ס	נושא	עמוד
1.	הגדרות של מדידות והתמרות	36
2.	מתמרים	38
3.	מדידת כוח, משקל, תאוצה ומיקום	43
4.	מדידות טמפרטורה	46
5.	מקודדים אופטיים	48
6.	חיישני קירבה	49
7.	מדידות פיזיקליות	52
8.	חיבור למערכת בקרה ספרתית	56
9.	מפעילים	59

טבלאות

נושא	עמוד
טבלת מספר 1 - הגדרות של מושגים פיזיקליים	36
טבלת מספר 2 - אותות תקניים תקביליים במערכות מדידה	37
טבלת מספר 3 - המרה של יחידות כוח/משקל	43
טבלת מספר 4 - המרה של יחידות טמפרטורה	46
טבלת מספר 5 - סימוני צמדים תרמיים ותחומי טמפרטורות	47
טבלת מספר 6 - מקדמים דיאלקטרים של חומרים שונים	49
טבלת מספר 7 - המרה של יחידות לחץ	52

איורים

נושא	עמוד
איור מספר 1 - צורות שונות של נגדים משתנים	38
איור מספר 2 - מבנה של מתמר קיבולי	39
איור מספר 3 - מבנה של מתמר השראתי	39
איור מספר 4 - תמונה של *LDR*	40
איור מספר 5 - מגבר מהפך	41
איור מספר 6 - מגבר לא מהפך	41
איור מספר 7 - מגבר משווה	41
איור מספר 7א' - מגבר הפרש	42
איור מספר 7ב' - מגבר מסכם שלילי	42
איור מספר 7ג' - מגבר יחידה	42
איור מספר 8 - עיקרון מדידה והתמרת כוח ע"י מתמר תזוזה	43
איור מספר 9 - מדידה כוח / משקל ע"י מד לחץ	43
איור מספר 10 - גשר ויטסטון	43
איור מספר 11 - שנאי	46
איור מספר 12 - צורות חיבור שונות לצמדים תרמיים	47
איור מספר 13 - מקודד אופטי הפרשי	48
איור מספר 14 - מקודד אופטי אבסולוטי	48
איור מספר 15 - מבנה חיישן קירבה השראתי	50
איור מספר 16 - חיישן קירבה אינפרה אדום	50
איור מספר 17 - חיישן קירבה אולטרה סוני	51
איור מספר 18 - מנומטר	52
איור מספר 19 - לחץ הפרשי בשפופרת **U**	52
איור מספר 20 - ספיקה בצינור בעל הצרה קבועה	55
איור מספר 21 - צינור פיטו למדידת מהירות גז או אוויר	55
איור מספר 22 - סכמה מלבנית של מערכת בקרה מבוקרת מחשב	56
איור מספר 23 - מבנה של מתמר *A/D* הפועל בשיטת *Approximation Successive*	56
איור מספר 24 - מבנה של מתמר *D/A*	57
איור מספר 25 – זמני אות ספרתי	59
איור מספר 26 - בקרה על פעולת מנוע *DC* בעזרת גשר *H*	59

פרק ג' -בקרים מתוכנתים

מ״ס	נושא	עמוד
1.	מושגים בסיסיים בבקרים מתוכנתים וממשק אדם מכונה	61
2.	מושגי יסוד בוליאניים	61
3.	יחידות מידע בסיסיות וגדלים של זיכרון	66
4.	סוגי נתונים בשימוש בבקרים (*Data Types*)	66
5.	מבנה עקרוני של בקר מתוכנת	68
6.	אופן פעולה של בקר	69
7.	חישוב זמן סריקה של הבקר	69
8.	כרטיסי כניסה ויציאה ספרתיים (דיגיטליים)	70
9.	כרטיסי כניסה ויציאה תקבילים (אנלוגיים)	73
10.	שפות תכנות בבקר	76
11.	פונקציות תכנה נפוצות בדיאגרמת סולם	76
12.	אופן הקריאה (סריקה) של דיאגרמת הסולם	82
12.	דוגמאות לתכניות בסיסיות בדיאגרמת סולם	83

איורים

נושא	עמוד
איור מספר 1 - הספרות בבסיסי הספירה הנפוצים	61
איור מספר 2 - מפתח המרה בין בסיס 16 ובסיס 10	61
איור מספר 3 - השוואה של מספרים בין הבסיסים	62
איור מספר 4 - המרות מקוצרות בין בסיסים שימושיים	63
איור מספר 5 - פעולות בוליאניות וסימוני שערים לוגיים	64
איור מספר 6 - הסימנים העיקריים בדיאגרמת סולם	65
איור מספר 7 - תרגום פעולות בוליאניות לדיאגרמת סולם	65
איור מספר 8 - מבנה של נתון מסוג *INT*	66
איור מספר 9 - מבנה של נתון מסוג *Real/ Floating Point*	67
איור מספר 10 - סוגי הנתונים בהם משתמשים בבקרים	67
איור מספר 11 - תרשים מלבני של בקר מתוכנת	68
איור מספר 12 - מחזור הסריקה של הבקר	69
איור מספר 13 - מבנה מלבני של כרטיס כניסה לבקר	70
איור מספר 14 - צורות החיבור של מקור המתח לכרטיס הכניסה בבקר	70
איור מספר 15 - תיאור החיבורים של חיישן קירבה עם 3 חוטים	71
איור מספר 16 - מעגל מיתוג טיפוסי של חיישן קירבה עם 3 חוטים	71
איור מספר 17 - מבנה מלבני של כרטיס יציאה בבקר	72

איור מספר 18 - צורות החיבור של צרכן אל כרטיס היציאה בבקר 72
איור מספר 19 - צורת חיבור צרכן לכרטיס יציאה מסוג ממסר 73
איור מספר 20 - אותות תקניים במערכות בקרה 73
איור מספר 21 - כרטיס כניסה אנלוגי 74
איור מספר 22 – חיבור מתמרי זרם שונים לכרטיס כניסה אנלוגי 74
איור מספר 23 - כרטיס יציאה אנלוגי 75
איור מספר 24 - שלב עקרוני בדיאגרמת סולם בבקר 76
איור מספר 25 - סימוני מגעים מסוג $N.O$ ו- $N.C$ 77
איור מספר 26 - סימון סליל (הפעלה) 77
איור מספר 27 - סימון פקודות נעילה L ו- U 77
איור מספר 28 - סימון פקודות נעילה S ו- R 78
איור מספר 29 - סימון פקודות של קוצבי זמן 78
איור מספר 30 - סימון פקודות של מונים 79
איור מספר 31 - פקודות השוואה בין מספרים 80
איור מספר 32 - פקודות חישוב בין שני מספרים 80
איור מספר 33 - פקודת העברה של נתון בין שני משתנים 81
איור מספר 34 - סדר הקריאה של השלבים בדיאגרמת סולם 82
איור מספר 35 - סדר הקריאה בתוך שלב בדיאגרמת סולם 82
איור מספר 36 - מעגל החזקה עצמית 83
איור מספר 37 - פעולות נעילה 83
איור מספר 38 - טיימר מסוג *on delay* 83
איור מספר 39 - מונה מסוג *up cunter* 84
איור מספר 40 - פקודות השוואה משולבות עם טיימר 84
איור מספר 41 - שילוב בין פקודות טיימר ומונה 85

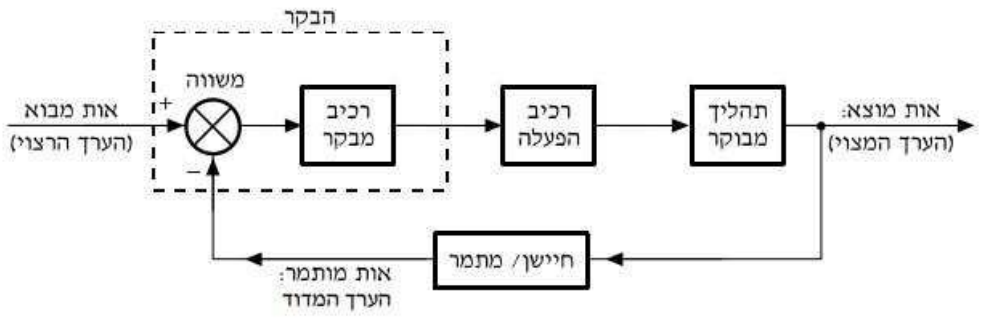
פרק א'

מערכות בקרה

1. מבנה כללי של מערכת בקרה בחוג סגור

1.1 תאור ע"י דיאגרמת מלבנים

במערכת בקרה בחוג סגור מתבצעת השוואה בין האות הרצוי והאות המצוי. האות המצוי מותמר על-ידי חיישן או על-ידי מתמר, לגודל פיסיקלי הזהה בממדיו לאות הרצוי (למשל, מתח חשמלי).
הבקר מקבל במבוא את המידע על שגיאת המערכת (הפרש בין ערך רצוי לערך מצוי) ו"שולח" אות תיקון לרכיב בקרה סופי הגורם לשינוי בערכו של המשתנה המבוקר.
דיאגרמת המלבנים ממחישה את אופן זרימת המידע במערכת.



איור 1 – תרשים מלבנים של מערכת בקרה כללית עם משוב

אותות:

<u>אות המבוא</u> – נקרא גם הערך הרצוי או אות הייחוס. זהו הערך אליו שואפים להגיע בתהליך הבקרה.
סימון - $Reference = R(s)$

<u>אות המוצא</u> - נקרא גם הערך המצוי או הערך המבוקר. זהו הגודל הפיסיקלי עליו שולטים במערכת הבקרה.
סימון - $controlled\ Value = C(s)$

רכיבים:

<u>משווה</u> - נקרא גם מסכם. זהו חלק אינטגרלי מיחידת הבקר שתפקידו לקבוע שגיאה במבוא הבקר.

<u>בקר</u>- נקרא גם וסת או בקר תהליך. זהו ה"מוח" במערכת הבקרה, הבקר מקבל מידע על אות השגיאה ו "שולח" אות תיקון לרכיב הבקרה הסופי.

דוגמא: מגבר שרת מסוג מגבר הפרש.

<u>רכיב הפעלה</u> - נקרא גם רכיב בקרה סופי.

זהו הרכיב שבפועל מבצע את השינוי בערכו של המשתנה המבוקר.

<u>תהליך מבוקר</u> - הרכיב במערכת שמכיל את המשתנה המבוקר.

<u>חיישן/מתמר</u> - "העיניים" של מערכת הבקרה.

תפקידו מדידת ערכו של המשתנה המבוקר והתמרת הגודל הפיסיקלי לאות חשמלי המוזן למבוא הבקר. החיישן נמצא בחוג התחתון של הדיאגרמה הנקרא גם חוג המדידה או חוג המשוב (feedback)

2. התמרות לפלס

2.1 הגדרה של התמרת לפלס

התמרה לפלס היא כלי מתמטי שהשימוש בו מקל על פתרון משוואות דיפרנציאליות ואינטגרליות ע"י הפיכתן למשוואות אלגבריות.

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t)dt$$

התמרת לפלס פועלת על פונקצית מקור $f(t)$ המוגדרת בקטע $[0,\infty)$ ומייצרת פונקציה חדשה $F(s)$ שהמשתנה שלה מסומן ב s.

המרת נגזרת של פונקציה :

$$L[D^n f(t)] = s^n F(s) - s^{n-1} f(0) - s^{n-2} Df(0) - \cdots - D^{n-1} f(0)$$

המרת אינטגרל של פונקציה

$$L\left[\int_0^t f(\tau)d\tau\right] = \frac{1}{S}F(s) + \frac{1}{S}F(0)$$

כאשר $F(0)$ הוא ערך האינטגרל בזמן $t = 0$.

תכונות כלליות:

הגדרות ההתמרה	
זמן	$f(t)$
לפלס	$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^\infty f(t)e^{-s\cdot t}dt$
לינאריות וסופרפוזיציה	
זמן	$a_t f_t(t) + \ldots + a_n f_n(t)$
לפלס	$a_1 F_1(s) + \ldots + a_n F_n(s)$
התמרת הנגזרת (סדר ראשון)	
זמן	$\frac{df}{dt} = f'(t)$
לפלס	$sF(s) - f(0)$
התמרת הנגזרת (סדר שני)	
זמן	$\frac{d^2f}{dt^2} = f''(t)$
לפלס	$s^2F(s) - sf(0) - f'(0)$

משפט הערך הסופי:

$$\lim_{s\to 0} S\cdot F(s) = \lim_{t\to\infty} f(t)$$

משפט הערך ההתחלתי:

$$\lim_{s\to \infty} S\cdot F(s) = \lim_{t\to 0} f(t)$$

2.2 פירוק לשברים חלקיים

<u>הצגה כללית עבור מקרה א'</u>

$$\frac{P(S)}{(S-\alpha_1)^k} = \frac{A}{(S-\alpha_1)^k} + \frac{B}{(S-\alpha_1)^{k-1}} + \frac{C}{(S-\alpha_1)^{k-2}} + \cdots + \frac{D}{(S-\alpha_1)}$$

<u>הצגה כללית עבור מקרה ב'</u>

$$\frac{P(S)}{(S^2+\alpha_1 S+a_2)^k} = \frac{A\cdot S+B}{(S^2+\alpha_1 S+a_2)^k} + \frac{C\cdot S+D}{(S^2+\alpha_1 S+a_2)^{k-1}} + \cdots + \frac{G\cdot S+H}{(S^2+\alpha_1 S+a_2)}$$

<u>דוגמא למקרה – שורשים ממשיים ושונים</u>

$$F(S) = \frac{2s+1}{s(s+1)(s+4)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+1} + \frac{C}{s+4}$$

$$2s+1 = A(s+1)(s+4) + Bs(s+4) + Cs(s+1)$$

$$s=0 \Rightarrow 1 = A\cdot 4 \Rightarrow A = \frac{1}{4}$$

$$s=-1 \Rightarrow -1 = B\cdot(-1)\cdot 3 \Rightarrow B = \frac{1}{3}$$

$$s=-4 \Rightarrow -7 = C\cdot(-4)\cdot(-3) \Rightarrow C = -\frac{7}{12}$$

$$F(S) = \frac{1/4}{s} + \frac{1/3}{s+1} - \frac{7/12}{s+4} \Rightarrow\Rightarrow f(t) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3}e^{-t} - \frac{7}{12}e^{-4t}$$

<u>דוגמא למקרה – שורשים מרוכבים</u>

$$F(s) = \frac{5}{(s+1)(s^2+2S+5)} = \frac{A}{S+1} + \frac{BS+C}{S^2+2S+5}$$

$$5 = A(S^2+2S+5) + (BS+C)(S+1)$$

$$S=-1:\ 5=4A\Rightarrow A=\frac{5}{4}$$

$$S=0:\quad 5=5A+C\Rightarrow C=5-5A=\frac{-5}{4}$$

$$S=1:\quad 5=8A+(B+C)\cdot 2\Rightarrow B=\frac{5-8A-2C}{2}=\frac{-5}{4}$$

$$F(s)=\frac{5/4}{s+1}+\frac{-5/4\cdot S-5/4}{(s^2+2S+5)}=\frac{5}{4}\left(\frac{1}{s+1}-\frac{s+1}{(s+1)^2+2^2}\right)$$

$$f(t)=\frac{5}{4}\left(e^{-t}-e^{-t}cos(2t)\right)$$

2.3 טבלת התמרות לפלס עבור פונקציות אלמנטריות

שם הפונקציה	הפונקציה במישור הזמן	התמרת לפלס
יחידת הלם	$\delta(t)$	1
יחידת מדרגה	$u(t)$	$\frac{1}{S}$
יחידת מהירות	t	$\frac{1}{S^2}$
פולינום	t^n	$\frac{n!}{S^{n+1}}$
פונקציה מעריכית	e^{-at}	$\frac{1}{S+a}$
גל סינוסואידלי	$sin\ \omega t$	$\frac{\omega}{S^2+\omega^2}$
גל קוסינוס	$cos\ \omega t$	$\frac{S}{S^2+\omega^2}$
גל סינוס מרוסן	$e^{-at}sin\ \omega t$	$\frac{\omega}{(S+a)^2+\omega^2}$
גל קוסינוס מרוסן	$e^{-at}cos\ \omega t$	$\frac{S+a}{(S+a)^2+\omega^2}$

טבלה מס' 1 – טבלת התמרות לפלס

טבלת התמרות לפלס מורחבת

2.3.1

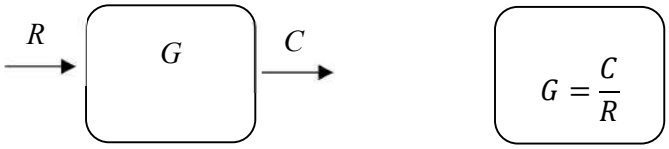
טבלת התמרות לפלס			
	F(s)	**f(t)**	$t \geq 0$
1.	1	$\delta(t)$	הלם של יחידה בזמן $t_0 = 0$
2.	$\frac{1}{s}$	1 or u(t)	מדרגת יחידה המתחילה בזמן $t_0 = 0$
3.	$\frac{1}{s^2}$	t	שיפוע של יחידה
4.	$\frac{1}{s^n} \cdot (n-1)!$	t^{n-1}	חיובי שלם = n
5.	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}	
6.	$\frac{1}{(s+a)^n} \cdot (n-1)!$	$t^{n-1}e^{-at}$	חיובי שלם = n
7.	$\frac{1}{s(s+a)}$	$\frac{1}{a}(1-e^{-at})$	

טבלת התמרות לפלס			
	F(s)	f(t)	$t \geq 0$
8.	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{ab}\left[1-\frac{b}{b-a}e^{-at}+\frac{a}{b-a}e^{-bt}\right]$	$a \neq b$
9.	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\sin(\omega t)$	
10.	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\cos(\omega t)$	
11.	$\frac{s+\alpha}{s^2+\omega^2}$	$\frac{\sqrt{\alpha^2+\omega^2}}{\omega}\sin(\omega t+\phi)$	$\phi=\tan^{-1}\frac{\omega}{\alpha}$
12.	$\frac{1}{s(s^2+\omega^2)}$	$\frac{1}{\omega^2}(1-\cos\omega t)$	
13.	$\frac{s+\alpha}{s(s^2+\omega^2)}$	$\frac{\alpha}{\omega^2}-\frac{\sqrt{\alpha^2+\omega^2}}{\omega^2}\cos(\omega t+\phi)$	$\phi=\tan^{-1}\frac{\omega}{\alpha}$
14.	$\frac{1}{(s+a)(s^2+\omega^2)}$	$\frac{e^{-at}}{a^2+\omega^2}+\frac{1}{\omega\sqrt{a^2+\omega^2}}\sin(\omega t+\phi)$	$\phi=\tan^{-1}\frac{\omega}{a}$
15.	$\frac{1}{(s+a)^2+b^2}$	$\frac{1}{b}e^{-at}\sin(bt)$	
16.	$\frac{1}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$	$\frac{1}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n t}\sin\left(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\,t\right)$	
17.	$\frac{s+a}{(s+a)^2+b^2}$	$e^{-at}\cos(bt)$	
18.	$\frac{s+\alpha}{(s+a)^2+b^2}$	$\frac{\sqrt{(\alpha-a)^2+b^2}}{b}e^{-at}\sin(bt+\phi)$	$\phi=\tan^{-1}\frac{b}{\alpha-a}$
19.	$\frac{1}{s\left[(s+a)^2+b^2\right]}$	$\frac{1}{a^2+b^2}+\frac{1}{b\sqrt{a^2+b^2}}e^{-at}\sin(bt-\phi)$	$\phi=\tan^{-1}\frac{b}{-a}$
20.	$\frac{1}{s(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)}$	$\frac{1}{\omega_n^2}-\frac{1}{\omega_n^2\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n t}\sin\left(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\,t+\phi\right)$	$\phi=\cos^{-1}\zeta$

3. פונקציית תמסורת *(TRANSFER FUNCTION)*

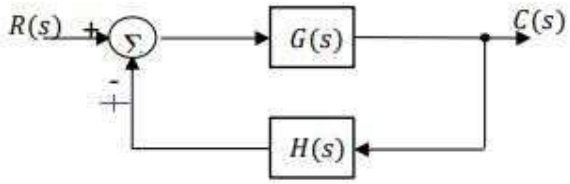
3.1 הגדרה

פונקציית תמסורת מוגדרת להיות היחס בין אות המוצא של המערכת לבין אות המבוא של המערכת.
לפונקציה זו חשיבות רבה מכיוון שהיא מספקת את כל המידע הנדרש עבור ביצועי המערכת של התהליך המבוקר.



3.2 אריתמטיקה של פונקציות התמסורת

3.2.1 פונקציית תמסורת של מערכת בקרה בחוג סגור עם משוב שלילי/חיובי

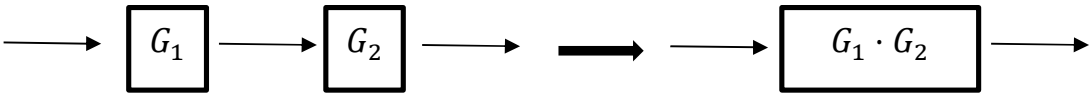


$$G_f(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 \mp H(s) \cdot G(s)}$$

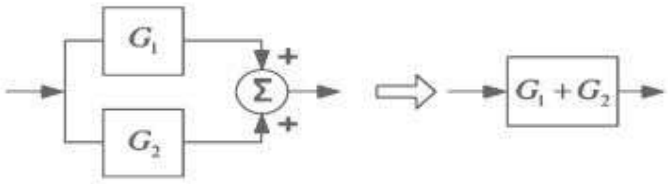
עבור משוב יחידה נציב בפונקציית התמסורת $H(s) = 1$

3.2.2 סוגי חיבורים מלבניים

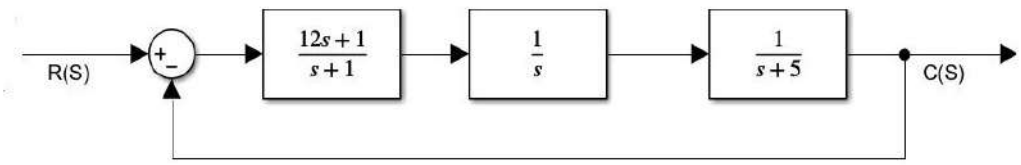
חיבור מלבנים בטור:



חיבור מלבנים במקביל:



דוגמא – חישוב פונקציית תמסורת בחוג סגור:



נשתמש בנוסחה המופיעה בסעיף 3.2.1 כאשר:

$$G(s) = \frac{12S+1}{s(s+1)(s+5)}\ , \qquad H(s) = 1$$

נציב ונכפיל מונה ומכנה במכנה משותף הגדול ביותר:

$$G_f(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{12S+1}{s(s+1)(s+5)} \quad /\cdot \text{מ"מ}}{1 + \frac{12S+1}{s(s+1)(s+5)} \cdot 1 \quad /\cdot \text{מ"מ}}$$

נקבל:

$$= \frac{12S+1}{s(s+1)(s+5)+12s+1}$$

נפתח סוגריים במכנה:

$$= \frac{12S+1}{s(s^2+6S+5)+12S+1}$$

פונקציית התמסורת כמנה בין 2 פולינומים:

$$\boxed{= \frac{12S+1}{s^3+6s^2+17S+1}}$$

4. מודלים מתמטיים של מערכות דינאמיות

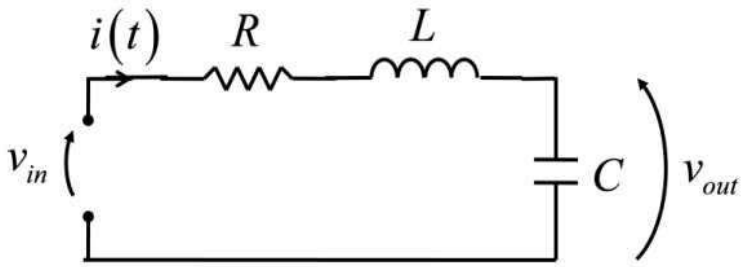
4.1 מעגלים חשמליים

קשרים במישור הזמן	קשרים במישור לפלס
זרם הקבל: $i_C(t) = C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt}$	עכבת נגד $Z_R(s) = R[\Omega]$
המתח בסליל: $V_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$	עכבת סליל $Z_L(s) = L \cdot S[\Omega]$
	עכבת קבל $Z_C = \frac{1}{CS}[\Omega]$

טבלה מס' 2 – קשרים מתמטיים של רכיבים חשמליים

דוגמא: חישוב תמסורת במעגל חשמלי טורי

ראשית יש להמיר את רכיבי המעגל לעכבות לפי הטבלה.



