



# חיישנים השראתיים

חיישנים השראתיים

השראות

חיישנים השראתיים

השראות הדדית

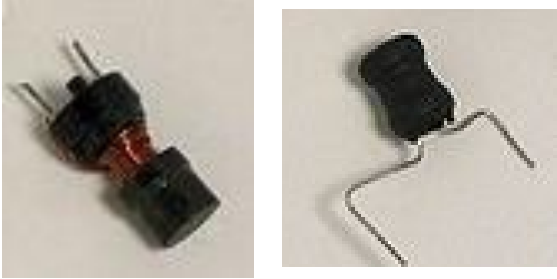
*Eddy Current Sensors* חיישני זרמי מערבולת

*LVDT (Linear Variable Differential Transformer)*



# חיישנים השראתיים

## השראות עצמית



- בסליל:  $V = L \frac{di}{dt}$

- ההשראות העצמית  $L$  תלויה בגיאומטריה של המעגל המגנטי

$$L = L(\text{Geometry}, \mu)$$

ובחדירות המגנטית של החומר:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{V}\cdot\text{s}/(\text{A}\cdot\text{m})$$

-  $\mu_0$  : חדירות מגנטית של ואקום

$\mu_r$  : חדירות מגנטית יחסית

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad \text{חדירות מגנטית:}$$

**magnetic permeability**, relative increase or decrease in the resultant magnetic field inside a material compared with the magnetizing field in which the given material is located;



# חיישנים השראתיים

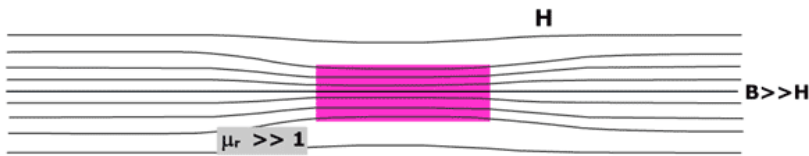
## חדירות מגנטית



*Diamagnets* ( $\mu_r < 1$ )

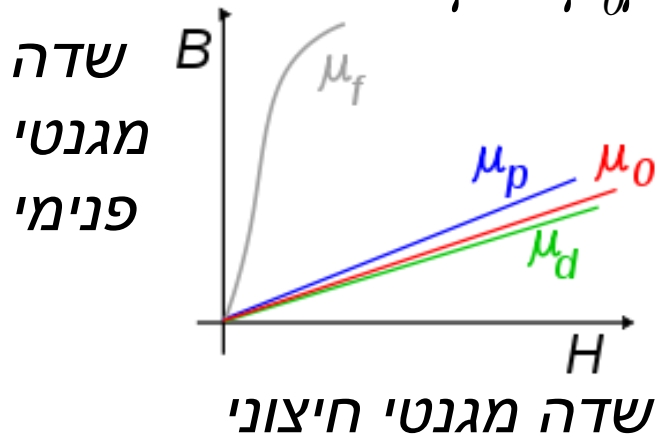


*Paramagnets* ( $\mu_r > 1$ )



*Ferromagnets* ( $\mu_r \gg 1$ )

חדירות מגנטית:  $\mu = \mu_0 \mu_r = B/H$



*Ferromagnets* ( $\mu_f$ )

*Paramagnets* ( $\mu_p$ )

*Free space* ( $\mu_0$ )

*Diamagnets* ( $\mu_d$ )



# חיישנים השראתיים

## חוקי יסוד לחיישנים השראתיים ואלקטרומגנטיים

- השטף המגנטי,  $\phi$  (Magnetic Flux), המתקבל בהשפעת שדה מגנטי בעל צפיפות,  $B$ , מחושב לפי:

$$\phi = \int_S \underline{B} \cdot \underline{dA} \quad [\phi] = \text{Weber} = \text{Volts} \cdot \text{sec}$$

- ההשראות העצמית בסליל היא הבסיס לחיישנים השראתיים.

– השדה המשתנה נוצר מהזרם בסליל לפי חוק אמפר (שקף הבא)

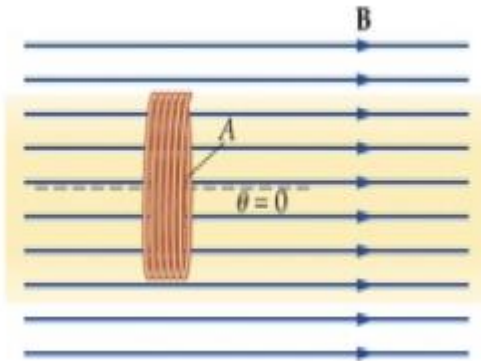
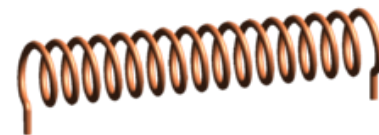
- לעומת חוק Faraday שהוא הבסיס לחיישנים א"מ (בהרצאות הבאות):

– שדה משתנה גורם למתח:

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

– בסליל עם  $n$  ליפופים:

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





# חיישנים השראתיים – חוק אמפר

• חוק Ampere – זרם גורם לשדה מגנטי:  $\oint \underline{B} \cdot \underline{dl} = \mu i_{enc}$

– קבוע פרמאביליות (חדירות מגנטית)  $\mu$

– בסליל  $Bl = n\mu i \Rightarrow B = n\mu i / l$

– אבל:  $\phi = \int_S \underline{B} \cdot \underline{dA}$

$$\phi = \frac{nA\mu i}{l} = \frac{ni}{l/\mu A} = \frac{m.m.f}{\mathcal{R}_m}$$

מתח מושרה על סליל בהשפעת שינוי זרם

$$E = -n \frac{d\phi}{dt} = -\frac{n^2}{l/\mu A} \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

$$L = n \frac{d\phi}{di} = \frac{n^2}{\mathcal{R}_m} = \frac{n^2 \mu A}{l} [H]$$

לכן השראות עצמית תוגדר:

מדידת השינוי בהשראות העצמית בסליל היא הבסיס לחיישנים השראתיים.



# השראות עצמית

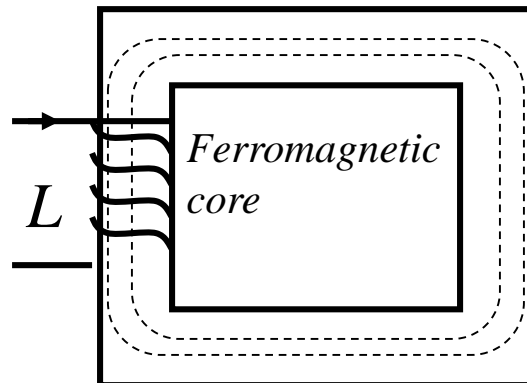
## השראות עצמית של סליל

השראות עצמית •  $L = n \frac{d\phi}{di}$   $\phi =$  שטף מגנטי

$$[L] = \text{Henry} = \frac{\text{Volts} * \text{sec}}{\text{Amp}} = \frac{\text{Weber}}{\text{Amp}}$$

- ההשראות העצמית של סליל עם:
  - מספר ליפופים  $n$
  - שטח חתך  $A$
  - אורך  $l$  (אורך המעגל המגנטי, לא החוט!!)

$$L = \frac{n^2}{\mathcal{R}_m} = \frac{n^2 \mu A}{l} [H]$$



אורך המסלול המקווקו  $l =$

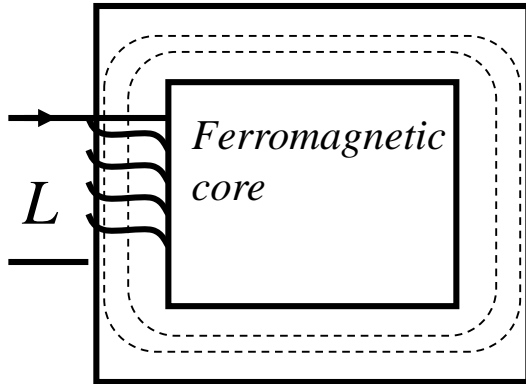


# חיישנים השראתיים

## מעגלים מגנטיים

### • מעגל מגנטי

אורך המסלול המקווקו  $l$



$$m.m.f = \phi \mathcal{R}_m$$

• סליל עם  $n$  ליפופים יוצר כוח

$$m.m.f = ni$$

• במעגל מגנטי ה- $m.m.f$  יוצר

• שטף מגנטי  $\phi$

• כתלות ברילקטנס המגנטי  $\mathcal{R}_m$

$$\mathcal{R}_m = \frac{n^2}{L} = \frac{l}{\mu A} [H^{-1}] \quad \text{— בסליל}$$

• מעגל מגנטי בהשוואה למעגל חשמלי:

$$e.m.f = IR \quad m.m.f = \phi \mathcal{R}_m$$

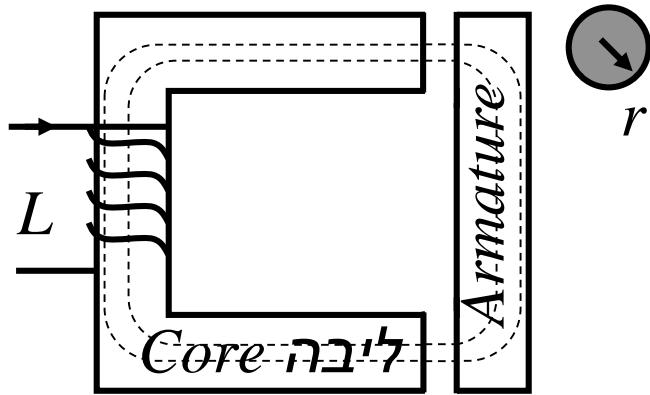
• חישוב רילקטנס מגנטי אנלוגי לחישוב התנגדות חשמלית



