

הולכה חשמלית

מילות מפתח:

התנגדות, וולטמטר, אמפרמטר, נגד, דיודה, אופיין, התנגדות דינמית.

הציוד הדרוש: 2 רבי מודדים דגיטלים (מולטי-מטרים), פלטת רכיבים, ספק, כבלים חשמליים.

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.

1. תיאוריה

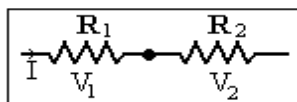
1.1 חוק אום

מוליכות חשמלית מציינת תכונה של חומר המאפשר זרימה של זרם חשמלי. המוליכות של רכיב חשמלי מסוים מוגדרת כיחס שבין הזרם דרכו לבין מפל המתח על פני הרכיב. ההתנגדות החשמלית היא הגודל ההופכי למוליכות ומוגדרת כיחס שבין המתח לזרם, ההתנגדות נמדדת באום ($\text{Ohm}=\Omega$) כאשר $1\Omega=1\text{V}/\text{A}$. רכיב חשמלי שהתנגדותו קבועה ואינה תלויה בזרם או במתח נקרא נגד אומי או בקיצור נגד והוא מקיים את חוק אום:

$$(1) \quad V = I \cdot R$$

כאשר: V המתח, I הזרם ו R ההתנגדות.

סימונו של הנגד במעגל החשמלי הוא:  או .

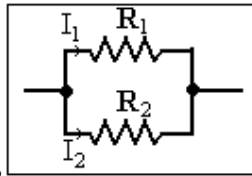


ההתנגדות השקולה של שני נגדים המחוברים בטור:

מתקבלת אם שמים לב לכך שהזרם דרך שני הנגדים זהה, ואילו המתח הוא סכום המתחים $V=V_1+V_2=I(R_1+R_2)$. ולכן ההתנגדות השקולה היא סכום ההתנגדויות:

$$(2) \quad R = R_1 + R_2$$

-הולכה חשמלית-

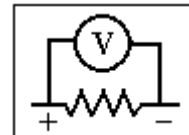


כאשר שני נגדים מחוברים במקביל: מפל המתח עליהם שווה ואילו הזרם הכולל הוא סכום הזרמים: $I = I_1 + I_2 = V/R_1 + V/R_2$. ולכן ההתנגדות השקולה היא:

$$(3) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

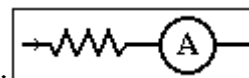
1.2 אופן החיבור והמדידה של מתח זרם והתנגדות

מדידת מתח נעשית באמצעות וולטמטר, אופן חיבור הוולטמטר למעגל החשמלי נעשה כאשר הוולטמטר מחובר במקביל לרכיב אשר על פניו אנו מעוניינים למדוד



את המתח לווטמטר אידיאלי ישנה התנגדות אינסופית כלומר לא זורם דרכו זרם ולכן אינו משפיע על הזרמים במעגל. אולם, לווטמטר מעשי ישנה התנגדות פנימית (בדרך כלל גבוהה מאד) לכן, כאשר הוא מחובר למעגל זורם דרכו זרם והזרמים במעגל משתנים מעט ולעיתים יש לקחת זאת בחשבון.

מדידת זרם נעשית באמצעות אמפרמטר, אופן חיבור האמפרמטר למעגל החשמלי נעשה כאשר האמפרמטר מחובר בטור לרכיב דרכו מעוניינים למדוד את

