נוסחאון מה"ט לבחינה

97112

מערכות בקרה

רכיבים ומתמרים

לטכנאים והנדסאים

מגמת הנדסת בקרה ואוטומציה

מקצועות:

מערכות בקרה - 3961

רכיבים ומתמרים - 3960

מספר	מהדורה מספר	תאריך
97112	2	05/23

תוכן

ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות 5
כופלי יחידות 5
קבועים פיזיקליים - Physical Constants 6
בקרה 7
1. תרשים מלבנים - אלגברה של מערכת בקרה 7
1.1 חיבור בטור 7
1.2 מסכם/סיכום הגברים חיבור במקביל 7
2. פונקצית תמסורת 8
2.1 מערכת עם משוב שלילי/חיובי 8
2.2 פונקציית התמסורת של השגיאה 9
2.3 מערכת עם משוב יחידה 9
3. משוואות דיפרנציאליות 10
3.1 מערכת מסדר ראשון 10
3.2 משוואות דיפרנציאליות לינאריות הומוגניות מסדר שני 11
4. טבלת התמרות לפלס 13
4.1 התמרת לפלס של נגזרות ואינטגרל 14
4.2 מעגלים חשמליים 14
5. משפט הערך הסופי/התחלתי 15
6. מערכות מסדר שני 16
7. תגובה בזמן של מערכות מסדר שני 17
8. הגדרות ריסון 20
8.1 כאשר $\zeta > 1$ - ריסון על קריטי/ ריסון יתר 20
8.2 כאשר $\zeta = 1$ - ריסון קריטי 20
8.3 כאשר $0 < \zeta < 1$ - ריסון תת קריטי מכונה גם ריסון חסר 21
8.4 כאשר $\zeta = 0$: מציין מצב שבו אין ריסון במערכת 22
8.5 כאשר $-1 < \zeta < 0$: מקדם הריסון שלילי 23
9. מקדמי שגיאה ושגיאות במצב המתמיד 24
9.1 מערכת בקרה עם משוב שלילי 24
9.2 סיכום קבועי השגיאה והשגיאות במצב המתמיד 25
10. יציבות מערכת בקרה 26
10.1 הגדרות ליציבות מערכת בקרה : 26
10.2 יציבות מערכת בקרה לפי קריטריון ראוט-הורוביץ 26
10.3 טבלת ראוט למערכת מסדר שלישי 26
10.4 טבלת ראוט למערכת מסדר רביעי 27
11. בקרים תעשייתיים 28
11.1 בקרה דו מצבית בקרת (on-off) 28

11.2 בקרה יחסית/פרופורציונלית - *P* (Proportional) 29
11.3 בקרה אינטגרלית - *I* (Integral) 30
11.4 בקרה נגזרת - D (Differential /Derative) 31
רכיבים ומתמרים 32
1. תחומים תקינים במערכות בקרה 32
1.1 מתחים תקינים במערכות בקרה 32
1.2 זרמים תקינים במערכות בקרה 32
1.3 תחומי אותות תקינים במערכות פנאומטיות 32
2. עקרונות פעולה של מתמרים 34
2.1 התמרת תזוזה באמצעות נגד משתנה (Potentiometer) 34
2.2 עקרון פעולת שנאי אידיאלי 34
2.3 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 35
2.4 חיישן קירבה קיבולי 36
2.5 עקרון פעולת המנומטר 36
3. עקרון פעולת גשר ויטסטון 37
4. מגברי שרת 38
4.1 מגבר שרת כמשווה (חוג פתוח) 38
4.2 מגבר שרת הופך מופע 38
4.3 מגבר שרת שומר מופע 39
5. מקודד אופטי Optical Encoder 40
6. גלאי אור 41
6.1 נגד רגיש לאור -LDR 41
7. מדידות בסיסיות 42
מדידת לחץ 42
7.1 מדידת לחץ אטמוספרי בשפופרת כספית 42
7.2 מדידת לחץ הפרשי בשפופרת U 42
7.3 טבלת המרה ליחידות לחץ 42
7.4 מדידת מפלס במכל **פתוח** ע"י מתמר לחץ הידרוסטטי 43
7.5 מדידת מפלס במכל **סגור** ע"י מתמר לחץ הידרוסטטי 43
7.6 מדידת מפלס באמצעות משדר לחץ הפרשי במיכל פתוח 44
7.7 מדידת מפלס באמצעות משדר לחץ הפרשי במיכל פתוח הנמצא בגובה מעל ריצפת העבודה 44
7.8 עקרון למדידת כוח ומשקל 45
7.9 מדידת כוח/משקל ע"י מד לחץ במאזניים הידרוליים 45
7.10 טבלת המרה ליחידות משקל 45
7.11 מדידת ספיקה 46
8. מדידת טמפרטורה 49
8.1 טבלת המרת יחידות מידה של טמפרטורה 49
8.2 מדידת טמפרטורה ע"י צמד תרמי 49
8.3 צורות חיבור צמד טרמי 50
8.4 מדידת טמפרטורה של דו מתכתי bi-metal 51
8.5 עקרון שינוי התנגדות מתכת כתוצאה משינוי טמפרטורה 51
8.6 טבלת נתונים תקניים לשינוי התנגדויות מתכות כתוצאה משינוי טמפרטורה 51

8.7 חוק הגזים האידיאליים לכמות (מסה) נתונה של גז 51
9. מדידת מהירות 52
9.1 מדידה ישירה של מהירות קווית 52
9.2 מדידה עקיפה של מהירות קווית (לדוגמא מהירות מכונית) 52
9.3 מדידת מהירות סיבוב בעזרת טכוגנרטור 52
10. מדידות מיוחדות 53
10.1 מד עיוות strain gain 53
11. שסתומי בקרה 54
11.1 עקרון פעולת שסתום 54
11.2 הספיקה דרך שסתום לינארי 55
11.3 הספיקה דרך שסתום שווה אחוזים 55
11.4 מפל הלחץ על פני השסתום 55
11.5 הגדרת C_v 56
11.6 חישוב C_v 56
12. המרת יחידות 57
12.1 טבלת המרה ליחידות נפח 57
12.2 טבלת המרה ליחידות אורך 57
12.3 טבלת המרת ספיקה נפחית של נוזל 57
12.4טבלת המרת ספיקה מסית 58
12.5 טבלת המרת יחידות לחץ 58

ערכים פיזיקליים - סימונים ויחידות

מס	כינוי	סימון	יחידות במערכת SI	יחידות במערכת SI - עברית
1	מרחק, רדיוס, אורך	l, r, d	m	מטר
2	זווית	φ, α	rad	רדיאן, מעלה
3	שטח חתך, שטח	S, A	m^2	מטר מרובע
4	זרם חשמלי	I, i	A	אמפר
5	פוטנציאל חשמלי	V	V	וולט
6	מתח, כוח אלקטרומניע	E, V, U	V	וולט
7	עבודה, אנרגיה	W	J, Wh	ווט שעה, ג׳אול
8	התנגדות	R, r	Ω	אוהם
9	טמפרטורה	T	$°K, °C$	מעלות קלוין, צלזיוס
10	זמן	t	sec	שנייה
11	זמן מחזור	T	sec	שנייה
12	תדירות	f	Hz	הרץ

כופלי יחידות

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

קבועים פיזיקליים - Physical Constants

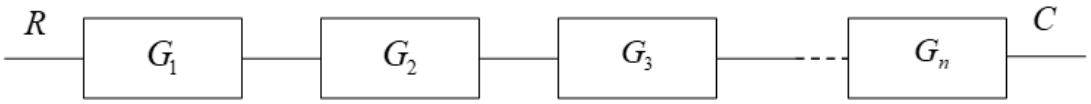
תאור	סימון	יחידות	ערך
מטען אלקטרון	e, q	C	$1.602\cdot10^{-19}$
מסת מנוחה של אלקטרון	m_e	kg	$9.1066\cdot10^{-31}$
חדירות מגנטית של חלל ריק	μ_0	H/m	$\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7} = \\ =12.56\cdot10^{-7}$
קבוע דיאלקטרי של חלל ריק	ε_0	F/m	$\varepsilon_0 = \frac{1}{36}\cdot10^{-9} \\ =8.85\cdot10^{-12}$

בקרה

1. תרשים מלבנים - אלגברה של מערכת בקרה

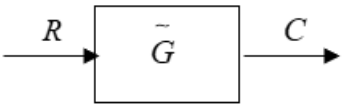
1.1 חיבור בטור

רכיבים/מגברים המחוברים בטור ניתנים להפיכתם למלבן שקול ע"י הכפלה.

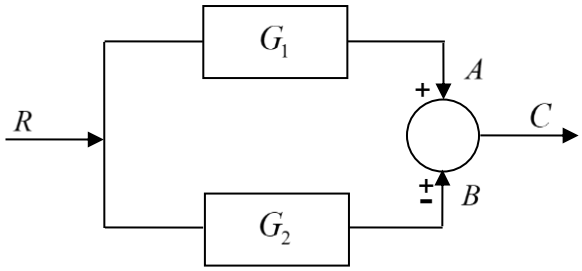


$$\frac{C}{R}=\tilde{G}=G_1\cdot G_2\cdot G_3\cdot ....\cdot G_n$$

המערכת השקולה המתקבלת:



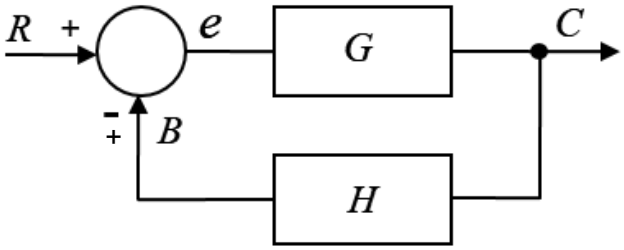
1.2 מסכם/סיכום הגברים חיבור במקביל



$$C=A-B=R\cdot G_1\pm R\cdot G_2=R(G_1\pm G_2)$$

2. פונקצית תמסורת

2.1 מערכת עם משוב שלילי/חיובי



- G - פונקצית תמסורת ישירה
- H - פונקצית תמסורת של המשוב
- e - השגיאה של המערכת
- B - מייצג את אות הדגימה של המשוב
- C - המוצא של המערכת

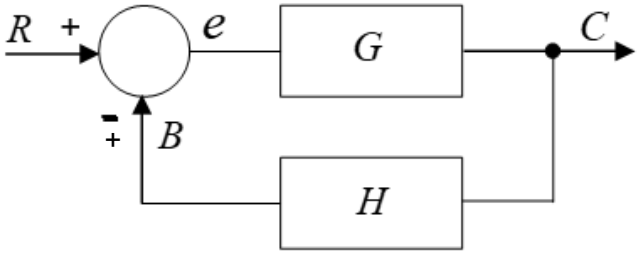
פונקצית התמסורת של המערכת כאשר המשוב **שלילי**

$$\frac{C}{R}=\frac{G}{1+GH}$$

פונקצית התמסורת של המערכת כאשר המשוב **חיובי**

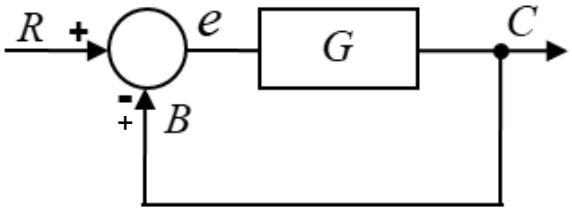
$$\frac{C}{R}=\frac{G}{1-GH}$$

2.2 פונקציית התמסורת של השגיאה



$$\frac{e}{R}=\frac{1}{1\pm GH}$$

2.3 מערכת עם משוב יחידה



פונקציית התמסורת של המערכת

$$\frac{C}{R}=\frac{G}{1\pm G}$$

3. משוואות דיפרנציאליות

3.1 מערכת מסדר ראשון

תהליכים מסדר ראשון מתוארים ע״י משוואה דיפרנציאלית מסדר ראשון.



משוואה **מסדר ראשון** אשר הזמן הוא המשתנה הבלתי תלוי מתארת קצב שינוי של ערך כלשהו.

$$\frac{dy(t)}{dt} + Ay(t) = x(t)$$

$y(t)$ - מוצא המערכת בתלות בזמן.

$x(t)$ - כניסת המערכת בתלות בזמן.

A - מקדם קבוע.