# חיישנים השראתיים

## שימוש במעגל מגנטי למדידת מרחק

Core & Armature  
Are ferromagnetic  
gap  $d$



• חיישן השראותי למדידת המרחק  $d$

$$\mathcal{R}_{m,total} = \mathcal{R}_{core} + \mathcal{R}_{gap} + \mathcal{R}_{armature}$$

• הרלקטנס ליניארי במרחק  $d$ :

$$\mathcal{R}_{m,total} = \mathcal{R}_0 + kd \quad ; \quad k = \frac{2}{\mu_0 \pi r^2}$$

$$\mathcal{R}_0 = \mathcal{R}_{core} + \mathcal{R}_{armature}$$

$$m.m.f = ni = \phi \mathcal{R}_m$$

$$\mathcal{R}_m = \frac{n^2}{L} = \frac{l}{\mu A} [H^{-1}]$$

• ההשראות תלויה לא-ליניארית במרחק

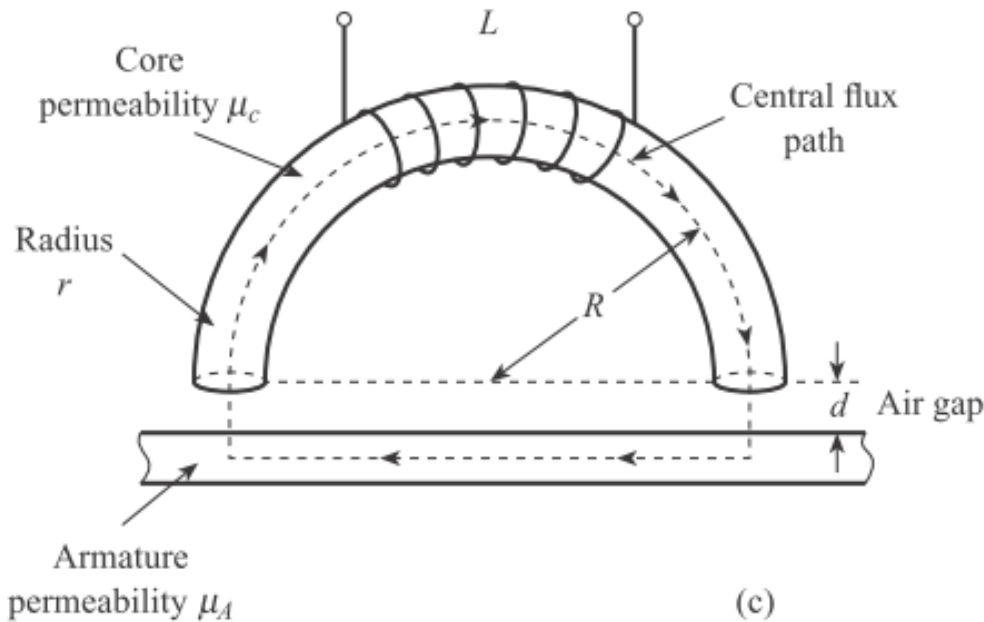
$$L = \frac{L_0}{1 + \alpha d}$$

$$\alpha = k / \mathcal{R}_0$$
$$L_0 = n^2 / \mathcal{R}_0$$



# חיישנים השראתיים למדידת מרחק

## דוגמא



בהנחה שהשטף בפלטה  
מתרכז בעומק  $\ll t$

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_0 &= \mathfrak{R}_{core} + \mathfrak{R}_{armature} \\ &= \frac{\pi R}{\mu_0 \mu_c \pi r^2} + \frac{2R}{\mu_0 \mu_A r t} \end{aligned}$$

עבור:

$n=500$ ;  $R=2cm$ ;  $r=0.5cm$ ,  $t=0.5cm$   
 $\mu_r=100$  for both core and armature  
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} V \cdot s / (A \cdot m)$

$L = 13 mH$  @  $d = 0 mm$  ←

$L = 6.35 mH$  @  $d = 1 mm$

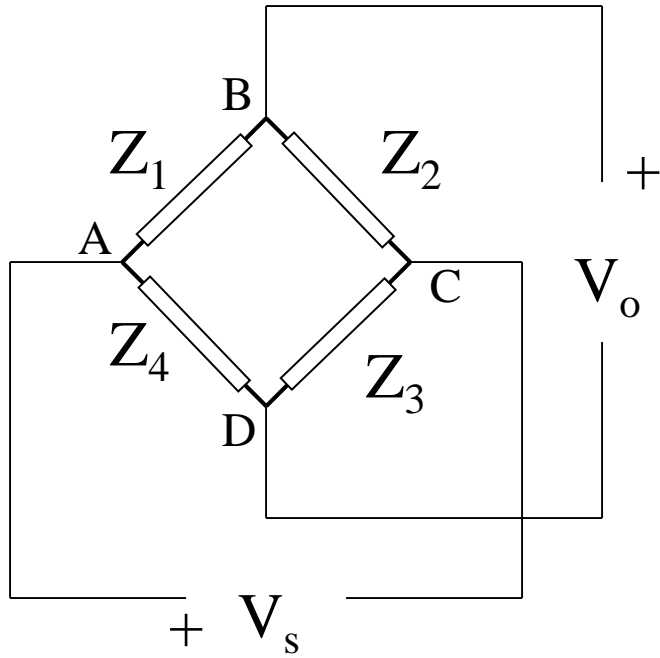
$$\mathfrak{R}_m = \frac{l}{\mu A} [H^{-1}] \quad ; \quad L = \frac{n^2}{\mathfrak{R}_m}$$

