




מערכות משולבות חיישנים

מתמרים 

מתמרים פייזואלקטריים 

מתמרים אלקטרומגנטיים 

צמד-תרמי 

השלמות 



האפקט הפייזואלקטרי

• פייזו: "סחט" *Piezo = squeeze*

• בחומרים פייזואלקטריים:

$$q = K_q x$$

דפורמציה x "סוחטת" מטען q

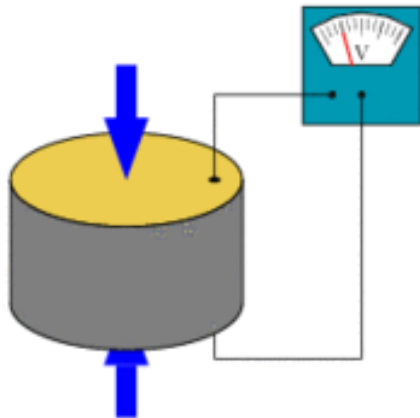
שמצטבר על משטחי הפנים

– רגישות המטען למעוות $K_q [Coulomb / m]$

– החומר הפייזואלקטרי מהווה קבל

– המטען שמצטבר על גבי הקבל יוצר

שדה חשמלי (פירוט בהמשך)

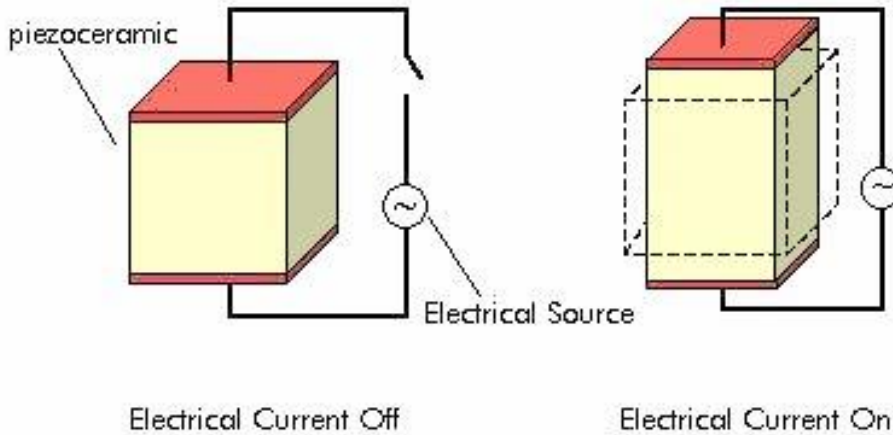


הערה: להבדיל מהאפקט הפייזו-רזיסטיבי שקשור ל-"סחיטת" התנגדות (משינוי נפח)



האפקט הפייזואלקטרי – הפיכות

- אפקט אלקטרו-מכני (Curie 1880): מתח גורם מעוות
 - משמש ליצור רעידות במערכות אקוסטיות ואולטרא-סוניות.
 - הנעה למערכות סופר מדויקות.



- אפקט מכנו-אלקטרי
 - מתמרים פייזואלקטריים
 - יצירה של "אנרגיה" חשמלית בזרם נמוך.



חומרים פייזואלקטריים

1. גבישים טבעיים:

- קוורץ, Tourmaline
- תכונות תלויות בתכונות הגביש

2. גבישים קרמיים סינטטיים:

- PZT (Lead zirconate titanate), barium titanate, lead niobate
- מיוצר עם מגוון רחב של תכונות
- חסרונות:

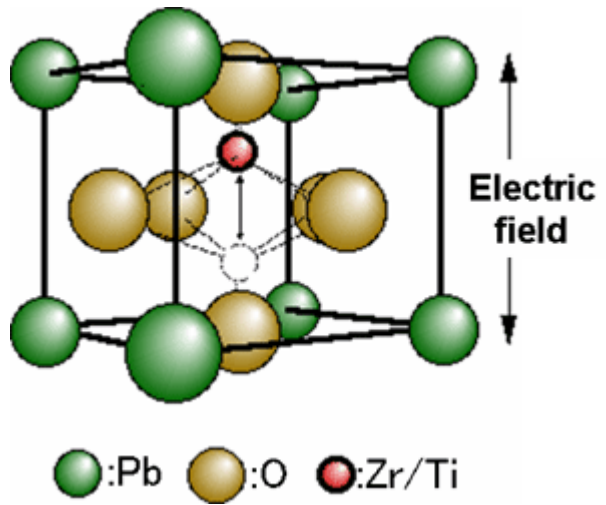
• רגישות לטמפרטורה

• התיישנות (Aging): איבוד תכונות פיזו-אלקטריות קרוב לטמפרטורת קירי

3. פולימריים סינטטיים:

- PVDF (Poly-vinylidene fluoride)

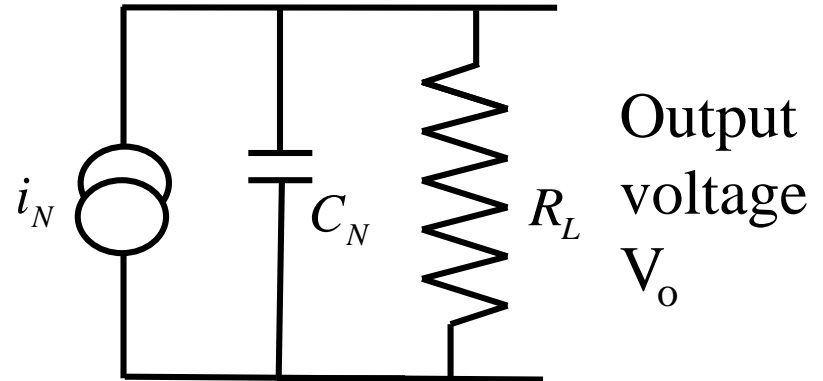
PZT crystal structure





רגישות – מתח יציאה לדפורמציה

Charge Source: $q = K_q x$
Current Source: $i_N = \dot{q} = K_q \dot{x}$
 $i_N = i_C + i_R$



KCL: $C_N \frac{dV_o}{dt} = i_N - i_R = K_q \frac{dx}{dt} - \frac{V_o}{R_L}$

Laplace transform: $(C_N s + 1/R_L)V_o(s) = K_q s X(s)$

Transfer function $\frac{V_o(s)}{X(s)} = \frac{K_q}{C_N} \frac{\tau s}{\tau s + 1}$ Time constant;
First order High-pass $\tau = R_L C_N$

Voltage sensitivity to deformation: $K_V = K_q / C_N$



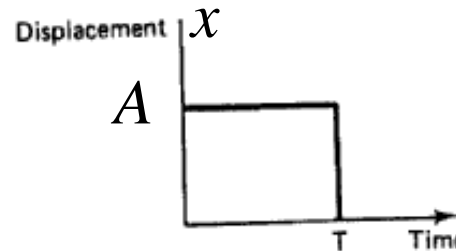
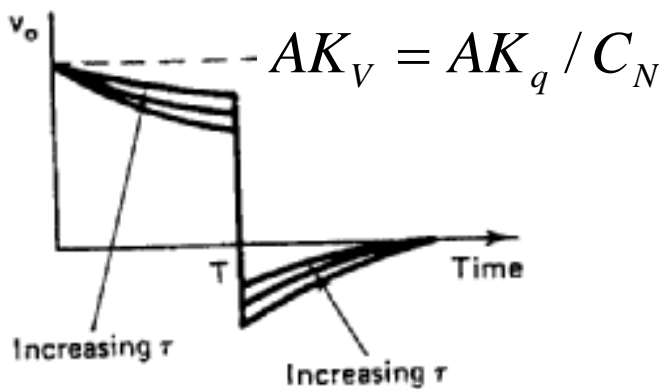
מגבלות המעגל החשמלי – תגובה בתדירות נמוכה

אין תגובה סטטית (אין תגובה לדפורמציה סטטית):
 1. התדר הכי נמוך שבו השגיאה הדינאמית קטנה מ 5% נתון ע"י:

$$(0.95)^2 = \frac{(\omega_1 \tau)^2}{1 + (\omega_1 \tau)^2} \rightarrow \omega_1 = \frac{3.04}{\tau}$$

Larger τ enables measurement of lower ω .

2. תגובה לפולס באורך T:



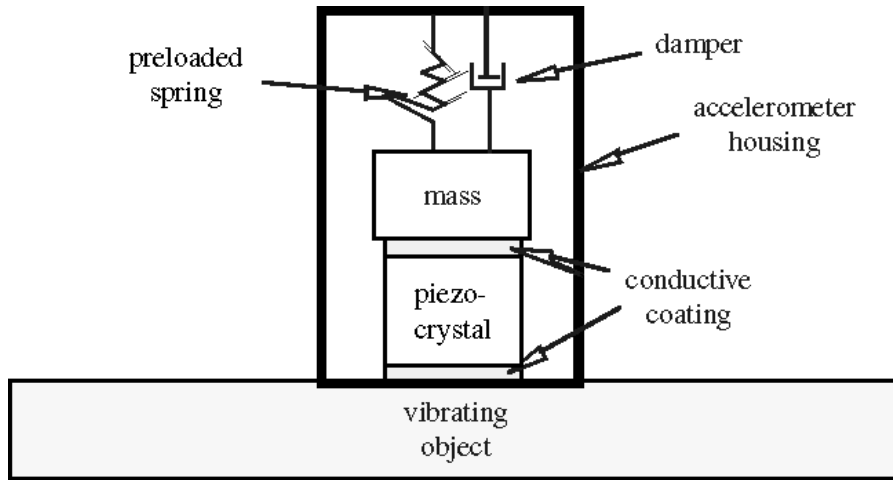
$$t < T \Rightarrow V_o = AK_V e^{-t/\tau}$$

$$t > T \Rightarrow V_o = AK_V (e^{-T/\tau} - 1) e^{-(t-T)/\tau}$$

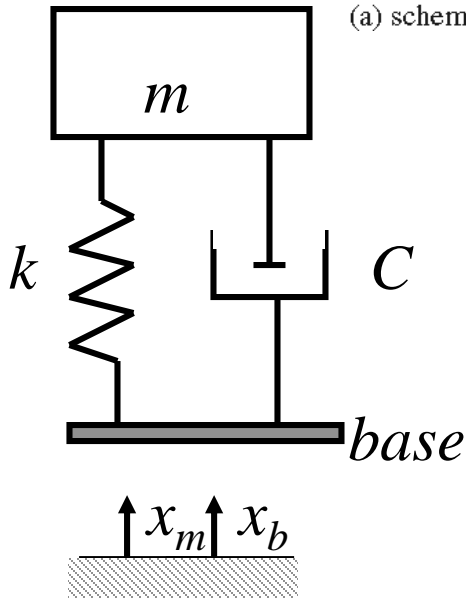
כדי שבסוף הפולס השגיאה תהיה קטנה מ 5% דרוש:
 $\tau > 20T$



מד תאוצה פייזואלקטרי



(a) schematic illustration



$$m\ddot{x}_m = C(\dot{x}_b - \dot{x}_m) + k(x_b - x_m)$$

$$y \equiv \Delta x = (x_b - x_m)$$

$$m(\ddot{x}_b - \ddot{y}) = C\dot{y} + ky$$

$$m\ddot{y} + C\dot{y} + ky = m\ddot{x}_b$$

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = \ddot{x}_b$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \xi = \frac{C}{2\sqrt{km}}$$

$$LPF2: \frac{Y(s)}{s^2 X_b(s)} \triangleq \frac{\Delta X(s)}{s^2 X_b(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$





תגובת התדירות הכללית – מערכת אלקטרו-מכנית

- תגובת התדירות של המערכת האלקטרו-המכאנית:

$$\frac{V_o(s)}{F(s)} = K_V \frac{\tau s}{(\tau s + 1)} \frac{(1/m)(1/\omega_n^2)}{(s^2/\omega_n^2 + 2\xi s/\omega_n + 1)}$$

מד כוח

$$\frac{V_o(s)}{s^2 X_b(s)} = K_V \frac{\tau s}{(\tau s + 1)} \frac{(1/\omega_n^2)}{(s^2/\omega_n^2 + 2\xi s/\omega_n + 1)}$$

מד תאוצה

- בתדרים נמוכים: מערכת HPF מסדר ראשון כתוצאה מהמעגל החשמלי של הגביש הפייזו-אלקטרי (וכפי שנראה בהמשך, המגבר)
- בתדרים גבוהים: LPF מסדר שני כתוצאה מהמערכת המכאנית, עם

- תדירות טבעית גבוהה בגלל הקשיחות הגבוהה של הגביש

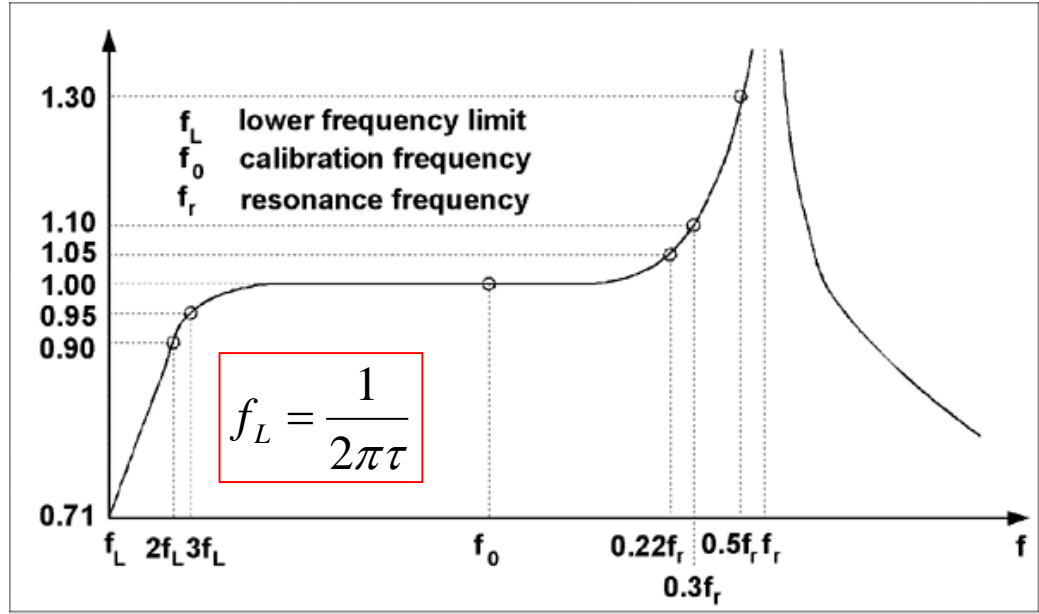
$$f_n = 10 - 100 \text{ KHz}; \quad \omega_n = 2\pi f_n$$

- יחס ריסון נמוך בגלל קשיחות גבוהה (ומקדם ריסון נמוך)

$$\xi \approx 0.01$$



תגובת התדירות הכללית – מד תאוצה פייזואלקטרי



$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad \text{תזכורת}$$

$$f_r \approx f_n \quad \leftarrow \xi \ll 1 \quad \text{עבור}$$

תחום התדירות (5% accuracy):

$$3f_L \leq f \leq \frac{f_n}{5}$$

- תחום תדירות נמוך:
 - נקבע ע"י התכונות החשמליות
 - ניתן להרחיב ע"י מגבר מטען (בהמשך)
- תחום תדירות גבוה:
 - נקבע ע"י התכונות המכאניות של המדיד
 - להגדלת תחום התדירות:
 - מסה יותר קטנה
 - חיסרון: רגישות יותר נמוכה



ממשקים למתמרים פייזואלקטריים

- בעיות אופייניות:

- המתמר יוצר כמות קטנה של מטען

- התנגדות יציאה גבוהה

- תגובה בתדר נמוך: מוגבלת

- ע"י קבוע הזמן של המתמר

- קבוע הזמן מושפע מהתנגדות

- וקיבולות הכבל שמחובר

- למגבר מתח (שקף הבא).

