

מעבדה במכשור

הנדסה ביורפואית

מגישים:

נדב אמיתי

יובל כסיף

סול אמרה

תאריך:

22.06.2022

תוכן עניינים:

1	רקע תאורטי:	3
2	תשובות לשאלות הכנה:	6
2.1	שאלה 1:	6
2.2	שאלה 2:	6
2.3	שאלה 3:	8
2.4	שאלה 4:	9
2.5	שאלה 5:	9
2.6	שאלה 6:	9
2.7	שאלה 7:	9
2.8	שאלה 8:	10
2.9	שאלה 9:	10
2.10	שאלה 10:	10
3	מקורות	11

1 רקע תאורטי:

תרמיסטור הינו רכיב חשמלי מוליך למחצה שהתנגדותו משתנה כתלות בטמפרטורה. ככל שהטמפרטורה עולה ההתנגדות יורדת. הקשר בין ההתנגדות לטמפ' מתואר באמצעות המשוואה הבאה:

$$(1) \frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3$$

כאשר T מייצג את הטמפרטורה ביחידות קלווין, R את ההתנגדות ו A,B,C הינם קבועים שתלויים בתכונות הרכיב. על מנת לפשט את המשוואה ניתן להציב C=0 ולקבל בקירוב את הקשר האקספוננציאלי הבא:

$$(2) R_T = R_0 e^{\beta(T) \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]}$$

כאשר $T_0 = 298 [K]$, R_0 הינה ההתנגדות בטמפ' T_0 . [1]. הפרמטר β תלוי בחומר המוליך למחצה ובטמפ', כאשר ניתן להגיד שהוא קבוע (בקירוב) עבור טווח מסוים של טמפ', במקרה שלנו 35.5-42 מעלות צלזיוס.

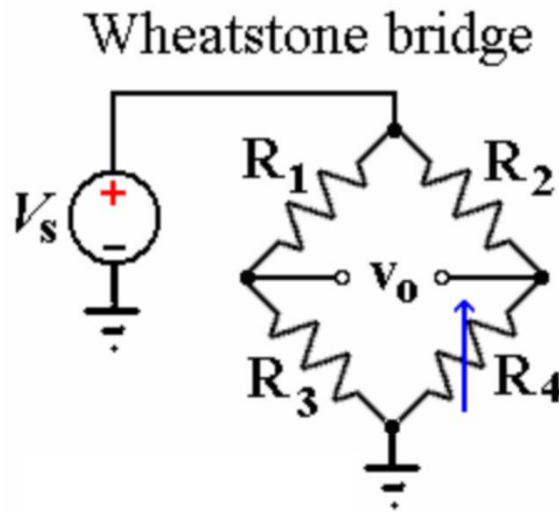
מקדם α ניתן לפיתוח:

$$(3) \alpha = \frac{dR}{R_T dT} = -\frac{\beta}{T^2}$$

חימום עצמי:

ככלל, כאשר זרם זורם בתרמיסטור, התנגדותו משתנה. תרמיסטור אידאלי אמור למסור את כל החום שנוצר אל הסביבה, אך בתרמיסטור מעשי, לא מצליח למסור את כל החום לסביבה וכתוצאה מכך התנגדותו יורדת יתר על המידה, כלומר הטמפ' גבוהה יותר. בעיה זו מעידה על שגיאה במדידה, ולכן נרצה להגדיר את השגיאה המקסימלית שאנחנו מוכנים לאפשר. לאחר שקבענו שגיאה מקסימלית (בטמפ') ניתן לחשב את ההספק המקסימלי שאנו מוכנים להעביר בתרמיסטור.

