



מגמת הנדסת אלקטרוני נייקה ומחשבים

יסודות בתורת החשמל

תוכן עניינים

2	דבר המפמ"ר
3	1. מטען, כוח ושדה וחסמי
22	2. מתחים וזרמים חסמיים
55	3. התנגדות חסמיית
78	4. המגל החסמי
100	5. חוק אום
118	6. ההספק החסמי
137	7. חוקי קירכהוף
166	8. מעגלים טוריים, מקביליים ומעורבים
239	9. שיטות לפתורן מעגלים

דבר המפמ"ר

אנו עומדים בפתחה של תקופה של חידושים טכנולוגיים, אתגרים חשיבתיים והתנסיות מرتקנות. במגמת הנדסת אלקטרונית ומחשבים אתם תחשפו לנסיבות מיידת מתקדמת ומשמעותית. זכרו, כי אתם חלק חשוב מהמחקר ובינכם הכוח והידע לקחת חלק בפיתוח דור העתיד.

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

שלומי אדרונד אחני

מפמ"ר מגמות הנדסת אלקטרונית ומחשבים ומערכות בקרה ואנרגיה

1. מטען, כוח ושدة וזמן

יעדי הפרק הראשוני

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

ב. התלמיד ידע לחשב מטען אלקטرون, כוח על יחידת מטען למרחב ושדה חשמלי.

מבוא

אחד התופעות הפיזיקליות המשמעותיות בחיננו היא תופעת היוזרות החשמל. החשמל הוא אבן יסוד הן בשימוש היומיומי והן בהתפתחות הטכנולוגית הגלובלית. אם ננסה לתאר את חיינו, ولو ליום אחד, ללא חשמל, נגלה עולם כבוי על כל המשטמע בכאן.

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

המילה **אלקטרון**, שממנה נגזרת אלקטרוניקה, מקורה במליה יוונית שפרושה "ענבר" (שרף עצים קדומים שהתאבן). היוונים הבינו שחתיכת ענבר מתנהגת בצורה שונה一旦 כאשר משפשפים אותה בפייסט צמר או פרווה. לאחר שנות חקר הבינו שהענבר נתען במטען חשמלי.

אם נביט סביבונו, נראה מגוון רחב של חומרים, חלקם טבעיים וחלקם מהנדסים (על ידי אדם). לכל חומר מבנה ותכונות פיזיקליות הייחודיות לו. לмерות השוני בין סוג החומרים, אפשר לראות כי כאשר מחלקים את החומר לחלקים קטנים מאוד, מתקבל חילוק הקטן ביותר השומר על תכונות היסוד - האטום. בפרק זה נלמד כיצד משפייע מבנה החומר על תכונותיו החשמליות. בטבע ישנו כ-180 חומר יסוד הקרוים יסודות, מהם 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 לתוך ולישומו הלימודי. קיימת חשיבות רבה ללמידה ולהבנת המושגים המובאים בפרק, בשל הצורך לבנות תהליכי הדרגתית ומשמעותי של תוכני ההוראה והלמידה בתורת החשמל.

1.1 מטען דשמלי

במבוא הפרק הוזכר תהליך המשיכה והדחיה בין חומרים, תהלייר שהתגלה בעקבות שפשווחומרים. אבל מה קורה כאשר גופים משתפשפים זה בזה? אנו יודעים שהגוף המשופשף יכול למשוך אליו גופים אחרים. אבל ממה נבע כוח המשיכה? התשובה היא, שכטוצאה ממנה נטען גוף, נקראת הגופים המשופשפים נטענו בטען חשמלי. הפעולה, שכטוצאה ממנה נטען גוף, נקראת טעינה. כדי להסביר תופעה זו של קיום כוחות משיכה וכוחות דחיה חשמליים, אנו מניחים כי קיימים שני סוגי של מטענים חשמליים. מוסכם לקרוא לסוג אחד מטען חיובי, ולסמןו "+", ולסוג השני מוסכם לקרוא מטען שלילי, ולסמןו "-". כלל חשוב הקשור למטען חשמלי הוא שימור המטען. המטען החשמלי אינו נעלם ואיינו מופיע יש מאין.

הגדרה פיזיקלית

טען חשמלי: תוכנה פיזיקלית של החומר, שגורמת לאינטראקציה חשמלית עם מטענים אחרים. מטען חשמלי יכול להיות חיובי או שלילי. גוף הטוען במטען חיובי הוא גוף המורכב מيونים חיובים (שחרר ממנו אלקטرونים לסביבה). גוף הטוען במטען שלילי הוא גוף המורכב מيونים שליליים (קיים אלקטرونים מהסביבה).

טען מסויימים באוט Q ויחידות המטען נקראים קולון ומסומנים באות [C].

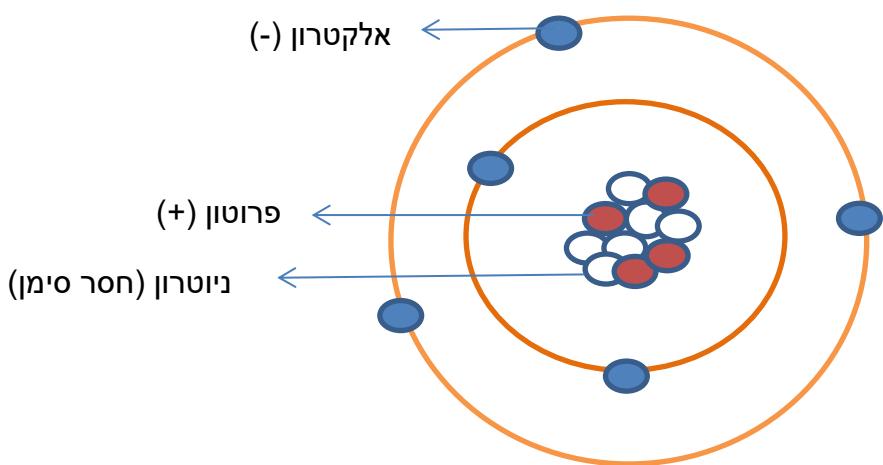
הדמייה לאטום

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

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

2.1 מבנה האטום

החומר מורכב מאטומים. האטום הוא החלק הקטן ביותר של יסוד, השומר עדין על תכונות היסוד. האטום בניו מגען, ומאלקטרונים הנעים סביב הגרעין. מסת הגרעין גדולה פי 2000 ממשת האלקטרונים, ולכן מרבית המסה של האטום מרכזת בגרעין. עם זאת, הגרעין תופס רק חלק קטן מאוד מנפח האטום. האלקטרונים נעים סביב הגרעין במסלולים שונים, ומסלולים אלה קובעים את ממד האטום. הגרעין עצמו בניו מחלקיקים יסודיים יותר: פרוטונים וניטرونים. הפרוטונים, הניטرونים והאלקטרונים הם חלקיקי היסוד של החומר בטבע. אנו עוסקים בעיקר באלקטרונים, ומעט גם בפרוטונים.



איור 1-1: אטום בעל חמישה אלקטרונים, חמישה פרוטונים וחמשה ניטرونים.

מטרון הפרוטון ומטען האלקטרון שונים במסה שלהם: מסת הפרוטון גדולה פי 2000 כמעט מהרעין האלקטרון. הם שונים גם בטען החשמלי שלהם: למטען האלקטרון קוראים **מטרון שלילי**, ולמטרון הפרוטון קוראים **מטרון חיובי**.

סימוני המטענים

החלקיק	סוג המטען	סימון המטען
אלקטرون	שלילי	-
פרוטון	חיובי	+

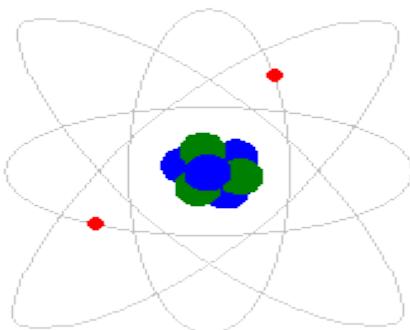
גודל מטען האלקטרון שווה לגודל מטען הפרוטון. את הגודל מסמן באות **e**.

בטבלה שלעיל אין מתיחסים לניטרונים, לאחר שחלקיקים אלו א迪ישים מבחינה חשמלית. המושג אדייש חשמלית תקף גם לגבי האטום אשר לא הוציאו ממנו, או לא הוכנסו לו, אלקטרונים. ומכאן נרחיב את המושג, **יון**.
קיימים שני סוגי יונים: **יון חיובי** ו**יון שלילי**.

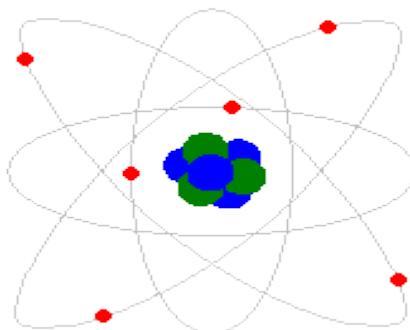
בין מטענים שונים-סימן יוצר כוח משיכה, ואילו בין מטענים שווים-סימן יוצר כוח דחיה.

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 2-1: אטום בעל מספר שונה של פרוטונים ואלקטרונים

לצורך ביצוע המעבדה, יש להיכנס ל קישור הבא:

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



יעד לימודים:

תלמידים יכולים לקבוע את המשתנים המשפיעים על אובייקטים וכייז מטענים חיובים ושליליים משפיעים על האינטראקציה.
מומלץ לבצע את הניסוי באופן מעשי.

פעילות לסימולציה

1. נבחן את הבלונים ואת חםלי הסטטי בסימולציה, מדוע בחורו בחפצים אלו?
2. כיצד ניתן לגרום לבalon לדבוק בסודר?
3. מה משפיע על משיכה חזקה או חלה?
4. כיצד משפיע הסימון החיובי והשלילי על משיכה ודחיה?
5. השלם את הטבלאות ורשום האם קיימים הבדלים, הסבר.

סודר	בלון	לפני פעולה השפsshוף
		מטרנים חיובים
		מטרנים שליליים
		מטרן חםלי

סודר	בלון	אחרי פעולה השפsshוף
		מטרנים חיובים
		מטרנים שליליים
		מטרן חםלי

קיימת אם כן אפשרות להוספה ולהוצאה של אלקטرونים מהאטום. כפי שהוזכר בתחילת הפרק, תחילת השפsshוף, הגורם לטעינה, מאפשר לאלקטרונים לעבור מגוף אחד לאחר. כתוצאה מפעולה זו ייווצרו יוניים. הגוף שמננו יצא אלקטרון 'הפור' ליוון בעל מטען חיובי, ואילו הגוף שאליו 'יתוסף' האלקטרון 'הפור' ליוון בעל מטען שלילי.

אפשר לצפות בסרטון המדגים דחיה ומשיכה בין גופים:

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

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



אם נקרב למוט הפלסטי התליי **צמר שעמו שפשפנו את המוטות**, יוכל לראות כי נוצרה משיכה בעקבות טיענת הגוף על ידי השפשוף. מכאן, כאשר הגוף הוא בעל מטען שלילי (חומר פרוטוניים) או מטען חיובי (עדף פרוטוניים), הגוף מסוגל לעצמו את תוכנת המשיכה או הדחיה ביחס לגופים האחרים. כמו כן, אם נקרב כעת את חתיכת המשי, אשר שופשפה במוט זכוכית, למוט פלסטי המשופשף בצמר - נראה שמתוך **דחיה**.



איור 3-1: דוגמה לתנועה של אלקטرونים

3.1. 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 (דחיה או משיכה) בין שני גופים נקודתיים, טעונים חשמלית, מותאמת לשירות למיניהם של הגופים ולהופci ריבוע המרחק ביניהם.

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

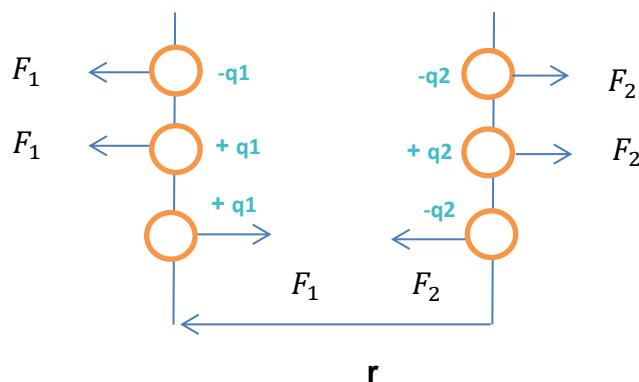
ב- מטען הגוף

F- הכוח החשמלי

z- מרחק

הכוח הפועל בין שני החלקיקים טעונים תלוי ב:

- **גודל המטען החשמלי** (1 ו- 2q). הכוח נמצא ביחס ישיר לגודלם. ככל שהטען גדול יותר, כך הכוח החשמלי גדול יותר, ולהפך.
- **המרחק בין המטענים** (z)- 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 4-1: כוח חשמלי בין גופים נקודתיים.

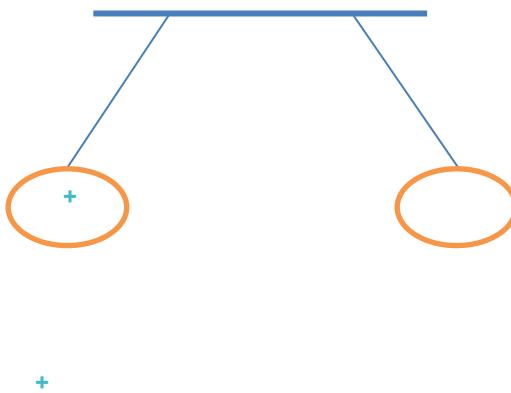
4.1. ייחדות מטען

כדי שנוכל לדון בצורה מדויקת יותר בטען ובכוחות הפעילים ביניהם, علينا לציין את גודל המטען בצורה מדויקת. נניח שישנו כדור הטוען בטען מסוים. נסמן אתטען הכדור באמצעות Q . כדי שנוכל לדעת מדויק כמהטען היה על הכדור, علينا לבטא את Q באמצעות מספר, ולצדו יחידות. (גם כשאנו מודדים מרחק, למשל, علينا לבטא אותו בעזרת מספר, ולצדיו יחידות). מددנו את המרחק בסנטימטרים, במטרים או בקילומטרים). علينا לקבוע אם כן מהו ייחידת המטען, שבעזרתה נוכל למדודטען Q נתון. ראיינו שטען של גוף נקבע על ידי ההפרש בין מספר האלקטרונים למספר הפרוטונים בגוף (אם יש עודף אלקטרונים, הגוף טוען מטען שלילי, ואם חסרים אלקטרונים, הגוף טוען חיובי). لكن נוכל לקבוע אתטען האלקטרון כיחידתטען.

שאלה למחשבה

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

- כוח המשיכה בין ה כדורים יגדל.
- כוח המשיכה בין ה כדורים יקטן.
- כוח המשיכה בין ה כדורים לא ישנה.



פתרון:

כוח המשיכה החשמלי הפעיל בין הcondors יגדל.

הסביר:

גוף טען בטען חשמלי יוצר משבבו שדה אלקטrostטי המפעיל כוח חשמלי על מטענים הנמצאים בסביבתו. כיוון שהגוף מורכב מחלקים הטעונים חיובית ושלילית, נוצרים גם כוחות משיכה וגם כוחות דחיה בין הגוף המרכזי לגוף הטען. לפי חוק קולון, כוח המשיכה יהיה גדול מכוח הדחיה, ולכן הכוח השקול יהיה כוח משיכה - הגוף ימשכו זה זהה. כאשר נוגעים באצבע בצד/body הentralי לפרק זמן קצר, מטענים שליליים שבצד/body הentralי מושתקים על ידי הצד/body הentralי הפעיל כוח המשיכה החשמלי הפעיל ביניהם. ברגע המגע, המטענים החיוביים מתאחדים למרכז אחד מוליכו שכוללת את הצד/body המוביל, את הגוף האדם ואת הצד/body הארץ. נוצר קיטוב בתוך המערכת כולה: מטענים שליליים עוברים מגוף האדם ומצד/body הארץ דרך האצבע אל הצד/body ומנטRELים את המטענים החיוביים שלו. כשהמגע נפסק, הגוף כבר אינו נutralי אלא בעל מטען שלילי. מרגע זה, בין הcondors פועל רק כוח משיכה. לפיכך כוח המשיכה במצב זה יגדל.

דרך הניסוי המתואר, נכיר את המושג השראה אלקטrostטית.

השראה אלקטrostטטית היא תופעה שבה מתרחש קיטוב חשמלי בגוף נutralי הנמצא בקרבת גוף טען.

5.1 השדה החשמלי

כאשר כוח חשמלי הפעיל על מטען למרחב, מניחים שקיים שם שדה חשמלי. השדה החשמלי הוא וקטורי (בעל גודל וזווית). כיוונו של וקטור השדה החשמלי בנקודה מסוימת נקבע לפי כיוון הכוח החשמלי שיופיע על מטען נקודתי חיובי שיוצג באותה נקודת. גודל השדה החשמלי הוא כפול הכוח הפעיל על יחידת מטען.

שדה חשמלי אלקטrostטי: הוא שדה חשמלי שנוצר על ידי מטענים חשמליים קבועים במקום.

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

$$E = \frac{N}{Q} \text{ ניוטון ל庫ולן}$$

הטען נמדד ביחידות קולון (C), קולון אחד (1C) הוא כמות המטען הוא $e = 6.24 \times 10^{18}$.

טען אלקטרוני הוא $C = 1.6 \times 10^{-19}$.

המרחק נמדד במטרים (m)

והכוח נמדד בניוטונים (N)

$$\frac{N \cdot m^2}{c^2} k = 9 \times 10^9$$

שאלות לדין

1. האם ניתן מצב שבו שני קווי שדה יחתכו זה את זה? נמקו את תשובהיכם.
2. אם דרך נקודת מסויימת לא עובר קו שדה חשמלי, האם ניתן להסיק שלא קיימן שדה חשמלי בנקודת זו? הסבירו את תשובהיכם.
3. האם קיימים קווי שדה נוספים על פני אלה המשורטטים בדיאגרמה של קו שדה?
4. האם השדה החשמלי גדול ככל WHATSOEVER מתקבבים 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 ובאיזה לא? תארו והסבירו.

תרגול

1. אוטום המימן מורכב מפרוטון ומאלקטרון. מרחקו הממוצע של האלקטרון מהפרוטון הוא $m(11-11) \times 10^{-5}$. 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 מצין כוח המשיכה)
 - ב. $N = 8.2 \times 10^{-8}$ (סימן המינוס מצין כוח המשיכה)
 - ג. $N = 8.2 \times 10^{-8}$
 - ד. $N = 6.2 \times 10^{-10}$ (סימן המינוס מצין כוח המשיכה)
2. שני מטענים זהים בני קולון אחד נדחים זה מזה בכוח של ניוטון אחד. חשב את המרחק בין המטענים.
 - א. $94,868m$
 - ב. $103,666m$
 - ג. $63,412m$
 - ד. $88,198m$
3. מהו גודלו וסימנו של מטען q , אם מטען בק-6-10X5 המרחק ממנו 5 ס"מ, נדחה ממנו בכוח של $7.2N$?

. א. $4X10-9 \text{ C}$. ב. $13X10-7 \text{ C}$. ג. $4X10-7 \text{ C}$. ד. $6X10-6 \text{ C}$

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

א. כוח משיכה $N = 0.125X10^9$ ב. כוח דחיה $N = -0.125X10^9$ ג. כוח משיכה $N = -0.5X10^9$ ד. כוח דחיה $N = 125X10^{10}$

השדה החשמלי והמחשתו החזותית

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

אחרי שלמדנו את חוק קולון,我们知道 ליחס את הכוח שפועל בין שני מטענים – נוכל לבטא את השדה חשמלי.

גודל/עוצמת השדה החשמלי בנקודה מסוימת מוגדר **גודל הכוח החשמלי**, שהוא 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 $\left[\frac{N}{C}\right]$ (ניוטון לקולון).

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

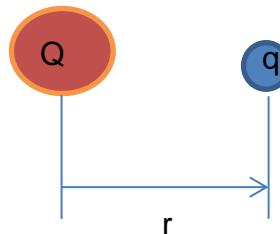
כאשר מעוניינים לבדוק את קיומו של השדה החשמלי באמצעות מטען, יש להשתמש במטען קטן, שיהיה זניח בהשוואה לשדה החשמלי הקיים כבר באותה נקודה. מטען קטן זה, שבאמצעותו בוחנים את השדה החשמלי נקרא, **מטען בוחן**.

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 יוצרו 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 מהטען Q .

לפי חוק קולון המתואר בנוסחה הבאה

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

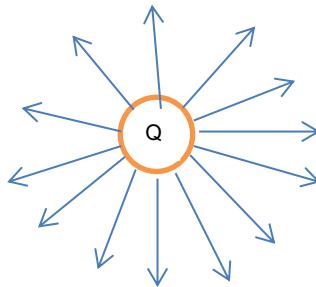


כאן ניתן לומר כי

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

טען חיובי Q נתון בנקודה מסוימת. נתאר לעצמו 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 החז. אורך החז הוא ביחס ישיר לעוצמת השדה בנקודה שממנה יצא החז.

אפשר לראות זאת באירור הבא.



איור 6-1: קווי שדה סביב מטען חיובי

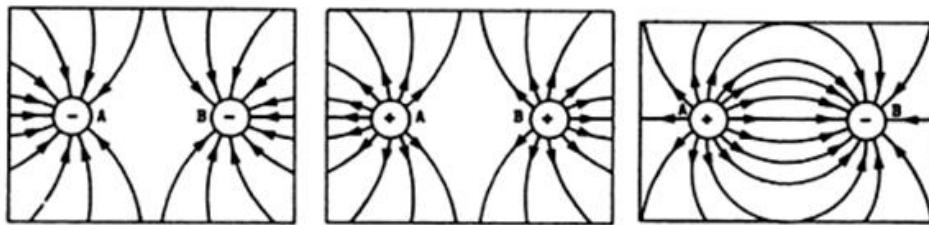
הטען Q (איור 6-1) חיובי, וכך גם מטען הבוחן. כיוון הכוח, הפועל על מטען הבוחן, הוא אפוא מהטען Q ולכיוון מטען הבוחן. כך גם כיוון קווי השדה החשמלי. מניחים את מטען הבוחן במקומות שונים בשדה החשמלי, ומקבלים קווי שדה חשמלי בכיוונים שונים, כאשר כל קו של שדה חשמלי יוצא מהטען Q יוצר השדה החשמלי.

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

קווי השדה החשמלי סביב מטען חיובי - הם קוויים ישרים, כפי שראויים באירור 6-1. כך גם לגבי קווי השדה החשמלי סביב מטען שלילי.

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

צפיפות קווי השדה החשמלי בתחום מסוים - נמצאת ביחס ישיר לגודל השדה החשמלי באותו תחום. בהתאם לצפיפות קווי השדה החשמלי, אפשר לקבל מושג על גודל השדה החשמלי באותו תחום. ואולם, מרטטיטים את קווי השדה החשמלי, כך שצפיפותם תהיה ביחס ישיר 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 באירור 6-1. גודל השדה החשמלי זהה בכל כיוון סביב מטען יחיד, וכן יש באירור 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.



קווי שדה סביב זוג
טען שליליים

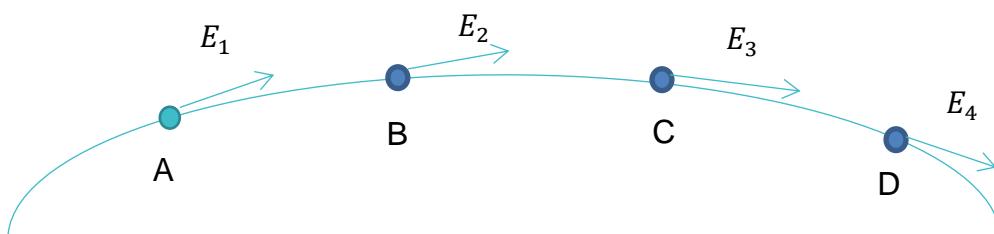
קווי שדה סביב זוג
טען חיוביים

קווי שדה סביב זוג
טען שליליים

שדה חשמלי הינו **קטור** - גודל בעל עוצמה וכיוון.

גודלו המאפיין על ידי ערך מסווני בלבד, נקרא – **סקלר**.

כדי לדעת מהו כיוון השדה החשמלי בנקודה כלשהי שנמצאת בקוו של שדה חשמלי, יש להعبر משיק לקו בנקודה זו. כיוון המשיק בנקודה הוא כיוון הכוח החשמלי, שיופיע על מטען חיובי, אם ישימו אותו בנקודה זו. למשל, כיוון המשיק הוא כיוון השדה החשמלי בנקודה זו. באירור 7-1 מוגדר כיצד ניתן למצוא את כיוון השדה החשמלי בנקודות שונות על קו של שדה חשמלי. למשל, כיוון המשיק E_2 הוא כיוון השדה החשמלי בנקודה B



איור 7-1: כיוון שדה חשמלי בנקודות שונות

דוגמה 1:

1. בנקודה מסומנת a בשדה החסמי, שנוצר על ידי מטען בודד, פועל כוח חסמי של 2×10^{-2} ניוטון על מטען של 4×10^{-7} קולן.
- א.** חשבו את עוצמת השדה בנקודה זו.
- ב.** חשבו את גודל המטען, Q היוצר את השדה החסמי, אם הנקודה a נמצאת במרחק 30 סנטימטרים מהטען.

פתרון

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

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

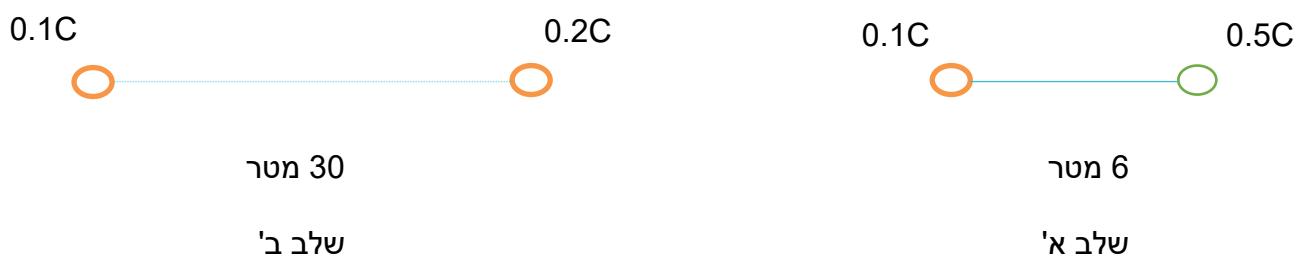
ב. נשתמש במשוואת הבאה:

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

***ניסי לבי כי המרחק נתון בסנטימטרים ועלינו להמיר אותו למטרים**

דוגמה 2:

באיר למיטה מתוארים שני גופים טעוניים. בשלב הראשון, המרחק בין הגוףים הוא 6 מטר, וכוח הדחיה בין המטעןים הוא 12,500,000 ניוטון. בשלב השני הרחיבו את המרחק בין הגוףים למרחק של 30 מטר זה מזה. מה הגודל וכוח הדחיה בין המטעןים?

**פתרון**

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

בשלב השני, המרחק בין המטענים הוא 30 מטר, המרחק בריבוע הוא 900. ראינו כי יחד הדחיה בין המטענים שווה ליחס הפוך למרחק בריבוע. בשלב השני המרחק בריבוע גדול 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

1. שני מטענים זהים, בני $c = 0.05$, נדחים זה מזה בכוח ניוטון אחד. חשבו את המרחק בין המטענים.

2. נתונם שני מטענים: $c = 2 \times 10^{-6}$ ו- $c = 10^{-6}$. המרחק בין שני המטענים חצי מטר. מניחים ייחידת מטען חיובית c על הקטע המחבר את שני המטענים או על המשכו. סמננו את הנקודה שבה יש לשים את ייחידת המטען החיובי, כך שסכום הכוחות שיפעלו עליו שני המטענים יהיה אפס.

3. מטען Q יוצר שדה חשמלי. גודל השדה החשמלי - במרחק 10 cm ממטען זה - הוא 5 N/C.

א. באיזה מרחק מהטען Q יהיה גודלו של השדה החשמלי 20 N/C ?

ב. מה גודל המטען החשמלי?

4. המרחק בין שני מטענים 1 ו- 2 הוא 20 cm . מה גודל השדה בנקודה P הנמצאת במרכז הקטע, המחבר את שני המטענים?

5.ין חיובי הוא ין

א. בו מספר הפרוטונים גדול ממספר האלקטרונים

ב. בו מספר האלקטרונים גדול ממספר הפרוטונים

ג. בו מספר האלקטרונים שווה למספר הפרוטונים

ד. בו מספר הפרוטונים גדול ממספר הניאוטرونים

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

א. 3.5 ניטון לקולון

ב. 1.5 ניטון לקולון

ג. 6 ניטון לקולון

ד. 2.5 ניטון לקולון

7. נתון יון חמוץ 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 מסווגו כחיוביים או שליליים) - דוחים זה את זה. ואילו מטענים מסווגים שונים - מושכים זה את זה.
- מקורות המטען החשמלי הם החלקיקים היסודיים המטענים, הנמנחים עם מרכיבי האטום. הפרוטון טען חיובי, והאלקטרון טען מטען חיובי שלילי. שני המטענים הללו שוויים בגודלם.
- הטען החשמלי של גוף נקבע על פי מספר האלקטרונים העודפים או החסרים בו, בהשוואה למספר הפרוטונים שבו. לגוף טען שלילי - יש עודף אלקטרונים. לגוף טען חיובית - יש פחות אלקטרונים מאשר פרוטונים.
- קיים השדה סיבי מטען שלילי הפוכים בכיוונם לאלה של קווי השדה החשמלי שבסביבתו מטען חיובי.
- כאשר מעוניינים לבדוק את קיומו של השדה החשמלי באמצעות מטען, יש להשתמש במטען קטן (טען בוחן) שייהי זניח בהשוואה לשדה החשמלי הקיים כבר באותה נקודה.
- אפשר להפריד מטענים באמצעות השראה אלקטростטית.

2. מתחים וזרמים זשיומיים

2.1 פוטנציאלי ומתח

ראינו שכלי שני מטענים מפעילים כוח חשמלי זה על זה. ככל שהמטענים קרובים יותר, הכוח גדול יותר, וככל שהמרחק ביניהם גדול יותר, הכוח קטן יותר. ראיינו גם שمטענים **שווים** דוחים זה את זה, ומטענים **שוניים** - מושכים זה את זה.

כוחות בין מטענים - חזרה על פרק 1

ראינו שכלי שני מטענים מפעילים כוח חשמלי זה על זה. ככל שהמטענים קרובים יותר, הכוח גדול יותר, וככל שהמרחק ביניהם גדול יותר, הכוח קטן יותר. ראיינו גם שמטענים **שווים** דוחים זה את זה, ומטענים **שוניים** - מושכים זה את זה. בסרטון הבא, ניתן לראות הוכחה לדחיה ומשיכה בין מטענים.

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

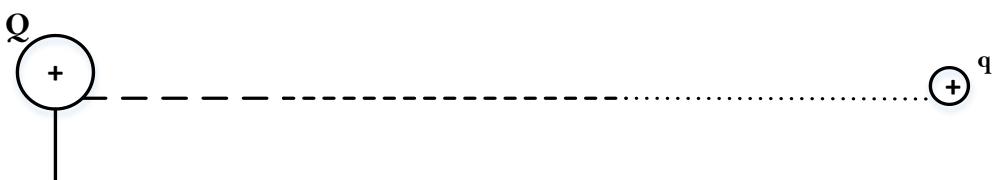
יש ללחוץ על כתוביות ← אנגלית ← ← תרגום אוטומטי ← עברית. קישור לסרטון:

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

מכאן, נוכל להכיר מושג חדש הנקרא פוטנציאלי.נושא זה, יבוא להסביר בפרק אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

עכשו נבדוק מה קורה כאשר מקרים מטען אחד למטען אחר. לשם כך נשים גוף, הטעון במטען חיובי Q , במקום כלשהו, ונניח שהגוף הטעון הזה אינו יכול לזרז למקוםו. כעת נקרב אל מטען Q גוף אחר, הטעון במטען חיובי q . אנו רוצים להראות ש כדי לקרב את מטען q אל מטען Q יש להשקיע אנרגיה.

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



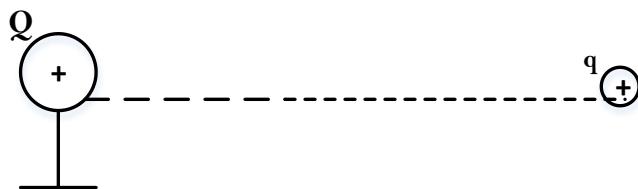
איור 1-2 מטען חיובי q מרוחק מרחק גדול מאוד מהטען החיובי Q

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



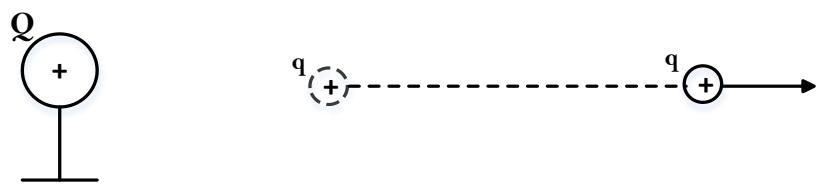
איור 2-2 כדי לקרב את המטען q למטען Q יש להפעיל כוח, כדי להתגבר על כוח הדחיה

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



איור 3-2 כשעוזבים את המטען q , הוא מתחליל לנוע בכיוון החוץ ולהתרחק מהטען Q

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



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

אנרגייה פוטנציאלית חשמלית

כל שנקרב יותר את מטען q למטען Q בדוגמה, כך נדרש להשקי במטען q עוד ועוד אנרגיה, וכך מטען q ירכוש אנרגיה גדולה יותר. אנו רואים כי האנרגיה של מטען q תלויה במרחקו של מטען q ממטען Q , או במקומות אחרים: במקום של מטען q ביחס למטען Q .

מציר כי האנרגיה של גוף, התלויה במיקום הגוף, נקראת אנרגיה פוטנציאלית.Cutת אם עוסקים באנרגיה פוטנציאלית, הקשורה בכוחות חשמליים. לכן אנרגיה זו נקראת אנרגיה

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

כעת נגידיר מושג חדש: **הפוטנציאלי**



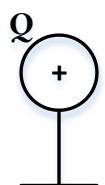
האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת נקראת **הפוטנציאלי** באותה נקודה (אין, למעשה, הבדל בין "אנרגייה של יחידת מטען" – לבין "אנרגייה ליחידת מטען").

כיצד מסמנים פוטנציאלים?

הפוטנציאלי בנקודה A מסומן על ידי U_A ;

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

אם בכל נקודה יש פוטנציאלי חשמלי שונה מזו של הנקודה אחרת, אומרים כי יש ביןין הפרש פוטנציאלים.



A
 U_A



B
 U_B

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

נגידיר עכשו 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:

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

יחידת הפוטנציאלי היא הווולט, וזהי גם יחידת המתח. יחידה זאת מסומנת באות ו'. ראיינו שהפוטנציאלי בנקודה מסוימת הוא האנרגיה (הפוטנציאלית) של יחידת מטען בנקודה זו. מאחר שהאנרגיה נמדדת ביחידת ג'ול (או ג'אול) והטען נמדד בקולון, נבע 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 פוטנציאלי צפוני, ראיינו שהפוטנציאלי בנקודה מסוימת הוא האנרגיה של יחידת מטען בנקודה זו. כאשר קיימים שני מטענים במרחב ז' וכל מטען נשא אנרגיה, כלומר, אם בשתי הנקודות יש פוטנציאלים צפוניים שונים, אמורים כי יש ביניהם הפרש פוטנציאליים. בסרטון הבא, מובא המושג הפרש פוטנציאליים.

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

יש ללחוץ על כתוביות ←אנגלית←←תרגום אוטומטי←← עברית.

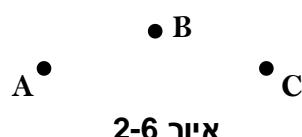
הקישור הסרטון:

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

הערה: המושג פוטנציאלי צפוני מובא בדקה 4:50.

דוגמה 2-1

נתונות הנקודות A, B ו-C, כפי שמתואר באירור 6-2. בغالל קיימים של מטענים שונים (שאינם מופיעים באירור), נוצר בנקודה A פוטנציאלי של 7 V, בנקודה B – פוטנציאלי של 7 V, ובנקודה C – פוטנציאלי של 7 V. חשבו את המתחים U_{AC} , U_{BC} ו- U_{AB} .



פתרון

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

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

נציב במשווהה 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 (V 11), ואילו המתח בין B ל-C הוא הנמוך ביותר (V 5).

כיוון תנועת המטענים עקב הפרש הפוטנציאליים

נזכיר למטען החיובי ♦ שבו עסקנו קודם. רأינו שכאשר עוזבים אותו, הוא נע למקום שבו הפוטנציאל נמוך יותר, בגלל כוח הדחיה של המטען החיובי Q.

באופן כללי נוכל לומר כי

מטען חיובי, החופשי לנوع בהשפעת מתח, נע מנקודה, שבה הפוטנציאל גבוה – אל הנקודה, שבה הפוטנציאל נמוך.

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

אחד הדרכים היא להניח מטען חיובי Q בקרבת הנקודה A, ומטען שלילי Q- בקרבת הנקודה B, כפי שמתואר באיור 2-7. אם נשים מטען חיובי ♦ על הSKU המחבר בין שתי הנקודות, הוא יוזע לעבר נקודת B, ויתרחק מנקודת A. פירוש הדבר שהפוטנציאל בקרבת המטען החיובי Q גבוה מהפוטנציאל בקרבת המטען השלילי Q-, ובין שני המטענים קיים הפרש פוטנציאליים, כלומר מתח.



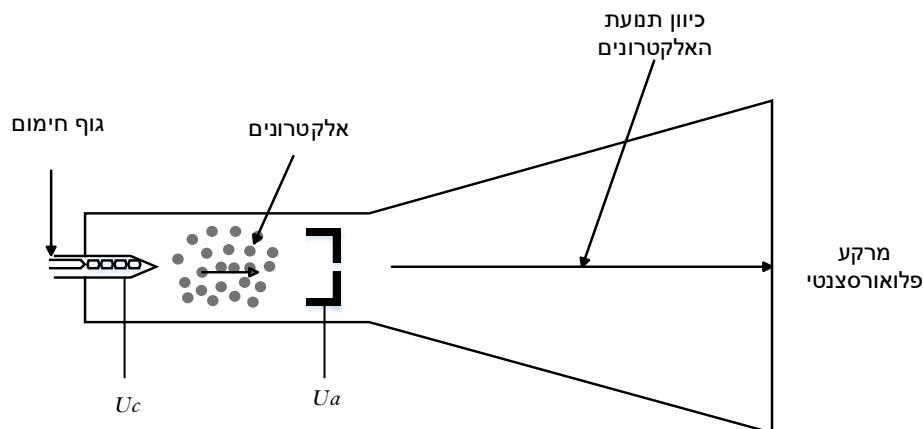
איור 2-7

בפרק הקודם רأינו שיש גופים, שכאשר משפפים אותם זה בזה, אחד מהם נתען במטען חיובי, והשני נתען במטען שלילי. בדרך זו אפשר לקבל שני מטענים שוים בגודלם ובעליהם סימנים שונים, שיש ביניהם הפרש פוטנציאליים.

אבל דרך זו להפריד בין מטענים חיוביים לשניליים - אינה יעילה. בהמשך נלמד על דרכים אחרות יותר להפרדה מטענים, כר שעל גוף אחד מצטרב מטען חיובי, ועל הגוף השני מצטרב מטען שלילי. כאמור, בין שני מטענים אלה נוצר מתח. התקן, שமפריד מטענים בצורה זאת, נקרא **מ庫ר מתח**.

ראינו שם יש מתח בין שתי נקודות, הרו שמטען חיובי – החופשי לנوع – נע מן הפוטנציאלי הגבוה אל עבר הפוטנציאלי הנמוך. ומה יקרה אם נשים מטען שלילי פ- בין שתי הנקודות?

אם נשים מטען שלילי פ-, החופשי לנوع, בין שתי נקודות שביניהן קיים הפרש פוטנציאליים, הוא ינוע מהנקודה שבה הפוטנציאלי נמוך – אל הנקודה שבה הפוטנציאלי גבוה יותר.



איור 9-2 החלקים העיקריים של השפוגרת וכיון תנועת האלקטרונים בשפוגרת

שאלות חזקה

2.1 שאלה

בחර את המילים והביטויים הנכונים בקטע הבא: כדי לקרב מטען שלילי - פ- אל מטען שלילי - Q, יש צורך/אין צורך להטגבר על כוח הדחיה שבין המטענים. קירוב המטען - פ- אל המטען - Q- נדרש/אין צורך בהשकעת אנרגיה.

- א.** יש צורך/ קרוע
- ב.** אין צורך/ קרוע

ג. יש צורך/ לא צריך

ד. אין צורך/ לא צריך

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 בהשकעת אנרגיה?

א. ללא השקעת אנרגיה

ב. חייב לחתת לו אנרגיה חיצונית שזוז

ג. יש לחבר אותו לסוללה

שאלה 2.4

מהו פוטנציאלי?

א. אנרגיה פוטנציאלית לייחידת מטען.

ב. מילת קיצור של "אנרגיה פוטנציאלית".

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

ד. מכפלת האנרגיה הפוטנציאלית במטען.

ה. כושר של גוף למשוך או לדוחות מטענים شمالיים.

שאלה 2.5

גוף טען שלילית ינווע, בהשפעת הפרש פוטנציאלים, מקום שבו הפוטנציאל נמוך/ גבוה לעומת מקום שבו הפוטנציאל גבוה/ נמוך.

א. נמוך/ גבוה

ב. גבוה/ נמור

ג. אף אחת מההתשובות אינה נכונה, הגוף טען שלילית.

שאלה 2.6

טען חיובי, החופשי לנوع, ינווע מפוטנציאלי _____ לפוטנציאלי.

א. גבוה לנמור

ב. נמור לגבוה

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

שאלה 2.7

הפוטנציאלי בנקודה A הוא 6 וולט, והפוטנציאלי 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

הפוטנציאלי בנקודה A הוא 8 וולט, והפוטנציאלי בנקודה B הוא 5 וולט, מהו המתח בין נקודה A לנקודה B

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 הינו מתח של המטען בכל נקודה

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

ג. המתח בין הנקודות הוא המרחק ביניהן

שאלה 2.10

האנרגייה הדרישה להעברת מטען תלוי

א. במרחק שלו מהטען الآخر, כמוון במקומו

ב. בגודל המטען

ג. במסה המטען

2.2 פוטנציאלי, מתח ושدة חשמלי

כאמור בסעיף 1.8, השدة החשמלי הוא וקטורי (בעל כיוון וגודל), והוא מתאר את המצב החשמלי בנקודות שונות של המרחב. גם הפוטנציאלי מתאר את המצב החשמלי בנקודות שונות של המרחב, אלא שהפוטנציאלי הוא סקלר (ראינו כי הפוטנציאלי החשמלי הוא האנרגייה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת. אנרגיה ומטען הם סקלרים, ומכאן שגם הפוטנציאלי – שהוא מנתה של שני סקלרים – הוא סקלר).

גודל השدة החשמלי – הנוצר על ידי מטען Q , ובמרחק r מטען זה – נתון במשוואת (1-3):

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

אפשר להראות כי הפוטנציאלי בנקודה, המרוחקת מרחק r מטען Q , נתון במשוואת:

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

ומכאן שהקשר בין גודל השدة החשמלי לבין הפוטנציאלי – בנקודה, המרוחקת מרחק r מטען Q – הוא:

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

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

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

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

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

דוגמה 2-2

בשדה חשמלי אחיד קיימן הפרש פוטנציאליים של $V = 220$ בין שתי נקודות מרוחקות 5 ס"מ זו מזו. מה גודל השדה החשמלי בקטע שבין שתי נקודות אלה?

פתרון

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

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

נבטא את הנתונים במערכת היחידות SI (נ嗥ר את הסנטימטרים למטרים), נציב את הנתונים במשווהה שלמעלה, ונקבל:

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

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

כאמור, הפוטנציאלי בנקודה A, המרחק מרכך r ממטען Q, נתון במשווהה (2-2):

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

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

$$\text{לפי המשווהה } U = k \frac{Q}{r}, \text{ נקבל כי הפוטנציאלי } U_1 \text{ הנוצר בנקודה A על ידי מטען } q_1, \text{ הוא } U_1 = \frac{kq_1}{r_1} \text{ והפוטנציאלי } U_2 \text{ הנוצר בנקודה A על-ידי המטען } q_2, \text{ הוא } U_2 = \frac{kq_2}{r_2}.$$

ניתן להראות כי הפוטנציאלי U בנקודה A, כתוצאה משני המטענים, הוא סכום הפוטנציאליים באותו 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 מסויימת 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 .

הפוטנציאלי U בנקודה A, כתוצאה מ- n המטענים, הוא סכום הפוטנציאלים באותו 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 הפוטנציאלי, שנוצר בנקודה מסוימת על ידי מערכת מטענים, יש לחשב את הפוטנציאלים הנוצרים בנקודה זו על ידי המטענים הבודדים, ולסכום פוטנציאלים אלה – תוך הקפדה על סימני המטענים.

סימולציה שדות צפוניים –

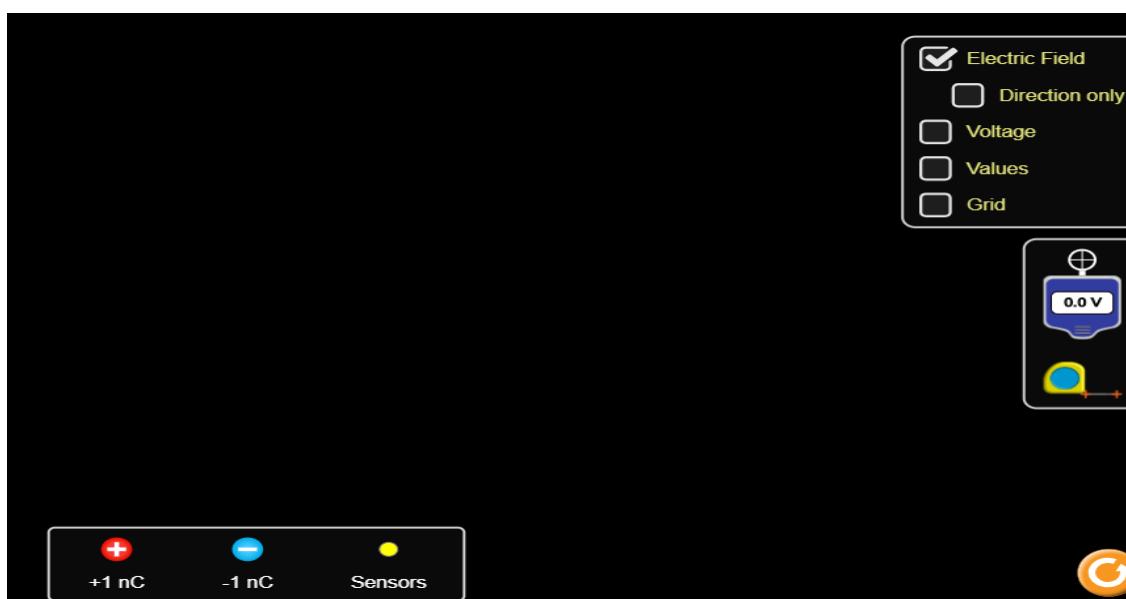
חקירה מודרנית – שדות צפוניים

לפניך דף הנקודות לשימוש ותרגול שדות צפוניים בעזרת הסימולציה הבאה:

בשלב הראשון יש להיכנס לlienק המצורף.

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

לפניך מסך הפתיחה של הסימולציה, להלן הסבר המקרה:



הרכיב העליון מציע חמישה אפשרויות לסימון:

• Electric field • שדה צפוניים

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

הרביע התחתון מציע שני אמצעי מדידה:
מד מתח ומד מרחק (מטר).

בכל שלב ניתן לאפס את הסימולציה ולהתחל מחדש, על ידי לחיצה על החץ בעיגול הכתום הנמצא בתחתית המסך הימני.

בתחתית המסך נוכל לראות מלבן ובתוכו: **טען חיובי, מטען שלילי וחישון** (בחישון בשלב זה לא נבצע שימוש).

מטרת הסימולציה:

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

כמו כן, קיימת אפשרות למדוד מתח ומרחק על ידי גיררת מד המדידה לכל נקודה על המסך.

יש תחילה לסמן ו' עבר האפשרויות בריבוע העליון.

כאשר נרצה להגדיל את המטען למרחב, علينا Lager מטענים מהמלבן התחתון ולהניחם זה מעל זה (ניתן לראות שינוי בו בזמן).

משימות

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

שאלה:

האם קיים שינוי בין השדה החשמלי שיוצר מטען חיובי לבין השדה החשמלי שייצר מטען שלילי? הסבר את תשובהך.

4. כעת, יש לנקח את מד המתח הכלול, להניחו על המטען החיובי ולאחר מכן (רק לאחר איפוס) על המטען השילי. האם קיימים שינוי בין התוצאות? הסבר את התוצאות המתקבלות.
5. יש למלא את הטבלה על פי 5 מדידות לבחירתך. יש להשתמש במד מדידת המרחק.

