

אוניברסיטת בן גוריון
הפקולטה למדעי הטבע
המחלקה לפיזיקה

שם הניסוי

דו"ח מעבדה 4- הולכה חשמלית

מאת:

סול אמארה

מדריך המעבדה:

נמרוד שרף

24/12/2020

תוכן עניינים

2.....	1. מטרות הניסוי :
3.....	2. רקע תיאורטי :
6.....	3. ניסוי : מדידת התנגדות של נגד
6.....	3.1. מהלך הניסוי :
7.....	3.2. תוצאות הניסוי :
8.....	3.3. עיבוד התוצאות :
10.....	3.4. דיון בתוצאות ומסקנות :
11.....	4. ניסוי : מדידת התנגדות פנימית של ספק מתח
11.....	4.1. מהלך הניסוי :
11.....	4.2. תוצאות הניסוי :
12.....	4.3. עיבוד התוצאות :
13.....	4.4. דיון בתוצאות ומסקנות :
14.....	5. ניסוי : מדידת קו אופיין של דיודה
14.....	5.1. מהלך הניסוי :
14.....	5.2. תוצאות הניסוי :
15.....	5.3. עיבוד התוצאות :
19.....	5.4. דיון ומסקנות :
20.....	6. ניסוי : מדידת קו אופיין של נורת להט
20.....	6.1. מהלך הניסוי :
21.....	6.2. תוצאות הניסוי :
22.....	6.3. עיבוד התוצאות :
26.....	6.4. דיון בתוצאות ומסקנות :
27.....	7. סיכום ומסקנות כלליות :
27.....	8. ביבליוגרפיה
28.....	9. נספחים

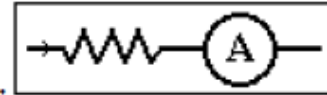
1. מטרות הניסוי :

- * הכרת נושא ההולכה החשמלית ומכשירי המדידה
- * הכרת חוק אום ומדידת האופיין של נגד אומי
- * מדידת התנגדות פנימית של מקור מתח
- * מדידת אופיין של דיודה
- * מדידת אופיין של נורת להט

2. רקע תיאורטי:

זרם חשמלי I:

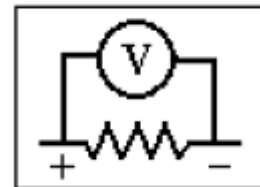
זרם חשמלי הינו תנועה של חלקיקים טעונים במטען כלשהו לאורך איזור מוליך זרם. זרם חשמלי ניתן לחישוב ישירות לפי כמות המטען שעוברת ביחידת זמן, והיחידות שלו הן אמפר (A). בנוסף לכך, ניתן למדוד זרם על ידי מכשיר הנקרא **אמפרמטר**. למכשיר זה יש התנגדות השואפת לאפס בשביל שהוא לא ישפיע על המתח במעגל. על מנת למדוד את הזרם באמצעותו יש לחבר את האמפרמטר בטור לרכיב שנרצה למדוד כפי שמומחש בתמונה:



מתח חשמלי V:

מתח חשמלי הוא גודל פיזיקלי הנמדד בוולט (V) והוא מתייחס לכמות העבודה שיש להשקיע על מנת להעביר מטען מנקודה אחת לאחרת, וכאשר מדברים על מתח בנקודה מסוימת מתייחסים על השקעה בינה לבין האינסוף.

בנוסף לכך, ניתן למדוד מתח על ידי מכשיר הנקרא **וולטמטר**. למכשיר זה יש התנגדות השואפת לאינסוף בשביל שהוא לא ישפיע על הזרם במעגל, וימנע תנועת חלקיקים. על מנת למדוד את המתח באמצעותו יש לחבר את הוולטמטר במקביל לרכיב שנרצה למדוד כפי שמומחש בתמונה:



באופן תיאורטי לשני המכשירים שהסברנו עליהם עד כה (וולטמטר ואמפרמטר) יש התנגדות אידאלית אך במציאות למכשירים אלה יש התנגדות ובמידה ונצטרך לדעת את הערך הנמדד ברמה מדויקת יש להתחשב בהתנגדות המכשיר.

ספק מתח:

ספק מתח הינו מקור המתח החשמלי במעגל, וכתוצאה מכך יש תנועת חלקיקים טעונים במעגל כלומר זרם. למכשיר אידיאלי לא קיימת התנגדות, כלומר המתח שאותו הוא מייצר זה המתח הנמצא במעגל. כאשר נרצה להתחשב בהתנגדות ספק המתח ולדעת איזה מתח הוא מספק למעגל באופן מדויק ניתן להשתמש בנוסחה הבאה כאשר r הינה ההתנגדות הפנימית של הספק:

$$V = E - rI$$

התנגדות R:

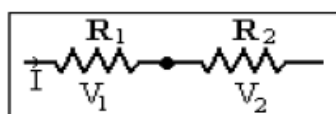
התנגדות היא תכונה של חומר הנמדדת ביחידות אום (Ω), המאפיינת את היכולת שלו להעביר זרם חשמלי בתוכו.

תכונה זו תלויה בחומר ממנו עשוי הרכיב ובגודלו וניתנת לחישוב על ידי הנוסחה: $R = \frac{\rho L}{A}$

כך ש L מייצג את אורך המוליך, A את שטח החתך ו ρ הינה התנגדות סגולית, תכונה התלויה בסוג החומר.

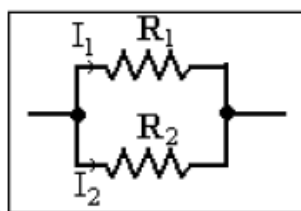
ניתן לחבר במעגל חשמלי מספר נגדים ובמקרה כזה נרצה לדעת את ההתנגדות הכוללת של המעגל על מנת לבצע חישובים נוספים. לסוג החיבור יש חשיבות על ההתנגדות וקיימים 2 סוגי חיבורים: חיבור בטור וחיבור במקביל.

חיבור בטור: חיבור זה מאפיין מספר נגדים אשר זורם דרכם זרם שווה במעגל. במקרה זה ההתנגדות הכוללת הינה סכום ההתנגדות של כל רכיב כפי שמתואר בנוסחה הבאה:



$R = R_1 + R_2$. דוגמא לרכיבים המחוברים בטור:

חיבור במקביל: חיבור זה מאפיין מספר נגדים אשר זורם דרכם מתח שווה והזרם במעגל הינו סכום הזרמים העובר דרכם. במקרה זה ההתנגדות הכוללת הינה נתונה בנוסחה הבאה:



דוגמא לרכיבים המחוברים במקביל: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

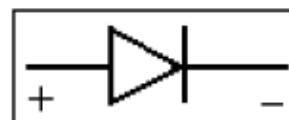
כפי שניתן לשים לב, קיים שוני רב בין הנוסחאות ולכן יש לשים דגש על סוג החיבור ואופן החישוב המתאים.

חוק אוהם:

חוק זה מקשר בין התנגדות מתח וזרם על פי הנוסחה הבאה: $V = IR$

דיודה:

דיודה הוא רכיב חשמלי היכולה להעביר זרם בכיוון אחד בלבד. כאשר ננסה להעביר זרם בכיוון השני הדיודה תהווה מעין נתק וזרם קטן מאוד יעבור דרכה. סימון הדיודה במעגל החשמלי הינו:



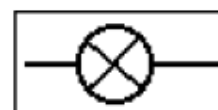
כך שכיוון החץ מסמן את כיוון הזרם. בשל מאפיינה השונים של דיודה הנוסחה בה נשתמש הינה:

$$I = I_0(e^{\alpha V} - 1)$$

נורת להט:

נורת להט הינו רכיב חשמלי שהתנגדותו תלויה בטמ"פ, וככל שהטמ"פ תעלה גם התנגדותו תעלה. הקשר בין מתח לזרם ברכיב זה הינו:

$I = cV^\beta$. במעגל חשמלי נורת להט מסומנת כך:



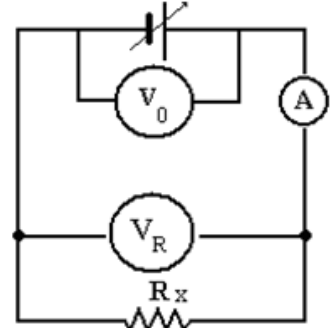
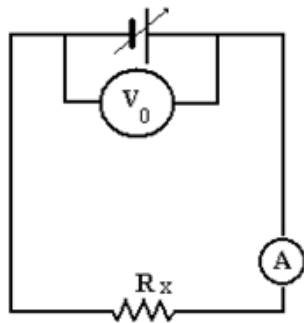
ריכוז הנוסחאות בן נשתמש במעבדה זו:

(1) $V = IR$	חוק אום
$(2) R = \frac{\rho L}{A}$ $\rho_{\text{נחושת}} = 0.018 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} , \rho_{\text{זהב}} = 0.018 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$	התנגדות של מוליך
(3) $R = R_1 + R_2$	חיבור נגדים בטור
(4) $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	חיבור נגדים במקביל
(5) $V = E - rI$ r התנגדות פנימית	מתח ההדקים של ספק מתח
$(6) I = I_0(e^{\alpha V} - 1)$ $I = I_0 \cdot e^{\alpha V} , \ln(I) = \ln(I_0) + \alpha V$	דיודה
(7) $I = cV^\beta$	נורת להט
(8) $\frac{ \bar{x} - x }{\bar{x}}$	סטייה יחסית הערך שהתקבל-x הערך הספרותי- \bar{x}
(9) $\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \Delta z\right)^2}$	הערכת השגיאה בגדלים בלתי תלויים

3. ניסוי: מדידת התנגדות של נגד

3.1 מהלך הניסוי:

נרצה להרכיב את המעגלים הנתונים בתרשים הבא על מנת לחשב את ההתנגדות של הרכיבים.