כדי שנוכל למצוא את ההספק המקסימלי, נחזיק את הטמפ' קבועה, אך בתנאי מתח משתנים, כך שבכל פעם שאנו משנים את המתח נמדוד מהו הזרם שעובר בתרמיסטור. מאחר וההספק מתקבל ע"י $V \cdot I$ ניתן להוציא גרף של הספק כנגד התנגדות התרמיסטור (שמתקבל ע"י $\frac{V}{I}$), או לחילופין באמצעות הקשר בין ההתנגדות לטמפ' ניתן להוציא גרף של הספק כנגד טמפ'. כמו כן, נשערך כי גרף זה בקירוב לינארי ולכן באמצעות רגרסיה לינארית ורווח בר סמך ניתן למצוא את הקשר בין שגיאת הטמפ' וההספק. מתוך ההתאמה הלינארית ניתן להציב את השגיאה המקסימלית שאנו מאפשרים ובכך לקבל את ההספק המקסימלי.



איור 1 - גשר וויטסטון [2]

באיור 1 ניתן לראות גשר וויטסטון לדוגמא, המורכב ממקור מתח, שלושה נגדים קבועים, ונגד משתנה אחד (כתלות בטמפ'). כמו כן, את השתנות הנגד R_4 ניתן למדוד כתוצאה מהשתנות המתח v_0 . המתח v_0 מתקבל ע"י:

$$(4) \quad v_0 = V_S \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_1} - V_S \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

המעגל מתוכנן כך שבמצב הרפרנס (טמפ' הרפרנס) המתח $v_0 = 0$, זאת באמצעות היחס בין הנגדים.

אם נגדיר $R_T = R_4$ נוכל לחשב את ההספק:

$$(5) \quad P_{R_T} = \frac{V_{R_T}^2}{R_T} = \frac{V_S^2 \cdot R_T}{(R_2 + R_T)^2}$$

נשים לב כי המכנה מורכב מגורמים חיוביים בלבד ולכן ניתן להגדיל את הביטוי בכך שנוריד את R_T מהמכנה ונקבל:

$$(6) \quad P_{R_T} \leq \frac{V_S^2 \cdot R_T}{R_2^2}$$

מאחר ואנו יודעים את הערך המקסימלי של R_T מתוך הוראות היצרן, ובנוסף יודעים מהו ההספק המקסימלי שאנו מאפשרים, נוכל לבחור את R_2 כך שלכל ערך של R_T יתקבל הספק שקטן מההספק המקסימלי.

כאמור, המתח הנמדד הינו v_0 , אנו רוצים שמתח זה יהיה תמיד חיובי ויעלה עם עליית הטמפ'. לכן, נבחר את R_1, R_3 כך שיתקיים ש- $v_0(T_{min}) = 0$. עקב הקשר בין R_T ל T ניתן לדרוש $v_0(R_{Tmax}) = 0$. מהצבה של דרישה זו במשוואה 4 נקבל:

$$(7) \frac{R_2}{R_{Tmax}} = \frac{R_1}{R_3}$$

בחירת הגבר:

אמנם יש קשר ישיר בין המתח הנמדד לטמפ', אך שינוי אופייני במתח כתוצאה משינוי R_T (שנובע משינוי טמפ') הוא מאוד נמוך, לכן נרצה להגבירו באמצעות מגבר מכשור. מתחי ההזנה של המגבר הינם $\pm V_s$, כמו כן נרצה להימנע מרוויה של המגבר, שכן במידה והדבר יקרה נאבד את הקשר החח"ע בין המתח לטמפ'. על מנת לעשות זאת, נבחר את ההגבר כך שהמתח המקסימלי שיתקבל אחרי המגבר לא יעלה על מתחי ההזנה. מתח זה מתקבל כאשר v_{0max} כלומר, טמפ' מקסימלית

[2]. T_{max}

2 תשובות לשאלות הכנה:

2.1 שאלה 1:

מתוך הקובץ 'S&H WITH VALUES.xls' , ועבור הטמפרטורות 35,37,39 מעלות צלזיוס, ההתנגדויות הן:

$$R_{T=35^{\circ}\text{C}} = 1471 [\Omega], R_{T=37^{\circ}\text{C}} = 1355 [\Omega], R_{T=39^{\circ}\text{C}} = 1249 [\Omega]$$

