

סמסטר ב' תשס"ב

שם הבדוק : _____

תאריך הבדיקה : _____

ציון הדו"ח : **I** _____

II _____

דו"ח מסכם בניסוי : מעגלים חשמליים

חלק : א'

שם מדריך הניסוי (שם מלא) : ברק אביגדורי

תאריך ביצוע הניסוי : 17.12.15

תאריך הגשת הדו"ח : 30.12.15

הדו"ח מוגש על ידי :

309901205

ת.ז.

כהן
משפחה

אדם
שם פרטי

II

201432911

ת.ז.

יהודה
משפחה

עדי
שם פרטי

I

02
מספר עמדה

D
תת קבוצה

03
מס' קבוצת המעבדה

הנדסת חשמל
מסלול הלימוד

הערות הבדוק לנושאים לקויים בדו"ח :

מטרת הניסוי : בחינת התנהגות בסיסית של מעגלי זרם ישר (DC).

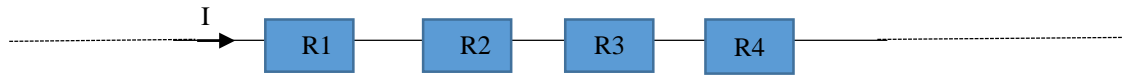
רקע תיאורטי :

מעגלים חשמליים כוללים רכיבים רבים ושונים, בשלב זה אנו נדון במעגלי DC בהם הזרם ישר ואינו משנה מגמה או כיוון עם הזמן. במעגלים אלו מקור המתח מספק מתח קבוע, ולא למנטים החשמליים יש התנגדות ולכן נקרא להם נגדים. במעגל שבו מקור מתח ונגד, על פי חוק אוהם נקבל את הקשר הבא :

$$V = IR \quad (1)$$

כאשר V – המתח במעגל [VOLT], I – הזרם במעגל [AMPER], R – התנגדות הנגד [Ohm-Ω].
באופן כללי לרכיבים שונים התנגדות שונה התלויה במבנה החומר ממנו הם עשויים ובצורתו.

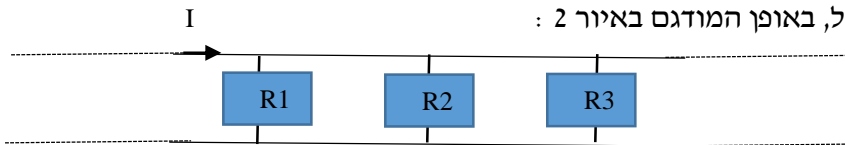
נחבר מספר נגדים באופן המודגם באיור 1 :



איור 1 – חיבור טורי של נגדים

נוכל לחשב נגד שקול בו המתח והזרם יהיו זהים למתח והזרם שבין הנגד הראשון לאחרון :

$$V = IR_{EQ} = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots) = I \sum_i R_i \rightarrow R_{EQ} = \sum_i R_i \quad (2)$$



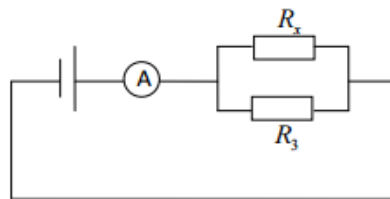
איור 2 – חיבור מקבילי של נגדים

נחבר מספר נגדים במקביל, באופן המודגם באיור 2 :

נתאים לנגד ה i את הזרם I_i שעובר דרכו, נסמן את הזרם הכולל I_{TOT} , המתח בין ההדקים זהה ולכן נקבל :

$$I_{TOT} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \rightarrow I_{TOT} = \frac{V}{R_{EQ}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \dots \rightarrow \frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (3)$$

נתבונן באיור 3 :



איור 3 – חיבור מקבילי של נגדים במעגל עם אמפרמטר וספק מתח

כאשר R_3 נגד ידוע ו R_x נגד שאת התנגדותו אנו מעוניינים לחשב, לפי נוסחה 3 ניתן לחשב לשניהם נגד שקול (חיבור מקבילי) :

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_x} \rightarrow R_{EQ} = \frac{R_3 * R_x}{R_3 + R_x} \quad (4)$$

כיון שמכשיר המדידה שברשותנו אינו אידיאלי, יש לו התנגדות פנימית אותה נסמן ב R_A , התנגדות זו מחוברת בטור להתנגדות השקולה שחישבנו בנוסחה 4, כעת נוכל לחשב ע"פ נוסחה 2 את ההתנגדות הכוללת של המעגל :

$$R_{final} = R_A + R_{EQ} = \frac{R_A(R_3 + R_x) + R_3 * R_x}{R_3 + R_x} \quad (5)$$

מחוק אוהם (נוסחה 1) נקבל :

$$V = IR_{final} \rightarrow I = V * \frac{R_3 + R_x}{R_A(R_3 + R_x) + R_3 * R_x} \quad (6)$$