הפתרון הכללי מורכב מהפתרון ההומוגני והפתרון הפרטי:

$$y(t) = y_H(t) + y_P(t)$$

הפתרון ההומוגני

(המשוואה שווה ל-0):

$$\frac{dy(t)}{dt} + Ay(t) = 0$$

הפתרון ההומוגני מהצורה:

$$y_H(t) = Ae^{\lambda t}$$

הפתרון הפרטי:

לפי סוג אות הכניסה

לאילוץ קבוע: $y_p(t) = a$

לאילוץ לינארי (מהירות): $v_p(t) = at + b$

לאילוץ ריבועי (תאוצה): $a_p(t) = at^2 + bt + c$

3.2 משוואות דיפרנציאליות לינאריות הומוגניות מסדר שני

תהליכים מסדר שני מתוארים ע"י משוואה דיפרנציאלית מסדר שני.

$$\boxed{\frac{d^2y(t)}{dt^2}+A\frac{dy(t)}{dt}+By(t)=x(t)}$$

$y(t)$ - מוצא המערכת בתלות בזמן.

$x(t)$ - כניסת המערכת בתלות בזמן.

A ו- B מקדמים קבועים.

שלב 1: המשוואה ההומוגנית (המשוואה שווה ל-0):

$$\boxed{\lambda^2+A\lambda+B=0}$$

מפתרון המשוואה האופיינית יתכנו 3 מקרים:

1. שני השורשים ממשיים ושונים.
2. שני השורשים ממשיים ושווים.
3. שני השורשים מרוכבים (קומפלקסים).

מקרה 1: שני השורשים ממשיים ושונים

כאשר $\Delta=b^2-4ac>0$:

הפתרון המתקבל: $\boxed{y(t)=Ae^{\lambda_1 t}+Be^{\lambda_2 t}}$

מקרה 2: שני השורשים ממשיים ושווים

כאשר $\Delta=b^2-4ac=0$:

הפתרון המתקבל: $\boxed{y(t)=Ae^{\lambda_1 t}+Bte^{\lambda_2 t}}$

מקרה 3: שורשים מרוכבים (קומפלקסים)

כאשר $\Delta=b^2-4ac<0$

הפתרון המתקבל: $\boxed{y(t)=e^{at}\left(A\cos\omega t+B\sin\omega t\right)}$

<u>שלב ב' הפתרון הפרטי:</u> לפי סוג אות הכניסה

לאילוץ קבוע: $y_p(t) = a$

לאילוץ ליניארי (מהירות): $v_p(t) = at + b$

לאילוץ ריבועי (תאוצה): $a_p(t) = at^2 + bt + c$

4. טבלת התמרות לפלס

התמרת לפלס היא כלי מתמטי שנועד להקל על פתרון משוואות דיפרנציאליות מסדר שני ומעלה. התמרות לפלס הופכות את המשוואה הדיפרנציאלית למשוואה אלגברית ע"י שימוש בטבלאות מוכנות.

מישור הזמן $f(t)$	מישור לפלס $F(s)$
$\delta(t)$	1
1	$\frac{1}{s}$
A	$\frac{A}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
At	$\frac{A}{s^2}$
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
$\sin\omega t$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
$\cos\omega t$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
$e^{-at}\sin\omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$
$e^{-at}\cos\omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$

4.1 התמרת לפלס של נגזרות ואינטגרל

מישור הזמן $f(t)$	מישור לפלס $F(s)$
$\frac{dy(t)}{dt}$	$SY(s)-Y(0)$
$\frac{d^2y(t)}{dt^2}$	$S^2Y(s)-SY(0)-Y'(0)$
$\int_0^{\infty} y(t)dt$	$\frac{1}{S}Y(S)$

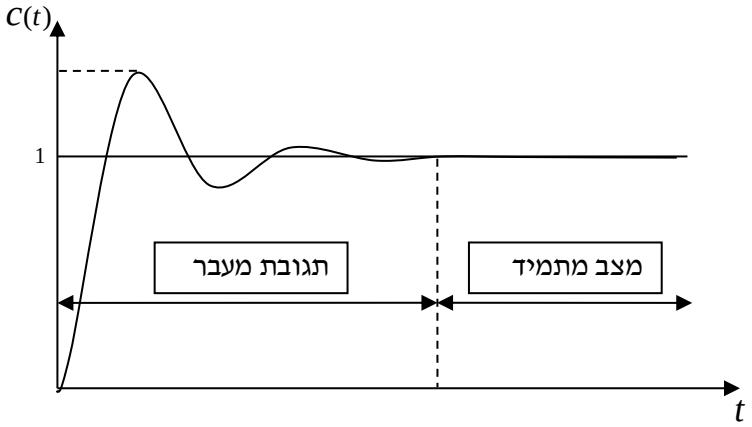
4.2 מעגלים חשמליים

הטבלה נכונה רק כאשר אין מתח התחלתי בקבל או זרם התחלתי בסליל (תנאי התחלה = 0).

רכיב	מישור לפלס	מישור הזמן
מתח	$U(s)$	$u(t)$
זרם	$I(s)$	$i(t)$
נגד R - חוק אום	$U(S)=I(S)\cdot R$	$u(t)=R\cdot i(t)$
סליל L - חוק לנץ	$U(S)=I(S)\cdot LS$	$u(t)=L\frac{di(t)}{dt}$
קבל C - חוק פרדיי	$U(S)=I(S)\cdot\frac{1}{CS}$	$u(t)=\frac{1}{C}\int i(t)dt$

5. משפט הערך הסופי/התחלתי

תגובת מעבר נקראת גם תגובה דינמית, היא תגובת המערכת לאילוץ מרגע הפעלתו ועד להגעה המערכת למצב המתמיד הנקרא גם תגובה סטטית.



משפט הערך הסופי

כאשר נרצה לדעת את תגובת המערכת **במצב המתמיד בלבד**, לאחר סיום מצב המעבר נוכל להשתמש במשפט הערך הסופי.

$$\boxed{\lim_{t\to\infty}\cdot c(t)=\lim_{S\to 0} S\cdot C(S)}$$

משפט הערך ההתחלתי

כאשר נרצה לדעת את התנהגות המערכת **במצב ההתחלתי ובמצב הסופי** , בתחילת התהליך ובמצב המתמיד נוכל להשתמש בשני המשפטים.

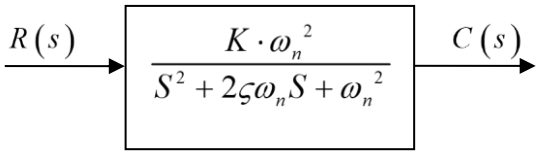
כלומר בתחילת תגובת המעבר $(t=0)$ ובמצב המתמיד $(t=\infty)$

$$\boxed{\lim_{t\to 0} c(t)=\lim_{S\to\infty} S\cdot C(S)}$$

6. מערכות מסדר שני

פולינום אופייני של מערכת בקרה מסדר שני

$$\boxed{\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K \cdot \omega_n^{\,2}}{S^2 + 2\varsigma\omega_n S + \omega_n^{\,2}}}$$



K - ההגבר הסטטי של המערכת

ς - מקדם הריסון

ω_n - תדירות טבעית של המערכת

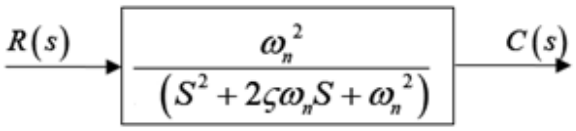
$C(s)$ - אות היציאה

$R(s)$ - אות הכניסה

ς - הוא מקדם מספרי אשר לפי ערכו, ניתן לדעת אם יש תנודות במערכת ובאיזו מהירות הן מתרסנות.

ω_n - תדירות טבעית של המערכת. התדירות נקבעת לפי מרכיבי המערכת, תדירות זו תתקבל כאשר למערכת אין ריסון. כלומר, כאשר $\varsigma = 0$.

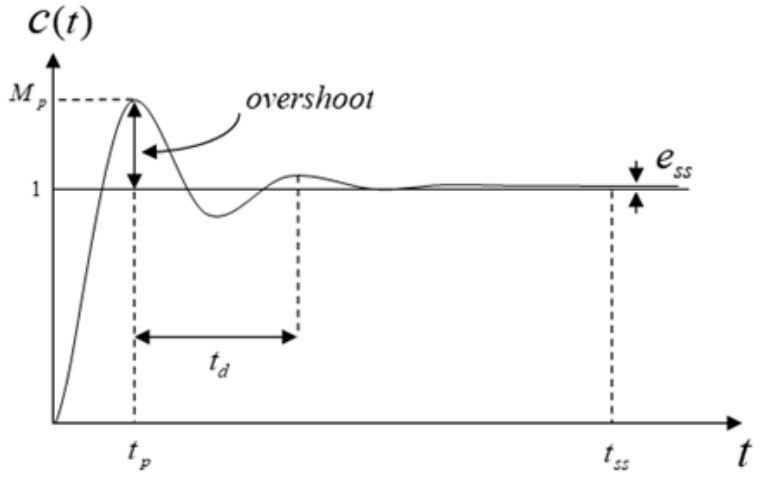
7. תגובה בזמן של מערכות מסדר שני



תגובה בזמן של מערכת מסדר שני לאות אילוץ מדרגת יחידה:

$$c(t)=1-\frac{e^{-\varsigma\omega_n t}}{\sqrt{1-\varsigma^2}}\sin\left[\omega_n\sqrt{1-\varsigma^2}\,t+\tan^{-1}\frac{\sqrt{1-\varsigma^2}}{\varsigma}\right]$$

גרף המתאר את התגובה האופיינית של מערכת מסדר שני עבור מקדם ריסון **תת קריטי** $0<\varsigma<1$ ועבור **אות כניסת מדרגת יחידה**.



$overshoot$ - ההפרש בין הערך המרבי של תגובת היתר לבין הערך הרצוי.

M_p - הערך המרבי של תגובת היתר.

t_p - זמן תגובת היתר המרבי.

t_d - זמן מחזור של התנודה.

t_{ss} - זמן ההתייצבות של הערך המתמיד החדש.

ω_d - התדירות הזוויתית של התנודה המרוסנת.

τ - קבוע זמן של מערכת מסדר שני.

הערך המרבי של תגובת היתר

$$M_p = r(t) + e^{-\left(\frac{\varsigma\pi}{\sqrt{1-\varsigma^2}}\right)}$$

מקדם הריסון

$$\varsigma = \frac{-\ln(M_P - 1)}{\sqrt{(\ln(M_P - 1))^2 + \pi^2}}$$

זמן תגובת היתר המרבי

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\varsigma^2}}$$

זמן מחזור של התנודה

$$t_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = 2 \cdot t_p$$

תדירות טבעית

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p\sqrt{1-\varsigma^2}}$$

תגובת היתר

$$overshoot\% = e^{-\left(\frac{\varsigma\pi}{\sqrt{1-\varsigma^2}}\right)} \cdot 100$$

התדירות הזוויתית של התנודה המרוסנת

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\varsigma^2} = \frac{2\pi}{t_d}$$

