

כא"מ, התנגדות פנימית והספק מופק של סוללה

א. מטרת הניסוי

- (1) למדוד את הכ"מ ואת ההתנגדות הפנימית של סוללה.
- (2) לחקור את ההספק המתפתח בהתנגדות החיצונית השקולה כפונקציה של גודל התנגדות זו.

ב. רקע תיאורטי

הגדרת הכוח האלקטרו מניע ומתח ההדקים

הכוח האלקטרו מניע של מקור המתח החשמלי הוא כמות האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שמקור המתח מספק לכל יחידת מטען שעוברת דרכו. מסמנים גודל זה ב- \mathcal{E} .

ניתן להגדיר את הכוח האלקטרו מניע גם בדרך הבאה:

הכוח האלקטרו מניע של מקור המתח החשמלי הוא כמות העבודה שמבצע מקור המתח כשהוא מעביר דרכו (ומניע במעגל כולו) יחידת מטען אחת.

לפי הגדרה זו, יחידת הכא"מ היא:

$$(1) \quad [\mathcal{E}] = \frac{J}{C} = V$$

אם מקור המתח מעביר דרכו כמות מטען של ΔQ , הוא מספק לכמות מטען זו אנרגיה פוטנציאלית חשמלית שגודלה:

$$(2) \quad \Delta U = \Delta Q \mathcal{E}$$

מאחר שאנרגיה זו שווה לעבודת מקור המתח, W_ϵ , נקבל שהעבודה שמקור המתח מבצע בהעברת כמות מטען ΔQ דרכו נתונה על ידי:

$$(3) \quad W_\epsilon = \Delta Q \mathcal{E}$$

מתח ההדקים הוא המתח בין הדקי מקור המתח, כלומר הפרש הפוטנציאלים בין הדקיו.

גודל זה מבטא את האנרגיה הפוטנציאלית שיש לכל קולון בצאתו מההדק החיובי של מקור המתח ביחס להדק השלילי שלו. אנרגיה זו היא מהווה מקור האנרגיה הנצרכת בנגדים החיצוניים במעגל. לכן כאשר עוברת במעגל כמות מטען ΔQ , האנרגיה הנמסרת לנגדים השונים במעגל שווה ל- ΔQV , כאשר V הוא מתח ההדקים.

הקשר בין הכוח האלקטרו מניע ובין מתח ההדקים

נגדיר תחילה מהו מקור מתח אידיאלי ומהו מקור מתח שאינו אידיאלי.

(1) מקור מתח אידיאלי הוא מקור מתח שהתנגדותו הפנימית שווה לאפס. מקור זה אינו מבזבז אנרגיה אלא רק מספק אנרגיה.

(2) מקור מתח שאינו אידיאלי הוא בעל "התנגדות פנימית", המסומנת ב- r . מקור זה צורך ומבזבז חלק מהאנרגיה שהוא אמור לספק למטענים. אנרגיה זו הופכת בדרך כלל לחום במקור עצמו. בתרשימים, מקור המתח שאינו אידיאלי מוצג על ידי הוספת נגד (המסומן ב- r) על צדו הימני או השמאלי של המקור.

מתקיים:

(1) אם מקור המתח אידיאלי, כל קולון שנכנס אל מקור המתח רוכש אנרגיה פוטנציאלית חשמלית שגודלה \mathcal{E} , ויוצא ממנו עם אנרגיה זו בשלמותה. מכאן נקבל שהפרש הפוטנציאלים בין הדקי המקור (מתח ההדקים V) שווה ל- \mathcal{E} ($V = \mathcal{E}$).

(2) אם מקור המתח אינו אידיאלי, אז כל קולון שעובר דרך המקור רוכש ממנו אנרגיה פוטנציאלית חשמלית בשיעור ε , ובאותו זמן מפסיד חלק מאנרגיה זו בגלל ההתנגדות הפנימית. לכן כל קולון יוצא מהמקור באנרגיה פוטנציאלית הקטנה מ- ε . מכאן, שהפרש הפוטנציאלים בין הדקי המקור יהיה קטן מ- ε , כלומר מתח ההדקים V כעת קטן מ- ε , ($V < \varepsilon$).