נסמן - $Z_2(S)$ עכבת הקבל

$Z_1(S)$ סכום העכבות של הנגד והסליל

לאחר מכן –

אם מתבקשים לחשב יחס תמסורת בין מתח המוצא למתח המבוא יש להשתמש בנוסחת מחלק המתח הטורי:

$$\frac{V_o(S)}{V_{in}(S)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1 + Z_2(s)}$$

אם מתבקשים לחשב יחס תמסורת בין <u>זרם כללי</u> למתח המבוא נעבוד לפי:

$$\frac{I(S)}{V_{in}(S)} = \frac{1}{Z_T(S)} = \frac{1}{Z_1(S) + Z_2(S)}$$

	כוח במישור הזמן	כוח במישור לפלס
קפיץ	$f_k(t) = k \cdot x(t)$	$F_k(s) = k \cdot X(s)$
מרסן	$f_B(t) = B \cdot \frac{dx(t)}{dt}$	$F_B(s) = B \cdot s \cdot X(s)$
מסה	$f_m(t) = M \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2}$	$F_M(s) = M \cdot s^2 \cdot X(s)$

טבלה מס' 3 – קשרים מתמטיים של רכיבים מכאניים

<u>דגשים בפתרון תרגילים של מערכות מכאניות</u>:

1) בחירת מערכת צירים – תמיד בכיוון תנועת המסה (ובכיוון הכוח החיצוני המופעל עליה).

2) סימון כוחות על גבי השרטוט.

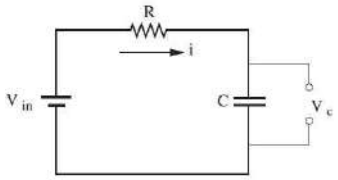
3) כתיבת חוק 2 של ניוטון: $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ ובניית המשוואה הדיפרנציאלית המתארת את התנועה.

4) ביצוע התמרת לפלס על המשוואה הדיפרנציאלית ובניית פונקציית התמסורת $G(s) = \frac{X(s)}{F(s)}$

5) אם נתבקש נביא את פונקציית התמסורת לצורה קנונית ונמצא את הפרמטרים האופייניים K_{ss}, ω_n, ξ

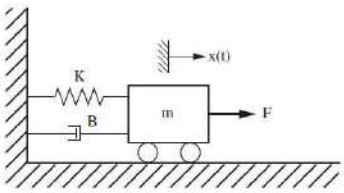
4.3 מודלים של מערכות שונות

נגד קבל



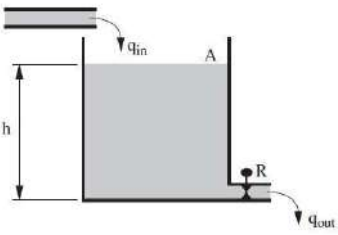
$$\frac{V_C(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{RCs+1}$$

קפיץ מרסן



$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + Bs + K}$$

מיכל מים

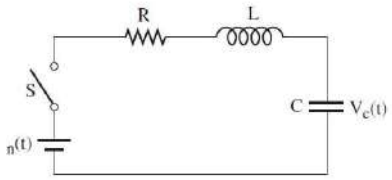


$$q_{out} = \frac{h}{R}$$

$$\frac{Q_{out}(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{1}{ARs+1} \qquad \frac{H(s)}{Q_{in}(s)} = \frac{R}{ARs+1}$$

במצב מתמיד $q_{in} = q_{out}$

נגד קבל סליל



$$\frac{V_c(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

5. מערכת בקרה מסדר ראשון

5.1 משוואה דיפרנציאלית במישור הזמן

$$a \cdot \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t)$$

5.2 פונקציית תמסורת במישור לפלס

צורה קנונית: $G(s) = \frac{k}{\tau \cdot s + 1}$

k – הגבר סטטי, τ – קבוע זמן בודד

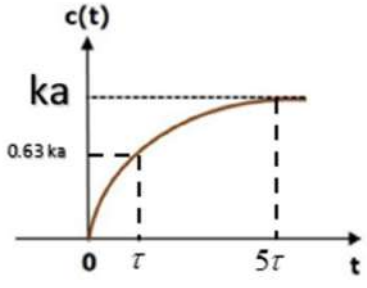
5.3 תגובת מערכת בקרה מסדר ראשון

	תגובת מערכת מסדר ראשון **במישור לפלס**	תגובת מערכת מסדר ראשון **במישור הזמן**
אות המבוא: מדרגה בגובה a	$C(s) = \frac{a}{s} \cdot \frac{k}{\tau \cdot s + 1}$	$c(t) = a \cdot k \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right]$
אות המבוא: הלם בגובה יחידה	$C(s) = \frac{k}{\tau \cdot s + 1}$	$c(t) = \frac{k}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$

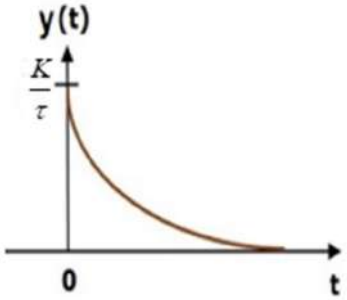
טבלה מס' 4 - תגובת מערכת בקרה מסדר ראשון

a – גובה המדרגה, c – אות המוצא, k – הגבר סטטי, τ - קבוע הזמן

שרטוטים:



תגובת מערכת מסדר ראשון **<u>לכניסת מדרגה</u>** בגובה a



תגובת מערכת מסדר ראשון **<u>לכניסת הלם</u>**

איור 2 – תגובת מערכת מסדר ראשון לכניסות שונות

6. מערכת בקרה מסדר שני

6.1 משוואה דיפרנציאלית במישור הזמן

$$\frac{d^2c(t)}{dt^2} + a \cdot \frac{dc(t)}{dt} + b \cdot c(t) = r(t)$$

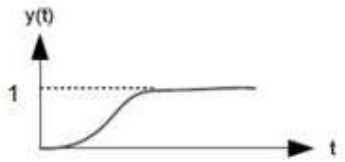
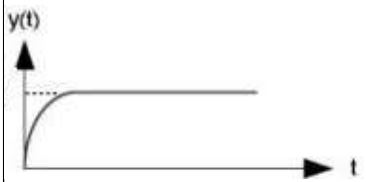
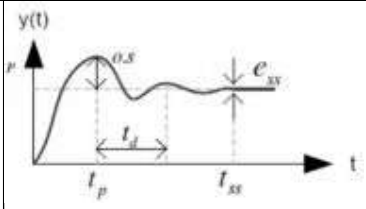
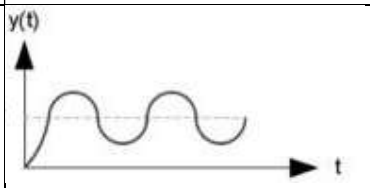
6.2 פונקציית תמסורת במישור לפלס

צורה קנונית:

$$G(s) = \frac{k \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$

$\omega_n \left[\frac{rad}{sec}\right]$ – תדירות טבעית, k – הגבר סטטי , ξ – מקדם הריסון

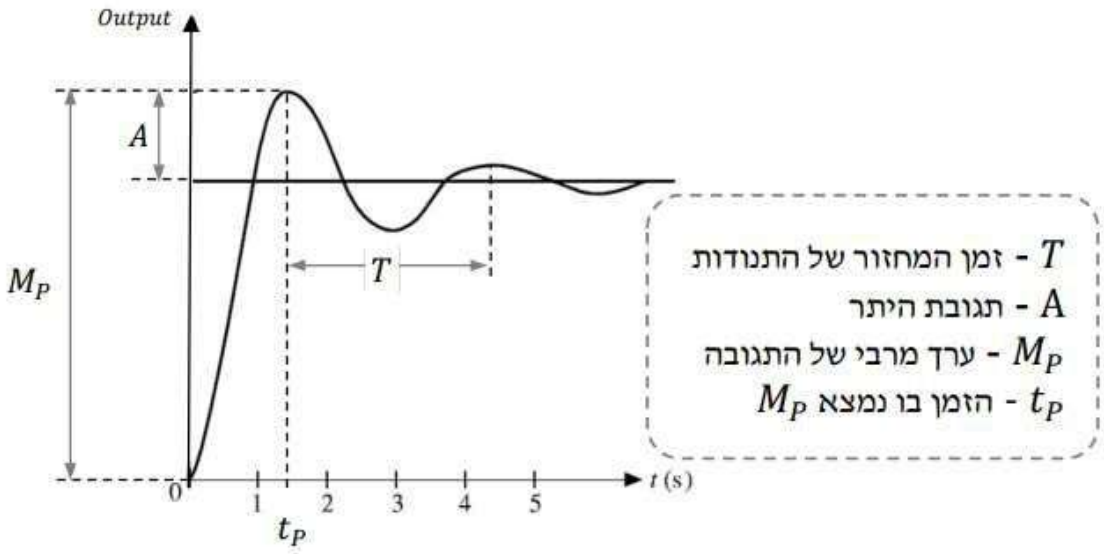
6.3 מערכות בקרה מסדר II המושפעות ממקדם הריסון ξ:

מספר מקרה	ערך מקדם הריסון	סוג הריסון	תגובת המערכת למדרגת יחידה	יציבות המערכת
1	$\xi > 1$	עודף ריסון *Overdamping*		מערכת יציבה. אות מעריכי דועך מיקום קטבים: על ציר ממשי שלילי
2	$\xi = 1$	ריסון קריטי		מערכת יציבה. אות מעריכי דועך מערכת **בגבול התנודות**. מיקום קטבים: על ציר ממשי שלילי באותה נקודה.
3	$0 < \xi < 1$	ריסון תת קריטי *Underdamping*		מערכת יציבה. מערכת בעלת תנודות מתרסנות מיקום קטבים: מרוכבים צמודים עם חלק ממשי שלילי
4	$\xi = 0$	תנודות בלתי מתרסנות		מערכת **בגבול היציבות.** מערכת בעלת תנודות באמפליטודה קבועה מיקום קטבים: מרוכבים צמודים עם חלק ממשי אפס

טבלה מס' 5 – מערכות בקרה מסדר II המושפעות ממקדם הריסון ξ

6.4 ניתוח תגובת מערכת בקרה מסדר שני **בתת ריסון** (ריסון תת קריטי) עבור כניסת אות מדרגת יחידה

6.4.1 איור תגובת מערכת מסדר שני בתת ריסון לכניסת אות מדרגה



איור 3 - תגובת מערכת מסדר שני בתת ריסון לכניסת אות מדרגה

6.4.2 הפרמטרים של מערכת בקרה מסדר שני כתגובה לאות מדרגת יחידה:

מספר	הפרמטר	המשוואה
1	תגובת היתר - *Overshoot*	$0.S = A = e^{-\frac{\pi\cdot\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$ מציאת יחס ריסון בהינתן תגובת היתר $\zeta = \sqrt{\frac{\left[\ln(O.S)\right]^2}{\left[\ln(O.S)\right]^2+\pi^2}}$
2	הערך המירבי של תגובת היתר מתקבל בזמן t_p	$M_P = 1 + e^{-\frac{\pi\cdot\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$
3	היחס בין שתי תנודות סמוכות *Decay Ratio*	$Deccay\ Ratio\ = e^{-\frac{2\cdot\pi\cdot\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$
4	התדירות הזוויתית של התנודה המרוסנת - ω_d	$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}$
5	זמן הגעה לערך מקסימלי - t_p *Peak Time*	$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}} = \frac{\pi}{\omega_d}$
6	זמן המחזור T	$T = \frac{2\cdot\pi}{\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}} = 2 \cdot t_p$
7	הקשר בין אחוז השגיאה $K-$ לבין זמן ההתייצבות - t_s	$\left\lvert\frac{e^{-\xi\cdot\omega_n\cdot t_s}}{\sqrt{1-\xi^2}}\right\rvert \leq \frac{k\%}{100}$
8	קבוע זמן של מערכת מסדר שני	$\tau = \frac{1}{\xi\cdot\omega_n}$
	ω_n – תדירות טבעית, k – הגבר סטטי, ξ - מקדם הריסון	

טבלה מס׳ 6 – פרמטרים של מערכת בקרה מסדר שני לאות מדרגת יחידה

חישוב הערך המרבי של התגובה כאשר ההגבר הסטטי $k \neq 1$ ומדרגת המבוא $a \neq 1$:

$$M_P = a \cdot k \cdot (1 + 0.S)$$

כאשר:

a = מדרגת המבוא K = הגבר סטטי $0.S$ = תגובת היתר (נוסחה מס׳ 1 בטבלה)

7. יציבות מערכות בקרה

7.1 הגדרות ליציבות מערכות בקרה:

א. אם תגובת המערכת לאות הלם יחידה שואפת לאפס במצב המתמיד.

ב. קריטריון ***BIBO –Bounded Input Bounded Output*** : אם כניסת אות מוגבל למערכת גורם לאות מוצא מוגבל של המערכת.

ג. מערכת בקרה בחוג סגור תהיה יציבה אם שורשי המשוואה האופיינית (קטבי המערכת) נמצאים בחצי המישור השמאלי של המישור המרוכב S.

7.2 קריטריון ראוט-הורוביץ, ***RH-Routh Hurwitz***, ליציבות מערכת בקרה, עבור פולינום של המשוואה האופיינית של מערכת בקרה.

$$Q(s) = a_m \cdot S^m + a_{m-1} \cdot S^{m-1} + \cdots + a_1 \cdot S^1 + a_0 \cdot S^0$$

א. על פי קריטריון היציבות של ראוט-הורוביץ:

המערכת יציבה אם לכל האברים בעמודה הראשונה של הטבלה ***RH*** יש אותו סימן.

S^m	a_m	a_{m-2}	a_{m-4}	a_{m-6}
S^{m-1}	a_{m-1}	a_{m-3}	a_{m-5}	a_{m-7}
S^{m-2}	b_1	b_2	b_3	b_4
S^{m-3}	c_1	c_2	c_3	c_4
S^{m-4}	d_1	d_2	d_3	d_4
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
S^0	z_1			

ב. הגדרת המקדמים b_i

$$b_1 = \frac{a_{m-1} \cdot a_{m-2} - a_m \cdot a_{m-3}}{a_{m-1}} \qquad b_2 = \frac{a_{m-1} \cdot a_{m-4} - a_m \cdot a_{m-5}}{a_{m-1}}$$

$$b_3 = \frac{a_{m-1} \cdot a_{m-6} - a_m \cdot a_{m-7}}{a_{m-1}} \qquad b_4 = \frac{a_{m-1} \cdot a_{m-8} - a_m \cdot a_{m-9}}{a_{m-1}}$$

ג. הגדרת המקדמים c_i

$$c_1 = \frac{b_1 \cdot a_{m-3} - b_2 \cdot a_{m-1}}{b_1} \qquad c_2 = \frac{b_1 \cdot a_{m-5} - b_3 \cdot a_{m-1}}{b_1}$$

$$c_3 = \frac{b_1 \cdot a_{m-7} - b_4 \cdot a_{m-1}}{b_1} \qquad c_4 = \frac{b_1 \cdot a_{m-9} - b_5 \cdot a_{m-1}}{b_1}$$

ד. הגדרת המקדמים d_i

$$d_2 = \frac{c_1 \cdot b_3 - c_2 \cdot b_1}{c_1} \qquad d_1 = \frac{c_1 \cdot b_2 - c_2 \cdot b_1}{c_1}$$

$$d_1 = \frac{c_1 \cdot b_5 - c_5 \cdot b_1}{c_1} \qquad d_3 = \frac{c_1 \cdot b_4 - c_4 \cdot b_1}{c_1}$$

<u>טבלאות מקוצרות לקריטריון ראוט – לפי סדר מערכת</u>

פולינום המכנה : $Q(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + ... + a_1 s^1 + a_0 s^0$

תנאים הכרחיים לבדיקה :

1) כל המקדמים בעלי אותו סימן (כולם חיוביים או כולם שליליים)
2) כל המקדמים קיימים

אם אחד מהתנאים המקדימים (או שניהם) לא מתקיים – המערכת בהכרח **לא יציבה** ואין צורך להמשיך לבדוק.

אם **שני התנאים מתקיימים**, יש לבדוק יציבות לפי טבלת ראוט.

<u>טבלת ראוט למערכת מסדר ראשון</u> :

s^1	a_1
s^0	a_0

<u>טבלת ראוט למערכת מסדר שני</u> :

s^2	a_2	a_0
s^1	a_1	0
s^0	a_0	0

<u>טבלת ראוט למערכת מסדר שלישי</u> :

s^3	a_3	a_1
s^2	a_2	a_0
s^1	b_1	0
s^0	a_0	0

$$b_1 = \frac{a_2 \cdot a_1 - a_0 \cdot a_3}{a_2}$$

טבלת ראוט למערכת מסדר רביעי:

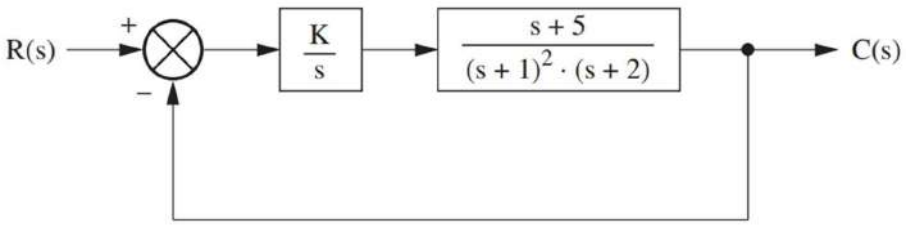
s^4	a_4	a_2	a_0
s^3	a_3	a_1	0
s^2	b_1	a_0	0
s^1	c_1	0	0
s^0	a_0	0	0

$$b_1 = \frac{a_3 \cdot a_2 - a_1 \cdot a_4}{a_3}$$
$$c_1 = \frac{b_1 \cdot a_1 - a_0 \cdot a_3}{b_1}$$

תנאי ליציבות: **כל המקדמים** בשורה המודגשת צריכים להיות חיוביים

7.2.1 **דוגמא:** שימוש בקריטריון ראוט עבור מערכת מסדר רביעי:

באיור לשאלה נתונה דיאגרמת מלבנים של תהליך בקרה:



א. מצא את המשוואה האופיינית של המערכת.

ב. רשום את טבלת ראוט עבור המשוואה האופיינית שמצאת בסעיף א.

ג. מצא את תחום הערכים של k שעבורו המערכת יציבה.

<u>פתרון :</u>

א. צ״ל את המשוואה האופיינית של המערכת.

$$G_T(\boldsymbol{s}) = \frac{k(s+5)}{s(S+1)^2(s+2)}$$

$$H_T(\boldsymbol{s}) = 1$$

$$\frac{C}{R}(s) = \frac{G_T}{1 + G_T H_T} = \frac{\frac{k(s+5)}{s(S+1)^2(s+2)}}{1 + \frac{k(s+5)}{s(S+1)^2(s+2)}} = \frac{k(s+5)}{s(S+1)^2(s+2) + K(s+5)} =$$

$$\frac{k(s+5)}{s(s^2+2s+1)(s+2) + K(s+5)} = \frac{k(s+5)}{s(s^3+4s^2+5s+2) + K(s+5)}$$

$$= \frac{k}{s^4 + 4s^3 + 5s^2 + 2s + Ks + 5K}$$

משוואה אופיינית= המכנה של פונקציית התמסורת - $1 + GH$

$$Q(s) = 1 + GH = s^4 + 4s^3 + 5s^2 + 2s + Ks + 5K$$

ב. טבלת ראוט עבור המשוואה האופיינית שמצאנו בסעיף א.

s^4	1	5	$5k$
s^3	4	$K+2$	0
s^2	c_1	$5K$	0
s^1	D_1	0	0
s^0	$5k$	0	0

ג. צ״ל את תחום הערכים של k שעבורם המערכת יציבה.

$$c_1 = \frac{4 \cdot 5 - k - 2}{4} = \frac{18 - k}{4}$$

$$D_1 = \frac{\frac{(18-k)(k+2)}{4} - 20k}{\frac{18-k}{4}} = \frac{(18-k)(k+2) - 80k}{18-k}$$

$$= \frac{36 + 18k - 2k - k^2 - 80k}{18-k} = \frac{-k^2 - 64k + 36}{18-k}$$

כדי שהמערכת תהיה יציבה, העמודה השמאלית צריכה להיות חיובית.

<u>תנאים ליציבות:</u>

$$\frac{18-k}{4} > 0$$

18-k>0

18>k

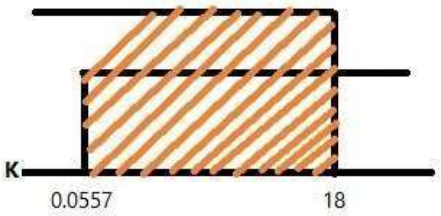
$$\frac{-k^2-64k+36}{18-k} > 0$$

$$-k^2-64k+36 > 0$$

$$k_1 > 0.557, k_2 > -64.55$$

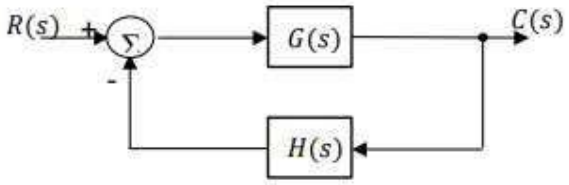
זהו פתרון של משוואה ריבועית, K לא יכול להיות שלילי ולכן לוקחים רק ערכים חיוביים של K

תחום הערכים של k שעבורו המערכת יציבה הוא: **0.557<k<18**



8. שגיאות במערכת הבקרה

8.1 עבור המערכת הנתונה:



פונקציית התמסורת של השגיאה:

$$G_E(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+G(s)\cdot H(s)}$$

ניתן לחשב את <u>שגיאת המצב המתמיד</u> ע"י שימוש במשפט הערך הסופי או ע"י טבלת השגיאות.

<u>לפי משפט הערך הסופי:</u>

$$e_{ss} = \lim_{s\to 0} s \cdot E(s)$$

כאשר:

$e_{ss}\ (steady\ state\ error)$ = השגיאה במצב המתמיד (מישור הזמן).