מעגל 1: מעגל למדידת התנגדות כאשר הוולטמטר במקביל לנגד **מעגל 2:** מעגל למדידת התנגדות כאשר האמפרמטר בטור לנגד

לשם כך, ראשית נחבר את הרכיבים הנמצאים בטור במעגל החיצוני, ולאחר מכן נחבר את הרכיבים במקביל. כמו כן, נשים לב כי יש התאמה בין החיבורים החיוביים לחיוביים ובין השלילים לשלילים. בנוסף, נוודא שמקור המתח בעל התנגדות של 0Ω . נשים לב ליחידות המוצגות במכשירים, ולפני הדלקת מקור המתח נוודא כי הזרם והמתח הנמדדים הם 0. לאחר מכן נדליק את מקור המתח ונשנה את טווח הערכים שלו בין 0-2V בקפיצות של 0.2V. נחזור על הניסוי בשנית, על פי המעגל המוצג בציור 3. בכל אחד מהניסויים נרשום את התוצאות בטבלה ונקפיד על היחידות עליהן המכשירים מכוונים. בנוסף, נרצה למדוד את התנגדות בנגד בו השתמשנו לשם החישובים בהמשך, ולכן נחבר אליו את הוולטמטר במקביל, נבחין כי הוא מכוון על פונקציית מדידת ההתנגדות ולאחר התייבבות הקריאה נרשום את המדידה.

3.2. תוצאות הניסוי:

התנגדות שנמדדה ישירות בעזרת רב מודד היא: $R_X = 10.1\Omega$

תוצאות המדידה במעגל 1:

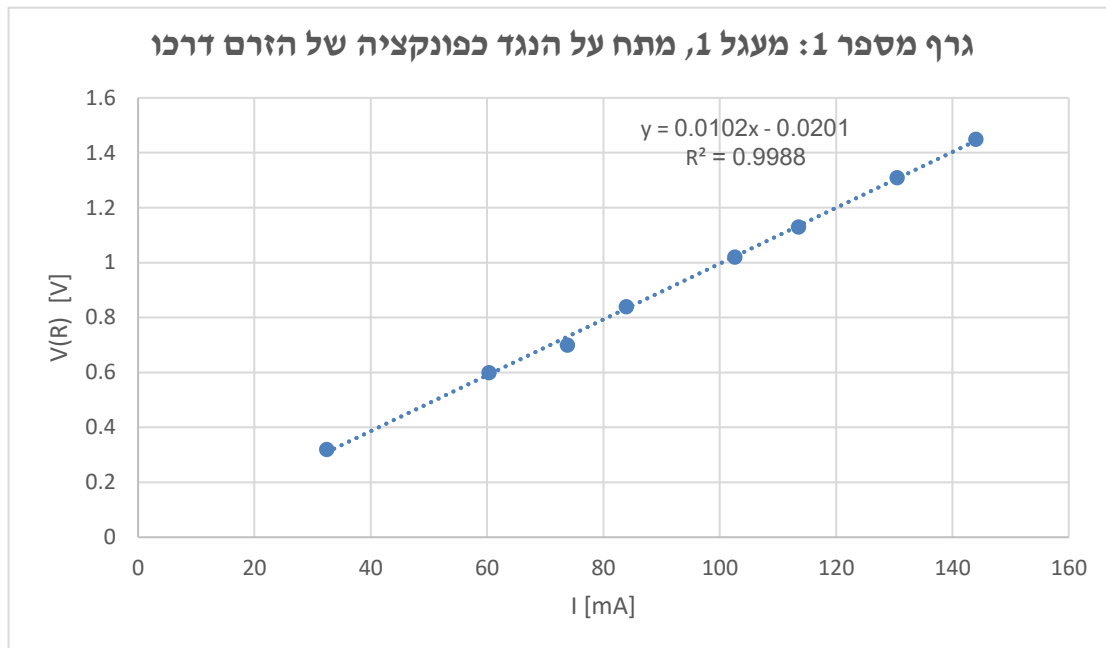
$I_A \pm 0.1(mA)$	$V_R \pm 0.01(V)$
7.7	0.06
20.6	0.2
32.4	0.32
60.3	0.6
73.8	0.7
83.9	0.84
102.6	1.02
113.5	1.13
130.5	1.31
144	1.45

תוצאות המדידה במעגל 2:

$I_A \pm 0.1(mA)$	$V_0 \pm 0.1(V)$
12.2	0.2
27.8	0.4
40	0.6
55.3	0.8
69.5	1
85	1.2
97.7	1.4
115.5	1.6
129	1.8
145	2

3.3. עיבוד התוצאות:

נציג את המדידות באמצעות הגרפים הבאים, המתארים את המתח הנמדד על הנגד כפונקציה של הזרם דרכו.



SUMMARY OUTPUT							
Regression Statistics							
0.99968408 Multiple R							
0.999368259 R Square							
0.999289292 Adjusted R Square							
0.012616801 Standard Error							
10 Observations							
ANOVA							
	Significance F	F	MS	SS	df		
	4.35636E-14	12655.42208	2.014536531	2.014536531	1	Regression	
			0.000159184	0.001273469	8	Residual	
				2.01581	9	Total	
Upper 95.0%	Lower 95.0%	Upper 95%	Lower 95%	P-value	t Stat	Standard Error	Coefficients
0.002455819	-0.03440163	0.002455819	-0.03440163	0.080677919	-1.998705073	0.007991627	-0.015972905 Intercept
0.010333299	0.009918174	0.010333299	0.009918174	4.35636E-14	112.4963203	9.00095E-05	0.010125736 X Variable 1

על פי נתוני גרף מספר 1, $y = 0.010126x - 0.0201$ ונוסחא מספר (1):

$$V = I \cdot R$$

ממשוואה זו ניתן לראות כי בגרף ערך השיפוע מייצג את ההתנגדות הנגד. כמו כן, נזכור כי

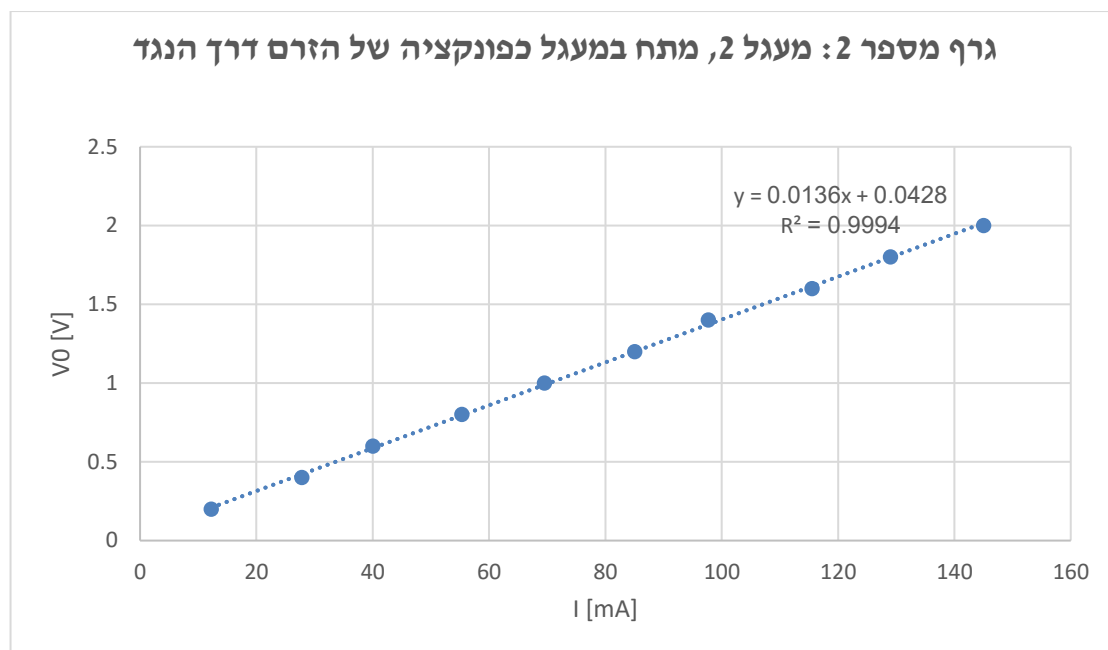
השתמשנו בזרם ביחידות [mA] ומחוק אום (נוסחא 1), ניתן להסיק את הקשר: $R = \frac{V}{I}$

ולכן על מנת לקבל את ההתנגדות ב[Ω] נכפיל את ערך השיפוע ב 10^3 .

מניתוח הנתונים ניתן לראות כי השגיאה בשיפוע הגרף הינה $9 \cdot 10^{-5}$, נקבל כי

$$R_X = 0.010126 \cdot 10^3 \pm 9 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3 \Omega = 10.126 \pm 0.09 \Omega$$

לכן ההתנגדות במעגל ה1 הינה: $R_{X1} = 10.13 \pm 0.09 \Omega$



								SUMMARY OUTPUT
								Regression Statistics
								0.999685129 Multiple R
								0.999370357 R Square
								0.999291652 Adjusted R Square
								0.016116068 Standard Error
								10 Observations
								ANOVA
								Significance F
								F
								MS
								SS
								df
								1 Regression
								8 Residual
								9 Total
Upper 95.0%	Lower 95.0%	Upper 95%	Lower 95%	P-value	t Stat	Standard Error	Coefficients	
0.067402943	0.018160608	0.067402943	0.018160608	0.003911845	4.006916005	0.010676983	0.042781775	Intercept
0.013884859	0.013327965	0.013884859	0.013327965	4.29877E-14	112.6837032	0.000120749	0.013606412	X Variable 1

על פי נתוני גרף מספר 1, $y = 0.013606x + 0.04278$ ונוסחא מספר (1):

$$V = I \cdot R$$

ממשוואה זו ניתן לראות כי בגרף ערך השיפוע מייצג את התנגדות הנגד. כמו כן, נזכור כי

השתמשנו בזרם ביחידות $[mA]$ ומחוק אום (נוסחא 1), ניתן להסיק את הקשר: $R = \frac{V}{I}$

ולכן על מנת לקבל את ההתנגדות ב $[\Omega]$ נכפיל את ערך השיפוע ב 10^3 .