קבוע הזמן

$$\tau = \frac{1}{\varsigma\omega_n}$$

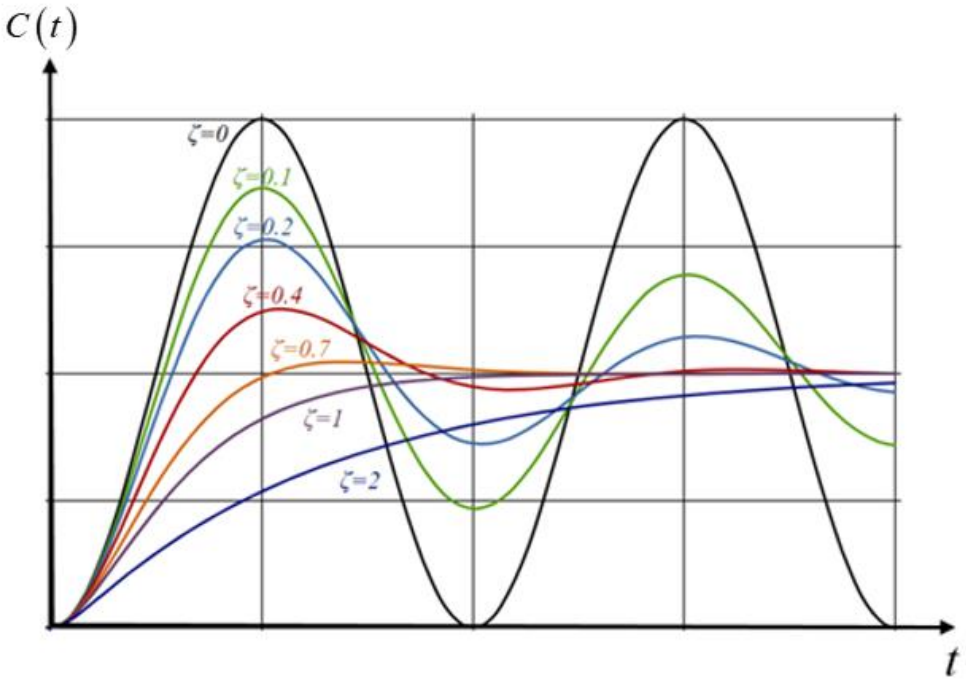
זמן התייצבות

$$\boxed{t_{ss}\left(e_{ss}=1\%\right)=5\tau=\frac{5}{\varsigma\omega_n}}$$

$$\boxed{t_{ss}\left(e_{ss}=2\%\right)=4\tau=\frac{4}{\varsigma\omega_n}}$$

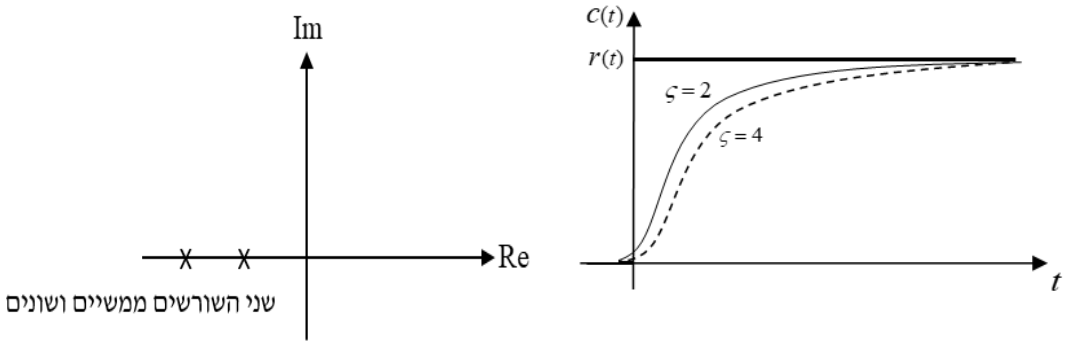
$$\boxed{t_{ss}\left(e_{ss}=5\%\right)=3\tau=\frac{3}{\varsigma\omega_n}}$$

הגרף המתאר את התגובה האופיינית של מערכת מסדר שני עבור מקדם ריסון **בדרגות שונות, לאות כניסת מדרגת יחידה**.



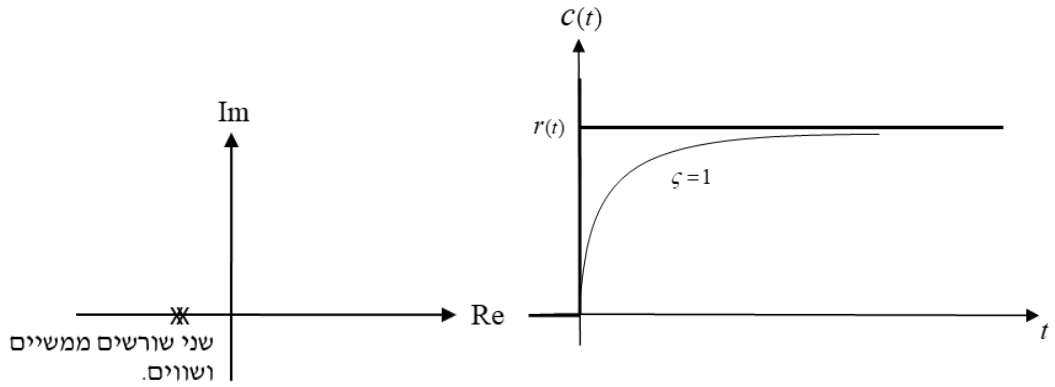
8. הגדרות ריסון

8.1 כאשר $\varsigma > 1$ - ריסון על קריטי/ ריסון יתר



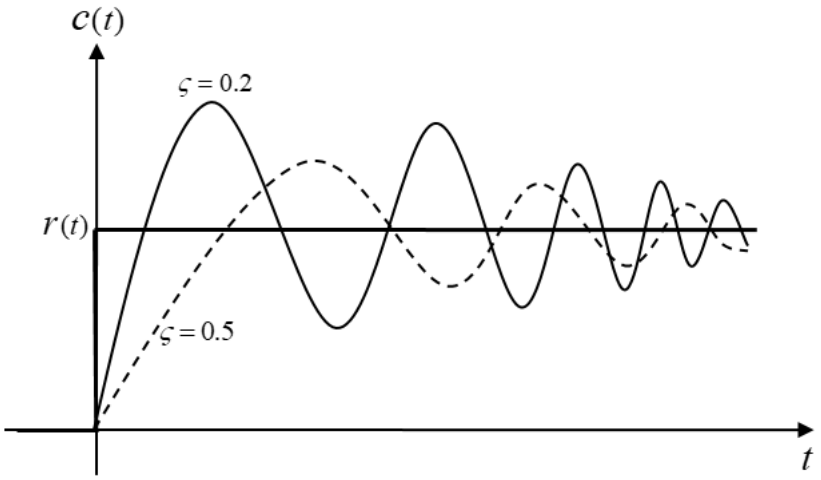
מניתוח המשוואה האופיינית נקבל שני שורשים ממשיים ושונים, הנמצאים משמאל לראשית הצירים.

8.2 כאשר $\varsigma = 1$ - ריסון קריטי
המערכת תגיב במהירות הגדולה ביותר ללא תנודות.

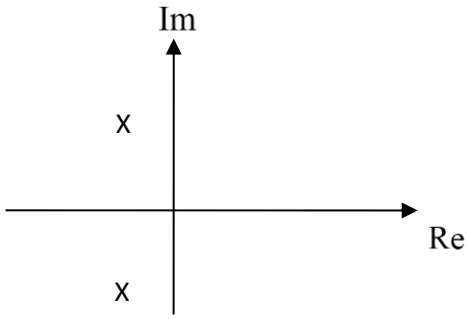


מניתוח המשוואה האופיינית נקבל שני שורשים ממשיים ושווים, הנמצאים משמאל לראשית הצירים.

8.3 כאשר $0 < \varsigma < 1$ - ריסון תת קריטי מכונה גם ריסון חסר
מציין מצב של ריסון נמוך שבו יש תנודות מתרסנות.

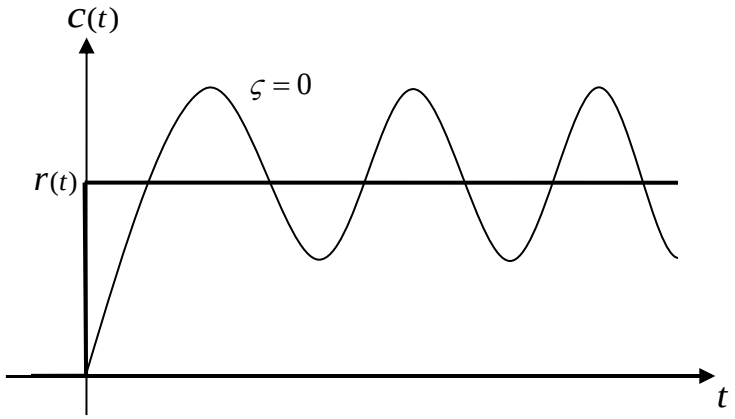


מניתוח המשוואה האופיינית נקבל שני שורשים קומפלקסים, הנמצאים משמאל לראשית הצירים.

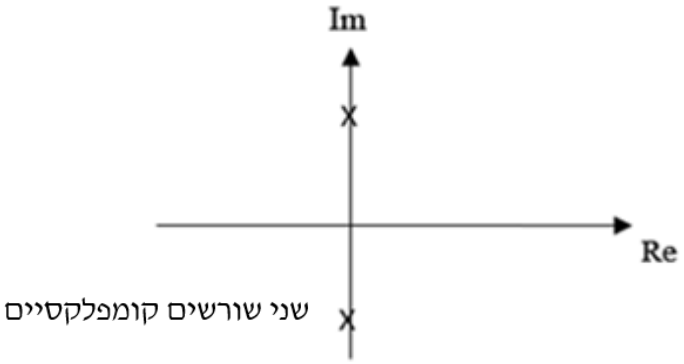


שני שורשים קומפלקסיים.

8.4 כאשר $\varsigma = 0$: מציין מצב שבו אין ריסון במערכת. כלומר, קיימות תנודות הרמוניות נמשכות. מצב זה נקרא סף תנודות -ריסון קריטי.

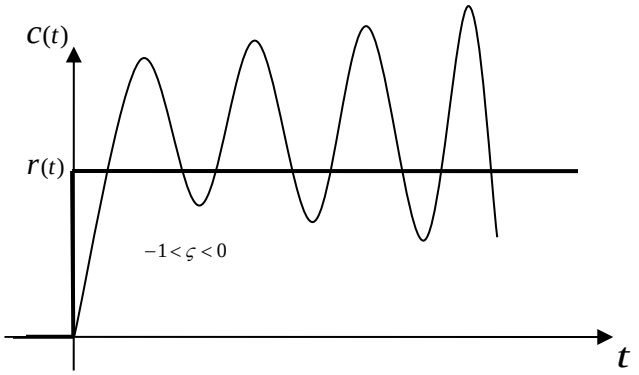


מניתוח המשוואה האופיינית נקבל שני פתרונות קומפלקסיים, כאשר החלק הממשי שווה ל- 0.

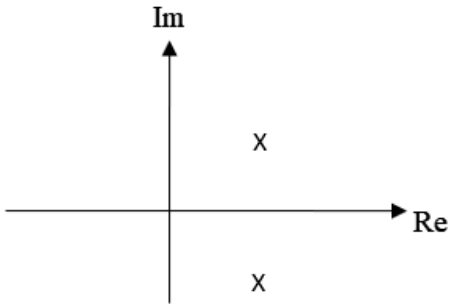


8.5 כאשר $-1<\varsigma<0$: מקדם הריסון שלילי

המערכת <u>לא</u> יציבה. מתקבלות תנודות ההולכות וגדלות עם זמן.



מניתוח המשוואה האופיינית נקבל שני שורשים מרוכבים הנמצאים מימין לראשית הצירים.

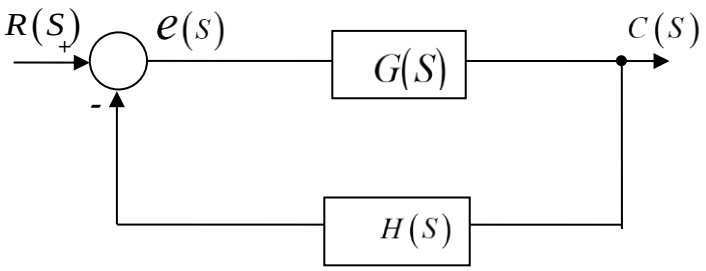


9. מקדמי שגיאה ושגיאות במצב המתמיד

לבחינת יעילות המשוב ויכולת המערכת למדוד את השגיאה במצב המתמיד בין אות הכניסה לאות המוצא, יש לבדוק את היכולת של אות המוצא לעקוב אחרי אות הכניסה.

שגיאות במצב המתמיד

9.1 מערכת בקרה עם משוב שלילי



פונקצית התמסורת של השגיאה:

$$\frac{e(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+G(S)\cdot H(S)}$$

ומכאן:

$$e(s) = \frac{1}{1+G(S)\cdot H(S)} \cdot R(s)$$

השגיאה במצב המתמיד

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

9.2 סיכום קבועי השגיאה והשגיאות במצב המתמיד

סוג המערכת נקבע לפי מספר הקטבים הנמצאים בראשית הצירים של המערכת **בחוג פתוח**.

פונקצית התמסורת של המערכת בחוג פתוח

$$T_{(O,L)} = G(s)\cdot H(s)$$
$$\Downarrow$$
חוג פתוח

הגדרות

מערכת מסוג 0 : מערכת שמספר הקטבים שלה בראשית הצירים שווה ל-0.