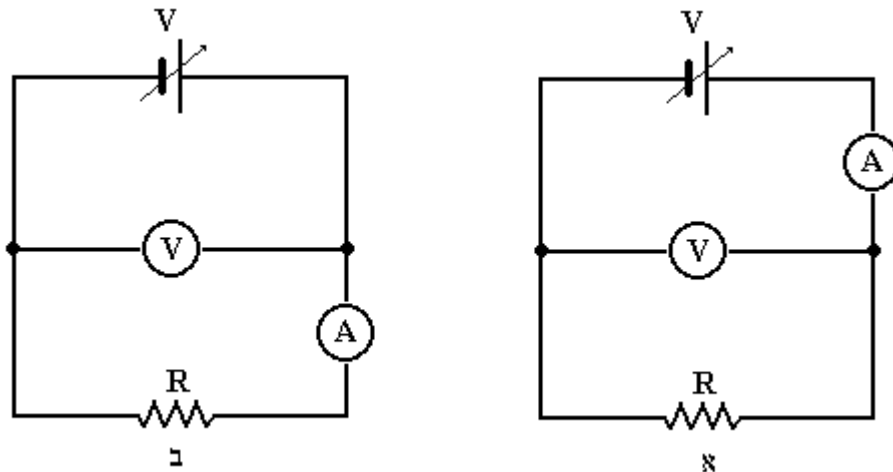


הזרם. לאמפרמטר אידיאלי התנגדות אפסית ולכן גם כאשר זורם דרכו זרם אין עליו מפל מתח והוא אינו משפיע על המעגל החשמלי. אולם, לאמפרמטר מעשי ישנה התנגדות פנימית ולכן כאשר הוא מחובר במעגל ישנו מפל מתח על האמפרמטר ולעיתים יש לקחת זאת בחשבון.

על מנת לחשב את התנגדותו של נגד באמצעות חוק אום, עלינו למדוד את המתח על הנגד ואת הזרם דרכו, החלוקה בין המתח לזרם תיתן את ההתנגדות. ניתן למדוד התנגדויות של נגדים באמצעות מכשיר אוממטר המחובר לשתי הקצוות של הנגד.

ישנם שני אפשרויות לחבר מכשירי מדידה (אמפרמטר וולטמטר) למדידת התנגדות של נגד. המעגלים מתוארים בצירור 1.

-הולכה חשמלית-



ציור 1: מעגלים למדידת התנגדות: א- וולטמטר במקביל לנגד. ב- אמפרמטר בטור לנגד.

במצב של מכשירי מדידה אידיאליים לא צריך להיות הבדל בין שתי צורות החיבור. אולם, באופן מעשי שהמכשירים אינם אידיאליים ישנם הבדלים בקריאות המכשירים בשל צורת החיבור השונה. בציור 1א המתח הנמדד בוולטמטר הוא אכן המתח על הנגד, אבל הזרם הנמדד באמפרמטר הוא סכום הזרמים דרך הנגד ודרך הוולטמטר. ולכן ההתנגדות הנמדדת היא ההתנגדות השקולה של הנגד הנמדד במקביל להתנגדות הפנימית של הוולטמטר. מעגל זה יהיה יעיל אם התנגדות הוולטמטר גדולה מאד ביחס לנגד הנמדד.

בציור 1ב הזרם הנמדד באמפרמטר הוא באמת הזרם דרך הנגד, אך המתח הנמדד בוולטמטר הוא סכום המתחים על פני הנגד ועל פני האמפרמטר. ההתנגדות הנמדדת היא, אם כן, ההתנגדות השקולה של הנגד בטור עם ההתנגדות הפנימית של האמפרמטר. מעגל זה יהיה יעיל אם התנגדות האמפרמטר זניחה ביחס לנגד הנמדד.

1.3 התנגדות פנימית של ספק מתח

ספק מתח אידיאלי הוא כזה אשר המתח המופק ממנו קבוע ואינו משתנה עם העומס. בפועל המתח של ספק מתח משתנה כאשר ישנו עומס. ניתן לתאר ספק מתח מעשי כספק אידיאלי המייצר כוח אלקטרו מניע (כא"מ) קבוע, ואליו מחובר נגד בטור המתאר את ההתנגדות הפנימית של ספק המתח. מתח ההדקים של ספק המתח יתואר ע"י :

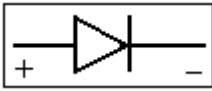
$$(4) \quad V = E - r \cdot I$$

כאשר E - הכא"מ של הספק, V - מתח ההדקים, r - ההתנגדות הפנימית ו I - הזרם דרך הספק. כאשר אין זרם (אין עומס) הכא"מ הוא מתח ההדקים.