מניתוח הנתונים ניתן לראות כי השגיאה בשיפוע הגרף הינה 0.00012075, נקבל כי

$$R_X = 0.013606 \cdot 10^3 \pm 0.00012075 \cdot 10^3 \Omega = 13.606 \pm 0.12075 \Omega$$

לכן ההתנגדות במעגל 2 הינה: $R_X = 13.6 \pm 0.1$

3.4. דיון בתוצאות ומסקנות:

התוצאות שקיבלנו הינם:

$$R_{X1} = 10.13 \pm 0.09 \Omega$$

$$R_{X2} = 13.6 \pm 0.1 \Omega$$

התנגדות שנמדדה ישירות בעזרת רב מודד היא: $R_X = 10.1 \Omega$

נשתמש בנוסחה (8) לחישוב השגיאה היחסית של כל אחד מההתנגדויות מערך ההתנגדות שנמדד ישירות על ידי רב מודד:

$$\frac{|10.1 - 10.13|}{10.1} \cdot 100\% = 0.3\%$$

$$\frac{|10.1 - 13.6|}{10.1} \cdot 100\% = 35\%$$

ניתן לראות כי במעגל 2 קיבלנו סטייה יחסית גבוהה בהרבה מאשר הסטייה היחסית שקיבלנו במעגל 1 ולכן ניתן להסיק שהמעגל הראשון מדויק יותר ויש להעדיף לבצע את המדידות בצורה זו. בשל כך ניתן להסיק כי האמפרמטר איננו אידיאלי ולכן המתח הנמדד על ספק המתח במעגל 2 איננו המתח המגיע לנגד כיוון שחלקו יורד בשל התנגדות האמפרמטר, וכתוצאה מכך יש שגיאות במדידה.

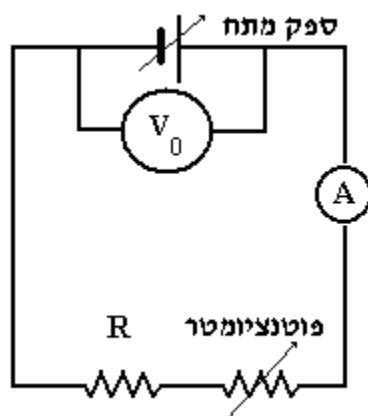
ניתן לראות כי במעגל הראשון מבוצעת מדידה של המתח שנמצא על הנגד ולכן ערך המחושב ממעגל זה הינו מדויק יותר.

בנוסף, נשים לב כי במעגל 1: $R^2 = 0.9988$ ובמעגל 2: $R^2 = 0.9994$ קרבתו של ערך זה ל-1, מייצגת את מהימנות התוצאות ומכך ניתן להסיק כי הערכים בשני הניסויים יחסית מדויקים.

4. ניסוי: מדידת התנגדות פנימית של ספק מתח

4.1. מהלך הניסוי:

נרצה להרכיב את המעגל הנתון בתרשים הבא על מנת לחשב את ההתנגדות של ספק המתח.



לשם כך, נחבר את המעגל על פי הסדר המופיע בתרשים, גם כאן נוודא כי יש התאמה בין החיבורים החיוביים והשליליים. נשנה את התנגדות מקור המתח למצב $r - \text{int}$ ונכוון את המתח ל-5V. נשים לב ליחידות המוצגות במכשירים ונשנה את תחום המדידה של האמפרמטר ל-20 אמפר. נסובב את הפוטנציומטר (נגד בעל התנגדות משתנה), נגד כיוון השעון לערכו המקסימלי. נמדוד את המתח והזרם המוצגים ונתחיל להקטין בהדרגה את התנגדות הפוטנציומטר בקפיצות של 20 מילי אמפר. את הנתונים נציג בטבלה.

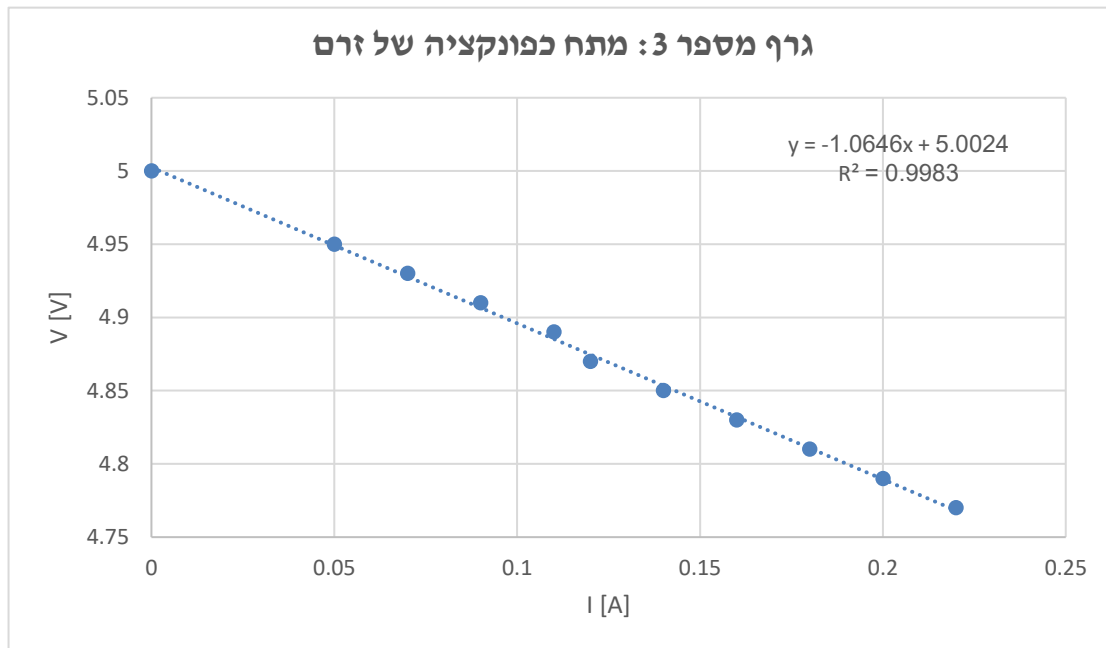
4.2. תוצאות הניסוי:

ללא זרם במעגל מתח ההדקים שנמדד הוא $V = 5V$

$I_A \pm 0.01(A)$	$V_0 \pm 0.01(V)$
0.05	4.95
0.07	4.93
0.09	4.91
0.11	4.89
0.12	4.87
0.14	4.85
0.16	4.83
0.18	4.81
0.2	4.79
0.22	4.77

4.3. עיבוד התוצאות:

נציג את המדידות באמצעות הגרף הבא, המתאר את המתח הנמדד על ספק המתח כפונקציה של הזרם במעגל.



SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics

0.998961693	Multiple R
0.997924465	R Square
0.997665023	Adjusted R Square
0.00318947	Standard Error
10	Observations

ANOVA

Significance F	F	MS	SS	df
5.07855E-12	3846.427626	0.039128618	0.039128618	1
		1.01727E-05	8.13817E-05	8
			0.03921	9

Upper 95.0%	Lower 95.0%	Upper 95%	Lower 95%	P-value	t Stat	Standard Error	Coefficients
5.007896167	4.997841538	5.007896167	4.997841538	1.45637E-24	2294.79097	0.002180098	5.002868852 Intercept
-1.030463425	-1.110051797	-1.030463425	-1.110051797	5.07855E-12	-62.01957454	0.017256771	-1.070257611 X Variable 1

על פי נתוני גרף מספר 1, $y = -1.0646x + 5.0024$ ונוסחא מספר (5):

$$V = E - rI$$

ממשוואה זו ניתן לראות כי בגרף ערך השיפוע (בערך מוחלט) מייצג את התנגדות מקור המתח.

מניתוח הנתונים ניתן לראות כי השגיאה בשיפוע הגרף הינה 0.0173, נקבל כי

$$r = 1.0646 \pm 0.0173\Omega = 1.06 \pm 0.02\Omega$$

לכן התנגדות מקור המתח הינה: $r = 1.06 \pm 0.02\Omega$

4.4. דיון בתוצאות ומסקנות:

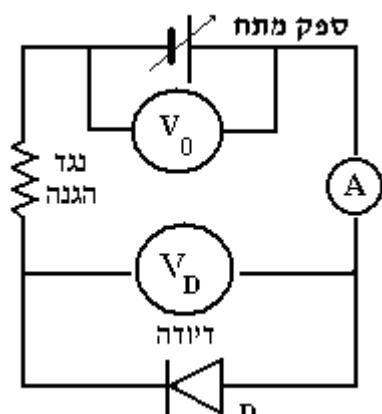
בניסוי קיבלנו כי התנגדות מקור המתח הינה $r = 1.06 \pm 0.02 \Omega$. בניסוי ראינו כי להתנגדות זו יש השפעה על המעגל החשמלי כיוון שמתח ההדקים מושפע משינויים בהתנגדות הפנימית של מקור המתח.

בנוסף, נשים לב כי בגרף מספר 3: $R^2 = 0.9983$ ומכך שערך זה קרוב ל1 ניתן להסיק כי התוצאות שקיבלנו הינן מדויקות.

5. ניסוי: מדידת קו אופיין של דיודה

5.1. מהלך הניסוי:

נרצה להרכיב את המעגל הנתון בתרשים הבא:



ראשית נחזיר את הכפתור בגב ספק המתח אל 0Ω ונשנה את תחום המדידה של האמפרמטר ל200 מילי אמפר. לאחר מכן נחבר את הרכיבים הנמצאים בטור במעגל החיצוני, ואז נחבר את הרכיבים במקביל, גם כאן נוודא כי יש התאמה בין החיבורים החיוביים והשליליים. כמו כן, נכוון את המתח בספק המתח ל0.1V ונבצע מדידות של הזרם. לאחר מכן, נשנה את המתח על הדיודה מ0.2-0.75 V בקפיצות של 0.05V ונרשום את הערכים הנמדדים בטבלה. נשים לב כי הזרם במעגל איננו עולה על 120 mA.

