



העמסה חשמלית והשפעות סביבה

העמסה חשמלית ומעגלים שקולים

העמסה חשמלית

מעגלים שקולים

השפעות סביבה

השפעות מפריעות והשפעות משנות

מודל כללי ודוגמאות

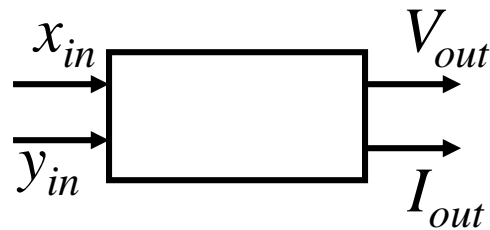
שיטות קיזוז



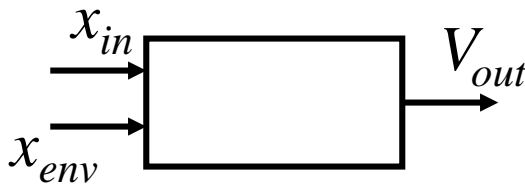
העמסה והשפעות סביבה



מודל אידיאלי: מתייחס לחייושן כקופסה שחורה בעלת כניסה יחידה ויציאה יחידה.



דרושים מודלים יותר מעשיים לתיאור:
1. העמסה - הגודל הנמדד מושפע מתהליך מעבר אנרגיה הקשור לתהליך החישה.



2. השפעות סביבה - תגובת החייושן מושפעת ממשתנים נוספים פרט לגודל הנמדד.



העמסה - כללי

תהליך החישה דורש המרת/העברת אנרגיה, גם אם מינימלית. משמעות ההעמסה היא: השפעת צריכת האנרגיה מהתהליך המדידה על הערך של הגודל הנמדד.



- לגודל הנמדד יש גודל נלווה שמכפלתם מתארת את מעבר ההספק/אנרגיה.
- מדידת זרימה (ספיקה): דורשת מפל לחץ – העמסה הידראולית.
 - מדידת טמפרטורה: דורשת מעבר חום (UA) – העמסה תרמית.
 - מדידת מתח: דורשת מעבר זרם – העמסה חשמלית.
 - מדידת כוח/לחץ: דורשת דפורמציה (תזוזה) – העמסה מכנית.



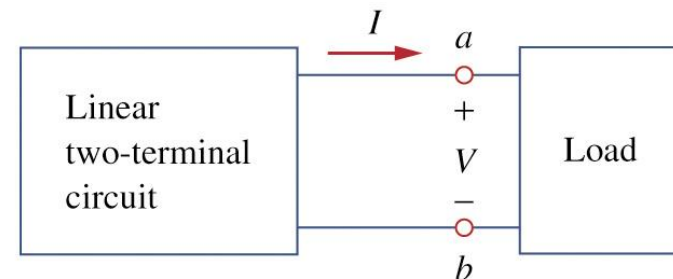
Loading Effects and Equivalent Circuits

Motivation ???

When electrical system or sub-system (linear circuit) is connected to an additional system (load) three questions get to mind:

1. Is the output of the system (voltage or current) maintained when connected to the load and under what conditions (loading effects of measuring devices)?
2. How the system is seen by the load or how the system behave with the load?
3. Is it possible to replace the system by a simple equivalent circuit that behave as seen by the load with the same voltage-current relation at the terminals?

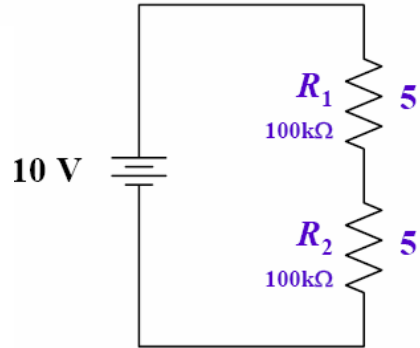
Is the voltage across the a - b terminals of the open circuit, the same as the connected circuit (when connected to the load) ?





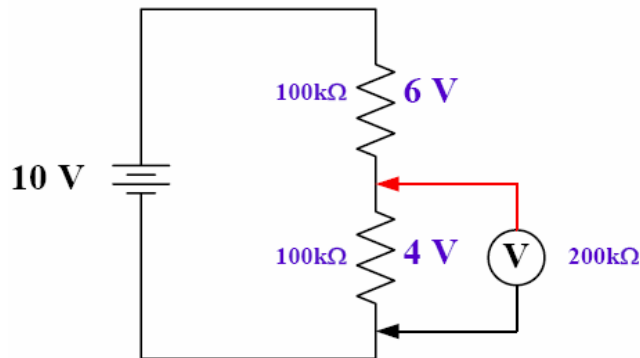
Loading Effects – measuring voltage across R_2

Circuit before measurement



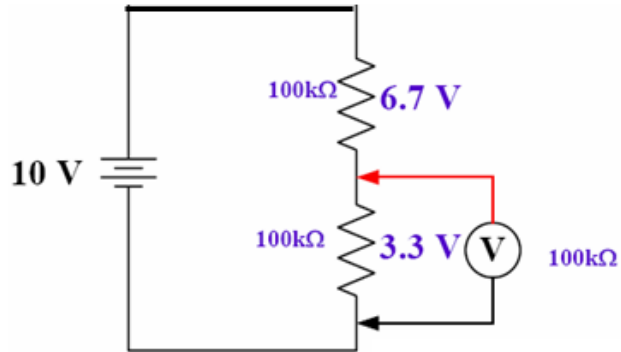
מה המתח על R_2 ?

