



מגמת הנדסת אלקטרונים וניקה ומחשבים

יסודות בתורת החשמל

תוכן עניינים

דבר המפמ"ר.....	2
1. מטען, כוח ושדה וחשמלי.....	3
2. מתחים וזרמים חשמליים.....	22
3. התנגדות חשמלית.....	55
4. המעגל החשמלי.....	78
5. חוק אום.....	100
6. ההספק החשמלי.....	118
7. חוקי קירכהוף.....	137
8. מעגלים טוריים, מקביליים ומעורבים.....	166
9. שיטות לפתרון מעגלים.....	239

דבר המפמ"ר

אנו עומדים בפתחה של תקופה של חידושים טכנולוגיים, אתגרים חשיבתיים והתנסויות מרתקות. במגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים אתם תחשפו לסביבת למידה מתקדמת ומשמעותית. זכרו, כי אתם חלק חשוב מהמחר ובידכם הכוח והידע לקחת חלק בפיתוח דור העתיד.

הפקדתי בידי צוות מורי המגמה, אחריות רבה, לחשוף אתכם לידע חדשני, להנחות אתכם בפרויקטים מאתגרים ולהוביל אתכם להצלחה.

שלומי אדמונד אחנין

מפמ"ר מגמות הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים ומערכות בקרה ואנרגיה

1. מטען, כוח ושדה חשמלי יעדי הפרק הראשון

א. התלמיד יבין את המונחים הבאים: מטען חשמלי, יחידת המטען הבסיסית, קולון ושדה חשמלי.

ב. התלמיד יידע לחשב מטען אלקטרון, כוח על יחידת מטען במרחב ושדה חשמלי.

מבוא

אחת התופעות הפיזיקליות המשמעותיות בחיינו היא תופעת היווצרות החשמל. החשמל הוא אבן יסוד הן בשימוש היומיומי והן בהתפתחות הטכנולוגית הגלובלית. אם ננסה לתאר את חיינו, ולו ליום אחד, ללא חשמל, נגלה עולם כבוי על כל המשתמע בכך.

חקר תופעת החשמל התבצע במהלך המאה ה-18, לאחר שהתגלו תכונות של חומרים בטבע, שחולקו לשני סוגים: דוחים או מושכים זה את זה. חלוקה זו נוצרה באקראי לאחר ששפשפו סוגים שונים של חומרים. תכונות אלו מובילות אותנו למושגים מטען חשמלי ומבנה החומר, שאותם נלמד. באופן טבעי, מייחסים את פעולות המשיכה או הדחייה לקיומם של כוחות מיוחדים הגורמים לפעולות אלה. למקור של כוחות אלה קוראים מטענים חשמליים.

המלה **אלקטרון**, שממנה נגזרת אלקטרוניקה, מקורה במלה יוונית שפרושה "ענבר" (שרף עצי מחט קדומים שהתאבן). היוונים הבחינו שחתיכת ענבר מתנהגת בצורה שונה כאשר משפשפים אותה בפיסת צמר או פרווה. לאחר שנות חקר הבינו שהענבר נטען במטען חשמלי.

אם נביט סביבנו, נראה מגוון רחב של חומרים, חלקם טבעיים וחלקם מהונדסים (על ידי אדם). לכל חומר מבנה ותכונות פיזיקליות הייחודיות לו. למרות השוני בין סוגי החומרים, אפשר לראות כי כאשר מחלקים את החומר לחלקים קטנים מאוד, מתקבל החלק הקטן ביותר השומר על תכונות היסוד - האטום. בפרק זה נלמד כיצד משפיע מבנה החומר על תכונותיו החשמליות. בטבע ישנם כ-118 חומרי יסוד הקרויים יסודות, ומהם ניתן ליצור, על ידי תרכובות וכדומה, כל חומר שקיים במציאות.

לסיכום, פרק זה הוא פרק הפתיחה בתורת החשמל, והוא בבחינת בסיס להמשך למידה והתנסות בתחום. בפרק זה תיחשפו לתוכן וליישומו הלימודי. קיימת חשיבות רבה ללמידה ולהבנת המושגים המובאים בפרק, בשל הצורך לבנות תהליך הדרגתי ומשמעותי של תוכני ההוראה והלמידה בתורת החשמל.

1.1 מטען חשמלי

במבוא הפרק הוזכר תהליך המשיכה והדחייה בין חומרים, תהליך שהתגלה בעקבות שפשוף חומרים. אבל מה קורה כאשר גופים משתפשים זה בזה? אנו יודעים שהגוף המשופסף יכול למשוך אליו גופים אחרים. אבל ממה נובע כוח המשיכה? התשובה היא, שכתוצאה מהשפשוף, הגופים המשופשים נטענו במטען חשמלי. הפעולה, שכתוצאה ממנה נטען גוף, נקראת טעינה. כדי להסביר תופעה זו של קיום כוחות משיכה וכוחות דחייה חשמליים, אנו מניחים כי קיימים שני סוגים של מטענים חשמליים. מוסכם לקרוא לסוג אחד מטען חיובי, ולסמנו "+", ולסוג השני מוסכם לקרוא מטען שלילי, ולסמנו "-". כלל חשוב הקשור למטען חשמלי הוא שימור המטען. המטען החשמלי אינו נעלם ואינו מופיע יש מאין.

הגדרה פיזיקלית

מטען חשמלי: תכונה פיזיקלית של החומר, שגורמת לאינטראקציה חשמלית עם מטענים אחרים. מטען חשמלי יכול להיות חיובי או שלילי. גוף הטעון במטען חיובי הוא גוף המורכב מיונים חיוביים (שיחרר ממנו אלקטרונים לסביבה). גוף הטעון במטען שלילי הוא גוף המורכב מיונים שליליים (קיבל אלקטרונים מהסביבה).

מטען מסמנים באות Q ויחידות המטען נקראים קולון ומסומנים באות [C].

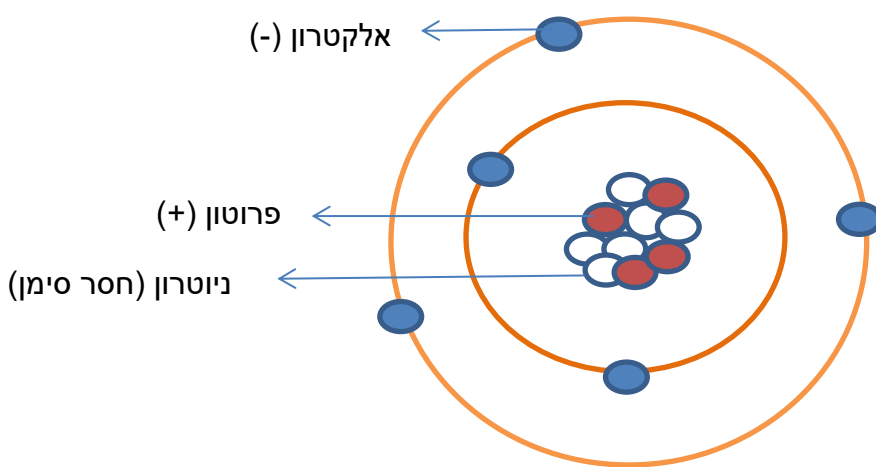
הדמיה לאטום

מתוך הקטלוג החינוכי קישור לסימולציית הרכבת אטום (להוסיף הסבר לגבי מה לבצע בסימולציה):

https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_en.html

1.2 מבנה החומר

החומר מורכב מאטומים. האטום הוא החלק הקטן ביותר של יסוד, השומר עדיין על תכונות היסוד. האטום בנוי מגרעין, ומאלקטרונים הנעים סביב הגרעין. מסת הגרעין גדולה פי 2000 ממסת האלקטרונים, ולכן מרבית המסה של האטום מרוכזת בגרעין. עם זאת, הגרעין תופס רק חלק קטן מאוד מנפח האטום. האלקטרונים נעים סביב הגרעין במסלולים שונים, ומסלולים אלה קובעים את ממדי האטום. הגרעין עצמו בנוי מחלקיקים יסודיים יותר: פרוטונים וניטרונים. הפרוטונים, הניטרונים והאלקטרונים הם חלקיקי היסוד של החומר בטבע. אנו נעסוק בעיקר באלקטרונים, ומעט גם בפרוטונים.



איור 1-1: אטום בעל חמישה אלקטרונים, חמישה פרוטונים וחמישה ניטרונים.

מטען הפרוטון ומטען האלקטרון שונים במסה שלהם: מסת הפרוטון גדולה פי 2000 כמעט ממסת האלקטרון. הם שונים גם במטען החשמלי שלהם: למטען האלקטרון קוראים **מטען שלילי**, ולמטען הפרוטון קוראים **מטען חיובי**.

סימוני המטענים

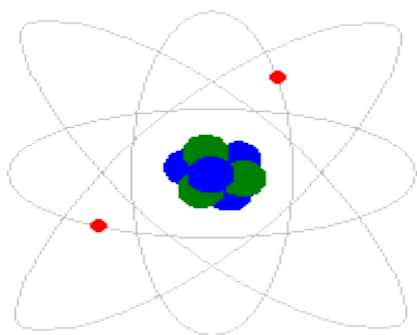
החלקיק	סוג המטען	סימון המטען
אלקטרון	שלילי	-
פרוטון	חיובי	+

גודל מטען האלקטרון שווה לגודל מטען הפרוטון. את הגודל נסמן באות **e**.

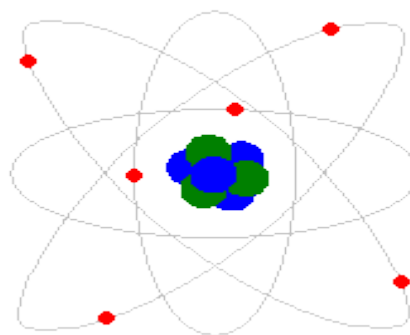
בטבלה שלעיל אין מתייחסים לנויטרונים, מאחר שחלקיקים אלו אדישים מבחינה חשמלית. המושג אדיש חשמלית תקף גם לגבי האטום אשר לא הוצאו ממנו, או לא הוכנסו לו, אלקטרונים. ומכאן נרחיב את המושג, יון. קיימים שני סוגי יונים: יון חיובי ויון שלילי.

בין מטענים שוני-סימן ייווצר כוח משיכה, ואילו בין מטענים שווי-סימן ייווצר כוח דחייה.

יון חיובי הוא אטום אשר מספר הפרוטונים בו עולה על מספר האלקטרונים.
יון שלילי הוא אטום אשר מספר הפרוטונים בו קטן ממספר האלקטרונים.



יון חיובי



יון שלילי

איור 1-2: אטום בעל מספר שונה של פרוטונים ואלקטרונים

לצורך ביצוע המעבדה, יש להיכנס לקישור הבא:

https://phet.colorado.edu/sims/html/balloons-and-static-electricity/latest/balloons-and-static-electricity_en.html



יעד לימודי:

תלמידים יוכלו לקבוע את המשתנים המשפיעים על אובייקטים וכיצד מטענים חיוביים ושליילים משפיעים על האינטראקציה.
מומלץ לבצע את הניסוי באופן מעשי.

פעילות לסימולציה

1. נבחן את הבלונים ואת חשמל הסטטי בסימולציה, מדוע בחרו בחפצים אלו?
2. כיצד ניתן לגרום לבלון לדבוק בסוודר?
3. מה משפיע על משיכה חזקה או חלשה?
4. כיצד משפיע הסימון החיובי והשלילי על משיכה ודחייה?
5. השלם את הטבלאות ורשום האם קיימים הבדלים, הסבר.

סוודר	בלון	לפני פעולת השפשוף
		מטענים חיוביים
		מטענים שלילים
		מטען חשמלי

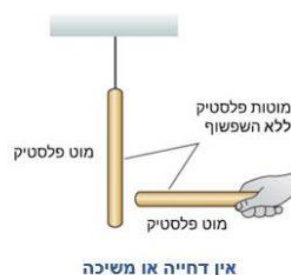
סוודר	בלון	אחרי פעולת השפשוף
		מטענים חיוביים
		מטענים שלילים
		מטען חשמלי

קיימת אם כן אפשרות להוספה ולהוצאה של אלקטרונים מהאטום. כפי שהוזכר בתחילת הפרק, תהליך השפשוף, הגורם לטעינה, מאפשר לאלקטרונים לעבור מגוף אחד לאחר. כתוצאה מפעולה זו ייווצרו יונים. הגוף שממנו יצא אלקטרון יהפוך ליון בעל מטען חיובי, ואילו הגוף שאליו יתוסף האלקטרון יהפוך ליון בעל מטען שלילי.

אפשר לצפות בסרטון המדגים דחייה ומשיכה בין גופים:

<https://www.youtube.com/watch?v=ViZNqU-Yt-Y>

לדוגמה, אם מקרבים **מוט פלסטיק** למוט פלסטיק אחר (ללא מגע), לא רואים שום דבר מיוחד, אבל אם משפשפים את שני המוטות **בצמר** מגלים שנוצרת בין המוטות **דחייה**.



אם נקרב למוט הפלסטיק התלוי **צמר** שעמו שפשפנו את המוטות, נוכל לראות כי נוצרה משיכה בעקבות טעינת הגוף על ידי השפשוף. מכאן, כאשר הגוף הוא בעל מטען שלילי (חוסר פרוטונים) או מטען חיובי (עודף פרוטונים), הגוף מסגל לעצמו את תכונת המשיכה או הדחייה ביחס לגופים האחרים. כמו כן, אם נקרב כעת את חתיכת המשי, אשר שופשפה במוט זכוכית, למוט פלסטיק המשופשף בצמר - נראה שמתקיימת **דחייה**.



איור 1-3: דוגמה לתנועה של אלקטרונים

1.3 הכוח החשמלי וחוק קולון

חוק קולון נקרא על שם הפיזיקאי הצרפתי שארל-אוגוסטן דה קולון שגילה אותו בשנות השמונים של המאה השמונה עשרה.

החוק קובע כי גודלו של הכוח החשמלי (דחייה או משיכה) בין שני גופים נקודתיים, טעונים חשמלית, מותאמת ישירות למכפלת המטענים של הגופים ולהופכי ריבוע המרחק ביניהם.

$$F_1 = F_2 = k_c \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

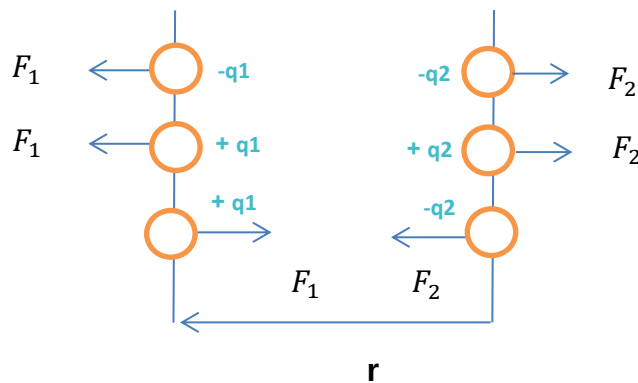
q- מטען הגוף

F- הכוח החשמלי

r- מרחק

הכוח הפועל בין שני החלקיקים טעונים תלוי ב:

- **גודל המטען החשמלי** (q_1 ו- q_2). הכוח נמצא ביחס ישיר לגודלם. ככל שהמטענים גדולים יותר, כך הכוח החשמלי גדול יותר, ולהפך.
- **המרחק בין המטענים** (r)- הכוח הנמצא ביחס הפוך לריבוע המרחק שביניהם. ככל שהמרחק בין המטענים גדול יותר, כך הכוח החשמלי הפועל ביניהם קטן יותר, ולהפך.



$$F_1 = F_2 = k_c \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

איור 1-4: כוח חשמלי בין גופים נקודתיים.

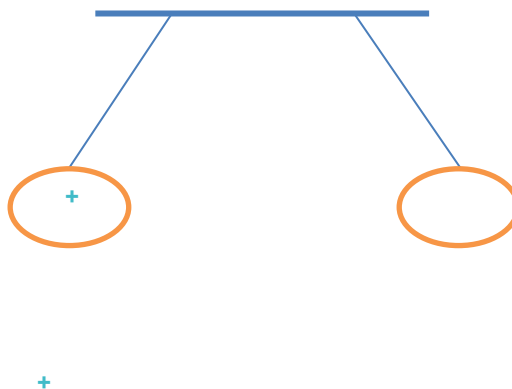
1.4 יחידות מטען

כדי שנוכל לדון בצורה מדויקת יותר במטענים ובכוחות הפועלים ביניהם, עלינו לציין את גודל המטען בצורה מדויקת. נניח שישנו כדור הטעון במטען מסוים. נסמן את מטען הכדור באות Q . כדי שנוכל לדעת במדויק כמה מטען היה על הכדור, עלינו לבטא את Q באמצעות מספר, ולצדו יחידות. (גם כשאנו מודדים מרחק, למשל, עלינו לבטא אותו בעזרת מספר, ולציין אם מדדנו את המרחק בסנטימטרים, במטרים או בקילומטרים). עלינו לקבוע אם כן מהי יחידת המטען, שבעזרתה נוכל למדוד מטען Q נתון. ראינו שמטען של גוף נקבע על ידי ההפרש בין מספר האלקטרונים למספר הפרוטונים בגוף (אם יש עודף אלקטרונים, הגוף טעון מטען שלילי ואם חסרים אלקטרונים, הגוף טעון מטען חיובי). לכן נוכל לקבוע את מטען האלקטרון כיחידת המטען.

שאלה למחשבה

על חוטים מבודדים תלויים זה לצד זה שני כדורים מוליכים, השמאלי טעון במטען חיובי והימני ניטרלי. בין הכדורים פועל כוח משיכה חשמלי. נוגעים באצבע בכדור הימני לפרק זמן קצר: מה יקרה לכוח המשיכה?

- כוח המשיכה בין הכדורים יגדל.
- כוח המשיכה בין הכדורים יקטן.
- כוח המשיכה בין הכדורים לא ישתנה.



פתרון:

כוח המשיכה החשמלי הפועל בין הכדורים יגדל.

הסבר:

גוף טעון במטען חשמלי יוצר מסביבו שדה אלקטרוסטטי המפעיל כוח חשמלי על מטענים הנמצאים בסביבתו. כיוון שהגוף מורכב מחלקיקים הטעונים חיובית ושלילית, נוצרים גם כוחות משיכה וגם כוחות דחייה בין הגוף הניטרלי לגוף הטעון. לפי חוק קולון, כוח המשיכה יהיה גדול מכוח הדחייה, ולכן הכוח השקול יהיה כוח משיכה - הגופים ימשכו זה לזה. כאשר נוגעים באצבע בכדור הניטרלי לפרק זמן קצר, מטענים שליליים שבכדור הניטרלי מרותקים על ידי הכדור הטעון חיובית בגלל כוח המשיכה החשמלי הפועל ביניהם. ברגע המגע, המטענים החיוביים מתאחדים למערכת אחת מוליכה שכוללת את הכדור המוליך, את גוף האדם ואת כדור הארץ. נוצר קיטוב בתוך המערכת כולה: מטענים שליליים עוברים מגוף האדם ומכדור הארץ דרך האצבע אל הכדור ומנטרלים את המטענים החיוביים שלו. כשהמגע נפסק, הגוף כבר אינו נטרלי אלא בעל מטען שלילי. מרגע זה, בין הכדורים פועל רק כוח משיכה. לפיכך כוח המשיכה במצב זה יגדל. דרך הניסוי המתואר, נכיר את המושג השראה אלקטרוסטטית.

השראה אלקטרוסטטית היא תופעה שבה מתרחש קיטוב חשמלי בגוף ניטרלי הנמצא בקרבת גוף טעון.

1.5 השדה החשמלי

כאשר כוח חשמלי פועל על מטען במרחב, מניחים שקיים שם שדה חשמלי. השדה החשמלי הוא וקטור (בעל גודל וזווית). כיוונו של וקטור השדה החשמלי בנקודה מסוימת נקבע לפי כיוון הכוח החשמלי שיפעל על מטען נקודתי חיובי שיוצב באותה נקודה. גודל השדה החשמלי הוא כגודל הכוח הפועל על יחידת מטען.

שדה חשמלי אלקטרוסטטי: הוא שדה חשמלי שנוצר על ידי מטענים חשמליים הקבועים במקומם.

הגדרה מתמטית

$$E = \frac{F_E}{q}$$

גודלו של וקטור השדה מכונה "עוצמת השדה החשמלי". q הוא גודלו של מטען נקודתי ו- F הוא הכוח שהשדה החשמלי מפעיל על מטען זה.

יחידות השדה החשמלי

$$E = \frac{N}{Q} \text{ ניוטון לקולון}$$

המטענים נמדדים ביחידות קולון (C), קולון אחד (1C) הוא כמות המטען הוא $1.6 \times 10^{-19} \text{ e}$.

מטען האלקטרון הוא $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

המרחק נמדד במטרים (m)

והכוח נמדד בניוטונים (N)

$$k = 9 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} \text{ ערך הקבוע } k \text{ הוא}$$

שאלות לדיון

1. האם ייתכן מצב שבו שני קווי שדה יחתכו זה את זה? נמקו את תשובתכם.
2. אם דרך נקודה מסוימת לא עובר קו שדה חשמלי, האם ניתן להסיק שלא קיים שדה חשמלי בנקודה זו? הסבירו את תשובתכם.
3. האם קיימים קווי שדה נוספים על פני אלה המשורטטים בדיאגרמה של קווי שדה?
4. האם השדה החשמלי גדל כשאתם מתקרבים לקו שדה? הסבירו.
5. מטען נקודתי משוחרר מאזור שבו לא משורטטים קווי שדה, האם יפעל עליו כוח? נמק.
6. האם תנועתו של מטען נקודתי תהיה תמיד לאורך קו שדה? באילו מצבים כן ובאילו לא? תארו והסבירו.

תרגול

1. אטום המימן מורכב מפרוטון ומאלקטרון. מרחקו הממוצע של האלקטרון מהפרוטון הוא $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$. חשב את כוח המשיכה החשמלי בין האלקטרון לפרוטון, כאשר הם מרוחקים זה מזה מרחק ממוצע זה.
 - א. $N - 13.6 \times (10^{-8})$ (סימן המינוס מציין כוח משיכה)
 - ב. $N - 8.2 \times (10^{-8})$ (סימן המינוס מציין כוח משיכה)
 - ג. $N \cdot 8.2 \times (10^{-8})$
 - ד. $N - 6.2 \times (10^{-10})$ (סימן המינוס מציין כוח משיכה)
2. שני מטענים זהים בני קולון אחד נדחים זה מזה בכוח של ניוטון אחד. חשב את המרחק בין המטענים.
 - א. $94,868 \text{ m}$
 - ב. $103,666 \text{ m}$
 - ג. $63,412 \text{ m}$
 - ד. $88,198 \text{ m}$
3. מהו גודלו וסימנו של מטען q , אם מטען בן $5 \times 10^{-6} \text{ C}$ המרוחק ממנו 5 cm , נדחה ממנו בכוח של 7.2 N ?

א. $4 \times 10^{-9} \text{ C}$

ב. $13 \times 10^{-7} \text{ C}$

ג. $4 \times 10^{-7} \text{ C}$

ד. $6 \times 10^{-6} \text{ C}$

4. מטען של-1, C, נמצא במרחק 3 m ממטען של $+0.5 \text{ C}$. חשב את הכוח הפועל ביניהם, וקבע אם זהו כוח משיכה או כוח דחייה. מהו הכוח שהיה פועל בין המטענים, אילו המרחק ביניהם היה כפול?

א. כוח משיכה $0.125 \times 10^9 \text{ N}$, $-0.5 \times 10^9 \text{ N}$

ב. כוח דחייה $-0.125 \times 10^9 \text{ N}$, $0.5 \times 10^9 \text{ N}$

ג. כוח משיכה $0.125 \times 10^9 \text{ N}$, $-0.5 \times 10^9 \text{ N}$

ד. כוח דחייה $125 \times 10^{10} \text{ N}$, $5 \times 10^9 \text{ N}$

השדה החשמלי והמחשתי החזותית

כל מטען חשמלי יוצר סביבו "שדה חשמלי", שדה זה יפעיל כוח חשמלי על כל מטען אחר שיימצא בו.

אחרי שלמדנו את חוק קולון, ואנו יודעים לחשב את הכוח שפועל בין שני מטענים – נוכל לבטא את השדה חשמלי.

גודל/עוצמת השדה החשמלי בנקודה מסוימת מוגדר כגודל הכוח החשמלי, שהיה פועל על יחידת מטען חיובי אילו הונחה באותה נקודה.

$$E = \frac{F}{C}$$

F – גודל הכוח החשמלי [N].

q – המטען שאנו מניחים בנקודה מסוימת [C].

E – גודל השדה החשמלי באותה נקודה $\left[\frac{\text{N}}{\text{C}}\right]$ (ניוטון לקולון).

בנוסף לגודל של השדה החשמלי, יש להתייחס לכיוון שדה זה. כיוון השדה החשמלי, בנקודה מסוימת, מוגדר **ככיוון הכוח החשמלי שיפעל על יחידת מטען חיובי, אם תונח בנקודה הנדונה.**

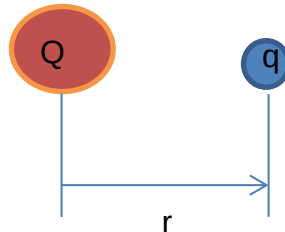
כאשר מעוניינים לבחון את קיומו של השדה החשמלי באמצעות מטען, יש להשתמש במטען קטן, שיהיה זניח בהשוואה לשדה החשמלי הקיים כבר באותה נקודה. מטען קטן זה, שבאמצעותו בוחנים את השדה החשמלי נקרא, **מטען בוחן.**

מטען בודק (מטען בוחן): מטען חשמלי שאמור לבדוק ולמדוד שדה חשמלי, והוא קטן עד כדי כך שהכנסתו לתוך השדה לא תגרום לשינוי במקומם של המטענים יוצרי השדה.

שדה חשמלי נוצר ממערכת מטענים. המערכת הפשוטה ביותר היא מטען בודד. השדה החשמלי, שנוצר על ידי מטען בודד Q , ניתן לחישוב בעזרת מטען בוחן q הנמצא במרחק r מהמטען Q .

לפי חוק קולון המתואר בנוסחה הבאה

$$F = k \frac{q_a q_b}{r^2}$$

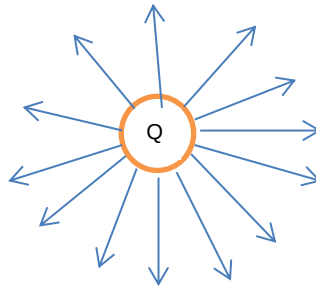


מכאן ניתן לומר כי

$$E = \frac{F}{C} = \frac{k \frac{Qq}{r^2}}{C} = k \frac{Q}{r^2}$$

מטען חיובי Q נתון בנקודה מסוימת. נתאר לעצמנו מטען בוחן חיובי, המועבר ממקום למקום בסביבתו של המטען הקבוע. בכל מקום שנניח את המטען הבוחן הוא "ירגיש" בשדה החשמלי, שכיוונו מן המטען Q כלפי חוץ. אורך החץ הוא ביחס ישר לעוצמת השדה בנקודה שממנה יוצא החץ.

אפשר לראות זאת באיור הבא.



איור 1-6: קווי שדה סביב מטען חיובי

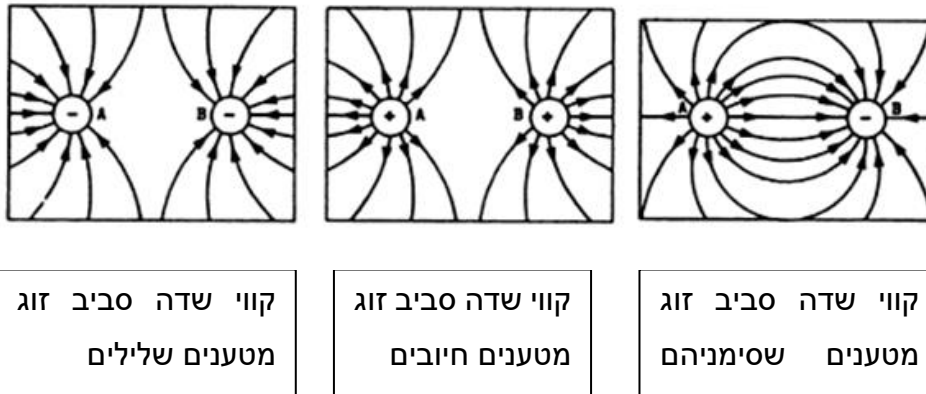
המטען Q (איור 1-6) חיובי, וכך גם מטען הבוחן. כיוון הכוח, הפועל על מטען הבוחן, הוא אפוא מהמטען Q ולכיוון מטען הבוחן. כך גם כיוון קווי השדה החשמלי. מניחים את מטען הבוחן במקומות שונים בשדה החשמלי, ומקבלים קווי שדה חשמלי בכיוונים שונים, כאשר כל קו של שדה חשמלי יוצא מהמטען Q יוצר השדה החשמלי.

קווי השדה סביב מטען שלילי - הפוכים בכיוונם לאלה של קווי השדה החשמלי סביב מטען חיובי. כלומר, קווי השדה החשמלי **נכנסים** אל המטען השלילי, וכיוון החצים - במקרה זה - הפוך לזה שבאיור 1-6.

קווי השדה החשמלי סביב מטען חיובי - הם קווים ישרים, כפי שרואים באיור 1-6. כך גם לגבי קווי השדה החשמלי סביב מטען שלילי.

קווי השדה החשמלי צפופים יותר ככל שהם סמוכים למטען שבאיור 1-6. למעשה צריכים להיות אינסוף קווי שדה חשמלי סביב מטען יחיד (חיובי או שלילי).

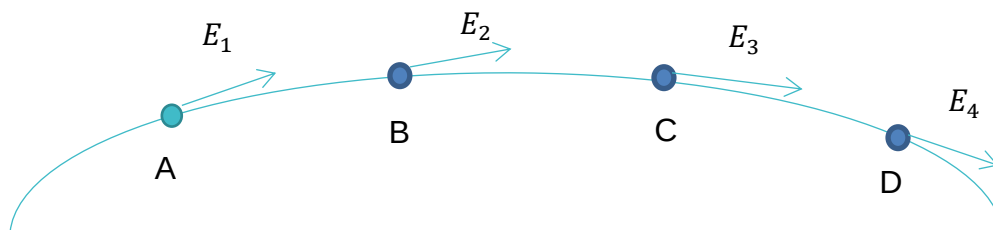
צפיפות קווי השדה החשמלי בתחום מסוים - נמצאת ביחס ישר לגודל השדה החשמלי באותו תחום. בהתאם לצפיפות קווי השדה החשמלי, אפשר אפוא לקבל מושג על גודל השדה החשמלי באותו תחום. ואמנם, משרטטים את קווי השדה החשמלי, כך שצפיפותם תהיה ביחס ישר לגודל השדה החשמלי בתחום המתאים. ניתן אפוא להראות - באמצעות קווי השדה החשמלי - לא רק את כיוון השדה החשמלי, אלא גם את גודל השדה החשמלי בתחום מסוים. דוגמה לכך מופיעה באיור 1-6. גודל השדה החשמלי זהה בכל כיוון סביב מטען יחיד, ולכן יש באיור זה מספר זהה של קווי שדה חשמלי בכל כיוון. נמחיש עתה את קווי השדה החשמלי של זוגות מטענים. גם כאן ניתן לתאר את השדות באמצעות קווי שדה חשמלי.



שדה חשמלי הינו וקטור - גודל בעל עוצמה וכיוון.

גודל המאופיין על ידי ערך מספרי בלבד, נקרא – סקלר.

כדי לדעת מהו כיוון השדה החשמלי בנקודה כלשהי שנמצאת בקו של שדה חשמלי, יש להעביר משיק לקו בנקודה זו. כיוון המשיק בנקודה הוא ככיוון הכוח החשמלי, שיפעל על מטען חיובי, אם ישימו אותו בנקודה זו. כלומר, כיוון המשיק הוא ככיוון השדה החשמלי בנקודה זו. באיור 1-7 מודגם כיצד ניתן למצוא את כיוון השדה החשמלי בנקודות שונות על קו של שדה חשמלי. למשל, כיוון המשיק E_2 הוא ככיוון השדה החשמלי בנקודה B



איור 1-7: כיוון שדה חשמלי בנקודות שונות

דוגמה 1:

1. בנקודה מסוימת a בשדה חשמלי, שנוצר על ידי מטען בודד, פועל כוח חשמלי של 2×10^{-2} ניוטון על מטען של 4×10^{-7} קולון.
- א. חשבו את עוצמת השדה בנקודה זו.
- ב. חשבו את גודל המטען, Q היוצר את השדה החשמלי, אם הנקודה a נמצאת במרחק 30 סנטימטרים מהמטען.

פתרון

- א. עוצמת השדה החשמלי שווה לגודל הכוח, הפועל על יחידת מטען, מכאן:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{2 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{-7}} = 5 \times 10^4 \frac{N}{C}$$

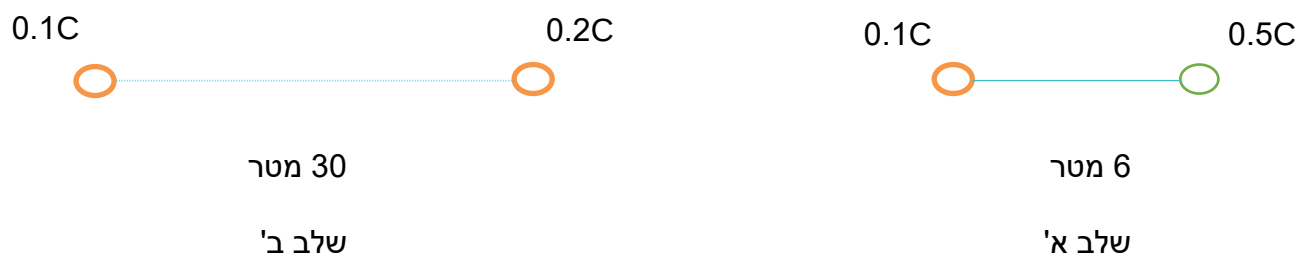
- ב. נשתמש במשוואה הבאה:

$$Q = \frac{Er^2}{k} = \frac{5 \times 10^4 \times (0.3)^2}{9 \times 10^9} = 5 \times 10^{-7} C$$

****נשים לב כי המרחק נתון בסנטימטרים ועלינו להמיר אותו למטרים**

דוגמה 2:

באיור למטה מתוארים שני גופים טעונים. בשלב הראשון, המרחק בין הגופים הוא 6 מטר, וכוח הדחייה בין המטענים הוא 12,500,000 ניוטון. בשלב השני הרחיבו את המרחק בין הגופים למרחק של 30 מטר זה מזה. מה הגודל וכוח הדחייה בין המטענים?



פתרון

בשלב הראשון, המרחק בין המטענים 6 מטרים, המרחק בריבוע הוא 36 מטרים. ידוע כי כוח הדחייה בין המטענים הוא 12,500,000 ניוטון.

בשלב השני, המרחק בין המטענים הוא 30 מטר, המרחק בריבוע הוא 900. ראינו כי יחס הדחייה בין המטענים שווה ליחס הפוך למרחק בריבוע. בשלב השני המרחק בריבוע גדל פי:

$$\frac{900}{36} = 25$$

לכן, בשלב השני, הכוח יקטן פי 25.

לכן:

$$\frac{12,500,000}{25} = 500,000 \text{ N}$$

בשלב השני, גודל הכוח 500,000 ניוטון.

תרגול

- שני מטענים זהים, בני $c = 0.05$, נדחים זה מזה בכוח ניוטון אחד. חשבו את המרחק בין המטענים.
- נתונים שני מטענים: $q_1 = 2 \times 10^{-6} \text{ c}$ ו- $q_2 = 10^{-6} \text{ c}$. המרחק בין שני המטענים חצי מטר. מניחים יחידת מטען חיובית 1 c על הקטע המחבר את שני המטענים או על המשכו. סמנו את הנקודה שבה יש לשים את יחידת המטען החיובי, כך שסכום הכוחות שיפעילו עליה שני המטענים יהיה אפס.
- מטען Q יוצר שדה חשמלי. גודל השדה החשמלי - במרחק 10 m ממטען זה - הוא 5 N/C .
- א. באיזה מרחק מהמטען Q יהיה גודלו של השדה החשמלי 20 N/C ?
ב. מה גודל המטען החשמלי?
- המרחק בין שני מטענים q_1 ו- q_2 הוא 20 cm . מה גודל השדה בנקודה P הנמצאת באמצע הקטע, המחבר את שני המטענים?
- יון חיובי הוא יון

- בו מספר הפרוטונים גדול ממספר האלקטרונים
- בו מספר האלקטרונים גדול ממספר הפרוטונים
- בו מספר האלקטרונים שווה למספר הפרוטונים
- בו מספר הפרוטונים גדול ממספר הניוטונים

6. מטען Q יוצר שדה חשמלי. גודל השדה החשמלי- במרחק 10 m ממטען זה- הוא 5 ניטון לקולון. גודל השדה במרחק של 20 m יהיה:

א. 3.5 ניטון לקולון

ב. 1.5 ניטון לקולון

ג. 6 ניטון לקולון

ד. 2.5 ניטון לקולון

7. נתון יון חמצן ובו 10 אלקטרונים ו- 8 פרוטונים. מה המטען של יון זה?

א. מטען שלילי

ב. מטען חיובי

ג. חסר מטען

ד. מטען אדיש

סיכום פרק 1

- קיימים שני סוגי מטענים. מטענים מאותו סוג (חיוביים או שליליים) - דוחים זה את זה. ואילו מטענים מסוגים שונים - מושכים זה את זה.
- מקורות המטען החשמלי הם החלקיקים היסודיים הטעונים, הנמנים עם מרכיבי האטום. הפרוטון טעון מטען חשמלי חיובי, והאלקטרון טעון מטען חשמלי שלילי. שני המטענים הללו שווים בגודלם.
- המטען החשמלי של גוף נקבע על פי מספר האלקטרונים העודפים או החסרים בו, בהשוואה למספר הפרוטונים שבו. לגוף טעון שלילית - יש עודף אלקטרונים. לגוף טעון חיובית - יש פחות אלקטרונים מאשר פרוטונים.
- קווי השדה סביב מטען שלילי הפוכים בכיוונם לאלה של קווי השדה החשמלי שסביב מטען חיובי.
- כאשר מעוניינים לבחון את קיומו של השדה החשמלי באמצעות מטען, יש להשתמש במטען קטן (מטען בוחן) שיהיה זניח בהשוואה לשדה החשמלי הקיים כבר באותה נקודה.
- אפשר להפריד מטענים באמצעות השראה אלקטרוסטטית.

2. מתחים וזרמים חשמליים

2.1 פוטנציאל ומתח

ראינו שכל שני מטענים מפעילים כוח חשמלי זה על זה. ככל שהמטענים קרובים יותר, הכוח גדול יותר, וככל שהמרחק ביניהם גדול יותר, הכוח קטן יותר. ראינו גם שמטענים שונים-סימן דוחים זה את זה, ומטענים שונים-סימן - מושכים זה את זה.

כוחות בין מטענים - חזרה על פרק 1

ראינו שכל שני מטענים מפעילים כוח חשמלי זה על זה. ככל שהמטענים קרובים יותר, הכוח גדול יותר, וככל שהמרחק ביניהם גדול יותר, הכוח קטן יותר. ראינו גם שמטענים שונים-סימן דוחים זה את זה, ומטענים שונים-סימן - מושכים זה את זה. בסרטון הבא, ניתן לראות המחשה לדחייה ומשיכה בין מטענים.

שימו לב, ניתן להפוך את תרגום הסרטון לעברית על ידי לחיצה על  (הגדרות) הנמצא בתחתית המסך מצד ימין.

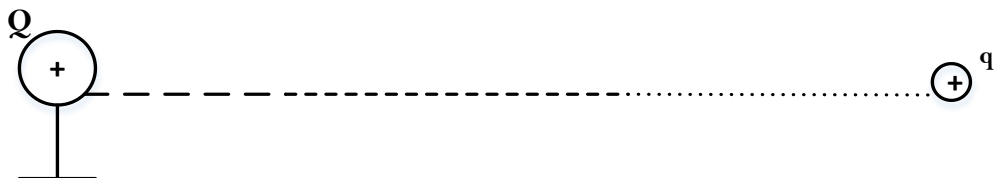
יש ללחוץ על כתוביות ← אנגלית ← תרגום אוטומטי ← עברית. קישור לסרטון:

<https://www.youtube.com/watch?v=Uog8votPpe0>

מכאן, נוכל להכיר מושג חדש הנקרא פוטנציאל. נושא זה, יובא להסבר בפרק אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

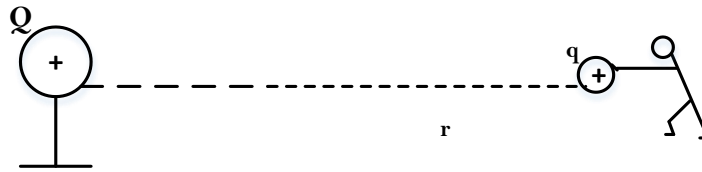
עכשיו נבדוק מה קורה כאשר מקרבים מטען אחד למטען אחר. לשם כך נשים גוף, הטעון במטען חיובי Q , במקום כלשהו, ונניח שהגוף הטעון הזה אינו יכול לזוז ממקומו. כעת נקרב אל מטען Q גוף אחר, הטעון במטען חיובי q . אנו רוצים להראות שכדי לקרב את מטען q אל מטען Q יש להשקיע אנרגיה.

נניח כי מטען q היה בהתחלה במצב מנוחה, ובמרחק גדול מאוד ממטען Q , כך ששום כוח לא פעל, למעשה, על מטען q (איור 2-1).



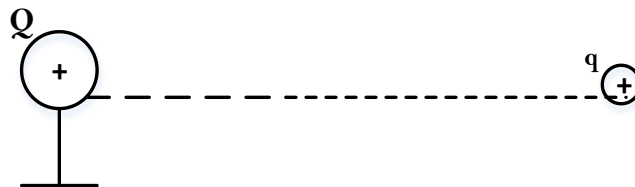
איור 2-1 מטען חיובי q מרוחק מרחק גדול מאוד מהמטען החיובי Q

נניח שאנו רוצים לקרב את מטען q עד למרחק r ממטען Q . מאחר שהמטען החיובי Q מפעיל כוח דחייה על המטען החיובי q , יש להפעיל על מטען q כוח נגדי, כדי לקרב אותו אל מטען Q (איור 2-2).



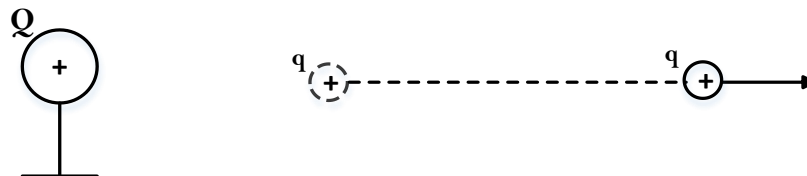
איור 2-2 כדי לקרב את המטען q למטען Q יש להפעיל כוח, כדי להתגבר על כוח הדחייה

כאשר עוזבים את הגוף, הטעון במטען q , בנקודה המרוחקת מרחק r ממטען Q , הגוף מתחיל לנוע ולהתרחק ממטען Q כתוצאה מכוח הדחייה שבין הגופים (איור 2-3).



איור 2-3 כשעוזבים את המטען q , הוא מתחיל לנוע בכיוון החץ ולהתרחק מהמטען Q

הגוף הטעון, שמטענו q , רוכש מהירות (איור 2-4), ויש לו עכשיו אנרגיה קינטית (אנרגיה הקשורה לתנועה).



איור 2-4 המטען q מתרחק מהמטען Q ורוכש אנרגיה קינטית

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית

ככל שנקרב יותר את מטען q למטען Q בדוגמה, כך נצטרך להשקיע במטען q עוד ועוד אנרגיה, ולכן מטען q ירכוש אנרגיה גדולה יותר. אנו רואים כי האנרגיה של מטען q תלויה במרחקו של מטען q ממטען Q , או במילים אחרות: במיקום של מטען q ביחס למטען Q .

מזכיר כי האנרגיה של גוף, התלויה במיקום הגוף, נקראת אנרגיה פוטנציאלית. כעת אנו עוסקים באנרגיה פוטנציאלית, הקשורה בכוחות חשמליים. לכן אנרגיה זו נקראת אנרגיה

פוטנציאלית חשמלית. נסיק אם כן כי בקירוב מטען q למטען Q , הענקנו למטען q אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

כעת נגדיר מושג חדש: **הפוטנציאל**



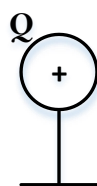
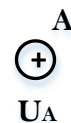
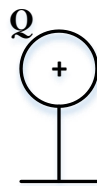
האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת נקראת **הפוטנציאל באותה נקודה** (אין, למעשה, הבדל בין "אנרגיה של יחידת מטען" – לבין "אנרגיה ליחידת מטען").

כיצד מסמנים פוטנציאלים?

הפוטנציאל בנקודה A מסומן על ידי U_A ;

והפוטנציאל בנקודה B מסומן על ידי U_B (איור 2-5).

אם בכל נקודה יש פוטנציאל חשמלי שונה מזה של הנקודה האחרת, אומרים כי יש ביניהן הפרש פוטנציאלים.



איור 2-5 הפוטנציאל בנקודה A הוא U_A , והפוטנציאל בנקודה B הוא U_B . אם $U_B \neq U_A$, יש-כמובן- הפרש פוטנציאלים בין הנקודות A-B.

נגדיר עכשיו עוד מושג: **המתח**.



המתח החשמלי בין הנקודות A ו-B הוא הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות האלה.

יחידת המתח

את המתח בין A ל-B נסמן על ידי U_{AB} , ונקבל:

$$U_{AB} = U_A - U_B \quad (2-1)$$

יחידת הפוטנציאל היא הוולט, וזוהי גם יחידת המתח. יחידה זאת מסומנת באות V. ראינו שהפוטנציאל בנקודה מסוימת הוא האנרגיה (הפוטנציאלית) של יחידת מטען בנקודה זו. מאחר שהאנרגיה נמדדת ביחידת ג'ול (או ג'אול) והמטען נמדד בקולון, נובע מכך שיחידת המתח היא:

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ ג'ול}}{1 \text{ קולון}}$$

כלומר, וולט אחד שווה לג'ול אחד חלקי קולון אחד.

לאחר שהכרנו את המושג פוטנציאל חשמלי, ראינו שהפוטנציאל בנקודה מסוימת הוא האנרגיה של יחידת מטען בנקודה זו. כאשר קיימים שני מטענים במרחק r וכל מטען נושא אנרגיה, כלומר, אם בשתי הנקודות יש פוטנציאלים חשמליים שונים, אומרים כי יש ביניהן הפרש פוטנציאלים. בסרטון הבא, מובא המושג הפרש פוטנציאלים.

יש לשים לב, כי ניתן להפוך את תרגום הסרטון לעברית על ידי לחיצה על  (הגדרות) הנמצא בתחתית המסך מצד ימין.

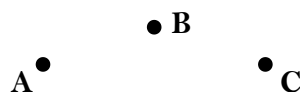
יש ללחוץ על כתוביות—אנגלית—תרגום אוטומטי—עברית. הקישור לסרטון:

<https://www.youtube.com/watch?v=-Rb9guSEeVE>

הערה: המושג פוטנציאל חשמלי מובא בדקה 4:50.

דוגמה 2-1

נתונות הנקודות A, B ו-C, כפי שמתואר באיור 2-6. בגלל קיומם של מטענים שונים (שאינם מופיעים באיור), נוצר בנקודה A פוטנציאל של 14 V, בנקודה B – פוטנציאל של 8 V, ובנקודה C – פוטנציאל של 3 V. חשבו את המתחים U_{AB} , U_{BC} ו- U_{AC} .



איור 2-6

פתרון

ראינו שהמתח U_{AB} נתון על-ידי משוואה (2-1):

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

נציב במשוואה זו את הפוטנציאלים הנתונים, ונקבל:

$$U_{AB} = U_A - U_B = 14 - 8 = 6 \text{ V}$$

באופן דומה נקבל את שאר המתחים:

$$U_{BC} = U_B - U_C = 8 - 3 = 5 \text{ V}$$

$$U_{AC} = U_A - U_C = 14 - 3 = 11 \text{ V}$$

אנו רואים שהמתח בין A ל-C הוא הגבוה ביותר (11 V), ואילו המתח בין B ל-C הוא הנמוך ביותר (5 V).

כיוון תנועת המטענים עקב הפרש הפוטנציאלים

נחזור למטען החיובי q שבו עסקנו קודם. ראינו שכאשר עוזבים אותו, הוא נע למקום שבו הפוטנציאל נמוך יותר, בגלל כוח הדחייה של המטען החיובי Q.

באופן כללי נוכל לומר כי

מטען חיובי, החופשי לנוע בהשפעת מתח, נע מן הנקודה, שבה הפוטנציאל גבוה – אל הנקודה, שבה הפוטנציאל נמוך.

כיצד אפשר ליצור הפרש פוטנציאלים, כלומר, מתח, בין שתי נקודות A ו-B?

אחת הדרכים היא להניח מטען חיובי Q בקרבת הנקודה A, ומטען שלילי -Q בקרבת הנקודה B, כפי שמתואר באיור 2-7. אם נשים מטען חיובי q על הקו המחבר בין שתי הנקודות, הוא יזוז לעבר נקודה B, ויתרחק מנקודה A. פירוש הדבר שהפוטנציאל בקרבת המטען החיובי Q גבוה מהפוטנציאל בקרבת המטען השלילי -Q, ובין שני המטענים קיים הפרש פוטנציאלים, כלומר מתח.



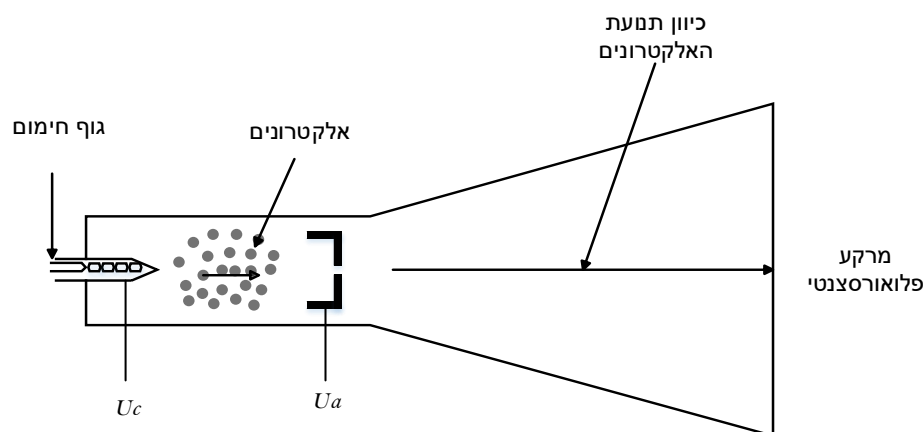
איור 2-7

בפרק הקודם ראינו שיש גופים, שכאשר משפשפים אותם זה בזה, אחד מהם נטען במטען חיובי, והשני נטען במטען שלילי. בדרך זו אפשר לקבל שני מטענים שווים בגודלם ובעלי סימנים שונים, שיש ביניהם הפרש פוטנציאלים.

אבל דרך זו להפריד בין מטענים חיוביים לשליליים - אינה יעילה. בהמשך נלמד על דרכים יעילות יותר להפרדת מטענים, כך שעל גוף אחד מצטבר מטען חיובי, ועל הגוף השני מצטבר מטען שלילי. כאמור, בין שני מטענים אלה נוצר מתח. התקן, שמפריד מטענים בצורה כזאת, נקרא **מקור מתח**.

ראינו שאם יש מתח בין שתי נקודות, הרי שמטען חיובי - החופשי לנוע - נע מן הפוטנציאל הגבוה אל עבר הפוטנציאל הנמוך. ומה יקרה אם נשים מטען שלילי $-q$ בין שתי הנקודות?

אם נשים מטען שלילי $-q$, החופשי לנוע, בין שתי נקודות שביניהן קיים הפרש פוטנציאלים, הוא ינוע מהנקודה שבה הפוטנציאל נמוך - אל הנקודה שבה הפוטנציאל גבוה יותר.



איור 2-9 החלקים העיקריים של השפופרת וכיוון תנועת האלקטרונים בשפופרת

שאלות חזרה

שאלה 2.1

בחר את המילים והביטויים הנכונים בקטע הבא: כדי לקרב מטען שלילי $-q$ אל מטען שלילי $-Q$, יש צורך/אין צורך להתגבר על כוח הדחייה שבין המטענים. קירוב המטען $-q$ אל המטען $-Q$ כרוך/אינו כרוך בהשקעת אנרגיה.

א. יש צורך/ כרוך

ב. אין צורך/ כרוך

ג. יש צורך/ לא כרוך

ד. אין צורך/ לא כרוך

שאלה 2.2

משחררים מטען שלילי $-q$ בקרבת מטען חיובי $+Q$ הקבוע במקומו. האם המטען $-q$ יתקרב למטען $+Q$ יתרחק ממנו, או לא יזוז ממקומו?

א. יתרחק ממטען Q

ב. יתקרב למטען Q

ג. לא יזוז ממקומו

שאלה 2.3

משחררים מטען שלילי $-q$ בקרבת מטען חיובי $+Q$ הקבוע במקומו. האם תנועת המטען $-q$ כרוכה בהשקעת אנרגיה?

א. ללא השקעת אנרגיה

ב. חייב לתת לו אנרגיה חיצונית שזוז

ג. יש לחבר אותו לסוללה

שאלה 2.4

מהו פוטנציאל?

א. אנרגיה פוטנציאלית ליחידת מטען.

ב. מילת קיצור של "אנרגיה פוטנציאלית".

ג. כושר של גוף להיות טעון במטען חיובי או שלילי.

ד. מכפלת האנרגיה הפוטנציאלית במטען.

ה. כושר של גוף למשוך או לדחות מטענים חשמליים.

שאלה 2.5

גוף טעון שלילית ינוע, בהשפעת הפרש פוטנציאלים, ממקום שבו הפוטנציאל נמוך/ גבוה למקום שבו הפוטנציאל גבוה/ נמוך.

א. נמוך/ גבוה

ב. גבוה/ נמוך

ג. אף אחת מהתשובות אינה נכונה, הגוף טעון שלילית.

שאלה 2.6

מטען חיובי, החופשי לנוע, ינוע מפוטנציאל _____ לפוטנציאל _____.

א. גבוה לנמוך

ב. נמוך לגבוה

ג. המטען חייב לנוע לעבר מטען אחר, לכן לא ניתן לדעת את התשובה

שאלה 2.7

הפוטנציאל בנקודה A הוא 6 וולט, והפוטנציאל בנקודה B הוא 2 וולט. מהו הפרש בין נקודה A לנקודה B

א. 4 V

ב. -4V

ג. תלוי בסימן המטען, חיובי/ שלילי

שאלה 2.8

הפוטנציאל בנקודה A הוא 8 וולט, והפוטנציאל בנקודה B הוא 5 וולט, מהו המתח בין נקודה B לנקודה A

א. 3 V

ב. -3V

ג. תלוי בסימן המטען חיובי/ שלילי.

שאלה 2.9

מהו המושג מתח בין נקודת A לנקודת B

א. המתח בנקודות אלו הנו מתח של המטען בכל נקודה

ב. המתח החשמלי בין הנקודות A ו B-הוא הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות האלה

ג. המתח בין הנקודות הוא המרחק ביניהן

שאלה 2.10

האנרגיה הדרושה להעברת מטען תלויה

א. במרחק שלו מהמטען האחר, כלומר במיקומו

ב. בגודל המטען

ג. במסה המטען

2.2 פוטנציאל, מתח ושדה חשמלי

כאמור בסעיף 1.8, השדה החשמלי הוא וקטור (בעל כיוון וגודל), והוא מתאר את המצב החשמלי בנקודות שונות של המרחב. גם הפוטנציאל מתאר את המצב החשמלי בנקודות שונות של המרחב, אלא שהפוטנציאל הוא סקלר (ראינו כי הפוטנציאל החשמלי הוא האנרגיה הפוטנציאלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת. אנרגיה ומטען הם סקלרים, ומכאן שגם הפוטנציאל – שהוא מנה של שני סקלרים – הוא סקלר).

גודל השדה החשמלי – הנוצר על ידי מטען Q , ובמרחק r ממטען זה – נתון במשוואה (2-1):

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

אפשר להראות כי הפוטנציאל בנקודה, המרוחקת מרחק r ממטען Q , נתון במשוואה:

$$(2-2) \quad U = k \frac{Q}{r}$$

ומכאן שהקשר בין גודל השדה החשמלי לבין הפוטנציאל – בנקודה, המרוחקת מרחק r ממטען Q – הוא:

$$(2-3) \quad E = \frac{U}{r}$$

נניח עתה כי לאורך קטע - המהבר בין שתי נקודות, שהמרחק ביניהן d – קיים שדה חשמלי אחיד (כלומר: שדה חשמלי קבוע בגודלו ובכיוונו) E . אפשר להראות כי לאורך הקטע שבין שתי הנקודות – קיים הפרש פוטנציאלים U , והקשר בין גודל השדה החשמלי האחיד לבין הפרש הפוטנציאלים – הוא:

$$(2-4) \quad E = \frac{U}{d}$$

נוכל לתאר זאת גם בצורה "הפוכה": נניח כי לאורך קטע – המהבר בין שתי נקודות, שהמרחק ביניהן d – קיים הפרש פוטנציאלים U . אם בין הנקודות קיים שדה חשמלי אחיד, נקבל אותו קשר בין גודל השדה החשמלי האחיד – לבין הפרש הפוטנציאלים:

$$\left(E = \frac{U}{d} \right)$$

דוגמה 2-2

בשדה חשמלי אחיד קיים הפרש פוטנציאלים של 220 V בין שתי נקודות שמרוחקות 5 ס"מ זו מזו. מה גודל השדה החשמלי בקטע שבין שתי נקודות אלה?

פתרון

גודל השדה החשמלי הוא – לפי משוואה (2-4):

$$E = \frac{U}{d}$$

נבטא את הנתונים במערכת היחידות SI (נהפוך את הסנטימטרים למטרים), נציב את הנתונים במשוואה שלמעלה, ונקבל:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{220}{0.05} = 4400 \frac{V}{m}$$

גודל השדה החשמלי בקטע שבין שתי הנקודות – הוא $4400 \frac{V}{m}$.

כאמור, הפוטנציאל בנקודה, המרוחק מרחק r ממטען Q , נתון במשוואה (2-2):

$$U = k \frac{Q}{r}$$

נניח כי במרחב יש שני מטענים: q_1, q_2 . כן נניח כי המרחק של נקודה מסוימת A ממטען q_1 הוא r_1 ; והמרחק של אותה נקודה A ממטען q_2 הוא r_2 הוא כפי שמתואר להלן.

לפי המשוואה $U = k \frac{Q}{r}$, נקבל כי הפוטנציאל U_1 , הנוצר בנקודה A על ידי מטען q_1 , הוא $U_1 =$

$$U_1 = \frac{kq_1}{r_1} \text{ והפוטנציאל } U_2, \text{ הנוצר בנקודה } A \text{ על-ידי המטען } q_2, \text{ הוא } U_2 = \frac{kq_2}{r_2}.$$

ניתן להראות כי הפוטנציאל U בנקודה A , כתוצאה משני המטענים, הוא סכום הפוטנציאלים באותה נקודה, כלומר:

$$(2-5) \quad U = U_1 + U_2 = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2}$$

נניח כי במרחב יש n מטענים $(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$. המרחק של נקודה מסוימת A ממטען q_1 הוא r_1 ; המרחק של אותה נקודה A ממטען q_2 הוא r_2 ; ומרחק נקודה A ממטען q_n הוא r_n .

הפוטנציאל U בנקודה A , כתוצאה מ- n המטענים, הוא סכום הפוטנציאלים באותה נקודה, כלומר:

$$(2-6) \quad U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2} + \frac{kq_3}{r_3} + \dots + \frac{kq_n}{r_n}$$

ובכן, כדי לחשב את הפוטנציאל, שנוצר בנקודה מסוימת על ידי מערכת מטענים, יש לחשב את הפוטנציאלים הנוצרים בנקודה זו על ידי המטענים הבודדים, ולסכם פוטנציאלים אלה – תוך הקפדה על סימני המטענים.

סימולציית שדות חשמליים –

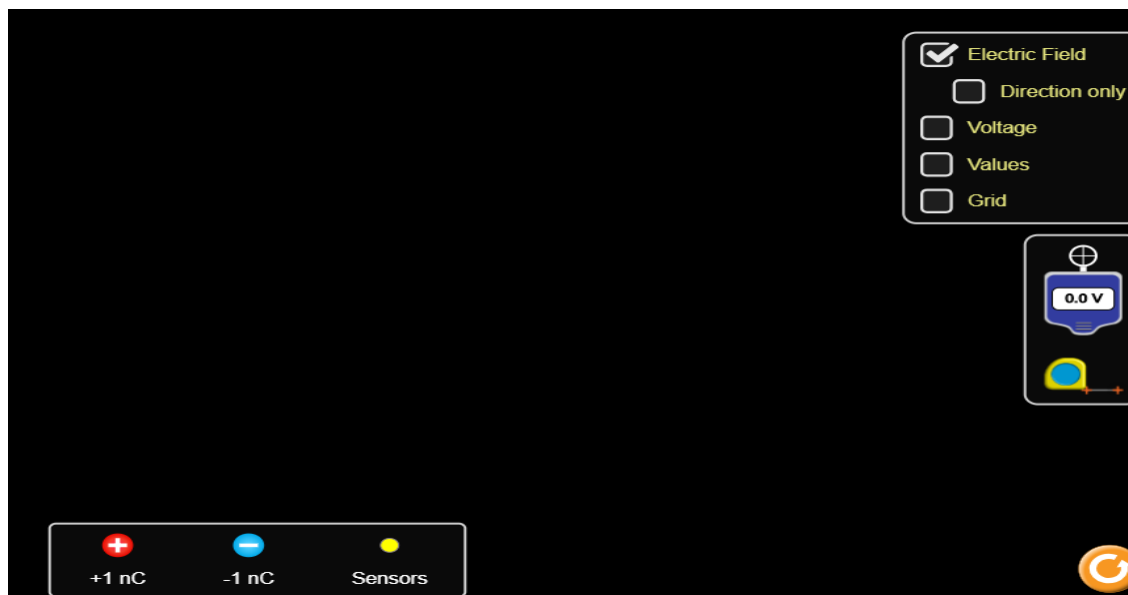
חקירה מודרכת – שדות חשמליים

לפניך דף הנחיות לשימוש ותרגול שדות חשמליים בעזרת הסימולציה הבאה:

בשלב הראשון יש להיכנס ללינק המצורף.

https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html

לפניך מסך הפתיחה של הסימולציה, להלן הסבר המקרא:



הריבוע העליון מציע חמש אפשרויות לסימון:

• Electric field שדה חשמלי

- Direction only כיוון השדה
- Voltage מתח
- Values ערכים
- Grid (מיועדת לסימון צירים וקבל ערכי נקודות) רשת

הריבוע התחתון מציע שני אמצעי מדידה:

מד מתח ומד מרחק (מטר).
בכל שלב ניתן לאפס את הסימולציה ולהתחיל מחדש, על ידי לחיצה על החץ בעיגול הכתום הנמצא בתחתית המסך הימני.

בתחתית המסך נוכל לראות מלבן ובתוכו: **מטען חיובי, מטען שלילי וחיישן** (בחיישן בשלב הזה לא נבצע שימוש).

מטרת הסימולציה:

הסימולציה מאפשרת חקר ולמידה סביב נושא שדות חשמליים, מטענים ומתח.
על ידי התנסות, יוכל התלמיד לחקור את הקשר בין גודל, סימון ומיקום המטען לבין כיוון ועוצמת השדה החשמלי.

כמו כן, קיימת האפשרות למדוד מתח ומרחק על ידי גרירת מד המדידה לכל נקודה על המסך.

יש תחילה לסמן וי עבור האפשרויות בריבוע העליון.

כאשר נרצה להגדיל את המטען במרחב, עלינו לגרור מטענים מהמלבן התחתון ולהניחם זה מעל זה (ניתן לראות שינוי בו זמנית).

משימות

1. יש לקחת מטען חיובי אחד בלבד ולהניחו במרכז המסך. (יש לראות כי Electric field- שדה חשמלי מסומן) ניתן לראות כעת את קווי השדה החשמלי וכיוונם.
2. כעת, יש לבצע איפוס על ידי החץ הכתום בתחתית המסך.
3. נחזור על הפעולה הראשונה, רק שכעת יש להניח מטען שלילי במרכז המסך ולראות את קווי השדה החשמלי.

שאלה:

האם קיים שוני בין השדה החשמלי שיוצר מטען חיובי לבין השדה החשמלי שיוצר מטען שלילי? הסבר את תשובתך.

4. כעת, יש לקחת את מד המתח הכחול, להניחו על המטען החיובי ולאחר מיכן (רק לאחר איפוס) על המטען השלילי. האם קיים שוני בין התוצאות? הסבר את התוצאות המתקבלות.
5. יש למלא את הטבלה על פי 5 מדידות לבחירתך. יש להשתמש במד מדידת המרחק.

מדידה	קריאת מד המרחק	קריאת מד המתח
1		
2		
3		
4		
5		

מהן המסקנות לתוצאות המתקבלות על ידי חמשת המדידות?

סימולציה נוספת:

דף הסבר לסימולציית התנסות במעבדה לחקר וירטואלי של השדה חשמלי

מטרת ההתנסות:

בסימולציה זו, יתנסה התלמיד בחקר השדה החשמלי ויחקור את השפעת המטען על השדה החשמלי.

