



# ממשקים לחיישנים

## מעגלי גשר - הרחבה

- כללי
- שיקולי סימטריה
- שימושים למדי עיבור
- לינאריות ומגבלות הספק

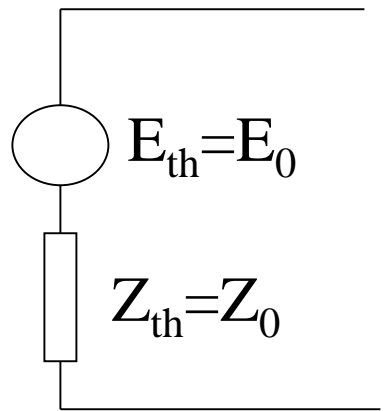
## • מגברים

- מגבר הפרש
- CMRR
- מגבר מיכשור



# מעגלי גשר (Wheatstone bridge)

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

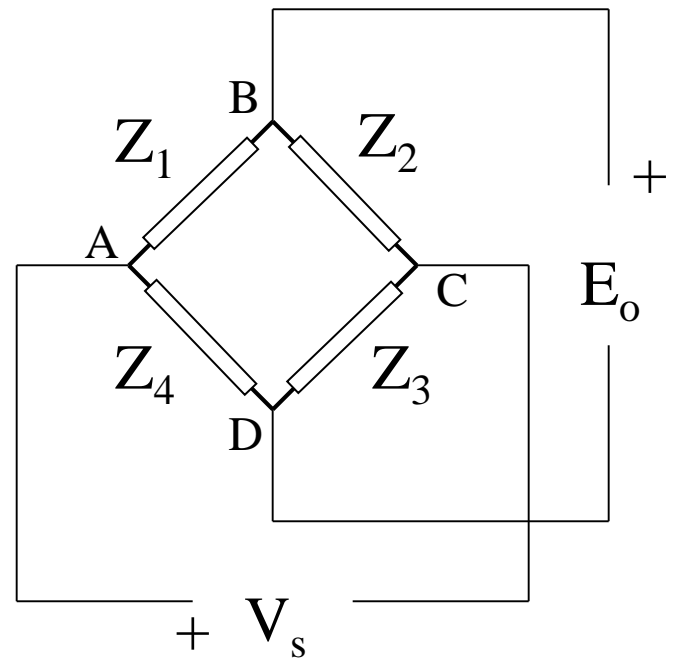


שקול טבנין:

מתח אספקה (ישר או חילופין)  $V_s$

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

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





# מעגלי גשר התנגדותיים – נגד משתנה אחד

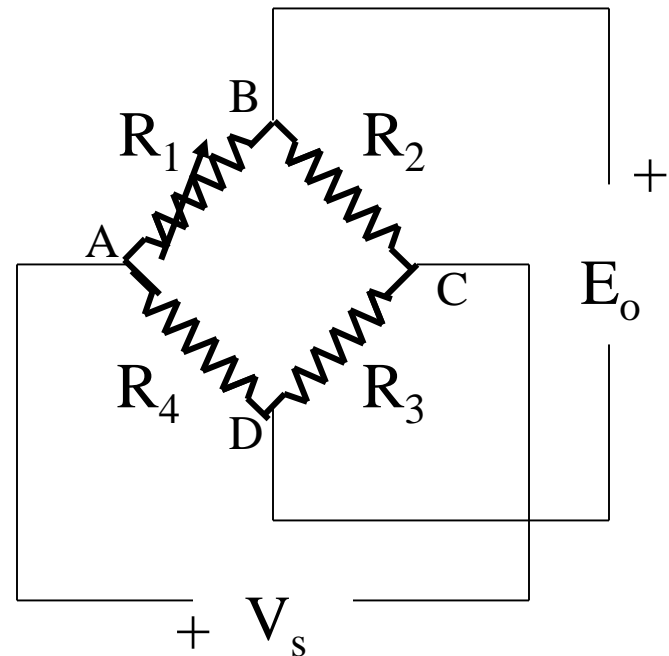
$$R_1 = R_0(1 + \delta) \equiv R_0 x$$

נגד משתנה אחד:

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

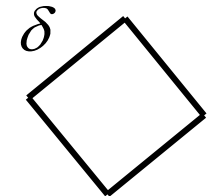
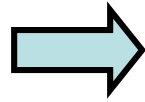
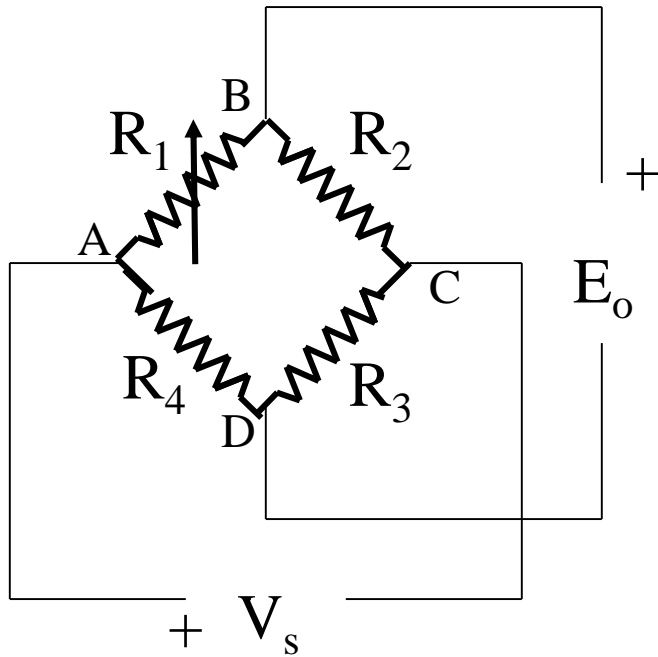
תנאי איפוס:

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



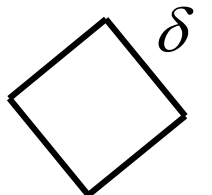


# מעגלי גשר – שיקולי סימטריה

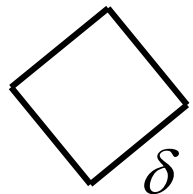


מדי עיבור:  $r=1$   $x \approx 1; \delta \ll 1$

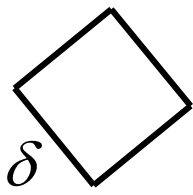
$$E_0 = E_o(\delta) \quad E_0 = V_s \frac{\delta}{4}$$



$$E_0 = -E_o(\delta) \quad E_0 = -V_s \frac{\delta}{4}$$



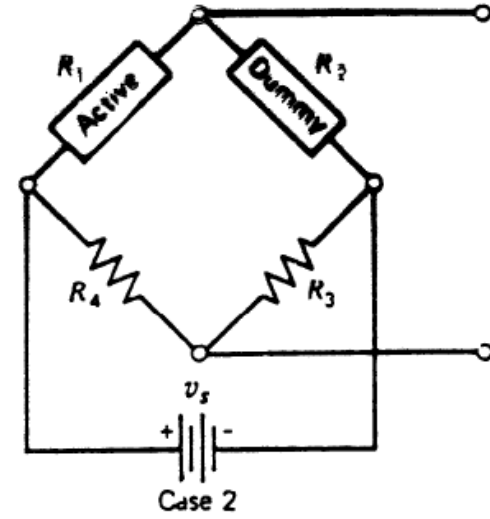
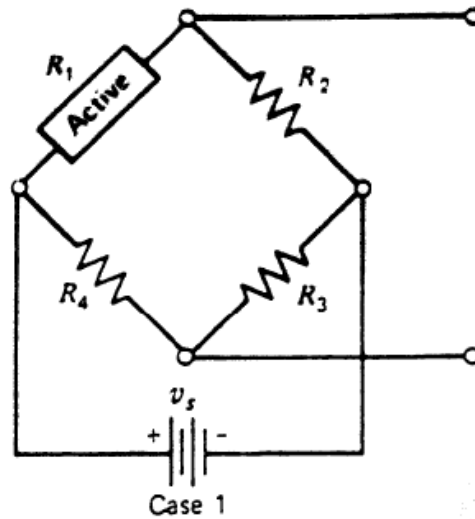
$$E_0 = E_o(\delta) \quad E_0 = V_s \frac{\delta}{4}$$



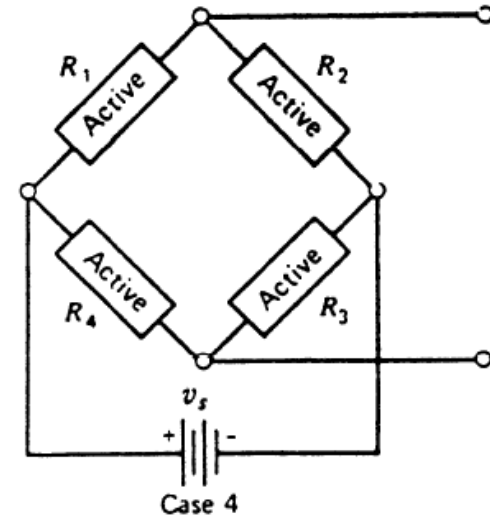
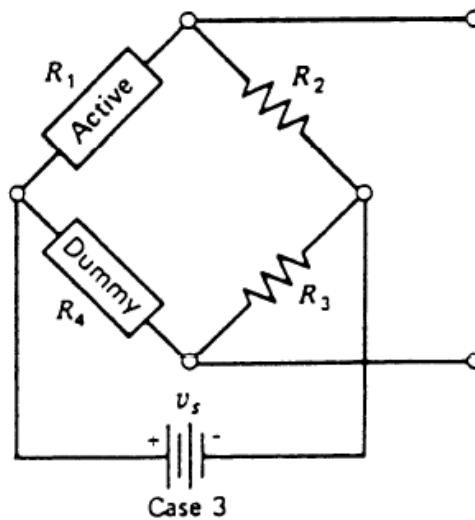
$$E_0 = -E_o(\delta) \quad E_0 = -V_s \frac{\delta}{4}$$



# מעגלי גשר – סידורי גשר שונים



Is Case 2  
= Case 3 ?



8 May 2023

Figure 7.3 Four common strain-gage arrangements in a Wheatstone bridge.



# חצאי גשר – חיסור וחיבור אנלוגי

חיסור אנלוגי: כששני חיישנים (התנגדותיים) מחוברים לצלעות שכנות של הגשר, מתח היציאה שווה להפרש המתחים שהיו מתקבלים אם כל חיישן היה מחובר בנפרד לאותה רגל של הגשר.

$$V_0 = V_o(\delta_2) - V_o(\delta_3) \quad \begin{array}{c} \delta_2 \\ \diagdown \\ \diagup \\ \delta_3 \end{array} \quad \text{דוגמא:}$$

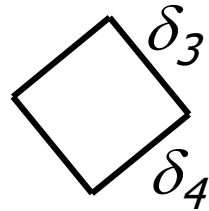
חיבור אנלוגי: כששני חיישנים (התנגדותיים) מחוברים לצלעות מקבילות של הגשר, מתח היציאה שווה לסכום המתחים שהיו מתקבלים אם כל חיישן היה מחובר בנפרד לאותה רגל של הגשר.

$$V_0 = V_o(\delta_2) + V_o(\delta_4) \quad \begin{array}{c} \delta_2 \\ \diagdown \\ \diagup \\ \delta_4 \end{array} \quad \text{דוגמא:}$$



# חצאי גשר – שימושים לחיסור אנלוגי

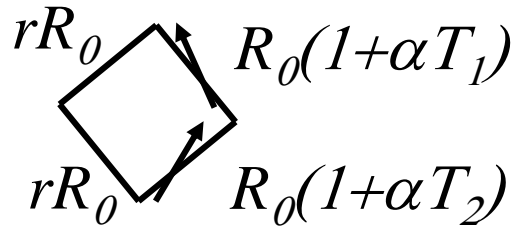
$$V_0 = V_o(\delta_3) - V_o(\delta_4)$$



חיסור אנלוגי מתקבל ע"י חיבור של שני חיישנים לצלעות שכנות של הגשר

שימושים:

$$V_0 = \frac{V_s}{r} \alpha(T_1 - T_2)$$



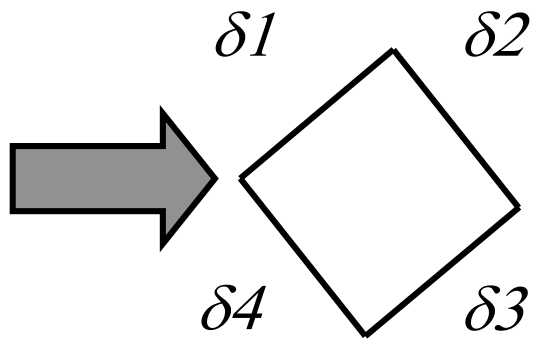
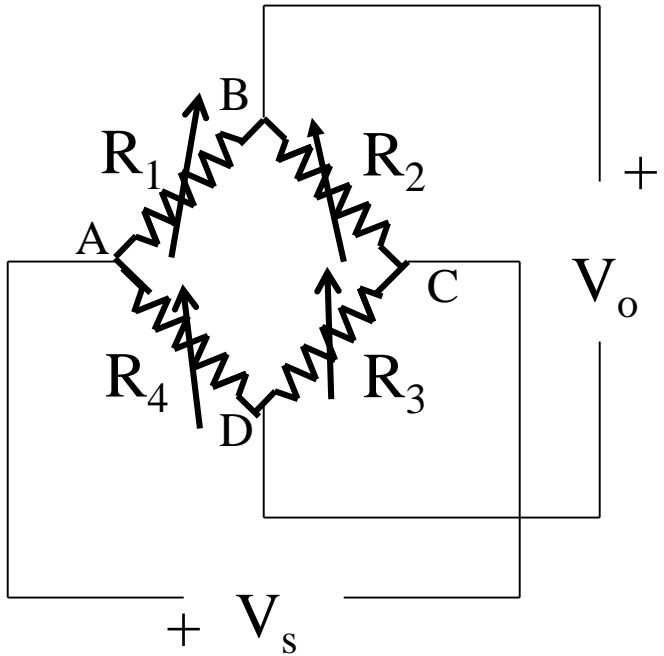
- חישוב הפרש טמפרטורה:

מתי נחוץ ??

- קיזוז השפעת טמפרטורה במדידת עיבורים (בהמשך) ...



