



מבחן מועד א' – 26.7.2020

משך המבחן – שלוש שעות.

מוותר השימוש בכל חומר עזר, אסור להיעזר באנשים אחרים בכל צורה

שאלה 1: מדי עיבור למדידת מומנט פיתול (25%)

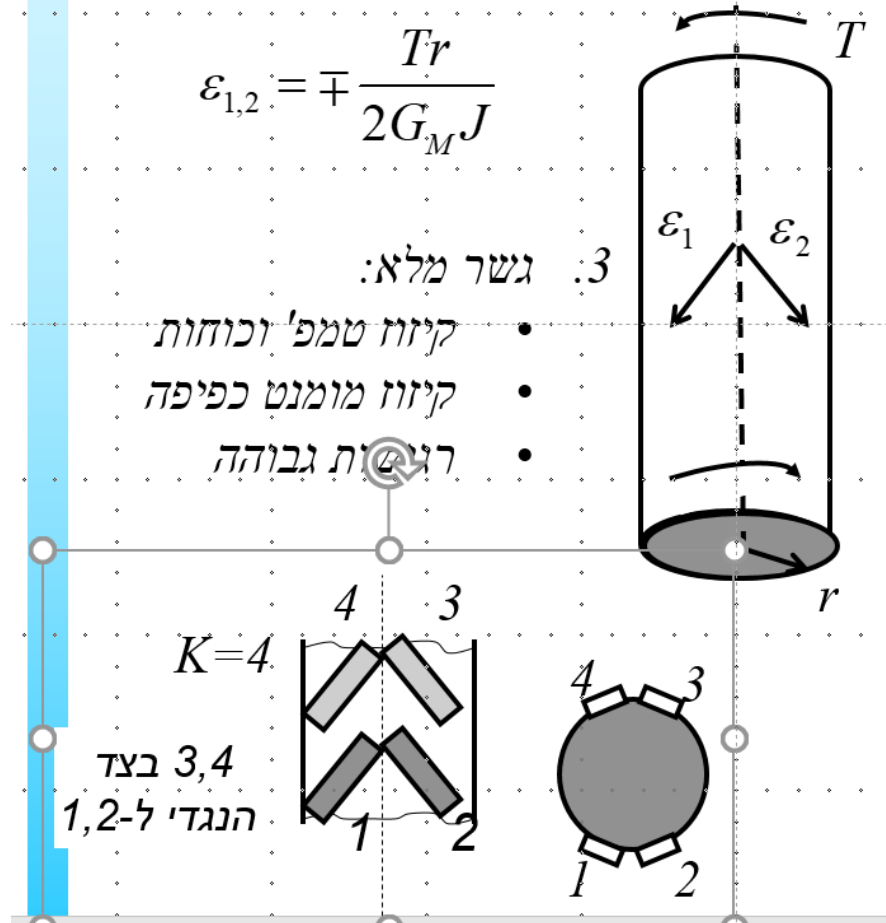
דרוש למדוד מומנט פיתול בתחום עבודה של $\pm 100N-m$ שמופעל על ציר מסתובב עם רדיוס $r=0.03m$.

(מעוות הפיתול γ שנוצר בגלל מומנט פיתול T הוא $\gamma = \frac{2T}{\pi G_M r^3}$ כאשר G_M הוא מודול הגזירה

$$G_M = 80GPa = 8 \cdot 10^{10} N/m^2$$

א. נתונים מדי עיבור בעלי התנגדות נומינלית של 120Ω וקבוע $G=2.0$. איך תמקם את מדי-העיבור ואיך תחבר אותם בגשר כדי לקבל רגישות מקסימאלית?

תשובה: משקף 26





ב. מהי הרגישות ביחידות של $\mu V/V/N-m$? האם המדידה רגישה לכוח צירי? למומנט כפיפה? לטמפרטורה?

$$\delta = \pm G\gamma = \pm \frac{2GT}{\pi G_M r^3} = \pm \frac{2 \cdot 2 \cdot T}{3.14 \cdot 8 \cdot 10^{10} N/m^2 \cdot 0.03^3 m^3} = \pm \frac{10^{-4}}{6.29 \cdot 3^3} T = \pm 0.5910^{-6} T$$

תשובה: $\delta = \pm 0.5910^{-6} T$

$$V_{out} = 4 \frac{V_s}{4} G\gamma = V_s \frac{2GT}{\pi G_M r^3} = 0.5910^{-6} T V_s$$