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

מהן המסקנות לתוצאות המתקבלות על ידי חמשת המדידות?

סימולציה נוספת:

דף הסבר לסימולציה התנסות במעבדה לחקר וירטואלי של השדה החשמלי

מטרת ההתנסות:

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

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

יש להיכנס לlienק המצורף:

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

הוראות כלליות

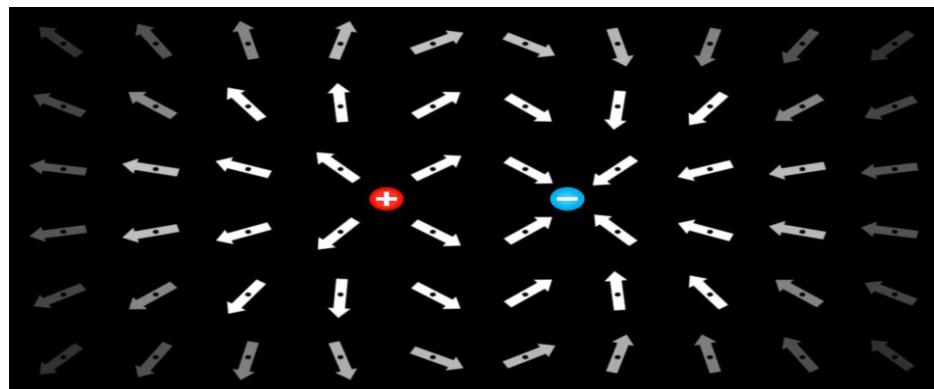
- בלחיצה על **הוסף** ניתן להוסיף מטען חשמלי גודל ברירת המחדל הוא 1 קולון.
- ניתן לשנות את גודל המטען על ידי לחיצה על **תכונות** ובחלון שיפתח יש לשנות רק את המטען לאחר השינוי חייב ללחוץ על **סיום**.

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 שהוסף כדור אי אפשר לשנות את מטענו.

- על מנת להוסיף כדור עם מטען שונה, יש לשנות את המטען וזה להוסיף את הcador.
- ניתן לראות את השפעת הcador הטעון על השדה צעד אחריו צעד, לחץ על עצור ועוד כל לחיצה על כפתור צעד נותן את השינוי הבא.
- בהפעלת הסימולציה, בלחיצה על הcador ניתן לקליך כיוון ולזיהות את התנהוגות 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? וכיידן ישפיע על השדה החשמלי.
2. כעת, החלף את המטענים לזרהים בסימונים, מה הכוח הפועל ביניהם?
3. צור מטען בעל גודל של 2 קולון ושל 3 קולון, האם קיים שינוי בשדה החשמלי? בדוק את ההבדלים כאשר יוצרים את אותם המטענים רק הפוכים בסימונים. מהם המסקנות?
4. האם קיים מצב בו השדה החשמלי שווה בערך לאפס? הסבר.
5. בדוק, על ידי הוזנת המטענים, האם המרחק ישפיע על השדה החשמלי.

דוגמה 2-3

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

פתרונות

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

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

הפוטנציאלי U_2 , הנוצר בנקודה A על-ידי המטען q_2 , הוא – לפי משווהה (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 הפוטנציאלי בנקודה A, שנוצר על ידי מערכת של שני מטענים, נתון במשווהה (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 חזקה

2.11 שאלה

המרחק בין שני לוחות מתכת הוא 15 cm . נתון כי בין הלוחות קיים שדה חשמלי אחיד, שגודלו $\frac{7}{m}$. מה הפרש הפוטנציאלים בין לוחות המתכת?

2.12 שאלה

בין קצוטיו של תיל, שאורכו 10 m , יש הפרש פוטנציאליים של 220 V . נניח כי השדה החשמלי קבוע לאורך התיל, וכיוונו כלפיו התיל. מה גודל השדה החשמלי?

2.13 שאלה

א. מה הפוטנציאלי החשמלי במרחב של $m^{11} \times 10^{-11} \text{ M}$ פרוטון בודד? מטען הפרוטון הוא $1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$.

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

2.14 שאלה

נתון גוף שטען מטען חיובי, וסביבתו ארבע נקודות (לאו דווקא על קו ישר).

- הנקודה A היא הקדומה ביותר אל הגוףטען.
- הנקודה B היא המרוחקת ביותר מן הגוףטען.
- הנקודות C ו-D נמצאות במרחק שווה מן הגוףטען (במרחק גדול יותר מ-A מהגוףטען, ובמרחק קטן יותר מ-B מהגוףטען).
- באייזו נקודה הפוטנציאלי הוא הגדל ביותר?
 - באייזו נקודה הפוטנציאלי הוא הקטן ביותר?
 - לאילו שתי נקודות יש פוטנציאלי שווה?
 - חזור על שני הסעיפים הקודמים, כשהנתון כי הגוףטען מטען שלילי.

שאלה 2.15

באזור שלhalten נתונים שני מטענים. מה הפוטנציאלי בנקודה A שבאים זה?

שאלה 2.16

שלושה מטענים נמצאים על ציר X:

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

חשבו את הפוטנציאלי בנקודה $0=x$.

שאלה 2.17

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

- בטאו, באמצעות הנתונים, את הפוטנציאלי בנקודה שנמצאת במרכז הקטע המחבר את שני המטענים.
- בטאו, באמצעות הנתונים, את גודל השدة החשמלי באותה נקודה.
- חזור על שני הסעיפים הקודמים, כשהשני המטענים זהים בסימנו.

שאלה 2.18

האם יתכן, שהפוטנציאלי יהיה שונה מ的那个, במקום שבו השدة החשמלי הוא אף – ולהיפך? נמקו.

מעבדה בשדה חשמלי - משחק הוקי

במשחק הוקי השתמש בחוקי השדה החשמלי על מנת להbkיע שעריהם.

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

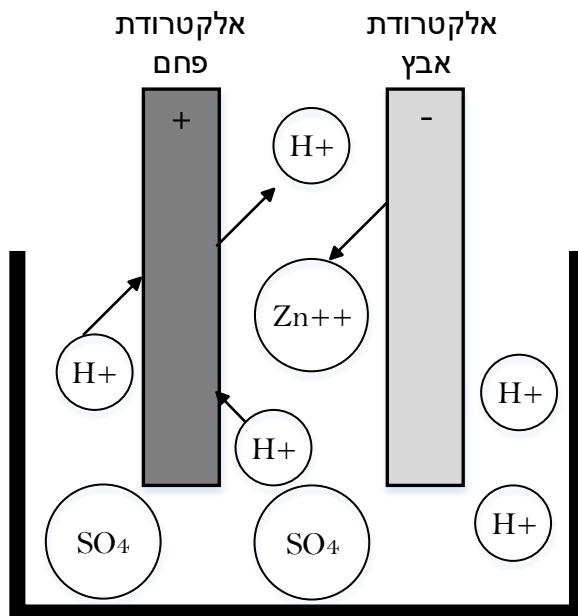
הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

הוראות כלליות

- מטרת המשחק להכניס את הגדור השחור לשער, יש 4 מטענים חיוביים ושליליים.
- **תרגול** - בו התלמיד לומד כיצד להזיז את הגדור השחור באמצעות המטענים מתאים כך שהגדור יעקו את המחסום.
- **רמת קושי 1** – בין הגדור השחור לבין השער יהיה מחסום, על התלמיד להציב מטענים מתאים כך שהגדור יעקו את המחסום.
- **רמת קושי 2** - כעת יופיעו על המגרש שני מחסומים, כך שתכנון המסלול יהיה מורכב יותר.
- **רמת קושי 3** - על המסר יופיעו שלושה מחסומים, וקבעת מסלול לכדור השחור תהיה יותר מורכבת.
 - ניתן לקבוע את מטען הדסקית על ידי **דיסקה חיובית**.
 - ניתן לראות את מסלול הגדור השחור על ידי **סימון עקבה**.
 - ניתן לראות את כיוון השדה שהמטענים יוצרים על המגרש על ידי **סימון שדה**.
 - ניתן לראות את עצמת השדה על ידי **סימון antialias**

3.2 התא החשמלי

כבר הזכרנו, שאחת הדרכים לקבלת מקור מתח - היא להפריד בין מטענים חיוביים לשניליים. התא החשמלי הוא התקןיעיל להפרדת מטענים. הוא בני משני מוטות השקועים בטור תמישה, כפי שמתואר באירור 10-2. מוטות אלו מכונים אלקטטרודות.



איור 10-2 תא פחם-אבץ

התא החסמי, המתויר כאן, הוא תא פחם-אבץ. אלקטרודה אחת של התא עשויה פחם, והאלקטרודה השנייה עשויה אבץ. שתי האלקטרודות שקוועות בתוך תמיישה של חומצה גופריתית (H_2SO_4). لكذا של אלקטרודה - נהוג לקרוא הדק, ולפעמים גם האלקטרודה עצמה נקראת הדק.

סביר עתה כיצד נוצרת הפרדת המטענים בתא החסמי, וכייזד מוצברים המטענים באלקטרודות של התא. בתוך התמיישה יש תהליך של התפרקות ליוונים. מכל מולקולה של החומצה מתקיים שני יוני חיובים של מימן (H^+) ויוון שלילי אחד (SO_4^{2-}) כותבים זאת כר:



כאשר מכניסים את אלקטרודת האבץ לתוך התמיישה החומצית, יוני האבץ (Z_n^{+}) עוזבים את אלקטרודת האבץ, וועברים לתמיישה. כל יון Z_n^{+} משאיר אחריו באלקטרודת האבץ שני אלקטרונים עודפים, וכתוכאה מכר - אלקטרודת האבץ נתענת בטען שלילי.

התמיישה, שאליה עוברים יוני חיובים של אבץ, נתענת בטען חיובי. אבל לתמיישה יש נטייה להישאר אדישה מבחינה חשמלית. לכן, כדי לאזן את כניסה של כל יון אבץ חיובי שני יוני של מימן - הנמצאים בתמיישה - מתחברים לשני אלקטרונים מאלקטרודת הפחם. כר הופכים שני יוני אלה לשני אטומי מימן, ולאלה עוזבים את התמיישה, ומתחברים כאמור לשני אלקטרונים מאלקטרודת הפחם.

مالקטרודת הפחム נלקחו שני אלקטרונים, והיא נהפכת לבעלת מטען חיובי (יש בה חוסר באלקטרונים). ראיינו כי באלקטרודת האבץ יש עודף אלקטרונים, כלומר: אלקטרודת האבץ נתענת בטען שלילי, ואלקטרודת הפחם נתענת בטען חיובי. בדרך זו נעשית הפרדת המטען בתא החשמלי, ומתקבל מתח בין שתי האלקטרודות של התא.

האלקטרודה, שבה מצטבר המטען השיליי, נקראת **האלקטרודה השילילית**, ומסמנים אותה **לפעמים ב- -**. האלקטרודה, שבה מצטבר המטען החיובי, נקראת **האלקטרודה החיובית**, ומסמנים אותה **לפעמים ב- +**.

סוללות חשמליות

הסבירנו כיצד פועל תא חשמלי, המכיל תמישה נזילה. לא נהוג להשתמש בתא זה, ובדרך כלל משתמשים בתא יבש. תא זה מכיל משחה חומצית במקום תמישה נזילה. מספר תאים יבשים, המחברים זה לזה, משמשים סוללה. סוללות כאלה אנו מכנים למלמה, לפניו, לטרנזייסטו, או למחשבון.

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

סוללות ישות אחרות, הנפוצות בשוק, הן הסוללות האלקליניות ("אלקליות"). לסוללות אלה יש איזוט גבואה ואורך חיים גדול, ומשתמשים בהן במכשירים אלקטרוניים שונים. הנה ערכיהם טיפוסיים של מתחי סוללות: 7V, 3V, 1.5V, 9V, 12V.

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

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

הוראות כלליות

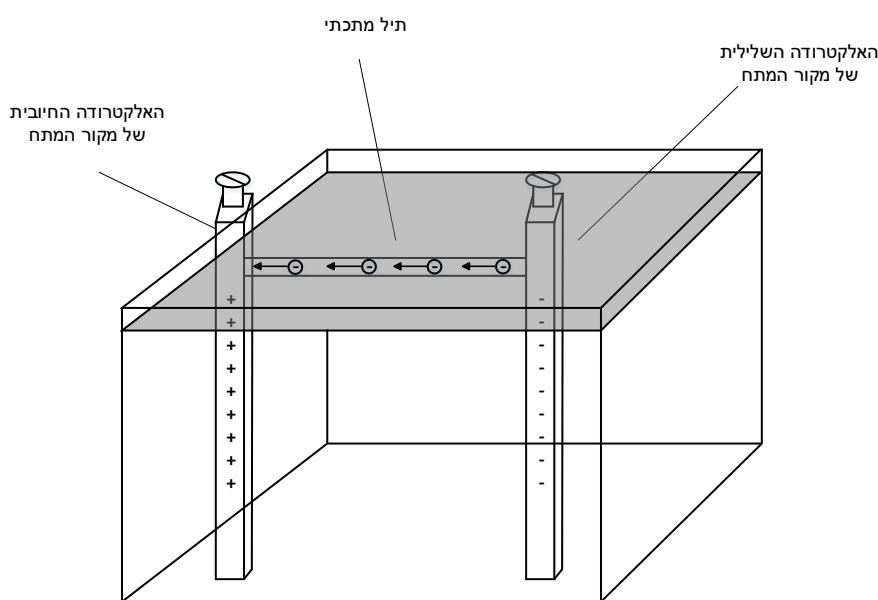
- עם הפעלת בסיסמולציה הסוללה מאוזנת כלומר הפרש הפוטנציאליים שלה הוא אףו (מתוך אףו), אותה כמות של מטענים בשני צידי הסוללה.
- למטה מופיע סרגל מתוח אשר נמצא במצבו המקורי שהסוללה מאוזנת כלומר מתוך אףו.
- כאשר נזיז את הסמן של המתח המקביל ימינה ושמאליה נראה שהמטענים יעברו בהתאם לצד ימין או שמאל בהתאם, כאשר הסוללה טעונה מרבית כל המטענים נמצא בצד אחד, עם פעולה הסוללה והשימוש בה חלק מהמטענים עוברים לצד השני.
- ניתן להציג את שני מגלי המטענים כסוללה על ידי סימן הציג סוללה.

2.4 הדגם החשמלי

ראינו שבתא החשמלי נעשית הפרדת מטענים. אלקטודה אחת נתענת בטען חיובי, והשנייה נתענת בטען שלילי. נראה עתה מה יקרה, אם נחבר תיל עשי מתח – לשתי האלקטרודות של התא.

כבר בסוף סעיף 2.1ذكرנו, שבמתקכות שונות (כגון: כסף, נחושת ואבץ) יש מצבור של אלקטורים, החופשיים לנوع. נציין כי לא כל האלקטרונים באוטומי המתקכת הם אלקטורים חופשיים. חלק מהאלקטורים קשורים בחזקה לגרעיני האוטומים, ושאר האלקטרונים חופשיים לנوعם בין האוטומים במתקכת. איור 2-15 אפשר לראות מסלולים של אלקטורים חופשיים.

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



איור 2-16 תיל מחובר לאלקטרודות של מתח. האלקטרונים החופשיים בתיל נעים מהאלקטודה השילית – אל האלקטרודה החיבונית

אנו יודעים שבין האלקטרודות של התא יש מתח, וכי **מטענים שליליים** נעים **מפוטנציאלי נמוך לפוטנציאל גבוה**. لكن **האלקטרונים החופשיים שבתיל המתכת** ינעו מהאלקטרודה **השלילית לאלקטרודה החיובית**.

אנו יודעים גם כי באלקטרודה השלילית של התא מצטברים אלקטרונים עודפים. גם אלקטרונים עודפים אלה יתחלו לנوع לאורך תיל המתכת. תנועה זו של אלקטרונים מן האלקטרודה השלילית תקטין את המטען השלילי שבאלקטרודה זו. כתוצאה לכך, ניתן לחשוב המשך התהליך של טיענת האלקטרודות. (שכן עתה יוכל יוני האבץ לעזוב את האלקטרודה השלילית, כפי שהסבירנו בסעיף 2.2).

המשך הטיענה של האלקטרודות יגרום להמשך הקיום של המתח בין האלקטרודות. מתח זה יוסיף לגורם לתנועת אלקטרונים מהאלקטרודה השלילית - אל האלקטרודה החיובית של מקור המתח. נסיק מכך כי כאשר מוחברים תיל לאלקטרודות אלה, נוצרת בתיל תנועה מכיוון אחת של אלקטרונים מאלקטרודה אחת לשניה, כלומר, האלקטרונים נעים בתנועה שיש לה כיוון מסוים. תנועה זאת של אלקטרונים - **נקראת זרם חשמלי**. גם תנועה מכיוון של מטענים חיוביים (כגון, יוניים חיוביים) היא זרם חשמלי.

ובאופן כללי:

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

אנו נעסק בדרך כלל בתנועה מכיוון של אלקטרונים.

מוליצים וմבודדים

רוב המתכות - ובهن הנחושת, הכסף והאבץ, שכבר הזכרנו - שייכות לקבוצת חומרים, הנקראים **מוליצים**. התכוונה החשובה של המוליצים היא שנמצאים בהם שפע של חלקיקים נושאי מטען החופשיים לנوع בחומר. אנו נעסוק בעיקר במוליצים, שבהם החלקיקים האלה הם אלקטרונים. מבחינתנו, מוליך הוא חומר שאפשר ליצור בו בקלות תנועה מכיוון של אלקטרונים.

יש חומרים שהמבנה האנטומי שלהם אינו מאפשר ליצור בקלות תנועה מכיוון של אלקטרונים. חומרים כאלה נקראים **մבודדים או מבזדים**. בפרק הבאם נדון בשימושם מבזדים בחשמל. באIOR 17-2 מתוארים מוליצים שכוסים בחומרים מבזדים.

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

בעזרת הסימולציה, ניתן לראות כי האלקטרונים נעים בمعالג בעזרת מקור המתח. התלמיד יזהה תכונות המתקשרות לפלסטיק ומתקות ויבין את ההבדלים. כמו כן ניתן לחוש את התלמידים לתופעת הפוטו אלקטሪק (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 מתקכת.
3. כעת, הגדר את מתח הסוללה לערך שך 0.5 וולט.
4. הצדורים הקטנים הנעים במוליך הינם האלקטרונים
5. כדי להשלים תנועה מכונה של אלקטרונים עליהם לנوع במסלול מוליך אשר מתחילה מנוקודה אחת במקור המתח בקוטביות אחת ומסתיימת במקור המתח בקוטביות הפוכה.

הוראות כלליות

- לרשותך מעגל חשמלי עם סוללה שנייה לשנות את ערכها ושלושה מוליכים שונים.
- קבע את המוליך **מתקכת** הפעל את המمعال צפה בתנועת האלקטרונים וברמת המוליכות (סרגל צד שמאל), שנה את עצמת המתח ותראה את ההשפעה על רמת המוליכות.
- שנה את המוליך **פלסטי-מוליך**, שנה את המתח וראה את המוליכות של החומר (אפס).
- שנה את המוליך **לפוטו-מוליך** (מוליכותו תלויה באור), הפעל את המمعال עלה את המתח (זרם לא עובר), הדלק את האור על ידי **סימון הפעל פס** ושים לב כיצד המוליכות משתנה בתלות באור.

שים לב: לא ניתן לשלוט על עצמת האור لكن האור הופך את החומר למוליך או מבזבז. ניתן היה אפשר לשנות את עצמת האור הינו רואים שהחומר היה הופך למוליך בדרגות שונות בתלות באור.

שאלותZZR

שאלה 2.19

האם האלקטרונים, הקשורים בחזקה 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 נקבעת תנואה מכובנת של מטענים? סמןו את התשובה הנכונה.

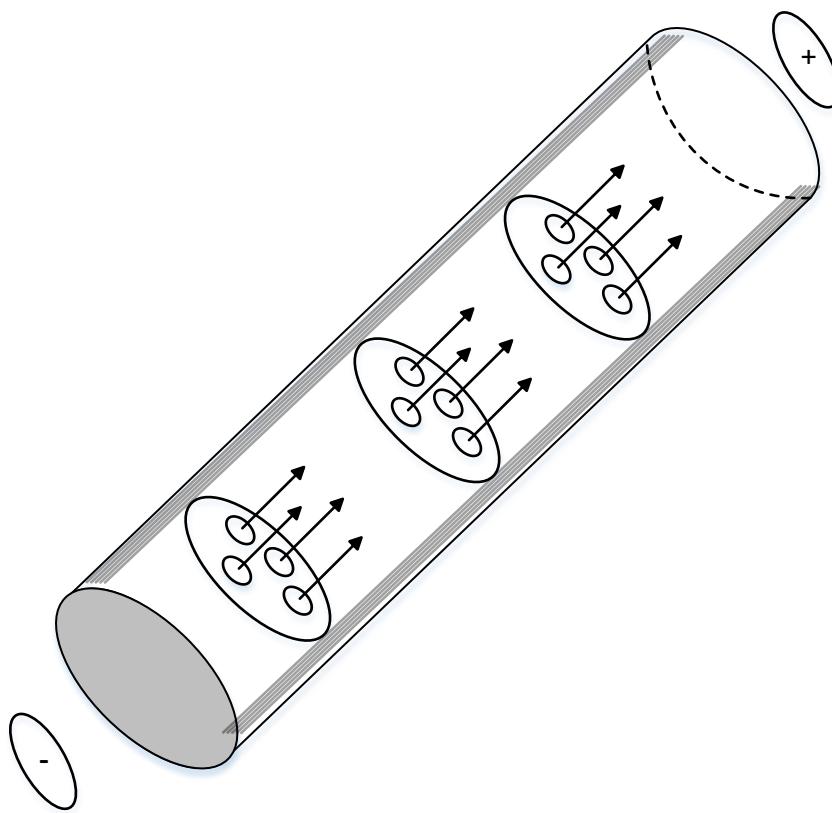
- א. אלקטرون
- ב. הפרש פוטנציאליים
- ג. אנרגיה פוטנציאלית חשמלית
- ד. זרם חשמלי
- ו. פוטנציאל
- ה. מתח חשמלי

2.5 חישוב הזרם החשמלי בمولיך

הגדכנו את הזרם החשמלי כתנואה מכובנת של מטענים. עתה נגדיר מושג שבuzzרתו מכל לתאר את גודלו של הזרם החשמלי. מושג זה הוא **עוצמת הזרם החשמלי**. לעיתים מזכירים ואומרים **זרם** במקום **עוצמת זרם**. מסמנים את עוצמת הזרם (ואת הזרם) באות א'.

באיור 18-2 מתואר זרם במוליך.

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



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

נסמן ב-Q את גודל המטען שעובר בחתך המוליך, ונסמן ב-t את משך הזמן שבו עבר המטען. גודל המטען שעובר בחתך המוליך ביחידת זמן, כמו זרם I, נתון על ידי

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

I – זרם (או עוצמת הזרם)

Q – מטען

t – זמן

ובמילאים:

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

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

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{4 \text{ קולון}}{20 \text{ שניות}} = \frac{4 \text{ ס}}{20 \text{ שניות}} = 0.2 \frac{\text{ס}}{\text{שניות}}$$

חידות הזרם

אם מדובר במוליך שהמתעניינים החופשיים בו הם אלקטرونים, 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 לשניה**. ליחידה זו קוראים **אמפר**, ומסמנים אותה **A**.

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

$$(2-8) \quad 1A = \frac{1C}{1s} \quad \text{אמפר} = \frac{\text{קולון}}{\text{שניות}}$$

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

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

כשהזרם קטן בהרבה מאמפר אחד, נהוג למדוד אותו במילি-אמפר או במיקרו-אמפר. מיליאםפר הוא אלףית האמפר (כשם שמלימטר הוא אלףית המטר). המיליאםפר מסומן כר: mA. הקשר בין המיליאםפר לאמפר הוא:

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

המיקרואםפר הוא מיליוןית האמפר. המיקרואםפר מסומן כר: μA. הקשר בין המיקרואםפר לאמפר הוא:

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

דוגמה 2-4

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

פתרון

זמן נתון בדקות, ותחילה נרשום אותו בשניות:
 $300 \text{ שניות} = (5 \times 60) \text{ שניות} = 5 \text{ דקות}$

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

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

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

דוגמה 2-5

מחשבון פועל במשך שעתיים רצופות. במשך כל הזמן זהה עבר בו זרם של 0.12mA. מהי כמות המטען שעברה במחשבון?

פתרון

נרשום תחיליה 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 משווה (2-7),

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

ולכן:

$$Q = 1t$$

נציב במסווה זו את ערכי הזרם והזמן:

$$= 0.00012 \times 7200 = 0.864$$

Q

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



שאלה 2.22

סמןו את התשובה הנכונה.

עוצמת הזרם החשמלי במוליך היא...

- א.** המטען החשמלי שעובר דרך חתך של המוליך המחבר להדק תא חשמלי.
- ב.** המטען החשמלי שעובר בין הבדיקה חיובית להידק השלילי של תא חשמלי.

- ג. המטען החשמלי שעובר ביחידת זמן דרך חתך של המוליך.
ד. מספר האלקטרונים החופשיים במוליך.
ה. מכפלת המטען במשך הזמן שהטען עבר דרך חתך של המוליך.

2.23 שאלה

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

2.24 שאלה

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

2.25 שאלה

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

2.26 שאלה

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

2.27 שאלה

בפנס זרם זרם של Am0.250. תוך כמה זמן יעבורטען של 3 קולון דרך נורת הפנס?

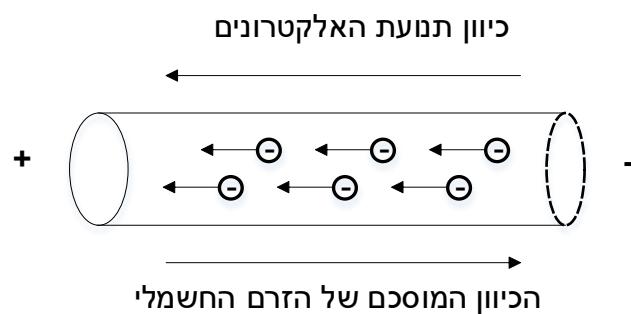
2.28 שאלה

הזרם במקלט טרנזיסטורי (ווקמן) הוא A.03. בטאו זרם זה ביחידות Am ו-A.m.

2.6 כיוון הזרם החשמלי במוליך

הגדכנו את הזרם החשמלי כתנועה מכיוון של מטענים شمالיים, כלומר: תנועת מטענים שיש לה כיוון. لكن מייחסים כיוון לזרם. הנטייה הטבעית היא לקבוע את כיוון הזרם בכיוון התנועה של המטענים שהם מרכיב הזרם. כאמור, אנו עוסקים בעיקר בזרם העובר במוליכים מתקטיים. המטענים החופשיים במוליכים אלה הם אלקטרונים. אם כך, היינו מצפים שכיוון הזרם יהיה בכיוון תנועת האלקטרונים.

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



איור 2-19 הכוון המוסכם של הזרם החשמלי

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

האלקטرونים במוליך נעים מהאלקטרודה **השלילית לחיבורית**, והכיוון המוסכם של הזרם הוא מהאלקטרודה **החיבורית לשילilit**.

ניסוי עקרון זרימת האלקטרונים וכיוון הזרימה

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

פרק א'

- **לפניך מעגל חשמלי המכיל סוללה (לא ניתן לשולט על ערכיה), מפסק, נורה, ומוליך.**
 - **ניתן לשולט על מצב המפסק בסרגל **פתח/סגור מתג**.**
 - **כאשר המעגל סגור מתחילה תנועת אלקטטרונים מההדק השיליי של הסוללה לחיבוי, ניתן לראות את תנועת האלקטרונים על ידי לחיצה על הראה **תנועת אלקטטרונים**.**
 - **ניתן לראות מהלך שלאלקטרון על ידי **סמן אלקטרון**.**
 - **ניתן לסמן את כיוון הזרימה על ידי לחיצה על הראה **כיוון זרם**.**
 - **עקרון זרימת הזרם הוא שכאשר י יצא אלקטרון מההדק השיליי נכנס אלקטרון בהדק החיבוי, על ידי הזזה של כל האלקטרונים במוליך, כך, שכמות האלקטרונים בכל רגע שווה רק קצב ההזזה קבוע את עצמת הזרם.**

2.7 צפיפות הזרם

לפעמים נרצה לדעת את צפיפותם של האלקטרונים נשאי הזרם מתחת למוליך, כאשר בمولיך זורם זרם. במקרים אחרים, נרצה לדעת את צפיפות הזרם במוליך. כאשר ידועה לנו עצמתו של הזרם החשמלי I , ידועה לנו כמות המטען שעוברת ביחידת זמן דרך חתך של המוליך, אך אין לנו מידע על צפיפות האלקטרונים נשאי הזרם מתחת למוליך. 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; במקרים אחרים: צפיפות הזרם במוליך היא היחס בין עצמת הזרם I דרך המוליך – לשטח חתכו A . נסמן ב- J את צפיפות הזרם במוליך, ונקבל:

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

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

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

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

דוגמה 2-6

דרך מוליך גליל, שקוטרו 1cm , עובי זרם של 2m . 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 , ושרדיוסו שלו 0.5cm . שטח עיגול, שהרדיוס שלו r , הוא πr^2 , ולכן שטח החתך A של המוליך הוא:

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

צפיפות הזרם – לפי משוואת (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 חזקה

2.29 שאלה

נתונים שלושה מוליכים גליליים. בכל מוליך עובר זרם של $A_{m0} = 150$.

- א.** שטח החתך של אחד המוליכים הוא $mm^2 = 30$. 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?

2.30 שאלה

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

2.31 שאלה

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

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

2.32 שאלה

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

שאלות סיוכום

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

- א.** הפוטנציאלי באותה נקודה
- ב.** האנרגיה הדורשה להעברת מטען

- ג. מיקום המטען
2. הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות - נקרא
- א. הפרש הגבהים בין המטענים
ב. מתח
ג. מטען
3. גוף טען שלילי ינוע בהשפעת הפרש פוטנציאלים, ממוקם שבו הפוטנציאל
- א. נמוך לגובה
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 שונים-סימן, המופרדים זה מהז, יכולים לשמש ל
- א. זרם במעגל
ב. מקור מתח
ג. להפרש פוטנציאלים
6. התא החשמלי (והסוללה) הוא התקןיעיל
- א. הפרדת מטענים
ב. חיבור המעגל
ג. אחסון כל המטענים יחד
7. תנועה מכובנת 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. אקריאי

10. צפיפות הזרם ב מוליך היא

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

סיכום פרק 2

- האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת – נקראת **הפוטנציאלי** באותה נקודה (אין לטענה הבדל בין "אנרגיה של יחידת מטען" – לבין "אנרגית לחידת מטען").
- הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות – נקרא מתח. יחידת המתח היא וולט.
- גוף טעון שלילי ינווע בהשפעת הפרש פוטנציאלים, מקום שבו הפוטנציאלי נמוך למקום שבו הפוטנציאל גבוה.
- הפוטנציאלי בנקודה המרוחקת מרחק r ממטען Q נתון על ידי
$$U = k \frac{Q}{r}$$
.
- הפוטנציאלי, הנוצר בנקודה מסוימת על ידי מערכת מטענים, שווה לסכום הפוטנציאלים הנוצרים באותה זו על ידי המטענים הבודדים (טור התיחסות בסימני המטענים).
- נתון קטע באורך d . הקשר בין גודל השدة החשמלי האחד לאורך הקטע – בין הפרש הפוטנציאלים:
$$E = \frac{U}{d}$$
.
- שני מטענים שונים-סימן, שמופרדים זה מזה, יכולים לשמש כמקור מתח.
- יש דרכים שונות שבן ניתן להפריד בין מטענים חיוביים לשיליים, וכך ליצור מקורות מתח. התא החשמלי (והסוללה) הוא התקןiesel להפרדת מטענים.
- תנועה מכנית של מטענים חשמליים – נקראת זרם חשמלי. האלקטרונים הם נושא זרם החשמלי במוליכים מתכתיים. המתקנות הן מוליכות, כלומר: ניתן ליצור בהן בקלות זרם חשמלי – בגיןוד למבודדים.
- זרם החשמלי במוליך נתון על ידי כמות המטען שעובר דרך שטח החתך של המוליך – ביחידת זמן:
$$I = \frac{Q}{t}$$
.
- הכוון המושכם של זרם החשמלי במוליך – מנוגד לכיוון תנועת האלקטרונים באותו מוליך.
- צפיפות זרם במוליך היא כמות המטען שעוברת דרך שטח חתך מוליך ביחידת זמן; כלומר: צפיפות זרם במוליך היא היחס בין עוצמת הזרם I דרך המוליך – לשטח חתכו A .

3. התנוגדות דשMAILית

3.1 מבוא

ראינו שבאמצעות מקור מתח אפשר ליצור זרם חשמלי לאורך מוליך. משתמשים בכך במערכות רבות וشنויות: בראשת החשמל הארץית, במערכת הטלפונים, בתקשורת בין מחשבים, בטלווייזיה בכבלים – ועוד.

3.2 התנוגדות מוליכים למעבר זרם דשMAILי דרך

כדי להבין מדוע מוליכים מגלים התנוגדות למעבר זרם דרכם, נצרך לחזור ולהתבונן במבנה האוטומי של החומרה המוליכים. העסוק בעיקר במוליכים עשויים מתכת, ולכן נ התבונן במבנה האוטומי של המתכות. האוטומים במתכות מסוודרים בצורה סימטרית, שכבות שכבות של אוטומים, ובכל שכבה יש אוטומים מסוודרים בצורה מסוימת וקבועה. מבנה זה נקרא **سورג או סריג**. באIOR 2-3 נתון סוג מתכת.

למدى כהrik מהאלקטرونים של אוטומי המתכת הם אלקטرونים חופשיים. אלקטرونים אלה אינם קשורים לאוטומים שלהם, אלא יכולים לנوع בסורג כולם. האוטומים, שהאלקטرونים החופשיים עזבו אותם, נהפכים לイוניים חיוביים, והאלקטرونים החופשיים נעים כל הזמן בכל הכוונים בתוך הסורג המתכת.

התיאור שהבנו עד עכשוו מתאים למוליכים מתכתיים אידיאליים. כמובן, מוליכים מורכבים מסורגים, בהםם כל יון קבוע במקומו, וכל היוניים זהים זה לזה. אבל בمولיך מתכתי מעשי - המבנה המושלם של הסורג אינו נשמר. היוניים החיוביים אינם ממקום למקום, אבל הם מתנדדים בתנודות זעירות. בנוסף לכך, נכנסים לسورג יוניים זרים, שוגם הם מקלקלים את המבנה המושלם של הסורג.

כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך סורג לא-מושלם, הם מתנגשים ביוניים, היון תנועתם משתנה ומהירותם קטנה. באIOR 3-3 רואים מסלולים של אלקטرونים בתוך סורג מתכתי מעשי. גם בסורג האידיאלי וגם בסורג המעשי - אין כיון אחד שבו נעים יותר אלקטرونים מאשר בכיוונים האחרים.

זכור, הגדרנו את הזרם החשמלי כתנועת אלקטرونים בכיוון מסוים. לאחר שהאלקטرونים החופשיים בסורג אינם נעים לשום כיון מיוחד, לא נוצר בסורג זרם חשמלי.

עכשו נראה מה קורה כאשר מוחברים מוליך מתכתי - להדקם של מקור מתח. אלו יודעים שמקור המתח גורם לתנועה מכובעת של אלקטرونים בתוך המוליך, מההדק השלייל של מקור המתח - אל הבדיקה החיוויי שלו.

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

תחליה 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 המטען (על ידי שפשוף) באלקטרונים.
כמו כן, ניתן לראות את הקשר בין הפרק הראשון הנלמד בנושא מטענים, לפרק השני בנושא מתח וזרמים והפרק השלישי בנושא התנדבות. חלק מהתנסות הסימולציה ניתן לראות כיצד משפייע גודל המטען, המרחק האויררי, על הייצירות הזרם החשמלי.

הערה: לצורך התנסות וההדגישה, הזמן טעונה בסימולציה קצר מהזמן למציאות.

מהלך הסימולציה:

יש להטען 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 טוען במטענים השליילים?
2. מהי התופעה החשמלית אשר גורמת לג'ון להתחشم?
3. ממה מושפעת עצמת הזרם?



אבל גם כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך המוליך בתנועה מכואנת, יש התנgesיות בין האלקטרונים לבין הイונים בסורגי המתכת. גם בתנועה המכואנת התנgesיות אלו גורמות לשינויים בכיוון התנועה של האלקטרונים ולהקטנת מהירותם. באיר-4-3 מתוארים – באמצעות חצים – מסלולי התנועה של האלקטרונים החופשיים, כشمוקור המתח מחובר בין קצות המוליך.

התנועה המכואנת של האלקטרונים החופשיים מתעכבת אם כן בגל התנgesיות, ובמוליך נוצרת התנgesות לזרם החשמלי, ובKİצורה: **התנgesות**.

3.3 הגדרת התנגדות 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 אותו מקור מתח מוליך שיש לו התנגדות גדולה מאוד, לא עבר כמעט זרם במוליך.

ובאופן כללי:

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

ונכל 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 - ההתנגדות

U – מתח

I – זרם

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

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

יחידת התנגדות

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

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

או:

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

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

נגידר אם כן את יחידת התנגדות אום בצורה הבאה:

למוליך יש התנגדות של אום אחד (Ω), אם הפרש פוטנציאליים של וולט אחד (V) בין קצוטיו, יוצר במוליך זרם של אמפר אחד (I).

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 הסרטונים הבאים כיצד חוק אום בא לידי ביטוי במעגלים شمالיים.

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

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

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

גיאORG סימון אום (1785-1851 בערך)

"**תוצאות מחקרו התקבלו תחיליה בספקנות, ואףלו בלאג, על ידי מדענים אחרים, ורק אחרי שנים הכירו בחשיבותו תגליתו.**"
תיאור זה מתאים למדענים רבים. אחד מהם הוא הפיזיקאי הגרמני גיאORG סימון אום. הוא היה בן למשפחה מרובת ילדים. את השכלהו הבסיסית רכש מאביו, שהוא מסגר והתענין במדעים. אום גילתה את החוק, שנקרא אחר כרעל שלו: חוק אום. החוק התקבל בהתחלה בביבורת שלילית, ואףלו בלאג. אום נפגע מאוד מהיחס אליו, והתפטר מהאוניברסיטה שלימד בה. רק לאחר זמן רב הכירו בחשיבותו תגליתו והוא זכה לכבוד גדול.

חוק אום

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

מטרת הסימולציה:

בניסוי זה נראה כיצד המתח משפיע על עוצמת הזרם ובנין 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 מצין את חום הנגד בתלות בזרם.
- סימולציית האלקטרונים מראה את הזרימה וכיוונה, בטור למעגל יש מוד זרם המציין את עוצמת הזרם.
- בפעולת המעגל שנו את עוצמת המתח ותראו כיצד זה משפיע על הזרם במעגל, ניתן לראות את העיקרון שכאשר אלקטرون יצא מהסוללה בהדק השי אלקטرون נכנס. כמות האלקטרונים בזרימה שווה רק קצב התנועה שלהם משתנה.
- שימוש לב סרגל החום משתנה בתלות בזרם (יחס יש).
- שנו את עוצמת הנגד וראו את השפעתו על הזרם (חוק אום).
- ניתן לראות את התנהלות האוטומים בנגד בזמן זרימת האלקטרונים על ידי סימון

הציג אוטומים 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 משלבי המוליכים יש התנגדות קטנה יותר?

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

פתרון

התנגדות R_1 של המוליך העשו בברזל היא:

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

התנגדות R_2 של המוליך העשו 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:

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

שאלותHz

שאלה 3.1

נתונים שלושה מוליכים שונים. מחבריםם כל פעם מוליך אחר לאחרו מקור מתח. למוליך הראשון ההתנגדות קטנה, למוליך השני ההתנגדות בינונית, ולמוליך השלישי ההתנגדות 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? (סמן את התשובה הנכונה).

- A.** היחס בין הזרם למתח.
- B.** היחס בין המתח לזרם.
- C.** מכפלת המתח בזרם.
- D.** סכום המתח והזרם.

3.3 שאלה

המתח בין קצות חוט הלהט בפנס הוא $7V$, והזרם בחוט הוא $0.3A$. מהי התנגדות חוט הלהט?

3.4 שאלה

סמן את המשוואה הנכונה.

$$\text{A. } R = \frac{U}{I}$$

$$\text{B. } R = \frac{I}{U}$$

$$\text{C. } R = UI$$

$$\text{D. } R = \frac{1}{UI}$$

3.4 הגורמים הקובעים את גודל התנגדות

של מוליך

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

- אורך המוליך (האורך מסומן באות ℓ).
- שטח החתך של המוליך (שטח החתך מסומן באות A).
- החומר ממנו 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 שוויים, אך הם נבדלים זה מזה באורכם (איור 5-3). במקרה זה, ככל שה מוליך ארוך יותר, התנגדותו גדולה יותר.

נסביר זאת: ככל שה מוליך ארוך יותר, האלקטרונים במוליך עוברים דרך ארוכה יותר - מכאן אחד של המוליך לקצה השני. ככל שהאלקטרונים עוברים מרחק גדול יותר, הם מתנגשים ביזונים רבים יותר בתחום הסוג המתכתי הלא-מושלם. כתוצאה מכך, התנועה המכובדת של האלקטרונים מתעכבת. פירוש הדבר שהזרים קטן יותר, וכך שכך אמרנו, זהו סימן לכך שההתנגדות גדולה יותר.

לכן,

כל שמדובר ארוך יותר, ההתנגדות שלו גדולה יותר

כדי לבדוק מהו הקשר המדויק בין אורך מוליך לבין ההתנגדותו, נערכו ניסויים שבהם חיברו למקור מתח מסוים מוליכים שנבדלו זה מזה רק באורכם. בניסויים אלה מדדו את הזרם שעובר בכל מוליך, ועל סמך המדידות חישבו את ההתנגדות של כל מוליך. כמו כן מדדו את האורך של כל מוליך. מצאו כי **התנגדות 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 7-3 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 $5\Omega = R_2$. מהי ההתנגדות R_1 של המוליך הארוך?

פתרון

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

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

התנגדות נמצאת ביחס ישר לאורך, ולכן יחס ההתנגדויות הוא יחס האורכים;
כלומר, $\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$. אם אורך מוליך א גדול פי 2 מאשר אורך מוליך ב, גם ההתנגדות של מוליך א גדולה פי 2 מההתנגדות של מוליך ב, כלומר, $\frac{R_1}{R_2} = \frac{2}{1}$. 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 התנגדות

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

סביר זאת: ככל ששטח החתך של מוליך גדול יותר, יש בשטח החתך שלו יותר אלקטرونים חופשיים. לכן, כאשר מוחברים את המוליך למקור מתח, יותר אלקטرونים חופשיים נדחפים על ידי המקור - דרך שטח החתך - בכל יחידת זמן. בימים אחרים: הזרם במוליך גדול יותר העובדה שהזרם במוליך גדול יותר (כשנתנו כי אין שינוי במתוך המקור), פירושה שה מוליך מתנגד פחות למעבר זרם דרכו. כלומר: התנגדות המוליך קטנה יותר.

לכן,

כל שטח 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 ההתנגדות. בניסויים אלה מצאו כי ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס הפוך לשטח החתך של המוליך. למשל: אם מגדילים פי 2 את שטח החתך של מוליך, ההתנגדות 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

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

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

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

התנגדות סגולית – והשפעת החומר, שמננו עשו המוליך, על התנגדותו

ראינו שההנגדות של מוליך תלוי 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 ממתקות שונות. יש תילים עשויים נחושת, יש תילים מברזל, מאלומיניום ועוד.

לכל אחת מהמתכוון שהזכרנו יש תכונות מיוחדות, 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 מסוימות, ובמיוחד אחרות: לכל מוליך יש **סגולות** מסוימות אלה אינן תלויות באורך ובשטח החתך של המוליך (ובקיצור: סגולות אלה אינן תלויות בממדי המוליך).

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

כדי להקל את המדידות וההשוואות, בוחרים מוליכים שהאורק שלהם הוא יחידת אורך אחת (למשל: מטר אחד), ושטח החתך שלהם הוא יחידת שטח אחת (למשל: מילימטר רבוע אחד). ההנחה, הנ마다 בנסיבות אלה, נקראת **התנגדות סגולית**, והוא מסומנת באות היוונית κ (ק). לכל חומר יש התנגדות סגולית מסוימת.

במדידות רבות שנעשו, התגלה כי **התנגדות של מוליך נמצאת ביחס ישיר להתנגדות הסגולית של החומר שמננו עשו המוליך**.

לאחר שהובאו הסברים על ההתנגדות המוליך והשפעתו על זרימת הזרם, נביא סימולציה הממחישה את המושג ההתנגדות 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 צלום מסך של הסימולציה.

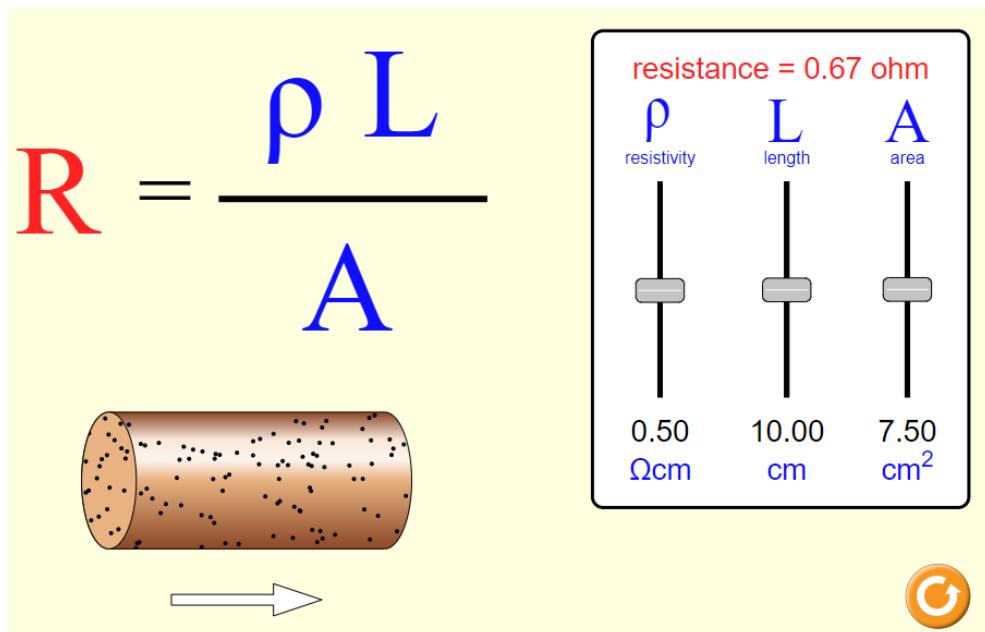
כפי שלמדנו:

R- התנגדות המוליך

L- אורך המוליך

A - שטח החתך

ρ- התנגדות סגולית



ניתן לראות בתחום המוליך נקודות שחורות, כפי שנלמד בפרק, אלו הסריגים המצויים בתחום, ככל קיימים יותר נקודות שחורות (סריגים), כך ההסתברות שיתגשו באלקטרונים גבוהה יותר.

הסימולציה מאפשרת לנו לשנות כל פעם משתנה אחר במשווה, ולראות כיצד הקשר בא לידה ביתו.

לטיכום: מצאנו כי שלוש תכונות משפיעות על גודל ההתנגדות של מוליך: אורך המוליך; שטח החתך שלו; והחומר ממנו עשוי המוליך. נכתב בצורה משווה את הקשר בין ההתנגדות של מוליך לבין התכונות שלו:

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

כלומר:

התנגדות המוליך נמצאת ביחס ישיר להתנגדות הסגולית של החומר ממנו עשוי המוליך
ואורך המוליך, וביחס הפוך לשטח החתך של המוליך.

נסמן באמצעות את הגדים המופיעים במשוואה:

התנגדות – R

אורך – l

שטח החתך – A

התנגדות סגולית - ρ

ונקבל את המשוואה:

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

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

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

ичידות ההתנגדות הסגולית

בשלב זה איננו יודעים עדין מהו ייחידת ההתנגדות הסגולית. אבל אנו יודעים את היחידות של שלושת הגדים האחרים, המופיעים במשוואה (3-4) המבטאת את ההתנגדות הסגולית: האורך, שטח החתך וההתנגדות. בעזרת היחידות של הגדים האלה, נוכל לבטא את ייחידות ההתנגדות הסגולית. נדגים זאת.

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

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

ויחידות ההתנגדות הסגולית מתבלotas על ידי כך, שמחלקים את מכפלת היחידות שבמונה

ביחידות של המכנה במשוואה $\frac{RA}{l} = \rho$, ומקבלים:

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

ולכן ייחידת ההתנגדות הסגולית היא:

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

כלומר:

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

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

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

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

דוגמה 3-4

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

פתרון

נציב במשוואת ההתנגדות את הנתונים שבדוגמה:

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

בຕבלה (1-3) רשומות ההתנגדויות הסגוליות של מוליכים שונים. בהמשך נראה כי ההתנגדות – גם ההתנגדות הסגולית – תלויות בטמפרטורה. ההתנגדויות הסגוליות, הרשומות בטבלה 1-3, נמדדו ב- 20°C .