$E(s)$ = השגיאה במישור S מתוך תמסורת השגיאה.

8.2 טבלת חישוב השגיאה לפי סוג המערכת

את פונקציית התמסורת בחוג פתוח אפשר לרשום באופן כללי כך:

$$GH(s) = \frac{K \cdot B_1(s)}{s^L \cdot B_2(s)}$$

K – הגבר

L – סוג המערכת

$B_2(s), B_1(s)$ – פולינומים

$$B_1(s) = a_0 \cdot s^m + a_1 \cdot s^{m-1} + \cdots + a_{m-1} \cdot s + a_m$$
$$B_2(s) = b_0 \cdot s^n + b_1 \cdot s^{n-1} + \cdots + b_{n-1} \cdot s + b_n$$

מבוא / סוג המערכת	אות מדרגה $r(t) = r_1$		אות מהירות $r(t) = r_2 \cdot t$		אות תאוצה $r(t) = r_3 \cdot t^2$	
	K_p	שגיאת המצב המתמיד	K_v	שגיאת המצב המתמיד	K_a	שגיאת המצב המתמיד
סוג 0	$\frac{K \cdot B_1(0)}{B_2(0)}$	$\frac{r_1}{1+K_p}$	0	∞	0	∞
סוג 1	∞	0	$\frac{K \cdot B_1(0)}{B_2(0)}$	$\frac{r_2}{K_v}$	0	∞
סוג 2	∞	0	∞	0	$\frac{K \cdot B_1(0)}{B_2(0)}$	$\frac{2 \cdot r_3}{K_a}$

טבלה מס' 7– טבלת חישוב השגיאה לפי סוג המערכת

סוג המערכת L נקבע לפי מס׳ הקטבים הנמצאים בראשית הצירים (אינטגרטורים) של המערכת <u>בחוג פתוח</u>.

- סוג 0 – אפס קטבים בראשית הצירים
- סוג 1 – קוטב אחד בראשית הצירים
- סוג 2 – שני קטבים בראשית הצירים

8.2.1 **דוגמא : חישוב שגיאת מצב מתמיד לפי סוג המערכת**

נתונה מערכת בקרה שפונקציית החוג הפתוח שלה נתונה ע״י הביטוי :

$$GH(s) = \frac{10s + 12}{s(s+1)\cdot(s+8)}$$

למערכת מכניסים אות מהירות $r(t) = 4t$

פתרון דוגמא:

ראשית נפתח סוגריים במכנה :

$$GH(s) = \frac{10s + 12}{\underbrace{s}_{\substack{\text{מערכת}\\ \text{סוג 1}}}\ (s^2 + 9s + 8)}$$

כעת נחשב את קבוע המהירות :

$$\begin{matrix} B_1(0) = 12 \\ B_2(0) \ \ = 8 \end{matrix} \Rightarrow k_V \underbrace{=}_{\substack{\text{לפי הטבלה שורה}\\ \text{2 עמודה אמצעית}}} \frac{1 \cdot 12}{8} = \mathbf{1.5}$$

$$K = 1$$

$$r_2 = 4$$

לבסוף נחשב את שגיאת המצב מתמיד לפי הטבלה :

$$e_{ss}^{v} = \frac{r_2}{K_v} = \frac{4}{1.5} = \frac{8}{3}$$

9. בקרים תעשייתיים

9.1 משוואות הבקרים: ***P*** *roportional* – ***P*** ***I*** *ntegral* – ***I*** ***D*** *erivative* – ***D*** **במישור הזמן**

משוואת הבקר **במישור הזמן**	
$P(t) = P_0 + K_p \cdot e(t)$	בקר ***P***
$P(t) = P_0 + K_i \cdot \int_0^t e(t)dt$	בקר ***I***
$P(t) = P_0 + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$	בקר ***D***

טבלה מס' 8 – משוואות בקרי *P,I,D* במישור הזמן

K_p – הגבר הבקר P, ללא יחידות P_0 – תפוקת הבקר כאשר השגיאה שווה לאפס (%)

K_d – הגבר הבקר D, יחידות של *(sec)* K_i – הגבר אינטגרלי, יחידות של *(1/sec)*

9.2 משוואות הבקרים: ***P*** *roportional* – ***P*** ***I*** *ntegral* – ***I*** ***D*** *erivative* – ***D*** **במישור לפלס**

משוואת הבקר **במישור לפלס**	
$P(s) = P_0 + K_p \cdot E(s)$	בקר ***P***
$P(s) = P_0 + K_i \cdot \frac{1}{s} \cdot E(s)$	בקר ***I***
$P(s) = P_0 + K_d \cdot S \cdot E(s)$	בקר ***D***

טבלה מס' 9 – משוואות בקרי *P,I,D* במישור לפלס

K_p – הגבר הבקר P, ללא יחידות P_0 – תפוקת הבקר כאשר השגיאה שווה לאפס (%)

K_d – הגבר הבקר D, יחידות של *(sec)* K_i – הגבר אינטגרלי, יחידות של *(1/sec)*

9.3 משוואות הבקרים: ***PI*** , ***PD***, ***PID*** **במישור הזמן**

	משוואת הבקר **במישור הזמן -** *p(t)*
בקר ***PI***	$P_0 + K_p \cdot e(t) + K_p \cdot K_i \cdot \int_0^t e(t)dt$
בקר ***PD***	$P_0 + K_p \cdot e(t) + K_p \cdot K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$
בקר ***PID***	$P_0 + K_p \cdot e(t) + K_p \cdot K_i \cdot \int_0^t e(t)dt + K_p \cdot K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$

טבלה מס׳ 10– משוואות בקרי *PI*, *PD*, *PID* במישור הזמן

K_p – הגבר הבקר *P*, ללא יחידות P_0 – תפוקת הבקר כאשר השגיאה שווה לאפס (%)

K_d – הגבר הבקר *D*, יחידות של *(sec)* K_i – הגבר אינטגרלי, יחידות של *(1/sec)*

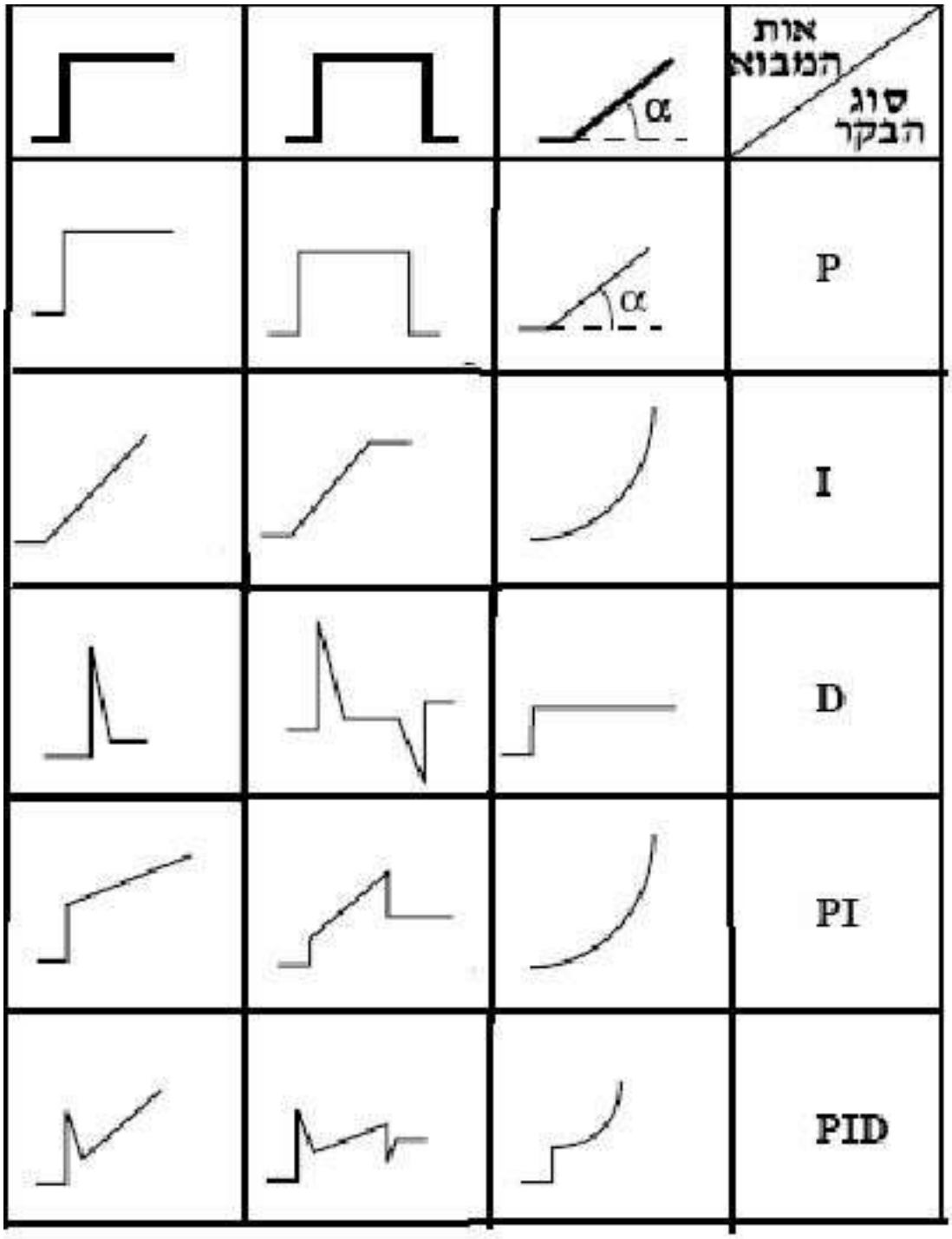
9.4 משוואות הבקרים: ***PI*** , ***PD***, ***PID*** **במישור לפלס**

	משוואת הבקר **במישור לפלס -** *p(s)*
בקר ***PI***	$P_0(s) + K_p \cdot E(s) + K_p \cdot K_i \cdot \frac{1}{s} \cdot E(s)$
בקר ***PD***	$P_0(s) + K_p \cdot E(S) + K_p \cdot K_d \cdot s \cdot E(s)$
בקר ***PID***	$P_0(s) + K_p \cdot E(s) + K_p \cdot K_i \cdot \frac{1}{s} \cdot E(s) + K_p \cdot K_d \cdot s \cdot E(s)$

טבלה מס׳ 11– משוואות בקרי *PI*, *PD*, *PID* במישור לפלס

K_p – הגבר הבקר *P*, ללא יחידות P_0 – תפוקת הבקר כאשר השגיאה שווה לאפס (%)

K_d – הגבר הבקר *D*, יחידות של *(sec)* K_i – הגבר אינטגרלי, יחידות של *(1/sec)*



טבלה מס' 12-תגובת הבקר לאות הכניסה

10. נספחים לפרק א'

מבואות מתמטיים

חוקי שברים

$$\frac{a}{b}+\frac{c}{d}=\frac{ad+cb}{bd}$$

$$1+\frac{a}{b}=\frac{b+a}{b}$$

$$\frac{\frac{a}{b}}{c}=\frac{a}{bc}$$

$$\frac{a}{\frac{b}{c}}=\frac{ac}{b}$$

$$\frac{a+b}{c}=\frac{a}{c}+\frac{b}{c}$$

משפט הערך הסופי/ התחלתי

$$\lim_{t\to\infty} f(t)=\lim_{S\to 0} S\times F(s)$$

$$\lim_{t\to 0} f(t)=\lim_{S\to\infty} S\times F(s)$$

משוואה ריבועית

$$S_{1,2}=\frac{-b\pm\sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

כפל מקוצר

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

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

טרינום-שורשים פשוטים

$as^2+bs+c=0 \quad Mode\to 5,3$

$S_1=A$

$S_2=B$

$(s-A)(s-B)$

שורשים מרוכבים

$as^2+bs+c=0 \quad Mode\to 5,3$

$S_{1,2}=\sigma\pm\omega j$

$(s-\sigma)^2+\omega^2$

$$i=j=\sqrt{-1}$$
$$j^2=-1$$

פרוק שברים חלקיים (פתרון 3 משוואות עם 3 נעלמים *mode 5-2* במחשבון)

1. פירוק פשוט

$$\frac{F}{(s+a)(s+b)(s+c)}=\frac{A}{s+a}+\frac{B}{s+b}+\frac{C}{s+c}=\frac{A(s+b)(s+c)+B(s+a)(s+c)+C(s+a)(s+b)}{(s+a)(s+b)(s+c)}$$

2. חזקה גבוהה

$$\frac{F}{s(s+a)^n}=\frac{A}{s}+\frac{B}{(s+a)^1}+\frac{C}{(s+a)^2}+\ldots+\frac{X}{(s+a)^n}$$

3. שורשים מרוכבים-הורדת סדר

$$\frac{F}{s(as^2+bs+c)}=\frac{A}{s}+\frac{Bs+C}{as^2+bs+c}$$

$MODE\ 5\to 3$

$S_{1,2}=\sigma\pm\omega j$

הערה: לאחר מציאת A,B,C יש לפצל את המכנה עם השורשים המרוכבים לפי $(s-\sigma)^2+\omega^2$

4. השוואת מונים

$$\frac{s^2+as+b}{s^2+ds+c}=\frac{s^2+ds+c}{s^2+ds+c}+\frac{fs+g}{s^2+ds+c}=1+\frac{fs+g}{s^2+ds+c}$$

$*f=d-a$

$*g=c-b$

<u>מעבר ממשוואה דיפרנציאלית ללפלס</u>

1. $A\frac{df(t)}{dt}+Bf(t)=Cg(t)$

$AF(s)\times s+BF(s)=CG(s)$

$F(s)[As+B]=CG(s)$

$\frac{F(s)}{G(s)}=\frac{C}{As+B}$

2. $A\frac{d^2f(t)}{dt^2}+B\frac{df(t)}{d(t)}+Cf(t)=Dg(t)$

$AF(s)\times s^2+BF(s)\times s+CF(s)=DG(s)$

$F(s)\left[As^2+B^2+C\right]=DG(s)$

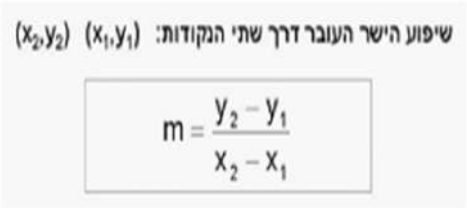
$\frac{F(s)}{G(s)}=\frac{D}{As^2+Bs+C}$

בניית משוואת ישר לפי 2 נקודות :

שלבי פתרון ומציאת פונקציה קווית על פי 2 נקודות : $A(x_1,y_1)$, $B(x_2,y_2)$

Y=mX+b

שלב 1- מציאת שיפוע



שלב 2 – מציאת b

1. נבחר אחת מהנקודות הנתונות
2. נציב במשוואת הישר את m, x ו-y.
3. נחשב את b מתוך הפונקציה Y=mX+b

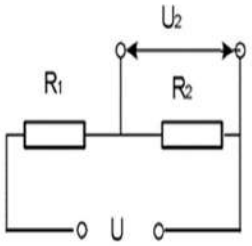
שלב שלישי – פונקציית קו ישר סופית

מציבים את m ו-b שמצאנו.

מחלק מתח

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in}$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$



חיבור טורי

$$R_{tot} = R_1 + R_2$$

$$V_1 = R_1 I$$

$$V_2 = R_2 I$$

$$I_{tot} = I_1 = I_2$$

חוק אוהם

$$V = RI$$

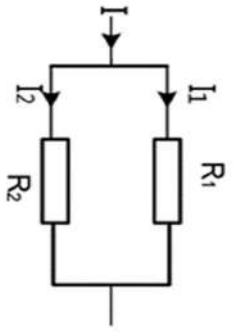
$$I = \frac{V}{R}$$

$$R = \frac{V}{I}$$

מחלק זרם

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I_{tot}$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I_{tot}$$



חיבור מקבילי

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R_{tot} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{tot} = V_1 = V_2$$

$$I_1 = R_1 \times V$$

$$I_2 = R_2 \times V$$

פרק ב'

רכיבים ומתמרים

1. הגדרות של מדידות והתמרות

1.1 הגדרת גדלים בסיסיים במערכת היחידות SI.

מטר - יחידת האורך הסטנדרטית $[m]$.

קילוגרם - יחידת המסה הסטנדרטית $[Kg]$.

שנייה - יחידת הזמן הסטנדרטית $[s]$.

1.2 הגדרת מושגים במכניקה הנגזרים מהגדלים הבסיסיים במערכת היחידות SI.

המושג	הגדרה	שם וסימון יחידה	ביטוי ביחידות SI
שטח - S	$S = l^2$	-	m^2
נפח - V	$V = l^3$	-	m^3
מהירות - v	l/t	-	m/s
תאוצה - a	l/t^2	-	m/s^2
כוח - F	$F = m \cdot a$	ניוטון - F	$Kg \ \ m/s^2$
עבודה - W	$W = F \cdot l$	ז'אול - J	$Kg \ \ m^2/s^2$
אנרגיה - E	$E = F \cdot l$	ז'אול - J	$Kg \ \ m^2/s^2$
הספק - P	$S = W/t$	ואט - W	$Kg \ \ m^2/s^2$
צפיפות - p	$p = m/V$	-	Kg/s^2
תנע - J	$J = m \cdot v$	-	$Kg \ \ m/s$
לחץ - P	$P = F/S$	פסקל - Pa	$Kg/(m \cdot s^2)$

$l[m]$ - אורך, $t[s]$ - זמן, $m[Kg]$ - מסה.

טבלה מספר 1: הגדרות של מושגים פיזיקליים

1.3 אותות תקניים תקביליים במערכות מדידה.

מתח חשמלי - V	זרם חשמלי - mA
$0 \div 5$	$0 \div 20$
$1 \div 5$	$4 \div 20$
$0 \div 10$	$0 \div 50$
$2 \div 10$	$10 \div 50$

טבלה מספר 2: אותות תקניים תקביליים במערכות מדידה

1.4 הגדרות ומושגים.

1.4.1 **איפוס מתמר - *Zero Adjustment***: כיוון מכני או חשמלי שבעזרתו מאפסים את היציאה המזערית של מתמר.

1.4.2 **רגישות - *Sensitivity***: זהו היחס שבין השינוי שחל באות המוצא של מתמר לעומת אות המבוא שגרם אותו.

1.4.3 **כושר הבחנה (הפרדה) - *Resolution***: השינוי המזערי באות המבוא היוצר תגובה שניתן להבחין בה במוצא.

1.4.4 **דיוק - *Accuracy***: מידת הקירבה של הערך הנמדד אל הערך שנחשב לאמִתי.

1.4.5 **שגיאה - *Error***: ההפרש בין הערך הנמדד לערך האמִתי.

1.4.6 **לינאריות - *Linearity***: מידת הקִרבה של אוסף מדידות אל קו **ישר** מיטבי (אופטימלי).

1.4.7 **התאמה - *Conformity***: מידת הקִרבה של אוסף מדידות אל קו **עקום** מיטבי (אופטימלי).

1.5 שגיאות מדידה נפוצות

קיימות שגיאות מדידה שונות כאשר מודדים תכונות החומרים. מדידת מפלס, טמפרטורה, מהירות וכדומה. השגיאות הנפוצות ביותר הן: שגיאת דיוק, שגיאת חזרתיות, שגיאת חשל, שגיאת לינאריות ושגיאת התאמה. שגיאות אלו הוסברו בקצרה בסעיף הקודם.

1.6 טבלת יחידות הנדסיות

ערך	סימון	כינוי	
		אנגלית	עברית
10^{6}	M	Mega	מגה
10^{3}	k	kilo	קילו
10^{-2}	c	centi	סנטי
10^{-3}	m	milli	מילי
10^{-6}	μ	micro	מיקרו
10^{-9}	n	nano	ננו
10^{-12}	p	pico	פיקו

2. מתמרים

2.1 נגד משתנה - *Potentiometer*.

זהו נגד אשר ערך התנגדותו נמדד ביחידות אום ושהתנגדותו אינה קבועה וניתנת לכוונון בטווח מסוים.



איור מספר 1:
צורות שונות של נגדים משתנים

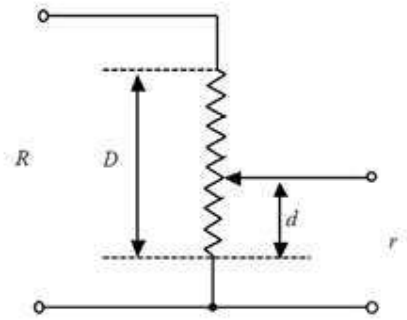
התמרת תזוזה באמצעות נגד משתנה (Potentiometer)

התנגדות מקצה לקצה של הנגד המשתנה $R[\Omega]$

התנגדות קטע נמדד $r[\Omega]$

אורך הנגד המשתנה מקצה לקצה $D[cm]$

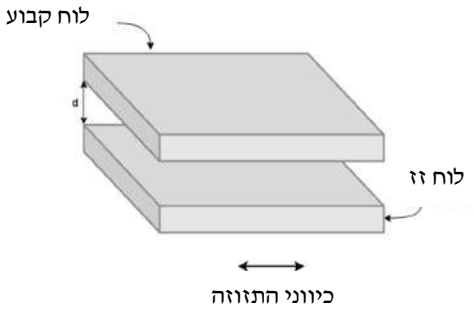
אורך קטע הנמדד $d[cm]$



$$r = \frac{d \cdot R}{D}$$

2.2 מתמר קיבולי - *Capacitive transducer*.

זהו מתמר המבוסס על קבל אשר ערך קיבולו משתנה כתוצאה מהפעלת כוח חיצוני עליו או שינוי ממדיו כגון שינוי המרחק בין לוחות הקבל או הקבוע הדיאלקטרי שלו.



איור מספר 2:
מבנה של מתמר קיבולי

<u>חיישן קירבה קיבולי</u>

חיישן קיבולי מבוסס על מדידת הקיבול של קבל לוחות, שקיבולו משתנה כתוצאה משינוי באחד מהפרמטרים שלו הנגרמים מתזוזה

הנוסחה לחישוב ערכו של הקבל:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$$

כאשר:

A – שטח הלוחות (m^2)

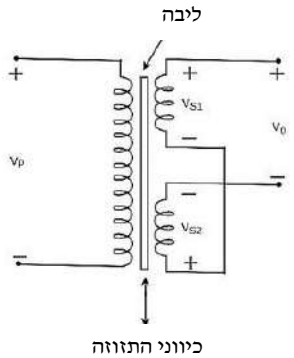
d – המרחק בין הלוחות (m)

ε_r – המקדם הדיאלקטרי היחסי של החומר בין לוחות הקבל

ε_0 – הקבוע הדיאלקטרי בריק: $8.854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$.

2.3 מתמר השראתי - *Inductive transducer*.

זהו מתמר המבוסס על משרן אשר ערך השראותו משתנה כתוצאה משינוי מידת קִרבתו למשטחים. משמש גם לזיהוי מתכות ולספירת חפצים.



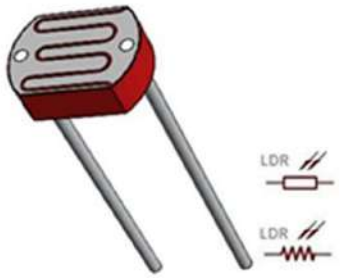
איור מספר 3:
מבנה של מתמר השראתי

2.4 נגד רגיש לאור - *LDR, Light Dependent Resistor*.