Measurement #2



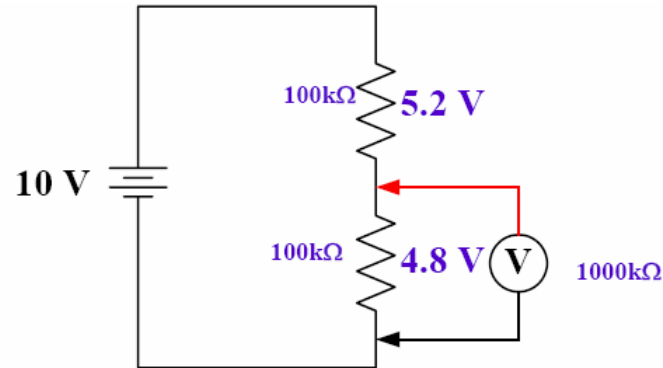
$$V_{meas} = \frac{200 // 100}{100 + 200 // 100} 10V = 4.0V$$

Measurement #1



$$V_{meas} = \frac{100 // 100}{100 + 100 // 100} * 10V = \frac{50}{150} * 10V = 3.33V$$

Measurement #3



$$V_{meas} = \frac{1000 // 100}{100 + 1000 // 100} 10V = 4.8V$$



העמסה חשמלית

העמסה חשמלית מתקיימת בין כל שתי מערכות או תתי מערכות המחוברות ביניהם באופן חשמלי.
דוגמא: העמסת חיישן ע"י מגבר או ממשק כלשהוא.

- תכונות חשמליות (מפרט):

- מתארות את החיישן או תת-המערכת בעזרת מעגל חשמלי אקוויוולנטי.
- מאפשרות לחשב את ההעמסה החשמלית ולתכנן את המערכת כך שההעמסה תעמוד בדרישות דיוק המדידה.



Thevenin's Theorem

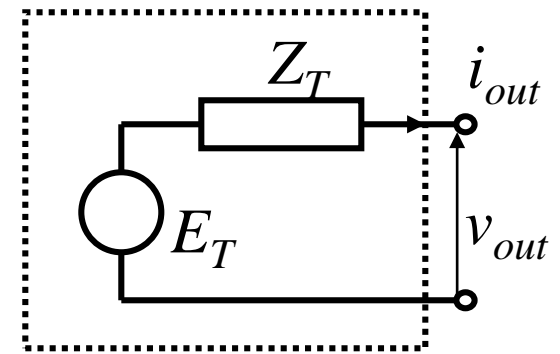
Thevenin's theorem states that a linear two-terminal circuit can be replaced by an equivalent circuit consisting of:

A voltage source E_T in series with an outlet impedance Z_T where:

E_T is the open circuit voltage at the terminals and,

Z_T is the outlet or equivalent resistance seen at the terminals when the independent sources are turned off.

Equivalent circuits have the same voltage-current relation at the terminals.



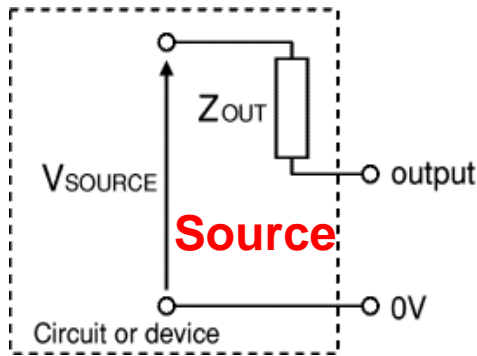
$$E_T = V_{out} (open)$$

$$Z_T = Z_{out}$$

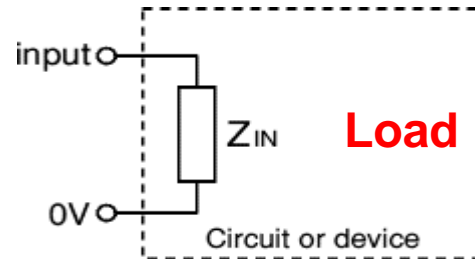
Voltage sources shorted
and current sources
opened



העמסה חשמלית - שקול תבנין של מקור ועומס



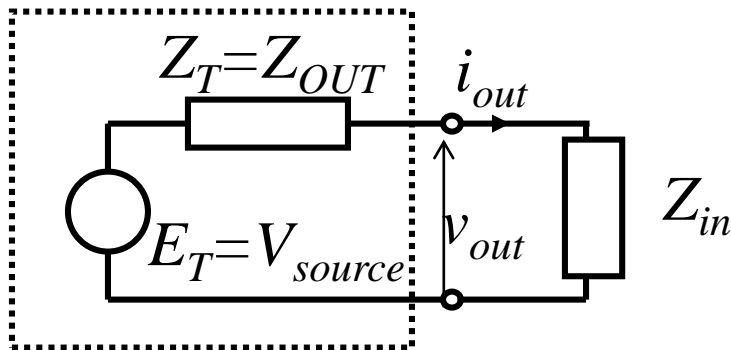
Usually **output impedances** should be **low**



Usually **input impedances** should be **high**

מערכת עם מקורות מתח מאופיינת חשמלית בעזרת שקול תבנין

עומס חשמלי האלמנט החשמלי מאופיין כאימפדנס כניסה

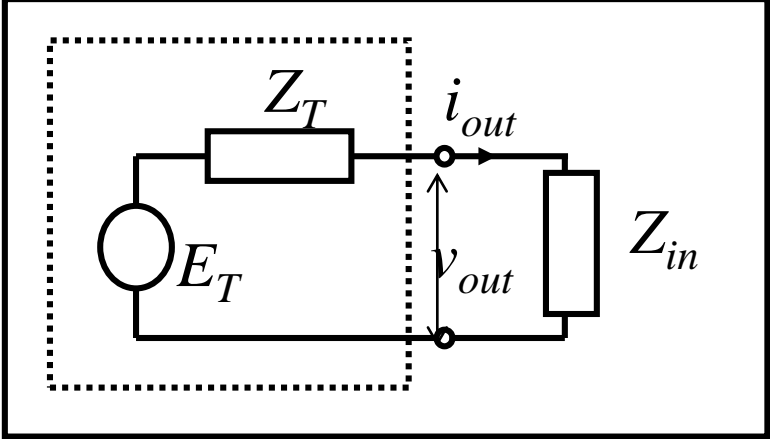


דוגמאות:

- חיישן (מד כוח) מועמס ע"י מגבר
- מעגל חשמלי מועמס ע"י מד-מתח



העמסה חשמלית - ניתוח בעזרת שקול תבנית



בגלל העמסה,

מתח היציאה, v_{out} קטן ממתח הריקים E_T

$$v_{out} = E_T \frac{1}{1 + \frac{Z_T}{Z_{in}}}$$

כדי שהעמסה תהיה זניחה דרוש:

$$Z_T \ll Z_{in} \quad (\text{Rule of Thumb: } 0.1\%)$$

— איפיון סטטי: אימפדנסים התנגדותיים, $Z_T = R_T$ $Z_{in} = R_{in}$

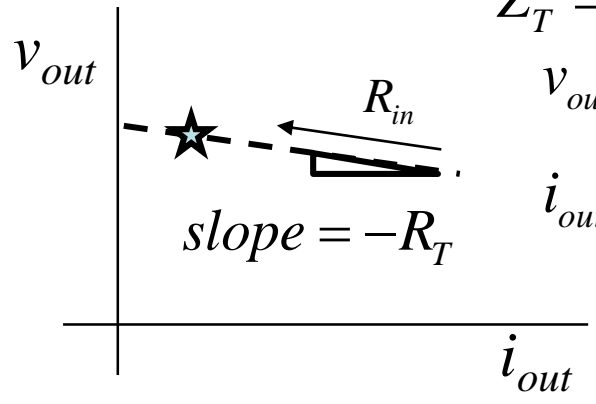
— מתח ההדקים יורד עם הזרם: $v_{out} = E_T - R_T i_{out}$

— הזרם קטן ככל שהתנגדות העומס גדלה $i_{out} = \frac{E_T}{R_T + R_{in}}$

— ולפיכך מתח היציאה מתקרב למתח הריקים

— נקודת העבודה ★ תלויה בהתנגדות הכניסה

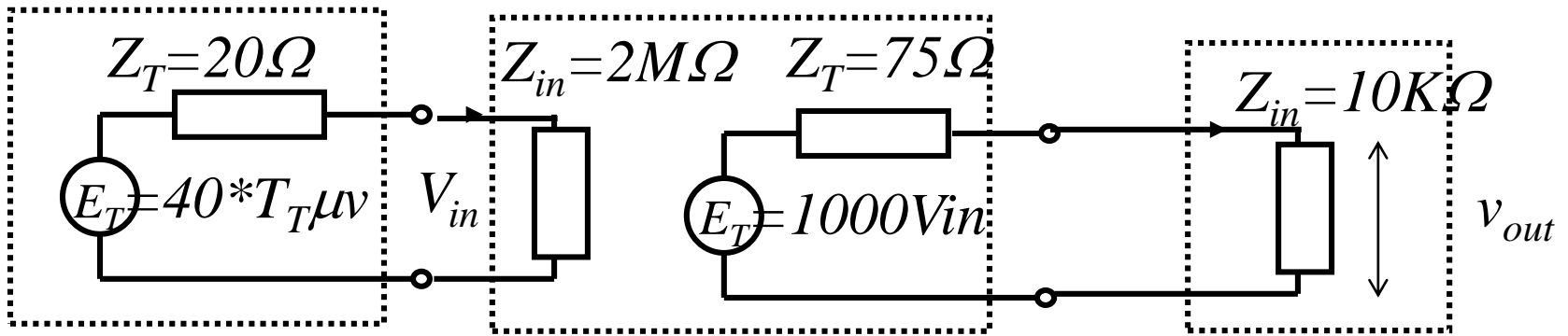
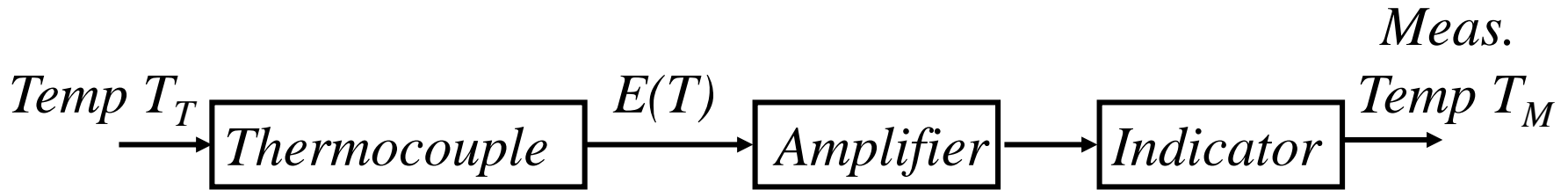
של האלמנט המעמיס





העמסה חשמלית

דוגמא: מדידת טמפרטורה עם צמד תרמי



באיזה שלב ההעמסה יותר בעייתית (יוצרת שגיאה יותר גדולה)?

העמסה חשמלית גורמת לשגיאה נוספת של 0.75%

$$error \approx -\frac{Z_T}{Z_{in}}$$

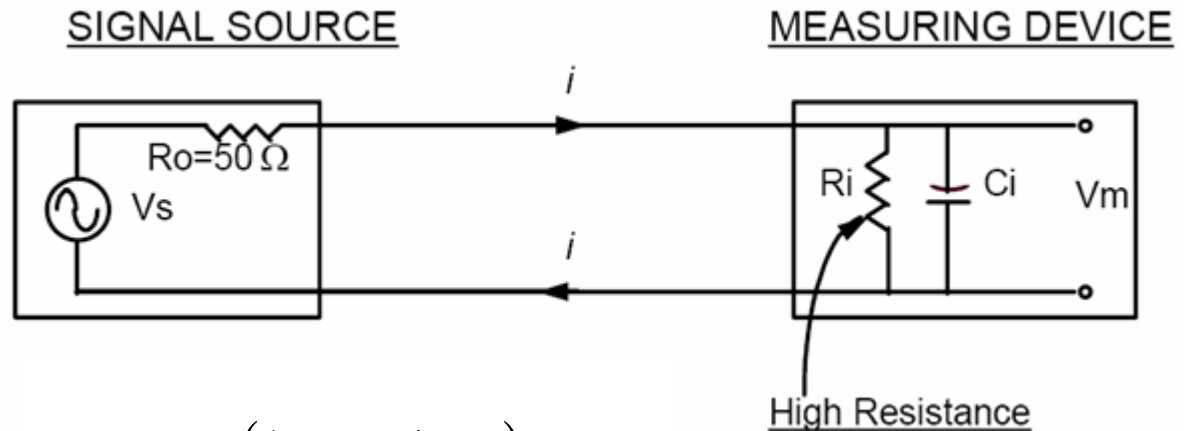


העמסה חשמלית

התחשבות בקיבול הכניסה של מכשיר המדידה

- V_s = voltage in volts [V]
- I = current in amps [A]
- [Ω] Z = impedance in ohms
- R = resistance in ohms [Ω]
- f = frequency [Hz]
- C = capacitance [F]