5.2. תוצאות הניסוי:

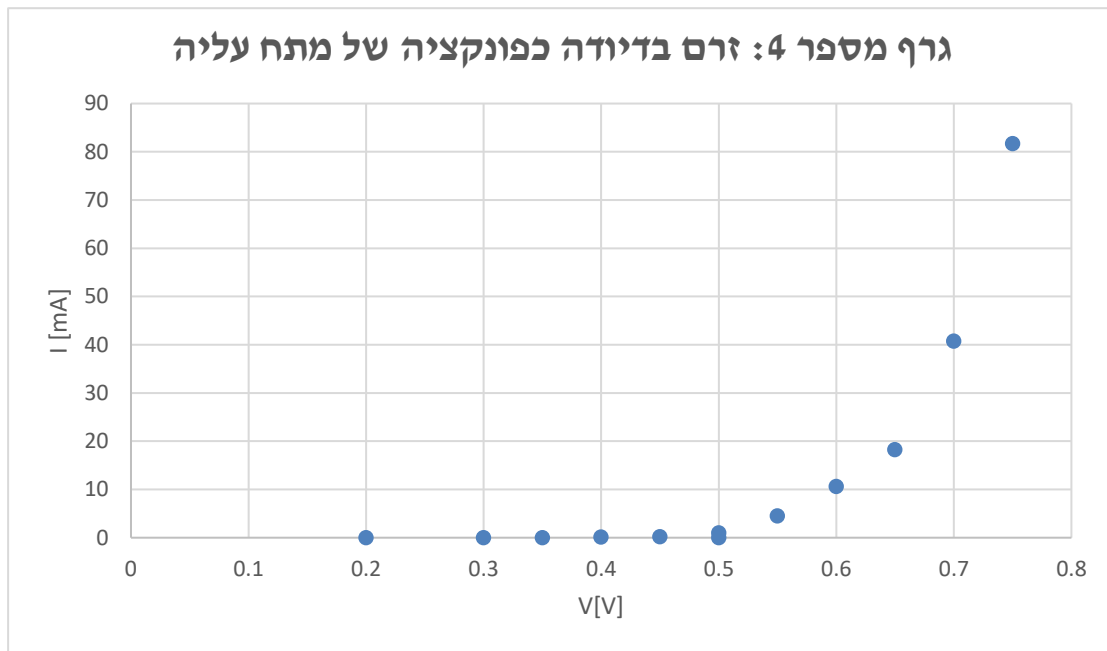
מתח על הדיודה כפונקציה של הזרם דרכה:

$I_A \pm 0.1(mA)$	$V_D \pm 0.01(V)$
0	0.2
0	0.25
0	0.3
0	0.35
0.1	0.4
0.2	0.45
1	0.5
4.5	0.55
10.6	0.6
18.2	0.65
40.7	0.7
81.7	0.75

5.3. עיבוד התוצאות:

באמצעות הנתונים נבנה גרף של אופיין הדיודה $I(V)$ המייצג את נוסחה (6):

$$I = I_0(e^{\alpha V} - 1)$$



על מנת לשרטט גרף של ההתנגדות הדינמית נשתמש בנוסחה (6), נביע את המתח כפונקציה של הזרם ונגזור אותו לפי הזרם:

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \alpha V, \quad V = \frac{\ln(I) - \ln(I_0)}{\alpha}$$

$$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{\alpha I}$$

כפי שנתון בתדריך המעבדה, $\alpha \approx \frac{e}{2kT}$ כך ש:

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad T \approx 21^\circ\text{C} \quad K = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{^\circ\text{K}}$$

נחשב את הזווית במעלון קלווין על פי הקשר הבא: $x^\circ\text{C} = x + 273.15^\circ\text{K}$ ולכן הטמפרטורה

במעבדה הינה בקירוב: $T \approx 21^\circ\text{C} \approx 294.15^\circ\text{K}$

נחשב את α :

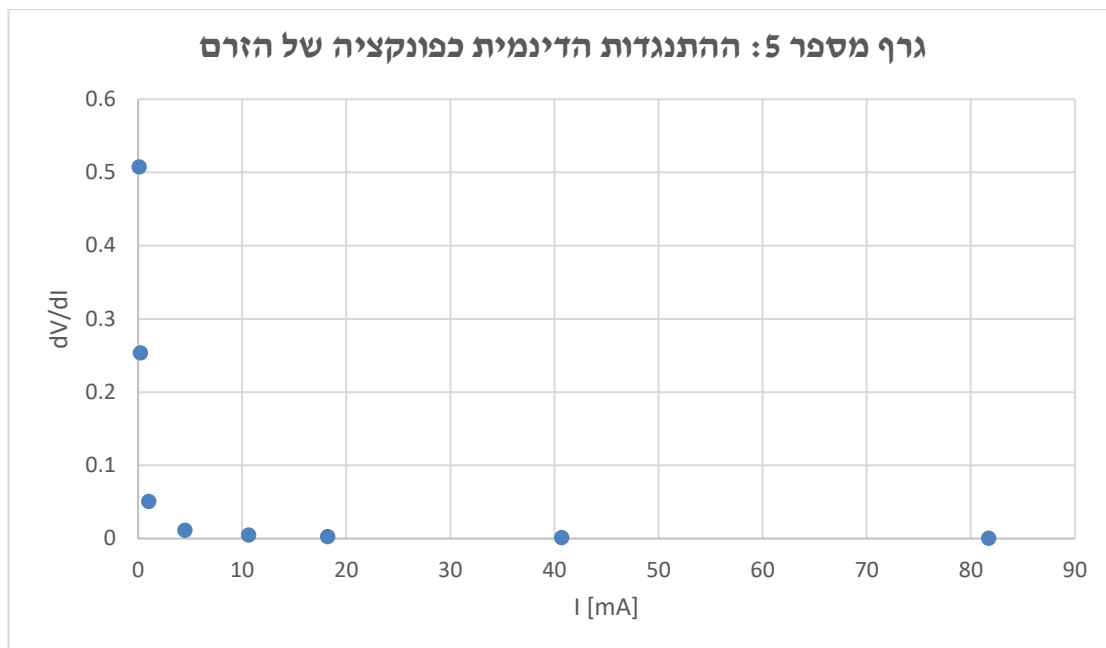
$$\alpha \approx \frac{e}{2kT} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 294.15 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23}} = 19.708$$

ונקבל

$$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{\alpha I} = \frac{1}{19.708 \cdot I}$$

נחשב את $\frac{dV}{dI}$ לפי הנוסחה שקיבלנו ונבנה את הגרף המתאים:

$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot I}$	$I_A \pm 0.1(mA)$
לא קיים	0
לא קיים	0
לא קיים	0
לא קיים	0
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 0.1} = 0.5074$	0.1
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 0.2} = 0.2537$	0.2
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 1} = 0.0507$	1
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 4.5} = 0.0113$	4.5
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 10.6}$ $= 0.0048$	10.6
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 18.2}$ $= 0.0028$	18.2
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 40.7}$ $= 0.0012$	40.7
$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{19.708 \cdot 81.7}$ $= 0.0006$	81.7



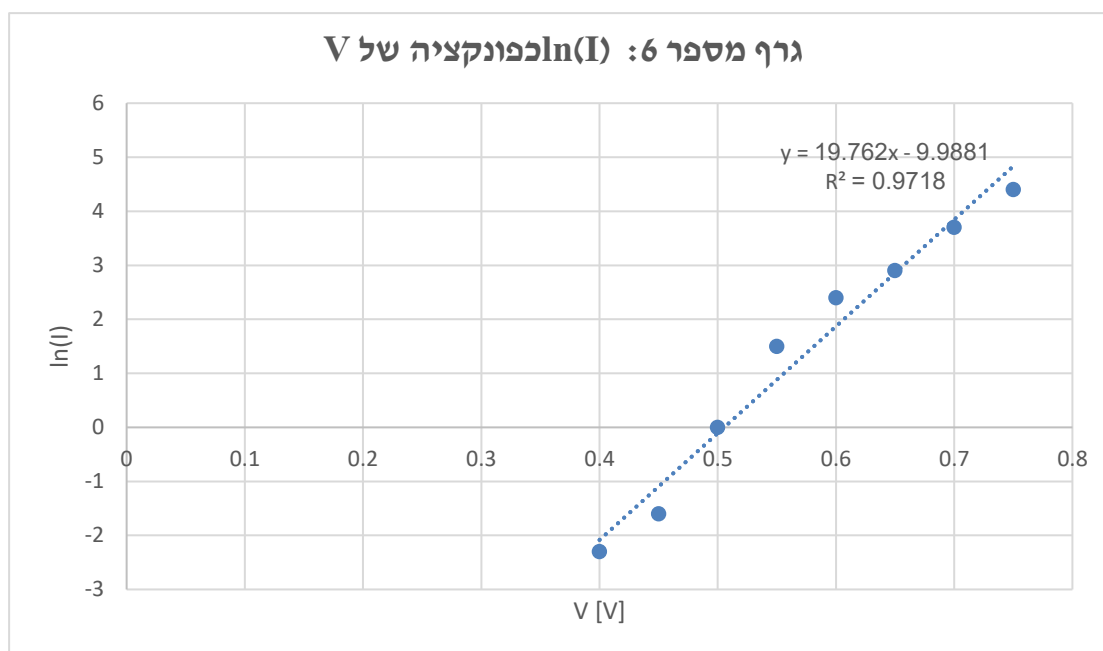
משמעות הגרף:

בדיודה היחס בין הזרם למתח איננו קבוע ולכן לא ניתן למדוד את ההתנגדות שלה בדומה למדידה שעשינו עבור נגדים בניסוי הראשון. בשל כך, נסתכל על ערך הנקרא "ההתנגדות דינמית" המתייחס לשינוי במתח כתוצאה מהשינוי בזרם הזורם במעגל. גרף זה מציג את ההתנגדות הדינמית של הדיודה וניתן לראות כי הוא איננו קבוע ומשתנה. כמו כן, מהגרף ניתן להסיק כי בערכי זרם קטנים ההתנגדות גבוהה ואילו כאשר הזרם עולה מעל תווך מסוים ההתנגדות שואפת לאפס.

