



חיישנים התנגדותיים

הקדמה

מדי עיבור

הקדמה לממשקים (חיישנים התנגדותיים):

– פוטנציומטרים ומחלקי מתח

– מעגלי גשר [Wheatstone bridge](#)

תרמומטר התנגדוטי

– מתכתיים RTD= Resistive temp detector

– Hot wire Anemometer

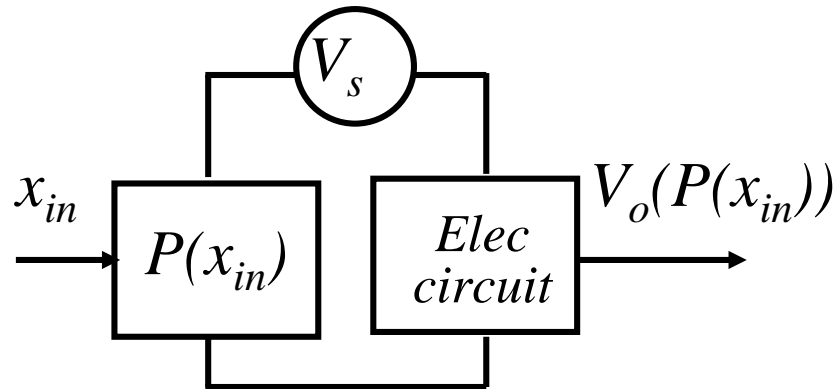
– מוליכים למחצה Thermistors

חיישנים פוטו-התנגדותיים



הקדמה – עקרונות החיישנים

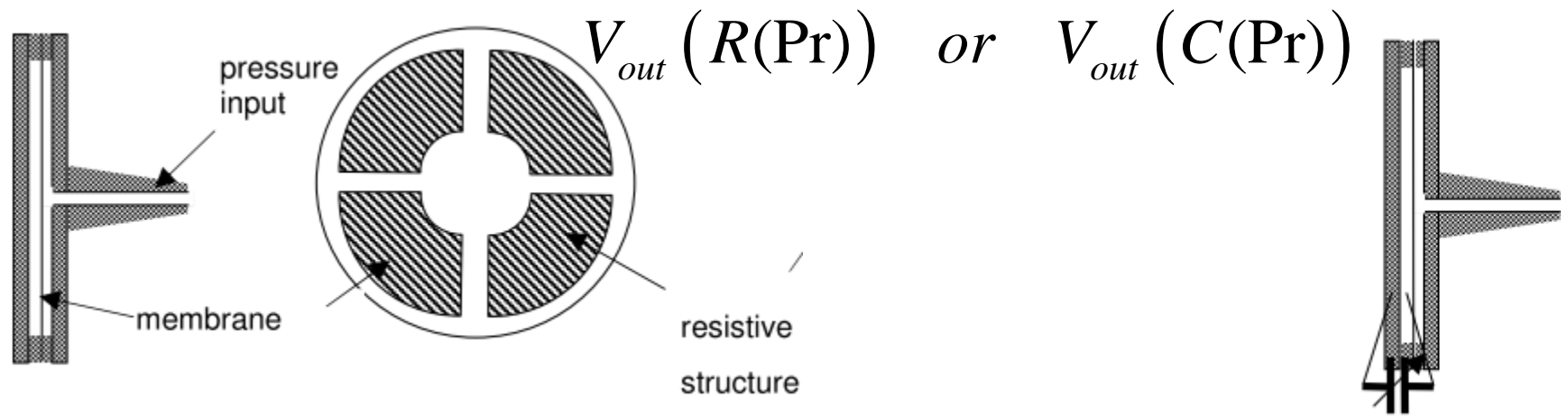
- חיישנים פרמטריים (Modulating): הגודל הנמדד משפיע על פרמטר חשמלי (התנגדות, קיבול, השראות) שגודלו נמדד בעזרת מעגל חשמלי עם מקור חיצוני





חיישני לחץ פרמטריים: דוגמאות

- הלחץ דוחף את הממבראנה שעליה נמצאים רכיבים חשמליים (התנגדותיים או קיבוליים):
- אפשרות 1: מתיחת הממבראנה משנה את ההתנגדות של רכיבים התנגדותיים (מדי עיבור) שנמצאים עליה $R(Pr)$
- אפשרות 2: דחיפת הממבראנה משנה את המרחק בין הרכיבים המוליכים ומשטח ייחוס ובכך את הקיבול בניהם $C(Pr)$
- מעגל גשר (נלמד בהמשך): מתח היציאה תלוי בפרמטר שמשתנה עם הלחץ.





חיישנים התנגדתיים

הקדמה

מדי עיבור

הקדמה לממשקים (חיישנים התנגדתיים):

– פוטנציומטרים ומחלקי מתח

– מעגלי גשר **Wheatstone bridge**

תרמומטר התנגדתי

– מתכתיים RTD= Resistive temp detector

– Hot wire Anemometer

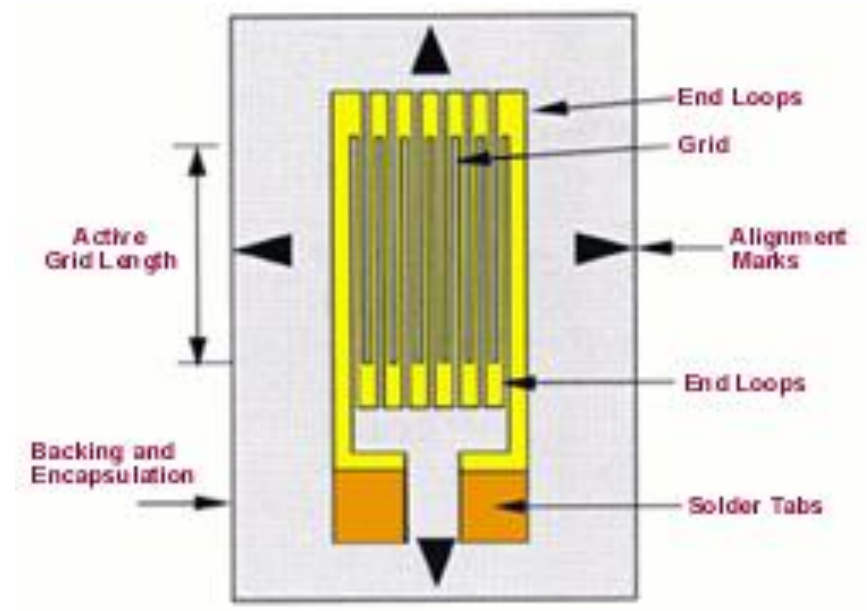
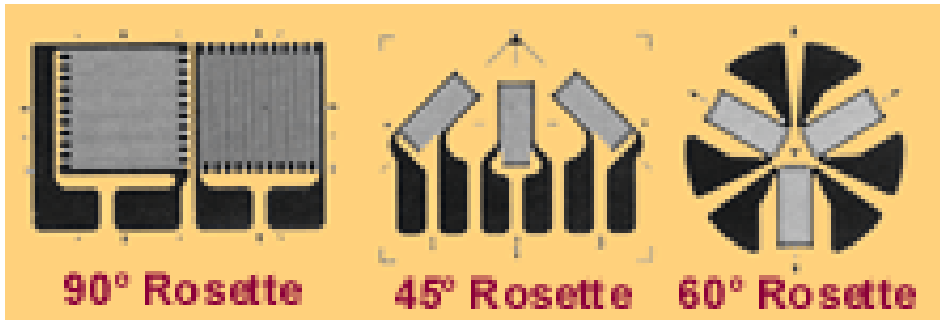
– מוליכים למחצה Thermistors

חיישנים פוטו-התנגדתיים



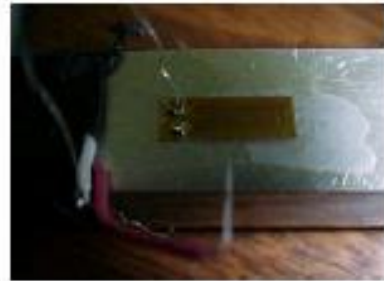
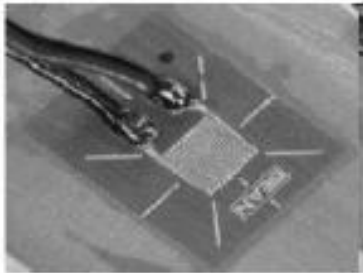
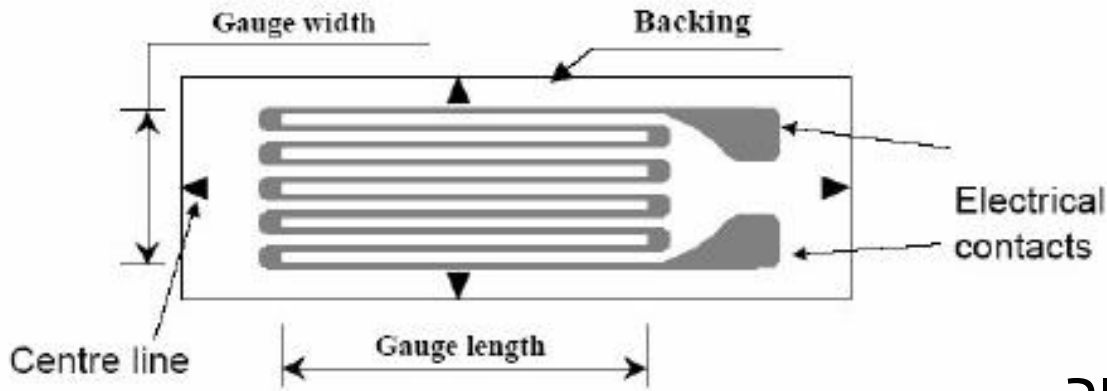
מדי עיבור