1.4 קו אופיין והתנגדות דינמית

קו אופיין של רכיב חשמלי הוא תיאור הזרם העובר דרך הרכיב כפונקציה של מפל המתח על הרכיב כלומר: $I(V)$. לדוגמא קו אופיין של נגד הוא קו ישר בשיפוע $1/R$. ההתנגדות הדינמית של רכיב חשמלי מוגדרת כ- dV/dI . ההתנגדות הדינמית שימושית כאשר הרכיב עובד סביב נקודת העבודה (V_0, I_0) , שיפוע המשיק לגרף $V(I)$ בנקודת העבודה הוא ההתנגדות הדינמית של הרכיב בנקודת העבודה. בניסוי נמדוד את האופיינים של שני רכיבים: דיודה ונורת להט.

דיודה הינה רכיב חשמלי אסימטרי, הדיודה מוליכה בצורה טובה מאד בכיוון אחד ומעל ערך מסוים של מתח אך מהווה כמעט נתק כאשר זרם מנסה לזרום בכיוון

ההפוך. סימונה של דיודה במעגל החשמלי הוא  , כוון החץ הוא כיוון ההולכה של הדיודה. קו אופיין של דיודה נתון ע"י ביטוי מהצורה:

$$(5) \quad I = I_0 (e^{\alpha \cdot V} - 1)$$


כאשר I_0 ו α קבועים חיוביים. נשים לב שכאשר המתח $V=0$ אין זרם. באופן מעשי, הגודל I_0 הוא קטן מאוד (מסדר גודל של 10^{-9} A) ולכן ניתן להזניח את ה-1 במשוואה ביחס למקדם האקספוננציאלי. הגודל I_0 נקרא "זרם הזליגה". לכן משוואה 5 תקבל את הצורה:

$$(6) \quad I = I_0 \cdot e^{\alpha \cdot V}$$

כלומר הקשר בין הזרם למתח הינו אקספוננציאלי. אם נפעיל \ln על שני צידי המשוואה ניתן לרשום:

$$(7) \quad \ln(I) = \ln(I_0) + \alpha \cdot V$$

ולכן ע"י שרטוט קו ישר של $\ln(I)$ כפונקציה של V , ניתן למצוא את המקדם α .

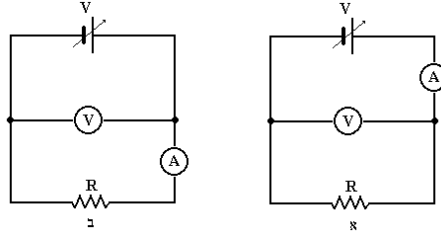
נורת להט מסומנת במעגל חשמלי ע"י . קו אופיין של נורת להט תלוי באופן משמעותי ביותר בטמפרטורה. הטמפרטורה של נורת הלהט משתנה עם הזרם ואיתה משתנה גם ההתנגדות של הנורה. בניסוי זה נניח קו אופיין מהצורה:

$$(8) \quad I = c \cdot V^\beta$$

וננסה למצוא את הפרמטרים ולמדוד את ההתנגדות הדינמית של נורת הלהט.

1.5. שאלות הכנה

1.1. נניח שברשותך אמפרמטר בעל התנגדות פנימית של 10Ω ווולטמטר בעל התנגדות פנימית של $30k\Omega$ מה תהיה ההתנגדות שתמדוד עבור נגדים של 1Ω , 10Ω , 100Ω , 1000Ω , 10000Ω בכל אחד מהמעגלים המופיעים בצירוף 1, א, ב.



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 ו R_2 .

מהו הזרם דרך הנגד R_T כאשר R_1 ו R_2 מחוברים בטור?

מהו הזרם דרך הנגד R_T כאשר R_1 ו R_2 מחוברים במקביל?

חשב את השגיאות בזרמים.

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 $V = 2.7V \pm 0.3V$.