רשימת ציוד :

- מקור מתח – כאשר יוצג במעגל יסומן
- אוסף נגדים יחד עם לוח ייעודי לחיבור נגדים. במעגל נסמן נגד באופן הבא
- נגד משתנה
- תילי חיבור
- מד מתח (וולטמטר) – למד מתח אידיאלי התנגדות אינסופית. כאשר יוצג במעגל יסומן
- מד זרם (אמפרמטר) – למד זרם אידיאלי התנגדות אפסית. כאשר יוצג במעגל יסומן
- מד התנגדות

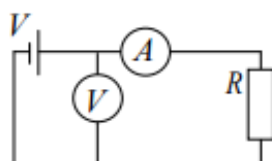
מהלך הניסוי :

בניסוי זה נאמוד על טיבם של חוקים אלו, ראשית עלינו להבין שנוסחאות אלו מתארות מצב אידיאלי בו הזרם קבוע והמתח נשמר אחיד על פני הדקי המעגל, במציאות אין זה נכון וישנם תופעות כגון בלאי מכשירי המדידה, התנגדות פנימית של מכשירי המדידה עצמם, ובכך בעצם המדידה אנו משנים את המתח והזרם על הנגד. נרצה לצמצם ככל הניתן את תופעות אלו ועל כן נגדיר את התנאים בהם נוכל להניח שהמדידות שאנו מבצעים זניחים ביחס לערכים הנמדדים.

שלב 1

במהלך הניסוי נרצה למדוד את המתח והזרם על נגד כלשהו **בו זמנית** ולכן נרצה לאמוד את דיוק מכשירי המדידה שברשותנו. נסמן R_V – התנגדות הוולטמטר, R_A – התנגדות האמפרמטר, R – התנגדות הנגד בניסוי, נפריד ל 3 מקרים :

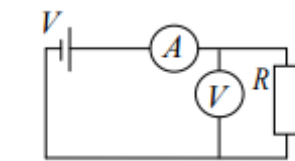
מקרה 2 : $R \gg R_A$



איור 5

במצב זה התנגדות הנגד גדולה מאוד ביחס להתנגדות האמפרמטר ולכן השפעתו על המתח דרך הנגד זניחה.

מקרה 1 : $R \ll R_V$



איור 4

במצב זה התנגדות הוולטמטר גדולה מאוד ביחס להתנגדות הנגד ולכן השפעתו על הזרם דרך הנגד זניחה.

מקרה 3 : שני התנאים מתקיימים, במקרה זה אין חשיבות לאופן שבו נחבר את המעגל.

כיוון שאין אנו יודעים את היחס בין התנגדות הנגד להתנגדות מכשירי המדידה נחבר ונמדוד את המתח והזרם לפי איור 4 ולפי איור 5 ונפעל באופן הבא :

- אם המתח נשאר קבוע בשני המקרים – נסיק שמתקיימים התנאים למקרה 2.
- אם הזרם נשאר קבוע בשני המקרים – נסיק שמתקיימים התנאים למקרה 1.
- אם הזרם והמתח נשארו קבועים - נסיק שהמכשירים שברשותנו מדויקים לביצוע הניסוי בכל אחד מהאופנים שהוצגו.
- אם הזרם והמתח שונים – נסיק שמכשירי המדידה שברשותנו לא מדויקים מספיק לביצוע הניסוי.

שלב 2

בשלב זה נרצה לאמת את נכונות החיבור המקבילי והטורי (נוסחאות 2,3), נחבר מעגל כמודגם באיור 3 ונמדוד את המתח והזרם עבור התנגדויות שונות .

תכנון עיבוד התוצאות :

שלב 1

מדידת ערך התנגדות הנגד – ישמש כערך תיאורטי :

בתחילת הניסוי נמדוד את הערך ההתנגדות של הנגד ע"י מד ההתנגדות, ערך זה יהווה את הערך התיאורטי אותו אנו מעוניינים לחשב דרך שימוש בנוסחאות שהוצגו לעיל.

- נבצע 60 מדידות בפרק זמן קצר ונמצע אותם ע"י ממוצע חשבוני פשוט, נסמן ממוצע זה $\langle R \rangle$.
- לכל סט מדידות נחשב את **סטיית התקן ע"פ נוסחה 3.9** שבחוברת הנוסחאות, ולאחר מכן נחשב את **השגיאה הסטטיסטית** ע"י שימוש ב**נוסחה 3.10** שבחוברת זו.
- נחשב את שגיאת מכשירי המדידה לפי הוראות היצרן. את המדידות נבצע בטווח של $10K\Omega$, נסמן ΔR_{inst} את שגיאת המכשיר :

$$\Delta R_{inst} = \frac{0.01\langle R \rangle + 0.001 * 10K}{100} \quad [Ohm(\Omega)] \quad (7)$$

- נשקלל את השגיאה הסטטיסטית ושגיאת המכשיר לכדי **שגיאה אחת ע"י שימוש בנוסחה 2.19**.