- מטרות הממשק:

- התמרת המטען למתח

- התנגדות יציאה נמוכה

- הרחבת תחום התדירויות

- הנמוכות

- קבוע זמן שאינו תלוי

- בכבל המחבר

- סוגי ממשקים

- מגבר בנוי בתוך המתמר

- מגבר מטען (חיצוני)

$$\frac{V_{out}(s)}{X(s)} = \frac{K_q}{C_s} \frac{\tau_s s}{1 + \tau_s s}; \quad \tau_s = R_s C_s$$



מתמר פייזואלקטרי – חיבור ישיר למגבר מתח

- קבוע הזמן תלוי בהתנגדות וקיבולת הכבל המחבר ויכולה להשתנות עם הטמפרטורה
- הרגישות תלויה בקיבולת הקבלים ויכולה להשתנות עם הטמפרטורה

קבוע הזמן

$\tau = R_L C_N$ – גביש

– בחיבור למגבר עם כבל נוסף:

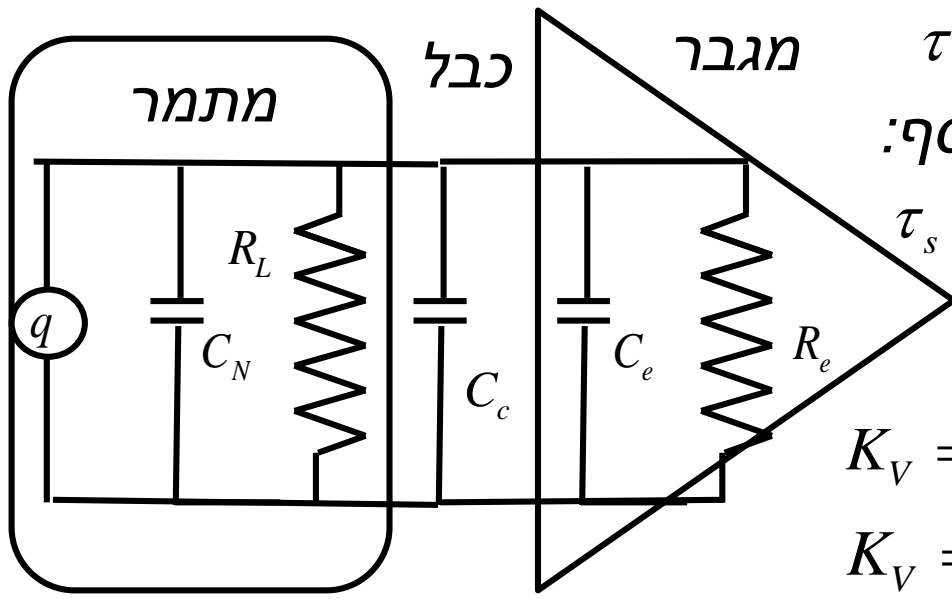
$\tau_s = R_s C_s$ $C_s = C_N + C_C + C_e$
 $R_s = R_e \parallel R_L$

רגישות

$K_V = K_q / C_N$ – גביש לבד:

$K_V = K_q / C_S$ – עם כבל ומגבר:

יותר נמוכה





מתמר פייזואלקטרי – מגבר פנימי Built in

● מגבר (כמו בשקף הקודם) שהוא חלק אינטגרלי למתמר

● *IEPE: Integral Electronics Piezo-electric*

● יתרונות:

– המעגל יוצר אימפדנס יציאה יותר נמוך:

● מקטין את השפעת הקבלים והמכשור החיצוני (אחרי החיישן)

● ניתן להעביר את אות היציאה למרחקים

● הגדלת קבוע הזמן

– זול יחסית

● חסרונות:

– מגביל את תחום הטמפרטורה (בגלל המעגל החשמלי)

– הרגישות נקבעת בזמן הייצור ואינה ניתנת לשינוי

– המעגל הפנימי דורש מקור זרם קבוע (אבל בחלק

מהחיישנים מקור הזרם הוא פנימי)



מד תאוצה פייזואלקטרי – עם מגבר פנימי

TABLE 6.6 Characteristics for the Model 508 Piezoelectric Accelerometer with Internal Preamplifier (Courtesy of BBN Instruments)

Parameter	Value	Unit
Sensitivity	10 ± 0.5	mV/g
Transverse sensitivity	<5	%
Frequency response		
±5% band	3 to 15,000	Hz
±3 dB band	1 to 35,000	Hz
Total equivalent noise	0.0015	g
Linearity (up to 150 g)	±1	%
Temperature range	-54 to +121	°C
Shock	10,000	g
Output impedance at 100 Hz	1000	Ω
Weight	<12	g



מד תאוצה פייזואלקטרי – ללא מגבר פנימי

Specifications – Charge Accelerometer Type 4371, 4371 S and 4371 V

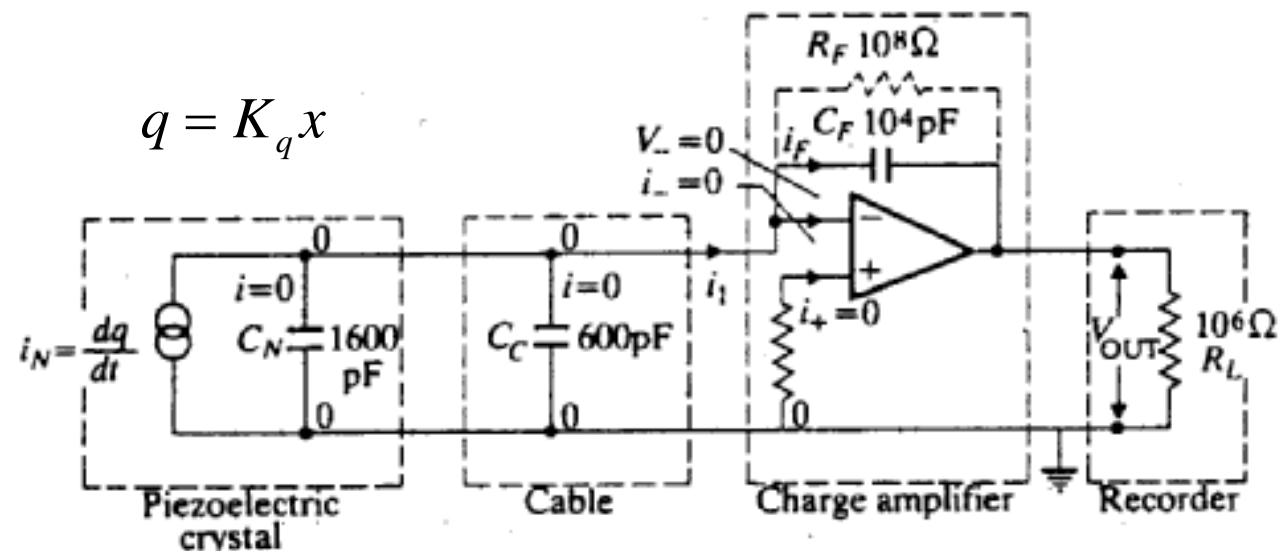
	Units	4371/4371 S	4371 V
Dynamic Characteristics			
Charge Sensitivity (@ 159.2 Hz)	pC/g	9.8 ± 2%	9.8 ± 15%
Frequency Response		See typical Amplitude Response	
Mounted Resonance Frequency	kHz	42	
Amplitude Response ±10% [1]	Hz	0.1 to 12600	
Transverse Sensitivity	%	<4	
Transverse Resonance Frequency	kHz	15	
Electrical Characteristics			
Min. Leakage Resistance @ 20°C	GΩ	≥20	
Capacitance	pF	1200	
Grounding		Signal ground connected to case	
Environmental Characteristics			
Temperature Range	°C (°F)	-55 to 250 (-67 to 482)	
Humidity		Welded, sealed	
Max. Operational Sinusoidal Vibration (peak)	g pk	6000	
Max. Operational Shock (± peak)	g pk	20000	
Base Strain Sensitivity	Equiv. g/μ strain	0.002	
Thermal Transient Sensitivity	Equiv. g/°C (g/°F)	0.004 (0.022)	
Magnetic Sensitivity (50 Hz–0.03 Tesla)	g/T	0.4	

[1] Low-end response of the transducer is a function of its associated electronics



מתמר פייזואלקטרי

חיבור למגבר מטען – קבל משוב גדול



יתרונות:

$$i_N = K_q \dot{x} = -(C_f \dot{v}_o + v_o / R_f)$$

- ניתן להרחיב את תחום התדירות
- לכמעט סטטי (Quazi static)

- רגישות וקבוע הזמן תלויים רק ברכיבי המשוב
- תחום טמפ' גדול יחסית למגבר Built-in

$$\frac{V_{out}(s)}{X(s)} = -\frac{K_q}{C_F} \frac{\tau_F s}{1 + \tau_F s}$$

חסרונות:

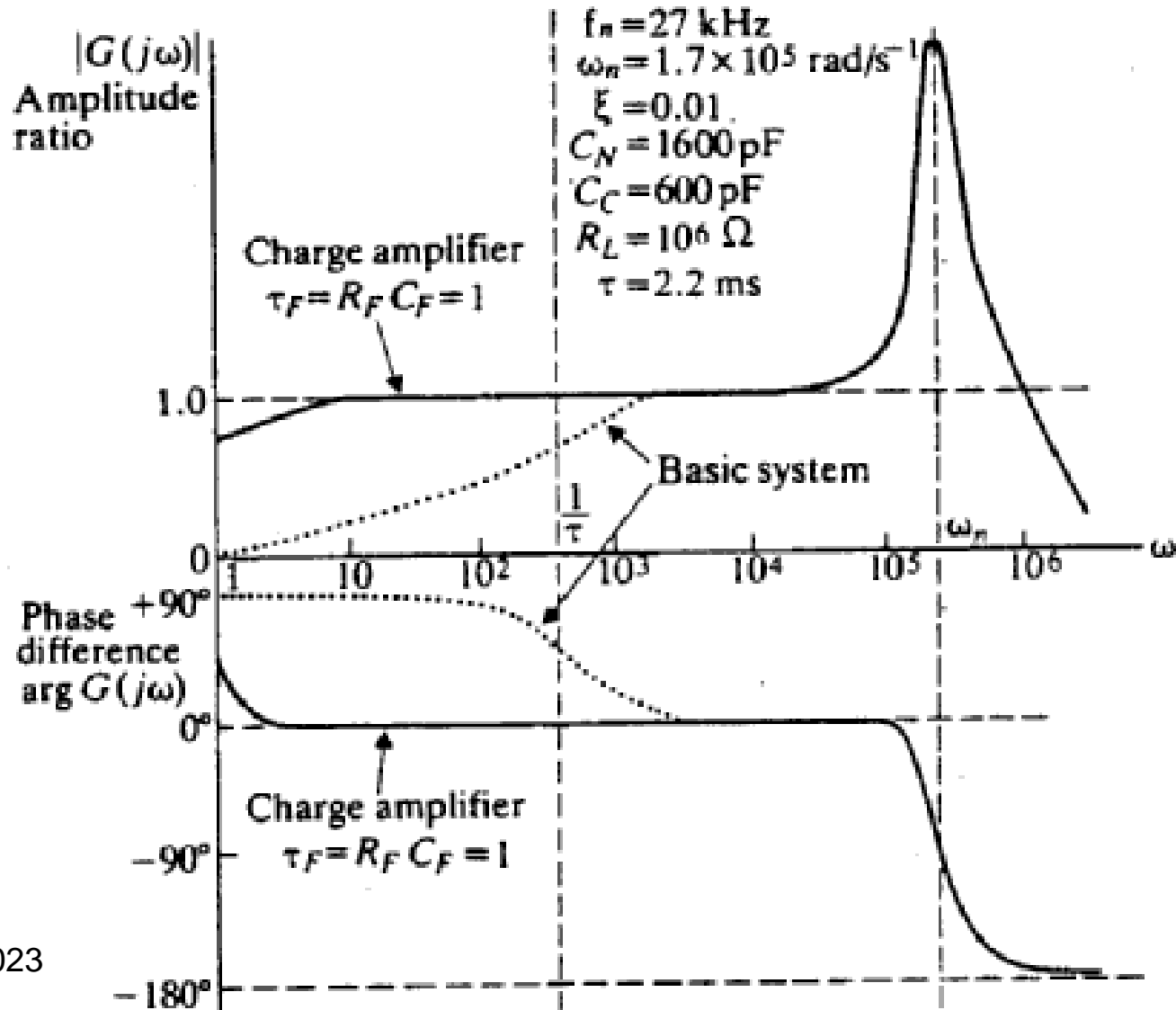
$$\tau_F = C_F R_F$$

- חיבור בכבל מיוחד בגלל אימפדנס יציאה גבוה
- רגישות יותר נמוכה (קבל המשוב גדול)



מתמר פייזואלקטרי עם מגבר מטען

תגובת תדירות





Piezo-electric Accelerometer

מפרטים שונים

Table 9.1 Piezoelectric Accelerometer Characteristics

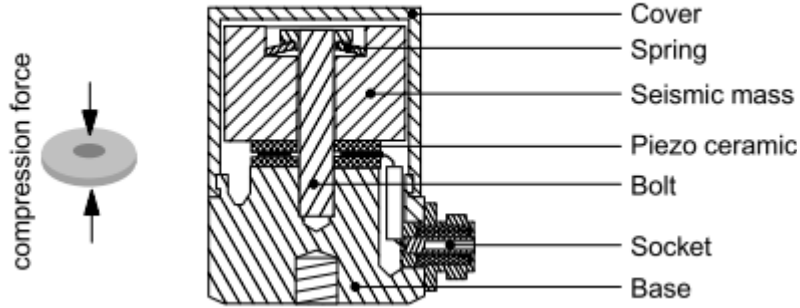
	Manufacturer			
	Endevco	Endevco	PCB	Kistler
Model	2222C	2292	302A	808A
Crystal material	Piezite P-8	Piezite P-8	Quartz	Quartz
Charge sensitivity (pC/g)	1.4	0.14	—	1.0
Voltage sensitivity (mV/g)	1.8	0.4	10	—
Capacitance (pF)	470	80	—	90
Internal time constant (s)	—	—	0.5	—
Frequency response (Hz)	20 to 8000	50 to 20,000	1 to 5000	0 to 7000
Mounted resonance frequency (Hz)	40,000	125,000	45,000	40,000
Transverse sensitivity	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 5\%$
Range (g)	0 to 1000	0 to 20,000	0 to 500	0 to 10,000
Size (in.)	0.25 dia \times 0.135	0.31 Hex \times 0.3	$\frac{1}{2}$ Hex \times 1.25	$\frac{1}{2}$ Hex \times 0.90
Weight (grams)	0.5	1.3	23	20
Vibration (maximum g)	1000	1000	2000	—
Shock (maximum g)	10,000	20,000	5000	—
Temperature range ($^{\circ}$ F)	-100 to +350	-65 to +250	-100 to +250	-195 to +260
Application	General purpose	Shock	General purpose	General purpose