השתמשו בנוסחה 4 כדי לחשב את ההתנגדות הפנימית.

4. ידוע שעבור דיודה עם המקדמים: $\alpha=2$ ו $I_0 = 1nA$ (לפי נוסחה 6).

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?

5. ידוע שעבור נורת להט בעלת המקדמים: $\beta = 3.5 \pm 0.2$ ו $c = 2 \pm 0.2$ (נוסחה 8).

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

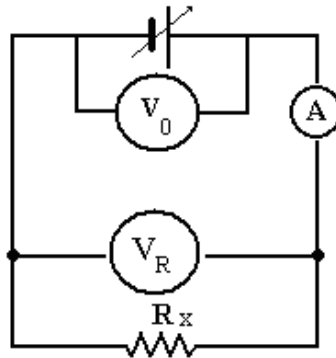
מהי תהיה ההתנגדות הנורה בזרם זה?

2. מהלך הניסוי

2.1 מדידת התנגדות של נגד

נתונים לך: מקור מתח משתנה, וולטמטר דיגיטלי ואמפרמטר דיגיטלי (המכשירים שלפניך הם רבי מודדים המסוגלים למדוד מתח זרם התנגדות וכו').
בפלטת הרכיבים: נגד שאת התנגדותו אנו מעוניינים למדוד, מסומן בפלטת הרכיבים ב- R_x .

הערה: בנספח ניתן למצוא הסבר לשימוש אופייני ברבי מודדים דיגיטליים.



ציור 2: מעגל למדידת התנגדות כאשר הוולטמטר במקביל לנגד

- הרכב את המעגל המתואר בציור 2, ודא כי סקלת המתח בספק (V_0) מראה אפס. השתמש ברב-מודד הנייד כוולט-מטר ובחר תחום עבודה של $20V$. חבר את הרב-מודד השולחני כמד זרם ובחר תחום עבודה של 200 mA (ודא כי הינך מחובר לכניסות המתאימות לזרם ואל תשנה את תחומי העבודה במהלך הניסוי).

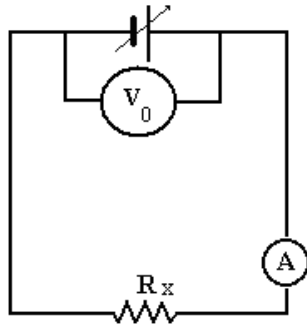
- שנה את המתח בספק (V_0) מ- $0V$ ועד $2V$ בקפיצות של $0.2V$ ורשום את ערכו של הזרם (I) והמתח במכשירי המדידה (V_R) עבור כל אחד ממתחי הספק. שים לב שישנו הבדל בין מתח הספק (V_0) לבין מתח על הנגד (V_R).

- שרטט גרף של מתח הנגד (V_R) כפונקציה של הזרם ומצא את ההתנגדות בעזרת חוק אום (משוואה-1). חשב את השגיאה בהתנגדות.

- הרכב את המעגל המתואר בציור 3, ודא שוב כי המתח על הספק הוא אפס. מאחר ובמקרה זה מודד הוולט-מטר את מתח הספק וערך זה ניתן לקריאה באופן ישיר ממד המתח בספק לכן, אין צורך לחבר עוד וולט-מטר. השתמש שוב

-הולכה חשמלית-

ברב- מודד השולחני כמד זרם ובחר תחום עבודה של 200 mA (אל תשנה את תחומי העבודה במהלך הניסוי).