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

טבלה 1-3 התנגדויות סגוליות של מוליכים שונים

3.3.3. חישובי התנגדות, התנגדות סגולית, אורך ושטח חתך

נדגים עכשו כיצד משתמשים במשוואה $R = \frac{\rho l}{A}$, כדי לחשב את אחד מארבעת הגודלים המופיעים בה, כאשר ידועים שלושת הגודלים האחרים. כפי שראינו, ההתנגדות הסגולית נתונה, בדרך כלל, ביחידות $\frac{mm^2 \cdot \Omega}{m}$. כדי להשתמש בצורה נכונה במשוואה $R = \frac{\rho l}{A}$, علينا לבטא את ההתנגדות ביחידות אום (Ω), את האורך במטרים (m), ואת שטח החתך במילימטרים רבועים (mm^2). אם אחד הגודלים נתון ביחידות אחרות, יש לתרגם אותו ליחידות הדרישות. 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-nickel הוא 20 סנטימטרים, ושטח החתך שלו 4 סנטימטרים רבועים. מהי ההתנגדות המוליך?

פתרון

אורך המוליך נתון בסנטימטרים, והוא צריכים לתרגם זאת למטרים:

$$0.2 \text{ מ}' = 0.2 \text{ ס"מ}$$

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-nickel היא:

$$1 \frac{\Omega \times \text{מ"מ}^2}{\text{מ}}$$

נציב במשוואת ההתנגדות (3-3) את הגודלים הנתונים, ביחסות המתאימות, ונקבל:

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

שאלות חזקה

שאלה 3.5

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

- א.** לאייה משני המוליכים יש ההתנגדותגדולה יותר?
- ב.** מהו היחס בין ההתנגדויות המוליכים?

שאלה 3.6

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

שאלה 3.7

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

שאלה 3.8

באיר 9-3 נתונים ארבעה מוליכים העשויים כולם מאותו חומר.

- א.** סמנו את המוליך שההתנגדותו היא הקטנה ביותר.
- ב.** סמנו את המוליך שההתנגדותו היא הגדולה ביותר.
- ג.** חשבו את ההתנגדות של שני מוליכים אלה, בהנחה שהם עשויים נוחות.

שאלה 3.9

ברצוננו לחשב את האורך של תיל נחושת מגולגל. לשם כך מודדים את התנגדות התיל ואת שטח החתך שלו. התוצאות הן: ההתנגדות - Ω_5 , שטח החתך – 20 ממ"ר. מהו אורך התיל? (התנגדות הסגוליית של הנחושת נתונה בטבלה 1-3).

שאלה 3.10

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

3.3 השפעת הטמפרטורה על ההתנגדות

עד עכשיו למדנו על שלושה גורמים, המשפיעים על ההתנגדות של מוליך: אורך המוליך; שטח החתך של המוליך; והחומר ממנו עשוי המוליך, כלומר: ההתנגדות הסגוליית של המוליך. ניוכח עכשיו כי ההתנגדות מוליך תלולה גם בטמפרטורה שבה הוא נמצא.

בדרך כלל, ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, מספר ההתנגדויות של האלקטרונים החופשיים ביוני הסורג – גדול יותר, ולכן ההתנגדות למעבר זרם בסורג גדולה יותר. אך ההתנגדות למעבר זרם במוליך מתכתי – גזילה עם הטמפרטורה של המוליך.

בגרף שבאיור 10-3 מתוארת בקירוב רב ההתנגדות של מוליך מתכתי, תוך תלות בטמפרטורה. אנו רואים שההתנגדות גדלה עם הטמפרטורה. בתחום רחב של טמפרטורות, הגרף הוא קו ישר. במקרה, למשל, מתקבל קו ישר בין 0°C – לבין 500°C .

בדרך כלל, מוליכים שונים נבדלים זה מזה בתלות ההתנגדות שלהם בטמפרטורה. באיר-3 11 נתון התיאור הגרפי של תלות ההתנגדות בטמפרטורה של שני מוליכים שונים.

באיר 11-3 אפשר לראות, שני היסרים נבדלים זה מזה בשיפועם שליהם. את השיפוע הישר, שמתאר את תלות ההתנגדות של מוליך בטמפרטורה, מבטאים באמצעות גודל הנקרא מוקדם הטמפרטורה של המוליך. את מוקדם הטמפרטורה מסומנים באות היוונית α (אלפא). מוקדם הטמפרטורה נמצא ביחס ישיר לשיפוע הישר – בתנאים מסוימים. דיוון נוסף בנושא זה – חורג מסגרתנו.

لمוקדם הטמפרטורה α יש חשיבות רבה. מוליך בעל מוקדם טמפרטורה קטן שומר על ההתנגדות קבועה כמעט גם בשינוי טמפרטורה גדולים. לעומת זאת, במוליך בעל מוקדם

טמפרטורה גדול, ההתנגדות משתנה מאוד עם שינוי הטמפרטורה. בمعالגים شمالיים ואלקטרוניים רבים ההתנגדויות קבועות, על אף שינוי הטמפרטורה; כלומר, דרישים 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 שידעו גוף ההתנגדות שלהם, תוך תלות בטמפרטורה. חומרים כאלה נקראים **מדידים**.

אם רצים לדעת את הטמפרטורה של תנור להוט, למשל, מניחים את המדייד בתנור. לאחר שהmdiיד מתחמם (והטמפרטורה שלו מגיעה לטמפרטורה שבתוכה התנור), מודדים את ההתנגדות mdiיד. לפי הגרף של תלות ההתנגדות mdiיד בטמפרטורה, אפשר לדעת את הטמפרטורה של mdiיד.

באיור 3.12-3 מתואר גוף צזה. נניח כי אחרי הוצאת mdiיד מהタンור, ההתנגדות mdiיד היא 1.6Ω . מהגרף נסיק כי הטמפרטורה בתנור היא $500^\circ C$. בשיטה זו משתמשים למדידות טמפרטורות גבוהות, שקשה למدوוד אותן בדרך רגילה, או למדידת טמפרטורות במקומות שאין גישה אליהם בזמן mdiיד (למשל: סילילי מנוע בזמן פעולה המנוע).

שאלות חזקה

3.11 שאלה

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

3.12 שאלה

דרוש מוליך מתקתי שההתנגדותו קטנה ככל האפשר. סמננו את התכונות הנדרשות ממוליך צזה ואת הטמפרטורה שבה עליו להימצא.

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

3.13 שאלה

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

3.14 שאלה

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

3.3 בידוד וUMBDDIM

עד כה דיברנו על מוליכים מתכתיים. יש גם מוליכים לא-מתכתיים, כדוגמת הפחם, שהוא מוליך המשמש לצרכים רבים. התכונה האופיינית למוליכים היא התנגדות סגолית קטנה. אולם יש גם חומרים, שההתנגדות הסגולית שלהם גדולה. לשם השוואה: התנגדות

$$\text{הsegolit shel Crom-Nikel hia, } 1 \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}} \text{ ve illo hategadot segolit shel zekocit hia} \\ 10^{22} \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}.$$

חומר, שהתנגדותו הסגולית גדולה מאוד, הוא חומר מבודד. זכוכית, למשל, היא חומר מבודד, כמו כן: מבדד. גם חרסינה, בקיליט, נצץ (מיקה), קווארכז ופרפין הם מבודדים. מאחר שלUMBDDIM יש התנגדות סגולית גבוהה מאוד, הם מונעים מעשה מעבר זרם דרכם.

חומרים מבודדים משמשים לצרכים רבים. נתבונן, למשל, במה שקרה ב��ים. מכשירי החשמל מחוברים לשקעים באמצעות חוטי חשמל מוליכים. אילו חוטי החשמל היו חשובים, היפנו נתונים לסכנות התחשמלות בכל פעם שבו יהיו משתמשים במכשיר חשמלי. משום כך עוטפים את חוטי החשמל בחומר פלסטי מבודד, שמנע מעבר זרם לגוף האדם.

עוד שימוש בUMBDDIM נעשה כדי למנוע צבוז בחשמל. מאחר שהUMBDDIM אינם מעבירים זרם, משתמשים בהם כדי למנוע מן הזרם החשמלי הגיעו למקומות לא רצויים.

כאשר בוחרים מבודד שישמש לציפוי חוט מוליך - או לבידוד בצד חשמלי מסוים – יש לבדוק את תכונות המבודד ואת התנאים שבהם יפעל הצד החשמלי. לדוגמה, יש לבדוק את התנאים הבאים:

- תחום הטמפרטורות שבו נדרש הצד לפעול;
- תחום הלחות המומלצות לפעולת הצד;
- דרישות בטיחות מהצד.

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

- חוטי החשמל בבתים מצופים בחומר שנקרא פ.ו.ו.ו. (P.V.C). ה-PVC הוא חומר פלסטי שאינו סופג רטיבות. בגלל תכונתו זו, משמש ה-PVC גם לבודוד כבילים תת-קרקעיים. החיסרון של ה-PVC הוא שנגרם לו נזק כשהוא גלוי לקרני השימוש. לעומת זאת, לציפוי נחושת – משתמשים באמיל, כי זה חומר חזק ונפחו קטן.
- במתיקי חשמל שונים משתמשים לצורך בידוד בחומרים הפלסטיים פוליאתילן וטפלון. הפוליאתילן חזק פחות מ-PVC, אך עמיד יותר בפני חומצויות. הטפלון משמש כבודוד בטמפרטורות גבוהות ובזרמים קתינים (באלקטרוניקה, למשל).

יש מבדדים שנחוצים למוליכים טוביים בטמפרטורות גבוהות. ברור כי יש להתחשב בתכונה זו של המבדדים, כשרוצים להשתמש בהם. לדוגמה, חלק ממוכנות החשמל פועלות בטמפרטורות גבוהות, ויש לבחור עבורם במבדדים שההתנגדות הסוגלית שלהם קטנה רק במידה מסוימת כאשר הטמפרטורה עולה.

לאחר שלמדנו את התכונות המייחדות את המוליך ותורמות לفعاليותו בمعالג 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 سورג 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 מסויימת וקבועה
2. כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך سورג לא-מושלם
 - א. הם מתנגשים ביוניים, כיוון תנועתם משתנה, ומהירותם קטנה
 - ב. הם מתנגשים ביוניים, כיוון תנועתם משתנה, ומהירותם גדולה
 - ג. הם מתנגשים ביוניים, כיוון תנועתם אינה משתנה, ומהירותם קטנה
3. כאשר מחברים מוליכים שונים למקור מתח נתון, חוזרים כי

א. רואים כי ככל שההנגדות המוליך גדולה יותר, הזרם במוליך קטן יותר

ב. רואים כי ככל שההנגדות המוליך גדולה יותר, הזרם במוליך גדול

ג. רואים כי ככל שהה נגדות המוליך קטנה יותר, הזרם במוליך קטן יותר,

4. שלוש התכונות העיקריות, הקובעות את ההנגדות של מוליך, הן:

א. אורך, שטח, טמפרטורה של המוליך

ב. אורך, שטח וחומר המוליך

ג. מצב צבירה, גודל, ואורך

5. ככל שה מוליך ארוך יותרvr

א. ההתנגדותו קטנה

ב. ההתנגדותו גדולה

ג. אין קשר בין ההתנגדות המוליך לאורכו

6. ההתנגדות סגולית תליה

א. בסוג החומר

ב. בשטח החתך של המוליך

ג. באורך המוליך ובהתנגדותו

7. למוליכים יש ההתנגדות סגולית גבוהה

א. נכון

ב. לא נכון

ג. תלוי בסוג המוליך

8. ככל שהזרם קטןvr

א. ההתנגדות גבוהה

ב. ההתנגדות קטנה

ג. המוליך בעל ההתנגדות סגולית גבוהה

9. למבודדים קיימת ההתנגדות סגולית גבוהה

א. נכון

ב. לא נכון

ג. תלוי בסוג המבודד

סיכום פרק 3

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

4. המנגנון הדשמלי

צרוך (עומס)

ראינו שכשר מחברים מוליך בין האלקטרודות של מקור מתח, נוצר במוליך זרם. הזרם זורם במוליך, כל זמן שיש הפרש פוטנציאליים בין האלקטרודות. אבל אם נחתור את המוליך, כפי שמתואר באיור 1-4, הזרם יפסיק, אף שעדין יש הפרש פוטנציאליים בין האלקטרודות של מקור המתח. אם לא נציין אחרת, כאשר נכתב "מקור", נתקוון ל"מקור מתח".

נזכיר כאן כי כשבוקים במקור מתח וביחסו מוליך לאלקטרודות של המקור, מתיחסים בדרך כלל להדקים ולא לאלקטרודות ואף אנו עושים כך לעיתים קרובות. ההדקים מתוארים באיור 1-4. כאמור, תא חשמלי הוא דוגמה למקור. האלקטרודות בתא החשמלי שקוועות בתוך תמייה, ונוהג לומר כי התמייה נמצאת בין ההדקים.

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

התהlixir מסתיים כי מטענים נעים בכיוון מסוים ורק כאשר יש הפרש פוטנציאליים. ברגע שנוצר שווון פוטנציאליים, תנועת האלקטרונים נפסקת, כלומר הזרם נפסיק. הסיבה להצטברות המטענים ולהפסקת הזרם היא, שהאלקטרונים החופשיים אינם יכולים "לקיים" בדרך כלל מהמוליך החוצה. לכן הם מצטברים בנקודת הנתק B.

כדי שייהי זרם במוליך, יש לסגור את הקטע המנותק בין A ל-B על ידי "משהו", שבו יוכל האלקטרונים להמשיך ולנוע אל ההדק החיבוי. כמובן, יש לדאוג לכך שלאלקטרונים יהיה מסלול סגור לנوع בו מההדק השילי להדק החיבוי.

ה"משהו", שיסגור את הקטע החתוור בין הנקודות A ו-B, יכול להיות קטע של תיל מוליך, אבל בדרך כלל זהו מכשיר חשמלי שמנצל את הזרם החשמלי למטרות מעילות.¹ מכשיר זה נקרא **צרוך או עומס**. דוגמאות לצרכנים: מגנט, תנור בישול, נורה חשמלית. דוגמאות נוספות מtauוארות באיורים 2-4, 3-4, ו-4-4.

¹ בדרך כלל, כאשר מנצלים זרם חשמלי למטרות מעילות, משתמשים במקור מתח שאינו תא חשמלי. אבל לפעמים אין חשיבות לתיאור המדיוק של מקור המתח, והוא מייצגים אותו על ידי תא חשמלי. בהמשך נלמד על מקור מתח מסוג אחר.

שלו גודלה יחסית להתנגדות של תיל מוליך, ולכן חלק זה נקרא לפעמים **נגד**. לעיתים קרובות, כאשר אין צורך בתיאור מפורט של הרצן, מייצגים אותו על ידי נגד.

כאשר זרם עובר בנגד, יש התנגדויות בין האלקטרונים לבין היונים בחומר שמןעו עשויה הנגד. כתוצאה לכך הנגד מתחכם. לכן נגדים משמשים לפעמים כגופי חימום.

1.4 מעגל צבולי

כבר אמרנו שכדי שיזרום זרם בתיל מוליך וב策ן המחברים למקור מתח, יש לדאוג לקיוםו של מסלול סגור שבו יוכל האלקטרונים לנوع. בהתאם לכך, נגדים מושג חדש:

הגדירה

מסלול סגור הכלול ממקור מתח ו策ן, שיכוון הזרם המואסם בו הוא מהדק החיווי של מקור המתח אל הבדיקה השילילית, דרך ה策ן, נקרא **מעגל צבולי סגור**, ובקיצור: **מעגל צבולי**.

דוגמה למעגל צבולי סגור אפשר לראות באIOR 5-4.

להלן קישור לסרטון המציג את עקרון הפעלת המעגל הצבולי:

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

בדרך כלל איננו רוצים שה策ן יפעל כל הזמן, אלא רק שנוכל לחבר או לנתק את ה策ן לפי הצורך. לשם כך מחברים במעגל מתג (או מפסק). מעגל צבולי שנסגר בעזרת מתג מתואר באIOR 6-4.

בAIR 7-4 מתואר מתג פשוט, בשני מצבים: כאשר הוא סגור, וכשהוא פתוח.

המתג פועל כך:

החלקים 1 ו-2 קבועים במקומם. הם עשויים ממתקכת, ואלייהם מחברים את קצותו התיל המוליך. חלק 1 מחוברת ידית שדומה לסכין, ועשוי גם היא ממתקכת. קצה הידית מכוסה בחומר מבודד. חלק 2 עשוי משתי לוחיות מתכת קרובות זו לזו. כאשר מרים את הידית, היא נכנסת בין הלוחיות, ויצרתAITן מגע הדוק. במצב זה, המתג סגור. כאשר מרים את הידית, נוצר רווח בין לבין לוחיות המתכת. במצב זה המתג פתוח.

כאשר המתג פתוח, אין מסלול סגור לאלקטרונים, ולכן לא זורם זרם בمعالג. המعالג נקרא **מעגל חשמלי פתוח**. כאשר המתג סגור, המعالג סגור, זורם בו זרם, והctrنן יכול לפעול. באIOR 8-4 אפשר לראות מתג מעשי.

מתגים חשמליים

המתגים הם רכיבים שימושיים בمعالג החשמלי. היום מצויים בשוק מתגים מסווגים רבים מאוד. נכיר כאן שני מתגים שאנו משתמשים בהם מדי יום בביטחון: מTAG החשמל שבעזרתו מדליקים ומכבאים את האור, ומTAG לחץ המפעיל את הפעמון שכוניסת לבית.

מתג הדלקה וכיבוי אור

באIOR 9-4 רואים מTAG טיפוס המשמש להדלקה ולכיבוי אור.

באIOR 10-4 נתון המTAG – לאחר שהוסר חלק ממנו. כך נוכל ללמידה את המבנה העיקרי ואופן הפעולה של מTAG זה.

למTAG שלוש לוחיות: שתי לוחיות מתכת קבועות שאלייהן מחברים את קצוות המוליך, ולוחית נוספת, גם היא ממתקת, שאפשר להזיז אותה. אל הלוחית השלישית מחובר כפטור הפעלה קפיצי, העשו מחומר מבודד, ובעזרתו אפשר להזיז את הלוחית. כאשר הלוחית השלישית נוגעת בשתי הלוחיות האחרות, המTAG סגור. כאשר מזיזים את הלוחית, נשאר מרוחך, וזה המTAG פתוח.

מתג לחץ

המTAG בפועלן הדلت הוא מTAG לחץ. כאשר לוחצים על הcpfטור, נוצר מגע בין לוחיות המתכת שמחוברת לכפטור לבין לוחיות המתכת שמתוחתיה. המTAG נסגר והפעמון מציל. כאשר עוזבים את cpfטור, הוא חוזר למקוםו המקורי - בגין הקפיצי המחבר אליו. המTAG נפתח, והפעמון מפסיק לצלצל.

למTAG תפקיד חשוב בمعالגים חשמליים. כאשר המTAG פתוח, אין מסלול סגור לאלקטרונים, ולכן לא זורם זרם בمعالג, והمعالג נקרא **מעגל חשמלי פתוח**. כאשר המTAG סגור, המمعالג סגור, זורם בו זרם, והctrןן יכול לפעול.

בסרטון הבא, נוכל לראות את תפקידו של המTAG בمعالג החשמלי.

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

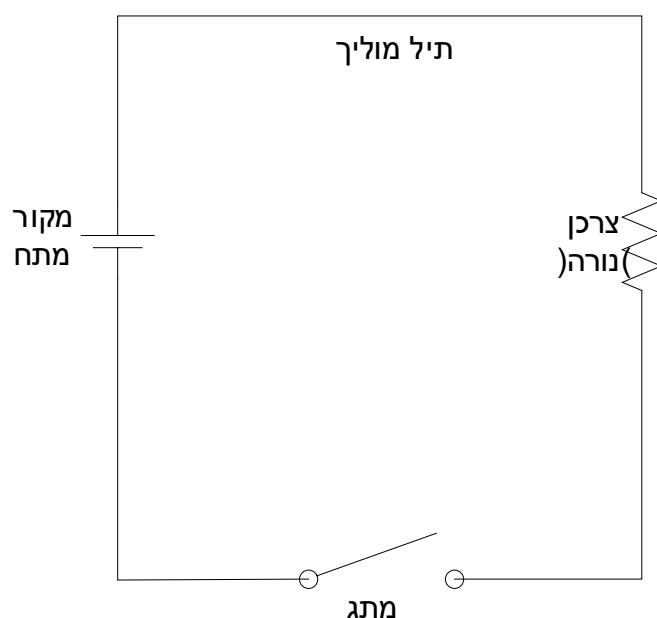
עד כה כבר הכרנו את החלקים העיקריים של המمعالג החשמלי: מקור מתח, תיל מוליך, ctrןן, מTAG. כאשר עוסקים בمعالגים חשמליים, נהוגים לשרטט אותם, ולשם כך משתמשים

בסמלים מקובלים. בטבלה 1-4 מופיעים הרכיבים במעגל החשמלי, תפיקידיהם, והסמלים המקבילים שלהם.

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

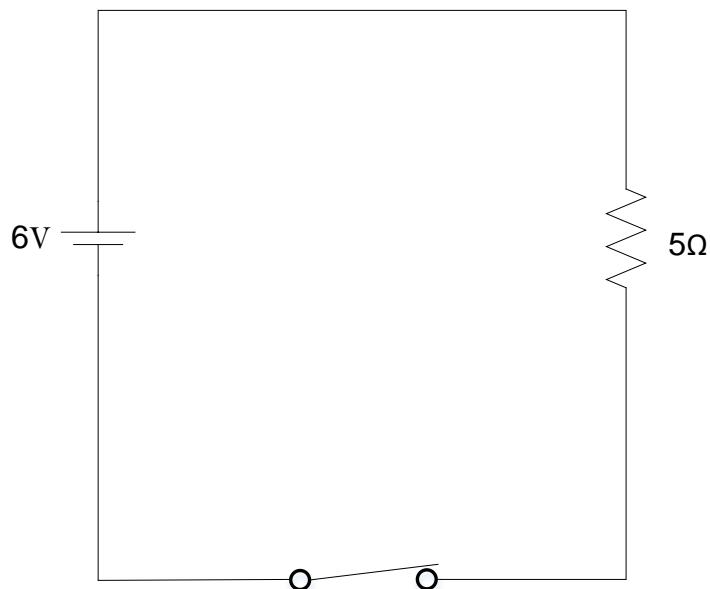
טבלה 1-4 רכיבים במעגל החשמלי וסמליהם

נביא עתה שוב את המעגל הפשוט שהכרנו קודם, ולצדו תרשימים המעגל **שרכיביו** השונים מיוצגים על ידי סמליהם המקבילים. במקרה זהה הצרך הוא נורה, והוא מיוצג בתרשימים באמצעות נגד.



תרשים המעגל
איור 4-12

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

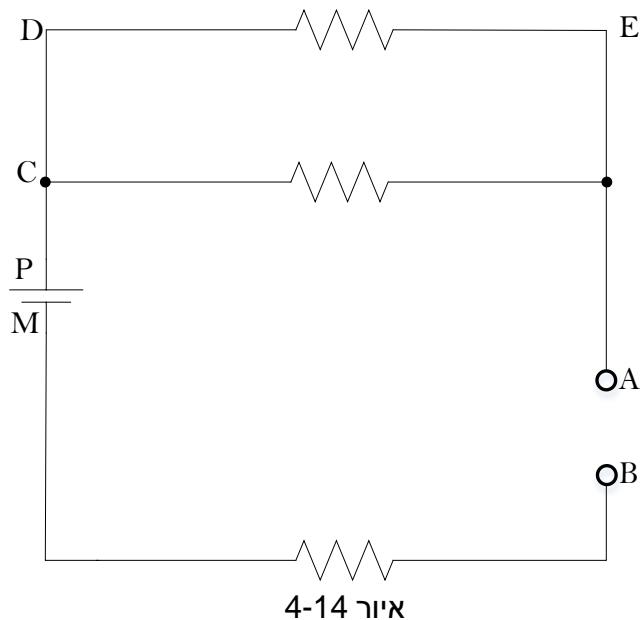


איור 4-13

במעגל חשמלי יכולים להיות כמו מקורות מתח וגם כמו צרכנים. בהמשך נכיר מעגליים פשוטים. כעת עוסוק במעגליים פשוטים בלבד.

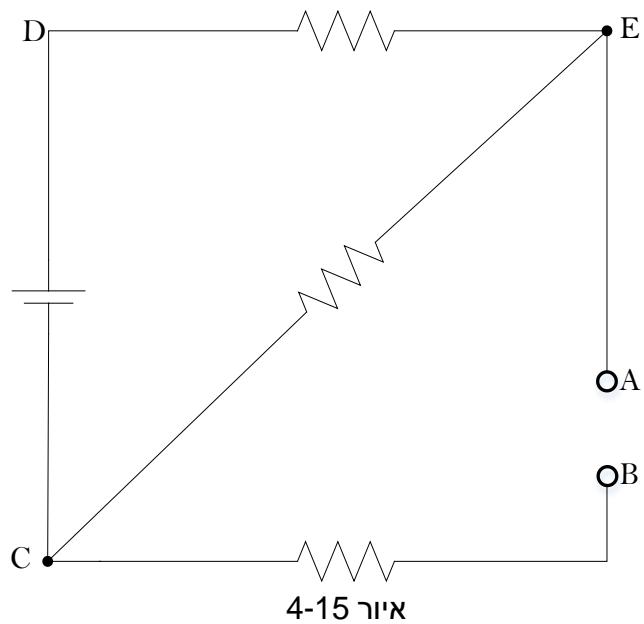
שאלה 4.1

האם המעגל שבאיור 4-14 הוא מעגל סגור?



שאלה 4.2

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



2.4 סוגי נגדים

כאשר מזרמים זרם شمال'י באמצעות מקור מתח, משתמשים בתילים מוליכים שהתנגדותם קטנה ככל האפשר. אבל לפעמים רצויים ליצור בכונה התנגדות לזרם החשמלי, כדי להקטין את הזרם או כדי ליצור חום, או לצרכים אחרים. לשם כך משתמשים בנגדים. הנגדים מיוצרים用水ות שונות, ובערבי התנגדות רבים. איור 16-4 נתונים שונים של נגדים.

מבנה נגדים

הנגדים מחלקים לשלווה סוגים עיקריים על פי המבנה שלהם.

א. נגד שכבہ

נגד שכבہ (איור 17-4) בני מגילע עשוי קרמיקה מצופה בשכבה מתכתית דקה או בשכבה פחム דקה.

ב. נגד פחם

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

ג. נגדים מלופפים

נגד מלופף (איור 19-4) עשוי מתיל מתכת דק, בעל התנגדות סגולית גדולה למד'. התיל מלופף על גבי גליל של חרסינה, או של חומר מבודד אחר. (מלופפים את התיל לצורת סליל, כדי שיתפסו מקום מועט למורות אורכו)

תכונות נגדים

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

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

ב. תלות ההתנגדות בטמפרטורה. תכונה זו תלויות בתכונות החומר ממנו עשוי הנגד.

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

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

דוגמה 4-1

נתון נגד שרשום עליו $\Omega k10$, והסיבולת היא 5%. מה תהיה ההתקנות הקטנה ביותר והגדולה ביותר של הנגד?

פתרון

ההתקנות הנגד יכולה להיות קטנה ב-5% לכל היותר ממהערך הרשום עליו. אך ההתקנות הקטנה ביותר תהיה:

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

ההתקנות הנגד יכולה להיות גדולה ב-5% לכל היותר ממהערך הרשום עליו. אך ההתקנות הגדולה ביותר תהיה:

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

שאלות צדקה

4.3 שאלה

מה תהיה ההתקנות הגדולה ביותר והקטנה ביותר של נגד, שרשום עליו $\Omega k4.7$, (רישום זה פירושו שסיבולת הנגד היא 5%).

4.4 שאלה

מה תהיה ההתקנות הגדולה ביותר וההתקנות הקטנה ביותר של נגד שרשום עליו $\Omega k1.2$, ?10%

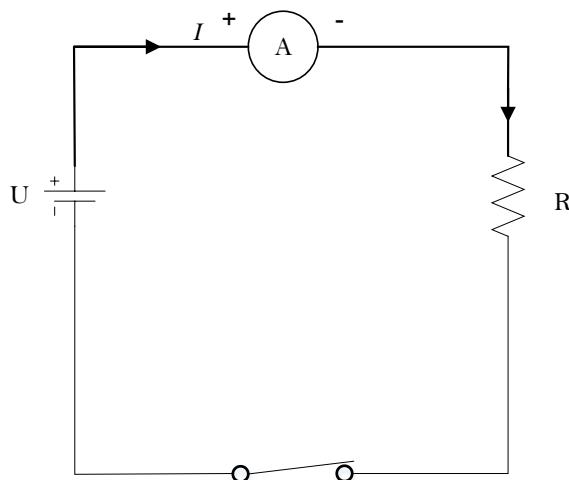
3.4 מדידות זרם ומתח במעגל צבילי

כאשר רוצים למדוד את הזרם שעובר במעגל צבילי, 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 שנתרות (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 הבדיקה החיובי שלו – אל הבדיקה השלילי, כמתואר באיוור 4-20.

באיור 4-21 רואים מעגל שמחובר לו מד-זרם. הזרם שմבקשים למדוד עובר דרך מד-הזרם, מהבדיקה החיובי אל הבדיקה השלילי. הזרם מסומן באות א, והכיוון שלו מסומן בעזרת חץ.



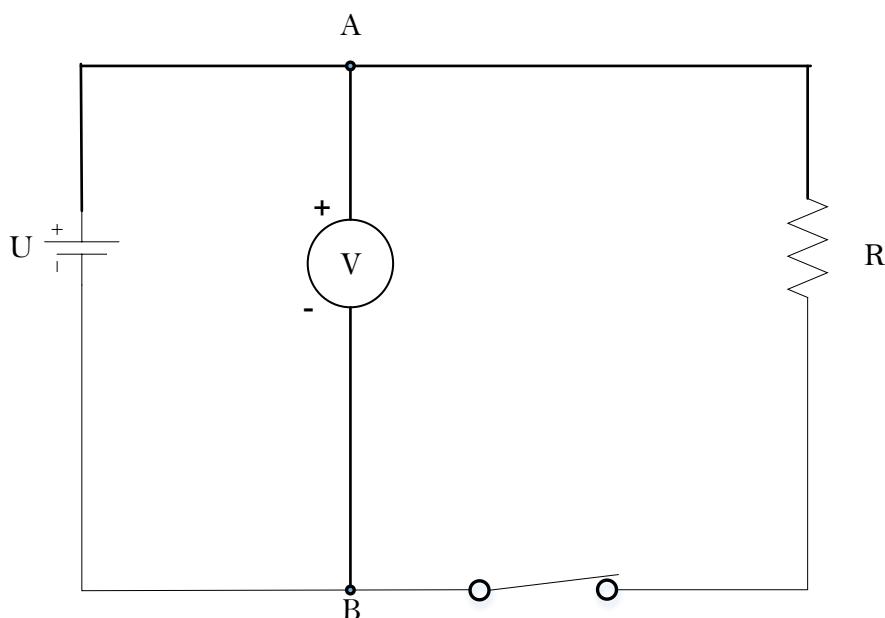
איור 4-21 מדידת זרם במעגל צבילי

מד-מתח

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

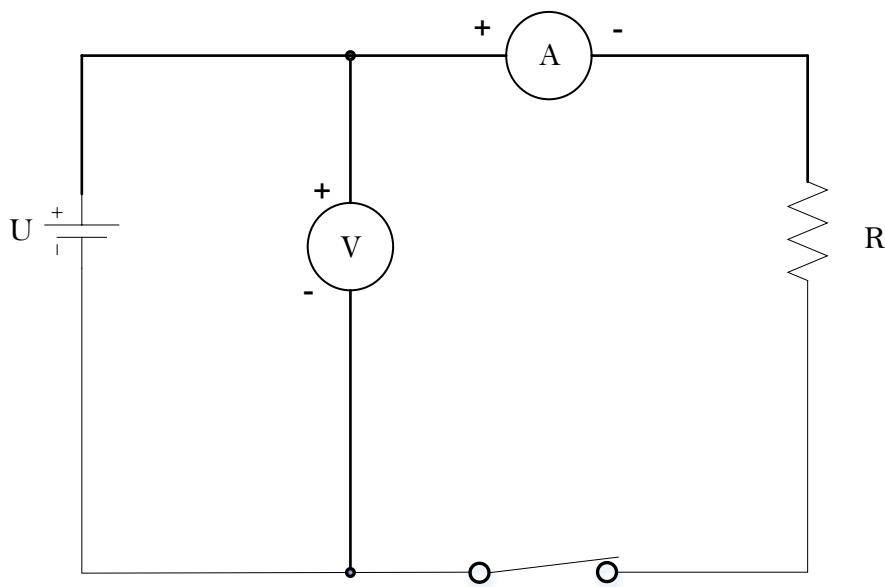
כאשר רוצים למדוד מתח בין שתי נקודות במעגל מחברים את הבדיקה החיובי לנקודה שבה הפוטנציאלי גבוה יותר, ואת הבדיקה שלילי לנקודה שבה הפוטנציאלי נמוך יותר. הסימן המקובל של מד-מתח הוא _____. מד-מתח מעשי מתואר באיוור 4-22.

באיור 23-4 רואים מעגל שמחובר לו מד-מתח. במעגל זה רוצים למדוד את המתח בין הנקודות A ו-B. בנקודה A הפוטנציאלי גבוה יותר, ולכן מחברים אליו את הבדיקה החיבורי של מד-המתח. בנקודה B הפוטנציאלי נמוך יותר, ולכן מחברים אליו את הבדיקה השילילי של מד-המתח.



איור 23-2 מדידת מתח במעגל חשמלי

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



איור 24-2 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 25-4. בשנים האחרונות

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

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

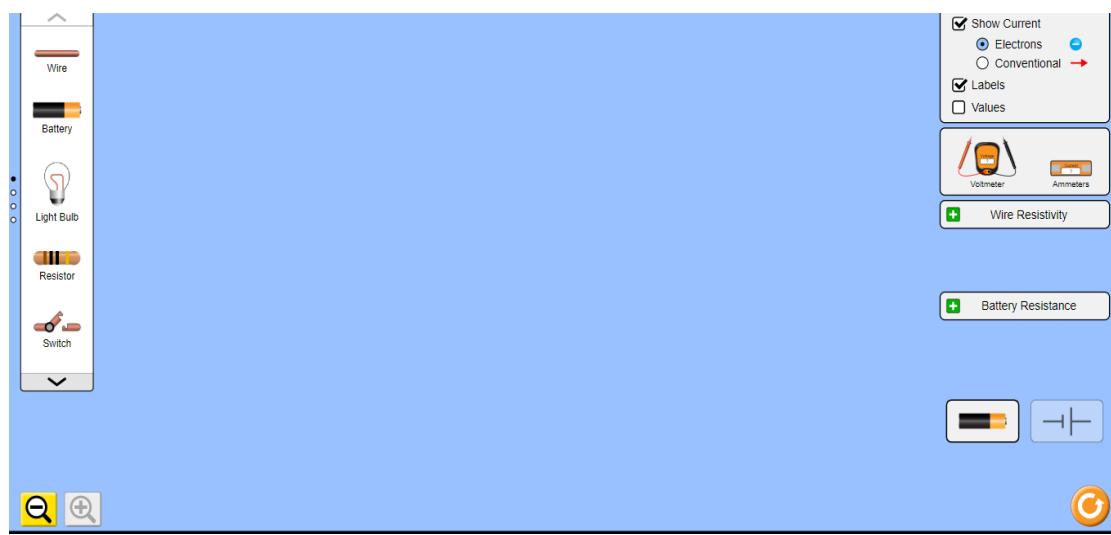
מטרת הסימולציה:

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

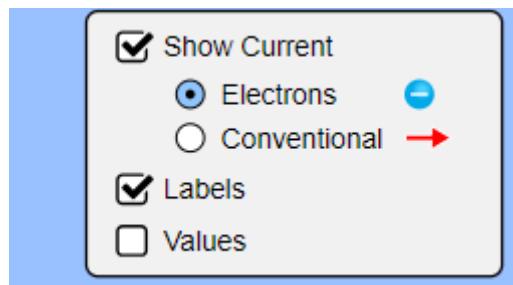
בנוסף, קיימים אמצעי מדידה, מתח וזרם, אשר אותם נוכל לצרף למעגל ולמדוד בעזרתם את הערכיהם המתקבלים בנסיבות שונות.

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

לפניכם מסך ראשון לסימולציה:



להלן המקרה:



- *Show Current*- הצגת הזרם

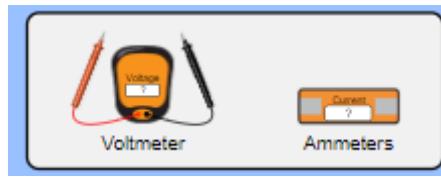
מאשר לנו לבחור האם להציג את תנועת האלקטרונים -

- *Conventional*- הצגה בצורת ח-ץ

הציג שמות הרכיבים המוצגים

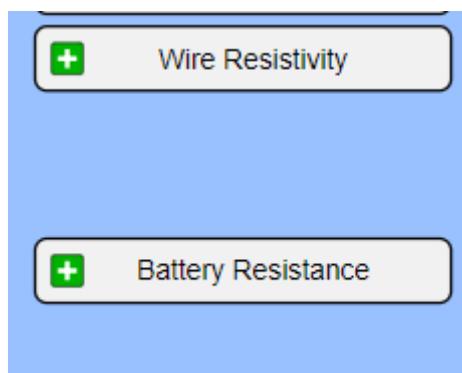
- *Labels*- הצגת הערבים

הציג מקרה מכשירי המדידה



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

על המסך נוכל לראות גם את האפשרויות הבאות:



- *Wire Resistivity*- הוספת התנגדות תיל בסרגל רץ

- *Battery Resistance*- הוספת התנגדות מקור המתח

מצד שמאל במסך הסימולציה, קיימן החלון הבא:



בחalon זה נוכל לבחור הוסף פריטים למעגל, תיל (Wire), מוקור מתח (Battery), צרכן נורה (Light Bulb), מתג (Switch) ואם נגלה מטה נמצא רכיבים נוספים עליהם נלמד בהמשך.

מספר הוראות הפעלה:

- כדי להוסיף משורת התפריט יש לגורר לרצף המסר את הרכיב הרצוי. לחיצה כפולה עלינו נציג בתחתית המסך סימן של אשפה, אשר יאפשר לנו למחוק את הפריט במידה הצורך.
- כאשר נחבר מד מתח עליוו נראהות כי חיבור הקוטביות נכונה.

שאלות הניסוי

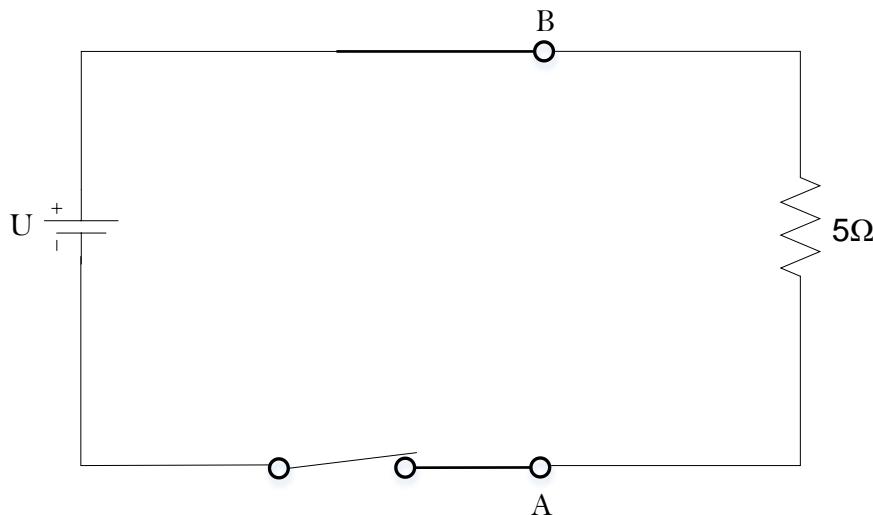
- בנה מעגל (טור) המורכב מנגד, מוקור מתח, תיל ומטג. ראה כי קיימת תנוצה מטענים.
- לחץ על האפשרות להציג ערכיהם ומדווד על פי נוסחת חוק אום את המתח המתkeletal.
- cut, יש לחתוך את מסיר המדידה ולבצע מדידה אלקטרונית, האם קיימן זהות בין התשובות?
- שנה את התנגדות התיל במעגל, כיצד שינוי זה השפיע על התוצאות במעגל?
- cut, פתח את המטג, מה קורה במעגל? ומדוע?

פעילות בנושא הספק החשמלי:

- בצע חישוב על פי הנתונים במעגל של ההספק הכללי הנוצר במעגל
- cut שנה את התנגדות הנגד וראה כיצד שינוי זה השפיע על ההספק במעגל?
- ראה כי שינוי בסוללת המעגל, גורם לשינוי בהספק הכללי.

שאלות פתוחה
 שאלה 4.5

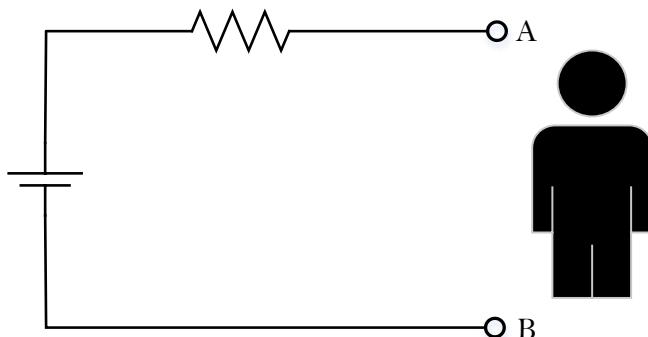
במעגל שבאיור 4-27 רצימ למדוד את המתח בין הנקודות A ו-B. הוסיףו למעגל מד-מטרה לצורך המדידה, וסמן את מקום הבדיקה החיצוני ומקום הבדיקה השילילי של מד-מטרה.

 **אייר 4-27** **שאלה 4.6**

נמדד את הזרם כנגד R שבאיור 4-27. הוסיףו למעגל מד-זרם וסמן את מקום הבדיקה החיצוני ואת מקום הבדיקה השילילי של מד-זרם.

4.4 הסכנות הכרוכות בזרם החשמלי

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



איור 4-28 אדם ליד מעגל חשמלי

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

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

תחליה 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 המטען (על ידי שפוף) באלקטרונים. כמו כן, ניתן לראות את הקשר בין הפרק הראשון הנלמד בנושא מטענים, לפרק השני בנושא מתח וזרמים והפרק השלישי בנושא התנגדות. חלק מהתנסות הסימולציה ניתן לראות כיצד משפיק גודל המטען, המרחק האויר, על היוצרים הזרם החשמלי.

הערה: לצורך התנסות וההדגמה, הזמן טעונה בסימולציה קצר מהזמן למציאות.

מהלך הסימולציה:

יש להטען את רגלו של ג'ון במטענים על ידי השפוף בשטייח. ולאחר מכן להניע את ידו לעבר הדלת.

שאלות לדין:

1. האם אפשר לחזות מה יקרה לג'ון כאשר גופו יהיה טוען במטענים השליליים?
2. מה התרופה החשמלית אשר גורמת לג'ון להתחشم?
3. ממה מושפעת עצמת הזרם?



מכת חשמל	
מה עלייכם לעשות?	
1. נתקו את המגע בין גורם ההתחשמלות לבין הנפגע	מכת חשמל עלולה להיגרם עקב מגע עם מקור מתח גבוה ברחוב, במפעל או בבית. הזרם גורם לפצעי כויה קשים בנקודה שבה הוא נכנס לגוף, ובנקודה שבה הוא יוצא ממנו. תוך כדי מהלכו בגוף, בין נקודת הכניסה ליציאה, גורם הזרם נזק למקומות שונים: עור, שרירים, עצבים ו כלי דם. זרם ממוקור מתח גבוה עלול לגרום לאיבוד הנשימה, הדופק וההכרה, ולהתמוטטות עד למצב של מוות קליני.
2. כבו והסירו בגדים בעוריהם התחליו בחחיה	איבחון: סימנים ותלונות
3. א. פתחו דרכי אויר. ב. ודאנו נשימה ודופק. ג. אם נדרש, בצעו החחיה – הנשמה עם או בלי עיסוי.	1. נסיבות הפגיעה ברוב המקרים יצבעו נסיבות הפגיעה בבירור שמדובר בתאונת ההתחשמלות.
4. טפלו בפצעי הכויה כסו את הכויה בתחבושת סטרילית או בפייסת بد נקי.	2. פצעי כניסה ויציאה פציעי כויה מפוחמים יופיעו בעור, במקומות שבhem הזרם נכנס לגוף ויוצא ממנו. כך לדוגמה: בהתאם לצורת ההתחשמלות – עלול להופיע פצע ביד וברגל, או פצעים בשתי הרגליים (כאשר מקור ההתחשמלות הוא על הקrukע).
5. קבעו שברים בגפים ובצוואר.	3. מוות קליני * איבוד ההכרה * הפסיקת הנשימה * דום לב
6. פנו בדחיפות לבית החולים נפגעים שספגו מכת חשמל יש לפנות תמיד לבית החולים, גם אם לא איבדו את ההכרה ונראה כאילו הם סובלים מפגעה קלה בלבד: למכת חשמל עלולים להיות סיבוכים מאוחרים.	4. נזק לרקמות רכות וקשוט * נזק לעור – כוויות * נזק לעצבים – שיתוקים * נזק לעצמות – שברים
שימוש לב!	5. התקף והתקכוויות הפרעות שיוצר הזרם במוח עלולות לגרום להתקפי התקכוויות עוויותים של כל שרירי הגוף.
* במרקם רבים שטח הכויה החיצונית על פני העור הוא קטן יחסית ועלול להטעות את המתפלים, בעודו שלמעשה גורם הרס נרחב של הרקמות שמטה לעור, במסלול שבו עבר הזרם. * מכת חשמל, במיוחד מתח גבוה, עלולה לגרום לשברים ופריקות של עצמות, לרבות חוליות עמוד השדרה. הפגיעה נגרמת עקב כיווץ עויתי של שריריהם בעת מעבר הזרם בגוף, או כתוצאה מנפילה גבוהה עקב ההתחשמלות. נפגעים כאלה עלולים לסבול משברים בגולגולת ובעמוד השדרה הצוארי, ולפיכך יש לקבוע את צווארו בהקדם האפשרי.	6. נפגע בהכרה שלקה במכת חשמל עלול לסבול מהתלונות והסימנים הבאים: * אי-שקט * כאבי שרירים * שיתוק * הפרעות בראייה

מבחן מסכם לפרק מעגל צבוני

1. מעגל צבוני סגור חייב לכלול בתוכו
 - א. מתגים ונוורות
 - ב. נגד ומכשיiri מדידה
 - ג. מקור מתח, תיל מוליך וצרוך
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. סוג הנגדים הם
 - א. נגד שכבתי ונגד זכוכית
 - ב. נגד שכבתי, נגד פחם, נגדים מלופפי-תיל
 - ג. נגדים קרמיים ונגד פחם
4. האדם הוא מוליך
 - א. בעל התנוגדות נמוכה ולכן יכול להתחשل
 - ב. בעל התנוגדות נמוכה
 - ג. בעל התנוגדות גבוהה וудין יכול להתחشم
5. תפקיך המתג הינו
 - א. הפעלת הצריך וניתוקו
 - ב. הורדת הזרם במעגל בשל התנוגדותו
 - ג. וויסות המתח
6. כאשר רוצים למדוד מתח
 - א. יש לחבר את מד המתח בין שתי נקודות במעגל מחברים את הבדיקה לנקודה שבה הפוטנציאלי גובה יותר
 - ב. בין שתי נקודות במעגל מחברים את הבדיקה החיבוי לנקודה שבה הפוטנציאלי גובה יותר ואת הבדיקה השילילי לנקודה שבה הפוטנציאלי גובה יותר
 - ג. צורת החיבור לא משנה
7. כאשר נרצה למדוד את הזרם במעגל
 - א. נשתמש במיד הזרם מהבדיקה השילילי לחיבוי
 - ב. נשתמש במיד הזרם מהבדיקה החיבוי לשילילי
 - ג. צורת החיבור אינה משנה
8. תלות התנוגדות בטמפרטורה תוכנה זו תלולה ב:
 - א. בחומר ממנו הסוג התיל

ב. בנסיבות הzcרכנים המחוobרים למעגל

ג. בתכונות החומר ממנו עשוי הנגד

9. מהו צורך

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. علينا להשתמש בסמלים גרפיים מוסכמים

ב. תלוי באיזה תכונה 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 אלקטרוניים. המרجل כולל (לפחות) מקור מתח, המחבר לצרכן (נגד).
- כדי לאפשר את חיבור הצרכן - או את ניתוקו - מצרפים מtag למעגל החשמלי.
- אם לא זורם זרם במעגל, הרי שהמעגל פתוח.
- מקובל לשרטט מעגל חשמלי באמצעות סמלים מסוימים.
- סוגים נגדיים: נגדי שכבה, נגדי פחם, נגדים מולופפי-תיל.
- גוף האדם הוא מוליך, אם כי לא מוליך מעולה. אם זרם עובר דרך הגוף האדם, התוצאה עלולה להיות קטלנית.