מתוך נוסחה 2: $R_T = R_0 e^{\beta(T) \cdot [\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}]}$ נקבל:

$$1471 = R_0 e^{\beta \cdot [\frac{1}{35+273.15} - \frac{1}{T_0}]}$$

$$1355 = R_0 e^{\beta \cdot [\frac{1}{37+273.15} - \frac{1}{T_0}]}$$

נחלק בין המשוואות:

$$\begin{aligned} \frac{1471}{1355} &= \frac{R_0 e^{\beta \cdot [\frac{1}{35+273.15} - \frac{1}{T_0}]}}{R_0 e^{\beta \cdot [\frac{1}{37+273.15} - \frac{1}{T_0}]}} = e^{\beta \cdot [\frac{1}{35+273.15} - \frac{1}{T_0} - \frac{1}{37+273.15} + \frac{1}{T_0}]} \\ &= e^{\beta \cdot [\frac{1}{35+273.15} - \frac{1}{37+273.15}]} = e^{\beta \cdot 2.0926 \cdot 10^{-5}} \end{aligned}$$

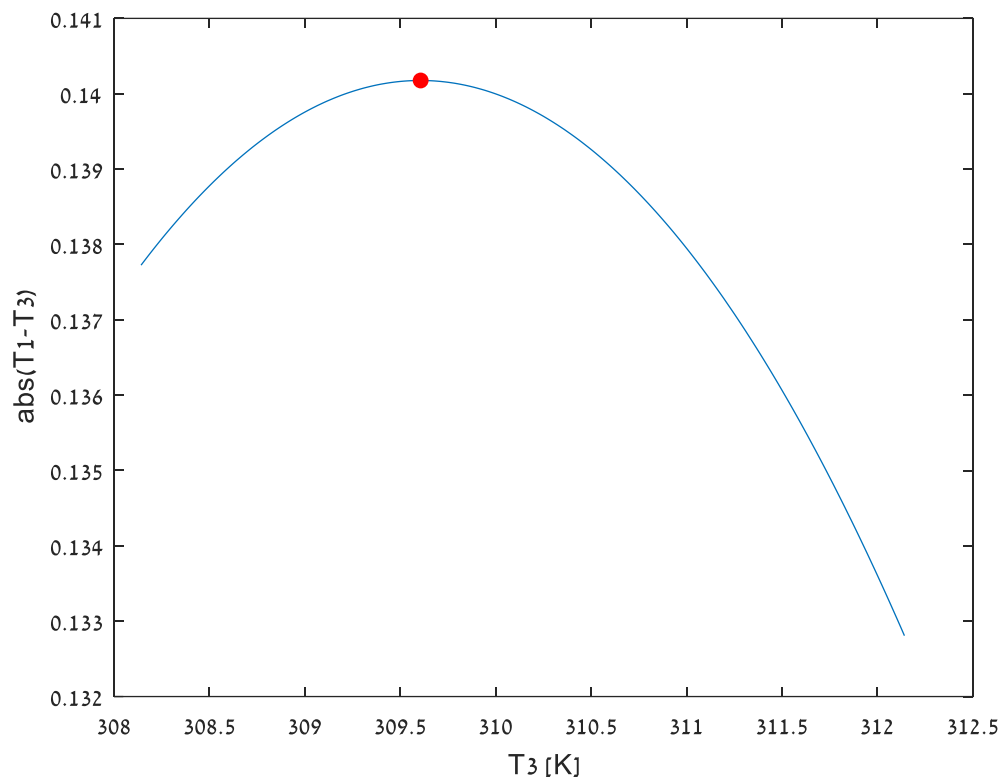
$$\beta \cdot 2.0926 \cdot 10^{-5} = \ln\left(\frac{1471}{1355}\right)$$

$$\beta = 3925.307 [^{\circ}\text{K}]$$

2.2 שאלה 2:

נשווה בין משוואות 1 ו-2. ראשית, ההשוואה נעשית בין ערכי הטמפר' השונים שנקבל מכל אחת מהמשוואות, לכן נרצה לבודד את T.