זהו חיישן אור - *Photocell* המשנה את התנגדותו בהתאם לעוצמת ההארה ואורך הגל (צבע האור) הנופלים עליו.

שימושים: מערכות אזעקה, הפעלת מכשירים תלויי עוצמת אור, השקיה בחקלאות ועוד שימושים רבים.

ברכיב זה ההתנגדות הסגולית של המוליך משתנה בהתאם לעוצמת האור.



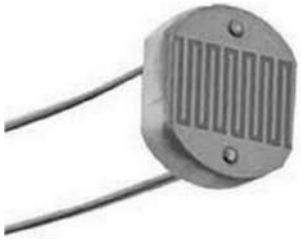
התנגדות המוליך בחיישן $R[\Omega]$

התנגדות הסגולית של המוליך $\rho\left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{cm}\right]$

אורך המוליך $L[cm]$

שטח חתך המוליך $A[mm^2]$

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



איור מספר 4:
תמונה של *LDR*

2.5 מגברי שרת - *Operation Amplifier*.

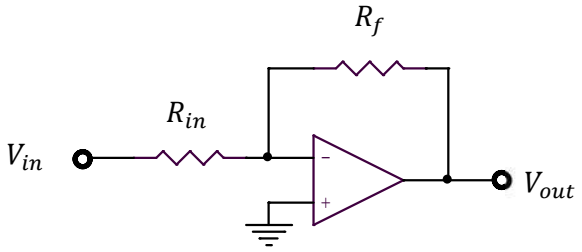
מגבר שרֶת הוא רכיב אלקטרוני הפועל כמגבר. תכונותיו העיקריות של מגבר השרת הן הגבר גבוה מאוד ופעולה כמגבר הפרשי, אשר מקבל בכניסותיו שני אותות, ובמוצאו מספק אות מוגבר בהתאם להפרש בין שתי הכניסות. נהוג להשתמש באחת הכניסות ככניסה לאות חיצוני, ואילו בכניסה האחרת לחבר רכיבים אלקטרוניים נוספים המקושרים למוצאו של המגבר (חוג משוב). בצורה זו ניתן לבחור ולשלוט על ערך ההגבר, ואף לבצע פעולות פשוטות של עיבוד אותות.

2.5.1 תכונות מגבר שרת אידאלי:

a.	מגבר הפרש -	$V_{out} = K \cdot (V_+ - V_-)$
b.	הגבר אינסופי -	$K \to \infty$
c.	התנגדות כניסה אינסופית -	$R_{in} \to \infty$
d.	התנגדות מוצא אפסית -	$R_{out} \to 0$
e.	רוחב סרט אינסופי -	$BW \to \infty$

2.5.2 סוגי החיבורים של מגבר שרת:

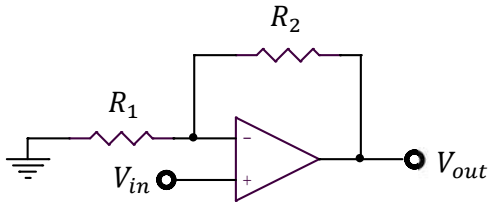
א. מגבר מהפך:



$$\boldsymbol{A_v = -\frac{R_f}{R_{in}}}$$

איור מספר 5: מגבר מהפך

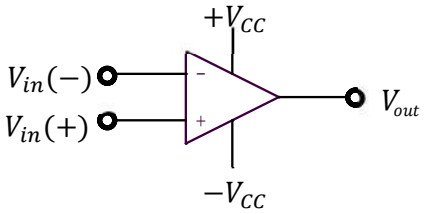
ב. מגבר לא מהפך:



$$\boldsymbol{A_v = \frac{R_2}{R_1} + 1}$$

איור מספר 6: מגבר לא מהפך

ג. מגבר משווה:

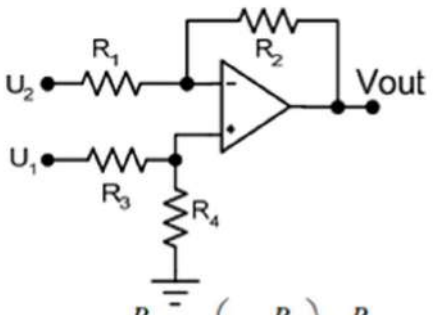


$$\boldsymbol{if} \quad V_{in}(+) > V_{in}(-) \quad \boldsymbol{Then} \quad V_{out} = +V_{CC}$$

$$\boldsymbol{if} \quad V_{in}(-) > V_{in}(+) \quad \boldsymbol{Then} \quad V_{out} = -V_{CC}$$

איור מספר 7: מגבר משווה

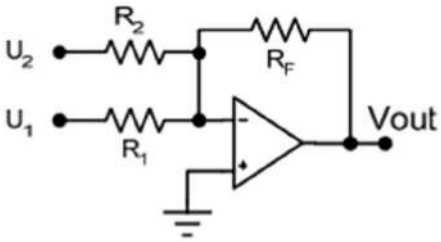
ד. מגבר הפרש (מחסר)



$$Vout = U_1 \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1} \times U_2$$

איור מספר 7א' : מגבר הפרש

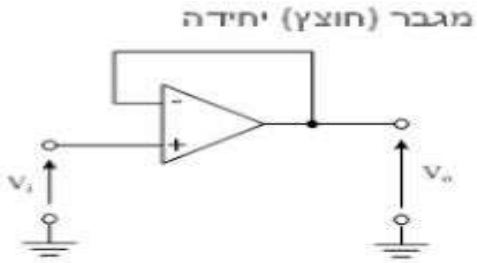
ה. מגבר מסכם שלילי



$$Vout = -R_F \times \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \ldots + \right)$$

איור מספר 7ב' : מגבר מסכם שלילי

ו. מגבר יחידה (חוצץ)



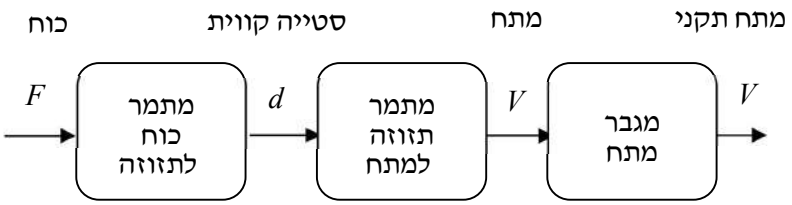
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1$$

$$v_o = v_i$$

איור מספר 7ג' : מגבר יחידה

3. מדידת כוח, משקל, תאוצה, מהירות ומיקום

3.1 עיקרון מדידה והתמרת כוח ע״י מתמר תזוזה.



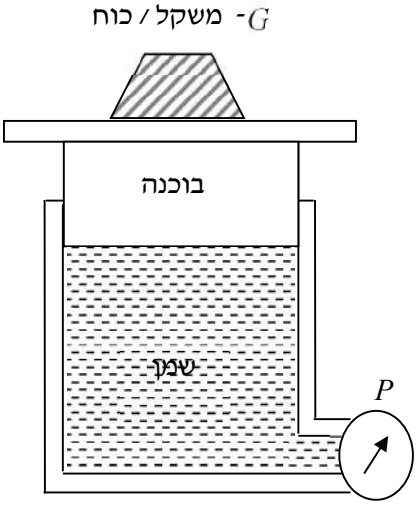
איור מספר 8: עיקרון מדידה והתמרת כוח ע״י מתמר תזוזה

3.2 טבלת המרה ליחידות כוח/משקל.

$\approx 0.10197\ kg$	$=10^5\ dyne$	$=1\ \frac{kg \cdot m}{s^2}$	$1N$

טבלה מספר 3: המרה של יחידות כוח/משקל

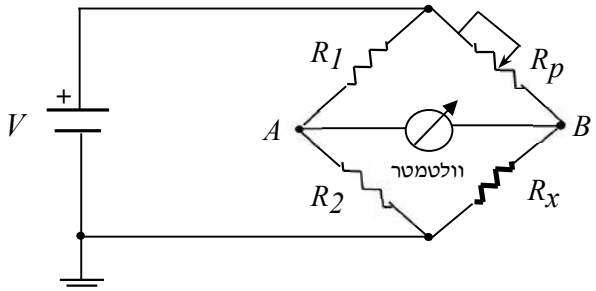
3.3 מדידה כוח / משקל ע״י מד לחץ במאזניים הידראוליות.



G - משקל / כוח מבוקש.
P - לחץ נמדד.
S - שטח חתך הבוכנה.

איור מספר 9:
מדידה כוח / משקל ע״י מד לחץ

3.4 עקרון פעולה של גשר ויטסטון.



איור מספר 10: גשר ויטסטון

באמצעות גשר וינסטון ניתן למדוד התנגדות לא ידועה R_x. ניתן לחשב את R_x רק כאשר הגשר מאוזן ובמצב זה המתח $V_{ab} = 0$. משיגים איזון הגשר על ידי כיוונון הפוטנציומטר R_P. כאשר R_p, R_2, R_1 ידועים מחשבים את ההתנגדות הלא ידועה R_x לפי הנוסחה להלן.

השוואת מתחים : $i_{R1} \cdot R_1 = i_{Rp} \cdot R_p \quad ; \quad i_{R2} \cdot R_2 = i_{Rx} \cdot R_x$

$$\frac{i_{R1} \cdot R_1}{i_{R2} \cdot R_2} = \frac{i_{Rp} \cdot R_p}{i_{Rx} \cdot R_x} \rightarrow \frac{\cancel{i_{R1}} \cdot R_1}{\cancel{i_{R2}} \cdot R_2} = \frac{\cancel{i_{Rp}} \cdot R_p}{\cancel{i_{Rx}} \cdot R_x} \rightarrow \boldsymbol{R_x = R_p \cdot \frac{R_2}{R_1}}$$

בעזרת גשר וינסטון ניתן לחשב התנגדויות של חיישנים שונים כגון חיישני טמפרטורה, מתמרי לחץ וכדומה.

3.5 מדידת מהירות זוויתית בעזרת טכוגנרטור - *Tacho Generator*.

הטכוגנרטור הוא מכשיר למדידת מהירות זוויתית של התקן חשמלי. הטכוגנרטור מפיק כוח חשמלי. המתח של הכוח המופק עומד ביחס ישר למהירות הזוויתית הנמדדת, מתח זה הוא לינארי. בעזרת טכוגנרטור ניתן למדוד מהירות זוויתית של מנוע וכל התקן אשר מסתובב. המהירות הזוויתית ω_s נמדדת לפי הנוסחה : $\omega_s = \frac{V_o}{K_t}$.

$\left[\frac{rad}{s}\right]\omega_s$ - מהירות זוויתית, $V_o[V]$ - מתח מוצא של הטכוגנרטור, $\left[\frac{V \cdot s}{rad}\right]K_t$ - קבוע הטכוגנרטור.

מצב ריקם :

הטכוגנרטור לא מחובר לעומס הצורך ממנו זרם

נוסחה למתח המוצא של הטכוגנרטור : $\boldsymbol{E = k_{TG} \cdot \omega}$

כאשר :

E – הכא"מ המושרה $[V]$

K_{TG} – קבוע הטכוגנרטור $\left[\frac{V}{\frac{rad}{\sec}} = \frac{V \cdot \sec}{rad}\right]$

ω – מהירות הסיבוב $\left[\frac{rad}{\sec}\right]$

ניתן לרשום את הנוסחה גם ביחידות rpm : $E = k_{TG} \cdot n$

E – הכא"מ המושרה $[V]$

K_{TG} – קבוע הטכוגנרטור $\left[\frac{V}{rpm}\right]$

n – מהירות הסיבוב $[rpm]$

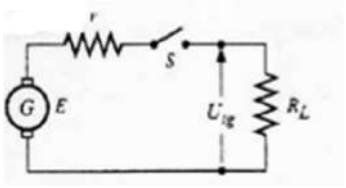
מעבר מ-rpm ל- $\frac{rad}{\sec}$ ולהיפך:

$$1rpm = \frac{1round}{1\min} = \frac{2\pi[rad]}{60[\sec]} = \frac{\pi}{30}\left[\frac{rad}{\sec}\right]$$

$$1[rpm] = \frac{\pi}{30}\left[\frac{rad}{\sec}\right]$$

$$1\left[\frac{rad}{\sec}\right] = \frac{30}{\pi}[rpm]$$

מצב מועמס



מתח המוצא במצב מעשי כאשר הטכומטר מחובר לעומס :

$$U_{TG} = K_{TG} \cdot \omega \cdot \frac{R_L}{r + R_L}$$

או באופן ישיר:

r = התנגדות פנימית של סליל הטכוגנרטור

R_L = התנגדות העומס

3.6 נוסחאות למהירות- v, תאוצה- a ומרחק- x. היחידות בשיטת SI.

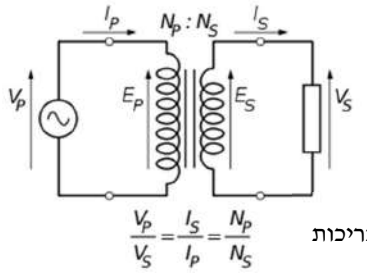
$$v\left[\frac{m}{s}\right] = \frac{x}{t} \qquad a\left[\frac{m}{s^2}\right] = \frac{v - v_0}{t} \qquad x[m] = (v - v_0) \cdot t$$

3.7 שנאי הפרשי - $LVDT$

ה- $LVDT$ הוא מתמר מיקום. $LVDT$ - $Linear\ Variable\ Differential\ Transformer$. זהו שנאי הפרשי לינארי, הבנוי מסליל ראשי (ראשוני) ומשני סלילים משניים המלופפים בכיוונים מנוגדים. הסליל הראשי יוצר שדה אלקטרומגנטי אשר מפיק השראות על שני הסלילים המשניים. סלילים אלו מוציאים מתח AC בהפרש פאזה של 180 מעלות. במרכז השנאי נמצאת ליבה מתכתית אשר נעה לאורך המתמר ומיקומה קובע את ערכי האמפליטודות של הסלילים המשניים. הפרש האמפליטודות הוא יחסי למיקום הליבה.

3.8 עיקרון הפעולה של שנאי – $Transformer$

העיקרון עליו פועל השנאי הוא שני סלילים הנמצאים בשדה מגנטי זהה. השדה המגנטי נוצר כתוצאה מהזרם העובר בסליל אחד (הסליל ה"ראשוני") ומשרה כוח אלקטרו מניע (כא"מ) בסליל האחר (הסליל ה"משני"). במצב זה, כל תכונה חשמלית של המערכת בצד אחד של השנאי משוקפת לצד השני.



איור מספר 11: שנאי

N_P , N_S - מספרי הכריכות

4. מדידת טמפרטורה

4.1 הבדל בין טמפרטורה לחום.

הטמפרטורה היא למעשה מדד לכמה גוף הוא "קר" או "חם". ואילו החום הוא האנרגיה שעוברת מגוף חם לגוף קר ועקב כך משנה, אך לא תמיד, את הטמפרטורה שלו. **החום** של אובייקט מוגדר כאנרגיה הכוללת של כל התנועה המולקולרית בתוך אובייקט זה. ואילו **הטמפרטורה** היא מידת חום ממוצעת או אנרגיה תרמית של מולקולות בחומר. יחידת החום היא ג'ואל או BTU ואילו יחידת הטמפרטורה היא: $K°$ או $R°$ או $F°$ או $°C$.

4.2 המרה של יחידות טמפרטורה.

$°F = 32 + °C \cdot 9/5$
$°R = 4/5 \cdot °C$
$°K = °C + 273$
$°C = (°F - 32)/1.8$

טבלה מספר 4: המרה של יחידות טמפרטורה

4.3 חיישן טמפרטורה מסוג *RTD - Resistance Temperature Detector*.

ה- *RTD* הינו חיישן המבוסס על שינויים בהתנגדותו. ה- *RTD* עשוי ממתכת טהורה ונקרא גם P_t100.
נוסחתו היא:

$$R = R_0\,[1 + \alpha \cdot \Delta T]$$

$R[\Omega]$ - התנגדות החיישן בטמפרטורה סופית.
$R_0[\Omega]$ - התנגדות החיישן בטמפרטורה התחלתית.
$\alpha[1/℃]$ - מקדם התלוי בסוג המתכת ממנה עשוי החיישן.
$\Delta T[℃]$ - הפרש הטמפרטורות, בין הטמפרטורה הסופית לטמפרטורה ההתחלתית.

4.4 חיישן טמפרטורה מסוג תרמיסטור *Thermistor*.

ה- *Thermistor* הינו חיישן המבוסס גם הוא על שינויים בהתנגדותו אבל בניגוד ל- *RTD* הוא עשוי מחומר קרמי או מפולימר או ממוליך למחצה.

4.5 צמד תרמי.

צמד תרמי *Thermocouple* הוא חיישן טמפרטורה הבנוי משתי מתכות שונות שנוצר הפרש מתח התלוי בטמפרטורה. תופעה זו נקראת אפקט סיבק *Sibak Effect* המאפשרת מדידה מדויקת של טמפרטורות. צמדי המתכות מסומנים באותיות J, T, K ועוד. בטבלה להלן מובאים תחומי הטמפרטורות בעבור שלושה סוגים של צמדים תרמיים.

סוג הצמד	סימון	תחום טמפרטורה
$I_R - C_0$	J	$-270 \div 760$ ℃
$C_U - C_0$	T	$-270 \div 400$ ℃
$C_R - A_L$	K	$-270 \div 1370$ ℃

טבלה מספר 5: סימוני צמדים תרמיים ותחומי טמפרטורות

I_R - ברזל C_O - קוסטנטן C_U - נחושת A_L - אלומל C_R - כרומל

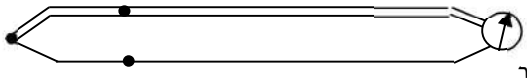
<u>רגישות/מקדם צמד התרמי</u>

מוגדרת כיחס הפרש המתחים המופקים בשתי טמפרטורות שונות בנקודת המדידה ובין הפרש שתי טמפרטורות אלה. רגישות זו נקראת גם מקדם הצמד התרמי α.

$$\alpha = \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta V}{\Delta T}\left[\frac{\mu V}{^\circ C}\right]$$

<u>צורות חיבור שונות לצמדים תרמיים</u>

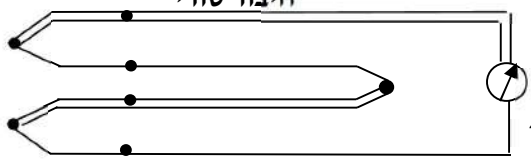
נקודה בודדת $V_{out} = \alpha \cdot (T_1 - T)\,;\, \alpha\left[\frac{mV}{^\circ\text{C}}\right]$



T_1 - הטמפרטורה בנקודת צמד התרמי

T - הטמפרטורה בנקודת המדידה

חיבור טורי $V_{out} = \alpha \cdot (T_1 + T_2 - 2 \cdot T)\ ;\ \alpha\left[\frac{mV}{^\circ\text{C}}\right]$

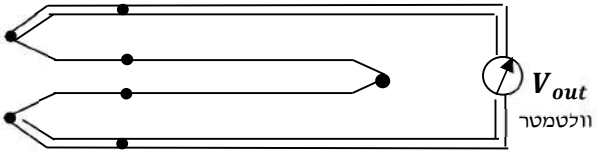


T_1 - הטמפרטורה בנקודת צמד התרמי הראשון

T_2 - הטמפרטורה בנקודת צמד התרמי השני

T - טמפרטורה בנקודת המדידה

חיבור הפרשי $V_{out} = \alpha \cdot (T_1 - T_2)\ ;\ \alpha\left[\frac{mV}{^\circ\text{C}}\right]$



T_1 - הטמפרטורה בנקודת צמד התרמי הראשון

T_2- הטמפרטורה בנקודת צמד התרמי השני

T - הטמפרטורה בנקודת המדידה

איור מספר 12: צורות חיבור שונות לצמדים תרמיים

5. מקודדים אופטיים

5.1 **מקודד אופטי הפרשי** - *Incremental Optical Encoder*.

כושר הפרדה (אבחנה) של מקודד אופטי הפרשי:

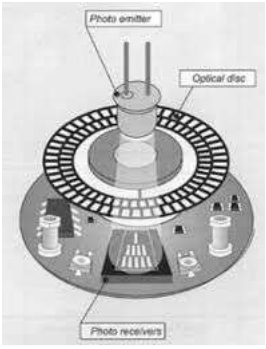
$$Res\ [°] = \frac{360°}{N}$$

כאשר N הוא מספר החריצים של המקודד.

חישוב מהירות זוויתית באמצעות מקודד אופטי הפרשי:

$$\omega\ [rpm] = \frac{\left[\frac{n}{N}\right] \cdot 60\left[\frac{sec}{min}\right]}{t[sec]}$$

n - מספר הדפקים שנספרו בפרק זמן t נתון.
N - מספר החריצים בערוץ.
t - פרק הזמן שבו נספרו הדפקים.



איור מספר 13:
מקודד אופטי הפרשי

5.2 **מקודד אופטי אבסולוטי** - Absolute Optical Encoder.

כושר הפרדה (אבחנה) של מקודד אופטי אבסולוטי:

$$Res\ [°] = \frac{360°}{2^n}$$

כאשר n הוא מספר הסיביות של המקודד.



איור מספר 14:
מקודד אופטי אבסולוטי

5.3 נוסחאות נוספות עבור מקודדים:

חישוב הרזולוציה: $res = \frac{360}{2^n}$

כאשר n מספר הערוצים בכל גזרה

מציאת הזווית (או תחום זוויות) לפי המילה הבינארית במוצא המקודד:

$$\boxed{\begin{aligned}\alpha_{\min} &= (X)_{10} \cdot res \\ \alpha_{\max} &= \alpha_{\min} + res\end{aligned}}$$

$(X)_{10}$ - הערך העשרוני של המילה הבינארית במוצא.

מציאת המילה הבינארית כאשר הזווית נתונה:

1) נחלק את הזווית ברזולוציה: $X = \frac{\alpha}{res}$
2) נעגל את המספר שהתקבל כלפי **מטה**: $\lfloor X \rfloor$
3) נמיר את המספר שהתקבל לבסיס 2: $(\lfloor X \rfloor)_2$

6. חיישני קירבה

6.1 **חיישן קירבה קיבולי** - *Capacitive Proximity Sensor*.

בעזרת חיישן זה אנו מודדים מרחקים קטנים. להלן נוסחה לחישוב ערכו של הקבל בתוך החיישן:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}\ [pF]$$

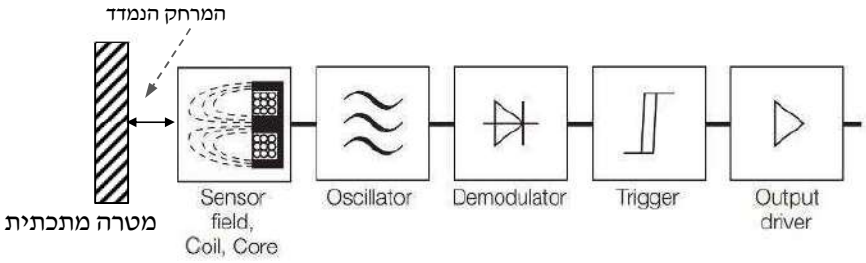
$C[F]$ - ערך הקבל הנמדד.
$\varepsilon_0\left[\frac{F}{m}\right]$ - המקדם הדיאלקטרי של ריק, $\varepsilon_0 = 8.8541878 \cdot 10^{-12}\left[\frac{F}{m}\right]$.
$\varepsilon_r[-]$ - המקדם הדיאלקטרי היחסי.
$S[m^2]$ - שטח לוחות הקבל.
$d[m]$ - מרחק בין לוחות הקבל.