פניות 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 ומפרמטר.

1. ראה כי המטענים זורמים לאורק המסלול.

2. לחץ על הלחצן הימני בנורה ובסוללה ובחירה בהציגת הערך.

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

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

ד. על ידי ניסוח חוק אומ, מהי ההתנגדות הנורה?

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

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

ו. במידה וקיים טיטה בתוצאה, הסבר ממה היא יכולה לנבוע?

2. מעגל פשוט- שני נגדים

א. יש להוסיף למעגל הק"ם 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 הזרםicut במעגל.

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

ד. חשב על ידי חוק א Ohm את התנגדות הכוללת במעגל

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

ה. חזור על השלבים א-ג לאחר הוספה של נורה שלישיית במעגל. מהicut השתנה

ומדוע?

3. מעגל פשוט- זרמים ומתחים במעגל

א. כעת, יש לשנות את ערכן של התנגדות הנורות, האחת בעלת התנגדות של 10, השניה 20 והשלישית 30 אום. מהיicut התנגדות השוקלה של שלושת הנורות יחד?

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

ב. כעת, מדוד על ידי מד המתח את התנגדות 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 הכוללי במעגל? האם על כל נורה זורם ערך אחר?

ה. כעת, יש לקחת את מד הזרם ולראות האם המידידה 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 ו לחבר שתי נורות מחוברות במקביל וערך כ10 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 ולחזורשוב על סעיף ב'.

מה ניתן להסיק ממדידה זו?

ד. יש לאפס חזרה את התנגדות של הנורות ל 10 אום. על י' חוק אום, מהו הזרם על כל אחד מהנורות? יש להשתמש כעזר במד המתה.

ה. כעת, יש לשנות את התנגדות הנורות, האחת ל 20 והשנייה ל 30 אום. מהו ההנגדות השוקלה בمعالג?

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

1. בمعالג זה יש להוציא נורה במקביל בעלת ערך של 10 אום, ולמצוא את הזרם בכל אחד מהענפים. על פי חוק הזרמים של כירכהוף, מהו הזרם הכללי בمعالג?

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

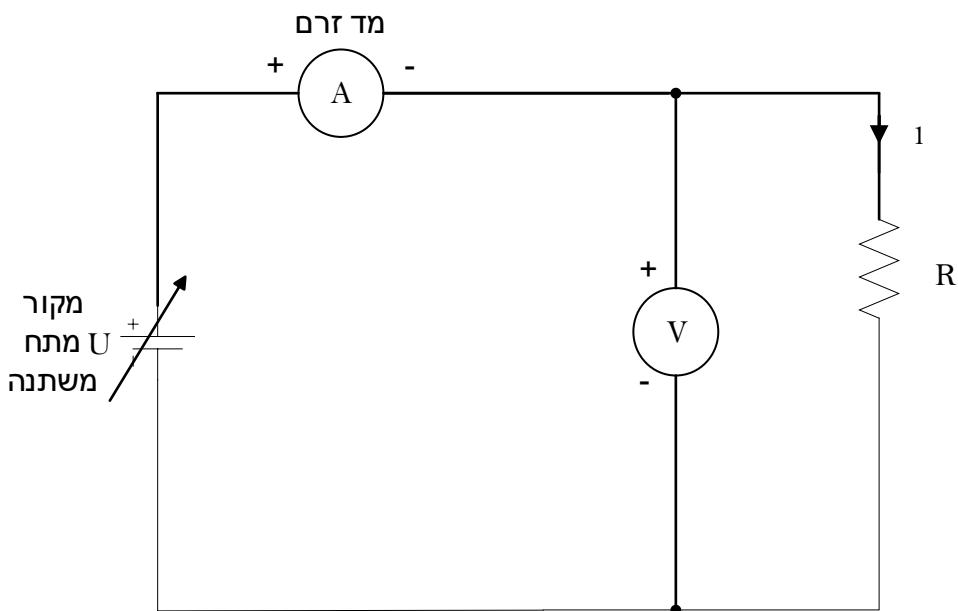
$$I_{eq} = \underline{\hspace{2cm}}$$

5. פולק אום

5.1 התנגדות וזרק אום

בפרקם הקודמים הגדכנו את ההתנגדות של מוליך כיחס בין המתח על המוליך לזרם דרכו. כמו כן למדנו שההתנגדות של מוליך תלוי באורךו, בשטח החתך שלו ובחומר שמננו הוא עשויי (כלומר, בהתקנות הסוגלית). ראיינו גם כי הטמפרטורה משפיעה על ההתנגדות.

עכשו ברצוננו לבדוק אם ההתנגדות של מוליך תלוי גם במתח שבין קצוטיו, ואם כתוצאה לכך היא תלוי גם בעוצמת הזרם העובר במוליך. אפשרות נוספת היא כזכור של מוליך יש התנגדות קבועה, וזה אינה תלוי במתח או בזרם. כדי לבדוק אפשרות אלה, נתבונן במעגל שבאיור 1-5.



איור 1-5 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 כפתורו. כדי למדוד את המתח על הנגד, חיבורו למעגל מד-מתח; וכך למדוד את הזרם בנגד, חיבורו למעגל מד-זרם. לאណון כאן בצורה החיבור של מכשירים אלה למעגל. נציין רק כי מד-המתח במעגל שבאיור 1-5 מודד את המתח על הנגד; ומד-הזרם מודד את הזרם בנגד.

עכשו נשנה פעמיים אחדות את מתח המקור, ובכל פעם נמדד את המתח על הנגד ואת הזרם העובר דרכו. נסכם את תוצאות המדידות בטבלה:

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

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

נחשב בכלל 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 שעיל המוליך לבין הזרם העובר דרכו**, הtgtalgtaה על ידי הפיזיקאי אום, והוא נקראת על שמו – **חוק אום**.

הביטוי המתמטי של חוק אום הוא:

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

כאשר R קבוע

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

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

כאשר R קבוע

רוב המוליכים, הנמצאים בשימוש, מקיימים את חוק אום, וכך הם נקראים לפעמים **מוליכים אומניים**. חשוב להדגש 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 אלקטرونים 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 מכובנת היא בדרך כלל לא יותר מכמה עשריות המילימטר בשנייה. זהה מהירות קטנה למדי.

אילו נדרשנו לחכות עד שהאלקטرونים הגיעו אחד של המוליך לקצהו الآخر, הינו ממתינים זמן רב להפעלתם של מכשירים חשמליים. לדוגמה, בפנס המרחק בין גורת החשמל לבין מתג ההדלקה הוא כמה סנטימטרים, והוא עולה להמ庭ין זמן ניכר מרגע הדלקת האור ועד לרגע שבו הנורה הייתה מאירה. ובשילוב טלפון ביון-עירוניות - הינו נדרשים להמ庭ין חדשניים אחדים עד שהאלקטرونים היו מגיעים לקצה השני של הקו, כלומר: עד שצலיל החיווג היה נשמע שם.

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

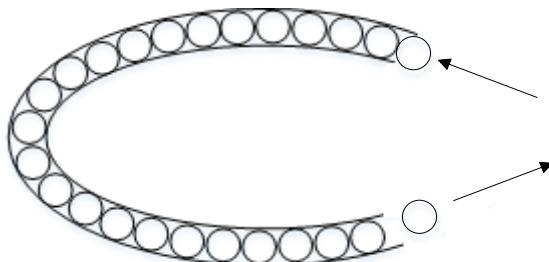
כאמור, כשותחים מוליך למקור מתח, המקור מפעיל כוח על האלקטרונים החופשיים שבמוליך. אלקטרון חופשי, הקרוב להדק השלייל של המקור, גורם לדחיפה האלקטרונים החופשיים הסמוכים לו, ואלה גורמים לדחיפה האלקטרונים הסמוכים להם, וכן הלאה... וכן הלאה...

הדחיפה הזאת עוברת ב מהירות עצומה (כמעט ב מהירות האור, כלומר כמעט 300,000 קילומטרים בשנייה) וגורמת לפועלות האלקטרונים במכשירים השונים. שכן הנורה מאירה מיד, ואנו שומעים מיד את בן-שיכון שבkaza החני של הטלפון. لكن פועלות האלקטרונים מתרחשת מיד, למורות התנועה האיטית של האלקטרונים במוליך.

נבהיר את התופעה בעזרת הממחשה פשוטה. נחשב על התיל המוליך בעל צינור חלול, ועל האלקטרונים בעל כדורים הממלאים את הצינור. צינור צזה, מלא כדורים, מתואר באIOR 2-5. כאשר דוחפים פנימה כדור בkaza אחד של הצינור, כדור אחר נפלט מיד החוצה בkaza החני של הצינור. מה הסיבה לכך?

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

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



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

чисובים בעזרת חוק אום

המשוואה $I = \frac{U}{R}$ היא משווה שימושית מאוד. נביא דוגמאות אחדות לחישובים כאלה.

דוגמה 5-1

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

פתרון

נתון $C = 220V$, $R = 20\Omega$. 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-nickel. התנגדות גוף החימום היא 200Ω . מה המתוח על גוף החימום, כשהזרם דרכו הוא 2.5A?

פתרון

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

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

המתוח על גוף החימום הוא 500V.

דוגמה 5-3

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

פתרון

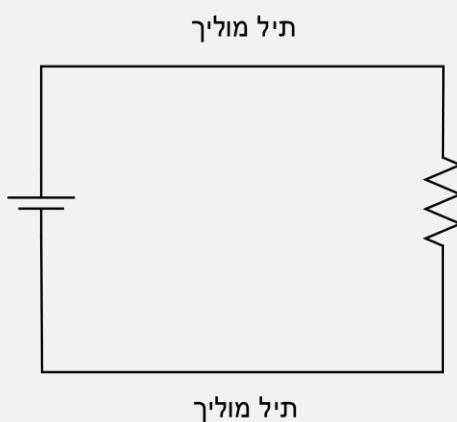
נתון כי $V=220$, $A=0.2$. נציב את הנתונים במשוואה (1-5), ונקבל:

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

התנגדות הנורה היא 1100Ω .

קצר ונטק

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 זהה מתואר באיוור 5-3.



איור 5-3 מעגל חשמלי הכלול ממקור, צרך ומוליכים

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

לפעמים, כאשר החומר המבודד מתישן וمتקלף, נוצר בכלל זאת מגע בין התילים המוליכים. מעגל חשמלי, שנוצר בו מגע כזה, מתואר באיוור 4-5.

שאלות
ડર
שאלה 5.1

לגביו כל משפט, קבעו אם הוא נכון או לא – וنمוקן 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

סמן את התכונה של מוליך אומי.

א. המתח עליו קבוע.

ב. התנגדותתו קבועה.

ג. הזרם דרכו קבוע.

ד. הוא אינו מציין לחוק אום.

שאלה 5.3

המתח על נורה הוא 220V. מהו הזרם בנורה, אם התנגדותה 200Ω ?

שאלה 5.4

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

שאלה 5.5

מה הזרם ב נגד המחבר למעגל החשמלי שבאיור 5-5?



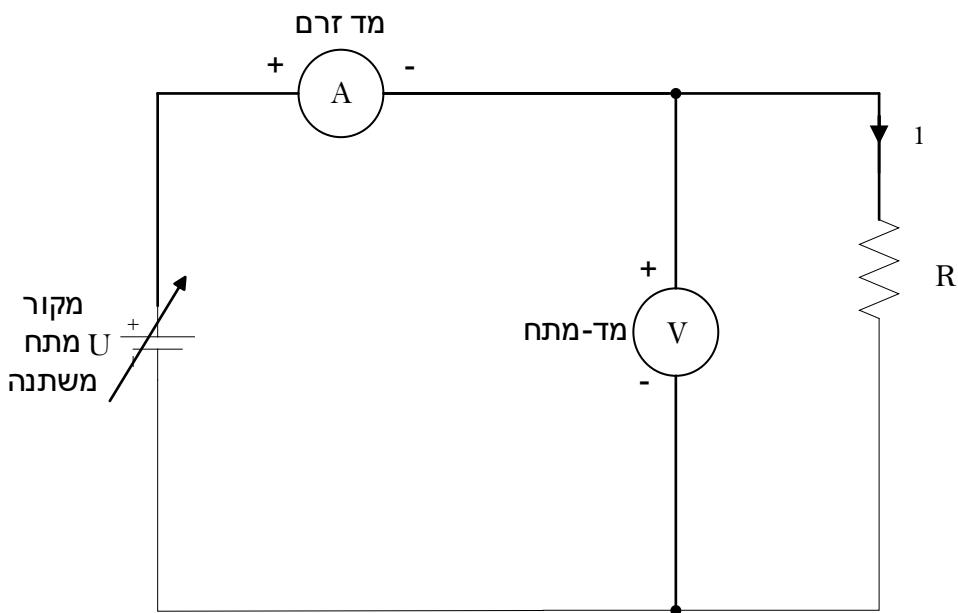
איור 5-5

שאלה 5.6

מלחם מחובר לרשת החשמל, והמתח עליו הוא $U = 220\text{V}$. התנגדות המלחם היא $R = 100\Omega$. מהו הזרם במלחם?

5.2 תיאור גרפי של חוק אום

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



איור 6-5 מעגל למדידת המתח על נגד והזרם דרכו

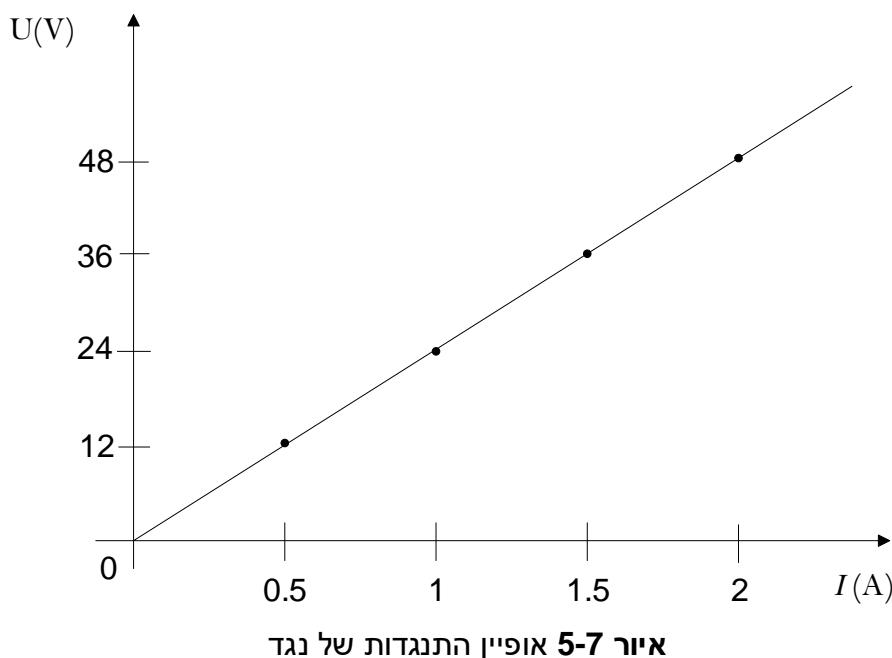
מתח (V)	זרם (A)
48	2
36	1.5
30	1.25
24	1
18	0.75
12	0.5

טבלה 6-2 תוצאות המדידה של המתח על נגד והזרם העובר דרכו

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

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

לדעתי אם הנגד הוא אומי או לא. גרפ, המתאר את המתח בתלות בזרם, נקרא אופין התנגדות. באיר 7-5 נתון אופין התנגדות של נגד.



מעבדה וירטואלית בנושא מעגל - סוללה נגד

קישור לSIMOLIZER:

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

מטרת הסימולציה:

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

הוראות כלליות

- בניסוי זה שני סרגלי עבודה שאותם ניתן לשנות, האחד קובע את עוצמת המתח והשני את עוצמת ההתנגדות. סרגל נוסף מצין את חום הנגד בתלות בזרם.
- סימולציית האלקטרוניים מראה את הזרימה וכיוונה, בטור למעגל יש מד זרם המציג את עוצמת הזרם.
- בהפעלת המעגל שנא את עוצמת המתח ותראו כיצד זה משפיע על הזרם במעגל, ניתן לראות את העיקרון שכאשר אלקטرون יוצא מהסוללה בהדק השי אלקטрон נכנס. כמות האלקטרונים בזרימה שווה רק קצב התנועה שלהם משתנה.
- שימוש לב סרגל החום משתנה בתלות בזרם (יחס ישן).

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

מעבדה מתח בסוללה

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

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

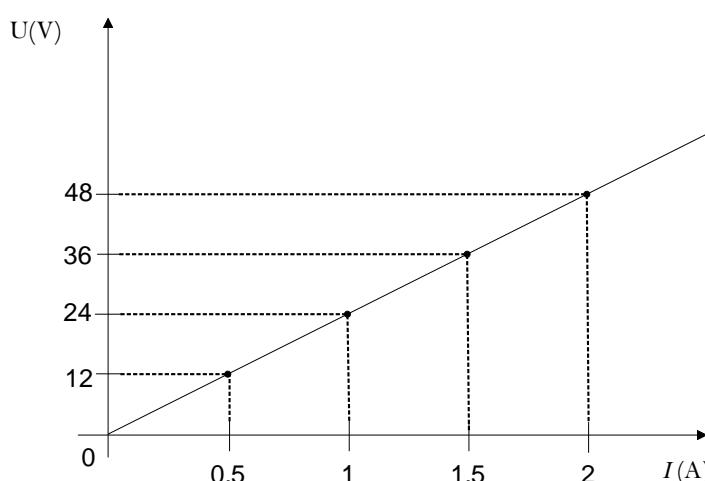
הווראות כלליות

- עם הפעלת בסימולציה הסוללה מאוזנת כלומר הפרש הפוטנציאלים שלה הוא אףו (מתוך אףו), אותה כמות של מטענים בשני צידי הסוללה.
- למטרה מופיע סרגל מתח אשר נמצא במרכז ומציין שהסוללה מאוזנת ככלומר מתח אףו.
- כאשר נזיז את הסמן של **המתח המקבול** ימינה ושמאליה נראה שהטען יעבור בהתאם לצד ימין או שמאל בהתאם, כאשר הסוללה טעונה מרבית כל המטען נמצאים הצד אחד, עם פועלות הסוללה והשימוש בה חלק מהטען עוברים לצד השני.
- ניתן להציג את שני מכלי המטען בסוללה על ידי סימון הציג **הציג סוללה**.

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

$$y=Kx$$

קו שיפוע הקו, והוא קבוע. קו זה מתואר במערכת הצירים שבאיור 5-8.



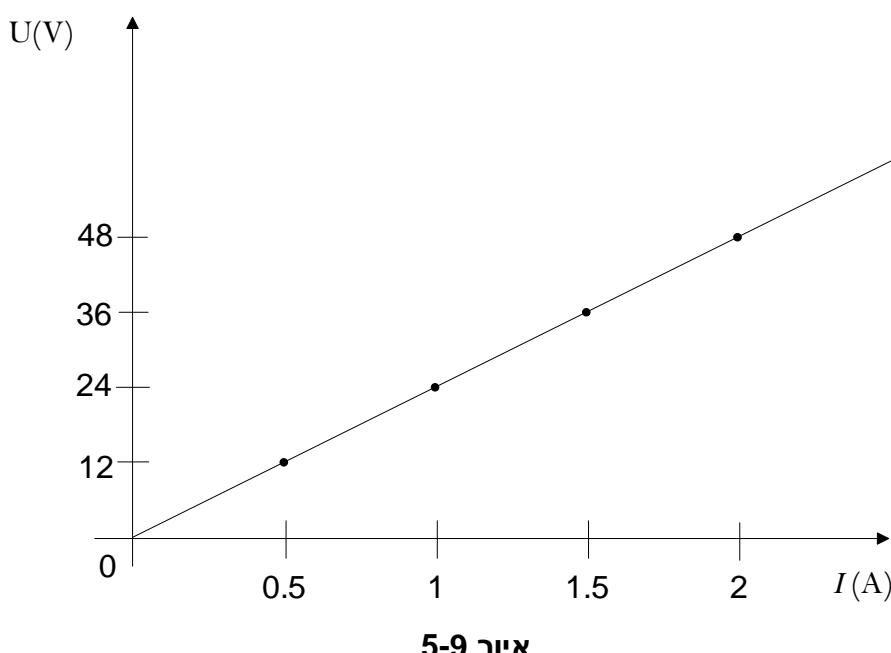
איור 5-8 קו ישר העובר דרך הראשית הצירים

בדוגמה 4-5 שלහן נחשב את השיפוע של קו כזה, ככלומר נמצא את ההתנגדות של נגד.

באופן דומה, משוואת הקו הישר במערכת הצירים $I-U$ (מתח-זרם) היא מהצורה $I = R = \frac{U}{R}$, כאשר השיפוע הקבוע של הקו מסומן הפעם באות R . אם נתבונן באופין ההתנגדות של מוליך מסוים, ונראה כי הוא קו ישר העובר בדרך הראשית. פירוש הדבר ש- R הוא קבוע. ככלומר, ההתנגדות של המוליך הנדון היא קבועה. لكن זהו אופיין של נגד אומי. נגד, שאופיין ההתנגדות שלו הוא קו ישר, נקרא לפעמים **נגד ליניארי**, ובקיצור: **נגד**.

דוגמה 5-4

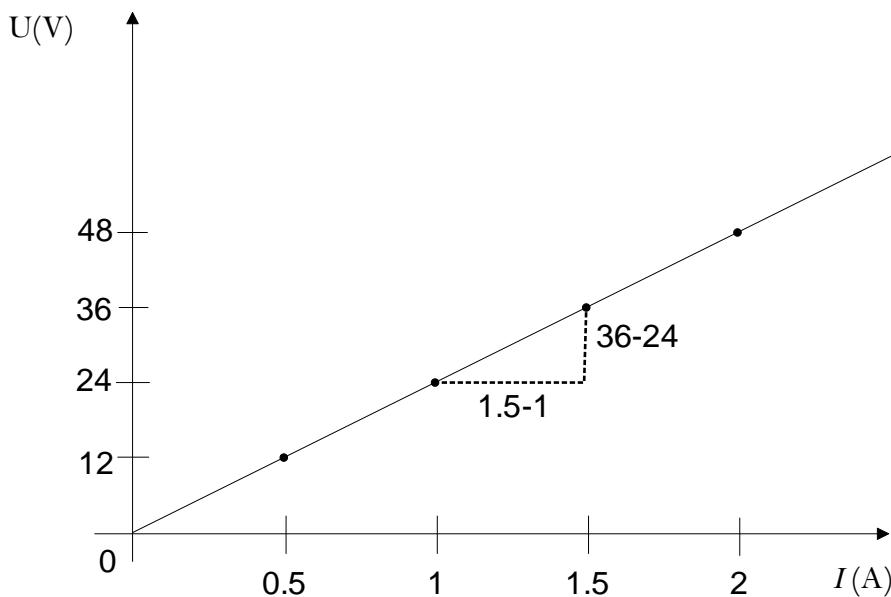
מהי ההתנגדות הנגד שאופיין ההתנגדות שלו נתון באIOR 9-5?



פתרונות

כדי לחשב את ההתנגדות הנגד, כשנתוון אופיין ההתנגדות שלו, יש לבחור שתי נקודות על הגרף (כפי שמתואר באIOR 10-5), ולהחלק את הפרש המתנים בהפרש המתאים של הזרמים. כדי לקבל תוצאה נכונה, יש להקפיד על יחידות המתח והזרם. על פי הגרף, קיבל כי ההתנגדות הנגד היא:

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

**איור 10-5** חישוב ההתנגדות של נגד ליניארי

כפי שכבר אמרנו, לא כל החומרים, ואףלו לא כל המוליכים, מקיימים את חוק אום. חוק אום מתקיים בעיקר במתכות (וגם לאביהן יש לדאוג לטמפרטורה קבועה, כדי שיקיימו חוק זה). ההתנגדות של חומרים רבים בטבע ושל התקנים רבים תלויות במתה שבין קצחותיהם, וכתווצה 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 בעיגל בעזרת מקור המתח. התלמיד יזהה תכונות המתקשרות לפוליטיק ומתקאות ויבין את ההבדלים. כמו כן ניתן לחוש את התלמידים לתופעת הפוטו אלקטриק (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 אודוטות 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. הצדדים הקטנים הנעים במוליך הינם האלקטרונים

5. כדי להשלים תנווה מכונת של אלקטرونים עליהם לנوع במסלול מוליך אשר מתחילה מנוקודה אחת במקור המתוח בקוטביות אחת ומסתיימת במקור המתוח בקוטביות הפוכה.

הוראות כלליות

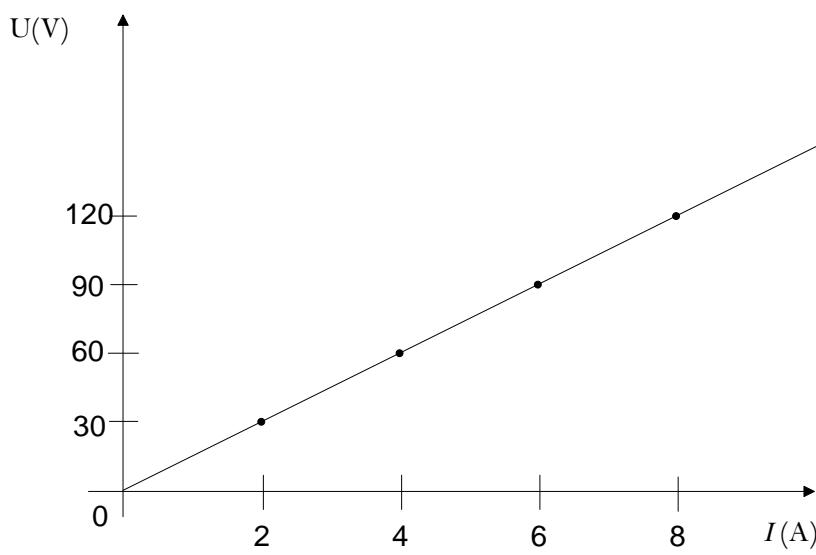
- לרשוטך מעגל חשמלי עם סוללה שנייה לשנות את ערכה ושלושה מוליכים שונים.
- קבע את המוליך **מתכת הפעיל** את המעגל צפה בתנועת האלקטרונים וברמת המוליכות (סרגל צד שמאל), שנה את עצמת המתוח וראה את ההשפעה על רמת המוליכות.
- שנה את המוליך **לפלסטייק**, שנה את המתוח וראה את המוליכות של החומר (אפס).
- שנה את המוליך **לפוטו-מוליך** (מוליכותו תלוי באור), הפעיל את המעגל עלה את המתוח (הזרם לא עבר), הדליק את האור על ידי **סימון הפעל פו** ושימם לב כיצד המוליכות משתנה בתלות באור.

שימוש לב לא ניתן לשנות על עצמת האור لكن האור הופך את החומר למוליך או מבודד. לו ניתן היה אפשר לשנות את עצמת האור הינו רואים שהחומר היה למוליך בדרגות שונות בתלות באור.

שאלותHzura

5.7

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



איור 5-11

שאלה 5.8

מדדו את המתח על נגד ואות הזרם דרכו. שנו את המתח, ושוב מדדו את הזרם, וכן הלאה.
شرطטו את אופיין ההתנגדות של הנגד על פי תוצאות המדידות שלහן.

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

שאלה 5.9

شرطטו את אופיין ההתנגדות של נגד, שהתנגדותו $\Omega 50$. הינו כי המתח על הנגד הוא $V 100$ לכל היותר.

שאלה 5.10

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

- א.** ההתנגדות הנגד **תגדל** / **תקטן**, ככל שהמתח על הנגד יגדל.
- ב.** ההתנגדות הנגד **תגדל** / **תקטן**, ככל שהזרם בנגד יגדל.
- ג.** ההתנגדות הנגד אינה משתנה, גם אם משנהים את המתח על הנגד.
- ד.** ההתנגדות 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 אומ? נמק.
- ב.** נתון רכיב, שלא עובר בו זרם, והמתח עליו שונה מאפס במצב זה. האם רכיב זה מקיים את חוק אומ?
- ג.** אופיין ההתנגדות של רכיב - אינו עובר דרך הראשית (הנקודה 0:0). האופין הוא קו ישר. האם רכיב זה מקיים את חוק אומ?

לאחר שהכרנו את המושגים, ההתנגדות, 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=G3H5lKoWPpY>

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

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

מעגל חשמלי

כבר אמרנו ש כדי שיזרום זרם בתיל מוליך ובצרוך המוחברים למקור מתח, צריך לדאוג שיהיה מסלול סגור, שבו יוכל האלקטרונים לנوع. בהתאם לכך, נגיד מושג חדש:

הגדלה 

מסלול סגור, הכולל מקור מתח וצרוך, שכיוון הזרם המosoכם בו הוא מהבודק החיוויי של מקור המתח - אל הבדיקה השילילי, דרך הצרוך, 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 אומן קובע כי קיימים ישר יחס בין הזרם על הנגד ($I_1 = I_2$), אם ההתנגדות הנגד קבועה, ואינה תלויה במתוח על הנגד ובזרם בנגד (ואם מזינים את השינוי בהתנגדות הנגד, שמתחמים כתוצאה מהזרם העובר דרכו).
- רוב המוליכים שימושים בהם מציתים לחוק אום, והם נקראים **מוליכים אומאים**.
- יש להבדיל בין חוק אום לבין הגדרת ההתנגדות של מוליך, אף כי בשני המקרים מופיע אותו קשר.
- אופיין ההתנגדות מתאר את המתח כפונקציה של הזרם, ואופיין מוליכות מתאר את הזרם כפונקציה של המתח.
- לעומת זאת, שהאופיין שלו הוא קו ישר, קוראים לפעמים **נגד ליניארי**.
- מוליך מצית לחוק אום, רק אם האופיין שלו - אופיין ההתנגדות או אופיין מוליכות - **ליניארי** ועובר דרך הראשית.

- חוק אום אינו חוק טبع כללי, והוא חל על כל החומרים. חוק אום חל בעיקר על מתכות (אם ניתן להזניח את שינוי הטמפרטורה שלהן, כתוצאה מהזרם דרכן). יש מוליכים שאינם מצויות החוק אום.

פערות מסכמת

1. כיצד להדיל נורה- מעבדה וירטואלית

בשלב הראשון יש להיכנס לקישור הבא:

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

הוראות הניסוי:

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

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

נורה אחת		
סוללה אחת		
מתג		
מעגל לבחירתך		
מעגל 5		

1. אילו חלקים כל מעגל העבודה צרי?

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

3. מה לדעתך שנקודות חולות נמצאים מעגלים שלר?

4. אילו צורות אנרגיה מועברים מהסוללה לנורה?

5. מה תפקידו של המתג?

פנילות 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 ממרכיבים הבאים: נורת חשמל, סוללה בעלת ערך 10 וולט ומפרמטר.

1. ראה כי המטענים זורמים לאורך המסלול.

2. לחץ על החצן ימני בנורה ובסוללה ובחור בהציגת הערכ.

- ב.** בדוק על ידי מד המתח כי אכן הסוללה מספקת 10 וולט למעגל. במידה זהה לערך הקיים, ניתן לשנות את ערכה על ידי לחיצה ימנית ולהזין את ערך הרצוי.

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

ד. על ידי נוסחת חוק א Ohm, מהי התנגדות הנורה?

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

- ה.** לאחר שיחסבת את ההתנגדות של הנורה, בדוק על ידי לחץ ימני על הנורה את ההתנגדות. האם ההתנגדות זהה לתוצאה שיחסבת?

1. 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 הזרםicut במעגל.

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

ד. חשב על ידי חוק א Ohm את ההתנגדות הכוללת במעגל

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

- ה.** חזר על השלבים א-ג לאחר הוספה של נורה שלישיית במעגל. מה CUT השתנה ומדוע?

3. מעגל פשוט- זרמים ומתחים במעגל

- א.** כעת, יש לשנות את ערךן של ההתנגדות הנורות, האחת בעלת ההתנגדות של 10, השנייה 20 והשלישית 30 אום. מהי CUT של ההתנגדות השוקלה של שלושת הנורות יחד?

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

ב. כתע, מדוד על ידי מד המתח את ההתנגדות על כל אחד מהנורוות

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

ג. כיצד מתחים אלו קשורים למתח הכללי של הסוללה?

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

ה. כתע, יש לנקח את מד הזרם וראות האם המדידה זהה לחישובך.

4. מעגל מקבילי פשוט - שני נגדים

א. לצורך בניית מעגל מקבילי, נקח את המסת. בנה מעגל המורכב מסוללה בעלת ערך של 10 וולט ו לחבר שתי נורות המתחוברות במקביל וערך כ-10 אום.

ב. כתע יש לחבר מד מתח פעם אחר פעם על כל אחד מהנורוות ולמדוד את המתח עליהם. איזו מסקנה ניתן להסיק ממדידות אלו?

ג. בשלב זב, יש לשנות את ההתנגדות הנורוות ל-100 אום ולהזoor שוב על סעיף ב'. מה ניתן להסיק ממדידה זו?

ד. יש לאפס חזרה את ההתנגדות של הנורוות ל-10 אום. על פי חוק אום, מהו הזרם על כל אחד מהנורוות? יש להשתמש כעזר במד המתח.

ה. כתע, יש לשנות את ההתנגדות הנורוות, האחת ל-20 והשנייה ל-30 אום. מהי ההתנגדות השוקלה במעגל?

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

ו. למעגל זה יש להוסיף נורה במקביל בעלת ערך של 10 אום, ולמצוא את הזרם בכל אחד מהמעיפים. על פי חוק הזרמים של כירכהוף, מהו הזרם הכללי 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

ב פרקים הקודמים למדנו על חיבור נגד למקור מתח. נחזור ונתאר בקיצור מה קורה בעט חיבור זהה. ובכן, המתח בין הדקי המקור גורם לכך של האלקטרונים החופשיים בנגד, המחבר למקור, פועל כוח חשמלי. אלקטרונים אלה נעים בנגד, רוכשים אנרגיה קינטית (של תנועה), ובמהלך תנועתם מתנגשים ביזוני הסורג. כתוצאה מהתנגשויות אלה, הנגד מתחכם.

אנו רואים שבתהליך זה ישנה הפיכת אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת: אנרגיה חשמלית נהפכת לחום; כמו כן מתרכש בתהליך זה מעבר של אנרגיה: מקור המתח אל הנגד. בח' היום-יום אנו מכירים מקרים רבים שבהם אנרגיה חשמלית נהפכת לחום באמצעות זרם חשמלי. באIOR 1-6 מתוארת דוגמה לכך. באIOR זה אנו רואים קומוקום חשמלי המשמש לחימום מים.

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

בגוף החימום של הקומוקום - זורם זרם. כתוצאה לכך, גופ החימום מתחכם, והוא מוחם את המים שמסביבו. אם נדע את כמות המים שהתחכם, ונדע בכמה מעלות עלתה טמפרטורת המים, נוכל לחשב את כמות האנרגיה שהושקעה בחימום המים. אולם לעיתים 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 בקומוקום נמשכת דקות אחדות. ברור שלא היינו קומיים קומוקום חשמלי, שהרתחת המים בו נמשכת זמן ארוך (למשל: שעה). אנו רואים אפוא כי במשך הזמן, הדרוש לחימום, יש חשיבות רבה.

מה קורה אפוא בעת חימום מים בקומוקום חשמלי? **אנרגיה הופכת את צורתה** - מאנרגיה חשמלית לחום ; **אנרגייה עוברת ממוקם למקום** - מקור המתח למים המתחכם; מקור המתח **משכיע אנרגיה**; הקומוקום 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. לקבע זה קוראים **הספק**. כמובן,

הספק הוא קצב הפיכת אנרגיה מצורה לצורה.

נבטא את ההספק באופן מפורט יותר:

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

נסמן באות W את כמות האנרגיה המחליפה צורה; נסמן באות t אתמשך הזמן שהאנרגיה מחליפה צורה, ובאות P – את ההספק. נחליף במשווהה האחורונה 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 האיקון Lab
- ניתן לבנות מעגל חשמלי באמצעות הכלים מצד שמאל, **wire** יאפשר לగורר מוליך למעגל על מנת לבצע חיבורים, **battery** יצורף למשטח העבודה סוללה, **Light Bulb** יאפשר על ננתן לבצע נוראה, **Resistor** יאפשר צורף של נגד ו-Switch מפסק.
- את ערכי הנגד, הסוללה והתנגדות החוט ניתן לשנות, על ידי ללחיצה יפתח סרגל כלים למטה בו ניתן לבצע את השינוי.
- עוצמת הזרם דרך הנורה תשפיע על עוצמת הארה, ניתן לראות זאת לאורך קרני האור היוצאים מהנורה.

התנסות

- לחבר מעגל חשמלי הכלול 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: בשאלת קבע את היחס, הכוונה האם היחס ישיר או הפוך והאם הוא מקיים את משוואות ההספק.

דוגמה 1-6

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

פתרון

כמויות האנרגיה שהחליפה צורה היא

$$360,000 \text{ ג'ול} = W$$

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

$$180 \text{ שניות} = t$$

והספק הקומקום הוא, לפי משווהה (1-6),

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

יחידות ההספק

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

$$\frac{\text{ג'ול}}{\text{שניה}} = \text{ואט} \qquad W = \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

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

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

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

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

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

1 MW=1,000,000W

כוח-סוא

יחידת ההספק נקראת על שם ג'יימס ואט, מהנדס סקוטי, שהיה מפתחי 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 שם של אנשי מדע - כאות הוקהה על תרומתם להתרחשות המדע.

הספק נמדד לפעמים ביחידת אחרת, הנקראת כוח-סוא. מה הקשר בין יחידת מדידה בחשמל לבין סוא?

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

הספק הוא קצב הפיכת אנרגיה מצורה לצורה.

ניתן לראות המ חה | למושג בקישור לסרטון הבא:

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

דוגמה 2-6

נתונים שני קומוקומים. הספק קומוקום א הוא $P_1 = 2,000 \text{ W}$, והספק קומוקום ב הוא $P_2 = 1,000 \text{ W}$. לכל קומוקום מכניםים ליתר מים באותה טמפרטורה, וצריך ללחם את המים בשני הקומוקומים לאותה טמפרטורה. האנרגיה **W**, שהושקעה בחימום המים בכל אחד מהקומוקומים, היא $200,000 \text{ ג'ול}$. באיזה קומוקום יגיעו המים מהר יותר לטמפרטורה הסופית?

פתרון

בשני הקומוקומים יש אותה כמות מים, ויש לחם את המים באותה מידת (כלומר, אותה טמפרטורה ההתחלתית לאותה טמפרטורה סופית).

הספק נתון על-ידי משווהה (6-1)

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

מכאן נקבל כי משך הזמן הדרוש לחימום נתון על ידי

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

נתון כי $J_000,000 = W$. בקומוקום א' $P_1 = 2,000$ וכאן משך הזמן הדרוש לחימום המים בקומוקום א' הוא:

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

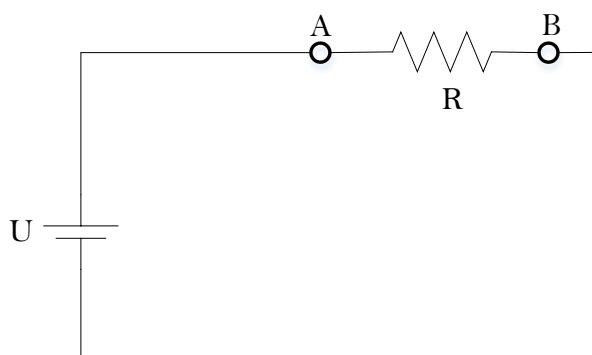
ובקומוקום ב' - משך הזמן הוא:

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

לכן בקומוקום א' המים יגיעו לטמפרטורה הסופית, לפני המים בקומוקום ב'.

ניתן להראות כי מתאפשרה מסקנה לגבי כל כמות של אנרגיה W , שיש להשייע בחימום המים בכל אחד מהקומוקומים שבדוגמה. לכן בקומוקום א' - שהספקו גדול יותר - המים יגיעו לטמפרטורה הסופית מהר יותר מהמים בקומוקום ב'.

הגדכנו את ההספק כקצב הפעלת אנרגיה מצוראה אחת לצורה אחרת: $\frac{W}{t} = P$. הגדרה זו נוכנה להספק מכל צורה, ולא רק להספק חשמלי. אבל אנו עוסקים, כמובן, בהספק חשמלי; לכן נלמד כיצד אפשר לבטא את ההספק החשמלי בדרך אחרת - באמצעות מתח וזרם. לשם כך נשתמש בדוגמה של כפ' חשמלית, המשמשת אף היא לחימום מים. תצלומה מופיע באIOR 3-6א.



ב' - המעגל החשמלי שבו נמצא הcpf החשמלית
(הנגד R מייצג את cpf החשמלית)

איור 3-6

נניח שהמתוך בין קצוטיה של הקפ היחסמלית הוא U . אנו יודעים שבגלל המתוך זהה, האלקטרונים בכפ היחסמלית נעים מהקצה שבו הפוטנציאלי נמוך אל הקצה שבו הפוטנציאלי גבוה. בمعالג שבאיור 3-6ב ינוו האלקטרונים מנקודה B, שהפוטנציאלי שלה נמוך, אל נקודה A, שהפוטנציאלי שלה גובה יותר.

אבל כזכור, כיוון הזרם המואסם הפוך לכיוון תנועת האלקטרונים. לכן כיוון הזרם המואסם בכפ היחסמלית הוא מנקודה A לנקודה B.

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

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

הפוטנציאלי בנקודה מסוימת (למשל: הנקודה A) מוגדר כאנרגיה הפוטנציאלית היחסמלית של יחידת מטען באותה נקודה. לכן הפרש הפוטנציאלים (כלומר, המתוך) 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 שם יחידת מטען אחת עוברת בין הנקודות A ו-B, כמוות האנרגיה היחסמלית של יחידת המטען בנקודה B קטנה בשיעור x ו 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 qU . לעומת:

$$W = Uq$$

אנרגיה זו, W , מסורה לכפ היחסמלית ונחיפה לחום. נשתמש בהגדרת ההספק, ונקבל כי הספק הקפ היחסמלית 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 – משווה (-2) – כלומר:

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

לכן נקבל כי ההספק נתון על ידי:

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

כולם, מצאנו:

$$\boxed{P = UI} \quad (6-4)$$

P – הספק [W]

U – מתח [V]

I – זרם [A]

ביטוי זה של ההספק ($UI = P$), שפיתחנו לגבי הקפ החשמלית, נכון לגבי כל צרך חשמלי, ואףלו לגבי מקור המתח עצמו, כפי שניעוץ בהמשך הלימוד. ההספק של רכיב שווה אם כן למכפלת המתח על הרכיב בזרם העובר דרך הרכיב.

דוגמה 6-3

מתניעים מכונית בעזרת מטען (סטarter, starter) המחבר למצבר (איור 4-6) של 12V. במתגען יש זרם של 200A. חשבו את ההספק של המתגען.

פתרון

– המתח של המתגען הוא $U = 12V$.

– הזרם במתגען הוא $I = 200A$.

והספק המתגען הוא, לפי משואה (6-2):

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

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

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

כלומר, אם בניגוד, שהתנגדותו R, זרם I, הספק הניגד נתון על ידי:

$$P = I^2 R$$

ומכאן:

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

כלומר:

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

דוגמה 6-4

הספק הדוד הוא $P=2,200\text{W}$.

התנגדות גוף החימום היא $R=20\Omega$.

נרשום את המשוואה (6-5), בצורה הנתונה במשוואה (6-6):

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

ונקבל:

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

הזרם בגוף החימום הוא 10.5A .

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

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

נציב במשוואת הספק, $P=UI$, את הביטוי של I מהחוק אום, ונקבל:

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

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

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

אם ידועים מה המתח של הנגד ומהו הספק הנגד, אפשר לחשב את התנגדות הנגד. ניוכח בפרק בדוגמה 5-6 שלහן. אך לפני נציג כי על נורה רשם הספק ומתח, למשל: $60\text{V}, 230\text{W}$. באיור 7-6 מופיע צילום של נורה.

פירשו של רישום 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 והספק אינם רשיומים רק על נורות, אלא גם על התקנים ומיכליים שונים (מקלט טלוויזיה, מערכת סטריאו, מחשב ביתי, מגהץ, תנור חשמלי ועוד).

דוגמה 6-5

מה התנגדות הנורה, המתווארת 7 באיור 6-6, כשהיא פועלת במתח הנetto באיור?

פתרון

אנו יודעים כי כאשר המתח של הנורה הוא $U=230V$, הספק הנורה הוא $P=60W$. ההספק נתון על ידי משווהה (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 פועל, היא $\Omega 881.7$.

 **שאלות חזקה**
שאלה 6.1

השלימו: הספק הוא קצב שינוי של _____.

שאלה 6.2

בכל שנייה אנרגיה חשמלית של J005 נהפקת לחום. סמנו את כל המשפטים הנכונים לגבי תהליך זה.

- א.** ככל שהתהליך נמשך זמן רב יותר, הספק גדול יותר.
- ב.** ככל שהתהליך נמשך זמן קצר יותר, הספק גדול יותר.
- ג.** הספק אינו תלוי בזמן הזמן של התהליך.
- ד.** הספק הוא W500.
- ה.** הספק הוא $\frac{1}{500} W$.
- ו.** הספק הוא J005.
- ז.** הספק הוא $J\frac{1}{500}$.

שאלה 6.3

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

$$P = \frac{1}{Wt} \cdot T$$

$$P = \frac{W}{t} \cdot g.$$

$$P = \frac{t}{W} \cdot b.$$

$$P = Wt \cdot a.$$

שאלה 6.4

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

שאלה 6.5

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

שאלה 6.6

מערכת סטראיו צריכה 180,000 ג'ול בשעה. מה הספק המערכת?

שאלה 6.7

כמה אנרגיה מושקעת בנורה של W00 100 שמיירה במשך שעתיים?

שאלה 6.8

הרתחת מים בקומקום חשמלי מסויים נמשכת דקה וחצי. כדי להרטיח את המים יש להשייע אנרגיה של J00,150. מהו הספק הקומקום?

שאלה 6.9

נתונים שני דודים חשמליים. דוד A פעיל במשך זמן רב יותר מדוד B, אך שני הדודים צריכים אותה כמות אנרגיה. לאיזה משני הדודים יש הספק גדול יותר? נמקו.

שאלה 6.10

שני תנורים חשמליים פועלים במשך אותו זמן. לתנור הדרוש 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

המתוך הגורם לפעולת מכונת גילוח צחמלית הוא $V=12$. ההספק של מכונה זו, הוא $W=3$. סמן את המשפטים הבאים לגבי מכונת גילוח זאת.

- א.** התנגדות מכונת הגילוח בעת פעולה היא $\Omega=4$.
- ב.** הזרם במכונת הגילוח הוא $A=0.25$.
- ג.** מכונת הגילוח צריכה אנרגיה של $J=3$ בכל שנייה.
- ד.** בכל 3 שניות, מכונת הגילוח צריכה $J=1$.

שאלה 6.12

סמן את ההספק הגדול ביותר מבין ההספקים הבאים:

$0.2MW$; $201kW$; $199,000W$

שאלה 6.13

נורה צריכה $J=720,000$ במשך שעתיים, ואילו מקלט תלוייזיה צריך $J=24,000$ במשך 5 דקות.
למי מהם יש הספק גדול יותר?

שאלה 6.14

הספק של מחשב אישי הוא $W=50$, והספק של תנור חימום הוא $W=2kW$.

מה סכום ההספקים של שני מכשירים אלה?

שאלה 6.15

המתוך הגורם לפעולת מערכת סטריאו הוא $V=220$, והזרם במערכת הוא $A=0.4A$. מה הספק המערכת?

שאלה 6.16

הספק של נורת להט הוא $W=100$. המתך של הנורה הוא $V=230$. מה הזרם בנורה?

שאלה 6.17

נורת הלוגן מחוברת לרשת החשמל. הספק הנורה הוא $W=500$. מה המתך של הנורה, אם הזרם בה הוא $A=2.2A$?

שאלה 6.18

על נורה רשום: $V=230$ / $W=40$. מה התנגדות הנורה כשהיא פועלת?

שאלה 6.19

הזרם במלחם הוא 0.15 A . התנגדות המלחם (כשזרם בו זרם זה) היא $1,600\Omega$. מה ההספק 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 720 V . חשבו את ההספק של כל תנור.
- ב.** נתון כי הזרם בכל תנור הוא 12 A (אך המתח שלהם שונה). חשבו עכשו את ההספק של כל תנור.

שאלה 6.21

"כל שההתנגדות גדולה יותר, ההספק גדול יותר".
אם טענה זו נכונה תמיד? לפעם? אף פעם? נמקו את תשובהכם.

6.2 צריכת אנרגיה חשמלית ויחידות אנרגיה שימושיות

אם ידוע ההספק החשמלי P של צרכן, אפשר לדעת כמה אנרגיה חשמלית נזרכה 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:

$$W = Pt$$

אם הצרך - שהמתח שלו הוא U , והזרם דרכו הוא I - מקיימים את חוק אום, נקבל לפי משווהה (6-7) כי:

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

וכן, לפי משווהה (5-6) 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 יחידת זמן. יחידת האנרגיה, שמתකבלת במקרה צזה, היא אט-שנייה (Ws). יחידה זו היא קטנה ואינה נוחה לשימוש.