$$\mathfrak{R}_0 = 1.91 \times 10^7 H^{-1}$$

$$k = 2 \times 10^{10} H^{-1}$$



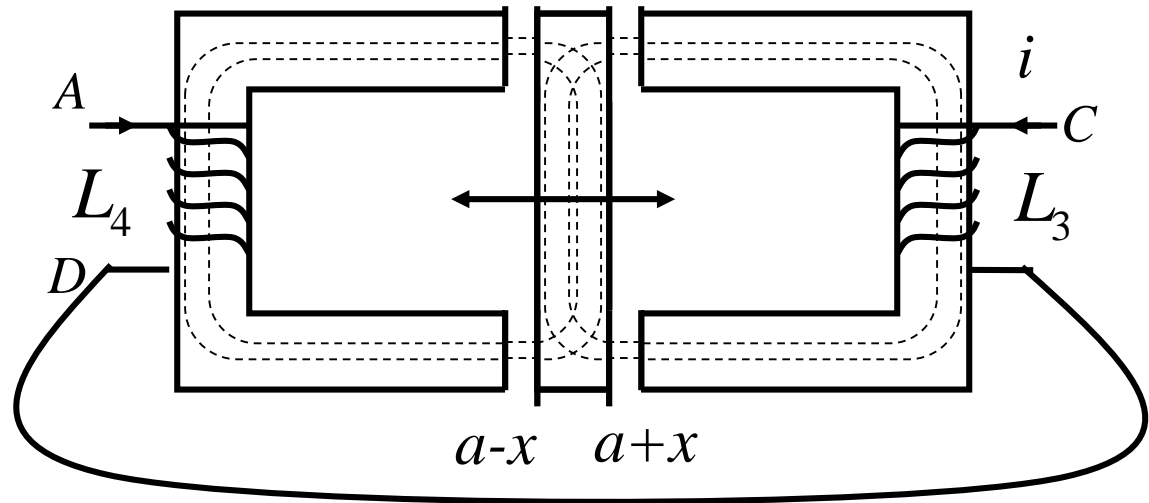
# חיישן השראתי דיפרנציאלי



לינאריות של התלות במרחק בעזרת מעגל גשר

$$L_4 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a - x)}$$

$$L_3 = \frac{L_0}{1 + \alpha(a + x)}$$



$$Z_1 = Z_2 = R;$$

$$Z_3 = j\omega L_3$$

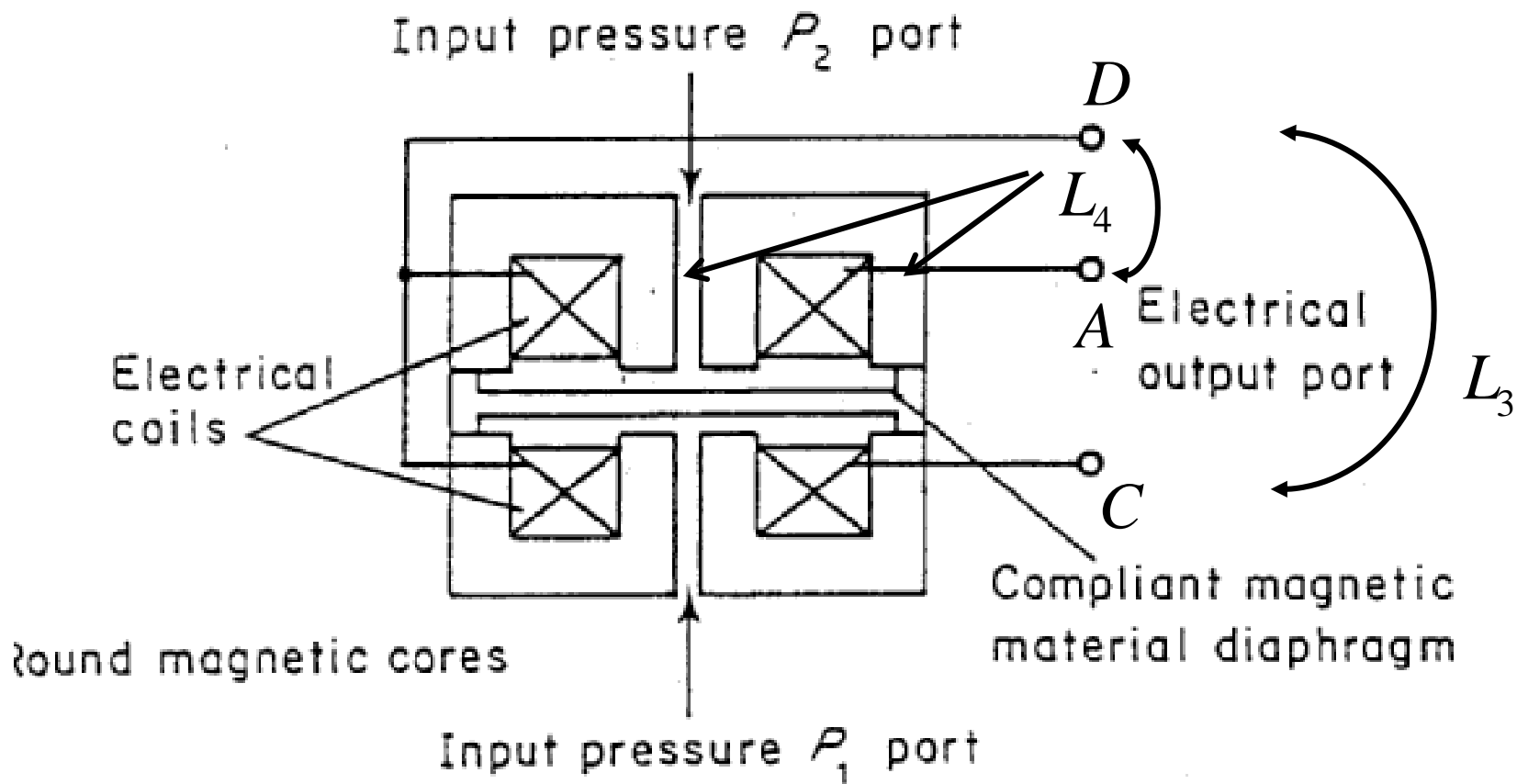
$$Z_4 = j\omega L_4$$

$$E_0 = V_s \left[ \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right] = V_s \left[ \frac{1}{2} - \frac{L_3}{L_4 + L_3} \right] = \frac{V_s \alpha x}{2(1 + \alpha a)}$$

# חיישנים השראתיים דיפרנציאליים

## מידת הפרש לחץ

### מידת הפרש לחץ





# חיישנים השראתיים

## יתרונות ושימושים

### יתרונות:

– לא רגישים ללחות וזיהום  
(בניגוד לחיישנים קיבוליים)

– רגישות גבוהה

– השפעת העמסה קטנה

### שימושים:

– חיישני מקום, תזוזה

– חיישני קירבה

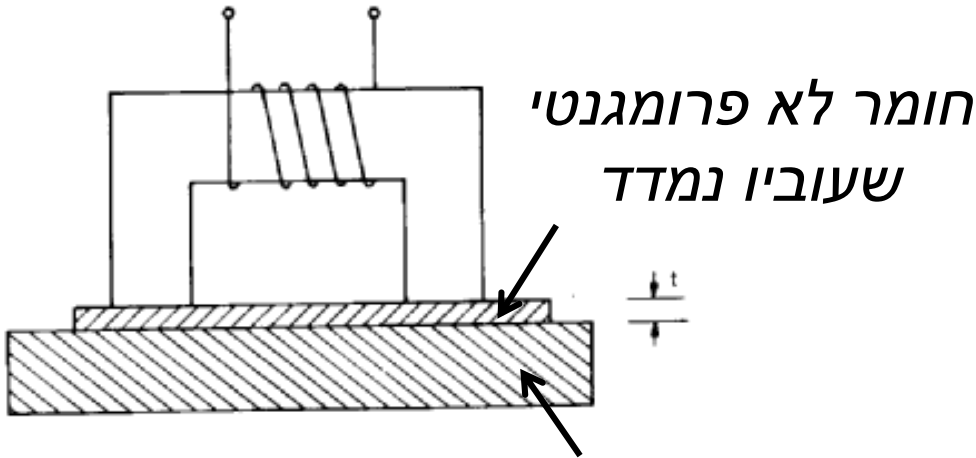
- חיישנים מתחת לכבישים (או בכניסה לחניה) לספירת מכוניות עוברות

– מדידת עובי

- חומרים פרומגנטיים

- חומרים שאינם פרומגנטיים (ראה איור)

מדידת עובי של חומר  
לא-פרומגנטי

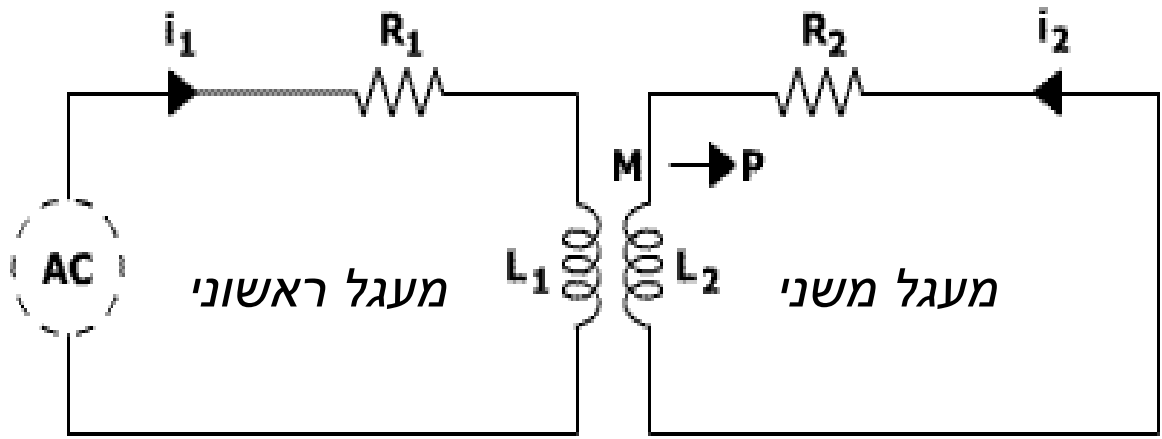


חומר פרומגנטי  
שמאפשר למדוד את העובי  
של החומר הלא פרומגנטי



# חיישני השראות הדדית

הגודל הנמדד (מרחק או תזוזה) משפיע על ההשראות ההדדית ( $M$ ) שמשפיעה על המתח במעגל הראשוני או המשני (בהמשך)



חיישני *Eddy Current*:

המעגל המשני נוצר בחלק מוליך שאת המרחק אליו מודדים.  
- מודדים את ההשפעה על המתח במעגל הראשוני.

חיישני *LVDT*:

המעגל המשני הוא סליל שמהווה חלק מהחיישן.  
- מודדים את המתח במעגל המשני (שמחובר לעומס כמוסבר בהמשך).



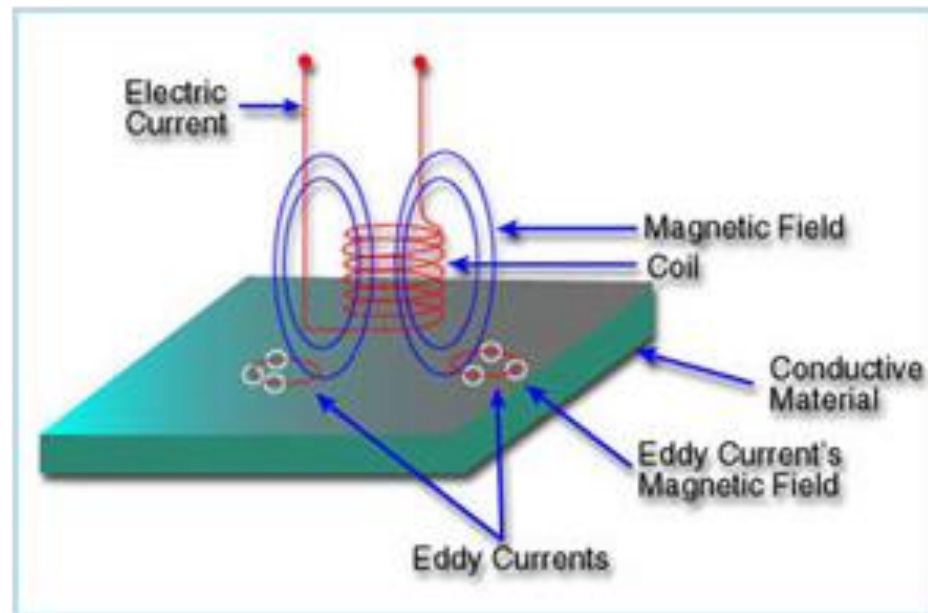
# חיישני קרבה – זרמי מערבולת

## Eddy Currents Foucault Sensors

- מדידת קרבה למוליך לא-מגנטי:

- במוליך שנמצא בשדה מגנטי משתנה נוצרים זרמי מערבולת שמתנגדים לשדה המשתנה ויוצרים השראות הדדית מנוגדת
- ככל שהמוליך יותר קרוב << זרמי המערבולת גדלים וגורמים להגדלת ההתנגדות המגנטית.