על מנת ליצור גרף של $\ln(I)$ כפונקציה של V נחשב את הערכים הנדרשים :

$\ln(I_A)$	$I_A \pm 0.1(mA)$
לא קיים	0
לא קיים	0
לא קיים	0
לא קיים	0
-2.3	0.1
-1.6	0.2
0	1
1.5	4.5
2.4	10.6
2.9	18.2
3.7	40.7
4.4	81.7

נבנה גרף של $\ln(I)$ כפונקציה של המתח, המייצג את נוסחה (6): $\ln(I) = \ln(I_0) + \alpha V$



על פי נתוני גרף מספר 6, $y = 19.762x - 9.881$ ונוסחא מספר (6):

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \alpha V$$

ממשוואה זו ניתן להסיק כי :

$$\alpha = 19.762$$

$$\ln(I_0) = -9.881, \quad I_0 = 5.114 \cdot 10^{-5}$$

כפי שנתון בתדריך המעבדה, $\alpha \approx \frac{e}{2kT}$ ומחישובים קודמים קיבלנו כי :

$$\alpha \approx \frac{e}{2kT} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 294.15 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23}} = 19.708$$

נחשב את הסטייה היחסית בין הערך שקיבלנו מהגרף לבין הערך המחושב, לשם כך נשתמש בנוסחא (8) :

$$\frac{|19.708 - 19.762|}{19.708} \cdot 100\% = 0.274\%$$

נקבל כי בהתחשבות בספרות משמעותיות בשני המקרים $\alpha = 20$ והסטייה היחסית בין הערכים הינה **0.3%**.

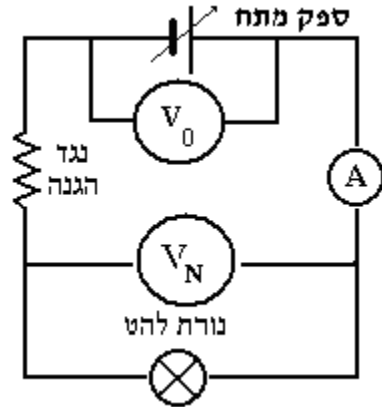
5.4. דיון ומסקנות:

בניסוי זה למדנו על דיודה ועל מאפייניה במעגל החשמלי. ראינו באמצעות גרף מספר 4 כי בשונה מהרכיבים שהכרנו עד כה, אין קשר לינארי בין המתח לזרם העובר דרכה ואילו קשר זה מתואר באמצעות נוסחא מספר (6). בנוסף, באמצעות גרף מספר 5 ניתן לראות כי לדיודה יש התנגדות דינמית, המשתנה בהתאם לזרם והמתח שיש עליה ובאמצעות גרף זה ניתן לקבל את ההתנגדות עבור זרם מסוים. כמו כן, בנינו את גרף 6 על מנת לחשב את הקבועים בנוסחא של הדיודה. קיבלנו כי $\alpha = 20$, $I_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ וחישבנו את אלפא בשני דרכים- באמצעות הגרף ובאמצעות הנוסחא. ראינו כי הסטייה בין הערכים הינה קטנה מאוד, **0.3%** ובשל כך ניתן להסיק כי הערכים שחישבנו הינם מדויקים.

6. ניסוי: מדידת קו אופיין של נורת להט

6.1. מהלך הניסוי:

נרצה להרכיב את המעגל הנתון בתרשים הבא:



נחבר את הרכיבים הנמצאים בטור במעגל החיצוני, ואז נחבר את הרכיבים במקביל, גם כאן נוודא כי יש התאמה בין החיבורים החיוביים והשליליים וכי האמפרמטר מכוון למדוד ערכים בטווח של 200mA. כמו כן, נכוון את המתח בספק המתח ל-0.04V ונבצע מדידות של הזרם. נשנה את המתח על המנורה בטווח של 0.04-0.1V בקפיצות של 0.01V ונרשום את הערכים הנמדדים בטבלה. לאחר מכן נמדוד את הזרם כאשר נשנה את המתח על הנורה בטווח של 0.1-0.9V בקפיצות של 0.2V, ובטווח של 1-6V בקפיצות של 1V. במהלך הניסוי נשים לב כי הזרם במעגל איננו עולה על 280 mA.

6.2. תוצאות הניסוי:

תחום הזרמים הנמוכים

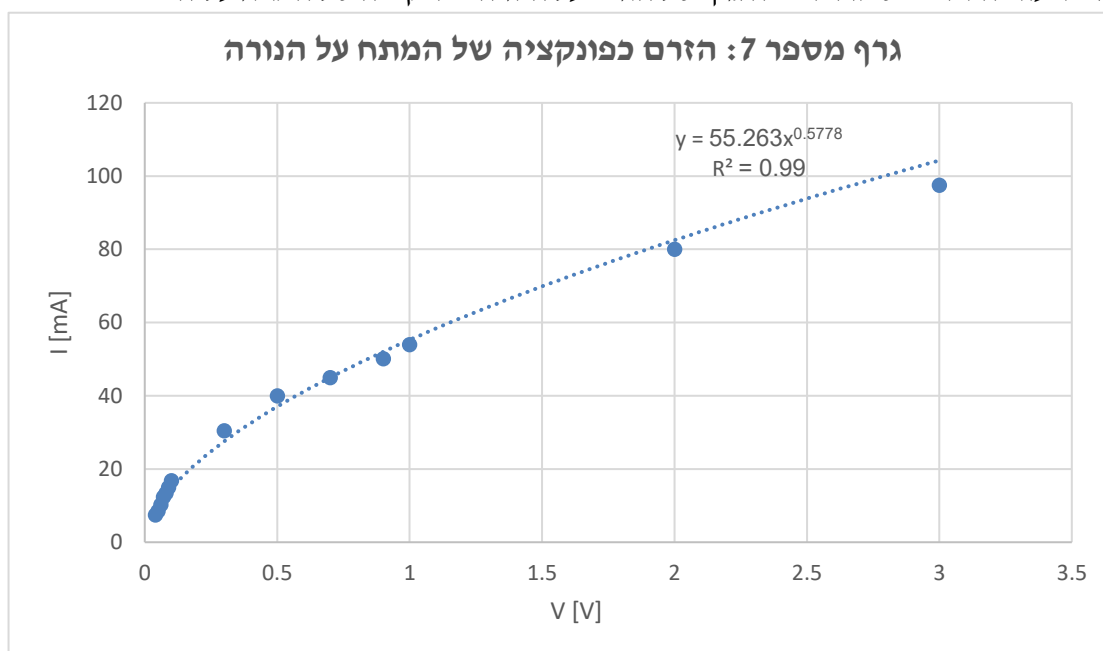
תחום הזרמים
הבינוניים

תחום הזרמים הגבוהים

מנורה $I_A \pm 0.1(mA)$	$V_N \pm 0.01(V)$
7.5	0.04
8.5	0.05
10.3	0.06
12.4	0.07
13.4	0.08
15	0.09
16.8	0.1
16.8	0.1
30.5	0.3
40	0.5
45	0.7
50.1	0.9
54	1
80	2
97.5	3

6.3. עיבוד התוצאות:

באמצעות הנתונים שמדדנו נבנה גרף של הזרם על הנורה כפונקציה של המתח עליה:

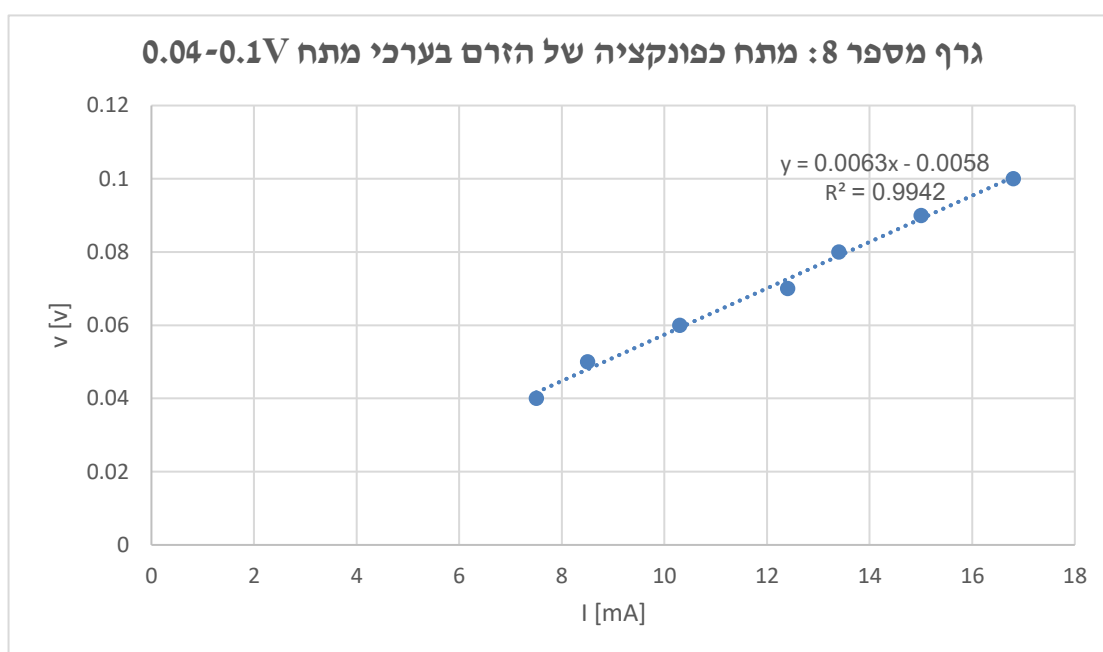


על פי נתוני גרף מספר 7, $y = 55.263x^{0.5778}$ ונוסחא מספר (7): $I = cV^\beta$

ניתן להסיק כי $\beta = 0.5778$, $c = 55.263$ ובהתחשב בספרות משמעותיות נקבל:

$$c = 55, \beta = 0.6$$

כעת נבנה גרף עבור כל תחום בנפרד:



							SUMMARY OUTPUT
							Regression Statistics
							0.997078964 Multiple R
							0.994166461 R Square
							0.992999754 Adjusted R Square
							0.001807424 Standard Error
							7 Observations
							ANOVA
							Significance F
							F
							MS
							SS
							df
							1 Regression
							5 Residual
							6 Total
							Upper 95.0%
							Lower 95.0%
							Upper 95%
							Lower 95%
							P-value
							t Stat
							Standard Error
							Coefficients
							-0.005827787 Intercept
							0.006326514 X Variable 1

על פי נתוני גרף מספר 8, $y = 0.0063x - 0.0058$. ניתן לראות כי יש קשר לינארי בין המתח לזרם ולכן ניתן לחשב מכך את ההתנגדות באמצעות נוסחא מספר (1):

$$V = I \cdot R$$

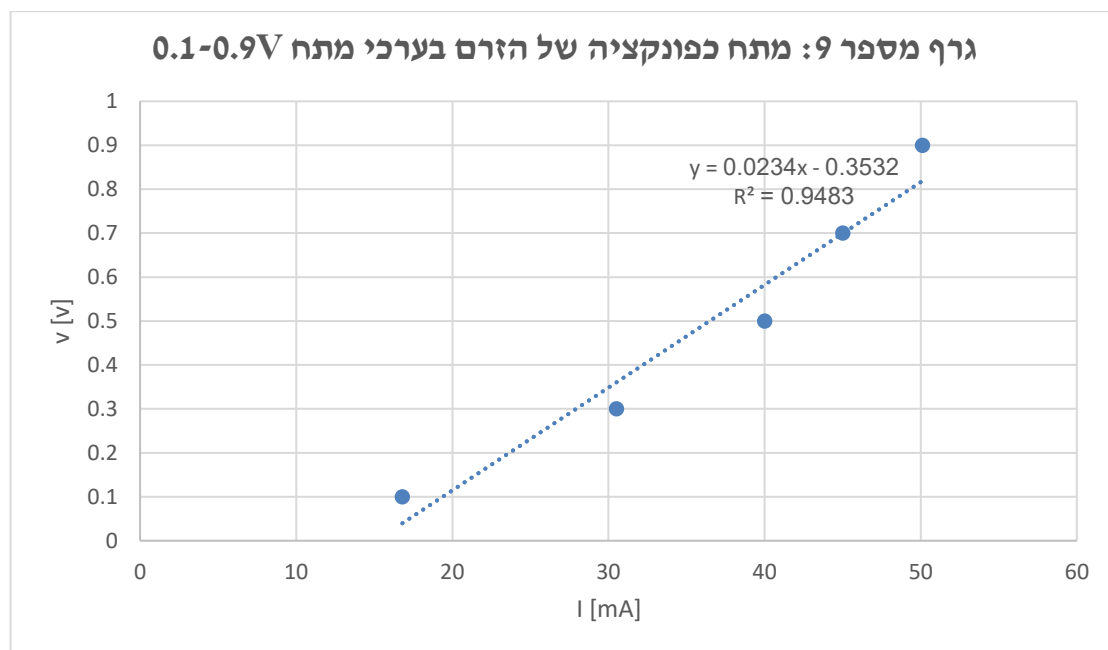
ממשוואה זו ניתן לראות כי בגרף ערך השיפוע מייצג את התנגדות הנגד. כמו כן, נזכור כי

השתמשנו בזרם ביחידות $[mA]$ ומחוק אום (נוסחא 1), ניתן להסיק את הקשר: $R = \frac{V}{I}$

ולכן על מנת לקבל את ההתנגדות ב $[\Omega]$ נכפיל את ערך השיפוע ב 10^3 .

בנוסף, מהטבלה ניתן לראות כי השגיאה בשיפוע הגרף הינה 0.000216728 ומכך נקבל כי:

$$R_1 = 0.0063 \cdot 10^3 \pm 0.00022 \cdot 10^3 = 6.3 \pm 0.2 \Omega$$



Regression Statistics

0.973828751	Multiple R
0.948342436	R Square
0.931123248	Adjusted R Square
0.082992019	Standard Error
5	Observations

ANOVA

Significance F	F	MS	SS	df
0.005062421	55.0747481	0.379336975	0.379336975	1 Regression
		0.006887675	0.020663025	3 Residual
			0.4	4 Total

Upper 95.0%	Lower 95.0%	Upper 95%	Lower 95%	P-value	t Stat	Standard Error	Coefficients
0.031296225	-0.737611	0.031296225	-0.737611001	0.061328046	-2.923381095	0.12080443	-0.353157388 Intercept
0.033416025	0.01335795	0.033416025	0.013357955	0.005062421	7.421236292	0.00315136	0.02338699 X Variable 1

על פי נתוני גרף מספר 9, $y = 0.0234x - 0.3532$. ניתן לראות כי יש קשר לינארי בין המתח לזרם ולכן ניתן לחשב מכך את ההתנגדות באמצעות נוסחא מספר (1):

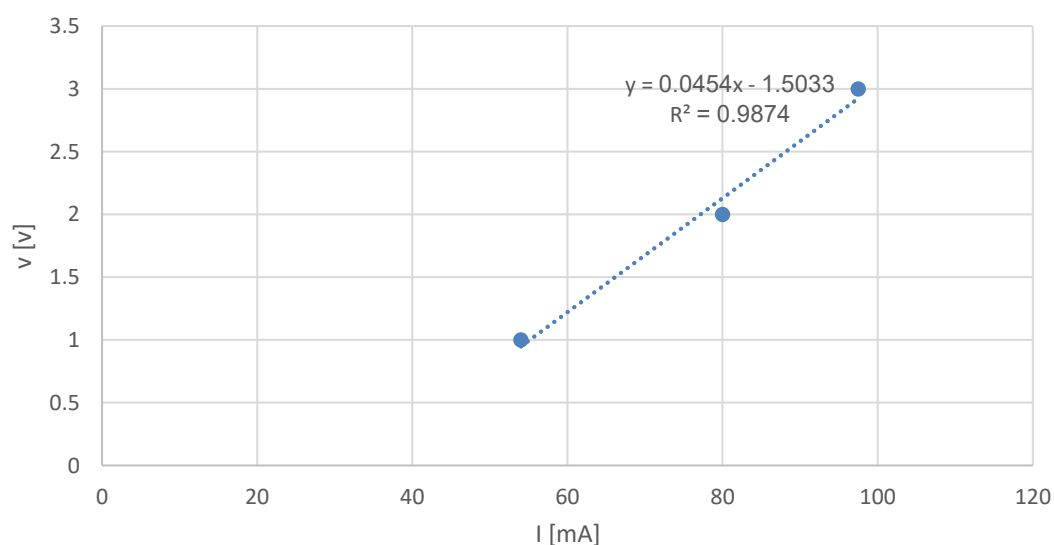
$$V = I \cdot R$$

ולכן נסיק כי ערך השיפוע מייצג את ההתנגדות, על מנת לקבל את ההתנגדות ב[Ω] נכפיל את ערך השיפוע ב 10^3 .

בנוסף, מהטבלה ניתן לראות כי השגיאה בשיפוע הגרף הינה 0.00315136 ומכך נקבל כי :

$$R_2 = 0.0234 \cdot 10^3 \pm 0.0032 \cdot 10^3 = 23 \pm 3 \Omega$$

גרף מספר 10: מתח כפונקציה של זרם בערכי מתח 1-3V



								SUMMARY OUTPUT
								<i>Regression Statistics</i>
							0.993696431	Multiple R
							0.987432597	R Square
							0.974865194	Adjusted R Square
							0.158539604	Standard Error
							3	Observations
								ANOVA
				<i>Significance F</i>	<i>F</i>	<i>MS</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>
				0.071518233	78.57093426	1.974865194	1.974865194	1 Regression
						0.025134806	0.025134806	1 Residual
							2	2 Total
<i>Upper 95.0%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>P-value</i>	<i>t Stat</i>	<i>Standard Error</i>	<i>Coefficients</i>	
3.651452473	-6.658062318	3.651452473	-6.658062318	0.167803596	-3.705567239	0.405688205	-1.503304923	Intercept
0.110477034	-0.019678634	0.110477034	-0.019678634	0.071518233	8.864024721	0.005121737	0.0453992	X Variable 1

על פי נתוני גרף מספר 10, $y = 0.0454x - 1.5003$. ניתן לראות כי יש קשר לינארי בין המתח לזרם ולכן ניתן לחשב מכך את ההתנגדות באמצעות נוסחא מספר (1):

$$V = I \cdot R$$

ולכן נסיק כי ערך השיפוע מייצג את ההתנגדות, על מנת לקבל את ההתנגדות ב[Ω] נכפיל את ערך השיפוע ב 10^3 .

בנוסף, מהטבלה ניתן לראות כי השגיאה בשיפוע הגרף הינה 0.005121737 ומכך נקבל כי :

$$R_3 = 0.0454 \cdot 10^3 \pm 0.0051 \cdot 10^3 = 45 \pm 5 \Omega$$

6.4. דיון בתוצאות ומסקנות:

נציג את התוצאות שחישבנו בניסוי זה :

$$c = 55, \beta = 0.6$$

עבור ערכי מתח בטווח נמוך של $0.04-0.1V$ $R_1 = 6.3 \pm 0.2 \Omega$ וההתאמה הלינארית של הגרף : $R^2 = 0.9942$.