מדידת ערכי המתח והזרם עבור מתחים שונים : (לאחר שקבענו מהי הדרך הנכונה לחבר את המעגל)

- נבצע 60 **מדידות של המתח ושל הזרם** בפרקי זמן קצרים, את הממוצעים החשבוניים נסמן $\langle V \rangle$, $\langle I \rangle$ בהתאמה.
- לכל סט מדידות נחשב את **סטיית התקן והשגיאה הסטטיסטית** באופן זהה לדרך שהוצגה עבור הנגד.
- את המדידות נבצע בטווחי זרם ומתח של $0.1A$, $10V$ בהתאמה, לפי הוראות היצרן שגיאות המכשירים יינתנו ע"י :

$$\Delta I_{inst} = \frac{0.05\langle I \rangle + 0.005 * 0.1}{100} \quad [Amper] \quad (8)$$

$$\Delta V_{inst} = \frac{0.0035\langle V \rangle + 0.0005 * 10}{100} \quad [Volt] \quad (9)$$

כאשר ΔI_{inst} היא שגיאת מכשיר מד הזרם, ΔV_{inst} היא שגיאת מכשיר מד המתח.

- לכל סט נחשב **שגיאה כוללת ע"פ נוסחה 2.19**.

לאחר שנחזור מספר פעמים על הניסוי, נבצע התאמה ליניארית לגרף $V(I)$, ע"פ חוק אוהם (נוסחה 1) נצפה שערכו של שיפוע הגרף יהיה תואם לערכו הנמדד של הנגד.

שלב 2

תהליך המדידה בשלב זה יהיה זהה לתהליך המדידה שהוצג בשלב 1 (סטים של 60 מדידות, חישובי שגיאה וכו'). תחילה נחשב את ערכו הקבוע של הנגד (R_3 באיור 3).

נחבר את המעגל לפי איור 3 והפעם נשאיר את המתח קבוע ואת ערכי הנגד נשנה. עבור כל ערך שונה של הנגד :

- נחשב את ערכו של הנגד המשתנה (R_x באיור 3)
- נחשב את הזרם

נחזור על התהליך מספר פעמים, את התוצאות נשבץ בגרף המתואר ע"י נוסחה 6, כלומר נבנה גרף $I(V, R_x)$, נציב ניחוש ל R_A כך שערכו יהיה 0, ואת R_3 נחלץ מן הגרף. את התוצאה נשווה עם הערך המדוד של R_3 .

הערכת טיב השגיאה ע"י מדד $n\sigma$:

- כאשר אנו מעוניינים להעריך עד כמה הערך שמדדנו קרוב לערכו התיאורטי.
- פעם אחת נמדוד באופן ישיר (ע"י מכשיר מדידה) נמצא את ערכו התיאורטי.
- פעם נוספת נמדוד באופן עקיף (נמדוד ערכים שמהם ניתן לחלץ את הערך ע"י שימוש בנוסחה).
- לאחר מכן נפעל ע"פ הנוסחה הבאה :
- אם $x_1 + \Delta x_1$ הינו ערך נתון, $x_2 + \Delta x_2$ הינו ערך מדוד, טיב השגיאה תינתן ע"י :

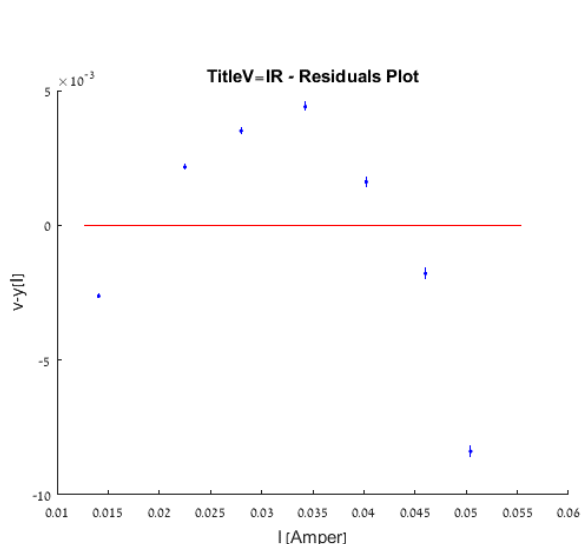
$$n\sigma = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}} \quad (10)$$

עיבוד התוצאות :