# מעגלי גשר מלא



משוואת גשר מלא:

$$V_o = V_o(\delta_1) - V_o(\delta_2) + V_o(\delta_3) - V_o(\delta_4)$$





# קיצוז השפעת טמפרטורה – מדי עיבור

## קיצוז השפעה מפריעה:

– קיצוז ע"י כניסה מבטלת (מימוש ע"י מעגלי גשר)

– בחירה במדיד מתאים לחומר (עם מקדם התפשטות תואם)

– קיצוז עצמי – Temperature compensated gauges

המדיד מותאם לחומר כך שהשפעת שינוי ההתנגדות מקזזת את ההשפעה בהפרשי מקדמי ההתפשטות ראה שקפים בהמשך . . .

## השפעה מפריעה (מתווספת)

– שינוי התנגדות המדיד:  
 $\alpha = \text{Temperature coefficient of resistance}$

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

– הפרש במקדמי התפשטות תרמית:

$$R = R_0(1 + G\varepsilon + G\varepsilon_T)$$

$$\varepsilon_T = (\beta_g - \beta_s)T = \beta T$$

– אפקט כללי:

$$R = R_0(1 + G\varepsilon + G\varepsilon_T)(1 + \alpha T) \sim R_0(1 + G\varepsilon + G\varepsilon_T + \alpha T)$$

## השפעה משנה:

– שינוי קבוע המדיד, G  
– בד"כ זניח פרט לטמפ' קיצונית



# מדי עיבור

## קיזוז השפעת טמפרטורה ע"י כניסה מבטלת

קיזוז ע"י כניסה מבטלת:

הפרש בין שני נגדים (ממומש ע"י מעגל גשר - בהמשך)

— מדיד: נגד שחשוף

למעוות ולטמפרטורה

$$\Delta R_\varepsilon = G\varepsilon + G\varepsilon_T + \alpha T$$

— נגד "חיקוי" (Dummy):

חשוף רק לטמפרטורה

$$\Delta R_d = G\varepsilon_T + \alpha T$$

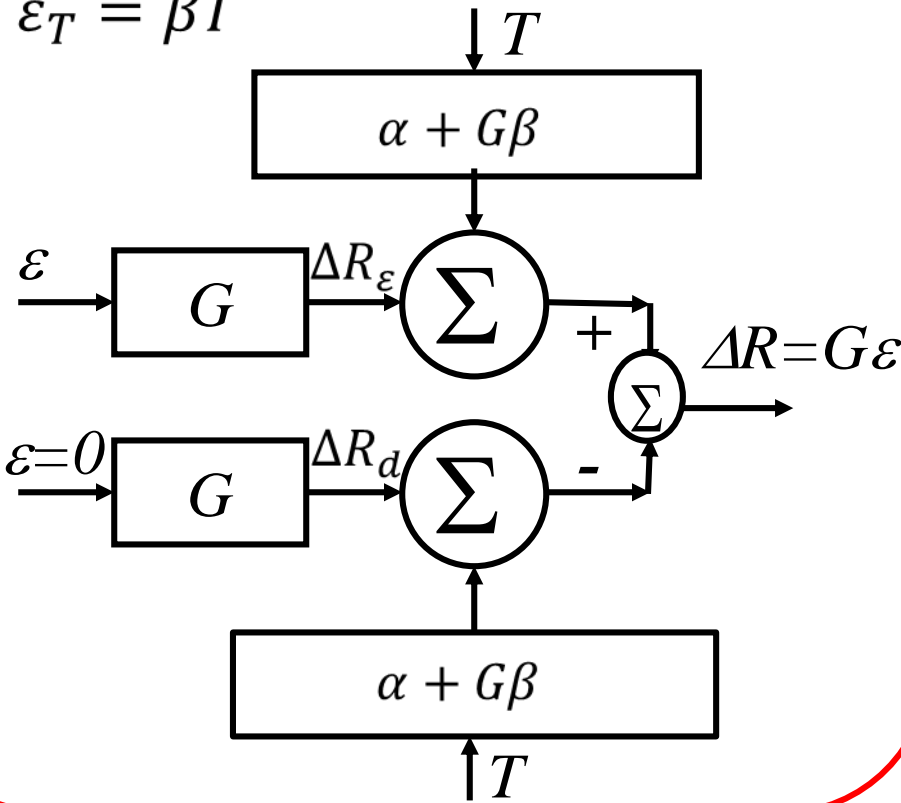
— הפרש לא תלוי

בטמפרטורה!

$$\Delta R = \Delta R_\varepsilon - \Delta R_d = G\varepsilon$$

$$\varepsilon_T = \beta T$$

נגד מדיד  
נגד חיקוי



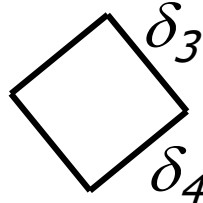
האם אפשרי? מה הפתרון?

β זניח או חיבור נגד החיקוי לאיזור לא מועמס בדגם.

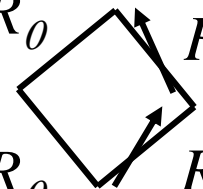


# חיסור אנלוגי להשפעת טמפרטורה

## חצי גשר הכולל נגד חיקוי

$$V_0 = V_o(\delta_3) - V_o(\delta_4)$$


חיסור אנלוגי מתקבל ע"י חיבור של שני חיישנים לצלעות שכנות של הגשר



$$R_0(1 + \delta + \delta_T)(1 + \alpha T)$$

$$R_0(1 + \delta_T)(1 + \alpha T)$$

קיצוץ השפעת טמפרטורה ע"י תוספת מד עיבור *Dummy*:

$$V_0 = \frac{V_s}{4} [\delta + \delta_T + \alpha T + \delta\alpha T + \delta_T\alpha T]$$

ללא קיצוץ:

$$V_0 = \frac{V_s}{4} [\delta + \delta_T + \alpha T + \delta\alpha T + \delta_T\alpha T - (\delta_T + \alpha T + \delta_T\alpha T)]$$

עם קיצוץ:

$$\Rightarrow V_0 = \frac{V_s}{4} [\delta + \delta\alpha T] \approx \frac{V_s}{4} \delta$$

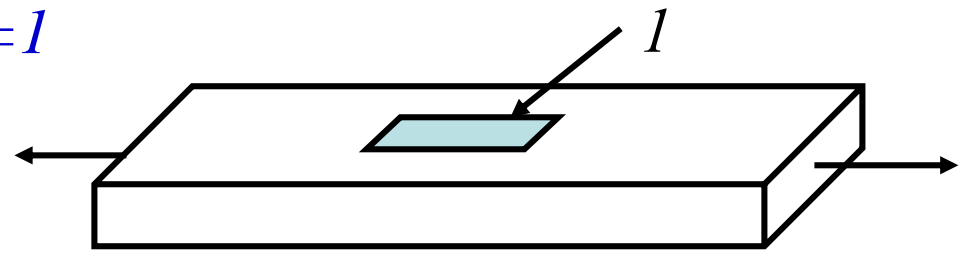


# מדידת כוח צירי

## קונפיגורציות גשר שונות

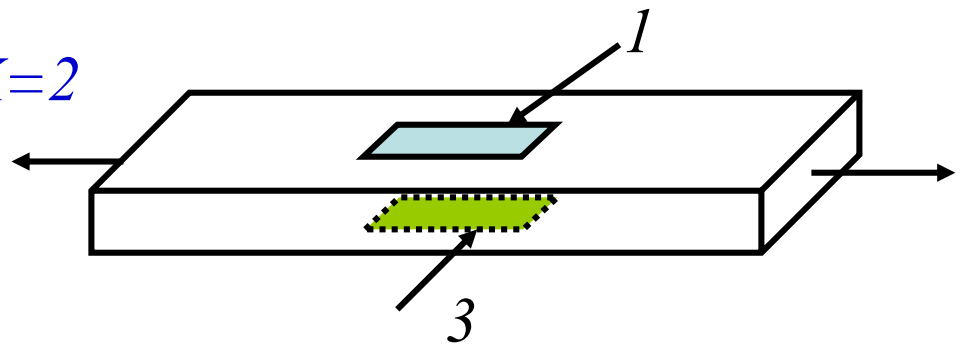
$$\epsilon_F = \frac{F}{EA}$$

$K=1$



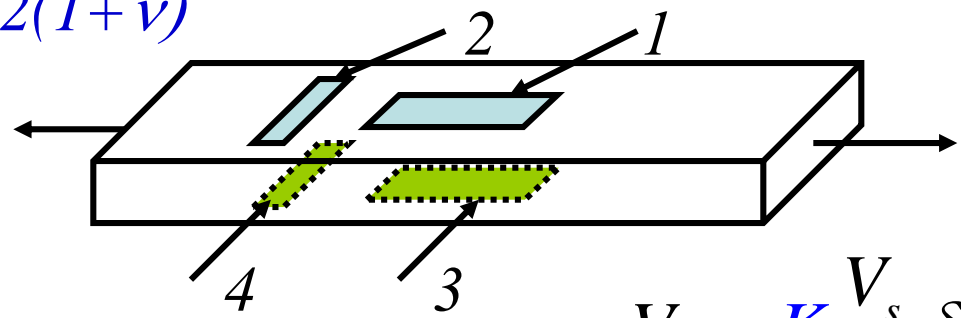
1. מקרה בסיסי: (אין קיזוז כפיפה)
- קיזוז טמפ' עם "dummy" ברגל 2 או 4

$K=2$



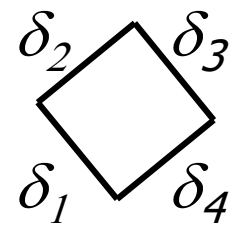
2. חצי גשר: קיזוז כפיפה
- קיזוז טמפ' עם גשר מלא או "dummy" (ברגל 2 ו-4)

$K=2(1+\nu)$



3. גשר מלא: קיזוז כפיפה וטמפרטורה

$$V_0 = K \frac{V_s}{4} \delta$$



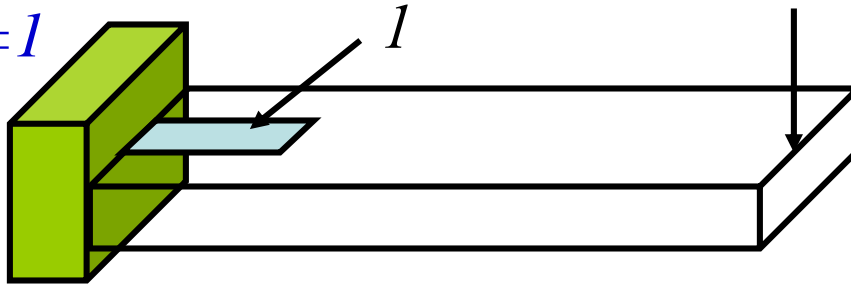


# מדידת מומנט כפיפה

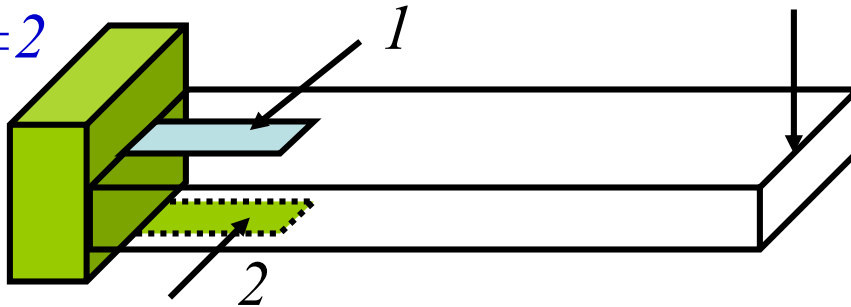
## קונפיגורציות גשר שונות

$$\varepsilon_M = \frac{My}{EI}$$

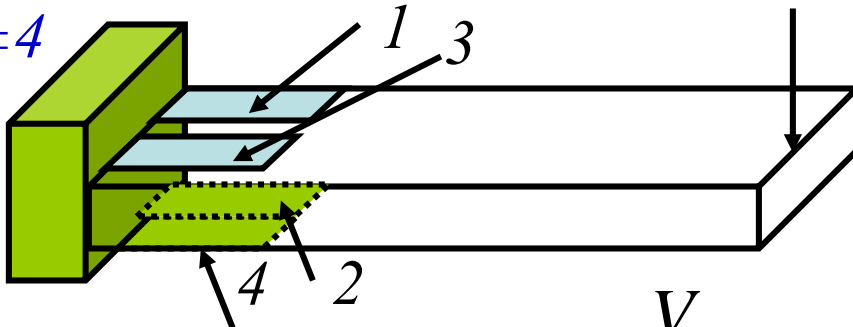
$K=1$



$K=2$



$K=4$

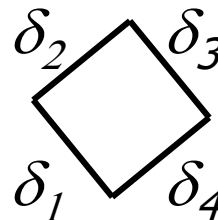


1. מקרה בסיסי: רבע גשר

- קיזוז טמפרטורה עם "dummy" ברגל 2 או 4
- אין קיזוז כוח צירי ומומנט פיתול

2. חצי גשר: קיזוז טמפרטורה, כוח צירי ומומנט פיתול

3. גשר מלא: קיזוז טמפרטורה, כוח צירי ומומנט פיתול

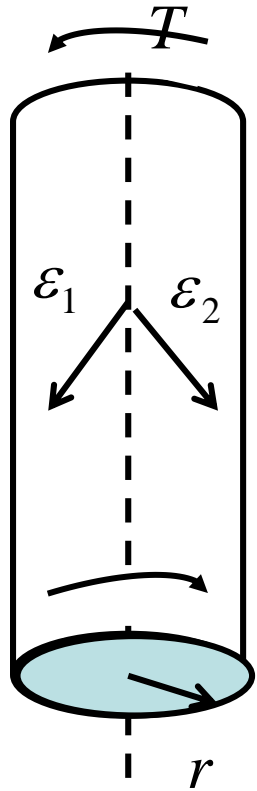


$$V_0 = K \frac{V_s}{4} \delta$$



# מדידת מומנט פיתול

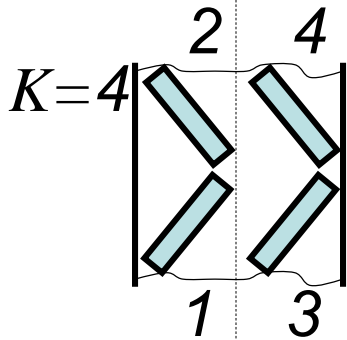
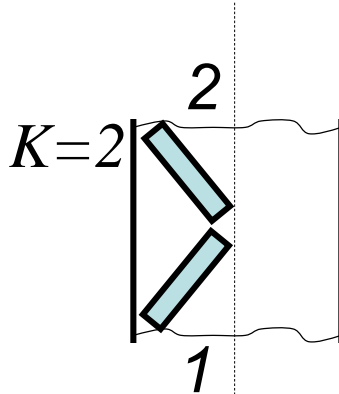
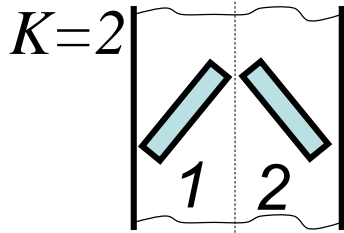
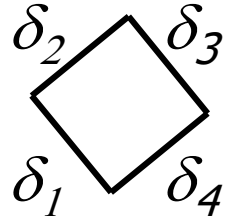
## קונפיגורציות גשר שונות



$$\epsilon_{1,2} = \mp \frac{Tr}{2GJ}$$

$G$  מודול גזירה  
 $J$  מומנט אינרציה פולארי

$$V_0 = K \frac{V_s}{4} \delta$$



1. חצי גשר 1:

- קיזוז טמפ' וכוח צירי
- אין קיזוז מומנט כפיפה

2. חצי גשר 2:

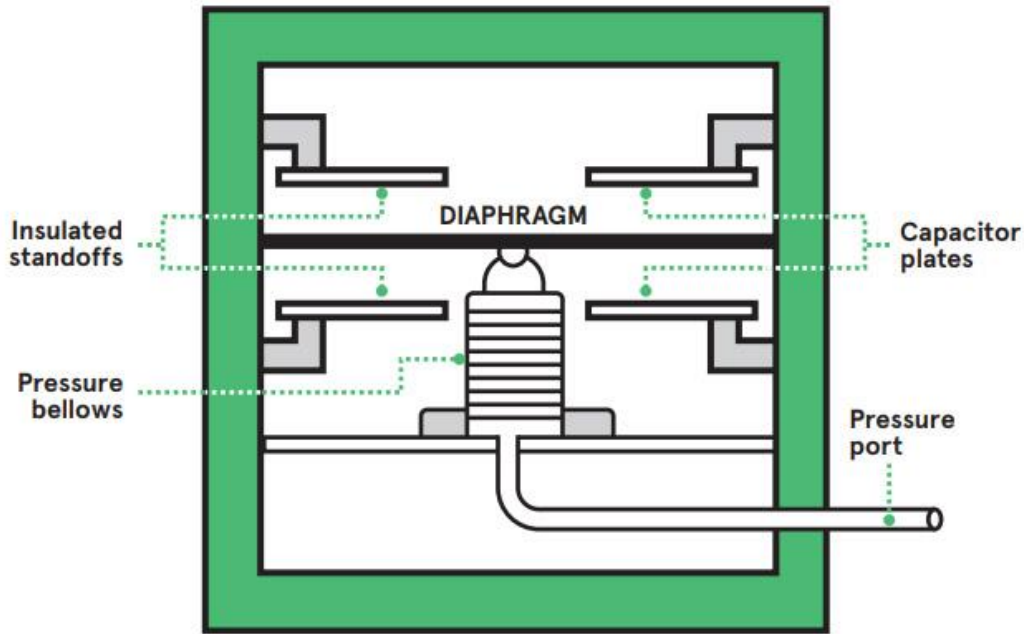
- קיזוז טמפ' וכוח צירי
- קיזוז מומנט כפיפה

3. גשר מלא:

- קיזוז טמפ' וכוח צירי
- קיזוז מומנט כפיפה
- רגישות גבוהה לפיתול בלבד



# Diaphragm Pressure Sensor





# Diaphragm Pressure Sensor

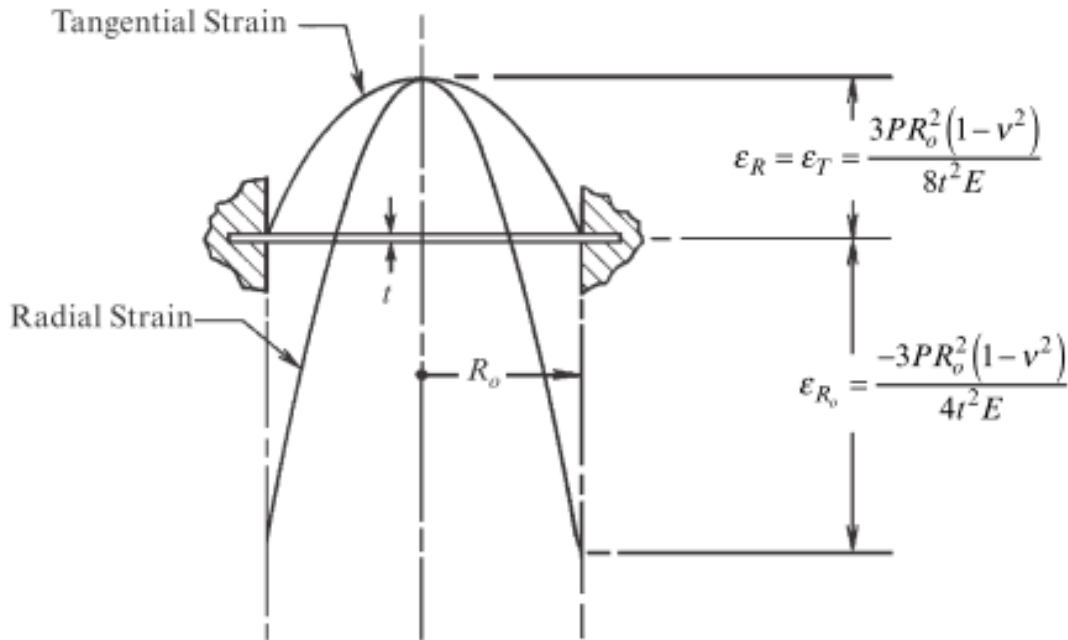


Fig.1 – Strain distribution in clamped diaphragm

- עיבור רדיאלי ומשיקי בדיאפרגמה מעגלית שתפוסה בקצוות.
- הביטויים הם קירובים לינאריים לשקיעות קטנות (יחסית לעובי הדיאפרגמה)
- בהנחה של שקיעות קטנות, השקיעה במרכז:

$$Y_c = \frac{3PR_o^4(1-\nu^2)}{16t^3E}$$

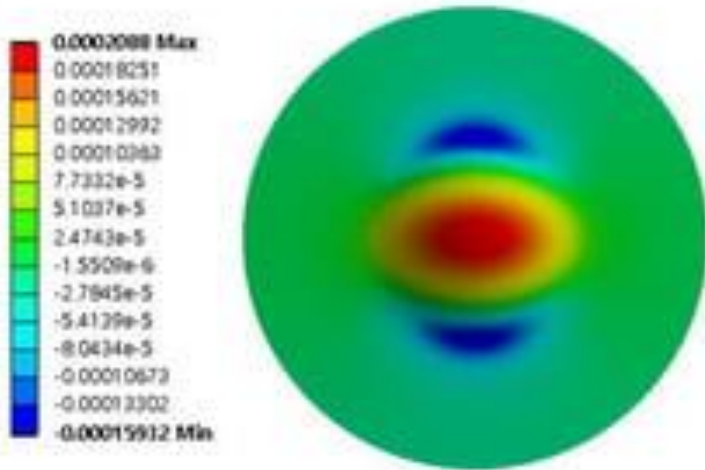
| where:                      | U.S. Customary Units | Metric (Si) Units |
|-----------------------------|----------------------|-------------------|
| $P$ = Pressure              | psi                  | $Pa$              |
| $R_o$ = Diaphragm Radius    | in                   | $mm$              |
| $t$ = Diaphragm thickness   | in                   | $mm$              |
| $\nu$ = Poisson's ratio     |                      | dimensionless     |
| $E$ = Modulus of elasticity | psi                  | $Pa$              |



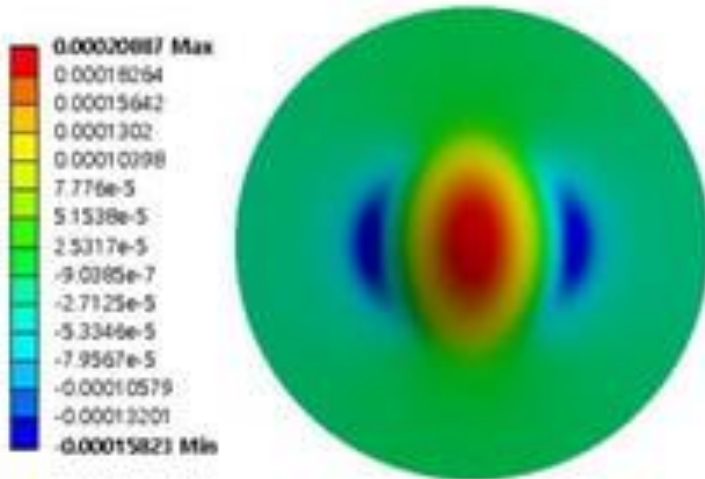


# Diaphragm Strain Gages & Wiring

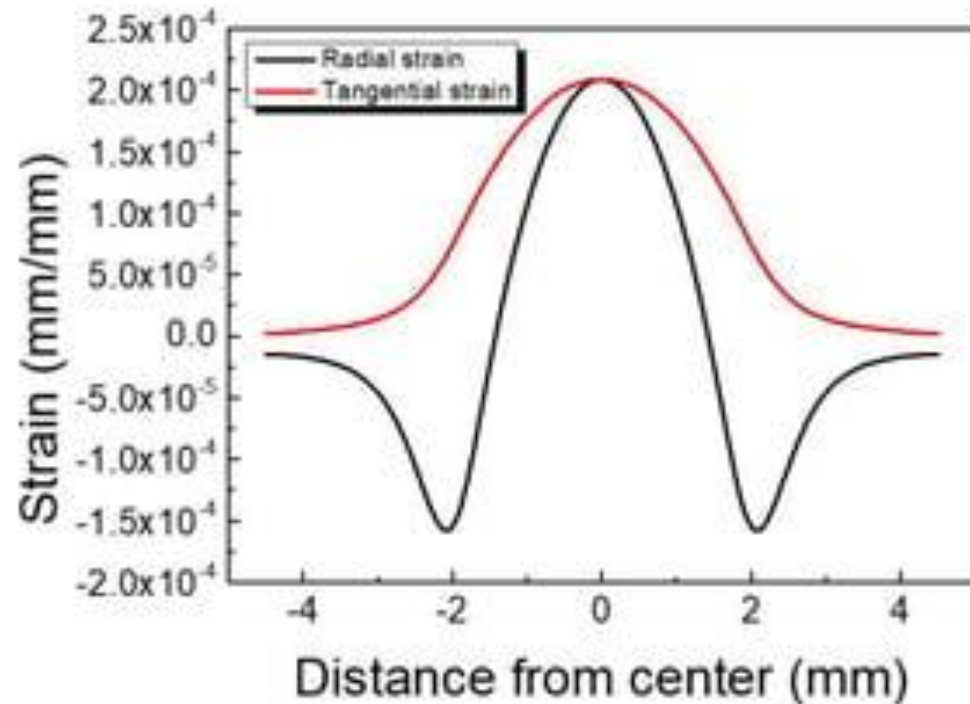
(a)



(b)



(c)



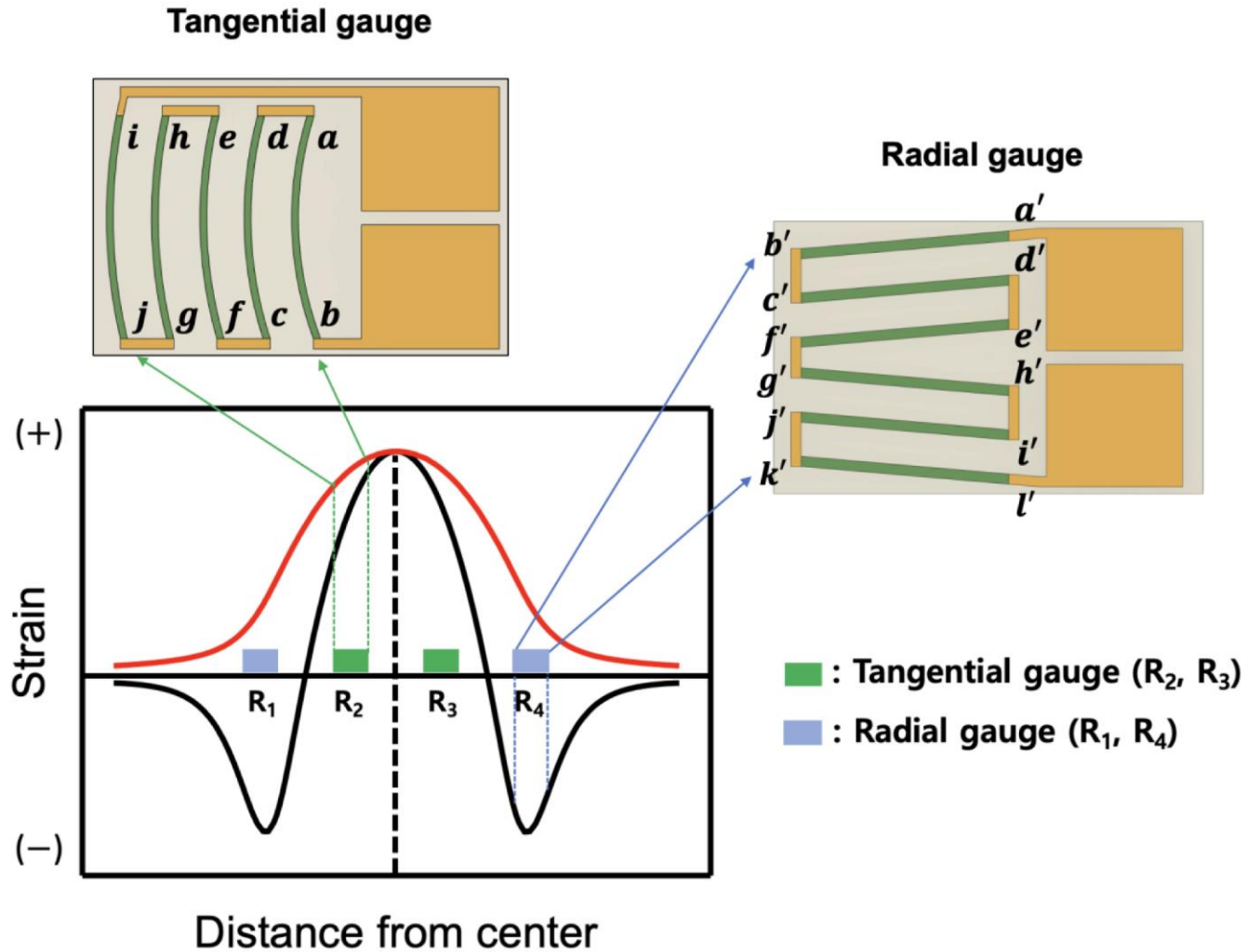
8 May 2023

Strain distribution on the surface of a stainless-steel circular diaphragm. Color maps of (a) tangential and (b) radial strains. (c) Two-dimensional plot of tangential and radial strains.