מדי תאוצה פייזואלקטריים

מבנים שונים

Compression Design:



Shear Design:

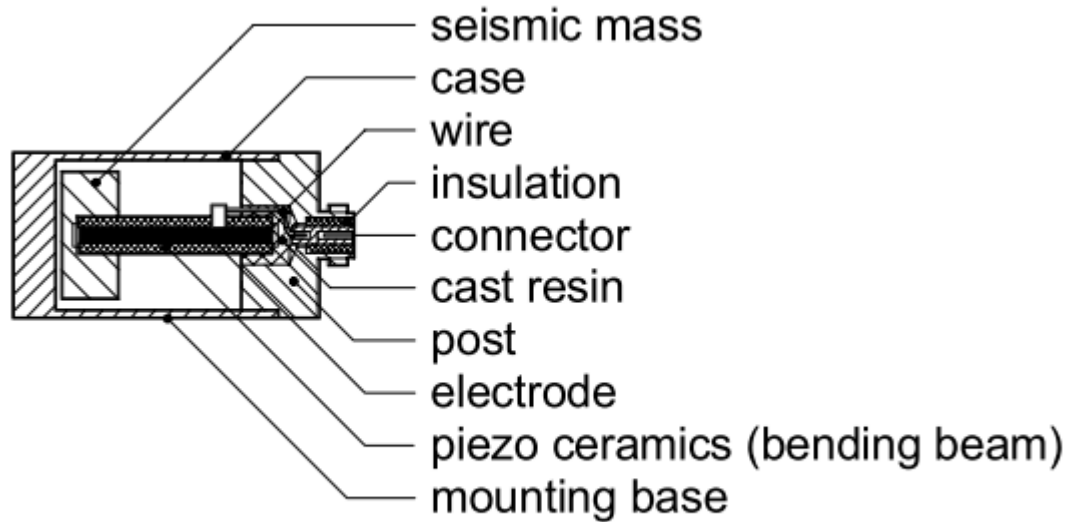
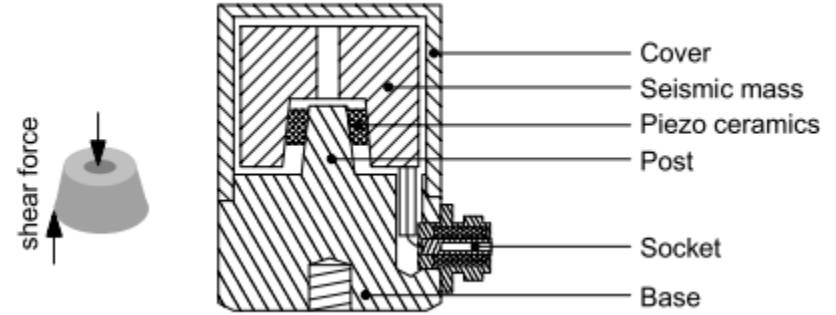




Figure 5: Bender Design

השוואה בין מדי תאוצה פייזואלקטריים

מבנים שונים

	Shear	Compression	Bender
Advantage 	<ul style="list-style-type: none"> low temperature transient sensitivity low base strain sensitivity (1) 	<ul style="list-style-type: none"> high sensitivity-to-mass ratio robustness technological advantages 	<ul style="list-style-type: none"> best sensitivity-to-mass ratio
Drawback 	<ul style="list-style-type: none"> lower sensitivity-to-mass ratio 	<ul style="list-style-type: none"> high temperature transient sensitivity high base strain sensitivity (2*) 	<ul style="list-style-type: none"> fragile relatively high temperature transient sensitivity

לדוגמא:

חיישן במבנה גזירה:

(1) 0.002 g/ μ strains

חיישן במבנה לחיצה

(2) 0.1 g/ μ strains

למבנה גזירה ביצועים עדיפים ולכן זהו מבנה מועדף בחיישנים חדשים

מבנה לחיצה וכפיפה שכיחים בחיישנים ישנים

(* ישנם חיישנים בלחיצה עם תכן שמבודד את האפקט של מעוות הבסיס



מתמרים אלקטרומגנטיים

מתמרים (חיישנים) אלקטרומגנטיים

Variable Gap

Toothed Wheel Magnetic Pickup

Moving Coil

Hall Effect sensors חיישני אפקט הול

* למעשה חיישן פרמטרי אבל על בסיס מגנט קבוע

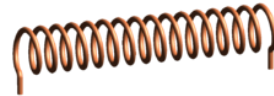


מתמרים אלקטרומגנטיים

עקרון עבודה

- מבוססים על חוק *Faraday*: מתח מושרה משינויים בשטף

$$E = -n \frac{d\phi}{dt}$$



המגנטי $\phi = \int_S \underline{B} \cdot \underline{dA}$
– בסליל עם *n*-ליפופים

- בחיישנים א"מ

– השדה המגנטי נוצר ממגנט קבוע (ולא מהזרם בסליל)

• אין מקור מתח!

– השינויים בשדה המגנטי נובעים מהתזוזה (ולא מזרם החילופין)

- קונפיגורציות מקובלות:

– חיישני מרווח משתנה (*Variable gap*):

• תזוזה גורמת לשינוי בהתנגדות המגנטית (רלקטנס) \mathcal{R}_m

– חיישני סליל נע (*Moving Coil*):

• תזוזה גורמת לשינוי בשטח שהסליל מכסה.



מתמרים אלקטרומגנטיים

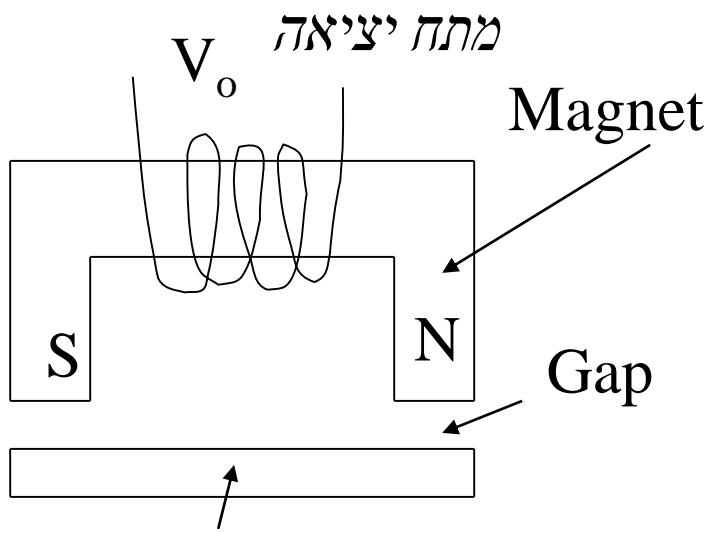
השוואה עם חיישנים השראתיים

- **חיישנים השראתיים**
 - חיישן פרמטרי
 - נמדד השינוי ב- $L(G, \mu)$ (בעיקר עקב גיאומטריה):
 - $$V_o = L \frac{di}{dt}$$
 - יש תגובה סטטית
 - רגישות תלויה במתח אספקה
 - מבוססים על חוק Ampere
- **מתמרים אלקטרומגנטיים**
 - מתמר
 - נמדד השינוי בשדה המגנטי (כתוצאה מהתזוזה)
 - $$V_o = - \frac{d\phi}{dt}$$
 - אין תגובה סטטית
 - רגישות תלויה בעוצמת המגנט הקבוע
 - מבוססים על חוק Faraday



מתמרים אלקטרומגנטיים

מרווח משתנה Variable Gap



Ferromagnetic moving element

$$V_o = -n \frac{d\phi}{dt} = n \frac{mmf}{\mathcal{R}_m^2} \frac{2\dot{x}}{\mu_0 A}$$

המקדם תלוי ברלקטנס ולכן ב x

ה- mmf נוצר ע"י מגנט ואינו משתנה בזמן:

$$mmf = constant$$

צפיפות השטף המגנטי תלויה ברלקטנס:

$$\phi = \frac{mmf}{\mathcal{R}_m} = \frac{const}{\mathcal{R}_m}$$

$$\mathcal{R}_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_T A} + \frac{2x}{\mu_0 A} \quad \text{הרלקטנס:}$$

מודדים מתח חשמלי המתקבל עקב שינויים ברלקטנס (ולכן בשטף) כתוצאה מהתזוזה:

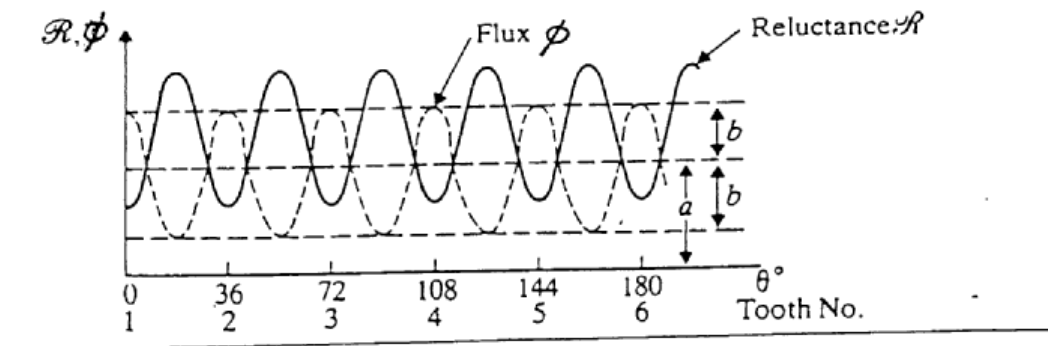
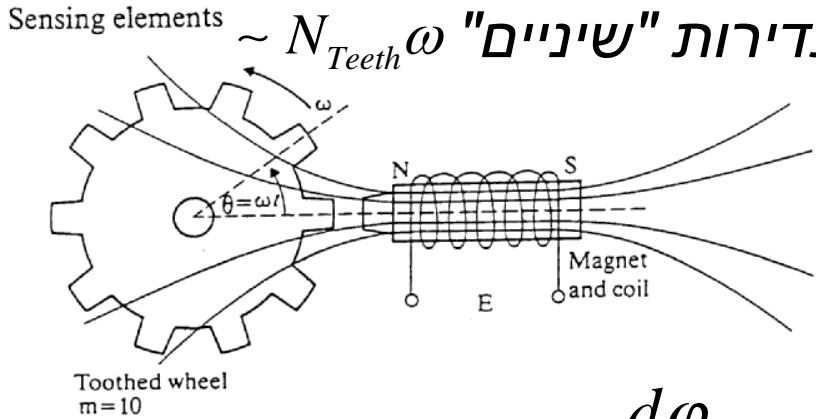
מתח היציאה פרופורציונאלי למהירות!!



מד מהירות זוויתית א"מ

Toothed wheel magnetic pickup

מהירות זוויתית ω
 תדירות "שיניים" $\omega \sim N_{Teeth}$



$$V_o = -n \frac{d\phi}{dt} \underset{\text{1st Fourier Comp}}{\approx} C N_{Teeth} \omega \sin(N_{Teeth} \omega t)$$

מדידת מהירות סיבוב:

1. אמפליטודת המתח – רגיש לרעש ולהשפעות העמסה (חשמלית).
2. תדירות המתח – יותר אמין, נמדד באמצעות מעגל לספירת פולסים (מדידה ספרתית).

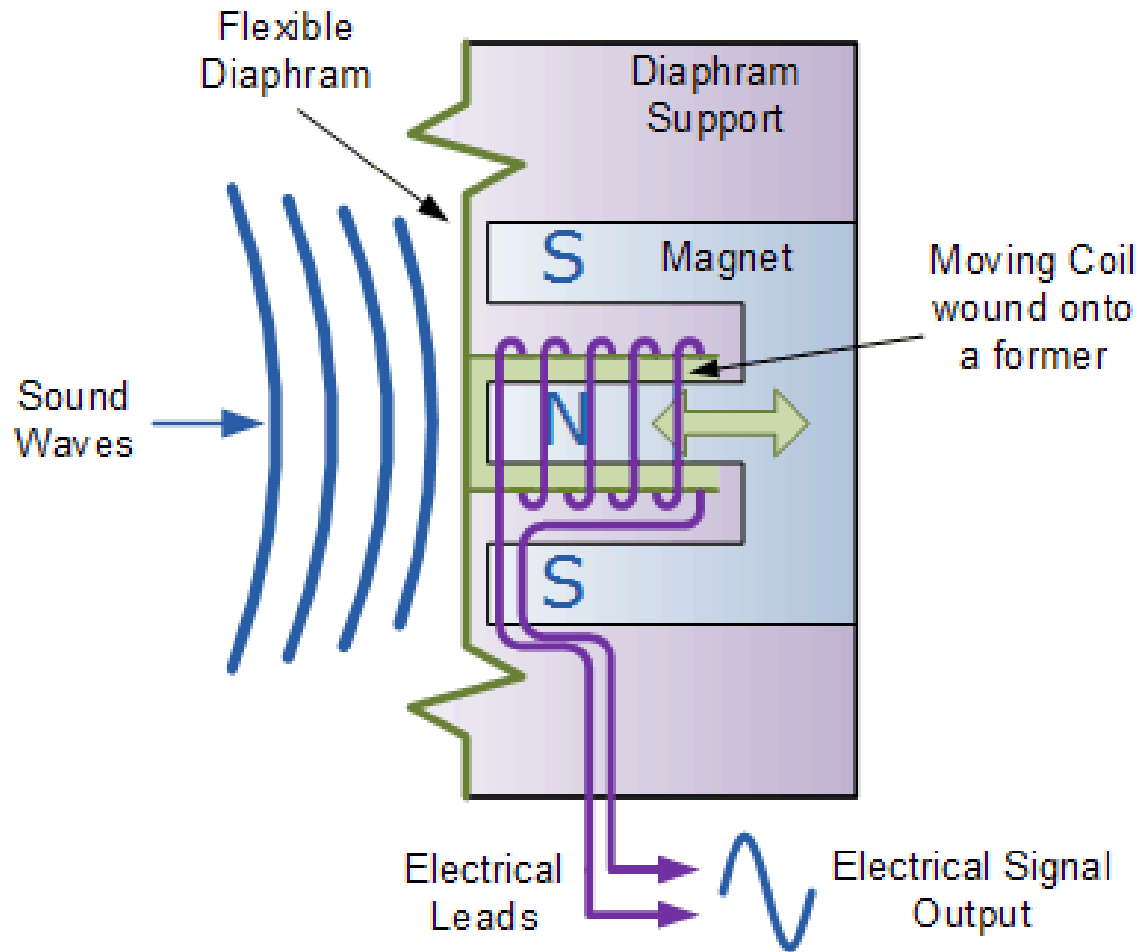
חסרונות:

1. קיים חסם תחתון למהירות הסיבוב שניתן למדוד.
2. רזולוציה גבוהה דורשת מספר גדול של שיניים ולכן גלגל גדול.