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

יש להיכנס ללינק המצורף:

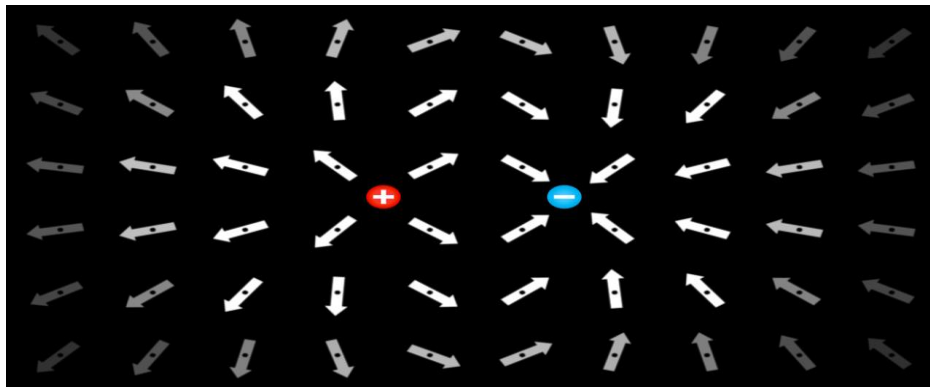
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/efield>

הוראות כלליות

- בלחיצה על הוסף ניתן להוסיף מטען חשמלי גודל ברירת המחדל הוא 1 קולון.
- ניתן לשנות את גודל המטען על ידי לחיצה על תכונות ובחלון שיפתח יש לשנות רק את המטען לאחר השינוי חייב ללחוץ על סיום.
- ניתן לשנות את צפיפות השדה החשמלי, על ידי שינוי סרגל העוצמה, פעולה זו מתבצעת על ידי תזוזה מצד לצד ניתן לראות את הצפיפות משתנה.
- באמצעות הוסף ניתן להוסיף עוד כדור מטען, או להוריד באמצעות מחק.
- ברגע שהוספת כדור אי אפשר לשנות את מטענו.

- על מנת להוסיף כדור עם מטען שונה, יש לשנות את המטען ואז להוסיף את הכדור.
- ניתן לראות את השפעת הכדור הטעון על השדה צעד אחרי צעד, לחץ על עצור ואז כל לחיצה על כפתור צעד נותן את השינוי הבא.
- בהפעלת הסימולציה, בלחיצה על הכדור ניתן לגרור אותו לכל כיוון ולזהות את התנהגות השדה.

דוגמה מתוך הסימולציה של מטען אחד הנושא מטען חיובי והשני נושא מטען שלילי.



משימות

1. יש להניח מטען אחד חיובי ומטען אחד שלילי במרכז המסך. איזה כוח קיים בין שני המטענים? וכיצד זה משפיע על השדה החשמלי.
2. כעת, החלף את המטענים לזהים בסימונם, מה הכוח הפועל ביניהם?
3. צור מטען בעל גודל של 2 קולון ושל 3 קולון, האם קיים שוני בשדה החשמלי? בדוק את ההבדלים כאשר יוצרים את אותם המטענים רק הפוכים בסימונם. מהם המסקנות?
4. האם קיים מצב בו השדה החשמלי שווה בערך לאפס? הסבר.
5. בדוק, על ידי הוזזת המטענים, האם המרחק משפיע על השדה החשמלי.

דוגמה 2-3

שני מטענים נקודתיים ($q_2 = -6 \times 10^{-6} \text{C}$, $q_1 = 4 \times 10^{-6} \text{C}$) מרוחקים זה מזה 8cm. חשבו את הפוטנציאל בנקודה A שלהלן.

פתרון

הפוטנציאל U_1 , הנוצר בנקודה A על-ידי המטען q_1 , הוא:

$$U_1 = \frac{kq_1}{r_1} = \frac{9 \times 10^9 \times 4 \times 10^{-6}}{0.1} = 3.6 \times 10^5 V$$

הפוטנציאל U_2 , הנוצר בנקודה A על-ידי המטען q_2 , הוא – לפי משוואה (2-2):

$$U_2 = \frac{kq_2}{r_2} = \frac{9 \times 10^9 \times (-6 \times 10^{-6})}{0.06} = -9 \times 10^5 V$$

ראינו כי הפוטנציאל בנקודה A, שנוצר על ידי מערכת של שני מטענים, נתון במשוואה (2-5):

$$U = U_1 + U_2 = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2}$$

נציב את הנתונים ונקבל:

$$U = U_1 + U_2 = 3.6 \times 10^5 + (-9 \times 10^5) = -5.4 \times 10^5 V$$

 שאלות חזרה

שאלה 2.11

המרחק בין שני לוחות מתכת הוא 15cm. נתון כי בין הלוחות קיים שדה חשמלי אחיד, שגודלו $600 \frac{V}{m}$. מה הפרש הפוטנציאלים בין לוחות המתכת?

שאלה 2.12

בין קצותיו של תיל, שאורכו 10m, יש הפרש פוטנציאלים של 220V. נניח כי השדה החשמלי קבוע לאורך התיל, וכיוונו ככיוון התיל. מה גודל השדה החשמלי?

שאלה 2.13

א. מה הפוטנציאל החשמלי במרחק של $5.3 \times 10^{-11} m$ מפרוטון בודד? מטען הפרוטון הוא $1.6 \times 10^{-19} C$.

ב. מה גודל השדה החשמלי, שיוצר הפרוטון באותו מרחק (מהפרוטון עצמו)?

שאלה 2.14

נתון גוף שטעון מטען חיובי, וסביבו ארבע נקודות (לאו דווקא על קו ישר).

הנקודה A היא הקרובה ביותר אל הגוף הטעון.

הנקודה B היא המרוחקת ביותר מן הגוף הטעון.

הנקודות C ו-D נמצאות במרחק שווה מן הגוף הטעון (במרחק גדול יותר מ-A מהגוף הטעון, ובמרחק קטן יותר מ-B מהגוף הטעון).

א. באיזו נקודה הפוטנציאל הוא הגדול ביותר?

ב. באיזו נקודה הפוטנציאל הוא הקטן ביותר?

ג. לאילו שתי נקודות יש פוטנציאל שווה?

ד. חזור על שני הסעיפים הקודמים, כשנתון כי הגוף טעון מטען שלילי.

שאלה 2.15

באיור שלהלן נתונים שני מטענים. מה הפוטנציאל בנקודה A שבאיור זה?

שאלה 2.16

שלושה מטענים נמצאים על ציר x:

המטען	נמצא בנקודה
$Q_1 = 2 \times 10^{-6} \text{C}$	$x=20 \text{ cm}$
$Q_2 = -3 \times 10^{-6} \text{C}$	$x=30 \text{ cm}$
$Q_3 = -4 \times 10^{-6} \text{C}$	$x=40 \text{ cm}$

חשבו את הפוטנציאל בנקודה $x=0$.

שאלה 2.17

נתונים שני מטענים מנוגדים, $+Q$ ו- $-Q$, המרוחקים זה מזה מרחק z .

א. בטאו, באמצעות הנתונים, את הפוטנציאל בנקודה שנמצאת באמצע הקטע המחבר את שני המטענים.

ב. בטאו, באמצעות הנתונים, את גודל השדה החשמלי באותה נקודה.

ג. חזרו על שני הסעיפים הקודמים, כששני המטענים זהים בסימנם.

שאלה 2.18

האם ייתכן, שהפוטנציאל יהיה שונה מאפס, במקום שבו השדה החשמלי הוא אפס – ולהיפך? נמקו.

מעבדה בשדה חשמלי- משחק ההוקי

במשחק ההוקי נשתמש בחוקי השדה החשמלי על מנת להבקיע שערים.

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/electric-hockey>

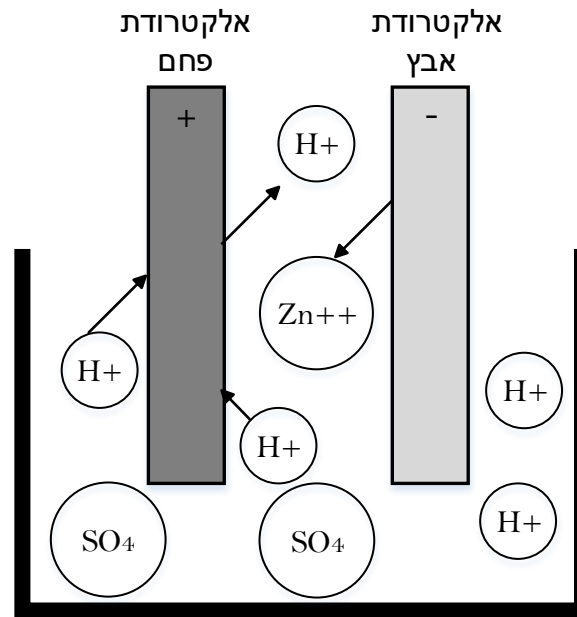
הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

הוראות כלליות

- מטרת המשחק להכניס את הכדור השחור לשער, יש 4 מצבים
 - **תרגול** - בו התלמיד לומד כיצד להזיז את הכדור השחור באמצעות המטענים החיוביים והשליליים.
 - **רמת קושי 1** – בין הכדור השחור לבין השער יהיה מחסום, על התלמיד להציב מטענים מתאימים כך שהכדור יעקוף את המחסום.
 - **רמת קושי 2**- כעת יופיעו על המגרש שני מחסומים, כך שתכנן המסלול יהיה מורכב יותר.
 - **רמת קושי 3**- על המסך יופיעו שלושה מחסומים, וקביעת מסלול לכדור השחור תהיה יותר מורכבת.
- ניתן לקבוע את מטען הדסקית על ידי **דיסקה חיובית**.
- ניתן לראות את מסלול הכדור השחור על ידי סימון **עקבה**.
- ניתן לראות את כיוון השדה שהמטענים יוצרים על המגרש על ידי סימון **שדה**.
- ניתן לראות את עוצמת השדה על ידי סימון **antialias**

2.3 התא החשמלי

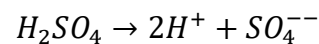
כבר הזכרנו, שאחת הדרכים לקבלת מקור מתח - היא להפריד בין מטענים חיוביים לשליליים. התא החשמלי הוא התקן יעיל להפרדת מטענים. הוא בנוי משני מוטות השקועים בתוך תמיסה, כפי שמתואר באיור 2-10. מוטות אלו מכונים אלקטרודות.



איור 2-10 תא פחם-אבץ

התא החשמלי, המתואר כאן, הוא תא פחם-אבץ. אלקטרודה אחת של התא עשויה פחם, והאלקטרודה השנייה עשויה אבץ. שתי האלקטרודות שקועות בתוך תמיסה של חומצה גופרתית (H_2SO_4). לקצה של אלקטרודה - נהוג לקרוא **הדק**, ולפעמים גם האלקטרודה עצמה נקראת **הדק**.

נסביר עתה כיצד נוצרת הפרדת המטענים בתא החשמלי, וכיצד מצטברים המטענים באלקטרודות של התא. בתוך התמיסה יש תהליך של התפרקות ליונים. מכל מולקולה של החומצה מתקבלים שני יונים חיוביים של מימן (H^+) ויון שלילי אחד (SO_4^{--}) כותבים זאת כך:



כאשר מכניסים את אלקטרודת האבץ לתוך התמיסה החומצית, יוני האבץ (Zn^{++}) עוזבים את אלקטרודת האבץ, ועוברים לתמיסה. כל יון Zn^{++} משאיר אחריו באלקטרודת האבץ שני אלקטרונים עודפים, וכתוצאה מכך - אלקטרודת האבץ נטענת במטען שלילי.

התמיסה, שאליה עוברים יונים חיוביים של אבץ, נטענת במטען חיובי. אבל לתמיסה יש נטייה להישאר אדישה מבחינה חשמלית. לכן, כדי לאזן את כניסתו של כל יון אבץ חיובי שני יונים של מימן - הנמצאים בתמיסה - מתחברים לשני אלקטרונים מאלקטרודת הפחם. כך הופכים שני יונים אלה לשני אטומי מימן, ואלה עוזבים את התמיסה, ומתחברים כאמור לשני אלקטרונים מאלקטרודת הפחם.

מאלקטרודת הפחם נלקחו שני אלקטרונים, והיא נהפכת לבעלת מטען חיובי (יש בה חוסר באלקטרונים). ראינו כי באלקטרודת האבץ יש עודף אלקטרונים, כלומר: אלקטרודת האבץ נטענת במטען שלילי, ואלקטרודת הפחם נטענת במטען חיובי. בדרך זו נעשית הפרדת המטענים בתא החשמלי, ומתקבל מתח בין שתי האלקטרודות של התא.

האלקטרודה, שבה מצטבר המטען השלילי, נקראת **האלקטרודה השלילית**, ומסמנים אותה לפעמים ב-"-". האלקטרודה, שבה מצטבר המטען החיובי, נקראת **האלקטרודה החיובית**, ומסמנים אותה לפעמים ב-"+".

סוללות חשמליות

הסברנו כיצד פועל תא חשמלי, המכיל תמיסה נוזלית. לא נהוג להשתמש בתא כזה, ובדרך כלל משתמשים בתא יבש. תא כזה מכיל משחה חומצית במקום תמיסה נוזלית. מספר תאים יבשים, המחוברים זה לזה, משמשים סוללה. סוללות כאלה אנו מכניסים למצלמה, לפנס, לטרנזיסטור, או למחשבון.

תא יבש מתואר באיור 2-11. מכל האבץ הוא האלקטרודה השלילית של התא היבש, ומוט הפחם במרכז הוא האלקטרודה החיובית. מוט הפחם מוקף במשחה חומצית.

סוללות יבשות אחרות, הנפוצות בשוק, הן הסוללות האלקליניות ("אלקליות"). לסוללות אלה יש איכות גבוהה ואורך חיים גדול, ומשתמשים בהן במכשירים אלקטרוניים שונים. הנה ערכים טיפוסיים של מתחי סוללות: 1.5V, 3V, 9V, 12V.

בניסוי זה נראה כיצד כמות המטענים קובעת את עוצמת המתח בסוללה.

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/battery-voltage>

הוראות כלליות

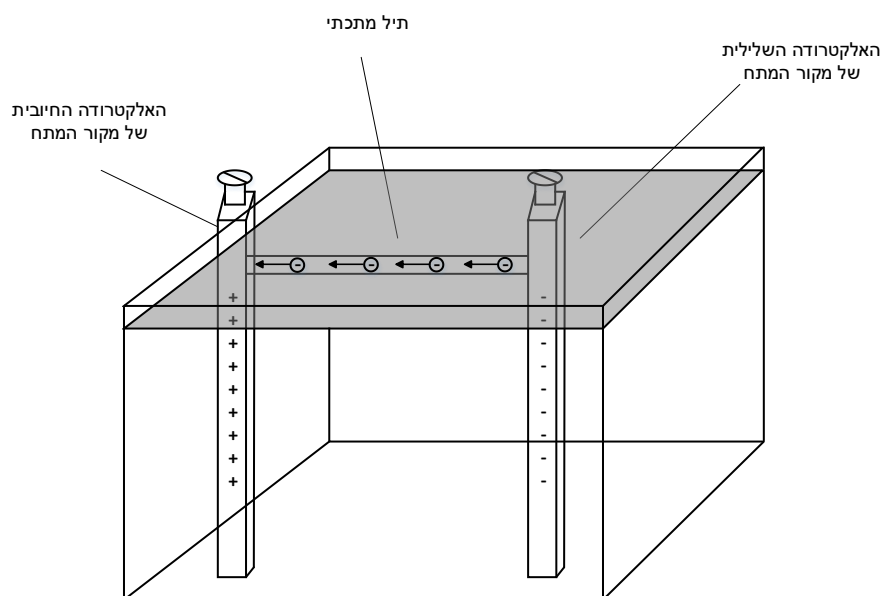
- עם הפעלת בסימולציה הסוללה מאוזנת כלומר הפרש הפוטנציאלים שלה הוא אפס (מתח אפס), אותה כמות של מטענים בשני צידי הסוללה.
- למטה מופיע סרגל מתח אשר נמצא באמצע ומציין שהסוללה מאוזנת כלומר מתח אפס.
- כאשר נזיז את הסמן של המתח המקובל ימינה ושמאלה נראה שהמטענים יעברו בהתאם לצד ימין או שמאל בהתאם, כאשר הסוללה טעונה מרבית כל המטענים נמצאים בצד אחד, עם פעולת הסוללה והשימוש בה חלק מהמטענים עוברים לצד השני.
- ניתן להציג את שני מכלי המטענים כסוללה על ידי סימון הצג סוללה.

2.4 הזרם החשמלי

ראינו שבתא החשמלי נעשית הפרדת מטענים. אלקטרודה אחת נטענת במטען חיובי, והשנייה נטענת במטען שלילי. נראה עתה מה יקרה, אם נחבר תיל עשוי מתכת – לשתי האלקטרודות של התא.

כבר בסוף סעיף 2.1 הזכרנו, שבמתכות שונות (כגון: כסף, נחושת ואבץ) יש מצבור של אלקטרונים, החופשיים לנוע. נציין כי לא כל האלקטרונים באטומי המתכת הם אלקטרונים חופשיים. חלק מהאלקטרונים קשורים בחוזקה לגרעיני האטומים, ושאר האלקטרונים חופשיים לנוע בין האטומים במתכת. באיור 2-15 אפשר לראות מסלולים של אלקטרונים חופשיים.

ניקח תיל עשוי ממתכת עשירה באלקטרונים חופשיים (למשל, נחושת) ונחבר אותו לשתי האלקטרודות של תא חשמלי (איור 2-16). כאמור, תא חשמלי הוא מקור מתח.



איור 2-16 תיל מחובר לאלקטרודות של מקור מתח. האלקטרונים החופשיים בתיל נעים מהאלקטרודה השלילית – אל האלקטרודה החיובית

אנו יודעים שבין האלקטרודות של התא יש מתח, וכי **מטענים שליליים** נעים **מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה**. לכן **האלקטרונים החופשיים שבתיל המתכתי ינועו מהאלקטרודה השלילית לאלקטרודה החיובית**.

אנו יודעים גם כי באלקטרודה השלילית של התא מצטברים אלקטרונים עודפים. גם אלקטרונים עודפים אלה יתחילו לנוע לאורך תיל המתכת. תנועה זו של אלקטרונים מן האלקטרודה השלילית תקטין את המטען השלילי שבאלקטרודה זו. כתוצאה מכך, יתאפשר המשך התהליך של טעינת האלקטרודות. (נשכן עתה יוכלו יוני האבץ לעזוב את האלקטרודה השלילית, כפי שהסברנו בסעיף 2.2).

המשך הטעינה של האלקטרודות יגרום להמשך הקיום של המתח בין האלקטרודות. מתח זה יוסיף לגרום לתנועת אלקטרונים מהאלקטרודה השלילית - אל האלקטרודה החיובית של מקור המתח. נסיק מכך כי כאשר מחברים תיל לאלקטרודות אלה, נוצרת בתיל תנועה מכוונת של אלקטרונים מאלקטרודה אחת לשנייה, כלומר, האלקטרונים נעים בתנועה שיש לה כיוון מסוים. תנועה כזאת של אלקטרונים - נקראת **זרם חשמלי**. גם תנועה מכוונת של מטענים חיוביים (כגון, יונים חיוביים) היא זרם חשמלי.

ובאופן כללי:

זרם חשמלי הוא תנועה מכוונת של מטענים חשמליים (חיוביים או שליליים)

אנו נעסוק בדרך כלל בתנועה **מכוונת של אלקטרונים**.

מוליכים ומבודדים

רוב המתכות - ובהן הנחושת, הכסף והאבץ, שכבר הזכרנו - שייכות לקבוצת חומרים, הנקראים **מוליכים**. התכונה החשובה של המוליכים היא שנמצאים בהם שפע של חלקיקים נושאי מטען החופשיים לנוע בחומר. אנו נעסוק בעיקר במוליכים, שבהם החלקיקים האלה הם אלקטרונים. מבחינתנו, מוליך הוא חומר שאפשר ליצור בו בקלות תנועה מכוונת של אלקטרונים.

יש חומרים שהמבנה האנטומי שלהם אינו מאפשר ליצור בקלות תנועה מכוונת של אלקטרונים. חומרים כאלה נקראים **מבודדים** או **מבדדים**. בפרקים הבאים נדון בשימושי מבדדים בחשמל. באיור 2-17 מתוארים מוליכים שמכוסים בחומרים מבודדים.

מטרת הסימולציה היא לבחון את הקשר בין ערך המתח החשמלי לבין המוליך המעביר את הזרם.

בעזרת הסימולציה, ניתן לראות כי האלקטרונים נעים במעגל בעזרת מקור המתח.

התלמיד יזהה תכונות המתקשרות לפלסטיק ומתכות ויבין את ההבדלים. כמו כן ניתן לחשוף את התלמידים לתופעת הפוטו אלקטריק (אם כי טרם נלמד בכיתה).

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

להלן קישור לסימולציה בנושא מוליכים:

<http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Conductivity>

דרך השלבים הבאים ניתן לחקור אודות המוליכים ותכונותיהם:

1. תחילה, יש לוודא כי המתח בתפריט, ערכו שווה לאפס.
2. תחת תפריט חומרים, בחר מתכת.
3. כעת, הגדר את מתח הסוללה לערך שך 0.5 וולט.
4. הכדורים הקטנים הנעים במוליך הינם האלקטרונים
5. כדי להשלים תנועה מכוונת של אלקטרונים עליהם לנוע במסלול מוליך אשר מתחיל מנקודה אחת במקור המתח בקוטביות אחת ומסתיים במקור המתח בקוטביות הפוכה.

הוראות כלליות

- לרשותך מעגל חשמלי עם סוללה שניתן לשנות את ערכה ושלושה מוליכים שונים.
- קבע את המוליך **מתכת** הפעל את המעגל צפה בתנועת האלקטרונים וברמת המוליכות (סרגל צד שמאל), שנה את עוצמת המתח ותראה את ההשפעה על רמת המוליכות.
- שנה את המוליך **לפלסטיק**, שנה את המתח וראה את המוליכות של החומר (אפס).
- שנה את המוליך **לפוטו-מוליך** (מוליכותו תלויה באור), הפעל את המעגל עלה את המתח (הזרם לא עובר), הדלק את האור על ידי סימון **הפעל פס** ושים לב כיצד המוליכות משתנה בתלות באור.

שים לב: לא ניתן לשלוט על עוצמת האור לכן האור הופך את החומר למוליך או מבודד. לו ניתן היה אפשר לשנות את עוצמת האור היינו רואים שהחומר היה הופך למוליך בדרגות שונות בתלות באור.

שאלות חזרה

שאלה 2.19

האם האלקטרונים, הקשורים בחוזקה לגרעיני האטומים, נקראים אלקטרונים חופשיים?

שאלה 2.20

השלימו: תיל מחובר לאלקטרודות של תא חשמלי. האלקטרונים החופשיים בתיל נעים מהאלקטרודה _____ של התא, אל האלקטרודה _____.

שאלה 2.21

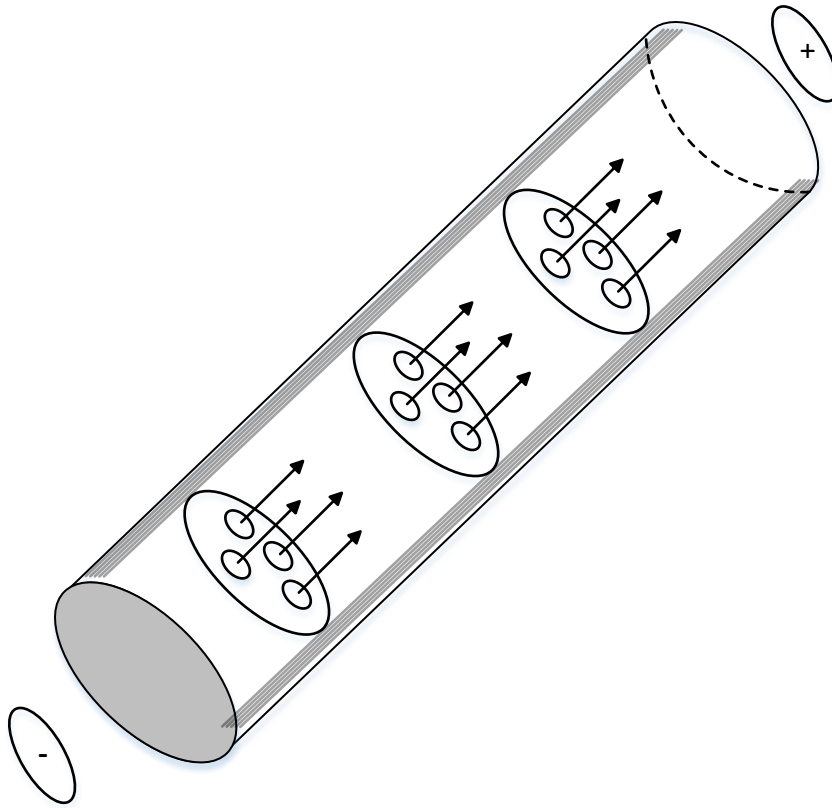
כיצד נקראת תנועה מכוונת של מטענים? סמנו את התשובה הנכונה.

- א. אלקטרון
- ב. הפרש פוטנציאלים
- ג. אנרגיה פוטנציאלית חשמלית
- ד. זרם חשמלי
- ה. מתח חשמלי
- ו. פוטנציאל

2.5 חישוב הזרם החשמלי במוליך

הגדרנו את הזרם החשמלי כתנועה מכוונת של מטענים. עתה נגדיר מושג שבעזרתו נוכל לתאר את גודלו של הזרם החשמלי. מושג זה הוא **עוצמת הזרם החשמלי**. לפעמים מקצרים ואומרים **זרם** במקום **עוצמת זרם**. מסמנים את עוצמת הזרם (ואת הזרם) באות I .
באיור 2-18 מתואר זרם במוליך.

עוצמת הזרם החשמלי היא המטען החשמלי העובר ביחידת זמן דרך חתך של המוליך.



איור 2-18 הזרם במוליך, ומטענים עוברים בחתכים שונים של המוליך.

נסמן ב- Q את גודל המטען שעובר בחתך המוליך, ונסמן ב- t את משך הזמן שבו עובר המטען. גודל המטען שעובר בחתך המוליך ביחידת זמן, כלומר הזרם I , נתון על ידי

$$(2-7) \quad I = \frac{Q}{t}$$

I – זרם (או עוצמת הזרם)

Q – מטען

t – זמן

ובמילים:

$$\frac{\text{מטען}}{\text{זמן}} = \text{עוצמת הזרם}$$

למשל, נניח כי במשך זמן של 20 שניות t עובר מטען של 4 קולון Q דרך חתך של מוליך. לפי משוואה (2-7), עוצמת הזרם החשמלי I במוליך היא:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{4 \text{ קולון}}{20 \text{ שניות}} = \frac{4C}{20s} = 0.2 \frac{C}{s} \left[\frac{\text{קולון}}{\text{שניות}} \right]$$

יחידות הזרם

אם מדובר במוליך שהמטענים החופשיים בו הם אלקטרונים, אפשר לבטא את עוצמת הזרם במוליך באמצעות מספר האלקטרונים העוברים בחתך המוליך ביחידת זמן. אבל, כאמור, בדרך כלל מודדים את המטען ביחידת המטען קולון.

היחידה של עוצמת הזרם החשמלי היא **קולון לשנייה**. ליחידה זו קוראים **אמפר**, ומסמנים אותה באות **A**.

עוצמת הזרם החשמלי במוליך היא אמפר אחד. אם קולון אחד עובר דרך שטח החתך של המוליך במשך שנייה אחת:

$$1A = \frac{1C}{1s} \quad \text{אמפר} = \frac{\text{קולון}}{\text{שניות}}$$

אם, למשל, $Q = 0.6C$, $t = 3s$, נקבל כי עוצמת הזרם היא:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{0.6C}{3s} = 0.2A$$

כשהזרם קטן בהרבה מאמפר אחד, נהוג למדוד אותו במילי-אמפר או במיקרו-אמפר. מילי-אמפר הוא אלפית האמפר (כשם שמילימטר הוא אלפית המטר). המילי-אמפר מסומן כך: mA. הקשר בין המילי-אמפר לאמפר הוא:

$$1mA = \frac{1A}{1,000} \quad (2-9)$$

המיקרו-אמפר הוא מיליונית האמפר. המיקרו-אמפר מסומן כך: μA . הקשר בין המיקרו-אמפר לאמפר הוא:

$$1\mu A = \frac{1A}{1,000,000} \quad (2-10)$$

דוגמה 2-4

במשך 5 דקות עבר מטען של 120 קולון דרך החתך של חוט הלהט בנורה. מהי עוצמת הזרם בחוט הלהט במשך הזמן הזה?

פתרון

הזמן נתון בדקות, ותחילה נרשום אותו בשניות:

$$300 \text{ שניות} = (5 \times 60) \text{ שניות} = 5 \text{ דקות}$$

ועכשיו נחשב את עוצמת הזרם, לפי משוואה (2-7):

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{120C}{300s} = 0.4A$$

במשך 5 הדקות הנתונות, עוצמת הזרם בחוט הלהט – היא 0.4A.

דוגמה 2-5

מחשבון פעל במשך שתיים רצופות. במשך כל הזמן הזה עבר בו זרם של 0.12mA. מהי כמות המטען שעברה במחשב?

פתרון

נרשום תחילה את הזרם באמפרים:

$$0.12mA = \frac{0.12}{1,000} = 0.00012A$$

נבטא את הזמן בשניות:

$$7200 \text{ שניות} = 2 \times 3600 = 2 \text{ שעות}$$

לפי משוואה (2-7),

$$I = \frac{Q}{t}$$

ולכן:

$$Q = It$$

נציב במשוואה זו את ערכי הזרם והזמן:

$$Q = 0.00012 \times 7200 = 0.864 \text{ קולון}$$

כמות המטען, שעברה במחשבון במשך שתיים רצופות, היא 0.864 קולון.

 שאלות חזרה

שאלה 2.22

סמנו את התשובה הנכונה.

עוצמת הזרם החשמלי במוליך היא...

א. המטען החשמלי שעובר דרך חתך של המוליך המחובר להדקי תא חשמלי.

ב. המטען החשמלי שעובר בין ההדק החיובי להדק השלילי של תא חשמלי.

ג. המטען החשמלי שעובר ביחידת זמן דרך חתך של המוליך.

ד. מספר האלקטרונים החופשיים במוליך.

ה. מכפלת המטען במשך הזמן שהמטען עובר דרך חתך של המוליך.

שאלה 2.23

מטען של 15 קולון עבר במוליך במשך 30 שניות. מהי עוצמת הזרם במוליך?

שאלה 2.24

זרם של 4A עבר במוליך במשך 20 שניות. חשבו את המטען החשמלי שעבר במוליך במשך זמן זה.

שאלה 2.25

בנורת להט זורם זרם של 0.5A. תוך כמה זמן יעבור מטען של 6 קולון דרך חתך של חוט הלהט בנורה?

שאלה 2.26

במחשב זורם זרם של 0.8A. חשבו את המטען שעבר במחשב במשך 4 שעות.

שאלה 2.27

בפנס זורם זרם של 250mA. תוך כמה זמן יעבור מטען של 3 קולון דרך נורת הפנס?

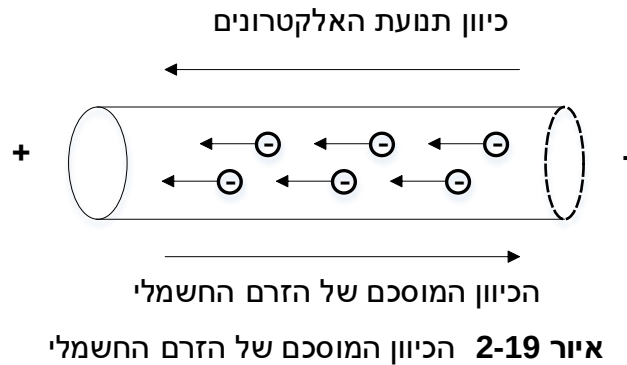
שאלה 2.28

הזרם במקלט טרנזיסטורי (ווקמן) הוא 0.03A. בטאו זרם זה ביחידות mA ו- μA .

2.6 כיוון הזרם החשמלי במוליך

הגדרנו את הזרם החשמלי כתנועה מכוונת של מטענים חשמליים, כלומר: תנועת מטענים $\vec{q}$ יש לה כיוון. לכן מייחסים כיוון לזרם. הנטייה הטבעית היא לקבוע את כיוון הזרם ככיוון התנועה של המטענים שמהם מורכב הזרם. כאמור, אנו נעסוק בעיקר בזרם העובר במוליכים מתכתיים. המטענים החופשיים במוליכים אלה הם אלקטרונים. אם כך, היינו מצפים שכיוון הזרם יהיה ככיוון תנועת האלקטרונים.

ראינו שכיוון תנועת האלקטרונים במוליך מתכתי שמחובר למקור מתח הוא מהאלקטרודה השלילית של המקור - אל האלקטרודה החיובית שלו. אם כך, היינו מצפים שזה יהיה גם כיוון הזרם. אך כיוון הזרם החשמלי נקבע דווקא מהאלקטרודה החיובית לאלקטרודה השלילית. כיוון זה נקרא **כיוון המוסכם** של הזרם, והוא מסומן באיור 2-19.



מדוע נקבע כיוון הזרם כפי שנקבע? פעם (בתקופה של פרנקלין) חשבו שהזרם החשמלי הוא תנועה של מטענים חיוביים, ולכן קבעו את כיוון הזרם החשמלי כפי שקבעו. אף שקביעה זו של כיוון הזרם אינה מוצלחת ביותר, היא מקובלת עד היום, וגם אנו נשתמש בה. נסכם:

האלקטרונים במוליך נעים מהאלקטרודה השלילית לחיובית, והכיוון המוסכם של הזרם הוא מהאלקטרודה החיובית לשלילית.

ניסוי עקרון זרימת האלקטרונים וכיוון הזרימה

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/signal-circuit>

הוראות

- לפניך מעגל חשמלי המכיל סוללה (לא ניתן לשלוט על ערכיה), מפסק, נורה, ומוליך.
- ניתן לשלוט על מצב המפסק בסרגל **פתח\סגור מתג**.
- כאשר המעגל סגור מתחילה תנועת אלקטרונים מההדק השלילי של הסוללה לחיובי, ניתן לראות את תנועת האלקטרונים על ידי לחיצה על **הראה תנועת אלקטרונים**.
- ניתן לראות מהלך של אלקטרון על ידי **סמן אלקטרון**.
- ניתן לסמן את כיוון הזרימה על ידי לחיצה על **הראה כיוון זרם**.
- עקרון זרימת הזרם הוא שכאשר יוצא אלקטרון מההדק השלילי נכנס אלקטרון בהדק החיובי, על ידי הזזה של כל האלקטרונים במוליך, כך, שכמות האלקטרונים בכל רגע שווה רק קצב ההזזה קובע את עוצמת הזרם.

2.7 צפיפות הזרם

לפעמים נרצה לדעת את צפיפותם של האלקטרונים נושאי הזרם בחתך המוליך, כאשר במוליך זורם זרם. במילים אחרות, נרצה לדעת את צפיפות הזרם במוליך. כאשר ידועה לנו עוצמתו של הזרם החשמלי I , ידועה לנו כמות המטען שעברה ביחידת זמן דרך חתך של המוליך, אך אין לנו מידע על צפיפות האלקטרונים נושאי הזרם בחתך המוליך. בהגדרת הזרם I אין כלל התייחסות לשטחו של חתך זה.

צפיפות הזרם (current density) במוליך היא כמות המטען שעוברת דרך שטח חתך מוליך ביחידת זמן; במילים אחרות: צפיפות הזרם במוליך היא היחס בין עוצמת הזרם I דרך המוליך – לשטח חתכו A . נסמן ב- J את צפיפות הזרם במוליך, ונקבל:

$$(2-11) \quad J = \frac{I}{A}$$

במערכת היחידות SI – השטח A נמדד במטרים רבועים, ועוצמת הזרם I נמדדת באמפרים. היחידה של צפיפות הזרם J תהיה אפוא:

$$(2-12) \quad \frac{A}{m^2} \quad \frac{\text{אמפר}}{m^2}$$

צפיפות הזרם היא גודל חשוב באלקטרוניקה ובנושאים מתקדמים של חשמל ומגנטיות. צפיפות הזרם היא וקטור, כלומר: גודל עם כיוון. דיון בנושא זה – חורג ממסגרתנו.

דוגמה 2-6

דרך מוליך גילי, שקוטרו 1cm, עובר זרם של 2mA. מהי צפיפות הזרם במוליך?

פתרון

קוטר המוליך הוא $D=1\text{cm}$, ורדיוסו r הוא:

$$r = \frac{D}{2} = 0.5\text{cm} = 0.005\text{m}$$

חתך המוליך הוא עיגול שקוטרו 1cm, ושהרדיוס שלו 0.5cm. שטח עיגול, שהרדיוס שלו r , הוא πr^2 , ולכן שטח החתך A של המוליך הוא:

$$A = \pi r^2 = \pi \times 0.005^2 = 0.000785\text{m}^2 = 0.785\text{cm}^2$$

וצפיפות הזרם – לפי משוואה (2-11) – היא:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{2 \times 10^{-3}}{0.0000785} = 25.5 \frac{A}{m^2}$$

וביחידות $\frac{A}{mm^2}$:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{2 \times 10^{-3}}{0.785} = 25.5 \times 10^{-4} \frac{A}{mm^2}$$

שאלות חזרה 

שאלה 2.29

נתונים שלושה מוליכים גליליים. בכל מוליך עובר זרם של 150mA.

- א. שטח החתך של אחד המוליכים הוא 30 mm^2 . חשבו את צפיפות הזרם במוליך זה.
- ב. רדיוס המוליך השני גדול פי 2 מרדיוס המוליך הראשון. מה צפיפות הזרם במוליך זה?
- ג. רדיוס המוליך השלישי קטן פי 4 מרדיוס המוליך הראשון. מה צפיפות הזרם במוליך זה?

שאלה 2.30

בשני מוליכים זורם אותו זרם. האם במוליך העבה יותר - צפיפות הזרם תהיה גדולה יותר, קטנה יותר, או שצפיפות הזרם תהיה שווה בשני המוליכים?

שאלה 2.31

דרך חתך של מוליך עברו 39×10^{18} אלקטרונים במשך 20 שניות. מטען האלקטרון הוא $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

- א. מה עוצמת הזרם במוליך? נא לפרט.
- ב. מה צפיפות הזרם, אם ידוע כי שטח החתך של המוליך הוא 10 mm^2 ?

שאלה 2.32

מטען עובר בפרק זמן t דרך חתך של מוליך גלילי, שרדיוסו r . הראו שהמטען Q נתון על ידי $Q = \pi r^2 J t$ (J – צפיפות הזרם במוליך).

שאלות סיכום 

1. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת – נקראת

- א. הפוטנציאל באותה נקודה
- ב. האנרגיה הדרושה להעברת מטען

- ג. מיקום המטען
2. הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות - נקרא
א. הפרש הגבהים בין המטענים
ב. מתח
ג. מטען
3. גוף טעון שלילית ינוע בהשפעת הפרש פוטנציאלים, ממקום שבו הפוטנציאל
א. נמוך לגבוה
ב. גבוה לנמוך
ג. תלוי במיקום
4. הפוטנציאל, הנוצר בנקודה מסוימת על-ידי מערכת מטענים, שווה ל
א. סכום המטענים
ב. סכום הזרמים
ג. שווה לסכום הפוטנציאלים הנוצרים בנקודה זו על-ידי המטענים הבודדים
5. שני מטענים שוני-סימן, המופרדים זה מזה, יכולים לשמש ל
א. זרם במעגל
ב. מקור מתח
ג. להפרש פוטנציאלים
6. התא החשמלי (והסוללה) הוא התקן יעיל
א. הפרדת מטענים
ב. חיבור המעגל
ג. אחסון כל המטענים יחד
7. תנועה מכוונת של מטענים חשמליים
א. מעגל חשמלי
ב. מתח חשמלי או הפרש פוטנציאלים
ג. זרם חשמלי
8. הזרם החשמלי במוליך נתון על-ידי כמות המטען, העובר דרך שטח החתך של המוליך – ביחידת זמן:
א. אין תלות בזמן
ב. המשפט נכון
ג. המשפט אינו נכון
9. הכיוון המוסכם של הזרם החשמלי במוליך
א. מנוגד לכיוון תנועת האלקטרונים באותו מוליך.
ב. באותו כיוון המוליך
ג. אקראי

10. צפיפות הזרם במוליך היא

- א.** כמה המוליך רחב
- ב.** כמה זרם יכול לעבור
- ג.** כמות המטען, העוברת דרך שטח חתך מוליך ביחידת זמן

סיכום פרק 2

- האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת – נקראת **הפוטנציאל** באותה נקודה (אין למעשה הבדל בין "אנרגיה של יחידת מטען" – לבין "אנרגיה ליחידת מטען").
- הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות - נקרא מתח. יחידת המתח היא וולט.
- גוף טעון שלילית ינוע בהשפעת הפרש פוטנציאלים, ממקום שבו הפוטנציאל נמוך למקום שבו הפוטנציאל גבוה.
- הפוטנציאל בנקודה המרוחקת מרחק r ממטען Q נתון על ידי $U = k \frac{Q}{r}$.
- הפוטנציאל, הנוצר בנקודה מסוימת על ידי מערכת מטענים, שווה לסכום הפוטנציאלים הנוצרים בנקודה זו על ידי המטענים הבודדים (תוך התחשבות בסימני המטענים).
- נתון קטע באורך d . הקשר בין גודל השדה החשמלי האחיד לאורך הקטע – לבין הפרש הפוטנציאלים: $E = \frac{U}{r}$.
- שני מטענים שוני-סימן, שמופרדים זה מזה, יכולים לשמש כמקור מתח.
- יש דרכים שונות שבהן ניתן להפריד בין מטענים חיוביים לשליליים, וכך ליצור מקורות מתח. התא החשמלי (והסוללה) הוא התקן יעיל להפרדת מטענים.
- תנועה מכוונת של מטענים חשמליים - נקראת זרם חשמלי. האלקטרונים הם נושאי הזרם החשמלי במוליכים מתכתיים. המתכות הן מוליכות, כלומר: ניתן ליצור בהן בקלות זרם חשמלי - בניגוד למבודדים.
- הזרם החשמלי במוליך נתון על ידי כמות המטען שעובר דרך שטח החתך של המוליך – ביחידת זמן: $I = \frac{Q}{t}$.
- הכיוון המוסכם של הזרם החשמלי במוליך - מנוגד לכיוון תנועת האלקטרונים באותו מוליך.
- צפיפות הזרם במוליך היא כמות המטען שעוברת דרך שטח חתך מוליך ביחידת זמן; כלומר: צפיפות הזרם במוליך היא היחס בין עוצמת הזרם I דרך המוליך – לשטח חתכו A .

3. התנגדות חשמלית

3.1 מבוא

ראינו שבאמצעות מקור מתח אפשר ליצור זרם חשמלי לאורך מוליך. משתמשים בכך במערכות רבות ושונות: ברשת החשמל הארצית, במערכת הטלפונים, בתקשורת בין מחשבים, בטלוויזיה בכבלים – ועוד.

3.2 התנגדות מוליכים למעבר זרם חשמלי

דרכם

כדי להבין מדוע מוליכים מגלים התנגדות למעבר זרם דרכם, נצטרך לחזור ולהתבונן במבנה האטומי של החומרים המוליכים. נעסוק בעיקר במוליכים עשויים מתכת, ולכן נתבונן במבנה האטומי של המתכות. האטומים במתכות מסודרים בצורה סימטרית, שכבות שכבות של אטומים, ובכל שכבה יש אטומים שמסודרים בצורה מסוימת וקבועה. מבנה כזה נקרא **סורג** או **סריג**. באיור 2-3 נתון סורג מתכתי.

למדנו כבר שחלק מהאלקטרונים של אטומי המתכת הם אלקטרונים חופשיים. אלקטרונים אלה אינם קשורים לאטומים שלהם, אלא יכולים לנוע בסורג כולו. האטומים, שהאלקטרונים החופשיים עזבו אותם, נהפכים ליונים חיוביים, והאלקטרונים החופשיים נעים כל הזמן בכל הכיוונים בתוך הסורג המתכתי.

התיאור שהבאנו עד עכשיו מתאים למוליכים מתכתיים אידיאליים. כלומר, מוליכים שמורכבים מסורגים, ובהם כל יון קבוע במקומו, וכל היונים זהים זה לזה. אבל במוליך מתכתי מעשי - המבנה המושלם של הסורג אינו נשמר. היונים החיוביים אינם נעים ממקום למקום, אבל הם מתנוודדים בתנודות זעירות. נוסף לכך, נכנסים לסורג יונים זרים, שגם הם מקלקלים את המבנה המושלם של הסורג.

כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך סורג לא-מושלם, הם מתנגשים ביונים, כיוון תנועתם משתנה ומהירותם קטנה. באיור 3-3 רואים מסלולים של אלקטרונים בתוך סורג מתכתי מעשי. גם בסורג האידיאלי וגם בסורג המעשי - אין כיוון אחד שבו נעים יותר אלקטרונים מאשר בכיוונים האחרים.

כזכור, הגדרנו את הזרם החשמלי כתנועת אלקטרונים בכיוון מסוים. מאחר שהאלקטרונים החופשיים בסורג אינם נעים לשום כיוון מיוחד, לא נוצר בסורג זרם חשמלי.

עכשיו נראה מה קורה כאשר מחברים מוליך מתכתי - להדקים של מקור מתח. אנו יודעים שמקור המתח גורם לתנועה מכוונת של אלקטרונים בתוך המוליך, מההדק השלילי של מקור המתח - אל ההדק החיובי שלו.

בסימולציה הבאה ניתן לראות כי גם אנו, בני האדם, מוליכים חשמל, וכי אם נטעין את גופנו (בסימולציה על ידי שפשוף הרגל בשטיח), נטעין את גופנו באלקטרונים. כשנסגור מעגל, נוכל להתחשמל, כלומר להעביר זרם.

תחילה יש להיכנס לקישור הבא:

https://phet.colorado.edu/sims/html/john-travoltage/latest/john-travoltage_en.html

הערה: את הסימולציה ניתן לבצע בשפה העברית והערבית על ידי האפשרות *Translation*

מטרת הסימולציה:

להכיר ולהתנסות בהולכה של גוף המוטען (על ידי שפשוף) באלקטרונים. כמו כן, ניתן לראות את הקשר בין הפרק הראשון הנלמד בנושא מטענים, לפרק השני בנושא מתח וזרמים והפרק השלישי בנושא התנגדות. כחלק מהתנסות הסימולציה ניתן לראות כיצד משפיע גודל המטען, המרחק האווירי, על היווצרות הזרם החשמלי.

הערה: לצורך התנסות וההדמיה, הזמן טעינה בסימולציה קצר מהזמן במציאות.

מהלך הסימולציה:

יש להטעין את רגלו של ג'ון במטענים על ידי השפשוף בשטיח. ולאחר מכן להניע את ידו לעבר הדלת.

שאלות לדין

1. האם אפשר לחזות מה יקרה לג'ון כאשר גופו יהיה טעון במטענים השלילים?
2. מהי התופעה החשמלית אשר גורמת לג'ון להתחשמל?
3. ממה מושפעת עצמת הזרם?



אבל גם כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך המוליך בתנועה מכוונת, יש התנגשויות בין האלקטרונים לבין היונים בסורג המתכתי. גם בתנועה המכוונת התנגשויות אלו גורמות לשינויים בכיוון התנועה של האלקטרונים ולהקטנת מהירותם. באיור 3-4 מתוארים – באמצעות חצים – מסלולי התנועה של האלקטרונים החופשיים, כשמקור המתח מחובר בין קצות המוליך.

התנועה המכוונת של האלקטרונים החופשיים מתעכבת אם כן בגלל ההתנגשויות, ובמוליך נוצרת התנגדות לזרם החשמלי, ובקיצור: **התנגדות**.

3.3 הגדרת ההתנגדות באמצעות מתח וזרם

ראינו כי יש קשר הדוק בין התנגדות המוליך לבין הזרם דרך המוליך. נפרט זאת: אם מחברים למקור מתח נתון מוליך שיש לו התנגדות קטנה מאוד, אז הכוח החשמלי הפועל על המטענים - בגלל מקור המתח - יוצר זרם גדול מאוד במוליך; ואם מחברים לאותו מקור מתח מוליך שיש לו התנגדות גדולה מאוד, לא עובר כמעט זרם במוליך.

ובאופן כללי:

כאשר מחברים מוליכים שונים למקור מתח נתון, רואים כי ככל שהתנגדות המוליך גדולה יותר, הזרם במוליך קטן יותר, ולהפך.

נוכל אם כן להגדיר את התנגדות המוליך בעזרת הקשר בין המתח על המוליך - לבין הזרם במוליך. נניח שמחברים מוליך למקור מתח. נסמן באות U את המתח בין קצות המוליך, ונסמן באות I את הזרם שעובר במוליך בגלל המתח U . נגדיר:

התנגדות המוליך היא היחס בין המתח U לזרם I .

נסמן את ההתנגדות באות R , ונוכל לרשום זאת כך:

$$(3-1) \quad R = \frac{U}{I}$$

R - התנגדות

U - מתח

I - זרם

נראה כיצד משתמשים במשוואה זו. נניח כי בין קצות מוליך, העשוי נחושת, יש מתח של 12V, והזרם במוליך זה הוא 10A. התנגדות המוליך היא - לפי משוואה (3-1),

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12V}{10A} = 1.2 \frac{V}{A}$$

יחידת ההתנגדות

אנו רואים כי יחידת ההתנגדות היא וולט חלקי אמפר. ליחידה זו קוראים אום, ומסמנים אותה באות היוונית Ω (אומגה גדולה). כלומר:

$$\text{אום} = \frac{\text{וולט}}{\text{אמפר}}$$

או:

$$(3-2) \quad 1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

ולכן בדוגמה שהבאנו, התנגדות מוליך הנחושת היא 1.2 אום, או 1.2Ω .

נגדיר אם כן את יחידת ההתנגדות אום בצורה הבאה:

למוליך יש התנגדות של אום אחד (1Ω), אם הפרש פוטנציאלים של וולט אחד (1V) בין קצותיו, יוצר במוליך זרם של אמפר אחד (1A)

מצורף קישור לסרטונים המראים את הקשר בין המשתנה, זרם, מתח והתנגדות.

לאחר שהכרנו את המושגים, התנגדות, מתח וזרם, למדנו את הקשר בין המשתנים. כמו כן תואר זאת על ידי חוק אום.

ניתן לראות בסרטונים הבאים כיצד חוק אום בא לידי ביטוי במעגלים חשמליים.

<https://www.youtube.com/watch?v=G3H5IKoWPpY>

<https://www.youtube.com/watch?v=J4Vq-xHqUo8>

כמו כן, בהמשך הפרק קיים קישור לביצוע התנסות של מעגלים חשמליים המתארים את הקשר בין המשתנים.

גיאורג סימון אום (1787-1851 בערך)

"תוצאות מחקרו התקבלו תחילה בספקנות, ואפילו בלעג, על ידי מדענים אחרים, ורק אחרי שנים הכירו בחשיבות תגליתו".

תיאור זה מתאים למדענים רבים. אחד מהם הוא הפיזיקאי הגרמני גיאורג סימון אום. הוא היה בן למשפחה מרובת ילדים. את השכלתו הבסיסית רכש מאביו, שהיה מסגר והתעניין במדע. אום גילה את החוק, שנקרא אחר כך על שמו: חוק אום. החוק התקבל בהתחלה בביקורת שלילית, ואפילו בלעג. אום נפגע מאוד מהיחס אליו, והתפטר מהאוניברסיטה שלימד בה. רק לאחר זמן הכירו בחשיבות תגליתו והוא זכה לכבוד גדול.

חוקי אוהם

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/ohms-law>

מטרת הסימולציה:

בניסוי זה נראה כיצד המתח משפיע על עוצמת הזרם ונבין את תפקיד הנגד (חוק אום). הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

הוראות כלליות

- בניסוי זה שני סרגלי עבודה שאתם ניתן לשנות, האחד קובע את עוצמת המתח והשני את עוצמת ההתנגדות. סרגל נוסף מציין את חום הנגד בתלות בזרם.
- סימולציית האלקטרוניקה מראה את הזרימה וכיוונה, בטור למעגל יש מד זרם המציין את עוצמת הזרם.
- בהפעלת המעגל שנו את עוצמת המתח ונראו כיצד זה משפיע על הזרם במעגל, ניתן לראות את העיקרון שכאשר אלקטרון יוצא מהסוללה בהדק השי אלקטרון נכנס. כמות האלקטרונים בזרימה שווה רק קצב התנועה שלהם משתנה.
- שימו לב שסרגל החום משתנה בתלות בזרם (יחס ישר).
- שנו את עוצמת הנגד וראו את השפעתו על הזרם (חוק אום).
- ניתן לראות את התנהלות האטומים בנגד בזמן זרימת האלקטרונים על ידי סימון

הצג אטומים בנגד

- ניתן לראות את התנהגות האלקטרונים בסוללה על ידי סימון הראה סוללה מבפנים

דוגמה 3-1

נתונים שני מוליכים, האחד עשוי ברזל והשני עשוי נחושת. בטבלה רשומים המתח בין קצות כל מוליך והזרם בכל מוליך. לאיזה משני המוליכים יש התנגדות קטנה יותר?

המוליך	המתח בין קצות המוליך	הזרם במוליך
ברזל	12 V	5 A
נחושת	24 V	6 A

פתרון

ההתנגדות של R_1 של המוליך העשוי ברזל היא:

$$R_1 = \frac{12V}{5A} = 2.4\Omega$$

ההתנגדות של R_2 של המוליך העשוי נחושת היא:

$$R_2 = \frac{24V}{6A} = 4\Omega$$

בדוגמה זו – התנגדות מוליך הנחושת קטנה מהתנגדות מוליך הברזל.

כאשר ההתנגדות גדולה, נהוג למדוד אותה בקילו-אום או במגה-אום.

קילו-אום ($k\Omega$) = אלף אום:

$$1k\Omega = 1,000\Omega = 10^3\Omega$$

מגה-אום ($M\Omega$) = מיליון אום:

$$1M\Omega = 1,000,000\Omega = 10^6\Omega$$

שאלות חזרה 

שאלה 3.1

נתונים שלושה מוליכים שונים. מחברים כל פעם מוליך אחר לאותו מקור מתח. למוליך הראשון התנגדות קטנה, למוליך השני התנגדות בינונית, ולמוליך השלישי התנגדות גדולה.

באיזה מהמוליכים יזרום הזרם הגדול ביותר? נמקו.

שאלה 3.2

מוליך מחובר למקור מתח. בין קצות המוליך יש מתח, ובמוליך זורם זרם. כיצד מוגדרת התנגדות המוליך? (סמנו את התשובה הנכונה).

- א. היחס בין הזרם למתח.
- ב. היחס בין המתח לזרם.
- ג. מכפלת המתח בזרם.
- ד. סכום המתח והזרם.

שאלה 3.3

המתח בין קצות חוט הלהט בפנס הוא 3V, והזרם בחוט הוא 0.3A. מהי התנגדות חוט הלהט?

שאלה 3.4

סמנו את המשוואה הנכונה.

א. $R = \frac{U}{I}$

ב. $R = \frac{I}{U}$

ג. $R = UI$

ד. $R = \frac{1}{UI}$

3.4 הגורמים הקובעים את גודל ההתנגדות של מוליך

למדנו כי למוליך יש התנגדות, ובעזרת המשוואה $R = \frac{U}{I}$ אנו יכולים לדעת גם את גודל ההתנגדות של מוליך. לשם כך עלינו לחבר את המוליך למקור מתח U. אם נדע את עוצמת הזרם I, הזרם במוליך בגלל המתח U, נוכל לדעת את התנגדות המוליך. אבל עדיין איננו יודעים אילו תכונות של המוליך קובעות את התנגדותו. שלוש התכונות העיקריות, הקובעות את ההתנגדות של מוליך, הן:

- אורך המוליך (האורך מסומן באות l).
- שטח החתך של המוליך (שטח החתך מסומן באות A).
- החומר שממנו עשוי המוליך.

נדון בכל אחת מהתכונות האלה ובהשפעתן על התנגדות המוליך.

השפעת אורך המוליך על התנגדותו

נתונים כמה מוליכים, העשויים מאותו חומר ושטחי החתך שלהם שווים, אך הם נבדלים זה מזה באורכם (איור 3-5). במקרה זה, ככל שהמוליך ארוך יותר, התנגדותו גדולה יותר.

נסביר זאת: ככל שהמוליך ארוך יותר, האלקטרונים במוליך עוברים דרך ארוכה יותר - מקצה אחד של המוליך לקצה השני. ככל שהאלקטרונים עוברים מרחק גדול יותר, הם מתנגשים ביונים רבים יותר בתוך הסורג המתכתי הלא-מושלם. כתוצאה מכך, התנועה המכוונת של האלקטרונים מתעכבת. פירוש הדבר שהזרם קטן יותר, וכפי שכבר אמרנו, זהו סימן לכך שההתנגדות גדולה יותר.

לכן,

ככל שהמוליך ארוך יותר, ההתנגדות שלו גדולה יותר

כדי לבדוק מהו הקשר המדויק בין אורך מוליך לבין ההתנגדות, נערכו ניסויים שבהם חיברו למקור מתח מסוים מוליכים שנבדלו זה מזה רק באורכם. בניסויים אלה מדדו את הזרם שעבר בכל מוליך, ועל סמך המדידות חישבו את ההתנגדות של כל מוליך. כמו כן מדדו את האורך של כל מוליך. מצאו כי ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס ישר לאורך המוליך. למשל: אם מגדילים פי 2 את אורך המוליך, גם ההתנגדות שלו גדלה פי 2.

דוגמה 3-2

באיור 3-7 נתונים שני מוליכים הנבדלים זה מזה רק באורך: אורך מוליך א הוא 4 מטר l_1 , ואורך מוליך ב הוא 2 מטר l_2 . נתון כי ההתנגדות המוליך הקצר היא $R_2 = 5\Omega$. מהי ההתנגדות R_1 של המוליך הארוך?

פתרון

אורך מוליך א גדול פי 2 מאורך מוליך ב, כי:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\text{אורך מוליך א}}{\text{אורך מוליך ב}} = \frac{4 \text{ מ'}}{2 \text{ מ'}} = 2$$

ההתנגדות נמצאת ביחס ישר לאורך, ולכן יחס ההתנגדויות הוא כיחס האורכים;

כלומר, $\frac{l_1}{l_2} = \frac{R_1}{R_2}$. אם אורך מוליך א גדול פי 2 מאורך מוליך ב, גם ההתנגדות של מוליך א

גדולה פי 2 מההתנגדות של מוליך ב, כלומר, $\frac{R_1}{R_2} = 2$. ההתנגדות של מוליך ב (המוליך

הקצר) היא 5Ω , ולכן ההתנגדות של מוליך א היא:

$$R_1 = 2R_2 = 2 \times 5 = 10\Omega$$

השפעת שטח החתך של המוליך על התנגדותו

נתונים כמה מוליכים העשויים מאותו חומר ושווים באורכם, אך נבדלים זה מזה בשטח החתך שלהם (איור 3-8). במקרה זה, ככל ששטח החתך גדול יותר, התנגדות המוליך קטנה יותר.

נסביר זאת: ככל ששטח החתך של מוליך גדול יותר, יש בשטח החתך שלו יותר אלקטרונים חופשיים. לכן, כאשר מחברים את המוליך למקור מתח, יותר אלקטרונים חופשיים נדחפים על ידי המקור - דרך שטח החתך - בכל יחידת זמן. במילים אחרות: הזרם במוליך גדול יותר. העובדה שהזרם במוליך גדול יותר (כשנתון כי אין שינוי במתח המקור), פירושה שהמוליך מתנגד פחות למעבר זרם דרכו. כלומר: התנגדות המוליך קטנה יותר.

לכן,

ככל ששטח החתך של המוליך גדול יותר, ההתנגדות שלו קטנה יותר.

כמו שמצאו בניסויים את הקשר בין אורך המוליך להתנגדותו, כך גם מצאו את הקשר בין שטח החתך של מוליך להתנגדותו. לשם כך חיברו למקור מתח מסוים מוליכים שונים, שנבדלו זה מזה רק בשטח החתך שלהם. מדדו את הזרם בכל מוליך, וחישבו את התנגדותו. בניסויים אלה מצאו כי **ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס הפוך לשטח החתך של המוליך**. למשל: אם מגדילים פי 2 את שטח החתך של מוליך, התנגדותו קטנה פי 2.

דוגמה 3-2

נתונים שני מוליכים העשויים מאותו חומר, והשווים באורכם. ההתנגדות של מוליך א היא 8Ω ושטח החתך שלו גדול פי 4 משטח החתך של מוליך ב.

מהי ההתנגדות של מוליך ב?

פתרון

ההתנגדות נמצאת ביחס הפוך לשטח החתך. בדוגמה שלנו, שטח החתך של מוליך א גדול פי 4 משטח החתך של מוליך ב, ולכן התנגדות מוליך א קטנה פי 4 מהתנגדות מוליך ב.

התנגדות מוליך א היא 8Ω , ולכן ההתנגדות של מוליך ב היא:

$$8\Omega \times 4 = 32\Omega$$

התנגדות סגולית – והשפעת החומר, שממנו עשוי המוליך, על התנגדותו

ראינו שההתנגדות של מוליך תלויה באורך שלו ובשטח החתך שלו. אבל לשני מוליכים בעלי אורך ושטח חתך זהים יכולה להיות התנגדות שונה, אם הם עשויים מחומרים שונים. אנו יודעים שיש תילים מוליכים העשויים ממתכות שונות. יש תילים עשויים נחושת, יש תילים מברזל, מאלומיניום ועוד.

לכל אחת מהמתכות שהזכרנו יש תכונות משלה, ויש הבדלים אחדים ביניהן. נזכיר כמה הבדלים המשפיעים על התנגדות התילים. הבדל אחד הוא במספר האלקטרונים החופשיים בסורג. הבדל אחר הוא במבנה הסורג.

אם כן, לכל מוליך יש תכונות מיוחדות משלו, ובמילים אחרות: לכל מוליך יש **סגולות** משלו. סגולות אלה אינן תלויות באורך ובשטח החתך של המוליך (ובקיצור: סגולות אלה אינן תלויות בממדי המוליך).

כתוצאה מהסגולות של המוליכים המתכתיים השונים, לכל אחד מהם יש התנגדות שונה, גם אם למוליכים יש אותו אורך ואותו שטח חתך. כדי להיווכח בכך מודדים את ההתנגדות של מוליכים, שעשויים מחומרים שונים אך שלכולם אותו אורך ואותו שטח חתך. המדידות מגלות שההתנגדויות של המוליכים אכן שונות זו מזו.

כדי להקל את המדידות וההשוואות, בוחרים מוליכים שהאורך שלהם הוא יחידת אורך אחת (למשל: מטר אחד), ושטח החתך שלהם הוא יחידת שטח אחת (למשל: מילימטר רבוע אחד). ההתנגדות, הנמדדת בתנאים אלה, נקראת **התנגדות סגולית**, והיא מסומנת באות היוונית ρ (רו). לכל חומר יש התנגדות סגולית משלו.

במדידות רבות שנעשו, התגלה כי **ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס ישר להתנגדות הסגולית של החומר שממנו עשוי המוליך**.

לאחר שהובאו הסברים על התנגדות המוליך והשפעתו על זרימת הזרם, נביא סימולציה הממחישה את המושג התנגדות סגולית.

מעבדה זו נועדה לצורך התנסות בהתנגדות התיל, כתלות במשתנה שטח החתך ובהתנגדות הסגולית של סוג התיל.

להלן קישור:

https://phet.colorado.edu/sims/html/resistance-in-a-wire/latest/resistance-in-a-wire_en.html

לפניך תצלום מסך של הסימולציה.

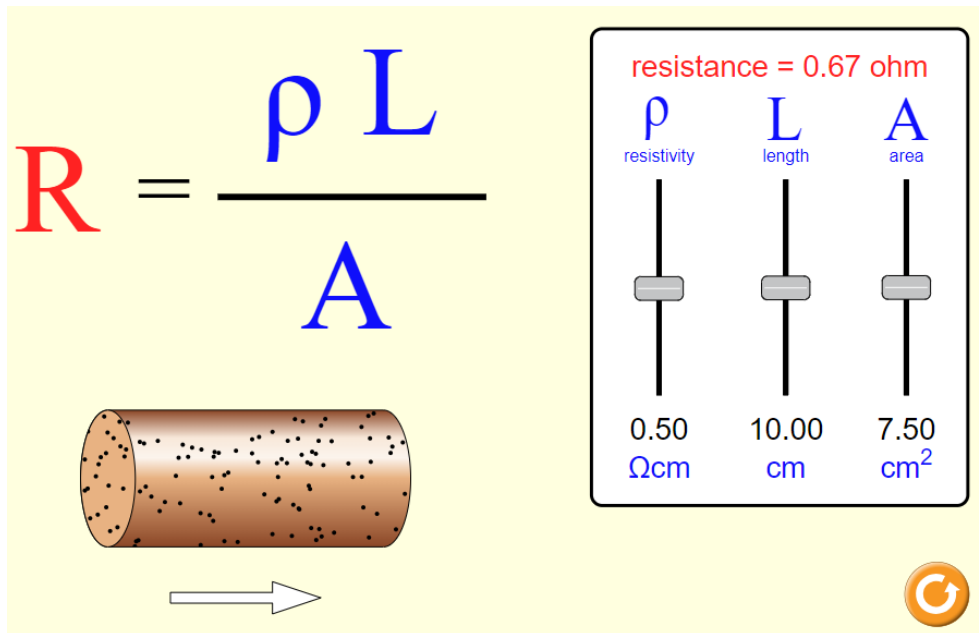
כפי שלמדנו:

R - התנגדות המוליך

L - אורך המוליך

A - שטח החתך

ρ - התנגדות סגולית



ניתן לראות בתוך המוליך נקודות שחורות, כפי שנלמד בפרק, אלו הסריגים המצויים במוליך, ככל שקיימים יותר נקודות שחורות (סריגים), כך ההסתברות שיתנגשו באלקטרונים גבוהה יותר.