ε_r[סיליקון]	ε_r[פוליאתילן]	ε_r[טפלון]	ε_r[נייר]
11.68	*2.25*	*2.1*	*3.5*

טבלה מספר 6: מקדמים דיאלקטרים של חומרים שונים

6.2 **חיישן קירבה השראתי** - *Inductive Proximity Sensor.*

חיישן קירבה השראתי מאפשר מדידת מרחקים קטנים של מספר מילימטרים של עצמים מתכתיים.
מבנה החיישן מוצג באיור להלן. החיישן מייצר השראה מגנטית וכאשר העצם נכנס לטווח החיישן,
ההשראה המגנטית משתנה ושנוי זה מתבטא במוצא החיישן ומתורגם למרחק במילימטרים.



איור מספר 15: מבנה חיישן קירבה השראתי

6.3 **חיישן קירבה אינפרה אדום** - *Infrared Proximity Sensor.*

חיישן זה פועל על-פי עיקרון של שידור וקליטה של גל אור. על-פי העיקרון הזה בצד אחד קיים רכיב הקרוי דיודה שמשדר קרן אור אינפרה-אדומה, אם קיים מכשול (חפץ) בדרכה של הקרן, נוצר החזר אור הנקלט על-ידי הרכיב הקולט. מרחק המכשול (חפץ) מחושב על-פי הפרש הזמן שבין הגל המשודר לגל הנקלט. באמצעות חיישן אינפרה-אדום אפשר למדוד מרחקים קטנים יחסית ותוצאות המדידה שלו נחשבות למדויקות ואמינות. מרחק החפץ הנמדד מחושב לפי הנוסחה: $d = v \cdot \frac{\Delta t}{2}$

$d[mm]$ - המרחק הנמדד.
$v\left[\frac{mm}{s}\right]$ - מהירות האור, $v = 3 \cdot 10^5 \left[\frac{km}{s}\right] = 3 \cdot 10^{11} \left[\frac{mm}{s}\right]$
$\Delta t[s]$ - הפרש הזמן שבין הגל המשודר לגל הנקלט.



איור מספר 16:
חיישן קירבה אינפרה אדום

6.4 **חיישן קירבה אולטרה סוני** - *Ultra Sony Proximity Sensor*.

חיישני קירבה אולטרה סוניים מתאימים למדידת מרחקים של מ-20 מילימטר ועד ל-10 מטרים. עקרון הפעולה של חיישנים אלו הוא שידור גל קול אולטרה סוני ומדידת זמן חזרת הגל. היתרון העיקרי של שיטה זו הוא שכמעט כל חומר שמחזיר צליל שניתן לגילוי, ללא קשר לצבעו או מרקמו. מוצא החיישנים יכול להיות אנלוגי, דיגיטלית, תקשורתי. חיישנים אלו מתאימים למדידת מפלס של מים, דלק, כימיקלים וכד', זיהוי אובייקטים, ביצוע מדידות ועוד. המרחק הנמדד מחושב לפי הנוסחה: $d = v \cdot \frac{\Delta t}{2}$

- d - המרחק הנמדד.
- v - מהירות גל הקול האולטרה סוני.
- Δt - הפרש הזמן שבין הגל המשודר לגל הנקלט.



איור מספר 17:
חיישן קירבה אולטרה סוני

7. מדידות פיזיקליות נוספות

7.1 מדידות לחץ ותת לחץ.

7.1.1 סוגי לחצים שונים.

לחץ מוגדר כפעולת כוח - F על פני שטח - S , $P = \frac{F}{S}$. **לחץ מוחלט** - נמדד לגבי אפס לחץ. **לחץ אטמוספרי** - הוא לחץ של עמוד האוויר על פני כדור הארץ. **לחץ יחסי** - נמדד לגבי הלחץ האטמוספרי. יחידות הלחץ הן בטבלה להלן.

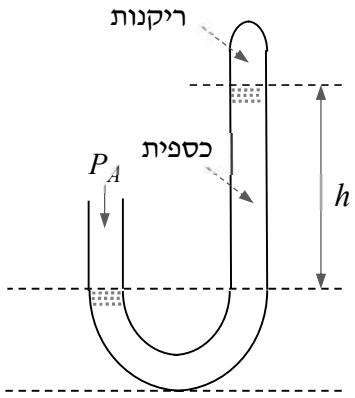
$Pa\ \left(N/_{m^2}\right)$	Bar	$Atmosphere$	Kg/cm^2	$mm\ H_2O$ @ 4^oC
1	10^{-5}	$9.8692 \cdot 10^{-6}$	$10.1972 \cdot 10^{-6}$	27.70

טבלה מספר 7: המרה של יחידות לחץ

7.1.2 מנומטר

המנומטר הוא מכשיר למדידת לחץ של נוזל או גז. המנומטר בנוי בדרך כלל מצינורית בצורת **U** המלאה בחלקה בנוזל מדידה, בדרך כלל כספית. נוזל המדידה חייב להיות בעל צפיפות שונה מזו של הנוזל/גז המפעיל את הלחץ.

באיור להלן מיוצג מנומטר המודד את הלחץ האטמוספרי.

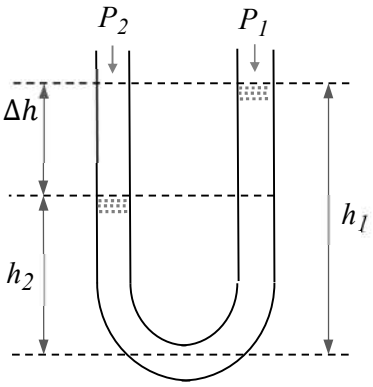


$P_A = d \cdot h$

איור מספר 18: מנומטר

P_A - הלחץ האטמוספרי.
d - צפיפות הכספית.
h - גובה עמוד הכספית (הפרש הגבהים).

7.1.3 לחץ הפרשי בשפופרת U.



$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

איור מספר 19:
לחץ הפרשי בשפופרת U

P - לחץ הנוזל בכל נקודה לאורך הכלי.
ρ - צפיפות הנוזל.
g - תאוצת כוח הכובד.
Δh - הגובה בו מחושב הלחץ ההידרוסטאטי יחסית לפני הנוזל.

7.1.4 מד לחץ המבוסס על מד מעוות - *Strain Gauge*

בשיטה זו מודדים לחצים על חומרים כאשר הלחץ עליהם הוא **בתחום האלסטי** בלבד. כאשר מפעילים כוח F על מד מעוות המחובר לחומר מסויים אז נוצר עיוות ומד המעוות משַנה את התנגדותו R יחסית ללחץ P המופעל.

מידת המעוות ϵ היא יחסית לגודל הלחץ P שפעל על שטח A ידוע. המאמץ σ נתון על ידי הנוסחה: $\sigma = E \cdot \epsilon$.

E הוא מודול יאנג, מודול האלסטיות של החומר. המאמץ σ המופעל על החומר הוא למעשה הלחץ P.

$$\sigma = P = \frac{F}{A} = E \cdot \epsilon$$

P - הלחץ הפועל על השטח.
ρ - המאמץ המופעל על השטח.
F - הכוח המייצר את הלחץ.
E - מודול יאנג של החומר הנלחץ.
ϵ - המעוות הנוצר בחומר הנלחץ.

נוסחאות עבור מדי מעוות

$$\boxed{\mathcal{E} = \frac{\Delta L}{L}}$$

$\mathcal{E}$ - עיוות מוגדר כשינוי האורך היחסי של הגוף, עקב מתיחות לאורך אחד הצירים של הגוף

$\Delta L[cm]$ - שינוי אורך של הציר, כתוצאה מהפעלת הכוח

$L[cm]$ - אורך הציר כאשר לא מופעל כוח

רגישות מד העיוות, רגישות זו חסרת יחידות

$G.F$ - רגישות מד העיוות ללא יחידות מידה

$dR[\Omega]$ - שינוי התנגדות מד העיוות

$R[\Omega]$ - התנגדות מד העיוות ללא הפעלת כוח

$$\boxed{G.F = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\mathcal{E}}}$$

7.2 מדידות ספיקה (זרימה).

7.2.1 הגדרת ספיקה.

ספיקה Q היא כמות נוזל שעוברת בצינור ליחידת זמן t. קיימים סוגים שונים של ספיקה:

- **ספיקה נפחית**: נפח הנוזל ליחידת זמן. $Q_V\left[\frac{m^3}{s}\right] = v\left[\frac{m}{s}\right] \cdot A[m^2]$.
  A - שטח חתך הצינור.
  v - מהירות הזרימה.

- **ספיקה משקלית**: משקל הנוזל ליחידת זמן. $Q_W\left[\frac{N}{s}\right] = v\left[\frac{m}{s}\right] \cdot A[m^2] \cdot \gamma\left[\frac{N}{m^3}\right]$
  A - שטח חתך הצינור.
  v - מהירות הזרימה.
  γ - משקל סגולי.

- **ספיקה מסית**: מסת הנוזל ליחידת זמן. $Q_m\left[\frac{Kg}{s}\right] = v\left[\frac{m}{s}\right] \cdot A[m^2] \cdot \rho\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
  A - שטח חתך הצינור.
  v - מהירות הזרימה.
  ρ - צפיפות הנוזל.

7.2.2 משוואת ברנולי.

משוואת ברנולי הכללית: $P + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = Constant$

משוואת ברנולי בין שתי נקודות של זורם (בחתך הצר ובחתך הרחב של הצינור):

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

P_1 - לחץ הזורם בשטח החתך הרחב.
v_1 - מהירות הזורם בשטח החתך הרחב.
h_1 - גובה נקודה נמדדת בשטח החתך הרחב.
g - תאוצת הכובד.
P_2 - לחץ הזורם בשטח החתך הצר.
v_2 - מהירות הזורם בשטח החתך הצר.
h_2 - גובה נקודה נמדדת בשטח החתך הצר.
ρ - צפיפות הנוזל.

7.2.3 משוואת ברנולי בין שתי נקודות של זורם כאשר $P_1 = P_2$.

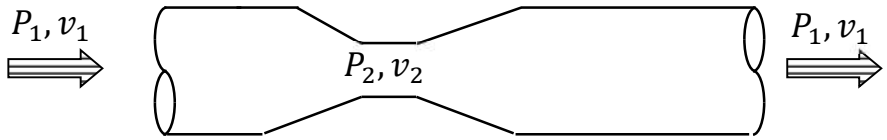
$$g \cdot (h_1 - h_2) = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad \rightarrow \quad \Delta h = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g}$$

ידוע כי הספיקה שווה לכל אורך הצינור: $Q_1 = Q_2 = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$ לכן:

$$\Delta h = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]$$

A_1 - שטח חתך הצינור בחלק הרחב. A_2 - שטח חתך הצינור בחלק הצר.
v_2 - מהירות הזורם בשטח החתך הצר. g - תאוצת הכובד.
Δh - הפרש הגבהים בין שתי נקודות המדידה.

7.2.4 שימוש בחוק ברנולי במדידת ספיקה בעל הצרה קבועה.



איור מספר 20: ספיקה בצינור בעל הצרה קבועה

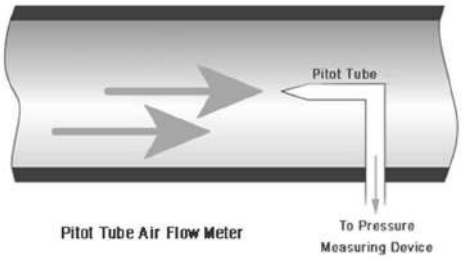
P_1 - לחץ הזורם בשטח החתך הרחב. P_2 - לחץ הזורם בשטח החתך הצר.
v_1 - מהירות הזורם בשטח החתך הרחב. v_2 - מהירות הזורם בשטח החתך הצר.
ρ - צפיפות הנוזל.

נוסחת ברנולי במדידת ספיקה בעלת הצרה קבועה

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \quad \text{או} \quad \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho}$$

7.2.5 צינור פיטו – *Pitot Tube* .

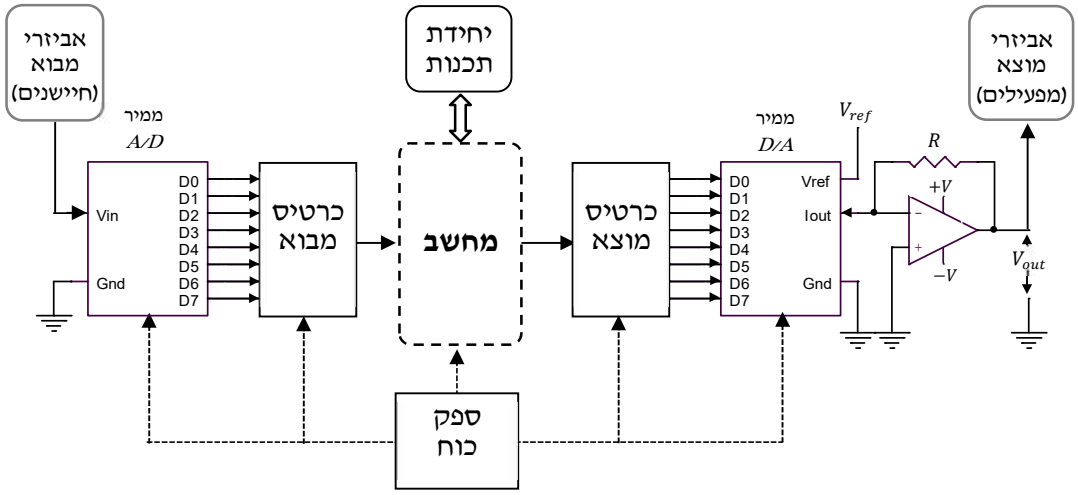
צינור פיטו הוא מכשיר למדידת לחץ המשמש למדידת זרימת נוזל או גז. צינור פיטו משמש בעיקר למדידת מהירות כלי טיס ולמדידת מהירויות של אוויר או גז בהתקנים תעשייתיים.



איור מספר 21:
צינור פיטו למדידת מהירות גז או אוויר

8. חיבור למערכת בקרה ספרתית

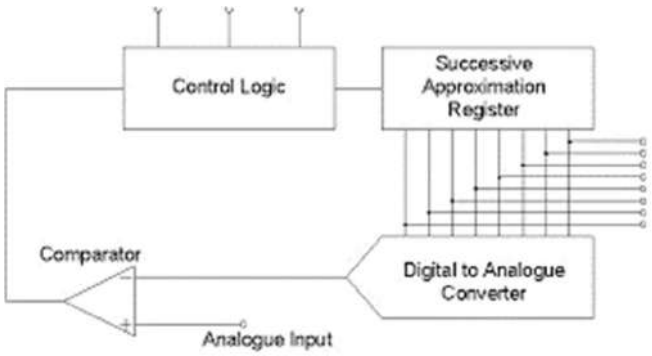
8.1 תיאור מלבני של מערכת בקרה מבוקרת מחשב.



איור מספר 22: סכמה מלבנית של מערכת בקרה מבוקרת מחשב

8.2 מתמר *A/D*.

מתמר ***A/D*** מתמיר (משנה) מתח תקבילי ***A****nalog* לאות ספרתי ***D****igital*. קיימות שיטות שונות של התמרה. באיור להלן מתוארת התמרת מתמר A/D בשיטת קירוב מתקדם *Successive Approximation*.



איור מספר 23: מבנה של מתמר *A/D* הפועל בשיטת *Successive Approximation*

8.3 כושר ההבחנה - *Resolution* של מתמר *A/D*.

$$Res = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n - 1}$$

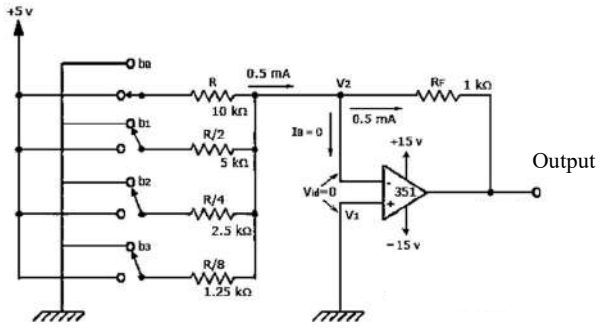
- V_{max} - המתח המרבי במבוא המתמר.
- V_{min} - המתח המזערי במבוא המתמר.
- n - מספר סיביות המתמר. **ככל שמספר הסיביות גדול יותר, כושר ההבחנה יותר טוב.**

8.4 חישוב זמן התמרה במתמר *A/D*.

זמן ההתמרה t של מתמר A/D מוגדר כמכפלת מספר מחזורי השעון - x בערך מחזור השעון - T. המונה של מתמר ה- A/D סופר את מספר מחזורי השעון מרגע התחלת ההמרה עד שמתח המוצא מה- A/D גדול ממתח המבוא V_{in}. הנוסחה היא: $t = x \cdot T$. ככל שמתח המבוא גדול יותר זמן ההמרה גדול יותר. זמן ההמרה המרבי מתקבל עבור מתח מבוא מרבי ומחושב לפי: $t_{max} = (2^n - 1) \cdot T$, n הוא מספר סיביות המתמר.

8.5 מתמר *D/A*.

מתמר ***D/A*** מתמיר (משנה) אות ספרתי ***D****igital* למתח תקבילי ***A****nalog*. קיימות שיטות שונות של התמרה. באיור להלן מתוארת התמרת D/A באחת השיטות.



איור מספר 24: מבנה של מתמר *D/A*

8.5 כושר ההבחנה - *Resolution* של מתמר *D/A*.

$$Res = \frac{2^n - 1}{V_{max} - V_{min}}$$

V_{max} - המתח המרבי במוצא המתמר.
V_{min} - המתח המזערי במוצא המתמר.
n - מספר סיביות המתמר. **ככל שמספר הסיביות גדול יותר, כושר ההבחנה יותר טוב.**

חישוב הרזולוציה: $V_{LSB} = \frac{V_{ref}}{2^N}$

חישוב מתח המוצא: $\boxed{V_O = V_{LSB} \cdot (b_1 \ldots b_n)_{10}}$

כאשר $(b_1 \ldots b_n)_{10}$ הינו הערך העשרוני של המילה הבינרית בכניסה.

8.7 **נוסחאות נוספות עבור מתמר *A/D***

חישוב הרזולוציה: $V_{LSB} = \frac{V_{ref}}{2^N}$

שלבי עבודה בחישוב המילה הבינארית ביציאה (כאשר נתון מתח הכניסה):

1) נחלק את מתח הכניסה ברזולוציה: $X = \frac{V_{in}}{V_{LSB}}$
2) נעגל את המספר שהתקבל כלפי **מטה**: $\tilde{X}$
3) נמיר את המספר שהתקבל לבסיס 2: $(\tilde{X})_2$

9 מפעילים

9.1 ממסר מכני - *Mechanical Relay*.

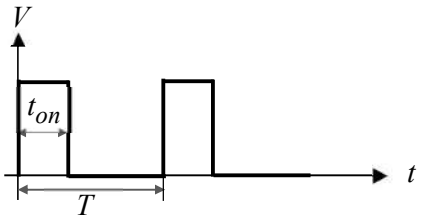
הממסר מאפשר הפעלת מכשירים הצורכים מתחים ו/או זרמים גבוהים. הממסר המכני הוא רכיב חשמלי הבנוי משני חלקים: סליל אלקטרו-מגנטי ומפסק (מתג). כאשר מועבר זרם חשמלי בסליל, נוצר שדה מגנטי המושך את המגעים של המתג ופותח או סוגר את מעגל חשמלי, וכך מנתקים או מפעילים מכשיר חשמלי או מערכת כלשהי.

9.2 ממסרים מצב מוצק - *Solid State Relay*.

ממסר במצב מוצק אינו יכול לשלוט על עוצמת הזרם אלא יש לו שני מצבים פשוטים - הפעלה וכיבוי. הממסר מאפשר לזרם לעבור דרכו. הממסר יכול להעביר זרמים או מתחים גבוהים, והוא מתאים אף לצרכני חשמל "כבדים" כגון מזגן או דוד חשמלי. קיימים סוגים שונים של ממסרים במצב מוצק.

9.3 ויסות הספק בעזרת *PWM*.

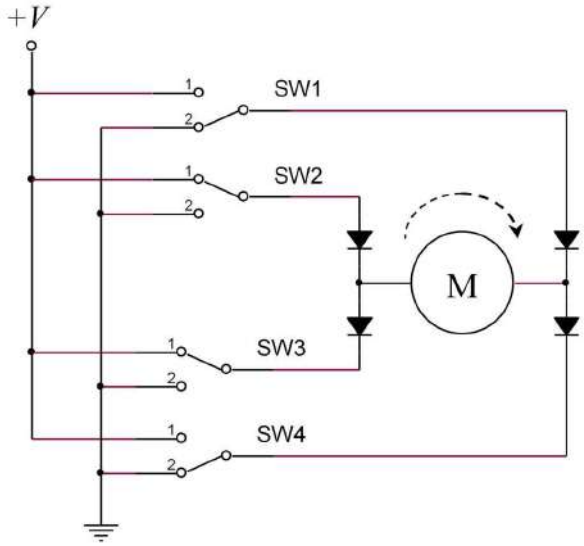
PWM-Pulse Width Modulation היא שיטת אפנון המאפשרת בקרה על הספק ממוצא דיגיטלי. בשיטה זו משנים את ה- *Duty Cycle* של האות הדיגיטלי. ה-***D.C.*** - ***Duty Cycle*** של האות מוגדר כיחס בין t_{on} לבין T כפי שניתן לראות באיור להלן ולפי הנוסחה: $D.C. = \frac{t_{on}}{T} \cdot 100\%$.



איור מספר 25: זמני אות ספרתי

9.4 בקרה על פעולת מנוע *DC* בעזרת גשר *H*.

פעולת מנוע DC ניתנת לבקרה בעזרת גשר H. הגשר בנוי מארבע דיודות כפי שמתואר באיור להלן. באמצעות ארבעת המתגים: $SW1 \div SW4$ ניתן לקבוע את פעולת המנוע. מיתוג ארבעת המתגים במצבים השונים מאפשרים לסובב את המנוע ימינה, שמאלה או לעצור אותו.



איור מספר 26:
בקרה על פעולת מנוע *DC* בעזרת גשר *H*.

פרק ג'

בקרים מתוכנתים וממשק אדם מכונה

1. מושגים בסיסיים בבקרים מתוכנתים וממשק אדם מכונה

***PLC* (*Programmable Logic Controller*)** - בקר מתוכנת.

***I/O* (*In/ Out*)** - כרטיסי כניסה ויציאה לבקר (קלט / פלט).

***CPU* (*Central Processing Unit*)** – יע"מ (יחידת עיבוד מרכזית), "המוח" של הבקר.

Visualization - הגדרה כללית לממשק גראפי להצגה של משתני הבקר.