חיישן ממודל ע"י שקול תבנין
כמקור מתח שתלוי בגדול הנמדד
והתנגדות (או אימפדנס) יציאה



$$V_m = V_s \frac{1}{1 + R_o / Z_{in}} \leftrightarrow V_s = V_m (1 + R_o / Z_{in})$$

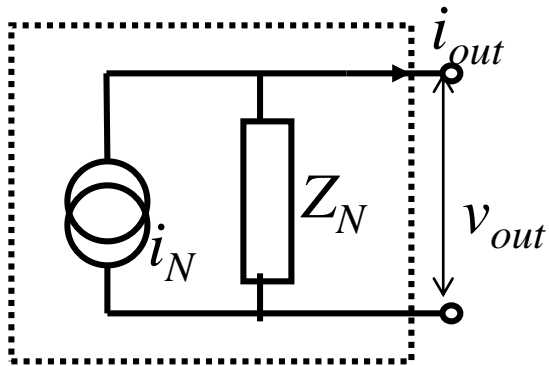
כשאימפדנס הכניסה Z_{in} מאוד גדול $V_m \sim V_s$
צריך לשים לב שכשהתדירות עולה אימפדנס הכניסה יורד!

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi fC}$$

$$Z_{in} = \frac{R_{in} Z_C}{R_{in} + Z_C}$$

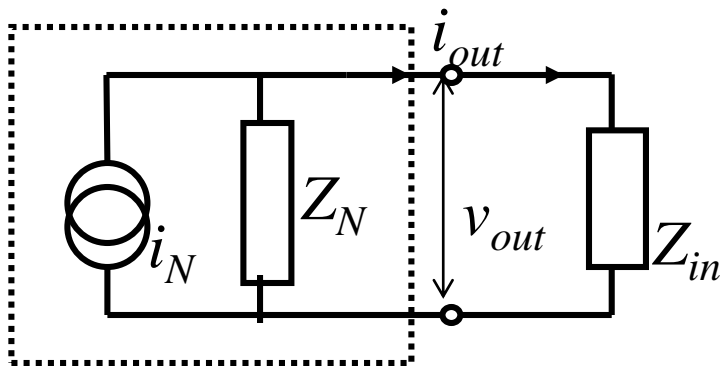


העמסה חשמלית – שקול נורתון



משפט נורתון (Norton Theorem):
כל רשת חשמלית עם רכיבים לינאריים ומקורות מתח וזרם ניתנת לתיאור (החלפה) ע"י רשת אקווילנטית המורכבת מקור זרם i_N במקביל עם אימפדנס יציאה Z_N

- i_N : זרם הקצר, זרם היציאה של הרשת המקוצרת
- Z_N : אימפדנס היציאה, אימפדנס הרשת כאשר כל מקורות הזרם מנותקים (פתוחים) (ומקורות המתח מקוצרים)



$$i_{out} = i_N \frac{1}{1 + \frac{Z_{in}}{Z_N}}$$

השפעת העמסה:

- להעמסה זניחה (במידת זרם) דרוש:

$$Z_{in} \ll Z_N$$

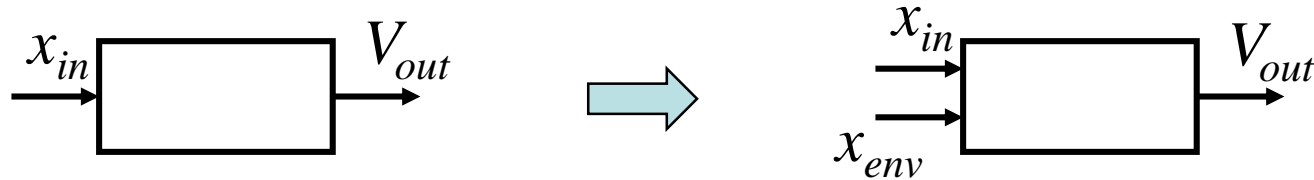


השפעות סביבה

השפעות הסביבה: קטנות אך בד"כ לא זניחות

גרף הכיול נקבע בתנאי סביבה סטנדרטיים:

טמפ' חדר 25°C , לחץ אטמוספרי, מתח אספקה נומינלי וכו'



שינוי תנאי הסביבה יכול להשפיע בשני אופנים:

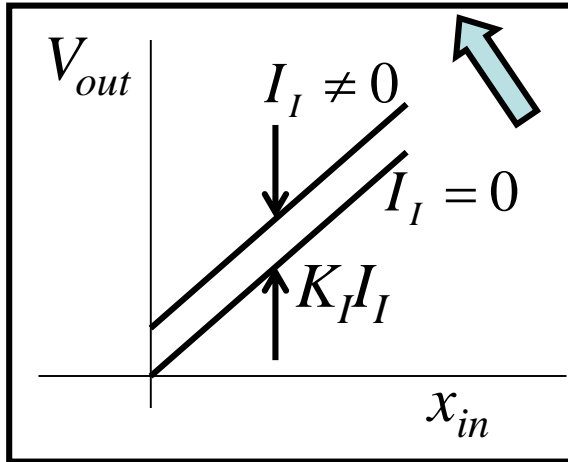
1. השפעה מפריעה – השפעה המפריעה לתגובת החיישן בלי קשר לגודל הנמדד, כלומר ע"י שינוי תגובת האפס.
2. השפעה משנה – השפעה המשנה את הרגישות של החיישן





השפעות סביבה

השפעות מפריעות (interfering)