מדי עיבור מבוססים על שינוי בהתנגדות כפונקציה של המעוות





מדי עיבור

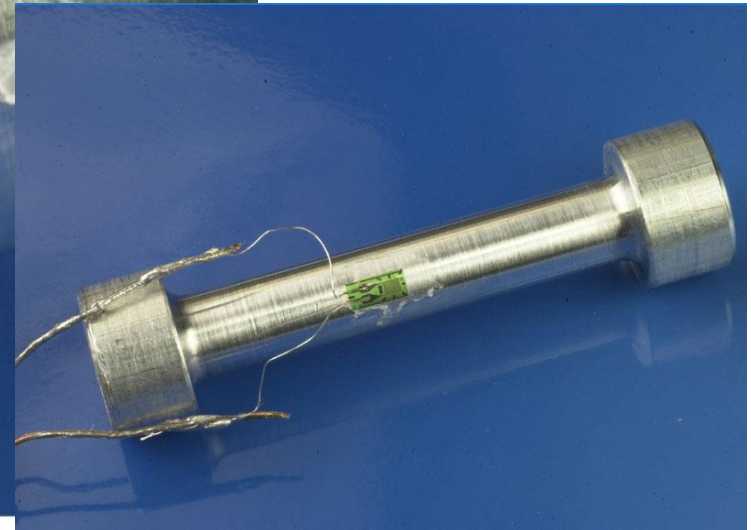
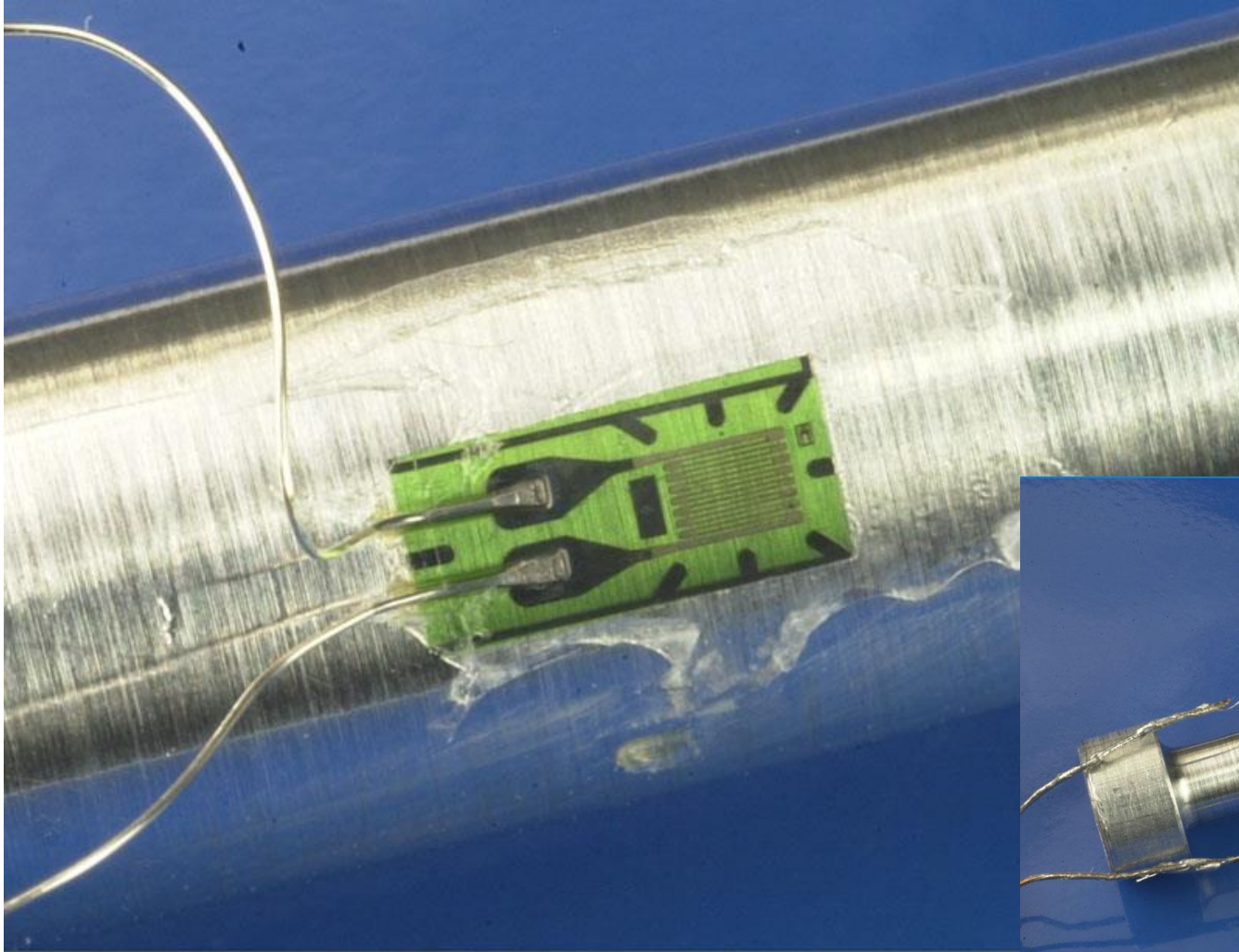


- מאמץ << מעוות
- מעוות << שינוי התנגדות
 - במתכות
 - אפקט פיזו-התנגדותי
 - חצאי-מוליכים
- למדידה מדויקת מד העיבור צריך להיות מודבק היטב לחלק שעובר מעוות
- בסיס מד-העיבור:
 - מבודד חשמלית מהחלק
 - מעביר את המעוות למדיד
 - יוצר משטח להדבקה



מדי עיבור

הרכבה על מוט למדידת כוח צירי





מדי עיבור – חישוב גודל

- חומר שכיח למדי-עיבור: קונסטנטן (55% נחושת 45% ניקל) – בעל התנגדות סגולית

$$\rho_e = 49 \times 10^{-8} \Omega m$$

- מד עיבור טיפוסי:

■ התנגדות $R = 120 \Omega$ קוטר: $D = 0.025 mm$

- מה צריך להיות אורך מד-העיבור?

$$L = \frac{RA_c}{\rho_e} = \frac{120(\pi 2.5^2 / 4)10^{-10}}{49 \times 10^{-8}} = 0.12m$$

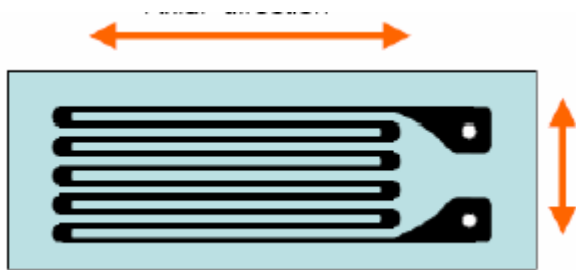
- מוליך ישר לא-פרקטי <<

- מבנה מפותל

- פיתולים גורמים לרגישות ניצבת

- המוליך יותר רחב בפיתולים כדי

להפחית רגישות ניצבת למה??





מדי עיבור - התנגדות

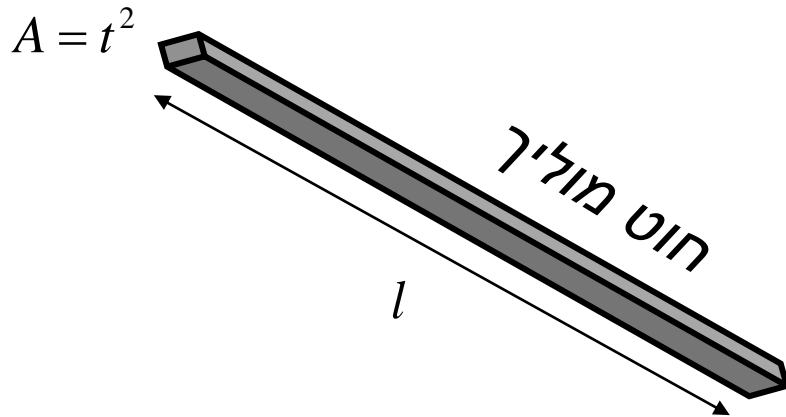
- מדי עיבור מבוססים על שינוי בהתנגדות תחת מאמץ מכני
- התנגדות של חוט מוליך:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

ρ = התנגדות סגולית

l = אורך

A = שטח



- בהפעלת מאמצ צירי טהור יחול שינוי בהתנגדות החשמלית לפי:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$



מדי עיבור

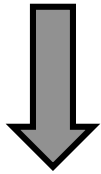
שינוי צורה והאפקט הפיזו-רזיסטיבי

• האפקט הפיזו-רזיסטיבי:
השינוי בהתנגדות הסגולית
כתוצאה ממעוות.

– במתכות הקשר לינארי: $\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$


– לרוב מדי העיבור $C \sim 1.13-1.15$

– לפלטינה $C \sim 4.4$



$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C \left(\frac{dl}{l} + \frac{dA}{A} \right) = C(1-2\nu) \frac{dl}{l}$$

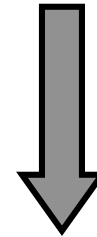
עיבור (מעוות) $\varepsilon = dl/l$ קבוע המדיד G

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\nu + C(1-2\nu)] = G \frac{dl}{l} = G\varepsilon$$


• שינוי שטח חתך:

– חוק Poisson: היחס בין
המעוות הצירי והמעוות

הרוחבי $\nu = -\frac{dt/t}{dl/l}$



$\nu \sim 0.3$ □

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dt}{t} = -2\nu \frac{dl}{l}$$



מדי עיבור – קבוע המדיד

- מדי עיבור (מתכתיים)

– שינוי התנגדות

קשר לינארי:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)] = G \frac{dl}{l} = G\varepsilon$$

$$R = R_0(1 + G\varepsilon) \quad \leftarrow \quad \frac{dR}{R} = G \frac{dl}{l} = G\varepsilon$$

– קבוע המדיד G (gauge factor)

– רוב המתכות (ההשפעה העיקרית נובעת משינוי הצורה) $G \approx 2$

– בפלטינה $G \approx 6$



מדי עיבור

מוליכים למחצה בהשוואה למתכתיים

• בחומרים מוליכים למחצה:

– האפקט הפיזו-רזיסטיבי דומיננטי וגדול יותר במתכות ואינו לינארי.

$$\frac{dR}{R} = -110\varepsilon + 10\varepsilon^2 \quad N\text{-type} \qquad \frac{dR}{R} = 119.5\varepsilon + 4\varepsilon^2 \quad P\text{-type}$$

TABLE 2.2 Typical Characteristics of Metal and Semiconductor Strain Gages

Parameter		Metal	Semiconductor
Measurement range	(*1)	0.1 to 40,000 $\mu\varepsilon$	0.001 to 3000 $\mu\varepsilon$
Gage factor		1.8 to 2.35	50 to 200
Resistance, Ω		120, 350, 600, . . . , 5000	1000 to 5000
Resistance tolerance	(*2)	0.1% to 0.2%	1% to 2%
Size, mm		0.4 to 150 Standard: 3 to 6	1 to 5



מדי עיבור מוליכים למחצה

- יתרונות:

- האפקט הפיזו-רזיסטיבי יותר חזק $\ll GF \sim 200$, מושפע ממספר ותנועה של מוליכי המטען

- התנגדות יותר גדולה $\rho = 10^{-5} - 10^{-2} \Omega m$

- מאפשר לבנות חיישנים קטנים, מקטין בעיות חימום עצמי

- זמן התעייפות יותר ארוך והיסטרזיס יותר קטן

- חסרונות:

- שינוי לא לינארי של ההתנגדות עם המעוות.

- רגישות גבוהה (ולא לינארית) לטמפרטורה, במיוחד בריכוז מזהמים גבוה שדרוש לרגישות למעוות.