$$\begin{aligned} R_T = R_0 e^{\beta(T) \cdot [\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}]} &\rightarrow \frac{R_T}{R_0} = e^{\beta(T) \cdot [\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}]} \rightarrow \beta \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right] = \ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right) \rightarrow \\ \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right] &= \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right) \rightarrow \frac{1}{T} = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right) + \frac{1}{T_0} \rightarrow T = \frac{1}{\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right) + \frac{1}{T_0}} \end{aligned}$$



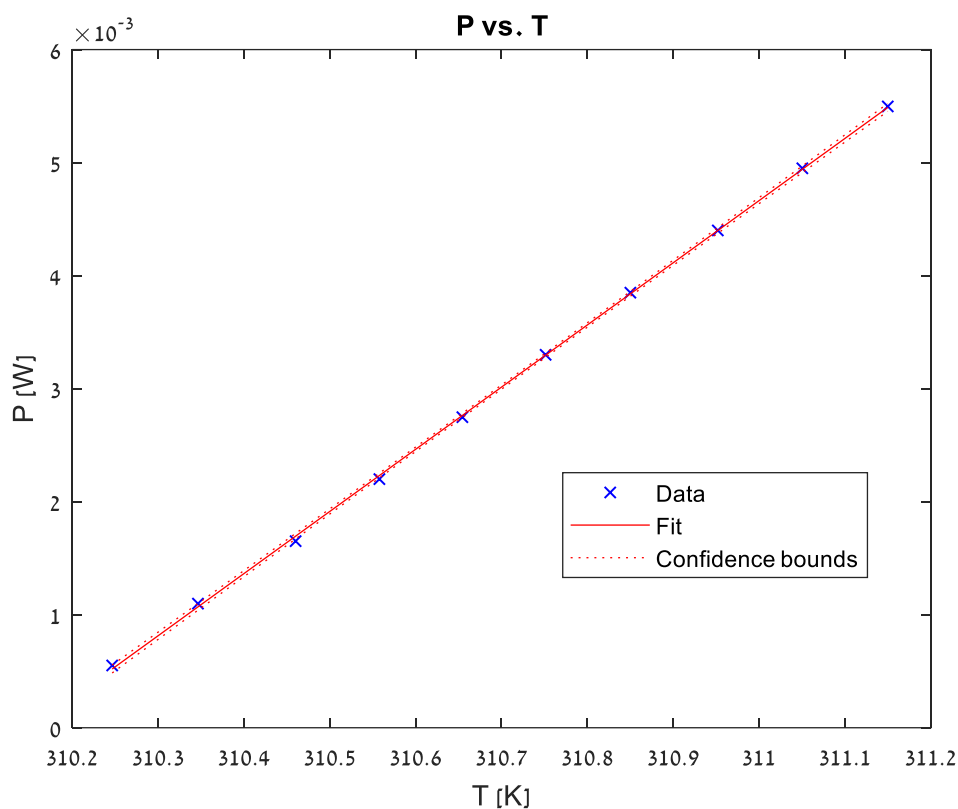
איור 2: ההפרש בין תוצאות החישוב בשתי הנוסחאות

מאיור זה ניתן לראות את ההפרש בין הטמפרטורות המחושבות באמצעות נוסחאות 1,2. ניתן

לראות כי השגיאה המקסימלית הינה 0.1402 וההפרש המקסימלי מתקבל עבור

$T = 309.6069$ [°K]. נשים לב כי הפרש זה הינו נמוך ולכן נוכל להסיק כי השימוש במשוואה

המקורבת בטווח הטמפרטורות הנתון הינו מדויק מספיק.