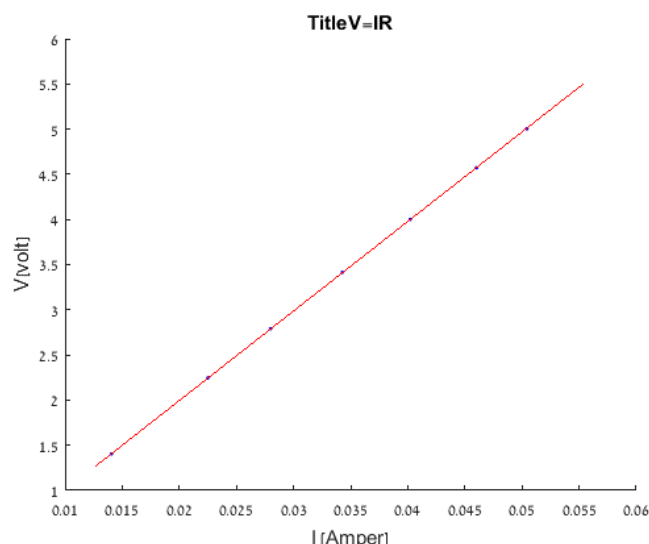
שלב 1

בנספח א' שבחלק הנספחים מרוכזות התוצאות עבור מדידות הזרם והמתח בשני האופנים המוצגים באיור 4 ובאיור 5, כאשר החלק a מייצג את איור 4 והחלק b מייצג את איור 5. תוך התייעצות עם המדריך הוחלט לבצע התאמה ליניארית לשני המעגלים ולבסוף להשוות את שיפוע הגרף, המייצג את התנגדות הנגד, לערך הנגד הנמדד ישירות, את טיב ההתאמה נחשב ע"י נוסחה 10.

הנתונים לגרף עבור המעגל באיור 4, מרוכזים בנספח ב', גרף ההתאמה הליניארית למעגל זה :



איור 7 – גרף השארים להתאמה שבאיור 6



איור 6 – התאמה ליניארית למעגל שבאיור 4

הערכים המתקבלים מהגרף :

$$[Volt] \ a1 = 0.01251756 \pm 0.001192293$$

$$[Ohm] \ a2 = 99.12935 \pm 0.04767767$$

$$\chi^2_{\text{reduced}} = 8.5932$$

$$p \text{ probability} = 3.754e-08$$

מנוסחה 1 אנו מצפים שערכו של $a2$ אשר מהווה את שיפוע הגרף, ייצג את ערך התנגדות הנגד $[Ohm]$. ערכו של $a1$ מייצג קבוע מתח היכול לנבוע ממתח התחלתי (כיוול שגוי, שגיאה שיטתית) או ממדידות לא מדויקות. ניתן לראות שה χ^2_{reduced} גדול מהערך הרצוי, בנוסף מהתבוננות בגרף השארים ניתן לזהות מגמה פרבולית סביב ההתאמה, כלומר – עבור זרמים קטנים ערכי ההתאמה נמוכים מהערך המדוד וככל שהזרם גדל ערכי ההתאמה גדלים ביחס לערכים הנמדדים, כמו כן נבצע הערכת טיב התוצאה ע"י נוסחה 10 :

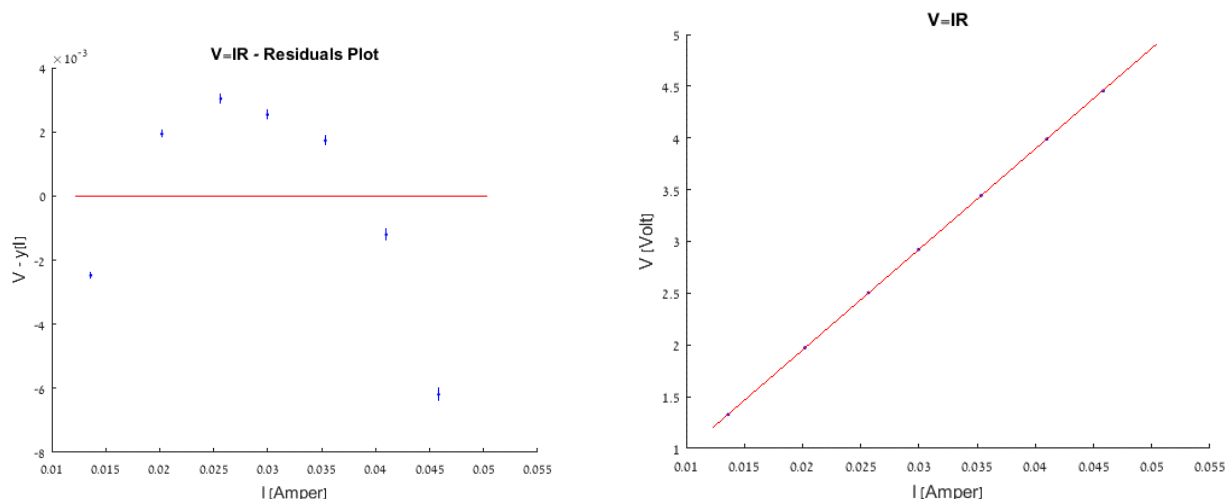
$$\text{ערך הנגד כפי שנמדד} : 97.698 \pm 0.014$$