17



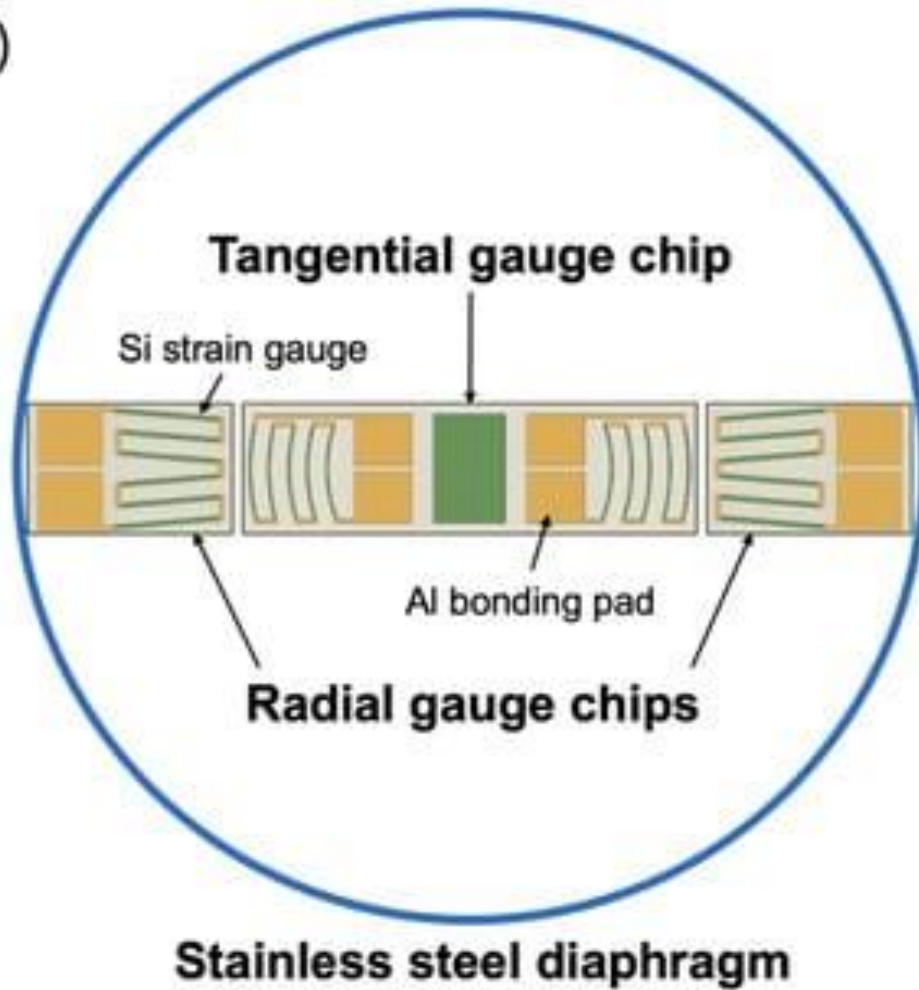
# Diaphragm Strain Gages & Wiring



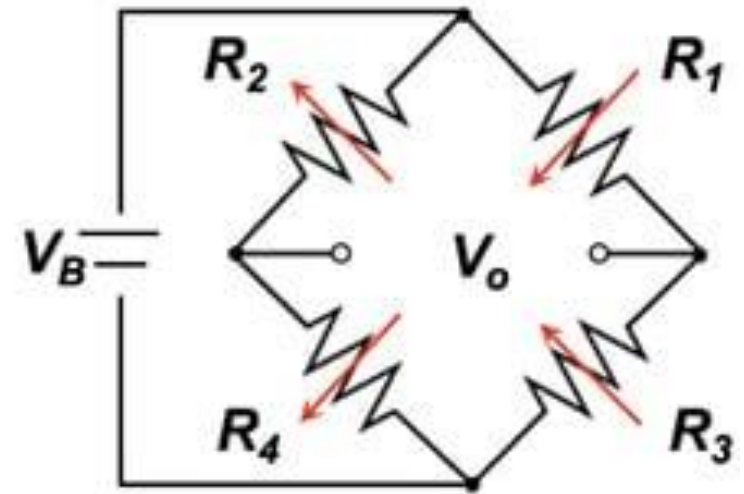


# Diaphragm Strain Gages & Wiring

(a)

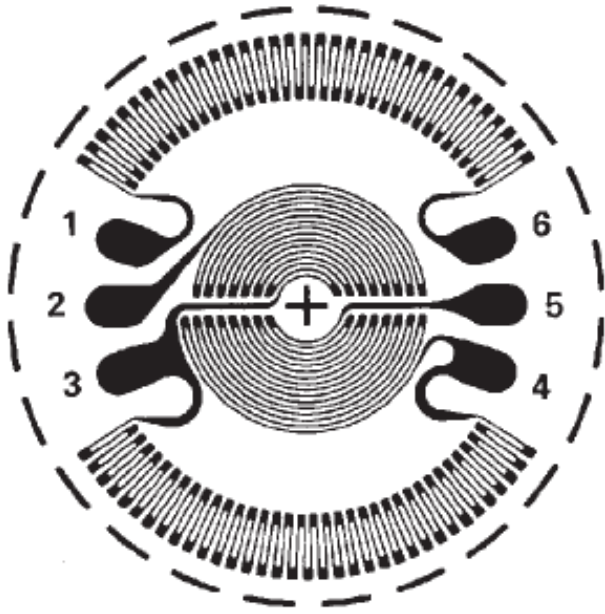


(b)

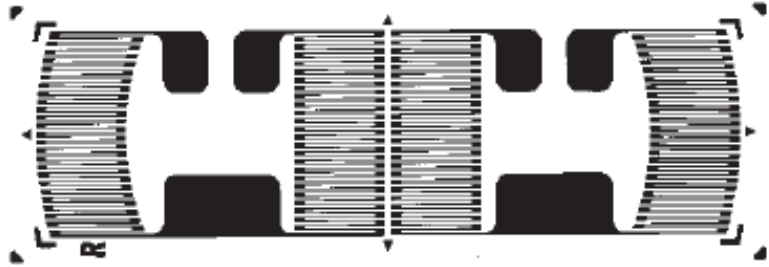




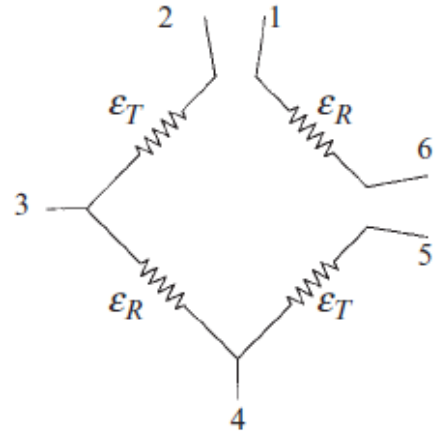
# Diaphragm Strain Gages & Wiring



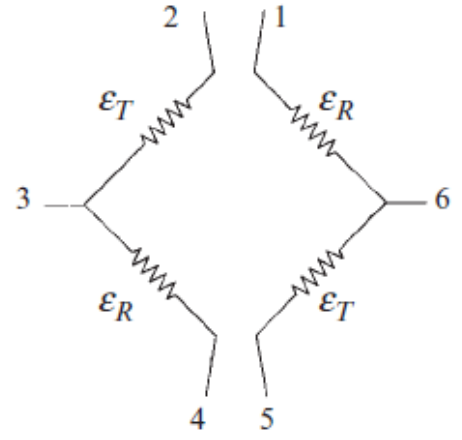
(a) Circular Pattern



(b) Linear Pattern



(a) Circular Pattern



(b) Linear Pattern



# Diaphragm Strain Gages & Wiring

• מתח יציאה:

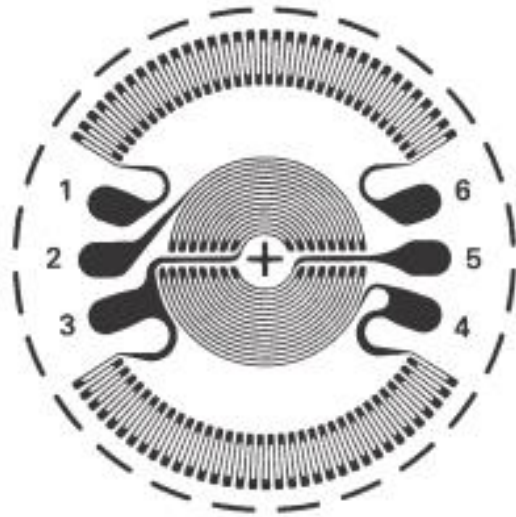
– תלות פונקציונאלית

$$e_0 = K \frac{PR_0^2(1-\nu^2)}{t^2 E}$$

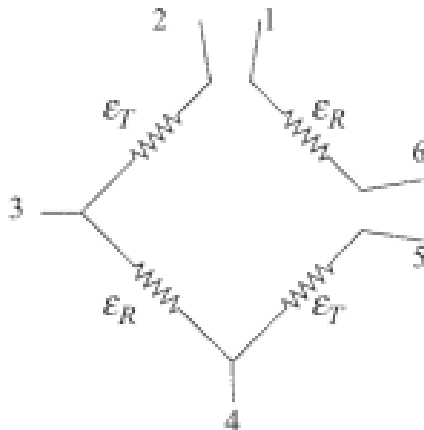
– המקדם  $K$  תלוי באזור שמדי-העיבור מכסים

– לדוגמא:  $K = 0.75 * 10^3 mV / V$

– לינאריות: ללינאריות עד 0.3% יש לשמור על שקיעות קטנות מרבע העובי.



(a) Circular Pattern





# Diaphragm Strain Gage Assembly

## Frequency Response

Depending strongly upon the degree of damping in the diaphragm strain gage assembly and in the fluid in contact with the diaphragm, the resonant frequency should be at least three to five times as high as the highest applied frequency.

The un-damped resonant frequency of a rigidly clamped diaphragm can be expressed as follows:

$$f_n = \frac{0.469t}{R_o^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, \text{ Hz}$$

where:  $\rho = \text{Mass density, } g/cm^3$



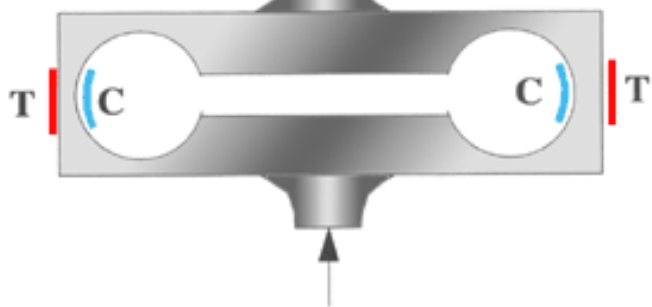
# Load Cells

## קונפיגורציות מבוססות כפיפה

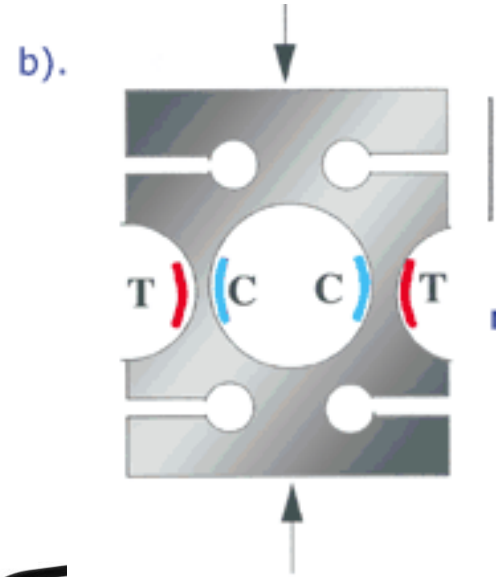
- מדידת כוח בהשפעת מומנטי הכפיפה שיוצרים מעוות מתיחה ולחיצה באזורים שונים