- תחום מעוות מוגבל $e_{\max} \sim 5000 \mu strain$



הערה (*1) על תחום המדידה

תחום האלסטיות

חוק Hooke –

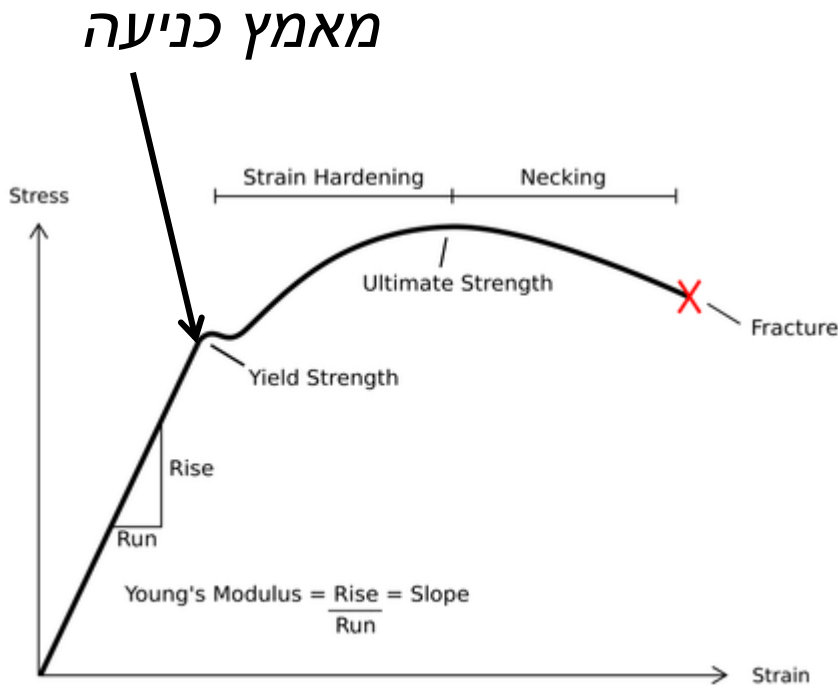
בתחום האלסטי הקשר בין המאמץ
הצירי והמעוות הצירי לינארי:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l}$$

תחום המדידה במדי עיבור מוגבל
לתחום האלסטי:

– למוליכים למחצה: $3000\mu\varepsilon$

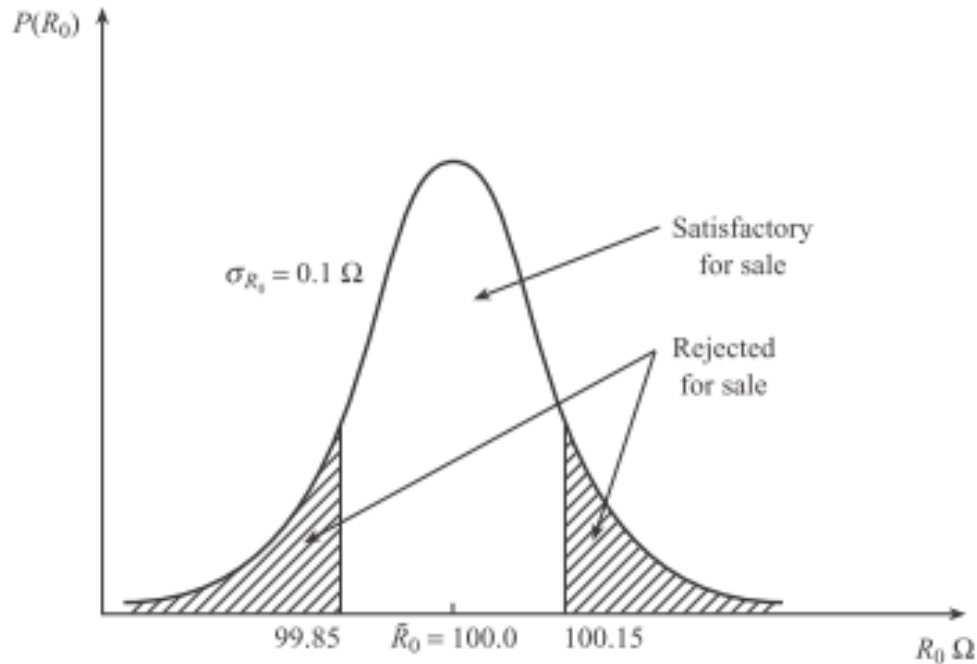
– למתכות: $40,000\mu\varepsilon = 4\%$





הערה (*2) על טולרנס

- היצרן משווק רק רכיבים שעומדים בטולרנס המוגדר





מדי עיבור - מגבלות

אפקטיבי רק אם כל המעוות מועבר למדיד –
חשיבות התקנה (הדבקה)

המאמץ מוגבל לתחום האלסטי –
($3000-5000 \mu\epsilon$ למוליכים למחצה, $40000 \mu\epsilon$ למתכות)

רגישות צידית / ניצבת (Transverse) –
מבנה המדיד מתוכנן להקטנת האפקט (1%-2%)

רגישות לטמפרטורה –
בחירה במדיד מתאים תרמית או קיזוז ע"י כניסה מבטלת (מתקנת).



מדי עיבור – שיקולי בחירה

The installation and operating characteristics of a strain gage are affected by the following parameters, which are selectable in varying degrees:

- strain-sensitive alloy
- backing materials (carrier)
- grid resistance
- gage pattern
- self-temperature compensation number
- gage length
- options



חיישנים התנגדוטיים

הקדמה

מדי עיבור

הקדמה לממשקים (חיישנים התנגדוטיים):

– פוטנציומטרים ומחלקי מתח

– מעגלי גשר Wheatstone bridge

תרמומטר התנגדוטי

– מתכתיים RTD= Resistive temp detector

– Hot wire Anemometer

– מוליכים למחצה Thermistors

חיישנים פוטו-התנגדוטיים



פוטנציומטר

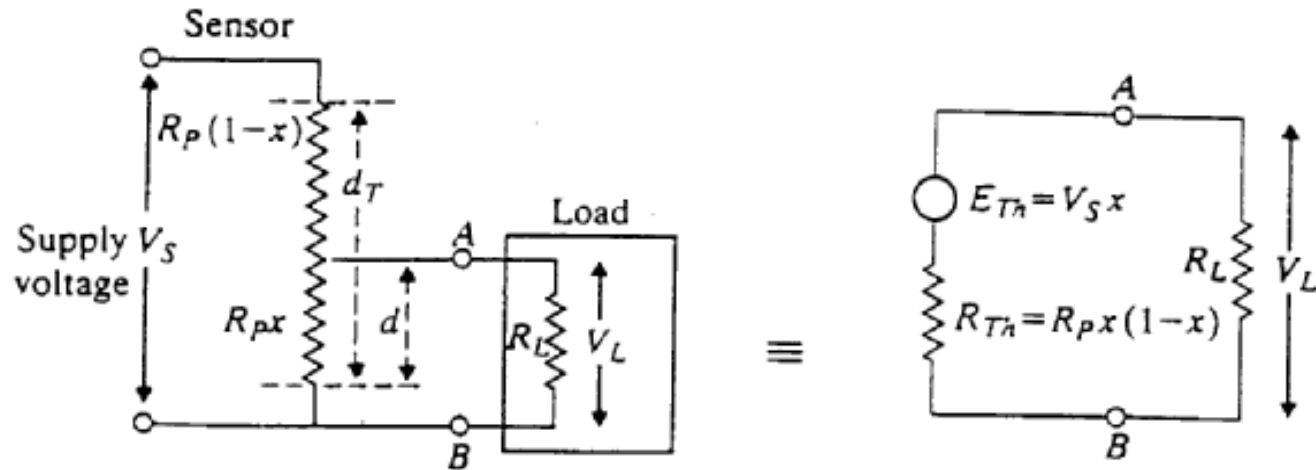


Fig. 5.6 Potentiometer displacement sensor and Thévenin equivalent circuit



פוטנציומטר - דוגמאות



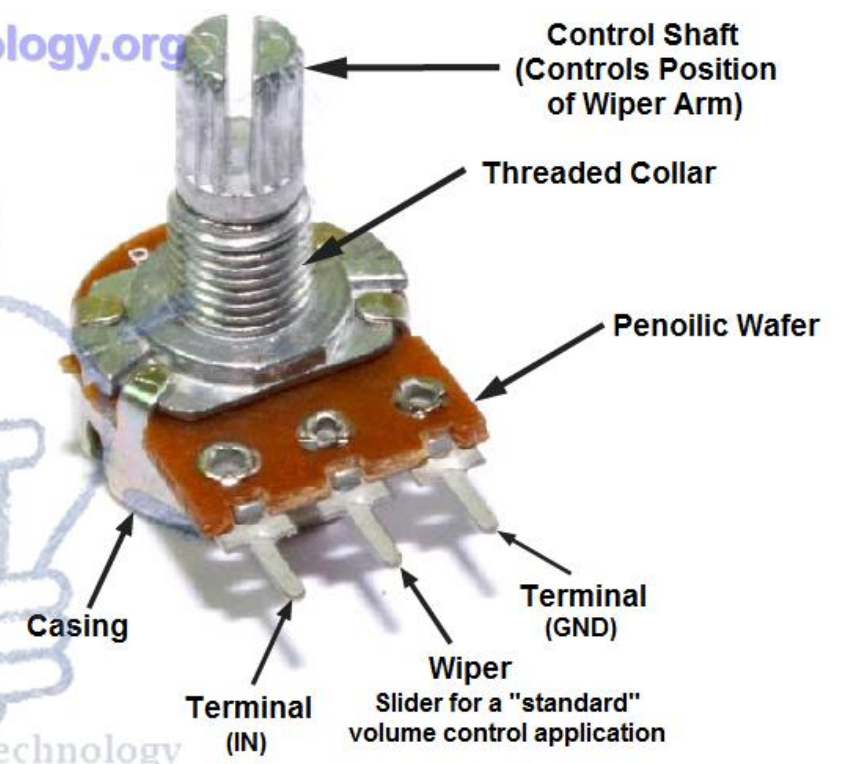
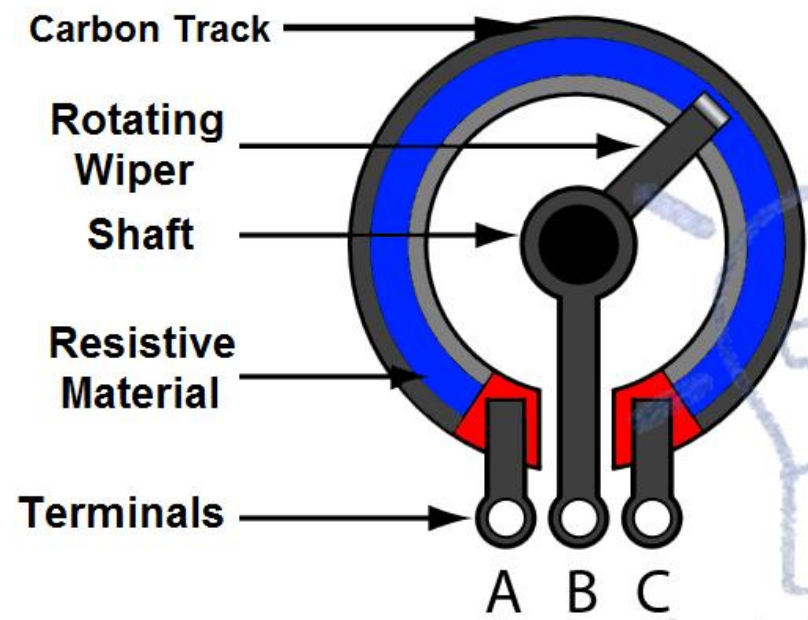
TABLE 2.1 Specifications for Several Potentiometers for Linear or Rotary Displacements

Parameter	Linear	Rotary
Range	2 mm to 8 m	10° to 60 turns
Linearity	0.002% to 0.1% full scale	
Resolution	50 μm	2° to 0.2°
Power	0.1 to 50 W	
Temperature coefficient	20 to 1000 parts/10 ⁶ /°C	
Maximal frequency	3 Hz	
Life	up to 4 × 10 ⁸ cycles	