$$\text{ערך הנגד המתקבל מהגרף} : 99.129 \pm 0.048$$

טיב ההתאמה :

$$n\sigma = \frac{|97.698 - 99.129|}{\sqrt{(0.014)^2 + (0.048)^2}} = 28.62$$

בנספח ג' שבחלק הנספחים מרוכזות תוצאות החישובים של המתח והזרם במעגל המודגם באיור 5, נתבונן בגרפים הבאים :



איור 9 – גרף השארים המתאים לגרף שבאיור 8

איור 8 – התאמה ליניארית למעגל המודגם באיור 5

הערכים המתקבלים עבור ההתאמה :

$$\begin{aligned} \text{[Volt]} \quad a1 &= 0.006721185 \pm 0.001176969 \\ \text{[Ohm]} \quad a2 &= 97.2058 \pm 0.05071825 \\ \chi^2_{\text{reduced}} &= 7.0551 \\ p \text{ probability} &= 1.3257e-06 \end{aligned}$$

בניגוד לגרף עבור המעגל שבאיור 4, ההתאמה של המעגל באיור 5 מספקת תוצאות יותר קרובות לערך המדוד של הנגד. עם זאת, גם במקרה זה χ^2_{reduced} גבוה מערכו המצופה. מהתבוננות בגרף השארים ניתן לראות מגמה פרבולית זהה למגמה שבאיור 7, על כך נרחיב בדיון. כעת נחשב את טיב ההתאמה ע"י נוסחה 10 :

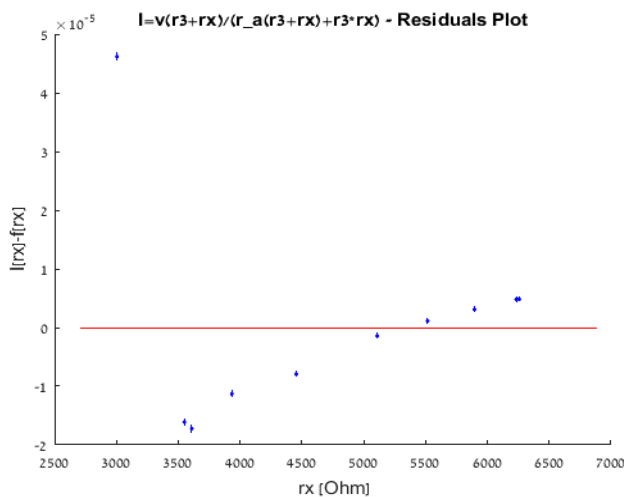
$$\begin{aligned} \text{ערך הנגד כפי שנמדד} &: \text{Ohm} \quad 97.698 \pm 0.014 \\ \text{ערך הנגד המתקבל מהגרף} &: \text{Ohm} \quad 97.206 \pm 0.051 \\ \text{טיב ההתאמה} &: \end{aligned}$$

$$n\sigma = \frac{|97.698 - 97.206|}{\sqrt{(0.014)^2 + (0.051)^2}} = 9.303$$

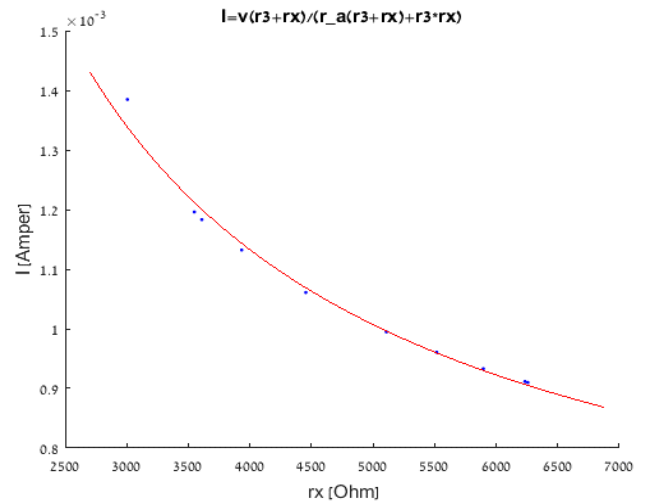
נוכל להסיק אפוא שהמידות שבוצעו מהמעגל שבאיור 5 היו מדויקות יותר.