מתמרים אלקטרומגנטיים

Moving Coil Sensors – Linear Velocity Sensor



Dynamic Moving-coil Microphone Sound Transducer

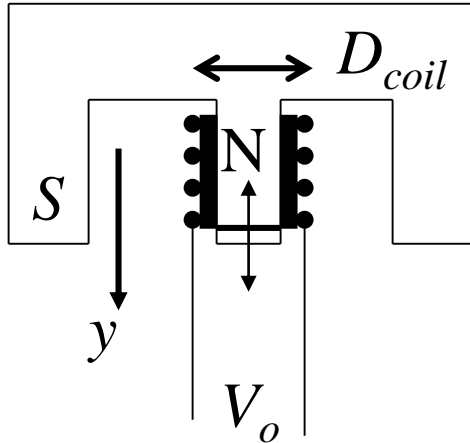


מתמרים אלקטרומגנטיים

Moving Coil Sensors – Linear Velocity Sensor

מבנה החיישן:

Moving coil sensor



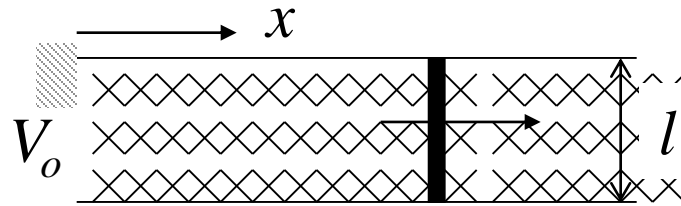
$$V_o = \pi n D_{coil} B \frac{dy}{dt}$$

גדלים אופייניים:

$$B = 10,000 \text{ Gauss}$$

$$\text{Sensitivity} = 10 \text{ mV}/(\text{mm}/\text{sec})$$

עיקרון עבודה: כאשר מוליך נע בשדה מגנטי, השטח A שהוא סוגר משתנה בזמן



$$\phi = BA = Blx$$

$$V_o = -\frac{d\phi}{dt} = -Blv$$

שיקולי תכן: עבור B קבוע ניתן להגדיל רגישות ע"י הגדלת

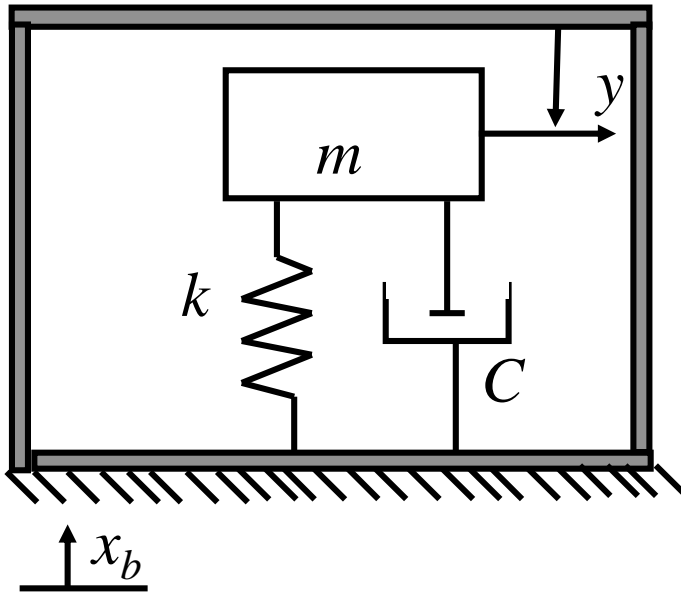
$$l = \pi n D_{coil}$$

כדי לשמור על גודל קטן, זה אפשרי רק ע"י הקטנת קוטר החוט והגדלת n ולכן ע"ח עליית התנגדות יציאה



מתמרים אלקטרומגנטיים

Linear Velocity Sensor - Applications



- מדידת מהירויות באמפליטודות קטנות
- מדידת רעידות
- חלק פנימי בחיישנים סיסמיים (עם מסה סיסמית קפיץ ומרסן)
- מדידת מהירות << מערכת מסדר שני מעביר גבוהים

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = \ddot{x}_b$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \xi = \frac{C}{2\sqrt{km}}$$

Second order HPF:

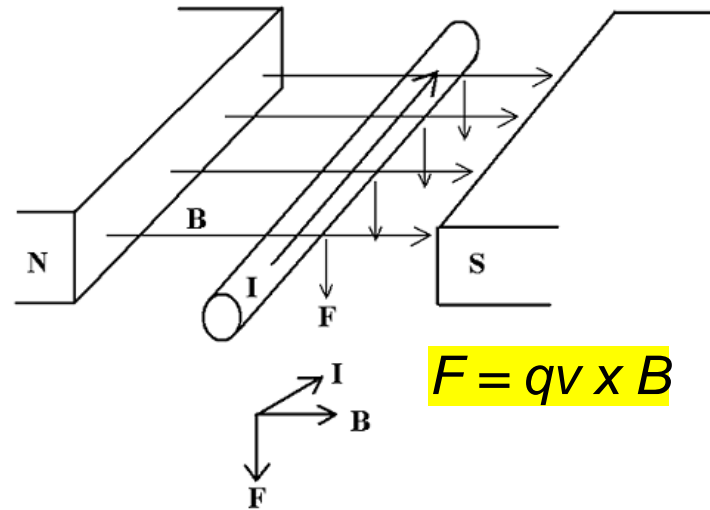
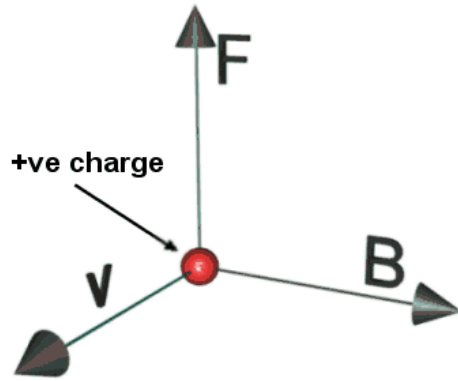
$$\frac{sY(s)}{sX_b(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$



Hall Effect Sensors – Lorentz force

- דומים למתמרים: השדה המגנטי נוצר ממגנט
- אבל אין התמרת אנרגיה וצריך לספק מתח (זרם)
- אפשר להתייחס כחיישן פרמטרי עם B כפרמטר

- עקרון פעולה: כוח לורנץ פועל על מטען q שנע במהירות סחיפה $V = V_d$ בניצב לשדה מגנטי B .
- הכוח ניצב לכיוון השדה המגנטי ולכיוון הסחיפה.

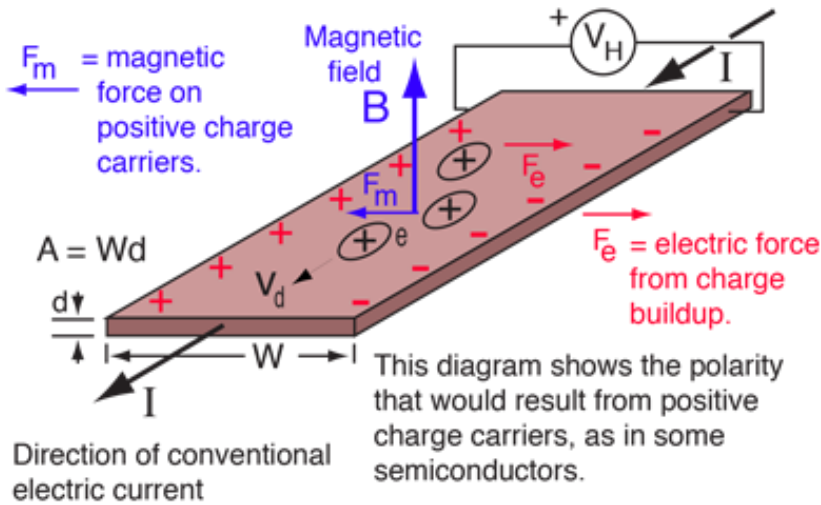


$$F = qv \times B$$

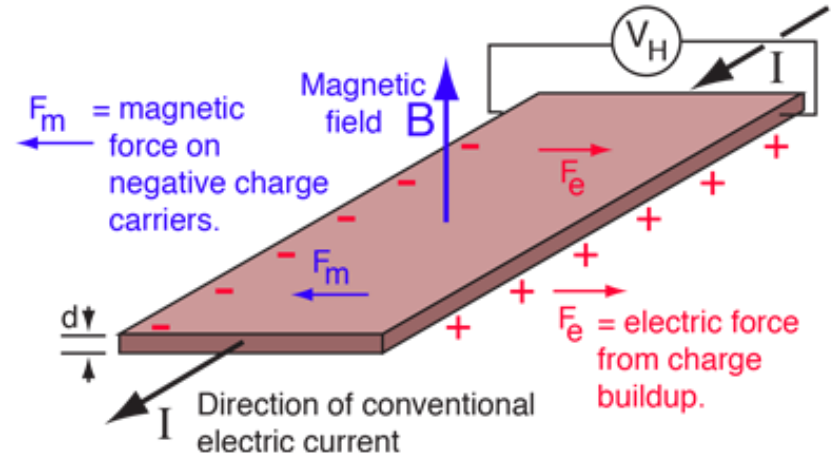


Hall Effect Sensors

אפקט הול עם נשאי מטען מסוגים שונים



אפקט הול עם נשאי מטען חיוביים
(P-type semiconductors)



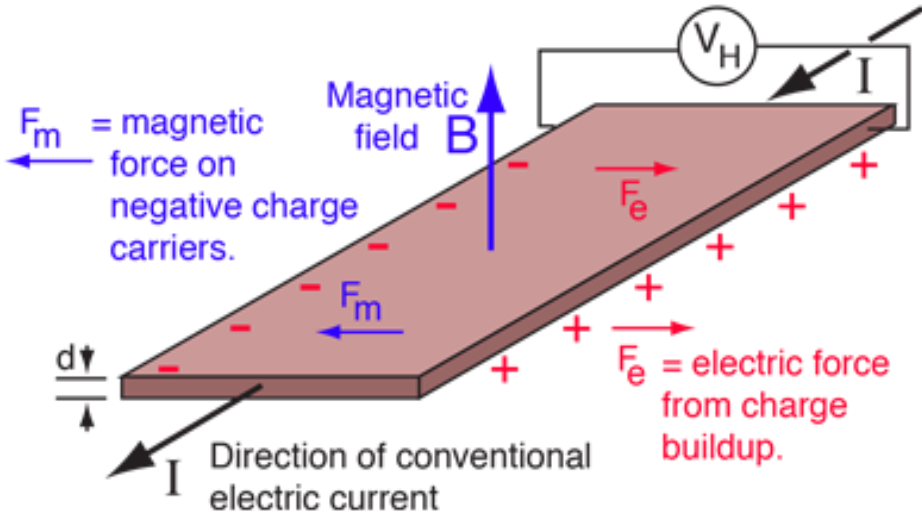
אפקט הול עם נשאי מטען שליליים
(מתכות ו-N-type semiconductors)

שים לב מתקבלת פולריות הפוכה בשני המקרים.



Hall Effect Sensors

אפקט הול עם נשאי מטען שליליים



- כוח לורנץ מגנטי F_m גורם להפרדה ולהצטברות של מטענים הפוכי סימן על הקצוות הנגדיים של המוליך.

$$F_m = qV_d B$$

- כתוצאה מכך נוצר שדה חשמלי רוחבי E שגורם לכוח חשמלי מתנגד:

$$F_e = qE$$

$$F_m = F_e \Rightarrow qE = qV_d B \Rightarrow E = V_d B$$

- מהירות הסחיפה, V_d , תלויה בזרם: $I = nqV_d(wd)$

n : כמות המטענים החופשיים ליחידת נפח

- מתח הול שנוצר: $V_H = Ew = V_d Bw = IB / (nqd)$



חיישני הול – מגנט נייד

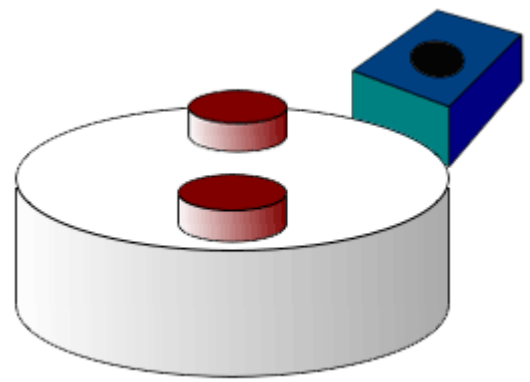
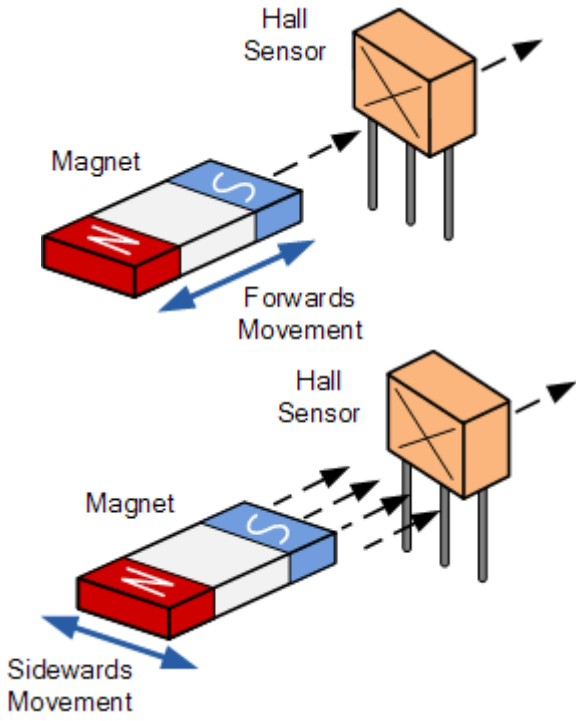
- חיישנים מבוססי אפקט הול מכילים מגנט שעוצמתו באזור המדיד תלויה בגיאומטריה

- המגנט נע בניצב למדיד אפקט הול.

- השדה במדיד תלוי במרחק

- המגנט נע במקביל למדיד אפקט הול.