פוטנציומטרים סיבוביים – מבנה חד סיבובי

© www.electricaltechnology.org



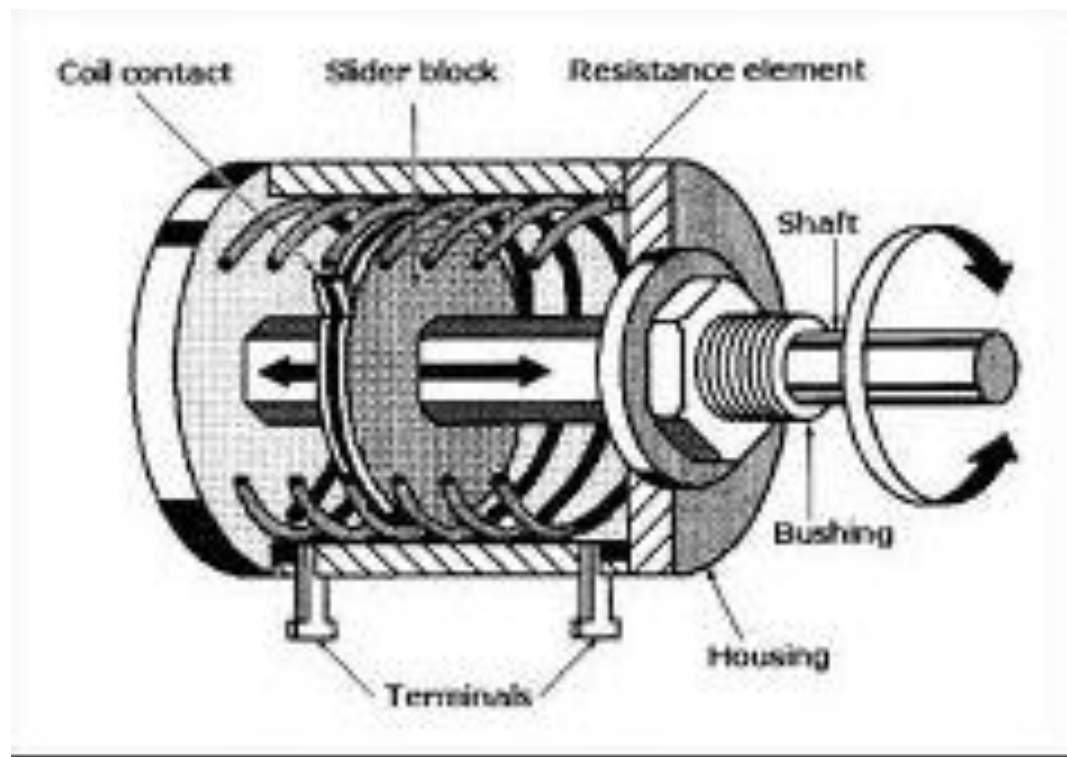
Electrical Technology
<http://www.electricaltechnology.org/>

Potentiometer Construction



פוטנציומטרים סיבוביים

מבנה סלילי רב סיבובי





פוטנציומטר – מעגל חשמלי

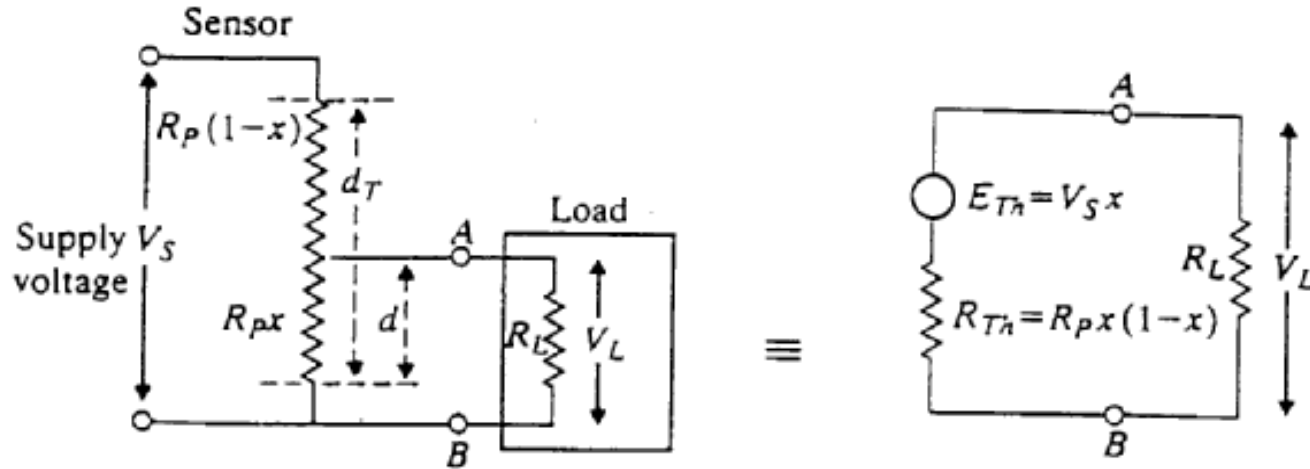


Fig. 5.6 Potentiometer displacement sensor and Thévenin equivalent circuit

$$k = \frac{R_L}{R_p}$$

$$\frac{V_L}{V_s} = \frac{kx}{k + x(1-x)}$$

השפעת העמסה: אופיין לא לינארי

$$e_{abs} = \frac{V_L - V_{Th}}{V_s} = \frac{x^2(1-x)}{k + x(1-x)}$$

שגיאה אבסולוטית:

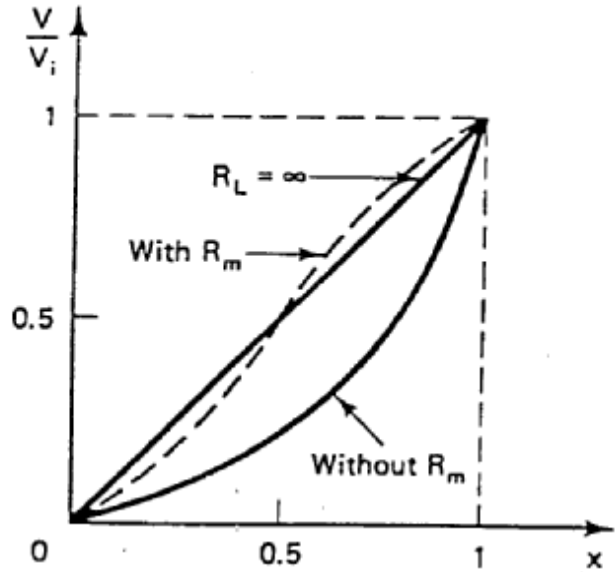
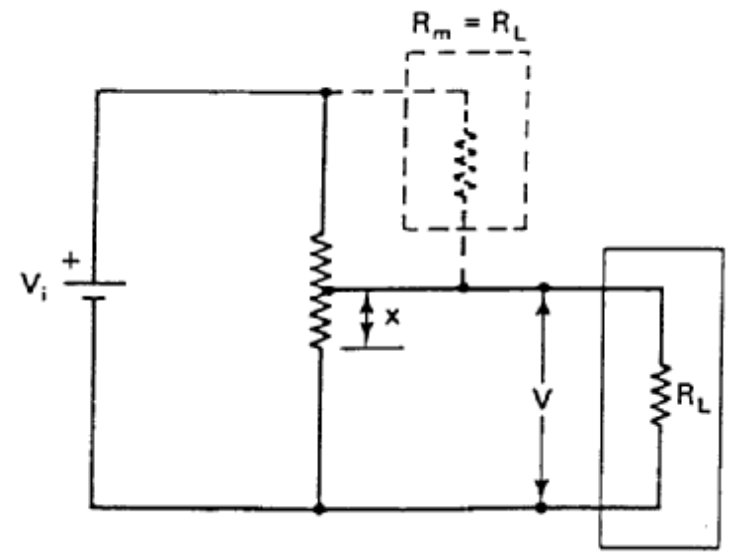
$$e_{abs,max} = 15 / k \% FS @ x = 2 / 3 \quad \text{עבור } k \gg 10$$



פוטנציומטר – מעגל לשיפור לינאריות

מעגל יישור

$$\frac{V_L}{V_s} = \frac{x(k+1-x)}{k+2x(1-x)}$$

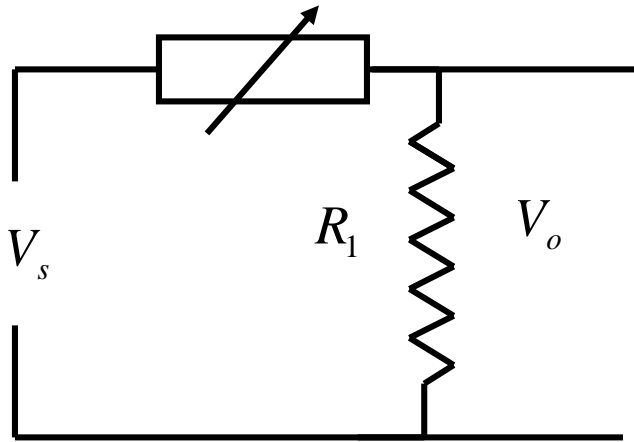


$$e_{abs} = \frac{V_L - V_{Th}}{V_s} = \frac{x(1-x)(1-2x)}{k+2x(1-x)}$$



מחלק מתח – מעגל מדידה

$$R = R_0(1 + \delta)$$



$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 + R/R_1}$$

$$S = \frac{\Delta V_o}{\Delta R} \approx -\frac{V_s}{R_1(1 + R/R_1)^2}$$

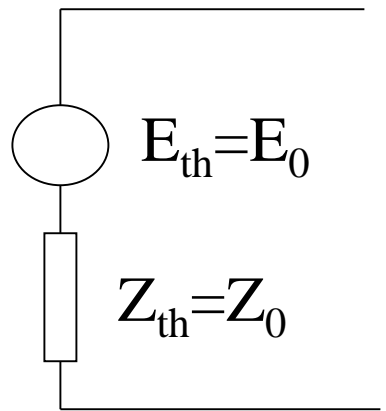
- נגד משתנה: $R = R_0(1 + \delta)$
- – מדי עיבור $\delta = G\varepsilon$
- – RTD $\delta = \alpha(T - T_0)$
- רגישות מקסימלית כאשר: $R_1 = R_0$
- ואז: $\Delta V_o = -\frac{V_s}{4} \delta$
- **חיסרון: שינויים קטנים סביב מתח עבודה גבוהה**
- **פתרון: מעגלי גשר – מימוש של חיסור אנלוגי**



מעגלי גשר (Wheatstone bridge)