הסימולציה מאפשרת לנו לשנות כל פעם משתנה אחר במשוואה, ולראות כיצד הקשר בא לידי ביטוי.

לסיכום: מצאנו כי שלוש תכונות משפיעות על גודל ההתנגדות של מוליך: אורך המוליך; שטח החתך שלו; והחומר שממנו עשוי המוליך. נכתוב בצורת משוואה את הקשר בין ההתנגדות של מוליך לבין התכונות שלו:

$$\text{התנגדות} = \frac{\text{אורך } X \text{ התנגדות סגולית}}{\text{שטח החתך}}$$

כלומר:

התנגדות המוליך נמצאת ביחס ישר להתנגדות הסגולית של החומר שממנו עשוי המוליך ולאורך המוליך, וביחס הפוך לשטח החתך של המוליך.

נסמן באותיות את הגדלים המופיעים במשוואה:

התנגדות – R

אורך – ℓ

שטח החתך – A

התנגדות סגולית – ρ

ונקבל את המשוואה:

$$(3-3) \quad R = \frac{\rho \ell}{A}$$

על פי משוואה זו נוכל למצוא את ההתנגדות הסגולית ρ של החומר שממנו עשוי מוליך, אם נדע את התנגדות המוליך R , את אורך המוליך ℓ ואת שטח החתך שלו A :

$$(3-4) \quad \rho = \frac{RA}{\ell}$$

יחידות ההתנגדות הסגולית

בשלב זה איננו יודעים עדיין מהי יחידת ההתנגדות הסגולית. אבל אנו יודעים את היחידות של שלושת הגדלים האחרים, המופיעים במשוואה (3-4) המבטאת את ההתנגדות הסגולית: האורך, שטח החתך וההתנגדות. בעזרת היחידות של הגדלים האלה, נוכל לבטא את יחידות ההתנגדות הסגולית. נדגים זאת.

נניח כי אורך מוליך נחושת הוא 400 מטרים (כלומר, $\ell=400\text{m}$) שטח החתך של המוליך הוא 8 מילימטרים רבועים (כלומר, $A = 8\text{mm}^2$), והתנגדות המוליך היא 0.9Ω (כלומר, $R=0.9\Omega$). ההתנגדות הסגולית ρ של הנחושת היא, לפי משוואה (3-4):

$$\rho = \frac{RA}{\ell} = \frac{0.9 \times 8}{400} = 0.018$$

ויחידות ההתנגדות הסגולית מתקבלות על ידי כך, שמחלקים את מכפלת היחידות שבמונה ביחידות של המכנה במשוואה $\rho = \frac{RA}{\ell}$, ומקבלים:

$$\rho = \frac{RA}{\ell} = \frac{0.9\Omega \times 8\text{mm}^2}{400\text{m}} = 0.018 \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$$

ולכן יחידת ההתנגדות הסגולית היא:

$$\frac{\Omega \times mm^2}{m}$$

כלומר:

$$\frac{\text{מילימטר רבוע} \times \text{אום}}{\text{מטר}}$$

יש יחידות נוספות של התנגדות סגולית, ובספר זה נשתמש ביחידות אלה. אם מבטאים את האורך במטרים, ואת שטח החתך של המוליך – במטרים רבועים, יחידת ההתנגדות הסגולית היא $\Omega \times cm$. הקשר בין יחידות ההתנגדות הסגולית הוא:

$$1 \frac{\Omega \times mm^2}{m} = 10^{-6} \Omega \times m = 10^{-4} \Omega \times cm$$

מצורף קישור לסרטון הממחיש מהי התנגדות סגולית:

<https://www.youtube.com/watch?v=B4tlYHAJmrQ>

כפי שלמדנו, לכל מוליך יש תכונות מיוחדות משלו, ובמילים אחרות: לכל מוליך יש **סגולות** משלו. סגולות אלה אינן תלויות באורך ובשטח החתך של המוליך (ובקיצור: סגולות אלה אינן תלויות בממדי המוליך).

דוגמה 3-4

נתון תיל טונגסטן שאורכו 6 מטרים, ושטח החתך שלו 3 מילימטרים רבועים. ההתנגדות הסגולית של טונגסטן היא $0.055 \frac{\Omega \times mm^2}{m}$. מהי ההתנגדות של תיל הטונגסטן?

פתרון

נציב במשוואת ההתנגדות את הנתונים שבדוגמה:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{0.055 \times 6}{3} = 0.11 \Omega$$

בטבלה (3-1) רשומות ההתנגדויות הסגוליות של מוליכים שונים. בהמשך נראה כי ההתנגדות - וגם ההתנגדות הסגולית - תלויות בטמפרטורה. ההתנגדויות הסגוליות, הרשומות בטבלה 3-1, נמדדו ב- $20^\circ C$.

המוליך	ההתנגדות הסגולית ביחידות $\frac{\Omega \times mm^2}{m}$	המוליך	ההתנגדות הסגולית ביחידות $\frac{\Omega \times mm^2}{m}$
אבץ	0.064	נחושת	0.018
אלומיניום	0.027	ניקל	0.078
ברזל	0.120	עופרת	0.220
זהב	0.028	פחם	35
טונגסטן	0.055	פליז	0.075
כסף	0.016	קונסטנטן	0.500
כרום-ניקל	1.000		

טבלה 3-1 התנגדויות סגוליות של מוליכים שונים

3.5 חישובי התנגדות, התנגדות סגולית,

אורך ושטח חתך

נדגים עכשיו כיצד משתמשים במשוואה $R = \frac{\rho l}{A}$, כדי לחשב את אחד מארבעת הגדלים המופיעים בה, כאשר ידועים שלושת הגדלים האחרים. כפי שראינו, ההתנגדות הסגולית נתונה, בדרך כלל, ביחידות $\frac{\Omega \times mm^2}{m}$. כדי להשתמש בצורה נכונה במשוואה $R = \frac{\rho l}{A}$, עלינו לבטא את ההתנגדות ביחידות אום (Ω), את האורך במטרים (m), ואת שטח החתך במילימטרים רבועים (mm^2). אם אחד הגדלים נתון ביחידות אחרות, יש לתרגם אותו ליחידות הדרושות. למשל: אם האורך נתון בסנטימטרים, יש לתרגם אותו למטרים; אם שטח החתך נתון בסמ"ר יש לתרגם אותו לממ"ר. נדגים זאת.

דוגמה 3-5

אורך מוליך כרום-ניקל הוא 20 סנטימטרים, ושטח החתך שלו 4 סנטימטרים רבועים. מהי התנגדות המוליך?

פתרון

אורך המוליך נתון בסנטימטרים, ואנו צריכים לתרגם זאת למטרים:

$$0.2 \text{ מ' } = 20 \text{ ס"מ}$$

שטח החתך של המוליך נתון בסמ"ר, ועלינו לתרגם זאת לממ"ר. כידוע:

$$10 \text{ מ"מ} = 1 \text{ ס"מ}$$

$$100 \text{ ממ"ר} = 10 \text{ מ"מ} \times 10 \text{ מ"מ} = 1 \text{ סמ"ר}$$

ולכן:

$$400 \text{ ממ"ר} = 4 \text{ סמ"ר}$$

ההתנגדות הסגולית של כרום-ניקל היא:

$$1 \frac{\Omega \times mm^2}{m}$$

נציב במשוואת ההתנגדות (3-3) את הגדלים הנתונים, ביחידות המתאימות, ונקבל:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{1 \times 0.2}{400} = 0.0005 \Omega$$

 שאלות חזרה

שאלה 3.5

נתונים שני מוליכים, הנבדלים רק באורך. אורך מוליך א – 20 ס"מ, ואורך מוליך ב – 70 ס"מ.

א. לאיזה משני המוליכים יש התנגדות גדולה יותר?

ב. מהו היחס בין התנגדויות המוליכים?

שאלה 3.6

שני מוליכים, האחד עבה והאחר דק, עשויים מאותו חומר, ואורכם שווה. לאיזה משני המוליכים התנגדות קטנה יותר?

שאלה 3.7

מהי ההתנגדות הסגולית של מוליך שאורכו 200 מטר, שטח החתך שלו 3 ממ"ר, והתנגדותו 5Ω ?

שאלה 3.8

באיור 3-9 נתונים ארבעה מוליכים עשויים כולם מאותו חומר.

א. סמנו את המוליך שהתנגדותו היא הקטנה ביותר.

ב. סמנו את המוליך שהתנגדותו היא הגדולה ביותר.

ג. חשבו את ההתנגדות של שני מוליכים אלה, בהנחה שהם עשויים נחושת.

שאלה 3.9

ברצוננו לחשב את האורך של תיל נחושת מגולגל. לשם כך מודדים את ההתנגדות התיל ואת שטח החתך שלו. התוצאות הן: ההתנגדות - 5Ω , שטח החתך - 20 מ"ר . מהו אורך התיל? (ההתנגדות הסגולית של הנחושת נתונה בטבלה 3-1).

שאלה 3.10

- א.** נתון תיל ברזל שאורכו 9 מטר, ושטח החתך שלו 5 מ"ר. מהי ההתנגדות של תיל הברזל?
- ב.** נתון תיל נחושת, שהתנגדותו שווה להתנגדות תיל הברזל הנתון בסעיף א. אורך תיל הנחושת 18 מטר. מהו שטח החתך של תיל הנחושת?

3.6 השפעת הטמפרטורה על ההתנגדות

עד עכשיו למדנו על שלושה גורמים, המשפיעים על ההתנגדות של מוליך: אורך המוליך; שטח החתך של המוליך; והחומר שממנו עשוי המוליך, כלומר: ההתנגדות הסגולית של המוליך. ניוכח עכשיו כי ההתנגדות מוליך תלויה גם בטמפרטורה שבה הוא נמצא. בדרך כלל, ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, מספר ההתנגשויות של האלקטרונים החופשיים ביוני הסורג - גדול יותר, ולכן ההתנגדות למעבר זרם בסורג גדולה יותר. לכן ההתנגדות למעבר זרם במוליך מתכתי - גדלה עם הטמפרטורה של המוליך. בגרף שבאיור 3-10 מתוארת בקירוב רב ההתנגדות של מוליך מתכתי, תוך תלות בטמפרטורה. אנו רואים שההתנגדות גדלה עם הטמפרטורה. בתחום רחב של טמפרטורות, הגרף הוא קו ישר. בנחושת, למשל, מתקבל קו ישר בין 100°C - לבין 500°C . בדרך כלל, מוליכים שונים נבדלים זה מזה בתלות ההתנגדות שלהם בטמפרטורה. באיור 3-11 נתון התיאור הגרפי של תלות ההתנגדות בטמפרטורה של שני מוליכים שונים. באיור 3-11 אפשר לראות, ששני הישרים נבדלים זה מזה בשיפוע שלהם. את השיפוע הישר, שמתאר את תלות ההתנגדות של מוליך בטמפרטורה, מבטאים באמצעות גודל הנקרא מקדם הטמפרטורה של המוליך. את מקדם הטמפרטורה מסמנים באות היוונית α (אלפא). מקדם הטמפרטורה נמצא ביחס ישר לשיפוע הישר - בתנאים מסוימים. דיון נוסף בנושא זה - חורג ממסגרתנו.

למקדם הטמפרטורה α יש חשיבות מעשית רבה. מוליך בעל מקדם טמפרטורה קטן שומר על התנגדות קבועה כמעט גם בשינויי טמפרטורה גדולים. לעומת זאת, במוליך בעל מקדם

טמפרטורה גדול, ההתנגדות משתנה מאוד עם שינוי הטמפרטורה. במעגלים חשמליים ואלקטרוניים רבים דרושות התנגדויות קבועות, על אף שינויי הטמפרטורה; כלומר, דרושים בהם מוליכים בעלי מקדם טמפרטורה קטן כל האפשר.

מדידים

על עיקרון זה של שינוי ההתנגדות בהתאם לטמפרטורה בונים מכשירים למדידת טמפרטורה. לצורך כך משתמשים בחומרים שידוע גרף ההתנגדות שלהם, תוך תלות בטמפרטורה. חומרים כאלה נקראים **מדידים**.

אם רוצים לדעת את הטמפרטורה של תנור לוחט, למשל, מניחים את המדיד בתנור. לאחר שהמדיד מתחמם (והטמפרטורה שלו מגיעה לטמפרטורה שבתוך התנור), מודדים את התנגדות המדיד. לפי הגרף של תלות התנגדות המדיד בטמפרטורה, אפשר לדעת את הטמפרטורה של המדיד.

באיור 3-12 מתואר גרף כזה. נניח כי אחרי הוצאת המדיד מהתנור, התנגדות המדיד היא 1.6Ω . מהגרף נסיק כי הטמפרטורה בתנור היא 500°C . בשיטה זו משתמשים למדידת טמפרטורות גבוהות, שקשה למדוד אותן בדרך רגילה, או למדידת טמפרטורות במקומות שאין גישה אליהם בזמן המדידה (למשל: סלילי מנוע בזמן פעולת המנוע).

שאלות חזרה

שאלה 3.11

- א. נתונים שני מוליכים, העשויים מאותו חומר, ונמצאים באותה טמפרטורה. האם לחומרים אלה יכולה להיות התנגדות שונה? נמקו.
- ב. האם לחומרים אלה יכולה להיות התנגדות סגולית שווה?

שאלה 3.12

דרוש מוליך מתכתי שהתנגדותו קטנה ככל האפשר. סמנו את התכונות הנדרשות ממוליך כזה ואת הטמפרטורה שבה עליו להימצא.

- התנגדות סגולית גדולה/קטנה ככל האפשר.
- אורך גדול/קטן ככל האפשר.
- שטח חתך גדול/קטן ככל האפשר.
- טמפרטורה גבוהה/נמוכה ככל האפשר.

שאלה 3.13

נתונים מוליכי טונגסטן השונים בשטח החתך שלהם. אורך כל אחד מהמוליכים הוא 5 מ'. מה צריך להיות שטח החתך של מוליך טונגסטן כזה, כדי שהתנגדותו תהיה 12Ω ?

שאלה 3.14

בטמפרטורה של 20°C , ההתנגדות של מוליך נחושת היא 3Ω . האם התנגדות המוליך ב- 30°C תהיה גדולה יותר, קטנה יותר, או ללא שינוי? נמקו.

3.7 בידוד ומבדדים

עד כה דיברנו על מוליכים מתכתיים. יש גם מוליכים לא-מתכתיים, כדוגמת הפחם, שהוא מוליך המשמש לצרכים רבים. התכונה האופיינית למוליכים היא התנגדות סגולית קטנה. אולם יש גם חומרים, שההתנגדות הסגולית שלהם גדולה. לשם השוואה: ההתנגדות הסגולית של כרום-ניקל היא $1 \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$, ואילו ההתנגדות הסגולית של הזכוכית היא $10^{22} \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$.

חומר, שהתנגדותו הסגולית גדולה מאוד, הוא חומר מבודד. זכוכית, למשל, היא חומר מבודד, כלומר: מבדד. גם חרסינה, בקליט, נציץ (מיקה), קווארץ ופרפין הם מבדדים. מאחר שלמבדדים יש התנגדות סגולית גדולה מאוד, הם מונעים למעשה מעבר זרם דרכם.

חומרים מבודדים משמשים לצרכים רבים. נתבונן, למשל, במה שקורה בבתיים. מכשירי החשמל מחוברים לשקעים באמצעות חוטי חשמל מוליכים. אילו חוטי החשמל היו חשופים, היינו נתונים לסכנת התחשמלות בכל פעם שהיינו משתמשים במכשיר חשמלי. משום כך עוטפים את חוטי החשמל בחומר פלסטי מבודד, שמונע מעבר זרם לגוף האדם.

עוד שימוש במבדדים נעשה כדי למנוע בזבז בחשמל. מאחר שהמבדדים אינם מעבירים זרם, משתמשים בהם כדי למנוע מן הזרם החשמלי להגיע למקומות לא רצויים.

כאשר בוחרים מבדד שישמש לציפוי חוט מוליך - או לבידוד בצידוד חשמלי מסוים - יש לבדוק את תכונות המבדד ואת התנאים שבהם יפעל הצידוד החשמלי. לדוגמה, יש לבדוק את התנאים האלה:

- תחום הטמפרטורות שבו צריך הצידוד לפעול;
- תחומי הלחות המומלצים לפעולת הצידוד;
- דרישות בטיחות מהצידוד.

נביא כאן כמה דוגמאות לשימוש במבדדים, ונתאר בקצרה את תכונות המבדדים השונים.

- חוטי החשמל בבתים מצופים בחומר שנקרא פי.וי.סי. (P.V.C). ה-PVC הוא חומר פלסטי שאינו סופג רטיבות. בגלל תכונותיו, משמש ה-PVC גם לבידוד כבלים תת-קרקעיים. החיסרון של ה-PVC הוא שנגרם לו נזק כשהוא גלוי לקרני השמש. לעומת זאת, לציפוי נחושת – משתמשים באמייל, כי זהו חומר חזק ונפוץ קטן.
- במתקני חשמל שונים משתמשים לצורך בידוד בחומרים הפלסטיים פוליאיתילן וטפולן. הפוליאיתילן חזק פחות מ-PVC, אך עמיד יותר בפני חומצות. הטפולן משמש כבידוד בטמפרטורות גבוהות ובזרמים קטנים (באלקטרוניקה, למשל).

יש מבדדים שנהפכים למוליכים טובים בטמפרטורות גבוהות. ברור כי יש להתחשב בתכונה זו של המבדדים, כשרוצים להשתמש בהם. לדוגמה, חלק ממכונות החשמל פועלות בטמפרטורות גבוהות, ויש לבחור עבורן במבדדים שהתנגדות הסגולית שלהם קטנה רק במעט כאשר הטמפרטורה עולה.

לאחר שלמדנו את התכונות המיוחדות את המוליך ותורמות לפעילותו במעגל החשמלי ואת תכונות המבודדים, נוכל לראות סרטון הממחיש זאת ובנוסף לתרגל את הנושא.

לפניך סרטון הממחיש את תכונות המבודדים והמוליכים. לאחר הצפייה ענו על השאלות.

<https://www.youtube.com/watch?v=QZPURSF5iH4>

שאלות 

1. המושג סריג או סורג משמעו

א. האופן בו האלקטרונים סגורים במוליך

ב. צורת הסידור של האטומים במבודדים

ג. שכבות שכבות של אטומים במוליכים, ובכל שכבה יש אטומים המסודרים בצורה מסוימת וקבועה

2. כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך סורג לא-מושלם

א. הם מתנגשים ביונים, כיוון תנועתם משתנה, ומהירותם קטנה

ב. הם מתנגשים ביונים, כיוון תנועתם משתנה, ומהירותם גדלה

ג. הם מתנגשים ביונים, כיוון תנועתם אינו משתנה, ומהירותם קטנה

3. כאשר מחברים מוליכים שונים למקור מתח נתון, רואים כי

- א. רואים כי ככל שהתנגדות המוליך גדולה יותר, הזרם במוליך קטן יותר
 - ב. רואים כי ככל שהתנגדות המוליך גדולה יותר, הזרם במוליך גדול
 - ג. רואים כי ככל שהתנגדות המוליך קטנה יותר, הזרם במוליך קטן יותר,
4. שלוש התכונות העיקריות, הקובעות את ההתנגדות של מוליך, הן:
- א. אורך, שטח, טמפרטורה של המוליך
 - ב. אורך, שטח וחומר המוליך
 - ג. מצב צבירה, גודל, ואורך
5. ככל שהמוליך ארוך יותר כך
- א. התנגדותו קטנה
 - ב. התנגדותו גדלה
 - ג. אין קשר בין התנגדות המוליך לאורכו
6. התנגדות סגולית תלויה
- א. בסוג החומר
 - ב. בשטח החתך של המוליך
 - ג. באורך המוליך ובהתנגדותו
7. למוליכים יש התנגדות סגולית גבוה
- א. נכון
 - ב. לא נכון
 - ג. תלוי בסוג המוליך
8. ככל שהזרם קטן כך
- א. ההתנגדות גדלה
 - ב. ההתנגדות קטנה
 - ג. המוליך בעל התנגדות סגולית גבוהה
9. למבודדים קיימת התנגדות סגולית גבוהה
- א. נכון
 - ב. לא נכון
 - ג. תלוי בסוג המבודד

סיכום פרק 3

- ההתנגדות R של מוליך היא היחס בין המתח U על המוליך – לבין הזרם I במוליך: $R = \frac{U}{I}$.
- יחידת ההתנגדות היא אום (Ω). למוליך יש התנגדות של אום אחד, אם מתח וולט אחד בין קצותיו גורם לכך שזרם של אמפר אחד יזרום דרך המוליך.
- ההתנגדות R נתונה על ידי $R = \frac{\rho l}{A}$ (ρ - אורך המוליך; A - שטח החתך של המוליך; ρ - ההתנגדות הסגולית של המוליך). יש להקפיד על היחידות השונות, כדי לקבל את ההתנגדות ביחידות הנכונות.
- למוליכים יש התנגדות סגולית קטנה. התנגדות מוליך גדלה בדרך כלל עם הטמפרטורה. המבודד (או המבודד) הוא חומר בעל התנגדות סגולית גדולה. יש מבדדים שנהפכים למוליכים טובים בטמפרטורות גבוהות. המדידים הם חומרים, שידוע גרף ההתנגדות שלהם בתלות בטמפרטורה. משתמשים במדידים לבניית מכשירים למדידת טמפרטורה.

4. המעגל החשמלי

צרכן (עומס)

ראינו שכאשר מחברים מוליך בין האלקטרודות של מקור מתח, נוצר במוליך זרם. הזרם זורם במוליך, כל זמן שיש הפרש פוטנציאלים בין האלקטרודות. אבל אם נחתוך את המוליך, כפי שמתואר באיור 4-1, הזרם ייפסק, אף שעדיין יש הפרש פוטנציאלים בין האלקטרודות של מקור המתח. אם לא נציין אחרת, כאשר נכתוב "מקור", נתכוון ל"מקור מתח".

נציין כאן כי כשעוסקים במקור מתח ובחיבור מוליך לאלקטרודות של המקור, מתייחסים בדרך כלל להדקים ולא לאלקטרודות ואף אנו נעשה כך לעתים קרובות. ההדקים מתוארים באיור 4-1. כאמור, תא חשמלי הוא דוגמה למקור. האלקטרודות בתא החשמלי שקועות בתוך תמיסה, ונהוג לומר כי התמיסה נמצאת בין ההדקים.

אשר המוליך שלם, האלקטרונים החופשיים במוליך נעים מההדק השלילי של מקור המתח לעבר ההדק החיובי שלו. כאשר המוליך נחתך, האלקטרונים נעים – בהשפעת הכוח החשמלי הפועל עליהם – לנקודת הנתק B של המוליך, ומצטברים שם. תהליך זה נמשך חלקיק שנייה, ומסתיים כאשר הפוטנציאל בנקודת הנתק B – שווה לפוטנציאל של ההדק השלילי של מקור המתח.

התהליך מסתיים כי מטענים נעים בכיוון מסוים רק כאשר יש הפרש פוטנציאלים. ברגע שנוצר שוויון פוטנציאלים, תנועת האלקטרונים נפסקת, כלומר הזרם נפסק. הסיבה להצטברות המטענים ולהפסקת הזרם היא, שהאלקטרונים החופשיים אינם יכולים "לקפוץ" בדרך כלל מהמוליך החוצה. לכן הם מצטברים בנקודת הנתק B.

כדי שיהיה זרם במוליך, יש לסגור את הקטע המנותק בין A ל-B על ידי "משהו", שבו יוכלו האלקטרונים להמשיך ולנוע אל ההדק החיובי. כלומר, יש לדאוג לכך שלאלקטרונים יהיה מסלול סגור לנוע בו מההדק השלילי להדק החיובי.

ה"משהו", שיסגור את הקטע החתוך בין הנקודות A ו-B, יכול להיות קטע של תיל מוליך, אבל בדרך כלל זהו מכשיר חשמלי שמנצל את הזרם החשמלי למטרות מועילות.¹ מכשיר כזה נקרא **צרכן** או **עומס**. דוגמאות לצרכנים: מגהץ, תנור בישול, נורה חשמלית. דוגמאות נוספות מתוארות באיורים 4-2, 4-3, ו-4-4. במכשירים אלה יש חלק שההתנגדות החשמלית

¹ בדרך כלל, כאשר מנצלים זרם חשמלי למטרות מועילות, משתמשים במקור מתח שאינו תא חשמלי. אבל כרגע אין חשיבות לתיאור המדויק של מקור המתח, ואנו מייצגים אותו על ידי תא חשמלי. בהמשך נלמד על מקור מתח מסוג אחר.

שלו גדולה יחסית להתנגדות של תיל מוליך, ולכן חלק זה נקרא לפעמים **נגד**. לעתים קרובות, כאשר אין צורך בתיאור מפורט של הצרכן, מייצגים אותו על ידי נגד. כאשר זרם עובר בנגד, יש התנגשויות בין האלקטרונים לבין היונים בחומר שממנו עשוי הנגד. כתוצאה מכך הנגד מתחמם. לכן נגדים משמשים לפעמים כגופי חימום.

4.1 מעגל חשמלי

כבר אמרנו שכדי שיזרום זרם בתיל מוליך ובצרכן המחוברים למקור מתח, יש לדאוג לקיומו של מסלול סגור שבו יוכלו האלקטרונים לנוע. בהתאם לכך, נגדיר מושג חדש:

הגדרה

מסלול סגור הכולל מקור מתח וצרכן, שכיוון הזרם המוסכם בו הוא מההדק החיובי של מקור המתח אל ההדק השלילי, דרך הצרכן, נקרא **מעגל חשמלי סגור**, ובקיצור: **מעגל חשמלי**.

דוגמה למעגל חשמלי סגור אפשר לראות באיור 4-5.

להלן קישור לסרטון המציג את עקרון הפעלת המעגל החשמלי:

<https://www.youtube.com/watch?v=VnnpLaKsqGU>

בדרך כלל איננו רוצים שהצרכן יפעל כל הזמן, אלא רק שנוכל לחבר או לנתק את הצרכן לפי הצורך. לשם כך מחברים במעגל מתג (או מפסק). מעגל חשמלי שנסגר בעזרת מתג מתואר באיור 4-6.

באיור 4-7 מתואר מתג פשוט, בשני מצבים: כאשר הוא סגור, וכאשר הוא פתוח.

המתג פועל כך:

החלקים 1 ו-2 קבועים במקומם. הם עשויים ממתכת, ואליהם מחברים את קצות התיל המוליך. לחלק 1 מחוברת ידית שדומה לסכין, ועשויה גם היא ממתכת. קצה הידית מכוסה בחומר מבודד. חלק 2 עשוי משתי לוחיות מתכת קרובות זו לזו. כאשר מורידים את הידית, היא נכנסת בין הלוחיות, ויוצרת איתן מגע הדוק. במצב זה, המתג סגור. כאשר מרימים את הידית, נוצר רווח בינה לבין לוחיות המתכת. במצב זה המתג פתוח.

כאשר המתג פתוח, אין מסלול סגור לאלקטרונים, ולכן לא זורם זרם במעגל. המעגל נקרא אז **מעגל חשמלי פתוח**. כאשר המתג סגור, המעגל סגור, זורם בו זרם, והצרכן יכול לפעול. באיור 4-8 אפשר לראות מתג מעשי.

מתגים חשמליים

המתגים הם רכיבים שימושיים במעגל החשמלי. היום מצויים בשוק מתגים מסוגים רבים מאוד. נכיר כאן שני מתגים שאנו משתמשים בהם מדי יום בבית: מתג החשמל שבעזרתו מדליקים ומכבים את האור, ומתג לחצן המפעיל את הפעמון שבכניסה לבית.

מתג הדלקה וכיבוי אור

באיור 4-9 רואים מתג טיפוס הממשש להדלקה ולכיבוי אור.

באיור 4-10 נתון המתג – לאחר שהוסר חלק ממנו. כך נוכל ללמוד את המבנה העקרוני ואופן הפעולה של מתג זה.

למתג שלוש לוחיות: שתי לוחיות מתכת קבועות שאליהן מחברים את קצות המוליך, ולוחית נוספת, גם היא ממתכת, שאפשר להזיז אותה. אל הלוחית השלישית מחובר כפתור הפעלה קפיצי, העשוי מחומר מבודד, ובעזרתו אפשר להזיז את הלוחית. כאשר הלוחית השלישית נוגעת בשתי הלוחיות האחרות, המתג סגור. כאשר מזיזים את הלוחית, נשאר מרווח, ואז המתג פתוח.

מתג לחצן

המתג בפעמון הדלת הוא מתג לחצן. כאשר לוחצים על הכפתור, נוצר מגע בין לוחית המתכת שמחוברת לכפתור לבין לוחית המתכת שמתחתיה. המתג נסגר והפעמון מצלצל. כאשר עוזבים את הכפתור, הוא חוזר למקומו הקודם - בגלל הקפיץ המחובר אליו. המתג נפתח, והפעמון מפסיק לצלצל.

למתג תפקיד חשוב במעגליים חשמליים. כאשר המתג פתוח, אין מסלול סגור לאלקטרונים, ולכן לא זורם זרם במעגל, והמעגל נקרא אז **מעגל חשמלי פתוח**. כאשר המתג סגור, המעגל סגור, זורם בו זרם, והצרכן יכול לפעול.

בסרטון הבא, נוכל לראות את תפקידו של המתג במעגל החשמלי.

<https://www.youtube.com/watch?v=m4jzggZu-4s>

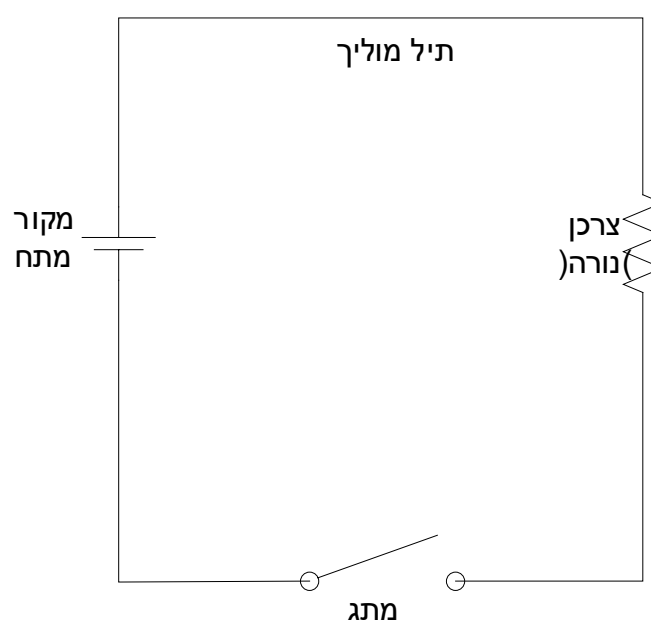
עד כה כבר הכרנו את החלקים העיקריים של המעגל החשמלי: מקור מתח, תיל מוליך, צרכן, מתג. כאשר עוסקים במעגלים חשמליים, נוהגים לשרטט אותם, ולשם כך משתמשים

בסמלים מקובלים. בטבלה 4-1 מופיעים הרכיבים במעגל החשמלי, תפקידיהם, והסמלים המקובלים שלהם.

החלק	תפקידו במעגל	סימולו	הערות
מקור מתח	מספק מתח (ואנרגיה) למעגל		סמל זה מייצג מקור מתח קבוע בזמן. הקו הארוך מסמן את ההדק בעל הפוטנציאל הגבוה יותר. מסומן גם בצורה זו:
צרכן (נגד)	מנצל את הזרם, שנוצר על ידי מקור המתח, לשימושים שונים, כגון: חימום, תאורה וכו'.		
תיל מוליך	מחבר בין חלקים במעגל ליצירת מעגל סגור.		התיל המוליך נקרא גם קו.
מתג	סוגר או פותח את המעגל.		

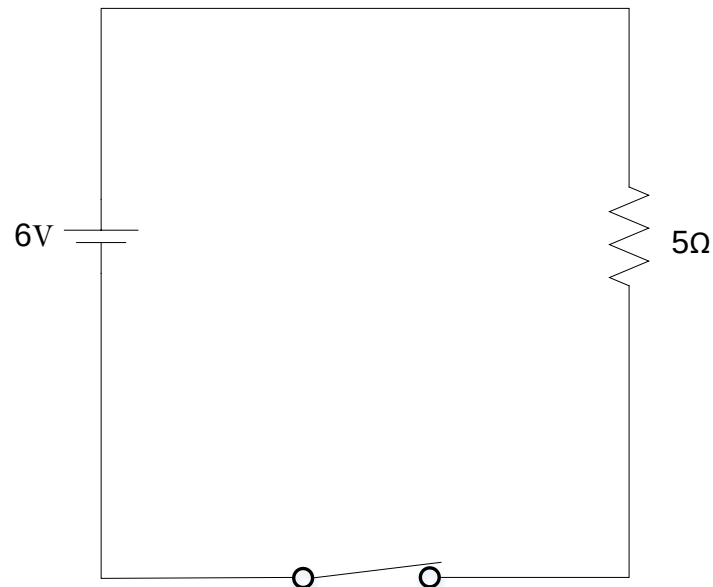
טבלה 4-1 רכיבים במעגל החשמלי וסמליהם

נביא עתה שוב את המעגל הפשוט שהכרנו קודם, ולצדו תרשים המעגל שרכיביו השונים מיוצגים על ידי סמליהם המקובלים. במקרה הזה הצרכן הוא נורה, והוא מיוצג בתרשים באמצעות נגד.



תרשים המעגל
איור 4-12

מקובל לרשום ליד כל חלק במעגל החשמלי את ערכו. ליד מקור המתח רושמים את מתח המקור, וליד הנגד רושמים את ערך ההתנגדות שלו, באופן הבא:

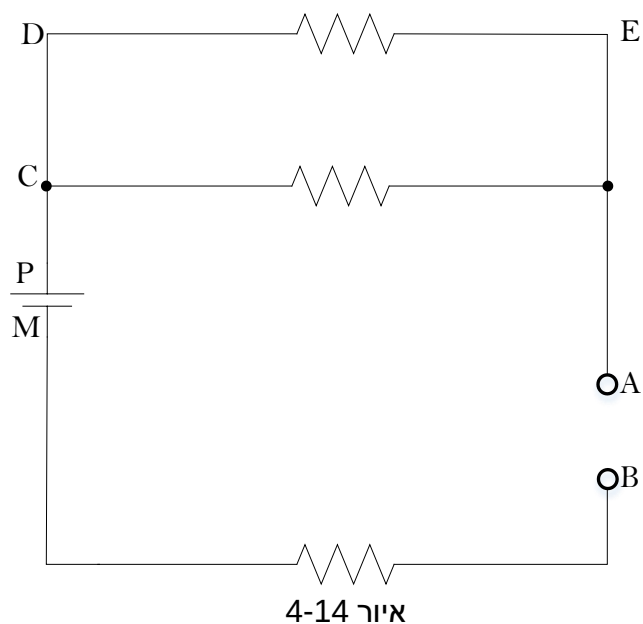


איור 4-13

במעגל חשמלי יכולים להיות כמה מקורות מתח וגם כמה צרכנים. בהמשך נכיר מעגלים כאלה. כעת נעסוק במעגלים פשוטים בלבד.

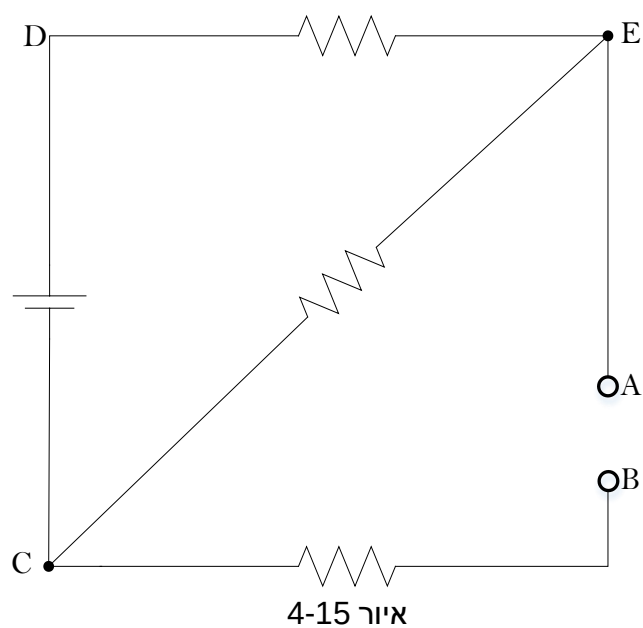
שאלה 4.1

האם המעגל שבאיור 4-14 הוא מעגל סגור?



שאלה 4.2

התבוננו באיור 4-15. האם המעגל EDCE הוא מעגל סגור?



4.2 סוגי נגדים

כאשר מזרימים זרם חשמלי באמצעות מקור מתח, משתמשים בתילים מוליכים שהתנגדותם קטנה ככל האפשר. אבל לפעמים רוצים ליצור בכוונה התנגדות לזרם החשמלי, כדי להקטין את הזרם או כדי ליצור חום, או לצרכים אחרים. לשם כך משתמשים בנגדים. הנגדים מיוצרים בצורות שונות, ובערכי התנגדות רבים. באיור 4-16 נתונים סוגים שונים של נגדים.

מבנה נגדים

הנגדים מתחלקים לשלושה סוגים עיקריים על פי המבנה שלהם.

א. נגדי שכבה

נגד שכבה (איור 4-17) בנוי מגליל עשוי קרמיקה מצופה בשכבה מתכתית דקה או בשכבת פחם דקה.

ב. נגדי פחם

נגד פחם (איור 4-18) עשוי מגוש חומר שהוא בעיקר פחם (בעל התנגדות גדולה למדי), או מגליל של חומר מבודד (למשל: חרסינה, זכוכית, קרמיקה) מצופה פחם. השימוש בנגדי פחם הולך ופוחת.

ג. נגדים מלופפים

נגד מלופף (איור 4-19) עשוי מתיל מתכת דק, בעל התנגדות סגולית גדולה למדי. התיל מלופף על גבי גליל של חרסינה, או של חומר מבודד אחר. (מלפפים את התיל לצורת סליל, כדי שיתפוס מקום מועט למרות אורכו)

תכונות נגדים

התכונה החשובה ביותר של הנגד היא כמובן ערך ההתנגדות שלו. אבל יש לו עוד שתי תכונות חשובות אחרות:

א. מידת ההתחממות המרבית שהנגד יכול לשאת בלי להינזק. תכונה זו תלויה ביכולתו של הנגד לפזר את החום המתפתח בו, כתוצאה מהזרם שזורם בו. תכונה זו תלויה בעיקר בצורתו של הנגד: ככל ששטח הפנים של הנגד גדול יותר, כך פיזור החום לסביבה טוב יותר.

ב. תלות ההתנגדות בטמפרטורה תכונה זו תלויה בתכונות החומר שממנו עשוי הנגד.

היצרנים נוהגים לרשום על הנגד - לא רק את ערך ההתנגדות שלו, אלא גם את אחוז השגיאה שבו נתון ערך ההתנגדות. אחוז השגיאה של ההתנגדות נקרא **סיבולת**. לדוגמה,

אם נתון כי הסיבולת היא 10%, פירוש הדבר שהתנגדות הנגד יכולה להיות גדולה מהערך הרשום ב-10% לכל היותר, או קטנה מהערך הרשום ב-10% לכל היותר.

דוגמה 4-1

נתון נגד שרשום עליו 10 kΩ, והסיבולת היא 5%. מה תהיה ההתנגדות הקטנה ביותר והגדולה ביותר של הנגד?

פתרון

התנגדות הנגד יכולה להיות קטנה ב-5% לכל היותר מהערך הרשום עליו. לכן ההתנגדות הקטנה ביותר תהיה:

$$\frac{10 \times 95}{100} = 9.5k\Omega$$

התנגדות הנגד יכולה להיות גדולה ב-5% לכל היותר מהערך הרשום עליו. לכן ההתנגדות הגדולה ביותר תהיה:

$$\frac{10 \times 105}{100} = 10.5k\Omega$$

שאלות חזרה 

שאלה 4.3

מה תהיה ההתנגדות הגדולה ביותר והקטנה ביותר של נגד, שרשום עליו 4.7 kΩ, 5%? (רישום זה פירושו שסיבולת הנגד היא 5%).

שאלה 4.4

מה תהיה ההתנגדות הגדולה ביותר וההתנגדות הקטנה ביותר של נגד שרשום עליו 1.2 kΩ, 10%?

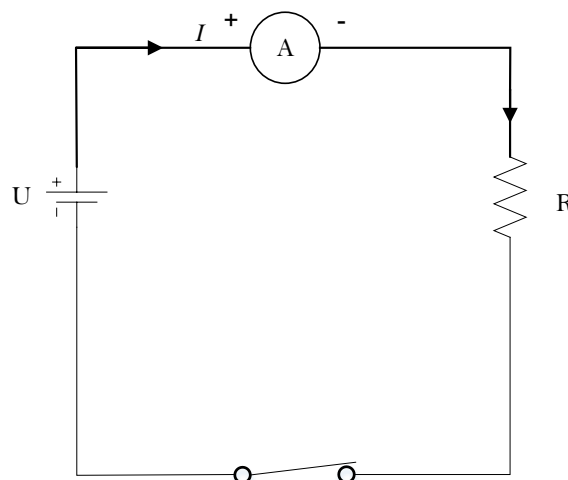
4.3 מדידות זרם ומתח במעגל חשמלי

כאשר רוצים למדוד את הזרם שעובר במעגל חשמלי, או את המתח שבין שתי נקודות במעגל, יש לחבר למעגל מכשירי מדידה.

מד-זרם

מד-זרם הוא מכשיר המשמש למדידת זרמים. את עוצמת הזרם שעובר במד-זרם קוראים באמצעות מחוג, הנמצא על לוח שנתות (איור 4-20), או באמצעות מספר המופיע על לוח תצוגה. למד-זרם יש שני הדקים: הדק חיובי ("+"), והדק שלילי ("-"). מחברים את מד-הזרם למעגל כך שהזרם המוסכם יעבור מן ההדק החיובי שלו – אל ההדק השלילי, כמתואר באיור 4-20.

באיור 4-21 רואים מעגל שמחובר לו מד-זרם. הזרם שמבקשים למדוד עובר דרך מד-הזרם, מההדק החיובי אל ההדק השלילי. הזרם מסומן באות I , והכיוון שלו מסומן בעזרת חץ.



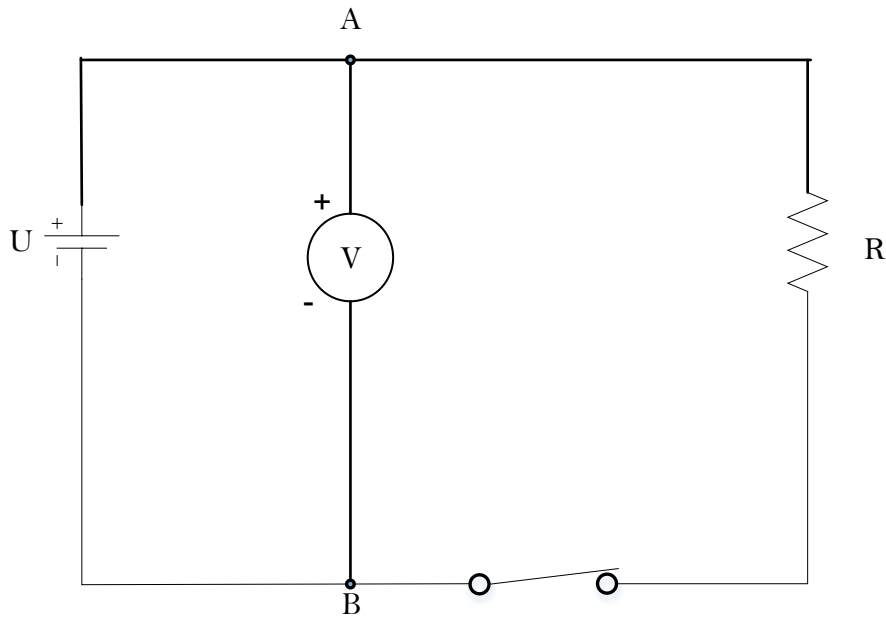
איור 4-21 מדידת זרם במעגל חשמלי

מד-מתח

מד-מתח הוא מכשיר המשמש למדידת המתח (הפרש הפוטנציאלים) בין שתי נקודות במעגל חשמלי. גם במד-מתח קוראים את גודל המתח בעזרת מחוג (איור 4-22) או בעזרת מספר על לוח תצוגה. גם למד-מתח יש שני הדקים: הדק חיובי ("+"), והדק שלילי ("-").

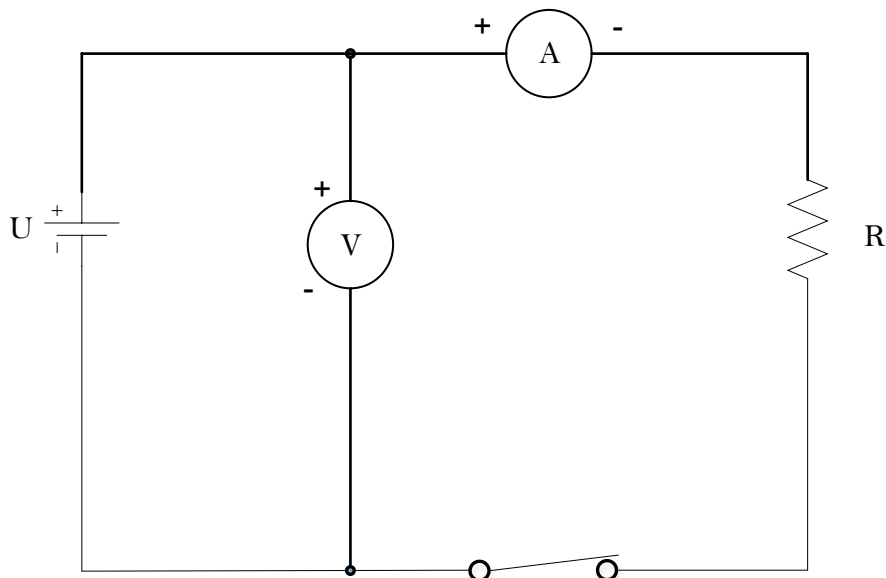
כאשר רוצים למדוד מתח בין שתי נקודות במעגל מחברים את ההדק החיובי לנקודה שבה הפוטנציאל גבוה יותר, ואת ההדק השלילי לנקודה שבה הפוטנציאל נמוך יותר. הסימון המקובל של מד-המתח הוא ____ . מד-מתח מעשי מתואר באיור 4-22.

באיור 4-23 רואים מעגל שמחובר לו מד-מתח. במעגל זה רוצים למדוד את המתח בין הנקודות A ו-B. בנקודה A הפוטנציאל גבוה יותר, לכן מחברים אליה את ההדק החיובי של מד-המתח. בנקודה B הפוטנציאל נמוך יותר, לכן מחברים אליה את ההדק השלילי של מד-המתח.



איור 2-23 מדידת מתח במעגל חשמלי

באיור 4-24 רואים מעגל שבו מודדים – באותו זמן – גם את הזרם וגם את המתח.



איור 2-24 מדידת מתח וזרם במעגל חשמלי

נעיר כי יש מכשירי מדידה שבאמצעותם אפשר למדוד גם זרם וגם מתח. מכשיר מדידה כזה נקרא רב-מודד. דוגמה למכשיר כזה אפשר לראות באיור 4-25. בשנים האחרונות

משתמשים יותר ויותר ברב-מודד ספרתי, שתוצאת המדידה שלו מיוצגת במספר על לוח תצוגה. דוגמה לרב-מודד ספרתי נתונה באיור 4-26.

סימולציה

יש להיכנס לקישורים הבאים לביצוע הסימולציה:

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab_en.html

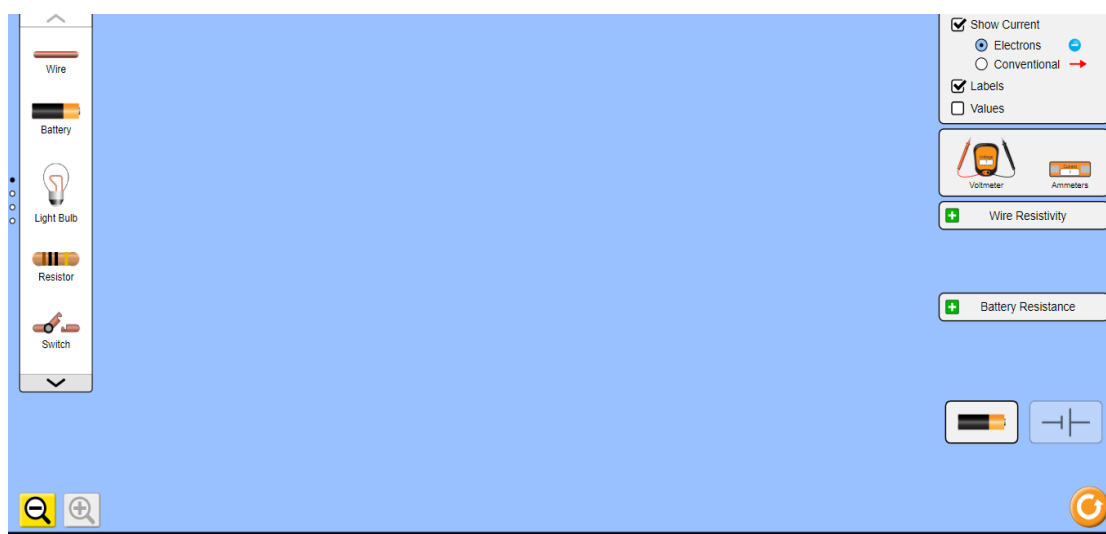
מטרת הסימולציה:

בניסוי זה, נוכל להתנסות בבניית מעגל חשמלי מלא, הכולל, צרכנים, נגדים, מוליכים, מתגים ומקור מתח.

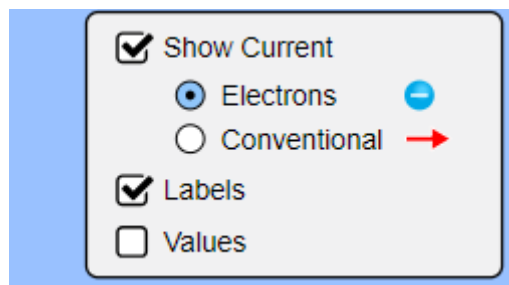
בנוסף, קיימים אמצעי מדידה, מתח וזרם, אשר אותם נוכל לצרף למעגל ולמדוד בעזרתם את הערכים המתקבלים בנקודות שונות.

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

לפניהם מסך ראשוני לסימולציה:

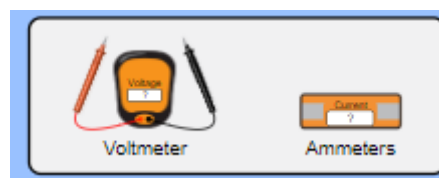


להלן המקרא:



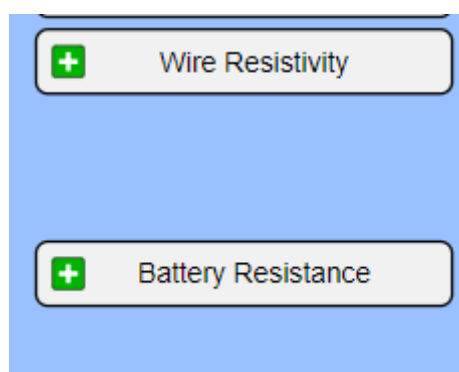
- הצגת הזרם- *Show Current*
- מאשר לנו לבחור האם להציג את תנועת האלקטרונים- *Electrons*
- הצגה בצורת חץ- *Conventional*
- הצגת שמות הרכיבים המוצגים- *Labels*
- הצגת הערכים- *Values*

הצגת מקרא מכשירי המדידה



- מד מתח- *Voltmeter*
- מד זרם- *Ammeters*

על המסך נוכל לראות גם את האפשרויות הבאות:



- הוספת התנגדות תיל בסרגל רץ- *Wire Resistivity*
- הוספת התנגדות מקור המתח- *Battery Resistance*

מצד שמאל במסך הסימולציה, קיים החלון הבא:



בחלון זה נוכל לבחור הוספת פריטים למעגל, תיל (Wire), מקור מתח (Battery), צרכן נורה (Light Bulb), מתג (Switch) ואם נגלל מטה נמצא רכיבים נוספים עליהם נלמד בהמשך.

מספר הוראות הפעלה:

- כדי להוסיף משורת התפריט יש לגרור לרכז המסך את הרכיב הרצוי. לחיצה כפולה עליו נציג בתחתית המסך סימן של אשפה, אשר יאפשר לנו למחוק את הפריט במידת הצורך.
- כאשר נחבר מד מתח עלינו לראות כי חיבור הקוטביות נכונה.

שאלות הניסוי

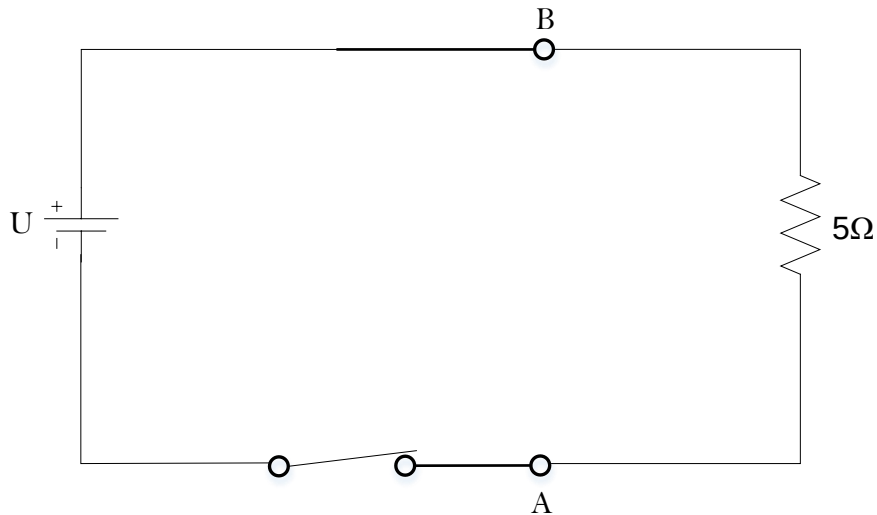
1. בנה מעגל (טורי) המורכב מנגד, מקור מתח, תיל ומתג. ראה כי קיימת תנועת מטענים.
2. לחץ על האפשרות להצגת ערכים ומדוד על פי נוסחת חוק אום את המתח המתקבל.
3. כעת, יש לקחת את מכשיר המדידה ולבצע מדידה אלקטרונית, האם קיים זהות בין התשובות?
4. שנה את התנגדות התיל במעגל, כיצד שינוי זה השפיע על התוצאות במעגל?
5. כעת, פתח את המתג, מה קורה במעגל? ומדוע?

פעילות בנושא הספק החשמלי:

1. בצע חישוב על פי הנתונים במעגל של ההספק הכולל הנצרך במעגל
2. כעת שנה את התנגדות הנגד וראה כיצד זה השפיע על ההספק במעגל?
3. הראה כי שינוי בסוללת המעגל, גורם לשינוי בהספק הכולל.

שאלה 4.5

במעגל שבאיור 4-27 רוצים למדוד את המתח בין הנקודות A ו-B. הוסיפו למעגל מד-מתח לצורך המדידה, וסמנו את מקום ההדק החיובי ומקום ההדק השלילי של מד-המתח.



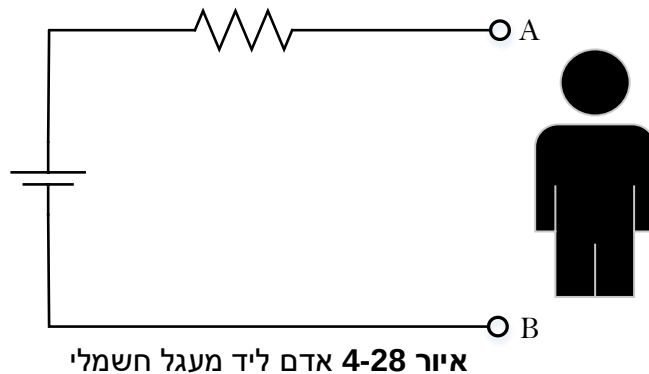
איור 4-27

שאלה 4.6

נמדוד את הזרם בנגד R שבאיור 4-27. הוסיפו למעגל מד-זרם וסמנו את מקום ההדק החיובי ואת מקום ההדק השלילי של מד-הזרם.

4.4 הסכנות הכרוכות בזרם חשמלי

ראינו שבמקרים מסוימים גוף האדם יכול להוליך חשמל. גוף האדם אינו מוליך טוב. התנגדותו הסגולית גדולה בהרבה מההתנגדות הסגולית של מוליך טוב כמו נחושת; ובכל זאת, זרם חשמלי יכול לעבור דרך גוף האדם. כאשר הזרם העובר דרך גוף האדם גדול מדי, הדבר עלול להיות מסוכן מאוד. זרם גדול מ-30mA נחשב מסוכן, ועלול לגרום נזקים גדולים לגוף האדם.



כאשר זרם חשמלי כזה עובר דרך גוף האדם, אומרים שהאדם התחשמל, או שקיבל מכת חשמל. כיצד אדם מתחשמל? הדבר קורה כאשר האדם נהפך לחלק ממעגל חשמלי סגור. לדוגמה, כאשר אדם נוגע בשני קצוות של מוליך המחובר למקור מתח; או כאשר הוא נוגע בכבל חשמלי קרוע. (גם אז האדם עלול להיות חלק ממעגל חשמלי הכולל את האדמה, שאף היא מוליך). במקרה זה גוף האדם סוגר את המעגל, והזרם שזורם במעגל הסגור עובר דרך גוף האדם.

ההתנגדות של גוף האדם היא בין $1\text{ k}\Omega$ לבין $100\text{ k}\Omega$. הערך המדויק תלוי בכמה דברים, וביניהם מידת הלחות של העור. כשהעור לח, התנגדות הגוף קטנה בהרבה מאשר כשהעור יבש. משום כך אסור בשום אופן לגעת במכשירים חשמליים בידיים רטובות, כי אז סכנת ההתחשמלות גדולה הרבה יותר.

תחילה יש להיכנס לקישור הבא:

https://phet.colorado.edu/sims/html/john-travoltage/latest/john-travoltage_en.html

הערה: את הסימולציה ניתן לבצע בשפה העברית והערבית על ידי האפשרות *Translation*

מטרת הסימולציה:

להכיר ולהתנסות בהולכה של גוף המוטען (על ידי שפשוף) באלקטרונים.
כמו כן, ניתן לראות את הקשר בין הפרק הראשון הנלמד בנושא מטענים, לפרק השני בנושא מתח וזרמים והפרק השלישי בנושא התנגדות.
כחלק מהתנסות הסימולציה ניתן לראות כיצד משפיע גודל המטען, המרחק האווירי, על היווצרות הזרם החשמלי.

הערה: לצורך התנסות וההדמיה, הזמן טעינה בסימולציה קצר מהזמן במציאות.

מהלך הסימולציה:

יש להטעין את רגלו של ג'ון במטענים על ידי השפשוף בשטיח. ולאחר מכן להניע את ידו לעבר הדלת.

שאלות לדיון:

1. האם אפשר לחזות מה יקרה לג'ון כאשר גופו יהיה טעון במטענים השלילים?
2. מהי התופעה החשמלית אשר גורמת לג'ון להתחשמל?
3. ממה מושפעת עצמת הזרם?



מכת חשמל	
מה עליכם לעשות? נתקו את המגע בין גורם ההתחשמלות לבין הנפגע * עדיף לנתק את מקור הזרם * אם לא ניתן לעשות זאת, הרחיקו את הגורם המחשמל בעזרת עצם לא-מוליך (מקל עץ יבש, מוט עם ידית פלסטיק וכדומה) כבו והסירו בגדים בוערים התחילו בהחייאה א. פתחו דרכי אוויר. ב. ודאו נשימה ודופק. ג. אם נדרש, בצעו החייאה – הנשמה עם או בלי עיסוי. טפלו בפצעי הכוויה כסו את הכוויה בתחבושת סטרילית או בפיסת בד נקי. קבעו שברים בגפיים ובצוואר. פנו בדחיפות לבית חולים נפגעים שספגו מכת חשמל יש לפנות תמיד לבית חולים, גם אם לא איבדו את ההכרה ונראה כאילו הם סובלים מפגיעה קלה בלבד: למכת חשמל עלולים להיות סיבוכים מאוחרים. שימו לב! * במקרים רבים שטח הכוויה החיצונית על פני העור הוא קטן יחסית ועלול להטעות את המטפלים, בעוד שלמעשה נגרם הרס נרחב של הרקמות שמתחת לעור, במסלול שבו עבר הזרם. * מכת חשמל, במיוחד ממתח גבוה, עלולה לגרום לשברים ופריקות של עצמות, לרבות חוליות עמוד השדרה. הפגיעה נגרמת עקב כיווץ עוויתי של השרירים בעת מעבר הזרם בגוף, או כתוצאה מנפילה מגובה עקב ההתחשמלות. נפגעים כאלה עלולים לסבול משברים בגולגולת ובעמוד השדרה הצווארי, ולפיכך יש לקבע את צווארו בהקדם האפשרי.	מכת חשמל עלולה להיגרם עקב מגע עם מקור מתח גבוה ברחוב, במפעל או בבית. הזרם גורם לפצעי כוויה קשים בנקודה שבה הוא נכנס לגוף, ובנקודה שבה הוא יוצא ממנו. תוך כדי מהלכו בגוף, בין נקודת הכניסה ליציאה, גורם הזרם נזק לרקמות שונות: עור, שרירים, עצבים וכלי דם. זרם ממקור מתח גבוה עלול לגרום לאיבוד הנשימה, הדופק וההכרה, ולהתמוטטות עד למצב של מוות קליני. איבחון: סימנים ותלונות נסיבות הפגיעה ברוב המקרים יצביעו נסיבות הפגיעה בבירור שמדובר בתאונה התחשמלות. פצעי כניסה ויציאה פצעי כוויה מפוחמים ויפיעו בעור, במקומות שבהם הזרם נכנס לגוף ויוצא ממנו. כך לדוגמה: בהתאם לצורת ההתחשמלות - עלול להופיע פצע ביד וברגל, או פצעים בשתי הרגליים (כאשר מקור ההתחשמלות הוא על הקרקע). מוות קליני * איבוד ההכרה * הפסקת הנשימה * דום לב נזק לרקמות רכות וקשות * נזק לעור – כוויות * נזק לעצבים – שיתוקים * נזק לעצמות – שברים התקף והתכווצויות הפרעות שיוצר הזרם במוח עלולות לגרום להתקפי התכווצויות עוויתיים של כל שרירי הגוף. נפגע בהכרה שלקה במכת חשמל עלול לסבול מהתלונות והסימנים הבאים: * אי-שקט * כאבי שרירים * שיתוק * הפרעות בראייה

מבדק מסכם לפרק מעגל חשמלי



1. מעגל חשמלי סגור חייב לכלול בתוכו
 - א. מתגים ונורות
 - ב. נגד ומכשירי מדידה
 - ג. מקור מתח, תיל מוליך וצרכן
2. זרם במעגל יזרום רק כאשר
 - א. המעגל סגור על ידי תיל מוליך
 - ב. רק כאשר מקור המתח מעל 5 וולט
 - ג. בתנאי שהנגד לא מספיק גדול
3. סוגי הנגדים הם
 - א. נגדי שכבה ונגדי זכוכית
 - ב. נגדי שכבה, נגדי פחם, נגדים מלופפי-תיל
 - ג. נגדים קרמיים ונגדי פחם
4. האדם הוא מוליך
 - א. בעל התנגדות נמוכה ולכן יכול להתחשל
 - ב. בעל התנגדות נמוכה
 - ג. בעל התנגדות גבוה ועדיין יכול להתחשמל
5. תפקיד המתג הינו
 - א. הפעלת הצרכן וניתוקו
 - ב. הורדת הזרם במעגל בשל התנגדותו
 - ג. וויסות המתח
6. כאשר רוצים למדוד מתח
 - א. יש לחבר את מד המתח בין שתי נקודות במעגל מחברים את ההדק החיובי לנקודה שבה הפוטנציאל גבוה יותר ואת ההדק השלילי לנקודה שבה הפוטנציאל נמוך יותר
 - ב. בין שתי נקודות במעגל מחברים את ההדק החיובי לנקודה שבה הפוטנציאל נמוך יותר ואת ההדק השלילי לנקודה שבה הפוטנציאל גבוה יותר
 - ג. צורת החיבור לא משנה
7. כאשר נרצה למדוד את הזרם במעגל
 - א. נשתמש במד הזרם מההדק השלילי לחיובי
 - ב. נשתמש במד הזרם מההדק החיובי לשלילי
 - ג. צורת החיבור אינה משנה
8. תלות ההתנגדות בטמפרטורה תכונה זו תלויה ב:
 - א. בחומר ממנו הסוג התיל

ב. בכמות הצרכנים המחוברים למעגל

ג. בתכונות החומר ממנו עשוי הנגד

9. מהו צרכן

א. כל רכיב במעגל החשמלי

ב. מנצל את הזרם, הנוצר על-ידי מקור המתח, לשימושים שונים, כגון: חימום, תאורה

וכו'.

ג. מתג חשמלי

10. לצורך שרטוט מעגל חשמלי

א. עלינו להשתמש בסמנים גרפיים מוסכמים

ב. תלוי באיזה תכנה אנו משתמשים

ג. אפשר לשרטט כיצד שאנו רוצים, בתנאי שנרשום את הערכים

סיכום פרק 4

- מעגל חשמלי סגור (ובקיצור: מעגל חשמלי) הוא מערכת חשמלית המשמשת מסלול סגור לזרם אלקטרוני. המעגל כולל (לפחות) מקור מתח, המחובר לצרכן (נגד).
- כדי לאפשר את חיבור הצרכן - או את ניתוקו - מצרפים מתג למעגל החשמלי.
- אם לא זורם זרם במעגל, הרי שהמעגל פתוח.
- מקובל לשרטט מעגל חשמלי באמצעות סמלים מוסכמים.
- סוגי נגדים: נגדי שכבה, נגדי פחם, נגדים מלופפיתיל.
- גוף האדם הוא מוליך, אם כי לא מוליך מעולה. אם זרם עובר דרך גוף האדם, התוצאה עלולה להיות קטלנית.