להתקני החשמל הביתיים יש בדרך כלל הספק של עשרות, מאות ואף אלפי אלף ואט. התקנים אלה פועלים במשך שעות רצופות (אלפי שניות). לכן מקובל למדוד את צריכה האנרגיה החשמלית ביחידות של קילו-ואט שעה (kWh), ובקיצור **קוט"ש** או **קו"ש**. נסביר סימון זה. אותן ה יחידות הראשונה במילה $hour$ (שעה, למשל: 3,600 שניות). אותן ק מיצגת אלף, כפי שלמדנו. מכאן נקבל:

$$1 kWh = 1,000W \times 3,600s = 3,600,000Ws = 3,600,000J$$

כלומר, קילו-ואט שעה שווה לשולשה מיליון ושמ-מאות אלף ג'ול.

$$1 MWh = 1,000kWh = 3,600,000J$$

יחידה מקובלת נוספת של אנרגיה היא MWh (מגה-ואט שעה), כלומר: מיליון ואט שעה:

דוגמה 6-6

ההספק של תנור חשמלי הוא $1.5kW$. מה כמות האנרגיה החשמלית שה坦ור צריך במשך שעתיים? רשמו את התשובה ביחידות ג'ול וביחידות **קוט"ש**.

פתרון

$$P=1.5kW=1,500W$$

משר הזמן הוא שעתיים ($2h$), כלומר $7,200$ שניות (s).

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, שה坦ור צריך במשך שעתיים, היא 3 **קוט"ש**.

הנה הספקים אופייניים של מכשירים והתקנים שונים. (יתכנו גם ערכים שונים מала הרשומים כאן).

100 W	מערכת סטריאו	30 W	וידיאו
150 W	מקלט טלויזיה	52 W	מאורר
40 W	נורה פלאורסצנטית	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-טיפ	1.4 kW	מייקרוגל
3,000 W	תנור חם	25 W	מלחם

תחנות הכוח הגדולות מייצרות חשמל בהספקים גדולים יותר. למשל, תחנת הכוח רוטנברג שבאשקלון כוללת שתי יחידות, וכל אחת מהן מייצרת חשמל בהספק של 550 MW.

שאלות חוזרת

6.22

- א. נורה מאירה שעתיים ברציפות. הספק הנורה הוא 75 W. חשבו – ביחידות ג'ול – את האנרגיה שהנורה צריכה במשך זמן זה.
 ב. חשבו את האנרגיה ביחידות kWh.

6.23

הספק תנור הוא 2 W. התנור פעיל במשך 5 שעות. חשבו – ביחידות kWh – את האנרגיה, שצרך התנור במשך זמן זה.

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 kWh.

שאלה 6.25

חשבו – ביחסות ג'ול – את האנרגיה הנצרכת על ידי כל אחד מהמכשירים הבאים שמחוברים לרשת החשמל (V=220):

שם המכשיר	התנגדות המכשיר	משך הפעולה של המכשיר
מלחם	1,600Ω	שעתיים
נורה	600Ω	שעה
תנור	15Ω	10 דקות

שאלה 6.26

השלימו:

- א. Ws היא יחידת _____.
 ב. kWh היא יחידת _____.
 ג. W היא יחידת _____.
 ד. MWh הוא גודל פי _____ מ- kWh .
 ה. $1 kWh$ הוא גודל פי _____ מ-J.

חברת החשמל בישראל, הנה הספק הבלעדי להספקה סדירה של חשמל לכל צרכן המדינה.

כפי שנלמד בפרק זה, אם ידוע ההספק החשמלי P של צרכן, ניתן לדעת כמה אנרגיה

חשמלית נזוכה עליו-ידי הצרכן במשך זמן.

לפי עלות של קילו וואט לשעה, ניתן לחשב את הסכום עליו לשלם לחברת החשמל.

להלן קישור למחשבון חברת החשמל לישראל

<https://srvt1.i-ecnet.co.il/scripts/mgrqispi.dll?APPNAME=iec&PRGNAMES=InstrumentsByGroup&ARGUMENTS=-N1>

לאחר פעילות באתר, יש לבדוק האם קיימים פערים בין החישוב המעשית על ידי הנוסחאות שנלמדו, לבין המחשבון הדיגיטלי המופיע באתר.

מעבדה וירטואלית בנושא מעגל חשמלי – קו טהנתנסות – פעלות מסכמתת

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, הcoil, צרכנים, נגדים, מוליכים, מתגים ומקור מתח.

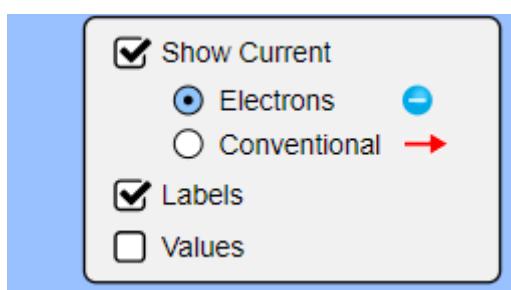
בנוסף, קיימים אמצעי מדידה, מתח וזרם, אשר אותם נוכל לצלף למעגל ולמדוד בעזרתם את הערכיהם המתקבלים בנקודות שונות.

הערה: סימולציה זו פועלת בשפה העברית והערבית.

לפניכם מסך ראשון לSIMOLAZIA:

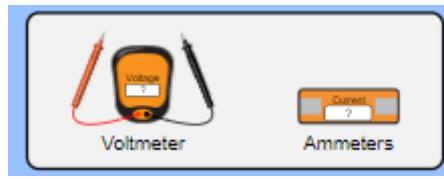


להלן המקרה:



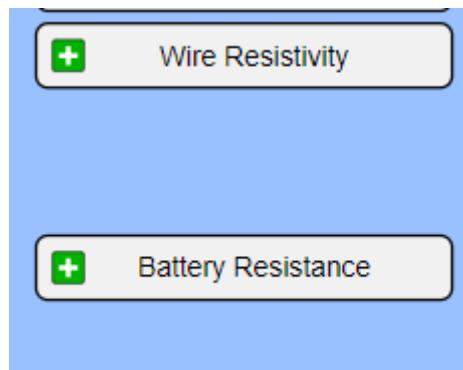
- הצגת זרם-Show Current
- Electrons- מאשר לנו לבחור האם להציג את תנועת האלקטרונים
- Conventional-הציג בצורה חז-conv
- Labels- הציג שמות הרכיבים המוצגים
- Values- הציג הערכים

הציג מקרה מכשיiri המדידה



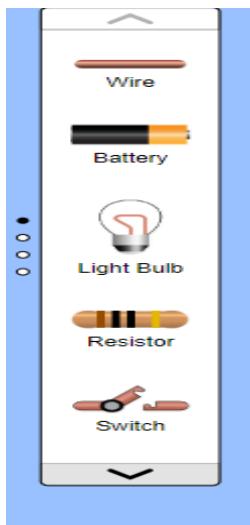
- מד מתח-Voltmeter
- מד זרם-Ammeters

על המסך נוכל לראות גם את האפשרויות הבאות:



- Wire Resistivity- הוספה התנגדות תיל בסרגל רץ
- Battery Resistivity- הוספה התנגדות מקור המתח

מצד שמאל במסך הסימולציה, קיימ החילון הבא:



בחולון זה נוכל לבחור הוספה פריטים למעגל, תיל (Wire), מוקור מתח (Battery), צרכן נורה (Light Bulb), מתג (Switch) ואם נגלה מטה נמצא רכיבים נוספים עליהם למד בהמשך.

מספר הוראות הפעלה:

- כדי להוסיף משורת התפריט יש Lager לרכיב המספר את הרכיב הרצוי. לחיצה כפולה עליו נציג בתחתית המספר סימן של אשפה, אשר מאפשר לנו למחוק את הפריט במידת הצורך.
- כאשר נחבר מוד מתח לעליינו נראה כי חיבור הקוטביות נכונה.

שאלות הניסוי:

1. בנה מעגל (טור) המורכב מנגד, מוקור מתח, תיל ומtag. ראה כי קיימת תנוצה מטענים.
2. לחץ על האפשרות להציג ערכים ומדווד על פי נוסחת חוק אום את המתח המתkeletal.
3. כעת, יש לקחת את מכשיר המדידה ולבצע מדידה אלקטרונית, האם קיימן זהות בין התשובות?
4. שנה את התנגדות התיל במעגל, כיצד שינוי זה השפיע על התוצאות במעגל?
5. כעת, פתח את המtag, מה קורה במעגל? ומדווד?

פעילויות בנושא הספק החשמלי:

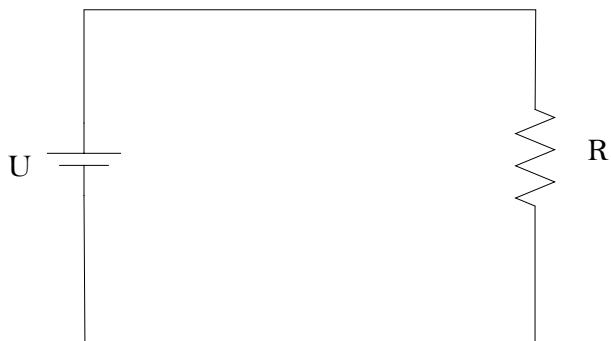
1. בצע חישוב על פי הנתונים במעגל של ההספק הכלל הנוצר במעגל
2. כעת שנה את התנגדות הנגד וראה כיצד שינוי זה השפיע על ההספק במעגל?
3. ראה כי שינוי בסוללת המעגל, גורם לשינוי בהספק הכלל.

סיכום פרק 6

- ההספק P הוא קצב ביצוע עבודה, או קצב הפיכת אנרגיה מצורה אחת לאחרת. אם פתקן מבצע עבודה W במשך זמן t , הספקו הוא $\frac{W}{t} = P$. יחידת ההספק היא ואט אחד (ג'ול לשניה).
- הספק הדרוש שווה למינימום המתח של התקן בזרם העובר דרך התקן: $U=P$. משווואה זו חלה על כל רכיב במעגל, כולל מקור מתח. אם התקן מקיים את חוק אומ, הספק הדרוש נתון גם על ידי $I^2R = \frac{U^2}{R} = P$.
- קילו-וואט שעה הוא יחידת אנרגיה: הספק של קילו-וואט (W) – במשך שעה, כולם: kWh .
- מגה-וואט שעה: הספק של מגה-וואט (מיליון ואט) במשך שעה, כולם: MWh .
- להתקני החשמל הביתיים יש הספק של عشرות, מאות, ואפילו אלפי ואט. מקובל למדוד את צריכה האנרגיה החשמלית הביתית ביחידות של קילו-וואט שעה.

7. זרנקי קירכהוף

באיור 1-7 מתואר מעגל פשוט, כדוגמת המעגלים שבהם עסקנו בפרקם הקדמיים. מעגל זה מכיל מקור מתח אחד ונגד אחד. כדי לחשב את המתח של הנגד, את הזרם שבנגד, או את התנגדות הנגד, השתמשנו בחוק אום. לעומת זאת, אם ידועים העריכים של שניים מתוך שלושת הגודלים - מתח, זרם וההתנגדות - אפשר לחשב את הגודל השלישי.



איור 1-7 מעגל המכיל מקור מתח ונגד

אם נדע את שלושת הגודלים האלה, יוכל לחשב גודל נוסף - ההספק. אם נדע את ארבעת הגודלים האלה, נאמר שפתרנו את המעגל. אך לפעמים מסוימים במידיעת המתח, הזרם וההתקנות במעגל, כדי לומר כי פתרנו את המעגל.

לא כל המעגלים פשוטים כמו המעגל שבאיור 1-7. יש מעגלים, המכילים כמה מקורות מתח וכמה נגדים. כאשר מנסים לפתור מעגלים כאלה, מתרברר שא-א-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.

i הידעת
גוסטב רוברט קירכהוף (1824-1887)

קירכהוף היה פיזיקאי גרמני, שהגיע להישגים חשובים בתחוםים שונים של הפיזיקה. את שני החוקים בחוקי החשמל, 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 לפתור מעגלים פשוטים, כדי להביא לקירכהוף כבוד רב, אבל הם היו רק חלק קטן מהישגים. קירכהוף עסק גם בתחוםים אחרים בפיזיקה, ועיקר הישגיו היה בעבודתו החלוצית בנושא הקשרורים בקרינה. ואמנם קיים חוק נוסף, שנקרא חוק קירכהוף, והוא עוסק בקרינה.

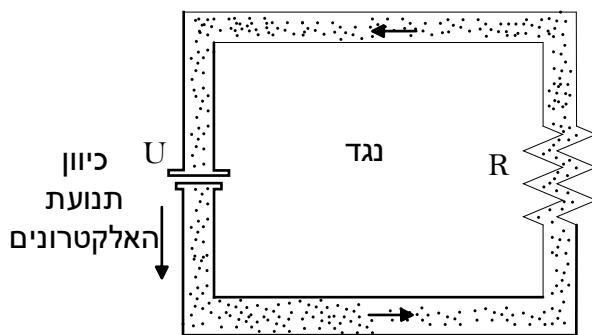
כמו כן, קירכהוף היה שותף לגילוי שני יסודות כימיים חדשים, ותרם לחקירת ההרכב של המשמש.

7.1 חוק הזרמים של קירכהוף

נזכיר ונתבונן במעגל פשוט ממקור אחד ונגד אחד. מעגל זה מופיעשוב באירור 2-7. תנועת האלקטרונים במעגל זה מתוארת באירור 3-7. האלקטרונים באירור זה מיוצגים באמצעות נקודות, והנגד מסומן על ידי הגדלה של סימון הנגד.



איור 2-7 מעגל המכיל מקור מתח ונגד

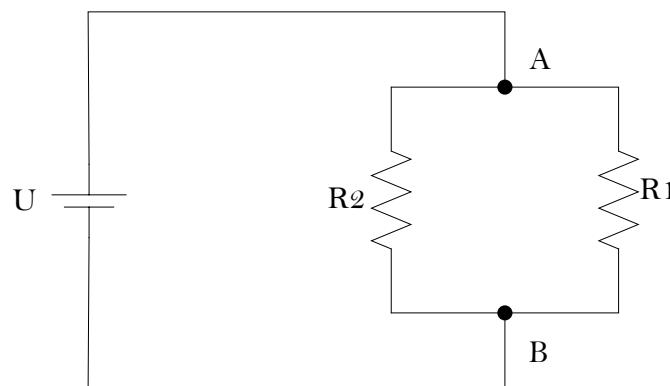


איור 3-7 תנועת האלקטרונים במעגל של מעלה

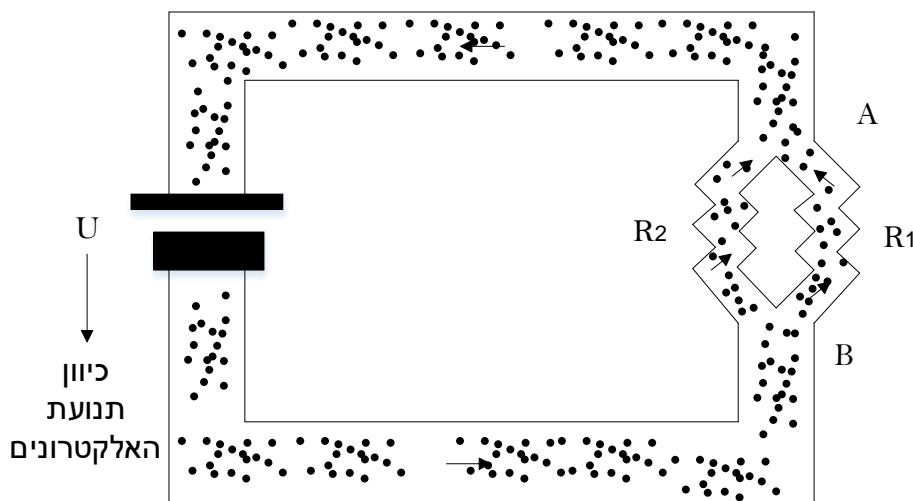
כאמור, האלקטרונים נעים במעגל מההדק השלי'י להדק החיבוי, כפי שמתואר המمعال שבאיור 3-7. האלקטרונים שם נעים מההדק השלי'י של מקור המתח, דרך המוליך התוחתון. משם הם ממשיכים לנעו דרך הנגד ודרכו המוליך העליון, ומשם – לעבר ההדק החיבוי של מקור המתח. כיוון תנועת האלקטרונים מסומן בחצים. כאמור, **כיוון הזרם המוסכם הפוך לכיוון תנועת האלקטרונים.**

צומת במעגל חסמי.

עכשו נתבונן במעגל חסמי המכיל מקור מתח ושני נגדים, R_1 ו- R_2 , כפי שמתואר באיור 3-4. הנגדים מחוברים – באמצעות מוליכים – למקור המתח. שתי נקודות החיבור של הנגדים לمولיכים הן A ו-B.



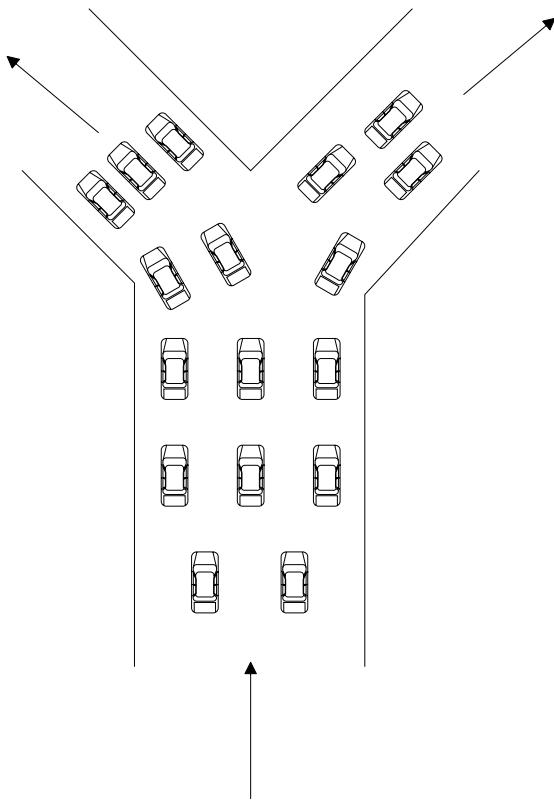
איור 7-4
מעגל שבו הזרם מתפצל בין שני נגדים



איור 7-5
תנועה האלקטרונים במעגל שמיימי

באיור 5-7 מתוארת תנועת האלקטרונים במעגל שבאיור 4-7. נניח כי קבוצת אלקטרונים מגיעה לנקודה B. כיצד ימשיכו האלקטרונים לנוע? דרך הנגד R_2 , דרך הנגד R_1 , או דרך שני הנגדים?

כדי לנתח את תנועת האלקטרונים בנקודה B, ניעזר בדוגמה המוכרת לנו: מכוניות הנעות בכביש ונכנסות לצומת (איור 6-7). כshmוכנית מגיעה לצומת, היא יכולה לפנות ימינה או שמאלה.



איור 6-7 מכוניות נכנסות לצומת ויוצאות ממנה

נניח כי אין "פקקים" בצומת. במקרה זה מספר המכוניות, הנכנסות לצומת בכל יחידת זמן, שווה למספר המכוניות היוצאות מהצומת באותה יחידת זמן.

נחזיר לאיורים 4-7 ו-5-7. בדומה לצומת בכביש, הנקודה B היא צומת במעגל, כי חלק מהאלקטرونים יכולים להמשיך לנוף מנקודה זו דרך הנגד R_1 , והחלק الآخر – דרך הנגד R_2 . בצומת עצמו לא מוצברים אלקטرونים. כמובן, כל האלקטרונים המגיעים לצומת ביחידת זמן יוצאים מהצומת באותו אותה יחידת זמן, ואין "פקקים" בצומת.

נמשיך את ההשוואה בין מכוניות לאלקטرونים. מכוניות אין נוצרות על הכביש או בצומת. גם האלקטרונים אינם נוצרים במוליך או בצומת.

ראיינו אפוא:

א. אלקטرونים אינם מצטברים בצומת;

ב. אלקטرونים אינם נוצרים בצומת.

משתי עובדות אלה נסיק:

מספר האלקטרונים, היוצאים מהצומת ביחידת זמן, שווה למספר האלקטרונים, הנכנסים לצומת באותה יחידת זמן.

ראיינו כי נקודה B באירועים 4-7 ו-5-7 היא צומת בمعالג. נסתכל עכשו בנקודה A שבאיורים אלה. בנקודה זו מתכנסים האלקטרונים מנגד R_1 ומנגד R_2 . משם ממשיכים האלקטרונים לנوع דרך המוליך, לעבר הבדיקה החיבובי של מקור המתח.

גם נקודה A היא צומת. בצומת מתכנסים, או מתרפזרים, שני זרמים לפחות. באופן כללי, צומת הוא נקודה בمعالג שבה נפגשים לפחות רכיבים של המוליך (הרכיבים יכולים להיות מקור מתח, נגד, מוליך, מתג או רכיבים אחרים), כך שהדק אחד של כל אחד מהרכיבים – מחובר לצומת.

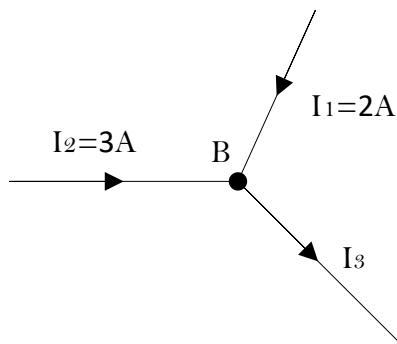
ראיינו כי מספר האלקטרונים, היוצאים מהצומת ביחידת זמן, שווה למספר האלקטרונים הנכנסים לצומת באותה יחידת זמן. כאמור, עצמת הזרם (ובקיצור: הזרם) מוגדרת כסכום המטען, העוברים ביחידת זמן דרך חתך של מוליך. מכאן נקבע:

סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.

זהו **חוק הזרמים של קירכהוף** (חוק זה נקרא בשמות נוספים: **חוק הצומת** וכן **חוק 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, זרם אחד יוצא מהצומת

פתרון

לפי חוק הזרמים של קירכהוף סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, :

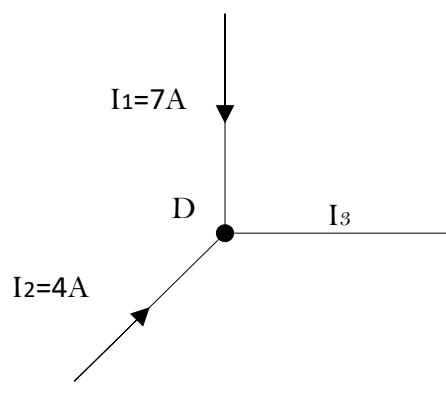
$$I_1 + I_2 = 2A + 3A = 5A$$

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

א. חשבו את גודל הזרם I_3 באיור 7-8.

ב. סמןו את הכיוון של זרם זה.



איור 7-8

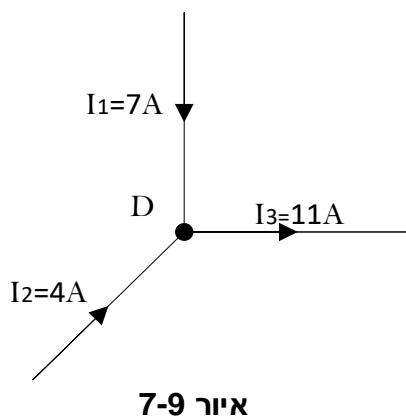
פתרון

א. סכום הזרמים הנכנסים לצומת D הוא

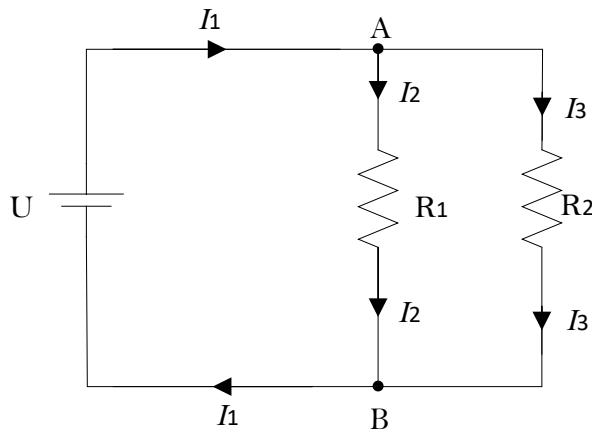
$$I_1 + I_2 = 7A + 4A = 11A$$

לכן גם סכום הזרמים היוצאים מצומת זה הוא 11A. מכאן נסיק כי הזרם I_3 יוצא מהצומת, וגודלו הזרם הוא $11A = I_3$.

ב. קיבלנו שהזרם I_3 יוצא מהצומת D, ולכן הכוון של זרם זה הוא מהצומת – ימינה. כיוון הזרם מסומן באיור 9-7.



נחזיר ונתבונן במעגל, כדוגמת המעגל שבאיור 4-7, שבו הזרם מתפצל בין שני נגדים. מעגל כזה מופיעשוב באיור 10-7, ומוסמנים בו הזרמים בחלקי המעגל השונים.



איור 10-7 סימוני זרמים במעגל

נשתמש בחוק הזרמים של קירכהוף כדי למצוא קשרים בין הזרמים השונים. לשם כך נרשום את חוק הזרמים של קירכהוף לצמתים B ו-A.

הזרמים הנכנסים לצומת B: I'_3, I'_2

הזרמים היוצאים מהתצומת B: I'_1 .

לכן, לפי חוק הזרמים של קירכהוף, מקבלים:

$$I'_1 = I'_2 + I'_3$$

ובצומת A נקבל:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

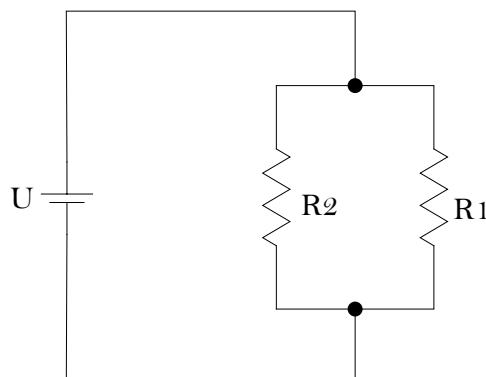
בפרק הבא נדון בקשרים שבין הזרמים הבאים: $I'_1 - I_1 ; I'_2 - I_2 ; I'_3 - I_3$

תרגול

שאלה 7-1

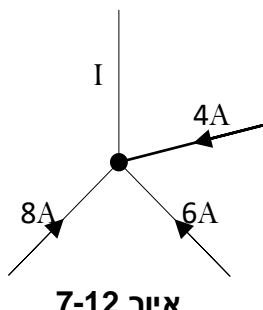
א. כמה צמתים יש במעגל שבאיור 1-7?

ב. כמה צמתים יש במעגל שבאיור 1-11?



שאלה 7-2

חשבו את הזרם I שבאיור 1-12, וקבעו אם הוא נכנס לצומת, או יוצא מהתצומת.



שאלה 7-3

شرطתו מעגל חשמלי שאין בו צמתים. במעגל צריכים להיות שלושה נגדים לפחות.

שאלה 7-4

שני זרמים נכנסים לצומת מסוים: $A = 9A$, $I_1 = 3A$, $I_2 = I$. שני זרמים אחרים יוצאים מהצומת: $I_4 = 14A$, $I_3 = 7A$

- א. הוכחו כי יש לפחות עוד זרם אחד הנכנס לצומת או יוצא ממנו.
- ב. בהנחה כי יש רק זרם נוסף אחד, חשבו אותו, וקבעו אם הוא נכנס לצומת או יוצא ממנו.

שאלה 7-5

סמן את כל הטענות הנכונות מחוק הזרמים של קירכהוף.

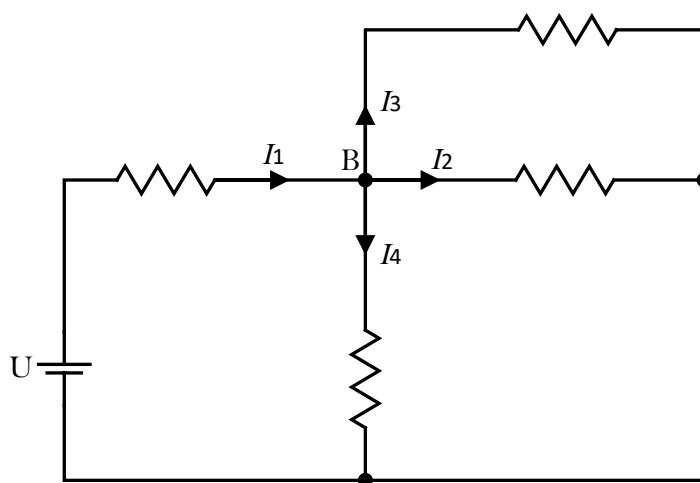
- א. במעגל חשמלי לא ניתן יותר מצומת אחד.
- ב. אם שום זרם לא נכנס לצומת, שום זרם גם לא יוצא מהצומת.
- ג. אם $\text{נכט}I$ הוא סכום הזרמים הנכנסים לצומת ו- $\text{יצא}I$ הוא סכום הזרמים היוצאים ממנה

צומת, אז $0 = \text{יצא}I - \text{נכט}I$.

- ד. 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.

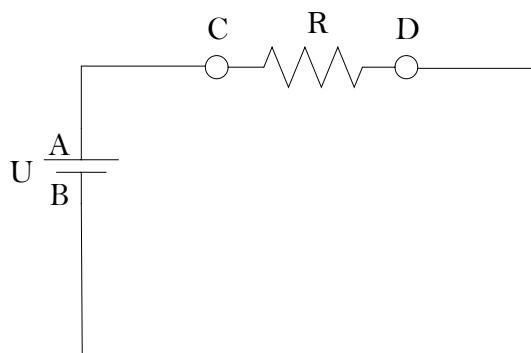


איור 7-13

7.2. דוח 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 החיבובי A של המקור, דרך הנגד R, אל ההדק השילוי B של המקור. לצורך ההסביר נניח אפוא שהמתענים במעגל יוצאים מההדק החיבובי A של המקור, מגיעים להדק C של הנגד, ומשם ממשיכים עד ההדק B של המקור.

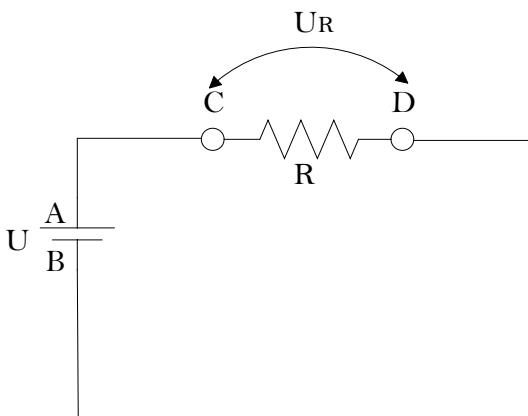


איור 7-14 מעגל חשמלי פשוט

כאשר עובר זרם בנגד, יש התנגדויות בין המתענים הנעים לבין היונים של החומר שמננו עשויי הנגד. כתוצאה לכך, הנגד מתחמס. לנגד נוספת אם כן אנרגיה. אבל אנו יודעים שאנרגיה אינה נוצרת מאליה, אלא רק משנה צורה.

כפי שהסבירנו בפרק הקודם, האנרגיה שנניפה לחום בנגד, היא חלק מהאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שהייתה למטען בהדק השמאלי C של הנגד. لكن האנרגיה הפוטנציאלית בהדק הימני D של הנגד קטנה מהאנרגיה הפוטנציאלית בהדק השמאלי C של הנגד. וכך הדבר גם לגבי הפוטנציאלים בהדק הנגד. אומרים כי יש **ירידת פוטנציאל**, או **נפילת פוטנציאל**, בין נקודת C לבין נקודת D. מאחר שמתוך הוא הפרש פוטנציאלים, קיבל כי קיימת 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 המתענים דרכם. מקורות כאלה נקראים **מקורות אידיאליים**. על מקורות לא-אידיאליים למד בקורס.



איור 15-7 סימון מפל מתה על בגד

מה גודלו של מפל המתה של הנגד שבאיור 15-7? אם ידוע לנו כי דרך הנגד, שהተנגדתו R עבר זרם I , הרי שבין נקודות הנגד יש מתה U הנתנו, לפי חוק אום, על ידי $U_R = RI$. מכך אנו למדים שגודלו של מפל המתה על הנגד R – הוא $U_R = RI$.

נזכיר כי אנו מכנים של מוליכים במעגל אין התנגדות; لكن לפי חוק אום נקבע, שגודלו של מפל המתה על כל מוליך הוא אפס. מכאן שגודלו של מפל המתה בין נקודות A ו-C הוא אפס. لكن מבחינה חשמלית, שתי הנקודות נחשבות לאותה נקודת. וכך גם לגבי נקודות B ו-D. ובכן, המתה U_R של הנגד שווה למתה U של המקור.

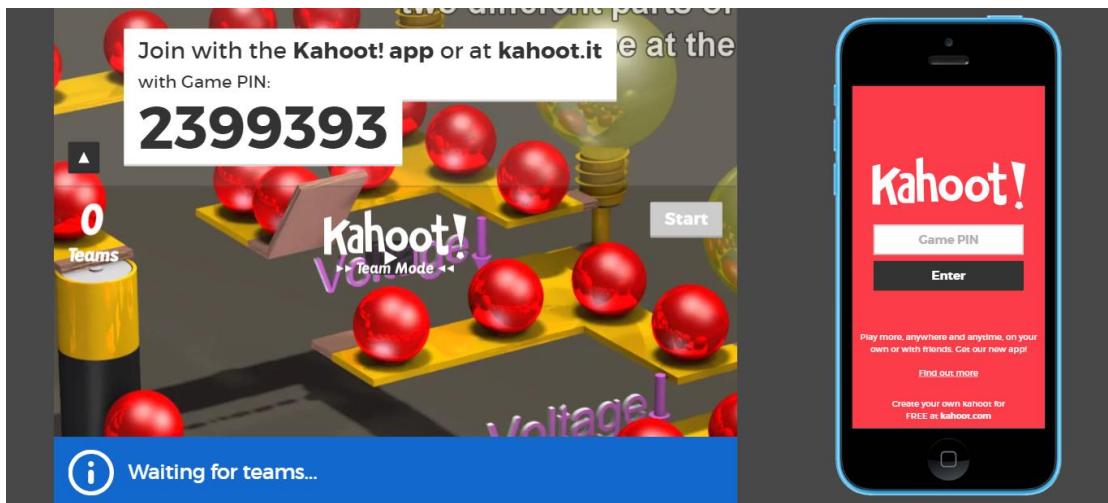
משחק בנושא מעגלים חשמליים

1. עלייכם להיכנסו לקישור הבא:

<https://play.kahoot.it/#/k/6bdadd8e-5001-40d9-8a68-dfb51354888e>

<https://create.kahoot.it/l/#/preview/6bdadd8e-5001-40d9-8a68-dfb51354888e>

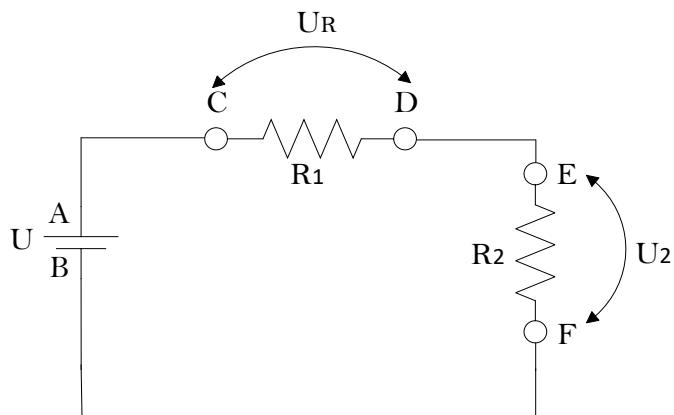
2. לאחר מכן לנקוד במסעך:



3. לענות על השאלות המופיעות כחלק מהמשחק

מפל מתח במעגל הכלול נגדים אחדים

עכשו נתבונן במעגל, שיש בו שני נגדים מחוברים זה אחר זה, כמוואר באיור 16-7. גם לגבי מעגל זה אנו מניחים של מוליכים אין התנגדות; וכן גם במעגל זה הנקודות A ו-C הןאותה נקודת מבחינה חשמלית, וגם הנקודות F ו-B נחשבות לאותה נקודת מבחינה חשמלית.



איור 16-7 מעגל הכלול מוקור אחד ושני נגדים, המוחברים זה אחר זה

חוק המתחים כביטוי לשימור האנרגיה במעגל

נבדוק את שינוי האנרגיה החשמלית במעגל. לשם כך נעקוב אחר התנועה של יחידת מטען חיובית אחת במעגל שבאיור 16-7.

לפי הגדרת המתח והدين בסעיף 6.1, האנרגיה החשמלית של יחידת המטען החיוביota בנקודת A (ההדק החינוי של מקור המתח) גדולה בשיעור $\frac{U}{U_2}$ מהאנרגיה החשמלית שלה

בנקודה B (ההדק השילילי של מקור המתח). האנרגיה נתונה על ידי $U = 1 \times U$ (יחידת המטען היא קולון אחד).

יחידת המטען נעה במעגל, ומתנגשת בイוניים של הנגד R_1 . כתוצאה לכך, יחידת המטען מאבדת אנרגיה חשמלית בשיעור U_1 (כלומר: $1 \times U_1$); בהמשך התנועה – יחידת המטען מתנגשת בイוניים של הנגד R_2 , ומאבdet אנרגיה חשמלית בשיעור U_2 (כלומר: $1 \times U_2$); ואז יחידת המטען מגיעה להדק השילילי של מקור המתח.

בשני השלבים שתיארנו, יחידת המטען איבדה את האנרגיה החשמלית שהייתה לה, כלומר היא איבדה אנרגיה חשמלית ששיעורה U (כלומר: $1 \times U$). לפי חוק שימור האנרגיה, נקבל:

$$U = U_1 + U_2$$

משמעותו זו נסיק לגבי המمعال שבאיור 7-16:

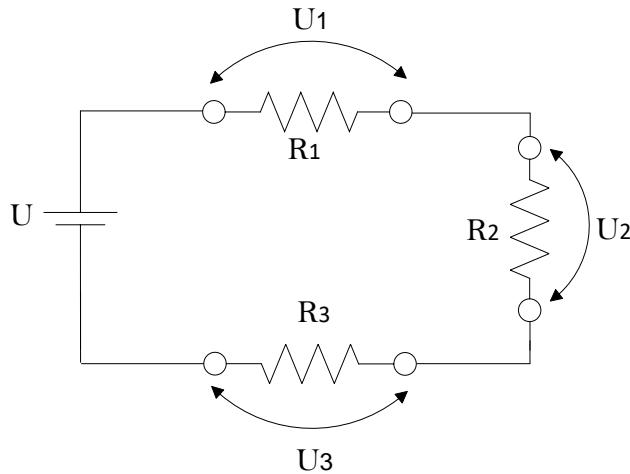
מתוך המקור U שווה לסכום מפלי המתח על הנגדים:

$$U = U_1 + U_2$$

התוצאה שקיבלנו חלה על כל מעגל, שבו הנגדים מחוברים זה אחר זה. באירור 7-17 מתואר מעגל, שככלו שלושה נגדים מחוברים זה אחר זה. גם במעגל זה נקבל:

מתוך המקור U שווה לסכום מפלי המתח על הנגדים:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$



איור 7-17 מעגל הכלול ממקור אחד ושלושה נגדים, המתחוברים זה אחר זה

שתי המשוואות האחרונות מבטאות את הכלל הבא:

במעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, סכום מפל' המתוח על כל הנגדים – שווה למתוח המקור.

כל זה נקרא **חוק המתוחים של קירכהוף**, או **חוק השני של קירכהוף**. בהמשך נלמד להשתמש בשני חוקי קירכהוף - חוק הזרמים וחוק המתוחים - כדי לנתח מעגליים פשוטים. אך לפני כן נגדיר מושגים מסוימים שייעזרו לנו לנתח מעגליים בצורה שיטית ויעילה. התוצאה שבמושגים ובמשמעותם אלה תתברר כשנណן במעגליים מורכבים.

תרגול

שאלה 7-7

נסחו את חוק המתוחים 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 מתוח המקור.

שאלה 7-9

מתוח המקור במעגל שבאיור 7-17 – הוא 7 V. המתוח על הנגד R_1 הוא 4 V; והמתוח על הנגד R_2 הוא 6 V. מהו המתוח על הנגד R_3 ?

שאלה 7-10

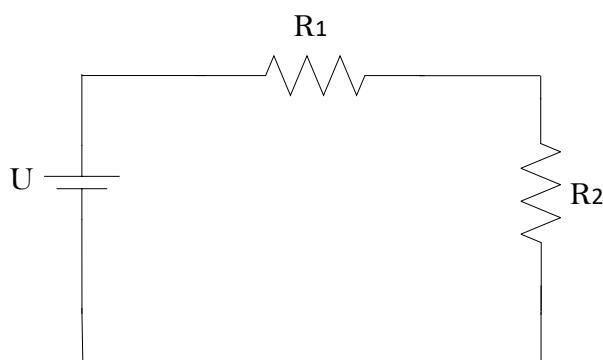
סמננו את הטענות הנכונות:

- א. סכום המתוחים הנכנסים לצומת שווה לסכום המתוחים היוצאים מהצומת.
- ב. סכום הזרמים במעגל, שבו לכל הנגדים התנגדות קבועה, שווה למתוח המקור.
- ג. סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.

ד. סכום מפלי המתחים על כל הנגדים בمعالג, שבו הנגדים מחוברים זה אחר זה, שווה למתהך המקור.

3.7 סימונו מתחים בمعالגים דשמליים

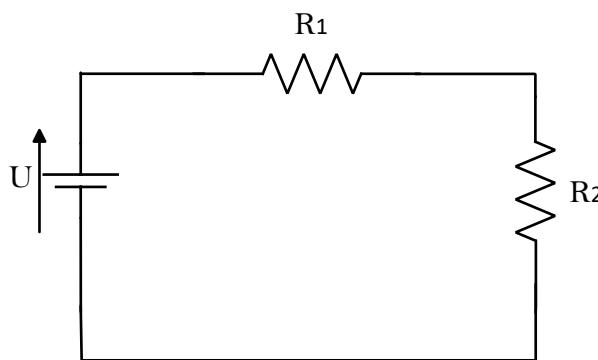
באיור 18-7 מתואר מעגל המכיל מקור מתח ושני נגדים. בمعالג כזה יש מתחים שונים: המתח על המקור, המתח על הנגד R_1 והמתח על הנגד R_2 . כדי למצוא את משווהת המתחים בمعالג, בהתאם לחוק השני של קירכהוף, נוח להשתמש בסימוני עזר של המתחים, שנסביר בסעיף זה.



איור 18-7 מעגל המכיל מקור מתח ושני נגדים

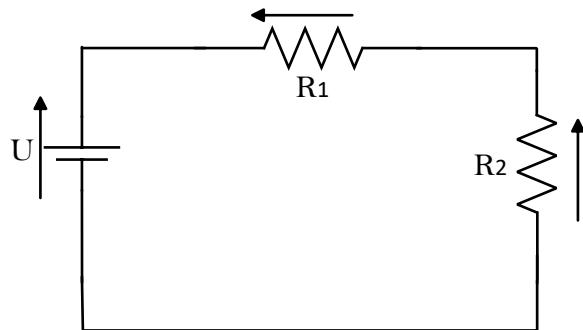
נשתמש בחץ כדי לסמן מתח על רכיב בمعالג. החץ משורטט כך שראש החץ פונה אל הדק הרכיב שבו הפוטנציאל גבוה יותר מאשר בהדק האחר, וזאת מכיוון שהוא קרוב להדק הרכיב שבו הפוטנציאל נמוך יותר.⁴ דוגמה לכך מתוארת באיור 19-7. כיוון החץ בציור זה הוא מההדק השילי של מקור המתח - אל ההדק החיובי של המקור. וזכור, פוטנציאל ההדק החיובי גבוה יותר מפוטנציאל ההדק השילי.

⁴ יש המسمנים פוטנציאל גבוה על ידי הסימן "+"; ופוטנציאל נמוך יותר על ידי "-".



איור 19-7 סימון מתח על מקור המתח במעגל

בהתאם להסברנו, סומנו חצים ליד הנגדים במעגל שבאיור 19-7. הכוון של כל חץ זה - הפוך לכיוון זרם בכל נגד, כי כיוון הזרם בנגד הוא מפוטנציאלי גובה לנמוך.



איור 20-7 כיוון הזרם וסימוני מתחים במעגל חשמלי

נזכיר כי בנגד לכיוון הזרם בנגד, כיוון הזרם במקור מתח הוא מפוטנציאלי נמוך למפוטנציאלי גובה. מכאן נסיק כי הנגדים במעגל מתנהגים באופן "הפוך" ממוקורות המתח: מקור המתח מספק אנרגיה למעגל, ואילו הנגדים צורכים אותה. נזכיר כאן שיש רכיבים היכולים לשמש בתנאים מסוימים לצרכים (כלומר, צורכי אנרגיה), ואילו בתנאים אחרים הם משמשים כמקורות (כלומר, מספקים אנרגיה למעגל).

שאלה לדין

מצבר המconjית – צרך או מקור מתח?

המצבר במכונית הוא דוגמה לרכיב שבתנאים מסוימים הוא צרך, ובתנאים אחרים הוא מקור מתח. המצבר נתען (כלומר, מקבל אנרגיה) כשהמנוע פועל, ולאחר מכן מספק זרם (כלומר, מחזיר את האנרגיה שקיבל) להפעלת המערכות השונות במכונית, כגון הfansים, מערכת ההצתה במנוע בנזין ועוד.

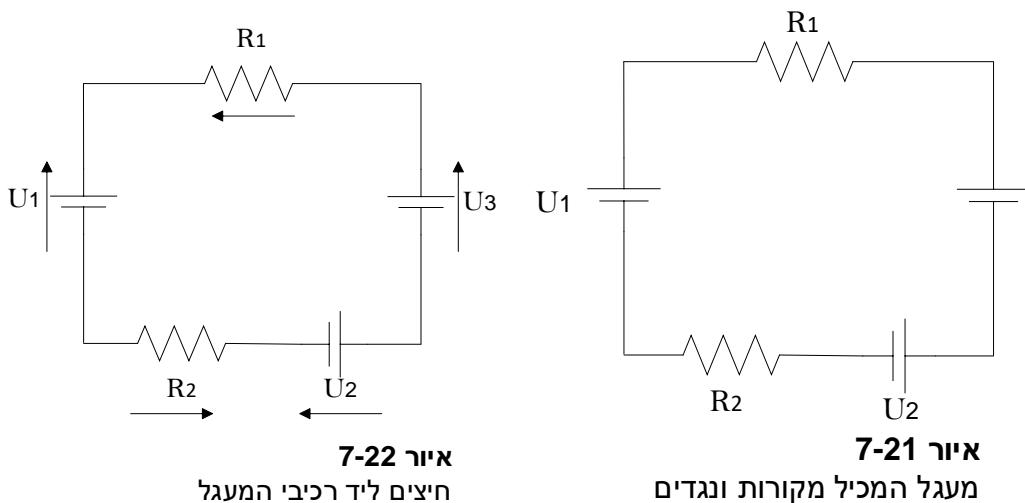
אם כן, כשהמצבר נטען, הוא משמש כצרוך; וכשהמצבר מספק זרם, הוא משמש כמקור מתח.

כאשר רכיב, כדוגמת המctrבר הנטען במכונית, משמש כצרוך, כיון חץ הזרם הפור לכיוון החץ המסמן את המתח של הרכיב; ואשר רכיב זה משמש כמקור המספק אנרגיה חשמלית, כיון חץ הזרם הוא בכיוון החץ המסמן את המתח של הרכיב.

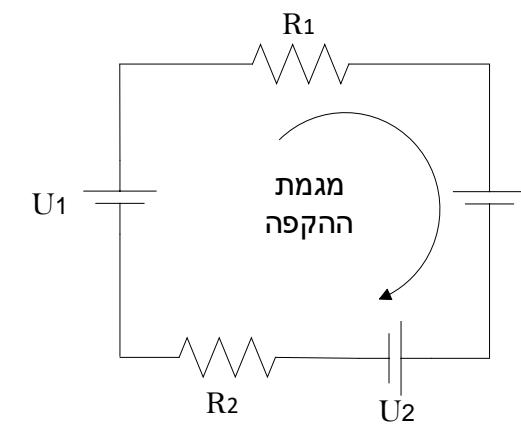
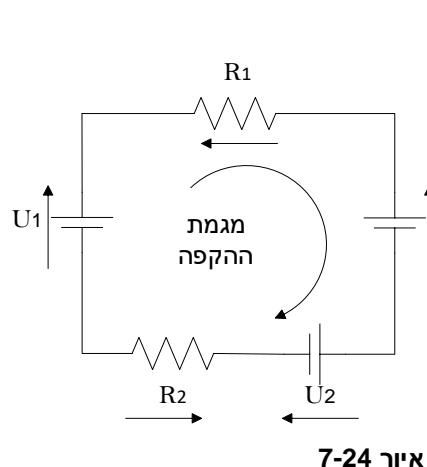
רישום משוואת המתחים במעגל

עד עכשוו עוסקנו במעגלים פשוטים למד'. כאשר עוסק במעגלים מורכבים יותר, נשימוש בשיטת סימון שתסייע לרישום נוח יותר של משוואת המתחים של קירכהוף.