מעגלי גשר – מתמירים שינויים בפרמטרים של התנגדות, קיבולות או השראות לשינויי מתח

מתח אספקה (ישר או חילופין) V_s

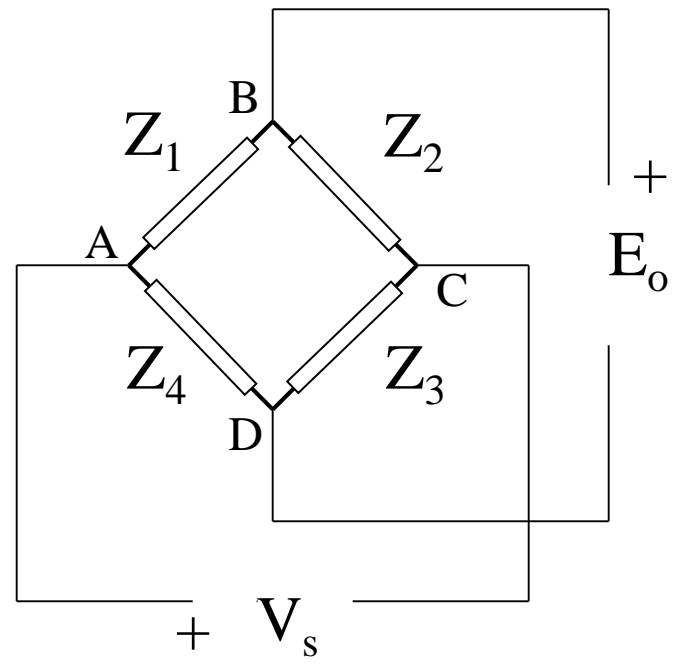


שקול טבנין: $E_{th} = E_0$

$Z_{th} = Z_0$

$$E_{th} = E_0 = V_s \left[\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \right]$$

$$Z_{th} = Z_0 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{Z_3 Z_4}{Z_3 + Z_4}$$





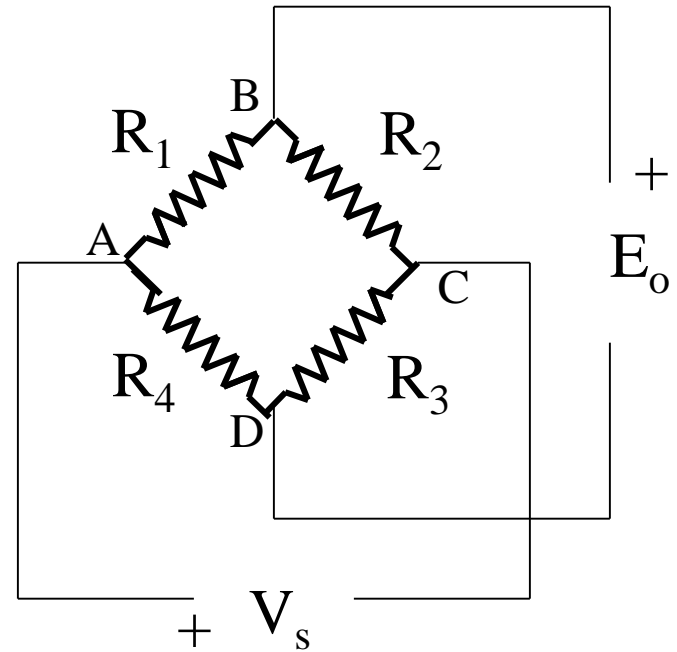
מעגלי גשר התנגדותיים – תנאי איפוס

תנאי איפוס: במצב נומינלי מתח היציאה אפס

$$E_0 = V_s \left[\frac{1}{1 + R_2 / R_1} - \frac{1}{1 + R_3 / R_4} \right]$$

תנאי איפוס:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \equiv r$$





מעגלי גשר התנגדותיים – נגד משתנה אחד

קביעת שינוי בהתנגדות ע"י מידת מתח היציאה

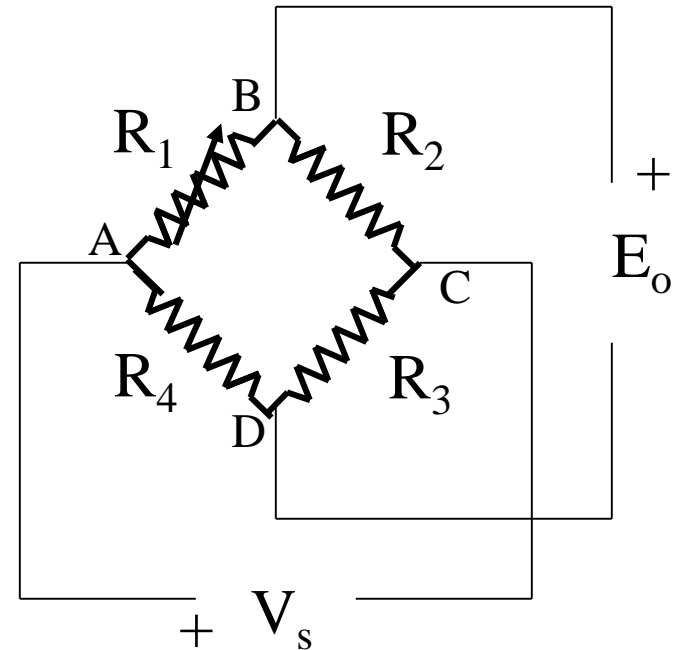
$$R_1 = R_0(1 + \delta) \equiv R_0 x$$

נגד משתנה אחד:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \equiv r$$

תנאי איפוס:

$$E_0 = V_s \left[\frac{x}{x+r} - \frac{1}{1+r} \right]$$

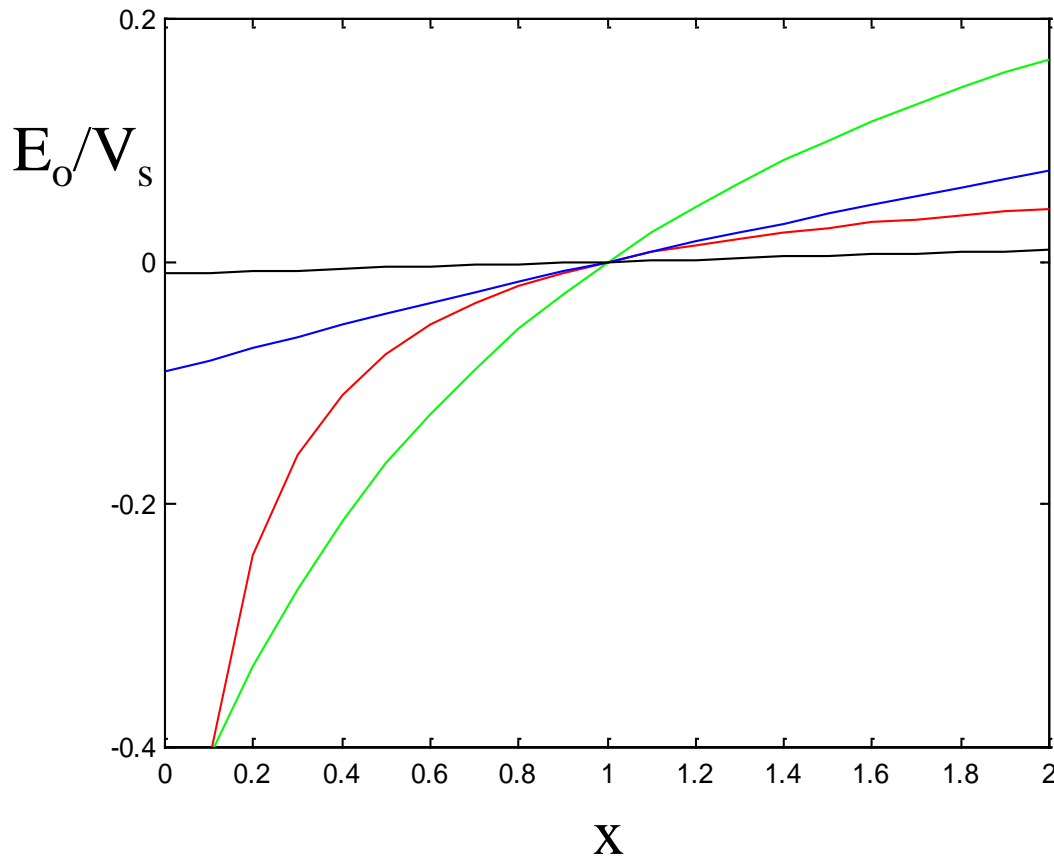




מעגלי גשר התנגדותיים

השפעת היחס r

$$E_0 = V_s \left[\frac{1}{1+r/x} - \frac{1}{1+r} \right] \quad \text{מתח שקול טבנין:} \quad x = 1 + \delta$$



$r=1$

$r=10$

$r=0.1$

$r=100$

תנאי איפוס:

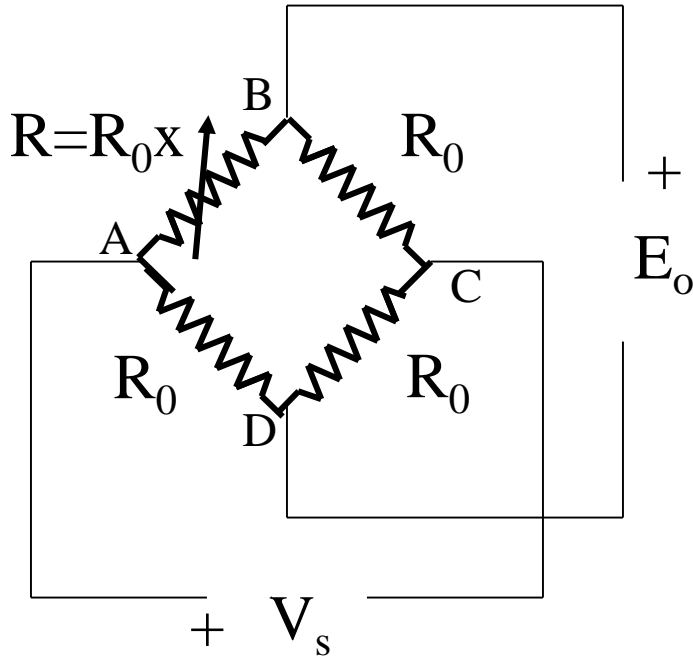
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \equiv r$$

מקסימום רגישות: $r = 1$
על חשבון לינאריות

לינאריות: $r > 10$
על חשבון רגישות



מעגלי גשר למדי עיבור



במעגלי גשר – מתקבל אומנם אותו ביטוי כמו במחלק מתח אבל שינויי המתח הם סביב אפס וגם ניתן לבצע תיקונים ע"י מימוש של חיסור אנלוגי