רגישות: $S = 0.59 \mu V / V / N - m$

יש קיזוז למומנט כפיפה, כוח צירי וטמפ

ג. איזה מתח אספקה כדאי לבחור כדי לקבל רגישות מקסימאלית כשידוע שההספק המקסימלי שניתן לספק למדי העיבור הינו $P=0.21 \text{ Watt}$. (אפשר לעגל את התשובה הסופית)

$$\Rightarrow V_s \leq 2\sqrt{R_0 P_{max}} = 2\sqrt{120 \cdot 0.21} = 2 \cdot 5.02 = 10.04V$$

תשובה: משקף 32

ד. כדי לבדוק את הרגישות החליטו להשתמש בנגד כיוול ולבדוק את תגובת המעגל. איזה נגד כיוול תחבר במקביל לאחד ממדי-העיבור כדי לדמות פיתול בקצה תחום העבודה?

$$\delta_c = 4 \cdot 0.59 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 236 \mu S$$

תשובה: $\delta_c = 236 \mu S$

$$R_c = -R \left(1 + \frac{1}{\delta_c} \right) = -120 \left(1 - \frac{10^6}{236} \right) = 508355 \text{ Ohm}$$

ה. משתמשים במתח אספקה שנבחר בסעיף ג ומחברים את היציאה של מעגל הגשר למגבר מכשור. מה צריך להיות ההגבר של מגבר המכשור אם רוצים לדגום את היציאה שלו עם דוגם שמתח הכניסה שלו הוא $\pm 5V$. נתון כי עבור המגבר, $CMRR=200,000$. מהו מתח היציאה מהמגבר בגלל ההגבר המתח המשותף? מהי השגיאה היחסית בקצה תחום העבודה?

$$V_{out,max} = 0.5910^{-6} \cdot 100 \cdot 10 = 0.59 mV$$

תשובה: $V_{out,max} = 0.59 mV$

$$A_d = 5000 / 0.59 = 8474 \ll$$



Technion - Israel Institute Of Technology
Faculty Of Mechanical Engineering

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת מכונות
סמסטר חורף תשפ"א
מערכות משולבות חיישנים 035033
שגיאה

$$G_c E_c = \frac{G_d}{CMRR} \frac{V_s}{2} = \frac{8474}{200000} \frac{10}{2} = 0.21V$$

$$\frac{G_c E_c}{G_d E_d} = \frac{0.21}{5} = 0.042$$

שאלה 3 : חיישני כוח פיזו-אלקטרי בהשוואה לחיישן כוח עם מדי עיבור (50%)

נתון חיישן תכוח פיזו-אלקטרי ללא מגבר מטען פנימי.

נתונים:

תחום כוחות: 0-750N

רגישות: 4pC/N

לינאריות: 1%FSO

תחום התדרים שבו החיישו מעביר את מדידת כוח בדיוק של עד 10% הוא: 1-XHz כאשר X הוא מספר

$$\text{שנוצר מ-4 הספרות } \frac{1}{\omega_n^2} = \frac{m}{k} = 0.12 \rightarrow m = 0.12 * 10^{-3} k = 0.12 * 37.500 = 4.5 Kg$$

(1) תגובת התדירות של החיישן:

(a) מהם הערכים השכיחים למקדם ריסון (ξ) מתאים לחיישנים פיזואלקטריים. בחרו מקדם ריסון בתחום הזה והניחו שזה הערך האמיתי.

תשובה: $\xi=0.01$

(b) מהו התדר הטבעי של החיישן?

תשובה: התדר המקסימאלי שבו הדיוק הוא 10% קשור לתדר הרזוננס: $f_r = X/0.3 \ll X=0.3f_r$

כשמקדם הריסון נמוך, תדר הרזוננס-תדר הטבעי. $f_n = X/0.3 \ll$

עבור $f_n = 22630Hz \ll X = 6789Hz$

(c) שרטטו באופן מקורב את תגובת התדירות של החיישן. ציינו באופן ברור את תחום התדרים בו דיוק המדידה יותר טוב מ-10% ואת תדר הרזוננס של החיישן.

תשובה: שקף 22. נחשב גם את תדר הפינה של המסנן מסדר ראשון מעביר גבוהים: $2 * fL = 1 \ll$

$\omega c = \pi \ll fL = 0.5Hz$



Technion - Israel Institute Of Technology
Faculty Of Mechanical Engineering

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת מכונות
סמסטר חורף תשפ"א
מערכות משולבות חיישנים 035033

(d) נניח שיש כוח שמעורר תדרים סביב התדר הטבעי של המערכת – בתחום 0.5-1.5 התדר הטבעי. האם הדוגם שבחרתם בפרויקט מתאים לדגום את המתח שנוצר? נמקו.
תשובה: צריך לבדוק שתדר הדגימה גדול מפעמיים התדר המקסימאלי כלומר פי 3 מהתדר הטבעי.