סביר שיטת סימון זו בעזרת המודול שבאיור 7-21. מעגל זה מכיל שלושה מקורות מתח ושני נגדים. באיור 7-22 מסומנים החיצים ליד רכיבי המודול. בהמשך נלמד לקבוע את כיוון הזרם במעגל זה, כך שאפשר יהיה לדעת את כיווני החיצים ליד הנגדים.

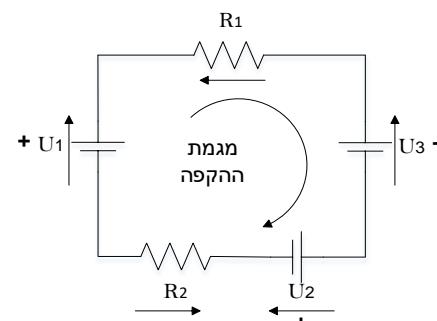
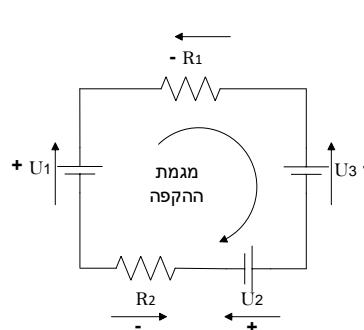


נקיף עכשוו את המודול במוגמה מסוימת. אנו יכולים לבחור אם להקיף את המודול במוגמת התנועה של מחוגי השעון - או במוגמת הפוכה. המוגמה שתבחר תקרא **מוגמת ההקפה**. באיור 7-23 בחרנו במוגמת התנועה של מחוגי השעון כמוגמת ההקפה, ובאיור 7-24 הוספנו את החיצים ליד רכיבי המודול. אין קשר בין מגמת ההקפה שאנו בוחרים, לבין כיווני חצ'י המתח.



נסמן באופן הבא כל מקור מתח שנפגש בעת ההקפה:

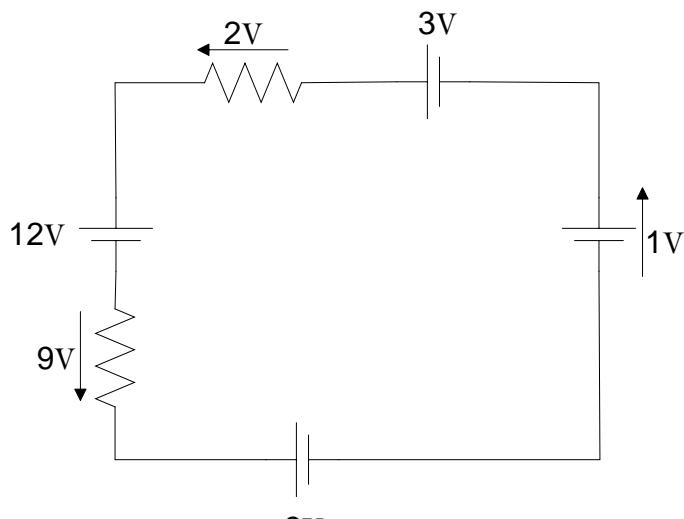
אם כיוון החץ ליד מקור המתח הוא כмагמת ההקפה, נרשום את הסימן "+" ליד מקור זה, כפי שמתואר באיור 7-25; ואם כיוון החץ ליד מקור המתח הפוך למוגמת ההקפה, נרשום את הסימן "-" ליד מקור זה.



באופן דומה נסמן "+" או "-" ליד כל נגד במעגל, וזאת בהתאם למוגמת ההקפה ולכיוון החץ שליד הנגד המתאים. דוגמה לסימון זה מתוארת באיור 7-26.

דוגמיה 7-3

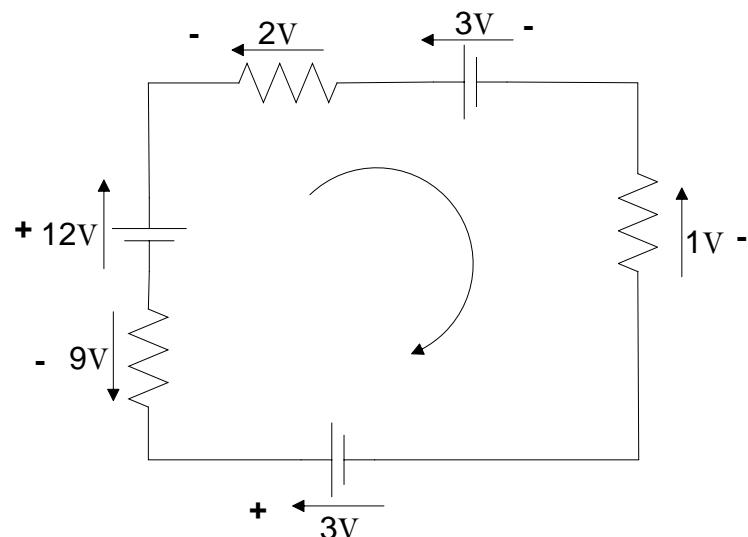
חשבו את הסכום הכללי של המתחים במעגל שבאיור 7-27.



איור 7-27

פתרון

באיור 7-28 בחרנו את מגמת הרקפה כמגמת התנועה של מתחי השעון. כן הוספנו את החיצים ליד מתחי המקורות. בהתאם לכלל שקבענו, סומנו "+" או "-" ליד כל אחד ממתחים אלה.



איור 7-28

סכום המתחים הוא:

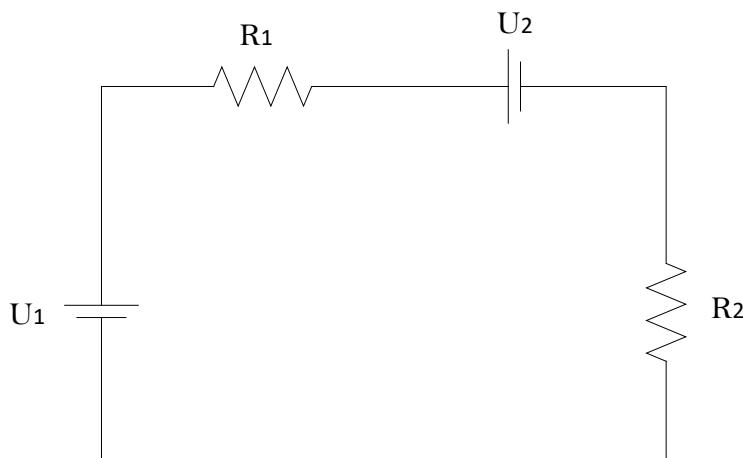
$$(+12) + (-2) + (-3) + (-1) + (+3) + (-9) = 12 - 2 - 3 - 1 + 3 - 9 = 0$$

התוצאה - סכום המתחים שווה לאפס - אינה מקרית. היא מתאימה לחוק המתחים של קירכהוף. נראה זאת בסעיף הבא.



שאלה 7-11

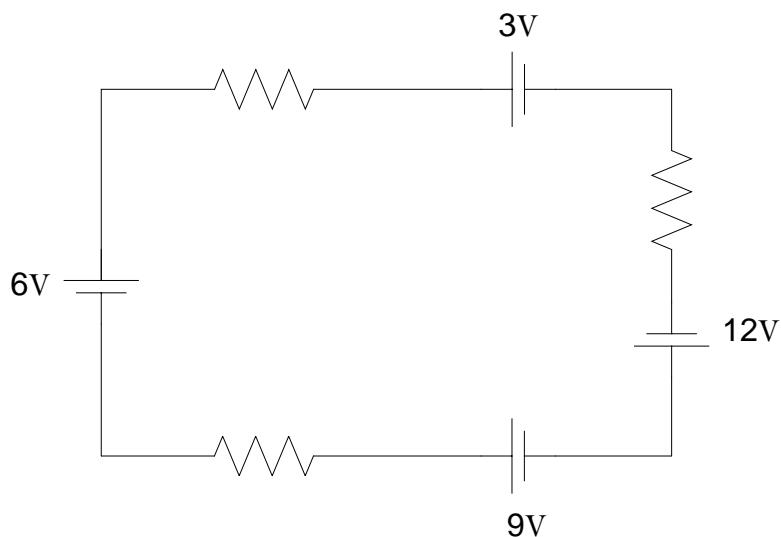
סמן באמצעות ח' את המתח ליד כל אחד מהמקורות שבאיור 7-29.



איור 7-29

שאלה 7-12

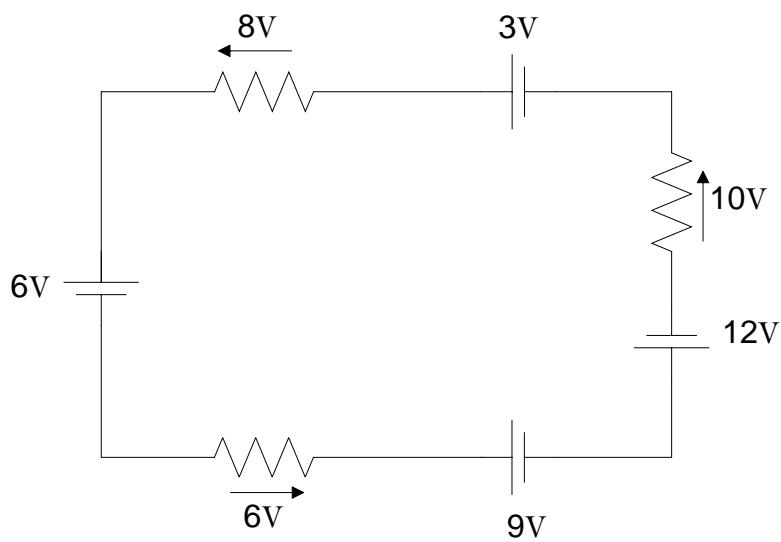
- בחרו וסמן את מגמת ההקפה של המעגל המתואר באיור 30-7.
- סמן ח' ליד כל מקור מתח באיור 30-7, כך של ח' יצביע על הדק המקור שהפוטנציאלי שלו גבוה יותר מאשר של הדק השני.
- סמן "+" או "-" ליד כל אחד מהמקורות המתח במעגל.
- חשבו את סכום מתחי המקורות במעגל, תוך התחשבות בסימן שליד כל מקור.



איור 7-30

שאלה 7-13

- א. בחרו וסמן את מגמת ההקפה של המעגל המתואר באיר 7-31.
- ב. סמן "+" או "-" ליד כל אחד מהנגדים במעגל.
- ג. חשבו את סכום מתחי הנגדים במעגל, תוך התחשבות בסימן שליד כל נגד.

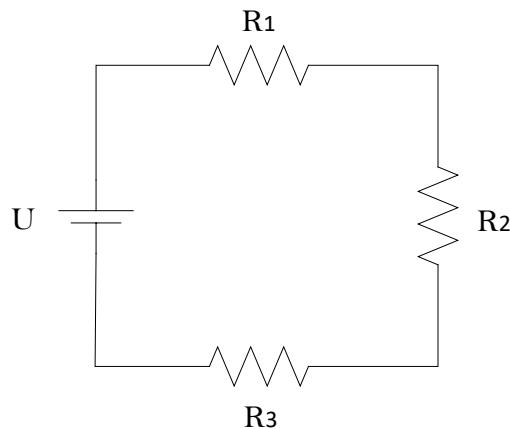


איור 7-31

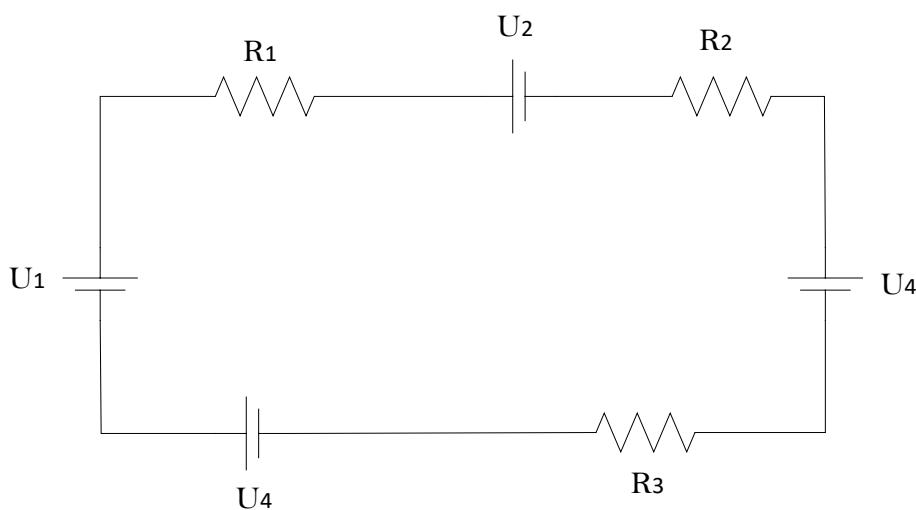
7.4 הזרה הכללית של זღג המתחים של קירכהוף

בסעיף 7.2 ניסחנו את חוק המתחים של קירכהוף: במעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזזה אחר זה, סכום מפלי המתוח של כל הנגדים שווה למתח המוקור. האם חוק המתחים של קירכהוף נכון רק לגבי מעגלים שבהם כל הנגדים מחוברים בזזה אחר זה, כמו במעגל שבאיור

?7-32



איור 7-32
מעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזזה אחר זה



איור 7-33
מעגל המכיל כמה מקורות מתוח וכמה נגדים

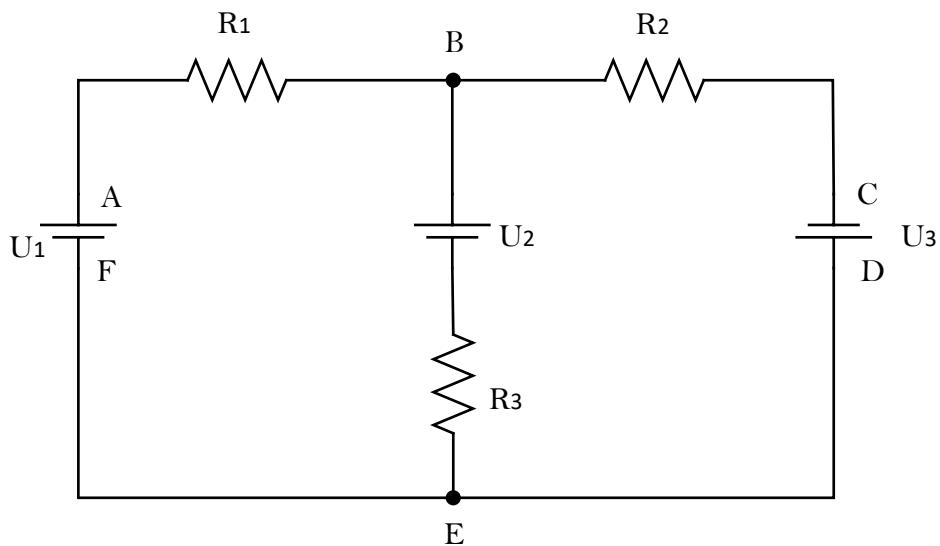
באיור 7-33 נתון מעגל שמכיל כמה מקורות מתוח וכמה נגדים. נבדוק את חוק המתחים של קירכהוף - גם לגבי מעגל זה, שבו הנגדים אינם מחוברים בזזה אחר זה.

החולג במעגל חשמלי

אפשר להשתמש המשפטים של קירכהוף לגבי כל מעגל. אם נתון מעגל מורכב, אפשר לחלק אותו לחלקים שונים, ולהשתמש בשוק המשפטים לגבי כל חלק בנפרד. כדי לזהות חלקים אלה, נסביר מושג חדש: **חולג**.

לצורך ההסבר, נבחר נקודת כלשהי במעגל שבאיור 7-34. הנקודת שבחרנו היא A. עכשו ננוו לאורך המעגל החשמלי, עד שנחזור להתחלה, כך שנעבור רק פעם אחת דרך כל נקודת המסלול הסגור שבחרנו הוא:

$$A \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow A$$

**איור 7-34**

מסלול סגור זה במעגל הוא דוגמה לחולג. עכשו נגדיר חולג:

הגדלה

חולג הוא מסלול סגור כלשהו במעגל חשמלי, שלגביו מתקיימים התנאים הבאים:

- המסלול מתחילה ונקודת מסויימת במעגל, ומסתיים באותה נקודת עצמה.
- לאורך המסלול אנו עוברים רק פעם אחת דרך כל נקודת (פרט לנקודת התחלה, כמובן).

הנה דוגמה נוספת לחולג במעגל שבאיור 7-34.

$$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$$

במעגל זה יש חולג נוסף:

$$B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B$$

עכשו ננשח את חוק המתחים של קירכהוף בצורתו הכללית:

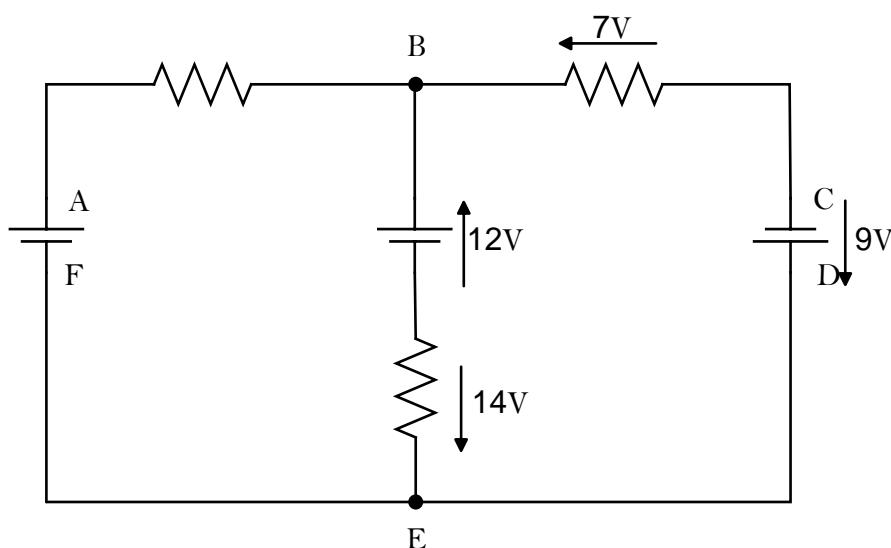
הגדלה

חוק המתחים של קירכהוף

סכום המתחים (כולל הסימנים המתאימים שלהם) בכל אחד מהחוגים של מעגל חשמלי הוא אפס.

דגם 7-4

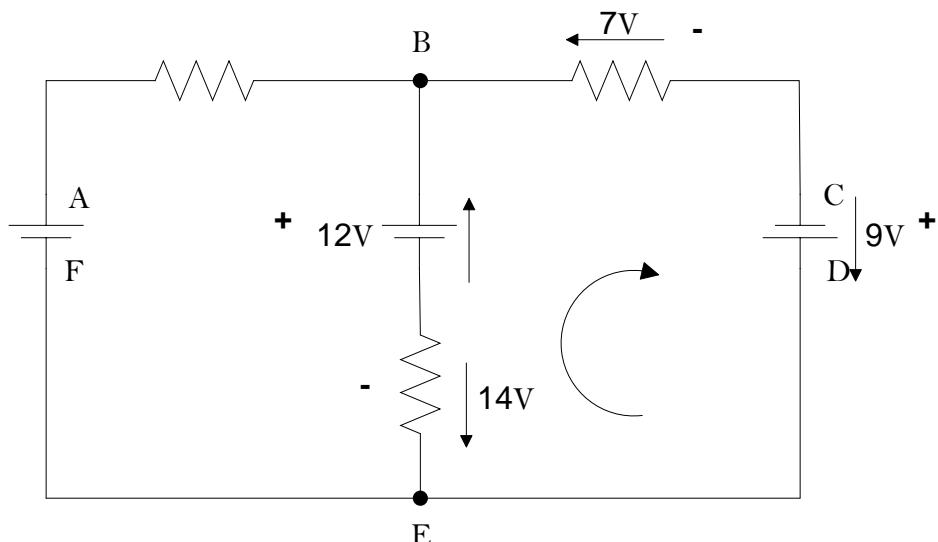
הראו כי סכום המתחים (כולל הסימנים המתאימים) הוא אפס בחוג BEDCB שבאיור 7.37.



איור 7-35

פתרון

באיור 7-36 מגמת ההקפה בחוג BEDCB מסומנת בחז. כן סומנו חצים ליד מקורות המתוח והנגדים, ובהתאם לכך סומן "+" או "-" ליד כל מקור מתוח 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 לחזק המתחים של קירכהוף.

מחזק המתחים של קירכהוף אפשר להסביר, כי **סכום מתחי המקורות (טור הקפדה על כיווני החצים) בחוג - שווה בגודלו לסכום מפלי המתח בחוג זה**. נציג 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 זאת תתקבל לגבי כל חזק וחוג בכל מעגל חשמלי.

תרגול

שאלה 7-14

סמנו את כל החוגים במעגל שבאיור 7-37:

א. ABEFA

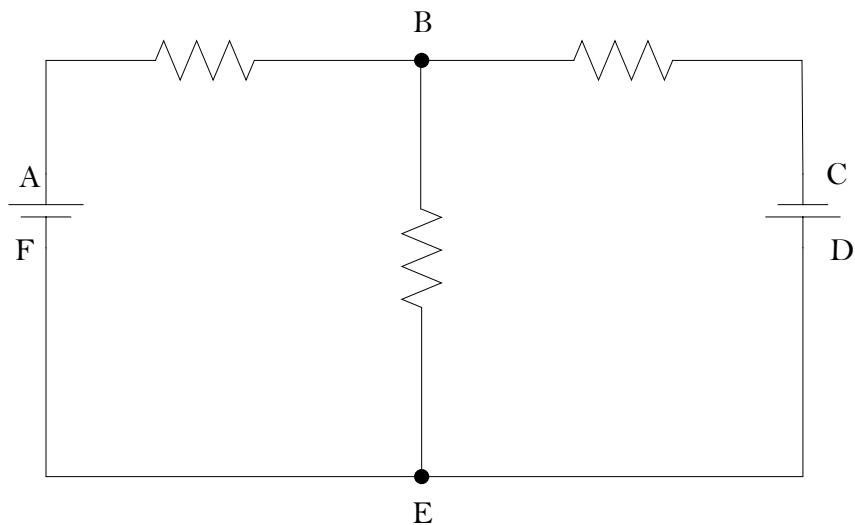
ב. FEBCD

ג. ABCDEFA

ד. BCDEB

ה. ABECD

ו. DEFAB



איור 7-37

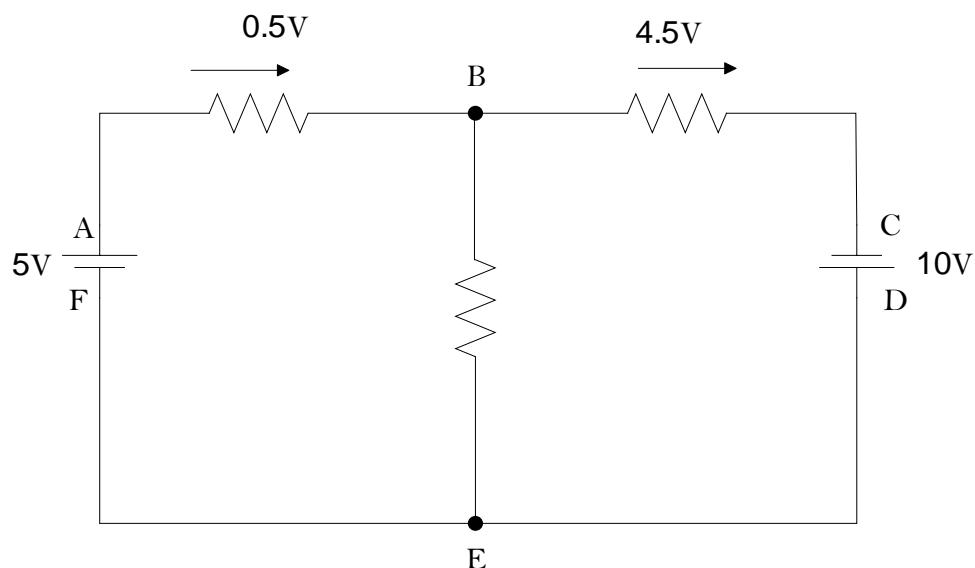
שאלה 7-15

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

- כמה חוגים יש במעגל שבאיור 7-32?
- כמה חוגים יש במעגל שבאיור 7-33?

שאלה 7-18

סמןו את כל הטענות הנכונות:

- חוק הזרמים של קירכהוף קובע כי סכום הזרמים בכל חוג של מעגל חשמלי שווה לאפס.
- חוג הוא מעגל חשמלי שככל לפחות שני מקורות מתח.
- לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום מתחי מקורות המתח בחוג - שווה בגודלו לסכום המתחים על הנגדים באותו חוג.
- כל מעגל חשמלי מכיל לפחות שני חוגים.
- לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום המתחים בכל חוג שווה לאפס.

סיכום

- צומת הוא נקודה במעגל שבו נפגשים לפחות שלושה מרכיבים 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 זה אחר זה, סכום מפלי המתוח של כל הנגדים - שווה למתח המקור.
- כיוון חץ המתוח בנגד - הפוך לכיוון חץ הזרם. אבל במקור מתוח (במעגל, שבו כל הנגדים מחוברים זה אחר זה) - כיוון חץ המתוח זהה לכיוון חץ הזרם. מוסיף חץ "חוט למעגל, וכיוון חץ זה הוא שרירותי. בהתאם לכיוון חץ הייחוס וחץ מתוח, מוסיף סימן מתאים ("+" או "-") לכל חץ מתוח.
- חוג סגור (ובקיצור: חוג) הוא מסלול כלשהו לאורך מעגל חשמלי; החוג הסגור מתחילה בנקודת מסויימת במעגל, ומסתיים באותה נקודת עצמה, כשלאורך המסלול עוברם פעמי אחת דרך כל נקודת (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, מקבילים ומעורבים

בפרק הקודם למדנו את שני חוקי קירכהוף. בפרק זה ניעזר בחוקי קירכהוף כדי לפתור מעגלים המכילים מקור אחד וכמה נגדים. בפרק הבא ניעזר בחוקים אלה כדי לפתור מעגלים מורכבים המכילים כמה חוגים.

1.8 מעגל טורי

נתבונן במעגל שבאיור 1-8, שבו שני הנגדים R_1 ו- R_2 מחוברים בזיה אחר זה. ניווכח מיד כי במעגל זהה, הזרם הנכנס לנקודה כלשהי שווה לזרם היוצא ממנה. מכאן נסיק, שאותו זרם זורם לאורך המעגל כולו.

כדי להיווכח בכך, נשתמש בחוק הזרמים של קירכהוף. נתבונן בנקודה A⁵ כלשהי במעגל, ונבדוק אם הזרם I_1 , שנכנס לנקודה זו, שווה לזרם I'_1 היוצא ממנה. לשם כך נתבונן תחילת במעגל שבאיור 2-8.

במעגל זהה הוספנו את הנגד R_3 , שבו זורם הזרם I_3 . עכשו 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 התנגדות R_3 יותר ויותר. עתה נניח שאנו מנטקים את הנגד R_3 מהמעגל שבאיור 2-8. ניתוק R_3 מהמעגל, הרי זה כאילו מניחים במקומו נגד בעל התנגדות גדולה עד מאד (אינסופית), כך שזרם אינו יכול לעبور דרכו. כלומר, מקבלים:

$$I_3 = 0$$

גם במקרה זה, חוק הזרמים לגבי הנקודה A עדין מתקיים, ולכן נקבל:

$$I_1 = I_2$$

⁵ הנקודה A במעגל מייצגת חותם של התיל המוליך, והוא במעגל מייצג תיל מוליך.

אבל כאשר מנתקים את הנגד R_3 מהמעגל שבאיור 2-8, מקבלים את המנגנון שבאיור 1-8. נסיק מכך כי הזרם I_1 , הנכנס לנקודה A במעגל שבאיור 1-8, שווה לזרם I' היוצא מנקודה זו. (מציר כי אנו מתכוונים לזרם הנכנס לחצר מסויים של המוליך - חצר המיצג על ידי הנקודה A - ולזרם היוצא מחוץ לה).

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 1-8 אין כל נקודות צומת, ולכן אותו זרם זורם לאורך כל המנגנון. מכאן שהזרים הנכנס לנגד R_1 במעגל זה שווה לזרם היוצא מהנגד. וכך הדבר גם לגבי הנגד R_2 . המשקנה שהסקנו לגבי זרם הנכנס לנקודה ויוצא ממנה נכונה אם כן גם לכל נגד:

הזרם, הנכנס לנגד במעגל חשמלי, שווה לזרם היוצא ממנו.

נחזיר ונשרטט מעגל, שיש בו מקור מתח ושני נגדים מחוברים בזיה אחר זה (איור 3-8).

במעגל זה יש חוג אחד בלבד; שני הנגדים מחוברים בזיה אחר זה, ואין ביניהם צמתים. במקרה זה אומרים כי **הנגדים מחוברים בחיבור טורי**, ובקיצור: **הנגדים מחוברים בטור**, או: **הנגדים בטור**. מעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בטור, נקרא **מעגל טורי**.

אם כן, המנגנון שבאיור 3-8 הוא מעגל טורי. ראיינו כי הזרם שווה לאורך כל המנגנון. המשקנה זו נכונה לגבי כל מעגל טורי:

במעגל טורי – אותו זרם זורם לכל אורך המנגנון.

נסיק מכאן:

כאשר נגדים מחוברים בטור, זורם בהם אותו זרם.

ההנגדות השוקלה של נגדים בטור

באיור 4-8 מופיע שוב מעגל ובו שני נגדים (R_1 ו- R_2) מחוברים בטור.

כפי שהסבירנו בסעיפים קודמים, הנקודה B והנקודה C באיור 4-8 הןאותה נקודת מבחינה חשמלית. لكن המمعال שבאיור 4-8 והמمعال שבאיור 5-8 זהים מבחינה חשמלית. פירוש הדבר שבשני המיעלים יש אותו זרם I, ואוטו מתח קיים בין הנקודות A ו-D בשני המיעלים. נבדוק כיצד ניתן את ההנגדות לתנועה ש"מרגייש" כל מטען הנע בمعال. ההנגדות לתנועת מטען בין הנקודות A ו-D שווה להנגדות לתנועתו, שמגלה הנגד R_1 , בתוספת ההנגדות לתנועתו שмагלה הנגד R_2 . אם כן, ההנגדות ש"מרגייש" המטען בין הנקודות A ו-D שווה לסכום ההנגדויות של הנגדים R_1 ו- R_2 . נסמן באמצעות R_{eq} את ההנגדות שכיל מטען "מרגייש" בין הנקודות A ו-D, ונקבל:

$$(8-1) \quad R_{eq} = R_1 + R_2 \quad \text{eq - קיצור של השקול (שקל)}$$

הנגד, שההנגדות R_{eq} לשני הנגדים R_1 ו- R_2 מחוברים בטור; שכן אם נחליף את שני הנגדים R_1 ו- R_2 , המוחברים בטור, בניגוד יחיד שההגדות R_{eq} , לא נשנה דבר מבחינת ההנגדות לתנועת המטענים הנעים בمعال. לא יחול שינוי בזרם I, וגם המתח בין הנקודות F ו-G (שהוא המתח בין הדקי מקור המתח) לא ישתנה כלל.

הمعال, המתקיים על ידי החלפת שני הנגדים בנגד השקול שלהם, נקרא **معال שקול** לمعال המקורי. באיור 6-8 מופיע המمعال השקול לمعال שבאיור 4-8. ההנגדות R_{eq} , השוקלה להנגדות כל הנגדים בمعال, נקראת **ההנגדות השוקלה של המمعال**, ובקיצור: **ההנגדות המمعال**.

נזכיר:

ההגדות השוקלה של שני נגדים, המוחברים בטור, שווה לסכום ההגדויות של שני הנגדים.

דוגמה 8-1

שני נגדים מחוברים בטור. ההגדות אחד הנגדים היא 16Ω , וההגדות הנגד השני - 50Ω . מהי ההגדות השוקלה של שני הנגדים?

פתרון

ההתנגדות השකולה של שני הנגדים שווה לסכום ההתנגדויות שלהם. נתון כי $R_2 = 16\Omega$, $R_1 = 50\Omega$, ולפי משואה (8-1), נקבל:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 16 + 50 = 66\Omega$$

ההתנגדות השakterola של שני הנגדים היא 66Ω .

בדרך שבה מצאנו את ההתנגדות השakterola של שני נגדים, המחברים בטור, ניתן למצאו גם את ההתנגדות השakterola של כל מספר נגדים המחברים בטור. נסיק:

התנגדות השakterola של מספר כלשהו של נגדים, המחברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים.

אם ידועים לנו הסכום U של מפלி המתוח של הנגדים בمعال טורי, והזרם I בمعال זה, ניתן לדעת את גודל ההתנגדות השakterola של נגדים אלה בעזרת שימוש בחוק אום. נקבל:

$$(8-2) \quad R_{eq} = \frac{U}{I}$$

הסכום U של מפלி המתוח של הנגדים בمعال זה שווה למתוח המקור.

דוגמה 8-2

בمعال טורי יש ארבעה נגדים זהים המחברים בטור למקור מתוח של $12V$. התנגדות כל אחד מהנגדים היא 75Ω . מהו הזרם בمعال?

פתרון

התנגדות השakterola של הנגדים היא:

$$R_{eq} = 75 + 75 + 75 + 75 = 75 \times 4 = 300\Omega$$

לפי חוק המתוחים של קירכהוף, סכום מפללי המתוח של הנגדים שווה למתוח המקור: $12V = U$. מכאן שהזרם בمعال הוא, לפי משואה (8-2):

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{12}{300} = 0.04A$$

מהדוגמה האחרונה אנו רואים שכאשר נתונים ארבעה נגדים זהים המחברים בטור, כך שההתנגדות כל אחד מהם היא R , כלומר:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

ההתנגדות השוקלה שלהם נתונה על ידי:

$$R_{eq} = 4R$$

באופן כללי, כאשר נתונים n נגדים מחוברים בטור, כך שההתנגדות כל אחד מהם היא R , ההתנגדות השוקלה שלהם היא:

$$(8-3) \quad R_{eq} = nR$$

הקשר בין המתחים על נגדים, המוחברים בטור

ראינו כי כאשר נגדים מחוברים בטור, ככלם זורם אותו זרם. עכשו נרשום את הקשר בין גודל המתחים של הנגדים המוחברים בטור לבין התנגדויות הנגדים:

היחס בין המתחים על נגדים, המוחברים בטור, שווה ליחס בין התנגדויות הנגדים.

כדי להיווכח בנכונות הקשר, נסתכל שוב באIOR 4-8. לפי חוק אומ, המתח U_1 של הנגד 1 הוא:

$$U_1 = IR_1$$

ו המתח U_2 של הנגד 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 המוחברים בטור הוא כיחס ההתנגדויות של נגדים אלה.

דוגמה 8-3

נתון המעגל שבאייר 8-8, ובו $U = 12V$, $R_1 = 8\Omega$, $R_2 = 16\Omega$. כן נתון שהמתח של הנגד 1 הוא $8V$. מהו המתח של הנגד 2 ?

פתרון

נשתמש במשוואת (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, המתחבים בטור, לבין הספק המקור

כדי למצוא את הקשר בין הספקי צרכנים המתחבים בטור, לבין הספק המקור, נסתכל בمعالג שבאיור 8-8.

בمعالג טורי זה יש שני צרכנים (או נגדים) המתחבים בטור, ולכן זרם המمعالג I זורם בכל אחד מהם. ההספק החשמלי נתון במשווהה (6-3): $U = P$. מכאן שההספק P_1 של הצרוך R_1 הוא:

$$P_1 = IU_1$$

ההספק P_2 של הצרוך R_2 הוא:

$$P_2 = IU_2$$

מתוך המקור הוא U , והספק המקורי P (הנקרא גם הספק המمعالג) 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 ראיינו כי הספק הצרוך R_1 $P_1 = IU_1$, והספק הצרוך 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 בمعالג טורי, המכיל שני צרכנים, הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים. באופן כללי, מקבלים:

בمعالג טורי – הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים.

טעונה זו נוכנה לכל מספר של צרכנים, ולא רק לשני צרכנים.

דוגמה 4-8

- א. חשבו את ההספק של כל צרכן במעגל שבאיור 9-8.
- ב. חשבו את סכום ההספקים של הצלכניים במעגל זה.
- ג. מהו הספק המקור במעגל זה?

פתרון

א. שני הצלכניים במעגל מחוברים בטור. ההתנגדות השקולת 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 הספק הצלכניים:

הספק של צרכן, שהተנגדתו R , נתון במשוואה (6-3):

$$P = IU = I^2R$$

כאשר I הוא הזרם בצלבן, ו- U הוא המתח של הצלבן.

מכאן שהספק P_1 של הצלבן R_1 הוא:

$$P_1 = I^2R_1 = 2^2 \times 50 = 4 \times 50 = 200W$$

והספק P_2 של הצלבן R_2 הוא:

$$P_2 = I^2R_2 = 2^2 \times 60 = 4 \times 60 = 240W$$

ב. סכום הספק הצלכניים הוא לפי המשוואה (8-5):

$$P_1 + P_2 = 200 + 240 = 440W$$

ג. מתח המקור הוא 220V, וזרם המעלג הוא 2A. הספק המקור הוא:

$$P = IU = 2 \times 220 = 440W$$

אנו רואים כי הספק המקור שווה לסכום הספק הצלכניים.

תרגול

שאלה 1-8

- סמן 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 בمعال טורי הוא יחסי ההתנגדויות של הנגדים.
ד. יחס המתחים של הנגדים בمعال טורי הוא יחסי ההתנגדויות של הנגדים.

שאלה 8

"לנגד יש התנגדות, ולכן זרם היוצא מנגד קטן מהזרם הנכנס לנגד".
נכון או לא?

שאלה 9

הזרם הנכנס לנקיודה, שאינה נקודת צומת...
א. גדול מהזרם היוצא מנקיודה זו.
ב. שווה לזרם היוצא מנקיודה זו.
ג. קטן מהזרם היוצא מנקיודה זו.

שאלה 10

כמה צמתים יש בمعال טורי?

שאלה 11

בمعال חשמלי יש מקור יחיד.
א. האם מתחת המקור בمعال טורי יכול להיות קטן מסכום המתחים של הנגדים בمعال?
ב. האם מתחת המקור בمعال טורי יכול להיות גדול מהמתה של הנגד השקל של המمعال?

שאלה 12

"אם שני נגדים זהים מחוברים בטור בمعال טורי, המתה של כל אחד מהם שווה". נכון או לא?

שאלה 13

באיזה נגד בمعال שבאיור 10-8 זורם הזרם הגדל ביותר? (סמן את התשובה הנכונה.)
א. בניגוד שהተנגדותן Ω_8 כי הוא הקרוב ביותר להדק החיווי של מקור המתה.
ב. בניגוד שהተנגדותן היא הגדולה ביותר.
ג. בניגוד שהተנגדותן Ω_{16} , כי הוא הקרוב ביותר להדק השילילי של מקור המתה.
ד. בניגוד שהተנגדותן Ω_{75} , הרחוק ביותר ממוקור המתה.
ה. בכל הנגדים זורם אותו זרם.

שאלה 8-8

מהי ההתנגדות השකולה של הנגדים בمعال שבאיור 8-10?

שאלה 8-9

ההתנגדות השתקולה של מעגל טורי היא 100Ω . מתח המקור הוא $12V$. מה הזרם בمعال?

שאלה 8-10

ההתנגדות של מעגל טורי היא 50Ω . הזרם בمعال הוא $2A$. מהו מתח המקור?

שאלה 8-11

חשבו את המתח U_1 ואת המתח U_2 בمعال שבאיור 11-8.

שאלה 8-12

חשבו את הזרם בمعال שבדוגמה 3-8.

שאלה 8-13

"ההתנגדות השתקולה של נגדים בטור - גדולה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים מחוברים בטור". נכון או לא?

שאלה 8-14

שני צרכנים מחוברים בטור בمعال טורי. התנגדות צרךן אחד היא 16Ω . וההנוגדות הצריכה השנייה היא 24Ω . מתח המקור הוא $12V$.

- א. חשבו את ההספק של כל צרךן.
- ב. חשבו את סכום הספקי הצרכנים.
- ג. מהו הספק המקור?

שאלה 8-15

שני נגדים, R_1 ו- R_2 , מחוברים בטור, כמפורט באירור 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.

- מהו התנגדות 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, כמפורט באירור 8-8. הזרם במעגל הוא 1A. סמן את כל הטענות הנכונות.

א. ההספק P_1 של הנגד R_1 הוא $I^2 R_1$.

ב. ההספק P_2 של הנגד R_2 הוא $\frac{U^2}{R_1+R_2}$.

ג. סכום הספקי הנגדים הוא UI.

ד. סכום הספקי הנגדים הוא $\frac{U^2}{R_1+R_2}$.

ה. סכום הספקי הנגדים הוא $I^2(R_1 + R_2)$.

ו. סכום הספקי הנגדים הוא $\frac{U}{(R_1+R_2)^2}$.

ז. סכום הספקי הנגדים הוא $I(R_1 + R_2)^2$.

 8.2 התנגדות התקן

באיור 12-8 אנו רואים מעגל שבו מקור המתח מחובר לצרכן (נגד) R באמצעות תילים מוליכים ("חותי חשמל"). תרשימים המعال מובאים באירור 13-8. למדנו לפתור מעגל צזה, 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 לתנגדות של הcrcנים במעגל. אם כן, לרוב אין צורך להתחשב בה התנגדות התילים המוליכים, כאשר פותרים את המעגל. אבל علينا לזכור כי התנגדות של התילים המוליכים אינה אפס, ולפעמים יש להתחשב בה. נבהיר זאת.

לממנו כי ככל שתיל מוליך ארוך יותר, התנגדותו גדולה יותר. אם במעגל חשמלי יש תיילים ארוכים, אין להזניח את התנגדות התיילים, ויש להתחשב בה כמשמעותם את המעגל. התנגדות התיילים נקראת **התנגדות הקו**, ובמעגל טורי היא שווה לסכום ההתנגדויות של התיילים המוליכים. כאשר מתחשבים בהતנגדות הקו, מתייחסים לתיל המוליך – אולי היה נגד. באמצעות R_1 נסמן את סכום ההתנגדויות של התיילים המוליכים.

המטענים, הנעים במעגל, צריכים להתגבר על ההתנגדות הנגד R וכן על ההתנגדות הקו R_1 . מכאן שסכום ההתנגדויות במעגל זה הוא הסכום של ההתנגדות הנגד וההתנגדות הקו. لكن נסיק כי הנגד והתיילים המוליכים מחוברים בטור.

ראינו כי ההתנגדות השוקלה של גדים בטור גדולה מההתנגדות כל אחד מהנגדים. מכאן שההתנגדות השוקלה של הרצן R והנגד הנוסף R_1 , המוחברים בטור, גדולה מההתנגדות הרצן. למשל, ההתנגדות השוקלה $R + R_1$ של המעגל שבאיור 8-13 גדולה מההתנגדות הרצן.

בדומה להתנגדות כל נגד, ההתנגדות הקו (כלומר: ההתנגדות התיילים המוליכים) תליה בדברים הבאים:

- אורך התיילים המוליכים;
- שטח החתך של התיילים המוליכים;
- החומר ממנו עשויים התיילים המוליכים (כלומר: הה Tangentesa הסוגלית שלהם);
- הטמפרטורה של התיילים המוליכים.

דוגמה 8-5

כדי לפרוץ דרך בסלע, משתמשים בנפץ חשמלי. הפעלת הנפץ נעשית ממחרך, מטעמי בטיחות (כדי למנוע פגעה בפעולת הנפץ). ההתנגדות הנפץ היא 4Ω . הנפץ מחובר למקור מתח של 76 , באמצעות תיילים מוליכים העשויים נחושת, שטח החתך שלהם קבוע.

התנגדות התיל המוליך, המוחבר בין הבדיקה החיבורית של מקור המתח לבין הנפץ – 1Ω . תיל שני, באותו אורך, מ לחבר את הנפץ להדק השילוי של מקור המתח. המעגל החשמלי המתאים מתואר באיזור 8-14.

א. מהי ההתנגדות הקו?

ב. חשבו את ההתנגדות המעגל.

- ג. חשבו את הזרם במעגל.
ד. מה היה הזרם במעגל, אילו לתילים המוליכים לא הייתה התנגדות?

פתרון

א. תיל מוליך אחד מחבר את הבדיקה החיבור של מקור המתח אל הנפץ, ותיל מוליך שני מחבר את הנפץ להידק השילילי של מקור המתח. נתון כי לשני התילים אותו אורך, אותן שטח חתך, והם עשויים אותו חומר (נוחות). מכאן נקבל כי לשני התילים יש אותה התנגדות. נתון כי התנגדות אחד התילים היא Ω . נסמן באמצעות R_2 את התנגדות השකולה של שני התילים. נקבל אפוא כי התנגדות שני התילים היא $R_2 = 2\Omega$. זהה ההתנגדות הנקו.

ב. הנפץ מחובר בטור לתילים המוליכים, והתנגדות השකולה שלהם (כלומר, ההתנגדות המעגל) היא:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 4 + 2 = 6\Omega$$

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 ההתנגדות, הזרם במעגל היה 1.5A במקום A.

להתנגדות הנקו יש חשיבות רבה במיוחד בקווי המתח, שבין תחנת הכוח לבין הרכנים. קוויים אלה נמתחים לאורכו עשרה קילומטרים, כי לא כל הרכנים מצויים ליד תחנת הכוח. קוויים אלה הם "הヅבצן" הגדול של האנרגיה החשמלית, שעוברת ממוקם יוצרה (כלומר, מתחנת הכוח) אל הרכנים.

דוגמה 8-6

חשבו את הספק הנפץ ואת הספק התילים המוליכים במעגל שתואר בדוגמה 8-5.

פתרון

בדוגמה 5-8 נתון כי התנגדות הנפץ היא $\Omega_1 = 4\Omega$. בסעיף ג' של הפתרון מצאנו, כי הזרם בمعالג הטורי (ולכן גם הזרם בנפץ, המחבר בمعالג זה) הוא $A=1A$. למדנו כי ההספק של נגד נתון במשוואה (6-3):

$$P = I^2 R$$

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 $\Omega_2 = 2\Omega$, וההספק שלהם הוא:

$$P_2 = I^2 R_2 = 1^2 \times 2 = 1 \times 2 = 2W$$

אנו רואים כי ההספק, המתבצע בתילים המוליכים ($P_2 = 2W$), שווה למחצית ההספק הנמסר לנפץ ($P_1 = 4W$).

הנעת מכונית בעזרת כבליים

לא פעם אנו רואים בשולי הכביש שתי מכוניות שעומדות זו מול זו (איור 15-8), כשמיcosa המנוע של כל מכונית מארם, והמצברים של שתי המכוניות מחוברים באמצעות כבליים (הנקראים גם כבלי התנועה).

יש שני סוגי עיקריים של כבליים להנעת מכוניות: כבלים דקים וכבלים עבים. נבדוק באיזה סוג עדיף להשתמש להנעת מכונית.

הනעת מכונית נעשית על ידי מצבר, שהוא התקן המפריד מטענים. את המצבר אפשר לטעון שוב ושוב, כאשר הוא "מתroxן". אם המצבר מכונית "מתroxן", ואין טענים אותו, המכונית "נתקעת"; כי כדי שהמתנע (starter) של המכונית יוכל להניע את מנוע המכונית, יש לחבר את המתנע למצבר תקין.

נניח כי נהג השair בטעות את אורות מכוניותו דלוקים, ומctrבר המכונית "התroxן". במקרה זה, אפשר לחזור ולטעון את המצבר בדרך זו: בעזרת כבליים, מחברים את מתנע המכונית למצבר תקין של מכונית אחרת. (למעשה, מחברים את הכבלים להדק המצבר של המכונית התקועה, כי אלה נקודות החיבור למתנע). המתנע מתנע את המנוע, והמכונית יכולה לנסוע. תוך כדי נסעה, המצבר שהtaroxן – נטען מחדש.

המעגל החשמלי המתקבל – מתואר באיור 16-8. אנו מתעלמים אפוא מהמצבר ש"התroxן" במכונית התקועה, ומניחים שהוא נתק. המתנע הוא הדרוש במעגל זה, ובכלי ההנעה הם התילים המוליכים. ככל שהcabliים עבים יותר, התנגדות הקו קטנה יותר, ואז המתח המגיע להדק המתנע - גדול יותר, ויש סיכוי טוב יותר להניע את המכונית.

המסקנה היא שעדייף להשתמשocabliים עבים להנעת מכונית שהמצבר שלה "התroxן". אגב, אם משתמשיםocabli דק מדי לצורך התנועה, עלול הcabl להיתרך בגל/zrm הגובה (110A ויותר).

 **שאלה 8-18**

כאשר מתחשבים בהתנגדות הקו, מתייחסים לתיל המוליך אליו היה:

- | | |
|--------|-------------|
| א. נגד | ג. מקור מתח |
| ב. נתק | ד. מבದ |

 שאלה 8-19

סמן את האורמים שבהם תליה התנגדות הקו (בנחה שטמפרטורת הקו קבועה).