פעילות בנושא מעגל טורי ומקבילי על פי המעבדה הווירטואלית

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/circuit-construction-kit-dc>

1. מעגל פשוט - נגד אחד

א. בנה מעגל המורכב מהרכיבים הבאים: נורת חשמל, סוללה בעלת ערך 10 וולט ואמפרמטר.

1. ראה כי המטענים זורמים לאורך המסלול.

2. לחץ על הלחצן הימני בנורה ובסוללה ובחר בהצגת הערך.

ב. בדוק על ידי מד המתח כי אכן הסוללה מספקת 10 וולט למעגל. במידה וזה לא הערך הקיים, ניתן לשנות את ערכה על ידי לחיצה ימנית ולהזין את הערך הרצוי.

ג. על ידי המדידה במד הזרם, מהי קריאת הזרם?

ד. על ידי נוסחת חוק אום, מהי התנגדות הנורה?

$$R_{\text{bulb}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ה. לאחר שחישבת את ההתנגדות של הנורה, בדוק על ידי לחצן ימני על הנורה את ההתנגדות. האם ההתנגדות זהה לתוצאה שחישבת?

ו. במידה וקיימת סטייה בתוצאה, הסבר ממה היא יכולה לנבוע?

2. מעגל פשוט- שני נגדים

א. יש להוסיף למעגל הקיים עוד נורה. לחץ לחיצה ימנית על הנורה וודא כי ערכה 10 Ω .

ב. יש לבדוק את ערך הספק של מקור המתח ולראות כי ערכו 10 וולט.

ג. כעת, יש לקחת את מד הזרם ולמדוד את ערכו של הזרם כעת במעגל.

$$I_{\text{total}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ד. חשב על ידי חוק אוהם את ההתנגדות הכוללת במעגל

$$R_{\text{total}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ה. חזור על השלבים א-ג לאחר הוספה של נורה שלישית במעגל. מה כעת השתנה ומדוע?

3. מעגל פשוט- זרמים ומתחים במעגל

א. כעת, יש לשנות את ערכן של התנגדות הנורות, האחת בעלת התנגדות של 10, השנייה 20 והשלישית 30 אום. מהי כעת ההתנגדות השקולה של שלושת הנורות יחד?

$$R_{\text{eq}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ב. כעת, מדוד על ידי מד המתח את ההתנגדות על כל אחת מהנורות

$$V_{30\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{20\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{10\Omega} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ג. כיצד מתחים אלו קשורים למתח הכולל של הסוללה?

ד. מהו הזרם הכולל במעגל? האם על כל נורה זורם ערך אחר?

ה. כעת, יש לקחת את מד הזרם ולראות האם המדידה זהה לחישובך.

4. מעגל מקבילי פשוט- שני נגדים

א. לצורך בניית מעגל מקבילי, נקה את המסך. בנה מעגל המורכב מסוללה בעלת

ערך של 10 וולט וחבר שתי נורות המחוברות במקביל וערכן כ-10 אום.

ב. כעת יש לחבר מד מתח פעם אחר פעם על כל אחת מהנורות ולמדוד את המתח עליהן. איזו מסקנה ניתן להסיק ממדידות אלו?

ג. בשלב זה, יש לשנות את התנגדות הנורות ל-100 אום ולחזור שוב על סעיף ב'.

מה ניתן להסיק ממדידה זו?

ד. יש לאפס חזרה את ההתנגדות של הנורות ל-10 אום. על פי חוק אום, מהו הזרם

על כל אחד מהנורות? יש להשתמש כעזר במד המתח.

ה. כעת, יש לשנות את התנגדות הנורות, האחת ל-20 והשנייה ל-30 אום. מהי

ההתנגדות השקולה במעגל?

$$R_{eq} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ו. למעגל זה יש להוסיף נורה במקביל בעלת ערך של 10 אום, ולמצוא את הזרם בכל

אחד מהענפים. על פי חוק הזרמים של כירכהוף, מהו הזרם הכולל במעגל?

$$I_{30\Omega} = \quad I_{20\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \quad I_{10\Omega} = \underline{\hspace{2cm}}$$

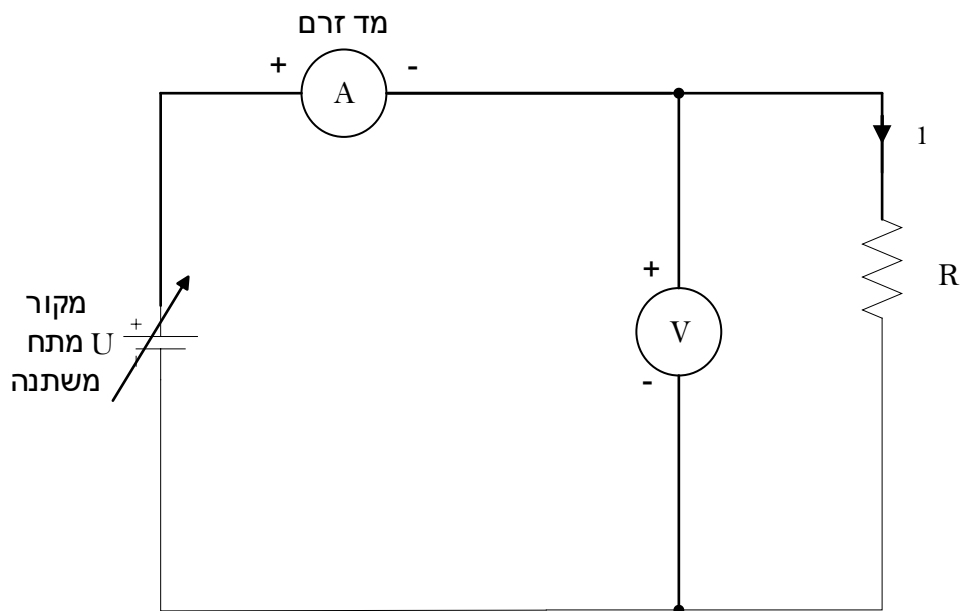
$$I_{eq} = \underline{\hspace{2cm}}$$

5. חוק אום

5.1 התנגדות וחוק אום

בפרקים הקודמים הגדרנו את ההתנגדות של מוליך כיחס בין המתח על המוליך לזרם דרכו. כמו כן למדנו שההתנגדות של מוליך תלויה באורכו, בשטח החתך שלו ובחומר שממנו הוא עשוי (כלומר, בהתנגדות הסגולית). ראינו גם כי הטמפרטורה משפיעה על ההתנגדות.

עכשיו ברצוננו לבדוק אם ההתנגדות של מוליך תלויה גם במתח שבין קצותיו, ואם כתוצאה מכך היא תלויה גם בעוצמת הזרם העובר במוליך. אפשרות נוספת היא כמובן שלמוליך יש התנגדות קבועה, וזו אינה תלויה במתח או בזרם. כדי לבדוק אפשרויות אלה, נתבונן במעגל שבאיור 5-1.



איור 5-1 מעגל חשמלי למדידת המתח על נגד והזרם דרכו

במעגל זה אפשר לשנות את מתח המקור (נניח כי המקור הוא ספק, שאפשר לשנות את המתח שלו על ידי סיבוב כפתור). כדי למדוד את המתח על הנגד, חיברו למעגל מד-מתח; וכדי למדוד את הזרם בנגד, חיברו למעגל מד-זרם. לא נדון כאן בצורת החיבור של מכשירים אלה למעגל. נציין רק כי מד-המתח במעגל שבאיור 5-1 מודד את המתח על הנגד; ומד-הזרם מודד את הזרם בנגד.

עכשיו נשנה פעמים אחדות את מתח המקור, ובכל פעם נמדוד את המתח על הנגד ואת הזרם העובר דרכו. נסכם את תוצאות המדידות בטבלה:

מתח (V)	12	18	24	30	36	48
זרם (A)	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2

טבלה 5-1 תוצאות המדידה של המתח על נגד והזרם דרכו

נחשב בכל פעם את היחס בין המתח על הנגד לבין הזרם העובר דרכו:

$$\frac{12}{0.5} = 24 \quad \frac{18}{0.75} = 24 \quad \frac{24}{1} = 24$$

וכן הלאה.

בניסוי זה היחס בין המתח על הנגד, לבין הזרם בנגד, הוא קבוע. כלומר, לנגד יש התנגדות קבועה, שערכה $R=24\Omega$, והיא אינה משתנה גם כאשר משנים את המתח על הנגד ואת הזרם העובר דרכו (אנו מניחים שבניסוי זה הטמפרטורה של הנגד אינה משתנה).

תוצאה זו, שלפיה **קיים יחס קבוע בין המתח שעל המוליך לבין הזרם העובר דרכו**, התגלתה על ידי הפיזיקאי אום, והיא נקראת על שמו – **חוק אום**.

הביטוי המתימטי של חוק אום הוא:

$$(5-1) \frac{U}{I} = R$$

כאשר R קבוע

בדרך כלל כותבים את **חוק אום** בצורה הזאת:

$$(5-2) U=RI$$

כאשר R קבוע

רוב המוליכים, הנמצאים בשימוש, מקיימים את חוק אום, ולכן הם נקראים **לפעמים מוליכים אומיים**. חשוב להדגיש כי **לא כל המוליכים מקיימים את חוק אום**. במוליך, שאינו מקיים את חוק אום, היחס בין המתח על המוליך לבין הזרם העובר דרכו אינו קבוע, אלא משתנה כאשר משנים את המתח והזרם.

מדוע האור נדלק מיד?

לפי חוק אום, כאשר מתח קבוע פועל על מוליך, זורם במוליך זרם קבוע, כלומר: מספר קבוע של אלקטרונים עוברים דרך שטח החתך של המוליך בכל יחידת זמן. באיזו מהירות נעים האלקטרונים במוליך?

אפשר להראות שבמוליך מעשי (תיל נחושת, למשל) מהירות האלקטרונים שנעים בתנועה מכוונת היא בדרך כלל לא יותר מכמה עשיריות המילימטר בשנייה. זוהי מהירות קטנה למדי.

אילו נדרשנו לחכות עד שהאלקטרונים יגיעו מקצה אחד של המוליך לקצהו האחר, היינו ממתנים זמן רב להפעלתם של מכשירים חשמליים. לדוגמה, בפנס המרחק בין נורת החשמל לבין מתג ההדלקה הוא כמה סנטימטרים, והיה עלינו להמתין זמן ניכר מרגע הדלקת האור ועד לרגע שבו הנורה הייתה מאירה. ובשיחות טלפון בין-עירוניות - היינו נדרשים להמתין חודשים אחדים עד שהאלקטרונים היו מגיעים לקצה השני של הקו, כלומר: עד שצליל החיוג היה נשמע שם.

והרי אנו יודעים כי האור נדלק מיד, וכי אנו שומעים מיד את דברי בן-שיחנו, אפילו כאשר הוא נמצא בארץ אחרת. כיצד קורה הדבר?

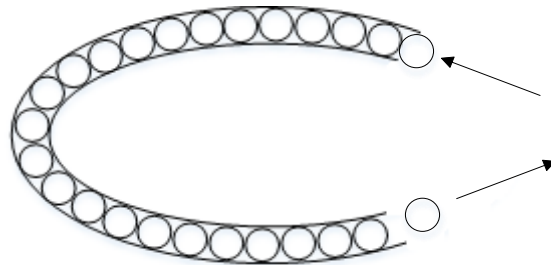
כאמור, כשמחברים מוליך למקור מתח, המקור מפעיל כוח על האלקטרונים החופשיים שבמוליך. אלקטרון חופשי, הקרוב להדק השלילי של המקור, גורם לדחיפת האלקטרונים החופשיים הסמוכים לו, ואלה גורמים לדחיפת האלקטרונים הסמוכים להם, וכן הלאה... וכן הלאה...

הדחיפה הזאת עוברת במהירות עצומה (כמעט במהירות האור, כלומר כמעט 300,000 קילומטרים בשנייה) וגורמת לפעולת האלקטרונים במכשירים השונים. לכן הנורה מאירה מיד, ואנו שומעים מיד את בן-שיחנו שבקצה השני של הטלפון. לכן פעולת האלקטרונים מתרחשת מיד, למרות התנועה האיטית של האלקטרונים במוליך.

נבהיר את התופעה בעזרת המחשה פשוטה. נחשוב על התיל המוליך כעל צינור חלול, ועל האלקטרונים כעל כדורים הממלאים את הצינור. צינור כזה, מלא כדורים, מתואר באיור 2-5. כאשר דוחפים פנימה כדור בקצה אחד של הצינור, כדור אחר נפלט מיד החוצה בקצה השני של הצינור. מה הסיבה לכך?

כשאנו דוחפים את הכדור שבקצה האחד, הוא דוחף מיד את הכדור הסמוך לו, וזה דוחף את הכדור שלידו, וכן הלאה - עד שנפלט הכדור שבקצה השני של הצינור. הכדור, שנדחף פנימה, אינו נע במהירות גדולה, אבל הדחיפה עוברת מהר מאוד מכדור לכדור, והשפעת הדחיפה מורגשת מיד בקצה השני של הצינור.

כך גם האלקטרונים. מהירותם אינה גדולה מאוד, אבל פעולתם מתרחשת מיד. עם זאת, יש הבדלים רבים בין האלקטרונים לבין הכדורים שבהמחשה זו.



איור 5-2 תנועת האלקטרונים במוליך ניתנת להמחשה על ידי תנועת כדורים בצינור

חישובים בעזרת חוק אום

המשוואה $U=RI$ היא משוואה שימושית מאוד. נביא דוגמאות אחדות לחישובים כאלה.

דוגמה 5-1

המתח על גוף החימום של מכונת כביסה הוא $220V$. התנגדות גוף החימום היא 20Ω . מהו הזרם הזורם בגוף החימום?

פתרון

נתון כי $R=20\Omega$, $U=220V$. נציב במשוואה (5-1) את הנתונים, ונקבל:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220V}{20\Omega} = 11A$$

הזרם בגוף החימום הוא $11A$.

דוגמה 5-2

גוף חימום של תנור חשמלי עשוי מתיל כרום-ניקל. התנגדות גוף החימום היא 200Ω . מה המתח על גוף החימום, כשהזרם דרכו הוא $2.5A$?

פתרון

נתון כי $I=2.5A$, $R=200\Omega$. נציב את הנתונים, ונקבל:

$$U=RI=200 \times 2.5=500V$$

המתח על גוף החימום הוא $500V$.

דוגמה 5-3

המתח על נורה הוא 220V, והזרם העובר דרכה הוא 0.2A. מהי התנגדות הנורה?

פתרון

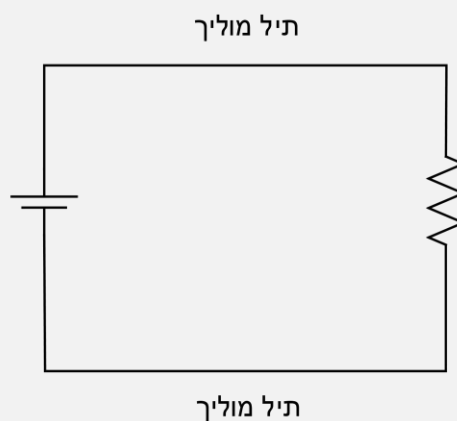
נתון כי $U=220V$, $I=0.2A$. נציב את הנתונים במשוואה (5-1), ונקבל:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220V}{0.2A} = 1100\Omega$$

התנגדות הנורה היא 1100Ω .

קצר ונתק

ראינו כי מעגל חשמלי כולל מקור מתח וצרכן. הזרם החשמלי זורם בתיל מוליך אחד (כלומר, בחוט חשמל) מהמקור לצרכן, ובתיל מוליך אחר - מהצרכן למקור, וכך נסגר המעגל החשמלי. מעגל כזה מתואר באיור 5-3.



איור 5-3 מעגל חשמלי הכולל מקור, צרכן ומוליכים

התיל המוליך עשוי נחושת, או מתכת אחרת, ומצופה בחומר מבודד. כבר למדנו כי הבידוד נועד למנוע התחשמלות של אדם הנוגע בתיל המוליך. כמו כן הוא נועד למנוע מגע בין שני התילים שבמעגל.

לפעמים, כאשר החומר המבודד מתייבש ומתקלף, נוצר בכל זאת מגע בין התילים המוליכים. מעגל חשמלי, שנוצר בו מגע כזה, מתואר באיור 5-4.

שאלות חזרה

שאלה 5.1

לגבי כל משפט, קבעו אם הוא נכון או לא – ונמקו את קביעתכם.

- א. כל מוליך מקיים את חוק אום.
- ב. שום מוליך אינו מקיים את חוק אום.
- ג. אם מוליך מקיים את חוק אום, המתח על המוליך קבוע.
- ד. אם מוליך מקיים את חוק אום, הזרם דרכו קבוע.
- ה. אם מוליך מקיים את חוק אום, התנגדותו קבועה.

שאלה 5.2

סמנו את התכונה של מוליך אומי.

- א. המתח עליו קבוע.
- ב. התנגדותו קבועה.
- ג. הזרם דרכו קבוע.
- ד. הוא אינו מציית לחוק אום.

שאלה 5.3

המתח על נורה הוא 220V. מהו הזרם בנורה, אם התנגדותה 400Ω ?

שאלה 5.4

התנגדות תנור חשמלי היא 20Ω והזרם בתנור הוא 11A. מהו המתח על התנור?

שאלה 5.5

מה הזרם בנגד המחובר למעגל החשמלי שבאיור 5-5?



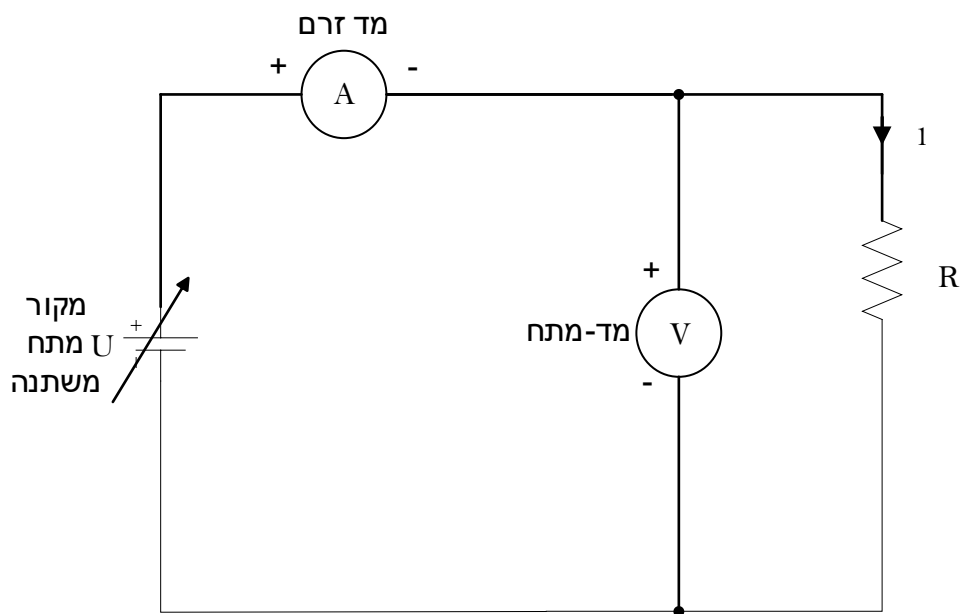
איור 5-5

שאלה 5.6

מלחם מחובר לרשת החשמל, והמתח עליו הוא $220V$. התנגדות המלחם היא $1,100\Omega$. מהו הזרם במלחם?

5.2 תיאור גרפי של חוק אום

בסעיף הקודם תיארו שיטה למדידת התנגדות של נגד: מחברים את הנגד למקור מתח, שהמתח שלו ניתן לשינוי. בכל פעם שמשנים את מתח המקור, מודדים את המתח על הנגד ואת הזרם העובר דרכו, ומחשבים את ההתנגדות. נחזור ונביא באיור 5-6 את המעגל שבו נערכות המדידות, ואת טבלת התוצאות.



איור 5-6 מעגל למדידת המתח על נגד והזרם דרכו

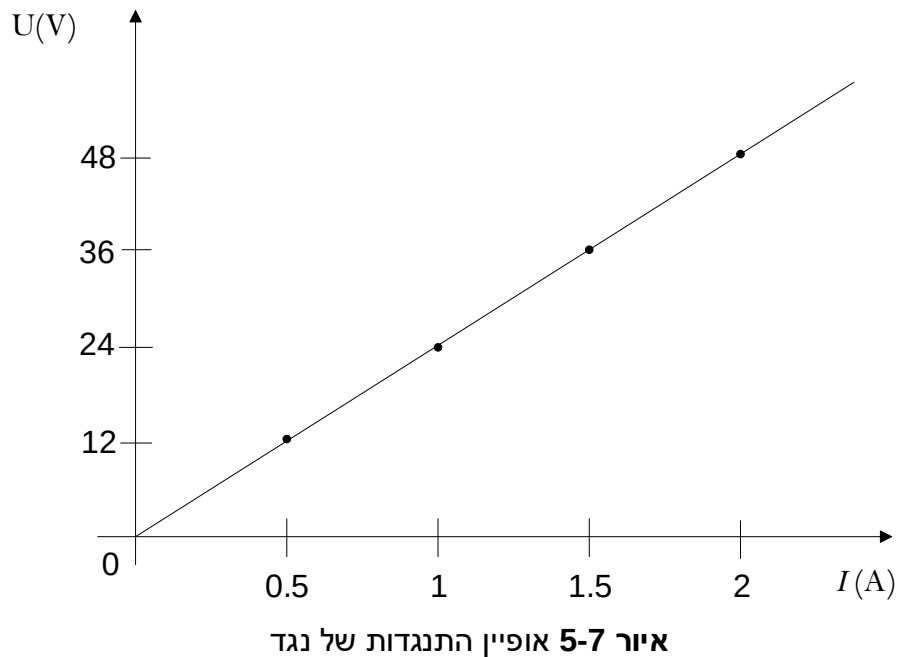
מתח (V)	12	18	24	30	36	48
זרם (A)	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2

טבלה 5-2 תוצאות המדידה של המתח על נגד והזרם העובר דרכו

כדי לדעת אם הנגד הוא אומי (כלומר, אם הנגד מקיים את חוק אום), חילקנו את המתח בזרם בכל אחת מהמדידות, ובדקנו אם התוצאות זהות. כלומר, בדקנו אם ההתנגדות קבועה.

אפשר לבדוק אם נגד הוא אומי גם בדרך אחרת: באמצעות גרף שמתאר את הקשר בין המתח על הנגד לבין הזרם העובר דרכו. לפעמים דרך זו נוחה יותר; די להציץ בגרף, כדי

לדעת אם הנגד הוא אומי או לא. גרף, המתאר את המתח בתלות בזרם, נקרא אופיין התנגדות. באיור 5-7 נתון אופיין התנגדות של נגד.



מעבדה וירטואלית בנושא מעגל - סוללה נגד

קישור לסימולציה:

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/ohms-law>

מטרת הסימולציה:

בניסוי זה נראה כיצד המתח משפיע על עוצמת הזרם ונבין את תפקיד הנגד (חוק אום).

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

הוראות כלליות

- בניסוי זה שני סרגלי עבודה שאתם ניתן לשנות, האחד קובע את עוצמת המתח והשני את עוצמת ההתנגדות. סרגל נוסף מציין את חום הנגד בתלות בזרם.
- סימולציית האלקטרוניקה מראה את הזרימה וכיוונה, בטור למעגל יש מד זרם המציין את עוצמת הזרם.
- בהפעלת המעגל שנו את עוצמת המתח ונראה כיצד זה משפיע על הזרם במעגל, ניתן לראות את העיקרון שכאשר אלקטרון יוצא מהסוללה בהדק השיי אלקטרון נכנס. כמות האלקטרונים בזרימה שווה רק קצב התנועה שלהם משתנה.
- שימו לב שסרגל החום משתנה בתלות בזרם (יחס ישר).

- שנו את עוצמת הנגד וראו את השפעתו על הזרם (חוק אום).
- ניתן לראות את התנהלות האטומים בנגד בזמן זרימת האלקטרונים על ידי סימון **הצג אטומים בנגד**
- ניתן לראות את התנהגות האלקטרונים בסוללה על ידי סימון **הראה סוללה מבפנים**

מעבדה מתח בסוללה

בניסוי זה נראה כיצד כמות המטענים קובעת את עוצמת המתח בסוללה.

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/battery-voltage>

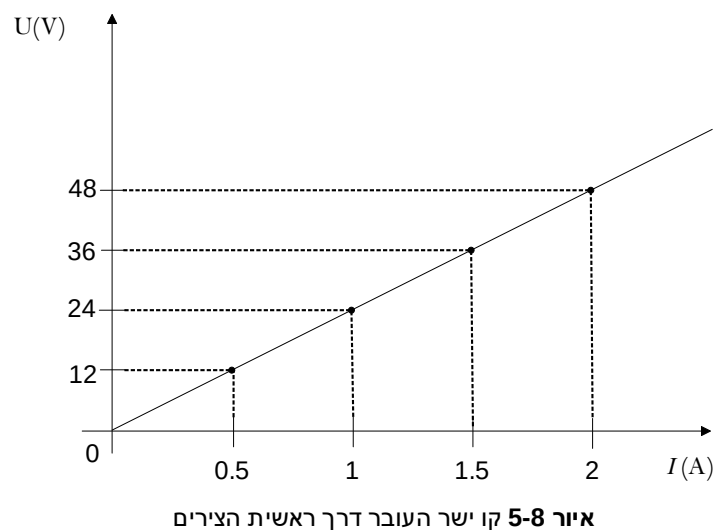
הוראות כלליות

- עם הפעלת בסימולציה הסוללה מאוזנת כלומר הפרש הפוטנציאלים שלה הוא אפס (מתח אפס), אותה כמות של מטענים בשני צידי הסוללה.
- למטה מופיע סרגל מתח אשר נמצא באמצע ומציין שהסוללה מאוזנת כלומר מתח אפס.
- כאשר נזיז את הסמן של **המתח המקובל** ימינה ושמאלה נראה שהמטענים יעברו בהתאם לצד ימין או שמאל בהתאם, כאשר הסוללה טעונה מרבית כל המטענים נמצאים בצד אחד, עם פעולת הסוללה והשימוש בה חלק מהמטענים עוברים לצד השני.
- ניתן להציג את שני מכלי המטענים כסוללה על ידי סימון **הצג סוללה**.

למדנו כי משוואת קו ישר, שעובר בדרך הראשית של מערכת צירים, היא:

$$y=kx$$

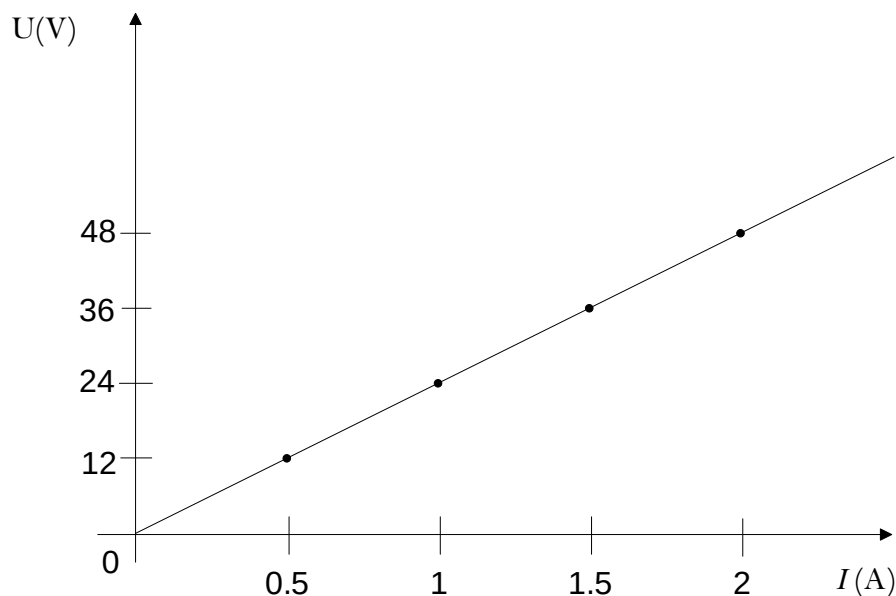
k הוא שיפוע הקו, והוא קבוע. קו כזה מתואר במערכת הצירים שבאיור 5-8.



בדוגמה 5-4 שלהלן נחשב את השיפוע של קו כזה, כלומר נמצא את ההתנגדות של נגד. באופן דומה, משוואת הקו הישר במערכת הצירים $U-I$ (מתח-זרם) היא מהצורה $U=RI$, כאשר השיפוע הקבוע של הקו מסומן הפעם באות R . אם נתבונן באופיין התנגדות של מוליך מסוים, ונראה כי הוא קו ישר העובר בדרך הראשית. פירוש הדבר ש- R הוא קבוע. כלומר, ההתנגדות של המוליך הנדון היא קבועה. לכן זהו אופיין של נגד אומי. נגד, שאופיין ההתנגדות שלו הוא קו ישר, נקרא לפעמים **נגד ליניארי**, ובקיצור: **נגד**.

דוגמה 5-4

מהי התנגדות הנגד שאופיין ההתנגדות שלו נתון באיור 5-9?

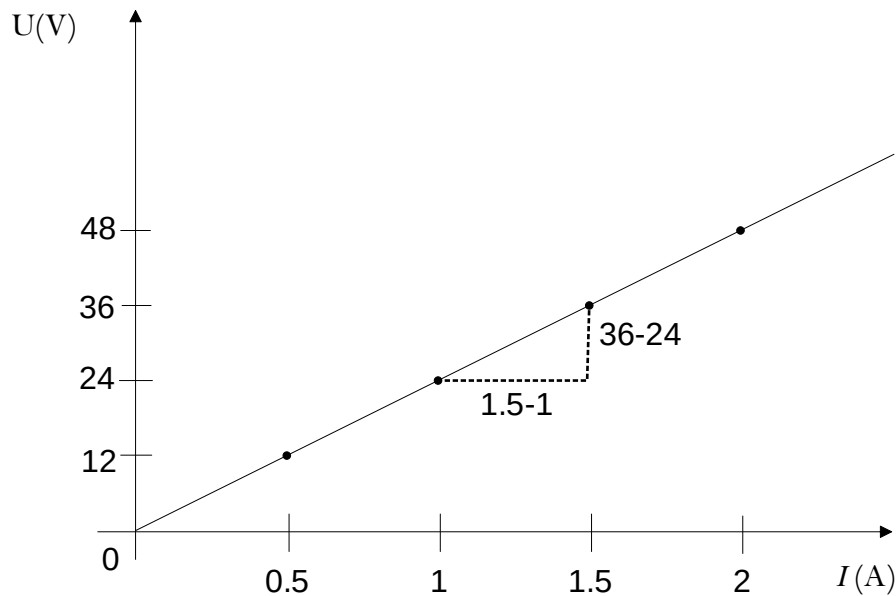


איור 5-9

פתרון

כדי לחשב את התנגדות הנגד, כשנתון אופיין ההתנגדות שלו, יש לבחור שתי נקודות על הגרף (כפי שמתואר באיור 5-10), ולחלק את הפרש המתחים בהפרש המתאים של הזרמים. כדי לקבל תוצאה נכונה, יש להקפיד על יחידות המתח והזרם. על פי הגרף, נקבל כי התנגדות הנגד היא:

$$\frac{36V - 24V}{1.5A - 1A} = \frac{12V}{0.5A} = 24 \frac{V}{A} = 24\Omega$$



איור 5-10 חישוב ההתנגדות של נגד ליניארי

כפי שכבר אמרנו, לא כל החומרים, ואפילו לא כל המוליכים, מקיימים את חוק אום. חוק אום מתקיים בעיקר במתכות (וגם לגביהן יש לדאוג לטמפרטורה קבועה, כדי שיקיימו חוק זה). ההתנגדות של חומרים רבים בטבע ושל התקנים רבים תלויה במתח שבין קצותיהם, וכתוצאה מכך - בזרם העובר דרכם.

מעבדה וירטואלית - מוליכות חשמל

מטרת הסימולציה היא לבחון את הקשר בין ערך המתח החשמלי לבין המוליך המעביר את הזרם.

בעזרת הסימולציה, ניתן לראות כי האלקטרונים נעים במעגל בעזרת מקור המתח.

התלמיד יזהה תכונות המתקשרות לפלסטיק ומתכות ויבין את ההבדלים. כמו כן ניתן לחשוף את התלמידים לתופעת הפוטו אלקטריק (אם כי טרם נלמד בכיתה).

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

להלן קישור לסימולציה בנושא מוליכים:

<http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Conductivity>

דרך השלבים הבאים ניתן לחקור אודות המוליכים ותכונותיהם:

1. תחילה, יש לוודא כי המתח בתפריט, ערכו שווה לאפס.
2. תחת תפריט חומרים, בחר מתכת.
3. כעת, הגדר את מתח הסוללה לערך שך 0.5 וולט.
4. הכדורים הקטנים הנעים במוליך הינם האלקטרונים

5. כדי להשלים תנועה מכוונת של אלקטרונים עליהם לנוע במסלול מוליך אשר מתחיל מנקודה אחת במקור המתח בקוטביות אחת ומסתיים במקור המתח בקוטביות הפוכה.

הוראות כלליות

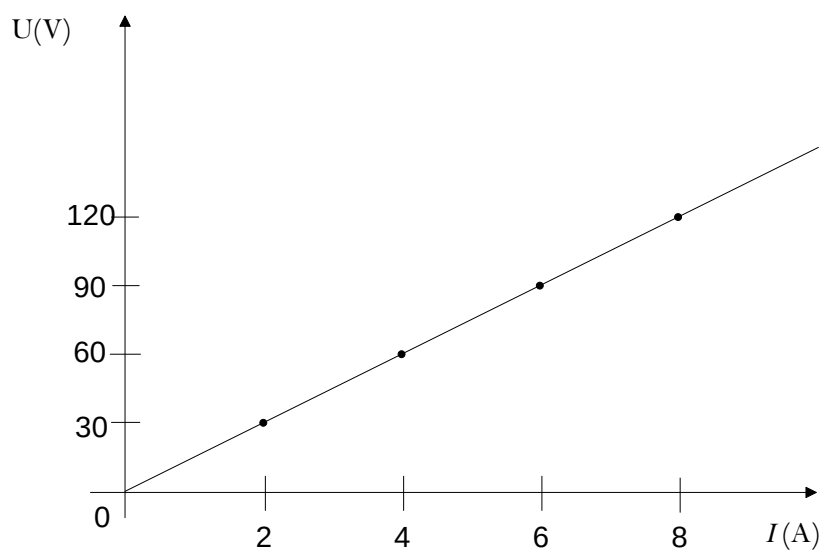
- לרשותך מעגל חשמלי עם סוללה שניתן לשנות את ערכה ושלושה מוליכים שונים.
- קבע את המוליך **מתכת** הפעל את המעגל צפה בתנועת האלקטרונים וברמת המוליכות (סרגל צד שמאל), שנה את עוצמת המתח ותראה את ההשפעה על רמת המוליכות.
- שנה את המוליך **לפלסטיק**, שנה את המתח וראה את המוליכות של החומר (אפס).
- שנה את המוליך **לפוטו-מוליך** (מוליכותו תלויה באור), הפעל את המעגל עלה את המתח (הזרם לא עובר), הדלק את האור על ידי סימון **הפעל פס** ושים לב כיצד המוליכות משתנה בתלות באור.

שימו לב לא ניתן לשלוט על עוצמת האור לכן האור הופך את החומר למוליך או מבודד. לו ניתן היה אפשר לשנות את עוצמת האור היינו רואים שהחומר היה הופך למוליך בדרגות שונות בתלות באור.

שאלות חזרה 

שאלה 5.7

באיור 5-11 מתואר אופיין ההתנגדות של נגד. מהי התנגדות הנגד?



איור 5-11

שאלה 5.8

מדדו את המתח על נגד ואת הזרם דרכו. שנו את המתח, ושוב מדדו את הזרם, וכן הלאה. שרטטו את אופיין ההתנגדות של הנגד על פי תוצאות המדידות שלהלן.

מתח (V)	28	21	14	7
זרם (A)	0.8	0.6	0.4	0.2

שאלה 5.9

שרטטו את אופיין ההתנגדות של נגד, שהתנגדותו 50Ω . הניחו כי המתח על הנגד הוא 100V לכל היותר.

שאלה 5.10

סמנו את הטענה הנכונה (או הטענות הנכונות) לגבי התנגדות של נגד ליניארי.

- א. התנגדות הנגד **תגדל / תקטן**, ככל שהמתח על הנגד יגדל.
- ב. התנגדות הנגד **תגדל / תקטן**, ככל שהזרם בנגד יגדל.
- ג. התנגדות הנגד אינה משתנה, גם אם משנים את המתח על הנגד.
- ד. התנגדות הנגד גדלה בצורה ליניארית (כלומר, קו ישר משופע).

שאלה 5.11

- א. נתון רכיב חשמלי, שדרכו עובר זרם, והמתח עליו הוא אפס. האם רכיב זה מקיים את חוק אום? נמק.
- ב. נתון רכיב, שלא עובר בו זרם, והמתח עליו שונה מאפס במצב זה. האם רכיב זה מקיים את חוק אום?
- ג. אופיין ההתנגדות של רכיב - אינו עובר דרך הראשית (הנקודה 0:0). האופיין הוא קו ישר. האם רכיב זה מקיים את חוק אום?

לאחר שהכרנו את המושגים, התנגדות, מתח וזרם, למדנו את הקשר בין המשתנים. כמו כן תואר זאת על ידי חוק אום.

ניתן לראות בסרטונים הבאים כיצד חוק אום בא לידי ביטוי במעגלים חשמליים.

יש לשים לב, כי ניתן להפוך את תרגום הסרטון לעברית על ידי לחיצה על . (הגדרות)

הנמצא בתחתית המסך מצד ימין. יש ללחוץ על כתוביות  אנגלית  תרגום אוטומטי  עברית.

<https://www.youtube.com/watch?v=G3H5IKoWPpY>

<https://www.youtube.com/watch?v=J4Vq-xHqUo8>

כמו כן, בהמשך הפרק קיים קישור לביצוע התנסות של מעגלים חשמליים המתארים את הקשר בין המשתנים.

מעגל חשמלי

כבר אמרנו שכדי שיזרום זרם בתיל מוליך ובצרכן המחוברים למקור מתח, צריך לדאוג שיהיה מסלול סגור, שבו יוכלו האלקטרונים לנוע. בהתאם לכך, נגדיר מושג חדש:

הגדרה

מסלול סגור, הכולל מקור מתח וצרכן, שכיוון הזרם המוסכם בו הוא מההדק החיובי של מקור המתח - אל ההדק השלילי, דרך הצרכן, נקרא **מעגל חשמלי סגור**, ובקיצור: **מעגל חשמלי**.

להלן קישור לסרטון המציג את עקרון הפעלת המעגל החשמלי:

<https://www.youtube.com/watch?v=VnnpLaKsqGU>

סיכום פרק 5

- חוק אום קובע כי קיים יחס בין המתח על נגד לבין הזרם בנגד ($U=RI$), אם התנגדות הנגד קבועה, ואינה תלויה במתח על הנגד ובזרם בנגד (ואם מזניחים את השינוי בהתנגדות הנגד, שמתחמם כתוצאה מהזרם העובר דרכו).
- רוב המוליכים שמשתמשים בהם מצייתים לחוק אום, והם נקראים **מוליכים אומיים**.
- יש להבדיל בין חוק אום לבין הגדרת ההתנגדות של מוליך, אף כי בשני המקרים מופיע אותו קשר.
- אופיין התנגדות מתאר את המתח כפונקציה של הזרם, ואופיין מוליכות מתאר את הזרם כפונקציה של המתח.
- לנגד, שהאופיין שלו הוא קו ישר, קוראים לפעמים **נגד ליניארי**.
- מוליך מציית לחוק אום, רק אם האופיין שלו - אופיין התנגדות או אופיין מוליכות - ליניארי ועובר דרך הראשית.

- חוק אום אינו חוק טבע כללי, ואינו חל על כל החומרים. חוק אום חל בעיקר על מתכות (אם ניתן להזניח את שינויי הטמפרטורה שלהן, כתוצאה מהזרם דרכן). יש מוליכים שאינם מצייתים לחוק אום.

פעילות מסכמת

1. כיצד להדליק נורה- מעבדה וירטואלית

בשלב הראשון יש להיכנס לקישור הבא:

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/circuit-construction-kit-dc>

הוראות הניסוי:

- גרור את החוטים, הסוללות והנורות מתוך התיבה הימנית, יש לחבר בין הרכיבים, האם הנורה דולקת?
 - מה קורה בעת הלחיצה הימנית על המעגל?
 - בדוק האם מופיעה נקודה אדומה?
 - לחץ לחיצה ימנית על הנקודה האדומה. מה כעת קורה?
 - בדוק מה קורה בעת לחיצה ימנית על המילה פיצול צומת? "split junction"
- ו. מלא את הטבלה הבאה:

מה ראית?	שרטוט של המעגל שבנית	מעגל וחלקים לשימוש
		מעגל 1 • 2 חוטים • נורה • סוללה
		מעגל 2 • 3 חוטים • נורה • 2 סוללות
		מעגל 3 • חוט אחד • נורה אחת • סוללה אחת
		מעגל 4 • 3 חוטים

• נורה אחת • סוללה אחת • מתג		
מעגל לבחירתך		
מעגל 5		

1. אילו חלקים כל מעגל העבודה צריך?

2. כיצד החוטים מחוברים לנורה? מה קורה אם החוטים לא מחוברים כראוי?

3. מה לדעתך שנקודות כחולות נמצאים מעגלים שלך?

4. אילו צורות אנרגיה מועברים מהסוללה לנורה?

5. מה תפקידו של המתג?

פעילות בנושא מעגל טורי ומקבילי על פי המעבדה הוירטואלית

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/circuit-construction-kit-dc>

1. מעגל פשוט- נגד אחד

א. בנה מעגל המורכב מהרכיבים הבאים: נורת חשמל, סוללה בעלת ערך 10 וולט ואמפרמטר.

1. ראה כי המטענים זורמים לאורך המסלול.

2. לחץ על הלחצן הימני בנורה ובסוללה ובחר בהצגת הערך.

ב. בדוק על ידי מד המתח כי אכן הסוללה מספקת 10 וולט למעגל. במידה וזה ל הערך הקיים, ניתן לשנות את ערכה על ידי לחיצה ימנית ולהזין את הערך הרצוי.

ג. על ידי המדידה במד הזרם, מהי קריאת הזרם?

ד. על ידי נוסחאת חוק אוהם, מהי התנגדות הנורה?

$$R_{\text{bulb}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ה. לאחר שחישבת את ההתנגדות של הנורה, בדוק על ידי לחצן ימני על הנורה את ההתנגדות. האם ההתנגדות זהה לתוצאה שחישבת?

ו. במידה וקיימת סטייה בתוצאה, הסבר ממה היא יכולה לנבוע?

2. מעגל פשוט- שני נגדים

א. יש להוסיף למעגל הקיים עוד נורה. לחץ לחיצה ימנית על הנורה וודא כי ערכה 10 Ω.

ב. יש לבדוק את ערך הספק של מקור המתח ולראות כי ערכו 10 וולט.

ג. כעת, יש לקחת את מד הזרם ולמדוד את ערכו של הזרם כעת במעגל.

$$I_{\text{total}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ד. חשב על ידי חוק אוהם את ההתנגדות הכוללת במעגל

$$R_{\text{total}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ה. חזור על השלבים א-ג לאחר הוספה של נורה שלישית במעגל. מה כעת השתנה ומדוע?

3. מעגל פשוט- זרמים ומתחים במעגל

א. כעת, יש לשנות את ערך של התנגדות הנורות, האחת בעלת התנגדות של 10,

השנייה 20 והשלישית 30 אום. מהי כעת ההתנגדות השקולה של שלושת הנורות

יחד?

$$R_{\text{eq}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ב. כעת, מדוד על ידי מד המתח את ההתנגדות על כל אחת מהנורות

$$V_{30\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{20\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{10\Omega} = \underline{\hspace{2cm}}$$

ג. כיצד מתחים אלו קשורים למתח הכולל של הסוללה?

ד. מהו הזרם הכולל במעגל? האם על כל נורה זורם ערך אחר?

ה. כעת, יש לקחת את מד הזרם וראות האם המדידה זהה לחישובך.

4. מעגל מקבילי פשוט- שני נגדים

א. לצורך בניית מעגל מקבילי, נקה את המסך. בנה מעגל המורכב מסוללה בעלת ערך

של 10 וולט וחבר שתי נורות המחוברות במקביל וערכן כ-10 אום.

ב. כעת יש לחבר מד מתח פעם אחר פעם על כל אחת מהנורות ולמדוד את המתח

עליהן. איזו מסקנה ניתן להסיק ממדידות אלו?

ג. בשלב זה, יש לשנות את התנגדות הנורות ל-100 אום ולחזור שוב על סעיף ב'. מה

ניתן להסיק ממדידה זו?

ד. יש לאפס חזרה את ההתנגדות של הנורות ל-10 אום. על ידי חוק אום, מהו הזרם על

כל אחד מהנורות? יש להשתמש כעזר במד המתח.

ה. כעת, יש לשנות את התנגדות הנורות, האחת ל-20 והשנייה ל-30 אום. מהי

ההתנגדות השקולה במעגל?

$$R_{eq} = \underline{\hspace{2cm}}$$

1. למעגל זה יש להוסיף נורה במקביל בעלת ערך של 10 אום, ולמצוא את הזרם בכל

אחד מהענפים. על פי חוק הזרמים של כירכהוף, מהו הזרם הכולל במעגל?

$$I_{10\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \quad I_{20\Omega} = \underline{\hspace{2cm}} \quad I_{30\Omega} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I_{eq} = \underline{\hspace{2cm}}$$

פרק 6: ההספק החשמלי

6.1 הגדרת ההספק

בפרקים הקודמים למדנו על חיבור נגד למקור מתח. נחזור ונתאר בקיצור מה קורה בעת חיבור כזה. ובכן, המתח בין הדקי המקור גורם לכך שעל האלקטרונים החופשיים בנגד, המחובר למקור, פועל כוח חשמלי. אלקטרונים אלה נעים בנגד, רוכשים אנרגיה קינטית (של תנועה), ובמהלך תנועתם מתנגשים ביוני הסורג. כתוצאה מהתנגשויות אלה, הנגד מתחמם.

אנו רואים שבתהליך זה ישנה הפיכת אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת: אנרגיה חשמלית נהפכת לחום; כמו כן מתרחש בתהליך זה מעבר של אנרגיה: ממקור המתח אל הנגד. בחיי היום-יום אנו מכירים מקרים רבים שבהם אנרגיה חשמלית נהפכת לחום באמצעות זרם חשמלי. באיור 6-1 מתוארת דוגמה כזאת. באיור זה אנו רואים קומקום חשמלי המשמש לחימום מים.

הקומקום מחובר למקור מתח (למעשה, הקומקום מחובר באמצעות שקע החשמל לרשת החשמל).

בגוף החימום של הקומקום - זורם זרם. כתוצאה מכך, גוף החימום מתחמם, והוא מחמם את המים שמסביבו. אם נדע את כמות המים שהתחממו, ונדע בכמה מעלות עלתה טמפרטורת המים, נוכל לחשב את כמות האנרגיה שהושקעה בחימום המים. אולם לעתים קרובות, כאשר אנו עוסקים בהפיכת אנרגיה חשמלית לחום, אנו מתעניינים לא רק בכמות האנרגיה המושקעת אלא גם בזמן שנדרש לכמות זו של אנרגיה חשמלית להפוך לחום.

לרוב הרתחת המים בקומקום נמשכת דקות אחדות. ברור שלא היינו קונים קומקום חשמלי, שהרתחת המים בו נמשכת זמן ארוך (למשל: שעה). אנו רואים אפוא כי למשך הזמן, הדרוש לחימום, יש חשיבות רבה.

מה קורה אפוא בעת חימום מים בקומקום חשמלי? **אנרגיה הופכות את צורתה** - מאנרגיה חשמלית לחום; **אנרגיה עוברת ממקום למקום** - ממקור המתח למים המתחממים; מקור המתח **משקיע אנרגיה**; הקומקום החשמלי והמים **צורכים אנרגיה**.

נתעניין בהמשך בעיקר בשני גורמים: כמות האנרגיה המחליפה את צורתה, ומשך הזמן הדרוש לכך. גורמים אלה קובעים את קצב ההפיכה של אנרגיה מצורה אחת – לאנרגיה מצורה אחרת. לקצב זה קוראים **הספק**. כלומר,

הספק הוא קצב הפיכת אנרגיה מצורה לצורה.

נבטא את ההספק באופן מפורט יותר:

$$\text{הספק} = \frac{\text{כמות אנרגיה המחליפה צורה}}{\text{משך הזמן שהאנרגיה מחליפה צורה}}$$

נסמן באות W את כמות האנרגיה המחליפה צורה; נסמן באות t את משך הזמן שהאנרגיה מחליפה צורה, ובאות P – את ההספק. נחליף במשוואה האחרונה את המילים באותיות, ונקבל כי ההספק נתון על ידי

$$(6-1) \quad P = \frac{W}{t}$$

P – הספק

W – אנרגיה

t – זמן

בניסוי זה נלמד על ההספק החשמלי והאלמנטים המשפיעים עליו.

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/circuit-construction-kit-dc>

הוראות כלליות

- פתח את הסימולציה לחץ על האייקון Lab
- ניתן לבנות מעגל חשמלי באמצעות הכלים בצד שמאל, **wire** יאפשר לגרור מוליך למעגל על מנת לבצע חיבורים, **battery** יצרף למשטח העבודה סוללה, **Light Bulb** יאפשר צרוף של נורה, **Resistor** יאפשר צרוף של נגד ו **Switch** מפסק.
- את ערכי הנגד, הסוללה והתנגדות החוט ניתן לשנות, על ידי לחיצה יפתח סרגל כלים למטה בו ניתן לבצע את השינוי.
- עוצמת הזרם דרך הנורה תשפיע על עוצמת הארה, ניתן לראות זאת באורך קרני האור היוצאים מהנורה.

התנסות

- חבר מעגל חשמלי הכולל סוללה נורה נגד ומוליך.
- שנה את עוצמת המתח, זהה את שינוי בעוצמת ההספק כשינוי בעוצמת האור. מה היחס בין עוצמת המתח לבין ההספק (עוצמת הארה)?
- שנה את עוצמת ההתנגדות וצפה בשינוי בהספק (עוצמת הארה). מה היחס בין עוצמת ההתנגדות לבין ההספק (עוצמת הארה)?
- מה היחס בין עוצמת הזרם במעגל לבין ההספק?

הערה: בשאלה קבע את היחס, הכוונה האם היחס ישר או הפוך והאם הוא מקיים את משוואות ההספק.

דוגמה 6-1

קומקום חשמלי הופך אנרגיה חשמלית של 360,000 ג'ול לחום – במשך 3 דקות. מהו הספק הקומקום?

פתרון

כמות האנרגיה שהחליפה צורה היא

$$W = 360,000 \text{ ג'ול}$$

משך הזמן, שהאנרגיה החליפה צורה, הוא 3 דקות. נבטא – במערכת היחידות SI – את הזמן בשניות:

$$t = 180 \text{ שניות}$$

והספק הקומקום הוא, לפי משוואה (6-1),

$$P = \frac{W}{t} = \frac{360,000 \text{ J}}{180 \text{ s}} = 2,000 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

יחידות ההספק

בדוגמה 6-1 אפשר לראות כי ההספק נמדד ב- $\frac{\text{J}}{\text{s}}$. היחידה $\frac{\text{J}}{\text{s}}$ נקראת **ואט**, ומסמנים אותה באות W .² כלומר:

$$W = \frac{\text{ג'ול}}{\text{שנייה}} \quad \text{ואט}$$

אם כן, הספק הקומקום שבדוגמה 6-1 הוא 2,000W.

כשההספק גדול, נהוג למדוד אותו ביחידות **קילו-ואט** או **מגה-ואט**. קילו-ואט הוא אלף ואט (כשם שקילומטר הוא אלף מטר). קילו-ואט מסומן כך: kW. הקשר בין קילו-ואט לבין ואט הוא

$$1 \text{ kW} = 1,000 \text{ W}$$

מגה-ואט הוא מיליון ואט. מגה-ואט מסומן כך: MW. הקשר בין מגה-ואט לבין ואט הוא

² האות W מסמנת גם את יחידת ההספק ואט, וגם אנרגיה. לצורך הבחנה, מסומנת כאן האנרגיה באות עבה: **W**.

$$1 \text{ MW} = 1,000,000 \text{ W}$$

כוח-סוס

יחידת ההספק נקראת על שם ג'יימס וואט, מהנדס סקוטי, שהיה ממפתחי מכונת הקיטור. אנו מכירים עוד יחידות הנקראות על שם אנשי מדע. למשל: יחידת המתח וולט נקראת על שם וולטה; יחידת הזרם נקראת על שם אמפר. יחידות מדידה נקראות לפעמים על שמם של אנשי מדע - כאות הוקרה על תרומתם להתפתחות המדע.

ההספק נמדד לפעמים ביחידה אחרת, הנקראת כוח-סוס. מה הקשר בין יחידת מדידה בחשמל לבין סוס?

כפי שנלמד בפרק, הספק משמעו כמות האנרגיה המחליפה את צורתה, ומשך הזמן הדרוש לכך. גורמים אלה קובעים את קצב ההפיכה של אנרגיה מצורה אחת – לאנרגיה מצורה אחרת. לקצב זה קוראים **הספק**. כלומר,

הספק הוא קצב הפיכת אנרגיה מצורה לצורה.

ניתן לראות המחשה למושג בקישור לסרטון הבא:

<https://www.youtube.com/watch?v=u4FpbaMW5sk>

דוגמה 6-2

נתונים שני קומקומים. הספק קומקום א הוא $P_1 = 2,000 \text{ W}$, והספק קומקום ב הוא $P_2 = 1,000 \text{ W}$. לכל קומקום מכניסים ליטר מים באותה טמפרטורה, וצריך לחמם את המים בשני הקומקומים לאותה טמפרטורה. האנרגיה W , שהושקעה בחימום המים בכל אחד מהקומקומים, היא 200,000 ג'ול. באיזה קומקום יגיעו המים מהר יותר לטמפרטורה הסופית?

פתרון

בשני הקומקומים יש אותה כמות מים, ויש לחמם את המים באותה מידה (כלומר, מאותה טמפרטורה התחלתית לאותה טמפרטורה סופית).

ההספק נתון על-ידי משוואה (6-1)

$$P = \frac{W}{t}$$

מכאן נקבל כי משך הזמן הדרוש לחימום נתון על ידי

$$t = \frac{W}{P}$$

נתון כי $W=200,000J$. בקומקום א $P_1 = 2,000W$ ולכן משך הזמן הדרוש לחימום המים בקומקום א הוא:

$$t_1 = \frac{W}{P_1} = \frac{200,000}{2,000} = 100s$$

ובקומקום ב - משך הזמן הוא:

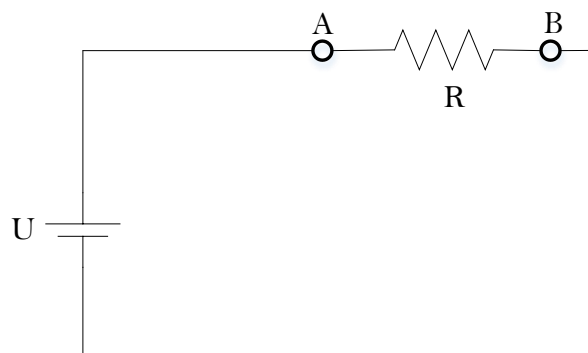
$$t_2 = \frac{W}{P_2} = \frac{200,000}{1,000} = 200s$$

לכן בקומקום א המים יגיעו לטמפרטורה הסופית, לפני המים בקומקום ב.

ניתן להראות כי מתקבלת אותה מסקנה לגבי כל כמות של אנרגיה W , שיש להשקיע בחימום המים בכל אחד מהקומקומים שבדוגמה. לכן בקומקום א – שהספקו גדול יותר - המים יגיעו לטמפרטורה הסופית מהר יותר מהמים בקומקום ב.

הגדרנו את ההספק כקצב הפיכת אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת: $P = \frac{W}{t}$. הגדרה זו

נכונה להספק מכל צורה, ולא רק להספק חשמלי. אבל אנו עוסקים, כידוע, בהספק חשמלי; לכן נלמד כיצד אפשר לבטא את ההספק החשמלי בדרך אחרת - באמצעות מתח וזרם. לשם כך נשתמש בדוגמה של כף חשמלית, המשמשת אף היא לחימום מים. תצלומה מופיע באיור 6-3.



ב – המעגל החשמלי שבו נמצאת הכף החשמלית
(הנגד R מייצג את הכף החשמלית)

איור 6-3

נניח שהמתח בין קצותיה של הכף החשמלית הוא U . אנו יודעים שבגלל המתח הזה, האלקטרונים בכף החשמלית נעים מהקצה שבו הפוטנציאל נמוך אל הקצה שבו הפוטנציאל גבוה. במעגל שבאיור 3-6 ינועו האלקטרונים מנקודה B, שהפוטנציאל שלה נמוך, אל נקודה A, שהפוטנציאל שלה גבוה יותר.

אבל כזכור, כיוון הזרם המוסכם הפוך לכיוון תנועת האלקטרונים. לכן כיוון הזרם המוסכם בכף החשמלית הוא מנקודה A לנקודה B.

נניח כי יחידת מטען חיובית עוברת מנקודה A לנקודה B. כתוצאה מכך, האנרגיה החשמלית של יחידת המטען – קטנה. כלומר: בנקודה A האנרגיה הפוטנציאלית של יחידת המטען החיובית גדולה יותר מאשר בנקודה B.

בכמה קטנה האנרגיה החשמלית של יחידת המטען בנקודה A מזו שבנקודה B?

הפוטנציאל בנקודה מסוימת (למשל: הנקודה A) מוגדר כאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען באותה נקודה. לכן הפרש הפוטנציאלים (כלומר, המתח) בין שתי הנקודות A ו-B שווה להפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית שיש ליחידת המטען בנקודה A - לבין האנרגיה הפוטנציאלית שיש לה בנקודה B.

הפרש הפוטנציאלים בין נקודות A ו-B הוא U . מכאן שאם יחידת מטען אחת עוברת בין הנקודות A ו-B, כמות האנרגיה החשמלית של יחידת המטען בנקודה B קטנה בשיעור $U \times 1$ (כלומר, בשיעור U) מזו שבנקודה A.

כאשר עוברות q יחידות מטען בין נקודות אלו, הפרש האנרגיה W – בין האנרגיה של יחידות מטען אלה בנקודה A, לבין האנרגיה שלהן בנקודה B – הוא Uq . כלומר:

$$W = Uq$$

אנרגיה זו, W , נמסרה לכף החשמלית ונהפכה לחום. נשתמש בהגדרת ההספק, ונקבל כי הספק הכף החשמלית הוא:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Uq}{t} = U \frac{q}{t}$$

הביטוי $\frac{q}{t}$ כבר מוכר לנו. כזכור, עוצמת הזרם I מוגדרת כיחס בין המטען q לזמן t – משוואה (2-7) – כלומר:

$$I = \frac{q}{t}$$

לכן נקבל כי ההספק נתון על ידי:

$$(6-3) \quad P = U \frac{q}{t} = UI$$

כלומר, מצאנו:

$$P = UI \quad (6-4)$$

P – הספק [W]

U – מתח [V]

I – זרם [A]

ביטוי זה של ההספק ($P = UI$), שפיתחנו לגבי הכף החשמלית, נכון לגבי כל צרכן חשמלי, ואפילו לגבי מקור המתח עצמו, כפי שנינוכח בהמשך הלימוד. ההספק של רכיב שווה אם כן למכפלת המתח שעל הרכיב בזרם העובר דרך הרכיב.

דוגמה 6-3

מתניעים מכונית בעזרת מתנע (סטֶרְטֶר, starter) המחובר למצבר (איור 6-4) של 12V. במתנע יש זרם של 200A. חשבו את ההספק של המתנע.

פתרון

– המתח של המתנע הוא $U=12V$.

– הזרם במתנע הוא $I=200A$.

והספק המתנע הוא, לפי משוואה (6-2):

$$P = UI = 12 \times 200 = 2,400W$$

כאמור, משוואת ההספק, $P=IU$, נכונה לכל רכיב במעגל החשמלי. אם הרכיב הוא נגד, הרי שהוא מקיים את חוק אום, כלומר: $U=RI$ (קבוע). נציב במשוואת ההספק את הביטוי של U מחוק אום, ונקבל:

$$P = IU = I \cdot IR = I^2 R \quad (6-5)$$

כלומר, אם בנגד, שהתנגדותו R , זרם זרם I , הספק הנגד נתון על ידי:

$$P = I^2 R$$

ומכאן:

$$I^2 = \frac{P}{R}$$

כלומר:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (6-6)$$

דוגמה 6-4

– הספק הדוד הוא $P=2,200\text{W}$.

– התנגדות גוף החימום היא $R=20\Omega$.

נרשום את המשוואה $P = RI^2$, משוואה (6-5), בצורה הנתונה במשוואה (6-6):

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

ונקבל:

$$I = \sqrt{\frac{2,200}{20}} = \sqrt{110} = 10.5\text{A}$$

הזרם בגוף החימום הוא 10.5A.

קיבלנו כבר ביטוי אחד של ההספק בנגד ($P = RI^2$), באמצעות משוואת ההספק ($P=UI$) וחוק אום. נמצא עכשיו ביטוי נוסף של ההספק בנגד. לשם כך נרשום את חוק אום בצורה

$$I = \frac{U}{R} \quad (R \text{ קבוע})$$

נציב במשוואת ההספק, $P=UI$, את הביטוי של I מחוק אום, ונקבל:

$$P = UI = U \frac{U}{R} = \frac{U \cdot U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

כלומר, אם על נגד – שהתנגדותו R – המתח הוא U , הספק הנגד נתון על ידי:

$$(6-7) \quad P = \frac{U^2}{R}$$

אם יודעים מה המתח של הנגד ומהו הספק הנגד, אפשר לחשב את התנגדות הנגד. ניווכח בכך בדוגמה 6-5 שלהלן. אך לפני נציין כי על נורה רשום הספק ומתח, למשל: 230V, 60W. באיור 6-7 מופיע צילום של נורה.

פירושן של רישומי זה הוא שכאשר זורם זרם בנורה עקב מתח של 230V, הספק הנורה הוא 60W. כאמור, על סמך נתונים אלה אפשר לחשב את התנגדות הנורה, כשהיא מחוברת למתח זה.

המתח וההספק אינם רשומים רק על נורות, אלא גם על התקנים ומכשירים חשמליים שונים (מקלט טלוויזיה, מערכת סטריאו, מחשב ביתי, מגהץ, תנור חשמלי ועוד).

דוגמה 6-5

מה התנגדות הנורה, המתוארת 7 באיור 6-7, כשהיא פועלת במתח הנתון באיור?

פתרון

אנו יודעים כי כאשר המתח של הנורה הוא $U=230V$, הספק הנורה הוא $P=60W$. ההספק נתון על ידי משוואה (6-7):

$$P = \frac{U^2}{R}$$

ומכאן נקבל:

$$R = \frac{U^2}{P}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$R = \frac{230^2}{60} = \frac{52,900}{60} = 881.7\Omega$$

התנגדות הנורה, כשהיא פועלת, היא 881.7Ω .

שאלות חזרה

שאלה 6.1

השלימו: הספק הוא קצב שינוי של _____.

שאלה 6.2

בכל שנייה אנרגיה חשמלית של $500J$ נהפכת לחום. סמנו את כל המשפטים הנכונים לגבי תהליך זה.

- א. ככל שהתהליך נמשך זמן רב יותר, ההספק גדול יותר.
- ב. ככל שהתהליך נמשך זמן קצר יותר, ההספק גדול יותר.
- ג. ההספק אינו תלוי במשך הזמן של התהליך.
- ד. ההספק הוא $500W$.
- ה. ההספק הוא $\frac{1}{500} W$.
- ו. ההספק הוא $500J$.
- ז. ההספק הוא $\frac{1}{500} J$.

שאלה 6.3

סמנו את המשוואה הנכונה (P -הספק; W – אנרגיה; t – זמן)

א. $P = Wt$ ב. $P = \frac{t}{W}$ ג. $P = \frac{W}{t}$ ד. $P = \frac{1}{Wt}$

שאלה 6.4

מדיח כלים צורך אנרגיה של 2,000 ג'ול במשך שנייה. מה הספק המדיח?

שאלה 6.5

מאוורר צורך אנרגיה של 30,000 ג'ול בדקה. מה הספק המאוורר?

שאלה 6.6

מערכת סטריאו צורכת 180,000 ג'ול בשעה. מה הספק המערכת?

שאלה 6.7

כמה אנרגיה מושקעת בנורה של 100W שמאירה במשך שעותיים?

שאלה 6.8

הרתחת מים בקומקום חשמלי מסוים נמשכת דקה וחצי. כדי להרתיח את המים יש להשקיע אנרגיה של 150,000J. מהו הספק הקומקום?

שאלה 6.9

נתונים שני דוודים חשמליים. דוד א פעל במשך זמן רב יותר מדוד ב, אך שני הדוודים צרכו אותה כמות אנרגיה. לאיזה משני הדוודים יש הספק גדול יותר? נמקו.

שאלה 6.10

שני תנורים חשמליים פועלים במשך אותו זמן. לתנור הצורך אנרגיה רבה יותר במשך זמן זה:

- א. יש הספק גדול יותר.
- ב. יש הספק קטן יותר.
- ג. יש אותו הספק כמו לתנור השני.