(e) מהו אורך הפולס המלבני המקסימאלי שהשגיאה בסופו תהיה קטנה מ-10%?

$$V_o = AK_V e^{-t/\tau}; \quad t < T \quad \text{משקף 17:}$$

חישוב קבוע הזמן: $\tau = 1/\omega_c = 1/\pi$

$$\ll \text{דרוש ש } \exp(-t/\tau) > 0.9 \ll t < \tau \ln(0.9) \ll t < -\ln(0.9)/\pi \ll T < 0.033 \text{sec}$$

(f) מה אורך המינימאלי של אות משולש שיבטיח שגיאה של פחות מ-10% במדידת הפיק?

$$\text{תשובה: משקף 23} \quad \frac{2\pi}{\omega_n} < \frac{T}{5} \ll T > 5/f_n \ll T > 5 * 0.3/X$$

כאן: T.0.22msec

(2) הורדת הגבול הנמוך של תחום התדרים של החיישן

(a) תכנן מעגל להורדת הגבול הנמוך של תחום התדרים של החיישן למתחת ל-0.25Hz. מה הדרישה על

הרכיבים במעגל? (אל תבחרו עדיין את ערכי הרכיבים)

תשובה: מגבר מטען (שקף 33) עם נגד וקבל במשוב. הדרישה ש:

$$C_f R_f = \tau$$

tau is determined from the requirement: $2 * f_L = 0.25 \rightarrow 2 / (2 * \pi * \tau) < 0.25$

$$\rightarrow \tau > 4 / (\pi) = 1.27 \text{ sec}$$

$$C_f R_f > 1.27$$

(b) נתונים נגד של 10GOhm וקבלים של 100,200,300,400pF. בחר קבל מתאים – מתוך הקבלים

הנתונים. מהם השיקולים בבחירת ערכי הקבל?

תשובה: כדי לקבל הגבר מקסימאלי – נבחר את הקבל עם הערך המינימאלי שעומד בדרישה של

$$f_L = 1/2 * \pi * \tau = 0.08 \text{Hz} \ll \tau = 2 \ll 200 \text{pF} \quad \text{הסעיף הקודם:}$$

(c) איך יושפעו התשובות לסעיף (1) מהורדת הגבול הנמוך של תחום התדרים של המערכת? לכל תת סעיף:

ציין האם התשובה תשתנה. אם לא, נמק. אם כן, מה תהיה התשובה בהינתן הגבול החדש.



תשובה: a & b & d לא יושפעו – כי קשורים לתגובת התדירות בתדרים גבוהים שמושפעת מהגביש.

c: הגבול הנמוך של פונקציית תגובת התדירות בדיוק של 10% ייקטן ל $2 * f_L = 0.16 \text{ Hz}$

e: $T < -2 * \ln(0.9) = 0.21 \text{ sec} \ll t < -\tau * \ln(0.9)$

(3) מודדים אות שמשנתנה באופן סינוסואידלי עם אמפליטודה של 4V ותדר של 1000Hz.

(a) בהזנחת השגיאה הדינאמית והאי-ליניאריות של החיישן: מה האמפליטודה והתדר של הכוח?

תשובה: משקף 21

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

$$K_V = K_q / C_N$$

משקף 16: ולמעשה בגלל מגבר המטען $KV = Kq/Cf$

נשים לב שהמונה של פת"ת הוא $k = 1/m * 1/\omega_n^2 = k$ הקשיחות של הגביש

$$KF = Kq/k = 4pC/N$$

באופן יותר מפורט

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

$$\frac{K_q}{C} \frac{\tau s}{(\tau s + 1)} \frac{1/k}{(s^2 / \omega_n^2 + 2\xi s / \omega_n + 1)}$$

$$\frac{K_q}{kC} \frac{\tau s}{(\tau s + 1)} \frac{1}{(s^2 / \omega_n^2 + 2\xi s / \omega_n + 1)}$$

$$\frac{K_F}{C} \frac{\tau s}{(\tau s + 1)} \frac{1}{(s^2 / \omega_n^2 + 2\xi s / \omega_n + 1)}$$

\ll ההגבר הוא $KF/Cf = 4pC/N/200pF = 0.02 \text{ V/N}$

אם האמפליטודה היא 4V \ll האמפליטודה של הכוח היא $4/0.02 = 200 \text{ N}$

(b) מה שגיאת האמפליטודה בהתחשב בשגיאה הדינאמית?