איור 3: ההתאמה הלינארית

מאיור זה ניתן לראות את ההתאמה הלינארית שקיבלנו באמצעות מודל fitlm עבור שערך של ההספקים מתוך הטמפרטורות. ניתן לראות כי קיבלנו התאמה טובה: $MSE = 6.5540 \cdot 10^{-10}$

טבלה 1: התוצאות שהתקבלו

מתח [V]	זרם [A]	התנגדות [Ω]	הספק [W]	הספק המשוערך [W]	טמפרטורה [°K]
0.862138	0.00064	1349.20	0.000551	0.000519	310.247
1.214706	0.00090	1343.70	0.001098	0.001069	310.347
1.485933	0.00111	1337.47	0.001651	0.001695	310.460
1.711821	0.00128	1332.16	0.002199	0.002231	310.558
1.909427	0.00144	1326.91	0.002748	0.002763	310.655
2.088243	0.00158	1321.67	0.003299	0.003296	310.752
2.250985	0.00171	1316.36	0.003849	0.003839	310.850
2.40159	0.00183	1310.91	0.004399	0.004399	310.952
2.542131	0.00195	1305.66	0.004949	0.004941	311.050
2.673587	0.00206	1300.38	0.005497	0.005488	311.150

בטבלה זו ניתן לראות את התוצאות שקיבלנו ואת תוצאות ההתאמה הלינארית של ההספק.

2.4 שאלה 4:

$$T_{max} = 37.01^{\circ}\text{C} = 310.16^{\circ}\text{K}$$

הנוסחה של ההתאמה שקיבלנו היא: $P = -1.7062 + 0.0055T$

$$P_{max} = 4.2389 \cdot 10^{-5} [\text{W}] = 42.389 [\mu\text{W}] < 100 [\mu\text{W}]$$

על ידי שימוש ברווח בר סמך נקבל כי הערך המקסימלי הינו $0.0404 [\text{W}]$ וערך זה גבוה מ- $100 [\mu\text{W}]$ ולכן נעדיף להשתמש בערך שקיבלנו מההתאמה של המודל.

2.5 שאלה 5:

באמצעות הקובץ ראינו כי עבור $T = 35.5^{\circ}\text{C}$ קיבלנו את ההתנגדות המקסימלית שהיא

$$R_{max} = 1441.01 [\Omega]$$

2.6 שאלה 6:

נשתמש במשוואה 6 ובתוצאות הסעיפים הקודמים:

$$P_{R_T} \sim \frac{V_S^2 \cdot R_T}{R_2^2} \rightarrow 4.24 \cdot 10^{-5} \sim \frac{9^2 \cdot 1441.01}{R_2^2} \rightarrow R_2 \sim 52474.63 [\Omega]$$

לכן נבחר $R_2 = 52474.63 [\Omega]$

2.7 שאלה 7:

נשים לב כי נרצה שההספק יהיה קטן מההספק המקסימלי שבחרנו בסעיף ד וככל שנגדיל את R_2 החסם על ההספק יהיה הדוק יותר ויבטיח שהוא יהיה קטן מההספק המקסימלי ולכן נוכל לבחור נגד שהתנגדותו היא לכל הפחות התוצאה מהסעיף הקודם. בשל כך, נבחר את הנגד בעל התנגדות של $50 + 3.3 [k\Omega]$. נחשב את הנגדים הנוספים:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_{T_{max}}} = \frac{53.3 [k\Omega]}{1441.01 [\Omega]} = 36.98$$

$$R_1 = 50 [k\Omega], R_3 = 1.5 [k\Omega]$$

2.8 שאלה 8:

כפי שהסברנו ברקע התאורטי ובהתאם לנוסחה 4, נקבל את המתח המקסימלי עבור הטמפרטורה המקסימלית שהיא 42°C . מהקובץ אקסל נקבל כי ההתנגדות בטמפ' זו היא $R = 1106.74 [\Omega]$. נחשב את המתח המקסימלי:

$$V_{0,max} = 9 \cdot \left(\frac{1.5 \cdot 10^3}{1.5 \cdot 10^3 + 50 \cdot 10^3} - \frac{1106.74}{53.3 \cdot 10^3 + 1106.74} \right) = 0.08 [V]$$

2.9 שאלה 9:

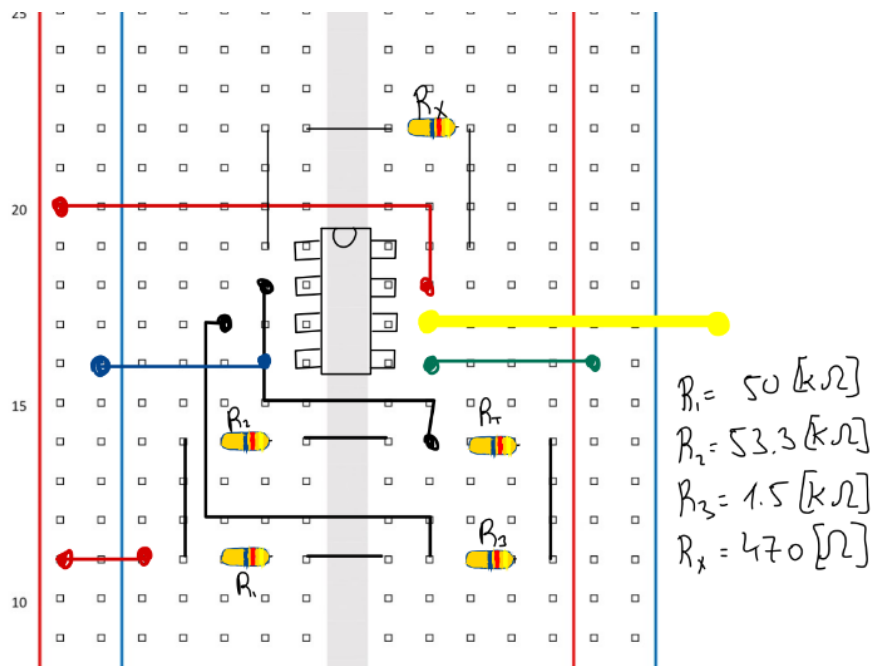
מתחי הזנה של המגבר מספקים את המתח למוצא המגבר ולכן $V_S^- \leq V_{out} \leq V_S^+$. במקרה של מתח שמחוץ לטווח זה, הוא יקבל את הערך הקרוב אליו ביותר מהטווח כלומר תהיה קטימה. בנוסף, במידה והמתח לא יהיה סימטרי סביב 0, לא נוכל לקבל מתחים שליליים (בכיוון ההפוך) מכיוון שמתח מגבר מכשור חסום על ידי מתחי ההזנה שלו

$$G = \frac{V_{GMAX}}{V_0} = \frac{5}{0.08} = 62.5 : \text{ההגבר המקסימלי}$$

מתוך המאמר נקבל את הנוסחה הבאה לחישוב ההתנגדות של הכניסה: [3]

$$R_x = \frac{(G - 1)555.555 - 55,000}{10 - G} = 396.826 [\Omega]$$

2.10 שאלה 10:



- [1] J. F. Taylor, *Feasibility Study of a Thermistor Vacuum Gauge*. Sandia Corporation, 1961.
- [2] "מעבדה תרמיסטור 2022.pdf."
- [3] "AD621.pdf."

```

T0=298.15; % [K]
R0=2241.5; % [ohm]
A=0.001636324; % [1/K]
B=0.000203197; % [1/K]
C=0.000000327; % [1/K]
beta=3925.307; % [K]

R=1249:1:1471;
T1=1./(1/beta.*log(R./R0)+1/T0);
T3=1./(A+B.*log(R)+C.*(log(R)).^3);
m=max(abs(T1-T3));

figure
plot(T3,abs(T1-T3));
hold on
scatter(T3(find(abs(T1-T3)==m)),m,'r','filled');
xlabel('T3 [K]');
ylabel('abs(T1-T3)');

%% C.
results=readtable('All_results.xls','Sheet','results_file6');
P=results.I.*results.V;
R=results.V./results.I;
T=1./(A+B.*log(R)+C.*(log(R)).^3);

y=fitlm(T,P);

figure
plot(y)
xlabel('T [K]');
ylabel('P [W]');
title('P vs. T');

%% D.
T_max=310.16;%[K]
y.Formula.ModelFun(T_max)
Pmax=y.Coefficients.Estimate(1,1)+y.Coefficients.Estimate(2,1)*T_max

CI=coefCI(y);
PmaxCI=CI(1,2)+CI(2,2)*T_max

```