*Double –ended  
Bending Beam Cell*



*ring-style load cells*

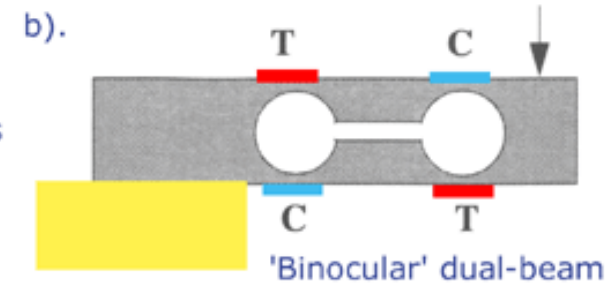
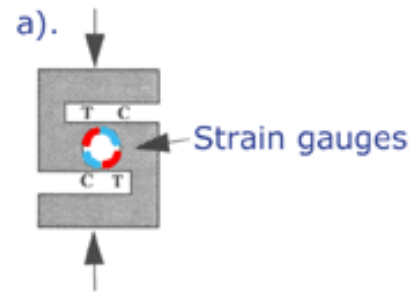
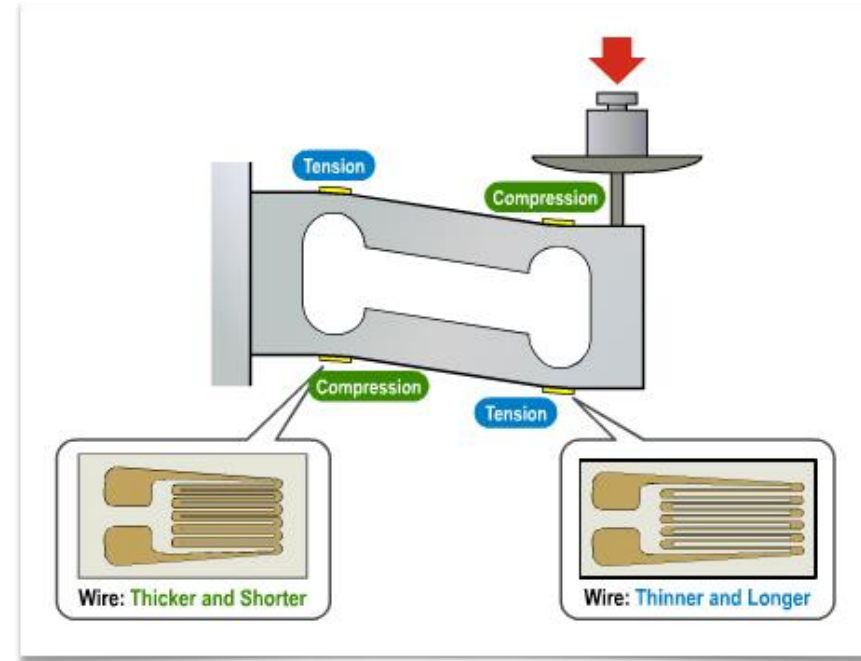
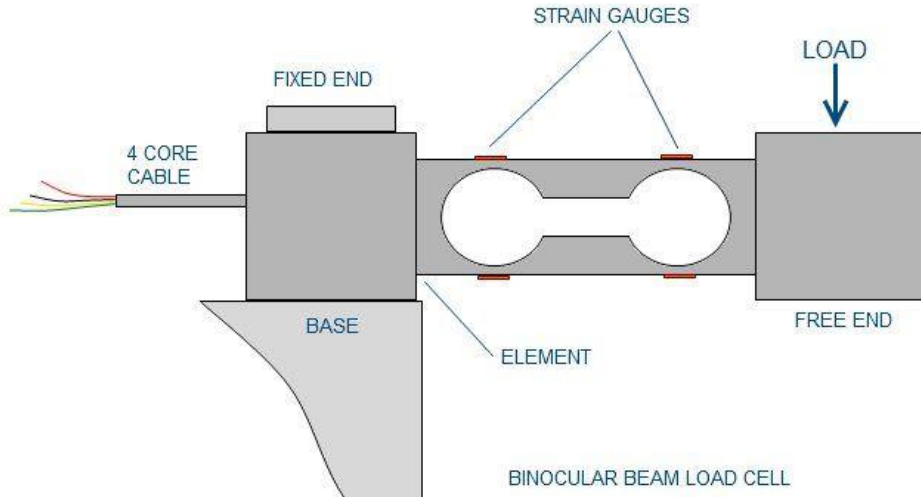






# Load Cells

## קונפיגורציות מבוססות כפיפה







# Strain Gages / Bridge Circuits Principal Errors



# Strain Gage Biaxial Case Errors

## Transverse Sensitivity

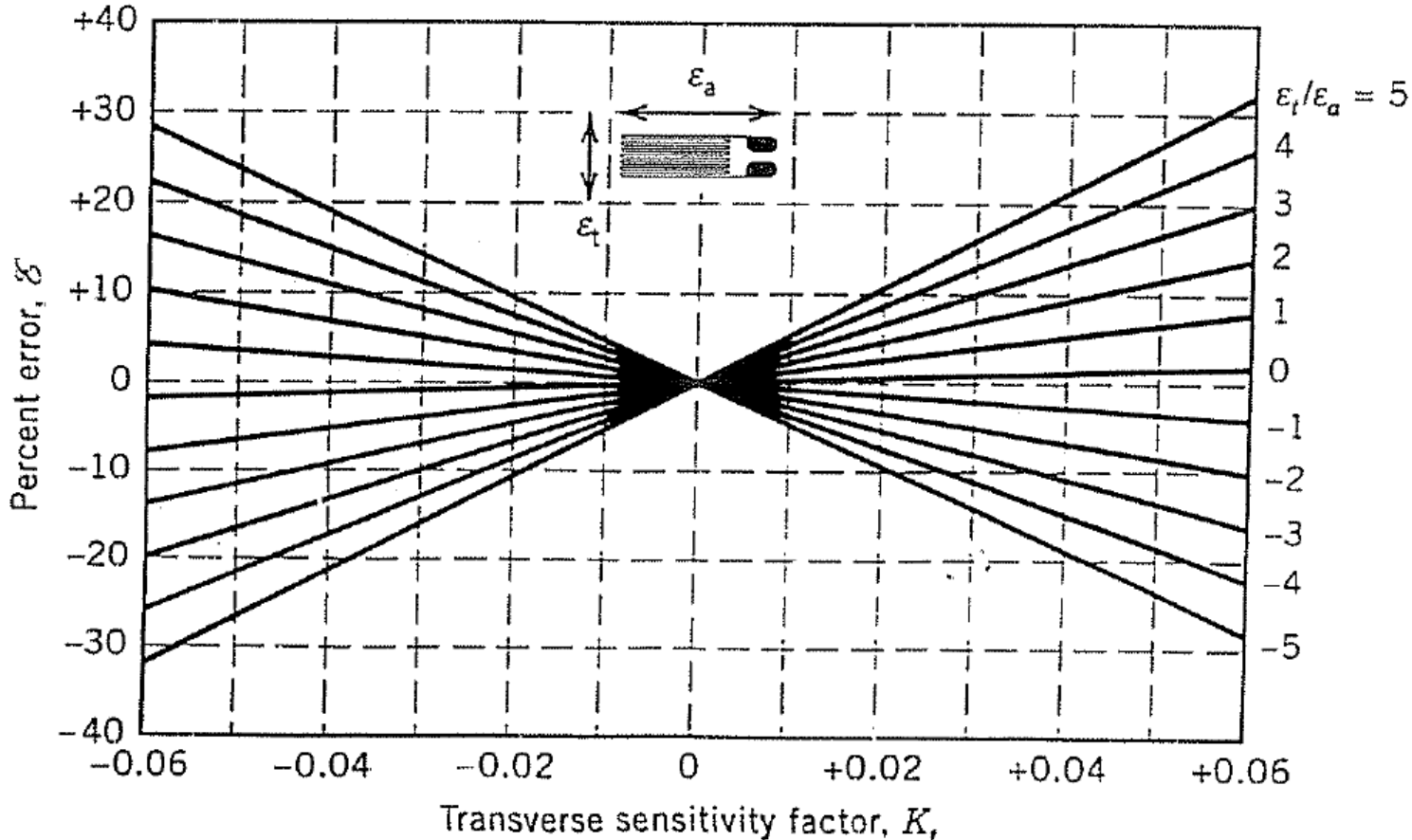
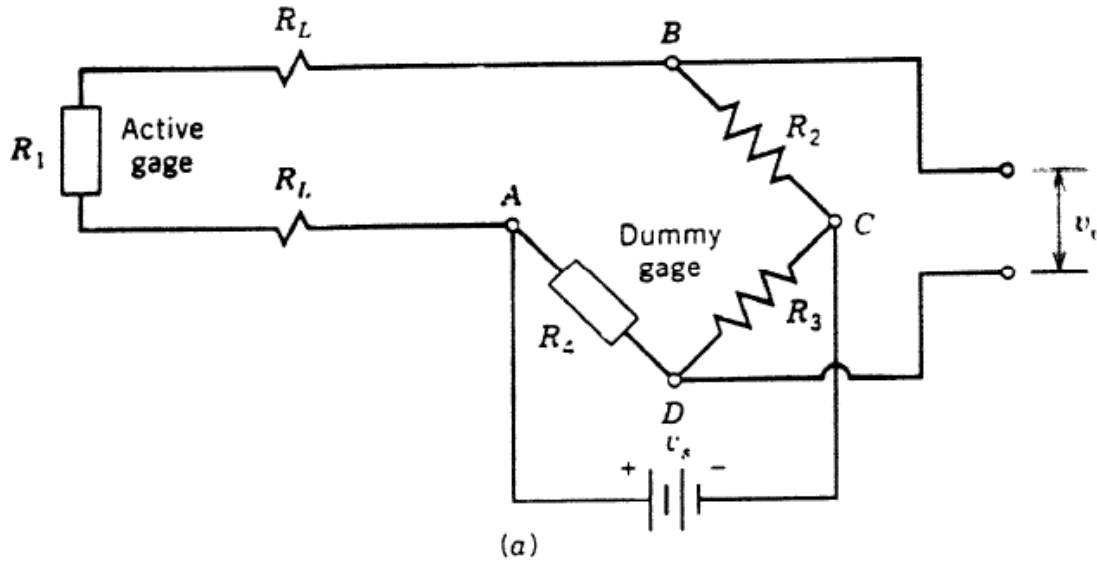


Figure 7.20 Percent error as a function of transverse sensitivity factor for several different ratios of transverse to axial strain.

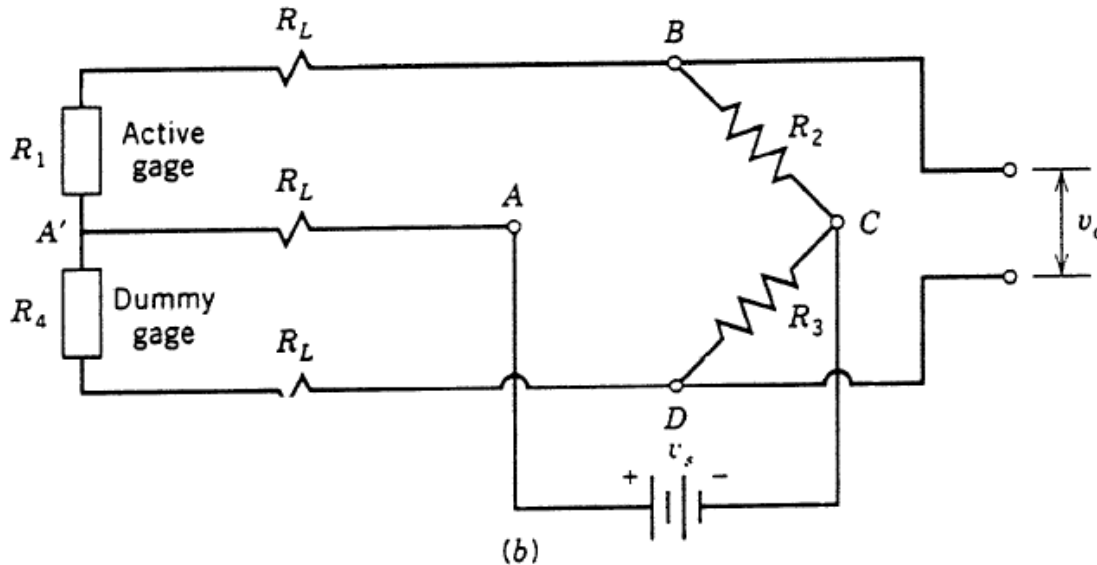


# מעגלי גשר – השפעת התנגדות החוטים



$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_g}{R_g} (1 - L)$$

$L$  – Loss Factor



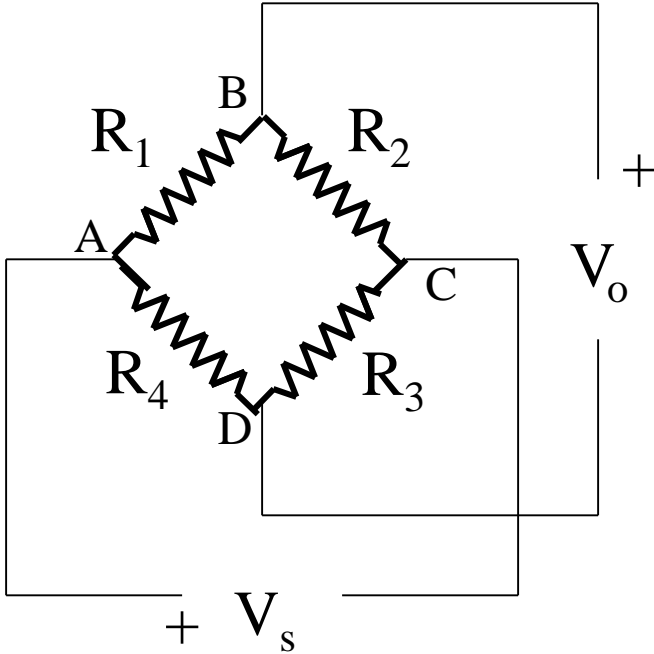
$$L_a = \frac{2R_L / R_g}{1 + 2R_L / R_g}$$

$$L_b = \frac{R_L / R_g}{1 + R_L / R_g}$$



# מעגלי גשר – שגיאת אי-הלינאריות

ביטוי כללי – לא לינארי



$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_s} &= \frac{1 + \delta_1}{1 + \delta_1 + r(1 + \delta_2)} - \frac{1 + \delta_4}{1 + \delta_4 + r(1 + \delta_3)} \\ &= r \frac{\delta_1 + \delta_3 - \delta_2 - \delta_4 + \delta_1\delta_3 - \delta_2\delta_4}{[1 + \delta_1 + r(1 + \delta_2)][1 + \delta_4 + r(1 + \delta_3)]} \\ \Rightarrow \frac{V_o}{V_s} &\approx \frac{r}{(1+r)^2} (\delta_1 + \delta_3 - \delta_2 - \delta_4) \end{aligned}$$