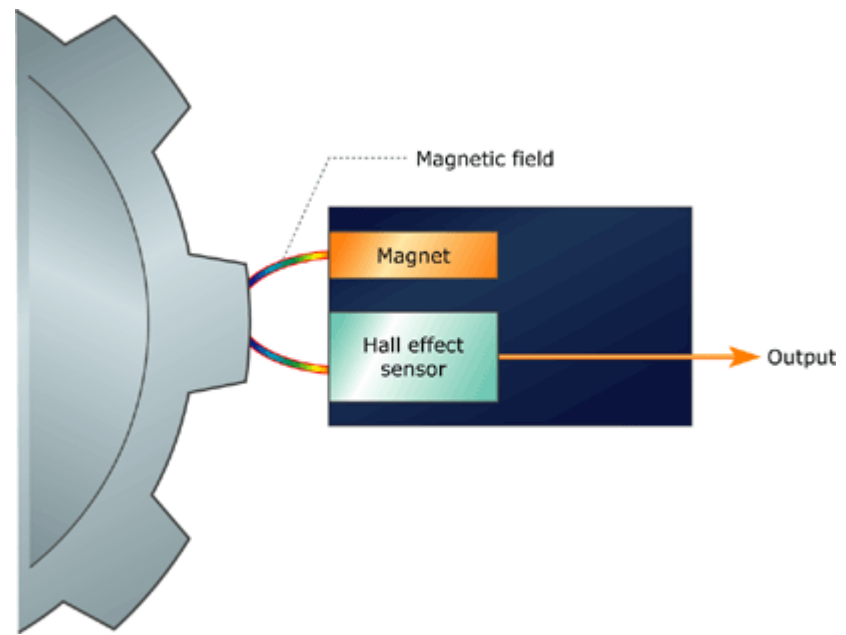
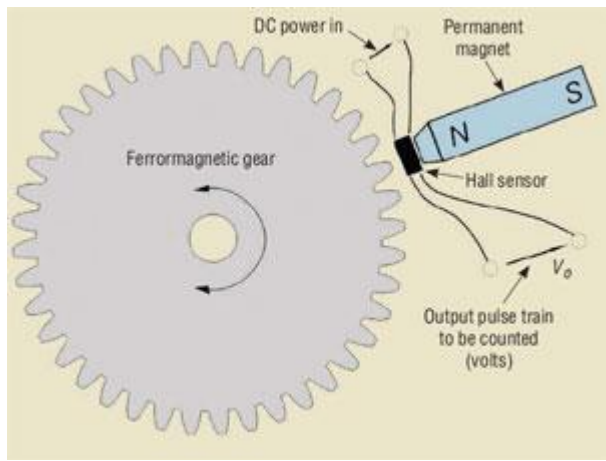
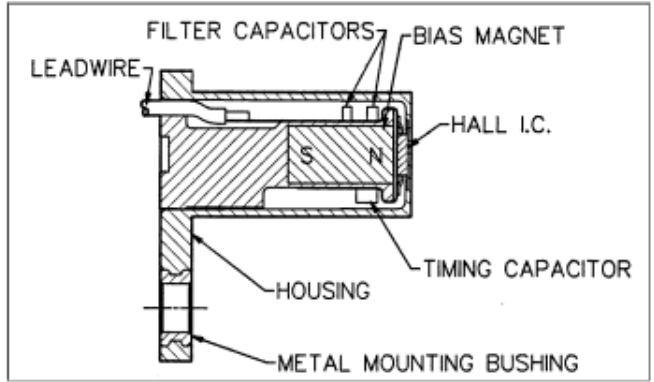
- מתאים למדידת מספר מעברים





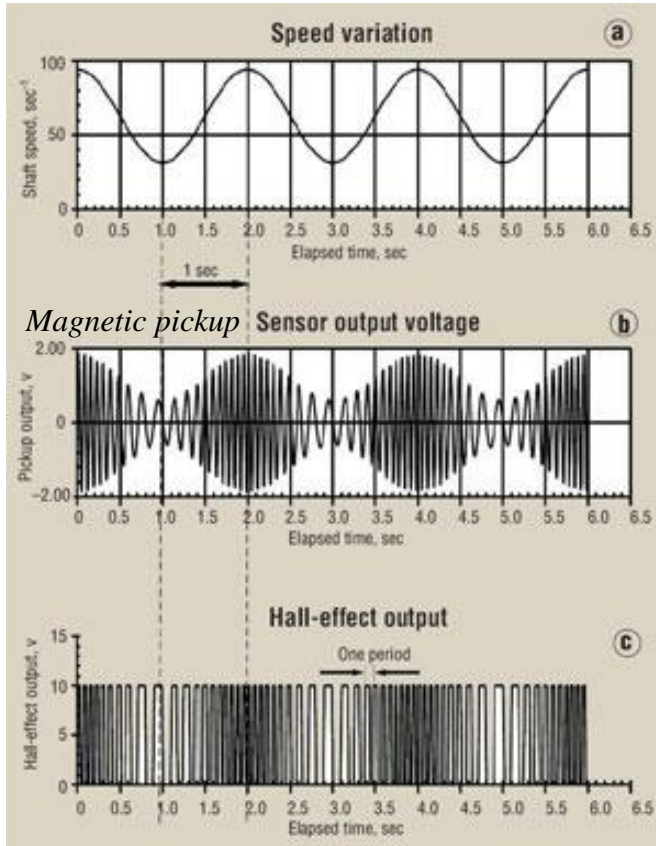
חיישני הול – מגנט ומדיד קבועים

- בהרבה מחיישני אפקט הול, המגנט והמדיד באריזה אחת והשדה משתנה בגלל המרחק מגוף אחר פרומגנטי (גלגל שיניים).





השוואה בין חיישני מהירות סיבוב מתמר א"מ לעומת חיישן הול

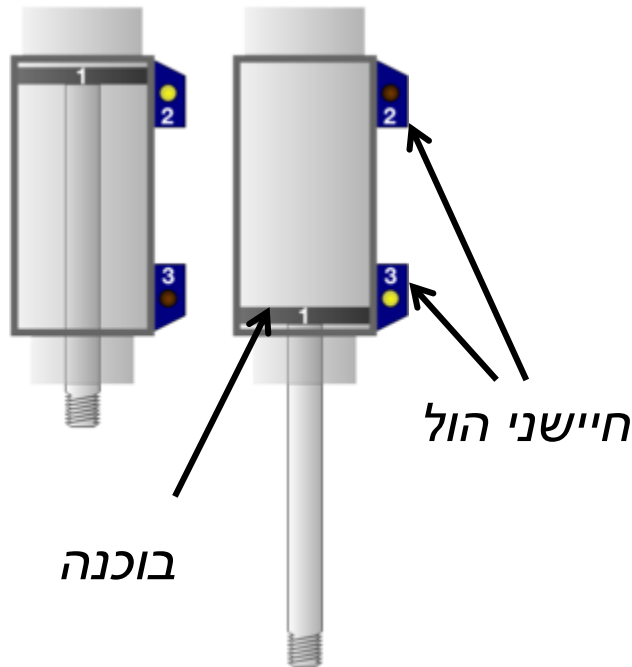


- חיישן א"מ (Magnetic pickup): המתח תלוי בקצב שינוי השטף המגנטי
 - מוגבל במהירות המינימאלית
 - מודולציית אמפליטודה ותדר
- חיישן אפקט הול: המתח תלוי בצפיפות השדה המגנטי (שתלוי בגיאומטריה)
 - לא מוגבל למהירות מינימאלית
 - קיימת רק מודולציית תדר

הערה: בד"כ נוצרים הרבה פולסים בסיבוב



חיישני הול – צורות יציאה שונות



בעיבוד אות של חיישן הול ניתן להתייחס לשני מודים של עבודה:

– יציאה רציפה (ליניארית)

– יציאה בינרית: מעגל "מפסק".

- כשהשדה החשמלי יורד מתחת לסף מסוים המעגל החשמלי נפתח.

- חיישני קירבה

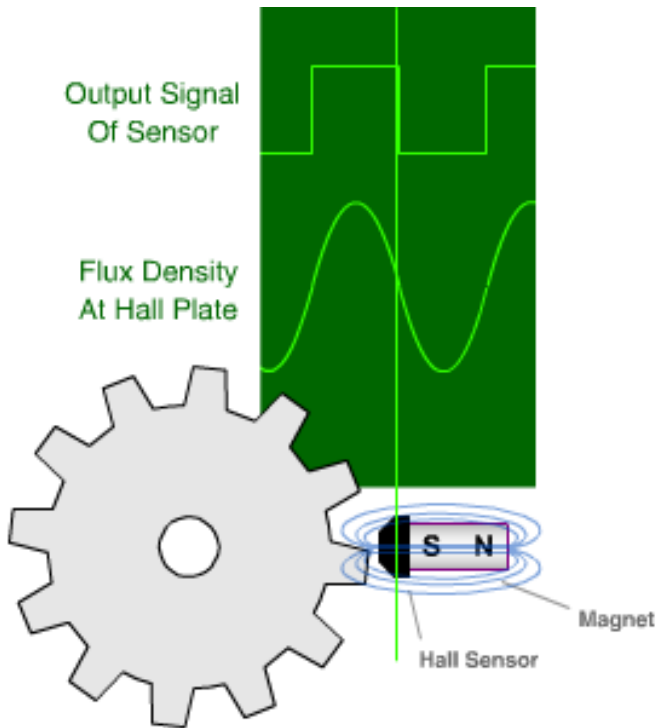
- מקשים

דוגמא לשימוש של חיישני אפקט הול כמפסקים:
מופעלים כשהבוכנה מגיע לקצה.

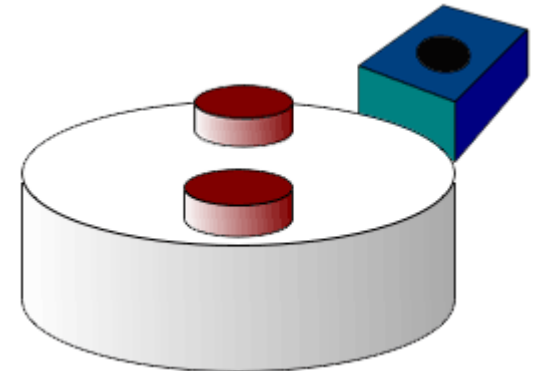


שימושים של חיישני הול – חיישני מהירות סיבוב

- מדידה וסנכרון לסיבוב של גלגלים וצירים
- מד מהירות סיבוב: על הדיסק שמסתובב מוצמדים שני מגנטים שמעוררים פולסי מתח בחיישן הול (שניים בסיבוב).
– שימוש: ב- disk drive



מדידת מהירות סיבוב גלגל
(מערכת בלמי ה-ABS
במכונית)





שימושים של חיישני הול – מדידת מעבר להב

● מבנה החיישן

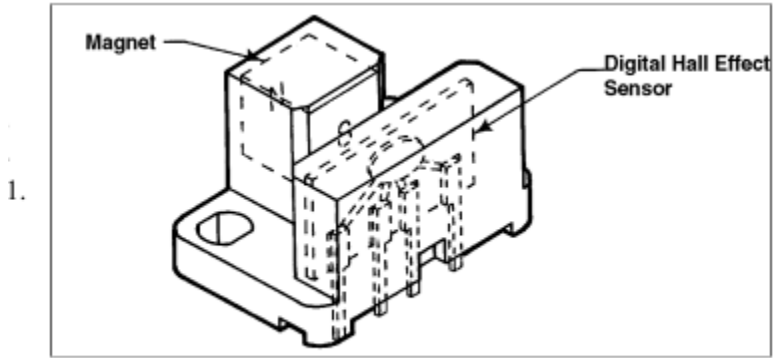


Figure 5-1 Basic vane operated position sensor

● פעולה: מדידת מספר המעברים של להבים

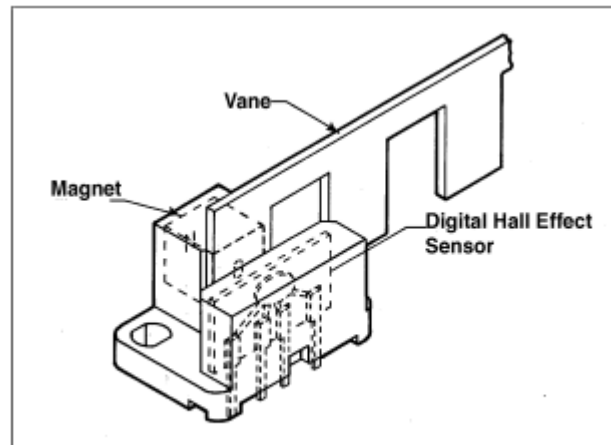


Figure 5-2 Ferrous vane in gap



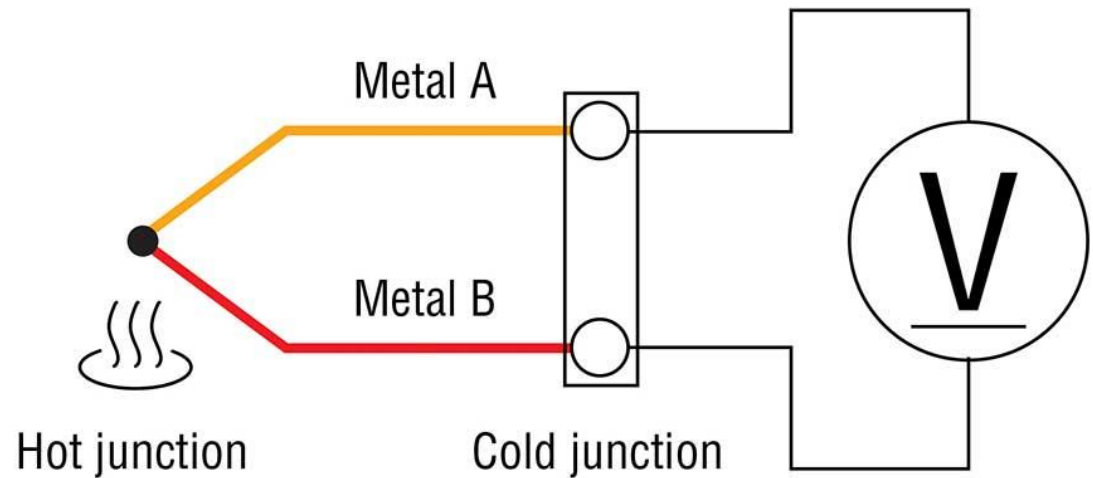
חיישני הול – מימושים, יתרונות וחסרונות

- משתמשים בחומרים מוליכים למחצה
– שליטה על כמות המטענים באופן מהימן
- חיסרון: רגיש לטמפרטורה
– מקור זרם/מתח מוגבל למניעת חימום עצמי
- יתרונות
– רגיש למיקום, לא רק למהירות
– אין מגע



Thermocouples

Working principle: (1812 by Thomas Johann Seebeck)



K-Type





Thermocouples

יתרונות וחסרונות

Advantages:

- Cheap
- Small tip
- Interchangeable
- Standard connectors
- Can measure a wide range

Disadvantages:

- Low accuracy, typical error > 1 degree
- Measures the temperature difference between two points, not absolute temperature.