עבור ערכי מתח בטווח בינוני של $0.1-1V$ $R_2 = 23 \pm 3 \Omega$ וההתאמה הלינארית של הגרף : $R^2 = 0.9483$

עבור ערכי מתח בטווח גבוהה של $1-3V$ $R_3 = 45 \pm 5 \Omega$ וההתאמה הלינארית של הגרף : $R^2 = 0.9874$

בניסוי זה מדדנו את קו האופיין של נורת להט בטווחים שונים של מתח הנופל עליה. בגרף 7 קיבלנו פונקציה אקספוננציאלית המתארת את הקשר בין הזרם למתח ומכך חישבנו את הקבועים. לאחר מכן, כאשר בנינו גרפים עבור כל טווח בנפרד קיבלנו כי יש התאמה לינארית בין המתח לזרם ולכן הסקנו כי לפי נוסחה (1) השיפוע של הגרף מייצג את ההתנגדות. בנוסף לכך, ניתן לראות כי ככל שטווח המתח עולה כך גם ההתנגדות עולה וניתן להסיק כי תופעה זו נובעת מכך שהטמ"פ עולה ובהתאם לרקע התאורטי ככל שהטמ"פ עולה גם ההתנגדות תעלה. בנוסף ניתן לראות כי R^2 הגבוהה ביותר הינו בטווח הערך הנמוך, ולכן ניתן להסיק כי התוצאות המדויקות ביותר הן בטמ"פ נמוכות. על מנת להגיע לתוצאות מדויקות יותר בטווחים האחרים ניתן לבצע מספר רב יותר של מדידות.

7. סיכום ומסקנות כלליות:

נציג את תוצאות הניסויים בטבלה:

ניסוי	תוצאות
3- מדידת התנגדות של נגד	סטייה של 0.3%, $R_{X1} = 10.13 \pm 0.09 \Omega$ סטייה של 35%, $R_{X2} = 13.6 \pm 0.1 \Omega$ התנגדות שנמדדה ישירות באמצעות רב מודד: $R_X = 10.1 \Omega$
4- מדידת התנגדות פנימית של ספק מתח	$r = 1.06 \pm 0.02 \Omega$
5- מדידת קו אופיין של דיודה	$I_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 20$ סטייה בין α מהגרף ומהנוסחה: 0.3%
6- מדידת קו אופיין של נורת להט	$c = 55$, $\beta = 0.6$ עבור ערכי מתח בטווח נמוך של 0.04-0.1V $R_1 = 6.3 \pm 0.2 \Omega$ עבור ערכי מתח בטווח בינוני של 0.1-1V $R_2 = 23 \pm 3 \Omega$ עבור ערכי מתח בטווח גבוהה של 1-3V $R_3 = 45 \pm 5 \Omega$

במעבדה זו למדנו על מעגלים חשמליים ורכיבים שונים בהם. בניסוי הראשון למדנו על חשיבות החיבור הנכון של המעגל החשמלי, והתנסינו עם מדידת מתח וזרם בוולטמטר ואמפרמטר. ראינו כי כאשר מדדנו את מתח ההדקים במעגל 2 קיבלנו סטייה גבוהה יותר (35%) מאשר במעגל הראשון (0.3%) בו מדדנו את המתח על הנגד. מכך ניתן להסיק כי המכשירי מדידה אינם אידיאליים וכאשר נרצה לחשב ברמת דיוק גבוהה נצטרך לדעת את התנגדותם ולחשב בהתאם לכך.

בניסוי השני ראינו כי המתח שהספק מפיק שונה ממתח הדקים אשר יש במעגל מפני שלספק המתח יש התנגדות פנימית.

בשני ניסויים אלו למדנו לחשב את ההתנגדות של הרכיבים בהתאם לנוסחאות המתאימות באמצעות גרף של המתח עליהם כפונקציה של הזרם.

בניסוי השלישי הכרנו רכיב חשמלי חשוב הנקרא דיודה, רכיב זה בעל מאפיין ייחודי מפני שהזרם זורם דרכו רק בכיוון אחד ואילו בכיוון השני הרכיב מהווה נתק במעגל. בשל כך התנגדותו משתנה ואיננה קבועה כמו בנגדים, ולכן כדי לדעת את התנגדותו נצטרך להתייחס למושג " התנגדות דינמית" המתאר את השינוי במתח חלקי השינוי בזרם. כאשר בנינו גרף זה ראינו כי ההתנגדות משתנה בהתאם לזרם כפי שציפינו. כמו כן, חישבנו את ערך הקבוע α באמצעות הנוסחה וגם באמצעות הגרף וקיבלנו אחוז סטייה נמוך ולכן ניתן להסיק כי התוצאות אותן חישבנו הן מדויקות.

בניסוי הרביעי, מדדנו את הזרם העובר דרך נורת להט בטווחי מתח שונים. ראינו בניסוי זה כי התנגדות הנורה עולה כאשר המתח עולה וההסבר לכך הוא שנורת הלהט משנה את התנגדותה בהתאם לטמ"פ, כלומר ככל שהטמפרטורה עולה אז גם ההתנגדות עולה כפי שקיבלנו בחישובי ההתנגדויות. כמו כן ראינו כי טווח המתחים הנמוך הוא בעל הדיוק הגבוהה ביותר מפני שההתאמה הליניארית שלו היא הקרובה ביותר ל1, ולכן ניתן להסיק כי בטווח זה הטמ"פ לא משתנה הרבה ולכן ערכים אלו הם המדויקים ביותר.

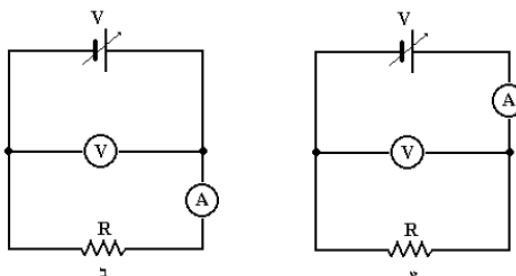
8. ביבליוגרפיה

1. תדריך מעבדה – אוניברסיטת בן גוריון

9. נספחים

שאלות הכנה - מעבדה 4, הולכה חשמלית

1. נניח שברשותך אמפרטר בעל התנגדות פנימית של 10Ω , וולטמטר בעל התנגדות פנימית של $30k\Omega$ מה תהיה ההתנגדות שתמדוד עבור הנגדים של 1Ω , 100Ω , 10000Ω בכל אחד מהמעגלים המופיעים בציור 1א, 1ב. קבע עבור אילו התנגדויות R עדיף להשתמש בחיבור א או ב.



מעגל א': המתח שנמדוד יהיה המתח על הנגד ואילו הזרם שנמדוד יהיה הזרם שיזרום דרך הנגד וגם הזרם שיזרום דרך הוולטמטר.

נשים לב כי הוולטמטר והנגד מחוברים במקביל ואליהם מחובר בטור האמפרטר, לכן נשתמש בנוסחאות (3), (4) לחישוב ההתנגדות הכללית של המעגל:

$$\frac{1}{R_{V,R}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V}, \quad \Sigma R = R_{V,R} + R_A$$

$\frac{1}{R_{V,R}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V} = \frac{1}{1} + \frac{1}{30 \cdot 10^3}, \quad R_{V,R} = 0.999\Omega$ $\Sigma R = R_{V,R} + R_A = 0.999 + 10 = 10.999 \Omega$ $\Sigma R = 11 \Omega$	$R = 1\Omega$
$\frac{1}{R_{V,R}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V} = \frac{1}{100} + \frac{1}{30 \cdot 10^3}, \quad R_{V,R} = 99.6678\Omega$ $\Sigma R = R_{V,R} + R_A = 99.6678 + 10 = 109.6678 \Omega$ $\Sigma R = 110 \Omega$	$R = 100\Omega$
$\frac{1}{R_{V,R}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V} = \frac{1}{10000} + \frac{1}{30 \cdot 10^3}, \quad R_{V,R} = 7500\Omega$ $\Sigma R = R_{V,R} + R_A = 7500 + 10 = 7510 \Omega$ $\Sigma R = 7510 \Omega$	$R = 10000\Omega$

מעגל ב': הזרם שנמדוד יהיה הזרם של הנגד ואילו המתח יהיה סכום המתח על פני הנגד ועל פני האמפרמטר.

נשים לב כי האמפרמטר והנגד מחוברים בטור ואליהם מחובר במקביל הוולטמטר, לכן נשתמש בנוסחאות (3), (4) לחישוב ההתנגדות הכללית של המעגל:

$$R_{A,R} = R + R_A, \quad \frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{R_{A,R}} + \frac{1}{R_V}$$

$R_{A,R} = R + R_A = 1 + 10 = 11\Omega$ $\frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{R_{A,R}} + \frac{1}{R_V} = \frac{1}{11} + \frac{1}{30 \cdot 10^3}$, $\Sigma R = 10.99\Omega$ $\Sigma R = 11\Omega$	$R = 1\Omega$
$R_{A,R} = R + R_A = 100 + 10 = 110\Omega$ $\frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{R_{A,R}} + \frac{1}{R_V} = \frac{1}{110} + \frac{1}{30 \cdot 10^3}$, $\Sigma R = 109.56\Omega$ $\Sigma R = 110\Omega$	$R = 100\Omega$
$R_{A,R} = R + R_A = 10000 + 10 = 10010\Omega$ $\frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{R_{A,R}} + \frac{1}{R_V} = \frac{1}{10010} + \frac{1}{30 \cdot 10^3}$, $\Sigma R = 7505.624\Omega$ $\Sigma R = 7505\Omega$	$R = 10000\Omega$

ניתן לראות כי בשני המעגלים התוצאות יצאו זהות ולכן ניתן להסיק כי אין העדפה לאחד מהחיבורים על פני השני.