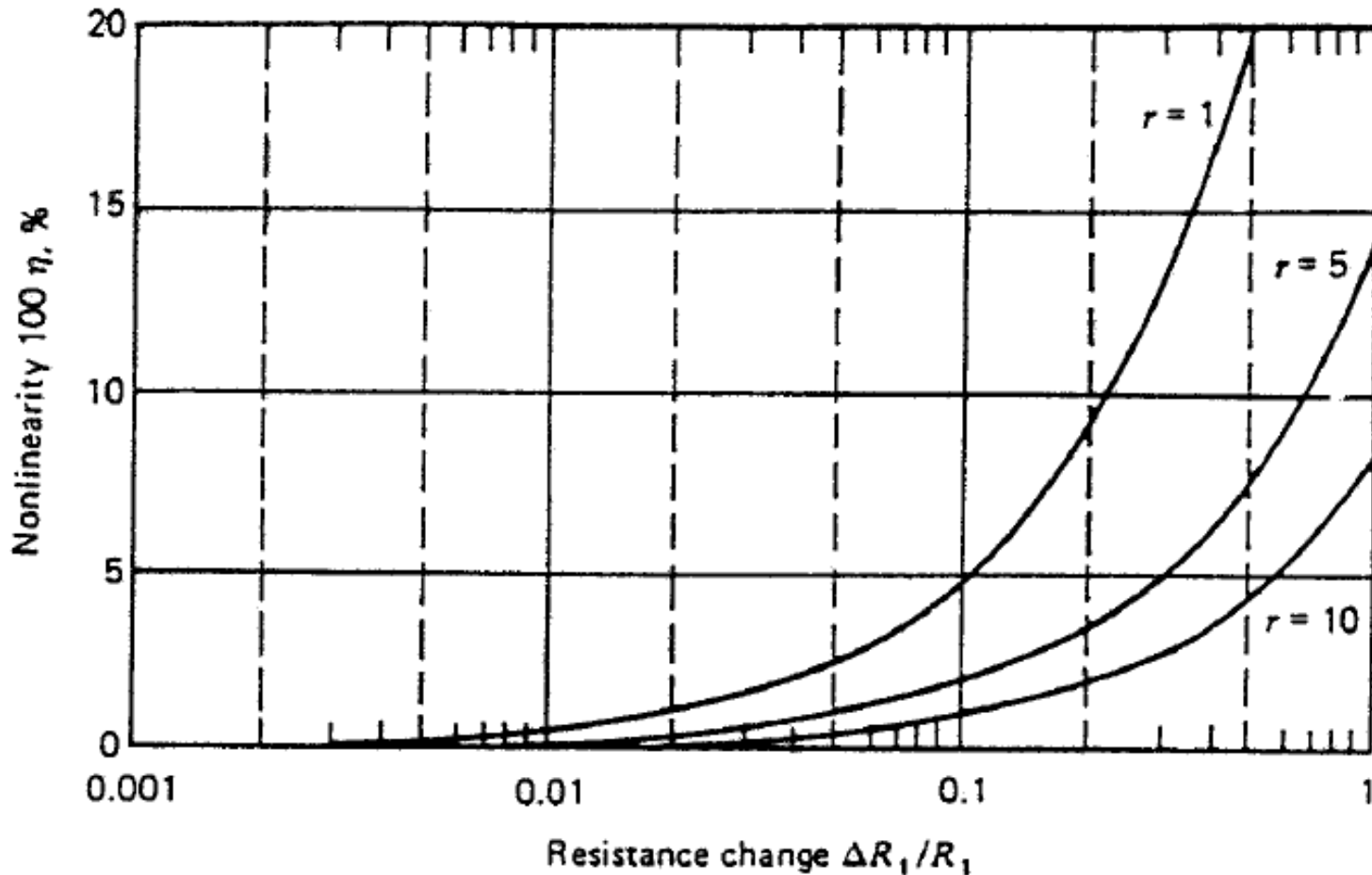
שגיאת אי-הלינאריות תהיה:

$$\eta = \frac{V_o - V_{o, Lin}}{V_s} = \left[ (\delta_2 - \delta_1)(\delta_1 + r\delta_2) + (\delta_4 - \delta_3)(\delta_4 + r\delta_3) \right] * r / [1 + r]^3$$

or  $\eta_{\%} = \beta / (1 + r + \beta)$  where:  $\beta = \delta_1 + \delta_4 + r(\delta_2 + \delta_3)$



# מעגלי גשר – שגיאת אי-הלינאריות



**Figure 6.9** Nonlinear term  $\eta$  as a function of resistance change  $\Delta R_1/R_1$  for a constant-voltage Wheatstone bridge circuit with one active gage.



# מעגלי גשר – מגבלות הספק

- מתח אספקה גבוה

- מגדיל רגישות

- אבל, מוגבל בגלל חימום עצמי

*The max allowed power,  $P_T$ , could be dissipated by the transducer limits the supply voltage  $V_s$  to:*

$$V_s = i_T (R_1 + R_2)$$

$$= i_T R_T (1 + r) = \sqrt{P_T / R_T} \cdot R_T (1 + r) = (1 + r) \sqrt{P_T R_T}$$

$$\Rightarrow V_{s,\max} \leq (1 + r) \sqrt{P_T R_T}$$



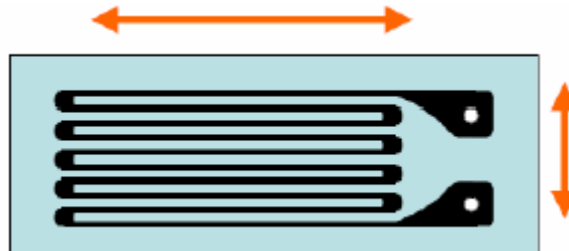
# מעגלי גשר – מגבלות הספק

*Recommended power densities,  $P_D$ :*

**Table 1 – Heat-Sink Conditions**  
watts/in<sup>2</sup> [kilowatts/m<sup>2</sup>]

| Accuracy Requirements |          | EXCELLENT<br>Heavy Aluminum<br>or<br>Copper Specimen | GOOD<br>Thick Steel | FAIR<br>Thin<br>Stainless Steel<br>or Titanium | POOR<br>Filled Plastic<br>such as<br>Fiberglass/Epoxy | VERY POOR<br>Unfilled Plastic<br>such as Acrylic<br>or Polystyrene |
|-----------------------|----------|--|---------------------|--|---|--|
| STATIC                | High     | 2–5<br>[3.1–7.8]                                     | 1–2<br>[1.6–3.1]    | 0.5–1<br>[0.78–1.6]                            | 0.1–0.2<br>[0.16–0.31]                                | 0.01–0.02<br>[0.016–0.031]   |
|                       | Moderate | 5–10<br>[7.8–16]                                     | 2–5<br>[3.1–7.8]    | 1–2<br>[1.6–3.1]                               | 0.2–0.5<br>[0.31–0.78]                                | 0.02–0.05<br>[0.031–0.078]   |
|                       | Low      | 10–20<br>[16–31]                                     | 5–10<br>[7.8–16]    | 2–5<br>[3.1–7.8]                               | 0.5–1<br>[0.78–1.6]                                   | 0.05–0.1<br>[0.078–0.16]   |
| DYNAMIC               | High     | 5–10<br>[7.8–16]                                     | 5–10<br>[7.8–16]    | 2–5<br>[3.1–7.8]                               | 0.5–1<br>[0.78–1.6]                                   | 0.01–0.05<br>[0.016–0.078]   |
|                       | Moderate | 10–20<br>[16–31]                                     | 10–20<br>[16–31]    | 5–10<br>[7.8–16]                               | 1–2<br>[1.6–3.1]                                      | 0.05–0.2<br>[0.078–0.31]   |
|                       | Low      | 20–50<br>[31–78]                                     | 20–50<br>[31–78]    | 10–20<br>[16–31]                               | 2–5<br>[3.1–7.8]                                      | 0.2–0.5<br>[0.31–0.78]   |

$$P_T = P_D * A$$

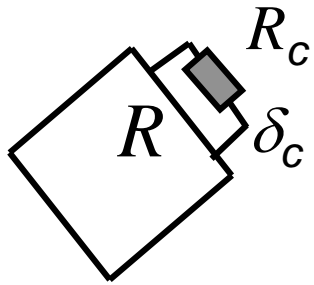




# מעגלי גשר – כיול חשמלי

• ניתן לכייל את מעגל הגשר ע"י דימוי האפקט המכאני:  
שינוי ההתנגדות עי נגד מגביל  $R_c$

• שינוי התנגדות הזרוע עקב תוספת  $R_c$  במקביל:



$$\Delta R = \frac{RR_c}{R + R_c} - R = -\frac{R^2}{R + R_c} < 0$$

• מדמה מעוות כיול:  
$$\delta_c \equiv \delta_{calibration} = \frac{\Delta R}{R} = -\frac{R}{R + R_c} < 0$$

<< כדי לדמות מעוות  $-1 < \delta_c < 0$  דרוש נגד כיול:  $R_c = -R \left( 1 + \frac{1}{\delta_c} \right)$

– שימו לב: אפשר לדמות רק מעוות שלילי!!!

– נגד הכיול יימצא בזרוע הנגדית מול החיישן!?

– לצורך דימוי מעוות חיובי נבחר מראש התנגדות יותר גדולה של הזרוע הנגדית (שבמקביל אליה יחובר נגד הכיול).





# Noise Control

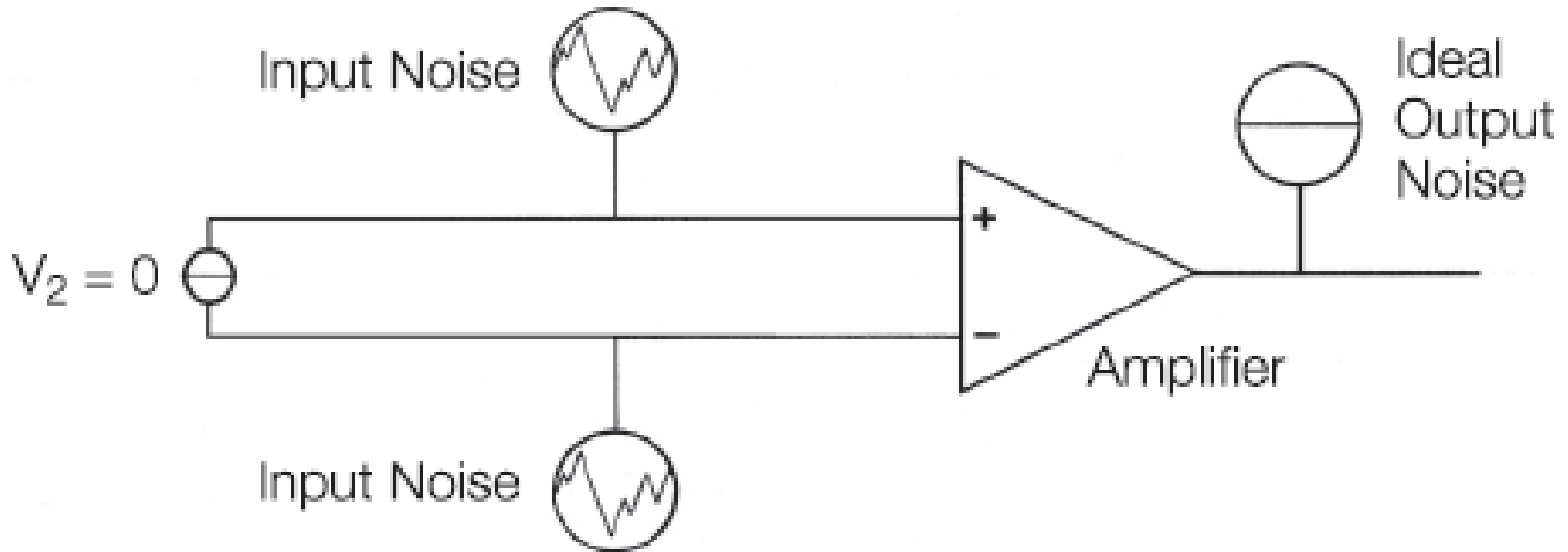


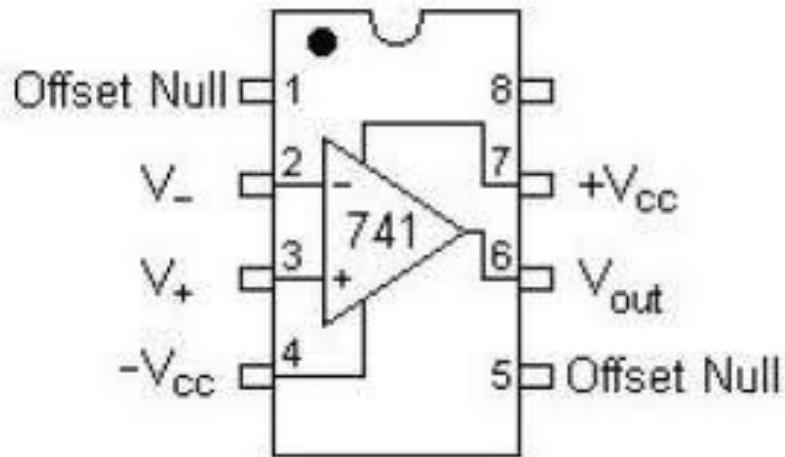
Figure 4. Noise cancellation by amplifier common-mode rejection.

*See Amplifiers Next . . .*



# ממשקים לחיישנים

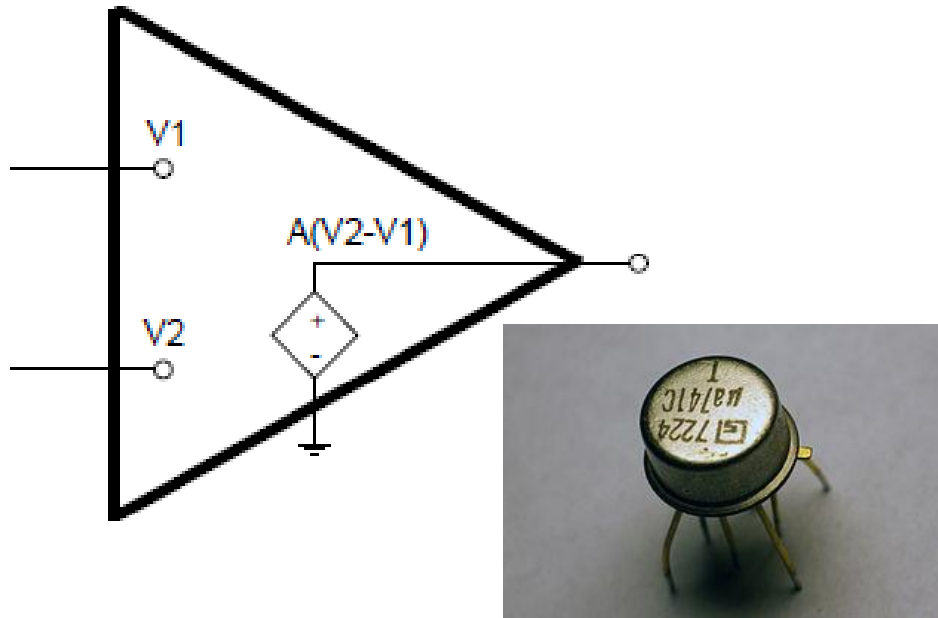
- מעגלי גשר - הרחבה כללי
- שיקולי סימטריה
- שימושים למדי עיבור
- לינאריות ומגבלות הספק



- מגברים
- מגבר הפרש
- CMRR
- מגבר מיכשור



# The Ideal Op-Amp



The Op-Amp produces an output voltage that is the difference between the two input terminals, multiplied by the gain  $A$ ...