- השפעות מפריעות מתווספות לתגובה ללא קשר לגודל הנמדד

I_I : שינוי הגודל המפריע מערכו הסטנדרטי

K_I : רגישות לגודל המפריע

– הפרעה: $\Delta V_o = K_I I_I$

- **דוגמאות:**

– טמפ' הייחוס של צמד תרמי

– סחיפה תרמית (Zero Drift),

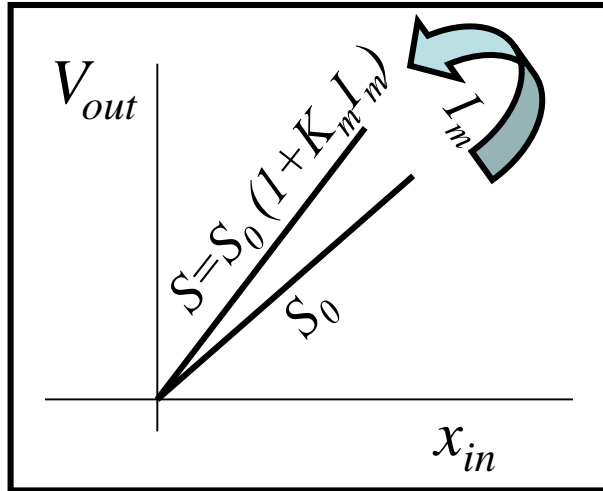
- נתון בד"כ ביחידות של $\%FS/^\circ C$

– רגישות ניצבת (Cross Sensitivity) של מד כוח או מד תאוצה



השפעות סביבה

השפעות משנות (modifying)



- השפעות שמשנות רגישות
 - S_0 : הרגישות הנומינלית
 - K_m : שינוי יחסי של הרגישות עם הגודל המשנה
 - I_m : שינוי הגודל המשנה מערכו הסטנדרטי
 - הרגישות החדשה: $S = S_0 (1 + K_m I_m)$
- דוגמאות:

– מקדם רגישות תרמי (α) Temperature Coeff. of Sensitivity
 נתון ביחידות של $\%reading/^\circ C$: $S = S_0(1 + \alpha \Delta T)$

S_0 : רגישות נומינלית, α : מקדם רגישות תרמי, ΔT : שינוי הטמפרטורה

– שינוי במתח האספקה כאשר הרגישות פרופורציונלית למתח האספקה
 $S = K_N(V_0 + \Delta V_0)$

K_N : קבוע הפרופורציה, V_0 : מתח אספקה נומינלי, ΔV_0 : שינוי במתח האספקה



השפעות סביבה

דוגמא – מד תאוצה

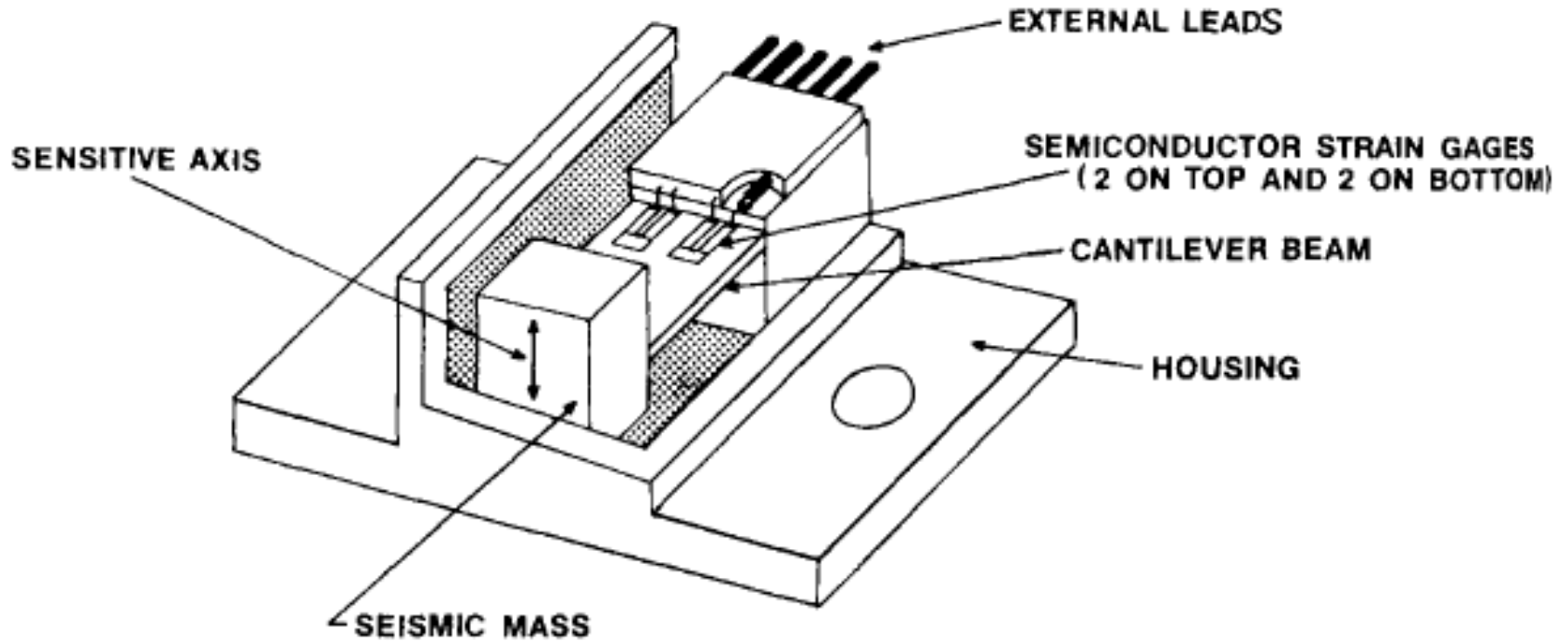


FIGURE 7-11. Bonded-semiconductor-strain-gage accelerometer.
(Courtesy of Entran Devices, Inc.)



השפעות סביבה

השפעות סביבה

שינויי טמפרטורת הסביבה:

שינוי ההתנגדות של מדי העיבור

שינוי הרגישות של מדי העיבור

שינוי אורך מד העיבור עקב שינוי אורך הקורה??

שינוי הקשיחות של הקורה

שינויי טמפרטורה מקומית עקב חימום עצמי:

שינוי ההתנגדות של מדי העיבור

שינוי הרגישות של מדי העיבור

חוסר כיוול של ממשק המדידה עקב סחיפה תרמית:

שגיאת אפס

תאוצות לא בכוון המדידה:

פיתול, כפיפה ואו מתיחה של הקורה בהתאם (רגישות ניצבת).