שלב 2

בנספח ד' מרוכזות המדידות שנעשו עבור המעגל שבאיור 3, נבצע התאמה גרפית לפי נוסחה 6, הגרף המתקבל :



איור 11 – גרף שארים להתאמה בשלב 2



איור 10 – התאמה גרפית שלב 2

כאשר בנוסחה שבנינו במטלב $V - a1$, $r3 - a2$ (התנגדות הנגד הקבוע), $r_A - a3$ (התנגדות מד הזרם), בהתאמה לנוסחה 6.

: initial parameters' values

$a1 = 2.500000$ $a2 = 4768.000000$ $a3 = 100.000000$

: fitted parameters' values

[volt] $a1 = 2.717202 \pm 0.002914437$

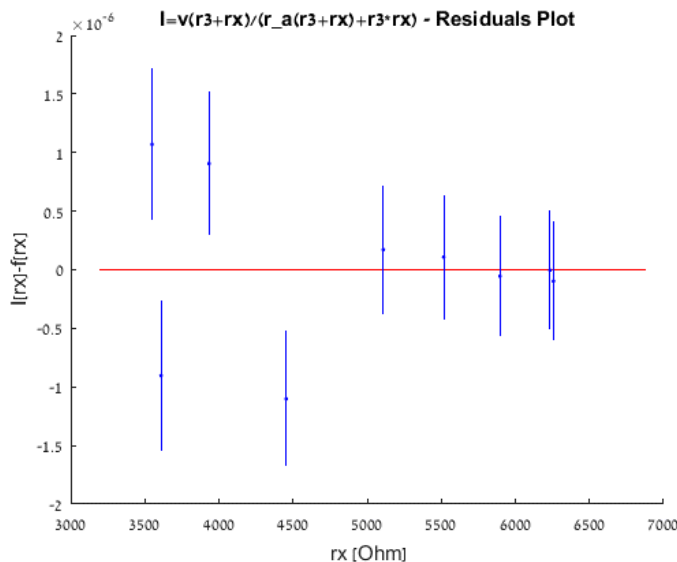
[Ohm] $a2 = 5425.523 \pm 36.2193$

[Ohm] $a3 = 96.26651 \pm 1.935662$

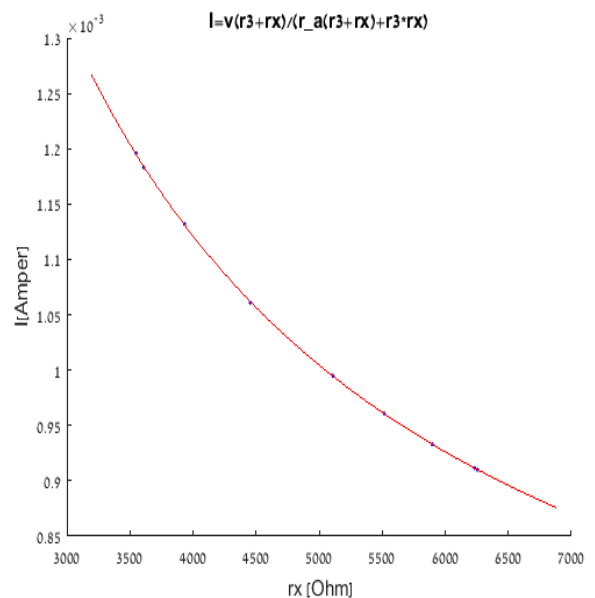
$\chi^2_{\text{reduced}} = 834.65$

p probability = 0

ניתן לראות לפי הערכים שההתאמה לא טובה, ערך χ^2_{reduced} גבוה מאוד ו-p probability הינו 0, אולם ניתן לראות בבירור מגרף השארים מגמת עליה לא ברורה ונקודה ספציפית חריגה במיוחד הן במגמה והן במרחקה מן הגרף, כנראה בשל מדידה לא עקבית, בלבול או טעות בזמן הקראת הערך. נבנה התאמה דומה עבור אותם הערכים ללא הערך החריג, נקבל את ההתאמה הבאה :



איור 13 – גרף שארים להתאמה המתוקנת



איור 12 – התאמה מתוקנת לנוסחה 6

:initial parameters' values
 $a1 = 2.500000$ $a2 = 4768.000000$ $a3 = 100.000000$
:fitted parameters' values
 [Volt] $a1 = 2.542008 \pm 0.002518422$
 [Ohm] $a2 = 4729.125 \pm 32.92844$
 [Ohm] $a3 = 99.93192 \pm 0.9214393$
 $\chi^2_{\text{reduced}} = 1.7517$
 $p \text{ probability} = 0.10475$

ניתן לראות בבירור כי לאחר הסרת המדידה החריגה קיבלנו התאמה הרבה יותר טובה, הן בערכי χ^2_{reduced} והן בערכי p , כמו כן הערכים $a1, a2, a3$ קרובים במידה רבה יותר לערכים אשר מדדנו. גרף השארים מציג מגמה אקראית. ניעזר בנוסחה 10 על מנת להעריך את טיב השגיאה, בין מדידת הנגד $r3$ באופן ישיר, ובין הערך $a2$ המתקבל מן הגרף:

$$n\sigma = \frac{|4729 - 4768.287|}{\sqrt{33^2 + 0.577^2}} = 1.208$$

ערכי $n\sigma$ הקטנים מ 3 נחשבים לערכים טובים, על כן טיב השגיאה גבוה.