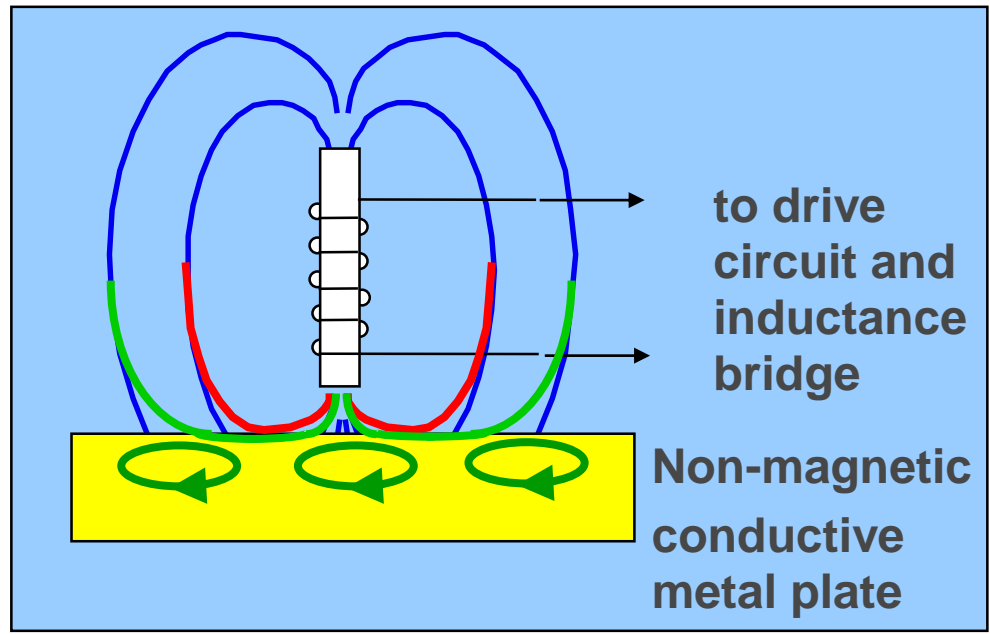
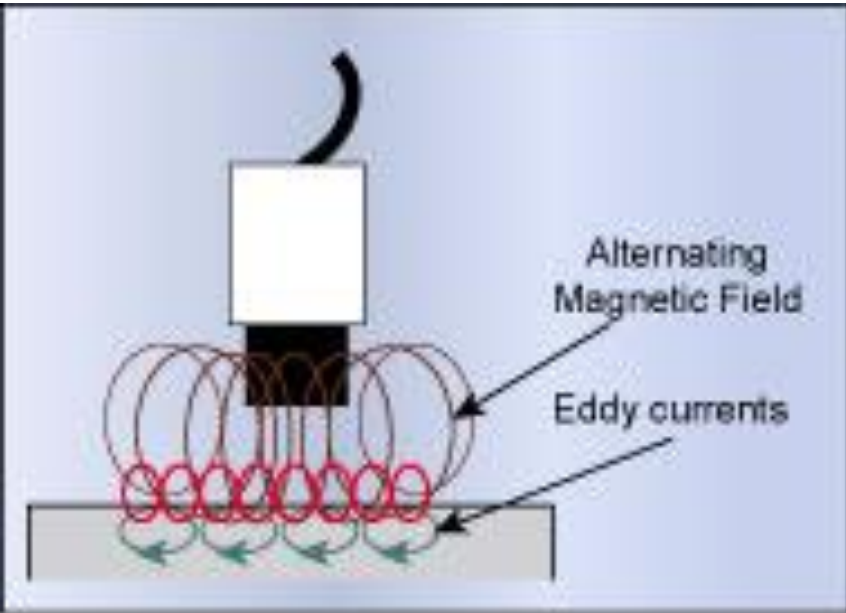
- **חיישני זרמי מערבולת משמשים לזיהוי פגמים וסדקים**





# חיישני קרבה – זרמי מערבולת

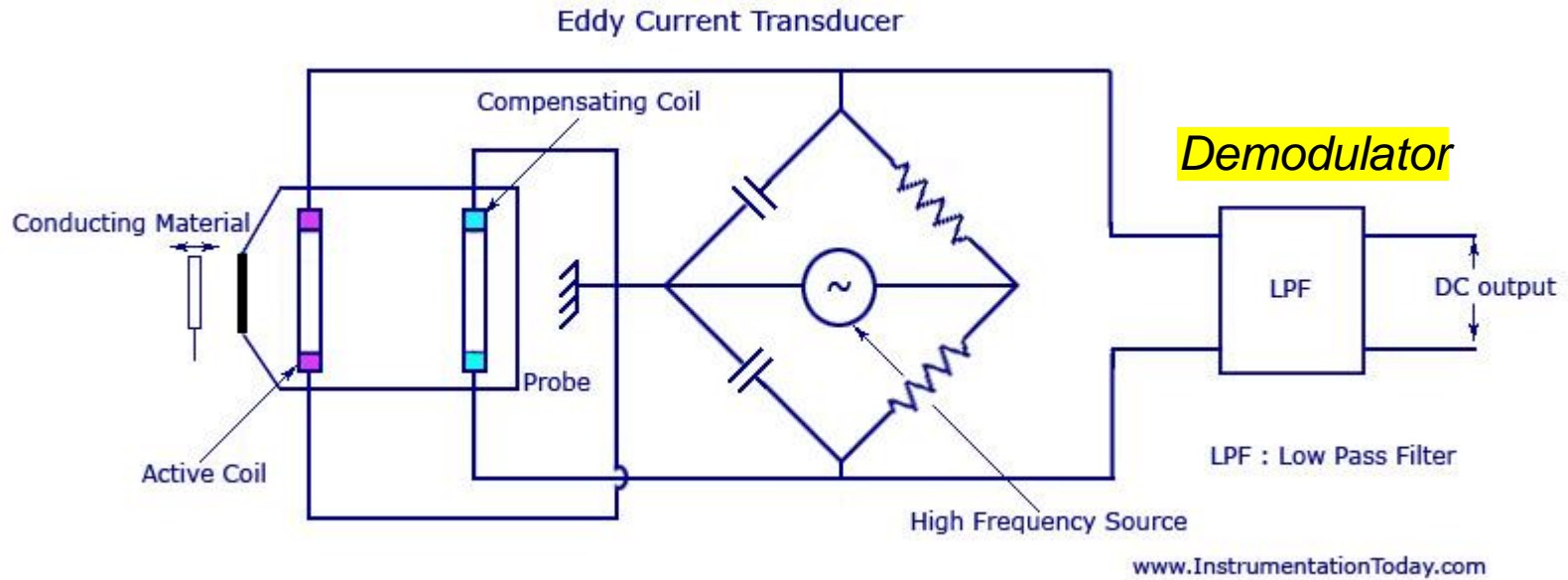
## Eddy Currents Foucault Sensors





# חיישני קרבה – זרמי מערבולת

## Eddy Currents Foucault Sensors



*See next complementary slide*





# חיישני קרבה – זרמי מערבולת

## Eddy Currents Foucault Sensors

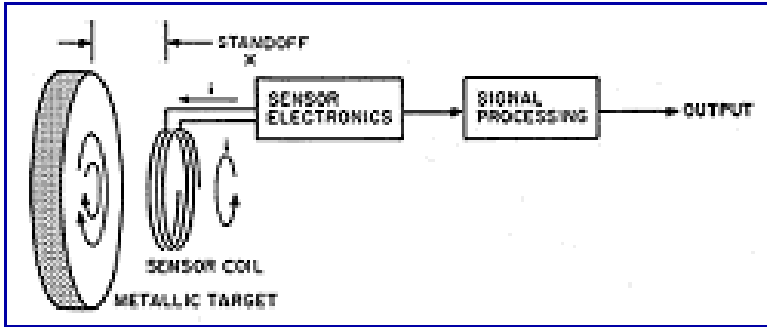
*This type of transducer is comparatively low in the measurement field and depends mostly on the quality of a high alternating source which is fed to a set of coils. One coil is called the active coil and the other provides temperature compensation (Compensating coil) by being the adjacent arm of a bridge circuit. A conducting material is kept close to the active coil so as to make it influenced by its absence or presence, or, by being any closer or away. Magnetic flux is induced in the active coil and is passed through the conductor producing eddy currents. The density of this current will be maximum at the surface and will lessen as the depth increases.*

*The active coil is kept closer to the conducting material and both of them are placed inside a probe. The compensating coil is kept further away from the conducting material. The high frequency source acts as the bridge circuit and feeds the coil across the two capacitors. The amount of eddy current produced becomes more as the distance between the conducting material and the active coil becomes less. This causes a change in the impedance of the active coil and thus unbalances the bridge circuit. The bridge circuit produces an output proportional to the amount of closeness between the conducting material and the active coil. The output of the bridge circuit is given to a low pass filter (LPF) and then its dc output is calculated. The high frequency allows a thin target to be used and also with this, the frequency response becomes good up to a target frequency  $1/10^{\text{th}}$  the supply frequency.*

*It should be noted that the diameter of the conducting material should be larger or at least same as that of a probe. If not, the output is prone to reduce linearity. If shafts are used as conducting materials, they should have a bigger diameter so that their curved surfaces effectively behaves as flat surfaces.*



# מעגל חשמלי שקול לחיישני זרמי מערבולת



- מקור זרם/מתח חילופין יוצר שדה מגנטי משתנה וזרמי מערבולת בחומר מוליך.