שינויי לחץ, שדה חשמלי



השפעה משנה דוגמא

Low Temperature Coefficient Triaxial ICP[®] Accelerometers

For Powertrain Testing

החברה מדגישה שמקדם הרגישות התרמי נמוך

Highlights

- Temperature coefficient of less than 0.0125% / °F (0.02% / °C)
- 10 mV/g sensitivity
- Measurement frequency to 10 kHz
- Operating temperature from -65 to +325 °F (-54 to +163 °C)
- Titanium housed and hermetically sealed in a small 0.4 in (10 mm) cube
- Available in stud and adhesive mounting configurations

$$\alpha < 0.02\% / ^\circ C$$

$$S_0 = 10 (mV/g)$$



$$S = S_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

רגישות:

$$\Delta S / S_0 < (0.0002 * \Delta T) mV/g$$

שגיאת הרגישות:

$$\Delta S / S_0 < 0.002 = 0.2\%$$

עבור $\Delta T = 10^\circ C$



השפעה משנה והשפעה מפריעה

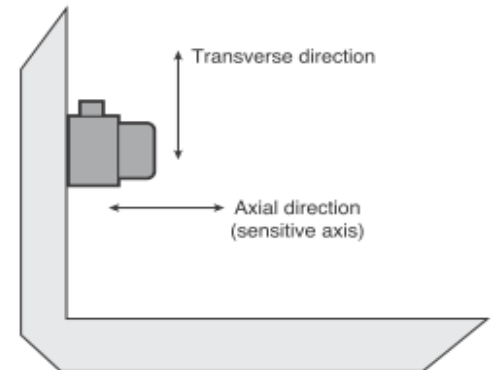
דוגמאות ממפרט של מד תאוצה

Technical Data

Type	Units	8044
Acceleration Range	g	-20000 ... 30000
Acceleration Limit	g	-30000 ... 100000
Transverse Acceleration Limit	g	20000
Sensitivity	pC/g	-0,3
Threshold	grms	0,07
Resonant Frequency, mounted, nom.	kHz	90
Frequency Response $\pm 5\%$	Hz	0 ... 8000
Amplitude Non-linearity	%FSO	± 1
Insulation Resistance @ R.T.	Ω	$>10^{13}$
Capacitance, nom.	pF	60
Transverse Sensitivity	%	≈ 5
Base Strain Sensitivity @250 $\mu\epsilon$	g/ $\mu\epsilon$	0,3
Long Term Stability	%	1
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/ $^{\circ}\text{C}$	-0,02
Temperature Range Operating	$^{\circ}\text{C}$	-195 ... 200



חיישן פייזואלקטרי
ללא מגבר פנימי



Transverse Sensitivity
Specified as
%axial Sensitivity

מפריעה

משנה



השפעות סביבה

מודל כללי

$$V_{out} = b + K_I I_I + S_0 (1 + K_m I_m) x_{in} + N(x_{in}) \quad \text{במקרה הכללי:}$$

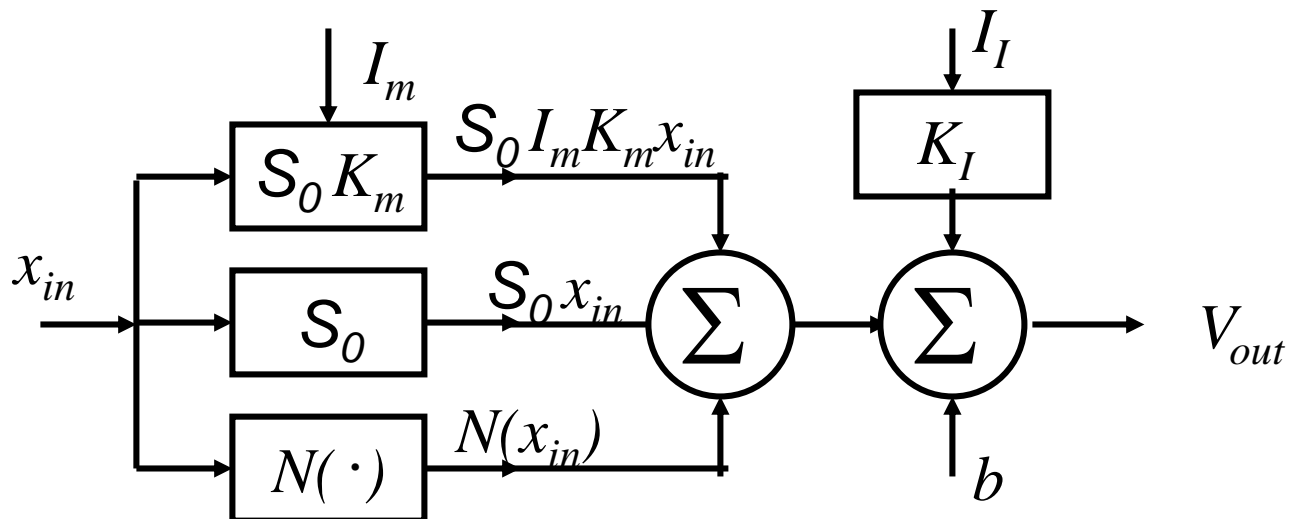
b : ההיסט

$K_I I_I$: שינוי בגודל המפריע והרגישות לגודל המפריע

S_0 : הרגישות הנומינלית

$K_m I_m$: שינוי הגודל המשנה והרגישות לגודל המשנה

$N(x_{in})$: אפקטים לא ליניאריים





דוגמא: חיישן לחץ מבוסס מדי עיבור

Absolute pressure transducer

SPECIAL FEATURES

- Nominal (rated) pressure 10 bar to 3,000 bar
- For static and dynamic pressure variance, pressure peaks and pressure fluctuations
- Principle of measurement: foil strain gage

Top Class

- Better temperature response
- Individually documented values
- Improved accuracy class
- Closer sensitivity tolerance (suitable for parallel connection, for differential pressure measurement, for example)
- PT100 for temperature compensation in four-wire circuit



P3 Top Class



P3MB version with fixed cable



P3MBP version with plug connection

מה הרגישות ?

מהי הרגישות לטמפרטורה כגודל מפריע? משנה?