דיון :

ראשית, ניתן להתרשם באופן מובהק כי המעגל התואם יותר למכשירי המדידה בהם ביצענו את הניסוי הינו המעגל מאיור 5. זאת בשל מדד χ^2_{reduced} הקרוב יותר ל 1 (כלומר טוב יותר), ע"י מדד $n\sigma$ טוב יותר וכן ע"י קרבתו של הפרמטר החופשי $a(1)$ לערך 0, שהוא הערך המצופה. ייתכן כי לחות שהייתה בחדר גרמה למתח התחלתי קבוע. נשים לב שבשני המקרים גרף השארים הראה מגמה פרבולית, עבור ערכי זרם קטנים הערכים היו מעל הישר המותאם ועבור זרמים גבוהים הערכים היו מתחתיו. יתכן כי מכשירי המדידה השפיעו על הזרם והמתח העובר במעגל (ודרך הנגד בפרט), בנוסף הזרמת זרם יוצרת חום בנגד מה שעלול לשנות במעט את תכונותיו הכימיות (ברמה המולקולרית) ובכך להקטין את התנגדותו, כלומר -הנגד מתחמם ככל שהזרם גדל, ובכך קטנה התנגדותו, מצב זה מתאים לצורה הפרבולית אותה אנו רואים.

בשלב השני ריכזנו את המדידות ולאחר התבוננות בגרף השארים זיהינו נקודה "חשודה", לאחר הסרת הנקודה קיבלנו התאמה טובה, והצלחנו לקרב את נוסחה 10 לפי המדידות במידה רבה. תוך התחשבות בחיבור המקבילי והטורי הנדרש.

נספחים :

נספח א' – מדידות הזרם והמתח במעגל a (איור 4) ובמעגל b (איור 5), כאשר :
 מקור – המתח המושרה (v), (volt) – v, המתח הנמדד (v), (volt) – sd_v, סטיית התקן של 60 מדידות, dv_stat \ di_stat – שגיאה סטטיסטית, dv_inst \ di_inst – שגיאת מכשירי המדידה, Range – טווחי המדידות.

a	range(10v)				range(100ma)							
	v מקור	sd_v[10 ⁻⁶]	sd_v[v]	dv_stat[v]	dv_inst[v]	dv_final[v]	i[ma=10 ⁻³]	sd_i[na=10 ⁻⁹]	sd_i[ma]	di_stat[ma]	di_inst[ma]	
	1.4	1.40374	36.8525	3.68525E-05	4.758E-06	9.913E-05	9.925E-05	14.06093	787.734	0.000787734	0.000101696	0.007035
	2.2	2.24462	18.4082	1.84082E-05	2.376E-06	0.0001286	0.0001286	22.49527	145.083	0.000145083	1.87301E-05	0.011253
	2.8	2.790434	75.414	0.000075414	9.736E-06	0.0001477	0.000148	27.98781	863.654	0.000863654	0.000111497	0.013999
	3.4	3.414644	219.446	0.000219446	2.833E-05	0.0001695	0.0001719	34.27567	1831.88	0.00183188	0.000236495	0.017143
	4	4.000551	166.446	0.000166446	2.149E-05	0.00019	0.0001912	40.21436	419.08	0.00041908	5.4103E-05	0.020112
	4.5	4.572605	266.828	0.000266828	3.445E-05	0.00021	0.0002128	46.01943	6850.54	0.00685054	0.000884401	0.023015
	5	5.003176	26.2685	2.62685E-05	3.391E-06	0.0002251	0.0002251	50.42952	1312.64	0.00131264	0.000169461	0.02522
b	range(10v)				range(100ma)							
	v מקור	sd_v[10 ⁻⁶]	sd_v[v]	dv_stat[v]	dv_inst	dv_final[v]	i[ma=10 ⁻³]	sd_i[na=10 ⁻⁹]	sd_i[ma]	di_stat[ma]	di_inst	
	1.3	1.328138	147.275	0.000147275	1.901E-05	9.648E-05	9.834E-05	13.61949	3186.35	0.00318635	0.000411356	0.006815
	2	1.972069	244.443	0.000244443	3.156E-05	0.000119	0.0001231	20.19851	1560.66	0.00156066	0.00020148	0.010104
	2.5	2.503576	426.707	0.000426707	5.509E-05	0.0001376	0.0001482	25.65505	6228.8	0.0062288	0.000804135	0.012833
	3	2.922859	39.7003	3.97003E-05	5.125E-06	0.0001523	0.0001524	29.97352	1530.51	0.00153051	0.000197588	0.014992
	3.5	3.44365	99.274	0.00099274	1.282E-05	0.0001705	0.000171	35.33946	3215.44	0.00321544	0.000415112	0.017675
	4	3.988046	60.7444	6.07444E-05	7.842E-06	0.0001896	0.0001897	40.97009	5399.05	0.00539905	0.000697014	0.02049
	4.5	4.45546	157.438	0.000157438	2.033E-05	0.0002059	0.0002069	45.82989	6938.21	0.00693821	0.000895719	0.02292