תנאי איפוס:
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \equiv r$$

במדי עיבור: $x = 1 + G\varepsilon \equiv 1 + \delta$
 גודל העיבור קטן ולכן: $x \approx 1; \delta \ll 1$
 נדרשת רגישות מקסימלית: נבחר $r = 1$

$$E_0 = V_s \left[\frac{x-1}{2(x+1)} \right] = V_s \frac{\delta}{2(2+\delta)}$$

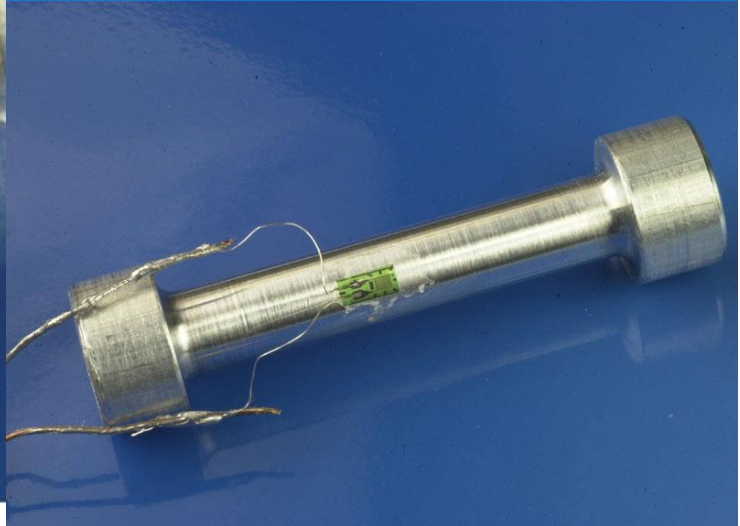
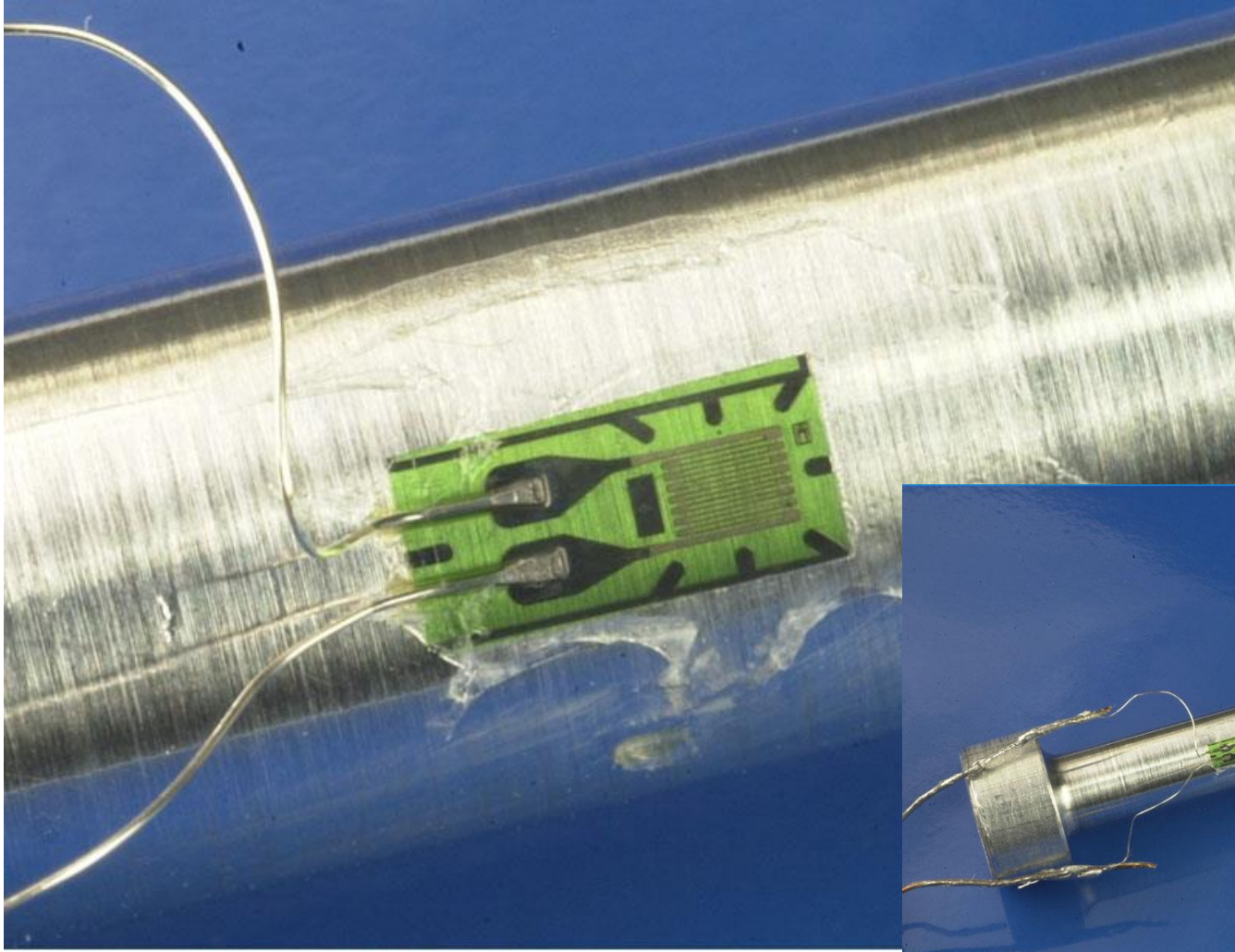
$$= V_s \frac{\delta}{4(1+\delta/2)} \approx V_s \frac{\delta}{4} (1 - \delta/2)$$

בקירוב לינארי:
$$E_0 = V_s \frac{\delta}{4}$$



מעגלי גשר למדי עיבור

הרכבה על מוט למדידת מעוות כתוצאה מכוח צירי



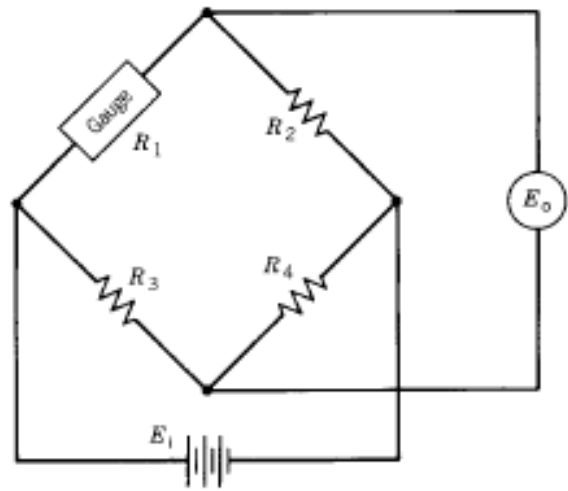


מדי עיבור – דוגמא להמחשה

Problem: A single strain gage has a nominal resistance of 120 Ω and a gage factor of 2.06. For a quarter bridge with 120 Ω fixed resistors, what will the voltage output be with a strain of 1000 μstrain for a supply voltage of 3V?

(Example 8.1, Wheeler & Ganji, 1996)

Solution: From before, if all fixed resistors and strain gage resistance are initially equal, & then gage subjected to state of strain



(Figure 11.8, Figliola & Beasley, 1995)

$$\frac{\delta E_o}{E_i} = \frac{\delta R/R}{4 + 2(\delta R/R)} \approx \frac{\delta R/R}{4}$$

Since the strain $\epsilon_a = \frac{dR/R}{S}$

$$\frac{\delta E_o}{E_i} = \frac{\epsilon_a S}{4 + 2(\epsilon_a S)} \approx \frac{\epsilon_a S}{4} \quad \text{or} \quad \delta E_o = \frac{\epsilon_a S}{4} E_i$$

$$\delta E_o = \frac{(1000 \times 10^{-6})(2.06)}{4} (3.00) = \underline{\underline{1.545 \text{ mV}}}$$

Nagurka (2002)



חיישנים התנגדתיים

הקדמה

מדי עיבור

הקדמה לממשקים (חיישנים התנגדתיים):

– פוטנציומטרים ומחלקי מתח

– מעגלי גשר Wheatstone bridge

תרמומטר התנגדתי

– מתכתיים RTD= Resistive temp detector

– Hot wire Anemometer

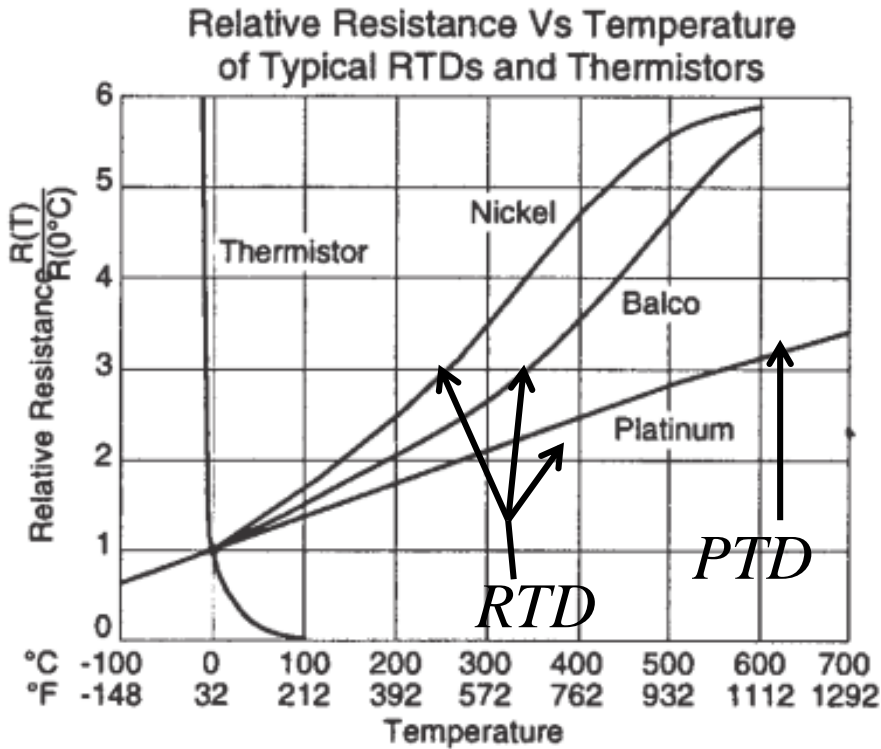
– מוליכים למחצה Thermistors

חיישנים פוטו-התנגדתיים



תרמומטר התנגדותי

Resistance Temperature Detector - RTD



עשוי מתכת:

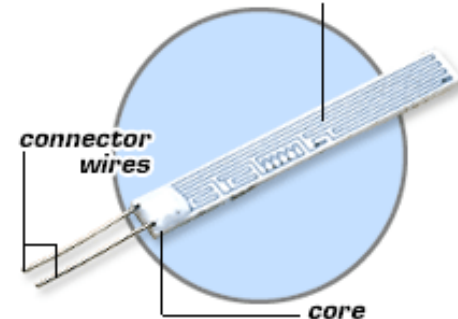
- בעיקר פלטינה (PTD, PT100)
- במוליכים (מתכות): $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$
- הקשר הכללי פולינומיאלי:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots)$$
- בתחום הליניארי: $R = R_0(1 + \alpha T)$
- R_0 - התנגדות בטמפ' הייחוס
- T - שינוי הטמפרטורה

PTD: בנוי מפלטינה קירוב ליניארי טוב

Typical RTD Design

coiled resistance element





תרמומטר התנגדותי - RTD

תכונות אופייניות (הנחת קשר לינארי)

$$R = R_0(1 + \alpha T)$$

TABLE 2.3 Specifications for Some Different Resistance Temperature Detectors

Parameter	Platinum	Copper	Nickel
Resistivity at 20°C, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	10.6	1.673	6.844
α , $\Omega/\Omega/\text{K}$	0.00385	0.0043	0.00681
R_0 , Ω at 0°C	25, 50, 100, 200, 500, . . .	10 (20°C)	50, 100, 120
Range	-200°C to +850°C	-200°C to +260°C	-80°C to +320°C



תרמומטר התנגדותי - PTD

קשר פולינומיאלי וריבועי

Callendar-Van Dusen Equation:

חיישני PTD:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4)$$

R_T = Resistance (Ω) at temperature T ($^{\circ}\text{C}$)

R_0 = Resistance (Ω) at 0°C

T = Temperature in $^{\circ}\text{C}$

Common values

A ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3.81×10^{-3}
B ($^{\circ}\text{C}^{-2}$)	-6.02×10^{-7}
C ($^{\circ}\text{C}^{-4}$)*	-6.0×10^{-12}