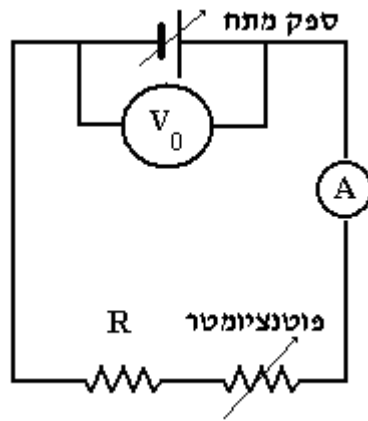
ציור 3: מעגל למדידת התנגדות כאשר אמפרמטר בטור לנגד

- שנה את המתח בספק מ-0V ועד 2V בקפיצות של 0.2V ורשום את ערכו של הזרם עבור כל אחד מהמתחים.
- שרטט גרף של מתח הספק (V_0) כפונקציה של הזרם, ומצא את ההתנגדות בעזרת חוק אום (משוואה-1). חשב את השגיאה בהתנגדות.
- מדוד את התנגדות הנגד בעזרת אוממטר דיגיטלי.
- השווה בין הערכים שקבלת שקיבלת בשלוש שיטות המדידה, הסבר ממה נובעים ההבדלים. מה לדעתך השיטה המדויקת יותר למדידת הנגד הנתון.
- חשב מהי ההתנגדות הפנימית של הוולטמטר ושל האמפרמטר.

2.2 מדידת התנגדות פנימית של ספק מתח

- נתונים לך: מקור מתח, וולטמטר דיגיטלי, אמפרמטר דיגיטלי. בפלטת רכיבים: פוטציומטר (נגד משתנה) שאליו מחובר נגד נוסף בטור.
- הרכב את המעגל המתואר בציור 4.
- כוון את המתח שבין הדקי הספק ל-5V (V_0) כאשר המעגל מנותק (הזרם במעגל הוא אפס).
- בגב המכשיר ישנו מתג בעל שני מצבים אפשריים מצב עליון מסומן ב- 0Ω ומצב תחתון מסומן ב- $r-int$. ודא כי בניסוי זה המתג נמצא במצבו בתחתון כלומר על- $r-int$. במצב זה אנו מגדילים במעט את התנגדות המקור כדי שנוכל למדוד אותה ביתר קלות. בסיום חלק זה של הניסוי החזר את המתג למצבו העליון על 0Ω .

-הולכה חשמלית-



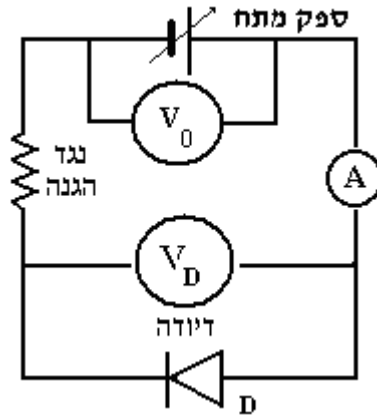
ציור 4: מעגל למדידת התנגדות פנימית של ספק מתח

- חבר את הרב- מודד השולחני כמד זרם ובחר תחום עבודה של 2A (ודא כי הינך מחובר לכניסות המתאימות לזרם ואל תשנה את תחומי העבודה במהלך הניסוי). את המתח V_0 יש לקרא במד מתח על הספק.
- סובב את הנגד המשתנה לערכו המקסימלי (שמאלה נגד כיוון השעון).
- עיי שינוי התנגדות הפוטנציומטר (הקטנת ההתנגדות, עיי סיבוב של הנגד עם כיוון השעון) תגדל צריכת הזרם במעגל. קרא תחילה את ערכו של הזרם באמפרמטר ואת ערכו של המתח בספק מיד עם חיבור הפוטנציומטר למעגל. כעט סובב את הפוטנציומטר והגדל את הזרם מ- 50 mA עד 220mA בקפיצות של 20 mA, קרא את מתח הספק בכל זרם.
- שרטט גרף של המתח כפונקציה של הזרם, היעזר במשוואה (4) על מנת למצוא את ההתנגדות הפנימית של ספק המתח. הערך את השגיאה מהגרף.

2.3 מדידת קו אופיין של דיודה

- נתונים לך: מקור מתח משתנה, וולטמטר דיגיטלי, אמפרמטר דיגיטלי. בפלטת הרכיבים: נגד הגנה, דיודה. הרכב את המעגל המתואר בציור 5.