שאלה 6.11

המתח הגורם לפעולת מכונת גילוח חשמלית הוא $12V$. ההספק של מכונה זו, הוא $3W$. סמנו את המשפטים הנכונים לגבי מכונת גילוח זאת.

א. התנגדות מכונת הגילוח בעת פעולתה היא 4Ω .

ב. הזרם במכונת הגילוח הוא $0.25A$.

ג. מכונת הגילוח צורכת אנרגיה של $3J$ בכל שנייה.

ד. בכל 3 שניות, מכונת הגילוח צורכת $1J$.

שאלה 6.12

סמנו את ההספק הגדול ביותר מבין ההספקים הבאים:

$0.2MW$; $201kW$; $199,000W$

שאלה 6.13

נורה צורכת $720,000J$ במשך שתיים, ואילו מקלט טלוויזיה צורך $24,000J$ במשך 5 דקות. למי מהם יש הספק גדול יותר?

שאלה 6.14

ההספק של מחשב אישי הוא $50W$, וההספק של תנור חימום הוא $2kW$.

מה סכום ההספקים של שני מכשירים אלה?

שאלה 6.15

המתח הגורם לפעולת מערכת סטריאו הוא $220V$, והזרם במערכת הוא $0.4A$. מה הספק המערכת?

שאלה 6.16

ההספק של נורת להט הוא $100W$. המתח של הנורה הוא $230V$. מה הזרם בנורה?

שאלה 6.17

נורת הלוגן מחוברת לרשת החשמל. הספק הנורה הוא $500W$. מה המתח של הנורה, אם הזרם בה הוא $2.2A$?

שאלה 6.18

על נורה רשום: $40W / 230V$. מה התנגדות הנורה כשהיא פועלת?

שאלה 6.19

הזרם במלחם הוא $0.15A$. התנגדות המלחם (כשזרם בו זרם זה) היא $1,600\Omega$. מה הספק המלחם?

שאלה 6.20

נתונים שני תנורים חשמליים. התנגדות תנור א (כשהוא פועל) היא 15Ω , והתנגדות תנור ב (כשהוא פועל) היא 10Ω .

- א. נתון כי המתח של שני התנורים הוא $220V$. חשבו את ההספק של כל תנור.
 ב. נתון כי הזרם בכל תנור הוא $12A$ (אך המתח שלהם שונה). חשבו עכשיו את ההספק של כל תנור.

שאלה 6.21

"ככל שההתנגדות גדולה יותר, ההספק גדול יותר".
 האם טענה זו נכונה תמיד? לפעמים? אף פעם? נמקו את תשובתכם.

6.2 צריכת אנרגיה חשמלית ויחידות אנרגיה שימושיות

אם ידוע ההספק החשמלי P של צרכן, אפשר לדעת כמה אנרגיה חשמלית נצרכה על ידי הצרכן במשך זמן t . לשם כך נשתמש במשוואת ההספק (6-1):

$$P = \frac{W}{t}$$

ומכאן נקבל כי האנרגיה החשמלית הנצרכת נתונה על ידי:

$$W = Pt$$

ואם הצרכן - שהמתח שלו הוא U , והזרם דרכו הוא I - מקיים את חוק אום, נקבל לפי משוואה (6-7) כי:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

וכן, לפי משוואה (6-5) נקבל:

$$P = I^2 R$$

ומכאן נקבל:

$$(6-8) \quad W = Pt = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt$$

לפעמים נוח לבטא את יחידת האנרגיה החשמלית באמצעות יחידת הספק ויחידת זמן. יחידת האנרגיה, שמתקבלת במקרה כזה, היא וואט-שנייה (Ws). יחידה זו היא קטנה ואינה נוחה לשימוש.

להתקני החשמל הביתיים יש בדרך כלל הספק של עשרות, מאות ואפילו אלפי וואט. התקנים אלה פועלים במשך שעות רצופות (אלפי שניות). לכן מקובל למדוד את צריכת האנרגיה החשמלית ביחידות של קילו-וואט שעה (kWh), ובקיצור **קוט"ש** או **קו"ש**. נסביר סימון זה. האות h היא האות הראשונה במילה hour (שעה, כלומר: 3,600 שניות). האות k מייצגת אלף, כפי שלמדנו. מכאן נקבל:

$$1 \text{ kWh} = 1,000W \times 3,600s = 3,600,000Ws = 3,600,000J$$

כלומר, קילו-וואט שעה שווה לשלושה מיליון ושש-מאות אלף ג'ול.

$$1 \text{ MWh} = 1,000\text{kWh} = 3,600,000J$$

יחידה מקובלת נוספת של אנרגיה היא MWh (מגה-וואט שעה), כלומר: מיליון וואט שעה:

דוגמה 6-6

ההספק של תנור חשמלי הוא 1.5kW. מה כמות האנרגיה החשמלית שהתנור צורך במשך שעתיים? רשמו את התשובה ביחידות ג'ול וביחידות קוט"ש.

פתרון

הספק התנור הוא $P=1.5kW=1,500W$.

משך הזמן הוא שעתיים (2h), כלומר 7,200 שניות (7,200s).

האנרגיה הנצרכת, ביחידות ג'ול, היא:

$$W = 1,500W \times 7,200s = 10,800,000J$$

וביחידות קוט"ש נקבל:

$$W = 1.5kW \times 2h = 3kWh$$

האנרגיה, שהתנור צורך במשך שעתיים, היא 3 קוט"ש.

הנה הספקים אופייניים של מכשירים והתקנים שונים. (ייתכנו גם ערכים שונים מאלה הרשומים כאן).

100 W	מערכת סטריאו	30 W	וידאו
150 W	מקלט טלוויזיה	52 W	מאוורר
40 W	נורה פלואורסצנטית	1.6 kW	מדיח כלים
500 W	נורת הלוגן	90 W	מחשב ביתי
60 W	נורת להט	0.0003 W	מחשב כיס
15 W	רדיו-טייפ	1.4 kW	מיקרוגל
3,000 W	תנור חשמלי	25 W	מלחם

תחנות הכוח הגדולות מייצרות חשמל בהספקים גדולים ביותר. למשל, תחנת הכוח רוטנברג שבאשקלון כוללת שתי יחידות, וכל אחת מהן מייצרת חשמל בהספק של 550 MW.

 שאלות חזרה

שאלה 6.22

- א. נורה מאירה שעתיים ברציפות. הספק הנורה הוא 75 W. חשבו – ביחידות ג'ול – את האנרגיה שהנורה צורכת במשך זמן זה.
- ב. חשבו את האנרגיה ביחידות kWh.

שאלה 6.23

הספק תנור הוא 2 kW. התנור פעל במשך 5 שעות. חשבו – ביחידות kWh – את האנרגיה, שצרך התנור במשך זמן זה.

שאלה 6.24

"חברת החשמל בונה תחנת-כוח, המספקת 100 מגה-ואט."

- א. מה הספק התחנה?
- ב. מה כמות האנרגיה – ביחידות ג'ול – שהתחנה מספקת בשעה?
- ג. בטאו את האנרגיה ביחידות MWh.

שאלה 6.25

חשבו – ביחידות ג'ול – את האנרגיה הנצרכת על ידי כל אחד מהמכשירים הבאים שמחוברים לרשת החשמל (220 V):

שם המכשיר	התנגדות המכשיר	משך הפעולה של המכשיר
מלחם	$1,600\Omega$	שעתיים
נורה	600Ω	שעה
תנור	15Ω	10 דקות

שאלה 6.26

השלימו:

- א. Ws היא יחידת _____.
 ב. kWh היא יחידת _____.
 ג. kW היא יחידת _____.
 ד. $1 MWh$ גדול פי _____ מ- $1 kWh$.
 ה. $1 kWh$ גדול פי _____ מ- $1 J$.

חברת החשמל בישראל, הנה הספק הבלעדי להספקה סדירה של חשמל לכל צרכן במדינה. כפי שנלמד בפרק זה, אם ידוע ההספק החשמלי P של צרכן, ניתן לדעת כמה אנרגיה חשמלית נצרכה על-ידי הצרכן במשך זמן.

לפי עלות של קילו וואט לשעה, ניתן לחשב את הסכום עלינו לשלם לחברת החשמל.

להלן קישור למחשבון חברת החשמל לישראל

<https://srvt1.i-ecnet.co.il/scripts/mgrqispi.dll?APPNAME=iec&PRGNAME=InstrumentsByGroup&ARGUMENTS=-N1>

לאחר פעילות באתר, יש לבדוק האם קיימים פערים בין החישוב המעשי על ידי הנוסחאות שנלמדו, לבין המחשבון הדיגיטלי המופיע באתר.

מעבדה וירטואלית בנושא מעגל חשמלי – קיט

התנסות – פעילות מסכמת

יש להיכנס לקישורים הבאים לביצוע הסימולציה:

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab_en.html

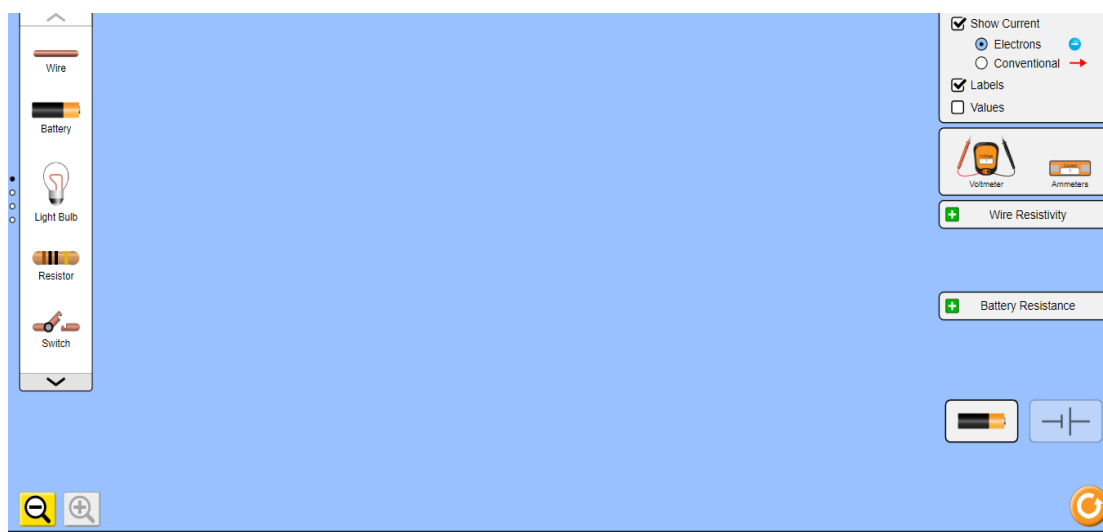
מטרת הסימולציה:

בניסוי זה, נוכל להתנסות בבניית מעגל חשמלי מלא, הכולל, צרכנים, נגדים, מוליכים, מתגים ומקור מתח.

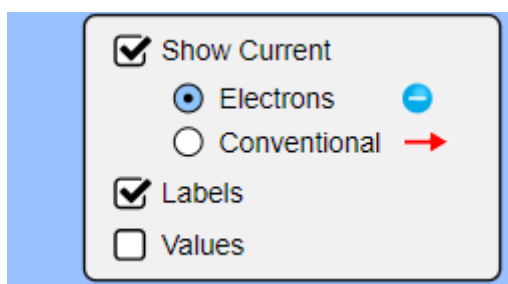
בנוסף, קיימים אמצעי מדידה, מתח וזרם, אשר אותם נוכל לצרף למעגל ולמדוד בעזרתם את הערכים המתקבלים בנקודות שונות.

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

לפניהם מסך ראשוני לסימולציה:

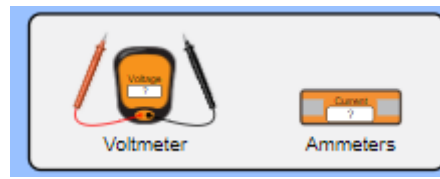


להלן המקרא:



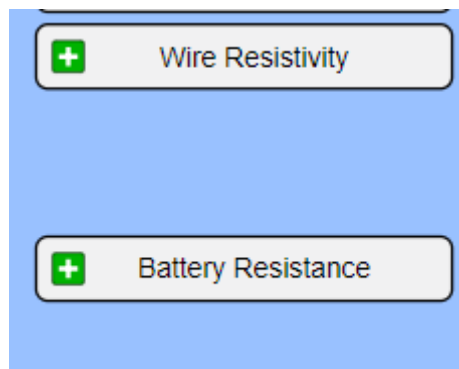
- הצגת הזרם-Show Current
- מאשר לנו לבחור האם להציג את תנועת האלקטרונים-Electrons
- הצגה בצורת חץ-Conventional
- הצגת שמות הרכיבים המוצגים-Labels
- הצגת הערכים-Values

הצגת מקרא מכשירי המדידה



- מד מתח-Voltmeter
- מד זרם-Ammeters

על המסך נוכל לראות גם את האפשרויות הבאות:



- Wire Resistivity- הוספת התנגדות תיל בסרגל רץ
- Battery Resistivity- הוספת התנגדות מקור המתח

מצד שמאל במסך הסימולציה, קיים החלון הבא:



בחלון זה נוכל לבחור הוספת פריטים למעגל, תיל (Wire), מקור מתח (Battery), צרכן נורה (Light Bulb), מתג (Switch) ואם נגלל מטה נמצא רכיבים נוספים עליהם נלמד בהמשך.

מספר הוראות הפעלה:

- כדי להוסיף משורת התפריט יש לגרור לרכז המסך את הרכיב הרצוי. לחיצה כפולה עליו נציג בתחתית המסך סימן של אשפה, אשר יאפשר לנו למחוק את הפריט במידת הצורך.
- כאשר נחבר מד מתח עלינו לראות כי חיבור הקוטביות נכונה.

שאלות הניסוי:

1. בנה מעגל (טורי) המורכב מנגד, מקור מתח, תיל ומתג. ראה כי קיימת תנועת מטענים.
2. לחץ על האפשרות להצגת ערכים ומדוד על פי נוסחת חוק אום את המתח המתקבל.
3. כעת, יש לקחת את מכשיר המדידה ולבצע מדידה אלקטרונית, האם קיים זהות בין התשובות?
4. שנה את התנגדות התיל במעגל, כיצד שינוי זה השפיע על התוצאות במעגל?
5. כעת, פתח את המתג, מה קורה במעגל? ומדוע?

פעילות בנושא הספק החשמלי:

1. בצע חישוב על פי הנתונים במעגל של ההספק הכולל הנצרך במעגל
2. כעת שנה את התנגדות הנגד וראה כיצד זה השפיע על ההספק במעגל?
3. הראה כי שינוי בסוללת המעגל, גורם לשינוי בהספק הכולל.

סיכום פרק 6

- ההספק P הוא קצב ביצוע עבודה, או קצב הפיכת אנרגיה מצורה אחת לאחרת. אם הֶתִקֵן מבצע עבודה W במשך זמן t , הספקו הוא $P = \frac{W}{t}$. יחידת ההספק היא וואט אחד (ג'ול לשנייה).
- הספק הצרכן שווה למכפלת המתח של הצרכן בזרם העובר דרך הצרכן: $P=UI$. משוואה זו חלה על כל רכיב במעגל, כולל מקור מתח. אם צרכן מקיים את חוק אום, הספק הצרכן נתון גם על ידי $P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$.
- קילו-וואט שעה הוא יחידת אנרגיה: הספק של קילו-וואט ($1,000 \text{ W}$) – במשך שעה, כלומר: kWh.
- מגה-וואט שעה: הספק של מגה-וואט (מיליון וואט) במשך שעה, כלומר: MWh.
- להתקני החשמל הביתיים יש הספק של עשרות, מאות, ואפילו אלפי וואט. מקובל למדוד את צריכת האנרגיה החשמלית הביתית ביחידות של קילו-וואט שעה.

7. חוקי קירכהוף

באיור 7-1 מתואר מעגל חשמלי, כדוגמת המעגלים שבהם עסקנו בפרקים הקודמים. מעגל זה מכיל מקור מתח אחד ונגד אחד. כדי לחשב את המתח של הנגד, את הזרם שבנגד, או את התנגדות הנגד, השתמשנו בחוק אום. כלומר, אם ידועים הערכים של שניים מתוך שלושת הגדלים - מתח, זרם והתנגדות - אפשר לחשב את הגודל השלישי.



איור 7-1 מעגל המכיל מקור מתח ונגד

אם נדע את שלושת הגדלים האלה, נוכל לחשב גודל נוסף - ההספק. אם נדע את ארבעת הגדלים האלה, נאמר ש**פתרנו** את המעגל. אך לפעמים נסתפק בידיעת המתח, הזרם והתנגדות במעגל, כדי לומר כי **פתרנו** את המעגל.

לא כל המעגלים פשוטים כמו המעגל שבאיור 7-1. יש מעגלים, המכילים כמה מקורות מתח וכמה נגדים. כאשר מנסים לפתור מעגלים כאלה, מתברר שאי-אפשר לפתור אותם בעזרת חוק אום בלבד, אלא יש להשתמש בחוקים נוספים.

בפרק זה נלמד שני חוקים, שיעזרו לנו לפתור מעגלים המכילים כמה מקורות מתח ונגדים. חוקים אלה נקראים **חוקי קירכהוף**, על שם המדען שניסח אותם לראשונה.

הידעת **גוסטב רוברט קירכהוף (1824-1887)**

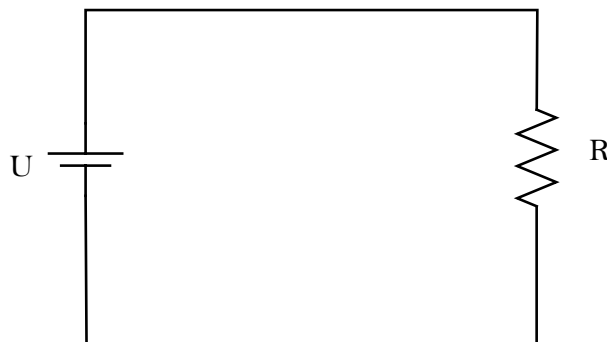
קירכהוף היה פיזיקאי גרמני, שהגיע להישגים חשובים בתחומים שונים של הפיזיקה. את שני החוקים בחשמל, הנקראים על שמו, ניסח כבר בגיל 23, כשהיה בראשית דרכו המדעית. גם את תואר הדוקטור שלו קיבל באותה שנה.

די היה בשני חוקים אלה, המשמשים לפתרון מעגלים חשמליים, כדי להביא לקירכהוף כבוד רב, אבל הם היו רק חלק קטן מהישגיו. קירכהוף עסק גם בתחומים אחרים בפיזיקה, ועיקר הישגיו היה בעבודתו החלוצית בנושאים הקשורים בקרינה. ואמנם קיים חוק נוסף, שנקרא חוק קירכהוף, והוא עוסק בקרינה.

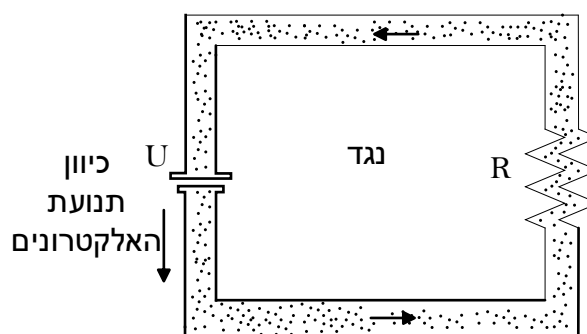
כמו כן, קירכהוף היה שותף לגילוי שני יסודות כימיים חדשים, ותרם לחקר ההרכב של השמש.

7.1 חוק הזרמים של קירכהוף

נחזור ונתבונן במעגל שמכיל מקור אחד ונגד אחד. מעגל זה מופיע שוב באיור 7-2. תנועת האלקטרונים במעגל זה מתוארת באיור 7-3. האלקטרונים באיור זה מיוצגים באמצעות נקודות, והנגד מסומן על ידי הגדלה של סימון הנגד.



איור 7-2 מעגל המכיל מקור מתח ונגד

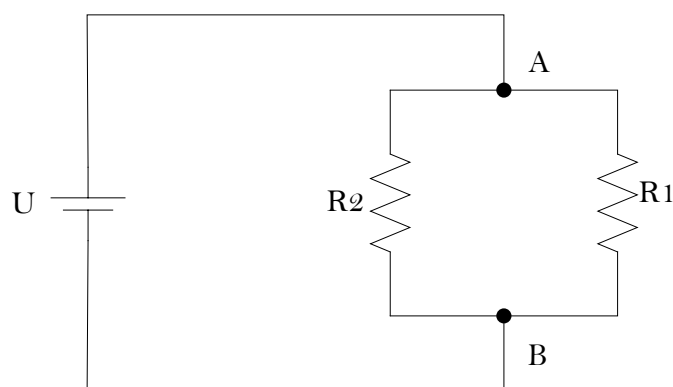


איור 7-3 תנועת האלקטרונים במעגל שלמעלה

כאמור, האלקטרונים נעים במעגל מההדק השלילי להדק החיובי, כפי שמתאר המעגל שבאיור 7-3. האלקטרונים שם נעים מההדק השלילי של מקור המתח, דרך המוליך התחתון. משם הם ממשיכים לנוע דרך הנגד ודרך המוליך העליון, ומשם – לעבר ההדק החיובי של מקור המתח. כיוון תנועת האלקטרונים מסומן בחצים. כאמור, **כיוון הזרם המוסכם הפוך לכיוון תנועת האלקטרונים.**

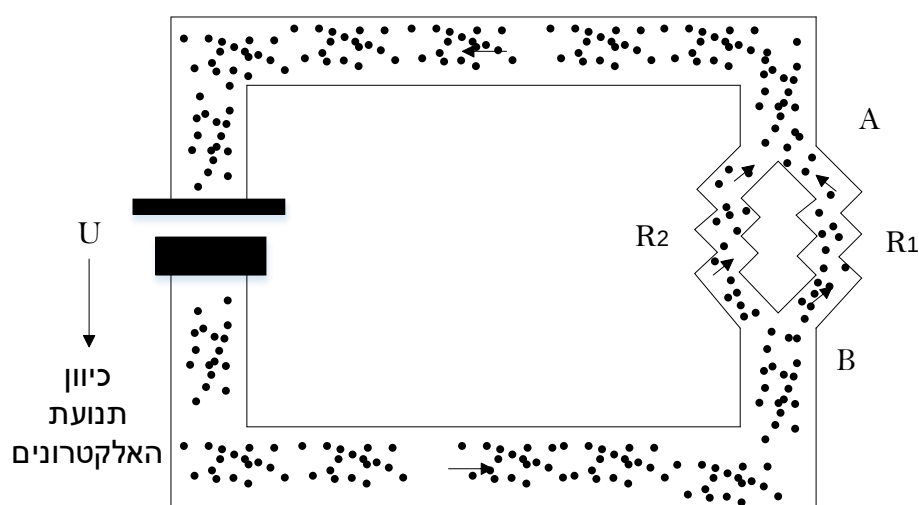
צומת במעגל חשמלי

עכשיו נתבונן במעגל חשמלי המכיל מקור מתח ושני נגדים, R_1 ו- R_2 , כפי שמתואר באיור 7-4. הנגדים מחוברים – באמצעות מוליכים – למקור המתח. שתי נקודות החיבור של הנגדים למוליכים הן A ו-B.



איור 7-4

מעגל שבו הזרם מתפצל בין שני נגדים

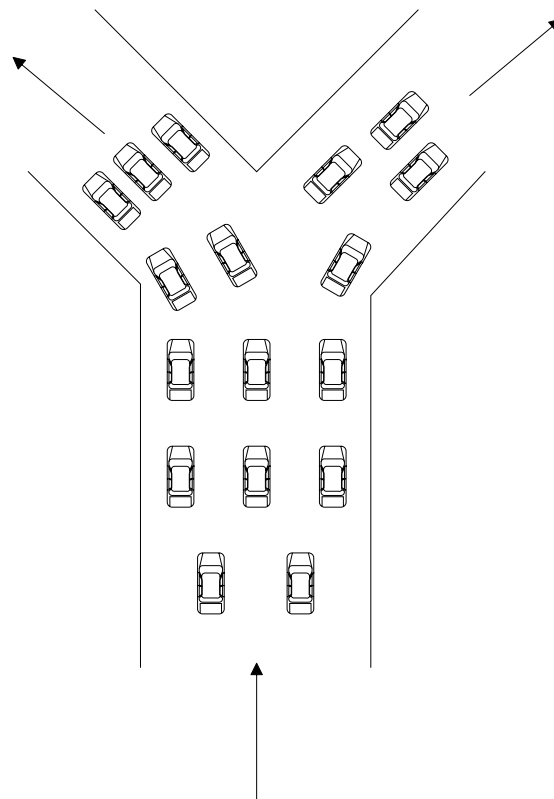


איור 7-5

תנועת האלקטרונים במעגל שמימין

באיור 7-5 מתוארת תנועת האלקטרונים במעגל שבאיור 7-4. נניח כי קבוצת אלקטרונים מגיעה לנקודה B. כיצד ימשיכו האלקטרונים לנוע? דרך הנגד R_1 , דרך הנגד R_2 , או דרך שני הנגדים?

כדי לנתח את תנועת האלקטרונים בנקודה B, ניעזר בדוגמה המוכרת לכולנו: מכוניות הנעות בכביש ונכנסות לצומת (איור 7-6). כשמכונית מגיעה לצומת, היא יכולה לפנות ימינה או שמאלה.



איור 7-6 מכוניות נכנסות לצומת ויוצאות ממנו

נניח כי אין "פקקים" בצומת. במקרה זה מספר המכוניות, הנכנסות לצומת בכל יחידת זמן, שווה למספר המכוניות היוצאות מהצומת באותה יחידת זמן.

נחזור לאיורים 7-4 ו-7-5. בדומה לצומת בכביש, הנקודה B היא **צומת** במעגל, כי חלק מהאלקטרונים יכולים להמשיך לנוע מנקודה זו דרך הנגד R_1 , והחלק האחר – דרך הנגד R_2 . בצומת עצמו לא מצטברים אלקטרונים. כלומר, כל האלקטרונים המגיעים לצומת ביחידת זמן יוצאים מהצומת במשך אותה יחידת זמן, ואין "פקקים" בצומת.

נמשיך את ההשוואה בין מכוניות לאלקטרונים. מכוניות אינן נוצרות על הכביש או בצומת. גם האלקטרונים אינם נוצרים במוליך או בצומת.

ראינו אפוא:

א. אלקטרונים אינם מצטברים בצומת;

ב. אלקטרונים אינם נוצרים בצומת.

משתי עובדות אלה נסיק:

מספר האלקטרונים, היוצאים מהצומת ביחידת זמן, שווה למספר האלקטרונים, הנכנסים לצומת באותה יחידת זמן.

ראינו כי נקודה B באיורים 7-4 ו-7-5 היא צומת במעגל. נסתכל עכשיו בנקודה A שבאיורים אלה. בנקודה זו מתכנסים האלקטרונים מנגד R_1 ומנגד R_2 . משם ממשיכים האלקטרונים לנוע דרך המוליך, לעבר ההדק החיובי של מקור המתח.

גם נקודה A היא צומת. בצומת מתכנסים, או מתפצלים, שני זרמים לפחות. באופן כללי, צומת הוא נקודה במעגל שבה נפגשים לפחות שלושה רכיבים של המעגל (הרכיבים יכולים להיות מקור מתח, נגד, מוליך, מתג או רכיבים אחרים), כך שהדק אחד של כל אחד מהרכיבים – מחובר לצומת.

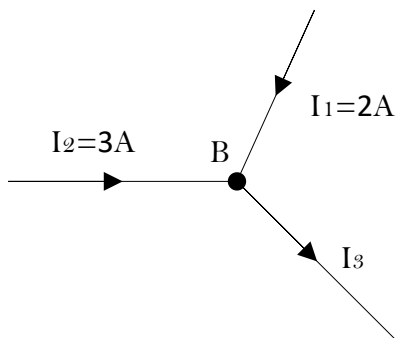
ראינו כי מספר האלקטרונים, היוצאים מהצומת ביחידת זמן, שווה למספר האלקטרונים הנכנסים לצומת באותה יחידת זמן. כזכור, עוצמת הזרם (ובקיצור: הזרם) מוגדרת כסכום המטענים, העוברים ביחידת זמן דרך חתך של מוליך. מכאן נקבל:

סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.

זהו **חוק הזרמים של קירכהוף** (חוק זה נקרא בשמות נוספים: **חוק הצומת** וכן **החוק הראשון של קירכהוף**).

דוגמה 7-1

שלושה מוליכים מחוברים לצומת B שבאיור 7-7. דרך שניים מהם נכנסים לצומת הזרמים I_1 ו- I_2 , ודרך המוליך השלישי יוצא מהצומת הזרם I_3 . חשב את I_3 .



איור 7-7 שני זרמים נכנסים לצומת B, וזרם אחד יוצא מהצומת

פתרון

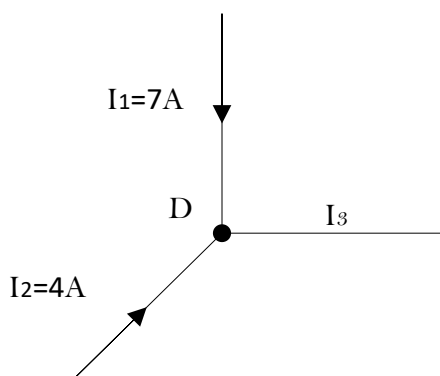
לפי חוק הזרמים של קירכהוף סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת,:

$$I_1 + I_2 = 2A + 3A = 5A$$

סכום הזרמים, היוצאים מהצומת, שווה אף הוא ל- $5A$. באיור 7-7 יש רק זרם אחד (I_3) היוצא מהצומת, כלומר: $I_3 = 5A$.

דוגמה 7-2

- חשבו את גודל הזרם I_3 באיור 7-8.
- סמנו את הכיוון של זרם זה.



איור 7-8

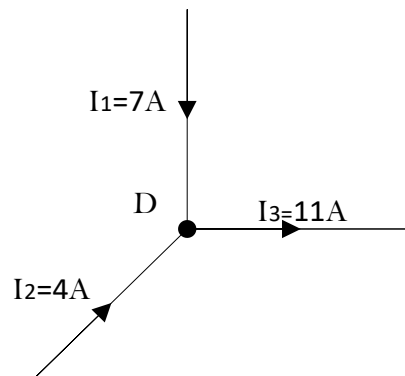
פתרון

א. סכום הזרמים הנכנסים לצומת D הוא

$$I_1 + I_2 = 7A + 4A = 11A$$

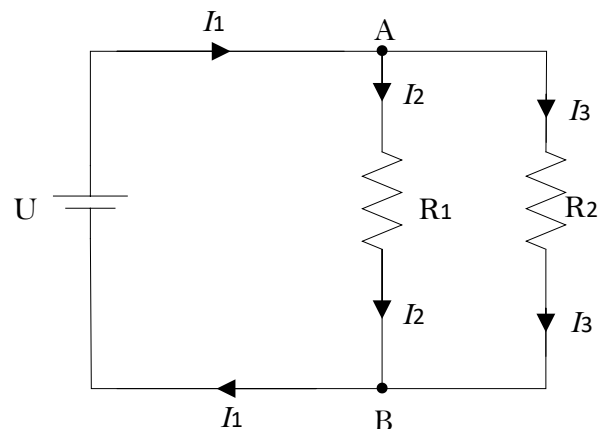
לכן גם סכום הזרמים היוצאים מצומת זה הוא 11A. מכאן נסיק כי הזרם I_3 יוצא מהצומת, וגודל הזרם הוא $I_3 = 11A$.

ב. קיבלנו שהזרם I_3 יוצא מהצומת D, ולכן הכיוון של זרם זה הוא מהצומת – ימינה. כיוון הזרם מסומן באיור 7-9.



איור 7-9

נחזור ונתבונן במעגל, כדוגמת המעגל שבאיור 7-4, שבו הזרם מתפצל בין שני נגדים. מעגל כזה מופיע שוב באיור 7-10, ומסומנים בו הזרמים בחלקי המעגל השונים.



איור 7-10 סימוני זרמים במעגל

נשתמש בחוק הזרמים של קירכהוף כדי למצוא קשרים בין הזרמים השונים. לשם כך נרשום את חוק הזרמים של קירכהוף לצמתים A ו-B.

הזרמים הנכנסים לצומת B: I'_2, I'_3 .

הזרמים היוצאים מהצומת B: I'_1 .

לכן, לפי חוק הזרמים של קירכהוף, מקבלים:

$$I'_1 = I'_2 + I'_3$$

ובצומת A נקבל:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

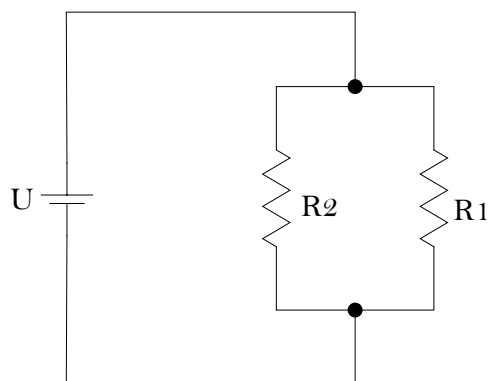
בפרק הבא נדון בקשרים שבין הזרמים הבאים: I_2 ו- I'_2 ; I_3 ו- I'_3 ; I_1 ו- I'_1

תרגול 

שאלה 7-1

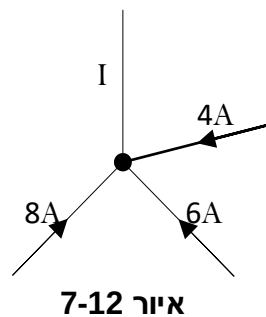
א. כמה צמתים יש במעגל שבאיור 7-1?

ב. כמה צמתים יש במעגל שבאיור 7-11?



שאלה 7-2

חשבו את הזרם I שבאיור 7-12, וקבעו אם הוא נכנס לצומת, או יוצא מהצומת.



שאלה 7-3

שרטטו מעגל חשמלי שאין בו צמתים. במעגל צריכים להיות שלושה נגדים לפחות.

שאלה 7-4

שני זרמים נכנסים לצומת מסוים: $I_1 = 9A$, $I_2 = 3A$. שני זרמים אחרים יוצאים מהצומת: $I_3 = 7A$, $I_4 = 14A$.

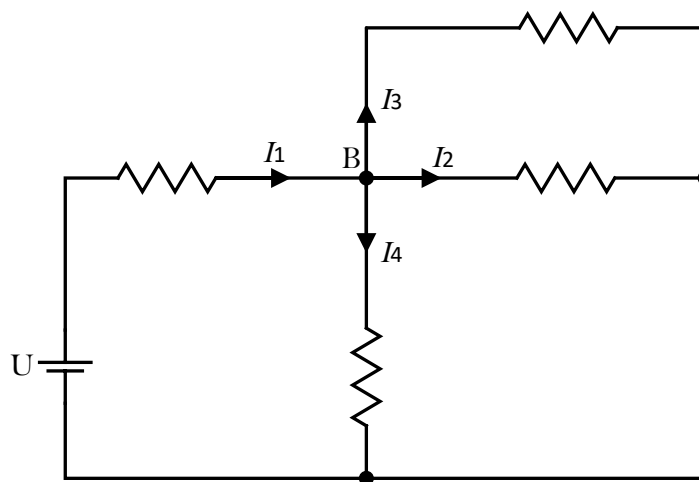
- הוכיחו כי יש לפחות עוד זרם אחד הנכנס לצומת או יוצא ממנו.
- בהנחה כי יש רק זרם נוסף אחד, חשבו אותו, וקבעו אם הוא נכנס לצומת או יוצא ממנו.

שאלה 7-5

- סמנו את כל הטענות הנובעות מחוק הזרמים של קירכהוף.
- במעגל חשמלי לא ייתכן יותר מצומת אחד.
- אם שום זרם לא נכנס לצומת, שום זרם גם לא יוצא מהצומת.
- אם $I_{\text{נכנס}}$ הוא סכום הזרמים הנכנסים לצומת ו- $I_{\text{יוצא}}$ הוא סכום הזרמים היוצאים מאותו צומת, אז $I_{\text{נכנס}} - I_{\text{יוצא}} = 0$.
- קיומו של זרם הנכנס לצומת מחייב גם קיום זרם היוצא מהצומת.

שאלה 7-6

רשמו את חוק הזרמים של קירכהוף לגבי הצומת B שבאיור 7-13.

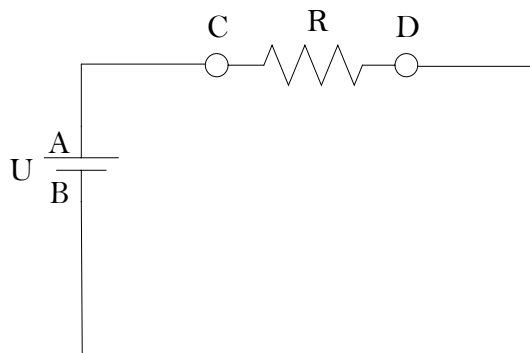


איור 7-13

7.2 חוק המתחים של קירכהוף

מפל מתח

באיור 7-14 חזרנו ושרטטנו מעגל חשמלי פשוט המכיל מקור מתח³ ונגד. למדנו כי כיוון הזרם המוסכם במעגל הוא מההדק החיובי A של המקור, דרך הנגד R, אל ההדק השלילי B של המקור. לצורך ההסבר נניח אפוא שהמטענים במעגל יוצאים מההדק החיובי A של המקור, מגיעים להדק C של הנגד, ומשם ממשיכים עד ההדק B של המקור.

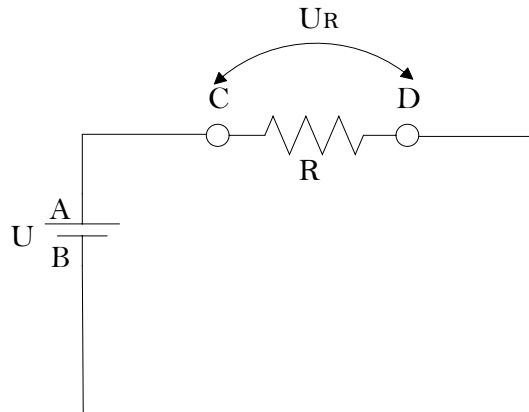


איור 7-14 מעגל חשמלי פשוט

כאשר עובר זרם בנגד, יש התנגשויות בין המטענים הנעים לבין היונים של החומר שממנו עשוי הנגד. כתוצאה מכך, הנגד מתחמם. לנגד נוספת אם כן אנרגיה. אבל אנו יודעים שאנרגיה אינה נוצרת מאליה, אלא רק משנה צורה.

כפי שהסברנו בפרק הקודם, האנרגיה שנהפכה לחום בנגד, היא חלק מהאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שהייתה למטענים בהדק השמאלי C של הנגד. לכן האנרגיה הפוטנציאלית בהדק הימני D של הנגד קטנה מהאנרגיה הפוטנציאלית בהדק השמאלי C של הנגד. וכך הדבר גם לגבי הפוטנציאלים בהדקי הנגד. קיים אפוא **הפרש פוטנציאלים** בין קצות הנגד. אומרים כי יש **ירידת פוטנציאל**, או **נפילת פוטנציאל**, בין נקודה C לבין נקודה D. מאחר שמתח הוא הפרש פוטנציאלים, נקבל כי קיים מתח בין שתי נקודות אלה. אנו אומרים כי בנגד יש מפל מתח. במעגל שבאיור 7-15, מפל המתח של הנגד R מסומן על ידי U_R .

³ בפרק זה נניח כי כל מקורות המתח אינם מגלים התנגדות למעבר המטענים דרכם. מקורות כאלה נקראים **מקורות אידיאליים**. על מקורות לא-אידיאליים נלמד בהמשך.



איור 7-15 סימון מפל מתח על בגד

מה גודלו של מפל המתח של הנגד שבאיור 7-15? אם ידוע לנו כי דרך הנגד, שהתנגדותו R , עבר זרם I , הרי שבין קצות הנגד יש מתח U הנתון, לפי חוק אום, על ידי $U_R = RI$. מכך אנו למדים שגודל מפל המתח על הנגד R הוא $U_R = RI$.

נציין כי אנו מניחים שלמוליכים במעגל אין התנגדות; לכן לפי חוק אום נקבל, שמפל המתח על כל מוליך הוא אפס. מכאן שמפל המתח בין נקודות A ו-C הוא אפס. לכן מבחינה חשמלית, שתי הנקודות נחשבות לאותה נקודה. וכך גם לגבי נקודות B ו-D. ובכן, המתח U_R של הנגד שווה למתח U של המקור.

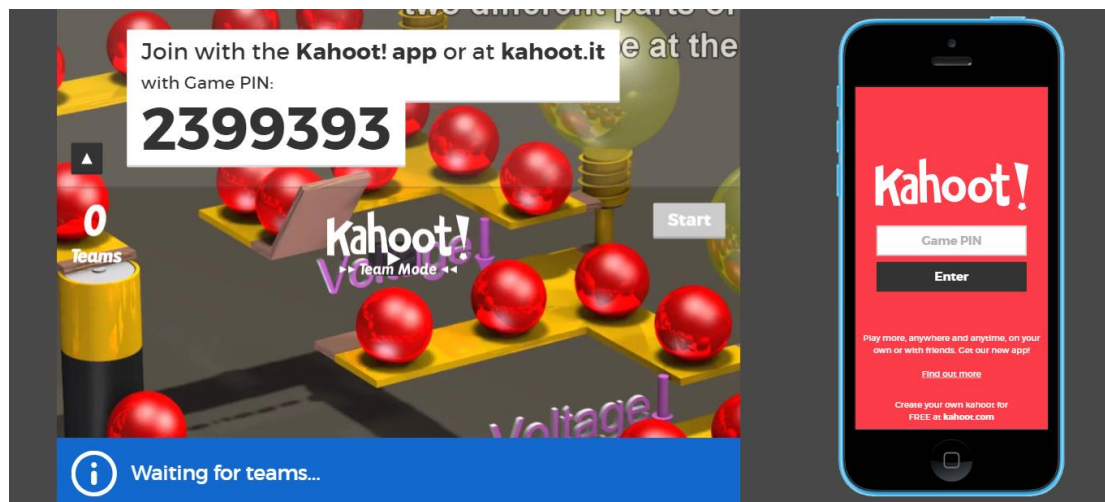
משחק בנושא מעגלים חשמליים

1. עליכם להיכנס לקישור הבא:

<https://play.kahoot.it/#/k/6bdadd8e-5001-40d9-8a68-dfb51354888e>

<https://create.kahoot.it/#/preview/6bdadd8e-5001-40d9-8a68-dfb51354888e>

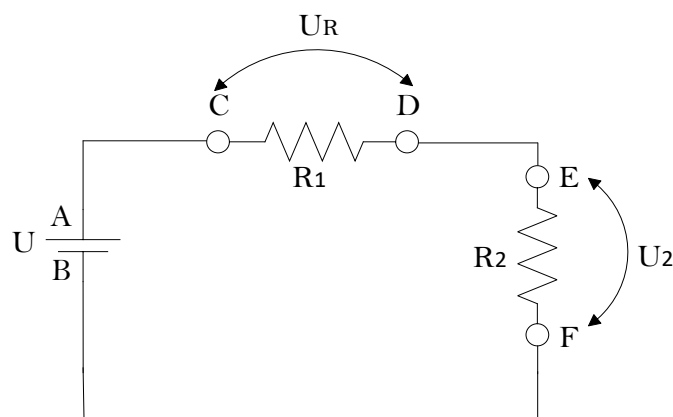
2. לאחר מכן להקיש את הקוד למשחק:



3. לענות על השאלות המופיעות כחלק מהמשחק

מפלי מתח במעגל הכולל נגדים אחדים

עכשיו נתבונן במעגל, שיש בו שני נגדים המחוברים בזה אחר זה, כמתואר באיור 7-16. גם לגבי מעגל זה אנו מניחים שלמוליכים אין התנגדות; ולכן גם במעגל זה הנקודות A ו-C הן אותה נקודה מבחינה חשמלית, וגם הנקודות B ו-F נחשבות לאותה נקודה מבחינה חשמלית.



איור 7-16 מעגל הכולל מקור אחד ושני נגדים, המחוברים בזה אחר זה

חוק המתחים כביטוי לשימור האנרגיה במעגל

נבדוק את שינויי האנרגיה החשמלית במעגל. לשם כך נעקוב אחר התנועה של יחידת מטען חיובית אחת במעגל שבאיור 7-16.

לפי הגדרת המתח והדיון בסעיף 6.1, האנרגיה החשמלית של יחידת המטען החיובית בנקודה A (ההדק החיובי של מקור המתח) גדולה בשיעור U מהאנרגיה החשמלית שלה

בנקודה B (ההדק השלילי של מקור המתח). האנרגיה נתונה על ידי $U \times 1 = U$ (יחידת המטען היא קולון אחד).

יחידת המטען נעה במעגל, ומתנגשת ביונים של הנגד R_1 . כתוצאה מכך, יחידת המטען מאבדת אנרגיה חשמלית בשיעור U_1 (כלומר: $U_1 \times 1$); בהמשך התנועה – יחידת המטען מתנגשת ביונים של הנגד R_2 , ומאבדת אנרגיה חשמלית בשיעור U_2 (כלומר: $U_2 \times 1$); ואז יחידת המטען מגיעה להדק השלילי של מקור המתח.

בשני השלבים שתיארנו, יחידת המטען איבדה את האנרגיה החשמלית שהייתה לה, כלומר היא איבדה אנרגיה חשמלית ששיעורה U (כלומר: $U \times 1$). לפי חוק שימור האנרגיה, נקבל:

$$U = U_1 + U_2$$

ממשוואה זו נסיק לגבי המעגל שבאיור 7-16:

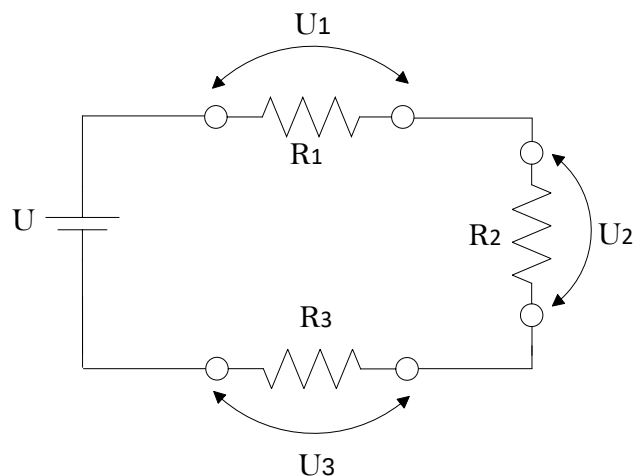
מתח המקור U שווה לסכום מפלי המתח על הנגדים:

$$U = U_1 + U_2$$

התוצאה שקיבלנו חלה על כל מעגל, שבו הנגדים מחוברים בזה אחר זה. באיור 7-17 מתואר מעגל, שכולל שלושה נגדים המחוברים בזה אחר זה. גם במעגל זה נקבל:

מתח המקור U שווה לסכום מפלי המתח על הנגדים:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$



איור 7-17 מעגל הכולל מקור אחד ושלושה נגדים, המחוברים בזה אחר זה

שתי המשוואות האחרונות מבטאות את הכלל הבא:

במעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, סכום מפלי המתח על כל הנגדים – שווה למתח המקור.

כלל זה נקרא **חוק המתחים של קירכהוף**, או **החוק השני של קירכהוף**. בהמשך נלמד להשתמש בשני חוקי קירכהוף - חוק הזרמים וחוק המתחים - כדי לנתח מעגלים חשמליים. אך לפני כן נגדיר מושגים וסימנים שיעזרו לנו לנתח מעגלים בצורה שיטתית ויעילה. התועלת שבמושגים ובסימונים אלה תתברר כשנדון במעגלים מורכבים.

תרגול 

שאלה 7-7

נסחו את חוק המתחים של קירכהוף לגבי המעגל שבאיור 7-14.

שאלה 7-8

הנה נתוני המעגל שבאיור 7-16:

$$U_1 = 6 \text{ V}$$

$$U_2 = 9 \text{ V}$$

חשבו את מתח המקור.

שאלה 7-9

מתח המקור במעגל שבאיור 7-17 – הוא 12 V. המתח על הנגד R_1 הוא 4 V; והמתח על הנגד R_2 הוא 6 V. מהו המתח על הנגד R_3 ?

שאלה 7-10

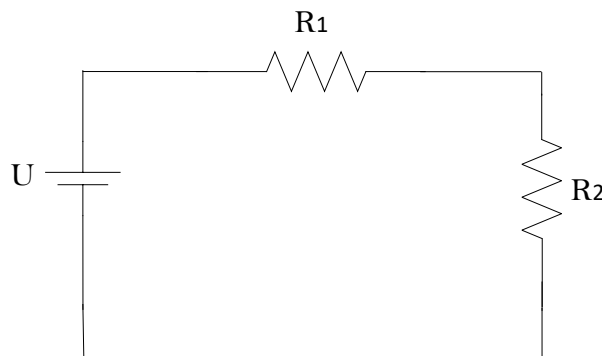
סמנו את הטענות הנכונות:

- סכום המתחים הנכנסים לצומת שווה לסכום המתחים היוצאים מהצומת.
- סכום הזרמים במעגל, שבו לכל הנגדים התנגדות קבועה, שווה למתח המקור.
- סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.

ד. סכום מפלי המתחים על כל הנגדים במעגל, שבו הנגדים מחוברים בזה אחר זה, שווה למתח המקור.

7.3 סימון מתחים במעגלים חשמליים

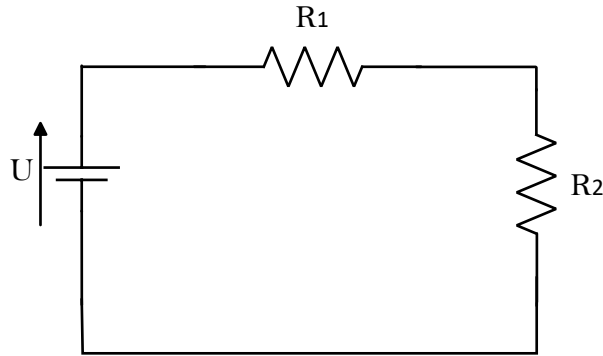
באיור 7-18 מתואר מעגל המכיל מקור מתח ושני נגדים. במעגל כזה יש מתחים שונים: המתח על המקור, המתח על הנגד R_1 והמתח על הנגד R_2 . כדי למצוא את משוואת המתחים במעגל, בהתאם לחוק השני של קירכהוף, נוח להשתמש בסימוני עזר של המתחים, שנסביר בסעיף זה.



איור 7-18 מעגל המכיל מקור מתח ושני נגדים

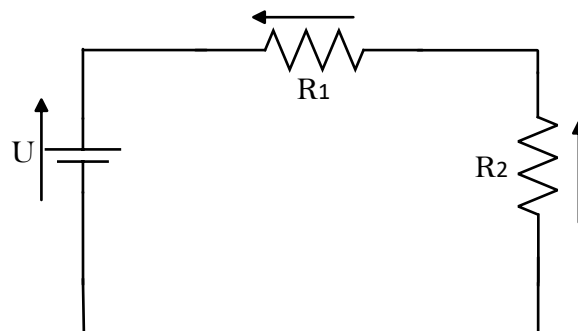
נשתמש בחץ כדי לסמן מתח על רכיב במעגל. החץ משורטט כך שראש החץ פונה אל הדק הרכיב שבו הפוטנציאל גבוה יותר מאשר בהדק האחר, וזנב החץ נמצא קרוב להדק הרכיב שבו הפוטנציאל נמוך יותר⁴. דוגמה לכך מתוארת באיור 7-19. כיוון החץ בציור זה הוא מההדק השלילי של מקור המתח - אל ההדק החיובי של המקור. וכזכור, פוטנציאל ההדק החיובי גבוה יותר מפוטנציאל ההדק השלילי.

⁴ יש המסמנים פוטנציאל גבוה על ידי הסימן "+"; ופוטנציאל נמוך יותר על ידי "-".



איור 7-19 סימון מתח על מקור המתח במעגל

בהתאם להסברנו, סומנו חצים ליד הנגדים במעגל שבאיור 7-20. הכיוון של כל חץ כזה - הפוך לכיוון זרם בכל נגד, כי כיוון הזרם בנגד הוא מפוטנציאל גבוה לנמוך.



איור 7-20 כיוון הזרם וסימוני מתחים במעגל חשמלי

נציין כי בניגוד לכיוון הזרם בנגד, כיוון הזרם במקור מתח הוא מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה. מכאן נסיק כי הנגדים במעגל מתנהגים באופן "הפוך" ממקורות המתח: מקור המתח מספק אנרגיה למעגל, ואילו הנגדים צורכים אותה. נזכיר כאן שיש רכיבים היכולים לשמש בתנאים מסוימים כצרכנים (כלומר, צורכי אנרגיה), ואילו בתנאים אחרים הם משמשים כמקורות (כלומר, מספקים אנרגיה למעגל).

שאלה לדיון

מצבר המכונית – צרכן או מקור מתח?

המצבר במכונית הוא דוגמה לרכיב שבתנאים מסוימים הוא צרכן, ובתנאים אחרים הוא מקור מתח. המצבר נטען (כלומר, מקבל אנרגיה) כשהמנוע פועל, ואחר כך מספק זרם (כלומר, מחזיר את האנרגיה שקיבל) להפעלת המערכות השונות במכונית, כגון הפנסים, מערכת ההצתה במנוע בנזין ועוד.

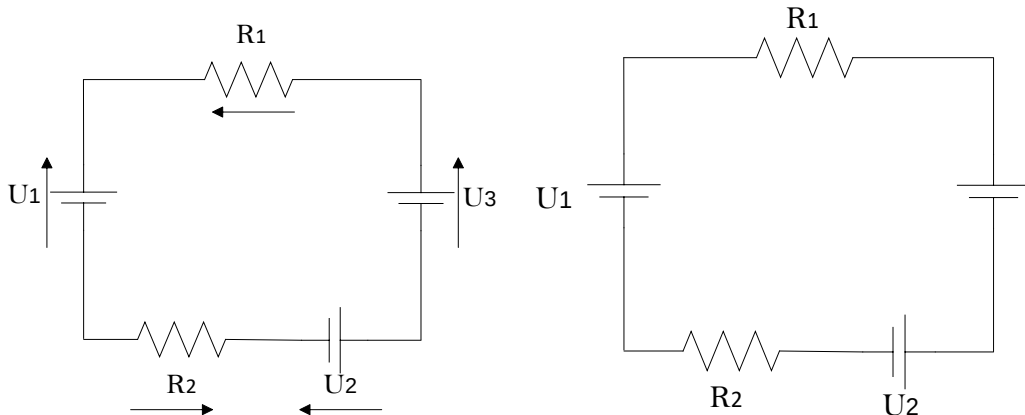
אם כן, כשהמצבר נטען, הוא משמש כצרכן; וכשהמצבר מספק זרם, הוא משמש כמקור מתח.

כאשר רכיב, כדוגמת המצבר הנטען במכונית, משמש כצרכן, כיוון חץ הזרם הפוך לכיוון החץ המסמן את המתח של הרכיב; וכאשר רכיב כזה משמש כמקור המספק אנרגיה חשמלית, כיוון חץ הזרם הוא ככיוון החץ המסמן את המתח של הרכיב.

רישום משוואת המתחים במעגל

עד עכשיו עסקנו במעגלים פשוטים למדי. כאשר נעסוק במעגלים מורכבים יותר, נשתמש בשיטת סימון שתסייע לרישום נוח יותר של משוואת המתחים של קירכהוף.

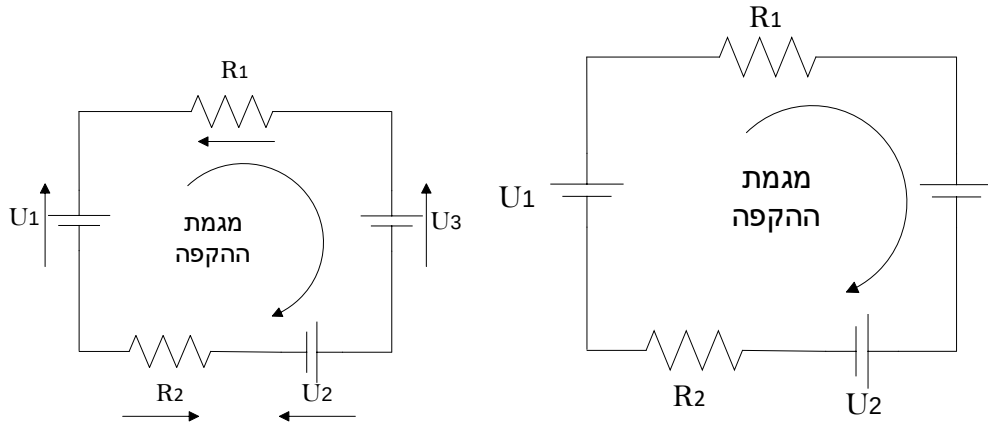
נסביר שיטת סימון זו בעזרת המעגל שבאיור 7-21. מעגל זה מכיל שלושה מקורות מתח ושני נגדים. באיור 7-22 מסומנים החצים ליד רכיבי המעגל. בהמשך נלמד לקבוע את כיוון הזרם במעגל כזה, כך שאפשר יהיה לדעת את כיווני החצים שליד הנגדים.



איור 7-22
חיצים ליד רכיבי המעגל

איור 7-21
מעגל המכיל מקורות ונגדים

נקיף עכשיו את המעגל במגמה מסוימת. אנו יכולים לבחור אם להקיף את המעגל במגמת התנועה של מחוגי השעון - או במגמה הפוכה. המגמה שתיבחר תיקרא **מגמת ההקפה**. באיור 7-23 בחרנו במגמת התנועה של מחוגי השעון כמגמת ההקפה, ובאיור 7-24 הוספנו את החצים ליד רכיבי המעגל. אין קשר בין מגמת ההקפה שאנו בוחרים, לבין כיווני חצי המתח.

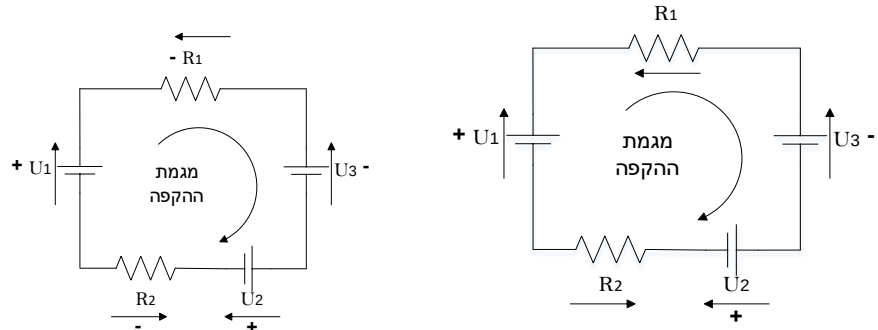


איור 7-24
מגמת ההקפה והחיצים ליד רכיבי המעגל

איור 7-23
מגמת ההקפה של המעגל

נסמן באופן הבא כל מקור מתח שנפגוש בעת ההקפה:

אם כיוון החץ ליד מקור המתח הוא כמגמת ההקפה, נרשום את הסימן "+" ליד מקור זה, כפי שמתואר באיור 7-25; ואם כיוון החץ ליד מקור המתח הפוך למגמת ההקפה, נרשום את הסימן "-" ליד מקור זה.



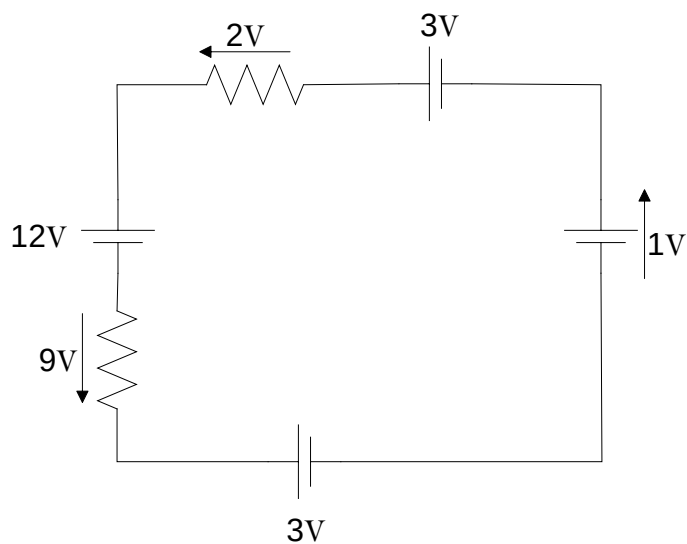
איור 7-26
סימוני "+" או "-" ליד כל נגד במעגל

איור 7-25
סימוני "+" או "-" ליד כל מקור מתח במעגל

באופן דומה נסמן "+" או "-" ליד כל נגד במעגל, וזאת בהתאם למגמת ההקפה ולכיוון החץ שליד הנגד המתאים. דוגמה לסימון זה מתוארת באיור 7-26.

דוגמה 7-3

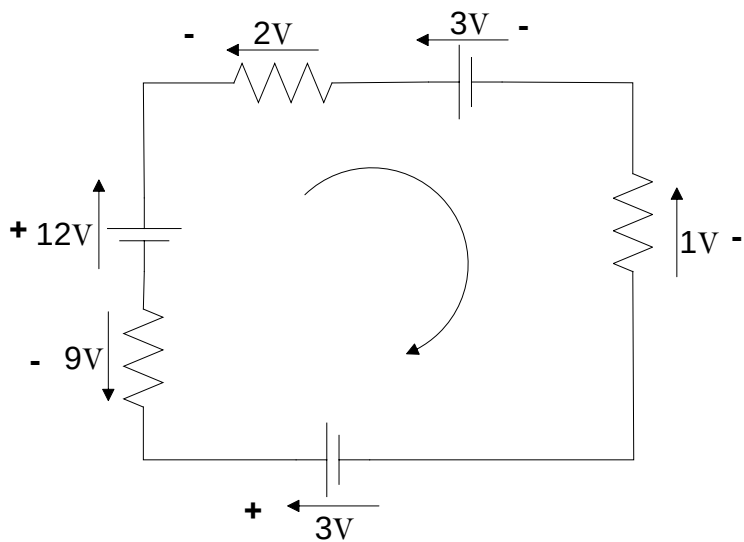
חשבו את הסכום הכולל של המתחים במעגל שבאיור 7-27.



איור 7-27

פתרון

באיור 7-28 בחרנו את מגמת ההקפה כמגמת התנועה של מחוגי השעון. כן הוספנו את החצים ליד מתחי המקורות. בהתאם לכלל שקבענו, סומנו "+" או "-" ליד כל אחד ממתחים אלה.



איור 7-28

סכום המתחים הוא:

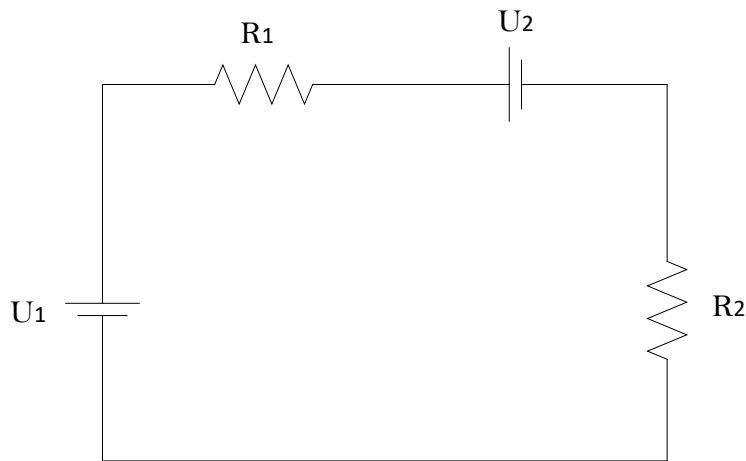
$$(+12) + (-2) + (-3) + (-1) + (+3) + (-9) = 12 - 2 - 3 - 1 + 3 - 9 = 0$$

התוצאה - סכום המתחים שווה לאפס - אינה מקרית. היא מתאימה לחוק המתחים של קירכהוף. נראה זאת בסעיף הבא.

תרגול 

שאלה 7-11

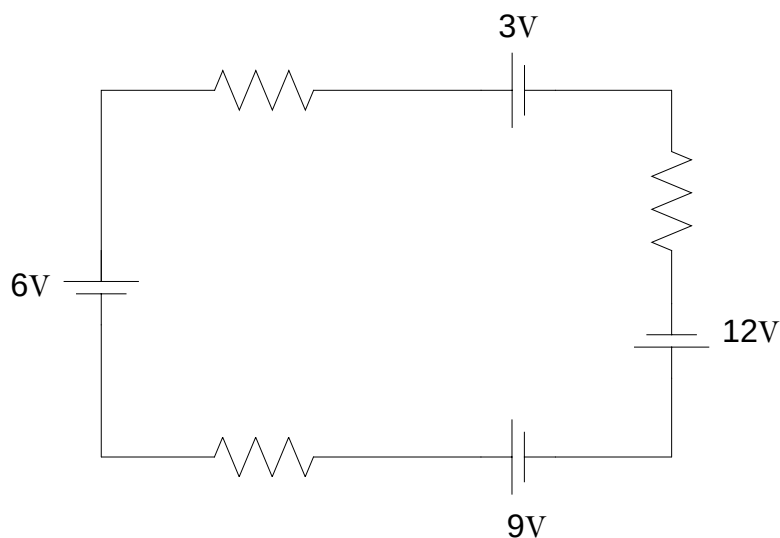
סמנו באמצעות חץ את המתח ליד כל אחד מהמקורות שבאיור 7-29.