*| C = 0 for $T > 0^{\circ}\text{C}$

בטמפרטורות חיוביות (צלזיוס $T > 0^{\circ}\text{C}$) המקדם $C=0$ ואז אפשר לפתור בקלות את המשוואה הריבועית:

$$0 = R_0BT^2 + R_0AT + (R_0 - R_T) \text{ implies...}$$

$$T_R = \frac{-R_0A + \sqrt{R_0^2A^2 - 4R_0B(R_0 - R_T)}}{2R_0B}$$



תרמומטר התנגדותי

יתרונות וחסרונות

• יתרונות:

– רגישות גבוהה (פי 10 מצמד תרמי)

– דיוק גבוה למדיד פלטינה

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}$$

Parameter	IEC 751 Class A	IEC 751 Class B
R_0	$100\Omega \pm 0.06\%$	$100\Omega \pm 0.12\%$
Alpha, α	$.00385 \pm .000063$	$.00385 \pm .000063$
Range	$-200^\circ\text{C to } 650^\circ\text{C}$	$-200^\circ\text{C to } 850^\circ\text{C}$

– קירוב לינארי טוב למדיד פלטינה

– מחיר זול למדידי ניקל ונחושת

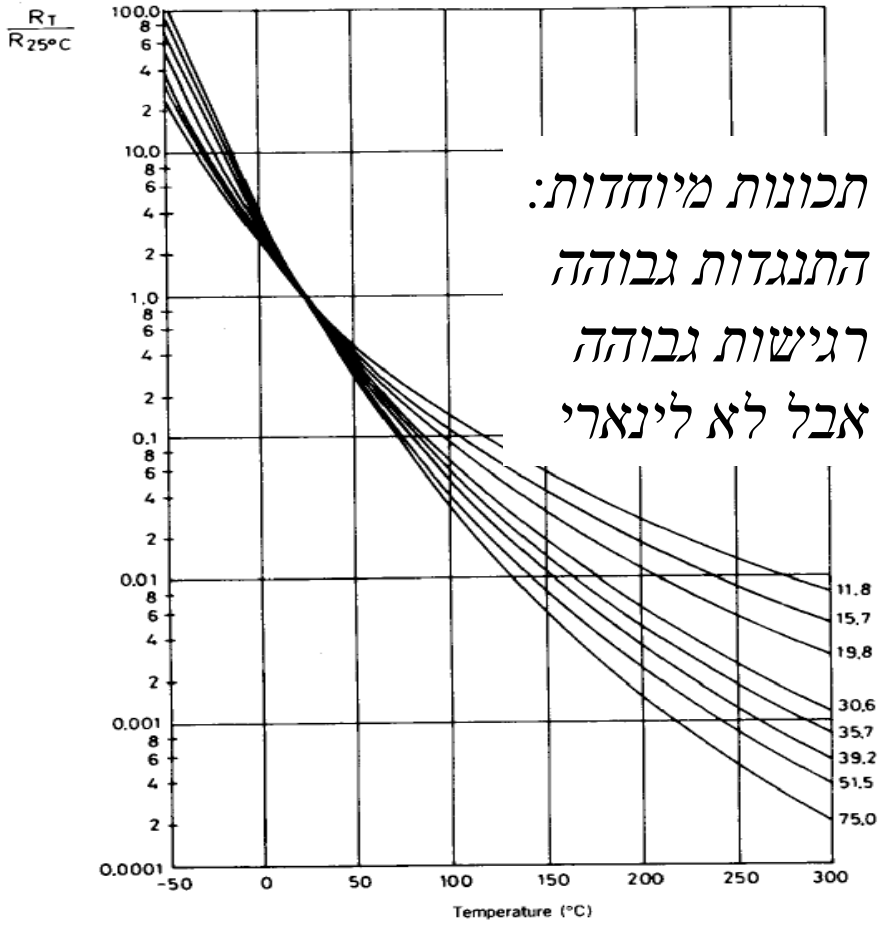
• מגבלות:

– תחום מוגבל -- חימום עצמי



תרמומטר התנגדותי - Thermistor

Thermally Sensitive Resistor



- עשוי מוליך-למחצה
- במוליכים למחצה:
 $T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$: NTC –
 $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$: PTC –
- הקשר לא-לינארי

- בתחום צר (50° ל-NTC) הקשר הוא בקרוב (0.3%) אקספוננציאלי:
- R_0 : התנגדות בטמפ' ייחוס T_0 (25°C)
- T : הטמפ' במעלות קלווין
- B : טמפ' אופיינית ($\sim 4000^\circ\text{K}$)

$$R_T = R_0 \exp \left\{ B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}$$

$$\alpha = \frac{dR_T / dT}{R_T} = \frac{-B}{T^2}$$

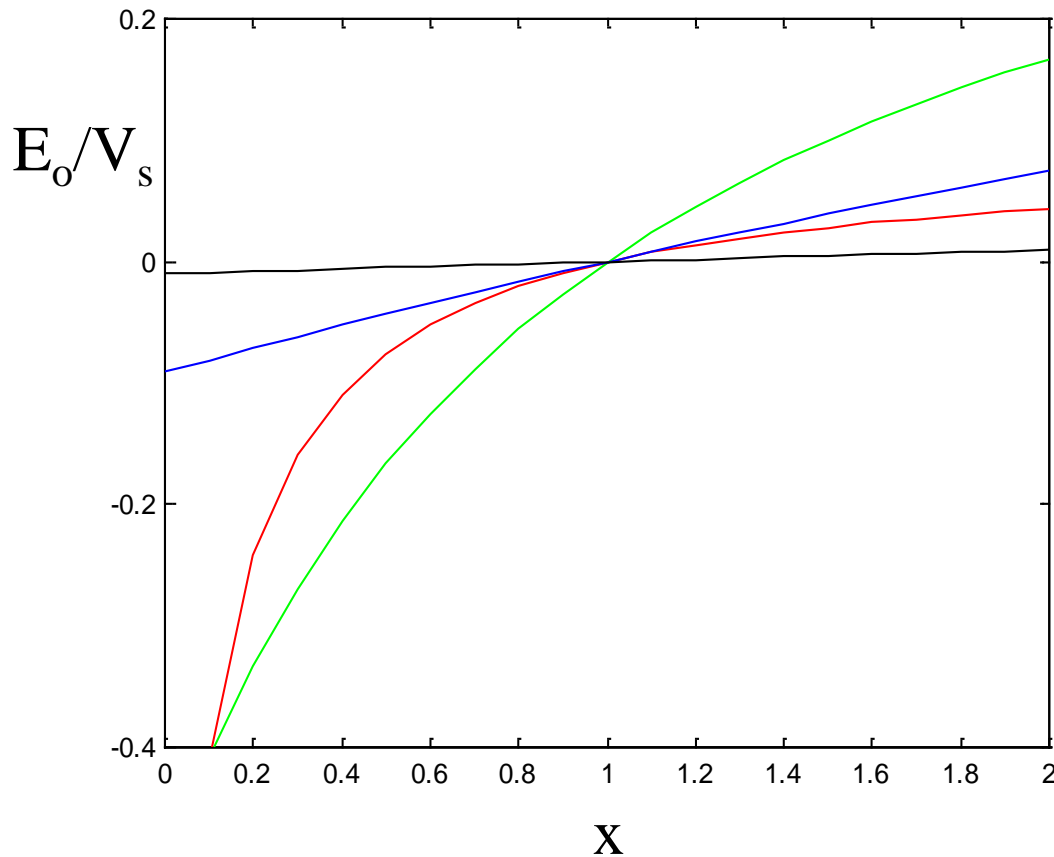
קירוב לינארי:



מעגלי גשר התנגדותיים

השפעת היחס r

$$E_0 = V_s \left[\frac{1}{1+r/x} - \frac{1}{1+r} \right] \quad \text{מתח שקול טבנין:} \quad x = 1 + \delta$$



$r=1$

$r=10$

$r=0.1$

$r=100$

תנאי איפוס:

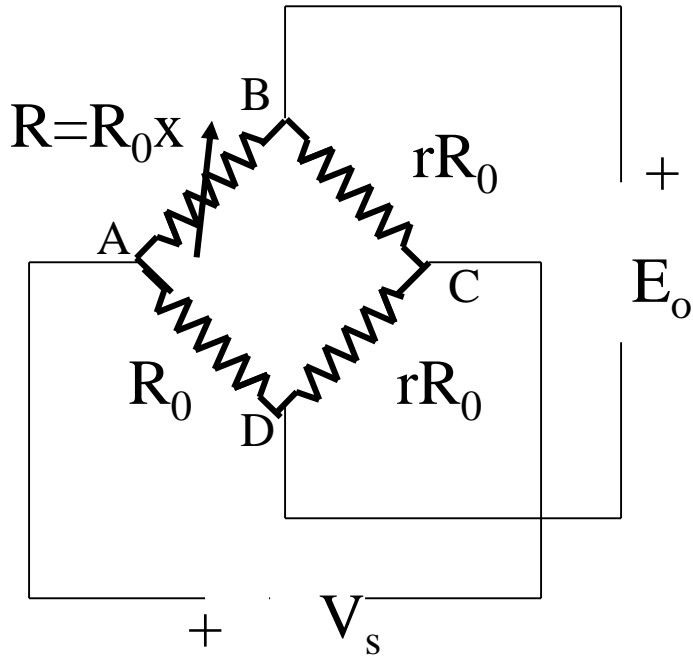
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \equiv r$$

מקסימום רגישות: $r = 1$
על חשבון לינאריות

לינאריות: $r > 10$
על חשבון רגישות



מעגלי גשר למדיד טמפרטורה מתכתי - RTD



התנגדות ליניארית: $R_T = R_0(1 + \alpha T)$

עבור Pt100: $R_0 = 100$; $\alpha = 0.00385$

$R_{250^\circ C} \approx 200\Omega$ ← x משתנה בין 1-2

אלה חיישנים מאוד ליניאריים

כדי לשמור על הליניאריות כדאי לבחור r

גבוה על חשבון הרגישות

תנאי איפוס:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \equiv r$$

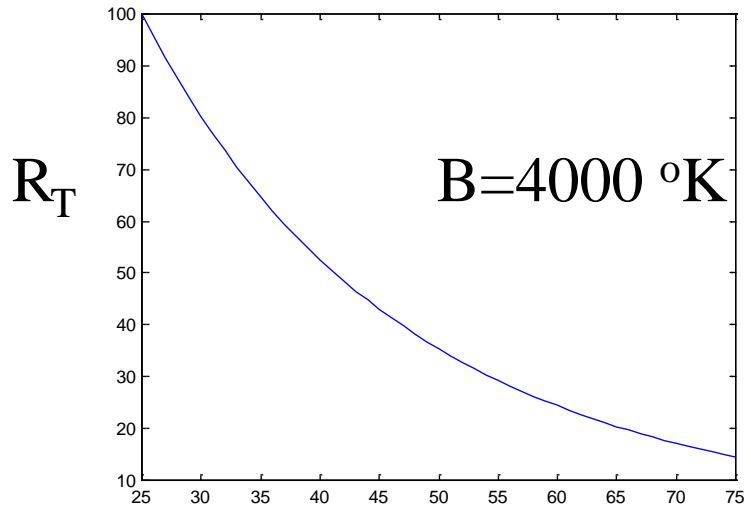
$$E_o = V_s \left[\frac{x}{x+r} - \frac{1}{1+r} \right] \approx V_s \frac{x-1}{r}$$

$$E_o = V_s \frac{\alpha T}{r}; \quad r > 10$$



מעגלי גשר לתרמיסטור

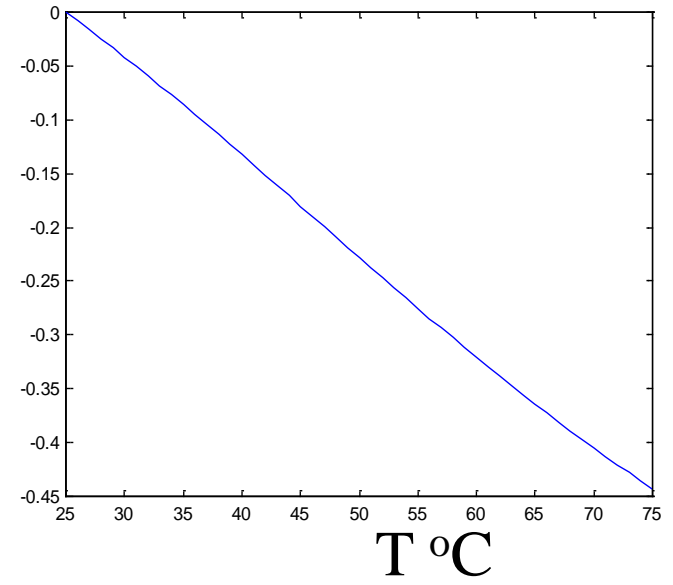
התנגדות לא ליניארית :



$$R_T = R_{T_r} e^{\left\{ \beta \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right] \right\}}$$