-הולכה חשמלית-



ציור 5 : מעגל למדידת אופיין הדיודה

• השתמש ברב-מודד הנייד כוולט-מטר למדידת- V_D , וברב- מודד השולחני כמד זרם בחר תחום עבודה של 200 mA (ודא כי הינך מחובר לכניסות המתאימות לזרם).

• שנה את המתח בספק V_0 עד לקבלת מתח של 0.1V בוולטמטר- V_D (שים לב! מפל המתח על הדיודה שונה ממתח הספק) ומדוד את הזרם באמפרמטר. שנה את המתח על הדיודה (V_D) מ- 0.2V עד ל 0.75 V ובקפצות של 0.05V ומדוד את הזרם עבור כל מתח. בכל מקרה אין להגדיל את הזרם מעל 90mA.

• שרטט את אופיין הדיודה $I(V)$ עפ"י משוואה (6) (גרף של מתח הדיודה- V_D כפונקציה של הזרם דרכה).

• שרטט את גרף ההתנגדות הדינמית $\frac{dV}{dI}$ של הדיודה כפונקציה של הזרם I . לאיזו תלות עליך לצפות?

• שרטט גרף של $\ln(I)$ כפונקציה של V מתח הדיודה עפ"י משוואה (7), מצא את המקדמים α ו- I_0

עפ"י התיאוריה, המקדם α שווה בקירוב ל- $\alpha = e/2kT$, כאשר :

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

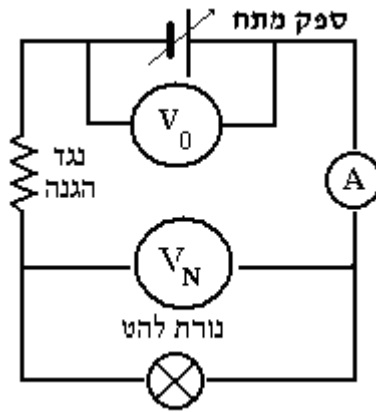
$$-T \text{ הטמפרטורה במעלות קלווין}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}^0\text{K}$$

• מדוד את הטמפרטורה בחדר והשווה את התוצאה שהתקבלה עם ערך המחושב.

2.4 מדידת קו אופיין של נורת להט

נתונים לך: מקור מתח משתנה, וולטמטר דיגיטלי, אמפרמטר דיגיטלי, בפלטת הרכיבים: נגד הגנה ונורת להט. הרכב את המעגל המתואר בצור 6. השתמש ברב-מודד הנייד כוולט-מטר למדידת- V_N , וברב-מודד השולחני כמד זרם בחר תחום עבודה של 200 mA (ודא כי הינך מחובר לכניסות המתאימות לזרם).



צור 6: מעגל למדידת אופיין נורת להט

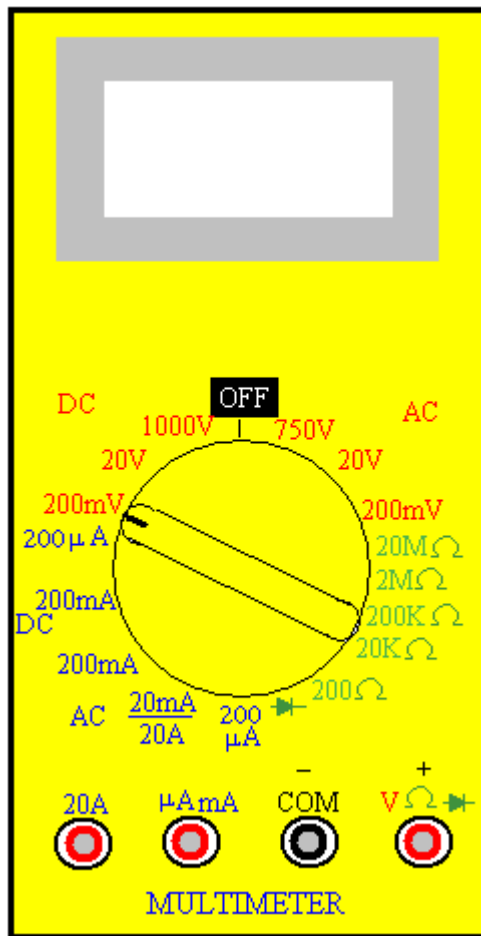
- שנה את המתח בספק V_0 עד לקבלת מתח של 0.04V בוולטמטר- V_N (שים לב! מפל המתח על המנורה- V_N שונה ממתח הספק- V_0) ומדוד את הזרם באמפרמטר. שנה את המתח על המנורה (V_N) מ- 0.04V עד ל 0.1 V ובקפיצות של 0.01V ומדוד את הזרם עבור כל מתח. ערכים אלו ישמשו אותך לתיאור האופיין בתחום הזרמים הנמוכים.
- המשך את המדידה ומדוד את הזרם כפונקציה של המתח, כאשר המתחים על המנורה הם מ- 0.1V עד ל- 1V ובקפיצות של 0.2V ומ- 1V עד 6V בקפיצות של 1V. בכל מקרה אין לעבור את הזרם מעל 150mA.
- שרטט את אופיין נורת הלהט $I(V)$ (גרף של מתח הנורה V_N כפונקציה של הזרם דרכה) והשווה למצופה עפ"י משוואה (8).
- שרטט גרף של ההתנגדות הדינמית dV/dI של נורת הלהט כפונקציה של הזרם I , הסבר את הגרף שהתקבל.