תשובה: נחשב את פת"ת ב 1000 הרץ – רק את 1 חלקי המכנה = 0.989

כלומר 200N זה רק 0.989 מהאמפליטודה האמיתית – 202N



Technion - Israel Institute Of Technology
Faculty Of Mechanical Engineering

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת מכונות
סמסטר חורף תשפ"א
מערכות משולבות חיישנים 035033

(c) מה שגיאת האמפליטודה בהתחשב בשגיאת האי-ליניאריות?

$$1\%FS = 7.5N$$

כלומר אמפליטודת הכוח היא $202N \pm 7.5N$

(4) את/ה שוקל חיישן כוח מבוסס מדי-עיבור במקום חיישן הכוח הפיזו-אלקטרי.

(a) נניח שמצאת חיישן כוח מבוסס מדי עיבור שתחום התדרים שבו השגיאה הדינאמית קטנה מ-10% הכי דומה לתחום התדרים של החיישן הפיזו-אלקטרי. צייר/י את תגובת התדירות של חיישן הכוח מבוסס מדי-העיבור שמצאת.

אותה תדירות גבוהה שבה הדיוק היא 10% - אבל אח"כ פת"ת יורדת ללא רזוננס!!! והפונקציה נשארת שטוחה בתדרים נמוכים.

(b) מה ההבדלים העיקריים בהשוואה לתגובת התדירות של החיישן הפיזו-אלקטרי? מדוע? תשובה: לעיל: כי הריסון יותר גבוה (0.7) ואין סינון בתדרים נמוכים.

שאלה 2 (25%)

דרוש למדוד מהירות תנועה של גוף עם חיישן *Moving Coil Sensors* עם מגנט קבוע בגודל $B=12,000 \text{ Gauss}$. ($\text{Gauss} = 10^{-8} \text{ Volt} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2$).

a. מה צריך להיות אורך החוט של הסליל בחיישן כדי לקבל רגישות של $48 \text{ mV} / (\text{cm} / \text{sec})$?

$$S = Bl = 48 \text{ mV} / (\text{cm} / \text{sec})$$

$$l = \frac{48 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 10^{-5}} = 4 \text{ m} \quad \ll V_o = Bl \frac{dy}{dt}$$

נניח שהקוטר הפנימי עליו מלופף הסליל הוא 1cm

$$l = 4 \text{ m} = \pi D_{\text{coil}} n$$

$$n = 4 / (\pi \cdot 0.01) = 127$$

b. מה אמפליטודה של מתח היציאה עבור תזוזה סינוסואידלית בתדר 10Hz ואמפליטודה של 1cm?

$$V_o = Bl \frac{dy}{dt} = Bl \cdot 1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 24 \text{ mV} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10 = 0.96\pi = 3.01 \text{ V}$$

c. דוגמים את מתח היציאה ע"י דוגם עם 12 ביטים שמקבל מתח כניסה של $\pm 5V$. מה המהירות המינימאלית שאפשר למדוד? מה השינוי המינימאלי בתדר של התזוזה מסעיף c (תזוזה באמפליטודה של 1cm) שאפשר למדוד.



Technion - Israel Institute Of Technology
Faculty Of Mechanical Engineering

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת מכונות
סמסטר חורף תשפ"א
מערכות משולבות חיישנים 035033

$$\Delta V_o = \frac{5}{2^{11}} = 2.44mV$$

$$\Delta V_o = 24mV \Delta v \rightarrow \Delta v = 2.44 / 24 = 0.051cm / sec \quad \text{תשובה:}$$

$$\Delta V_o = 48\pi mV \Delta f \rightarrow \Delta f = 2.44 / 48\pi = 0.008Hz$$

ד. מסתבר שצריך למדוד גם את המקום ולא רק את המהירות. מציעים להשתמש בחיישן השראות דיפרנציאלי שמחובר לגשר. האם אפשר להשתמש במקור מתח עם תדירות רשת החשמל בארץ (50 הרץ) כמקור מתח למעגל הגשר כדי למדוד את התזוזה מסעיף ב? אם לא, הצע תדר שמתאים. בכל מקרה: אילו תדרים יופיעו במתח היציאה מהגשר? איזה רכיבים תחבר ליציאה מהגשר כדי לקבל מתח שפרופורציוני לתזוזה?
תשובה: כן כי זה חמש פעמים התדר שמודדים
ביציאה: 40 ו-60 הרץ
מכפיל ומסנן

הערות:

שאלה 3:

3-1-d: תדר הדגימה לא קשור למספר הביטים של הדוגם!!! זה נתון בלתי תלוי.

3-1-e: נקבע מתגובת החיישן לפולס (שקף 17 בהרצאה 9) לא מפונקציית תגובת

התדירות