It always need a reference



Thermocouples

Table 3. Thermocouple Characteristics¹

Type	Metals (+)/(-)	Temp (°C) (approximate)	Scale Factor@ 25 °C	Accuracy* (Greater of)	Notes
J	Iron/Constantan	-210 to 760°C	52 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.1 °C or 0.4%	Wide range, general purpose
K	Chromel/Alumel	-270 to 1370°C	41 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.1 °C or 0.4%	Wide range, general purpose
T	Copper/Constantan	-270 to 400°C	40 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0.5 °C or 0.4%	High accuracy, narrow range
E	Chromel/Constantan	-200 to 1000°C	61 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.0 °C or 0.4%	High output per degree
R	Pt/Pt with 13% Rh	0 to 1700°C	6 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0.6 °C or 0.1%	High Temp
S	Pt/Pt with 10% Rh	0 to 1700°C	6 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0.6 °C or 0.1%	High Temp
N	Ni Cr Si/Ni Si Mg	-270 to 1300°C	52 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	1.1 °C or 0.4%	Stable at high temps

Sensitivity range between 1 to about 61 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (E-type)

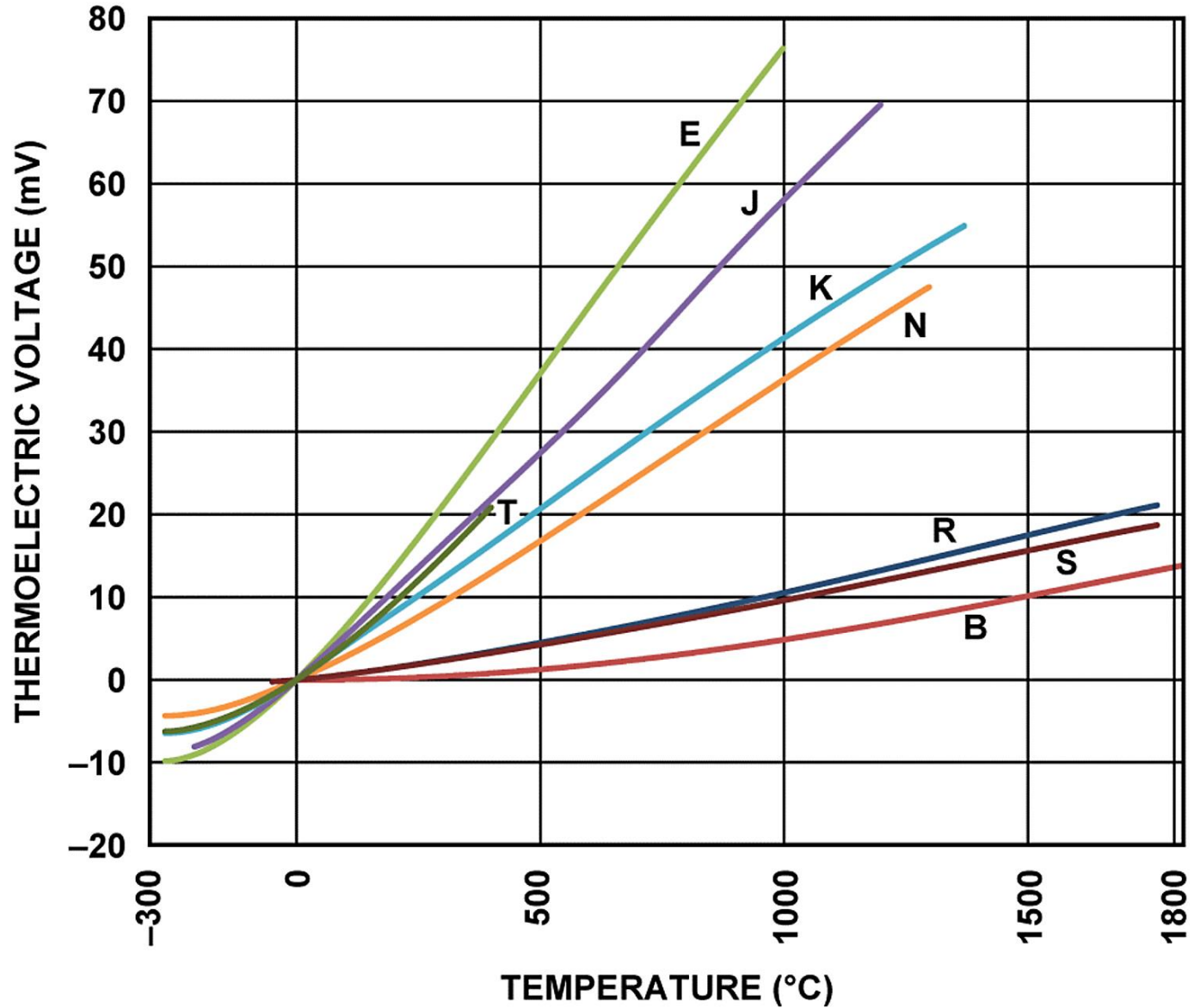


Thermocouple Standards

ANSI Code	ANSI MC 98.1 Color Coding		Alloy Combination		Maximum T/C Grande temp. range	EMF(mv)Over Max.temp.range	IEC 584-3 Color Coding	IEC Code
	Thermocouple	Extension	+ Lead	- Lead				
K			NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	NICKEL-ALUMINUM Ni-Al	-270 to 1372 °C -454 to 2501 °F	-8.458 to 54.886		K
J			IRON Fe (magnetic)	CONTANTAN COOPER-NICKEL Cu-Ni	-210 to 1200 °C -346 to 2193 °F	-8.095 to 69.553		J
T			COPPER Cu	CONTANTAN COOPER-NICKEL Cu-Ni	-270 to 400 °C -454 to 752 °F	-8.258 to 20.872		T
E			NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	CONTANTAN COOPER-NICKEL Cu-Ni	-270 to 1000 °C -454 to 1832 °F	-9.835 to 76.373		E
N			NICROSIL Ni-Cr-Si	NISIL Ni-Si-Mg	-270 to 1300 °C -450 to 2372 °F	-4.345 to 47.513		N
S	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-10% RHODIUM Pt-10%Rh	PLATINUM Pt	-50 to 1768 °C -58 to 3214 °F	-0.236 to 18.693		S
R	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-13% RHODIUM Pt-13%Rh	PLATINUM Pt	-50 to 1768 °C -58 to 3214 °F	-0.226 to 21.101		R
B	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-30% RHODIUM Pt-30%Rh	PLATINUM-6% RHODIUM Pt-6%Rh	0 to 1820 °C 32 to 3308 °F	0 to 13.820		B



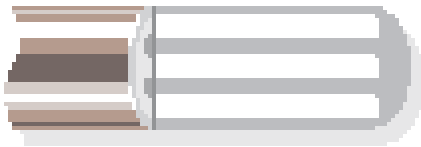
צמד תרמי – רגישות



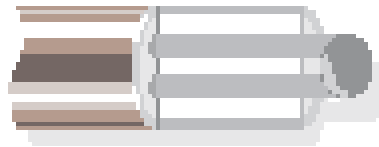


Common Thermocouples Junctions

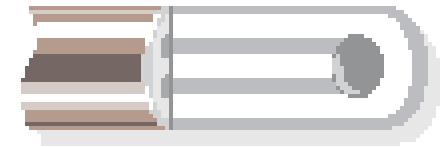
Grounded



Exposed



Ungrounded



Low noise thermocouple

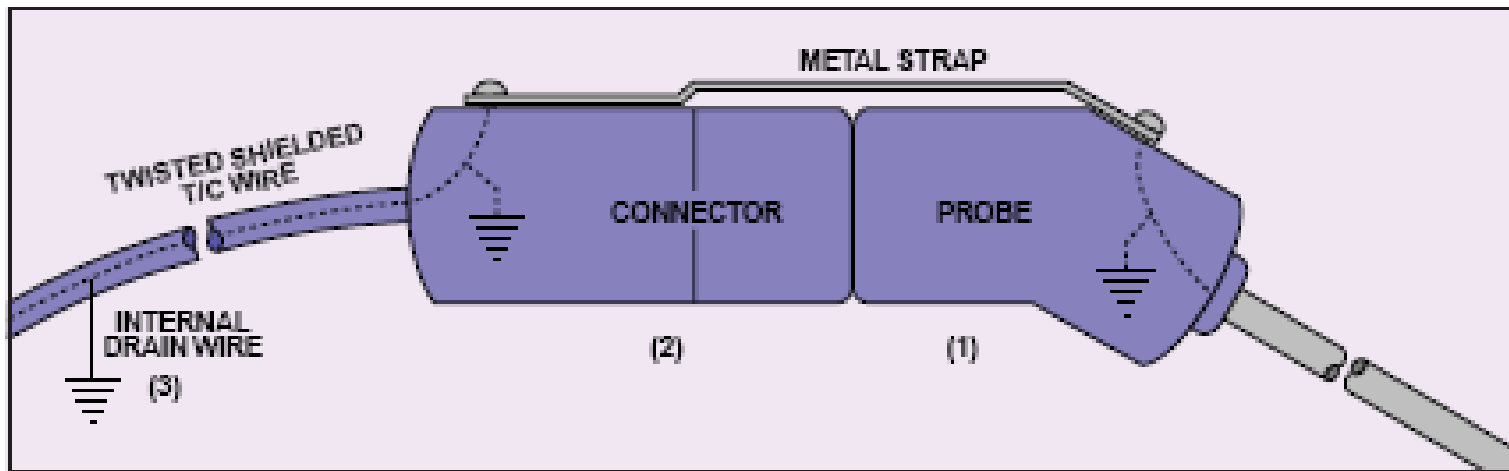


Figure 1. Continuous ground from probe to test instrument



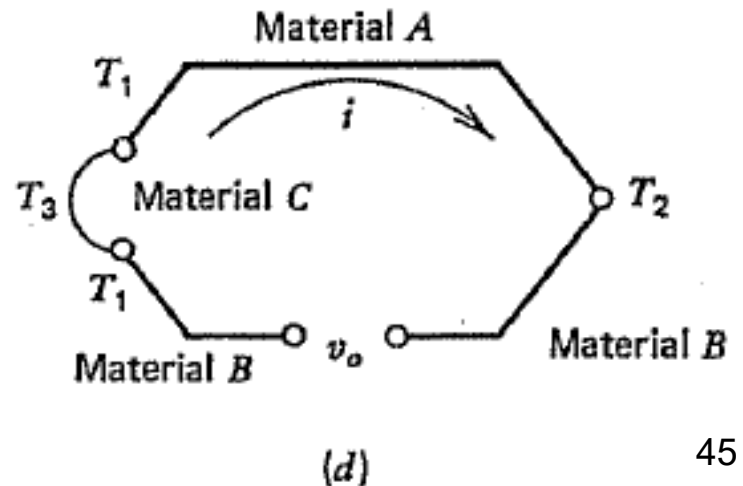
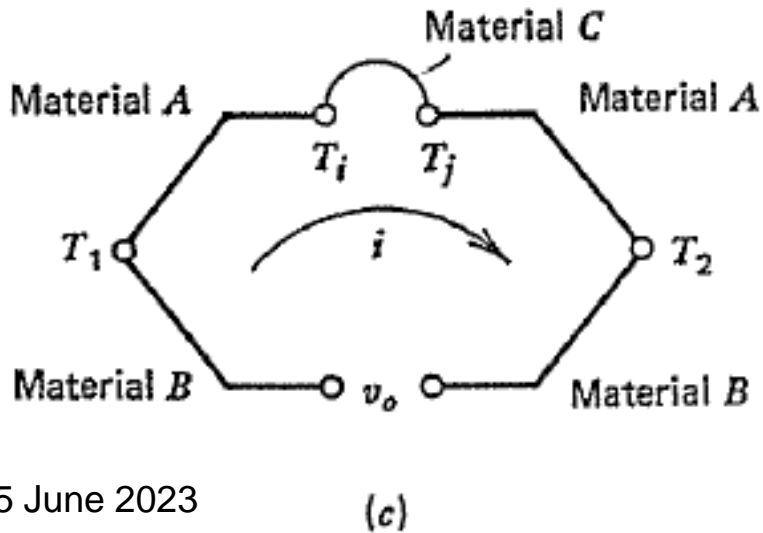
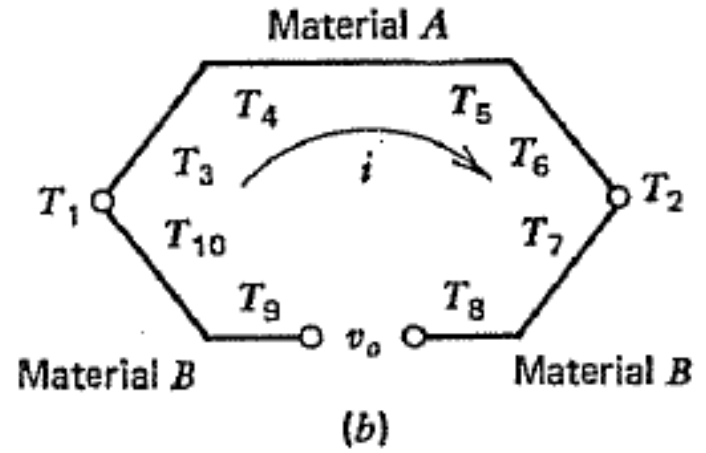
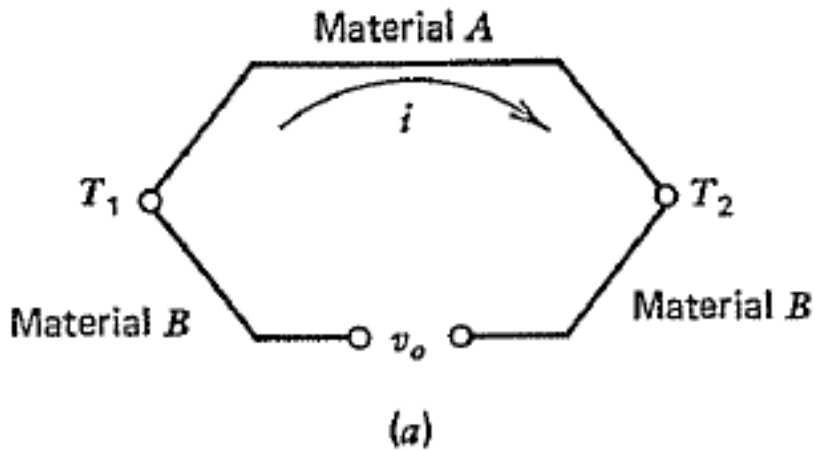
Thermocouples laws (1)

The practical use of thermocouples is based on the following six operating principles, which are illustrated in Fig. 11.15.

1. A thermocouple circuit must contain at least two dissimilar materials and at least two junctions (Fig. 11.15a).
2. The output voltage v_o of a thermocouple circuit depends only on the difference between junction temperatures ($T_1 - T_2$) and is independent of the temperatures elsewhere in the circuit if no current flows in the circuit (Fig. 11.15b).
3. If a third metal C is inserted into either leg (A or B) of a thermocouple circuit, the output voltage v_o is not affected, provided that the two new junctions (A/C and C/A) are maintained at the same temperature, for example, $T_i = T_j = T_3$ (Fig. 11.15c).
4. The insertion of an intermediate metal C into junction 1 does not affect the output voltage v_o , provided that the two junctions formed by insertion of the intermediate metal (A/C and C/B) are maintained at the same temperature T_1 (Fig. 11.15d).