-הולכה חשמלית-

- שרטט גרף של $\log I$ כפונקציה של $\log V$ עפ"י הפעלת \log על משוואה (8), ומצא את הפרמטרים c ו- β , הבחן בין תחומים השונים של הזרמים (זרמים נמוכים וגבוהים) הסבר את התנהגות הגרף בתחומים השונים.

3. נספח א': מולטימטר - רב מודד

מכשיר המולטימטר הינו מכשיר המאפשר מדידת: מתח ישר, מתח חילופין, זרם ישר, זרם חילופין והתנגדות. מכשיר לדוגמא מתואר באיור 7.



איור 7: מולטימטר דיגיטלי.

הבורר המרכזי מאפשר לבחור את סוג המדידה הרצויה וכן את תחום ערכי המדידה. לכל סוג מדידה יש לחבר את החוטים לשקעים המתאימים בחלקו התחתון של המכשיר. ליד כל שקע רשום לאיזו מדידה יש להשתמש בו. איזור מדידת מתח מסומן כאשר ליד הערכים מצוינת יחידת המדידה V , יש להבחין בין מדידת מתח ישר DC ומדידת מתח חילופין AC . השקעים בהם משתמשים

-הולכה חשמלית-

במידת מתח הם : שקע COM כהדק השלילי והשקע הימני ביותר (מסומן ב V) להדק החיובי. לדוגמא : על מנת למדוד מתח ישר בתחום עד ל 200mV יש לכוון את הבורר למצב המופיע באיור 7.

מידת זרם מסומן כאשר ליד הערכים מצוינת יחידת המדידה A, יש להבחין בין מדידת זרם ישר DC ומדידת זרם חילופין AC. השקעים בהם משתמשים במדידת זרם הם : שקע COM להדק השלילי והשקעים השמאליים להדק החיובי, מדידת זרם בתחום μmA יש להשתמש בשקע השני משמאל ואילו למדידת זרם עד 20A יש להשתמש בשקע השמאלי ביותר.

מידת התנגדות מסומן כאשר ליד הערכים מצוינת יחידת המדידה Ω . השקעים בהם משתמשים במדידת התנגדות הם : שקע COM והשקע הימני ביותר (מסומן ב- Ω).

למרות שישנם סוגים שונים של רבי מודד העיקרון בכולם דומה : חיבור של ההדקים לשקעים המתאימים (מתח והתנגדות, זרם וכו')
בחירת תחום העבודה בבורר (מתח, זרם, התנגדות וכו')
בחירת רזולוציה לפי ערכו של הגודל הנמדד, כלומר להתאים את הסקלה במכשיר שתתאים לערכים הנמדדים.