דוגמא: חיישן לחץ מבוסס מדי עיבור

Type		P3, P3MB. P3MBP									
Mechanical input quantities											
Pressure type		absolute pressure									
Principle of measurement		foil strain gage									
Measuring range, 0 bar...	bar	10	20	50	100	200	500	1000	2000	3000	
Accuracy class ¹⁾		0.2	0.15	0.2	0.15		0.1		0.2		
Output characteristics											
Nominal (rated) sensitivity		mV/V	2								1.5
Sensitivity tolerance		%	0.25	0.2			0.15				
Effect of temperature on zero signal in the nominal (rated) excitation voltage range per 10 K, rel. to nominal (rated) sensitivity											
in the nominal (rated) temperature range		%	±0.1								
in the operating temperature range		%	±0.15								
Effect of temperature on sensitivity in the nominal (rated) excitation voltage range per 10 K, rel. to actual value											
in the nominal (rated) temperature range		%	±0.1								
in the operating temperature range		%	±0.2								
Characteristic curve deviation (setting of initial point)		%	±0.20	±0.15	±0.2	±0.15	±0.10		±0.2		
Repeatability per DIN 1319		%	±0.05								

השפעות סביבה – חיישן תאוצה

ADXL345

SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 2.5\text{ V}$, $V_{DDIO} = 1.8\text{ V}$, acceleration = 0 g, $C_S = 10\ \mu\text{F}$ tantalum, $C_{IO} = 0.1\ \mu\text{F}$, output data rate (ODR) = 800 Hz, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Test Conditions	Min	Typ ¹	Max	Unit
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Each axis User selectable		$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$		g
Nonlinearity	Percentage of full scale		± 0.5		%
Inter-Axis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ²			± 1		%
OUTPUT RESOLUTION					
All g Ranges	Each axis 10-bit resolution		10		Bits
$\pm 2\text{ g}$ Range	Full resolution		10		Bits
$\pm 4\text{ g}$ Range	Full resolution		11		Bits
$\pm 8\text{ g}$ Range	Full resolution		12		Bits
$\pm 16\text{ g}$ Range	Full resolution		13		Bits
SENSITIVITY					
Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	Each axis All g-ranges, full resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 2\text{ g}$, 10-bit resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution	115	128	141	LSB/g
	$\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution	57	64	71	LSB/g
	$\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution	29	32	35	LSB/g
Sensitivity Deviation from Ideal	All g-ranges		± 1.0		%
Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$	All g-ranges, full resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 2\text{ g}$, 10-bit resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution	7.1	7.8	8.7	mg/LSB
	$\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution	14.1	15.6	17.5	mg/LSB
	$\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution	28.6	31.2	34.5	mg/LSB
Sensitivity Change Due to Temperature			± 0.01		%/°C
0 g OFFSET					
0 g Output for X_{OUT}, Y_{OUT}	Each axis	-150	0	+150	mg
0 g Output for Z_{OUT}		-250	0	+250	mg
0 g Output Deviation from Ideal, X_{OUT}, Y_{OUT}			± 35		mg
0 g Output Deviation from Ideal, Z_{OUT}			± 40		mg
0 g Offset vs. Temperature for X-, Y-Axes			± 0.4		mg/°C
0 g Offset vs. Temperature for Z-Axis			+1.2		ma/°C
NOISE					



השפעות סביבה – חיישן תאוצה

מהשקף הקודם

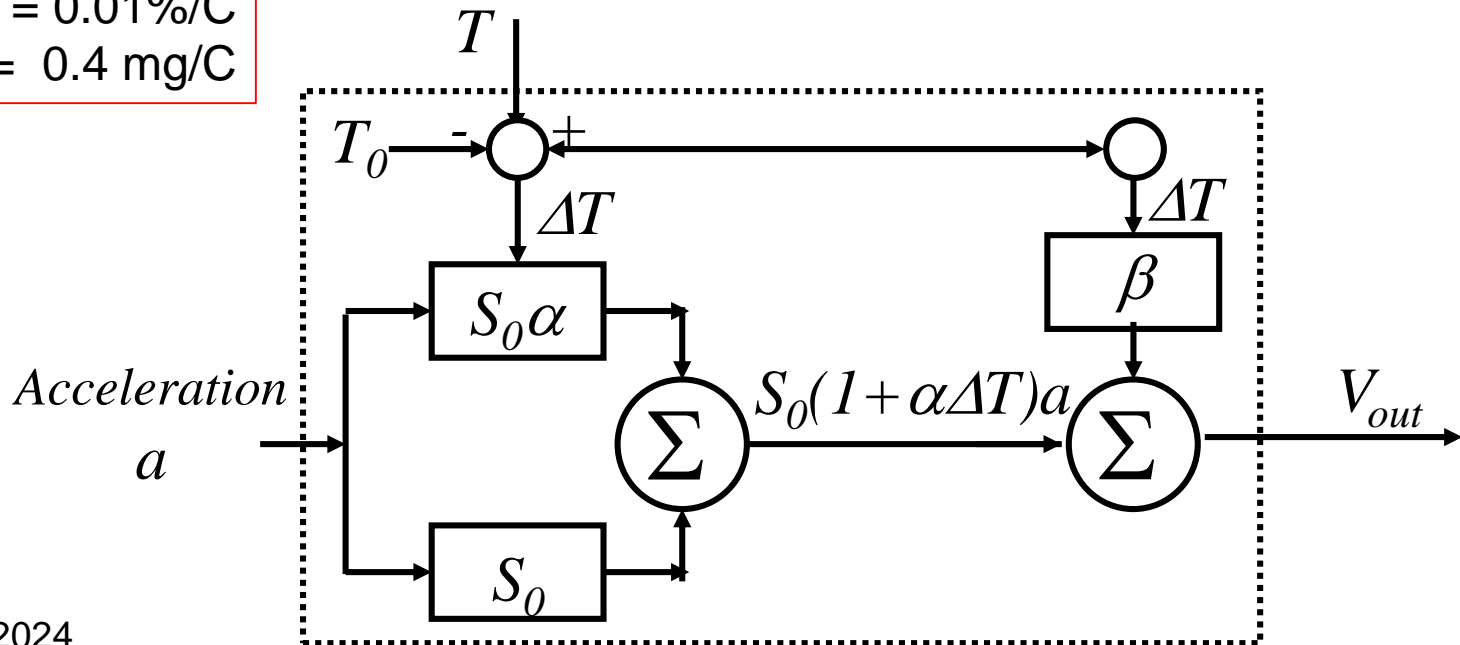
שינוי הרגישות בגלל שינוי טמפרטורה (השפעה משנה):