Thermocouples laws (2)





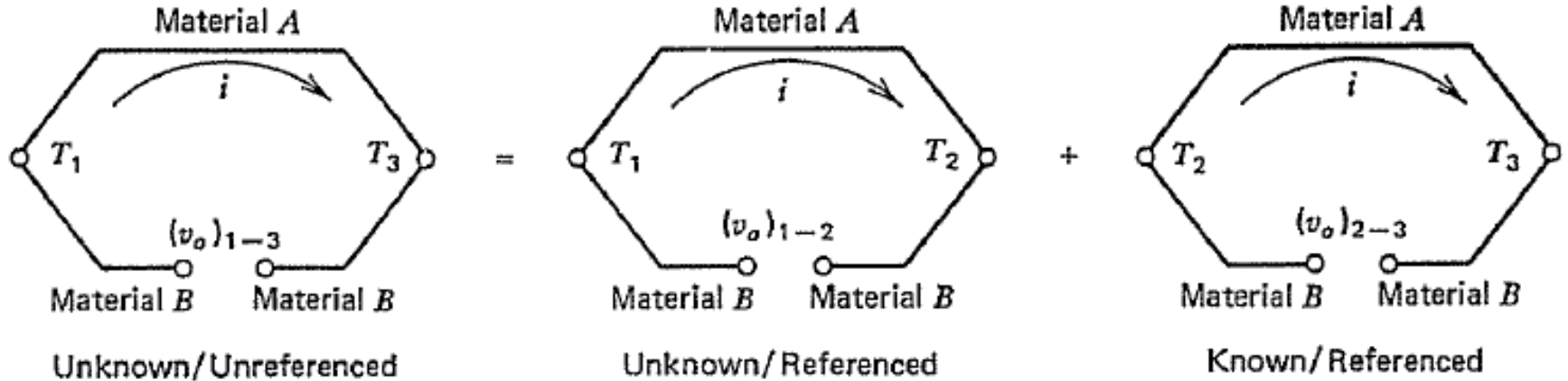
Thermocouples laws (3)

5. A thermocouple circuit with temperatures T_1 and T_2 produces an output voltage $(v_o)_{1-2} = f(T_1 - T_2)$, and one exposed to temperatures T_2 and T_3 produces an output voltage $(v_o)_{2-3} = f(T_2 - T_3)$. If the same circuit is exposed to temperatures T_1 and T_3 , the output voltage $(v_o)_{1-3} = f(T_1 - T_3) = (v_o)_{1-2} + (v_o)_{2-3}$ (Fig. 11.15e).
6. A thermocouple circuit fabricated from materials A and C generates an output voltage $(v_o)_{A/C}$ when exposed to temperatures T_1 and T_2 , and a similar circuit fabricated from materials C and B generates an output voltage $(v_o)_{C/B}$. Furthermore, a thermocouple fabricated from materials A and B generates an output voltage $(v_o)_{A/B} = (v_o)_{A/C} + (v_o)_{C/B}$ (Fig. 11.15f).

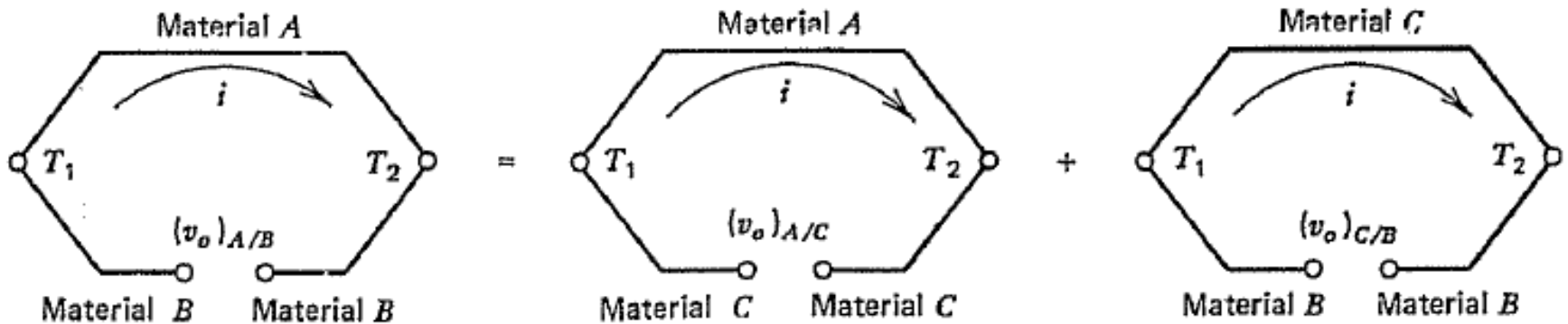
The six principles of thermoelectric behavior are important because they provide the basis for the design, circuitry, and application of thermocouples to temperature measurements.



Thermocouples laws (4)



(e)



(f)



Thermocouple Circuits

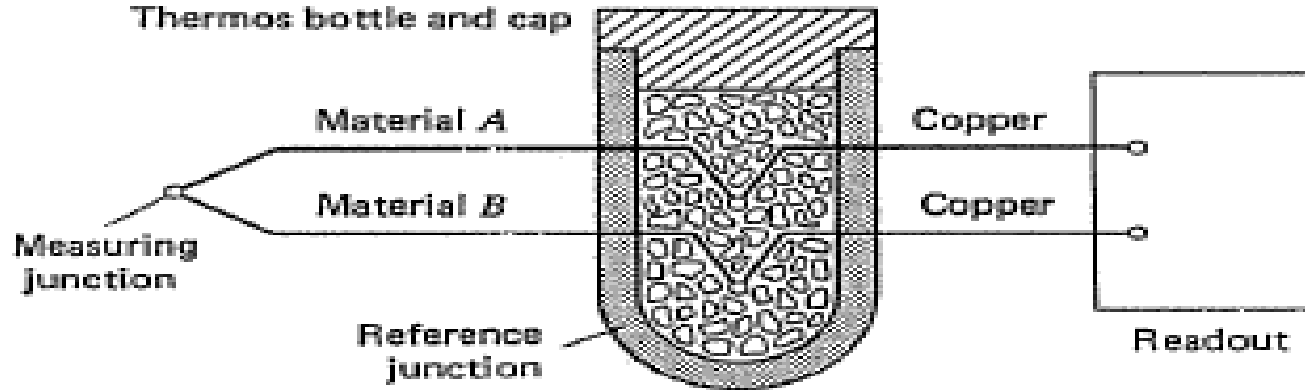


Figure 11.19 The ice-bath method for maintaining a reference temperature at 0°C (32°F).

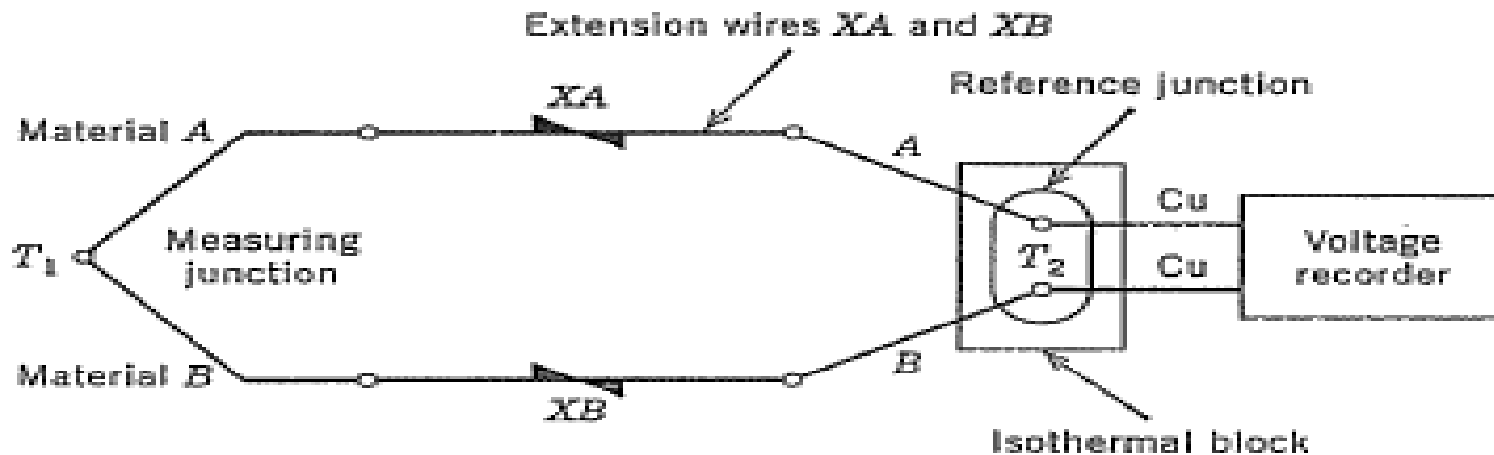


Figure 11.25 Schematic illustration of the use of extension wires and copper lead wires in a thermocouple circuit.



Reference Junction Compensation

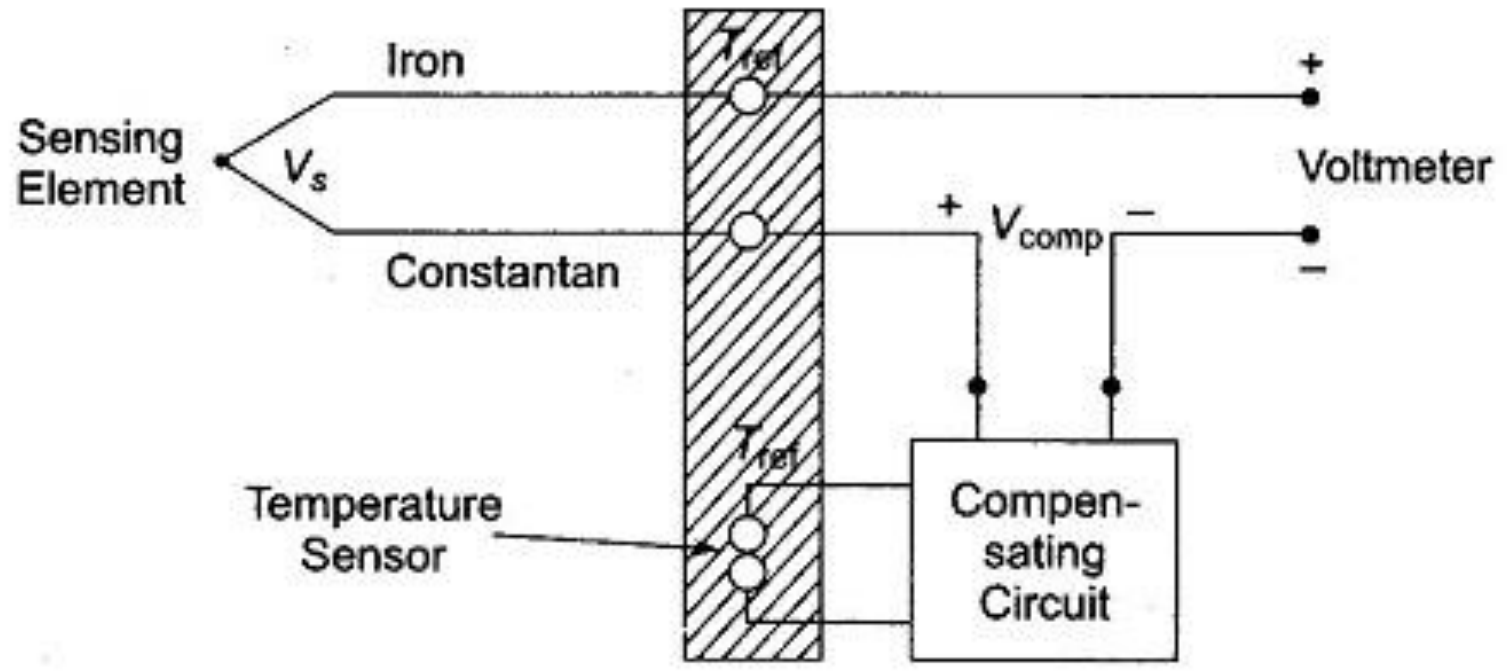
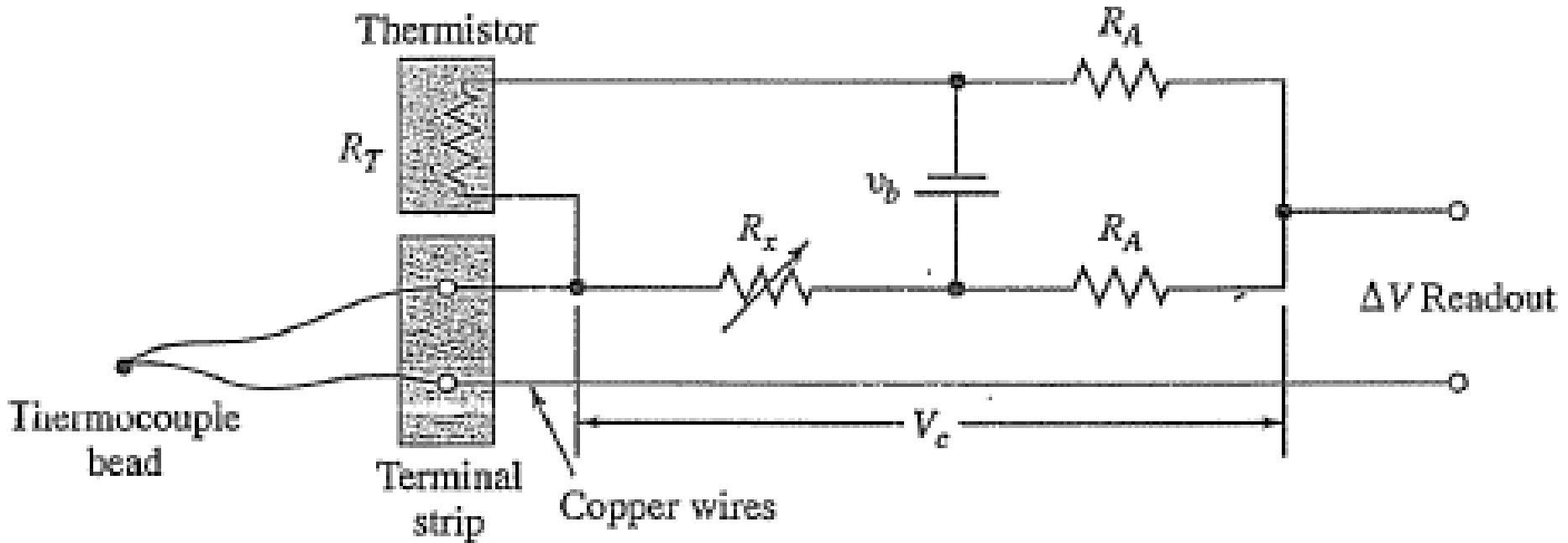


Fig. 13.47 Practical Isothermal Block Reference Junction for Data Loggers, etc.