- א. אורך התילים המוליכים.
- ב. ההתנגדות הצריך המחבר בטור לתילים המוליכים.
- ג. שטח החתך של התילים המוליכים.
- ד. מתח מקור המחבר לצריך באמצעות התילים המוליכים.
- ה. ההתנגדות הסגוליית של התילים המוליכים.
- ו. הזרם במעגל שבו נמצאים התילים המוליכים.

 שאלה 8-20

מקור מתח של $12V$ מחובר לצריך, $R=50\Omega$, באמצעות תילים מוליכים, כמפורט באIOR 13-8.

- א. הראו כי הזרם במעגל לא יכול להיות גדול מ- $0.24A$.
- ב. מה הזרם במעגל, אם ההתנגדות הקו היא 0Ω ?

 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 ההתנגדות הקו, בהנחה כי התילים המוליכים ישרים.
- ב. חשבו את ההתנגדות המעגל (התנגדות הרמקול והתנגדות הקו).

 שאלה 8-22

רמקול, שהתנגדותו 16Ω , מחובר למקור מתח של $12V$. מה ההתנגדות הקו, כשהמתוח על הרמקול הוא $7V$?

 שאלה 8-23

מקור מתח של $V=12$ מחובר לצרכן, $\Omega=R=50$, באמצעות תילים מוליכים. התנגדות הקו היא $\Omega=0.5$. חשבו את הספק הצרוך ואת הספק הקו.

8.3 חיבור נגדים במקביל

עד כה למדנו לזהות נגדים המוחברים בטור, ולהחשב את התנגדותם השקולה. עכשו נלמד צורה נוספת של חיבור נגדים. לשם כך נסתכל במעגל שבאיור 17-8.

במעגל זה יש שתי נקודות צומת: B ו-C. הנגד R_1 מחובר בקצתו האחד לנקודת הצומת B ובקצתו השני – לנקודת הצומת C. גם הנגד R_2 מחובר לנוקודות הצומת B ו-C. כלומר, קצה אחד של כל אחד מן הנגדים R_1 ו- R_2 מחובר לנוקודת הצומת B, והקצה השני של כל אחד מהם – מחובר לנוקודת הצומת C.

חיבור כזה של נגדים נקרא **חיבור במקביל**; והנגדים, במרקחה זה, **מחוברים במקביל**. מעגל שמלי, שבו כל הנגדים מחוברים במקביל, נקרא **מעגל מקביל**.

בדיוון זה הנחנו כי התנגדות התילים המוליכים זניחה. לו לא כן, היינו מקבלים שהמעגל שבאיור 17-8 אינו מעגל מקביל. במעגל מסווג זה (שאינו טורי ואינו מקביל)ណזון בהמשך.

כאמור, הנגדים R_1 ו- R_2 במעגל שבאיור 17-8 – מחוברים לאותן נקודות B ו-C. בין שתי הנקודות יש מתח מסוים, ולכן המתח שווה בשני הנגדים האלה. מכאן נסיק כי המתח שווה בנגדים המוחברים במקביל. במעגל מקביל – המתח של כל אחד מהנגדים שווה גם למתח המקור.

התנגדות השקולה של שני נגדים המוחברים במקביל

כבר למדנו לחשב את ההתנגדות השקולה של נגדים המוחברים בטור. עכשו נחשב את ההתנגדות השקולה של שני נגדים המוחברים במקביל.

באיור 18-8 מופיע מעגל, שבו שני נגדים המוחברים במקביל. באיור 19-8 מופיע מעגל, שבו מחובר נגד R_{eq} בין הנקודות B ו-C. ההתנגדות הנגד R_{eq} שקולת להתנגדות שני הנגדים המוחברים במקביל. מתח המקור U שווה בשני המעגלים האלה.

כדי שההתנגדות R_{eq} – במעגל שבאיור 19-8 – תהיה ההתנגדות השקולה של שני הנגדים במעגל שבאיור 18-8, חייבת להתקיים שתי דרישות:

- א. הזרם I בשני המוגלים יהיה אותו זרם;
 ב. המתח בין הנקודות B ו-C בשני המוגלים – יהיה אותו מתח.

כדי למצוא את ההתנגדות השקולה, נחשב תחילה את הזרם בכל אחד מהנגדים שבאיור 18. שני הנגדים מחוברים במקביל במוגל מקבילי, ולכן המתח של כל אחד מהנגדים שווה למתח המקורי.

לפי חוק אום, הזרם I_1 בנגד R_1 – במוגל שבאיור 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 במוגל שבאיור 18 היא צומת. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת זה, הוא I ; וכך סכום הזרמים, היוצאים מצומת זה, הוא $I_2 + I_1$. לפי חוק הזרמים של קירכהוף, קיבל:
 $I = I_1 + I_2$

נציב במשוואת 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 לסוגרים, ונקבל:

$$I = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

עתה נתבונן במוגל שבאיור 19-8. נניח כי הנגד R_{eq} במוגל זה – הוא אכן הנגד השקול לשני הנגדים R_1 ו- R_2 , המוחברים במקביל במוגל שבאיור 18-8. לפי חוק אום, הזרם במוגל זה הוא:

$$I = \frac{U}{R_{eq}}$$

אם R_{eq} היא ההתנגדות השקולה, כי אז לפי ההגדרה של ההתנגדות השקולה, הזרם I והמתח U במוגל השקול (שbaior 9-8) שוים לזרם I ולמתח U במוגל המקורי (שbaior 18-8).
 כלומר, I ו- U שוים בשתי המשוואות האחרונות שקיבלנו.

ליק נוכל לרשום:

$$\frac{U}{R_{eq}} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

נמצא ב-U את שני האגפים במשווהה האחרון ונקבל:

$$(8-6) \quad \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

באמצעות המשווהה האחרון נוכל לחשב את ההתנגדות השקולת של שני נגדים במקביל, אם נדע את ההתנגדות של כל אחד מנגדים אלה.

דינמה 7-8

במגל שבאיור 20-8 מחוברים שני נגדים במקביל: $U = 3V$, $R_2 = 4\Omega$, $R_1 = ?$

א. חשבו את ההתנגדות השקולת של שני הנגדים.

ב. שרטטו מעגל, שבו מחובר הנגד השקול במקום שני הנגדים.

פתרון

א. את ההתנגדות השקולת של שני נגדים במקביל – נחשב בעזרת משווהה (8-6):

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

נציב במשווהה 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. באיזור 21-8 משורטט מעגל, שבו הנגד השקול R_{eq} מחובר במקום שני הנגדים שבאיור 20.

בדוגמה الأخيرة חישבנו תחילה את $\frac{1}{R_{eq}}$, ורק אז מצאנו את R_{eq} . עכשו נמצא משווהה,

שבאמצעותה נוכל לחשב מיד את ההתנגדות השקולת של שני נגדים, בלי שנצרך לחשב

תחילה את $\frac{1}{R_{eq}}$. לשם כך נרשום שוב את המשווהה, שבאמצעותה חישבנו את ההתנגדות

הסקולה:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

נרשום מכנה משותף באגף ימין של המשווהה:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}$$

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: **התנגדות השkolah של שני נגדים במקביל - שווה למינימום מכפלת התנגדויות המוחולקות בסכום התנגדויות.**

דוגמה 8-8

חזרו וחשבו – באמצעות משואה (7-8) את התנגדות השkolah של שני הנגדים - $R_2 = 4\Omega$, $R_1 = 3\Omega$ – המוחברים 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 קיילנו כי התנגדות השkolah היא 1.7Ω .

בשתי הדריכים קיילנו שההתנגדות השkolah של שני הנגדים $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 4\Omega$, המוחברים במקביל, היא 1.7Ω . אנו רואים, שההתנגדות השkolah של שני הנגדים קטנה מהתנגדות של כל אחד מהנגדים. תוצאה זו אינה מכרית. אפשר להראות:

התנגדות השkolah של שני הנגדים במקביל קטנה מינימום מכפלת התנגדויות של הנגדים המוחברים במקביל.

דוגמה 8-9

שני נגדים מחוברים במקביל. התנגדות אחד הנגדים היא $\Omega 100$, וההתנגדות הנגד השני - $\Omega 50$. האם ההתנגדות השוקולה שלהם יכולה להיות גדולה מ- $\Omega 60$?

פתרון

לא. ההתנגדות השוקולה של שני הנגדים $\Omega 100$ ו- $\Omega 50$ חייבת להיות קטנה מ- $\Omega 50$, ולכן אינה יכולה להיות גדולה מ- $\Omega 60$.

עד כה מצאנו את ההתנגדות השוקולה של שני נגדים במקביל. ההתנגדות השוקולה 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 $\frac{1}{R_{eq}}$ נקרא ההופכי של ההתנגדות R . מכאן שההופכי של $\frac{1}{R_{eq}}$ של ההתנגדות השוקולה R_{eq} , שווה לסכום ההופכים של ההתנגדויות המוחברות במקביל. גם במקרה של שלושה נגדים ניתן לקבל משואה, שבזורה אפשר לחשב מיד את R_{eq} ,igli לחשב תחילה את ההופכי $\frac{1}{R_{eq}}$. אבל במקרה זה, המשואה המתבקשת מסובכת למדי.

אפשר לחשב את ההתנגדות השוקולה R_{eq} של שלושה נגדים, המוחברים במקביל, גם בדרך נוספת: תחילה נחשב את ההתנגדות השוקולה $R_{1,2}$ של שני הנגדים R_1 ו- R_2 , המוחברים במקביל. בשלב השני נחשב שוב את ההתנגדות השוקולה של שני נגדים: הנגד $R_{1,2}$ והנגד R_3 . אם כן, ההתנגדות השוקולה R_{eq} של שלושת הנגדים במקביל נתונה על ידי:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_3}$$

לפנינו אפוא שני נגדים המוחברים במקביל: $R_{1,2}$ ו- R_3 . לפי ההסבר הקודם, ההתנגדות השוקולה R_{eq} של שתי ההתנגדויות $R_{1,2}$ ו- R_3 , המוחברות במקביל, קטנה מכל אחת מההתנגדויות הללו, ולכן R_{eq} קטנה מ- $R_{1,2}$. נסיק באופן כללי:

כאשר מוסיפים נגד במקביל לקבוצת נגדים בمعالן חשמלי, ההתנגדות השוקולה של קבוצת הנגדים החדשה - קטנה מזו של קבוצת הנגדים המקורי.

כאשר נתונים שלושה נגדים זרים ($R_1 = R_2 = R_3 = R$) המוחברים במקביל, נחשב את ההתנגדותם השוקולה 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 נגדים זההים מחוברים במקביל הוא n , כך שההתנגדות כל אחד מהם – R , ההתנגדות השקולת שלהם היא:

$$(8-9) R_{eq} = \frac{R}{n}$$

דוגמה 8-10

נתונים עשרה נגדים מחוברים במקביל. התנגדות כל נגד היא 50Ω . מהו ההתנגדות השקולת שלהם?

פתרון

נתונים עשרה נגדים, ככלומר: $n=10$. ההתנגדות כל נגד היא 50Ω . הגדים מחוברים במקביל, ומכאן שההתנגדות השקולת שלהם היא לפי משוואה (8-9):

$$R_{eq} = \frac{R}{n} = \frac{50}{10} = 5\Omega$$

הקשר בין הזרמים בנגדים מחוברים במקביל

ראינו שכאשר נגדים מחוברים במקביל, לכל הנגדים יש אותו מתח. עתה נמצא מהו הקשר בין הזרמים בנגדים, מחוברים במקביל, להתנגדויות של נגדים אלה. לשם כך נסתכל בمعال' שבאיור 8-22. בمعال' זה מסומנים הזרמים, המתחים וההתנגדויות של שני נגדים, המוחברים במקביל.

הקשר בין הזרמים בנגדים, מחוברים במקביל, לבין ההתנגדויות הנגדים הוא:

$$(8-10) \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

כasher I_1 הוא הזרם בנגד R_1 , $-I_2$ הוא הזרם בנגד R_2 .

ככלומר:

היחס בין הזרמים בנגדים, מחוברים במקביל, הפוך ליחס בין ההתנגדויות של נגדים אלה.

כדי להיווכח בנכונות הקשר, נستכל שוב במעגל המקביל שבאיור 22-8. למדנו שהמתה של כל אחד מהנגדים במעגל זה הוא U . השתמש 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, המתחים במקביל, הפוך ליחס התנגדויות של נגדים אלה.

דוגמה 8-11

- א. חשבו את הזרמים I_1 ו- I_2 במעגל שבאיור 23-8.
ב. מהו מתח המקור במעגל זה?

פתרון

- א. הנגדים R_2 ו- R_1 מחוברים במקביל, אך יוס הזרמים בנגדים הפוך ליחס התנגדויות הנגדים, ולכן – לפי משווהה (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, מתקבלים:

$$I = I_1 + I_2 = 6A$$

נציב I_2 במקום I_1 במשווהה الأخيرة, 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 השקולת 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 הזרים במעגל מקבילי

למדנו כי במעגל טורי - סכום ההספקים של הזרים שווה להספק המקור. נבדוק אם כך הדבר גם במעגל מקבילי. לשם כך נסתכל במעגל שבאיור 8-24. זהו מעגל מקבילי, שבו הזרים R_1 ו- R_2 מחוברים במקביל. לכן המתח U של כל אחד מהזרים שווה למתח המקור.

הספק הדרוש R_1 הוא $P_1 = UI_1$, והספק הדרוש 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, $I_1 + I_2 = I$. 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 הזרים.

תוצאה זו נcona לכל מספר של זרים המתחברים במקביל במעגל מקבילי.

דוגמה 8-12

נורה ותנור חימום מחוברים במקביל למקור מתח של 230V. על הנורה רשום $W/75V/230\Omega$, וההתנגדות התנור בעת פעולתו היא 30Ω .

מהו ההספק שמספק המקור למעגל?

פתרון

המתוח על הנורה שווה למתח המקור, כי המעגל מקבילי. מכאן שהספק הנורה (P_1) הוא ההספק הרשום עליו: $W = P_1 = 75W$. עכשו 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 הcrcנים. אך ההספק, שמספק המקור, הוא:

$$P = P_1 + P_2 = 75W + 1763.3W = 1838.3W$$

לחיבור כמהcrcנים במקביל יש שימושים רבים. זהוי צורת החיבור משתמשים בה בדרך כלל בבתיים פרטיים ובמפעלים. הסיבות העיקריות לחיבור crcנים במקביל הן:

- כאשר מחברים במקביל CRCN נוסף למעגל מקבילי, המתח והזרם בכל אחד מהcrcנים האחרים – אינם משתנים. נסביר זאת:

המתוח של כל CRCN במעגל מקבילי שווה למתח המקור. אם מתח המקור אינו משתנה, גם המתח של כל CRCN אינם משתנה. לפי חוק אום, הזרם ב_CRCN נקבע רק על ידי המתח שלו והתנגדותו. מכאן שגם המתח של CRCN אינם משתנה, גם הזרם העובר דרכו אינם משתנה.

- כאשר אחד crcנים במעגל מקבילי מתקלקל, וזרם אינם יכול לעبور דרכו (למשל, כאשר נורה "נשrapת"), שאר crcנים יכולים להמשיך לפעול כרגע.

לעומת זאת, אם נחבר CRCN נוסף בטור במעגל טורי, הזרם במעגל (כלומר, הזרם בכל אחד מהcrcנים) יקטן. נסביר זאת:

הוספת CRCN בטור מגדילה את התנגדות המעגל כולו, וכתוצאה לכך הזרם במעגל – קטן. גם מפל המתח של כל CRCN יהיה קטן יותר במעגל טורי כזה. כדי,crcנים רבים דרוש מתח מסוים וזרם מסוים כדי שיפעלו בצורה תקינה, لكن הוספת CRCN בטור – יכולה להפריע לפעולתם התקינה של crcנים.

מלבד זאת, במעגל טורי – אם אחד crcנים מתקלקל, נוצר נתק במעגל, ושאר crcנים אינם יכולים להמשיך לפעול.

בטבלה 1-8 נתונה השוואה בין מעגל טורי למעגל מקבילי.

הגודל הפיזיקלי	מעגל טורי	מעגל מקבילי
מתוח	יכול להיות שונה עם כל נגדים	שווה בכל אחד מהנגדים
זרם	שווה בכל הנגדים	יכול להיות שונה בכל נגד
התנגדות שකולה של המעגל	- גודלה מכל אחת מההנגדויות של הנגדים במעגל - שווה לסכום ההנגדויות של הנגדים	- קטן מכלי אחת $R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$ 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 1-8 השוואת בין מעגל טורי למעגל מקבילי

דוגמאות מעשיות לחיבור צרכנים**חיבור הצרכנים בביטנו**

ראינו את היתרונות של חיבור צרכנים במקביל. ואכן בביטנו אנו מוצלים 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 שכשר אחד המכשירים בבית מתקלקל (למשל, כאשר גורה "נשרפת", או כאשר יש תקלת באחד המכשירים החשמליים שבאיור 8-25), שאר המכשירים בבית - ממשיכים לפעול כרגע.

מערכת החשמל במכונית

גם הצרכנים במכונית מחוברים במקביל למצבור המכונית. וגם במכונית, אם פנס "נשרף", שאר הצרכנים ממשיכים לפעול ללא שינוי. לדוגמה, שאר הפנסים של המכונית ממשיכים להאיר, גם לאחר שפנס אחד "נשרף". באIOR 8-26 נתון תרשים של מערכת החשמל במכונית.

ראינו שכשר מחברים צרכנים במקביל במעגל מקבילי, כל צrank פועל בצורה "עצמאית", ואין מושפע מהזרים האחרים במעגל. ובכל זאת בדרך כלל איןנו יכולים להפעיל בbite את כל המכשירים החשמליים בביטנו, כי כך נגרום להפסקת חשמל. הסיבה לכך היא שכשר מחברים צrank נוספים במקביל, הזרם הכללי במעגל – גידל. נסביר זאת.

כפי שראינו, ההתנגדות השוקלה של מעגל מקבילי – קטנה כאשר מחברים במקביל צrank נוספים במעגל. לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל – גידל, כאשר ההתנגדות השוקלה קטנה; לכן הוספה צrank במקביל – מגדילה את הזרם הכללי במעגל. אם הזרם הכללי במערכת החשמל הביתיית גדול מדי, התילים המוליכים עלולים להתחכם מאוד, כפי שראינו בפרק 5. כזכור, מוסףים נתיכים כדי למנוע זאת. נתיכים אלה יכולים לנתק את החשמל בבית, אם הזרם גדול מדי.

 **שאלה 8-24**

סמנו את כל ההשלכות הנכונות.

כשנגידים מחוברים במקביל בمعال מקבילי' ...

- א. זורם בהם אותו זרם.
- ב. המתח שלהם שווה.
- ג. ההתנגדות שלהם שווה.
- ד. המתח של כל נגד שווה למתח המקורי.
- ה. ההתנגדות השקולת שלהם שווה לסכום ההתנגדויות שלהם.

8-25 שאלה

שני נגדים מחוברים במקביל. ההתנגדות נגד אחד היא 50Ω , וההתנגדות הנגד השני הוא 75Ω . מה ההתנגדות השקולת שלהם שווה לסכום ההתנגדויות שלהם?

8-26 שאלה

התנגדות השקולת של שני נגדים, המוחוברים במקביל, היא 100Ω . סמנו את הטענה הנכונה.

- א. ההתנגדות אחד משני הנגדים קטנה מ- 100Ω .
- ב. ההתנגדות כל אחד מהנגדים קטנה מ- 100Ω .
- ג. ההתנגדות כל אחד מהנגדים גדולה מ- 100Ω .
- ד. סכום ההתנגדויות של הנגדים הוא 100Ω .

8-27 שאלה

סמנו את כל המשוואות הנכונות של התנגדות שקולת של שני נגדים, R_1 ו- R_2 , המוחוברים במקביל.

$$A. R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$B. \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$C. R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$D. R_{eq} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

8-28 שאלה

ברשותכם נגדים של 16Ω , ועליכם לקבל ההתנגדות של 8Ω . כמה נגדים (מאלה שברשותכם) יש לחבר במקביל כדי לקבל את ההתנגדות הרצויה?

8-29 שאלה

מעגל מכיל שני נגדים מחוברים במקביל למקור מתח של $7V$. התנגדות נגד אחד היא $\Omega 180$ וההתנגדות נגד השני היא $\Omega 90$.

- מהי ההתנגדות השוקולה של שני הנגדים?
- חשבו את הזרם בכל נגד.
- מהו הזרם היוצא מהמקור?

שאלה 8-30

קומקום, שהતנגדותו $\Omega 20$, מחובר במקביל לתנור חימום שהתנגדותו $\Omega 30$, ולטורה שהתנגדותה $\Omega 400$. מהי ההתנגדות השוקולה של שלושת הזרים האלה?

שאלה 8-31

טלוויזיה, מחשב ומוכנת כביסה מחוברים במקביל. התנגדות הטלוויזיה - $\Omega 700$, התנגדות המחשב - $\Omega 650$, וההתנגדות מוכנת הכביסה - $\Omega 20$.

בלי לחשב את ההתנגדות השוקולה של שלושת הזרים האלה, סמנו את הטענה הנכונה.

- התנגדות השוקולה גדולה מ- $\Omega 700$.
- התנגדות השוקולה קטנה מ- $\Omega 20$.
- התנגדות השוקולה גדולה מ- $\Omega 1370$.
- התנגדות השוקולה קטנה מ- $\Omega \frac{1}{1370}$.

שאלה 8-32

"הספק המקור שווה לסכום הספקי הזרים במעגל".

סמננו את כל הטענות הנכונות לגבי המשפט שלמעלה.

- המשפט נכון לגבי מעגל טורי.
- המשפט נכון לגבי מעגל מקביל.
- המשפט אינו נכון לגבי מעגל טורי.
- המשפט אינו נכון לגבי מעגל מקביל.

שאלה 8-33

על נורה רשום $7V/230W$. התנגדות מגהץ היא $\Omega 100$. הנורה והמגהץ בלבד מחוברים במקביל למקור מתח של $7V$.

- חשבו את הזרם בנורה ואת הזרם במגהץ.
- חשבו את ההספק של הנורה ושל המגהץ.

ג. חשבו את הספק המקור.

שאלה 8-34

חזרו על השאלה הקודמת, כשתהך המקור הוא $V = 220$.
הדרך: חשבו תחילה את התנגדות הנורה על פי הרשם עליה.

שאלה 8-35

חשבו את ההתנגדות השוקלה של כל אחד מהמעגלים שבאיורים 8-27 ו-8-28.

שאלה 8-36

- א. חמישה נגדים זהים מחוברים בטור. ההתנגדות כל נגד היא R . מה ההתנגדות השוקלה של הנגדים?
- ב. מחברים במקביל את חמישת הנגדים. מה ההתנגדות השוקלה של הנגדים בחיבור זה?
- ג. פי כמה גודלה ההתנגדות השוקלה של הנגדים, כשהם מחוברים בטור, מההתנגדות השוקלה שלהם כשהם מחוברים במקביל?

שאלה 8-37

ח נגדים זהים מחוברים פעם בטור, ופעם במקביל. פי כמה גודלה ההתנגדות השוקלה שלהם בטור, מההתנגדות השוקלה שלהם במקביל?

- | | | |
|----------|--------|--------------------|
| א. n^2 | ב. n | ג. $\frac{1}{n^2}$ |
|----------|--------|--------------------|

הדרך: הציבו כמה מספרים במקומות ח, ובדקו את תשובתכם.

שאלה 8-38

השלימו:

כשנגדים מחוברים _____, המתח שלהם שווה; וכשנגדים מחוברים _____, זורם 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:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

לגביו מעגל זה? נמקו או הביאו דוגמה מספרית, שלגביה משווה 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. ו- I_2 והם, בהתאם, הזרם בנגד R_2 , והמתח של נגד זה. סמןו ליד כל אחת מהמשוואות הבאות את אחד המספרים 0, 1, 2, לפי המפתח הבא:

- 1- המשווה מתאימה לחבר טורי.
- 2- המשווה מתאימה לחבר מקבילי.
- 0- המשווה אינה מתאימה לחבר טורי, ואף לא לחבר מקבילי.

א. $I_1R_1 = I_2R_2$

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. $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

הדרך: שרטטו חיבורים טוריים וחיבורים מקבילים, רשמו ערכיהם מספריים ובדקו אם תשובותיכם נכונות. אם יתברר שימושה מסויימת אינה מתאימה לחבר מסוים, נסו לנמק זאת.

4.8 מעגל מעורב

עד כה למדנו על לחבר נגדים בטורי ובמקביל. כאשר נתונים שלושה נגדים לפחות, אפשר לחבר את כלם בטורי, כפי שראאים באIOR 29-8; אפשר לחבר את כלם במקביל, כפי שראאים באIOR 30-8; ואפשר לחבר אותם בחיבור מעורב, כפי שראאים באIOR 31-8 ו- 32-8. מעגל, שבו הנגדים מחוברים בחיבור מעורב, נקרא **מעגל מעורב**.

[ניסוי] – מדידות במעגל מעורב

הכנסו לקישור וביצעו את הניסוי לפי ההוראות

<http://archive.c3.ort.org.il/Apps/WW/page.aspx?ws=c95853ea-7439-4431-b760-fa7e35c2dc61&page=3e98e78a-2822-41a6-a11bf76b8cd85ab4&fol=1843785c-9712-4390-a755-f76977498a45>

אפשר לראות מיד שיש הבדל בין שני המעגלים המעורבים שבאיורים 31-8 ו- 32-8. במעגל הראשון – הנגדים R_1 ו- R_2 מחוברים זה לזה במקביל, והנגד R_3 מחובר בטור לצירוף המקביל 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, שלמדו בסעיפים הקודמים. לדוגמה: במעגל שבאיור 31-8 נחישב תחילת את ההתנגדות השקולה של הנגדים R_1 ו- R_2 , המוחברים במקביל. נסמן באמצעות $R_{1,2}$ את הנגד השקול לשני נגדים אלה. כפי שלמדו, ההתנגדות 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 33-8.

המעגל שקיבלנו הוא מעגל טורי, הכלול שני נגדים: $R_{1,2}$ ו- R_3 . ההתנגדות השקולה R_{eq} של שני נגדים אלה – שווה לסכום ההתנגדויותיהם:

$$R_{eq} = R_{1,2} + R_3$$

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 31-8.

באופן כללי, כדי לפתור מעגל מעורב, מוחפשים קבוצות של נגדים המוחברים בטור, ומחליפים אותן כנגד השcoleו שלהם. מוחפשים גם קבוצות של נגדים המוחברים במקביל, ומחליפים גם אותן כנגד השcoleo שלהם. כך ממשיכים, עד שכל הנגדים במעגל מוחלפים כנגד שcoleo יחיד.

8-13 דוגמה



חשבו את ההתנגדות השקולת של המעגל שבאיור 8-34.

פתרון

הנגדים R_2 ו- R_3 – במעגל שבאיור 8-34 – מחוברים בטור. ההתנגדות השקולת שלהם $R_{2,3}$ היא:

$$R_{2,3} = R_2 + R_3 = 40 + 20 = 60\Omega$$

באיור 8-35 מתרואר המעגל, המתקבל לאחר שמחליפים את שני הנגדים R_2 ו- R_3 – בנגד השkol R. נגד זה מחובר במקביל לנגד R_1 . ההתנגדות השקולת R_{eq} של שני הגדים ו- $R_{2,3}$ היא:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_{2,3}}{R_1 + R_{2,3}} = \frac{30 \times 60}{30 + 60} = \frac{1,800}{90} = 20\Omega$$

чисוב זרמים ומתחים במעגל מעורב

למדנו לחשב את ההתנגדות השקולת של מעגלים מעורבים. עתה נלמד לחשב גם את הזרמים והמתחים במעגלים אלה. נשתמש במעגל שבאיור 8-36, כדי להציג את השלבים בחישוב הזרמים והמתחים השונים במעגל מעורב.
תחליה נחשב את ההתנגדות השקולת של המעגל:

הנגד R_L מחובר במקביל לנגד R_2 (מיקובל לסמן את הצורך במעגל על ידי R_L). נסמן על ידי $R_{2,L}$ את ההתנגדות השקולת 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 הגדים R_2 ו- R_L בנגד השkol שלהם $R_{2,L}$.

עתה נחשב את ההתנגדות השקולת R_{eq} של הגדים R_1 ו- $R_{2,L}$, המוחברים בטור:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,L} = 4,000 + 2,000 = 6,000\Omega = 6k\Omega$$

чисוב הזרם הכללי | במעגל

כפי שלמדנו, המתח על ההתנדות השקולה שווה למתח המקור U . לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל נתון על ידי:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{24}{6,000} = 0.004A = 4mA$$

מטעני נוחות, נחשב תחילה את המתחים של הנגדים, ורק אחר כך נחשב את הזרמים בנגדים.

чисוב 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 המתomics 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), המתחוברים במקביל. כלומר, המתח $U_{2,L}$ שווה גם למתח U_2 של הנגד R_2 ולמתח U_L של הנגד R_L :

$$U_{2,L} = U_2 = U_L = 8V$$

чисוב הזרמים בנגדים

מצאנו כבר כי הזרם בנגד R_1 הוא $4mA$. לפי חוק אום, הזרם I_2 בנגד R_2 הוא:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{8}{3,000} = 0.00267A = 2.67mA$$

והזרם I_L בנגד R_L הוא:

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{8}{6,000} = 0.00133A = 1.33mA$$

אנו רואים שסכום שני זרמיים אלה שווה לזרם הכללי במעגל.

8-14 דוגמה

חשבו את הזרם בנגד R_1 ואת המתח עליו במעגל שבאיור 8-38.

פתרון

נחשב תחילה את ההתנגדות השוקלה של המעגל. הנגדים R_3 ו- R_4 מחוברים בטור, וההתנגדות השוקלה שלהם $R_{3,4}$ היא:

$$R_{3,4} = R_3 + R_4 = 50 + 100 = 150\Omega$$

הנגד השוקול $R_{3,4}$ מחובר במקביל לנגד 75Ω , R_2 , כפי שראויים באIOR 39-8.

התנגדות השוקלה $R_{2,3,4}$ של שני הנגדים R_2 ו- $R_{3,4}$, מחוברים 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 40-8. ההתנגדות

الשוקלה שלהם R_{eq} היא:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,3,4} = 10 + 50 = 60\Omega$$

הזרם בנגד R_1 הוא הזרם הכללי | 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

התנגדות של כל אחד מהנגדים במעגלים שבאיור 41-8 היא 12Ω . חשבו את ההתנגדות השוקלה של כל אחד ממעגלים אלה.

שאלה 8-42

מהי ההתנגדות השוקלה של המעגל שבאיור 42-8?

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. $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

$$R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_2 + R_3}.$$

 שאלה 8-43

חזרו וחשבו את הזרמים והמתחים במעגל שבאיור 8-36, אך חשבו תחיליה את הזרמים - ואחר כך את המתחים.

 שאלה 8-44

חשבו את הזרם בנגד, שהתנגדותו $\Omega 16$, במעגל שבאיור 8-8.

 שאלה 8-45

- א. חשבו את המתח של הנגד, שהתנגדותו $\Omega 600$, במעגל שבאיור 8-44.
- ב. חשבו את ההספק של נגד זה.

 8.5 נגדיים משתנים **מחלק מתח**

במעגלים חשמליים ואלקטרוניים רבים צריך לפעמים לשנות את המתח של הרצן. בעזרתו שני נגדים, המתחברים בטור במעגל חשמלי, אפשר לקבל מתח (בין שתי נקודות במעגל זה) הקטן ממתח המקור. נתבונן במעגל שבאיור 8-45. במעגל זה – מתח המקור U מתחולק בין שני הנגדים R_1 ו- R_2 , ולכן המתח U של הנגד R_2 – קטן ממתח המקור. מעגל זה נקרא **לפעמים מחלק מתח**.

אם נחבר רצן L במקביל לנגד R_2 , ב策ן יהיה מתח הקטן ממתח המקור. חיבור זה מתואר באיור 8-46.

 נגד משותנה בחיבור פוטנציאומטר

בכל פעם שרוצים לשנות את המתח של הרצן L במעגל שבאיור 8-46, יש להחליף לפחות אחד מהנגדים R_1 או R_2 . ברור שסידור זה אינו נוח, ולכן במעגלים שבהם יש לשנות את המתח של הרצן משתמשים בנגד משותנה.

נגד זה עשוי משכבה של תערובת פחム או מתיל מתכת, המלווה כסיל. של הנגד נמצא זחלן שאפשר להזיזו, ובאמצעותו אפשר לשנות את המתח של הרצן.

באיור 47-8 מתואר מעגל, שבו מחובר הנגד המשטנה. הtantגדות המשטנה היא R והזחלן מחולק את הנגד המשטנה לשני נגדים, R_1 ו- R_2 , שסכום ההtantגדיות שלהם הוא R . הzzת הזחלן משנה את היחס בין הtantגדות R_1 להtantגדות R_2 , אך סכום ההtantגדיות נשאר תמיד קבוע – R .

כדי להשתמש בנגד המשטנה כמחולק מתח משטנה, לחברים אליו צרך L , כפי שאפשר לראות במעגל שבאיור 48-8. הדק אחד של הцרך מחובר לקצה הקבוע של הנגד המשטנה (באיור 48-8 – הקצה הקבוע הוא A), וההדק השני מחובר לזחלן.

חיבור כזה הוא **חיבור פוטנציאומטרי**, והנגד המשטנה נקרא **פוטנציאומטר**. הzzת הזחלן משנה את היחס בין R_1 ל- R_2 , וכתוואה מכך משטנה המתח של הцרך L . צרך זה לחבר, באIOR 48-8, במקביל לנגד R_2 , והשקל של שני נגדים אלה – לחבר בטור לנגד R_1 .

דוגמה 8-15

צרך לחבר לנגד משטנה בחיבור פוטנציאומטרי, כמתואר במעגל שבאיור 49-8. נתון $C_1 + R_1 = 12 k\Omega$. מהו המתח של הцרך L , כשהזחלן של הפוטנציאומטר נמצא במצב שבו היחס בין R_1 ל- R_2 הוא?

פתרון

תחילה נמצא את הtantגדיות R_1 ו- R_2 . אנו יודעים:

$$\frac{R_1}{R_2} = 3$$

כלומר:

$$R_1 = 3R_2$$

נציב זאת במשוואה:

$$R_1 + R_2 = 12 k\Omega$$

ונקבל:

$$3R_2 + R_2 = 12 k\Omega$$

ומכאן:

$$4R_2 = 12 k\Omega$$

$$R_2 = 3 k\Omega$$

וכן נקבל:

$$R_1 = 3R_2 = 9 \text{ k}\Omega$$

R_L מחובר במקביל ל- $R_{2,L}$ (איור 49-8), וההנגדות השוקלה $R_{2,L}$ של שני נגדים אלה היא:

$$R_{2,L} = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{3,000 \times 6,000}{3,000 + 6,000} = \frac{18,000,000}{9,000} = 2,000\Omega = 2 \text{ k}\Omega$$

ההנגדות השוקלה $R_{2,L}$ מחוברת בטור להנגדות R_1 . ההנגדות השוקלה R_{eq} של שתי הנגדויות אלה היא:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,L} = 9,000 + 2,000 = 11,000\Omega = 11 \text{ k}\Omega$$

זהו גם ההנגדות השוקלה של המעגל. לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל הוא:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{220}{11,000} = 0.02A = 20 mA$$

הזרם I זורם בנגד R_1 . המתח U_1 של הנגד R_1 הוא:

$$U_1 = IR_1 = 0.02 \times 9,000 = 180V$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף, המתח $U_{2,L}$ על ההנגדות השוקלה $R_{2,L}$ הוא:

$$U_{2,L} = U - U_1 = 220 - 180 = 40V$$

זהו גם המתח על כל אחד מהנגדים R_2 ו- R_L , המתחברים במקביל. כאמור, המתח על הרצין R_L הוא 40V.

נגד משתנה בחיבור ריאווטטי

לפעמים מתחברים את הנגד המשתנה, כפי שמתואר באיור 50-8. כאמור, אין מתחבים כלל את אחד הקצוות הקבועים של הנגד המשתנה, ומאנצלים רק את ההנגדות שבין הzahlן לבין הקצה הקבוע השני של הנגד המשתנה. במצב זה, הנגד המשתנה נקרא **ריאווטטי** וחברו כזה נקרא בהתאם - **חיבור ריאווטטי**.

ככל שהזחלן ברייאויסטט קרוב יותר לקצה הקבוע A (איור 8-50), ההתנגדות הリアויסטט (כלומר, ההתנגדות בין הנקודות A ו-C) קטנה יותר. כאשר הזחלן נוגע בקצה החופשי B, כל ההתנגדות R של הリアויסטט מחוברת למעגל. ההתנגדות R_1 שבאיור 8-50 – מחוברת בטור להtanגדות R_L . ההתנגדות R_2 אינה מחוברת למעגל זה.

מהו הבדל בין פוטנציאומטר לリアויסטט? בפוטנציאומטר משתמשים בשלושה הדקים, ואילו בリアויסטט משתמשים רק בשני הדקים. בפוטנציאומטר זורם זרם דרך הנגד R כולם, ואילו בリアויסטט זורם זרם רק בחלק R_1 של הנגד, בין הקצה הקבוע המחבר – לבין הזחלן. באיוור 8-51 מופיעים תצלומים של גדים משתנים אלה.

באיוור 8-8 מופיעים הסמלים של רכיבים אלה.

תרגול

8-46 שאלה

סמן את כל הטענות הנכונות לגבי שני המعالגים שבאיור 8-53.

- א. רק המועלג **הימני** אינו מחלק מתח.
- ב. רק המועלג **השמאלי** אינו מחלק מתח.
- ג. שני המعالגים הם מחלקיים מתח.
- ד. שני המعالגים **איןם** מחלקיים מתח.

8-47 שאלה

המתוח U_2 בمعالג שבאיור 8-54 נתון על ידי:

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| ב. $U \frac{R_2}{R_1}$ | א. $U \frac{R_2}{R_1+R_2}$ |
| ג. $U \frac{R_1+R_2}{R_2}$ | |
| ד. $U \frac{R_1+R_2}{R_1}$ | ה. $U \frac{R_1}{R_1+R_2}$ |

הדריכה: השתמשו בחוק אום לגבי הנגד R_2 ולגבי ההתנגדות השקולה.

8-48 שאלה

הראו כי כאשר $R_1 = 2R_2$ בمعالג שבאיור 8-54, מקבלים:

$$U_2 = \frac{U}{3}$$

שאלה 8-49

המתח U_1 במעגל שבאיור 55-8, נתון על ידי:

- | | | | |
|----|---------------------------|----|---------------------------|
| ב. | $\frac{R_1}{R_1 + R_2} U$ | א. | $\frac{R_1 + R_2}{R_1} U$ |
| ד. | $\frac{R_2}{R_1} U$ | ג. | $\frac{R_1}{R_1 + R_2} U$ |
| ו. | $\frac{R_2}{R_1 + R_2} U$ | ה. | $\frac{R_1 + R_2}{R_2} U$ |

שאלה 8-50

"המתח על כל אחד מהנגדים בחלוקת מתח קטן ממתח המקור". נכון או לא? נמקו.

שאלה 8-51

נתון חילוק מתח, שבו שני הנגדים זהים. המתח של כל אחד מה נגדים...

- א. שווה למתח המקור.
- ב. שווה למחצית מתח המקור.
- ג. גדול ממתח המקור.
- ד. קטן ממחצית מתח המקור.

שאלה 8-52

חזרו על דוגמה 15-8 עברו המצב שבו ההתנגדות R_1 שווה לה התנגדות R_2 .

שאלה 8-53

הוסיפו "רייאוטט" או "פוטנציוומטר" בכל מקום מסומן:

- ב _____ משתמשים בשלושה הדקים. ואילו ב _____ משתמשים בשני הדקים.
 ב _____ זורם זרם דרך הנגד כלו, ואילו ב _____ זורם זרם רק דרך חלק של הנגד, בין הקצה הקבוע המחבר לבין הזחלן.

שאלה 8-54

מה ההતנגדות השקויה של המעגל שבאיור 56-8?

- א. $R_1 + R_2$ ב. R_2 ג. R_L ד. R_1

$$\frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L} \cdot \Pi \quad R_1 + \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} \cdot \Sigma \quad R_2 + R_L \cdot I \quad R_1 + R_L \cdot \Pi$$

8-55 שאלה

- "הזרת הזרן" בمعالן שבאיור 8-57, משנה את היחס בין R_1 ל- R_2 , וכותזאה מכך משתנה המתח על הצרוך R_L .
- הראו כי כאשר $0 = R_1$, המתח על הצרוך R_L הוא U .
 - הראו בעזרת דוגמה מסכנית כי כאשר $R_1 = R_2$, המתח על הצרוך קטן מ- $\frac{U}{2}$.
 - הראו כי כאשר $R_1 = R_2 = R_L$, המתח על הצרוך הוא $\frac{U}{3}$.

8-56 שאלה

הראו כי ההתנגדות השקולה R_{eq} של המمعالן שבאיור 8-58 היא:

$$R_{eq} = R_1 + \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$$

8-57 שאלה

- חשבו את ההתנגדות השקולה של R_1 ו- R_L בمعالן שבאיור 8-59. מהי ההתנגדות המمعالן?
- חשבו את המתח על הצרוך R_L .

8-58 שאלה

חשבו את המתח על הצרוך R_L באיזור 8-60.

8-59 שאלה

הראו כי הזרם בצרוך R_L בمعالן שבאיור 8-61, נתון על ידי:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_L}$$

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 62-8. מעגל זה זהה למעגל שבאיור 6-8, ובכבר חישבנו את הזרמים שבו.

עכשו נחשב את ההספקים במעגל. לשם כך נרשום את הזרמים ביחידות אמפר, ואת ההתנגדויות – ביחידות אום.

הספק המקור נתון על ידי:

$$P = UI = 24 \times 0.004 = 0.096W = 96 \text{ mW}$$

והספק 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 62-8, 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.

אנרגייה מושקעת, אנרגיה מופקת-מעורבת ונצילות

ראינו כי כאשר זרם עובר בנגד, הנגד מתחmmmם. כמובן, אנרגיה חשמלית נהפכת לחום. במקרים מסוימים אנו מעוניינים בחום הנוצר בצרוך; למשל, כשהצרוך הוא תנור חימום, או קומקום חשמלי. אבל במקרים אחרים החום הנוצר בצרוך אינו נחוץ לנו. למשל, כאשר הצרוך הוא מנוע חשמלי, אנו מעוניינים באנרגייה המכנית ואיננו זקוקים לחום שנוצר.

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

אם כן, בمعالג 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 מבchiaנתנו אנרגיה מבזבצת.⁶

האנרגיה המבזבצת מופיעה בדרך כלל בצורה חום. במנוע חשמלי, שהזכרנו כבר, חלק מהאנרגיה מתבצע בתילים המוליכים, וחלק מתבצע תוך התגברות על החיכוך בין חלקי המנוע המסתובבים.

בזמן אנרגיה הוא חיסרונו של התקנים, ההופכים אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת, ואני רוצים למצום את הבזבוז ככל האפשר. ככל שנקטין את האנרגיה המבזבצת, נקבל יותר אנרגיה מופקת-מעילה. נסביר:

האנרגיה המבזבצת היא ההפרש בין האנרגיה המושקעת לאנרגיה המופקת-המעילה לנו.

היחס בין האנרגיה המופקת-המעילה, לבין האנרגיה המושקעת - נקרא נצילות. ובכן, הנצילות שלمعالג חשמלי נתונה על ידי:

$$\eta = \frac{\text{אנרגייה מופקת} - \text{מעילה}}{\text{אנרגייה מושקעת}} = \text{נצילות}$$

למעשה, הגדרה זו של נצילות אינה מוגבלת למעגלים בלבד, אך אנו עוסקים רק בנצילות של מעגליים.

נסמן את הנצילות על ידי האות היוונית η (אטא); את האנרגיה המושקעת בצרך נסמן על ידי W_{in} ; ואת האנרגיה המופקת-המעילה, המתקבלת מהצרך, נסמן על ידי W_{out} . נקבל:

$$(8-11) \quad \eta = \frac{W_{out}}{W_{in}}$$

W_{out} – אנרגיה מופקת-מעילה [J]
 W_{in} – אנרגיה מושקעת [J]

כדי לדעת את הנצילות שלمعالג חשמלי, יש לחשב את האנרגיה המושקעת בمعالג במשך זמן מסוים, ואת האנרגיה המופקת-המעילה של המمعالג **במשך אותו זמן**.

⁶ נדגיש כי אנרגיה מבזבצת אינה אנרגיה שנעמלת. לפי חוק שימור האנרגיה, אנרגיה אינה יכולה להיעלם. כשאנו אומרים אנרגיה מבזבצת, אנו מתכוונים לאנרגיה שאינה מעילה 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 צחומי הפקה, במשר ערב אחד, כמות של אנרגיית חום בשיעור 18 מיליון ג'ול. נצילות התנור היא 90%. מה כמות האנרגיה החשמלית שהושקעה בתנור במשר אותו ערבי?

פתרון

האנרגיה המופקת-המעילה של התנור היא $J_{out} = 18,000,000 \text{ W}$. הנצילות היא 90% $= 0.9$. 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 $20,000,000 J$.

נצלות אידיאלית

ככל שהערך של האנרגיה המועילה קרוב יותר לערך של האנרגיה המושקעת, האנרגיה המבוצצת קטנה יותר, והנצלות גדולה יותר. במצב אידיאלי, כל האנרגיה המושקעת נהפכת לאנרגיה מופקת-מעילה, כלומר, האנרגיה המופקת-המעילה שווה לאנרגיה המושקעת:

$$W_{out} = W_{in}$$

לכן במצב האידיאלי נקבל:

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = 1$$

כולם, הנזילות היא 100%. נזילות צאת היא אידיאלית. באופן מעשי, אי-אפשר לקבל נזילות של 100%, אבל אפשר להproxim לnezilot צאת. למשל, הנזילות של מנועים חשמליים יכולה להגיע ל-90%, ואףלו יותר.

הnezilot כיחס הספקים

ראינו כי הנזילות של מעגל חשמלי היא היחס בין האנרגיה המופקת-המעילה של מעגל במשך זמן מסוים, לבין האנרגיה המושקעת במעגל במשך אותו זמן. עכשו ברכינו להראות, כי הנזילות היא גם היחס בין ההספק המופק-המעיל P_{out} לבין ההספק המושקע P_{in} . ואננו, לפי הגדרת ההספק, האנרגיה המושקעת בצרוך במשך פרק זמן t , נתונה על ידי:

$$W_{in} = P_{in} \cdot t$$

והאנרגיה המופקת-המעילה W_{out} , שמתתקבל מהצרוך 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:

$$(8-12) \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

קיבלנו אפוא שתי הגדרות של נזילות:

- היחס בין האנרגיה המופקת-המעילה לאנרגיה המושקעת בפרק זמן מסוים;
- היחס בין ההספק המופק-המעיל להספק המושקע.

ונכל להשתמש בכל אחת מהגדרות אלה בהתאם לנוחותנו ולנתוני הבעה הספציפית.

8-17 דוגמה

ההספק המופק-המעיל של מנוע במכונית כביסה מסוימת הוא $W_k 2$. נזילות המנוע היא 80%. חשבו את ההספק שהמנוע צריך מרשת החשמל.

פתרון

נתון כי ההספק המופק-המעויל הוא $P_{out} = 2 kW = 2,000 W$, והנצילות היא 80%, כלומר: 0.8=η. علينا לחשב את ההספק המשוקע, כלומר: ההספק שהמנוע צריך. השתמש במשוואת הנצילות (8-12):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

ציב את הגודלים הנתונים, ונקבל:

$$0.8 = \frac{2,000}{P_{in}}$$

ומכאן:

$$P_{in} = \frac{2,000}{0.8} = 2,500 W = 2.5 kW$$

ההספק, שהמנוע צריך, הוא 2.5 kW.

чисובי נצילות במעגל טורי

עד כה חישבנו נצילות לפי היחס בין ההספק המופק-המעויל להספק המשוקע במעגל (או לפי היחס בין האנרגיה המופקת-המעוילת לאנרגיה המשוקעת). עכשו נלמד לחשב נצילות של מעגל טורי - רק על פי ערכי התנגדויות במעגל זה.

באיר 63-8 נתון מעגל טורי, הכולל שתי התנגדויות: התנגדות הצרcn R_L וההתנגדות R . ההתנגדות R מייצגת את ההתנגדות השקולה של כל ההתנגדויות במעגל, מלבד התנגדות הצרcn (למשל: ההתנגדות R מייצגת את התנגדות הקו).