מערכת מסוג 1 : מערכת שמספר הקטבים שלה בראשית הצירים שווה ל-1.

מערכת מסוג 2 : מערכת שמספר הקטבים שלה בראשית הצירים שווה ל-2.

כניסה	כניסת מדרגה		כניסת שיפוע/ מהירות		כניסת תאוצה	
סוג המערכת	מקדם שגיאה K_p	השגיאה במצב המתמיד $e_{ss}^{\ p}$	מקדם שגיאה K_v	השגיאה במצב המתמיד $e_{ss}^{\ v}$	מקדם שגיאה K_a	השגיאה במצב המתמיד $e_{ss}^{\ a}$
0	$\frac{b_0}{a_0}$	$\frac{R_0}{1+K_p}$	0	∞	0	∞
1	∞	0	$\frac{b_0}{a_0}$	$\frac{R_0}{K_v}$	0	∞
2	∞	0	∞	0	$\frac{b_0}{a_0}$	$\frac{R_0}{K_a}$

b_0 - מקדמים קבועים

a_0 - מקדמים קבועים

K_p - מקדם שגיאת כניסת מדרגה

K_v - מקדם שגיאת כניסת מהירות

K_a - מקדם שגיאת כניסת תאוצה

10. יציבות מערכת בקרה

10.1 הגדרות ליציבות מערכת בקרה:

מערכת נקראת יציבה במובן BIBO (Bounded Input - Bounded Output) אם לכל כניסה חסומה נקבל מוצא סופי (כלומר, חסום גם כן).

בנוסף, יציבות במובן כניסה מוצא ניתנת להגדרה מדויקת בעזרת תגובת המערכת להלם: מערכת היא יציבה אם תגובתה להלם שואפת לאפס כאשר הזמן שואף לאינסוף.

לכן, תנאי דרוש על מנת שהמערכת תהיה יציבה הוא שכל הקטבים יהיו בעלי חלק ממשי שלילי (נמצאים בחצי השמאלי של הציר המרוכב) , מה שמבטיח שהתגובה להלם תתאפס במצב המתמיד.

10.2 יציבות מערכת בקרה לפי קריטריון ראוט-הורוביץ

נציג פולינום באופן כללי:

$$Q_{(S)} = a_n \cdot S^n + a_{n-1} \cdot S^{n-1} + a_{n-2} \cdot S^{n-2} + ... + a_0 = 0$$

10.3 טבלת ראוט למערכת מסדר שלישי

טבלת ראוט במערכת מסדר שלישי תיראה לפי הצורה הבאה

S^3	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}
S^2	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}
S^1	b_1	b_2	b_3
S^0	c_1	c_2	c_3

⇩

המערכת יציבה אם לכל המקדמים בעמודה הראשונה יש אותו סימן.

$$b_1 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-2} - a_{n-3} \cdot a_n}{a_{n-1}} \qquad C_1 = \frac{b_1 \cdot a_{n-3} - b_2 \cdot a_{n-1}}{b_1}$$

$$b_2 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-4} - a_{n-5} \cdot a_n}{a_{n-1}} \qquad C_2 = \frac{b_1 \cdot a_{n-5} - b_3 \cdot a_{n-1}}{b_1}$$

$$b_3 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-6} - a_{n-7} \cdot a_n}{a_{n-1}} \qquad C_3 = \frac{b_1 \cdot a_{n-7} - b_4 \cdot a_{n-1}}{b_1}$$

10.4 טבלת ראוט למערכת מסדר רביעי

טבלת ראוט במערכת מסדר רביעי תיראה לפי הצורה הבאה

S^4	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}
S^3	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}
S^2	b_1	b_2	b_3
S^1	c_1	c_2	c_3
S^0	d_1	d_2	d_3

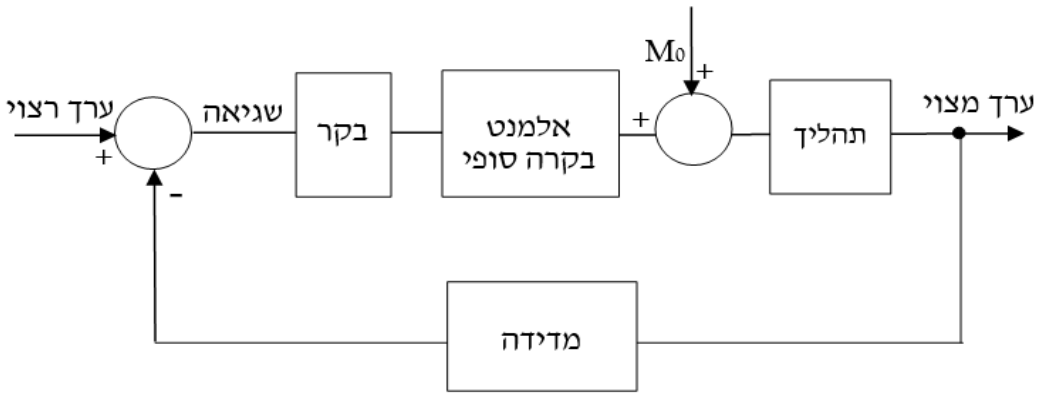
המערכת יציבה - לכל המקדמים שבעמודה הראשונה יש אותו סימן (כולם חיוביים).

$$b_1 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-2} - a_{n-3} \cdot a_n}{a_{n-1}} \qquad c_1 = \frac{b_1 \cdot a_{n-3} - b_2 \cdot a_{n-1}}{b_1} \qquad d_1 = \frac{c_1 \cdot b_2 - c_2 \cdot b_1}{c_1}$$

$$b_2 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-4} - a_{n-5} \cdot a_n}{a_{n-1}} \qquad c_2 = \frac{b_1 \cdot a_{n-5} - b_3 \cdot a_{n-1}}{b_1} \qquad d_2 = \frac{c_1 \cdot b_3 - c_3 \cdot b_1}{c_1}$$

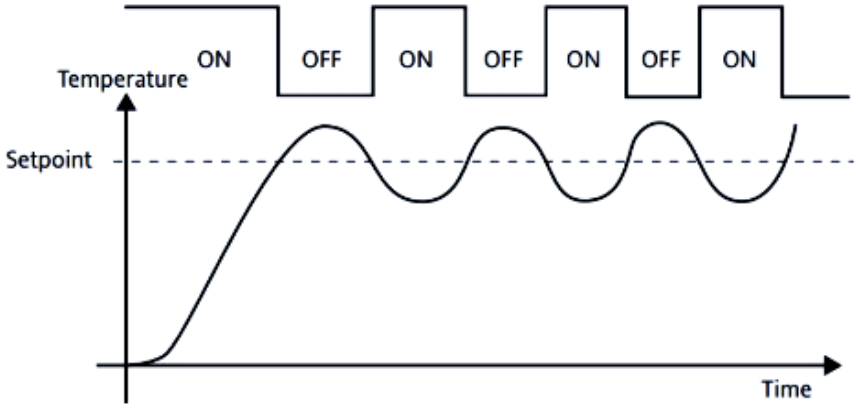
$$b_3 = \frac{a_{n-1} \cdot a_{n-6} - a_{n-7} \cdot a_n}{a_{n-1}} \qquad c_3 = \frac{b_1 \cdot a_{n-7} - b_4 \cdot a_{n-1}}{b_1} \qquad d_3 = \frac{c_1 \cdot b_4 - c_4 \cdot b_1}{c_1}$$

11. בקרים תעשייתיים



11.1 בקרה דו מצבית בקרת (on-off)

בבקרה דו-מצבית, תפוקה הבקר יכולה לקבל רק שני ערכים קיצוניים: ערך מקסימלי וערך מינימלי. אות היציאה מהבקר אינו יכול לקבל ערך ביניים בין שני הערכים ולכן הבקרה נקראת דו-מצבית.



מהתבוננות באיור ניתן לראות שהבקר מסוגל לייצר שני אותות בלבד, הערך הנמדד נע מעל ומתחת לערך הרצוי, ותפוקת הבקר המתקבלת אינה תלויה בגודל השגיאה, אלא רק בקיומה וגודלה.

11.2 בקרה יחסית/פרופורציונלית - *P* (Proportional)

בבקרה פרופורציונלית (המכונה בקרה *P*) , אות היציאה מהבקר $m(t)$ שווה לגודל קבוע מסוים m_0 בתוספת גודל הפרופורציונלי לשגיאה $e(t)$.
בבקרה יחסית, תפוקת הבקר משתנה יחסית לגודל השגיאה וכיוונה.

הבקר הפרופורציונלי מייצר את פלט הבקרה באופן פרופורציונלי לשגיאה. ערך שגיאה זה מוכפל עם הרווח היחסי (הגבר הבקר K_P) כדי לקבוע את התגובה של הפלט.

$$\boxed{m(t) = K_P \cdot e(t) + m_0}$$

$m(t)$ - אות היציאה מהבקר/תפוקת הבקר

K_P - הגבר הבקר (ניתן לכוונון), ללא יחידות

$e(t)$ - גודל השגיאה

m_0 - גודל קבוע של תפוקת הבקר, כאשר השגיאה אפס

11.3 בקרה אינטגרלית - (Integral) I

בבקרה אינטגרלית (המכונה בקרה *I*) , אות היציאה מהבקר $m(t)$ שווה לגודל קבוע מסוים m_0 ובאינטגרל השגיאה $e(t)$ שהיא פעולה השקולה לחישוב השטח שמתחת לעקומת השגיאה.
בבקרה אינטגרלית, תפוקת הבקר רגישה לגודל השגיאה ולזמן קיומה.

עבור זמן אינטגרלי גדול, מהירות התגובה של הבקר תהיה איטית, ובזמן האינטגרלי הקטן, מהירות התגובה תהיה מהירה.

$$\boxed{m(t)=\frac{1}{T_I}\cdot\int e(t)dt+m_0=K_I\cdot\int e(t)dt+m_0}$$

$$\boxed{K_I=\frac{1}{T_I}}$$

$m(t)$ - אות היציאה מהבקר/תפוקת הבקר

K_I - מהירות האינטגרציה, יחידות של $\left[\frac{1}{\text{sec}}\right]$

$e(t)$ - גודל השגיאה

T_I - זמן האינטגרציה ביחידות $[\text{sec}]$

m_0 - גודל קבוע של תפוקת הבקר, כאשר השגיאה אפס

11.4 בקרה נגזרת - D (Differential /Derative)

בקרת נגזרת (המכונה בקרה *D*), אות היציאה מהבקר $m(t)$ שווה לגודל קבוע מסוים m_0 כאשר השגיאה $e(t)$ קבועה לא מתקיימת פעולת תיקון בבקר.