**Why we need Amplifiers ???**

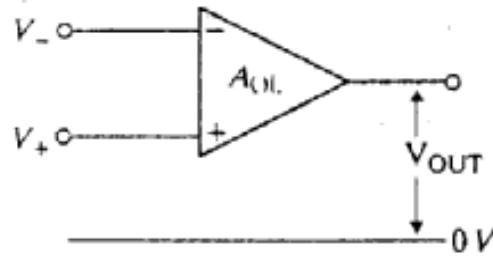
- 1) The input impedance is infinite - i.e. no current ever flows into either input of the op-amp.
- 2) The output impedance is zero - i.e. the op-amp can drive any load impedance to any voltage.
- 3) The open-loop gain ( $A$ ) is infinite.
- 4) The bandwidth is infinite.
- 5) The output voltage is zero when the input voltage difference is zero.

i.e. C.M.R.R. is infinite

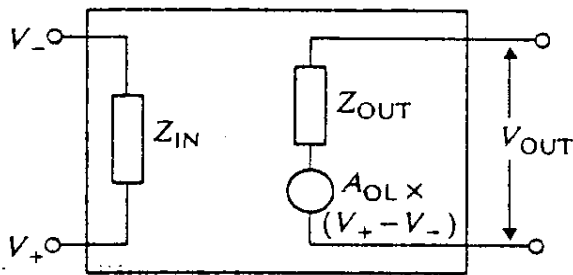
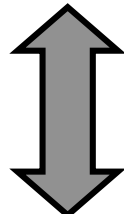


# מגברי שרת

## תכונות וקירובים שימושיים



$$V_{OUT} = A_{OL} (V_+ - V_-)$$



מגבר שרת – מעגל אקוויולנטי

מגבר שרת (Op-Amp):  
 מהווה אבן הבנייה למגברים  
 שמבוססים בעיקר על המשוב.

- הנחת הגבר אינסופי (במגבר שרת אידיאלי):

$$A_{OL} \rightarrow \infty$$

<< הפרש מתחי הכניסה שואף לאפס:

$$V_- \cong V_+$$

- הנחת התנגדות כניסה אינסופית

$$Z_{in} \rightarrow \infty$$

(במגבר שרת אידיאלי):

<< זרם כניסה אפסי:

$$i_- = i_+ = 0$$



# מגברים – תכונות (רצוי מול מצוי)

| Parameter            | Symbol    | Ideal Op-Amp | Practical Op-Amp                  |
|----------------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| DC Open loop gain    | $A_{OL}$  | $\infty$     | 100 dB                            |
| Input Impedance      | $Z_{IN}$  | $\infty$     | 2M $\Omega$                       |
| Output Impedance     | $Z_{out}$ | 0            | 75 $\Omega$                       |
| Input Offset Voltage | $V_{IO}$  | 0            | 1mV                               |
| Slew rate            | SR        | $\infty$     | Depends on input signal frequency |
| Bandwidth            | BW        | $\infty$     | Depends on input signal frequency |
| CMRR                 | $\rho$    | $\infty$     | 90 dB                             |

*Input offset voltage: required to get 0V output*



# מעגלי הגבר

● מגברי שרת משמשים לבניית מעגלים בעלי:

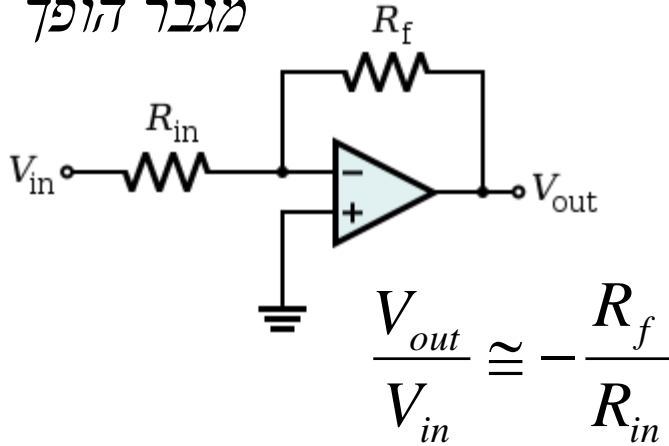
– הגבר סופי אך מדויק

– רוחב סרט יותר רחב (סינון רעשים)

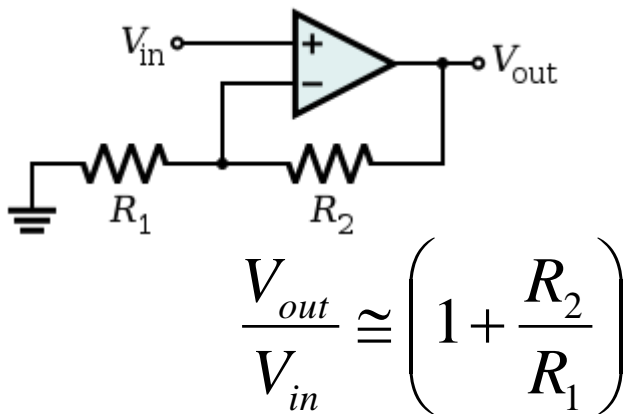
– התנגדות כניסה גבוהה

– התנגדות יציאה נמוכה

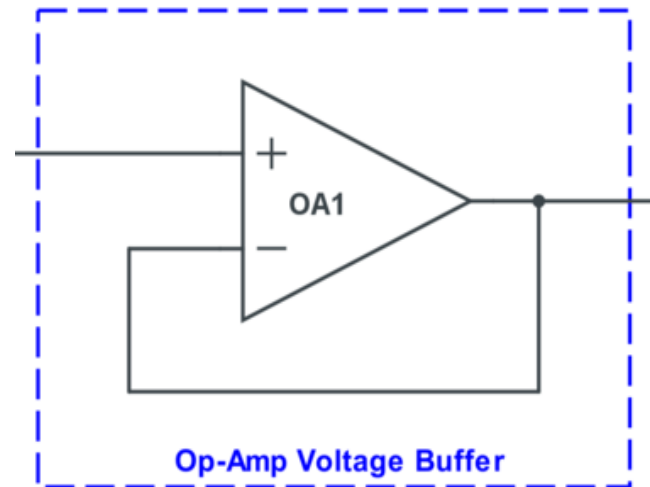
מגבר הזופך



מגבר לא-הזופך

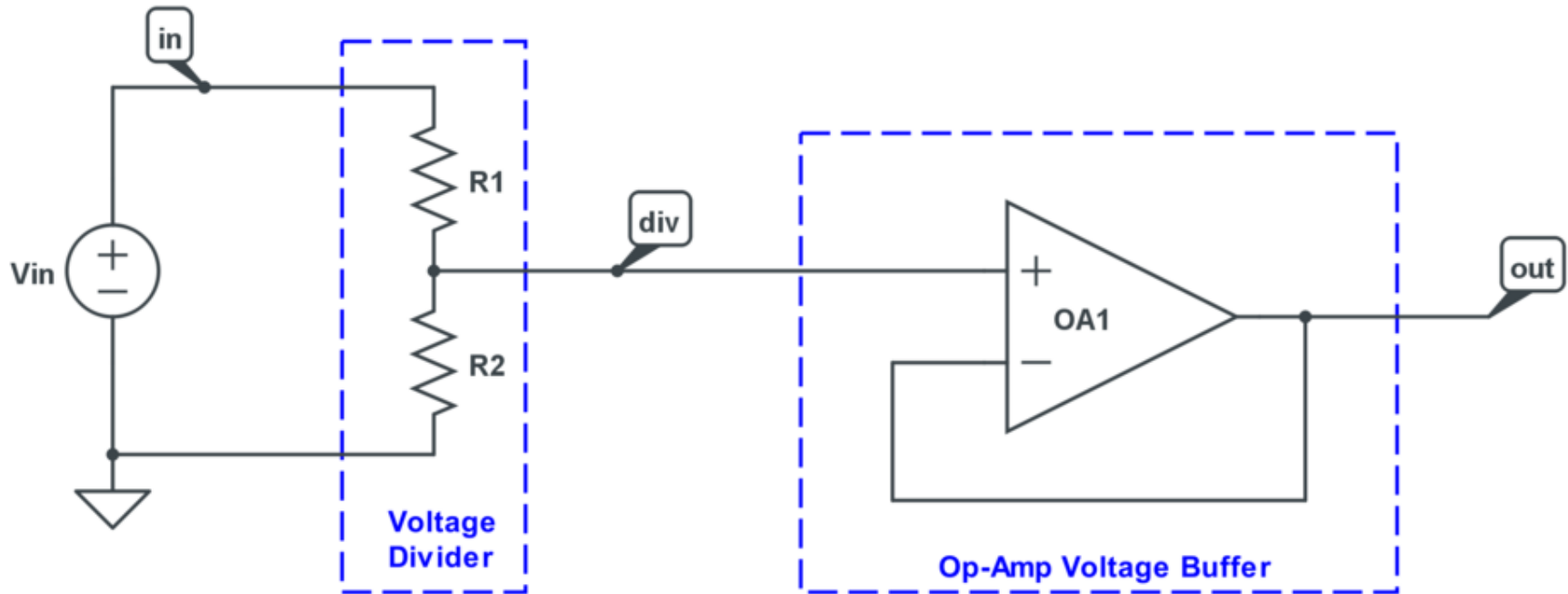


חוצץ Buffer





# מעגלי הגבר - הפחתת העמסה



OP-AMP VOLTAGE REFERENCE



# מגבר הפרשי עם מגבר שרת בודד

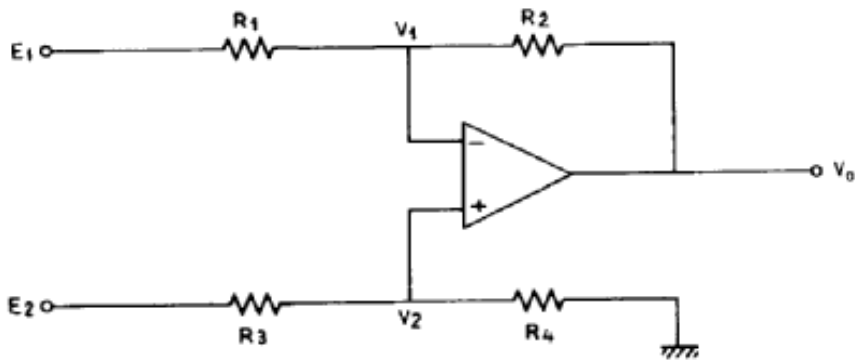


FIGURE 3.36 Differential amplifier based on a single op amp.

$$(V_1 = V_2 = E_2 R_4 / (R_3 + R_4))$$

$$(E_1 - V_1) / R_1 = (V_1 - V_0) / R_2 \Rightarrow$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} E_1 + (1 + \frac{R_2}{R_1}) \frac{R_4}{R_3 + R_4} E_2$$

$$(E_{1,2} = E_c \mp E_d / 2) \quad \text{הצבה:}$$

Common mode gain **הגבר משותף**

$$G_c = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}$$

Diff mode gain **הגבר הפרש**

$$G_d = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_2}{R_1} + (1 + \frac{R_2}{R_1}) \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$

$E_d = E_2 - E_1$  באופן כללי נגדיר

$E_c = \frac{E_2 + E_1}{2}$  ( $E_{1,2} = E_c \mp E_d / 2$ )

$V_o = G_c E_c + G_d E_d$  ביטוי כללי

$$k = \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

הגבר משותף מתאפס עבור:

ואז הגבר ההפרש הוא:  $G_d = k$





# יחס ההגברים CMRR

- תנאי איפוס ההגבר המשותף לא מתקיים בדיוק ומתואר

$$G_c = \frac{G_d}{CMRR} \quad \text{כלומר:} \quad CMRR = \frac{G_d}{G_c}$$

$$CMRR_R = \frac{1}{2} \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{R_1 R_4 - R_2 R_3} \quad \text{— עבור המגבר בשקף הקודם}$$

- מגבר שרת לא אידיאלי מאופיין ב- $CMRR_A$

$$\text{— מגבר } A741 : CMRR_A = 70\text{db}$$

$$\text{— } A_d = 50,000$$

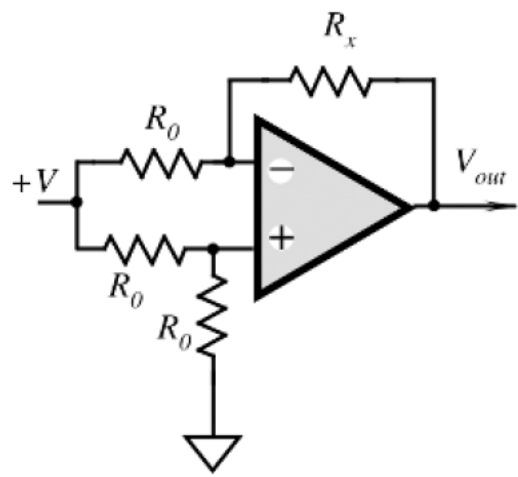
$$A_c = \frac{A_d}{10^{70/20}} = 15.8 \quad \leftarrow$$

- ה- $CMRR$  הכללי נתון ע"י חיבור במקביל:

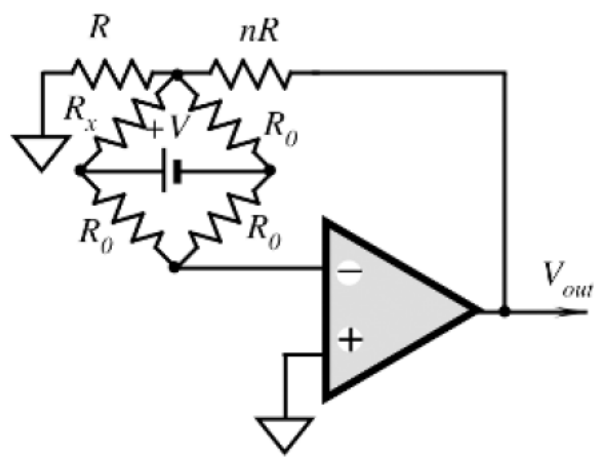
$$\frac{1}{CMRR_{Total}} = \frac{1}{CMRR_R} + \frac{1}{CMRR_A} \quad \text{— קטן מה- $CMRR$  המינימאלי}$$



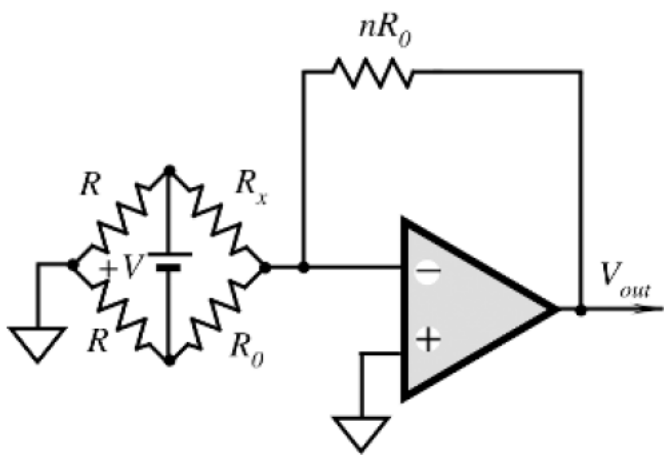
# שילוב מגבר הפרשי במעגל גשר



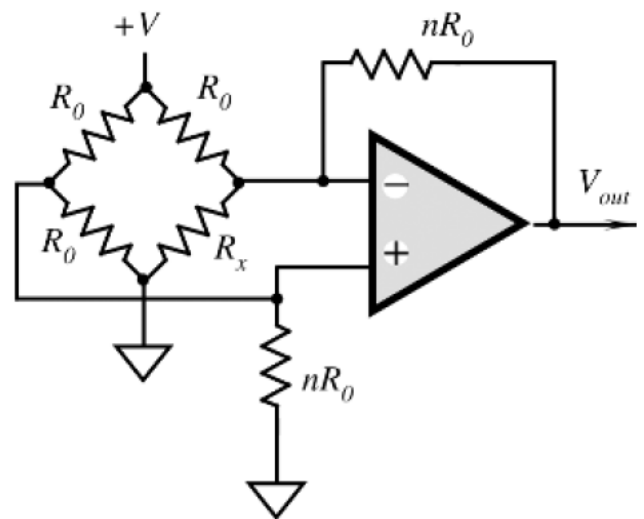
(A)



(B)



(C)



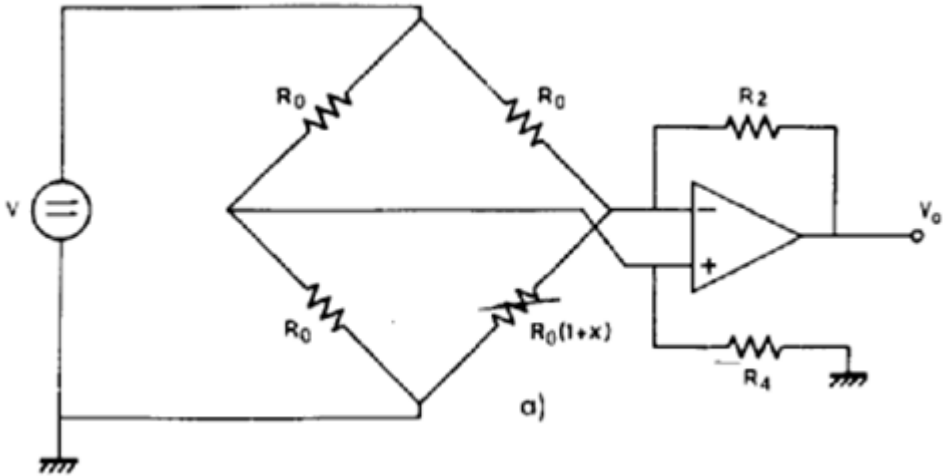
(D)



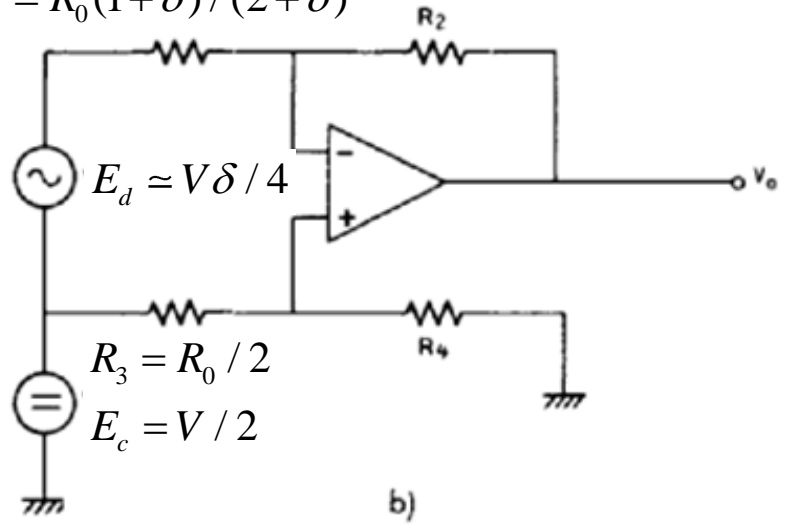
# שילוב מגבר הפרשי במעגל גשר

## מעגל שקול

- מעגל גשר מחובר למגבר הפרשי פשוט (עם מגבר שרת בודד).
- מעגל הגשר מורכב משלושה נגדים קבועים  $R_0$  נגד משתנה אחד שגודלו  $R_0(1+\delta)$ .



$$R_1 = R_0(1 + \delta) / (2 + \delta)$$

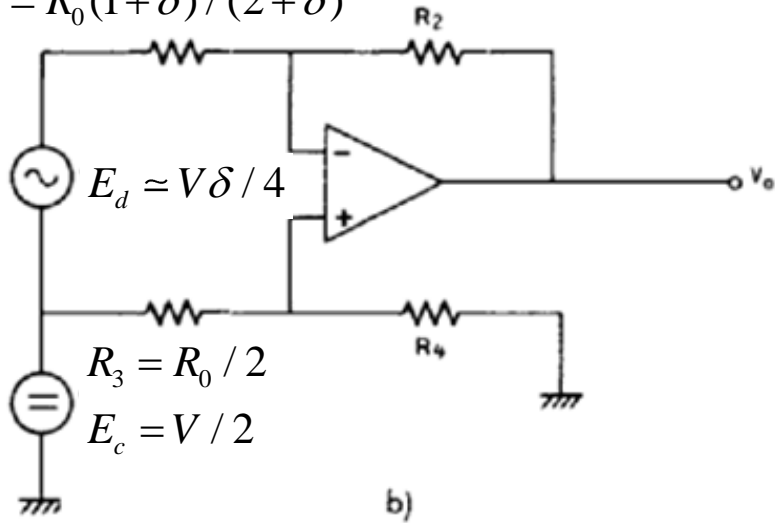


- המעגל השקול (שקול תבנין לכל כניסה)
    - מתח משותף לכניסות:  $E_c = V / 2$
    - מתח הפרשי:  $E_d \approx V \delta / 4$
    - נגד שקול לכניסה (+):  $R_3 = R_0 / 2$
    - נגד שקול לכניסה (-):  $R_4$
- $$R_1 = R_0(1 + \delta) / (2 + \delta)$$



# שילוב מגבר הפרשי במעגל גשר הגברים

$$R_1 = R_0(1 + \delta) / (2 + \delta)$$



• המעגל השקול זהה למעגל

משקף קודם כאשר:  $R_3 = R_0 / 2$

$$R_1 = R_0(1 + \delta) / (2 + \delta)$$

• עבור  $\delta \ll 1$ :

$$R_1 |_{\delta \ll 1} \rightarrow R_0(1 + \delta / 2) / 2$$

• תנאי האיפוס של ההגבר

המשותף  $G_c$  הוא:  $k = R_2 / R_1 = R_4 / R_3$

• ההגברים המתקבלים כאשר

התנגדות נגדי המשוב:  $R = R_2 = R_4$

$$G_c \approx \frac{\delta / 2}{1 + R_0 / 2R} \approx \frac{\delta}{2}$$

$$G_d = k = R_4 / R_3 = 2R / R_0 \gg 1$$

שים לב: לשינוי ההגבר צריך לשנות בו זמנית את שני נגדי המשוב



# שילוב מגבר הפרשי במעגל גשר

## המשך - השפעת CMRR

$$CMRR = \frac{G_d}{G_c} \approx \frac{4R}{\delta R_0} \quad \bullet \text{ CMRR (עבור } k \gg 1 \text{):}$$

• שגיאה יחסית (בקירוב:  $k \gg 1; \delta \ll 1$ ) בין מתח היציאה שנובע מהמתח המשותף (שצריך להיות 0) ומתח היציאה שנובע מההפרש (שצריך להיות מוגבר):

$$\frac{G_c E_c}{G_d E_d} \approx \frac{\delta / 2 \cdot V / 2}{G_d \cdot V \delta / 4} = \frac{1}{G_d}$$

• דוגמא:

$$G_d = 100; \rightarrow error = 1\%$$

שים לב: לשינוי ההגבר צריך לשנות בו זמנית את שני נגדי המשוב



# מגברי מכשור

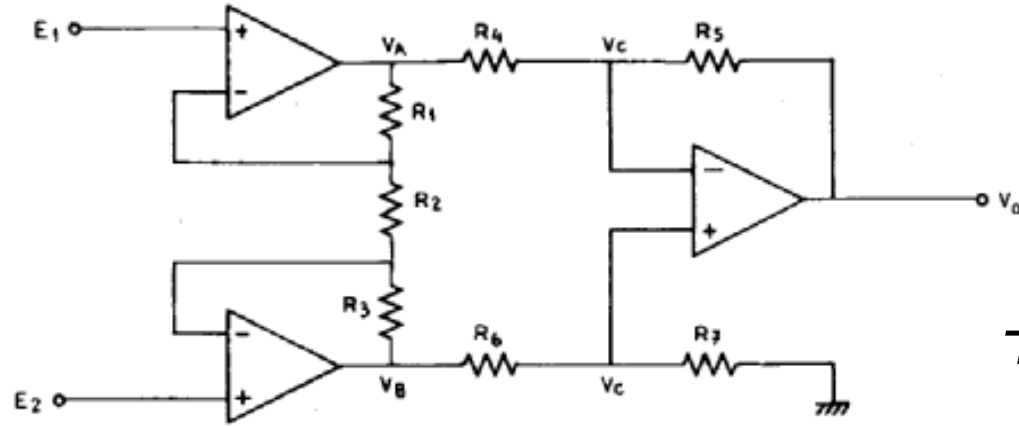


FIGURE 3.40 Instrumentation amplifier based on three op amps.

• הצורך:

- הפרדה בין שינוי הגבר ובין איפוס  $G_C$
- שינוי הגבר ע"י כיוון נגד בודד
- התנגדות כניסה גבוהה

• מגבר מכשור - איפוס  $G_C$  כאשר:  $k = \frac{R_5}{R_4} = \frac{R_7}{R_6}$

בהנחת מגברים אידיאליים:

$$V_A - V_B = (E_1 - E_2) \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right) \quad \leftarrow \text{נבחר } R_1 = R_3$$

$$\frac{V_A - E_1}{R_1} = \frac{E_1 - E_2}{R_2} = \frac{E_2 - V_B}{R_3}$$

$$\frac{V_B - V_C}{R_6} = \frac{V_C}{R_7}$$

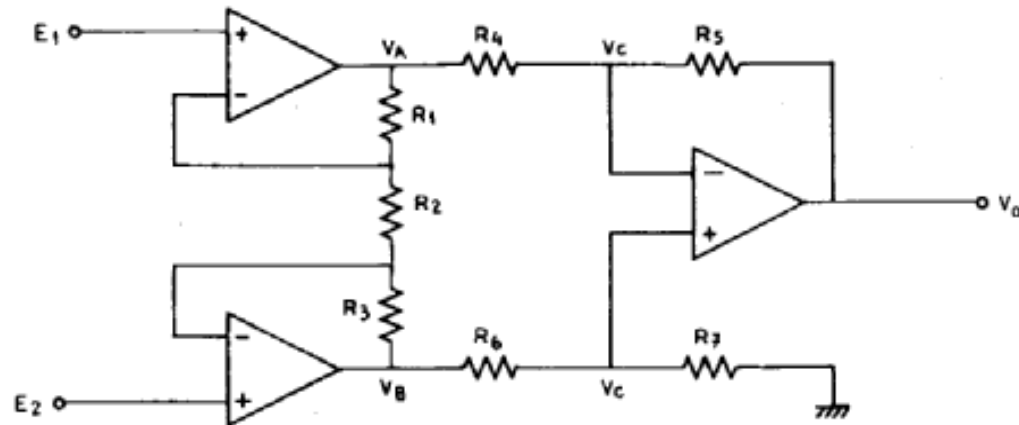
$$\frac{V_A - V_C}{R_4} = \frac{V_C - V_o}{R_5}$$

$$V_o = - \frac{R_5}{R_4} (V_A - V_B)$$

8 May 2023



# מגברי מכשור - סיכום



$$\Rightarrow \frac{V_o}{E_2 - E_1} = G_d = \frac{R_5}{R_4} \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right)$$

– איפוס הגבר משותף כאשר:

$$k = \frac{R_5}{R_4} = \frac{R_7}{R_6}$$

FIGURE 3.40 Instrumentation amplifier based on three op amps.

$$R_1 = R_3$$

$$R_5 = R_7$$

$$R_4 = R_6$$

$$G_d = k(1 + G) \longleftarrow G = \frac{2R_1}{R_2} \quad \text{נסמן:}$$

– עבור k מסוים ההגבר נקבע ע"י G (ע"י כיוון R2 בלבד)