כאשר: $S = S_0(1 + \alpha\Delta T)$ S_0 -רגישות נומינלית, α -מקדם רגישות תרמי

שינוי ההיסט בגלל שינוי טמפרטורה (השפעה מפריעה):

כאשר: $\Delta V_{out} = \beta\Delta T$ β - רגישות ההיסט לטמפ'

מהשקף הקודם (x):
 $S_0 = 256 \text{ bits/g}$
 $\alpha = 0.01\%/\text{C}$
 $\beta = 0.4 \text{ mg/C}$





השפעות סביבה

שיטות קיזוז #3 - #1

1. תכן חיישן

- רגישות זניחה לתנאי סביבה
- רגישות גבוהה לגודל הנמדד

2. קיזוז מחושב של ההפרעות

- דורש כיוול למדידת K_m ו- K_I
- דורש מדידה של הגדלים המפריעים

3. סינון:

- סינון כניסה: סינון רעידות, סינון חשמלי, סינון תרמי
- סינון יציאה: אפקטיבי כאשר אות היציאה הרצוי שונה מאות היציאה כתוצאה מההפרעות, למשל בתחום התדר



השפעות סביבה

שיטת קיזוז #4 - קיזוז עם אלמנט לא ליניארי

4. קיזוז אי-ליניאריות עם אלמנט לא-ליניארי

– דוגמא: טרמיסטור במעגל גשר





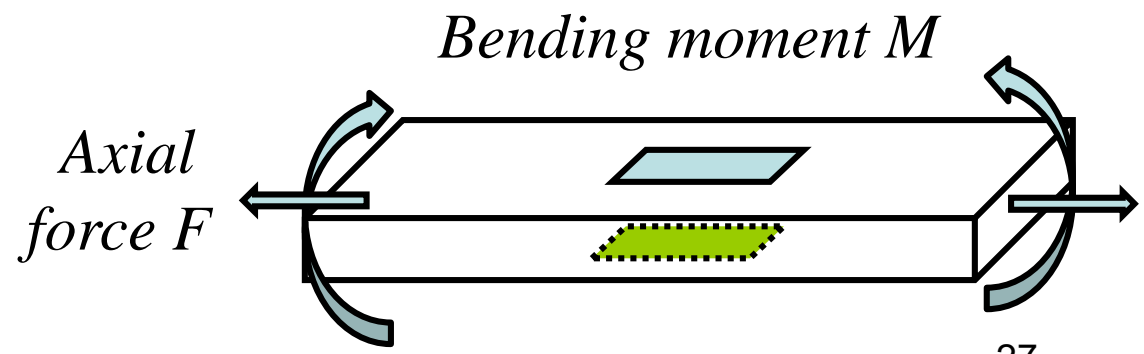
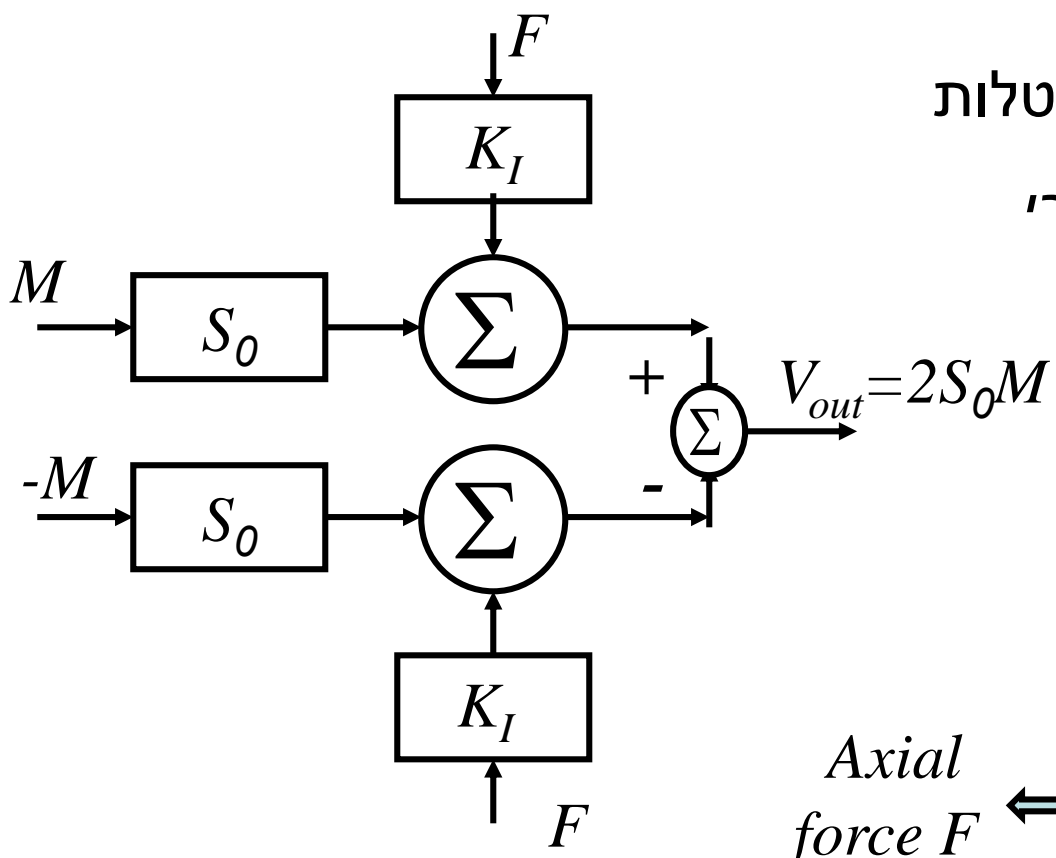
השפעות סביבה

שיטת קיזוז #5 - קיזוז דיפרנציאלי

5. קיזוז דיפרנציאלי

– כניסות בעלות השפעות מבטלות

– דוגמא: קיזוז השפעת כוח צירי על חיישן כפיפה מבוסס מד עיבור





השפעות סביבה

שיטת קיזוז #6 - מודולציה (אפנון)