הקשר המתמטי בין מתח ההדקים לכא"מ

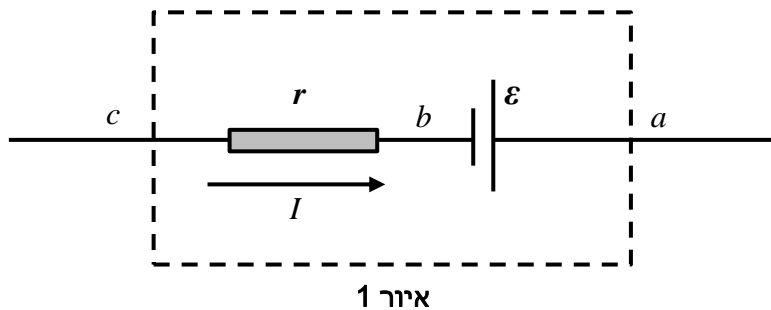
באיור 1 מתואר מקור מתח שהכא"מ שלו ε והתנגדותו הפנימית r ועובר דרכו I . על פי איור זה מתקיים שמתח ההדקים נתון על ידי:

$$(4) \quad V_{ac} = V_{ab} + V_{bc}$$

מכיוון שמתקיים: $V_{ab} = \varepsilon$ ו- $V_{bc} = -rI$ (שילי V_{bc} בגלל שמתקיים $V_b < V_c$) נקבל מהקשר הקודם:

$$(5) \quad V = \varepsilon - rI$$

כאשר סימנו את מתח ההדקים V_{ac} באות V .



מהקשר האחרון נקבל עבור מתח ההדקים:

1. מתח ההדקים שווה לכא"מ כאשר מתקיים $rI = 0$, וזה מתקיים כאשר:
 - א. $r = 0$, כלומר מקור המתח אידיאלי.
 - ב. $I = 0$, כלומר הזרם במעגל החשמלי הוא אפס, וזה קורה כאשר המעגל פתוח, או כשהתנגדות החיצונית אינסופית. לכן אם מחברים וולטמטר (מד מתח) אידיאלי למקור מתח המחובר למעגל חשמלי, עם פתיחת המעגל תהיה קריאת הוולטמטר שווה לכא"מ ε .
2. כאשר מקור המתח אינו אידיאלי ($r \neq 0$), והזרם חיובי, כלומר מכיוון מהקוטב השלילי אל הקוטב החיובי בתוך המקור, כפי שמתואר באיור 1, נקבל שמתח ההדקים, לפי משוואה (5), קטן מהכוח האלקטרו מניע ($V_{ab} < \varepsilon$).
3. הקשר בין מתח ההדקים ובין הזרם במעגל החשמלי הוא הפוך. בהתייחס לכא"מ נתון, ככל שהזרם במעגל גדל, נקבל לפי משוואה (5) שמתח ההדקים קטן. הערך המינימלי עבור מתח ההדקים הוא אפס, והוא מתקבל עבור זרם מקסימלי I_{max} המקיים: $V_{ab} = \varepsilon - rI_{max} = 0$. ממשוואה זו נקבל:

$$(6) \quad I_{max} = \frac{\varepsilon}{r}$$

מכיוון שהזרם במעגל נתון על ידי המשוואה:

$$(7) \quad I = \frac{\varepsilon}{R_T + r}$$

נקבל ש- I_{max} מתקבל כאשר ההתנגדות החיצונית השקולה מתאפסת ($R_T = 0$). מצב שבו ההתנגדות החיצונית שווה לאפס נקרא **קצר**. במילים אחרות, הדקי המקור מחוברים זה לזה

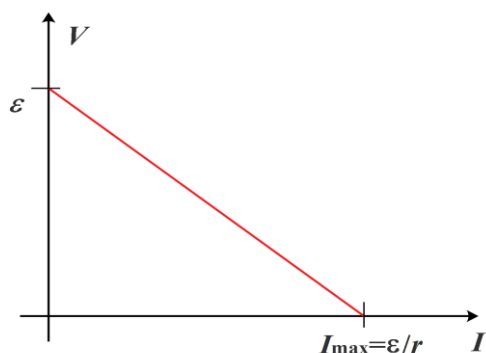
בתיל מוליך ללא התנגדות.

4. הגרף המתאר את מתח ההדקים כפונקציה של הזרם הוא קו ישר יורד, כפי שמתואר באיור 2. בגרף זה מתקיים:

א. שיפוע הגרף הוא $-r$.

ב. חיתוך הגרף עם הציר האנכי הוא בנקודה $(0, \varepsilon)$. נקודה זו מתקבלת כאשר הזרם מתאפס, כלומר כאשר המעגל פתוח (נתק) או כאשר התנגדות המעגל אינסופית).

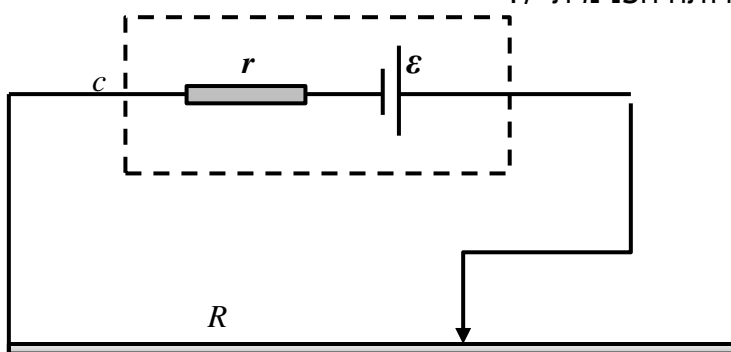
ג. החיתוך עם הציר האופקי הוא בנקודה, שבה הזרם מקבל ערך מקסימלי $I_{\max} = \varepsilon / r$. נקודה זו מתקבלת במצב קצר, כלומר ההתנגדות החיצונית השקולה מתאפסת.