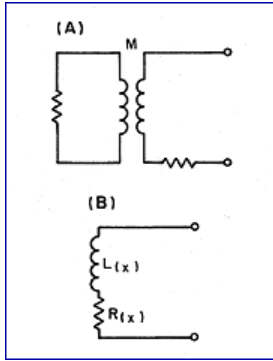
- זרמי המערבולת:

– מקטינים אם השדה המגנטי ולכן את ההשראות ההדדית (הגדלת התנגדות מגנטית)

– גורמים לאיבוד אנרגיה ששקול להתנגדות עולה

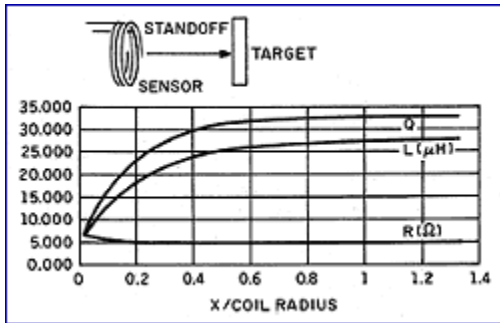
- מודל שקול: השראות ונגד משתנה

- מודל אידיאלי: השראות טהורה.



Measurements on a 38 mm dia. PC sensor at 1 MHz

Quality factor:  $Q = Q(x) = \frac{\omega L(x)}{R(x)}$



**מקדם איכות גבוה מחייב עבודה בתדר גבוה**

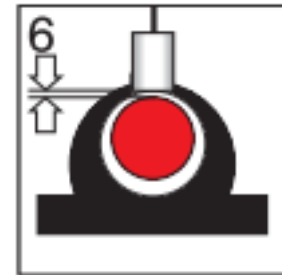
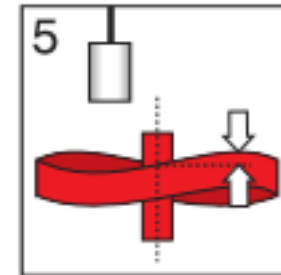
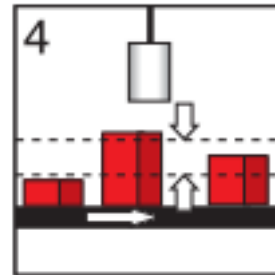
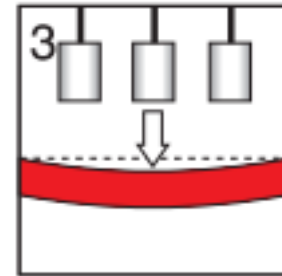
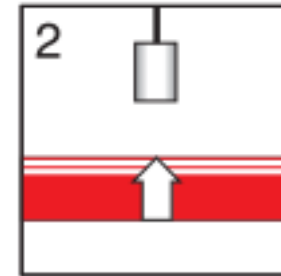
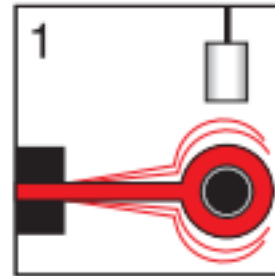


# חיישני זרמי מערבולת

## שימושים אופייניים

### TYPICAL APPLICATIONS

- 1 - vibration, amplitude, clearance, run-out
- 2 - displacement, distance, position, elongation
- 3 - deflection, deformation, waviness, tilt
- 4 - dimensions, measuring tolerances, sorting, part recognition
- 5 - stroke, deformation, axial shaft oscillation
- 6 - bearing oscillations, lubricating gap, wear, displacement



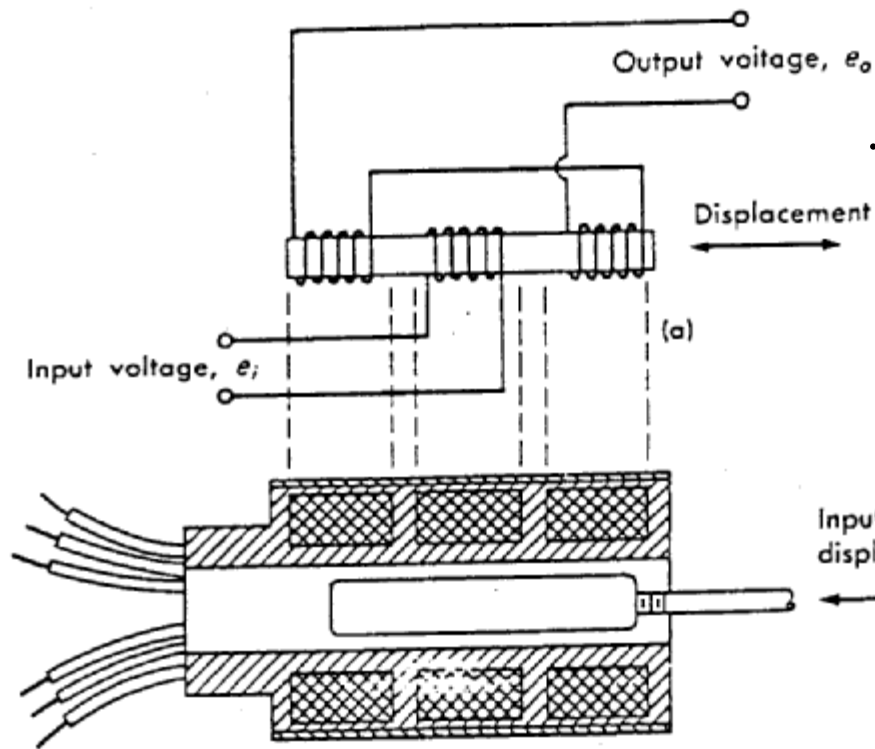
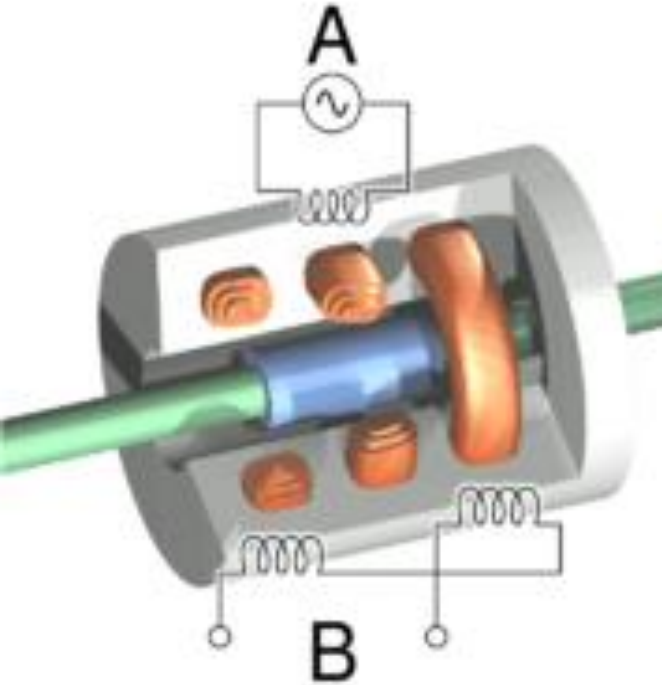


# חיישני השראות הדדית

## שנאי דיפרנציאלי - LVDT



*LVDT – Linear Variable Differential Transformer*

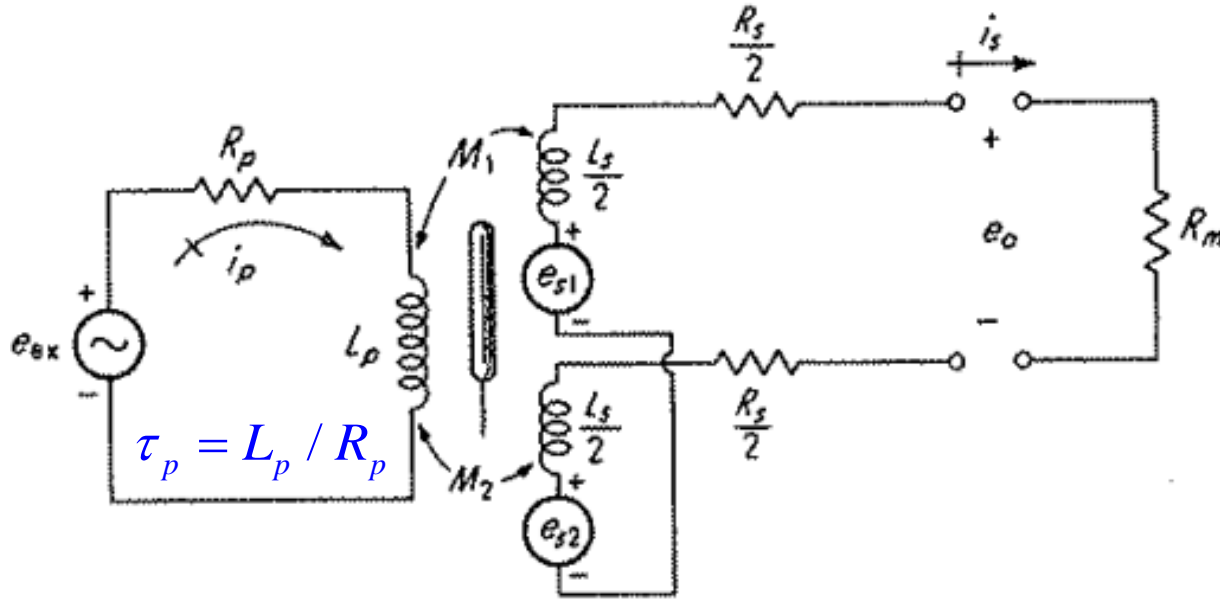


סכימת מבנה:

מבנה פנימי:



# LVDT – מעגל חשמלי (מעגל משני פתוח)



$$\frac{i_p(s)}{E_{ex}(s)} = \frac{1}{R_p} \frac{1}{1 + \tau_p s}$$

מעגל ראשוני: מעביר נמוכים מסדר ראשון

$$\frac{E_i(s)}{E_{ex}(s)} = \frac{M_i}{R_p} \frac{s}{1 + \tau_p s}$$

מתחים מושרים:

מעביר גבוהים מסדר ראשון

$$\frac{E_o(s)}{E_{ex}(s)} = \frac{M_1 - M_2}{R_p} \frac{s}{1 + \tau_p s}$$

מתח היציאה:

הפרש המתחים המושרים



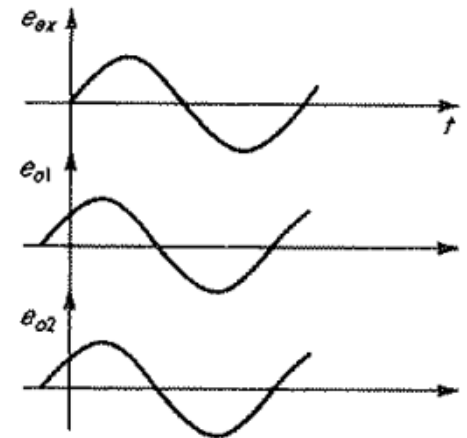
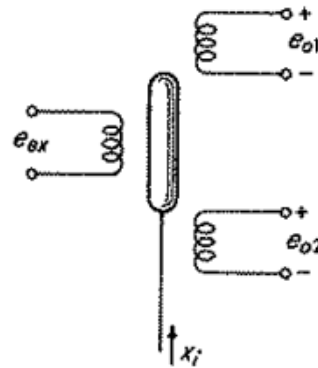
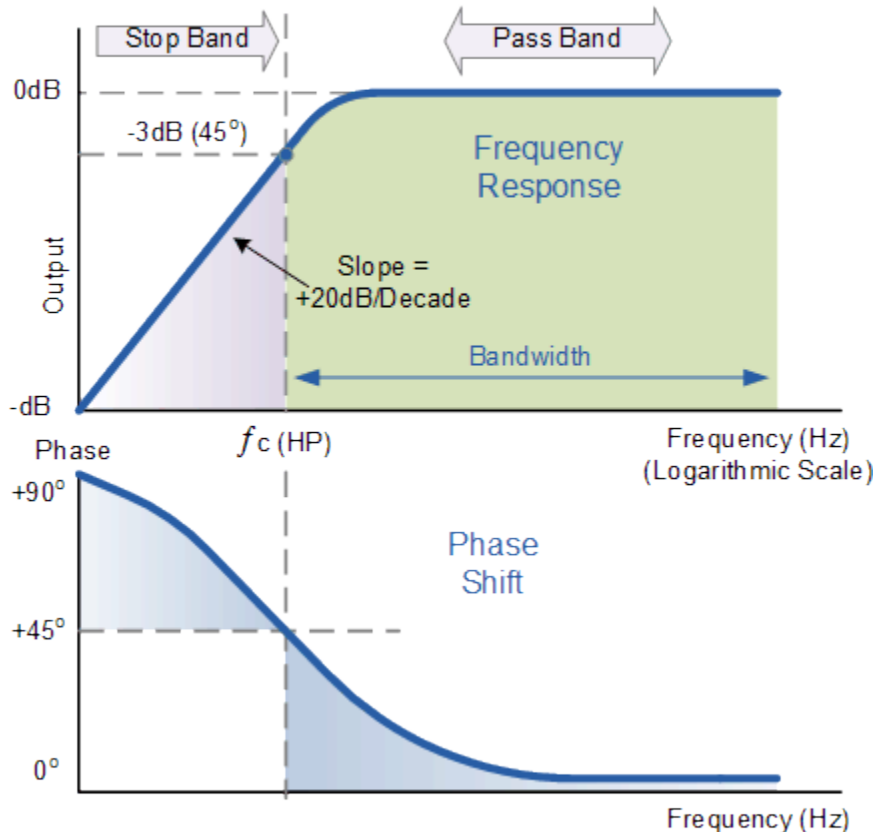
# LVDT – מתחים מושרים (מעגל משני פתוח)

$$\frac{E_i(s)}{E_{ex}(s)} = \frac{M_i}{R_p} \frac{s}{1 + \tau_p s}$$

מתחים מושרים:

מעביר גבוהים מסדר ראשון

$$\text{Gain (dB)} = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}}$$



Core in null position

מתקבל הפרש פאזה חיובי אשר קטן ככל שתדירות העירור גדלה



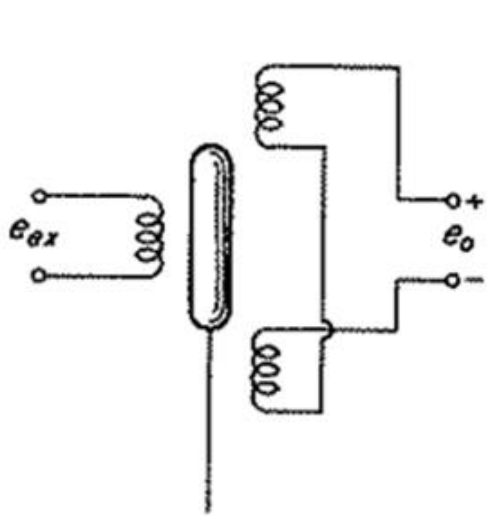
# LVDT - מתח היציאה

## מעגל משני פתוח

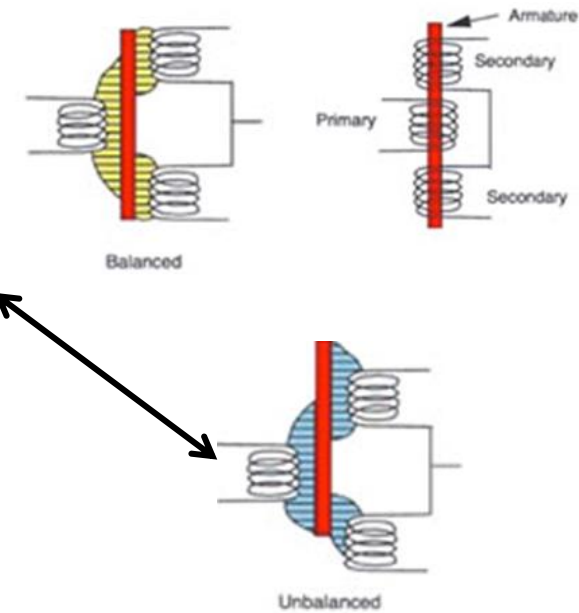
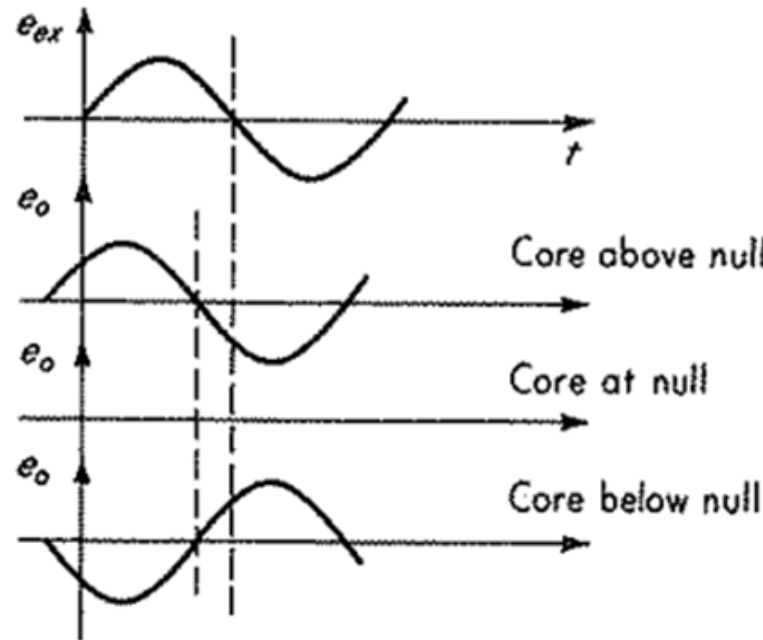
$$e_o = e_s = e_{s1} - e_{s2} \ll \text{מעגל משני פתוח}$$

$$\frac{E_o(s)}{E_{ex}(s)} = \frac{(M_1 - M_2)}{R_p} \frac{s}{1 + \tau_p s}$$

מעביר גבוהים מסדר ראשון:



Series-opposing secondaries





# מודולצית אמפליטודה למיקום - AM

כאשר המיקום קבוע:

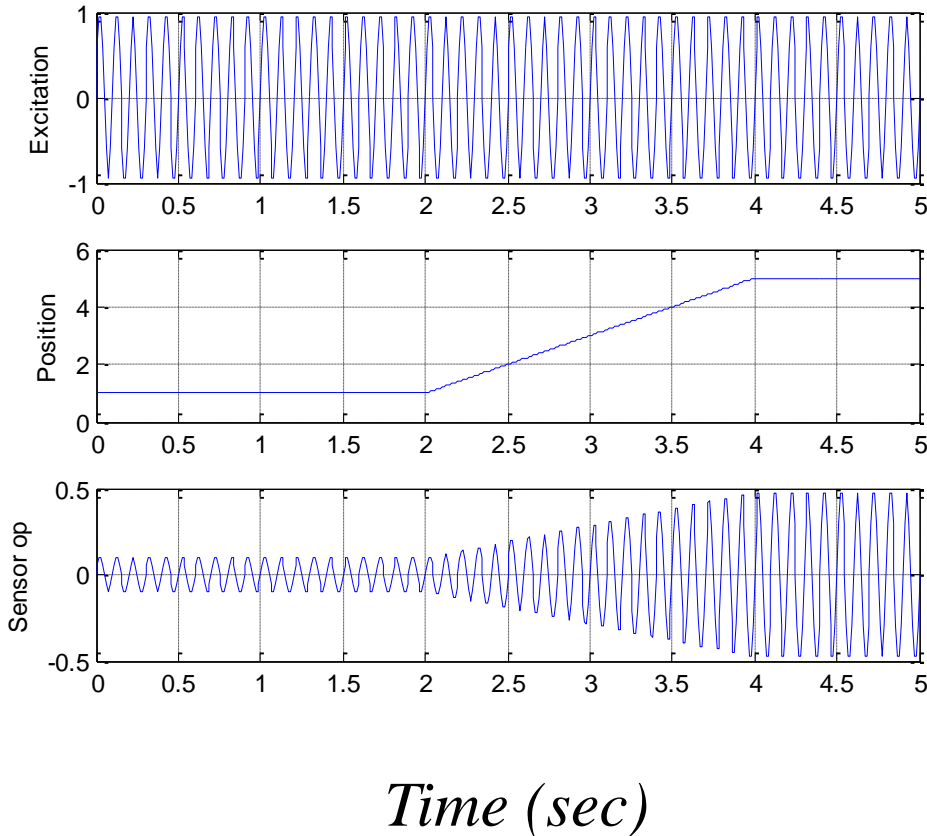
היציאה = מתח סינוסואידאלי בתדר הכניסה ובאמפליטודה קבועה

כאשר המיקום משתנה באופן

איטי יחסית לתדר העירור:

<< השינויים במיקום משנים את האמפליטודה של היציאה

$$\omega_{out} = \omega_c \pm \omega_s \quad ; \quad \omega_c \gg \omega_s$$



המסקנה מניתוח פונקצית התמסורת עבור מעגל משני פתוח היא: לבחור תדר עבודה גדול ככל שניתן.





# תגובה חשמלית של LVDT

## מעגל משני סגור (עם עומס)

• מעגל ראשוני:  $e_{ex} - (M_1 - M_2) di_s / dt = i_p R_p + L_p di_p / dt$

• מעגל משני:  $(M_1 - M_2) di_p / dt = i_s (R_s + R_m) + L_s di_s / dt$

– נגדיר:  $\tau_p = L_p / R_p \quad \tau_s = L_s / (R_s + R_m)$

$$\tau_M = (M_1 - M_2) / \sqrt{R_p (R_s + R_m)}$$

$$\Rightarrow \frac{E_o(s)}{E_{ex}(s)} = \frac{(M_1 - M_2) R_m}{(R_s + R_m) R_p} \frac{s}{(1 + \tau_p s)(1 + \tau_s s) + \tau_M^2 s^2}$$
$$\approx \frac{(M_1 - M_2) R_m}{(R_s + R_m) R_p} \frac{s}{(1 + \tau_p s)(1 + \tau_s s)} \quad \left( \text{for } \tau_M \ll \sqrt{\tau_p \tau_s} \right)$$

<< התנהגות כמעביר תדרי ביניים BPF מסדר שני.



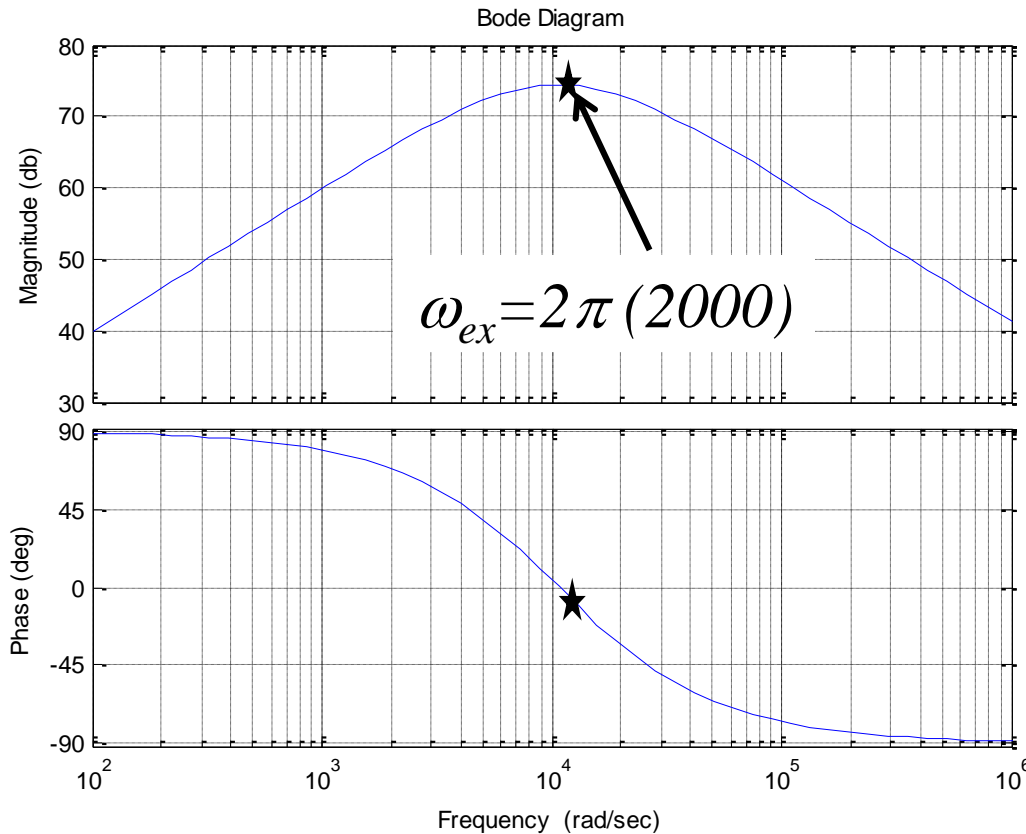
# פונקצית תגובת התדירות של LVDT

מעגל משני סגור (עם עומס)

$$\frac{E_o(s)}{E_{ex}(s)} \approx \frac{(M_1 - M_2)R_m}{(R_s + R_m)R_p} \frac{s}{(1 + \tau_p s)(1 + \tau_s s)}$$

- פת"ה של מתח היציאה (בקירוב):

$$\text{for } \tau_M \ll \sqrt{\tau_p \tau_s}$$



- בשרטוט:

פת"ה של מערכת BPF מסדר שני

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{s}{(1 + \tau_p s)(1 + \tau_s s)}$$



# LVDT – מעגל חשמלי

## כניסה יציאה ופענוח

- פונקציית התמסורת:

$$\frac{E_o(s)}{E_{ex}(s)} = \frac{(M_1 - M_2)R_m}{(R_s + R_m)R_p} \frac{s}{(1 + \tau_p s)(1 + \tau_s s) + \tau_M^2 s^2}$$