בקרה נגזרת מגיבה רק לקצב השינוי של השגיאה ולא לגודלה.

$$\boxed{m(t) = K_D \frac{\mathrm{de(t)}}{dt} + m_0}$$

$m(t)$ - אות היציאה מהבקר/תפוקת הבקר

K_D - הגבר הבקר, יחידות של $[\mathrm{sec}]$

$e(t)$ - גודל השגיאה

m_0 - קבוע הדיפרנציאציה

משוואת בקרה PI :

$$\boxed{m(t) = K_P e(t) + K_P K_I \cdot \int e(t)dt + M_I}$$

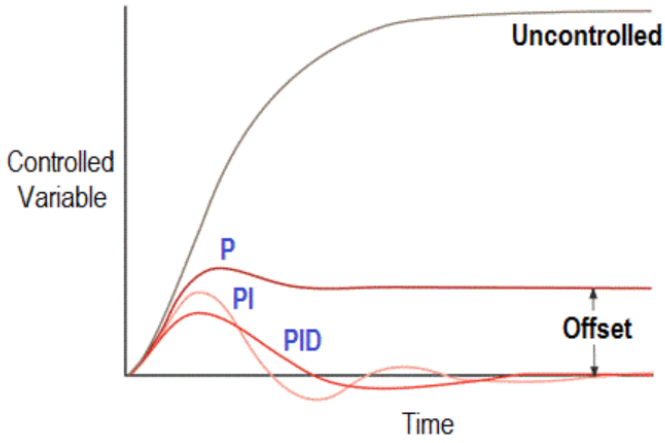
משוואת בקרה PD :

$$\boxed{m(t) = K_P \cdot e(t) + K_D \frac{\mathrm{de(t)}}{dt} + m_0}$$

משוואת בקרה PID :

$$\boxed{m(t) = K_P e(t) + K_P K_I \cdot \int e(t)dt + K_P K_D \frac{\mathrm{de(t)}}{dt} + m_0}$$

גרף השוואה בין פעולות הבקרים



רכיבים ומתמרים

1. תחומים תקינים במערכות בקרה

1.1 מתחים תקינים במערכות בקרה

0 – 5 [V]
1 – 5 [V]
0 – 10 [V]
2 – 10 [V]

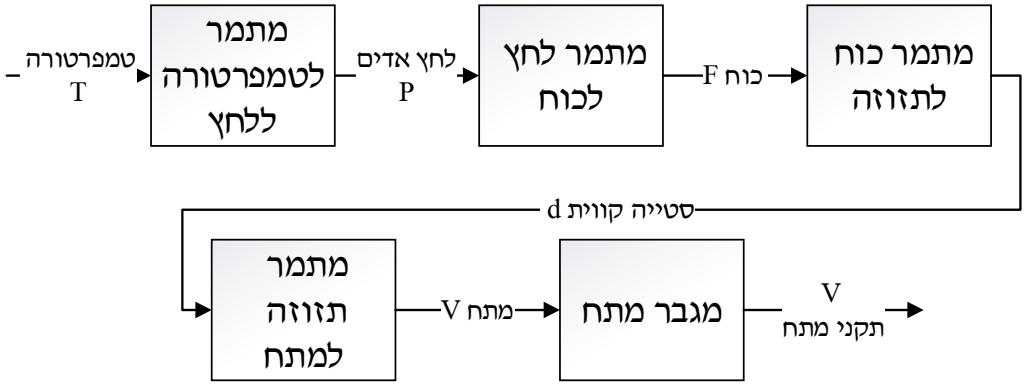
1.2 זרמים תקינים במערכות בקרה

0 – 20 [mA]
4 – 20 [mA]
10 – 50 [mA]

1.3 תחומי אותות תקינים במערכות פנאומטיות

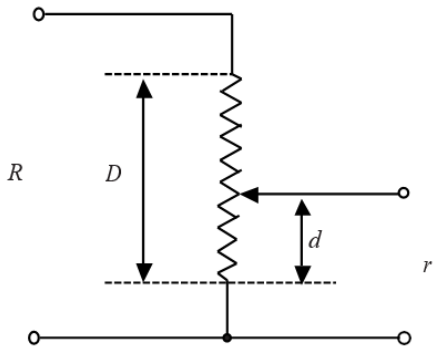
3 – 15 [psi]
0.2 – 1 [Bar]

דוגמא להמרת גודל פיזיקלי לאות חשמלי תקני


מתמר לטמפרטורה ללחץ
מתמר לחץ לכוח
מתמר כוח לתזוזה
מתמר תזוזה למתח
מגבר מתח
טמפרטורה
T
לחץ אדים
P
כוח F
סטייה קווית d
מתח V
V
תקני מתח

2. עקרונות פעולה של מתמרים

2.1 התמרת תזוזה באמצעות נגד משתנה (Potentiometer)



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

$r[\Omega]$ התנגדות קטע נמדד

$D[cm]$ אורך הנגד המשתנה מקצה לקצה

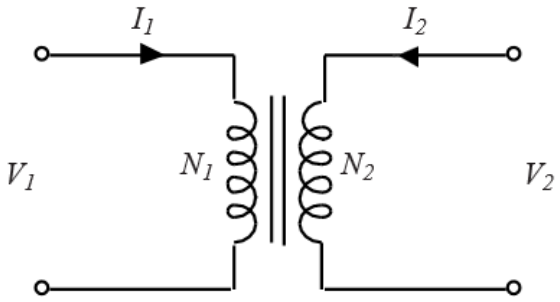
$d[cm]$ אורך קטע הנמדד

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

2.2 עקרון פעולת שנאי אידיאלי

קשר בין מתחי השנאי למספר הליפופים

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



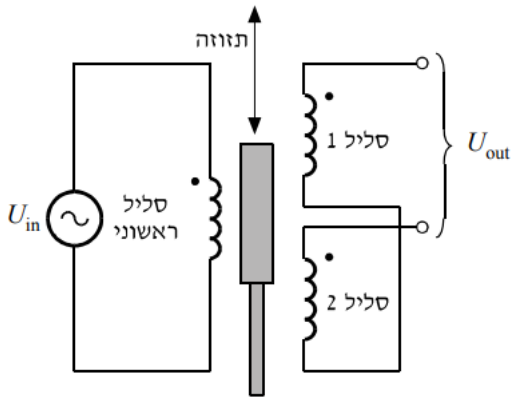
N_1 מספר כריכות בסליל הראשון

N_2 מספר כריכות בסליל השני

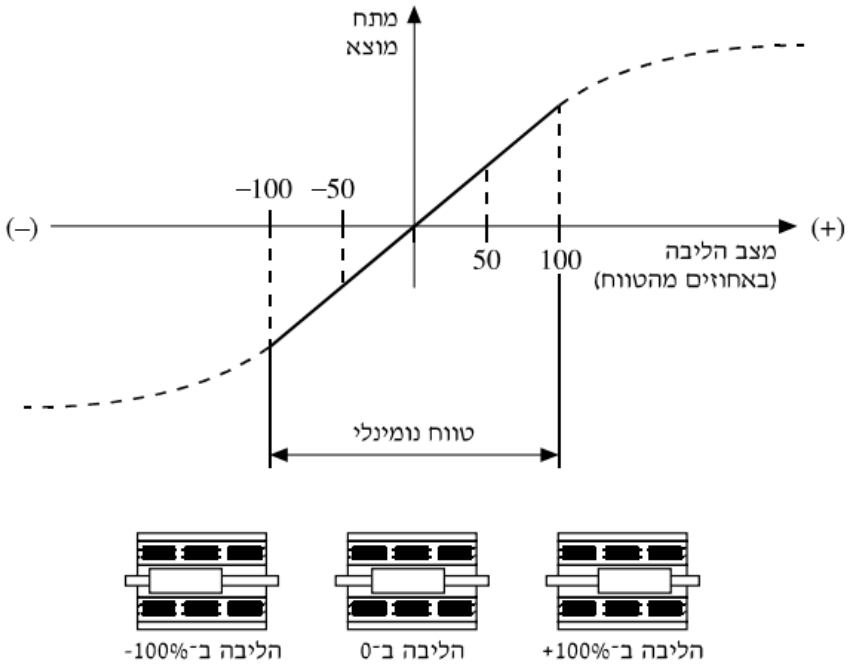
2.3 מתמר מיקום LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

הינו **שנאי הפרשי** משתנה בהתאם למיקום ליניארי. הוא מורכב משנאי, הבנוי מסליל ראשי ושני סלילים משניים המלופפים בכיוונים הפוכים. במרכזו של שנאי זה עוברת ליבה מתכתית במיקום משתנה. בסליל הראשי של השנאי מוזן מתח AC שיוצר שדה אלקטרו-מגנטי. שדה אלקטרו-מגנטי זה יוצר השראות על הסלילים המשניים, שמוציאים מתח AC במוצאם, בהפרש פאזה של 180 מעלות, עקב כיוון הליפוף ההפוך בניהם. הליבה שעוברת במרכז השנאי יוצרת שינוי באמפליטודה של כל אחד משני השנאים, בהתאם למיקום הליניארי של הליבה בתוך השנאי.

תיאור חשמלי של השנאי



תלות מתח המוצא של מתמר LVDT במצב הליבה במעגל



2.4 חיישן קירבה קיבולי

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

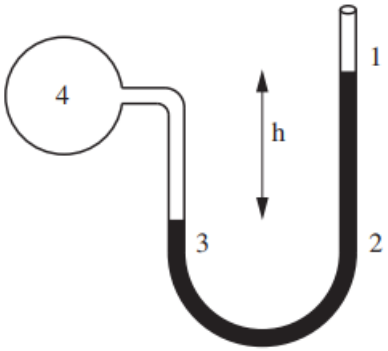
הנוסחה לחישוב ערכו של הקבל:

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

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: $8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$.

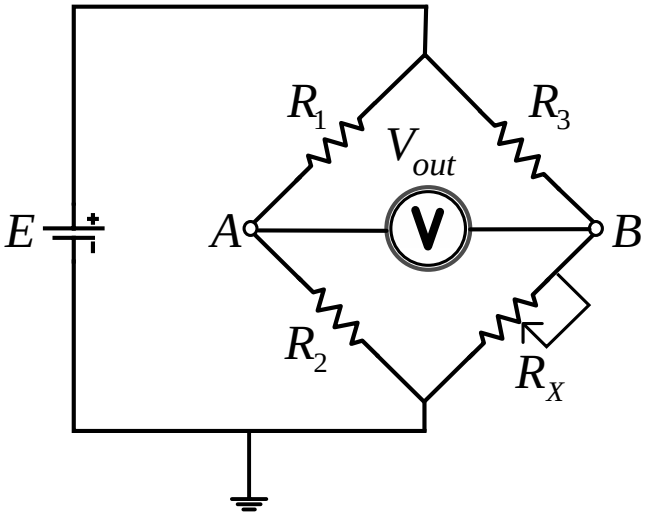
2.5 עקרון פעולת המנומטר



$$\boxed{P = \rho \cdot g \cdot h}$$

$P\left[\frac{dyne}{cm^2}\right]$	לחץ הנוזל בכלי 4
$\rho\left[\frac{gr}{cm^3}\right]$	צפיפות הנוזל במנומטר
$g\left[\frac{cm}{s^2}\right]$	תאוצת כוח הכובד
$h[cm]$	הפרש הגבהים בין נקודות 1 ו-3

3. עקרון פעולת גשר ויטסטון



מציאת מתח היציאה של גשר ווינסטון

$$V_{out} = V_A - V_B = \frac{E \cdot R_2}{R_2 + R_1} - \frac{E \cdot R_X}{R_X + R_3}$$

תנאי לקבלת גשר מאוזן

כשהמתח בין הנקודות A, B יהיה שווה לאפס, מאזנים את הגשר ע"י כיוון הפוטנציומטר R_X. במצב איזון נקבל:

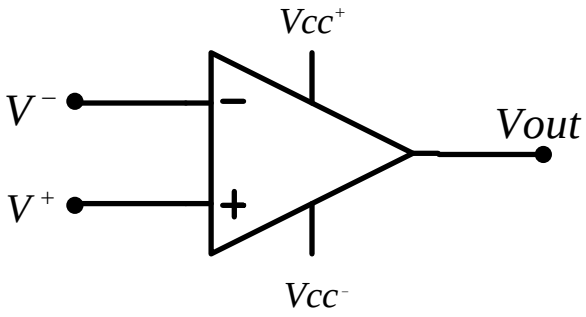
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_X}$$

$$R_X = \frac{R_3 \cdot R_2}{R_1}$$

4. מגברי שרת

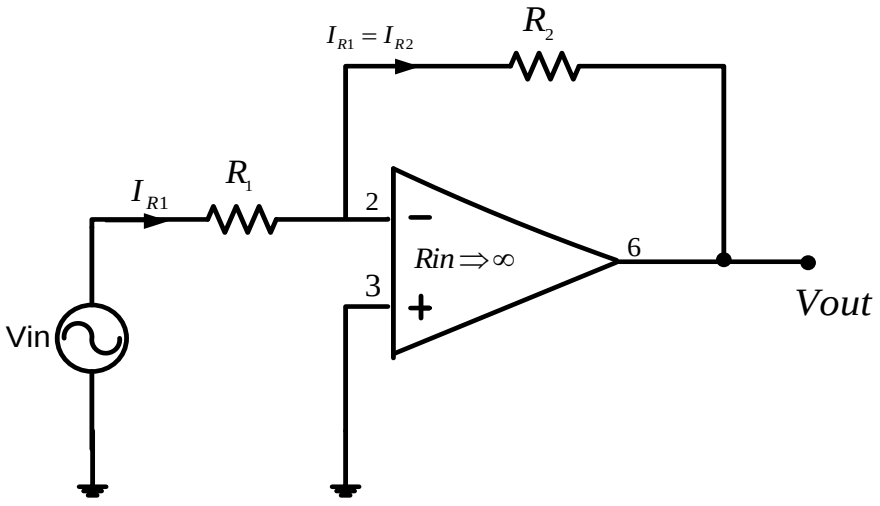
4.1 מגבר שרת כמשווה (חוג פתוח)

המגבר משמש כמשווה בין שני מתחי הכניסה V^+ ו- V^-.