איור 2

תלות ההספק המופק בהתנגדות החיצונית בגודל התנגדות זו

באיור 3 מתואר מעגל חשמלי הכולל סוללה המחוברת לנגד חיצוני משתנה. נתון שהכא"מ של הסוללה הוא ε והתנגדותה הפנימית r .



איור 3

ההספק המתפתח בהתנגדות החיצונית נתון על ידי:

$$(8) \quad P_R = I^2 R$$

כאשר I הוא הזרם במעגל והוא נתון על ידי:

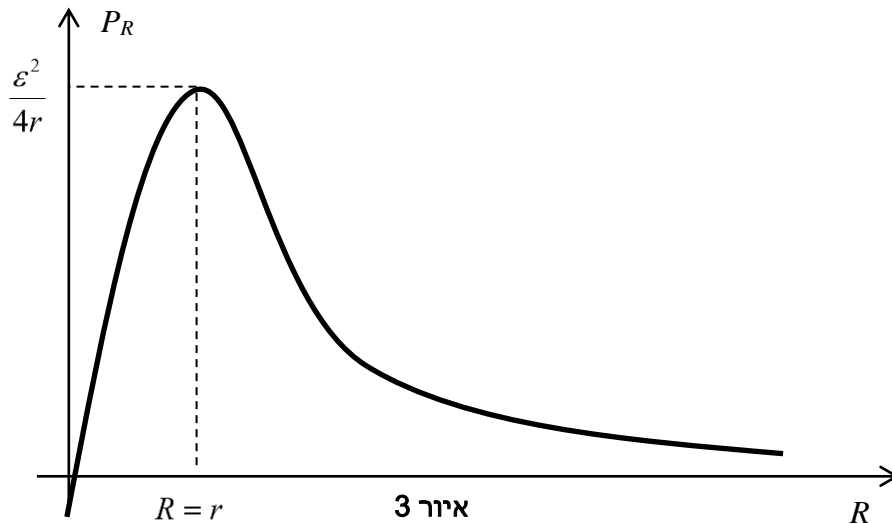
$$(9) \quad I = \frac{\varepsilon}{r + R}$$

אם נציב את המשוואה (9) ב-(8) נקבל:

$$(10) \quad P_R = I^2 R = \left(\frac{\varepsilon}{r + R} \right)^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(r + R)^2}$$

הגרף המתואר באיור 3 מתאר את ההספק P_R כפונקציה של R . ל- P_R יש ערך מקסימלי כאשר מתקיים $R = r$ (ההתנגדות החיצונית שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח). הערך המקסימלי של ההספק P_R מתקבל מהצבת $R = r$ במשוואה (10). נציב ונקבל:

$$(11) \quad P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$$



ראמוס - ספרים וייעוץ
www.ramose.co.il

ג. מכשור וציוד

(1) סוללה של 9 V (הסוללה המתוארת בתרשים הבא):

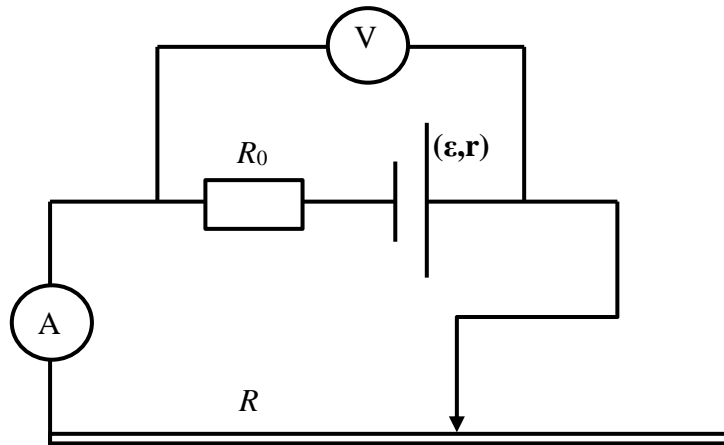


אם רוצים להשתמש בסוללות AA או דומות להן צריך גם בית לסוללות.

- (2) תילים.
- (3) נגד משתנה.
- (4) נגד R_0 שהתנגדותו 5Ω בערך.
- (5) מכשירי מדידה (וולטמטר ואמפרמטר).