2. נתון ספק מתח של 10V ושני נגדים $R_1 = 10\Omega \pm 0.5\Omega$, $R_2 = 15\Omega \pm 0.5\Omega$

R_T ההתנגדות השקולה של R_1, R_2 .

מהו הזרם דרך הנגד R_T כאשר שני הנגדים מחוברים בטור?

מהו הזרם דרך הנגד R_T כאשר שני הנגדים מחוברים במקביל?

חשב את השגיאות בזרמים.

כאשר שני הנגדים מחוברים במקביל נשתמש בנוסחה (3) למציאת ההתנגדות השקולה של המעגל:

$$R_T = R_1 + R_2 = 10 + 15 = 25 \quad R_T = 25 \pm 0.5 \Omega$$

נחשב את הזרם לפי נוסחה (1):

$$V = IR, I = \frac{V}{R} = \frac{10}{25} = 0.4A$$

על מנת לחשב את השגיאה בזרם נשתמש בנוסחה (1) ונוסחה (9):

$$(9) \Delta I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial R} \Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial V} \Delta V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{-V}{R^2} \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{1}{R} \cdot \Delta V\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-10}{25^2} \cdot 0.5\right)^2 + \left(\frac{1}{25} \cdot 0\right)^2} = 0.008$$

לכן כאשר הנגדים מחוברים בטור הזרם הוא: $I = 0.4 \pm 0.008 A$

כאשר שני הנגדים מחוברים במקביל נשתמש בנוסחה (4) למציאת ההתנגדות השקולה של המעגל:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{15} = \frac{1}{6}, R_T = 6 \pm 0.5 \Omega$$

נחשב את הזרם לפי נוסחה (1):

$$V = IR, I = \frac{V}{R} = \frac{10}{6} = 1.66667 A$$

על מנת לחשב את השגיאה בזרם נשתמש בנוסחה (1) ונוסחה (9):

$$\begin{aligned} (9) \Delta I &= \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial R} \Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial V} \Delta V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{-V}{R^2} \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{1}{R} \cdot \Delta V\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-10}{6^2} \cdot 0.5\right)^2 + \left(\frac{1}{6} \cdot 0\right)^2} = 0.1388 \end{aligned}$$

לכן כאשר הנגדים מחוברים בטור הזרם הוא: $I = 1.7 \pm 0.1 A$

3. לספק מתח יש מתח הדקים $4V \pm 0.1V$ כאשר לא זורם בו זרם. ידוע שעבור זרם של $I = 100mA \pm 1mA$ מתח ההדקים הינו $V = 2.7V \pm 0.3V$.

נעביר את הזרם ליחידות של אמפר על ידי הכפלה ב 10^{-3} :

$$I = 100mA \pm 1mA = 0.1 \pm 0.001A$$

נשתמש בנוסחה (5) לחישוב ההתנגדות הפנימית:

$$V = E - rI, \quad r = \frac{E - V}{I} = \frac{4 - 2.7}{0.1} = 13 \Omega$$

על מנת לחשב את השגיאה בהתנגדות הפנימית נשתמש בנוסחה (5) ונוסחה (9):

$$\begin{aligned} (9) \Delta r &= \sqrt{\left(\frac{\partial r}{\partial E} \Delta E\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial I} \Delta I\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{I} \cdot \Delta E\right)^2 + \left(\frac{-1}{I} \cdot \Delta V\right)^2 + \left(\frac{V - E}{I^2} \cdot \Delta I\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{0.1} \cdot 0.1\right)^2 + \left(\frac{-1}{0.1} \cdot 0.3\right)^2 + \left(\frac{2.7 - 4}{0.1^2} \cdot 0.001\right)^2} = 3.165 \end{aligned}$$

לכן ההתנגדות הפנימית של ספק המתח היא $r = 13 \pm 3 \Omega$

4. ידוע שעבור זרם עם המקדמים $I_0 = 1nA, \alpha = 2 \frac{C}{J}$.

בזמן פעולתה נמדד מפל מתח: $V_0 = 1V \pm 0.1V$.

חשב את הזרם שעובר דרכה במתח V_0 והערך את השגיאה בזרם.
 מהי ההתנגדות הדיודה בזרם שחישבת קודם?
 נשתמש בנוסחה (6):

$$I = I_0 e^{\alpha V} = e^{2 \cdot 1} = 7.389 nA = 7.389 \cdot 10^{-9} A$$

נחשב את השגיאה בזרם על ידי נוסחה (9) ו (6):

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial V} \Delta V\right)^2} = \sqrt{(I_0 \cdot e^{\alpha V} \cdot \alpha \cdot \Delta V)^2} = 1 \cdot e^2 \cdot 2 \cdot 0.1 = 1.4778 nA$$

$$= 1.478 \cdot 10^{-9} A$$

לכן הזרם דרך הדיודה הינו: $I = 7 \cdot 10^{-9} \pm 1 \cdot 10^{-9} A$
 כעת נחשב את ההתנגדות הדיודה באמצעות נוסחה (1):

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{7 \cdot 10^{-9}} = 142857143 \Omega$$

נחשב את השגיאה בהתנגדות באמצעות נוסחה (9) ו (1):

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial I} \Delta I\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{-V}{I^2} \Delta I\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{7 \cdot 10^{-9}} \cdot 0.1\right)^2 + \left(\frac{-1}{(7 \cdot 10^{-9})^2} \cdot 1 \cdot 10^{-9}\right)^2} = 24911338$$

לכן ההתנגדות הדיודה הינה: $R = 14 \cdot 10^7 \pm 2 \cdot 10^7 \Omega$

5. ידוע שעבור נורט להט בעלת המקדמים: $\beta = 3.5 \pm 0.2$, $c = 2 \pm 0.2 \frac{1}{\Omega}$

כאשר מפל מתח על הנורה: $V_0 = 10V \pm 1V$, למה שווה הזרם? הערך את השגיאה.
 מהי תהיה ההתנגדות הזרם בזרם זה?

נשתמש בנוסחה (7) על מנת למצוא את הזרם העובר דרך נורת הלהט:

$$I = cV^\beta = 2 \cdot 10^{3.5} = 6324.555 A$$

נחשב את השגיאה בזרם על ידי נוסחאות (9) ו (7):

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2}$$

$$= \sqrt{(cV^{\beta-1} \beta \cdot \Delta V)^2 + (V^\beta \cdot \Delta c)^2 + (cV^\beta \ln(V) \cdot \Delta \beta)^2} =$$

$$\sqrt{(2 \cdot 10^{2.5} \cdot 3.5 \cdot 1)^2 + (10^{3.5} \cdot 0.2)^2 + (2 \cdot 10^{3.5} \cdot \ln(10) \cdot 0.2)^2} = 3712.55$$

לכן בהתחשבות בספרות משמעותיות נקבל כי הזרם על הנורה הינו: $I = 6000 \pm 4000 \text{ A}$
נחשב את התנגדות הנורה באמצעות נוסחה (1):

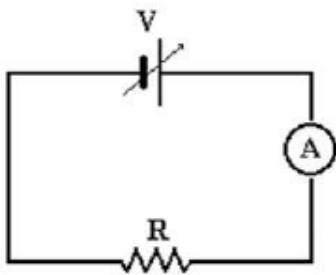
$$R = \frac{V}{I} = \frac{10}{6000} = 0.001667 \Omega$$

נחשב את השגיאה בהתנגדות באמצעות נוסחה (9) ו(1):

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial I} \Delta I\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{-V}{I^2} \Delta I\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{6000} \cdot 1\right)^2 + \left(\frac{-10}{6000^2} \cdot 4000\right)^2} = 0.00112$$

לכן התנגדות הנורה הינה: $R = 0.002 \pm 0.001 \Omega$



6. במעגל החשמלי המתואר נתון: $R = 30 \Omega$ התנגדות פנימית של מקור המתח הינה

$r = 1 \Omega$, ההתנגדות הפנימית של האמפרמטר $r_A = 1 \Omega$, והכא"מ של הספק הוא $E = 100V$.

א. מהי התנגדות החוטים אם הזרם הנמדד במעגל הינו $2A$.
ב. החוטים במעגל הוחלפו בחוטים העשויים מאותו חומר ובעלי אותו אורך, אך עם שטח החתך הקטן פי 3. האם הזרם במעגל יעלה או ירד ובכמה אחוז?
א. נשתמש בנוסחה (5) למציאת המתח במעגל:

$$V = E - rI = 100 - 1 \cdot 2 = 98 V$$

נשתמש בנוסחה (1) למציאת ההתנגדות הכוללת במעגל:

$$\Sigma R = \frac{V}{I} = \frac{98}{2} = 49 \Omega$$

נסמן את התנגדות החוטים ב X ונחשב אותו על ידי נוסחה (3) מפני שהרכיבים במעגל מחוברים בטור:

$$\Sigma R = X + R + r_A, \quad X = \Sigma R - R - r_A = 49 - 30 - 1 = 18 \Omega$$

לכן התנגדות החוטים במעגל הינה $X = 18 \Omega$

ב. נשתמש בנוסחה (2): $R = \frac{\rho L}{A}$ ניתן לראות כי אם שטח החתך קטן פי 3, התנגדות החוטים גדלה פי 3. בשל כך ההתנגדות במעגל תעלה, ולכן הזרם במעגל ירד.
נחשב:

$$X = 18 \cdot 3 = 54 \, \Omega$$

נשתמש בנוסחה (3) לחישוב ההתנגדות הכללית במעגל:

$$\Sigma R = X + R + r_A = 54 + 30 + 1 = 85 \, \Omega$$

נשתמש בנוסחה (1) לחישוב הזרם:

$$I = \frac{V}{\Sigma R} = \frac{98}{85} = 1.15 \, A$$

לכן הזרם במעגל החדש הינו $I = 1.15A$ וכפי שציפינו הזרם ירד.