איור 7-29

שאלה 7-12

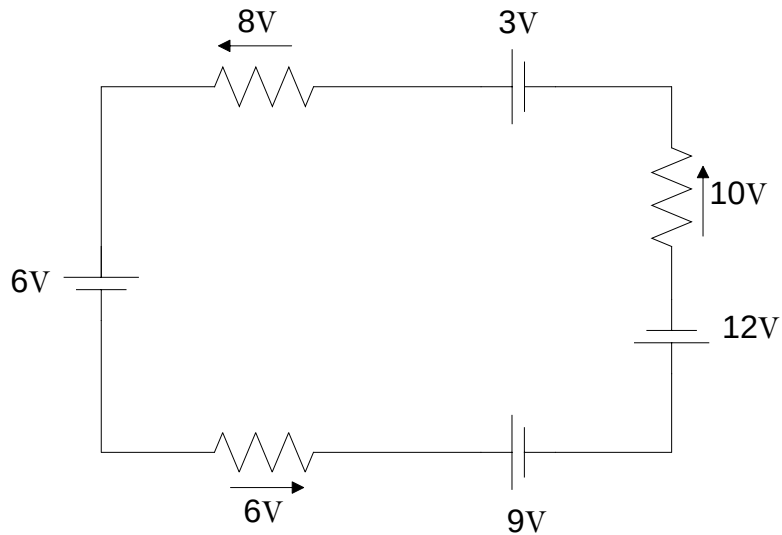
- בחרו וסמנו את מגמת ההקפה של המעגל המתואר באיור 7-30.
- סמנו חץ ליד כל מקור מתח באיור 7-30, כך שכל חץ יצביע על הדק המקור שהפוטנציאל שלו גבוה יותר מזה של ההדק השני.
- סמנו "+" או "-" ליד כל אחד ממקורות המתח במעגל.
- חשבו את סכום מתחי המקורות במעגל, תוך התחשבות בסימן שליד כל מקור.



איור 7-30

שאלה 7-13

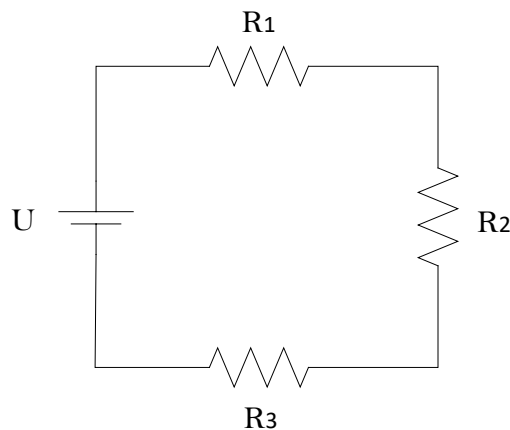
- בחרו וסמנו את מגמת ההקפה של המעגל המתואר באיור 7-31.
- סמנו "+" או "-" ליד כל אחד מהנגדים במעגל.
- חשבו את סכום מתחי הנגדים במעגל, תוך התחשבות בסימן שליד כל נגד.



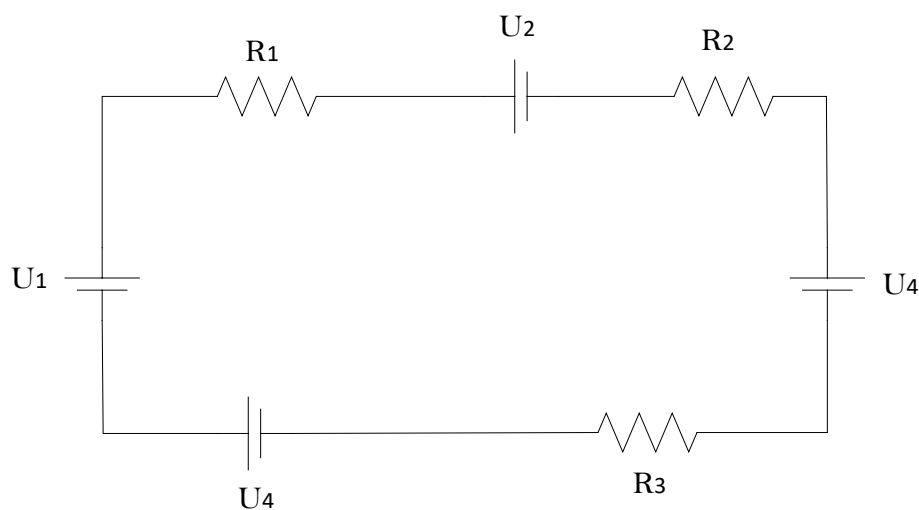
איור 7-31

7.4 הצורה הכללית של חוק המתחים של קירכהוף

בסעיף 7.2 ניסחנו את חוק המתחים של קירכהוף: במעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, סכום מפלי המתח של כל הנגדים שווה למתח המקור. האם חוק המתחים של קירכהוף נכון רק לגבי מעגלים שבהם כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, כמו במעגל שבאיור 7-32?



איור 7-32
מעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה



איור 7-33
מעגל המכיל כמה מקורות מתח וכמה נגדים

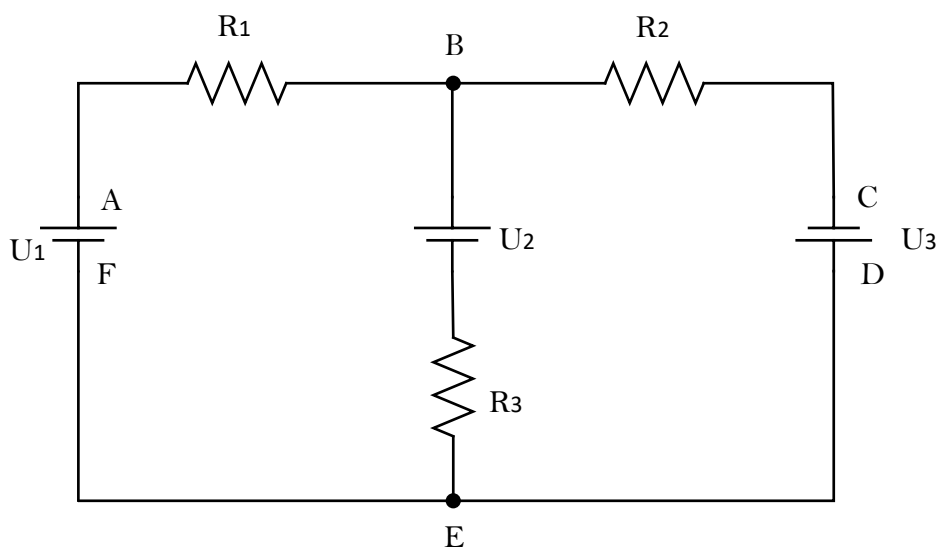
באיור 7-33 נתון מעגל שמכיל כמה מקורות מתח וכמה נגדים. נבדוק את חוק המתחים של קירכהוף - גם לגבי מעגל כזה, שבו הנגדים אינם מחוברים בזה אחר זה.

החוג במעגל חשמלי

אפשר להשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגבי כל מעגל. אם נתון מעגל מורכב, אפשר לחלק אותו לחלקים שונים, ולהשתמש בחוק המתחים לגבי כל חלק בנפרד. כדי לזהות חלקים אלה, נסביר מושג חדש: **חוג**.

לצורך ההסבר, נבחר נקודה כלשהי במעגל שבאיור 7-34. הנקודה שבחרנו היא A. עכשיו ננוע לאורך המעגל החשמלי, עד שנחזור להתחלה, כך שנעבור רק פעם אחת דרך כל נקודה. המסלול הסגור שבחרנו הוא:

$$A \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow A$$



איור 7-34

מסלול סגור זה במעגל הוא דוגמה לחוג. עכשיו נגדיר חוג:

הגדרה

- חוג** הוא מסלול סגור כלשהו במעגל חשמלי, שלגביו מתקיימים התנאים הבאים:
- המסלול מתחיל בנקודה מסוימת במעגל, ומסתיים באותה נקודה עצמה.
 - לאורך המסלול אנו עוברים רק פעם אחת דרך כל נקודה (פרט לנקודת ההתחלה, כמובן).

הנה דוגמה נוספת לחוג במעגל שבאיור 7-34.

$$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$$

במעגל זה יש חוג נוסף:

$$B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B$$

עכשיו ננסח את חוק המתחים של קירכהוף בצורתו הכללית:

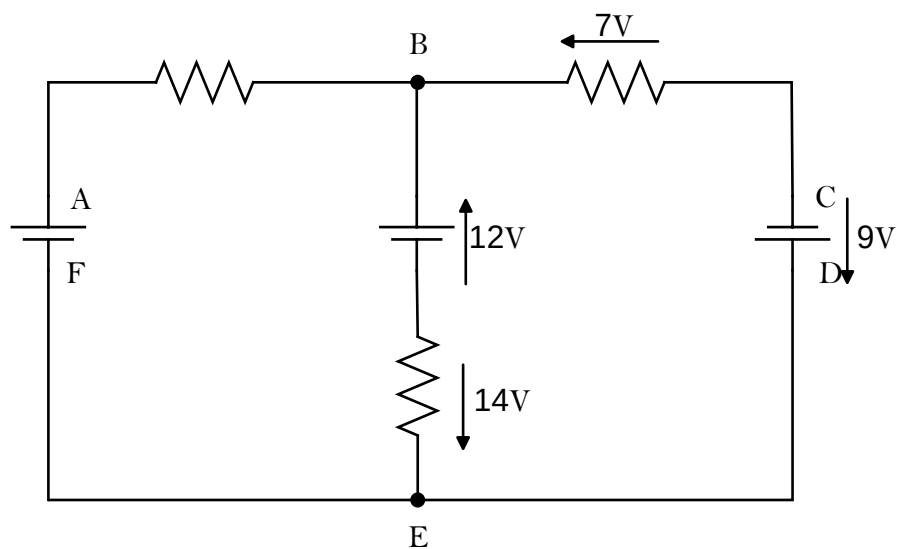
הגדרה 

חוק המתחים של קירכהוף

סכום המתחים (כולל הסימנים המתאימים שלהם) בכל אחד מהחוגים של מעגל חשמלי הוא אפס.

דוגמא 7-4 

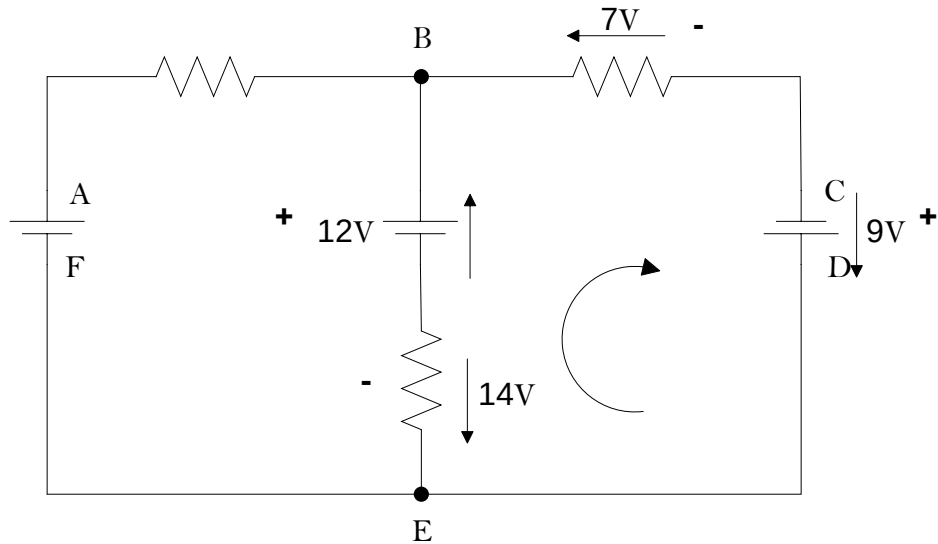
הראו כי סכום המתחים (כולל הסימנים המתאימים) הוא אפס בחוג BEDCB שבאיור 7.37.



איור 7-35

פתרון

באיור 7-36 מגמת ההקפה בחוג BEDCB מסומנת בחץ. כן סומנו חצים ליד מקורות המתח והנגדים, ובהתאם לכך סומן "+" או "-" ליד כל מקור מתח וליד כל נגד בחוג זה.



איור 7-36

סכום המתחים בחוג BEDCB הוא:

$$(+12) + (-7) + (+9) + (-14) = 12 - 7 + 9 - 14 = 0$$

התוצאה שקיבלנו מתאימה לחוק המתחים של קירכהוף.

מחוק המתחים של קירכהוף אפשר להסיק, כי **סכום מתחי המקורות (תוך הקפדה על כיווני החצים) בחוג - שווה בגודלו לסכום מפלי המתח בחוג זה**. נדגים זאת לגבי החוג BEDCB במעגל שבאיור 7-36.

סכום מתחי המקורות בחוק:

$$12 + 9 = 21 \text{ V}$$

סכום מפלי המתח בחוג:

$$-7 + (-14) = -7 - 14 = -21 \text{ V}$$

סכום מתחי המקורות בחוג זה שווה בגודלו - והפוך בסימנו - לסכום מפלי המתח בחוג. תוצאה כזאת תתקבל לגבי כל חוק וחוג בכל מעגל חשמלי.

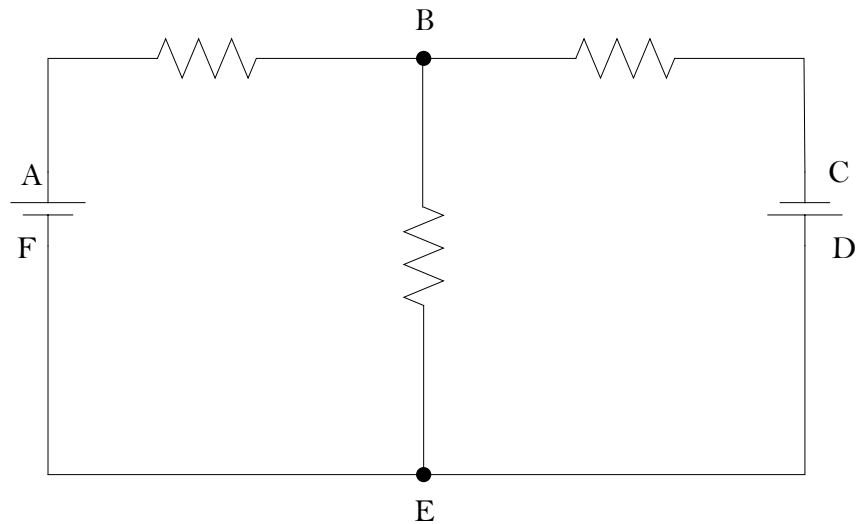
תרגול 

שאלה 7-14

סמנו את כל החוגים במעגל שבאיור 7-37:

א. ABEFA

- ב. FEBCD
- ג. ABCDEFA
- ד. BCDEB
- ה. ABECD
- ו. DEFAB



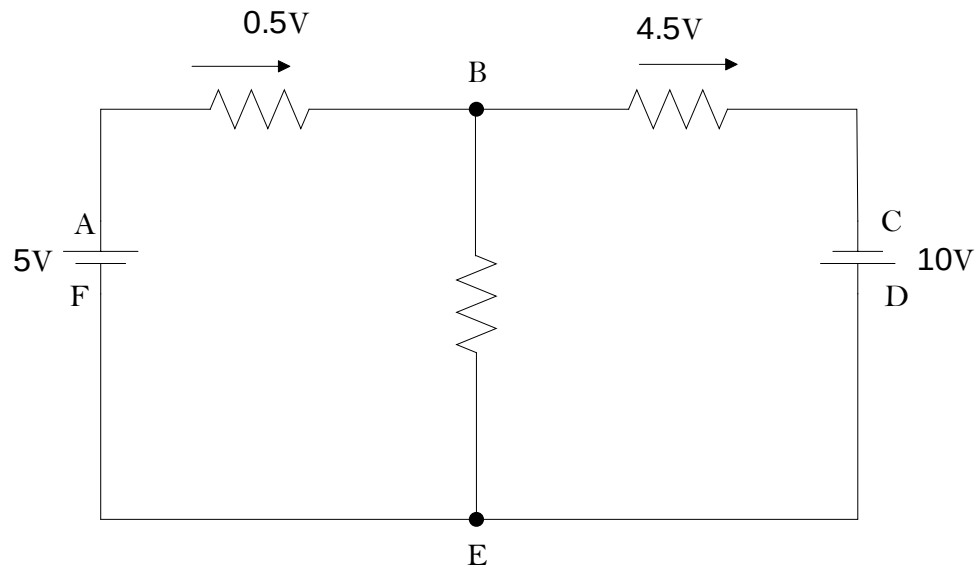
איור 7-37

שאלה 7-15

מהו סכום המתחים בחוג ABEFA שבאיור 7-36? נמקו.

שאלה 7-16

- א. חשבו את סכום מתחי המקורות בחוג ABCDEFA שבאיור 7-38.
- ב. חשבו את סכום מפלי המתח בחוג זה.



איור 7-38

שאלה 7-17

- א. כמה חוגים יש במעגל שבאיור 7-32?
- ב. כמה חוגים יש במעגל שבאיור 7-33?

שאלה 7-18

סמנו את כל הטענות הנכונות:

- א. חוק הזרמים של קירכהוף קובע כי סכום הזרמים בכל חוג של מעגל חשמלי שווה לאפס.
- ב. חוג הוא מעגל חשמלי שכולל לפחות שני מקורות מתח.
- ג. לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום מתחי מקורות המתח בחוג - שווה בגודלו לסכום המתחים על הנגדים באותו חוג.
- ד. כל מעגל חשמלי מכיל לפחות שני חוגים.
- ה. לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום המתחים בכל חוג שווה לאפס.

סיכום

- צומת הוא נקודה במעגל שבו נפגשים לפחות שלושה מהרכיבים במעגל (הדק אחד של כל רכיב).
- חוק הזרמים של קירכהוף: סכום הזרמים הנכנסים לצומת - שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.
- חוק המתחים של קירכהוף: במעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, סכום מפלי המתח של כל הנגדים - שווה למתח המקור.
- כיוון חץ המתח בנגד - הפוך לכיוון חץ הזרם. אבל במקור מתח (במעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה) - כיוון חץ המתח זהה לכיוון חץ הזרם. מוסיפים חץ ייחוס למעגל, וכיוון חץ זה הוא שרירותי. בהתאם לכיוון חץ הייחוס וחץ מתח, מוסיפים סימן מתאים ("+" או "-") לכל חץ מתח.
- חוג סגור (ובקיצור: חוג) הוא מסלול כלשהו לאורך מעגל חשמלי; החוג הסגור מתחיל בנקודה מסוימת במעגל, ומסתיים באותה נקודה עצמה, כשלאורך המסלול עוברים פעם אחת דרך כל נקודה (פרט לנקודת ההתחלה, כמובן).
- הצורה הכללית של חוק המתחים של קירכהוף: הסכום האלגברי של כל המתחים, בחוג סגור כלשהו במעגל חשמלי, הוא אפס.

פרק 8. מעגלים טוריים, מקביליים

ומעורבים

בפרק הקודם למדנו את שני חוקי קירכהוף. בפרק זה ניעזר בחוקי קירכהוף כדי לפתור מעגלים המכילים מקור מתח אחד וכמה נגדים. בפרק הבא ניעזר בחוקים אלה כדי לפתור מעגלים מורכבים המכילים כמה חוגים.

8.1 מעגל טורי

נתבונן במעגל שבאיור 8-1, שבו שני הנגדים R_1 ו- R_2 מחוברים בזה אחר זה. ניוכח מיד כי במעגל כזה, הזרם הנכנס לנקודה כלשהי שווה לזרם היוצא מאותה נקודה. מכאן נסיק, שאותו זרם זורם לאורך המעגל כולו.

כדי להיווכח בכך, נשתמש בחוק הזרמים של קירכהוף. נתבונן בנקודה A^5 כלשהי במעגל, ונבדוק אם הזרם I_1 , שנכנס לנקודה זו, שווה לזרם I'_1 היוצא ממנה. לשם כך נתבונן תחילה במעגל שבאיור 8-2.

במעגל הזה הוספנו את הנגד R_3 , שבו זורם הזרם I_3 . עכשיו הנקודה A היא נקודת צומת. לפי חוק הזרמים של קירכהוף, סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת. נשתמש בחוק הזרמים לגבי הצומת A, ונקבל:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

ברור כי קשר זה יתקיים, גם אם נגדיל את ההתנגדות R_3 יותר ויותר. עתה נניח שאנו מנתקים את הנגד R_3 מהמעגל שבאיור 8-2. ניתוק R_3 מהמעגל, הרי זה כאילו מניחים במקומו נגד בעל התנגדות גדולה עד מאוד (אינסופית), כך שזרם אינו יכול לעבור דרכו. כלומר, מקבלים:

$$I_3 = 0$$

גם במקרה זה, חוק הזרמים לגבי הנקודה A עדיין מתקיים, ולכן נקבל:

$$I_1 = I_2$$

⁵ הנקודה A במעגל מייצגת חתך של התיל המוליך, וקו במעגל מייצג תיל מוליך.

אבל כאשר מנתקים את הנגד R_3 מהמעגל שבאיור 8-2, מקבלים את המעגל שבאיור 8-1. נסיק מכך כי הזרם I_1 , הנכנס לנקודה A במעגל שבאיור 8-1, שווה לזרם I'_1 היוצא מנקודה זו. (נזכיר כי אנו מתכוונים לזרם הנכנס לחתך מסוים של המוליך - חתך המיוצג על ידי הנקודה A - ולזרם היוצא מחתך זה).

מסקנה זו נכונה לא רק לנקודה אחת במעגל חשמלי, אלא לכל נקודה שאינה נקודת צומת במעגל: הזרם הנכנס לנקודה במעגל חשמלי, שאינה נקודת צומת, שווה לזרם היוצא מנקודה זו.

במעגל שבאיור 8-1 אין כלל נקודות צומת, ולכן אותו זרם זורם לאורך כל המעגל הזה. מכאן שהזרם הנכנס לנגד R_1 במעגל זה שווה לזרם היוצא מהנגד. וכך הדבר גם לגבי הנגד R_2 . המסקנה שהסקנו לגבי זרם הנכנס לנקודה ויוצא ממנה נכונה אם כן גם לכל נגד:

הזרם, הנכנס לנגד במעגל חשמלי, שווה לזרם היוצא ממנו.

נחזור ונשרטט מעגל, שיש בו מקור מתח ושני נגדים מחוברים בזה אחר זה (איור 8-3).

במעגל זה יש חוג אחד בלבד; שני הנגדים מחוברים בזה אחר זה, ואין ביניהם צמתים. במקרה כזה אומרים כי **הנגדים מחוברים בחיבור טורי**, ובקיצור: **הנגדים מחוברים בטור**, או: **הנגדים בטור**. מעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בטור, נקרא **מעגל טורי**.

אם כן, המעגל שבאיור 8-3 הוא מעגל טורי. ראינו כי הזרם שווה לאורך כל המעגל הזה. מסקנה זו נכונה לגבי כל מעגל טורי:

במעגל טורי – אותו זרם זורם לכל אורך המעגל.

נסיק מכאן:

כאשר נגדים מחוברים בטור, זורם בהם אותו זרם.

ההתנגדות השקולה של נגדים בטור

באיור 8-4 מופיע שוב מעגל ובו שני נגדים (R_1 ו- R_2) המחוברים בטור.

כפי שהסברנו בסעיפים קודמים, הנקודה B והנקודה C באיור 8-4 הן אותה נקודה מבחינה חשמלית. לכן המעגל שבאיור 8-4 והמעגל שבאיור 8-5 זהים מבחינה חשמלית. פירוש הדבר שבשני המעגלים יש אותו זרם I, ואותו מתח קיים בין הנקודות A ו-D בשני המעגלים. נבדוק עכשיו את ההתנגדות לתנועה ש"מרגיש" כל מטען הנע במעגל. ההתנגדות לתנועת מטען בין הנקודות A ו-D שווה להתנגדות לתנועתו, שמגלה הנגד R_1 , בתוספת ההתנגדות לתנועתו שמגלה הנגד R_2 . אם כן, ההתנגדות ש"מרגיש" המטען בין הנקודות A ו-D שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים R_1 ו- R_2 . נסמן באמצעות R_{eq} את ההתנגדות שכל מטען "מרגיש" בין הנקודות A ו-D, ונקבל:

$$eq\text{-קיזור של equivalent (שקול)} \quad R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (8-1)$$

הנגד, שהתנגדותו R_{eq} , **שקול** לשני הנגדים R_1 ו- R_2 המחוברים בטור; שכן אם נחליף את שני הנגדים R_1 ו- R_2 , המחוברים בטור, בנגד יחיד שהתנגדותו R_{eq} , לא נשנה דבר מבחינת ההתנגדות לתנועת המטענים הנעים במעגל. לא יחול שינוי בזרם I, וגם המתח בין הנקודות F ו-G (שהוא המתח בין הדקי מקור המתח) לא ישתנה כלל.

המעגל, המתקבל על ידי החלפת שני הנגדים בנגד השקול שלהם, נקרא **מעגל שקול** למעגל המקורי. באיור 8-6 מופיע המעגל השקול למעגל שבאיור 8-4. ההתנגדות R_{eq} , השקולה להתנגדות כל הנגדים במעגל, נקראת **ההתנגדות השקולה של המעגל**, ובקיצור: **התנגדות המעגל**.

נסיק:

ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של שני הנגדים.

דוגמה 8-1

שני נגדים מחוברים בטור. התנגדות אחד הנגדים היא 16Ω , והתנגדות הנגד השני - 50Ω . מהי ההתנגדות השקולה של שני הנגדים?

פתרון

ההתנגדות השקולה של שני הנגדים שווה לסכום ההתנגדויות שלהם. נתון כי $R_2 = 50\Omega$, $R_1 = 16\Omega$, ולפי משוואה (8-1), נקבל:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 16 + 50 = 66\Omega$$

ההתנגדות השקולה של שני הנגדים היא 66Ω .

בדרך שבה מצאנו את ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים בטור, נוכל למצוא גם את ההתנגדות השקולה של כל מספר נגדים המחוברים בטור. נסיק:

ההתנגדות השקולה של מספר כלשהו של נגדים, המחוברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים.

אם ידועים לנו הסכום U של מפלי המתח של הנגדים במעגל טורי, והזרם I במעגל זה, נוכל לדעת את גודל ההתנגדות השקולה של נגדים אלה בעזרת שימוש בחוק אום. נקבל:

$$(8-2) \quad R_{eq} = \frac{U}{I}$$

הסכום U של מפלי המתח של הנגדים במעגל זה שווה למתח המקור.

דוגמה 8-2

במעגל טורי יש ארבעה נגדים זהים המחוברים בטור למקור מתח של $12V$. התנגדות כל אחד מהנגדים היא 75Ω . מהו הזרם במעגל?

פתרון

ההתנגדות השקולה של הנגדים היא:

$$R_{eq} = 75 + 75 + 75 + 75 = 75 \times 4 = 300\Omega$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום מפלי המתח של הנגדים שווה למתח המקור: $U=12V$. מכאן שהזרם במעגל הוא, לפי משוואה (8-2):

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{12}{300} = 0.04A$$

מהדוגמה האחרונה אנו רואים שכאשר נתונים ארבעה נגדים זהים המחוברים בטור, כך שהתנגדות כל אחד מהם היא R , כלומר:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

ההתנגדות השקולה שלהם נתונה על ידי:

$$R_{eq} = 4R$$

באופן כללי, כאשר נתונים n נגדים זהים המחוברים בטור, כך שהתנגדות כל אחד מהם היא R , ההתנגדות השקולה שלהם היא:

$$(8-3) \quad R_{eq} = nR$$

הקשר בין המתחים על נגדים, המחוברים בטור

ראינו כי כאשר נגדים מחוברים בטור, בכולם זורם אותו זרם. עכשיו נרשום את הקשר בין גודל המתחים של הנגדים המחוברים בטור לבין התנגדויות הנגדים:

היחס בין המתחים על נגדים, המחוברים בטור, שווה ליחס בין התנגדויות הנגדים.

כדי להיווכח בנכונות הקשר, נסתכל שוב באיור 8-4. לפי חוק אום, המתח U_1 של הנגד R_1 הוא:

$$U_1 = IR_1$$

והמתח U_2 של הנגד R_2 הוא:

$$U_2 = IR_2$$

מכאן נקבל:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2}$$

ומכאן:

$$(8-4) \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

כלומר, יחס המתחים של נגדים המחוברים בטור הוא כיחס ההתנגדויות של נגדים אלה.

דוגמה 8-3

נתון המעגל שבאיור 8-7, ובו $R_2 = 16\Omega$, $R_1 = 8\Omega$. כן נתון שהמתח של הנגד R_1 הוא $12V$. מהו המתח של הנגד R_2 ?

פתרון

נשתמש במשוואה (8-4):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$\frac{12}{U_2} = \frac{8}{16}$$

ומכאן:

$$U_2 = \frac{12 \times 16}{8} = 24V$$

המתח של הנגד R_2 הוא 24V.

הקשר בין הספקי צרכנים, המחוברים בטור, לבין הספק המקור

כדי למצוא את הקשר בין הספקי צרכנים המחוברים בטור, לבין הספק המקור, נסתכל במעגל שבאיור 8-8.

במעגל טורי זה יש שני צרכנים (או נגדים) המחוברים בטור, ולכן זרם המעגל | זורם בכל אחד מהם. ההספק החשמלי נתון במשוואה (3-6): $P=IU$. מכאן שההספק P_1 של הצרכן R_1 הוא:

$$P_1 = IU_1$$

ההספק P_2 של הצרכן R_2 הוא:

$$P_2 = IU_2$$

מתח המקור הוא U , והספק המקורי P (הנקרא גם הספק המעגל) נתון על ידי:

$$P = IU$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף:

$$U = U_1 + U_2$$

ולכן הספק המקור הוא:

$$P = IU = I(U_1 + U_2) = IU_1 + IU_2$$

אבל ראינו כי הספק הצרכן R_1 הוא $P_1 = IU_1$, והספק הצרכן R_2 הוא $P_2 = IU_2$. מכאן נקבל:

$$P = IU = I(U_1 + U_2) = IU_1 + IU_2 = P_1 + P_2$$

כלומר:

$$(8-5) \quad P = P_1 + P_2$$

מצאנו כי במעגל טורי, המכיל שני צרכנים, הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים. באופן כללי מקבלים:

במעגל טורי – הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים.

טענה זו נכונה לכל מספר של צרכנים, ולא רק לשני צרכנים.

דוגמה 8-4

- א. חשבו את ההספק של כל צרכן במעגל שבאיור 8-9.
 ב. חשבו את סכום ההספקים של הצרכנים במעגל זה.
 ג. מהו הספק המקור במעגל זה?

פתרון

א. שני הצרכנים במעגל מחוברים בטור. ההתנגדות השקולה שלהם R_{eq} היא:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 50 + 60 = 110\Omega$$

הזרם I במעגל נתון על ידי:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{220}{110} = 2A$$

נחשב את הספקי הצרכנים:

הספק של צרכן, שהתנגדותו R , נתון במשוואה (6-3):

$$P = IU = I^2 R$$

כאשר I הוא הזרם בצרכן, ו- U הוא המתח של הצרכן.

מכאן שההספק P_1 של הצרכן R_1 הוא:

$$P_1 = I^2 R_1 = 2^2 \times 50 = 4 \times 50 = 200W$$

וההספק P_2 של הצרכן R_2 הוא:

$$P_2 = I^2 R_2 = 2^2 \times 60 = 4 \times 60 = 240W$$

ב. סכום הספקי הצרכנים הוא לפי המשוואה (8-5):

$$P_1 + P_2 = 200 + 240 = 440W$$

ג. מתח המקור הוא 220V, וזרם המעגל הוא 2 A. הספק המקור הוא:

$$P = IU = 2 \times 220 = 440W$$

אנו רואים כי הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים.

תרגול

שאלה 8-1

סמנו את כל המשפטים הנכונים.

- א. בכל הנקודות של מעגל טורי זורם אותו זרם.
 ב. במעגל טורי אין מפל מתח של נגדים.

- ג. יחס הזרמים בנגדים במעגל טורי הוא כיחס ההתנגדויות של הנגדים.
ד. יחס המתחים של הנגדים במעגל טורי הוא כיחס ההתנגדויות של הנגדים.

שאלה 8-2

"לנגד יש התנגדות, ולכן הזרם היוצא מנגד קטן מהזרם הנכנס לנגד."
נכון או לא?

שאלה 8-3

הזרם הנכנס לנקודה, שאינה נקודת צומת...

- א. גדול מהזרם היוצא מנקודה זו.
ב. שווה לזרם היוצא מנקודה זו.
ג. קטן מהזרם היוצא מנקודה זו.

שאלה 8-4

כמה צמתים יש במעגל טורי?

שאלה 8-5

במעגל חשמלי יש מקור יחיד.

- א. האם מתח המקור במעגל טורי יכול להיות קטן מסכום המתחים של הנגדים במעגל?
ב. האם מתח המקור במעגל טורי יכול להיות גדול מהמתח של הנגד השקול של המעגל?

שאלה 8-6

"אם שני נגדים זהים מחוברים בטור במעגל טורי, המתח של כל אחד מהם שווה". נכון או לא?

שאלה 8-7

באיזה נגד במעגל שבאיור 8-10 זורם הזרם הגדול ביותר? (סמנו את התשובה הנכונה.)

- א. בנגד שהתנגדותו 8Ω כי הוא הקרוב ביותר להדק החיובי של מקור המתח.
ב. בנגד שהתנגדותו היא הגדולה ביותר.
ג. בנגד שהתנגדותו 16Ω , כי הוא הקרוב ביותר להדק השלילי של מקור המתח.
ד. בנגד שהתנגדותו 75Ω , הרחוק ביותר ממקור המתח.
ה. בכל הנגדים זורם אותו זרם.

שאלה 8-8

מהי ההתנגדות השקולה של הנגדים במעגל שבאיור 8-10?

שאלה 8-9

ההתנגדות השקולה של מעגל טורי היא 100Ω . מתח המקור הוא $12V$. מה הזרם במעגל?

שאלה 8-10

ההתנגדות של מעגל טורי היא 50Ω . הזרם במעגל הוא $2A$. מהו מתח המקור?

שאלה 8-11

חשבו את המתח U_1 ואת המתח U_2 במעגל שבאיור 8-11.

שאלה 8-12

חשבו את הזרם במעגל שבדוגמה 8-3.

שאלה 8-13

"ההתנגדות השקולה של נגדים בטור - גדולה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים המחוברים בטור." נכון או לא?

שאלה 8-14

שני צרכנים מחוברים בטור במעגל טורי. התנגדות צרכן אחד היא 16Ω . והתנגדות הצרכן השני היא 24Ω . מתח המקור הוא $12V$.

א. חשבו את ההספק של כל צרכן.

ב. חשבו את סכום הספקי הצרכנים.

ג. מהו הספק המקור?

שאלה 8-15

שני נגדים, R_1 ו- R_2 , מחוברים בטור, כמתואר באיור 8-8. נתון כי $R_1 = 10\Omega$ ו- $R_2 = 20\Omega$. הראו כי הספק הנגד R_2 גדול פי 2 מהספק הנגד R_1 .

שאלה 8-16

עשרה נגדים זהים מחוברים בטור למקור מתח של 12V. הזרם במעגל הוא 0.2A.

- מהי ההתנגדות של כל נגד?
- מהו ההספק של כל נגד?
- חשבו את הספק המקור ואת סכום ההספקים של הנגדים.

שאלה 8-17

שני נגדים, R_1 ו- R_2 , מחוברים בטור למקור מתח U , כמתואר באיור 8-8. הזרם במעגל הוא I . סמנו את כל הטענות הנכונות.

- ההספק P_1 של הנגד R_1 הוא $P_1 = I^2 R_1$.
- ההספק P_2 של הנגד R_2 הוא $P_2 = \frac{U^2}{R_1 + R_2}$.
- סכום הספקי הנגדים הוא UI .
- סכום הספקי הנגדים הוא $\frac{U^2}{R_1 + R_2}$.
- סכום הספקי הנגדים הוא $I^2(R_1 + R_2)$.
- סכום הספקי הנגדים הוא $\frac{U}{(R_1 + R_2)^2}$.
- סכום הספקי הנגדים הוא $I(R_1 + R_2)^2$.

8.2 התנגדות הקו

באיור 8-12 אנו רואים מעגל שבו מקור המתח מחובר לצרכן (נגד) R באמצעות תילים מוליכים ("חוטי חשמל"). תרשים המעגל מובא באיור 8-13. למדנו לפתור מעגל כזה, ועד כה הנחנו – לצורך הפתרון – כי התנגדות התילים המוליכים שווה לאפס.

האם תמיד ראוי להניח שההתנגדות של התילים המוליכים שווה לאפס? בדרך כלל, התילים המוליכים עשויים מחומר מוליך בעל התנגדות סגולית קטנה (לדוגמה: נחושת), והתנגדותם קטנה מאוד ביחס להתנגדות של הצרכנים במעגל. אם כן, לרוב אין צורך להתחשב בהתנגדות התילים המוליכים, כאשר פותרים את המעגל. אבל עלינו לזכור כי ההתנגדות של התילים המוליכים אינה אפס, ולפעמים יש להתחשב בה. נבהיר זאת.

למדנו כי ככל שתיל מוליך ארוך יותר, התנגדותו גדולה יותר. אם במעגל חשמלי יש תילים ארוכים, אין להזניח את התנגדות התילים, ויש להתחשב בה כשפותרים את המעגל. התנגדות התילים נקראת **התנגדות הקו**, ובמעגל טורי היא שווה לסכום ההתנגדויות של התילים המוליכים. כאשר מתחשבים בהתנגדות הקו, מתייחסים לתיל המוליך – כאילו היה נגד. באמצעות R_1 נסמן את סכום ההתנגדויות של התילים המוליכים.

המטענים, הנעים במעגל, צריכים להתגבר על התנגדות הנגד R וכן על התנגדות הקו R_1 . מכאן שסכום ההתנגדויות במעגל זה הוא הסכום של התנגדות הנגד והתנגדות הקו. לכן נסיק כי הנגד והתילים המוליכים מחוברים בטור.

ראינו כי ההתנגדות השקולה של נגדים בטור גדולה מהתנגדות כל אחד מהנגדים. מכאן שההתנגדות השקולה של הצרכן R והנגד הנוסף R_1 , המחוברים בטור, גדולה מהתנגדות הצרכן. כלומר, ההתנגדות השקולה $R_1 + R$ של המעגל שבאיור 8-13 גדולה מהתנגדות הצרכן.

בדומה להתנגדות כל נגד, התנגדות הקו (כלומר: התנגדות התילים המוליכים) תלויה בדברים הבאים:

- אורך התילים המוליכים;
- שטח החתך של התילים המוליכים;
- החומר שממנו עשויים התילים המוליכים (כלומר: ההתנגדות הסגולית שלהם);
- הטמפרטורה של התילים המוליכים.

דוגמה 8-5

כדי לפרוץ דרך בסלע, משתמשים בנפץ חשמלי. הפעלת הנפץ נעשית ממרחק, מטעמי בטיחות (כדי למנוע פגיעה במפעיל הנפץ). התנגדות הנפץ היא 4Ω . הנפץ מחובר למקור מתח של $6V$, באמצעות תילים מוליכים העשויים נחושת, ששטח החתך שלהם קבוע.

התנגדות התיל המוליך, המחובר בין ההדק החיובי של מקור המתח לבין הנפץ - 1Ω . תיל שני, באותו אורך, מחבר את הנפץ להדק השלילי של מקור המתח. המעגל החשמלי המתאים מתואר באיור 8-14.

- א. מהי התנגדות הקו?
- ב. חשבו את התנגדות המעגל.

ג. חשבו את הזרם במעגל.

ד. מה היה הזרם במעגל, אילו לתילים המוליכים לא הייתה התנגדות?

פתרון

א. תיל מוליך אחד מחבר את ההדק החיובי של מקור המתח אל הנפץ, ותיל מוליך שני מחבר את הנפץ להדק השלילי של מקור המתח. נתון כי לשני התילים אותו אורך, אותו שטח חתך, והם עשויים מאותו חומר (נחושת). מכאן נקבל כי לשני התילים יש אותה התנגדות. נתון כי התנגדות אחד התילים היא 1Ω . נסמן באמצעות R_2 את ההתנגדות השקולה של שני התילים, המחוברים בטור. נקבל אפוא כי התנגדות שני התילים היא $R_2 = 2\Omega$. זוהי התנגדות הקו.

ב. הנפץ מחובר בטור לתילים המוליכים, וההתנגדות השקולה שלהם (כלומר, התנגדות המעגל) היא R_{eq} :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 4 + 2 = 6\Omega$$

ג. הזרם במעגל נתון על ידי:

$$I = \frac{U}{R_{eq}}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$I = \frac{6V}{6\Omega} = 1A$$

ד. אילו לתילים המוליכים לא הייתה התנגדות, ההתנגדות היחידה במעגל הייתה התנגדות הנפץ. במקרה זה, הזרם במעגל היה:

$$I = \frac{6V}{4\Omega} = 1.5A$$

אנו רואים כי אילו התילים היו חסרי התנגדות, הזרם במעגל היה $1.5A$ במקום $1A$.

להתנגדות הקו יש חשיבות רבה במיוחד בקווי המתח, שבין תחנת הכוח לבין הצרכנים. קווים אלה נמתחים לאורך עשרות קילומטרים, כי לא כל הצרכנים נמצאים ליד תחנת הכוח. קווים אלה הם "הבזבזן" הגדול של האנרגיה החשמלית, שעוברת ממקום ייצורה (כלומר, מתחנת הכוח) אל הצרכנים.

דוגמה 6-8 

חשבו את הספק הנפץ ואת הספק התילים המוליכים במעגל שתואר בדוגמה 8-5.

פתרון

בדוגמה 5-8 נתון כי התנגדות הנפץ היא $R_1 = 4\Omega$. בסעיף ג של הפתרון מצאנו, כי הזרם במעגל הטורי (ולכן גם הזרם בנפץ, המחובר במעגל זה) הוא $I=1A$. למדנו כי ההספק של נגד נתון במשוואה (3-6):

$$P = I^2 R$$

מכאן נקבל כי ההספק P_1 של הנפץ הוא:

$$P_1 = I^2 R_1 = 1^2 \times 4 = 1 \times 4 = 4W$$

התנגדות התילים המוליכים היא $R_2 = 2\Omega$, וההספק שלהם הוא:

$$P_2 = I^2 R_2 = 1^2 \times 2 = 1 \times 2 = 2W$$

אנו רואים כי ההספק, המתבזבז בתילים המוליכים ($P_2 = 2W$), שווה למחצית ההספק הנמסר לנפץ ($P_1 = 4W$).

הנעת מכונית בעזרת כבלים

לא פעם אנו רואים בשולי הכביש שתי מכוניות שעומדות זו מול זו (איור 8-15), כשמכסה המנוע של כל מכונית מונח, והמצברים של שתי המכוניות מחוברים באמצעות כבלים (הנקראים גם כבלי התנעה).

יש שני סוגים עיקריים של כבלים להתנעת מכוניות: כבלים דקים וכבלים עבים. נבדוק באיזה סוג עדיף להשתמש להתנעת מכונית.

התנעת מכונית נעשית על ידי מצבר, שהוא התקן המפריד מטענים. את המצבר אפשר לטעון שוב ושוב, כאשר הוא "מתרוקן". אם מצבר מכונית "מתרוקן", ואין טוענים אותו, המכונית "נתקעת"; כי כדי שהמתנע (starter) של המכונית יוכל להתניע את מנוע המכונית, יש לחבר את המתנע למצבר תקין.

נניח כי נהג השאיר בטעות את אורות מכוניתו דלוקים, ומצבר המכונית "התרוקן". במקרה כזה, אפשר לחזור ולטעון את המצבר בדרך זו: בעזרת כבלים, מחברים את מתנע המכונית למצבר תקין של מכונית אחרת. (למעשה, מחברים את הכבלים להדקי המצבר של המכונית התקועה, כי אלה נקודות החיבור למתנע). המתנע מתניע את המנוע, והמכונית יכולה לנסוע. תוך כדי נסיעה, המצבר שהתרוקן – נטען מחדש.

המעגל החשמלי המתקבל – מתואר באיור 8-16. אנו מתעלמים אפוא מהמצבר ש"התרוקן" במכונית התקועה, ומניחים שהוא ניתק. המתנע הוא הצרכן במעגל זה, וכבלי ההתנעה הם התילים המוליכים. ככל שהכבלים עבים יותר, התנגדות הקו קטנה יותר, ואז המתח המגיע להדקי המתנע - גדול יותר, ויש סיכוי טוב יותר להתניע את המכונית.

המסקנה היא שעדיף להשתמש בכבלים עבים להתנעת מכונית שהמצבר שלה "התרוקן". אגב, אם משתמשים בכבל דק מדי לצורך התנעה, עלול הכבל להינתך בגלל הזרם הגבוה (110A ויותר).

שאלה 8-18

כאשר מתחשבים בהתנגדות הקו, מתייחסים לתיל המוליך כאילו היה:

- א. נגד
- ב. מבדד
- ג. מקור מתח
- ד. נתק

שאלה 8-19

סמנו את הגורמים שבהם תלויה התנגדות הקו (בהנחה שטמפרטורת הקו קבועה).

- א. אורך התילים המוליכים.
- ב. התנגדות הצרכן המחובר בטור לתילים המוליכים.
- ג. שטח החתך של התילים המוליכים.
- ד. מתח מקור המחובר לצרכן באמצעות התילים המוליכים.
- ה. ההתנגדות הסגולית של התילים המוליכים.
- ו. הזרם במעגל שבו נמצאים התילים המוליכים.

שאלה 8-20

מקור מתח של 12V מחובר לצרכן, $R=50\Omega$, באמצעות תילים מוליכים, כמתואר באיור 8-13.

- א. הראו כי הזרם במעגל לא יוכל להיות גדול מ-0.24A.
- ב. מה הזרם במעגל, אם התנגדות הקו היא 1Ω ?

שאלה 8-21

רמקול, שהתנגדותו 8Ω , מחובר למקור מתח של 12V. המרחק בין הרמקול למקור המתח –

10 מטר. ההתנגדות של כל מטר של התיל המוליך – היא 0.1Ω .

- א. חשבו את התנגדות הקו, בהנחה כי התילים המוליכים ישרים.
- ב. חשבו את התנגדות המעגל (התנגדות הרמקול והתנגדות הקו).

שאלה 8-22

רמקול, שהתנגדותו 16Ω , מחובר למקור מתח של 12V.

מה התנגדות הקו, כשהמתח על הרמקול הוא 11V?

שאלה 8-23

מקור מתח של 12V מחובר לצרכן, $R=50\Omega$, באמצעות תילים מוליכים. התנגדות הקו היא 0.5Ω . חשבו את הספק הצרכן ואת הספק הקו.

8.3 חיבור נגדים במקביל

עד כה למדנו לזהות נגדים המחוברים בטור, ולחשב את התנגדותם השקולה. עכשיו נלמד צורה נוספת של חיבור נגדים. לשם כך נסתכל במעגל שבאיור 8-17.

במעגל זה יש שתי נקודות צומת: B ו-C. הנגד R_1 מחובר בקצהו האחד לנקודת הצומת B ובקצהו השני – לנקודת הצומת C. גם הנגד R_2 מחובר לנקודות הצומת B ו-C. כלומר, קצה אחד של כל אחד מן הנגדים R_1 ו- R_2 מחובר לנקודת הצומת B, והקצה השני של כל אחד מהם – מחובר לנקודת הצומת C.

חיבור כזה של נגדים נקרא **חיבור במקביל**; והנגדים, במקרה זה, **מחוברים במקביל**. מעגל חשמלי, שבו כל הנגדים מחוברים במקביל, נקרא **מעגל מקבילי**.

בדיון זה הנחנו כי התנגדות התילים המוליכים זניחה. לולא כן, היינו מקבלים שהמעגל שבאיור 8-17 אינו מעגל מקבילי. במעגל מסוג זה (שאינו טורי ואינו מקבילי) נדון בהמשך.

כאמור, הנגדים R_1 ו- R_2 במעגל שבאיור 8-17 – מחוברים לאותן נקודות B ו-C. בין שתי הנקודות יש מתח מסוים, ולכן המתח שווה בשני הנגדים האלה. מכאן נסיק כי המתח שווה בנגדים המחוברים במקביל. במעגל מקבילי – המתח של כל אחד מהנגדים שווה גם למתח המקור.

ההתנגדות השקולה של שני נגדים המחוברים במקביל

כבר למדנו לחשב את ההתנגדות השקולה של נגדים המחוברים בטור. עכשיו נחשב את ההתנגדות השקולה של שני נגדים המחוברים במקביל.

באיור 8-18 מופיע מעגל, ובו שני נגדים המחוברים במקביל. באיור 8-19 מופיע מעגל, שבו מחובר נגד R_{eq} בין הנקודות B ו-C. התנגדות הנגד R_{eq} שקולה להתנגדות שני הנגדים המחוברים במקביל. מתח המקור U שווה בשני המעגלים האלה.

כדי שההתנגדות R_{eq} – במעגל שבאיור 8-19 – תהיה ההתנגדות השקולה של שני הנגדים במעגל שבאיור 8-18, חייבות להתקיים שתי דרישות:

- א. הזרם I בשני המעגלים יהיה אותו זרם;
 ב. המתח בין הנקודות B ו-C בשני המעגלים – יהיה אותו מתח.

כדי למצוא את ההתנגדות השקולה, נחשב תחילה את הזרם בכל אחד מהנגדים שבאיור 8-18. שני הנגדים מחוברים במקביל במעגל מקבילי, ולכן המתח של כל אחד מהנגדים שווה למתח המקור U .

לפי חוק אום, הזרם I_1 בנגד R_1 – במעגל שבאיור 8-18 – נתון על ידי:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

והזרם I_2 נתון על ידי:

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

ראינו כי הנקודה B במעגל שבאיור 8-18 היא צומת. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת זה, הוא I ; וסכום הזרמים, היוצאים מצומת זה, הוא $I_1 + I_2$. לפי חוק הזרמים של קירכהוף, נקבל:

$$I = I_1 + I_2$$

נציב במשוואה האחרונה את הביטויים של I_1 ושל I_2 , ונקבל:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

נוציא את U מחוץ לסוגריים, ונקבל:

$$I = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

עתה נתבונן במעגל שבאיור 8-19. נניח כי הנגד R_{eq} במעגל זה – הוא אכן הנגד השקול לשני הנגדים R_1 ו- R_2 , המחוברים במקביל במעגל שבאיור 8-18. לפי חוק אום, הזרם במעגל זה הוא:

$$I = \frac{U}{R_{eq}}$$

אם R_{eq} היא ההתנגדות השקולה, כי אז לפי ההגדרה של ההתנגדות השקולה, הזרם I והמתח U במעגל השקול (שבאיור 8-9) שווים לזרם I ולמתח U במעגל המקורי (שבאיור 8-18). כלומר, I ו- U שווים בשתי המשוואות האחרונות שקיבלנו.

לכן נוכל לרשום:

$$\frac{U}{R_{eq}} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

נצמצם ב-U את שני האגפים במשוואה האחרונה ונקבל:

$$(8-6) \quad \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

באמצעות המשוואה האחרונה נוכל לחשב את ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל, אם נדע את ההתנגדות של כל אחד מנגדים אלה.

דוגמה 8-7

במעגל שבאיור 8-20 מחוברים שני נגדים במקביל: $R_2 = 4\Omega, R_1 = 3\Omega$.

א. חשבו את ההתנגדות השקולה של שני הנגדים.

ב. שרטטו מעגל, שבו מחובר הנגד השקול במקום שני הנגדים.

פתרון

א. את ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל – נחשב בעזרת משוואה (8-6):

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

נציב במשוואה זו את ערכי הנגדים, ונקבל:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{4+3}{12} = \frac{7}{12}$$

ומכאן נקבל כי $R_{eq} = 1.7\Omega$.

ב. באיור 8-21 משורטט מעגל, שבו הנגד השקול R_{eq} מחובר במקום שני הנגדים שבאיור 8-20.

בדוגמה האחרונה חישבנו תחילה את $\frac{1}{R_{eq}}$, ורק אז מצאנו את R_{eq} . עכשיו נמצא משוואה, שבאמצעותה נוכל לחשב מיד את ההתנגדות השקולה של שני נגדים, בלי שנצטרך לחשב תחילה את $\frac{1}{R_{eq}}$. לשם כך נרשום שוב את המשוואה, שבאמצעותה חישבנו את ההתנגדות השקולה:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

נרשום מכנה משותף באגף ימין של המשוואה:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}$$

ונקבל:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

מכאן שההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל נתונה על ידי:

$$(8-7) \quad R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

ובמילים: ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל - שווה למכפלת ההתנגדויות המחולקת בסכום ההתנגדויות.

דוגמה 8-8

חזרו וחשבו – באמצעות משוואה (8-7) את ההתנגדות השקולה של שני הנגדים - $R_2 = 4\Omega$, $R_1 = 3\Omega$ – המחוברים במקביל.

פתרון

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3 \times 4}{3 + 4} = \frac{12}{7} = 1.7\Omega$$

שוב קיבלנו כי ההתנגדות השקולה היא 1.7Ω .

בשתי הדרכים קיבלנו שההתנגדות השקולה של שני הנגדים $R_2 = 4\Omega$, $R_1 = 3\Omega$ המחוברים במקביל, היא 1.7Ω . אנו רואים, שההתנגדות השקולה של שני הנגדים קטנה מההתנגדות של כל אחד מהנגדים. תוצאה זו אינה מקרית. אפשר להראות:

ההתנגדות השקולה של נגדים במקביל קטנה מכל אחת מההתנגדות של הנגדים המחוברים במקביל.

דוגמה 8-9

שני נגדים מחוברים במקביל. התנגדות אחד הנגדים היא 100Ω , והתנגדות הנגד השני - 50Ω . האם ההתנגדות השקולה שלהם יכולה להיות גדולה מ- 60Ω ?

פתרון

לא. ההתנגדות השקולה של שני הנגדים 100Ω ו- 50Ω חייבת להיות קטנה מ- 50Ω , ולכן אינה יכולה להיות גדולה מ- 60Ω .

עד כה מצאנו את ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל. ההתנגדות השקולה של שלושה נגדים במקביל נתונה על ידי:

$$(8-8) \quad \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

הביטוי $\frac{1}{R_1}$ נקרא ההופכי של ההתנגדות R . מכאן שההופכי של $\frac{1}{R_{eq}}$ של ההתנגדות השקולה R_{eq} , שווה לסכום ההופכיים של ההתנגדויות המחוברות במקביל.

גם במקרה של שלושה נגדים ניתן לקבל משוואה, שבעזרתה אפשר לחשב מיד את R_{eq} , בלי לחשב תחילה את ההופכי $\frac{1}{R_{eq}}$. אבל במקרה זה, המשוואה המתקבלת מסובכת למדי.

נוכל לחשב את ההתנגדות השקולה R_{eq} של שלושה נגדים, המחוברים במקביל, גם בדרך נוספת: תחילה נחשב את ההתנגדות השקולה $R_{1,2}$ של שני הנגדים R_1 ו- R_2 , המחוברים במקביל. בשלב השני נחשב שוב את ההתנגדות השקולה של שני נגדים: הנגד $R_{1,2}$ והנגד R_3 . אם כן, ההתנגדות השקולה R_{eq} של שלושת הנגדים במקביל נתונה על ידי:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_3}$$

לפינו אפוא שני נגדים המחוברים במקביל: $R_{1,2}$ ו- R_3 . לפי ההסבר הקודם, ההתנגדות השקולה R_{eq} של שתי ההתנגדויות $R_{1,2}$ ו- R_3 , המחוברות במקביל, קטנה מכל אחת מההתנגדויות הללו, ולכן R_{eq} קטנה מ- $R_{1,2}$. נסיק באופן כללי:

כאשר מוסיפים נגד במקביל לקבוצת נגדים במעגל חשמלי, ההתנגדות השקולה של קבוצת הנגדים החדשה - קטנה מזו של קבוצת הנגדים המקורית.

כאשר נתונים שלושה נגדים זהים (כלומר: $R_1 = R_2 = R_3 = R$) המחוברים במקביל, נחשב את התנגדותם השקולה בדרך זו:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{3}{R}$$

ומכאן:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{3}{R}$$

באופן כללי, כאשר מספר הנגדים הזחים המחוברים במקביל הוא n , כך שהתנגדות כל אחד מהם – R , ההתנגדות השקולה שלהם היא:

$$R_{eq} = \frac{R}{n} \quad (8-9)$$

דוגמה 8-10

נתונים עשרה נגדים המחוברים במקביל. התנגדות כל נגד היא 50Ω . מהי ההתנגדות השקולה שלהם?

פתרון

נתונים עשרה נגדים, כלומר: $n=10$. התנגדות כל נגד היא 50Ω . הנגדים מחוברים במקביל, ומכאן שההתנגדות השקולה שלהם היא לפי משוואה (8-9):

$$R_{eq} = \frac{R}{n} = \frac{50}{10} = 5\Omega$$

הקשר בין הזרמים בנגדים המחוברים במקביל

ראינו שכאשר נגדים מחוברים במקביל, לכל הנגדים יש אותו מתח. עתה נמצא מהו הקשר בין הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, להתנגדויות של נגדים אלה. לשם כך נסתכל במעגל שבאיור 8-22. במעגל זה מסומנים הזרמים, המתחים וההתנגדויות של שני נגדים, המחוברים במקביל.

הקשר בין הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, לבין התנגדויות הנגדים הוא:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (8-10)$$

כאשר I_1 הוא הזרם בנגד R_1 , ו- I_2 הוא הזרם בנגד R_2 .
כלומר:

היחס בין הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, הפוך ליחס בין ההתנגדויות של נגדים אלה.

כדי להיווכח בנכונות הקשר, נסתכל שוב במעגל המקבילי שבאיור 8-22. למדנו שהמתח של כל אחד מהנגדים במעגל זה הוא U . נשתמש בחוק אום לגבי כל אחד מהנגדים:

הזרם I_1 נתון על ידי:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

והזרם I_2 נתון על ידי:

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

מכאן נקבל:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1}$$

אכן קיבלנו שיחס הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, **הפוך** ליחס ההתנגדויות של נגדים אלה.

דוגמה 8-11

- א. חשבו את הזרמים I_1 ו- I_2 במעגל שבאיור 8-23.
ב. מהו מתח המקור במעגל זה?

פתרון

א. הנגדים R_1 ו- R_2 מחוברים במקביל, לכן יחס הזרמים בנגדים הפוך ליחס התנגדויות הנגדים, ולכן – לפי משוואה (8-10):

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{12}{6} = 2$$

כלומר:

$$I_1 = 2I_2$$

אבל לפי חוק הזרמים של קירכהוף, מקבלים:

$$I = I_1 + I_2 = 6A$$

נציב במקום $2I_2$ במשוואה האחרונה, ונקבל:

$$I = I_1 + I_2 = 2I_2 + I_2 = 3I_2 = 6A$$

ומכאן:

$$I_2 = \frac{6}{3} = 2A$$

והזרם I_1 הוא:

$$I_1 = 2I_2 = 2 \times 2 = 4A$$

אגב, אפשר לחשב תחילה את ההתנגדות השקולה של המעגל; את מתח המקור; ואת הזרם בכל נגד.

ב. מאחר שהמעגל מקבילי, מתח המקור שווה למתח של כל אחד מהנגדים. לכן:

$$U = I_1 R_1 = 4 \times 6 = 24V$$

הקשר בין הספק המקור להספקי הצרכנים במעגל מקבילי

למדנו כי במעגל טורי - סכום ההספקים של הצרכנים שווה להספק המקור. נבדוק אם כך הדבר גם במעגל מקבילי. לשם כך נסתכל במעגל שבאיור 8-24. זהו מעגל מקבילי, שבו הצרכנים R_1 ו- R_2 מחוברים במקביל. לכן המתח U של כל אחד מהצרכנים שווה למתח המקור.

הספק הצרכן R_1 הוא $P_1 = UI_1$, והספק הצרכן R_2 הוא $P_2 = UI_2$. הספק המקור (הנקרא גם הספק המעגל) הוא $P = UI$. נמצא את הקשר בין שלושת ההספקים האלה.

לפי חוק הזרמים של קירכהוף, $I = I_1 + I_2$. אם כן, נוכל לרשום את הספק המקור בצורה:

$$P = UI = U(I_1 + I_2) = UI_1 + UI_2 = P_1 + P_2$$

כלומר:

$$P = P_1 + P_2$$

קיבלנו:

במעגל מקבילי - הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים.

תוצאה זו נכונה לכל מספר של צרכנים המחוברים במקביל במעגל מקבילי.

דוגמה 8-12 

נורה ותנור חימום מחוברים במקביל למקור מתח של 230V. על הנורה רשום 230V/75W, והתנגדות התנור בעת פעולתו היא 30Ω.

מהו ההספק שמספק המקור למעגל?

פתרון

המתח על הנורה שווה למתח המקור, כי המעגל מקבילי. מכאן שהספק הנורה (P_1) הוא ההספק הרשום עליה: $P_1 = 75W$. עכשיו נחשב את הספק התנור (P_2):

$$P_2 = UI_2 = \frac{U^2}{R_2} = \frac{230^2}{30} = \frac{52,900}{30} = 1763.3W$$

ההספק P , שמספק המקור למעגל המקבילי, שווה לסכום ההספקים של הצרכנים. לכן ההספק, שמספק המקור, הוא:

$$P = P_1 + P_2 = 75W + 1763.3W = 1838.3W$$

לחיבור כמה צרכנים במקביל יש שימושים רבים. זוהי צורת החיבור שמשתמשים בה בדרך כלל בבתים פרטיים ובמפעלים. הסיבות העיקריות לחיבור הצרכנים במקביל הן:

- כאשר מחברים במקביל צרכן נוסף במעגל מקבילי, המתח והזרם בכל אחד מהצרכנים האחרים – אינם משתנים. נסביר זאת:

המתח של כל צרכן במעגל מקבילי שווה למתח המקור. אם מתח המקור אינו משתנה, גם המתח של כל צרכן אינו משתנה. לפי חוק אום, הזרם בצרכן נקבע רק על ידי המתח שלו והתנגדותו. מכאן שאם המתח של הצרכן אינו משתנה, גם הזרם העובר דרכו אינו משתנה.

- כאשר אחד הצרכנים במעגל מקבילי מתקלקל, זרם אינו יכול לעבור דרכו (למשל, כאשר נורה "נשרפת"), שאר הצרכנים יכולים להמשיך לפעול כרגיל.

לעומת זאת, אם נחבר צרכן נוסף בטור במעגל טורי, הזרם במעגל (כלומר, הזרם בכל אחד מהצרכנים) יקטן. נסביר זאת:

הוספת צרכן בטור מגדילה את התנגדות המעגל כולו, וכתוצאה מכך הזרם במעגל – קטן. גם מפל המתח של כל צרכן יהיה קטן יותר במעגל טורי כזה. כידוע, לצרכנים רבים דרוש מתח מסוים וזרם מסוים כדי שיפעלו בצורה תקינה, לכן הוספת צרכן בטור - יכולה להפריע לפעולתם התקינה של הצרכנים.

מלבד זאת, במעגל טורי - אם אחד הצרכנים מתקלקל, נוצר נתק במעגל, ושאר הצרכנים אינם יכולים להמשיך לפעול.

בטבלה 8-1 נתונה השוואה בין מעגל טורי למעגל מקבילי.

הגודל הפיסיקלי	מעגל טורי	מעגל מקבילי
מתח	יכול להיות שונה עם כל נגד	שווה בכל אחד מהנגדים
זרם	שווה בכל הנגדים	יכול להיות שונה בכל נגד
התנגדות שקולה של המעגל	– גדולה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים במעגל – שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים עבור שני נגדים R_1, R_2: $R_{eq} = R_1 + R_2$	– קטנה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים במעגל – הערך ההופכי של ההתנגדות השקולה $(\frac{1}{R_{eq}})$ שווה לסכום הערכים ההופכיים של ההתנגדויות הנגדים עבור שני נגדים R_1, R_2: $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
הספק המעגל	שווה לסכום ההספקים של הנגדים	שווה לסכום ההספקים של הנגדים

טבלה 8-1 השוואה בין מעגל טורי למעגל מקבילי

דוגמאות מעשיות לחיבור צרכנים

חיבור הצרכנים בביתנו

ראינו את היתרונות של חיבור צרכנים במקביל. ואכן בביתנו אנו מנצלים יתרונות אלה, והמכשירים החשמליים השונים בבית - מחוברים במקביל. משום כך, גם כאשר אנו מפעילים כמה מכשירים בבת אחת, המתח של כל מכשיר נשאר מתח הרשת. לכן גם הזרם בכל מכשיר אינו משתנה, והמכשירים יכולים לפעול בצורה תקינה. אנו יודעים גם שכאשר אחד המכשירים בבית מתקלקל (למשל, כאשר נורה "נשרפת", או כאשר יש תקלה באחד המכשירים החשמליים שבאיור 8-25), שאר המכשירים בבית - ממשיכים לפעול כרגיל.

מערכת החשמל במכונית

גם הצרכנים במכונית מחוברים במקביל למצבר המכונית. וגם במכונית, אם פנס "נשרף", שאר הצרכנים ממשיכים לפעול ללא שינוי. לדוגמה, שאר הפנסים של המכונית ממשיכים להאיר, גם לאחר שפנס אחד "נשרף". באיור 8-26 נתון תרשים של מערכת החשמל במכונית.

ראינו שכאשר מחברים צרכנים במקביל במעגל מקבילי, כל צרכן פועל בצורה "עצמאית", ואינו מושפע מהצרכנים האחרים במעגל. ובכל זאת בדרך כלל איננו יכולים להפעיל בבת אחת את כל המכשירים החשמליים בביתנו, כי כך נגרום להפסקת חשמל. הסיבה לכך היא שכאשר מחברים צרכן נוסף במקביל, הזרם הכללי במעגל – גדל. נסביר זאת.

כפי שראינו, ההתנגדות השקולה של מעגל מקבילי – קטנה כאשר מחברים במקביל צרכן נוסף במעגל. לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל – גדל, כאשר ההתנגדות השקולה קטנה; לכן הוספת צרכן במקביל - מגדילה את הזרם הכללי במעגל. אם הזרם הכללי במערכת החשמל הביתית גדול מדי, התילים המוליכים עלולים להתחמם מאוד, כפי שראינו בפרק 5. כזכור, מוסיפים נתיכים כדי למנוע זאת. נתיכים אלה יכולים לנתק את החשמל בבית, אם הזרם גדול מדי.