***HMI* (*Human Machine Interface*)** - ממשק אדם מכונה, פנל להצגה גראפית של משתני הבקר.

***SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*)** – תוכנה לשליטה, לתצוגה ולאיסוף נתונים.

תפ"מ (תיאור פעולות מערכת/ מתקן) – תיאור מילולי של פעולת המתקן או התהליך עבורו כותבים את תוכנת הבקרה.

2. מושגי יסוד בוליאניים

2.1 <u>בסיסי ספירה והמרות בסיסים</u>

מקובל להשתמש ב- 4 בסיסי ספירה עיקריים:
בסיס עשרוני (*Decimal*) – בסיס 10- הבסיס השימושי בחיי היום- יום;
בסיס בינארי (*Binary*) – בסיס 2- הבסיס הספרתי, שימושי "בעולם הדיגיטלי";
בסיס אוקטאלי (*Octal*) – בסיס 8- שימושי "לרישום מקוצר" של מספרים בבסיס בינארי;
בסיס הקסה- דצימלי (*Hexadecimal*) – בסיס 16 - שימושי "לרישום מקוצר" של מספרים בבסיס בינארי.

באיור 1 מוצגת טבלה המפרטת את הספרות הקיימות בבסיסים הנפוצים.

בסיס (radix)	שם	ספרות בשימוש
2	Binary	0,1
8	Octal	0,1,2,3,4,5,6,7
10	Decimal	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9
16	Hexadecimal	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F

איור מספר 1: הספרות בבסיסי הספירה הנפוצים

במספרים בהם הבסיס ***r*** גדול מ- 10, כמו בבסיס 16, נהוג להשתמש באותיות הלועזיות *A, B, C, D, E , F* כתחליף לספרות.
במקרה של בסיס 16, נשתמש במפתח ההמרה המוצג באיור 2.

בסיס 16	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F
בסיס 10	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10, 11, 12, 13, 14, 15

איור מספר 2: מפתח המרה בין בסיס 16 ובסיס 10

באיור 3 מוצגת טבלה להשוואה של מספרים בבסיסים הנפוצים:

Decimal	Binary	Octal	Hexadecimal
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10

איור מספר 3: השוואה של מספרים בין הבסיסים

המרה של מספרים בין הבסיסים הנפוצים יכולה להתבצע בצורות הבאות:

- המרה בעזרת מחשבון כיס (יש להעביר את המחשבון ל- *mode* המתאים ולהשתמש להמרה במקשים *DEC,BIN,OCT,HEX*).
- המרה על ידי שימוש באחת משיטות ההמרה המפורטות בהמשך.

להמרה של מספר שלם **מבסיסים שונים לבסיס 10** נשתמש בנוסחה הבאה:

$$(a_n a_{n-1}..a_3 a_2 a_1 a_0)_r = a_n \cdot r^n + a_{n-1} \cdot r^{n-1} + .. + a_3 \cdot r^3 + a_2 \cdot r^2 + a_1 \cdot r^1 + a_0 \cdot r^0$$

a -מייצגת ספרה בבסיס r

r -מייצג את הבסיס

n -מסמן מיקום של ספרה במספר

ההמרה מתבצעת על ידי **הכפלה** של כל ספרה במקדם, המורכב מבסיס הספירה בחזקת המיקום של הספרה.

להמרה של מספר שלם **מבסיס עשרוני לבסיסים אחרים** נשתמש בשיטת "החלוקה בבסיס ***r***":

נחלק את המספר השלם ב- r. נרשום את המנה (תוצאת החילוק) ואת השארית. את המנה השלמה נחלק שוב לבסיס r ונקבל מנה חדשה ושארית. את המנה שהתקבלה נחלק שוב בבסיס r ונקבל מנה חדשה ושארית. נמשיך את תהליך החלוקה עד שנקבל מנה 0. אוסף השאריות שהתקבלו בתהליך החילוק מרכיב את המספר בבסיס r. השאריות נכתבות מהשארית האחרונה עד השארית הראשונה שהתקבלה.

להמרה מהירה של מספרים בין בסיסים, נשתמש בשיטה שמתאימה רק לבסיסים שיש ביניהם זיקה של חזקה.
בצורה זו ניתן להמיר מספרים בין בסיס 2 ובסיס 8 ובין בסיס 2 ובסיס 16.
ההמרה מתבצעת בעזרת הטבלה באיור 4.

2	16
0000	0
0001	1
0010	2
0011	3
0100	4
0101	5
0110	6
0111	7
1000	8
1001	9
1010	A
1011	B
1100	C
1101	D
1110	E
1111	F

2	8
000	0
001	1
010	2
011	3
100	4
101	5
110	6
111	7

איור מספר 4: המרות מקוצרות בין בסיסים שימושיים

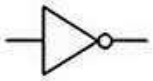
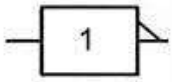
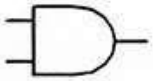
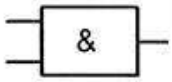
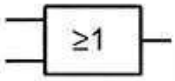
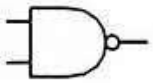
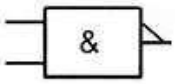
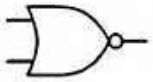
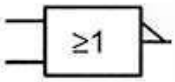
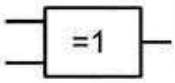
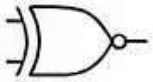
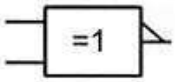
המרה של מספר בינארי למספר אוקטלי מתבצעת על ידי חלוקת המספר הבינארי, מימין לשמאל, לקבוצות של 3 ספרות. כל קבוצה מתורגמת בעזרת הטבלה באיור 4, לספרה בבסיס 8.
המרה הפוכה מתבצעת על ידי תרגום של כל ספרה במספר בבסיס 8, ל-3 ספרות בבסיס 2, לפי אותה טבלה.

המרה של מספר בינארי למספר הקסה דצימלי מתבצעת על ידי חלוקת המספר הבינארי, מימין לשמאל, לקבוצות של 4 ספרות. כל קבוצה מתורגמת בעזרת הטבלה באיור 4, לספרה בבסיס 16.
המרה הפוכה מתבצעת על ידי תרגום של כל ספרה במספר בבסיס 16, ל-4 ספרות בבסיס 2, לפי אותה טבלה.

2.2 פעולות בוליאניות, שערים לוגיים וטבלאות אמת.

פעולות בוליאניות מתבצעות על משתנים בוליאניים ומפיקות תוצאה בוליאנית. משתנה בוליאני הוא משתנה המקבל אחד משני מצבים: "0" או "1" , המוגדרים גם כ- *FALSE* או *TRUE* ו- כ- *OFF* או *ON*.
קיימות 3 פעולות בוליאניות בסיסיות. בנוסף קיימות 4 פעולות שימושיות שמורכבות מהפעולות הבסיסיות.

באיור 5 מוצגות הפעולות הבוליאניות. לכל פעולה מוצג הסימון המקובל שלה, שער לוגי (בשני תקנים נפוצים), הביטוי הבוליאני המתאים, טבלת האמת.

פעולה בוליאנית	סימון תקן אמריקאי ANSI	סימון תקן בינלאומי IEC	טבלת אמת	ביטוי בוליאני
NOT gate			A | F 0 | 1 1 | 0	$F=\overline{A}$
AND gate			A B | F 0 0 | 0 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1	$F=A \cdot B$
OR gate			A B | F 0 0 | 0 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 1	$F=A+B$
NAND gate			A B | F 0 0 | 1 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 0	$F=\overline{A \cdot B}=\overline{A}+\overline{B}$
NOR gate			A B | F 0 0 | 1 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 0	$F=\overline{A+B}=\overline{A} \cdot \overline{B}$
EX-OR gate			A B | F 0 0 | 0 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 0	$F=A \oplus B$
EX-NOR gate			A B | F 0 0 | 1 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1	$F=\overline{A \oplus B}$

איור מספר 5: פעולות בוליאניות וסימוני שערים לוגיים

2.3 תרגום של פעולות בוליאניות לדיאגרמת סולם.

כל אחת מהפעולות הבוליאניות ניתנת להצגה בתור מעגל מתגים חשמלי (מעגל פיקוד), הנקרא דיאגרמת סולם.
בדיאגרמת סולם אנו משתמשים בסימנים של מגעים:

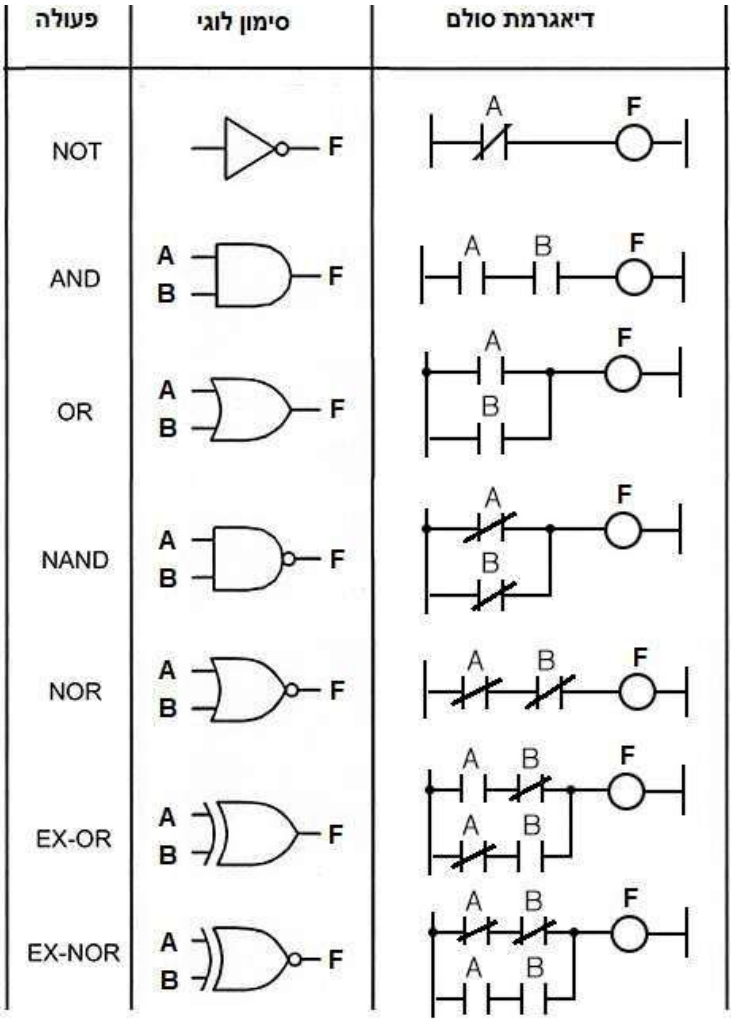
מגע רגיל פתוח *N.O.* (*Normally Open*)
מגע רגיל סגור *N.C.* (*Normally Closed*)
סימן של פונקציה (תוצאה/ צרכן))

הסימנים העיקריים מופיעים באיור 6.



איור מספר 6: הסימנים העיקריים בדיאגרמת סולם

באיור 7 מוצג הקשר בין הפעולה הבוליאנית לבין מעגל המתגים בדיאגרמת סולם.



איור מספר 7: תרגום פעולות בוליאניות לדיאגרמת סולם

3. יחידות מידע בסיסיות וגדלים של זיכרון

3.1 יחידות הזיכרון הבסיסיות

יחידות הזיכרון בשימוש הן: *Bit*, *Byte*, *Word*, *Double Word*. לעיתים משתמשים גם ב- *Long Word*.

Bit **(*Binary Digit*)** מוגדרת כיחידת זיכרון לספרה אחת. ניתן לאחסן בביט אחד מתוך שני ערכים, 0 או 1.

Byte מוגדר כמספר בן 8 ביטים. ניתן לאחסן ב-*byte* אחד מתוך 256 ערכים ($2^8=256$): 0-255.

Word מוגדר כמספר בן 16 ביטים (שני *bytes*). ניתן לאחסן ב- *word* אחד מתוך 65,536 ערכים: 0- 65,535.

Double Word מוגדר כמספר בן 32 ביטים (ארבעה *bytes*). ניתן לאחסן בו אחד מתוך 4,294,967,296 ערכים.

Long Word מוגדר כמספר בן 64 ביטים (שמונה *bytes*). ניתן לאחסן בו אחד מתוך 2^{64} ערכים.

3.2 גדלים של זיכרון

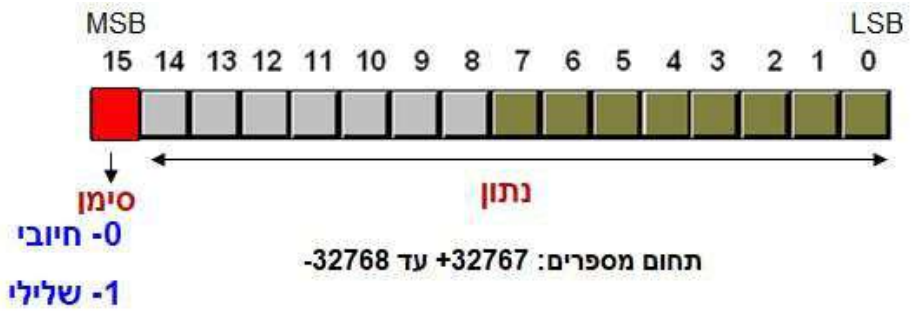
זיכרון נמדד ביחידות של ***bytes***. רכיב זיכרון אחד מכיל אלפים או מיליונים ויותר של *bytes*.
להגדרה של גודל הזיכרון משתמשים ביחידות המידה, *kilo*, *Mega*,,*Giga* ,*Terra* המחושבות בצורה בינארית:

1Kbytes= 1024 bytes (2^{10}*bytes*)
1Mbytes= 1,048,576 bytes (2^{20} *bytes*)
1 Giga bytes$= 2^{30}$ *bytes*
1Terra bytes$=2^{40}$ *bytes*

4. סוגי נתונים בשימוש בבקרים (*Data types*)

מבחינים בשני סוגים של נתונים ספרתיים בתכנות בקרים:
1. נתון מסוג ***Integer***
2. נתון מסוג ***Floating Point*** או ***Real***

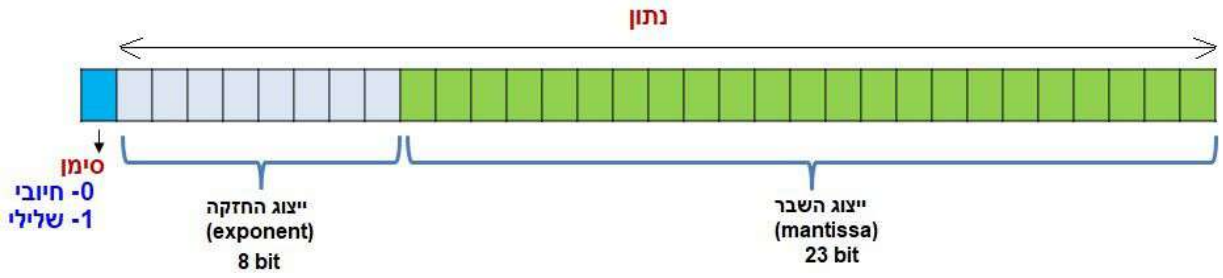
1) נתון מסוג *Integer* מציג מספר בינארי שלם, עם ספרת סימן. הנתון מאוחסן ביחידת זיכרון בגודל *word*.
הספרה המשמעותית ב- *word* (*msb*) היא ספרת הסימן. 15 הספרות האחרות ב *word* מכילות את המספר עצמו.
מבנה של נתון מסוג *Integer* מוצג איור מספר 8.



איור מספר 8: מבנה של נתון מסוג *INT*

מספרים בינאריים שלמים מוצגים גם ביחידות מידע שונות מ- *word*. הן מוצגות באיור מספר 10.

2) נתון מסוג *Floating point* או *Real* מציג מספר בינארי עם שבר עשרוני. המספר מחולק לשלושה חלקים:
חלק המייצג את השבר, חלק המייצג את החזקה וחלק המייצג את הסימן. הוא מוגדר לפי תקן הנקרא *IEEE754*. .
הנתון מאוחסן ביחידת זיכרון בגודל *Double word*.
מבנה של נתון מסוג *real* מוצג באיור מספר 9.



איור מספר 9: מבנה של נתון מסוג *Real/ Floating Point*.

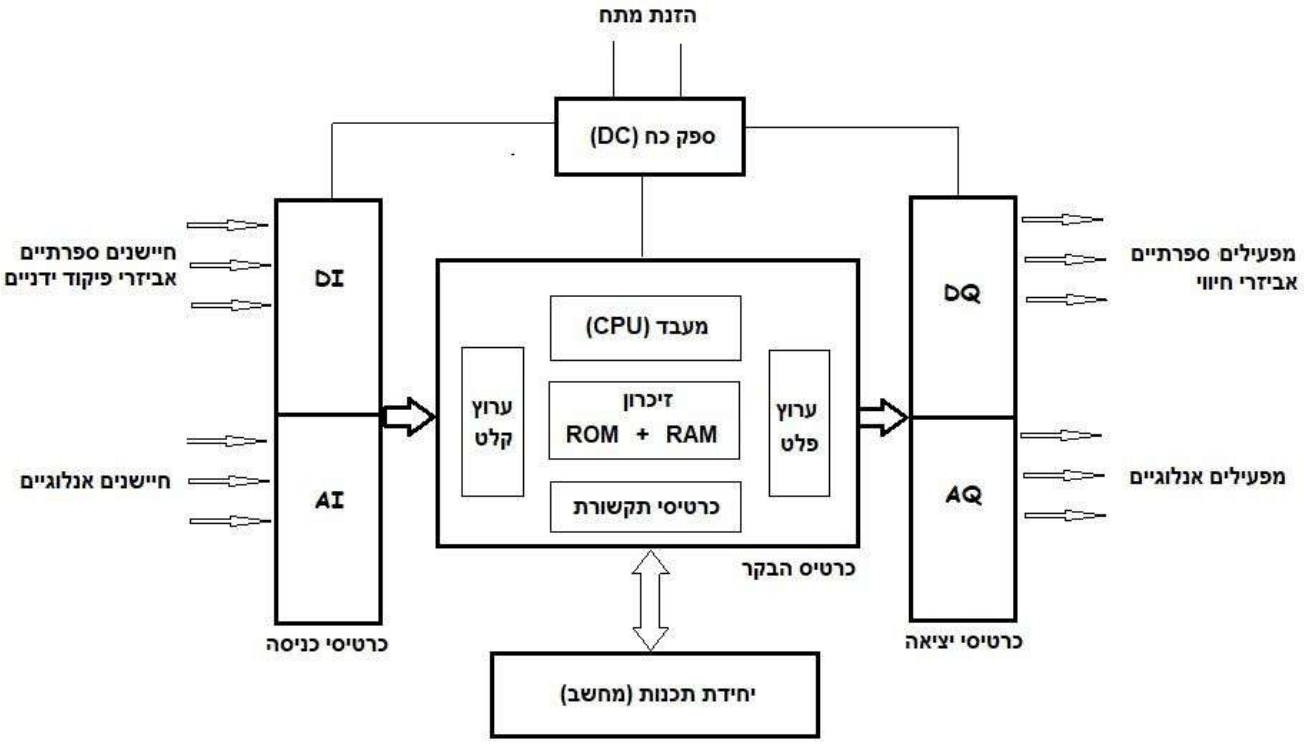
באיור מספר 10 מוצגת טבלה עם סוגי הנתונים שמקובל להשתמש בהם בבקרים מתוכנתים. בטבלה מוצגים שם הנתון, גודל הנתון וטווח המספרים עבורו.

סוג נתון	גודל	טווח מספרים
Bool (Boolean)	1 bit	0 to 1
Byte (byte)	8 bits (1 byte)	16#00 to 16#FF
Word (word)	16 bits (2 bytes)	16#0000 to 16#FFFF
DWord (double word)	32 bits (4 bytes)	16#00000000 to 16#FFFFFFFF
SInt (short integer)	8 bits (1 byte)	-128 to 127
USInt (unsigned short integer)	8 bits (1 byte)	0 to 255
Int (integer)	16 bits (2 bytes)	-32,768 to 32,767
UInt (unsigned integer)	16 bits (2 bytes)	0 to 65,535
DInt (double integer)	32 bits (4 bytes)	-2,147,483,648 to 2,147,483,647
UDInt (unsigned double integer)	32 bits (4 bytes)	0 to 4,294,967,295
Real (real or floating point)	32 bits (4 bytes)	$+/-1.18 \times 10^{-38}$ to $+/-3.40 \times 10^{38}$

איור מספר 10: סוגי הנתונים בהם משתמשים בבקרים.

5. מבנה עקרוני של בקר מתוכנת

באיור 11 מוצג תרשים מלבני של הבקר המתוכנת.



איור מספר 11: תרשים מלבני של בקר מתוכנת.

כפי שניתן לראות באיור, כרטיס הבקר מורכב ממספר רכיבים:

- יחידת העיבוד (מיקרו מעבד).
- יחידות זיכרון לאחסון התוכנה ונתוני הבקר- מורכבות מזיכרון צרוב *ROM* (*Read only memory*) ומזיכרון נדיף *RAM* (*Random access memory*).
- ערוצי קלט ופלט להעברת מידע (פנימי) בין המעבד והזיכרון לבין כרטיסי הכניסה והיציאה של הבקר.
- כרטיסי תקשורת לחיבור הבקר אל המחשב, לצורך תכנות ואל צגי *HMI* וציוד בקרה אחר.

כרטיסי הכניסה מורכבים מכרטיסים דיגיטליים (*DI*) וכרטיסים אנלוגיים (*AI*). כרטיסי היציאה מורכבים מכרטיסים דיגיטליים (*DQ*) וכרטיסים אנלוגיים (*AQ*).

ספק הכוח ממיר את מתח ההזנה לבקר (מתח ישר או מתח חילופין- רשת) למתחי העבודה של רכיבי הבקר.

יחידת התכנות, בדרך כלל מחשב *PC* מאפשרת גישה לזיכרון הבקר לצורך תכנות וקריאה של נתונים, בעזרת תוכנה ייעודית שמספק יצרן הבקר.

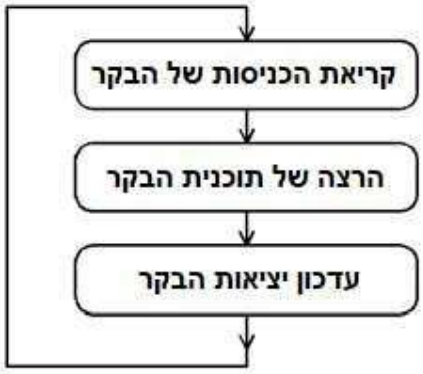
6. אופן פעולה של בקר מתוכנת

המעבד של הבקר (*CPU*) אחראי על תפעול שוטף ורציף של הבקר. אחת המטלות העיקריות שלו היא **"להריץ" את תוכנית הבקרה**, שנכתבה על ידי מתכנת הבקר ושמורה בזיכרון.
המעבד מריץ את התוכנית, פקודה אחרי פקודה (לפי סדר רישום הפקודות), בצורה מחזורית. הוא מבצע את ההוראות הנרשמות בפקודות ושולח את תוצאות החישוב שהוא מבצע לזיכרון הפנימי שלו.
התוצאות נרשמות בזיכרון הנתונים ובהמשך התהליך נשלחות גם אל כרטיסי היציאה של הבקר.