נספח ב' – טבלה המרכזת את תוצאות המדידה עבור המעגל שבאיור 6. dv_final \ di_final – השגיאה הכוללת.

i[amper]	di_final [amper]	v[volt]	dv_final[v]
0.013619	6.82715E-06	1.328138	9.83E-05
0.020199	1.01063E-05	1.972069	0.000123
0.025655	1.28577E-05	2.503576	0.000148
0.029974	1.49931E-05	2.922859	0.000152
0.035339	1.76796E-05	3.44365	0.000171
0.04097	2.05019E-05	3.988046	0.00019
0.04583	2.29374E-05	4.45546	0.000207

נספח ג' – טבלה המרכזת את תוצאות המדידה עבור המעגל שבאיור 5. di_final/dv_final – השיאה הכוללת.

v	dv_final[v]	i[amper]	di_final[amper]
1.40374	9.92E-05	0.01406093	7.04E-06
2.24462	0.000129	0.02249527	1.13E-05
2.790434	0.000148	0.02798781	1.4E-05
3.414644	0.000172	0.03427567	1.71E-05
4.000551	0.000191	0.04021436	2.01E-05
4.572605	0.000213	0.04601943	2.3E-05
5.003176	0.000225	0.05042952	2.52E-05

נספח ד' – טבלת הערכים הנמדדים עבור שלב 2 של הניסוי, מעגל המחובר לפי איור 3.

sd – סטיית תקן, d_stat – שגיאה סטטיסטית, d_inst – שגיאת מכשיר, d_final – שגיאה משוקללת, r-ampermeter – התנגדות מד הזרם כפי שמצוינת בחוברת היצרן.

voltage						range-1[ma]				
range-10kohm										
2.5	rx[ohm]	sd_rx	d_rx_stat	d_rx_inst	d_rx_final	i[a]	sd_i[a]	d_i_stat	d_inst	di_final
2.5	6256.907	0.00238	0.000307	0.725691	0.725691	0.00091	9.98987E-09	1.28969E-09	5.04966E-07	5.05E-07
2.5	6233.628	0.004746	0.000613	0.723363	0.723363	0.000911	8.91524E-09	1.15095E-09	5.05718E-07	5.06E-07
2.5	3004.768	0.003939	0.000508	0.400477	0.400477	0.001385	6.27978E-08	8.10716E-09	7.42329E-07	7.42E-07
2.5	3316.24	0.006115	0.000789	0.431624	0.431625	0.001306	6.11757E-08	7.89775E-09	7.0294E-07	7.03E-07
2.5	3609.376	0.024592	0.003175	0.460938	0.460949	0.001183	6.11103E-09	7.88931E-10	6.41549E-07	6.42E-07
2.5	3932.995	0.011193	0.001445	0.4933	0.493302	0.001132	5.84481E-09	7.54562E-10	6.16056E-07	6.16E-07
2.5	4454.088	0.004833	0.000624	0.545409	0.545409	0.001061	1.12688E-08	1.4548E-09	5.80434E-07	5.8E-07
2.5	5109.266	0.030943	0.003995	0.610927	0.61094	0.000995	1.79281E-09	2.31451E-10	5.47376E-07	5.47E-07
2.5	5516.177	0.027642	0.003569	0.651618	0.651627	0.000961	219.346	28.31744684	5.30378E-07	28.31745
2.5	5895.782	0.006189	0.000799	0.689578	0.689579	0.000933	2.4529E-09	3.16668E-10	5.16544E-07	5.17E-07
2.5	3445.06	0.005109	0.00066	0.444506	0.444506	0.001277	4.56045E-08	5.88752E-09	6.88629E-07	6.89E-07
2.5	3548.832	0.004808	0.000621	0.454883	0.454884	0.001196	2.21139E-09	2.85489E-10	6.47994E-07	6.48E-07
r3[ohm]	sd[ohm]	d_r3_stat	d_r3_inst	d_r3_final	r-ampermeter[ohm]					
4768.287	0.001836	0.000237	0.576829	0.576829	100					