תרגול 

שאלה 8-24

סמנו את כל ההשלמות הנכונות.

כשנגדים מחוברים במקביל במעגל מקבילי...

- א. זורם בהם אותו זרם.
- ב. המתח שלהם שווה.
- ג. ההתנגדות שלהם שווה.
- ד. המתח של כל נגד שווה למתח המקור.
- ה. ההתנגדות השקולה שלהם שווה לסכום ההתנגדויות שלהם.

שאלה 8-25

שני נגדים מחוברים במקביל. התנגדות נגד אחד היא 50Ω , והתנגדות הנגד השני היא 75Ω . מה ההתנגדות השקולה של שני הנגדים?

שאלה 8-26

- ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים במקביל, היא 100Ω . סמנו את הטענה הנכונה.
- א. התנגדות אחד משני הנגדים קטנה מ- 100Ω .
 - ב. התנגדות כל אחד מהנגדים קטנה מ- 100Ω .
 - ג. התנגדות כל אחד מהנגדים גדולה מ- 100Ω .
 - ד. סכום ההתנגדויות של הנגדים הוא 100Ω .

שאלה 8-27

סמנו את כל המשוואות הנכונות של התנגדות שקולה של שני נגדים, R_1 ו- R_2 , המחוברים במקביל.

א. $R_{eq} = R_1 + R_2$

ב. $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

ג. $R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

ד. $R_{eq} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$

שאלה 8-28

ברשותכם נגדים של 16Ω , ועליכם לקבל התנגדות של 8Ω . כמה נגדים (מאלה שברשותכם) יש לחבר במקביל כדי לקבל את ההתנגדות הרצויה?

שאלה 8-29

מעגל מכיל שני נגדים המחוברים במקביל למקור מתח של $9V$. התנגדות נגד אחד היא 180Ω , והתנגדות הנגד השני היא 90Ω .

- א. מהי ההתנגדות השקולה של שני הנגדים?
- ב. חשבו את הזרם בכל נגד.
- ג. מהו הזרם היוצא מהמקור?

שאלה 8-30

קומקום, שהתנגדותו 20Ω , מחובר במקביל לתנור חימום שהתנגדותו 30Ω , ולנורה שהתנגדותה 400Ω . מהי ההתנגדות השקולה של שלושת הצרכנים האלה?

שאלה 8-31

טלוויזיה, מחשב ומכונת כביסה מחוברים במקביל. התנגדות הטלוויזיה - 700Ω , התנגדות המחשב - 650Ω , והתנגדות מכונת הכביסה - 20Ω .

בלי לחשב את ההתנגדות השקולה של שלושת הצרכנים האלה, סמנו את הטענה הנכונה.

- א. ההתנגדות השקולה גדולה מ- 700Ω .
- ב. ההתנגדות השקולה קטנה מ- 20Ω .
- ג. ההתנגדות השקולה גדולה מ- 1370Ω .
- ד. ההתנגדות השקולה קטנה מ- $\frac{1}{1370}\Omega$.

שאלה 8-32

"הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים במעגל".
סמנו את כל הטענות הנכונות לגבי המשפט שלמעלה.

- א. המשפט נכון לגבי מעגל טורי.
- ב. המשפט נכון לגבי מעגל מקבילי.
- ג. המשפט אינו נכון לגבי מעגל טורי.
- ד. המשפט אינו נכון לגבי מעגל מקבילי.

שאלה 8-33

על נורה רשום $40W/230V$. התנגדות מגהץ היא 100Ω . הנורה והמגהץ בלבד מחוברים במקביל למקור מתח של $230V$.

- א. חשבו את הזרם בנורה ואת הזרם במגהץ.
- ב. חשבו את ההספק של הנורה ושל המגהץ.

ג. חשבו את הספק המקור.

שאלה 8-34

חזרו על השאלה הקודמת, כשמתח המקור הוא 220V. הדרכה: חשבו תחילה את התנגדות הנורה על פי הרשום עליה.

שאלה 8-35

חשבו את ההתנגדות השקולה של כל אחד מהמעגלים שבאיורים 8-27 ו- 8-28.

שאלה 8-36

- א. חמישה נגדים זהים מחוברים בטור. התנגדות כל נגד היא R . מה ההתנגדות השקולה של הנגדים?
- ב. מחברים במקביל את חמשת הנגדים. מה ההתנגדות השקולה של הנגדים בחיבור זה?
- ג. פי כמה גדולה ההתנגדות השקולה של הנגדים, כשהם מחוברים בטור, מההתנגדות השקולה שלהם כשהם מחוברים במקביל?

שאלה 8-37

n נגדים זהים מחוברים פעם בטור, ופעם במקביל. פי כמה גדולה ההתנגדות השקולה שלהם בטור, מההתנגדות השקולה שלהם במקביל?

א. n^2 ב. n

ג. $\frac{1}{n}$ ד. $\frac{1}{n^2}$

הדרכה: הציבו כמה מספרים במקום n , ובדקו את תשובתכם.

שאלה 8-38

השלימו:

כשנגדים מחוברים _____, המתח שלהם שווה; וכשנגדים מחוברים _____, זרם בהם אותו זרם. המתח של כל נגד במעגל _____ שווה למתח המקור.

שאלה 8-39

שני נגדים שונים, R_1 ו- R_2 , מחוברים במקביל. U_1 הוא המתח של הנגד R_1 , ו- U_2 הוא המתח של הנגד R_2 . האם נכון להשתמש במשוואה:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

לגבי מעגל זה? נמקו או הביאו דוגמה מספרית, שלגביה משוואה זו אינה נכונה.

שאלה 8-40

נתונים שני נגדים שונים, R_1 ו- R_2 . I_1 הוא הזרם בנגד R_1 , ו- U_1 הוא המתח של נגד זה. I_2 ו- U_2 הם, בהתאמה, הזרם בנגד R_2 , והמתח של נגד זה. סמנו ליד כל אחת מהמשוואות הבאות את אחד המספרים 0, 1, 2, לפי המפתח הבא:

- 1- המשוואה מתאימה לחיבור טורי.
- 2- המשוואה מתאימה לחיבור מקבילי.
- 0- המשוואה אינה מתאימה לחיבור טורי, ואף ולא לחיבור מקבילי.

א. $I_1 R_1 = I_2 R_2$

ב. $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$

ג. $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$

ד. $I_1 = I_2$

ה. $U_1 = U_2$

ו. $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

הדרכה: שרטטו חיבורים טוריים וחיבורים מקביליים, רשמו ערכים מספריים ובדקו אם תשובותיכם נכונות. אם יתברר שמשוואה מסוימת אינה מתאימה לחיבור מסוים, נסו לנמק זאת.

8.4 מעגל מעורב

עד כה למדנו על חיבור נגדים בטור ובמקביל. כאשר נתונים שלושה נגדים לפחות, אפשר לחבר את כולם בטור, כפי שרואים באיור 8-29; אפשר לחבר את כולם במקביל, כפי שרואים באיור 8-30; ואפשר לחבר אותם בחיבור מעורב, כפי שרואים באיורים 8-31 ו-8-32. מעגל, שבו הנגדים מחוברים בחיבור מעורב, נקרא **מעגל מעורב**.

ניסוי - מדידות במעגל מעורב

הכנסו לקישור ובצעו את הניסוי לפי ההוראות

<http://archive.c3.ort.org.il/Apps/WW/page.aspx?ws=c95853ea-7439-4431-b760-fa7e35c2dc61&page=3e98e78a-2822-41a6-a11b-f76b8cd85ab4&fol=1843785c-9712-4390-a755-f76977498a45>

אפשר לראות מיד שיש הבדל בין שני המעגלים המעורבים שבאיורים 8-31 ו-8-32. במעגל הראשון – הנגדים R_1 ו- R_2 מחוברים זה לזה במקביל, והנגד R_3 מחובר בטור לצירוף המקבילי שלהם. במעגל השני – הנגדים R_2 ו- R_3 מחוברים בטור, והנגד R_1 מחובר במקביל לצירוף הטורי שלהם.

כדי לפתור מעגל מעורב, נשתמש בכללים לחישוב ההתנגדות השקולה של נגדים בטור ובמקביל, שלמדנו בסעיפים הקודמים. לדוגמה: במעגל שבאיור 8-31 נחשב תחילה את ההתנגדות השקולה של הנגדים R_1 ו- R_2 , המחוברים במקביל. נסמן באמצעות $R_{1,2}$ את הנגד השקול לשני נגדים אלה. כפי שלמדנו, התנגדות נגד זה נתונה על ידי:

$$R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

נחליף את הנגדים R_1 ו- R_2 בנגד השקול שלהם, ונקבל את המעגל שבאיור 8-33.

המעגל שקיבלנו הוא מעגל טורי, הכולל שני נגדים: $R_{1,2}$ ו- R_3 . ההתנגדות השקולה R_{eq} של שני נגדים אלה – שווה לסכום התנגדויותיהם:

$$R_{eq} = R_{1,2} + R_3$$

נציב את הביטוי שקיבלנו עבור $R_{1,2}$, ונקבל:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

אם כן R_{eq} , היא ההתנגדות השקולה של שלושת הנגדים במעגל שבאיור 8-31.

באופן כללי, כדי לפתור מעגל מעורב, מחפשים קבוצות של נגדים המחוברים בטור, ומחליפים אותן בנגד השקול שלהן. מחפשים גם קבוצות של נגדים המחוברים במקביל, ומחליפים גם אותן בנגד השקול שלהן. כך ממשיכים, עד שכל הנגדים במעגל מוחלפים בנגד שקול יחיד.

דוגמה 8-13

חשבו את ההתנגדות השקולה של המעגל שבאיור 8-34.

פתרון

הנגדים R_2 ו- R_3 – במעגל שבאיור 8-34 – מחוברים בטור. ההתנגדות השקולה שלהם $R_{2,3}$ היא:

$$R_{2,3} = R_2 + R_3 = 40 + 20 = 60\Omega$$

באיור 8-35 מתואר המעגל, המתקבל לאחר שמחליפים את שני הנגדים R_2 ו- R_3 – בנגד השקול $R_{2,3}$. נגד זה מחובר במקביל לנגד R_1 . ההתנגדות השקולה R_{eq} של שני הנגדים R_1 ו- $R_{2,3}$ היא:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_{2,3}}{R_1 + R_{2,3}} = \frac{30 \times 60}{30 + 60} = \frac{1,800}{90} = 20\Omega$$

חישוב זרמים ומתחים במעגל מעורב

למדנו לחשב את ההתנגדות השקולה של מעגלים מעורבים. עתה נלמד לחשב גם את הזרמים והמתחים במעגלים כאלה. נשתמש במעגל שבאיור 8-36, כדי להדגים את השלבים בחישוב הזרמים והמתחים השונים במעגל מעורב. תחילה נחשב את ההתנגדות השקולה של המעגל:

הנגד R_L מחובר במקביל לנגד R_2 (מקובל לסמן את הצרכן במעגל על ידי R_L). נסמן על ידי $R_{2,L}$ את ההתנגדות השקולה של שני נגדים אלה, ונחשב אותה:

$$R_{2,L} = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{3,000 \times 6,000}{3,000 + 6,000} = 2,000\Omega = 2k\Omega$$

במעגל שבאיור 8-37 החלפנו את שני הנגדים R_2 ו- R_L בנגד השקול שלהם $R_{2,L}$.

עתה נחשב את ההתנגדות השקולה R_{eq} של הנגדים R_1 ו- $R_{2,L}$, המחוברים בטור:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,L} = 4,000 + 2,000 = 6,000\Omega = 6k\Omega$$

חישוב הזרם הכללי | במעגל

כפי שלמדנו, המתח על ההתנגדות השקולה שווה למתח המקור U . לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל נתון על ידי:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{24}{6,000} = 0.004A = 4mA$$

מטעמי נוחות, נחשב תחילה את המתחים של הנגדים, ורק אחר כך נחשב את הזרמים בנגדים.

חישוב המתחים של הנגדים

לפי איור 8-37 אפשר לראות, שהזרם I הוא הזרם העובר בנגד R_1 . כלומר: הזרם בנגד R_1 הוא $4mA$.

לפי חוק אום, המתח U_1 על נגד זה נתון על ידי:

$$U_1 = R_1 I = 4,000 \times 0.004 = 16V$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף, המתח $U_{2,L}$ במעגל שבאיור 8-37 – נתון על ידי:

$$U_{2,L} = U - U_1 = 24 - 16 = 8V$$

המתח $U_{2,L}$ הוא המתח של הנגד $R_{2,L}$, השקול לשני הנגדים R_2 ו- R_L (איור 8-36), המחוברים במקביל. כלומר, המתח $U_{2,L}$ שווה גם למתח U_2 של הנגד R_2 ולמתח U_L של הנגד R_L :

$$U_{2,L} = U_2 = U_L = 8V$$

חישוב הזרמים בנגדים

מצאנו כבר כי הזרם בנגד R_1 הוא $4mA$. לפי חוק אום, הזרם I_2 בנגד R_2 הוא:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{8}{3,000} = 0.00267A = 2.67A$$

והזרם I_L בנגד R_L הוא:

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{8}{6,000} = 0.00133A = 1.33A$$

אנו רואים שסכום שני זרמים אלה שווה לזרם הכללי במעגל.

דוגמה 8-14

חשבו את הזרם בנגד R_1 ואת המתח עליו במעגל שבאיור 8-38.

פתרון

נחשב תחילה את ההתנגדות השקולה של המעגל. הנגדים R_3 ו- R_4 מחוברים בטור, וההתנגדות השקולה שלהם $R_{3,4}$ היא:

$$R_{3,4} = R_3 + R_4 = 50 + 100 = 150\Omega$$

הנגד השקול $R_{3,4}$ מחובר במקביל לנגד $R_2 = 75\Omega$, כפי שרואים באיור 8-39.

ההתנגדות השקולה $R_{2,3,4}$ של שני הנגדים R_2 ו- $R_{3,4}$, המחוברים במקביל, היא:

$$R_{2,3,4} = \frac{R_2 R_{3,4}}{R_2 + R_{3,4}} = \frac{75 \times 150}{75 + 150} = \frac{11,250}{225} = 50\Omega$$

הנגדים R_1 ו- $R_{2,3,4}$ מחוברים בטור, כפי שניתן לראות במעגל שבאיור 8-40. ההתנגדות השקולה שלהם R_{eq} היא:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,3,4} = 10 + 50 = 60\Omega$$

הזרם בנגד R_1 הוא הזרם הכללי I במעגל, כלומר:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{24}{60} = 0.4A$$

ולפי חוק אום, המתח U_1 של הנגד R_1 הוא:

$$U_1 = IR_1 = 0.4 \times 10 = 4V$$

תרגול 

שאלה 8-41

ההתנגדות של כל אחד מהנגדים במעגלים שבאיור 8-41 היא 12Ω . חשבו את ההתנגדות השקולה של כל אחד ממעגלים אלה.

שאלה 8-42

מהי ההתנגדות השקולה של המעגל שבאיור 8-42?

א. $R_1 + R_2 + R_3$

ב. $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$

ג. $R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$

ד. $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

$$R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_2 + R_3} \text{ ה.}$$

שאלה 8-43

חזרו וחשבו את הזרמים והמתחים במעגל שבאיור 8-36, אך חשבו תחילה את הזרמים - ואחר כך את המתחים.

שאלה 8-44

חשבו את הזרם בנגד, שהתנגדותו 16Ω , במעגל שבאיור 8-43.

שאלה 8-45

- חשבו את המתח של הנגד, שהתנגדותו 600Ω , במעגל שבאיור 8-44.
- חשבו את ההספק של נגד זה.

8.5 נגדים משתנים

מחלק מתח

במעגלים חשמליים ואלקטרוניים רבים צריך לפעמים לשנות את המתח של הצרכן. בעזרת שני נגדים, המחוברים בטור במעגל חשמלי, אפשר לקבל מתח (בין שתי נקודות במעגל זה) הקטן ממתח המקור. נתבונן במעגל שבאיור 8-45. במעגל זה – מתח המקור U מתחלק בין שני הנגדים R_1 ו- R_2 , ולכן המתח U_2 של הנגד R_2 – קטן ממקור המתח. מעגל כזה נקרא לפעמים **מחלק מתח**.

אם נחבר צרכן R_L במקביל לנגד R_2 , בצרכן יהיה מתח הקטן ממתח המקור. חיבור כזה מתואר באיור 8-46.

נגד משתנה בחיבור פוטנציומטרי

בכל פעם שרוצים לשנות את המתח של הצרכן R_L במעגל שבאיור 8-46, יש להחליף לפחות אחד מהנגדים R_1 או R_2 . ברור שסידור כזה אינו נוח, ולכן במעגלים שבהם יש לשנות את המתח של הצרכן משתמשים בנגד משתנה.

נגד כזה עשוי משכבה של תערובת פחם או מתיל מתכת, המלוּפּף כסליל. של הנגד נמצא זחלן שאפשר להזיזו, ובאמצעותו אפשר לשנות את המתח של הצרכן.

באיור 8-47 מתואר מעגל, שבו מחובר הנגד המשתנה. התנגדות הנגד המשתנה היא R והזחלן מחלק את הנגד המשתנה לשני נגדים, R_1 ו- R_2 , שסכום ההתנגדויות שלהם הוא R . הזזת הזחלן משנה את היחס בין ההתנגדות R_1 להתנגדות R_2 , אך סכום ההתנגדויות נשאר תמיד קבוע – R .

כדי להשתמש בנגד המשתנה כמחלק מתח משתנה, מחברים אליו צרכן R_L , כפי שאפשר לראות במעגל שבאיור 8-48. הדק אחד של הצרכן מחובר לקצה הקבוע של הנגד המשתנה (באיור 8-48 – הקצה הקבוע הוא A), והדק השני מחובר לזחלן.

חיבור כזה הוא **חיבור פוטנציומטרי**, והנגד המשתנה נקרא אז **פוטנציומטר**. הזזת הזחלן משנה את היחס בין R_1 ל- R_2 , וכתוצאה מכך משתנה המתח של הצרכן R_L . צרכן זה מחובר, באיור 8-48, במקביל לנגד R_2 , והשקול של שני נגדים אלה – מחובר בטור לנגד R_1 .

 דוגמה 8-15

צרכן מחובר לנגד משתנה בחיבור פוטנציומטרי, כמתואר במעגל שבאיור 8-49. נתון כי $R_1 + R_2 = 12\text{ k}\Omega$. מהו המתח של הצרכן R_L , כשהזחלן של הפוטנציומטר נמצא במצב שבו היחס בין R_1 ל- R_2 הוא 3?

פתרון

תחילה נמצא את ההתנגדויות R_1 ו- R_2 . אנו יודעים:

$$\frac{R_1}{R_2} = 3$$

כלומר:

$$R_1 = 3R_2$$

נציב זאת במשוואה:

$$R_1 + R_2 = 12\text{ k}\Omega$$

ונקבל:

$$3R_2 + R_2 = 12\text{ k}\Omega$$

ומכאן:

$$4R_2 = 12\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 3\text{ k}\Omega$$

וכן נקבל:

$$R_1 = 3R_2 = 9 \text{ k}\Omega$$

R_L מחובר במקביל ל- R_2 (איור 8-49), וההתנגדות השקולה $R_{2,L}$ של שני נגדים אלה היא:

$$R_{2,L} = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{3,000 \times 6,000}{3,000 + 6,000} = \frac{18,000,000}{9,000} = 2,000 \Omega = 2 \text{ k}\Omega$$

ההתנגדות השקולה $R_{2,L}$ מחוברת בטור להתנגדות R_1 . ההתנגדות השקולה R_{eq} של שתי התנגדויות אלה היא:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,L} = 9,000 + 2,000 = 11,000 \Omega = 11 \text{ k}\Omega$$

זוהי גם ההתנגדות השקולה של המעגל. לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל הוא:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{220}{11,000} = 0.02 \text{ A} = 20 \text{ mA}$$

הזרם I זורם בנגד R_1 . המתח U_1 של הנגד R_1 הוא:

$$U_1 = IR_1 = 0.02 \times 9,000 = 180 \text{ V}$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף, המתח $U_{2,L}$ על ההתנגדות השקולה $R_{2,L}$ הוא:

$$U_{2,L} = U - U_1 = 220 - 180 = 40 \text{ V}$$

זהו גם המתח על כל אחד מהנגדים R_2 ו- R_L , המחוברים במקביל. כלומר, המתח על הצרכן R_L הוא 40V.

נגד משתנה בחיבור ריאוסטטי

לפעמים מחברים את הנגד המשתנה, כפי שמתואר באיור 8-50. כלומר, אין מחברים כלל את אחד הקצוות הקבועים של הנגד המשתנה, ומנצלים רק את ההתנגדות שבין הזחלן לבין הקצה הקבוע השני של הנגד המשתנה. במצב זה, הנגד המשתנה נקרא **ריאוסטט** וחיבור כזה נקרא בהתאם - **חיבור ריאוסטטי**.

ככל שהזחלן בריאוסטט קרוב יותר לקצה הקבוע A (איור 8-50), התנגדות הריאוסטט (כלומר, ההתנגדות בין הנקודות A ו-C) קטנה יותר. כאשר הזחלן נוגע בקצה החופשי B, כל ההתנגדות R של הריאוסטט מחוברת למעגל. ההתנגדות R_1 שבאיור 8-50 – מחוברת בטור להתנגדות R_L . ההתנגדות R_2 אינה מחוברת במעגל זה.

מהו ההבדל בין פוטנציומטר לריאוסטט? בפוטנציומטר משתמשים בשלושה הדקים, ואילו בריאוסטט משתמשים רק בשני הדקים. בפוטנציומטר זורם זרם דרך הנגד R כולו, ואילו בריאוסטט זורם זרם רק בחלק R_1 של הנגד, בין הקצה הקבוע המחובר – לבין הזחלן. באיור 8-51 מופיעים תצלומים של נגדים משתנים אלה.

באיור 8-52 מופיעים הסמלים של רכיבים אלה.

תרגול

שאלה 8-46

סמנו את כל הטענות הנכונות לגבי שני המעגלים שבאיור 8-53.

- רק המעגל הימני אינו מחלק מתח.
- רק המעגל השמאלי אינו מחלק מתח.
- שני המעגלים הם מחלקי מתח.
- שני המעגלים אינם מחלקי מתח.

שאלה 8-47

המתח U_2 במעגל שבאיור 8-54 נתון על ידי:

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| א. $\frac{R_2}{R_1 + R_2} U$ | ב. $\frac{R_2}{R_1} U$ |
| ג. $\frac{R_1 + R_2}{R_2} U$ | ד. $\frac{R_1}{R_2} U$ |
| ה. $\frac{R_1}{R_1 + R_2} U$ | ו. $\frac{R_1 + R_2}{R_1} U$ |

הדרכה: השתמשו בחוק אום לגבי הנגד R_2 ולגבי ההתנגדות השקולה.

שאלה 8-48

הראו כי כאשר $R_1 = 2R_2$ במעגל שבאיור 8-54, מקבלים:

$$U_2 = \frac{U}{3}$$

שאלה 8-49

המתח U_1 במעגל שבאיור 8-55, נתון על ידי:

א. $\frac{R_1+R_2}{R_1} U$	ב. $\frac{R_1}{R_1} U$
ג. $\frac{R_1}{R_1+R_2} U$	ד. $\frac{R_2}{R_1} U$
ה. $\frac{R_1+R_2}{R_2} U$	ו. $\frac{R_2}{R_1+R_2} U$

שאלה 8-50

"המתח על כל אחד מהנגדים במחלק מתח קטן ממתח המקור". נכון או לא? נמקו.

שאלה 8-51

נתון מחלק מתח, שבו שני הנגדים זהים. המתח של כל אחד מהנגדים...

- א. שווה למתח המקור.
- ב. שווה למחצית מתח המקור.
- ג. גדול ממתח המקור.
- ד. קטן ממחצית מתח המקור.

שאלה 8-52

חזרו על דוגמה 8-15 עבור המצב שבו ההתנגדות R_1 שווה להתנגדות R_2 .

שאלה 8-53

הוסיפו "ריאוסטט" או "פוטנציומטר" בכל מקום מסומן:

- ב. _____ משתמשים בשלושה הדקים. ואילו ב. _____ משתמשים בשני הדקים.
- ב. _____ זורם זרם דרך הנגד כולו, ואילו ב. _____ זורם זרם רק דרך חלק של הנגד, בין הקצה הקבוע המחובר לבין הזחלן.

שאלה 8-54

מה ההתנגדות השקולה של המעגל שבאיור 8-56?

- א. R_1
- ב. R_2
- ג. R_L
- ד. $R_1 + R_2$

$$\text{ה. } R_1 + R_L \quad \text{ו. } R_2 + R_L \quad \text{ז. } R_1 + \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} \quad \text{ח. } \frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L}$$

שאלה 8-55

"הזזת הזחלן במעגל שבאיור 8-57, משנה את היחס בין R_1 ל- R_2 , וכתוצאה מכך משתנה המתח של הצרכן R_L ".

א. הראו כי כאשר $R_1 = 0$, המתח על הצרכן R_L הוא U .

ב. הראו בעזרת דוגמה מספרית כי כאשר $R_1 = R_2$, המתח על הצרכן קטן מ- $\frac{U}{2}$.

ג. הראו כי כאשר $R_1 = R_2 = R_L$, המתח על הצרכן הוא $\frac{U}{3}$.

שאלה 8-56

הראו כי ההתנגדות השקולה R_{eq} של המעגל שבאיור 8-58 היא:

$$R_{eq} = R_1 + \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$$

שאלה 8-57

א. חשבו את ההתנגדות השקולה של R_1 ו- R_L במעגל שבאיור 8-59. מהי התנגדות המעגל?

ב. חשבו את המתח על הצרכן R_L .

שאלה 8-58

חשבו את המתח על הצרכן R_L באיור 8-60.

שאלה 8-59

הראו כי הזרם בצרכן R_L במעגל שבאיור 8-61, נתון על ידי

$$I = \frac{U}{R_1 + R_L}$$

8.6 הספק, נצילות וחשבון החשמל

בסעיפים הקודמים למדנו, כי גם במעגל טורי וגם במעגל מקבילי סכום ההספקים של הצרכנים שווה להספק המקור. עתה נראה שגם במעגל מעורב, סכום ההספקים של הצרכנים שווה להספק המקור. נדגים זאת לגבי המעגל שבאיור 8-62. מעגל זה זהה למעגל שבאיור 8-36, וכבר חישבנו את הזרמים שבו.

עכשיו נחשב את ההספקים במעגל. לשם כך נרשום את הזרמים ביחידות אמפר, ואת ההתנגדויות – ביחידות אום.

הספק המקור נתון על ידי:

$$P = UI = 24 \times 0.004 = 0.096W = 96 \text{ mW}$$

והספקי הצרכנים הם:

$$P_1 = I_1^2 R_1 = 0.004^2 \times 4,000 = 0.064W = 64 \text{ mW}$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 = 0.00267^2 \times 3,000 = 0.02139W = 21.39 \text{ mW}$$

$$P_L = I_L^2 R_L = 0.00133^2 \times 6,000 = 0.001061W = 10.61 \text{ mW}$$

וסכום הספקי הצרכנים הוא:

$$P_1 + P_2 + P_L = 64 + 21.39 + 10.61 = 96 \text{ mW}$$

אנו רואים כי במעגל שבאיור 8-62, הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים:

$$P = P_1 + P_2 + P_L = 96 \text{ mW}$$

תוצאה זו תתקבל לגבי כל מעגל מעורב. נסיק:

סכום הספקי הצרכנים במעגל מעורב - שווה להספק המקור.

אנרגיה מושקעת, אנרגיה מופקת-מועילה ונצילות

ראינו כי כאשר זרם עובר בנגד, הנגד מתחמם. כלומר, אנרגיה חשמלית נהפכת לחום. במקרים מסוימים אנו מעוניינים בחום הנוצר בצרכן; למשל, כשהצרכן הוא תנור חימום, או קומקום חשמלי. אבל במקרים אחרים החום הנוצר בצרכן אינו נחוץ לנו. למשל, כאשר הצרכן הוא מנוע חשמלי, אנו מעוניינים באנרגיה המכנית ואיננו זקוקים לחום שנוצר.

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/battery-resistor-circuit>

אם כן, במעגל חשמלי שמחובר בו צרכן, מושקעת אנרגיה חשמלית (על ידי מקור המתח) ומופקת אנרגיה בצורות שונות. אנו יכולים להבחין בין אנרגיה מופקת המועילה לנו, לבין אנרגיה מופקת שהיא מבחינתנו אנרגיה מבזבזת.⁶

האנרגיה המבזבזת מופיעה בדרך כלל בצורת חום. במנוע חשמלי, שהזכרנו כבר, חלק מהאנרגיה מתבזבז בתילים המוליכים, וחלק מתבזבז תוך התגברות על החיכוך בין חלקי המנוע המסתובבים.

בזבז אנרגיה הוא חיסרון של הִתְקֵנִים, ההופכים אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת, ואנו רוצים לצמצם את הבזבז ככל האפשר. ככל שנקטין את האנרגיה המבזבזת, נקבל יותר אנרגיה מופקת-מועילה. נסביר:

האנרגיה המבזבזת היא ההפרש בין האנרגיה המושקעת לאנרגיה המופקת-המועילה לנו.

היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה, לבין האנרגיה המושקעת - נקרא נצילות. ובכן, הנצילות של מעגל חשמלי נתונה על ידי:

$$\text{נצילות} = \frac{\text{אנרגיה מופקת} - \text{מועילה}}{\text{אנרגיה מושקעת}}$$

למעשה, הגדרה זו של נצילות אינה מוגבלת למעגלים בלבד, אך אנו נעסוק רק בנצילות של מעגלים.

נסמן את הנצילות על ידי האות היוונית η (אֵטָא); את האנרגיה המושקעת בצרכן נסמן על ידי W_{in} ; ואת האנרגיה המופקת-המועילה, המתקבלת מהצרכן, נסמן על ידי W_{out} . נקבל:

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (8-11)$$

η – נצילות

W_{out} - אנרגיה מופקת-מועילה [J]

W_{in} - אנרגיה מושקעת [J]

כדי לדעת את הנצילות של מעגל חשמלי, יש לחשב את האנרגיה המושקעת במעגל במשך זמן מסוים, ואת האנרגיה המופקת-המועילה של המעגל **במשך אותו זמן**.

⁶ נדגיש כי אנרגיה מבזבזת איננה אנרגיה שנעלמת. לפי חוק שימור האנרגיה, אנרגיה אינה יכולה להיעלם. כשאנו אומרים אנרגיה מבזבזת, אנו מתכוונים לאנרגיה שאינה מועילה לנו.

מקובל לרשום את הנצילות באחוזים. אם, למשל, הנצילות היא $\eta=0.7$, מקובל לרשום ערך זה בצורה $\eta=70\%$.

דוגמה 8-16

דוגמה 8-16

תנור חימום חשמלי הפיק, במשך ערב אחד, כמות של אנרגיית חום בשיעור 18 מיליון ג'ול. נצילות התנור היא 90%. מה כמות האנרגיה החשמלית שהושקעה בתנור במשך אותו ערב?

פתרון

האנרגיה המופקת-המועילה של התנור היא $W_{out} = 18,000,000 J$. הנצילות היא 90%, כלומר $\eta=0.9$. כדי לחשב את האנרגיה המושקעת, נשתמש במשוואת הנצילות (8-11):

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$0.9 = \frac{18,000,000}{W_{in}}$$

ומכאן נקבל:

$$W_{in} = \frac{18,000,000}{0.9} = 20,000,000 J$$

האנרגיה החשמלית, שהושקעה בתנור, היא 20,000,000 J.

נצילות אידיאלית

ככל שהערך של האנרגיה המועילה קרוב יותר לערך של האנרגיה המושקעת, האנרגיה המבוזבזת קטנה יותר, והנצילות גדולה יותר. במצב אידיאלי, כל האנרגיה המושקעת נהפכת לאנרגיה מופקת-מועילה, כלומר, האנרגיה המופקת-המועילה שווה לאנרגיה המושקעת:

$$W_{out} = W_{in}$$

לכן במצב האידיאלי נקבל:

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = 1$$

כלומר, הנצילות היא 100%. נצילות כזאת היא אידיאלית. באופן מעשי, אי-אפשר לקבל נצילות של 100%, אבל אפשר להתקרב לנצילות כזאת. למשל, הנצילות של מנועים חשמליים יכולה להגיע ל-90%, ואפילו יותר.

הנצילות כיחס הספקים

ראינו כי הנצילות של מעגל חשמלי היא היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה של מעגל במשך זמן מסוים, לבין האנרגיה המושקעת במעגל במשך אותו זמן. עכשיו ברצוננו להראות, כי הנצילות היא גם היחס בין ההספק המופק-המועיל P_{out} לבין ההספק המושקע P_{in} . ואמנם, לפי הגדרת ההספק, האנרגיה המושקעת בצרכן במשך פרק זמן t , נתונה על ידי:

$$W_{in} = P_{in} \cdot t$$

והאנרגיה המופקת-המועילה W_{out} , שמתקבלת מהצרכן במשך אותו פרק זמן t , נתונה על ידי:

$$W_{out} = P_{out} \cdot t$$

ומכאן נקבל:

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{P_{out} \cdot t}{P_{in} \cdot t} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

כלומר:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (8-12)$$

קיבלנו אפוא שתי הגדרות של נצילות:

- היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה לאנרגיה המושקעת בפרק זמן מסוים;
- היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע.

נוכל להשתמש בכל אחת מהגדרות אלה בהתאם לנוחותנו ולנתוני הבעיה הספציפית.

דוגמה 8-17

ההספק המופק-המועיל של מנוע במכונת כביסה מסוימת הוא 2 kW. נצילות המנוע היא 80%. חשבו את ההספק שהמנוע צורך מרשת החשמל.

פתרון

נתון כי ההספק המופק-המועיל הוא $P_{out} = 2 \text{ kW} = 2,000 \text{ W}$, והנצילות היא 80%, כלומר: $\eta = 0.8$. עלינו לחשב את ההספק המושקע, כלומר: ההספק שהמנוע צורך. נשתמש במשוואת הנצילות (8-12):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

נציב את הגדלים הנתונים, ונקבל:

$$0.8 = \frac{2,000}{P_{in}}$$

ומכאן:

$$P_{in} = \frac{2,000}{0.8} = 2,500 \text{ W} = 2.5 \text{ kW}$$

ההספק, שהמנוע צורך, הוא 2.5 kW.

חישובי נצילות במעגל טורי

עד כה חישבנו נצילות לפי היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע במעגל (או לפי היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה לאנרגיה המושקעת). עכשיו נלמד לחשב נצילות של מעגל טורי - רק על פי ערכי ההתנגדויות במעגל זה.

באיור 8-63 נתון מעגל טורי, הכולל שתי התנגדויות: התנגדות הצרכן R_L וההתנגדות R . ההתנגדות R מייצגת את ההתנגדות השקולה של כל ההתנגדויות במעגל, מלבד התנגדות הצרכן (למשל: ההתנגדות R מייצגת את התנגדות הקו).

נבטא את ההספקים במעגל זה. תחילה נבטא את **הספק המקור** (הנקרא גם **הספק המעגל**). נזכור כי ההספק P של המקור - נתון על ידי מכפלת מתח המקור U בזרם המעגל I :

$$P = UI$$

הספק המקור הוא ההספק המושקע במעגל. ההספק המופק-המועיל הוא, מבחינתנו, ההספק P_L של הצרכן R_L ; וההתנגדות השנייה R גורמת לבזבז הספק (ואנרגיה) במעגל. מכיוון שהמעגל הוא טורי, הזרם I זורם גם בצרכן, וההספק P_L של הצרכן נוצר על ידי מכפלת המתח שלו (U_L) בזרם העובר דרכו, כלומר:

$$P_L = U_L I$$

הנצילות η היא היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע, לכן:

$$\eta = \frac{P_L}{P} = \frac{U_L I}{UI}$$

ומכאן:

$$(8-13) \quad \eta = \frac{U_L}{U}$$

כלומר, נצילות המעגל הטורי שווה ליחס שבין המתח של הצרכן לבין מתח המקור. עכשיו נבטא את המתח של הצרכן באמצעות מתח המקור וההתנגדויות במעגל, כדי לבטא את הנצילות על פי ההתנגדויות בלבד.

הנצילות במעגל טורי כיחס התנגדויות

כאמור, המעגל טורי, ולכן ההתנגדות השקולה של המעגל היא:

$$R_{eq} = R_L + R$$

והזרם I במעגל נתון על ידי:

$$(8-14) \quad I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{U}{R_L + R}$$

לפי חוק אום, המתח U_L על הצרכן במעגל שבאיור 8-63 נתון על ידי:

$$U_L = IR_L$$

נציב במשוואה זו את ביטוי הזרם שבמשוואה (8-14), ונקבל:

$$U_L = IR_L = \frac{U}{R_L + R} R_L = \frac{U}{R_{eq}} R_L$$

והיחס בין המתח על הצרכן לבין מתח המקור הוא:

$$\frac{U_L}{U} = \frac{R_L}{R_{eq}}$$

כבר קיבלנו שהנצילות נתונה על ידי [משוואה (8-13)]:

$$\eta = \frac{U_L}{U}$$

ומכאן:

$$(8-15) \quad \eta = \frac{R_L}{R_{eq}} = \frac{R_L}{R_L + R}$$

אפשר לקבל את הנצילות גם בדרך אחרת. הנצילות נתונה, כאמור, על ידי:

$$\eta = \frac{U_L}{U}$$

נציב במשוואת הנצילות את הערכים המתאימים של המתחים:

$$U = I(R_L + R) = IR_{eq}$$

$$U_L = IR_L$$

ונקבל:

$$\eta = \frac{U_L}{U} = \frac{IR_L}{IR_{eq}} = \frac{R_L}{R_{eq}}$$

כלומר, הנצילות של מעגל טורי - נתונה על ידי היחס שבין התנגדות הצרכן לבין ההתנגדות השקולה של המעגל כולו. בדוגמה הבאה נראה פי כמה משתנה נצילות המעגל, כאשר התנגדות הצרכן גדלה פי שניים.

דוגמה 8-18

הצרכן במעגל שבאיור 8-64 – הוא נגד משתנה.

א. חשבו את נצילות המעגל, כשהתנגדות הנגד המשתנה היא 20Ω .

ב. מהי נצילות המעגל, כאשר התנגדות הנגד המשתנה היא 40Ω ?

ג. הראו כי נצילות המעגל תמיד קטנה מ-100%.

פתרון

א. ראינו כי נצילות המעגל המתואר באיור 8-64 נתונה על ידי משוואה (8-15), כלומר: על

ידי היחס בין התנגדות הצרכן להתנגדות השקולה של המעגל כולו:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R}$$

נציב את הנתונים ונקבל:

$$\eta = \frac{20}{20 + 20} = \frac{20}{40} = \frac{1}{2} = 0.5 = 50\%$$

ב. הפעם התנגדות הצרכן היא 40Ω , לכן נקבל:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R} = \frac{40}{40 + 20} = \frac{40}{60} = \frac{2}{3} = 0.667 = 66.7\%$$

אנו רואים שכאשר התנגדות הצרכן גדלה פי 2 (מ- 20Ω ל- 40Ω), הנצילות גדלה מ-50%

ל-66.7%, כלומר פי 1.33.

ג. נתבונן במשוואת הנצילות:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R}$$

אפשר לראות כי המכנה $R_L = R$ גדול תמיד מהמונה, כי הוא שווה למונה R_L ועוד R . ולכן המנה $\frac{R_L}{R_L + R}$ תמיד קטנה מ-1. מכאן שנצילות המעגל תמיד קטנה מ-1 (כלומר, מ-100%).

יחידות אנרגיה שימושיות

למדנו כי המכשירים החשמליים בביתנו מחוברים בדרך כלל במקביל, וכי ההספק הכולל של הצרכנים במעגל מקבילי - שווה לסכום ההספקים של הצרכנים. לכן ההספק הכולל של מכשירי החשמל בביתנו - שווה לסכום ההספקים של המכשירים.

האנרגיה החשמלית מסופקת למכשירי החשמל על ידי תחנות הכוח של חברת החשמל, שהן מקורות המתח הגדולים במדינה.

אם כן, חברת החשמל מספקת אנרגיה חשמלית להפעלת המכשירים החשמליים השונים. כל דירה או בית נחשבים לצרכן של חברת החשמל. ההתנגדות של צרכן כזה היא ההתנגדות השקולה של כל המכשירים בדירה, כלומר: צרכן אחד של חברת החשמל כולל כמה וכמה צרכנים (כלומר, מכשירים חשמליים) המחוברים בדרך כלל במקביל. ההספק של צרכן חברת החשמל (כלומר, דירה) הוא סכום ההספקים של הצרכנים שבדירה.

אנו משלמים בכל תקופה (מדי חודשיים; ויש המשלמים מדי חודש) לחברת החשמל, על פי כמות האנרגיה החשמלית שצרכנו. האנרגיה הכוללת, שצרכן חברת החשמל צורך במשך תקופה מסוימת, תלויה בהספק של כל אחד מהמכשירים שהופעלו, ובמשך הזמן שבו הופעלו המכשירים.

דוגמה 8-18

חשבו את צריכת החשמל – במשך חודש - של נורה ותנור חימום המחוברים במקביל. נתון כי הספק הנורה הוא 60W, והיא מאירה במשך 100 שעות בחודש; והספק התנור הוא 2,000W, והוא מחמם במשך 90 שעות בחודש.

פתרון

האנרגיה החשמלית W_1 , שהנורה צורכת, שווה למכפלת הספק הנורה P_1 במשך הזמן t_1 שהנורה מאירה. נהפוך את השעות לשניות, ונקבל:

$$W_1 = P_1 t_1 = 60 \times 100 \times 3,600 = 21,600,000 \text{ J}$$

והאנרגיה W_2 , שהתנור צורך, שווה למכפלת הספק התנור P_2 במשך הזמן t_2 , שהתנור פועל. שוב נהפוך את השעות לשניות, ונקבל:

$$W_2 = P_2 t_2 = 2,000 \times 90 \times 3,600 = 648,600,000 J$$

האנרגיה הכוללת של שני המכשירים היא:

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 = P_1 t_1 + P_2 t_2 \\ &= 21,600,000 + 648,000,000 = 669,600,000 J \end{aligned}$$

בדוגמה 8-19 חישבנו את צריכת החשמל – במשך חודש - של נורה ותנור בלבד, וקיבלנו מאות מיליוני ג'ול (J). מכאן מובן כי יחידת האנרגיה ג'ול אינה נוחה לצורך חישוב צריכת החשמל בבתים. ואמנם, כפי שהסברנו בפרק 6, היחידה השימושית לצריכה ביתית ותעשייתית היא הקילו-ואט שעה (kWh).

כזכור, הקשר בין קילו-ואט שעה לבין הג'ול נתון על ידי:

$$1 kWh = 1,000W \times 3600s = 3,600,000Ws = 3,600,000J$$

דוגמה 8-20

בטאו ביחידות קילו-ואט שעה את צריכת האנרגיה של הנורה והתנור שבדוגמה 8-19.

פתרון

נפתור שאלה זו בשתי דרכים:

א. בדוגמה 8-19 מצאנו כי האנרגיה, שהנורה והתנור צורכים, היא $669,600,000J$. נבטא אנרגיה זו ביחידות קילו-ואט שעה:
אנו יודעים כי:

$$1kWh = 3,600,000J$$

לכן האנרגיה, הנצרכת ביחידות קילו-ואט שעה, היא:

$$\frac{669,600,000}{3,600,000} = 186 kWh$$

ב. נבטא את הספקי הנורה והתנור ב-kW, ונחשב בקילו-ואט שעה את האנרגיה שנצרכה במשך חודש (בלי לבטא את האנרגיה ביחידות ג'ול, ובלי להפוך את השעות לשניות).
הספק הנורה הוא 60W, כלומר, 0.06 kW, והספק התנור הוא 2,000W, כלומר, 2 kW.
האנרגיה החשמלית, הנצרכת על ידי הנורה והתנור, היא:

$$W = P_1 t_1 + P_2 t_2$$

$$= 0.06 \times 100 + 2 \times 90 = 186 \text{ kWh}$$

חשבון החשמל

באיור 8-65 מופיע צילום של חלק מחשבון החשמל, שנשלח לצרכן של חברת החשמל. סכום האנרגיות, שצרכו המכשירים החשמליים בביתו של הצרכן, מנובמבר 2002 עד ינואר 2003, הוא 1475 kWh (בחשבון החשמל כתוב, שהצריכה בקוט"ש היא 975).

רשום בחשבון כי התשלום בעד קוט"ש הוא 557.26 ₪. כלומר, זהו התשלום בעבור צריכה של 975 קוט"ש. מכאן שמחיר קוט"ש אחד בחודשים אלה יהיה:

$$\frac{557.26}{1475} = 0.3778 = 37.7 \text{ אגורות}$$

וכך כתוב גם בחשבון החשמל. כאשר ידוע המחיר של 1 קוט"ש חשמל, אפשר לחשב את מחיר ההפעלה של מכשירי החשמל השונים, אם ידוע ההספק של מכשירים אלה.

לדוגמה, נחשב את המחיר ששולם בחודש ינואר 2003 בעבור הפעלתם של התנור והנורה שבדוגמה 8-20. כאמור, צריכת האנרגיה בחודש של התנור והנורה היא 186 kWh. המחיר לקוט"ש היה 37.7 אגורות, ולכן המחיר ששולם בעבור הפעלתם של שני המכשירים הוא $186 \times 37.7 = 7012.2$ אגורות ש"ח = 70.12 ₪.

תרגול

שאלה 8-60

הספק הנגד, שהתנגדותו 150Ω , במעגל שבאיור 8-66 הוא 2W.

א. חשבו את הספק הנגד 75Ω .

ב. חשבו את הספק המעגל.

ג. מהו מתח המקור?

שאלה 8-61

חשבו את ההספק של כל נגד ואת הספק המקור במעגל שבאיור 8-67.

שאלה 8-62

נתון כי הספק המעגל שבאיור 8-68 – הוא $7.2W$.

א. חשבו את הזרם I במעגל זה.

ב. חשבו את התנגדות הנגד R .

ג. חשבו את הספק הנגד R .

שאלה 8-63

המשפטים הבאים עוסקים בנצילות ובאנרגיה (מושקעת, מופקת-מועילה ומבוזבזת) במעגל חשמלי. סמנו ליד כל משפט: **תמיד נכון, לעולם לא נכון, נכון רק בחלק מהמעגלים.**

א. האנרגיה המופקת-המועילה גדולה מהאנרגיה המושקעת.

ב. הנצילות היא היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה לאנרגיה המושקעת.

ג. אם האנרגיה המופקת-המועילה שווה לאנרגיה המבוזבזת, הנצילות היא 50%.

ד. האנרגיה המופקת-המועילה גדולה מהאנרגיה המבוזבזת.

ה. הנצילות אינה גדולה מ-100%.

שאלה 8-64

סמנו את הביטויים הנכונים:

ככל שהערך של האנרגיה המופקת-המועילה קרוב יותר לערך של האנרגיה המושקעת, האנרגיה המבוזבזת **קטנה יותר/ גדולה יותר**, והנצילות **קטנה יותר/ גדולה יותר**.

שאלה 8-65

אם כל האנרגיה המושקעת הופכת לאנרגיה מופקת-מועילה, הנצילות היא:

א. 50%

ב. 0%

ג. 100%

ד. 1%

שאלה 8-66

תנור חשמלי, שנצילותו 92%, מחובר למקור מתח. התנור מפיק כל יום 60 מיליון ג'ול. מה כמות האנרגיה, שהתנור צורך כל יום?

שאלה 8-67

מכונת כביסה, שההספק שלה (כלומר, ההספק שהיא צורכת) 2 kW ונצילותה 90% , פועלת במשך 10 דקות.

א. רשמו ביחידות kWh את האנרגיה שמכונת הכביסה צורכת במשך 10 הדקות.

ב. בטאו, ביחידות ג'ול, את האנרגיה שמכונת הכביסה צורכת במשך 10 הדקות.

ג. חשבו את ההספק המופק-המועיל של מכונת הכביסה.

שאלה 8-68

הנצילות של צרכן היא 60% . הצרכן מחובר למקור מתח של 220V , והזרם בצרכן הוא 10A .

א. חשבו את ההספק, שהצרכן צורך.

ב. מה ההספק המופק-המועיל של הצרכן?

שאלה 8-69

חשבו את נצילות המעגל שבאיור 8-69.

שאלה 8-70

הצרכן R_L במעגל שבאיור 8-70 – מחובר בטור לנגד R . המשפטים הבאים נוגעים למעגל זה.

סמנו ליד כל משפט: **נכון**, **לא נכון**.

א. ככל ש- R_L גדל, גם הנצילות גדלה.

ב. אם $R_L = R$, נצילות המעגל היא 100% .

ג. אם $R_L = R$, נצילות המעגל היא 50% .

ד. אם $R_L > R$, נצילות המעגל גדולה מ- 100% .

ה. אם R_L גדל פי 2 , גם הנצילות גדלה פי 2 .

ו. הנצילות תלויה רק בשתי ההתנגדויות R ו- R_L , אך לא במתח המקור.

שאלה 8-71

נתון כי המתח של הנגד R שבמעגל שבאיור 8-70 – הוא 24V , והמתח של הנגד R_L הוא 8V .

מהי נצילות המעגל?

שאלה 8-72

הנה רשימה חלקית של מכשירים חשמליים, המחוברים בבית. ליד כל מכשיר רשום ההספק שלו, ומשך הזמן – בשעות – שבו המכשיר פעל במשך חודש. חשבו את האנרגיה החשמלית הכוללת – ביחידות kWh - שצרך כל אחד מהמכשירים האלה באותו חודש.

המכשיר	הספק המכשיר	משך פעולת המכשיר בשעות
מקלט טלוויזיה	150W	150
מחשב	60W	120
תנור חימום	3,000W	40

שאלה 8-73

- א. חשבו את נצילות המעגל שבאיור 8-71, בהנחה כי R_2 הוא הצרכן.
 ב. חזרו על החישוב, בהנחה כי R_1 הוא הצרכן.

8.7 העברת הספק מרבי לצרכן

באיור 8-72 נתון מעגל טורי המורכב ממקור מתח ממשי – ומצרכן R_0 , שהתנגדותו ניתנת לשינוי (כאמור, מקור מתח ממשי מיוצג על ידי מקור מתח אידיאלי E והתנגדות פנימית R_s). לפנינו אפוא מעגל טורי הכולל שני נגדים: נגד קבוע R_s ונגד משתנה R_0 . ברצוננו למצוא את התנגדות הצרכן R_0 , שעבורו ההספק P – המעבר לצרכן – יהיה מרבי. לדרישה זו, לקבלת הספק מרבי, יש חשיבות רבה במערכות חשמליות שונות.

עלינו למצוא את הקשר בין R_0 , הניתן לשינוי, לבין R_s , כך שההספק P יהיה מרבי. ההספק P , שהוא הספק הצרכן, נתון – לפי סעיף 8.6 – על ידי:

$$(8-16) \quad P = I^2 R_0$$

כאשר I הוא הזרם במעגל.

לפי חוק אום, הזרם במעגל נתון על ידי:

$$(8-17) \quad I = \frac{E}{R_s + R_0}$$

נציב במשוואה (8-16) את ביטוי הזרם שבמשוואה (8-17), ונקבל:

$$(8-18) \quad P = I^2 R_0 = \left(\frac{E}{R_s + R_0} \right)^2 R_0 = \frac{E^2 R_0}{(R_s + R_0)^2}$$

אנו מחפשים אפוא את המקסימום של ההספק P המועבר לצרכן – בתלות בהתנגדות R_0 . נמדוד את ההספק P בתלות בהתנגדות המשתנה R_0 , ונקבל את הגרף שבאיור 8-73.

בגרף זה אפשר לזהות שני תחומים: האחד משמאל להתנגדות R_0 , והשני – מימין להתנגדות זו.

בתחום השמאלי – ההספק גדל, כל עוד התנגדות הצרכן קטנה מהתנגדות המקור. ובתחום הימני – ההספק קטן, כשהתנגדות הצרכן גדולה מהתנגדות המקור.

ובכן, ההספק גדל בתחום השמאלי, מגיע למקסימום כשהתנגדות הצרכן שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח. בתחום הימני – ההספק הולך וקטן. כאמור, ההספק המרבי, המועבר לצרכן, מתקבל כאשר:

$$R_s = R_0$$

המשוואה $R_s = R_0$ היא אפוא התנאי להעברת הספק מרבי לצרכן. אפשר להוכיח זאת באופן מתמטי. לשם כך נחזור ונתבונן במשוואה (8-18):

$$P = \frac{E^2 R_0}{(R_s + R_0)^2}$$

במשוואה זו נתון ההספק P , המועבר לצרכן, בתלות בהתנגדות R_0 של הצרכן. תנאי הכרחי לקבלת מקסימום של פונקציה הוא התאפסות הנגזרת של הפונקציה. אפשר להראות כי המקסימום יתקבל כאשר $R_s = R_0$. ההוכחה חורגת ממסגרת הלימוד הנוכחי.

תרגול 

שאלה 8-74

- התנגדות הנגד R_s באיור 8-72 – היא 16Ω . מה צריכה להיות התנגדות הצרכן R_0 , שעבורו ההספק המועבר לצרכן יהיה מרבי?
- נתון כי הכא"מ של מקור הוא $9V$. מה ההספק שיועבר לצרכן, הנתון בסעיף הקודם, כשהתנגדות הצרכן שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח?

שאלה 8-75

- א. התנגדות הנגד R_s באיור 8-72 – היא 8Ω . נתון כי ההספק המועבר לצרכן – מרבי. מה התנגדות הצרכן?
- ב. מה נצילות המעגל?

שאלה 8-76

- א. משנים את התנגדות הצרכן שבאיור 8-72. בטבלה הבאה נתונים ערכים שונים של התנגדות הצרכן. חשבו את נצילות המעגל לגבי כל אחת מההתנגדויות הנתונות של הצרכן.

התנגדות הצרכן	$R_s = 5R_0$	$R_s = 2R_0$	$R_s = R_0$	$R_s = 0.5R_0$	$R_s = 0.2R_0$
נצילות					

- ב. מה הנצילות, כשהספק מרבי מועבר לצרכן?
- ג. האם הנצילות מרבית כשמועבר לצרכן הספק מרבי? נמקו.

שאלה 8-77

- א. משנים את התנגדות הצרכן שבאיור 8-72. בטבלה הבאה נתונים ערכים שונים של התנגדות הצרכן. הניחו כי הכא"מ של המקור הוא $1V$, וההתנגדות הפנימית של המקור היא 1Ω , וחשבו את הספק המעגל ואת ההספק המועבר לצרכן.

התנגדות הצרכן	$R_s = 5R_0$	$R_s = 2R_0$	$R_s = R_0$	$R_s = 0.5R_0$	$R_s = 0.2R_0$
הספק המעגל					
ההספק המועבר לצרכן					

- ב. מה ההספק המרבי המועבר לצרכן?
- ג. האם ההספק המרבי, המועבר לצרכן, הוא גם ההספק המרבי של המעגל? נמקו.

8.8 כא"מ ומקורות מתח

בפרקים הקודמים הנחנו כי לכל אחד ממקורות המתח במעגל יש מתח קבוע, שאינו תלוי בהתנגדויות ובזרם שבמעגל. על פי הנחה זו, אם מחברים צרכן למקור מתח, גם המתח של הצרכן קבוע.

בפרק זה נבדוק הנחה זו. נדון במקור מתח שבו המתח נוצר על ידי הפרדת מטענים בתהליך כימי, כמו זה שלמדנו בפרק 2. במקורות מתח מסוגים אחרים נעסוק בשלבים מתקדמים יותר של הלימוד.

8.8.1 התא החשמלי והזרם במעגל

נתחיל את דיוננו במעגל פשוט המכיל צרכן אחד. מקור המתח במעגל זה הוא התא החשמלי, שעליו למדנו בסעיף 2.2. אלקטרודה אחת של התא - עשויה פחם, והאלקטרודה השנייה עשויה אבץ.

באיור 8-74 מתואר התא החשמלי המחובר לצרכן. כאמור, כיוון הזרם המוסכם במעגל זה, המכיל מקור מתח וצרכן, הוא מההדק החיובי של מקור המתח – דרך הצרכן – אל ההדק השלילי של מקור המתח. ואילו בתוך התא יש מעבר מטענים חיוביים מההדק השלילי - אל ההדק החיובי. כיוון הזרם המוסכם במעגל מתואר באיור 8-74ב.

נחלק לשני חלקים את מסלול התנועה של המטענים במעגל. בחלק אחד של המסלול נעים המטענים - דרך התילים המוליכים והצרכן; ואילו בחלק השני של המסלול יש מעבר מטענים בתא החשמלי. בהמשך נזניח את התנגדות התילים המוליכים במעגל.

כאמור, הזרם המוסכם נע מנקודה שבה הפוטנציאל גבוה - לנקודה שבה הפוטנציאל נמוך. אבל בתוך התא החשמלי יש מעבר של מטענים חיוביים - מההדק השלילי להדק החיובי, כלומר: מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה. אם כן, בחלק זה של המסלול **יש צורך להשקיע אנרגיה במטענים חיוביים.**

אנרגיה זו מאפשרת את תנועת המטענים במעגל כולו, כי השקעת האנרגיה מאפשרת את המשך התהליך של הפרדת המטענים בתא. וכתוצאה מכך, ממשיך להתקיים הפרש פוטנציאלים בין ההדק החיובי לבין ההדק השלילי של התא. אנרגיה זו – מקורה בתהליכים כימיים, המתרחשים בתא החשמלי. ולכן נוהגים לקרוא לאנרגיה זו – **אנרגיה כימית.**

8.8.2 מתח הדקים, כא"מ והתנגדות פנימית

נניח תחילה כי מעבר המטענים בתוך התמיסה, בין הדקי מקור המתח (איור 8-74ב), נעשה ללא התנגדות כלשהי. כאמור, במקרה כזה צריך מקור המתח להוסיף אנרגיה למטענים (חיוביים), רק כדי להעלות את המטענים מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה, כלומר: להתגבר על המתח שבין ההדקים של המקור. מתח זה נקרא **מתח ההדקים של המקור**.

מתח ההדקים של המקור יכול לגרום לתנועת המטענים דרך הצרן שמחובר בין הדקי המקור. מאחר שמתח מתקבל על פי אנרגיה ליחידת מטען, אפשר לראות את מתח ההדקים של המקור כאנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען – דרך הצרן.

הנחנו כי מעבר המטענים בתוך התמיסה נעשה ללא התנגדות כלשהי. אך במציאות יש התנגדות למעבר המטענים בתוך התמיסה. מקור המתח צריך להשקיע אנרגיה, כדי להתגבר על ההתנגדות למעבר המטענים בתוך התא עצמו, נוסף על העלאת המטענים (החיוביים) מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה יותר.

כאמור, המעגל החשמלי מכיל את מקור המתח ואת הצרן. האנרגיה, שהמקור צריך להשקיע בהנעת יחידת מטען סביב המעגל החשמלי כולו, נקראת הכוח האלקטרו-מניע של מקור המתח, ובקיצור: **הכא"מ של מקור המתח**. הכא"מ מסומן על ידי E .

כוח אלקטרו-מניע אינו שם מתאים. שם זה כולל את המלה **כוח**, אך כוח אלקטרו-מניע אינו כוח, אלא אנרגיה ליחידת מטען. שם זה מקובל בתורת החשמל, וגם אנו נשתמש בו. אך במקום להשתמש בשם המלא, נקרא לו בהמשך רק בראשי התיבות שלו - **כא"מ**.

יחידת הכא"מ היא אנרגיה ליחידת מטען, כלומר: וולט (V). מכאן שיחידת הכא"מ ויחידת המתח הן זהות, אך הכא"מ והמתח הם גדלים שונים. כאמור, הכא"מ יכול לגרום לתנועת המטענים במעגל כולו, ואילו המתח בין ההדקים גורם לתנועת המטענים רק דרך הצרן במעגל.

הכא"מ של מקור מתח הוא תכונה אופיינית של המקור. תכונה זו תלויה באלקטרודות של התא ובתמיסה הנמצאת בתא. אם כן, אפשר לדבר על מקור בעל כא"מ של 9V, למשל.

כא"מ הוא רק אחת התכונות האופייניות של המקור. כאמור, יש בתמיסה התנגדות למעבר המטען מההדק השלילי להדק החיובי. התנגדות זו נקראת **התנגדות פנימית**, והיא מסומנת באמצעות r . ההתנגדות הפנימית היא תכונה אופיינית נוספת של המקור.

אנו נניח כי ההתנגדות הפנימית קבועה. לפיכך נייצג את ההתנגדות הפנימית על ידי נגד, שהתנגדותו r . למעשה, אותה כמות מטען עוברת ביחידת זמן גם בצרכן וגם בתמיסה, ולכן אפשר לומר כי אותו זרם עובר בצרכן ובתמיסה. מכאן נסיק כי המעגל שבאיור 8-74, הוא מעגל טורי, שבו הצרכן R מחובר בטור להתנגדות הפנימית r . מעגל טורי זה מתואר באיור 8-75.

נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגבי המעגל שבאיור 8-75, ונקבל כי הכא"מ E נתון על ידי:

$$(8-19) \quad E = U + Ir$$

נעביר את מתח ההדקים U לאגף שמאל, ואת הכא"מ E נעביר לאגף ימין, ונקבל:

$$(8-20) \quad U = E - Ir$$

המתח על הצרכן R במעגל זה, נתון, לפי חוק אום – על ידי מכפלת הזרם I (שהוא זרם המעגל הטורי וגם הזרם בצרכן R) בהתנגדות הנגד, כלומר: RI . מתח זה שווה למתח ההדקים של המקור, כפי שאפשר להיווכח מהמעגל שבאיור 8-75.

לפי משוואה (8-19), הזרם I הנתון על ידי $I = \frac{E-U}{R}$. ניווכח בהמשך כי זרם זה נתון גם על ידי:

$$(8-21) \quad I = \frac{E}{R+r}$$

דוגמה 8-21

נתון כי הכא"מ של מקור המתח במעגל שבאיור 8-75, הוא $3V$. ההתנגדות הפנימית של המקור, היא 0.2Ω , והתנגדות הצרכן – 8Ω .

א. חשבו את הזרם במעגל.

ב. חשבו את המתח של הצרכן.

ג. מה מתח ההדקים של המקור?

פתרון

א. כדי למצוא את הזרם I במעגל שבאיור 8-75, נשתמש בחוק אום, ונבטא את המתח U

של הצרכן, באמצעות הזרם בצרכן (ובמעגל הטורי כולו): $U=IR$. נציב זאת בחוק

המתחים של קירכהוף, ונקבל:

$$E = U + Ir = IR + Ir = I(R + r)$$

ומכאן:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{3}{8 + 0.2} = 0.3659A = 365.9 \text{ mA}$$

ב. לפי חוק אום, המתח של הצרכן נתון על ידי:

$$IR = 0.3659 \times 8 = 2.93V$$

ג. מתח ההדקים של המקור שווה למתח על הצרכן. נוכל להיווכח בכך, אם נציב במשוואה

$$U = E - Ir \text{ את הנתונים. ובכן:}$$

$$U = E - Ir = 3 - 0.3659 \times 0.2 = 2.93V$$

$$U = IR \text{ אנו רואים כי}$$

ראינו שכאשר מחברים צרכן למקור מתח, כפי שמתואר באיור 8-75, מתח ההדקים של המקור נתון על ידי $U = E - Ir$. ומכאן נקבל:

$$E - U = Ir$$

כלומר, ההפרש בין הכא"מ E למתח ההדקים U שווה למתח Ir על ההתנגדות הפנימית. על סמך דיוננו נוכל להסיק שמתח ההדקים במעגל, כדוגמת זה שבאיור 8-75, אינו גדול מהכא"מ. כמו כן נוכל להסיק כי ככל שהזרם במעגל קטן יותר, גם ההפרש בין הכא"מ למתח ההדקים יהיה קטן יותר.

מה יהיה הקשר בין הכא"מ ומתח ההדקים, כשלא יזרום זרם במעגל?

אם לא יזרום זרם במעגל ($I=0$), נקבל מהמשוואה $E - U = Ir$, כי $E=U$, כלומר: מתח ההדקים של המקור, שווה לכא"מ. אם שום צרכן לא מחובר בין הדקי המקור, לא זורם זרם במעגל. מתח ההדקים, לפי הסברנו, יהיה שווה במקרה זה לכא"מ. נסכם:

כשהצרכן מנותק במעגל שבאיור 8-75, מתח ההדקים של המקור, שווה לכא"מ.

גם אם ההתנגדות הפנימית של המקור הייתה שווה לאפס, היינו מקבלים מהמשוואה $E - U = Ir$, כי $E=U$. כלומר: מתח ההדקים של המקור שווה לכא"מ. ההתנגדות הפנימית של מקור שווה לאפס רק במצב אידיאלי, שאינו קיים במציאות. מקור מתח, שהתנגדותו הפנימית שווה לאפס, מכונה אם כן **מקור מתח אידיאלי**.

לעומת זאת, מקור מתח ממשי, כלומר מקור מתח הקיים במציאות, הוא בעל התנגדות פנימית. במעגלים מעשיים רבים, שבהם ההתנגדות הפנימית קטנה מאוד (זניחה) ביחס להתנגדות הצרכן, מניחים כי $r=0$, ומכאן שמתח ההדקים קבוע ושווה בערך לכא"מ, כלומר: $U=E$.

כאמור, אנו מניחים שההתנגדות הפנימית קבועה. אך במציאות, כאשר המקור (כלומר: התא, הסוללה, המצבר) מתיישן, גדלה ההתנגדות הפנימית שלו. כתוצאה מכך קטן מתח ההדקים, עד שהצרכן - המחובר למקור - מפסיק לפעול.