כדי לקשר את התוכנית לנתונים המתקבלים מכרטיסי הכניסה ולנתונים הנשלחים אל כרטיסי היציאה, המעבד קורא את הנתונים המתקבלים מכרטיסי הכניסה ושולח תוצאות והוראות אל כרטיסי היציאה.

פעולות אלו מתבצעות בצורה רציפה ומחזורית הנקראת **מחזור סריקה** (***Scan Cycle***) ומתבצעות בתדירות התלויה בשעון המעבד שנמצא בבקר. הסריקה מתבצעת בצורה אינסופית, כל זמן שהבקר מחובר למתח ההפעלה ונמצא במצב הרצה, מצב הנקרא מצב ***RUN***.

איור מספר 12 מציג את מחזור הסריקה של הבקר.



איור מספר 12: מחזור הסריקה של הבקר.

הערה: מחזור הסריקה כולל גם שלבים נוספים שלא תוארו באיור: פעולות דיאגנוסטיקה לאיתור תקלות ושגיאות בהרצת הבקר ותקשורת עם יחידת התכנות ועם ציוד היקפי המחובר לבקר.

7. חישוב זמן סריקה של בקר

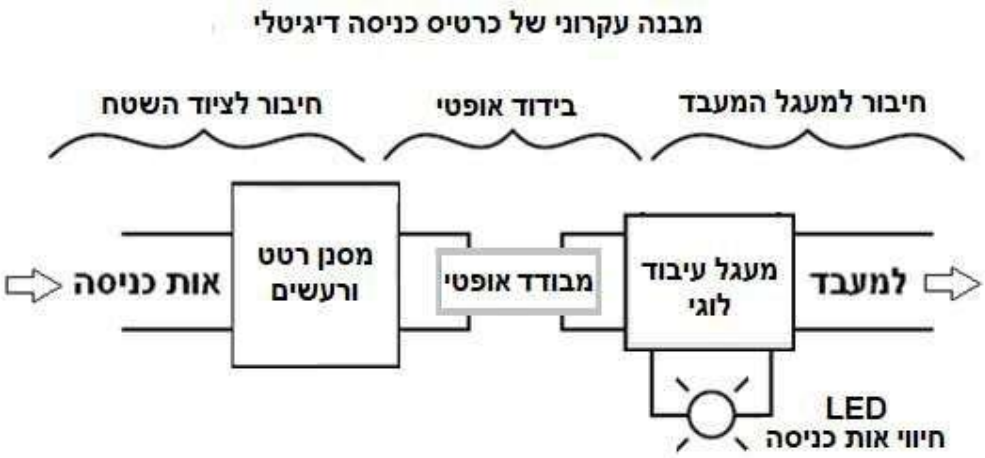
זמן הסריקה מוגדר כפרק הזמן שהבקר מבצע סריקה אחת (*Single scan*). בחוברת זו נתייחס לשלבי הסריקה שמתוארים באיור מספר 11.
לחישוב זמן הסריקה של הבקר נחבר את **זמן הגישה של הבקר לכרטיסי הכניסה והיציאה** עם **זמן הביצוע של פקודות התוכנה**.
שימו לב, זמן הסריקה של התוכנה תלוי במספר הפקודות (למעשה, גודל הזיכרון שמאחסן את הפקודות).
במקרים רבים מגדירים את זמן הביצוע עבור ***1Kbyte*** **פקודות**.

8. כרטיסי כניסה ויציאה ספרתיים (דיגיטליים) בבקר

8.1 כרטיסי כניסה ספרתיים.

כרטיסי כניסה ספרתיים בבקרים, פועלים בדרך כלל במתח פיקוד *24 VDC*. ישנם גם כרטיסים שפועלים במתח *12 VDC* ובמתח *230 VAC*.
בחוברת הנוסחאות נתייחס לכרטיסים הנפוצים שפועלים במתח ***24 VDC***.

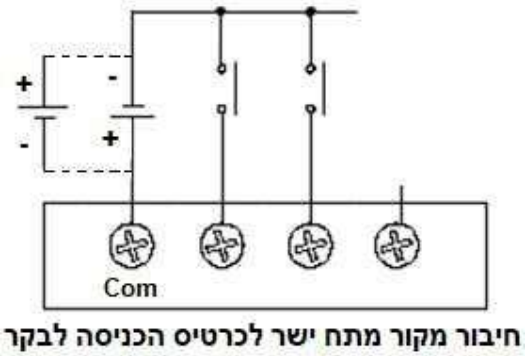
באיור מספר 13 מוצג מבנה מלבני של כרטיס כניסה ספרתי לבקר. נהוג לסמן אותו באתיות ***DI*** (*Digital Input*). שימו לב ליחידת הבידוד בין האות החשמלי המתקבל מציוד השטח לבין האות הלוגי בו פועלים המעגלים האלקטרוניים.



איור מספר 13: מבנה מלבני של כרטיס כניסה לבקר

8.2 צורות החיבור של כרטיסי כניסה למתח ישר.

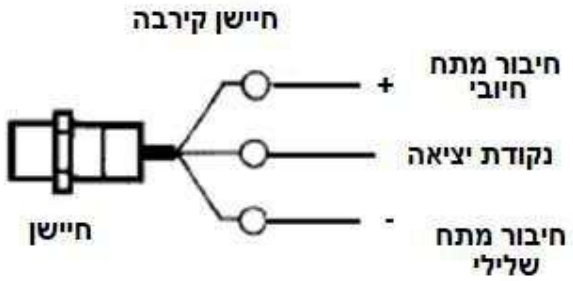
מבחינים בשתי צורות חיבור של ציוד קצה לכרטיסי הכניסה לבקר. צורות החיבור נבדלות בקוטביות החיבור של מעגל הכניסה לבקר.
צורת חיבור אחת נקראת ***Source***. בצורת חיבור זו ההדק החיובי של מקור המתח מחובר לנקודה המשותפת של חיבורי הכניסות בכרטיס (הכרטיס "דוחף" זרם החוצה).
צורת חיבור שניה נקראת ***Sink***. בצורת חיבור זו ההדק השלילי של מקור המתח מחובר לנקודה המשותפת של חיבורי הכניסות בכרטיס (הכרטיס "מושך" זרם פנימה).
שתי צורות החיבור מוצגות באיור מספר 14.



איור מספר 14: צורות החיבור של מקור המתח לכרטיס הכניסה בבקר

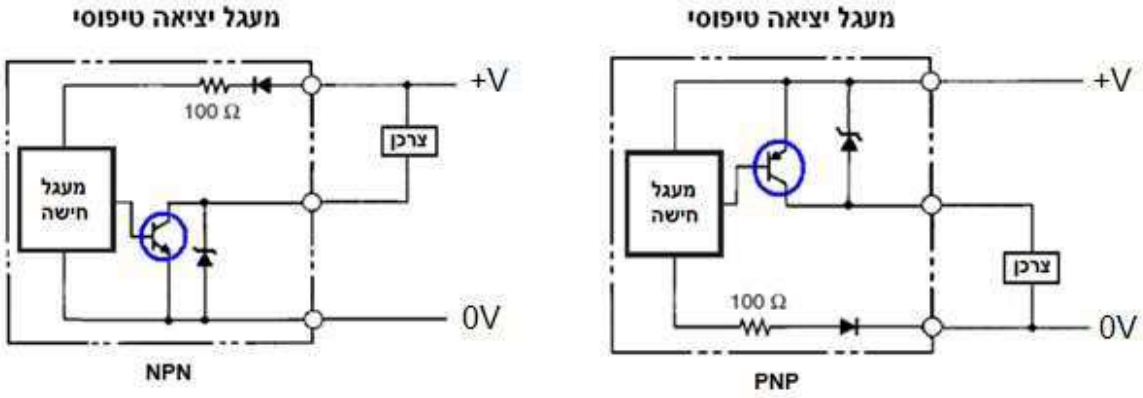
8.3 <u>חיבורים של חיישן קירבה בעל אות מוצא ספרתי</u> .

חיישני הקרבה שמוצגים בחוברת הנוסחאות הם חיישנים בעלי 3 חוטי חיבור. איור מספר 15 מציג את תפקידו של כל אחד מחוטי החיבור.



איור מספר 15: תיאור החיבורים של חיישן קירבה עם 3 חוטים

בכל חיישני הקירבה הדיגיטליים (כלומר חיישנים שמפיקים אות בינארי של "0" או "1") , שפועלים במתח ישר יש מעגל מיתוג במוצא, הכולל אחד משני סוגי טרנזיסטורים נפוצים. איור מספר 16 מציג את שתי צורות המיתוג הנפוצות, מיתוג עם טרנזיסטור *NPN* ומיתוג עם טרנזיסטור *PNP*.



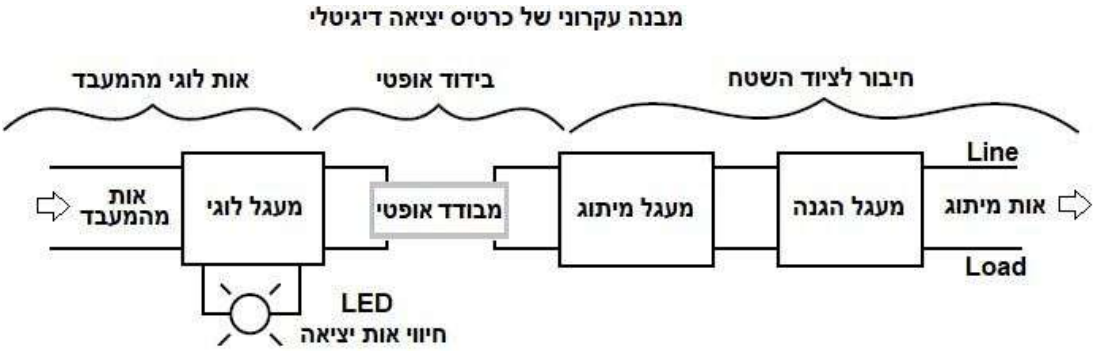
איור מספר 16: מעגל מיתוג טיפוסי של חיישן קירבה עם 3 חוטים

שימו לב, : הצרכן שמתואר באיור, יכול להיות גם כרטיס כניסה לבקר. בחיישן "מסוג" *NPN*, החיישן ממתג אות (-) לצרכן ובחיישן מסוג *PNP*, החיישן ממתג אות (+) לצרכן.

8.4 כרטיסי יציאה ספרתיים .

כרטיסי יציאה ספרתיים בבקרים **ממתגים** רכיבי פיקוד המחוברים אליהם. אות המוצא המתקבל תלוי בסוג כרטיס המוצא. כרטיסי יציאה מסוג **יציאת *DC*** "מעבירים" אות מיתוג במתח *24 VDC*. כרטיסי יציאה מסוג **יציאת ממסר** (*Relay*) "ממתגים אות מצח חיצוני המחובר דרכם.

באיור מספר 17 מוצג מבנה מלבני של כרטיס יציאה ספרתי בבקר. נהוג לסמן אותו באתיות ***DQ*** (*Digital Output*).שימו לב ליחידת הבידוד בין האות הלוגי בו פועלים המעגלים האלקטרוניים ובין האות החשמלי הנשלח אל ציוד השטח.



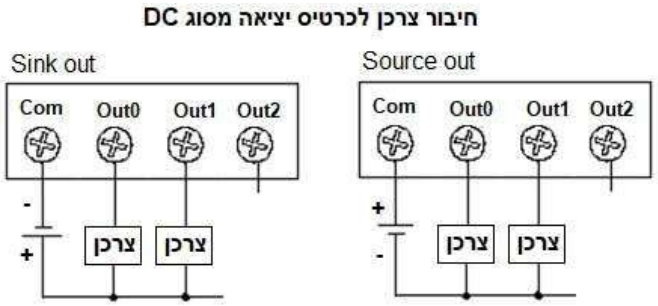
איור מספר 17: מבנה מלבני של כרטיס יציאה בבקר

8.5 צורות החיבור אל כרטיסי יציאה למתח ישר.

בדומה לכרטיסי הכניסה הספרתיים ולמעגלי המיתוג במוצא חישני הקירבה, גם לכרטיסי היציאה יש שתי צורות מיתוג : צורת מיתוג מסוג *sink* וצורת מיתוג מסוג *source*.

חיבור מסוג *sink* מאפשר "מעבר" אל נקודת ה (-) של מקור המתח, המפעיל את הצרכן ואת כרטיס היציאה.
חיבור מסוג *source* מאפשר "מעבר" אל נקודת ה (+) של מקור המתח, המפעיל את הצרכן ואת כרטיס היציאה.

באיור מספר 18 מוצגות צורות החיבור של כרטיס היציאה.

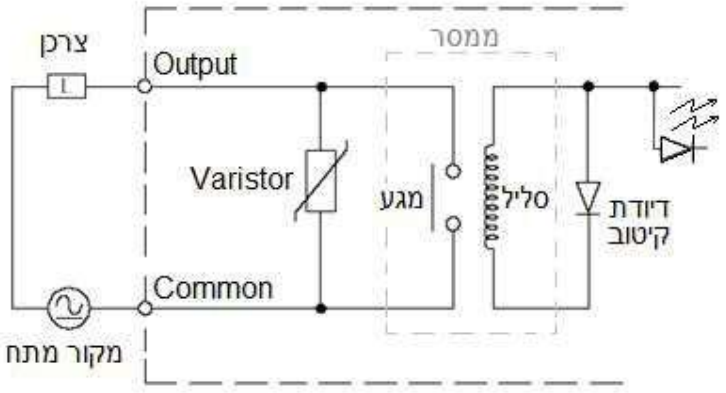


איור מספר 18: צורות החיבור של צרכן אל כרטיס היציאה בבקר

8.6 צורות החיבור אל כרטיס יציאה מסוג ממסר.

כרטיס יציאה מסוג ממסר (*Relay*) כולל ממסר אלקטרו מכני המשמ כיחידת המיתוג. בכרטיס מסוג ממסר יש בידוד בין האות הלוגי לבין אות המתח של הצרכן. המעגל הלוגי מפעיל את סליל הממסר, כתוצאה מכך מגע פנימי של הממסר, מסוג *N.O.* , נסגר. סגירת המגע "סוגרת" את מעגל הפעלת הצרכן, המחובר לנקודת היציאה.

באיור מספר 19 מוצג חיבור צרכן לכרטיס יציאת ממסר. ניתן למתג צרכן הפוע ל במתח ישר וגם צרכן הפועל במתח חילופין.



איור מספר 19: צורות החיבור של צרכן אל כרטיס היציאה בבקר

9. כרטיסי כניסה ויציאה תקביליים(אנלוגיים) בבקר

9.1 אותות אנלוגיים תקניים.

באיור מספר 20 מוצגים האותות התקניים המקובלים במערכות בקרה. האותות המודגשים הם האותות הנפוצים ביותר.

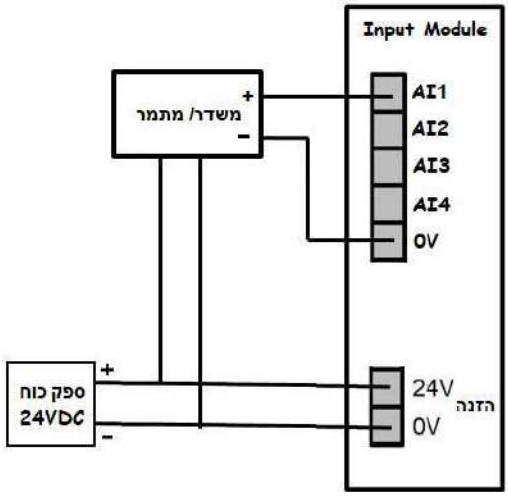
זרם:
4-20 mA ⇦
0-20 mA
+/- 20 mA

מתח:
0-10 VDC ⇦
0-5 VDC
1-5 VDC
+/-10VDC

איור מספר 20: אותות תקניים במערכות בקרה

9.2 כרטיס כניסה אנלוגי (*A/D- Analog to Digital*).

באיור 21 מוצג כרטיס כניסות אנלוגיות של בקר. באיור מתואר חיבור מתמר לאחת הכניסות.



איור מספר 21: כרטיס כניסה אנלוגי

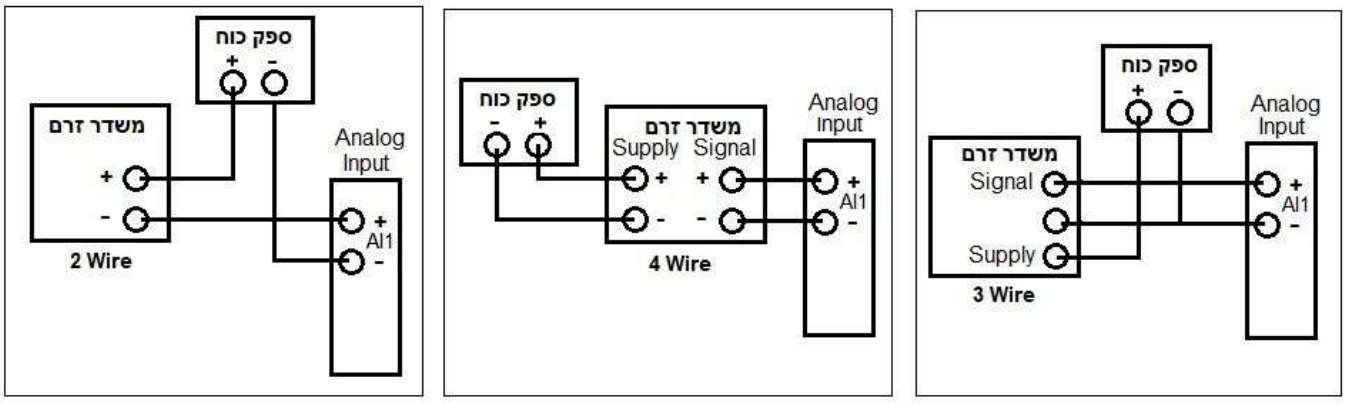
כרטיס הכניסה לבקר מקבל בדרך כלל מתח הזנה של *24VDC*. המתמר מוזן גם הוא מספק כוח *DC*.

9.3 סוגים של מתמרי זרם ואופן חיבורם לבקר.

מתמרים (*transducers*) המוציאים זרם ביחס לאות הנמדד מסווגים לפי מספר חוטי החיבור בהם:

- משדר 2 חוטים (*2wire transmitter*)
- משדר 3 חוטים (*3wire transmitter*)
- משדר 4 חוטים (*4wire transmitter*)

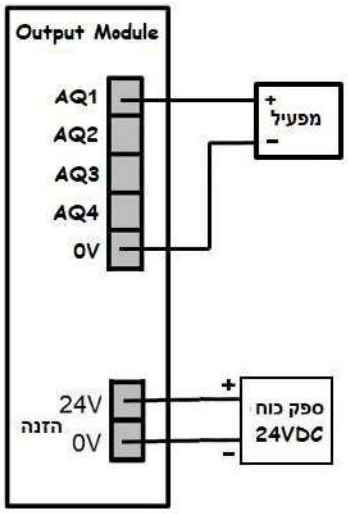
באיור מספר 22 מוצג אופן חיבור מתמרי הזרם השונים לכרטיס הכניסה בבקר.



איור מספר 22: חיבור מתמרי זרם שונים לכרטיס כניסה אנלוגי

9.4 כרטיס יציאה אנלוגי (*D/A- Digital to Analog*).

באיור 23 מוצג כרטיס כניסות אנלוגיות של בקר. באיור מתואר חיבור מפעיל לאחת היציאות.



איור מספר 23: כרטיס יציאה אנלוגי

כרטיס היציאה לבקר מקבל בדרך כלל מתח הזנה של *24VDC*. המפעיל המחובר למוצא מוזן מכרטיס היציאה.

9.5 כושר אבחנה (רזולוציה) של כרטיס אנלוגי.

כושר הבחנה (רזולוציה) של כרטיס אנלוגי מחושב כיחס בין תחום האות האנלוגי (מתח או זרם) לבין מספר החלוקות של האות (שתלויות מספר הסיביות של הממיר.
הנוסחה לחישוב כושר ההבחנה היא:

$$Res = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n}$$

כאשר:

V_{max} - המתח או הזרם המרבי במבוא הממיר.
V_{min} - המתח או הזרם המזערי במבוא הממיר.
n - מספר סיביות הממיר.

יצרני בקרים נוטים להגדיר את כושר ההבחנה כמספר הסיביות שיש בממיר.
לדוגמה:
כרטיס אנלוגי עם רזולוציה של 12 ביט. בכרטיס זה יש 4096 חלוקות והמספרים המתקבלים אחרי ההמרה נעים בין 0 ל- 4095.

10. שפות תכנות בבקר מתוכנת

תקן בינלאומי, *IEC 61131-3* מגדיר 5 שפות לתכנות של בקרים מתוכנתים.
השפות הן:

***LD**- Ladder Diagram*

דיאגרמת סולם- שפת תכנות גראפי. דומה לשרטוטים של מעגלי מיתוג חשמליים.

***FBD**- Function Block Diagram*

תרשים בלוקים- שפת תכנות גראפי. דומה לשרטוט של מעגלי שערים לוגיים.

***IL**- Instructions List*

שפת פקודות- שפת תכנות המורכבת מאוסף של פקודות לוגיות ואחרות. מזכירה שימוש בשפת מכונה.

***ST**- Structure Text*

שפת על מסוג "טקסט מובנה"- שפת תכנות שמזכירה שימוש בשפת *C* ובשפת *Python*. מתבססת על שפת *Pascal*.

***SFC**- Sequential Function Chart*

תרשימי זרימה- שפה גראפית המורכבת מתרשים זרימה לוגי של התהליך.

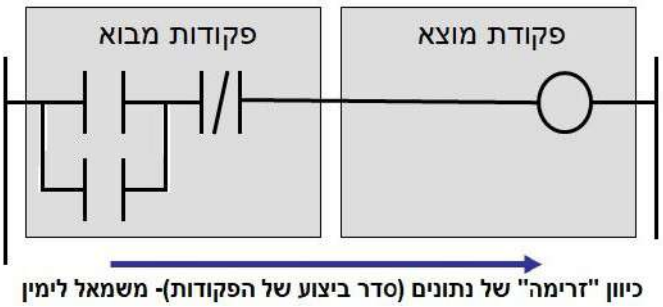
<u>הערה חשובה</u>:
דגמי בקרים רבים אינם פועלים בהתאם לתקן. לכן קיים לעיתים שוני אופן התכנות של הבקרים.
בחוברת הנוסחאות אנו נתייחס רק **לשפת דיאגרמת סולם,** שהיא שפה משותפת לכל הבקרים המתוכנתים.
השאלות בבחינה החיצונית במכטרוניקה, בנושא תכנות בקרים עוסקות **רק בשפת דיאגרמת סולם**.

11. פונקציות תוכנה נפוצות בדיאגרמת סולם

11.1 <u>מבנה של שלב בדיאגרמת סולם</u>.

שלב של דיאגרמת סולם בבקר מדמה ענף במעגל פיקוד חשמלי. עולם המושגים שמקובל להשתמש בו דומה יותר לעולם המושגים בפיקוד חשמלי מאשר עולם התוכנה: מגע נסגר/ מגע נפתח, סליל (ממסר) מופעל/ סליל לא מופעל, זרם זורם/ לא זורם במעגל וכדומה. בדומה למעגל מיתוג, המעגל כולל מתגים, המחוברים בטור או במקביל וסליל המשמש כצרכן להפעלה.
מקובל מאוד להשתמש גם במושגים כמו תנאי מתקיים (*true*) או תנאי לא מתקיים (*false*).