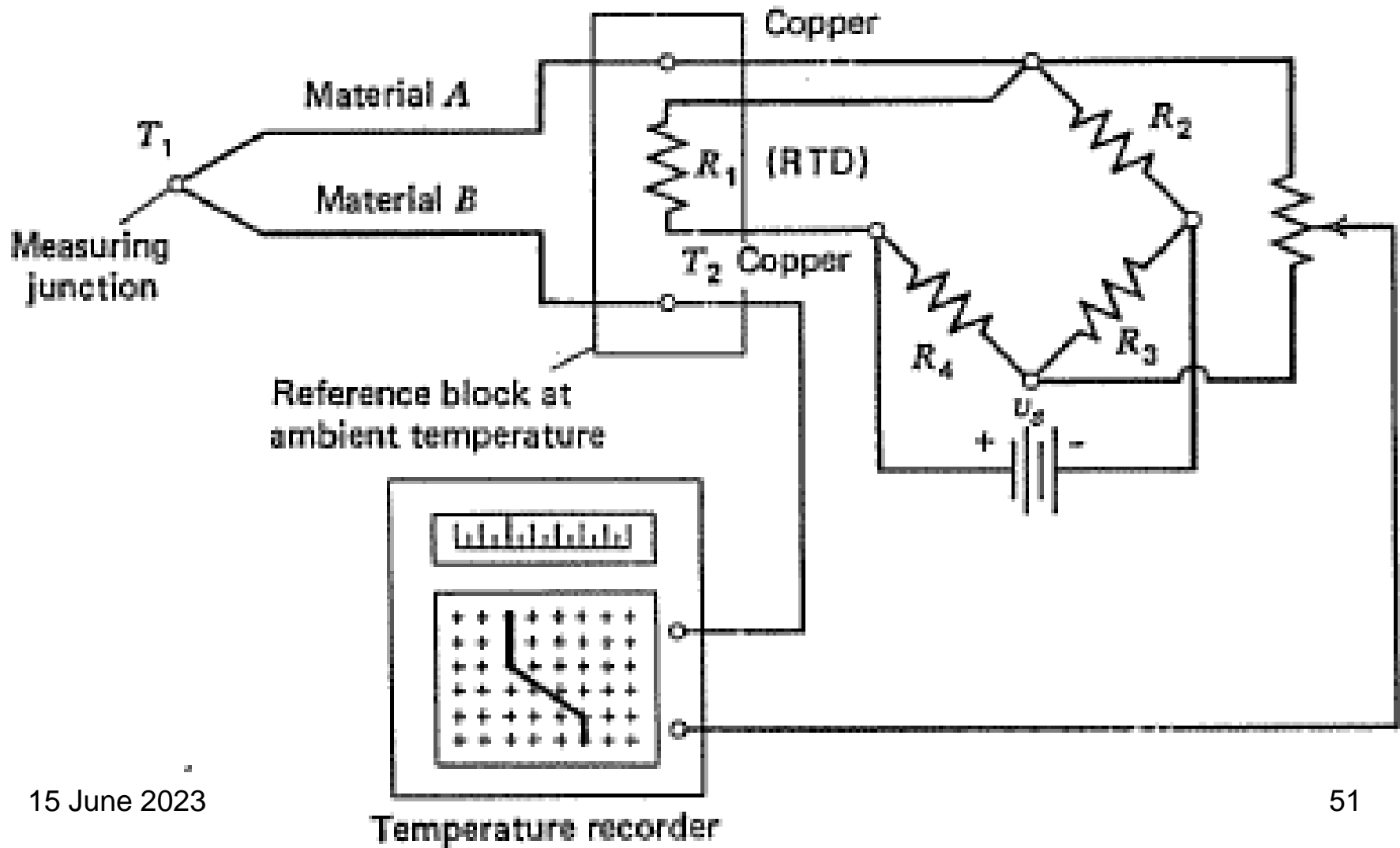


Reference Junction Compensation With Thermistor





Reference Junction Compensation With Bridge and RTD

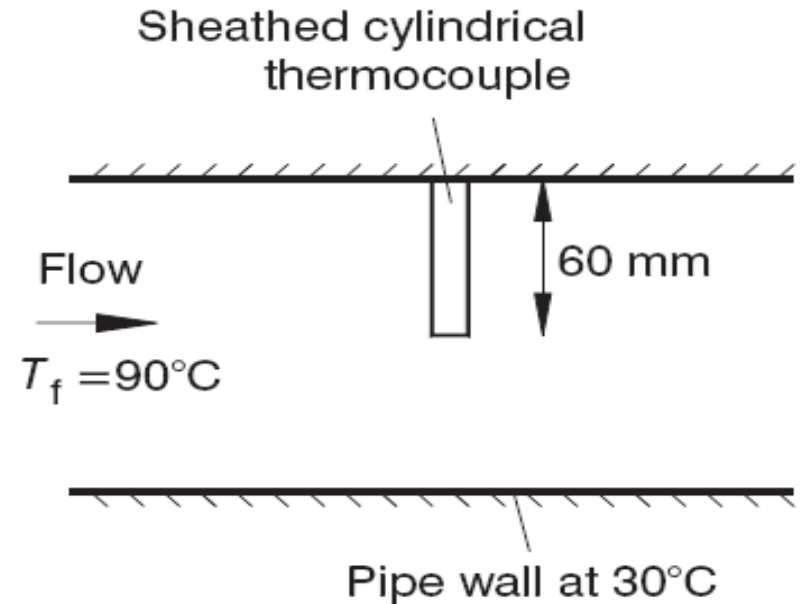




Temperature Measurements Issues

Conduction Errors

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c} (T - T_f) = 0 \quad (2.4)$$



- where:
- T = local fin temperature (K)
 - x = location away from the fin base (m)
 - A_c = the cross-sectional area (m^2)
 - P = the fin perimeter (m)
 - k = the thermal conductivity of the fin ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
 - h = heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
 - T_f = bulk temperature of the surrounding fluid (K)



Conduction Errors

Solution of equation (2.4), assuming negligible loss from the tip of the fin, gives

$$\frac{T - T_f}{T_b - T_f} = \frac{\cosh m(L - x)}{\cosh mL} \quad (2.5)$$

where L = length of the fin (m), T_b = temperature at the base of the fin (K) and

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}} \quad (2.6)$$

For the case of a cylindrical fin, $P = 2\pi r$ and $A_c = \pi r^2$, so

$$m = \sqrt{\frac{2h}{kr}} \quad (2.7)$$

Equation (2.5) can be used to evaluate the deviation of the temperature of a transducer, located part-way along a cylindrical sheath, from that of the local fluid temperature.



Conduction Errors – Example

A 10 mm external diameter stainless steel sheathed thermocouple is inserted into a pipe containing a fluid (Figure 2.8). If the heat transfer coefficient is $140 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ and the fluid temperature is 90°C and the length of the sensor protruding from the wall is 60 mm, determine analytically the temperature indicated by the transducer. The transducer is located 5 mm from the tip of the sheath and the pipe wall temperature can be taken as 30°C . The thermal conductivity of the sensor can be taken as $16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ and the effects of heat transfer by radiation can be neglected.



Conduction Errors – Example solution

From equation (2.7), taking the radius of the probe as 0.005 m,

$$m = \sqrt{\frac{2 \times 140}{16 \times 0.005}} = 59.2$$

Using equation (2.5), taking $x = 60 - 5 = 55$ mm and recalling that

$$\cosh n = \frac{e^n + e^{-n}}{2}$$

$$\frac{T - 90}{30 - 90} = \frac{\cosh(59.2(0.06 - 0.055))}{\cosh(59.2 \times 0.06)} = 0.06$$

So the temperature indicated by the transducer will be $T = 86.4^\circ\text{C}$. This is 3.6°C below the true temperature of the fluid.



Conduction Errors – Example comments

At the tip, $x = L$, the error can be defined as $= T_f - T_L$

$$\text{error} = T_f - T_L = \frac{T_f - T_b}{\cosh mL} \quad (2.8)$$

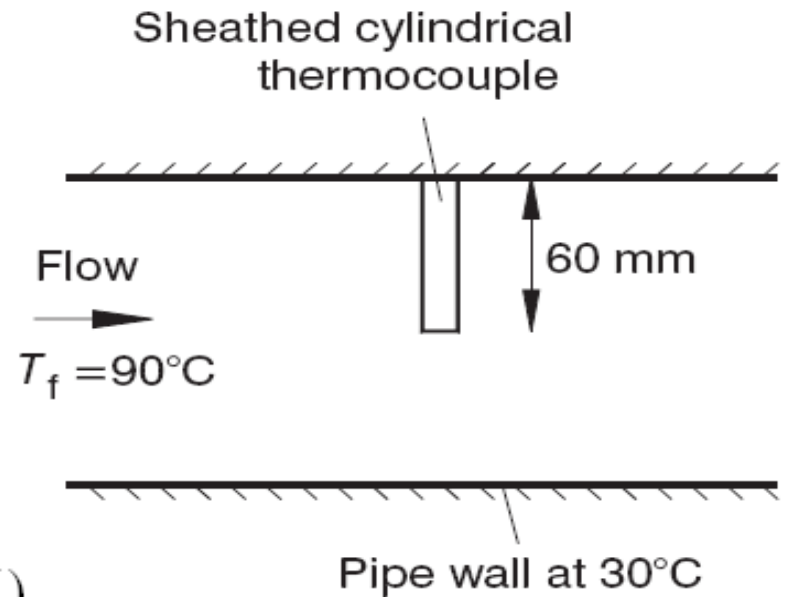
The error is proportional to $T_f - T_b$ so a pragmatic approach to minimize the error is to insulate the wall or pipe therefore elevating T_b . If control is available over the choice of sensor, then one with a small radius, low thermal conductivity and large immersion length is desirable.

It should be noted that the analysis presented in equations (2.4)–(2.6) and in the previous example does not take into account the detailed assembly of the sensor. In practice some sensors consist of a multi-core assembly with the transducer isolated electrically from the sheath by a ceramic insulator.



Radiation Errors

$$A\varepsilon\sigma(T_{ic}^4 - T_w^4) = Ah(T_f - T_{tc}) \quad (2.9)$$



T_f = the bulk temperature of the fluid (K)

T_{tc} = the temperature of the thermocouple (K)

T_w = the temperature of the walls of the surrounding

The thermocouple here will be subject to a number of phenomena which could cause errors between the indicated temperature and the true temperature of the gas including conduction along the support and thermal radiation exchange between the sensor and the pipe walls.



Radiation Errors – Comments

If $T_{\text{wall}} = 300^{\circ}\text{C}$ and $T_{\text{gas}} = 650^{\circ}\text{C}$, in this case the difference between the gas stream and that indicated by the thermocouple is about 68°C .

This difference can be reduced by use of a radiation shield and by increasing the temperature of the wall.

The temperature of the wall could be elevated by use of thermal insulation, which would serve to reduce the heat transfer due to radiation between the transducer and the wall.



Radiation Shield

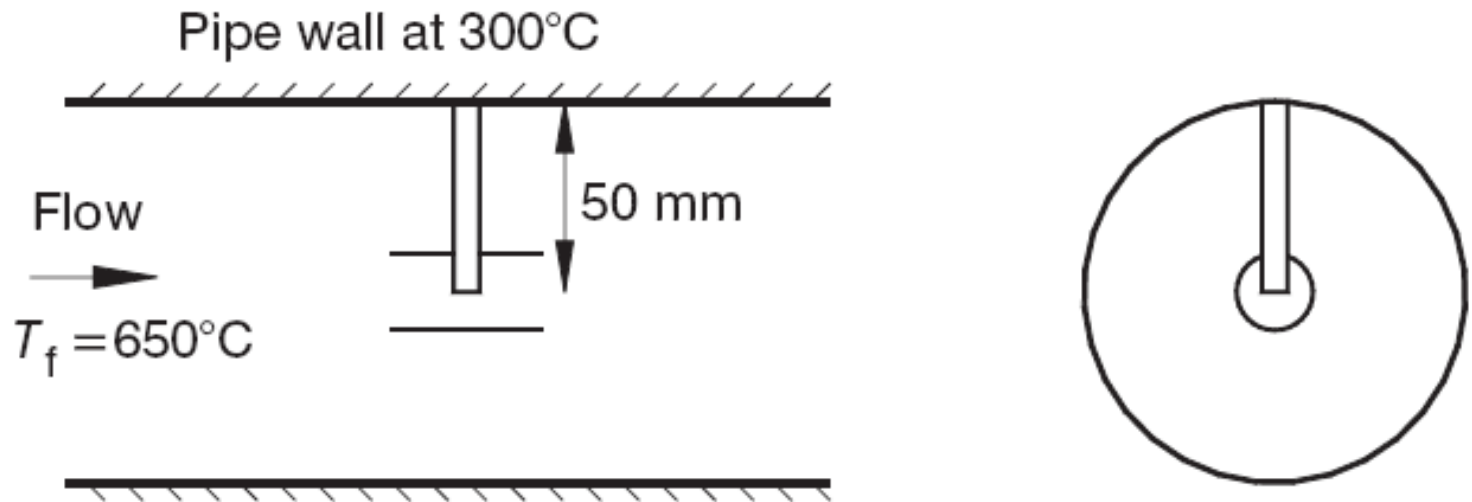
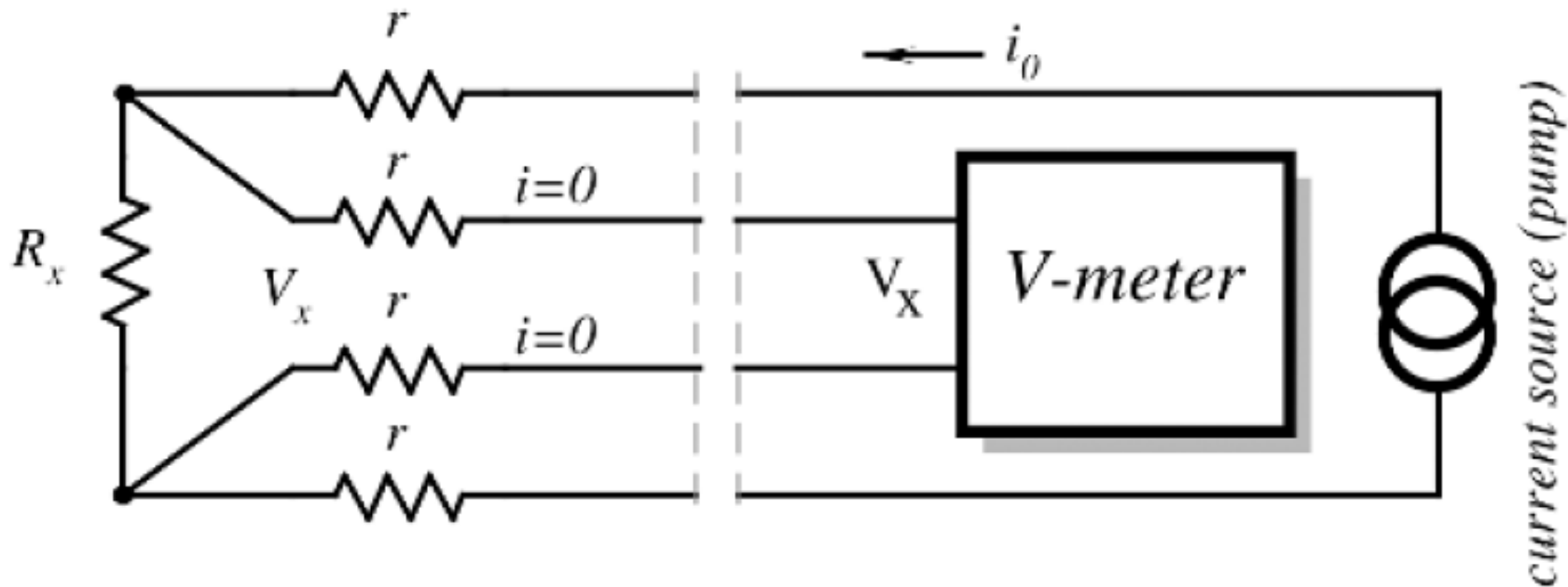


Figure 2.10 A radiation shield used to limit the exchange of radiation between a transducer and the surrounding environment



השלמות – חישה מרחוק בעזרת מתמר 4 חוטים



Remote measurements of resistances - four-wire method