- כאשר המתח ברגל **החיובית** $V^- < V^+$ מתח המוצא יהיה שווה בקירוב למתח ההזנה החיובית $Vout = V^+$.
- כאשר המתח ברגל **השלילית** $V^+ < V^-$ מתח המוצא יהיה שווה בקירוב למתח ההזנה השלילי $Vout = V^-$.
- כאשר המתח ברגל **השלילית שווה** למתח ברגל **החיובית** $V^+ = V^-$ מתח המוצא אינו מוגדר ויכול להיות כל ערך בין V^- ל- V^+.

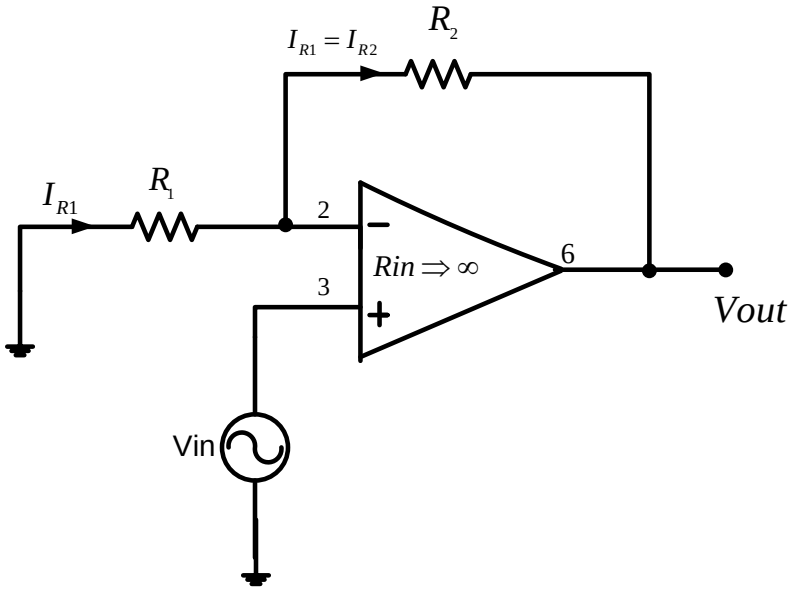
4.2 מגבר שרת הופך מופע



הגבר המתח:

$$A_V = \frac{Vout}{Vin} = -\frac{R_2}{R_1}$$

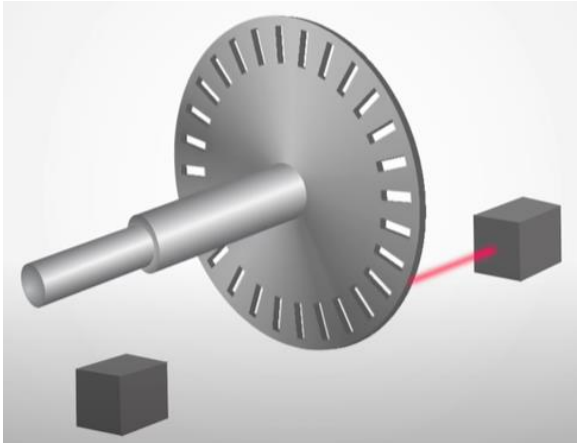
4.3 מגבר שרת שומר מופע



הגבר המתח:

$$A_V = \frac{Vout}{Vin} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

5. מקודד אופטי Optical Encoder



אנקודר אופטי–יחסי מבוסס על מכלול של דיסקה ובה חריצים מעבירי אור במרחק זוויתי קבוע זה מזה. מצדה האחד של הדיסקה ישנו מקור אור ומהצד השני גלאי אור המייצרים דפקים מחזוריים של מתח או של זרם בכל פעם שנקלט בהם אור. באנקודר דו–ערוצי מהירות הסיבוב של הדיסקה היא יחסית לתדר הדפקים הנמדד.

כושר הפרדה של מקודד אופטי הפרשי

$$R_{es}[^\circ] = \frac{360^\circ}{N}$$

$R_{es}\left[^\circ\right]$ - כושר הפרדה של המקודד

כאשר N הוא מספר החריצים של המקודד

מהירות סיבוב של מקודד אופטי הפרשי :

$$n[rpm] = \frac{60}{2\pi \cdot r} \cdot V$$

$n[rpm]$ - מהירות הסיבוב

$r[m]$ - רדיוס דיסקט המקודד

$V\left[\frac{m}{\sec}\right]$ - מהירות

כושר הפרדה (אבחנה) של מקודד אופטי אבסולוטי :

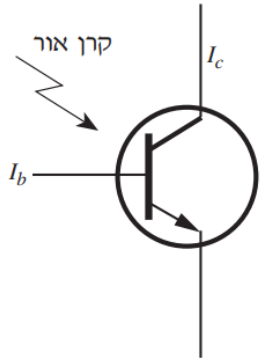
$$R_{es}[^\circ] = \frac{360^\circ}{2^n}$$

כאשר n מספר הסיביות של המקודד

6. גלאי אור

גלאי אור הוא התקן, שכתוצאה מאור משתנה התנגדותו החשמלית או נוצר הפרש מתחים שיוצר זרם בחיישן.

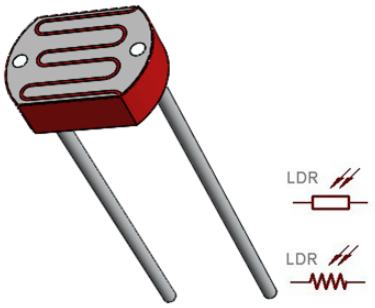
פוטו-טרנזיסטור



זרם הבסיס נמצא ביחס ישר לעוצמת קרן האור הפוגעת בטרנזיסטור. זרם הקולט מוגבר בעקבות ההגבר הפנימי של הטרנזיסטור.

6.1 נגד רגיש לאור -LDR

ברכיב זה ההתנגדות הסגולית של המוליך משתנה בהתאם לעוצמת האור.



$R[\Omega]$ התנגדות המוליך בחיישן

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

$L[cm]$ אורך המוליך

$A[mm^2]$ שטח חתך המוליך

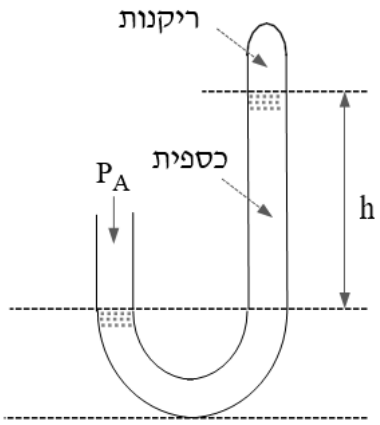
$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

7. מדידות בסיסיות

מדידת לחץ

7.1 מדידת לחץ אטמוספרי בשפופרת כספית

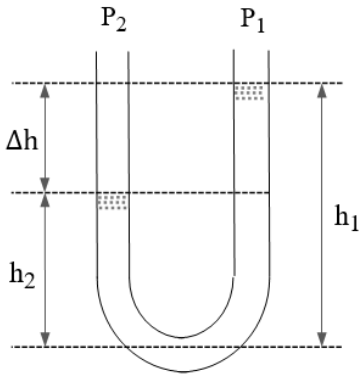
$$P_A = \rho \cdot g \cdot h$$



לחץ אטמוספרי	$P_A\left[\frac{kg}{m^2}\right]$
צפיפות הכספית	$\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
גובה עמוד הכספית	$h[m]$
תאוצת כוח הכובד	$g\left[\frac{m}{s^2}\right]$

7.2 מדידת לחץ הפרשי בשפופרת U

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



לחץ	$P\left[\frac{kg}{m^2}\right]$
צפיפות הנוזל	$\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
הפרשי הגובהים	$\Delta h[m]$
תאוצת כוח הכובד	$g = 9.81\left[\frac{m}{s^2}\right]$

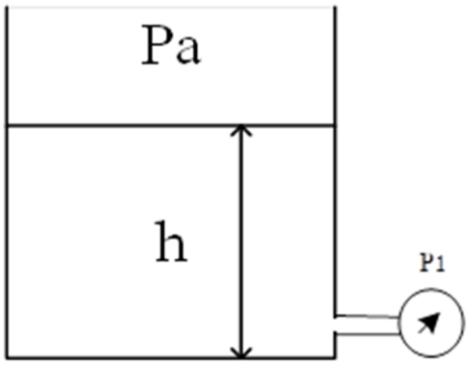
7.3 טבלת המרה ליחידות לחץ

psi	Lb/ft^2	Atmosphere	Kg/cm^2	in. H_2O @ 15˚C	ft. H_2O @ 15˚C	mm. Hg @ 0˚C	in. Hg @ 0˚C
1	144	0.06804	0.07031	27.70	2.309	51.71	2.036

BAR	$dyne/cm^2$	PSI	N/m^2	Pascal
1	10^6	14.504	10^5	10^5

מדידת מפלס נוזלים

7.4 מדידת מפלס במכל **פתוח** ע"י מתמר לחץ הידרוסטטי



$P_1\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ לחץ הנמדד במתמר הלחץ תאוצת כוח הכובד

$\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ צפיפות הנוזל

$h[m]$ מפלס הנוזל מעל נקודת המדידה

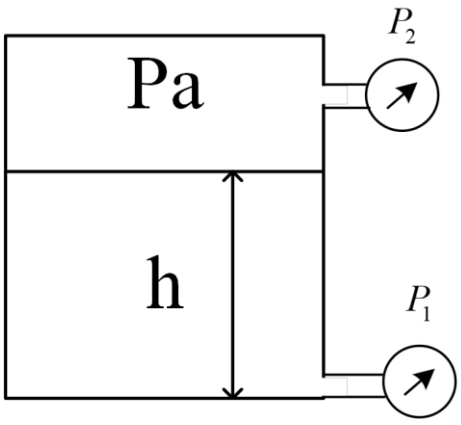
$g = 9.81\left[\frac{m}{s^2}\right]$ תאוצת כוח הכובד

$P_a\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ לחץ אטמוספרי

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h + P_a$$

7.5 מדידת מפלס במכל **סגור** ע"י מתמר לחץ הידרוסטטי

כאשר המיכל סגור נדרשים שני מדי לחץ בשתי נקודות מדידה



$$h = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g}$$

$P_1\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ הלחץ הנמדד במתמר לחץ התחתון

$P_2 = \left[\frac{kg}{m^2}\right]$ הלחץ הנמדד המתמר לחץ העליון

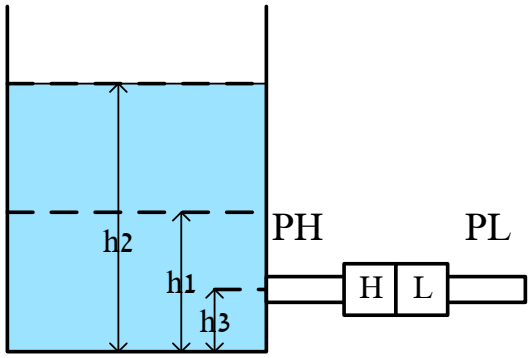
$h[m]$ גובה המפלס

7.6 מדידת מפלס באמצעות משדר לחץ הפרשי במיכל פתוח

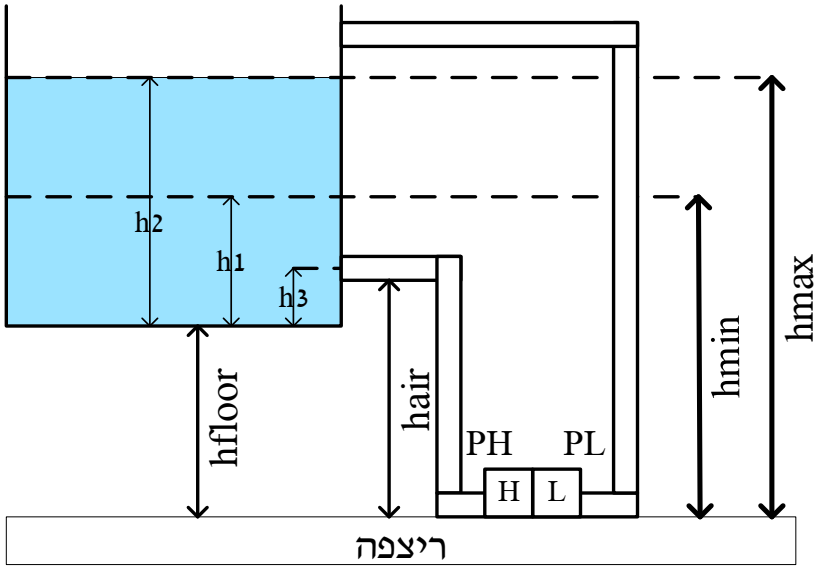
$$zero = \Delta P_{\min} = (h_1 - h_3)\cdot\rho\cdot g$$

$$span = \Delta P_{\max} = (h_2 - h_3)\cdot\rho\cdot g$$

$$range = (h_2 - h_1)\cdot\rho\cdot g$$



7.7 מדידת מפלס באמצעות משדר לחץ הפרשי במיכל פתוח הנמצא בגובה מעל ריצפת העבודה



$\Delta P_{\min}\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ הלחץ המינמלי במד לחץ ההפרשי PHL , ונקודת האפס.