8.8.3 ההתנגדות הפנימית של המקור, התנגדות הצרכן ונצילות המעגל

מצאנו כי הנצילות של מעגל טורי נתונה על ידי היחס שבין התנגדות הצרכן לבין ההתנגדות השקולה של המעגל כולו. ראינו באיור 8-74 ובאיור 8-75 כי גם מעגל, המכיל תא חשמלי וצרכן, הוא מעגל טורי. באיור 8-76 נתונים שני מעגלים טוריים: המעגל שבאיור 8-76 א מכיל נגד R וצרכן R_L , והמעגל שבאיור 8-76 ב - מכיל את ההתנגדות הפנימית r ואת התנגדות הצרכן R_L .

כאמור, הנצילות של מעגל טורי – נתונה במשוואה (8-15): $\eta = \frac{R_L}{R+R_L}$, ומכאן שנצילות מעגל, המכיל תא חשמלי וצרכן, נתונה על ידי:

$$(8-22) \quad \eta = \frac{R_L}{r+R_L}$$

דוגמה 8-22

נתון כי ההתנגדות הפנימית של מקור המתח שבאיור 8-76 ב – היא 0.2Ω . מה תהיה נצילות המעגל, אם התנגדות הצרכן תהיה...

- קטנה מאוד ("קֶצֶר")?
- גדולה מאוד ("אינסופית"; נֶתֶק)?
- 0.2Ω ?

פתרון

א. נציב $R_L = 0$ במשוואה (8-22), $\eta = \frac{R_L}{r+R_L}$, ונקבל:

$$\eta = \frac{0}{r+0} = 0$$

ב. אם התנגדות הצרכן R_L גדולה מאוד ביחס להתנגדות הפנימית של מקור המתח, הרי שהסכום $r + R_L$ קרוב מאוד להתנגדות הצרכן R_L . במכנה של משוואת הנצילות, $\eta = \frac{R_L}{r + R_L}$, נקבל בקירוב R_L , והנצילות תהיה כמעט 1 (כלומר: כמעט 100%).

ג. נציב במשוואת הנצילות (8-22) את הנתונים ונקבל:

$$\eta = \frac{R_L}{r + R_L} = \frac{0.2}{0.2 + 0.2} = \frac{0.2}{0.4} = 0.5 = 50\%$$

התנגדות הצרכן שווה, במקרה זה, להתנגדות הפנימית של מקור המתח, והנצילות שווה כמובן ל-50%.

8.8.4 הכא"מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח המחוברים

בטור

לפעמים קורה שמקור מתח יחיד אינו מספיק להזנת צרכן (או צרכנים). במקרים מסוימים דרושים לנו מתח, זרם והספק גדולים יותר מאלה שמקור יחיד מסוגל לספק. כדי להזין צרכן, אפשר לחבר מספר תאים זה לזה באותו מעגל. ההתקן המתקבל קרוי לעתים סוללה (battery). אחת האפשרויות היא לחבר את התאים האלה בטור. חיבור בטור של שני תאים הוא חיבור שבו ההדק החיובי של תא אחד מחובר להדק השלילי של התא השני (איור 8-77).

כאמור, הכא"מ הוא האנרגיה שהתא החשמלי משקיע ביחידת מטען, כדי להעלות אותה מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה יותר, תוך התגברות על ההתנגדות הפנימית של התא. כאשר תאים אחדים מחוברים בטור, כל תא משקיע במטען אנרגיה - בהתאם לכא"מ שלו.

האנרגיה, המושקעת על ידי כל התאים ביחד, שווה לסכום האנרגיות שכל תא בנפרד מעניק למטען. לכן הכא"מ השקול E_{eq} של מקור המתח הוא סכום הכא"מים של התאים הבודדים. אם נתונים n תאים מחוברים בטור, שהכא"מים שלהם $E_1, E_2, \dots, E_n$ (בהתאמה), הכא"מ השקול שלהם הוא:

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

כל מקור מתח נוסף, המחובר בטור, מגדיל את הכא"מ השקול E_{eq} . דוגמה לחיבור בטור של שני מקורות מתח של 1.5V – ליצירת מקור של 3V – מתוארת באיור 8-77. המצבר הוא מקור מתח, שנבנה על ידי חיבור בטור של מספר תאים חשמליים. למשל, מצבר של 12V במכונית בנוי משישה תאים (איור 8-78).

הן הסוללה והן המצבר מורכבים מתאים. אם כן, מה ההבדל בין סוללה למצבר?

הסוללות נקראות **תאים ראשוניים** (primary cells). המטענים בתא ראשוני נתקלים בהתנגדות לתנועתם דרך האלקטרוליט; וכאשר התא מתיישן, גְדֵלָה התנגדותו הפנימית. כתוצאה מכך, קָטַן מתח ההדקים של התא. לפיכך התא מפסיק לפעול.

לעומת זאת, יש תאים (או סוללות) הניתנים לטעינה מחדש באמצעות זרם חשמלי. תאים כאלה נקראים **תאים משניים** (secondary cells), או **מצברים**, או **סוללות נטענות**. לתא משני במכונית מקובל לקרוא **מצבר**, ולתא משני במכשירים אלקטרוניים (טלפון נייד וטלפון אלחוטי, למשל) מקובל לקרוא **סוללה נטענת**.

לאחר שנחלש הכא"מ, הנוצר בין האלקטרודות של תא משני, אפשר לחזור ולטעון תא זה, ולהחזיר אותו למצבו ההתחלתי - שלפני התחלת השימוש. אפשר לחזור שוב ושוב על התהליך עד שגם תא זה יפסיק לפעול.

מכל מקום, לא תמיד מקפידים על ההבחנה בשימוש במונחים אלה, והפירוש של BATTERY יכול להיות "סוללה" או "מצבר". לפי ההקשר אפשר לזהות שימושים אלה.

מאחר שלכל אחד מן התאים, המרכיבים את מקור המתח, יש התנגדות פנימית, גם למקור המתח כולו יש התנגדות פנימית. את ההתנגדות הפנימית של מקור מתח, המורכב מכמה תאים, נִכְנֶה **התנגדות פנימית שקולה**. לצורך חישוב התנגדות זו של תאים המחוברים בטור נתבונן במקרה הפשוט ביותר: חיבור טורי של שני תאים (איור 8-79א).

ההתנגדויות הפנימיות מחוברות בטור, ולכן ההתנגדות השקולה שלהן, r_{eq} , היא:

$$r_{eq} = r_1 + r_2$$

באיור 8-79ב מתוארים הכא"מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של שני התאים. באופן כללי, ההתנגדות הפנימית השקולה r_{eq} של n תאים, המחוברים בטור, היא:

$$r_{eq} = r_1 + r_2 + \dots + r_n$$

כאשר $r_1, r_2, \dots, r_n$ הן ההתנגדויות הפנימיות של n התאים.

8.8.5 הכא"מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח המחוברים במקביל

חיבור במקביל של מקורות מתח - הוא חיבור, שבו ההדקים החיוביים של המקורות מחוברים זה לזה, ויוצרים קוטב חיובי משותף; וההדקים השליליים של אותם מקורות מתח - מחוברים זה לזה, ויוצרים קוטב שלילי משותף (איור 8-83).

לשני התאים, המחוברים במקביל באיור 8-83, יש אותו כא"מ, ואין זה מקרה. לא רצוי לחבר במקביל מקורות מתח שהכא"מ שלהם שונה. אם נחבר במקביל שני תאים, שאין להם אותו כא"מ, ייווצר מתח בין התאים, ויעבור ביניהם זרם גם כאשר המעגל פתוח. זרם זה לא יביא לנו תועלת. אנרגיה חשמלית תתבזבז, והתאים יתרוקנו. יתרה מזאת, בגלל ההתנגדות הפנימית הקטנה, בדרך כלל, של התאים, ייווצר בתוך התאים זרם גדול ביותר העלול להרוס את התאים.

אם נחבר צרכן לתאים - בעלי אותו כא"מ והמחוברים במקביל - כמתואר באיור 8-84, נקבל - לפי חוק הזרמים של קירכהוף - כי הזרם I בצרכן הוא סכום הזרמים, שמקורות המתח מספקים:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

כל מטען במעגל ינוע עקב העבודה שמשקיע בו אחד התאים. מטען מסוים ינוע במעגל עקב הכא"מ של תא אחד, ומטען אחר ינוע במעגל עקב הכא"מ של אותו תא, או של תא אחר. אך מאחר שהכא"מ של התאים הוא זהה, כל מטען במעגל ינוע עקב כא"מ זהה. הכא"מ השקול E_{eq} של מקור מתח, המורכב מ- n תאים בעלי אותו כא"מ, שווה אפוא לכא"מ של כל אחד מהתאים הללו:

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$$

כאמור, ההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח, המחוברים בטור, חושבה על פי נוסחת ההתנגדות השקולה של נגדים בטור.

באופן דומה, מחשבים את ההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח - המחוברים במקביל, ובעלי כא"מ זהה - על פי נוסחת ההתנגדות השקולה של נגדים במקביל. נסמן את ההתנגדויות הפנימיות של n התאים - על ידי $r_1, r_2, \dots, r_n$. ההתנגדות הפנימית השקולה r_{eq} של n התאים, המחוברים במקביל, נתונה על ידי:

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}$$

אפשר להוכיח קשר זה בעזרת שיטות לפתרון מעגלים, שיילמדו בהמשך. בינתיים נקבל אפוא תוצאה זו ללא הוכחה.

כשם שההתנגדות השקולה של נגדים, המחוברים במקביל, קטנה מכל אחת מההתנגדויות, כך גם ההתנגדות הפנימית השקולה, של מקורות המחוברים במקביל, קטנה מכל אחת מההתנגדויות הפנימיות של המקורות.

8.8.6 חיבור מעורב של תאים

לפעמים, בגלל דרישות למתח ולהספק מסוימים, יש צורך לחבר תאים בחיבור מעורב. ראינו כבר אפשרויות שונות לחיבור מעורב של נגדים. באופן דומה אפשר לחבר תאים בצורות שונות.

כאן נדון רק במערך של תאים הכולל קבוצות אחדות של תאים מחוברים בטור, וכל קבוצה מחוברת במקביל לקבוצות נוספות. מערך כזה מתואר באיור 8-85. כל קבוצה במעגל זה כוללת שני תאים בטור; ויש שלוש קבוצות המחוברות במקביל. גם בחיבור מעורב חייבים כל התאים להיות זהים, בגלל המגבלות שפורטו לגבי חיבור תאים במקביל.

דוגמה 8-24

בטאו את הכא"מ השקול ואת ההתנגדות הפנימית השקולה של מערך התאים שבאיור 8-85. הניחו כי הכא"מ של כל תא הוא E , וההתנגדות הפנימית – r .

פתרון

נשתמש במשוואות שפיתחנו לקבלת הגדלים השקולים של הכא"מ וההתנגדות הפנימית, כדי לבטא את הגדלים הנדרשים. נבטא תחילה את הכא"מ השקול E_s ואת ההתנגדות הפנימית השקולה r_s של אחת מקבוצות התאים המחוברות בטור.

הכא"מ השקול של שני תאים זהים (שהכא"מ של כל אחד מהם הוא E), המחוברים בטור, הוא $E_s = 2E$; וההתנגדות הפנימית השקולה של שני תאים אלה – היא $r_s = 2r$. נוכל אפוא להמיר את מקור המתח, המתואר באיור 8-85, במקור המתח המתואר באיור 8-86.

באיור 8-86 נתונים שלושה מקורות מתח המחוברים במקביל. הכא"מ השקול של תאים אלה – הוא $E_{eq} = 2E$ וההתנגדות הפנימית השקולה היא $r_{eq} = \frac{2}{3}r$. נוכל אפוא להחליף את מערך התאים שבאיור 8-85 – במקור מתח, שהכא"מ שלו הוא $2E$, ושהתנגדותו הפנימית היא $\frac{2}{3}r$.

זרם I , הזורם בצרכן, שהתנגדותו R ואשר מחובר למערך התאים המתואר באיור 8-86, יהיה:

$$I = \frac{2E}{R + \frac{2}{3}r}$$

נניח כי בחיבור מעורב של תאים זהים – כדוגמת זה שבאיור 8-85 – יש p קבוצות של תאים במקביל, ובכל קבוצה – s תאים בטור. הכא"מ השקול של כל התאים האלה הוא $E_{eq} = sE$, וההתנגדות הפנימית השקולה היא $r_{eq} = \frac{sr}{p}$.

קיבלנו אפוא מעגל טורי הכולל מקור מתח E_{eq} , שהתנגדותו הפנימית r_{eq} , וצרכן R . ראינו שהתנאי להעברת הספק מרבי לצרכן במעגל טורי הוא שהתנגדות הצרכן שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח, כלומר:

$$R = r_{eq} = \frac{sr}{p}$$

אם התנגדות הצרכן, המחובר למערך תאים בחיבור מעורב, תהיה שווה ל- $\frac{sr}{p}$, יהיה אפוא זרם מרבי בצרכן.

8.8.7 קיבול שקול של תאים המחוברים בטור, במקביל ובמעורב

קיבול של תא חשמלי

מקור המתח, שאנו עוסקים בו, הוא התא החשמלי, ההופך כאמור אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית. האנרגיה הכימית, שהתא מכיל, מוגבלת כמובן. למדנו כבר את הקשר בין אנרגיה להספק: האנרגיה W , הכרוכה בהנעת המטענים במשך הזמן t_0 , שווה ל- Pt_0 (כלומר: למכפלת ההספק P במשך הזמן t_0):

$$W = Pt_0$$

אנו מניחים כי הכא"מ קבוע, זרם המעגל קבוע – ואף ההספק קבוע. למדנו שההספק נתון על ידי מכפלת המתח בזרם, וכן שההספק נתון על ידי מכפלת הכא"מ E של מקור המתח – בזרם המעגל I :

$$P = EI$$

נציב את ביטוי ההספק P במשוואת האנרגיה W , ונקבל:

$$W = Pt_0 = EIt_0$$

ומכאן:

$$\frac{W}{E} = It_0$$

מידעת הגודל It_0 , נוכל לדעת את משך הזמן t_0 שבו יכול התא לספק לצרכן במעגל – זרם בעל ערך קבוע I . הגודל It_0 נקרא **קיבול התא החשמלי**, והוא נמדד ביחידות אמפר-שעה $(A \cdot h)$. קיבול התא הוא גודל קבוע האופייני לתא.

לפי הגדרת הזרם, הגודל It_0 הוא מטען. ואכן, הקיבול It_0 של התא, הוא כמות המטען Q , שהתא מעביר במעגל במשך זמן פעולתו t_0 , כשהכא"מ של התא קבוע:

$$Q = It_0$$

בנוסף לכא"מ ולהתנגדות הפנימית, קיבול התא הוא אחד ממאפייניו העיקריים של התא החשמלי. יצרני תאים נוהגים בדרך כלל לדרג את התאים החשמליים לפי הקיבול שלהם ב- $A \cdot h$. אפשר לקבוע את הקיבול של התא באמצעות פריקתו בזרם קבוע, ובאמצעות מדידת זמן הפריקה. קיבול התא יתקבל אפוא כמכפלת הזרם (באמפרים) בזמן הפריקה (בשעות).

דוגמה 8-25

בטלפון נייד מסוים נמצאת סוללה, שהכא"מ שלה $3.6V$, וקיבולה $1,200 mA \cdot h$. נניח כי זרם קבוע של $200 mA$ זורם בטלפון במשך כל זמן פעולתו.

א. כמה זמן יכול הטלפון הנייד לפעול ברציפות?

ב. מהו ההספק שצורך הטלפון הנייד?

ג. מהי כמות האנרגיה, שהסוללה יכולה לספק במתח קבוע?

ד. מהי כמות המטען, שהסוללה יכולה להעביר במשך פעולתה התקינה?

פתרון

א. לפי הגדרת קיבול התא,

$$t_0 = \frac{Q}{I} = \frac{1,200 \text{ mA} \times h}{200 \text{ mA}} = 6h$$

המקלט יכול לפעול 6 שעות ברציפות.

ב. כאמור, הספק מקור המתח נתון על ידי $P=EI$. נציב את הערכים המספריים, ונקבל:

$$P = EI = 3.6V \times 200 \text{ mA} = 3.6V \times 0.2A = 0.72W$$

ג. כאמור, $W = Pt_0$. נציב את הערכים המספריים, ונקבל:

$$W = Pt_0 = 0.75 \times 6h = 0.72 \times 6 \times 3,600 = 15,552J$$

ד. לפי הגדרת קיבול התא, $Q = It_0$. נציב את הערכים המספריים, ונקבל:

$$Q = It_0 = 200 \text{ mA} \times 6h = 0.2A \times 6 \times 3,600 = 4,320 C$$

הקיבול השקול של תאים המחוברים בטור

הכרנו שלושה מאפיינים של התא החשמלי: כא"מ, התנגדות פנימית וקיבול. למדנו לחשב את הכא"מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של מקור מתח המורכב מתאים שמחוברים בטור. עתה נלמד לחשב את הקיבול השקול של תאים המחוברים בטור. לשם כך נתבונן במערך של n תאים זהים המחוברים בטור, ונחשב את הקיבול השקול של מקור זה.

במעגל, המתואר באיור 8-87א, נתונים n תאים זהים המחוברים בטור. לתאים אלה מחובר צרכן R . המעגל הוא טורי, ולכן אותו זרם I זורם בכל תא. מאחר שהתאים זהים, משך הזמן שזרם I קבוע יזרום בכל תא הוא זהה, ולכן לכל תא יש אותו קיבול. נסמן באמצעות $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ את קיבולי התאים, ונקבל:

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

נחליף את התאים הזוהים במקור מתח שקול, כך שיתקבל המעגל המתואר באיור 8-87ב. הזרם I במעגל זה שווה לזרם במעגל באיור 8-87א. מקור המתח השקול יזרים זרם במשך אותו זמן t_0 – כמו התאים המחוברים בטור. מכאן שהקיבול של מקור המתח השקול הוא It_0 . נסיק אפוא כי הקיבול השקול Q של מקור מתח הבנוי מתאים זהים, שמחוברים בטור, שווה לקיבול של כל אחד מהתאים המרכיבים אותו. כלומר:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$$

נבחר עתה תאים, שקיבוליהם שונים, ונחבר אותם בטור לצרכן. גם במקרה זה יזרום אותו זרם בכל התאים, אך התא, שקיבולו הוא הקטן ביותר, יהיה הראשון שבו תתכלה האנרגיה. הדרושה להנעת מטענים מאלקטרודה אחת של התא - לאלקטרודה השנייה.

נסמן באמצעות Q_1 את הקיבול הקטן ביותר של אחד התאים המחוברים בטור. הקיבול של תא זה הוא הקובע אפוא את הקיבול של מערכת התאים המחוברים בטור. מכאן נובע שהקיבול של מקור המתח השקול – שווה לקיבול Q_1 .

הקיבול השקול של תאים זהים במקביל

אם נחבר במקביל n תאים בעלי כא"מ זהה וקבוע, כל תא יעביר במעגל מטען השווה לקיבול התא. המטען הכולל, שכל התאים יעבירו במעגל, יהיה שווה לסכום המטענים שהתאים מעבירים. נסמן באמצעות $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ את קיבוליהם של n התאים, ונקבל:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

ובניסוח מילולי: הקיבול השקול של תאים, המחוברים במקביל, שווה לסכום קיבוליהם.

השוואה בין קיבול שקול של תאים בטור ובמקביל

למדנו כיצד למצוא את הכא"מ השקול, ההתנגדות הפנימית השקולה והקיבול השקול של מקור מתח, שמורכב מתאים המחוברים בטור או במקביל. בטבלה 8-2 מופיעים – במרוכז - הביטויים המתאימים עבור חיבור n תאים זהים, המחוברים בטור או במקביל. הכא"מ של כל תא הוא E ; ההתנגדות הפנימית – r , והקיבול – Q .

המאפיין של המקור	הערך בחיבור טורי	הערך בחיבור מקבילי	הערך של תא בודד
כא"מ שקול	nE	E	E
התנגדות פנימית שקולה	nr	$\frac{r}{n}$	r
קיבול שקול	Q	nQ	Q

טבלה 8-2 מאפיינים של מקור מתח, המורכב מ- n תאים זהים

מעיון בטבלה 8-2, נוכל לראות מה היתרונות של חיבור תאים במקביל - לעומת חיבור תאים בטור: ההתנגדות הפנימית קטנה יותר, קיבול גדול יותר. אך הדרישה שהתאים המחוברים במקביל יהיו זהים, כדי שהמקור - המורכב מתאים אלה - יוכל לפעול כראוי, מגבילה את מידת השימוש במקור כזה.

הקיבול השקול של תאים זהים בחיבור מעורב

כאמור, כאן נדון רק במערך של תאים שכולל קבוצות אחדות של תאים מחוברים בטור, וכל קבוצה מחוברת במקביל לקבוצות נוספות. כדי להדגים את הקיבול השקול של תאים זהים בחיבור מעורב, נחזור ונתבונן במעגל המתואר באיור 8-85.

נסמן על ידי Q את הקיבול של כל אחד מהתאים במעגל. הקיבול השקול Q_s של שני תאים, המחוברים בטור, הוא $Q_s = Q$; והקיבול השקול של שלושת המקורות, המחוברים במקביל (איור 8-86), הוא $Q_{eq} = 3Q$.

תרגול 

שאלה 8-78

סמנו את המלה הנכונה בכל צמד של מלים מודגשות.
צרכן מחובר למקור מתח. מקור המתח מעביר את המטענים החיוביים מפוטנציאל גבוה/נמוך לפוטנציאל גבוה/נמוך - בתוך התא החשמלי.

שאלה 8-79

- מהו כא"מ? סמנו את כל התשובות הנכונות.
 - שם אחר למתח הדקים.
 - קיצור של כוח אלקטרו-מניע.
 - האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען - דרך הצרכן בלבד.
 - האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען - דרך המעגל כולו.
- האם כא"מ הוא האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען - דרך המקור בלבד? נמקו.

שאלה 8-80

יחידת הכא"מ היא...

- | | |
|---------|--------|
| א. וולט | ג. אום |
| ב. אמפר | ד. ואט |

שאלה 8-81

- מהי התנגדות פנימית?
- התנגדות הצרכן.
- כל התנגדות הנמצאת במעגל חשמלי.
- התנגדות המקור למעבר מטענים בו.

ה. ההתנגדות השקולה במעגל טורי.

שאלה 8-82

- צרכן מחובר בטור למקור מתח. לאיזה מתח שווה המתח של הצרכן?
- לכא"מ של המקור.
 - למתח ההדקים של המקור.
 - להפרש שבין הכא"מ של המקור, לבין מתח ההדקים של המקור.
 - לסכום של כא"מ המקור ומתח ההדקים של המקור.

שאלה 8-83

נתון כי הכא"מ של מקור המתח במעגל שבאיור 8-75, הוא $9V$. ההתנגדות הפנימית של המקור, היא 0.2Ω , והתנגדות הצרכן - 16Ω . חשבו את מתח ההדקים של מקור המתח.

שאלה 8-84

צרכן, שהתנגדותו 50Ω , מחובר למקור מתח, שהתנגדותו הפנימית 0.1Ω . הזרם בצרכן הוא 239.5 mA . חשבו את הכא"מ של מקור המתח.

שאלה 8-85

הכא"מ של מקור מתח - $3V$, והתנגדות הפנימית - 0.2Ω . צרכן, שהתנגדותו 16Ω , מחובר למקור המתח. מה הזרם בצרכן?

שאלה 8-86

- באילו מהמקרים הבאים, מתח ההדקים של המקור שווה לכא"מ?
- אם שום צרכן אינו מחובר להדקי המקור.
 - אם התנגדות המקור שווה לאפס.
 - אם התנגדות הצרכן שווה לאפס.
 - אם התנגדות המקור שווה להתנגדות הצרכן.

שאלה 8-87

- לצעצוע חשמלי מחברים סוללה שמורכבת משישה תאים זהים המחוברים בטור. כל תא הוא בעל כא"מ של $1.5V$ והתנגדות פנימית של 0.1Ω . התנגדות העומס (הצעצוע) היא 15Ω .
- מהו הזרם שהסוללה מספקת?
 - חשבו את ההספק החשמלי שהצעצוע צורך.

שאלה 8-88

- א. נתונים 20 תאים זהים המחוברים בטור. קיבול כל תא הוא $2A \cdot h$. מהו הקיבול השקול של התאים?
- ב. נניח שהתאים מחוברים במקביל. מה יהיה הקיבול השקול שלהם?

שאלה 8-89

- א. שישה תאים מחוברים במקביל. הכא"מ של כל אחד מהתאים הוא 1.5V, וההתנגדות הפנימית של כל תא - 0.1Ω . נגד של 100Ω מחובר להדקי כל אחד מהתאים, בדומה למתואר באיור 8-84א. מהו הזרם בנגד?
- ב. מחברים שוב את התאים ואת הצרן, והפעם כולם בטור. מהו הזרם בנגד?

שאלה 8-90

הראו כי הזרם בצרן R שבציור 8-87 נתון על ידי המשוואה $I = \frac{2E}{R + \frac{2}{3}r}$ שבסוף דוגמה 8-24.

שאלה 8-91

- חמש סוללות זהות מחוברות במקביל. כל סוללה כוללת שלושה תאים זהים המחוברים בטור. הכא"מ של כל תא הוא 1.5V, וההתנגדות הפנימית - 0.2Ω . חשבו את הכא"מ השקול ואת ההתנגדות הפנימית השקולה של הסוללות.

סיכום

- כאשר נגדים שנמצאים באותו חוג מחוברים זה לזה, קצה לקצה, כמו בשרשרת – ואין צמתים ביניהם – הנגדים מחוברים בטור. מעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בטור, נקרא מעגל טורי.
- התנגדות שקולה במעגל היא התנגדות, שכאשר היא מחוברת במקום מערכת נגדים כלשהי במעגל, היא אינה משנה את תנאי המעגל. זרם המקור אינו משתנה; והמתח בין הנקודות – שאליו מחוברת ההתנגדות השקולה – נשאר אותו מתח.
- ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים. כאשר נגדים מחוברים בטור, היחס בין המתחים של הנגדים – שווה ליחס בין התנגדויות הנגדים.
- התנגדות התילים במעגל החשמלי – נקראת התנגדות הקו.
- נגדים, המחוברים בין אותם שני צמתים במעגל, מחוברים במקביל. מעגל חשמלי, שבו כל הנגדים מחוברים במקביל, נקרא מעגל מקבילי.
- ההתנגדות השקולה R_{eq} של שני נגדים, המחוברים במקביל, נתונה באמצעות כל אחת משתי המשוואות הבאות:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$
- ההתנגדות השקולה R_{eq} של n נגדים המחוברים במקביל:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$
- כשצרכנים מחוברים במקביל לרשת, אפשר לחבר צרן נוסף לרשת – או לנתק צרן – בלי להשפיע על יתר הצרכנים.
- במעגל מעורב מחוברים חלק מן הנגדים במקביל, וחלק – מחוברים בטור.
- מחלק מתח הוא הֶתְקֵן המאפשר לקבל מתח מוצא, שהוא רק חלק ממתח המקור. יש מחלק מתח, הבנוי משני נגדים קבועים.
- הפוטנציומטר והריאוסטט הם שני סוגים של נגדים משתנים.
- סכום הספקי הצרכנים במעגל מעורב שווה להספק המקור.
- הנצילות היא היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע.

- התנאי להעברת הספק מרבי לצרכן במעגל טורי, הכולל מקור מתח ממשי וצרכן, הוא שהתנגדות הצרכן תהיה שווה להתנגדות המקור.
- האנרגיה, שמקור מתח צריך להשקיע בהנעת יחידת מטען סביב המעגל החשמלי כולו, היא הכא"מ של מקור המתח. למקור המתח יש התנגדות פנימית. המתח שבין הדקי המקור - הוא מתח ההדקים של המקור.
- קיבול של תא חשמלי הוא משך הזמן שבו התא יכול לספק לצרכן במעגל – זרם בעל ערך קבוע.
- הנה המאפיינים של מקור מתח המורכב מ-n תאים זהים:

המאפיין של המקור	הערך בחיבור טורי	הערך בחיבור מקבילי	הערך של תא בודד
כא"מ שקול	nE	E	E
התנגדות פנימית שקולה	nr	$\frac{r}{n}$	r
קיבול שקול	Q	nQ	Q

9. שיטות לפתרון מעגלים

עד כה למדנו לפתור מעגלים טוריים, מקביליים או מעורבים, כאשר כל מעגל הכיל מקור מתח יחיד. לצורך הפתרון, חישבנו את ההתנגדות השקולה של הנגדים במעגל, ובאמצעות חוק אום מצאנו את הזרמים והמתחים השונים במעגל.

האם די בחוק אום ובחישוב ההתנגדות השקולה כדי לפתור כל מעגל חשמלי?

כדי לענות על שאלה זו, נתבונן תחילה במעגל המכיל מקור מתח יחיד, כמתואר באיור 9-1. זהו מעגל מעורב, שבו הנגד R_1 מחובר בטור לצירוף של הנגדים R_2 ו- R_3 , המחוברים במקביל.

באיור 9-2 נתון שוב המעגל שבאיור 9-1, ומסומנים בו הזרמים במעגל. כאמור, השתמשנו בכלל הבא לסימון כיווני הזרמים:

הזרם המוסכם בנגד - זורם מנקודה בעלת פוטנציאל גבוה לנקודה בעלת פוטנציאל נמוך.

אם כן, הזרם הכללי I_1 במעגל יוצא מההדק החיובי של מקור המתח, עובר בנגד R_1 , מגיע לצומת A, ומתפצל לזרמים I_2 ו- I_3 בנגדים R_2 ו- R_3 . כל כיווני הזרמים במעגל שבאיור 9-2 - מסומנים בהתאם לכלל סימון כיווני הזרמים.

עכשיו נוסיף למעגל שבאיור 9-1 שני מקורות מתח, ונקבל את המעגל שבאיור 9-3.

נניח שכל מקור מתח מזרים זרם, שכיוונו מההדק החיובי של המקור – אל הנגד הסמוך לו, וכיווני הזרמים הם כמתואר באיור 9-4. נראה מיד שהדבר לא ייתכן. כי הרי במקרה כזה, לצומת A היו נכנסים שלושה זרמים I_1 , I_2 ו- I_3 , ואף זרם לא היה יוצא ממנו. דבר זה עומד בסתירה לחוק הזרמים של קירכהוף, שלפיו סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.

המסקנה היא שלפחות כיוונו של אחד הזרמים חייב להיות הפוך לכיוון המסומן באיור 9-4. אבל כיוונו של איזה זרם מבין השלושה הוא הפוך? ייתכן גם שכיווניהם של שניים מבין הזרמים I_2 , I_1 , I_3 הפוכים מהמסומן באיור 9-4. ואם כך הדבר - אילו מהם?

לא די בחוק אום ובחישוב התנגדויות שקולות כדי לענות על השאלות האלה ולמצוא פתרון למעגלים, כדוגמת המעגל שבאיור 3-9. אבל קיימות שיטות שבעזרתן אפשר לפתור מעגלים כאלה, ואף מעגלים מורכבים יותר. כל השיטות הללו מבוססות על שימוש בחוק אום ובחוקי קירכהוף. נלמד עתה את אחת השיטות הללו.

9.1 שיטת זרמי החוגים

שיטת זרמי החוגים לפתרון מעגלים חשמליים פותחה על ידי הפיזיקאי הבריטי מאקסוול.

ג'יימס קלארק מאקסוול

1879-1831

מאקסוול היה פיזיקאי בריטי. הוא נולד באדינבורו שבסקוטלנד. כבר בגיל 14 כתב את המאמר המדעי הראשון שלו, והמאמר הוקרא בפני החברה המלכותית של אדינבורו. בתקופה זו גם החל בכתיבת שירה, והמשיך בכך עד סוף ימיו.

מאקסוול נחשב לאחד הפיזיקאים הגדולים בכל הדורות. מבין הפיזיקאים שחיו במאה ה-19, הוא היה בעל ההשפעה הגדולה ביותר על הפיסיקה המודרנית של המאה ה-20. רבים מהפיזיקאים בימינו רואים בו פיזיקאי מדרגתם של ניוטון ואיינשטיין. איינשטיין תיאר את עבודתו של מאקסוול כעבודה המעמיקה ביותר והפורייה ביותר בפיסיקה מאז ניוטון.

מאקסוול איחד את תורת החשמל ואת תורת המגנטיות לתורה אחת – התורה האלקטרומגנטית, וניסח אותה באמצעות ארבע משוואות בלבד, הנקראות על שמו. משוואות אלה הן הבסיס המתמטי לכל התופעות החשמליות הקלסיות.

אנו נפתור בשיטת זרמי החוגים את המעגל שבאיור 5-9, אך תחילה נסביר את המושג **זרם חוג**. לשם כך נחזור ונסביר מה הם הזרמים שעסקנו בהם עד כה. כאמור, בכל קטע במעגל, המורכב מקבוצת רכיבים המחוברים בטור, זורם אותו זרם. לקבוצת רכיבים כזאת קוראים **ענף**; ולזרם כזה קוראים **זרם ענף**. אם נחבר מד-זרם בטור לענף מסוים, ימדוד מד-הזרם את זרם הענף. בעיקרון, זרם ענף - הזרם בענף אחד - יכול להיות שונה מזרם ענף הזורם בענף אחר.

בפרקים הקודמים עסקנו, למעשה, בזרמי ענפים (הן במעגלים טוריים והן במעגלים מעורבים), בלי שקראנו להם בשם זה. נתבונן, למשל, במעגל שבאיור 5-9. זרמי הענפים במעגל זה הם הזרמים שבענפים הבאים:

BAF (מקור המתח U_a והנגד R_1)

BE (מקור המתח U_b והנגד R_2)

BCD (מקור המתח U_c והנגד R_3)

אם כן, במעגל שבאיור 9-5א, יש שלושה ענפים, ויש בו שלושה זרמי ענפים שונים.

זרמי חוגים

בניגוד לזרם ענף, זרם חוג מוגדר כזרם הזורם בחוג כולו. כאמור, חוג אחד יכול להכיל כמה ענפים שמחוברים זה לזה בחיבור שאינו בהכרח טורי. אם כן, זרם חוג הוא זרם אחד הזורם בכל ענפי החוג השונים. נסביר עתה את הקשר בין שני סוגי זרמים אלה: זרם חוג וזרם ענף.

נתבונן בשני החוגים, $ABEFA$ ו- $BCDEB$, אשר במעגל שבאיור 9-5א. נסתכל על כל חוג בנפרד, ונשייך זרם אחד לחוג כולו. לחוג $ABEFA$ נשייך את זרם החוג I_1 , ולחוג $BCDEB$ נשייך את זרם החוג I_2 , כמתואר באיור 9-5ב.

כאמור, אותו זרם חוג יכול לזרום בכמה ענפים שונים. למשל: בחוג $ABEFA$, המורכב משני ענפים (הענף BAF , המכיל את U_a ו- R_1 ; והענף BE , המכיל את U_b ו- R_2), זורם אותו זרם חוג I_1 . וכך הדבר לגבי החוג $BCDEB$, המורכב מענפים BCD ו- BE . בכל החוג הזה זורם אותו זרם חוג I_2 .

אנו רואים כי בענף BE , המכיל את U_b ו- R_2 , זורמים שני זרמי חוגים: I_1 ו- I_2 ; והרי אם נחבר בענף זה מד זרם, הוא ימדוד רק זרם אחד – זרם הענף. אם כן, מהו הקשר בין הזרם בענף BE לבין שני זרמי החוגים I_1 ו- I_2 הזורמים בענף זה?

ובכן, זרם הענף הוא הזרם **השקול** של שני זרמי החוגים. נסביר זאת. אנו רואים כי במעגל שבאיור 9-5ב, זרם החוג I_1 בענף BE – הפוך בכיוונו לזרם החוג I_2 בענף זה. לכן זרם הענף שווה להפרש בין שני זרמי החוגים הללו (להלן נדון בתנאי לכך, שההפרש יהיה $I_1 - I_2$ או $I_2 - I_1$). הפרש זרמים זה הוא הזרם השקול של שני זרמי החוגים הזורמים בענף BE , וכיוונו ככיוון הזרם הגדול בין שניהם.

הכיוונים של זרמי החוגים, I_1 ו- I_2 , סומנו באיור 9-5ב בכיוון תנועת מחוגי השעון. כך מסמנים לעתים קרובות את כיוון זרמי החוגים, אך לא תמיד.

סימון מתחים בענף שיש בו שני זרמי חוגים

חשוב להבין כי זרמי החוגים הם זרמים "מלאכותיים", שאנו מכניסים כדי לפתור מעגלים בצורה קלה יותר. אך הזרמים הממשיים במעגל הם זרמי הענפים. בענף שזורם בו רק זרם חוג אחד, זרם החוג שווה לזרם הענף: כך הדבר לגבי הענף BAF שבאיור 9-5 (זרם הענף שווה לזרם החוג I_1), וכך הדבר לגבי הענף BCD (זרם הענף שווה לזרם החוג I_2). בענף, שזורם בו יותר מזרם חוג אחד, זרם הענף הוא **השקול** של זרמי החוגים האלה.

וכיצד מחשבים בשיטת זרמי החוגים את המתח על ענף, המשותף לשני חוגים?

נתבונן בנפרד בחוג $ABEFA$ ובחוג $BCDEB$ של המעגל שבאיור 9-5. תחילה נתבונן בחוג השמאלי, שבו זורם זרם החוג I_1 . חוג זה מודגש באיור 9-6. מפל המתח U'_2 של הנגד R_2 , שזורם בו זרם החוג I_1 , הוא $U'_2 = I_1 R_2$. החץ המצביע על מקום הפוטנציאל הגבוה ברכיב מסומן באיור זה, לפי ההסכם שקבענו, בכיוון הפוך לזרם החוג I_1 .

החוג הימני של המעגל שבאיור 9-5 מודגש באיור 9-6. בחוג זה זורם זרם החוג I_2 . מפל המתח U''_2 של הנגד R_2 , שזורם בו זרם החוג I_2 , הוא $U''_2 = I_2 R_2$. גם במקרה זה סומן החץ ליד הרכיב, לפי ההסכם שקבענו.

אם כן, בשיטת זרמי החוגים, עוברים בנגד R_2 שני זרמים, ויש בו שני מתחים: U'_2 ו- U''_2 . באיור 9-7 נתון שוב המעגל שבאיור 9-5, ומסומנים בו שני המתחים U'_2 ו- U''_2 והחצים המתאימים להם.

המתח U_2 , שמד מתח ימדוד של הנגד R_2 , שווה להפרש בין שני המתחים U'_2 ו- U''_2 :

$$U_2 = U'_2 - U''_2$$

קוטביות המתח U_2 זהה לקוטביות המתח הגדול מבין שני המתחים: U'_2 ו- U''_2 .

עתה, לאחר שהסברנו את המושגים הבסיסיים בשיטת זרמי החוגים, נדגים פתרון מעגל בשיטה זו.

פתרון מעגל בשיטת זרמי החוגים

אנו רוצים לפתור בשיטת זרמי החוגים את המעגל שבאיור 9-7. את השלבים הראשונים בפתרון המעגל כבר עשינו: חילקנו את המעגל לשני חוגים, $ABEFA$ ו- $BCDEB$; שייכנו לכל

חוג - זרם חוג משלו, וקבענו כיוון מסוים לכל זרם חוג. כמו כן סימנו את המתחים U_2' ו- U_2'' של הנגד R_2 . עתה נשרטט חץ ליד כל אחד מהרכיבים במעגל, על פי הכללים שקבענו. שרטוט זה מתואר באיור 9-8.

עכשיו נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגבי כל אחד מהחוגים במעגל. נקיף כל חוג בכיוון זרם החוג המתאים, ונקבל:

משוואת המתחים בחוג השמאלי (ABEFA):

$$U_a - \underbrace{-U_1 + U_2'}_{\text{המתח על הנגד } R_2} - U_b = 0$$

ומשוואת המתחים בחוג הימני (BCDEB):

$$U_b + \underbrace{+U_2' - U_2''}_{\text{המתח על הנגד } R_2} - U_3 + U_c = 0$$

נשתמש בחוק אום כדי לבטא את המתחים של הנגדים - באמצעות הזרמים I_1 ו- I_2 .

$$U_1 = R_1 I_1$$

$$U_2' = R_2 I_1$$

$$U_3 = R_3 I_2$$

$$U_2'' = R_2 I_2$$

נציב ביטויים אלה במשוואות המתחים שרשמנו, ונקבל:

$$U_a - R_1 I_1 - R_2 I_1 + R_2 I_2 - U_b = 0$$

$$U_b + R_2 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_2 + U_c = 0$$

נכנס איברים (כלומר, נוציא את I_1 ואת I_2 מחוץ לסוגריים, בכל אחת מהמשוואות), נרכז את המתחים באגף אחד, ואת הזרמים וההתנגדויות – באגף השני. אם כן, נקבל:

$$(R_1 + R_2)I_1 - R_2 I_2 = U_a - U_b$$

$$-R_2 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b + U_c$$

קיבלנו שתי משוואות בשני נעלמים, I_1 ו- I_2 . (אנו מניחים שערכי הנגדים ומקורות המתח במעגל ידועים לנו). אם נפתור את המשוואות האלה, נדע מה הזרם בכל נגד במעגל. באיור 9-9 נתון המעגל שבאיור 9-5, כאשר רשומים בו ערכי הרכיבים במעגל.

נציב את ערכי הרכיבים בשתי המשוואות שקיבלנו:

$$(100 + 200)I_1 - 200I_2 = 45 - 30$$

$$-200I_1 + (200 + 400)I_2 = 30 + 10$$

נכנס איברים, ונקבל:

$$300I_1 - 200I_2 = 15$$

$$-200I_1 + 600I_2 = 40$$

קיבלנו שתי משוואות פשוטות למדי בשני הנעלמים I_1 ו- I_2 . נפתור אותן ונקבל:

$$I_1 = 0.121\text{A} = 121\text{ mA}$$

$$I_2 = 0.107\text{A} = 107\text{ mA}$$

הכיוונים של זרמי החוגים, I_1 ו- I_2 , נקבעו בהתאם לבחירתנו. אבל יכולנו לבחור את זרמי החוגים גם בכיוון ההפוך לכיוון המסומן.

איך נדע אם בחירת הכיוונים של זרמי החוגים - נכונה?

נוכל לדעת זאת רק לאחר שנחשב את זרמי החוגים. כאשר מתקבל ערך חיובי של זרם, פירוש הדבר שכיוון הזרם במעגל הוא אכן אותו כיוון שבחרנו מלכתחילה; ואילו כאשר מתקבל ערך שלילי של זרם, פירוש הדבר שכיוון הזרם במעגל - הפוך לכיוון שבחרנו מלכתחילה.

מה נוכל להסיק מהפתרונות שקיבלנו?

– הזרם בנגד $R_1 = 100\Omega$ הוא $I_1 = 0.121\text{A}$. לזרם I_1 יש ערך חיובי, לכן הכיוון של זרם זה הוא כמתואר במעגל שבאיור 9-9.

– הזרם בנגד $R_3 = 400\Omega$ הוא $I_2 = 0.107\text{A}$. גם לזרם I_2 יש ערך חיובי, לכן גם הכיוון של זרם זה הוא כמתואר במעגל שבאיור 9-9.

– הזרם בנגד $R_2 = 200\Omega$ הוא ההפרש בין שני הזרמים I_1 ו- I_2 . כיוון הזרם בנגד זה הוא ככיוון הזרם הגדול מבין השניים. מאחר שהזרם I_1 גדול מהזרם I_2 , כיוון הזרם בנגד R_2 הוא ככיוון הזרם I_1 (כלומר, מהנקודה B לנקודה E).

$$I_1 - I_2 = 0.121 - 0.107 = 0.014\text{A} = 14\text{ mA}$$

לאחר שחישבנו את הזרם בכל ענף במעגל, נוכל לחשב את המתח של כל אחד מהנגדים במעגל, וכן את ההספק של כל נגד. בכך נסיים את פתרון המעגל.

דוגמה 9-1

חשבו את הספק הנגד R_3 , אשר במעגל שבאיור 9-10.

פתרון

באיור 9-11 מסומנים החצים ליד רכיבי המעגל, בהתאם להסכמו. כיוון זרמי החוגים נקבע כרצוננו. נקיף כל חוג בכיוון זרם החוג המתאים, ונשתמש בחוק המתחים של קירכהוף, כדי לרשום את משוואות המתחים בחוגים. המשוואות הן:

$$U_a - U_1 - U'_3 - U''_3 = 0 \quad (\text{החוג השמאלי})$$

$$U_b - U_2 - U'_3 - U''_3 = 0 \quad (\text{החוג הימני})$$

לפי חוק אום נקבל:

$$U_1 = R_1 I_1 \quad U_2 = R_2 I_2$$

$$U'_3 = R_3 I_1 \quad U''_3 = R_3 I_2$$

נציב במשוואות החוגים את הביטויים המתאימים של המתחים, ונקבל:

$$U_a - R_1 I_1 - R_3 I_1 - R_3 I_2 = 0$$

$$U_b - R_2 I_2 - R_3 I_1 - R_3 I_2 = 0$$

נכנס איברים, ונרכז את המתחים באגף אחד, ואת הזרמים וההתנגדויות - באגף השני:

$$(R_1 + R_3)I_1 + R_3 I_2 = U_a$$

$$R_3 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$4,000I_1 + 3,000I_2 = 50$$

$$3,000I_1 + 5,000I_2 = 100$$

קיבלנו שתי משוואות בשני הנעלמים I_1 ו- I_2 . פתרונות המשוואות הם:

$$I_1 = -4.54 \text{ mA}$$

$$I_2 = 22.72 \text{ mA}$$

לזרם I_1 יש ערך שלילי, לכן הכיוון של זרם זה הפוך לכיוון המתואר במעגל שבאיור 9-11. ואילו לזרם I_2 יש ערך חיובי, לכן כיוון זרם זה הוא כמתואר באיור. במעגל שבאיור 9-12 מסומנים כיווני הזרמים כך, שלכל אחד מהם יש ערך חיובי.

כיוון הזרם I_1 בנגד $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$ (איור 9-12) הפוך לכיוון הזרם I_2 בנגד זה. מאחר שהזרם I_2 גדול מהזרם I_1 , הרי שכיוון הזרם I_3 בנגד R_3 – הוא ככיוון הזרם I_2 . ערך הזרם בנגד זה הוא $I_3 = I_2 - I_1 = 22.72 - 4.54 = 18.18 \text{ mA}$

חץ הזרם I_3 מסומן במעגל שבאיור 9-12. המתח U_3 והחץ שלידו מסומנים גם הם. כיווני החצים נקבעו לפי הסכם הסימונים של זרם ומתח בנגד. הספק הנגד R_3 נתון על ידי $P_3 = I_3^2 R_3 = \left(\frac{18.18}{1,000}\right)^2 \times 3,000 = 0.99 \text{ W}$

קבלה מידית של המשוואות בשיטת זרמי החוגים

למדנו לכתוב את משוואות המתחים בכל אחד מהחוגים של מעגל נתון. לאחר שפותרים משוואות אלה, מקבלים את הערכים של זרמי החוגים, ובאמצעותם - ניתן לחשב את הזרם בכל רכיב במעגל, ואת המתח של כל רכיב.

התהליך של קבלת משוואות המתחים - כלל כמה וכמה שלבים. ניווכח עכשיו כיצד אפשר לקבל באופן מדי את המשוואות. לשם כך נחזור ונרשום את משוואות המתחים בחוגי המעגל שבאיור 9-6. מטעמי נוחות חזרנו והבאנו באיור 9-13.

משוואות המתחים בחוג $ABEFA$, שבו זרם זרם החוג I_1 (המשוואה הראשונה): $(R_1 + R_2)I_1 - R_2I_2 = U_a - U_b$

משוואות המתחים בחוג $BCDEB$, שבו זרם זרם החוג I_2 (המשוואה השנייה): $-R_2I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b + U_c$

נתחיל במשוואה הראשונה. אגף ימין של המשוואה - הוא סכום מתחי המקורות בחוג $ABEFA$. הסימן ליד כל אחד ממתחי המקורות במשוואה זו נקבע לפי הכלל שלמדנו בסעיף 7.3.

כיוון החץ ליד מקור המתח U_a הוא ככיוון זרם החוג I_1 , ולכן רושמים משמאל ל- U_a את הסימן "+" (או שלא רושמים שום סימן); וכיוון החץ ליד מקור המתח של U_b , הפוך לכיוון של זרם החוג I_1 , ולכן רושום משמאל ל- U_b הסימן "-".

אגף שמאל של המשוואה הראשונה הוא סכום מפלי המתח בחוג $ABEFA$. סכום זה מבטא באמצעות מכפלות של התנגדויות - בזרמי החוגים. נפרט זאת.

- מכפילים את סכום ההתנגדויות של החוג – בזרם החוג. סכום ההתנגדויות של החוג $ABEFA$, הוא $R_1 + R_2$. זרם החוג $ABEFA$ הוא I_1 , והמכפלה שלהם היא $(R_1 + R_2)I_1$. מכפלה זו מופיעה במשוואה הראשונה.
- אם בחוג יש נגד, המשותף לחוג נוסף, מכפילים כל התנגדות משותפת - בזרם החוג של החוג הנוסף. הנגד R_2 משותף לחוג $ABEFA$ ולחוג הנוסף $BCDEB$. זרם החוג הנוסף, הזורם בנגד זה, הוא I_2 . לכן מופיעה במשוואה הראשונה המכפלה $R_2 I_2$.
- משמאל למכפלה הראשונה (מכפלת סכום ההתנגדויות בזרם החוג) רושמים את הסימן "+" (או שלא רושמים שום סימן).
- אם לשני זרמי החוגים יש אותו כיוון בנגד המשותף, רושמים את הסימן "+" משמאל למכפלה השנייה (מכפלת ההתנגדות המשותפת - בזרם החוג הנוסף). ואם לשני זרמי החוגים יש כיוונים הפוכים בנגד המשותף, רושמים את הסימן "-" משמאל למכפלה זו.

באופן דומה מקבלים במשוואה השנייה את הביטויים המתאימים לחוג $BCDEB$. כיווני החצים ליד מקורות המתח U_b ו- U_c הם ככיוון זרם החוג I_2 , ולכן מתחים אלה מופיעים בקוטביות חיובית - באגף ימין של המשוואה.

באגף שמאל של המשוואה השנייה מופיעה המכפלה של זרם החוג I_2 בסכום ההתנגדויות של החוג: $(R_2 + R_3)I_2$. משמאל למכפלה זו, מופיע הסימן "+". הנגד R_2 משותף לחוג $ABEFA$ ולחוג הנוסף $BCDEB$, וזורם בו זרם החוג הנוסף I_1 . לכן במשוואה השנייה מופיעה המכפלה $R_2 I_1$. הואיל ולשני זרמי החוגים, יש כיוונים הפוכים בנגד המשותף, רושמים את הסימן "-" משמאל למכפלה זו.

בגישה, שבה השתמשנו לקבלה מידית של המשוואות בשיטת זרמי החוגים, אפשר להשתמש לגבי כל מעגל חשמלי, ולא רק לגבי המעגל שבאיור 9-5. בדוגמה הבאה נשתמש בגישה זו – לגבי מעגל נוסף.

דוגמה 9-2

רשמו באופן מדי את משוואות המתחים של המעגל שבאיור 9-11.

פתרון

סכום המתחים בחוג השמאלי, הוא U_a ; וסכום ההתנגדויות בחוג זה, הוא $R_1 + R_3$. מכפלת סכום ההתנגדויות של החוג – בזרם החוג, היא $(R_1 + R_3)I_1$. הנגד R_3 משותף לחוג השמאלי ולחוג הימני. זרם החוג הנוסף, הזורם בנגד זה, הוא I_2 . לכן מופיעה במשוואה הראשונה המכפלה $R_3 I_2$.

כיוון זרם החוג I_2 בנגד המשותף הוא ככיוון זרם החוג I_1 , ולכן יופיע הסימן "+" משמאל למכפלה $R_3 I_2$. מכאן שמשוואת המתחים של החוג השמאלי הוא:

$$(R_1 + R_3)I_1 + R_3 I_2 = U_a$$

סכום המתחים בחוג הימני, הוא U_b ; וסכום ההתנגדויות בחוג זה - $R_2 + R_3$. כאמור, לשני זרמי החוגים יש אותו כיוון בנגד המשותף R_3 , ולכן יופיע הסימן "+" משמאל למכפלה $R_3 I_1$. מכאן שמשוואת המתחים של החוג הימני היא:

$$R_3 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b$$

תרגול

שאלה 9-1

בכל אחד מהמעגלים שבאיור 9-14 מסומנים זרמים. באילו ממעגלים אלה - לא ייתכן שכל כיווני הזרמים הם כמסומן באיור זה?

שאלה 9-2

חשבו את הזרם בנגד R_3 במעגל שבאיור 9-15.

שאלה 9-3

$R_2 = 15\Omega$ (ולא 70Ω) במעגל שבאיור 9-15. חשבו את הזרם בנגד R_3 במעגל זה.

שאלה 9-4

- א. נחזור למעגל המקורי שבאיור 9-15. מגדילים כפליים את המתח של כל אחד ממקורות המתח שבאיור 9-15. חשבו את הזרם בנגד R_3 .
- ב. מגדילים כפליים גם את כל אחת מההתנגדויות שבאיור 9-15. מה יהיה עכשיו הזרם בנגד R_3 ?

שאלה 9-5

- א. הפכו את הכיוון של כל אחד מהזרמים המסומנים במעגל שבאיור 9-9, וחשבו את המתח של הנגד R_2 .
- ב. חשבו את המתח של הנגד R_2 במעגל המקורי שבאיור 9-9. האם קיבלתם אותה תוצאה?

שאלה 9-6

חשבו את הספק הנגד R במעגל שבאיור 9-16.

שאלה 9-7

- א. חשבו את הזרם בנגד R_1 אשר במעגל שבאיור 9-17, תוך שימוש בהתנגדות שקולה בטור ובמקביל.
- ב. חזרו וחשבו את הזרם בנגד R_1 , תוך שימוש בשיטת זרמי החוגים.
- ג. איזו שיטה תעדיפו לגבי מעגל זה? נמקו את תשובתכם.

9.2 משפט תבנין

עד כה ראינו שאפשר לקבלת מעגל שקול למעגל נתון באמצעות התנגדות שקולה בטור, או במקביל. הייצוג השקול, שנלמד בסעיף זה, מיועד להחליף הן מקורות והן נגדים במעגל המקורי - ברכיבים שקולים. ייצוג זה מבוסס על משפט תבנין (*Thevenin's theorem*). משפט תבנין תקף לגבי מעגלים שמכילים רק רכיבים ליניאריים (*linear components*). לצורך דיוננו, רכיב ליניארי הוא רכיב שהקשר בין המתח שלו, לבין הזרם העובר דרכו, מתואר באמצעות קו ישר. דוגמאות לרכיבים ליניאריים: נגדים; ומקורות מתח (אידיאליים וממשיים). מעגל ליניארי הוא מעגל שמכיל רק רכיבים ליניאריים.

בטרם נביא את משפט תבנין, נתבונן בשני המעגלים המתוארים באיור 9-18. באיור 9-18א נתון מעגל ליניארי כלשהו שמכיל מקורות מתח. למעגל זה, המסומן במלבן האפור שבאיור, יש שני הדקי מוצא, A ו-B, וצרכן R_L המחובר בין הדקים אלה. באיור 9-18ב מייצג המלבן האפור את חלק המעגל הליניארי. חלק זה כולל מקורות מתח. בהמשך הסעיף ניוכח שיש מקורות חשמל נוספים - ולא רק מקורות מתח.

משפט תבנין טוען שכל חלק של מעגל ליניארי, שמכיל מקור חשמל אחד לפחות (למשל: איור 9-19א), ניתן לייצוג באמצעות מעגל שקול המורכב ממקור מתח אידיאלי U_{Th} , שאליו מחובר בטור נגד R_{Th} (איור 9-19ב). המעגל השקול נקרא לפעמים גם **מעגל תבנין**; U_{Th} נקרא לפעמים **מתח תבנין**, ו- R_{Th} - **התנגדות תבנין**. מעגל תבנין כולל רק את U_{Th} ואת R_{Th} , אך לא את הצרכן.

כדי למצוא מעגל תבנין, עלינו למצוא את U_{Th} ואת R_{Th} . אפשר להוכיח (אך ההוכחה חורגת ממסגרת הלימוד) שהמתח U_{Th} הוא מתח המעגל הפתוח - בין שני ההדקים A ו-B - במעגל המקורי (כלומר, המעגל הליניארי הכולל מקורות).

כלומר, אם ננתק את הצרכן R_L במעגל, המתואר באיור 9-19, המתח U_{Th} יהיה כמסומן באיור 9-20; וההתנגדות R_{Th} היא ההתנגדות ש"רואה" הצרכן בין שני ההדקים A ו-B במעגל (וליתר דיוק: בחלק המעגל הליניארי הכולל מקורות), כאשר כל המקורות במעגל זה - **משותקים** (killd).

מה זה מקור משותק? כדי להסביר את המושג **מקור מתח משותק**, נחזור תחילה על הקשר שבין מקור ממשי למקור אידיאלי. כאמור, אפשר לייצג מקור מתח ממשי באמצעות מקור מתח אידיאלי שאליו מחובר נגד, אשר התנגדותו שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח. מקור מתח משותק הוא מקור שאינו פעיל. **מקור מתח משותק הוא מקור מתח המיוצג על ידי התנגדותו הפנימית בלבד, כשמקור המתח האידיאלי - מקוצר.**

שאלה לדיון

מה המשמעות של "...כאשר כל המקורות במעגל זה - משותקים"? האם יש מקור משותק, שאינו מקור מתח?

כ. יש התקנים המשמשים כמקורות אנרגיה במעגל, ומספקים זרם שאינו תלוי ברכיבי המעגל האחרים, או במתח של הדקי המקור. אופיין מתח-זרם מסוים של התקן כזה – הטרנזיסטור – נתון באיור 9-21. באופיין זה יש תלות-מה של הזרם במתח.

נוכל לתאר לעצמנו התקן אידיאלי, אשר האופיין מתח-זרם שלו יהיה כמתואר באיור 9-21. מקור מתח כזה נקרא **מקור זרם אידיאלי** (*ideal current source*). מקור כזה מספק זרם קבוע, ללא תלות במתח של הדקי המקור. באיור 9-21 ג נתונים סימונים מקובלים של מקור זרם אידיאלי.

בדומה למקור מתח גם למקור זרם עשויה להיות, עקרונית, התנגדות פנימית. באיור 9-22 נתונים שני מעגלים: מקור מתח המחובר לצרכן; ומקור זרם המחובר לצרכן. מקור מתח ממשי, שהתנגדותו הפנימית R , ניתן לתיאור באמצעות מקור זרם אידיאלי שאותו נגד R מחובר אליו במקביל - אם הזרם, שיוצר מקור הזרם האידיאלי, נתון על ידי $I_s = \frac{U}{R} - E$ – הכא"מ של מקור המתח האידיאלי).

דוגמה 9-3

- חשבו את מתח תבנין U_{Th} בין הנקודות A ו-B במעגל המתואר באיור 9-23.
- חשבו את התנגדות תבנין, שאותה "רואה" הצרכן במעגל זה.
- שרטטו את מעגל תבנין השקול של מעגל זה.

פתרון

- ננתק את הצרכן R_L , ונקבל את המעגל המתואר באיור 9-24. לפי חוק המתחים של קירכהוף בחוג ACDFE, מקבלים:

$$E_1 - I(r_1 + R_1 + R_2 + r_2) - E_2 = 0$$

ומכאן:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + R_1 + R_2 + r_2} = \frac{10 - 6}{0.1 + 100 + 300 + 0.2} = 9.99\text{mA} \approx 0.01\text{A}$$

עתה נוכל לחשב את U_{Th} :

$$U_{Th} = E_2 + IR_2 + Ir_2 \approx 6 + 0.01 \times 300 + 0.01 \times 0.2 \approx 9\text{V}$$

- נקצר את מקורות המתח, כך שכל מקור מתח ייוצג על ידי ההתנגדות הפנימית שלו בלבד. נקבל את המעגל המתואר באיור 9-25. ההתנגדות, ש"רואה" הצרכן R_L במעגל זה היא ההתנגדות השקולה של ארבעת הנגדים: r_2, R_2, r_1, R_1 . התנגדות שקולה זו היא התנגדות תבנין (R_{Th}). נקבל אפוא:

$$R_{Th} = (R_1 + r_1) \parallel (R_2 + r_2) = \frac{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2)}{R_1 + r_1 + R_2 + r_2} = \frac{100.1 \times 300.2}{400.3} \approx 75\Omega$$

ג. מעגל תבנין השקול מתואר באיור 9-26א. המעגל, השקול לזה המתואר באיור 9-23, מתואר באיור 9-26ב.

נניח שנתון מעגל, שבו מחברים בכל פעם נגד שונה (או נגד משתנה) בין שתי נקודות A ו-B, ויש לחשב את הזרם (או המתח) בנגד בכל אחד מהמקרים. במעגל כזה בולט במיוחד יתרון השימוש במשפט תבנין, בהשוואה לשיטות אחרות לפתרון מעגלים (למשל: שיטת זרמי החוגים). נבהיר זאת.

כל אחד מהצרכנים "רואה" את אותו מעגל תבנין, כי מתח תבנין (U_{Th}) והתנגדות תבנין (R_{Th}) אינם תלויים בצרכן. לכן די אם נחשב פעם אחת את U_{Th} ואת R_{Th} . אז נוכל למצוא את הזרם I_L בצרכן על ידי פתירת מעגל טורי פשוט, הכולל מקור מתח U_{Th} ושני נגדים R_{Th} ו- R_L (איור 9-19), כלומר:

$$I = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_L}$$

הזרמים בנגדים השונים, שנחבר למעגל, יתקבלו על ידי הצבת הערכים המתאימים של התנגדויות הצרכן R_L – במשוואה זו. כאמור, מחשבים רק פעם אחת את U_{Th} ו- R_{Th} , ומשתמשים בערכים אלה לכל אחת מהתנגדויות הצרכן.

דוגמה 9-4

- השתמשו במשפט תבנין, וחשבו את הזרם I בנגד R_4 (איור 9-27).
- חזרו על סעיף א, אלא שהנגד R_4 הוחלף בנגד שהתנגדותו 25Ω .

פתרון

- לצורך חישוב מתח תבנין U_{Th} , ננתק את R_4 , ונקבל את המעגל, המתואר באיור 9-28. לפי חוק המתחים של קירכהוף, המתח U_{Th} נתון על ידי:

$$U_{Th} = U_{AB} = U_{CD} - E_2$$

(בנגד R_3 לא זורם זרם, והמתח עליו הוא אפס).

את המתח U_{CD} נחשב לפי כלל מחלק המתח:

$$U_{CD} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} E_1 = \frac{10}{10 + 15} \times 6 = 2.4V$$

ומכאן:

$$U_{Th} = U_{CD} - E_1 = 2.4 - 6 = 3.6V$$

כדי לחשב את R_{Th} , נקצר את מקורות המתח E_1 ו- E_2 . ההתנגדות ש"רואה" הנגד R_4 בין הנקודות A ו-B, מתוארת באיור 9-29. התנגדות זו נתונה על ידי:

$$R_{Th} = (R_1 \parallel R_2) + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \frac{15 \times 10}{15 + 10} + 20 = 26\Omega$$

באיור 9-30 מתואר המעגל הטורי השקול למעגל, המתואר באיור 9-27. המעגל השקול כולל את מעגל תבנין ואת הנגד R_4 . הזרם I בנגד R_4 נתון על ידי:

$$I = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_4} = \frac{-3.6}{26 + 50} = -47.4mA$$

ב. כל שעלינו לעשות עתה הוא להחליף במעגל שבאיור 9-30 את R_4 בנגד, שהתנגדותו 25Ω , ולחשב את הזרם I לאחר החלפת הנגד. ובכן:

$$I = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_4} = \frac{-3.6}{26 + 25} = -70.6mA$$

תרגול 

שאלה 9-8

חשבו את מתח תבנין ואת התנגדות תבנין של המעגל, המתואר באיור 9-31.

שאלה 9-9

הנגד R_L במעגל המתואר באיור 9-32 הוא נגד משתנה.

חשבו – בעזרת משפט תבנין – את הזרם בנגד זה:

א. כאשר $R_L = 250\Omega$.

ב. כאשר $R_L = 500\Omega$.

שאלה 9-10

חשבו את הזרם בכל אחד מהנגדים במעגל המתואר באיור 9-33. השתמש לשם כך בשיטת זרמי החוגים ובמשפט תבנין.

איזו משתי השיטות לחישוב זרמים עדיפה לדעתכם? נמקו.

שאלה 9-11

הפכו את מקור המתח, הנתון באיור 9-34, למקור זרם שקול, ושרטטו מקור זה.

שאלה 9-12

הפכו את מקור הזרם, הנתון באיור 9-35, למקור מתח שקול, ושרטטו מקור זה.

סיכום

- כדי לפתור מעגלים הכוללים חוגים אחדים, לא די – בדרך כלל – להשתמש בכללי החיבור של נגדים, ובשיקולים פיזיקליים פשוטים לגבי כיווני הזרמים וחלוקתם בין נגדי המעגל. חוקי קירכהוף וחוק אום הם היסוד לשיטות השונות של פתרון מעגלים חשמליים. בפרק זה עסקנו בלימוד שיטות אלה. בפרק זה למדנו שיטות אחדות לפתרון מעגלים:
 - שיטת זרמי החוגים.
 - משפט תבנין.
- שיטת זרמי החוגים מאפשרת לכתוב את משוואות המתחים במעגל בצורה קלה ומהירה. אין צורך לשקול מהו הסימן של כל איבר במשוואות אלה.
- משפט תבנין נוח מאוד לפתרון מעגל שמחברים בו, בכל פעם, נגד שונה (או נגד משתנה) בין שתי נקודות במעגל, וכשיש לחשב את הזרם (או המתח) בנגד בכל אחד מהמקרים.