על ידי בחירת $r=0.2-0.3$ אפשר להשתמש באי-ליניאריות של הגשר כדי לקזז את אי-הליניאריות של החיישן

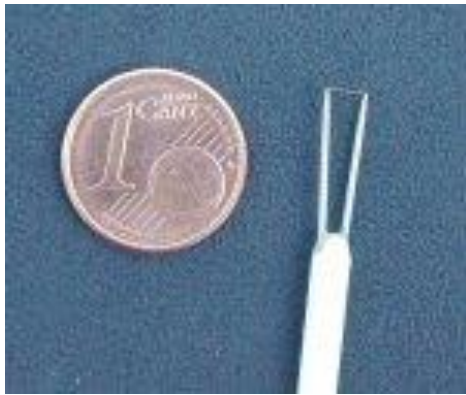
$$E_o/V_s$$





Hot Wire Anemometer

Hot-wire is often used to **measure compressible fluid velocity at a point** based on heat transfer principles:



- עיקרון המדידה: המדיד מחומם ע"י מקור זרם, הגודל הנמדד גורם להתקררות

- *Hot wire anemometer*

- מדידת מהירות זרימה של זורם שהטמפרטורה שלו (T_f) קבועה או מדודה

- מאזן אנרגיה: $I^2 R_W = h A_W (T_W - T_f)$

- h - מקדם ההסעה, תלוי במהירות הזורם
- A_W - שטח מגע

- $T_W - T_f$ - טמפ' הזורם והתיל

- ההתנגדות תלויה בטמפרטורה $R_W = R_0 [1 + \alpha(T_W - T_0)]$



Hot Wire Anemometer

זרם קבוע

• אופן עבודה א: זרם קבוע

– מדידת מהירות הזרימה ע"י מדידת שינוי R_W

– טמפרטורת התיל נקבעת ממדידת ההתנגדות $T_W(R_W)$

– מקדם ההסעה:

$$h = a + bv_f^c = \frac{I^2 R_W}{A_W (T_W - T_f)}$$

– ניתן לחלץ את מהירות הזרימה כפונקציה של התנגדות התיל (או, לחלופין, הטמפרטורה שלו) ושל טמפרטורת הנוזל.

$$\Rightarrow v_f^c = f(T_W, T_f) = g(R_W, T_f)$$



Hot Wire Anemometer

טמפרטורה (התנגדות) קבועה

• אופן עבודה ||: טמפרטורה (התנגדות) קבועה

– מעגל משוב משנה את הזרם לשמור על התנגדות התיל, ולפיכך גם על טמפרטורת התיל, קבועה

– מודדים את הזרם הדרוש לשמירת טמפרטורה

– מקדם ההסעה:

$$a + bv_f^c = \frac{I^2 R_W}{A_W (T_W - T_f)}$$

– ניתן לחלץ את מהירות הזרימה כפונקציה של הזרם שדרוש לשמירת התנגדות (טמפרטורת) התיל קבועה ושל טמפרטורת הזרם.

$$\Rightarrow v_f^c = f(I, T_f)$$



Hot Wire Anemometer

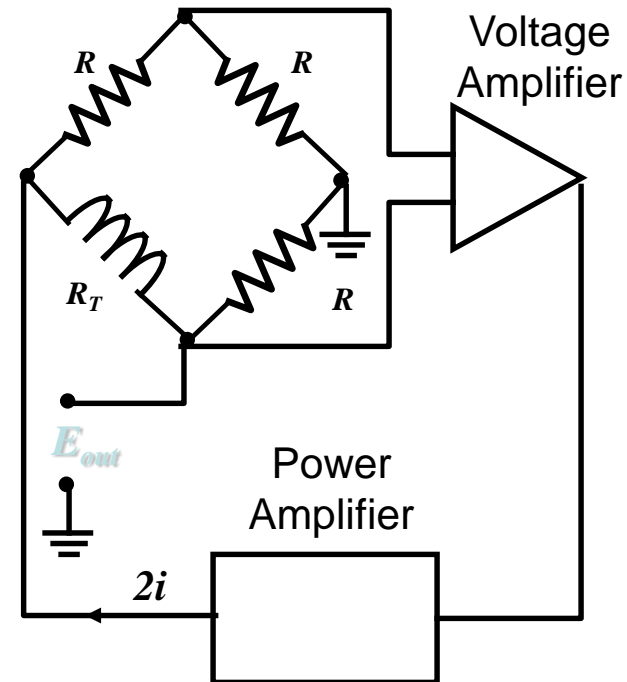
מימוש התנגדות קבועה

Hot-wire constant temperature anemometer uses a bridge and an amplifier for signal processing. For a sensor with T sensing characteristics of

$$T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)$$

The system output is:

$$E_{out} = \sqrt{E_0^2 + \gamma \cdot \sqrt{v}}$$





Hot Wire Anemometer

השוואה בין השיטות

Constant temp. version is generally used.

Constant temp. version is generally featured with linearized output, accurate measurements of large amplitude, low frequency velocity fluctuation with or without high turbulence.

Frequency range (1-120kHz).

In advance constant temp. systems, an additional RTD is mounted in one of the bridge arms next to the hot wire to sense and correct for any changes in fluid temperature.

Constant current version is preferred for low turbulence and high accuracy, low noise and excellent sensitivity.

Frequency range (0-500kHz)

The main two disadvantages of constant current are:

1. Existence of uncompensated low frequency band
2. Distorted output when small high frequency fluctuations are measured in the presence of large amplitude low frequency oscillations.



Hot Wire Anemometer

יתרונות וחסרונות

• יתרונות:

- רזולוציה מרחבית גבוהה
- תחום תדירויות רחב: (מעל 10KHz ועד 400KHz)

• חסרונות

- עדין, אפשר להשתמש רק בזורם נקי
- דורש כיול לעיתים קרובות בגלל הצטברות אבק (אלא אם הזורם מאוד נקי)
- יקר



חיישנים התנגדתיים

הקדמה

מדי עיבור

הקדמה לממשקים (חיישנים התנגדתיים):

– פוטנציומטרים ומחלקי מתח

– מעגלי גשר **Wheatstone bridge**

תרמומטר התנגדתי

– מתכתיים RTD= Resistive temp detector

– Hot wire Anemometer

– מוליכים למחצה Thermistors

חיישנים פוטו-התנגדתיים



אלמנטים פוטו-התנגדותיים

Light Dependent Resistors - LDR

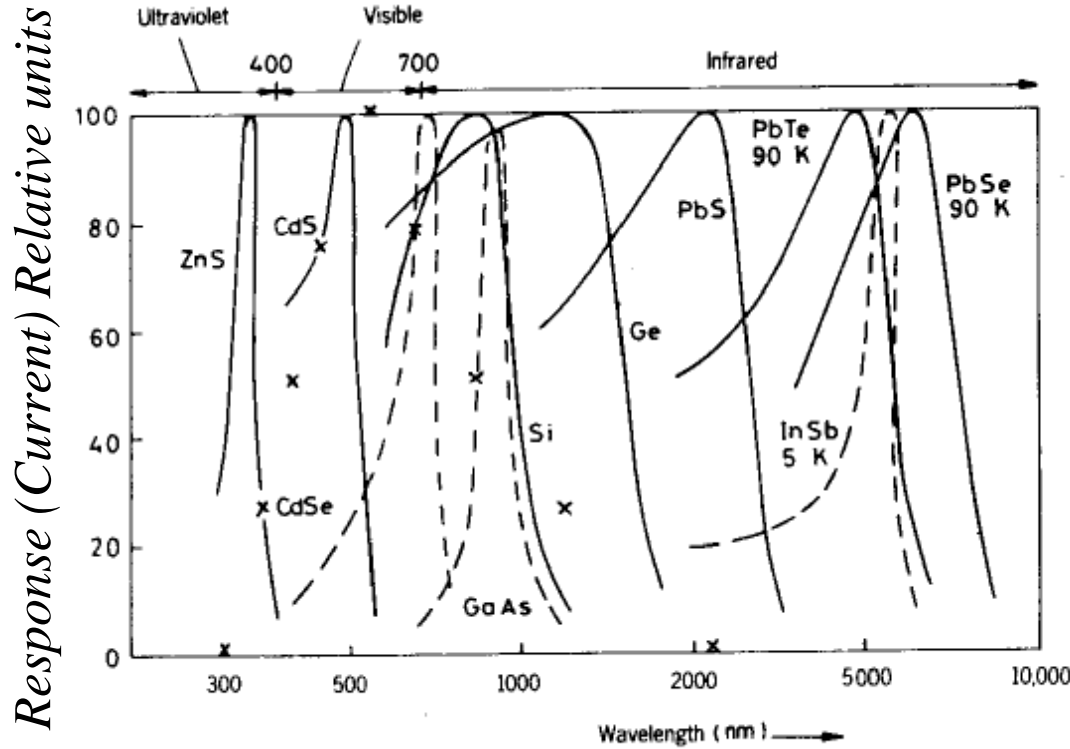
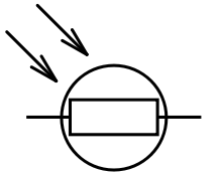


FIGURE 2.23 Spectral response for several photoconductors.

Photo Resistors

- מורכבים ממוליכים למחצה
- קרינה משחררת מטענים

$$R \downarrow \Leftarrow$$

מתאימים לאורכי גל

ספיציפיים

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E(eV)}$$

— Band Gap — E – האנרגיה הדרושה לשחרור אלקטרון

$$eV = 1.6 \times 10^{-19} J$$

שימושים: דיוק נמוך במחיר זול << שליטה בתאורת ברחוב, שליטה בצמצם מצלמה...