איור 24 מציג שלב בסיסי בדיאגרמת סולם (הכולל רק פעולות בוליאניות).



איור מספר 24: שלב עקרוני בדיאגרמת סולם בבקר

פקודות המבוא נמצאות בתחילת השלב (בצד שמאל). הפקודות בודקות את מצבם של מבואות הבקר או משתנים פנימיים המוגדרים בשלב. בהתאם לערך המשתנים ואופן חיבורם בשלב, מתקבלת תוצאה לוגית בפקודת המוצא.

פקודת המוצא מתרגמת את התוצאה הלוגית המתקבלת להפעלה של יציאה מהבקר או של משתנה פנימי בבקר.

<u>הערה כללית</u>: הפקודות המוצגות בחוברת הנוסחאות מוצגות באופן כללי עבור בקר טיפוסי ואינן מתייחסות לדגם מסוים או ליצרן מסוים של בקר. הן מתפקדות בצורה דומה בכל הבקרים המתוכנתים, בהם השתמשתם במהלך הלימודים.

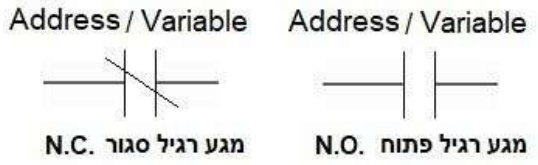
11.2 <u>פקודות מגעים</u>.

פקודות מגע מאפשרות לקרוא ערך של משתנה בוליאני ולבצע פעולה בהתאם לערכו, "0" או "1".

בשימוש **במגע מסוג *N.O.*,** הפעולה "מתקיימת" (מגע "נסגר") כאשר המשתנה מקבל ערך "1". הפעולה "לא מתקיימת" (מגע נשאר "פתוח") כאשר המשתנה מקבל ערך "0".

בשימוש **במגע מסוג *N.C.*** הפעולה "מתקיימת" (מגע נשאר סגור) כאשר המשתנה מקבל ערך "0". הפעולה "לא מתקיימת" (מגע "נפתח") כאשר המשתנה מקבל ערך "1".

פקודות המגע מוצגות באיור מספר 25.

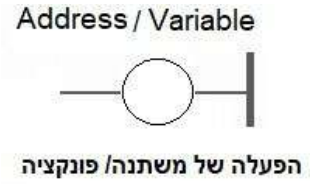


איור מספר 25: סימוני מגעים מסוג *N.O* ו- *N.C*.

11.3 <u>פקודת סליל (הפעלה/ פונקציה)</u>.

פקודה מסוג סליל מאפשרת רישום תוצאה של פעולה לוגית לתוך משתנה. משתמשים בסליל כדי להפעיל צרכן או יציאה מהבקר (בהתאם לכתובת הרשומה עליו) או משתנה בוליאני אחר (נהוג לקרוא לו משתנה זיכרון או משתנה עזר).

פקודת הסליל מוצגת באיור מספר 26.



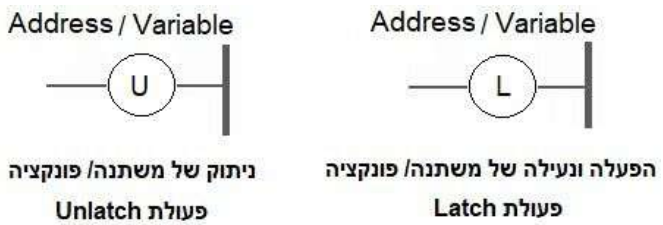
איור מספר 26: סימון סליל (הפעלה).

11.4 <u>פקודות נעילה/ זיכרון</u>.

פקודת *LATCH* (***L***)- מפעילה צרכן ומשאירה אותו במצב פועל עד לשימוש בפקודת *UNLATCH*.

פקודת *UNLATCH* (***U***) מנתקת את הצרכן ומשאירה אותו במצב מנותק.

פקודות הנעילה *L* ו- *U* מוצגות באיור מספר 27.



איור מספר 27: סימון פקודות נעילה *L* ו- *U*.

הערה: בבקרים רבים משתמשים בפקודות ***Set*** **ו-** ***Reset*** במקום בפקודות ***Latch*** **ו-** ***Unlatch*** :

המשמעות זהה בשני המקרים:
פקודת *Set* זהה לפקודת *Latch*. שתיהן מפעילות משתנה ונועלות את מצבו למצב "1".
פקודת *Reset* זהה לפקודת *Unlatch*.שתיהן מנתקות משתנה למצב "0".

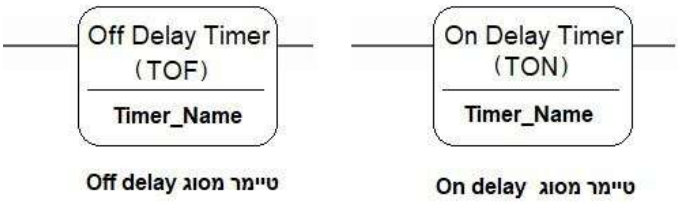
פקודות הנעילה *S* ו- *R* מוצגות באיור מספר 28.



איור מספר 28: סימון פקודות נעילה *S* ו- *R*.

11.5 פקודות קוצבי זמן- טיימרים.

פקודות המאפשרות ליצור השהייה בתוכנית והפעלות של משתנים בתלות זמן.
פקודות הטיימרים מוצגת באיור מספר 29.



איור מספר 29: סימון פקודות של קוצבי זמן

קוצב זמן השהיה בהפעלה:
טיימר מסוג **השהייה בהפעלה**. הטיימר נקרא ***On Delay Timer***. כאשר קוצב הזמן מופעל , הטיימר מתחיל למנות את פרק הזמן שנקבע לו. כאשר פרק הזמן הסתיים, הטיימר מפעיל את אות המוצא (*Q*).

קוצב זמן השהייה בניתוק:
טיימר מסוג **השהיה בניתוק.** הטיימר נקרא *Off Delay Timer*. כאשר קוצב הזמן מופעל, המוצא שלו (*Q*) מופעל מיד. כאשר קוצב הזמן מופסק, המוצא שלו (*Q*) **ממשיך** לפעול, עד שיחלוף פרק הזמן שנקבע, ואז מנותק.

פרמטרים של פקודת קוצב זמן

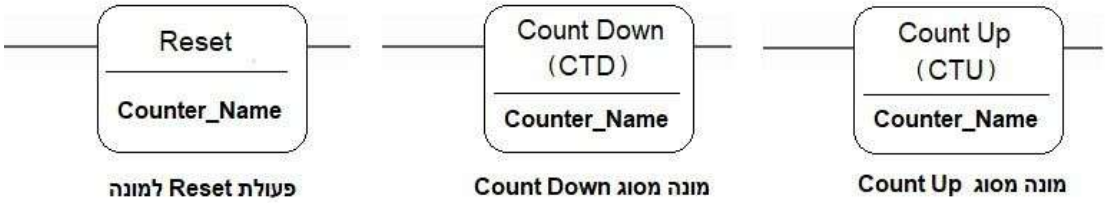
Timer_name.Pre *(preset)*- מספר המציין בשניות את פרק הזמן הנקוב של קוצב הזמן
(Pre= Preset)
Timer_name.Acc - מספר המציין בשניות את פרק הזמן שחלף מהפעלת קוצב הזמן
(Acc= Accumulation)

Timer_name.Q *(Q)*- משתנה בוליאני המקבל ערך 0 או 1 כתלות בזמן שעבר ובסוג קוצב הזמן
(Q= Output)

הערה: שמות הפרמטרים של הטיימר מוגדרים באופן שונה, בבקרים שונים.
הפרמטרים שנבחרו לשימוש בחוברת הנוסחאות, תואמים את ההגדרות בשאלות במבחן.

11.6 <u>פקודות ספירה- מונים</u>.

פקודות המאפשרות למנות דפקים (פולסים) של אותות ספרתיים.
פקודת המונה מוצגת באיור מספר 30.



איור מספר 30: סימון פקודות של מונים

מונה מעלה: מונה מסוג "מונה מעלה" (*Count Up*). ספירת המונה (*count_name.acc*) **גדלה** ב-1 בכל פעם שאות הכניסה למונה משתנה מ- 0 ל- 1.

מונה מטה: מונה מסוג "מונה מטה" (*Count Down*). ספירת המונה (*count_name.acc*) **קטנה** ב-1 בכל פעם שאות הכניסה למונה משתנה מ- 0 ל- 1.

איפוס מונה: פקודה לאיפוס המונה. הפקודה משנה את ערך ספירת המונה, *count_name.acc* ל -0.

פרמטרים של פקודת מונה

Counter_name.Pre *(preset)*-

מספר המציין את כמות השינויים באות הכניסה, מ-0 ל-1 שיפעילו את אות המוצא Q (כמות שינויים רצויה).

Counter _name.Acc *(Accumulation)*-

מספר המציין את כמות השינויים **המצטברת** באות הכניסה, מ-0 ל-1

Counter _name.Q *(Output)*-

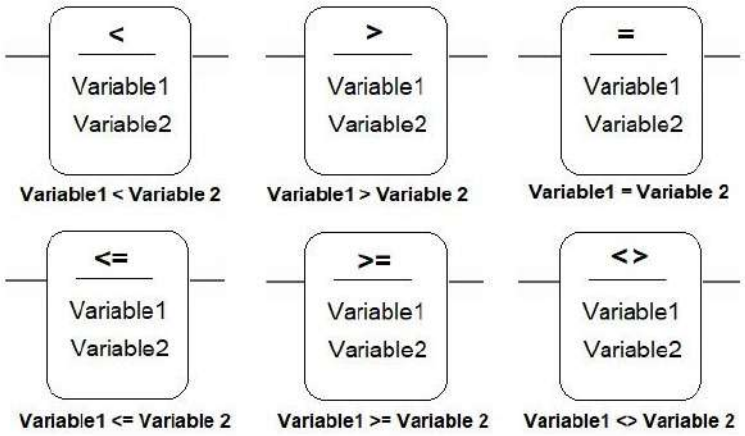
משתנה בוליאני המקבל ערך 0 או 1 כתלות בכמות השינויים באות הכניסה, מ 0 ל 1.
הערך 1 מתקבל כאשר כמות השינויים **המצטברת** (*counter_name.acc*) **שווה או גדולה** לכמות השינויים **הרצויה** (*counter_name.pre*).

הערה: שמות הפרמטרים של המונה מוגדרים באופן שונה, בבקרים שונים.
הפרמטרים שנבחרו לשימוש בחוברת הנוסחאות, תואמים את ההגדרות בשאלות במבחן.

11.7 <u>פקודות השוואה בין מספרים</u>.

פקודות הבודקות יחס (משוות) בין שני משתנים נומריים. המוצא של הפקודה פועל כאשר היחס הנבדק בין שני המשתנים, מתקיים.
הערה: כל פקודה בודקת יחס מסוים בין המשתנים.

פקודות ההשוואה מוצגות באיור מספר 31.

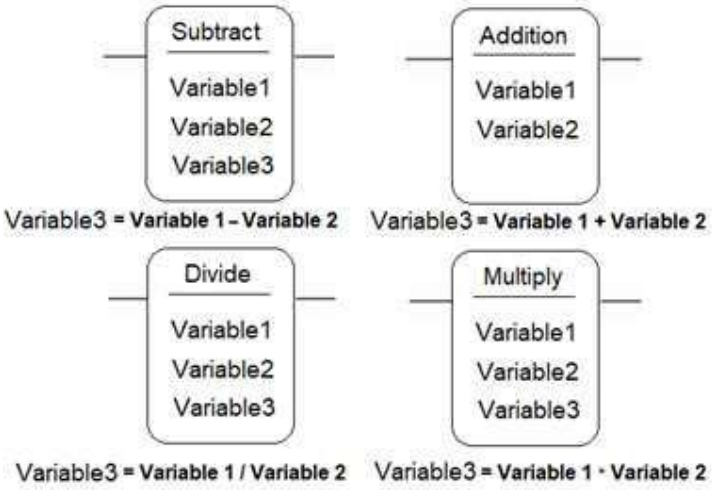


איור מספר 31: פקודות השוואה בין מספרים

11.8 <u>פקודות חישוב מתמטי</u>.

פקודות שמאפשרות לבצע פעולות החישוב הבסיסיות: חיבור, חיסור, כפל וחילוק. החישוב מתבצע בין שני משתנים, משתנה 1 ומשתנה 2 והתוצאה המתקבלת נרשמת במשתנה 3.

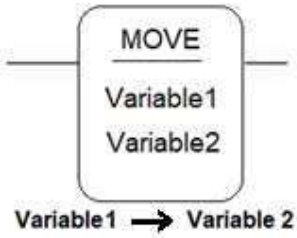
פקודת החישוב מוצגת באיור מספר 32.



איור מספר 32: פקודות חישוב בין שני מספרים

11.9 <u>פקודה להעתקה (העברת תוכן) של נתון- פקודת *Move*.</u>

הפקודה מעתיקה מספר קבוע או תוכן של משתנה לתוך משתנה אחר.
פקודת ההעברה מוצגת באיור מספר 33.



איור מספר 33: פקודות חישוב בין שני מספרים

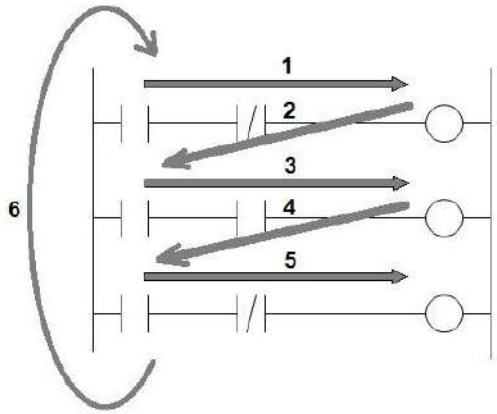
12. אופן הקריאה (סריקה) של דיאגרמת הסולם

תוכנית בדיאגרמת סולם מורכבת משלבים (שורות). כל שלב מורכב מפקודות ביצוע. קריאה של התוכנית היא חלק ממחזור הסריקה של הבקר.

12.1 <u>סדר הקריאה של שלבי הדיאגרמה.</u>

סדר הקריאה של התוכנית הוא תמיד מלמעלה למטה, מהשורה הראשונה אל השורה האחרונה וחוזר חלילה. הקריאה מתבצעת באופן מחזורי.

איור מספר 34 מציג את סדר הסריקה של השלבים בדיאגרמת הסולם.

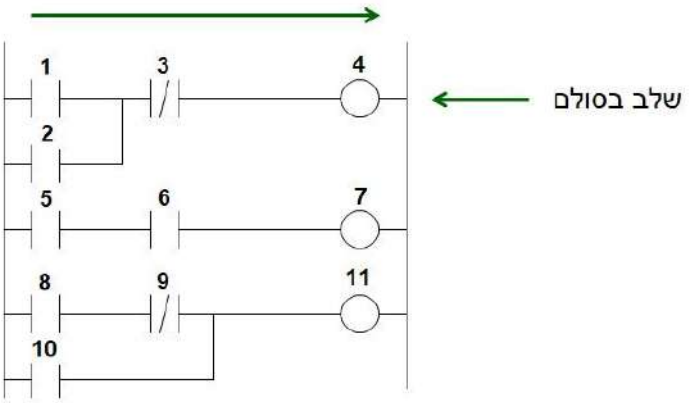


איור מספר 34: סדר הקריאה של השלבים בדיאגרמת סולם

12.2 <u>סדר קריאה בתוך שלב בדיאגרמה.</u>

בכל אחד מהשלבים בדיאגרמה, קריאה של הפקודות מתבצעת משמאל לימין, לפי סדר הפעולות הלוגיות.

איור מספר 35 מציג את סדר הקריאה של שלב בתוכנית. התוכנית מתבצעת לפי סדר המספרים הרשומים באיור.



איור מספר 35: סדר הקריאה בתוך שלב בדיאגרמת סולם

13. דוגמאות לתכניות בסיסיות בדיאגרמת סולם

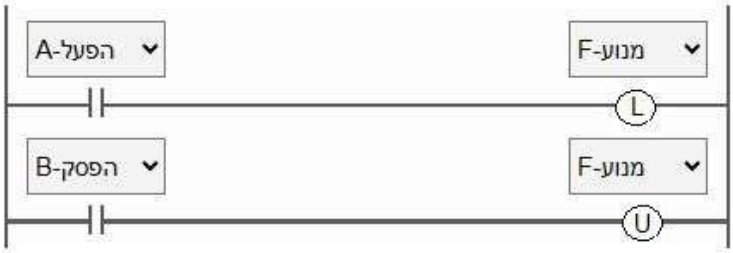
בסעיפים הבאים מוצגות מספר תכניות בסיסיות בדיאגרמת סולם. בתכניות מופיעות חלק מהפקודות שהוצגו בסעיפים 11.2 עד 11.9.

13.1 מעגל החזקה עצמית (מעגל זיכרון).



איור מספר 36: מעגל החזקה עצמית

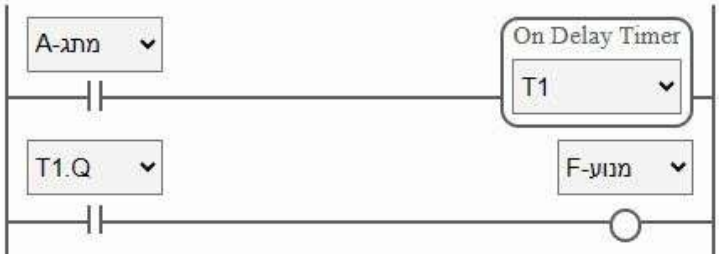
13.2 שימוש בפקודות נעילה (זיכרון).



איור מספר 37: פעולות נעילה

פקודת L מפעילה את מנוע F (״1״) ומשאירה אותו במצב פועל (״1״).
פקודת U מנתקת את מנוע F (״0״) ומשאירה אותו במצב מנותק (״0״).

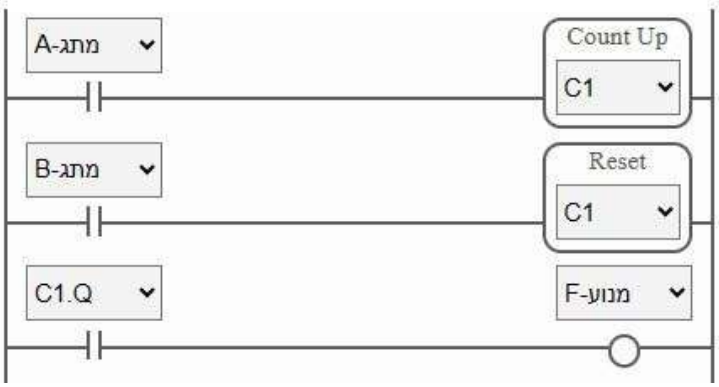
13.3 שימוש בטיימר מסוג השהיה בהפעלה (*on delay*).



איור מספר 38: טיימר מסוג *on delay*

מתג A מפעיל את פעולת הספירה בטיימר $T1$. הטיימר סופר עד הזמן הרצוי שהוגדר עבורו (*Preset*). בסיום הספירה מגע $T1.Q$ של הטיימר מפעיל את מנוע F (הפעלה לאחר השהייה).

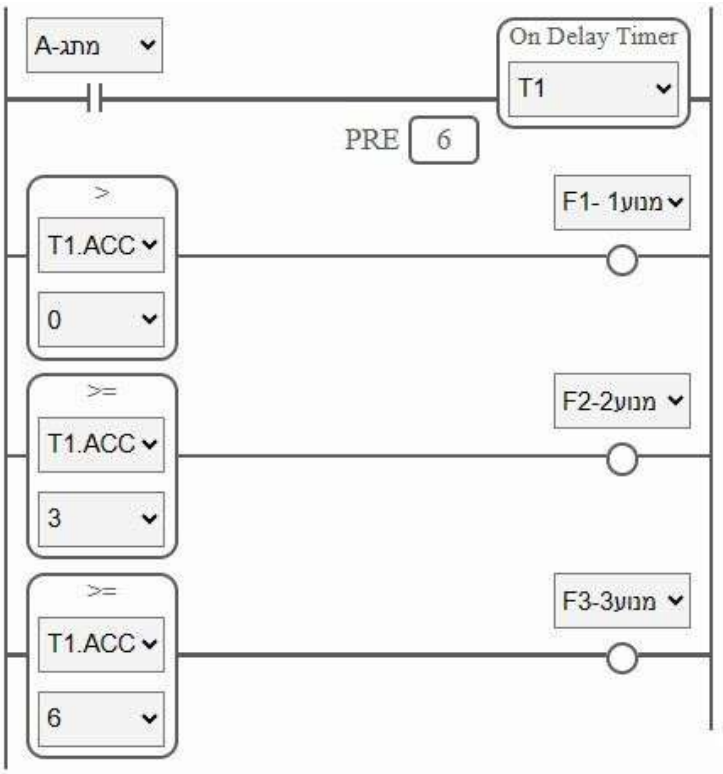
13.4 שימוש במונה מסוג מונה מעלה (*up counter*).



איור מספר 39: מונה מסוג *up counter*

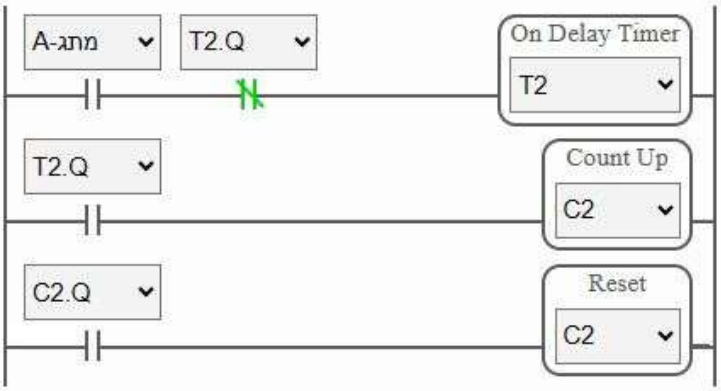
מתג *A* מקדם את הספירה במונה *C1* ("קופסת" *count up*). מתג *B* מאפס את המונה ("קופסת" *reset*). כאשר המונה הגיע לערך הרצוי שהוגדר עבורו (*Preset*), מגע *C1.Q* של המונה מפעיל את מנוע *F* (הפעלה לאחר מספר לחיצות על מתג *A*).

13.5 שימוש בפקודות השוואה עם טיימר.



איור מספר 40: פקודות השוואה משולבות עם טיימר

13.6 שימוש בפקודות טיימר ומונה.



איור מספר 41: שילוב בין פקודות טיימר ומונה

מתג *A* מפעיל את פעולת הספירה בטיימר *T2* הטיימר סופר עד הזמן הרצוי שהוגדר עבורו (*Preset*). בסיום הספירה מגע *T2.Q* של הטיימר מקדם את הספירה במונה *C1* ומאפס את הטיימר, למחזור השהייה נוסף.
כאשר המונה הגיע לערך הרצוי שהוגדר עבורו (*Preset*), מגע *C1.Q* של המונה מאפס את המונה, למחזור ספירה נוסף.

© כל הזכויות שמורות למה"ט