ד. הניסוי (בניית המערכת וביצוע המדידות)

- (1) מדוד באמצעות וולטמטר את הכא"מ של הסוללה (ראה שאלת הכנה מס' 4) ורשום את הערך שתקבל.
- (2) בחר נגד R_0 שהתנגדותו מסדר גודל $5-10\Omega$. מדוד באמצעות אוממטר את התנגדותו המדויקת ורשום את הערך שתקבל.
- (3) חבר את הנגד R_0 , הנגד המשתנה והאמפרמטר בטור לסוללה, וחבר במקביל לסוללה ולנגד R_0 וולטמטר כפי שמתואר באיור 4. בחיבור הזה הנגד R_0 נחשב כחלק מההתנגדות הפנימית של הסוללה. המטרה של חיבור הנגד R_0 היא לספק הגנה לסוללה. כי במהלך הניסוי נצטרך לאפס את ההתנגדות החיצונית. מצב זה הוא מצב של קצר שגורם לכך שכל המתח של המקור נופל על ההתנגדות הפנימית של הסוללה, וכתוצאה מכך הסוללה מתחממת ועלולה להישרף. נוכחות R_0 מונעת מצב זה. כאשר מאפסים את התנגדות הנגד המשתנה, מתח המקור מתחלק בין הנגד R_0 וההתנגדות הפנימית r .



איור 4

- 4) העבר את המגע הנייד של הריוסטט לקצה החיצוני של הנגד, כך שההתנגדות של הריוסטט תהיה מקסימלית ולאחר מכן סגור את המעגל. מדוד במצב זה את קריאת הוולטמטר והאמפרמטר ורשום את הקריאות שתקבל.
- 5) הקטן בהדרגה את התנגדות הנגד המשתנה מהערך המקסימלי שלו ועד הערך המינימלי (אפס) על ידי הזזת המגע הנייד פנימה. בצע זאת בצעדים (כ-10-15 צעדים), ובכל צעד מדוד את הקריאות של הוולטמטר והאמפרמטר.
- 6) הכן טבלה ורשום בה את הערכים שמדדת (המתח כפונקציה של הזרם).

ה. עיבוד וניתוח המדידות

- 1) שרטט גרף המתאר את המתח שמדדת כפונקציה של הזרם במעגל.
- 2) הסתמך על הגרף וחשב את הכא"מ של הסוללה ואת התנגדותה הפנימית r (ראה שאלת הכנה מס' 4).
- 3) על סמך הטבלה שקיבלת בניסוי זה הכן טבלה חדשה המתארת את ההספק הנוצר בנגד החיצוני (הנגד המשתנה) שהוא נתון על ידי הגדול $P_R = IV$ (I ו- V הם הגדלים שמדדת בניסוי) כפונקציה של התנגדות הנגד המשתנה הנתונה על ידי $R = V/I$.
- 4) שרטט, על סמך הטבלה שהכנת בסעיף הקודם, גרף המתאר את P_R כפונקציה של R .
- 5) התבסס על הגרף ששרטטת ומצא את ערך ההתנגדות שבה להספק יש ערך מקסימלי, והשווה ערך זה לערך התיאורטי שלו.
- 6) התבסס על הגרף ששרטטת ומצא את הערך המקסימלי של ההספק, והשווה ערך זה לערך התיאורטי שלו.

ו. שאלות הכנה

- 1) הגדר כא"מ ומתח הדקים, וקבע את היחידות של גדלים אלה.
- 2) הוכח את הקשרים: (5) ו-(10).
- 3) הסבר מדוע כאשר מחברים וולטמטר להדקי סוללה, קריאת הוולטמטר שווה בדיוק לכא"מ של הסוללה.
- 4) הראה שקריאת הוולטמטר במעגל המתואר באיור 4 נתונה על ידי הביטוי: $V = \varepsilon - (r + R_0)I$.
- 5) קבע באיזה מצב במעגל המתואר באיור 4 מתקבל ערך מקסימלי עבור הזרם. בטא זרם זה באמצעות הגדלים: ε , r ו- R_0 .
- 6) סרטט סכימטית גרף המתאר את קריאת הוולטמטר כפונקציה של הזרם במעגל המתואר באיור

.4

(7) קבע מה מייצג כל אחד מהגדלים הבאים בגרף ששרטטת בשאלה הקודמת:
א. שיפוע הגרף.

ב. נקודת חיתוך הגרף עם הציר האנכי.

ג. נקודת חיתוך הגרף עם הציר האופקי.

(8) קבע באילו מצבים משתווים הכא"מ ומתח ההדקים.

(9) הוכח שהערך המקסימלי עבור ההספק הנתון במשוואה (10) מתקבל כאשר $R = r$, והראה ש-
 $P_{R \max}$ נתון על ידי המשוואה (11).