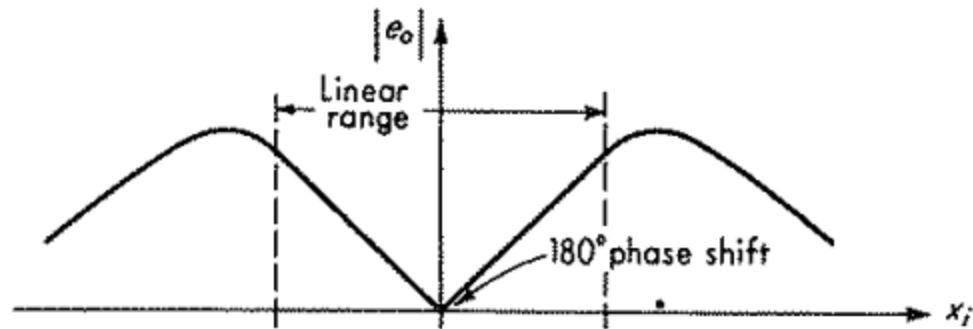
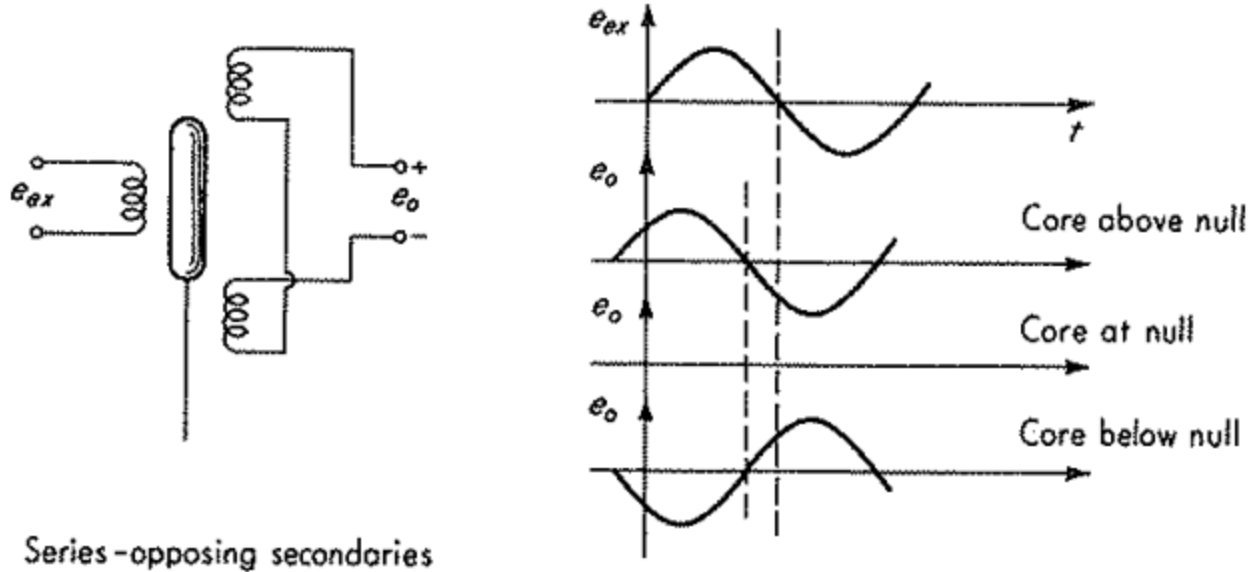
- מתח הכניסה: אות סינוסואידלי בתדר מספיק גבוה (גל נושא)
  - אפשר לבחור תדירות שעבורה הפרש הפאזה הוא אפס (בתדירויות נמוכות ההפרש +90 ובתדירויות גבוהות -90)
- קידוד האות הנמדד: איפנון (מודולציה) אמפליטודה של הגל הנושא
- פענוח האות הנמדד: דרוש מעגל די-מודולציה
  - מגבר גל-נושא (בהמשך)...

המסקנה מניתוח פונקציית התמסורת עבור מעגל משני סגור היא:

קיים תדר עבודה בתחום הביניים שמבטיח אמפליטודה סבירה והפרש פזה אפסי.



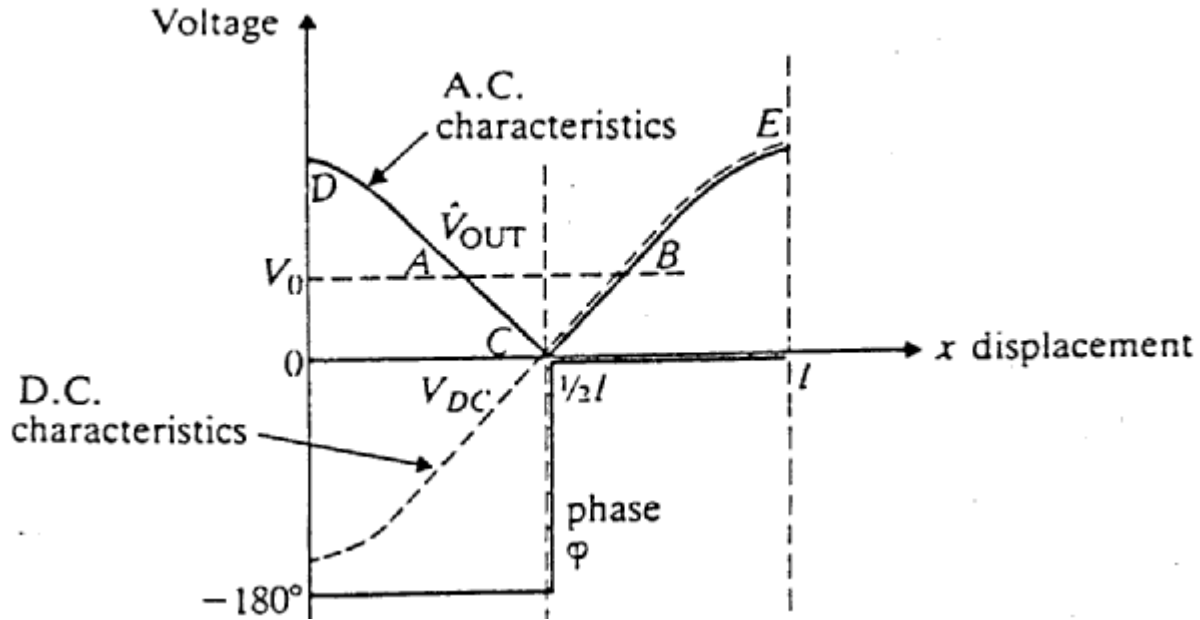
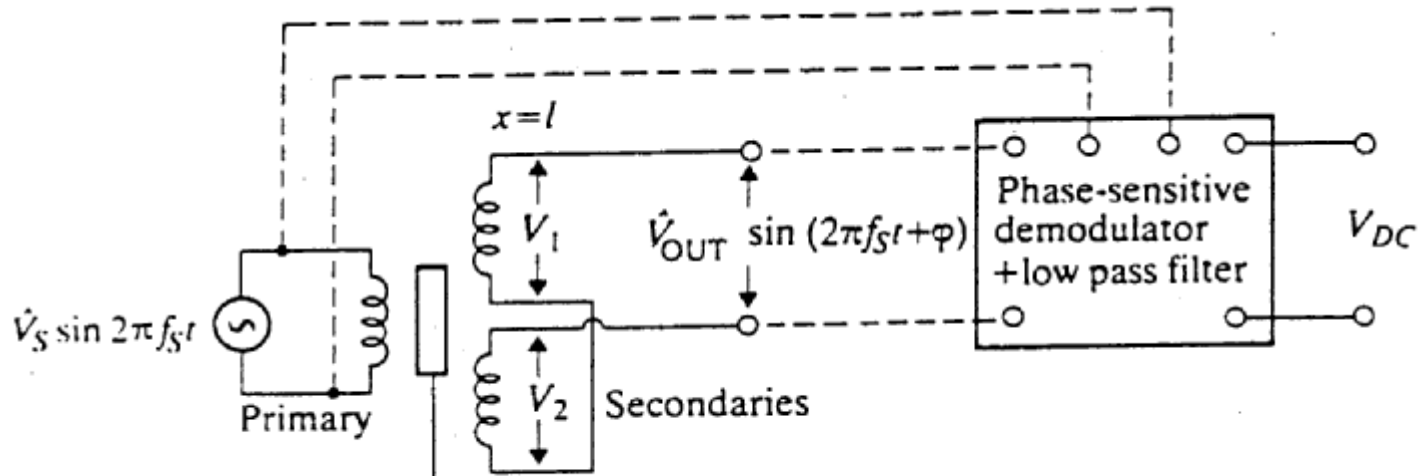
# LVDT – כוון התזוזה מקודד בסימן (פאזה)





# LVDT – חילוף האות הנמדד

מגבר גל נושא (פרטים בהמשך)





# LVDT - סיכום

- **מאוד נפוץ**
  - תחום מ:  $100\mu m$  ל:  $25cm$
  - DCLVDT – כולל מעגל חשמלי לערור ודה-מודולציה
- **העמסה מכנית (חיסרון):**
  - מתפתח כוח על הליבה שפרופורציונלי לריבוע הזרם הראשוני
  - הכוח אפסי במרכז וגדל לינארית בתזוזה
  - גדולה יותר מבחיישנים קיבוליים
- **יתרונות**
  - רזולוציה טובה (יותר מ- $0.1\%$ )
  - מתח יציאה גדול
  - אין חיכוך – אורך חיים גבוה
  - בידוד חשמלי בין מעגל ראשוני ומשני
  - דיוק גבוהה (*High repeatability*)
  - לינאריות ( $0.05\%$ ),
  - רגישות גבוהה
  - תגובה דינמית רחבה



# LVDT – מפרט דוגמא

**TABLE 4.3 General Characteristics for the Model 210A-0050, LVDT when Its Primary Winding is Excited by a 5 V, 2000 Hz Sinusoidal Voltage (Courtesy of Robinson-Halpern Company)**

Parameter	Minimum	Nominal	Maximum	Units
Linear range	-1.3		+1.3	mm
Linearity			±0.25	%FS
Optimal frequency		2000		Hz
Full-scale output (each winding)	225	250	275	mV
Primary winding impedance	440	490	540	Ω
	+62	+67	+72	°
Secondary winding impedance	159	177	195	Ω
	+57	+62	+67	°
Primary resistance	113.8	133.9	154.0	Ω
Secondary resistance	63.1	74.2	85.3	Ω
Phase shift (primary to secondary)	+4	+9	+14	°
Output at center position			0.5	%FS
Temperature coefficient		$\alpha = -0.5 \times 10^{-4}$		(°C) <sup>-1</sup>
		$\beta = -2 \times 10^{-7}$		(°C) <sup>-2</sup>

תחום התדירות לתזוזה: עדיף לא יותר מחמישית מתדירות המתח  $400\text{Hz}$  ←



# חיישן השראות הדידית

## מדידת אי אחידות בעובי הדופן