$$h_{\min} = h_{air} + (h_1 - h_3) = h_{floor} + h_1$$

$\Delta P_{\max}\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ הלחץ המקסימלי במד לחץ ההפרשי PHH , ונקודת הטווח.

$$zero = \Delta P_{\min} = h_{\min}\cdot\rho\cdot g$$

$$h_{\max} = (h_2 + h_{floor})$$

$h_1[m]$ מפלס הנוזל המינמלי

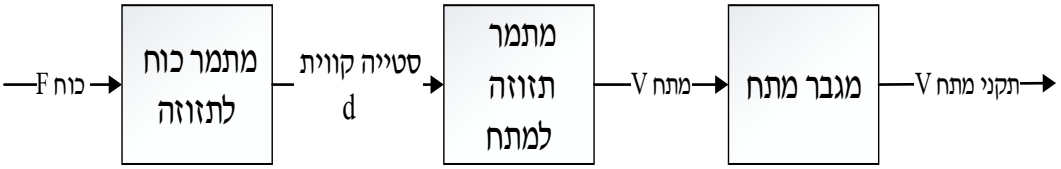
$$span = \Delta P_{\max} = h_{\max}\cdot\rho\cdot g$$

$h_2[m]$ מפלס הנוזל מקסימלי

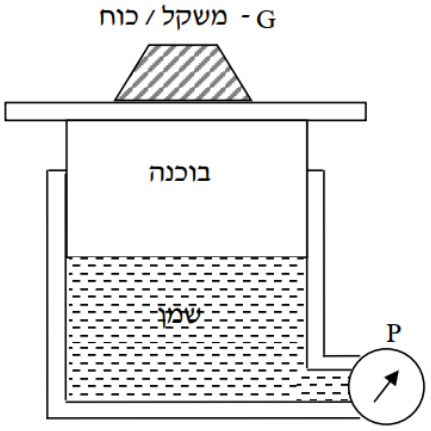
$h_3[m]$ מפלס הנוזל של המה"ל

7.8 עקרון למדידת כוח ומשקל

דוגמא למדידת ולהתמרת של כוח ע"י מתמר תזוזה



7.9 מדידת כוח/משקל ע"י מד לחץ במאזניים הידרוליים



$G[N]$ משקל/כוח שיש למדוד

$S[m^2]$ שטח חתך הבוכנה

$P\left[\frac{N}{m^2}\right]$ לחץ נמדד

$P_a\left[\frac{N}{m^2}\right]$ לחץ אטמוספרי

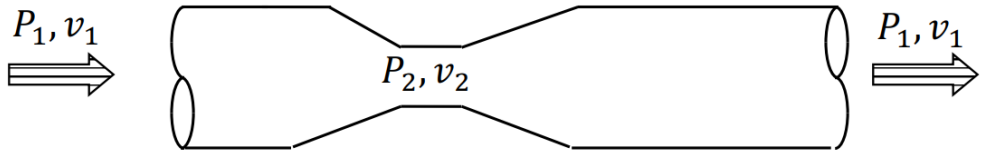
$$P = P_a + G/S$$

7.10 טבלת המרה ליחידות משקל

1b (ליברה)	oz (אונקיה)	Kg	gr	ft³ H_2O@ 0˚C	gal. H_2O@ 0˚C
1	16	0.4536	453.6	0.01602	0.1198

7.11 מדידת ספיקה

עקרון מד ספיקה בעל היצרות קבועה



$P_1\left[pal\right]$	לחץ הזורם בשטח חתך הרחב
$P_2\left[pal\right]$	לחץ הזורם בשטח חתך הצר
$V_1\left[m/\sec\right]$	מהירות הזורמת בשטח חתך הרחב
$V_2\left[m/\sec\right]$	מהירות הזורמת בשטח חתך הצר
$\rho\left[kg/m^3\right]$	צפיפות הזרם
$Q\left[m^3/\sec\right]$	ספיקת הזרם
$K\left[m^4\right]$	קבוע המביא בחשבון את שטח חתך הצינורות

בהיצרות מעשית נקבל:

$$\boxed{V_2^2 > V_1^2}$$

הספיקה Q לינארית עם המהירות:

$$\boxed{Q^2 = K \cdot \frac{P_1 - P_2}{\rho} \Rightarrow Q = \sqrt{K \cdot \frac{\Delta P}{\rho}}}$$

7.12 חישוב תחום מד ספיקה ברוטמטר לנוזלים שלא מים

צפיפות הנוזל $\rho\left[kg/m^3\right]$

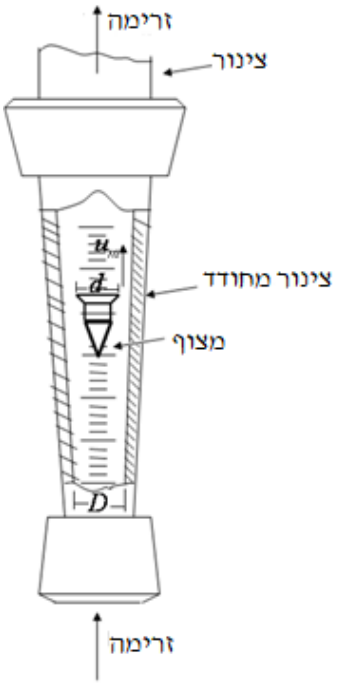
צפיפות המצוף $\rho_f\left[kg/m^3\right]$

ספיקת המים $Q_w\left[m^3/s\right]$

ספיקת הנוזל $Q_{LIQ}\left[m^3/s\right]$

$$Q_W = Q_{LIQ}\sqrt{\frac{(\rho_f - 1)\cdot\rho}{\rho_f - \rho}}$$

עקרון פעולה של מד ספיקה- רוטמטר



7.13 משוואת ברלוני בין שתי נקודות של זורם (בחתך הצר ובחתך הרחב של הצינור)

$$\boxed{P_1+\rho\cdot g\cdot h_1+\frac{\rho\cdot V_1^2}{2}=P_2+\rho\cdot g\cdot h_2+\frac{\rho\cdot V_2^2}{2}}$$

$h_1\left[m\right]$ גובה נקודה נמדדת בשטח החתך הרחב מעל למישור היחוס

$h_2\left[m\right]$ גובה נקודה נמדדת בשטח החתך הצר מעל למישור היחוס

$\Delta h\left[m\right]$ הפרשי הגבהים בין שתי נקודות מדידה

$g\left[\frac{m}{s^2}\right]$ תאוצת כוח הכובד

כאשר $P_1=P_2$

$$\boxed{g\cdot\left(h_1-h_2\right)=\frac{V_2^2-V_1^2}{2}\Rightarrow\Delta h=\frac{V_2^2-V_1^2}{2\cdot g}}$$

ידוע כי הספיקה שווה לכל אורך הצינור: $\boxed{Q_1=Q_2=A_1\cdot V_1=A_2\cdot V_2}$

ומכאן:

$$\boxed{\Delta h=\frac{V_2^2}{2\cdot g}\cdot\left[1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}$$

$A_1\left[cm^2\right]$ - שטח חתך הצינור בחלק הרחב

$A_2\left[cm^2\right]$ - שטח חתך הצינור בחלק הצר

8. מדידת טמפרטורה

8.1 טבלת המרת יחידות מידה של טמפרטורה

$$^\circ F = 1.8 \times {}^\circ C + 32^\circ$$
$$^\circ K = {}^\circ C + 273^\circ$$
$$^\circ R = {}^\circ C \cdot 0.8$$
$$^\circ C = \frac{^\circ F - 32^\circ}{1.8}$$

8.2 מדידת טמפרטורה ע"י צמד תרמי

טבלת סימוני צמדים טרמיים ותחומי טמפרטורות

סוג הצמד	סימון	תחום טמפרטורה
$I_R - C_O$	J	$-270 \div 760^\circ C$
$C_U - C_O$	T	$-270 \div 400^\circ C$
$C_R - A_L$	K	$-270 \div 1370^\circ C$

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

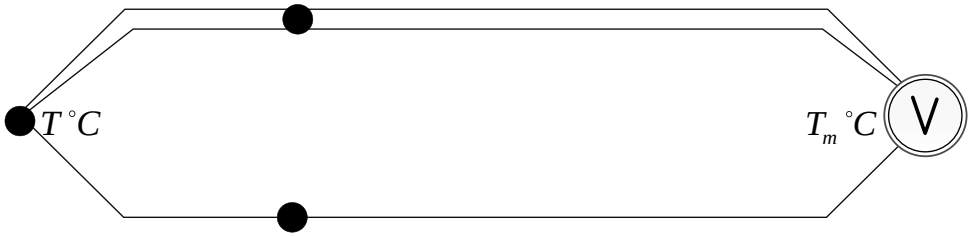
רגישות/מקדם צמד התרמי

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

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

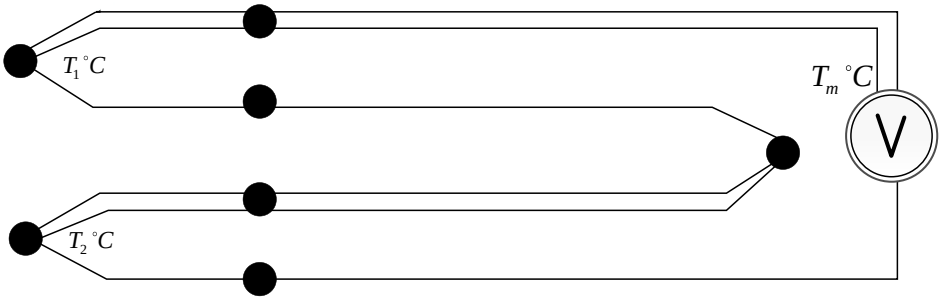
8.3 צורות חיבור צמד טרמי

מדידת טמפרטורה בנקודה בודדת



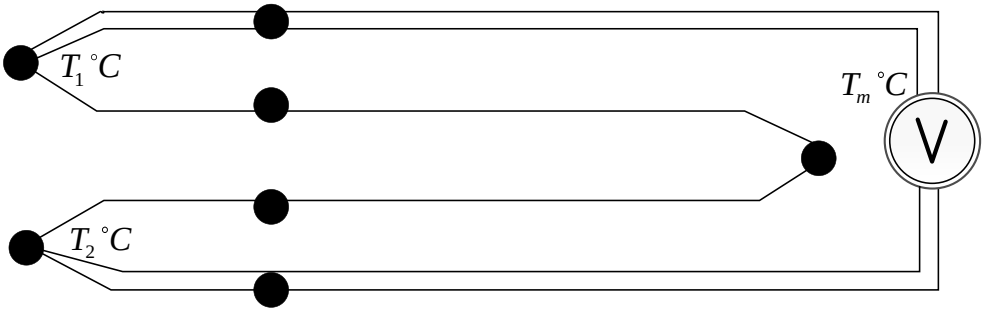
$$V = \alpha \cdot (T - T_m)$$

מדידת הטמפרטורות בשתי נקודות בחיבור טורי



$$V = \alpha \cdot \left[(T_2 - T_m) + (T_1 - T_m) \right]$$

מדידת הטמפרטורות בשתי נקודות בחיבור הפרשי



יש לקחת את הטמפרטורה הגבוהה יותר

$$T_2 > T_1$$

$$V = \alpha \cdot \left[(T_2 - T_m) - (T_1 - T_m) \right]$$

8.4 מדידת טמפרטורה של דו מתכתי bi-metal

$$\boxed{L_2 = L_1 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)\right]}$$

$L_1[cm]$	אורך הגוף ההתחלתי
$L_2[cm]$	אורך הגוף בטמפרטורה סופית
$T_1{}^\circ C$	טמפרטורה התחלתית
$T_2{}^\circ C$	טמפרטורה סופית
$\alpha\left[{}^\circ C^{-1}\right]$	מקדם התפשטות קווית של מתכות

8.5 עקרון שינוי התנגדות מתכת כתוצאה משינוי טמפרטורה

$$\boxed{R = R_0 \cdot \left[1 + \alpha_1 (\Delta T)\right]}$$

$R[\Omega]$	התנגדות בטמפרטורה הרצויה
$R_0[\Omega]$	התנגדות בטמפרטורת היחוס
$\Delta T[^\circ C]$	הפרש טמפרטורה בין הסופית להתחלתית
$\alpha\left[{}^\circ C^{-1}\right]$	מקדם התלוי בסוג מתכת החיישן

8.6 טבלת נתונים תקניים לשינוי התנגדויות מתכות כתוצאה משינוי טמפרטורה

התקן	התנגדות טמפרטורת הייחוס	טמפרטורת הייחוס	ערך מקדם α [Ω°C\Ω]
בריטי	$R_0 = 22.5[\Omega]$	$T_0 = 0\left[{}^\circ C\right]$	$\alpha = 0.00385$
אמריקאי	$R_0 = 100[\Omega]$	$T_0 = 0\left[{}^\circ C\right]$	$\alpha = 0.003916$
תקן בינלאומי IPTS-68	$R_0 = 100[\Omega]$	$T_0 = 0\left[{}^\circ C\right]$	$\alpha = 0.00385$

8.7 חוק הגזים האידיאליים לכמות (מסה) נתונה של גז

$$\boxed{\frac{P \cdot V}{T} = const}$$

$P[Pal]$	הלחץ המוחלט של הגז
$V\left[cm^3\right]$	נפח גז
$T\left[{}^\circ K\right]$	הטמפרטורה המוחלטת של הגז, במעלות קלווין

9. מדידת מהירות

אפשר למדוד את מהירותו הקווית של גוף או את מהירותו הסיבובית.

9.1 מדידה ישירה של מהירות קווית

מדידת הזמן שנדרש לגוף לעבור מרחק ידוע מראש, למשל קילומטר אחד, באמצעות שעון עצר, וחלוקת המרחק בזמן כדאי לקבל את המהירות.

$$\boxed{v = \frac{x}{t}}$$

$v\left[m/\sec\right]$ - מהירות

$x\left[m\right]$ - מרחק

$t\left[\sec\right]$ - זמן

9.2 מדידה עקיפה של מהירות קווית (לדוגמא מהירות מכונית)

במדידת המהירות של המכונית משתמשים בכבל מתכת, אשר בצידו האחד גלגל שיניים, המחובר לגל ההינע הסופי בתיבת ההילוכים או ישירות לגלגל. בצידו השני של הכבל נמצא מגנט קטן, אשר מסתובב עקב התנועה המועברת אליו דרך הכבל. סיבוב המגנט יוצר זרם בסליל שבו נמצא המגנט. אפשר למדוד זרם זה ולכייל מחוג, המורה את מהירות הרכב לזרם נמדד נתון.

9.3 מדידת מהירות סיבוב בעזרת טכוגנרטור

$$\boxed{K = \left(\frac{\Delta n}{\Delta V}\right)^{-1} = \frac{\Delta V}{\Delta n}}$$

$$\boxed{V_{tg} = n \cdot K}$$

מהירות סיבוב	$n\left[rpm\right]$	
מתח הנמדד ביצאת הטכוגנרטור	$V\left[V\right]$	
קבוע המותאם לטכוגנרטור המוגדר גם בתור הרגישות החיישן	$K\left[\frac{V}{rpm}\right]$	

10. מדידות מיוחדות

10.1 מד עיוות strain gain

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

E - עיוות מוגדר כשינוי האורך היחסי של הגוף, עקב מתיחות לאורך אחד הצירים של הגוף

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

$L\left[cm\right]$ - אורך הציר כאשר לא מופעל כוח

רגישות מד העיוות, רגישות זו חסרת יחידות

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

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

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

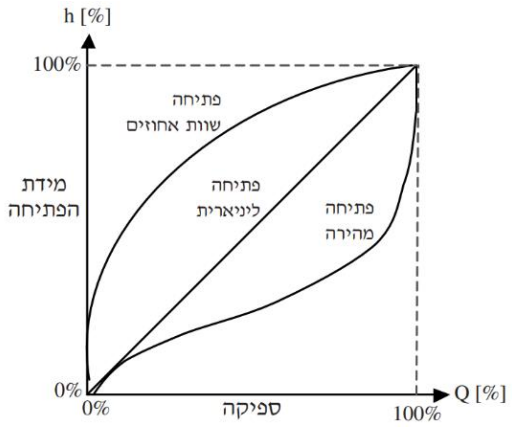
$$\boxed{G.F = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\mathrm{E}}}$$

11. שסתומי בקרה

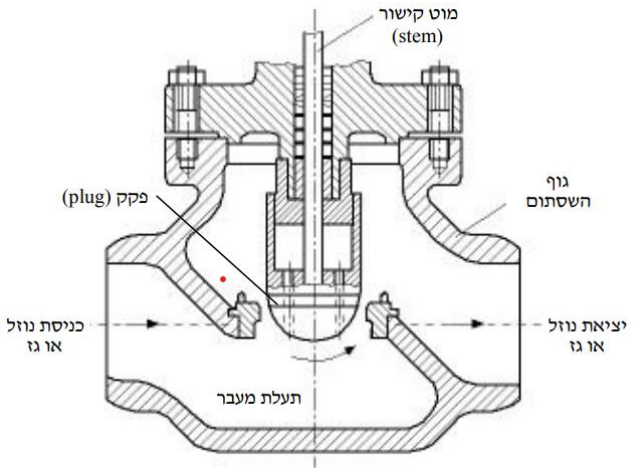
אחד המפעילים השימושיים ביותר בתעשייה הוא שסתום הבקרה (המכונה גם שסתום ויסות, ברז ויסות וכו'). באופן כללי, שסתום הוא התקן המיועד לשנות את הספיקה, או את כיוון הזרימה, או את הלחץ, במערכת שבה זורם נוזל או גז

11.1 עקרון פעולת שסתום

בגרף מתוארים שלושה אופיינים של שלושה סוגי שסתומים שונים: שסתום לפתיחה מהירה, שסתום לפתיחה ליניארית ושסתום לפתיחה שוות אחוזים.



המבנה הכללי של שסתום ויסות (חתך)



11.2 הספיקה דרך שסתום לינארי

$$Q = \frac{Q_m}{h_m} \cdot h \rightarrow K = \frac{Q_m}{h_m} \rightarrow Q = K \cdot h$$

Q - ספיקת הזורם

Q_m - ספיקת זורם מרבית

h_m - מידת הפתיחה המרבית של המגוף

$h[\%]$ - מידת פתיחת המגוף, באחוזים

K - קבוע ההגבר של השסתום, ללא יחידות

11.3 הספיקה דרך שסתום שווה אחוזים

$$Q = K \cdot h^2$$

$Q[\%]$ - ספיקת הזורם

$h[\%]$ - מידת פתיחת המגוף, באחוזים

K - קבוע ההגבר של השסתום, ללא יחידות

11.4 מפל הלחץ על פני השסתום

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{Q^2 \cdot \rho}{K}$$

$Q[LPM]$ ספיקת הזורם

$P_1[PSI]$ - לחץ סטטי של הזורם לפני ההצרה

$P_2[PSI]$ - לחץ סטטי של הזורם במהלך ההצרה

$\rho[gr/cm^3]$ - צפיפות הזורם

$K\left[\frac{(LPM)^2 \cdot \frac{gr}{cm^3}}{psi}\right]$ קבוע ההגבר של השסתום

11.5 הגדרת C_v

C_v של שסתום מוגדר כספיקה מספר גלוני מים לדקה GPM-Gallon Per Minute שניתן להזרים דרך שסתום בפתיחה מלאה בתנאי לחץ וטמפרטורה תקניים ותחת מפל לחץ של $1PSI$ על פני השסתום.

11.6 חישוב C_v

$$C_v = Q \cdot \sqrt{\frac{g}{P_1 - P_2}}$$

C_v - ספיקת הנוזל דרך השסתום בפתיחה מלאה ובמפל לחץ של 1 PSI

$Q[GPM]$ - ספיקת הזורם

$P_1[PSI]$ - לחץ סטטי של הזורם לפני ההצרה

$P_2[PSI]$ - לחץ סטטי של הזורם במהלך ההצרה

g - משקל סגולי gravity specific של הזורם

12. המרת יחידות

12.1 טבלת המרה ליחידות נפח

Galons (U.S)	ft^3	in^3	barrela (oil)	cm^3 (or ml)	liters	imperial Gallons
1	0.1337	231	0.02381	3785	3.785	0.8327

12.2 טבלת המרה ליחידות אורך

ft-feet	in-inch	meter	cm	mm
1	12	0.3048	30.48	304.8

12.3 טבלת המרת ספיקה נפחית של נוזל

Liter/second	Liter/minute	Meter cube/hour	Foot cube/minute	Foot cube/hour	US gallons/minute	US barrels (oil)/day
L/sec	L/min	M^3/hr	ft^3/min	ft^3/hr	gal/min	US brl/d
1	60	3.6	2.119093	127.1197	15.85037	543.4783
0.016666	1	0.06	0.035317	2.118577	0.264162	9.057609
0.277778	16.6667	1	0.588637	35.31102	4.40288	150.9661
0.4719	28.31513	1.69884	1	60	7.479791	256.4674
0.007867	0.472015	0.02832	0.01667	1	0.124689	4.275326
0.06309	3.785551	0.227124	0.133694	8.019983	1	34.28804
0.00184	0.110404	0.006624	0.003899	0.2339	0.029165	1

12.3.1 המרת ספיקה נוזלית

$$1\frac{Liter}{\sec} = 3.6\frac{m^3}{h} = 0.06\frac{m^3}{\min} = 1\cdot 10^{-3}\frac{m^3}{\sec}$$

$$1\frac{Liter}{\sec} = 1,000\frac{cm^3}{\sec} = 60,000\frac{cm^3}{\min} = 3,600,000\frac{cm^3}{h}$$

12.4 טבלת המרת ספיקה מסית

Kilogram/hour	Pound/hour	Kilogram/second	Ton/hour
kg/h	lb/hour	kg/s	t/h
1	2.204586	0.000278	0.001
0.4536	1	0.000126	0.000454
3600	7936.508	1	3.6
1000	2204.586	0.277778	1

דוגמאות:

$$8.6\left[\frac{Kg}{hr}\right]=0.00236\left[\frac{Kg}{\sec}\right]$$

$$450\left[\frac{gr}{\min}\right]=0.0075\left[\frac{Kg}{\sec}\right]$$

$$1\left[\frac{Kg}{\sec}\right]=60,000\left[\frac{gr}{\min}\right]$$

12.5 טבלת המרת יחידות לחץ

Bar	Pound/square inch	Kilopascal	Megapascal	Kilogram force/ centimeter square	Millimeter of mercury	Atmospheres
bar	psi	kPa	MPa	kgf/cm^2	mm Hg	atm
1	14.50326	100	0.1	1.01968	750.0188	0.987167
0.06895	1	6.895	0.006895	0.070307	51.71379	0.068065
0.01	0.1450	1	0.001	0.01020	7.5002	0.00987
10	145.03	1000	1	10.197	7500.2	9.8717
0.9807	14.22335	98.07	0.09807	1	735.5434	0.968115
0.001333	0.019337	0.13333	0.000133	0.00136	1	0.001316
1.013	14.69181	101.3	0.1013	1.032936	759.769	1

דוגמאות:

$$3.5[bar]=350[KPa]$$
$$3[atm]=303.9[KPa]$$
$$459[KPa]=4.53[atm]$$