נבטא את ההספקים במעגל זה. תחילת נבטא את **הספק המקור** (הנקרא גם **הספק המעלג**). נזכיר כי ההספק P של המקור - נתון על ידי מכפלת מתח המקור U בזרם המעלג I :

$$P = UI$$

הספק המקור הוא ההספק המשוקע במעגל. ההספק המופק-המעויל הוא, מבחיניתנו, ההספק P_L של הצרcn R_L ; וההתנגדות השנייה R גורמת לבלבול הספק (אנרגיה) במעגל. מכיוון שהמעגל הוא טורי, הזרם I זורם גם בצרcn, וההספק P_L של הצרcn נוצר על ידי מכפלת המתח שלו (U_L) בזרם העובר דרכו, כלומר:

$$P_L = U_L I$$

הנצילות η היא היחס בין ההספק המופק-המעויל להספק המושך, כלומר:

$$\eta = \frac{P_L}{P} = \frac{U_L I}{U I}$$

ומכאן:

$$(8-13) \quad \eta = \frac{U_L}{U}$$

כלומר, נצילות המעגל הטורי שווה ליחס שבין המתח של הרצן לבין מתח המקור. בעצם את המתח של הרצן באמצעות מתח המקור וההתנגדויות במעגל, כדי לבטא את הנצילות על פי ההתנגדויות בלבד.

הנצילות במעגל טורי כיחס ההתנגדויות

כאמור, המעגל טורי, ולכן ההתנגדות השוקלה 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 הרצן במעגל שבאיור 63-8 נתון על ידי:

$$U_L = I R_L$$

נציב במשוואה זו את ביטוי הזרם שבמשוואה (8-14), ונקבל:

$$U_L = I R_L = \frac{U}{R_L + R} R_L = \frac{U}{R_{eq}} R_L$$

והיחס בין המתח על הרצן לבין מתח המקור הוא:

$$\frac{U_L}{U} = \frac{R_L}{R_{eq}}$$

כבר קייבנו 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 הדרוש לבין התנגדות השוקלה של המעגל כולם. בדוגמה הבאה נראה פי כמה משתנה נצילות המעגל, כאשר התנגדות הדרוש גדלה פי שניים.

דוגמה 8-18

הדרוש במעגל שבאיור 8-64 – הוא נגד משתנה.

- חשבו את נצילות המעגל, כשהתנגדות הנגד המשתנה היא 20Ω .
- מהי נצילות המעגל, כאשר התנגדות הנגד המשתנה היא 40Ω ?
- הראו כי נצילות המעגל תמיד קטנה מ-100%.

פתרונות

a. ראיינו כי נצילות המעגל המתואר באיזור 8-64 נתונה על ידי משווה (15-8), כלומר: על ידי היחס בין התנגדות הדרוש לבין התנגדות השוקלה של המעגל כולם:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R}$$

נציב את הנתונים ונקבל:

$$\eta = \frac{20}{20 + 20} = \frac{20}{40} = \frac{1}{2} = 0.5 = 50\%$$

b. הפעם התנגדות הדרוש 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 הדרוש גדלה פי 2 ($m=20\Omega$ ל- 40Ω), הנצילות גדלה מ-50%

ל-66.7%, כלומר פי 1.33.

c. נתבונן במשוואת הנצילות:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R}$$

אפשר לראות כי המכנה $R = R_L$ גדול תמיד מהמונח, כי הוא שווה למונח 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%).

ýchidot anergia shimushiot

למדנו כי המכשירים החשמליים בبيתנו מחוברים בדרך כלל במקביל, וכי ההספק הכלול של היצרנים בمعالג מקבילי - שווה לסכום ההספקים של היצרנים. لكن ההספק הכלול של מכשירי החשמל בביתנו - שווה לסכום ההספקים של המכשירים.

האנרגיה החשמלית מסופקת למכשירי החשמל על ידי תחנות הכוח של חברת החשמל, שהן מקרות המתוח הגודלים במדינה.

אם כן, חברת החשמל מספקת אנרגיה חשמלית להפעלת המכשירים החשמליים השונים. כל דירה או בית נחביבים לצורכי של חברת החשמל. ההתנגדות של צורכי זהה היא ההתנגדות השקולה של כל המכשירים בדירה, ככלומר: צורן אחד של חברת החשמל כולל כמה וכמה צרננים (כלומר, מכשירים חשמליים) המתחברים בדרך כלל במקבילים. ההספק של צורן חברת החשמל (כלומר, דירה) הוא סכום ההספקים של היצרנים שבדירה.

אנו משלמים בכל תקופה (מדי חודשים; ויש המשלמים מדי חודשיים) לחברת החשמל, על פי כמות האנרגיה החשמלית שצרכנו. האנרגיה הכוללת, לצורן חברת החשמל צריך במשך תקופה מסוימת, תלויות בהספק של כל אחד מהמכשירים שהופעלו, ובמשך הזמן שבו הופעלו המכשירים.

דוגמה 8-18

חשבו את צריכה החשמל – במשך חודש – של נורה ותנור חימום המתחברים במקביל. נתון כי הספק הנורה הוא W_{60} , והוא מאירה במשך 100 שעות בחודש ; והספק התנור הוא $W_{2,000}$, והוא מחמם במשך 90 שעות בחודש.

פתרון

האנרגיה החשמלית W_1 , שהנורה צריכה, 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 , שהתנוור צורך, שווה למכפלת הספק התנוור P_2 במשך הזמן t_2 , שהתנוור פועל.
שוב נהפוך את השעות לשניות, ונקבל:

$$W_2 = P_2 t_2 = 2,000 \times 90 \times 3,600 = 648,600,000 \text{ J}$$

האנרגיה הכוללת של שני המכניםים היא:

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 = P_1 t_1 + P_2 t_2 \\ &= 21,600,000 + 648,600,000 = 669,600,000 \text{ J} \end{aligned}$$

בדוגמה 19-8 חישבנו את צריכת החשמל – במשך חודש – של נורה ותנוור בלבד, וקיבliśmy
מאות מיליון ג'ול (J). מכאן מובן כי יחידת האנרגיה ג'ול אינה נוחה לצורכי חישוב צריכת
החשמל בבתים. ואמנם, כפי שהסבירנו בפרק 6, היחידה השימושית לצריכה ביתית
ותעשייתית היא הקילו-ואט שעה (kWh).

כזכור, הקשר בין קילו-ואט שעה לבין הג'ול נתון על ידי:

$$1 kWh = 1,000W \times 3600s = 3,600,000Ws = 3,600,000 \text{ J}$$

דוגמה 8-20

בטאו ביחידות קילו-ואט שעה את צריכת האנרגיה של הנורה והתנוור שבדוגמה 19-8.

פתרון

נפתרו שאלה זו בשתי דרכים:

א. בדוגמה 19-8 מצאנו כי האנרגיה, שהנורה והתנוור צורכים, היא $3,600,000 \text{ J}$. נבטא
אנרגייה זו ביחידות קילו-ואט שעה:

אם יודעים כי:

$$1 kWh = 3,600,000 \text{ J}$$

לכן האנרגיה, הנצרכת ביחידות קילו-ואט שעה, היא:

$$\frac{3,600,000}{3,600,000} = 186 kWh$$

ב. נבטא את הספק הנורה והתנוור 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 $W_{60} = 0.06 \text{ kW}$, והספק התנוור הוא $W_{2,000} = 2 \text{ kW}$.
האנרגיה החשמלית, הנצרכת על ידי הנורה והתנוור, היא:

$$W = P_1 t_1 + P_2 t_2$$

$$= 0.06 \times 100 + 2 \times 90 = 186 \text{ kWh}$$

חשבון החשמל

באיר 8-65 מופיע צילום של חלק מחשבון החשמל, שנשלח לצרכן של חברת החשמל. סכום האנרגיות, שצרכו המכשירים החשמליים בביתיו של הצרכן, מנובמבר 2002 עד ינואר 2003, הוא kWh 1475 (בחשבון החשמל כתוב, שהצריכה בקוט"ש היא 975).

רשום בחשבון כי התשלום בעוד קוט"ש הוא 557.26 ₪. כמובן, זהו התשלום בעבר צריכה של 975 קוט"ש. מכאן שמחיר קוט"ש אחד בחודשים אלה יהיה:

$$\frac{557.26}{1475} = 0.3778 \text{ אגורות} = 37.7$$

וכך כתוב גם בחשבון החשמל. כאשר ידוע המחיר של 1 קוט"ש חשמל, אפשר לחשב את מחיר הפעלה של מכשירי החשמל השונים, אם ידוע ההספק של מכשירים אלה.

לדוגמה, נחשב את המחיר ששולם בחודש ינואר 2003 בעבר הפעלתם של התנור והנורה שבדוגמה 8-20. כאמור, צריכת האנרגיה בחודש של התנור והנורה היא kWh 186. המחיר לקוט"ש היה 37.7 אגורות, ולכן המחיר ששולם בעבר הפעלתם של שני המכשירים הוא $186 \times 37.7 \text{ ש"ח} = 7012.2 \text{ אגורות}$

תרגיל

8-60 שאלה

הספק הנגד, שהתנגדותו Ω_{150} , בمعال שבאיור 8-66 הוא W.2.

- חשבו את הספק הנגד Ω_{75} .
- חשבו את הספק המمعال.
- מהו מתח המקור?

8-61 שאלה

חשבו את ההספק של כל נגד ואת הספק המקור בمعال שבאיור 8-67.

8-62 שאלה

נתון כי הספק המעגל שבאיור 8-68 – הוא $W_{\text{total}} = 7.2$.

- א. חשבו את הזרם I במעגל זה.
- ב. חשבו את התנגדות הנגד R .
- ג. חשבו את הספק הנגד R .

8-63 שאלה

המשפטים הבאים עוסקים בניצילות ובאנרגיה (מושקעת, מופקת-מעילה וمبוזבצת) במעגל שמלי. סמןו ליד כל משפט: **תמיד נכון, לעולם לא נכון, נכון רק בחלק מהמעגלים**.

- א. האנרגיה המופקת-המעילה גדולה מהאנרגיה המושקעת.
- ב. הניצילות היא היחס בין האנרגיה המופקת-המעילה לאנרגיה המושקעת.
- ג. אם האנרגיה המופקת-המעילה שווה לאנרגיה המבוזבצת, הניצילות היא 50%.
- ד. האנרגיה המופקת-המעילה גדולה מהאנרגיה המבוזבצת.
- ה. הניצילות אינה גדולה מ-100%.

8-64 שאלה

סמןו את הביטויים הנכונים:

כל שהערך של האנרגיה המופקת-המעילה קרוב יותר לערך של האנרגיה המושקעת, האנרגיה המבוזבצת **קטנה יותר/ קטנה יותר, והניצילות קטנה יותר/ קטנה יותר**.

8-65 שאלה

אם כל האנרגיה המושקעת הופכת לאנרגיה מופקת-מעילה, הניצילות היא:

- א. 50%
- ב. 0%
- ג. 100%
- ד. 1%

8-66 שאלה

תנור שמלי, שניצילתו 92%, מחובר למקור מתח. התנור מפיק כל יום 60 מיליון ג'ול. מה כמות האנרגיה, שה坦ור צריך כל יום?

8-67 שאלה

מכונת כביסה, שההספק שלה (כלומר, ההספק שהוא צורכת) W_2 ונצילותה 90%, פועלת במשך 10 דקות.

- רשמו ביחידות Wh את האנרגיה שמכונת הכביסה צריכה במשך 10 דקות.
- בטאו, ביחידות ג'ול, את האנרגיה שמכונת הכביסה צריכה במשך 10 דקות.
- חשבו את ההספק המופק-המועיל של מכונת הכביסה.

שאלה 8-68

הנצילות של צrank היא 60%. הצrank מחובר למקור מתח של 220V, והזרם בצרrank הוא A10.

- חשבו את ההספק, שהצרrank צריך.
- מה ההספק המופק-המועיל של הצrank?

שאלה 8-69

חשבו את נצילות המעגל שבאיור 69-8.

שאלה 8-70

הצרrank R_L במעגל שבאיור 70-8 – מחובר בטור לנגד R. המשפטים הבאים נוגעים למעגל זה. סמןו ליד כל משפט: נכון, לא נכון.

- ככל ש- R_L גדול, גם הנצילות גדולה.
- אם $R = R_L$, נצילות המעגל היא 100%.
- אם $R = R_L$, נצילות המעגל היא 50%.
- אם $R > R_L$, נצילות המעגל גדולה מ-100%.
- אם R_L גדול פי 2, גם הנצילות גדולה פי 2.
- הנצילות תלויה רק בשתי ההתנגדויות R ו- R_L , אך לא במתוח המקור.

שאלה 8-71

נתון כי המתח של הנגד R שבמעגל שבאיור 70-8 – הוא 24V, והמתח של הנגד R_L הוא 8V. מהי נצילות המעגל?

שאלה 8-72

הנה רשימה חלקית של מכשירים חשמליים, המוחברים בבית. ליד כל מכשיר רשום ההספק שלו, ומהר הזמן – בשעות – שבו המכשיר פעיל במשך חודש. חשבו את האנרגיה החשמלית הכוללת – ביחידות kWh – שצרך כל אחד מהמכשירים האלה באותו חודש.

משך פעולה המכשיר בשעות	הספק המכשיר	המכשיר
150	150W	מקלט טלויזיה
120	60W	מחשב
40	3,000W	תנור חימום

שאלה 8-73

- א. חשבו את נזילות המעגל שבאיור 8-71, בהנחה כי R_2 הוא הדרוש.
 ב. חזרו על החישוב, בהנחה כי R_1 הוא הדרוש.

8.8 העברת הספק מרבבי לצרכן

באיור 8-72 נתון מעגל טורי המורכב ממוקור מתוך ממשי – ומצרך R_0 , שהተנגדותנו ניתנת לשינוי (כאמור, מקור מתוך ממשי מיוצג על ידי מקור מתוך אידיאלי E והተנגדות פנימית r_s). לפנינו אפוא מעגל טורי הכלול שני נגדים: נגד קבוע r_s ונגד משתנה R_0 . ברצוננו למצוא את הተנגדות הדרוש R_0 , שבעורו הספק P – המ עבר לצרך – יהיה מרבבי. לדרישה זו, לקבלת הספק מרבבי, יש חשיבות רבה במערכות חשמליות שונות.

עלינו למצוא את הקשר בין R_0 , הנתון לשינוי, לבין R , כך שהספק P יהיה מרבבי. הספק P, שהוא הספק הדרוש, נתון – לפי סעיף 8.6 – על ידי:

$$(8-16) P = I^2 R_0$$

כאשר I הוא הזרם במעגל.

לפי חוק אום, הזרם במעגל נתון על ידי:

$$(8-17) I = \frac{E}{R_s + R_0}$$

נציב במשוואה (8-16) את ביטוי הזרם שבמשוואה (8-17), ונקבל:

$$(8-18) P = I^2 R_0 = \left(\frac{E}{R_s + R_0} \right)^2 R_0 = \frac{E^2 R_0}{(R_s + R_0)^2}$$

אנו מוחפשים אפוא את המקסימום של ההספק P המועבר לצרcn – בתלות בהતנגדות R_0 . נמדד את ההספק P בתלות בהתנגדות המשתנה R , ונקבל את הגרף שבאיור 8-73.

בגרף זה אפשר לזהות שני תחומיים: האחד משמאלי להתנגדות R_0 , והשני – מימין להתנגדות R .

בתחום השמאלי – ההספק גזיל, כל עוד התנגדות הצרcn קטנה מהתנגדות המקור. ובתחום הימני – ההספק קטן, כשהתנגדות הצרcn גדולה מהתנגדות המקור.

ובכן, ההספק גזיל בתחום השמאלי, מגע למקסימום כשהתנגדות הצרcn שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח. בתחום הימני – ההספק הולך וקטן. כאמור, ההספק המרבי, המועבר לצרcn, מתקיים כאשר:

$$R_s = R_0$$

המשוואה $R_s = R_0$ היא אפוא התנאי להעברת הספק מרבי לצרcn. 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 לצרcn, בתלות בהתנגדות R_0 של הצרcn. תנאי הכרחי לקבלת מקסימום של פונקציה הוא התאפסות הנגזרת של הפונקציה. אפשר להראות כי המשוואה יתקיים כאשר $R_s = R_0$. ההוכחה חרוגת מסגרת הלימוד הנוכחי.

תרגול

שאלה 8-74

- התנגדות הנגד R_s באיזור 8-72 – היא 16Ω . מה צריכה להיות התנגדות הצרcn R_0 , שבעבורו ההספק המועבר לצרcn יהיה מרבי?
- נתון כי הcac"ם של מקור הוא $9V$. מה ההספק שיועבר לצרcn, הנתון בסעיף הקודם, כשהתנגדות הצרcn שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח?

שאלה 8-75

- א. התנגדות הנגד R_s באIOR 72-8 – היא Ω . נתון כי ההספק המועבר לצריך – מרבי. מה התנגדות הצריך?
- ב. מה נצילות המעגל?

שאלה 8-76

- א. משנים את התנגדות הצריך שבIOR 72-8. בטבלה הבאה נתונים ערכים שונים של התנגדות הצריך. חשבו את נצילות המעגל לגבי כל אחת מההתנגדויות הנתונות של הצריך.

$R_s = 5R_0$	$R_s = 2R_0$	$R_s = R_0$	$R_s = 0.5R_0$	$R_s = 0.2R_0$	התנגדות הצריך
					נצילות

- ב. מה הנצילות, כשההספק מרבי מועבר לצריך?
ג. האם הנצילות מרבית כשמועבר לצריך הספק מרבי? נמקו.

שאלה 8-77

- א. משנים את התנגדות הצריך שבIOR 72-8. בטבלה הבאה נתונים ערכים שונים של התנגדות הצריך. הנicho כיaca"מ של המקור הוא $1V$, וההתנגדות הפנימית של המקור היא Ω , וחשבו את הספק המעגל ואת ההספק המועבר לצריך.

$R_s = 5R_0$	$R_s = 2R_0$	$R_s = R_0$	$R_s = 0.5R_0$	$R_s = 0.2R_0$	התנגדות הצריך
					הספק המעגל
					הספק המועבר לצריך

- ב. מה ההספק המרבי המועבר לצריך?
ג. האם ההספק המרבי, המועבר לצריך, הוא גם ההספק המרבי של המעגל? נמקו.

8.8aca"מ ומקורות מתח

בפרקם הקודמים הנחנו כי לכל אחד מקורות המתה במעגל יש מתח קבוע, שאינו תלוי בתנודות ובזרם שבמעגל. על פי הנחה זו, אם מחרבים צרכן למקור מתה, גם המתה של הצרכן קבוע.

בפרק זה נבדוק הנחה זו. נדונם במקור מתה שבו המתה נוצר על ידי הפרדת מטענים בתהילר כימי, כמו זה שלמדנו בפרק 2. במקורות מתה מסווגים אחרים עוסוק בשלבים מתקדמים יותר של הלימוד.

8.8.1 התא החשמלי והזרם במעגל

נתחיל את דיאגרמו במעגל פשוט המכיל צרכן אחד. מקור המתה במעגל זה הוא התא החשמלי, שעליו למדנו בסעיף 2.2. אלקטרודה אחת של התא - עשויה פחם, והאלקטרודה השנייה העשויה אבץ.

באיר 74-8א מתואר התא החשמלי המחבר לצרכן. כאמור, כיוון הזרם המוסכם במעגל זה, המכיל מקור מתה וצרכן, הוא מהדק החיבוי של מקור המתה – דרך הצרכן – אל ההדק השילי של מקור המתה. ואילו בתור התא יש מעבר מטענים חיוביים מהדק השילי – אל ההדק החיבוי. כיוון הזרם המוסכם במעגל מתואר באיר 74-8ב.

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 התנודות התילים המוליכים במעגל.

כאמור, הזרם המוסכם נע מנוקודה שבה הפוטנציאלי גבוה – לנוקודה שבה הפוטנציאלי נמוך. אבל בתור התא החשמלי יש מעבר של מטענים חיוביים – מהדק השילי להדק החיבוי, ככלומר: מפוטנציאלי נמוך לפוטנציאלי גבוה. אם כן, בחלק זה של המסלול יש צורך להשكيיע אנרגיה במטענים חיוביים.

אנרגיה זו מאפשרת את תנועת המטענים במעגל כולו, כי השקעת האנרגיה מאפשרת את המשך התהילר של הפרדת המטענים בתא. וכתוצאה לכך, ממשיר להתקיים הפרש פוטנציאליים בין ההדק החיבוי לבין ההדק השילי של התא. אנרגיה זו – מקורה בתהילרים כימיים, המתרחשים בתא החשמלי. ולכן נהוגים לקרוא לאנרגיה זו – **אנרגייה כימית**.

8.8.2 מתח הדקים, כא"ם והתנגדות פנימית

נניח תחילה כי מעבר המטענים בתוך התמייסה, בין הדקי מקור המתח (איור 74-8ב), נעשה ללא התנגדות כלשהי. כאמור, במקרה זה צריך ציריך לנוסיף אנרגיה למטענים (חיוביים), רק כדי להעלות את המטענים מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה, כלומר: להתגבר על המתח שבין ההדקים של המקור. מתח זה נקרא **מתוך ההדקים של המקור**.

מתוך ההדקים של המקור יכול לגרום לתנועת המטענים דרך הרצקן שמחובר בין הדקי המקור. לאחר שמתוך מתתקבל על פי אנרגיה לייחידת מטען, אפשר לראות את מתוך ההדקים של המקור כאנרגייה המשקעת בהנעת יחידת מטען – **דרך הרצקן**.

הנחנו כי מעבר המטענים בתוך התמייסה נעשה ללא התנגדות כלשהי. אך במצבות יש התנגדות למעבר המטענים בתוך התמייסה. מקור המתח צריך להשקיע אנרגיה, כדי להתגבר על התנגדות למעבר המטענים בתוך התא עצמו, בנוסף על העלאת המטענים (חיוביים) מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה יותר.

כאמור, המעגל החשמלי מכיל את מקור המתח ואת הרצקן. האנרגיה, שהמקור צריך להשקיע בהנעת יחידת מטען סביב המעגל החשמלי שלו, נקראת הכוח האלקטרו-מניע של מקור המתח, ובקיצור: **הכא"ם של מקור המתח**. הכא"ם מסומן על ידי E.

כוח אלקטרו-מניע אינו שם מתאים. שם זה כולל את המלה **כוח**, אך כוח אלקטרו-מניע אינו כוח, אלא אנרגיה לייחידת מטען. שם זה מקובל בתורת החשמל, וגם אנו נשימוש בו. אך במקומות להשתמש בשם המלא, נקרא לו בהמשך רק בראשי התיבות שלו - **כא"ם**.

יחידת הכא"ם היא אנרגיה לייחידת מטען, ככל: וולט (V). מכאן **שיחידת הכא"ם ויחידת המתח הן זהות**, אך הכא"ם והמתח הם גדים שונים. כאמור, הכא"ם יכול לגרום לתנועת המטענים במעגל שלו, ואילו המתח בין ההדקיםגורם לתנועת המטענים רק דרך הרצקן **במעגל**.

הכא"ם של מקור מתח הוא תכונה אופיינית של המקור. תכונה זו תלולה באלקטרודות של התא ובתמייסה הנמצאת בתא. אם כן, אפשר לדבר על מקור בעל כא"ם של 79, למשל.

כ"מ הוא רק אחת התכונות האופייניות של המקור. כאמור, יש בתמייה התנגדות למעבר המטען מההדק השיללי להדק החיבוי. התנגדות זו נקראת **התנגדות פנימית**, והוא מסומנת באמצעות r . ההתנגדות הפנימית היא תכונה אופיינית נוספת של המקור.

אנו נניח כי ההתנגדות הפנימית קבועה. לפיכך ניצג את ההתנגדות הפנימית על ידי גנד, שהተנגדותו r . למעשה, אותה כמות מטען עוברת ביחידת זמן גם בצרוך וגם בתמייה, ולכן אפשר לומר כי אותו זרם עובר בצרוך ובתמייה. מכאן נסיק כי המעגל שבאיור 74-8ב, הוא מעגל טורי, שבו הצרך R מחובר בטור להtanגדות הפנימית r . מעגל טורי זה מתואר באior 8-75.

נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגבי המעגל שבאיור 8-75, ונקבל כי הכ"מ E נתון על ידי:

$$(8-19) E = U + Ir$$

מעבר את מתח ההדקים U לאגף שמאל, ואת הכ"מ E נعبر לאגף ימין, ונקבל:

$$(8-20) U = E - Ir$$

המתח על הצרך R במעגל זה, נתון, לפי חוק אום – על ידי מכפלת הזרם I (שהוא זרם המעגל הטורי וגם הזרם בצרך R) בהתנגדות הנגדי, כלומר: RI . מתח זה שווה למתח ההדקים של המקור, כפי שאפשר להיווכח מהמעגל שבאיור 8-75.

לפי משואה (8-19), הזרם I הנתון על ידי $\frac{E-U}{R} = I$. ניוכח בהמשך כי זרם זה נתון גם על ידי:

$$(8-21) I = \frac{E}{R+r}$$

דוגמה 8-21

נתון כי הכ"מ של מקור המתח במעגל שבאיור 8-75, הוא $7V$. ההתנגדות הפנימית של המקור, היא 0.2Ω , והtanגדות הצרך – 8Ω .

- חשבו את הזרם במעגל.
- חשבו את המתח של הצרך.
- מה מתח ההדקים של המקור?

פתרון

א. כדי למצוא את הזרם I במעגל שבאיור 8-75, נשתמש בחוק אום, ובבטא את המתח U של הצרך, באמצעות הזרם בצרך (ובמעגל הטורי כולל): $IR=U$. נציב זאת בחוק המתחים של קירכהוף, ונקבל:

$$E = U + Ir = IR + Ir = I(R + r)$$

ומכאן:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{3}{8 + 0.2} = 0.3659A = 365.9mA$$

ב. לפי חוק אום, המתח של הזרן נתון על ידי:

$$IR = 0.3659 \times 8 = 2.93V$$

ג. מתח הבדיקה של המקור שווה למתח על הזרן. נוכל להגיד בכך, אם נציב במשוואה

$$U = E - Ir$$

$$U = E - Ir = 3 - 0.3659 \times 0.2 = 2.93V$$

אנו רואים כי $IR = U$.

ראינו שכאשר מחברים זרן למקור מתח, כפי שמתואר באIOR 75-8, מתח הבדיקה של המקור נתון על ידי $Ir = E - U$. ומכאן נקבל:

$$E - U = Ir$$

כלומר, ההפרש בין הכא"מ E למתח הבדיקה U שווה למתח זו על התנגדות הפנימית. על סמך דינומו נוכל להסיק שמתוך הבדיקה במעגל, כדוגמת זה שבAIOR 75-8, אין גבול מהכא"מ. כמו כן נוכל להסיק כי ככל שהזרים במעגל קטן יותר, גם ההפרש בין הכא"מ למתח הבדיקה יהיה קטן יותר.

מה יהיה הקשר בין הכא"מ ומתח הבדיקה, כאשר יזרום זרם במעגל?

אם לא יזרום זרם במעגל ($I=0$), נקבל מהמשוואה $Ir = E - U$, כי $U=E$, כלומר: מתח הבדיקה של המקור, שווה לכך. אם שום זרן לא מחובר בין הדקי המקור, לא יזרום זרם במעגל. מתח הבדיקה, לפי הסברנו, יהיה שווה במקרה זה לכך. נסכם:

כשהזרן מנוטק במעגל שבAIOR 75-8, מתח הבדיקה של המקור, שווה לכך.

גם אם ההתנגדות הפנימית של המקור הייתה לאפס, היינו מקבלים מהמשוואה – $E = Ir + U$, כי $U=E$. כלומר: מתח הבדיקה של המקור שווה לכך. ההתנגדות הפנימית של מקור שווה לאפס רק במצב אידיאלי, שאין קיימים במצבים. מקור מתח, שהተנגדותו הפנימית שווה לאפס, מכונה אם כן **מקור מתח אידיאלי**.

לעומת זאת, מקור מתח ממשי, ככלומר מקור מתח הק"ם במציאות, הוא בעל התנגדות פנימית. בمعגלים מעשיים רבים, שבהם ההתנגדות הפנימית קטנה מאוד (זניחה) ביחס להtanגדות הדרוש, מניחים כי $r=0$, ומכאן שמתוך הבדיקות קבועה ושויה בערך לכא"מ, ככלומר: $E=U$.

כאמור, אנו מניחים שההתנגדות הפנימית קבועה. אך במקרים, כאשר המקור (כולומר: התא, הסוללה, המctrבר) מתיישן, גדלה ההתנגדות הפנימית שלו. כתוצאה לכך קtan מתח הבדיקות, עד שהצרוך - המחבר למקור - מפסיק לפעול.

8.8.3 ההתנגדות הפנימית של המקור, התנגדות ה צורך ונצילות המעגל

מצאו כי הנצלות של מעגל טורי נתונה על ידי היחס שבין ההתנגדות ה צורך לבין ההתנגדות השקולה של המעגל כולם. ראיינו באIOR 76-8ב ובAIR 75-8 כי גם מעגל, המכיל תא חשמלי וצורך, הוא מעגל טורי. באIOR 76-8 נתונים שני מעגליים טוריים: המעגל שבAIR 76-8א מכיל נגד R וצורך R_L , והמעגל שבAIR 76-8ב - מכיל את ההתנגדות הפנימית r ואת ההתנגדות ה צורך R_L .

כאמור, הנצלות של מעגל טורי – נתונה במשוואה (8-15): $\eta = \frac{R_L}{R+R_L}$, ומכאן שנצילות מעגל, המכיל תא חשמלי וצורך, נתונה על ידי:

$$(8-22) \quad \eta = \frac{R_L}{r+R_L}$$

דוגמאות 8-22

נתון כי ההתנגדות הפנימית של מקור המתח שבAIR 76-8ב – היא 0.2Ω . מה תהיה נצלות המעגל, אם ההתנגדות ה צורך תהיה...
 א. קטנה מאוד ("קצarr")?
 ב. גדולה מאוד ("איןסופית"; נתק)?
 ג. 0.2Ω

פתרונות

א. נציב $0 = R_L$ במשוואה (8-22), $\eta = \frac{R_L}{r+R_L} = \eta$, ונקבל:

$$\eta = \frac{0}{r+0} = 0$$

ב. אם התנגדות הצרוך L גדולה מאוד ביחס להtanגדות הפנימית של מקור המתח, הרי שהסכום $R_L + r$ קרוב מאוד להtanגדות הצרוך L . במקרה של משווהת הנצילות, $\eta = \frac{R_L}{r+R_L}$, נקבל בקירוב $R_L \approx r$, והנצילות תהיה כמעט 1 (כלומר: כמעט 100%).

ג. נציג במשווהת הנצילות (22-8) 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 הצרוך שווה, במקרה זה, להtanגדות הפנימית של מקור המתח, והנצילות שווה כמובן ל-50%.

8.8.4 הcac"ם השקוול והtanגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח המוחברים בטור

לפעמים קורה שמקור מתח ייחד אינו מספיק להזנת צרך (או צרכנים). במקרים מסוימים דרישים לנו מתח, זרם והספק גדולים יותר מאשר מקור יחיד מסוגל לספק. כדי להזין צרך, אפשר לחבר מספר תאים זה לזה באותו מעגל. ההתקן המתתקבל קריי לעיתים סוללה (battery). אחת האפשרויות היא לחבר את התאים האלה בטור. חיבור בטור של שני תאים הוא חיבור שבו הבדיקה החיבורית של תא אחד מוחבר להזק השילוי של התא השני (איור 8-8).

כאמור, cac"ם הוא האנרגיה שהטהה החשמלי משקיע ביחידת מטען, כדי להעלות אותה מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה יותר, תוך התגברות על התanגדות הפנימית של התא. כאשר תאים אחדים מוחברים בטור, כל תא משקיע במטען אנרגיה - בהתאם לכac"ם שלו.

האנרגיה, המושקעת על ידי כל התאים ביחד, שווה לסכום האנרגיות שכל תא בנפרד מעניק למטען. לכן cac"ם השקוול E_{eq} של מקור המתח הוא סכוםcac"מים של התאים הבודדים. אם נתונים חתאים מוחברים בטור, שהcac"מים שלהם E_1, E_2, \dots, E_n (בהתאם), cac"ם השקוול שלהם הוא:

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

כל מקור מתח נוסף, המוחבר בטור, מגדיל את cac"ם השקוול E_{eq} . דוגמה לחיבור בטור של שני מקורות מתח של 1.5V – לצירת מקור של 7V – מתוארת באיור 8-77. המctrבר הוא מקור מתח, שנבנה על ידי חיבור בטור של מספר תאים חשמליים. למשל, מctrבר של 12V במכונית בניו משישה תאים (איור 8-78).

הן הסוללה והן המctrיבר מורכבים מתאים. אם כן, מה ההבדל בין סוללה למctrיבר?

הсолלות נקראות **תאים ראשוניים** (primary cells). המטענים בתא ראשוןו נתקלים בהתנגדות לתנועתם דרך האלקטרוליט; וכאשר התא מתישן, גזלה התנגדותו הפנימית. כתוצאה לכך, קטן מתח הבדיקה של התא. לפיכך התא מפסיק לפעול.

לעומת זאת, יש תאים (או סוללות) הנחוצים לטעינה מחדש באמצעות זרם חשמלי. תאים כאלה נקראים **תאים שניים** (secondary cells), או **mctrivers**, או **סוללות נטענות**. לתא שני במכונית מקובל לקרוא **mctrיבר**, ולתא שני במכשירים אלקטרוניים (טלפון נייד וטלפון אלחוטי, למשל) מקובל לקרוא **סוללה נטענת**.

לאחר שנחלש הcac'm, הנוצר בין האלקטרודות של תא שני, אפשר לחזור ולטעון תא זה, ולהחזיר אותו למctrיבו המקורי - שלפני התחלת השימוש. אפשר לחזור שוב ושוב על התהילה עד שgam תא זה יפסיק לפעול.

מכל מקום, לא תמיד מקרים על הבדיקה בשימוש במונחים אלה, והפירוש של **BATTERY** יכול להיות "סוללה" או "mctrיבר". לפי ההקשר אפשר לזהות שימושים אלה.

מהחר שלכל אחד מן התאים, המרכיבים את מקור המתח, יש התנגדות פנימית, גם למקור המתח כלו יש התנגדות פנימית. את התנגדות הפנימית של מקור מתח, המורכב מכמה תאים, נקבע **התנגדות פנימית Skola**. לצורך חישוב התנגדות זו של תאים מחוברים בטור נתבונן במקרה הפשוט ביותר: חיבור טורי של שני תאים (איור 79-8א).

התנגדויות הפנימיות מחוברות בטור, ולכן **התנגדות השוקלה שלhn**, r_{eq} , היא:

$$r_{eq} = r_1 + r_2$$

באיור 79-8ב מתוארים הcac'm השוקול וההתנגדות הפנימית השוקול של שני התאים. באופן כללי, **התנגדות הפנימית השוקול** r_{eq} של ח תאים, המוחברים בטור, היא:

$$r_{eq} = r_1 + r_2 + \dots + r_n$$

כאשר r_1, \dots, r_n הן **התנגדויות הפנימיות של Ch התאים**.

8.8.5 הaca"מ השКОל והתנגדות הפנימית השКОלה של מקורות מתח המחוBrIM במקביל

חיבור במקביל של מקורות מתח - הוא חיבור, שבו ההדקדים החיוBi'IM של המקורות מוחברים זה לזה, ויוצרים קוtb חיBi' משותף; וההדקדים השLI'LIIM של אותם מקורות מתח - מוחברים זה לזה, ויוצרים קוtb שLI'LI משותף (איור 83-8).

לשני התאים, המחוBrIM במקביל באIOR 83-8, יש אותוaca"m, ואין זה מקרה. לא רצוי לחבר במקביל מקורות מתח שהaca"m שלהם שונה. אם לחבר במקביל שני תאים, שאין להם אותוaca"m, ייווצר מתח בין התאים, ויעבור ביניהם זרם גם כאשר המעגל פתוח. זרם זה לא יביא לנו תועלת. אנרגיה חשמלית תתבצע, והתאים יתרוקנו. יתרה מזאת, בגלל ההתנגדות הפנימית הקטנה, בדרך כלל, של התאים, ייווצר בתוך התאים זרם גדול ביותר העול להרוו את התאים.

אם לחבר צורך לתאים - בעלי אותוaca"m ומוחברים במקביל – כמפורט באIOR 84-8, נקבל – לפי חוק הזרמים של קירכהוף – כי הזרם I בצרוך הוא סכום הזרמים, שמקורות המתח מספקים:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

כל מטען במעגל ינוע עקב העבודה שימושו בו אחד התאים. מטען מסוים ינוע במעגל עקבaca"m של תא אחד, ומטען אחר ינוע במעגל עקבaca"m של אותו תא, או של תא אחר. אך מאחר שהaca"m של התאים הוא זהה, כל מטען במעגל ינוע עקבaca"m זהה.aca"m השקול של מקור מתח, המורכב מ- n תאים בעלי אותוaca"m, שווה לפחותaca"m של כל אחד מהתאים הללו:

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$$

כאמור, ההתנגדות הפנימית השKOלה של מקורות מתח, המחוBrIM בטOR, חושבה על פי נוסחת ההתנגדות השKOלה של נגדים בטOR.

באופן דומה, מחשבים את ההתנגדות הפנימית השKOלה של מקורות מתח – המחוBrIM במקביל, ובעלי同一aca"m זהה – על פי נוסחת ההתנגדות השKOלה של נגדים במקביל. נסמן את ההתנגדויות הפנימיות של n התאים – על ידי r_1, r_2, \dots, r_n . ההתנגדות הפנימית השKOלה של n התאים, המחוBrIM 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. בניתוח נקבל אפוא תוצאה זו ללא הוכחה.

כשם שההתקנות השcoleה של נגדים, המוחברים במקביל, קטנה מכל אחת מההתקנות, כך גם ההתקנות הפנימית השcoleה, של מקורות המוחברים במקביל, קטנה מכל אחת מההתקנות הפנימיות של המקורות.

8.8.6 חיבור מעורב של תאים

לפעמים, בגלל דרישות למתח ולהספק מסוימים, יש צורך לחבר תאים בחיבור מעורב. ראיינו כבר אפשרות שונת לחיבור מעורב של נגדים. באופן דומה אפשר לחבר תאים בנסיבות שונות.

כאןណון רק במבנה של תאים הכלול קבוצות אחדות של תאים מוחברים בטור, וכל קבוצה מוחברת במקביל לקבוצות נוספות. מבנה זה מתואר באIOR 85-8. כל קבוצה במעגל זה כוללת שני תאים בטור; ויש שלוש קבוצות המוחברות במקביל. גם בחיבור מעורב חייבים כל התאים להיות זמינים, בגלל המוגבלות שפורטו לגבי חיבור תאים במקביל.

דוגמה 8-24

בטאו את הcac"ם השcole ואות ההתקנות הפנימית השcoleה של מבנה התאים שבIOR 85-8. הניחו כי cac"ם של כל תא הוא E , וההתקנות הפנימית – r .

פתרון

נשתמש במשוואות שפיתחנו לקבלת הגדים השcoleים של cac"ם וההתקנות הפנימית, כדי לבטא את הגדים הנדרשים. נבטא תחילה את cac"ם השcole E_s ואת ההתקנות הפנימית השcoleה r_s של אחת מקבוצות התאים המוחברות בטור.

cac"ם השcole של שני תאים זהים (שהcac"ם של כל אחד מהם הוא E), המוחברים בטור, הוא $2E_s = E$; וההתקנות הפנימית השcoleה של שני תאים אלה – היא $2r_s = r$. נוכל אפוא להמיר את מקור המתח, המתואר באIOR 85-8, במקור המתח המתואר באIOR 86-8.

באיור 8-8 נתונים שלושה מקורות מתח המוחברים במקביל. הכא"מ השקול של תאים אלה – הוא $E_{eq} = 2E$ וההתנגדות הפנימית השקולה היא $r_{eq} = \frac{2}{3}r$. נוכל אףו להחליף את מערכ התאים שבאיור 8-8 – במקור מתח, שהכא"מ שלו הוא $2E$, וההתנגדות הפנימית היא $\frac{2}{3}r$.

זרם I , הזורם בצרוך, שההתנגדותו R ואשר מחובר למערך התאים המתואר באיור 8-8, יהיה:

$$I = \frac{2E}{R + \frac{2}{3}r}$$

נניח כי בחיבור מעורב של תאים זהים – דוגמת זה שבאיור 8-8 – יש קבוצות של תאים במקביל, ובכל קבוצה – s תאים בטור. הכא"מ השקול של כל התאים האלה הוא sE , וההתנגדות הפנימית השקולה היא $r_{eq} = \frac{sr}{p}$.

קיבלנו אףו מעגל טורי הכלול מוקור מתח E_{eq} , שההתנגדות הפנימית r_{eq} , וצרוך R . ראינו שהתנאי להעברת הספק מרבי לצרוך במעגל טורי הוא שההתנגדות הצרוך שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח, כלומר:

$$R = r_{eq} = \frac{sr}{p}$$

אם ההתנגדות הצרוך, המחבר למערך תאים בחיבור מעורב, תהיה שווה ל- $\frac{sr}{p}$, יהיה אףו זרם מרבי בצרוך.

7.8.7 קיבול שקול של תאים המוחברים בטור, במקביל ובמעורב

קיבול של תא חסמי

מקור המתח, שאנו עוסקים בו, הוא התא החסמי, ההופך כאמור אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית. האנרגיה הכימית, שהטא מכיל, מוגבלת כמוון. למדנו כבר את הקשר בין אנרגיה להספק: האנרגיה W , הכרוכה בהנעת המטענים במשך הזמן t_0 , שווה ל- Pt_0 (כלומר: למכפלת ההספק P בזמן t_0):

$$W = Pt_0$$

אנו מניחים כי הכא"ם קבוע, זרם המעגל קבוע – ואף ההספק קבוע. למדנו שההספק נתון על ידי מכפלת המתח בזרם, וכן שההספק נתון על ידי מכפלת הכא"ם E של מקור המתח – בזרם המעגל |:

$$P = EI$$

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 לצורכי מעגל – זרם בעל ערך קבוע |. 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. אכן, הקיבול It_0 של התא, הוא כמות המטען Q, שהטה מעביר במעגל במשך זמן פעולה t_0 , כשהכא"ם של התא קבוע:

$$Q = It_0$$

בנוסף לכך ולהתנגדות הפנימית, קיבול התא הוא אחד ממאפייניו העיקריים של התא החשמלי. יצרני תאים נוהגים בדרך כלל לדרג את התאים החשמליים לפי הקיבול שלהם בה- $A \cdot h$. אפשר לקבוע את הקיבול של התא באמצעות פריקתו בזרם קבוע, ובאמצעות מדידת זמן הפריקה. קיבול התא יתקבל אףו כמכפלת הזרם (באמפרים) בזמן הפריקה (בשעות).

דוגמה 8-25

- בטלפון נייד מסוים נמצאת סוללה, שהכא"ם שלה 7.6V , וקיבולה $1,200\text{ mAh}$. נניח כי זרם קבוע של 200 mA זורם בטלפון במשך כל זמן פעולה.
- כמה זמן יכול הטלפון לנדי לפעול ברכישות?
 - מהו ההספק שצורך הטלפון לנדי?
 - מהי כמות האנרגיה, שהסוללה יכולה לספק במתח קבוע?
 - 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 המתה נתון על ידי $E=EI$. 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, $It_0 = Q$. נציב את הערכים המספריים, ונקבל:

$$Q = It_0 = 200 \text{ mA} \times 6h = 0.2A \times 6 \times 3,600 = 4,320 \text{ C}$$

הקיבול השקול של תאים מחוברים בטור

הכרנו שלושה מאפיינים של התא החשמלי: כא"מ, התנגדות פנימית וקיבול. למדנו לחשב את הכא"מ השקול וההתנגדות הפנימית השקוולה של מקור מתח המורכב מתאים מחוברים בטור. עתה נלמד לחשב את הקיבול השקול של תאים מחוברים בטור. לשם כך נתבונן במערך של n תאים זהים מחוברים בטור, ונחשב את הקיבול השקול של מקור זה.

במugen, המתואר באיור 87-8א, נתונים n תאים זהים מחוברים בטור. לתאים אלה מחובר זרם I . המugen הוא טורי, ולכן אותו זרם I זורם בכל תא. מאחר שהתאים זהים, משך הזמן שזרם I קבוע יזרום בכל תא 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 הזהים במקור מתח שקול, כך שייתקבל המugen המתואר באיור 87-8ב.

הזרם I במugen זה שווה לזרם במugen באיור 87-8א. מקור המתה השקול יזרום זרם I משך זמן t_0 – כמו התאים מחוברים בטור. מכאן שהקיבול של מקור המתה השקול הוא $Q_0 = It_0$. נסיק אפוא כי הקיבול השקול Q של מקור מתח הבניי מתאים זהים, מחוברים 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 לצריך. גם במקרה זה יזרום אותו זרם בכל התאים, אך התא, שקיבולו הוא הקטן ביותר, יהיה הראשון שבו תתכללה האנרגיה הדורשה להנעת מטען מאלקטרודעה אחת של התא – לאלקטרודעה השנייה.

נסמן באמצעות Q_1 את הקיבול הקטן ביותר של אחד התאים המחברים בטור. הקיבול של תא זה הוא הקבוע אפוא את הקיבול של מערכת התאים המחברים בטור. מכאן נובע שהקיבול של מקור המתוך השקוול – שווה לקיבול Q_1 .

הקיבול השקוול של תאים זהים במקביל

אם נחבר במקביל ח תאים בעלי כא"ם זהה וקבוע, כל תא יעביר בمعالג מטען השווה לקיבול התא. המטען הכללי, שכל התאים יעבירו בمعالג, יהיה שווה לסכום המטענים שהתאים מעבירים. נסמן באמצעות Q_n, Q_2, \dots, Q_1 את קיבוליהם של ח התאים, ונקבל:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

ובניסוח מיולי: הקיבול השקוול של תאים, המחברים במקביל, שווה לסכום קיבוליהם.

השווואה בין קיבול שקוול של תאים בטור ובמקביל

למדנו כיצד למצוא את הכא"ם השקוול, ההתנגדות הפנימית השקוולה והקיבול השקוול של מקור מתוך, שמורכב מתאים המחברים בטור או במקביל. בטבלה 2-8 מופיעים – במרקוץ – הביטויים המתאימים עבור חיבור ח תאים זהים, המחברים בטור או במקביל. הכא"ם של כל תא הוא E ; ההתנגדות הפנימית – r , והקיבול – Q .

המאפיין של המקור	הערך בחיבור טורי	הערך בחיבור בודד	הערך ביחסו של תא	המאפיין של המקור
כא"ם שקוול	E_n	E	E	בודד
התנגדות פנימית שקוולה	r_n	$\frac{r}{n}$	r	מקביל
קיבול שקוול	Q	nQ	Q	קיים

טבלה 2-8 מאפיינים של מקור מתוך, המורכב מ- n תאים זהים

מעיון בטבלה 2-8, נוכל לראות מה היתרונות של חיבור תאים במקביל - לעומת חיבור תאים בטור: ההתנגדות הפנימית קטנה יותר, קיבול גדול יותר. אך הדרשיה שהתאים המחברים במקביל יהיו זהים, כדי שהמרקוץ - המורכב מתאים אלה - יוכל לפעול כראוי, מגבילה את מידת השימוש במקור צזה.

הקיבול השקול של תאים זהים בחיבור מעורב

כאמור, כאן נדון רק במערך של תאים ש כולל קבוצות אחידות של תאים מחוברים בטור, וכל קבוצה מחוברת במקביל לקבוצות נוספות. כדי להציג את הקיבול השקול של תאים זהים בחיבור מעורב, נחזור ונתבונן בمعالג המתואר באיור 8-8.

נסמן על ידי Q את הקיבול של כל אחד מהתאים בمعالג. הקיבול השקול Q_s של שני תאים, המוחוברים בטור, הוא $Q_s = Q$; והקיבול השקול של שלושת המקורות, המוחוברים במקביל (איור 8-8), הוא $Q_{eq} = 3Q$.

תרגיל**שאלה 8-78**

סמננו את המלה הנכונה בכל צמד של מילים מודגשות.
צרכן מחובר למקור מתח. מקור המתח מעביר את המטען החיוויים מפוטנציאלי גובה/נמוך לפוטנציאלי גובה/נמוך - בתוך התא החשמלי.

שאלה 8-79

1. מהו כא"מ? סמננו את כל התשובות הנכונות.
 - א. שם אחר למתח הבדיקה.
 - ב. קיצור של כוח אלקטרו-מניע.
 - ג. האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען - דרך ה策ן בלבד.
 - ד. האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען - דרך המעלג בלבד.
2. 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

- א. מהי התנגדות פנימית?
- ב. התנגדות ה策ן.
- ג. כל התנגדות הנמצאת בمعالג חשמלי.
- ד. התנגדות המקור למעבר מטען בו.

ה. התנגדות השוקלה בمعال טורי.

שאלות 8-82

צרכן מחובר בטור למקור מתח. לאיזה מתח שווה המתח של הצרך?

- א. לכ"מ של המקור.
 - ב. למתח ההדקקים של המקור.
 - ג. להפרש שבין הכא"מ של המקור, לבין למתח ההדקקים של המקור.
 - ד. לסקום של כא"מ המקור ולמתח ההדקקים של המקור.

שאלות 8-83

נתון כי הcap של מקור המתח במעגל שבאיור 7-8, הוא 9V. ההתנגדות הפנימית של המקור, היא 0.2Ω , וההתנגדות הצריך - Ω_{16} . חשבו את מתח הבדיקה של מקור המתח.

שאלות 8-84

צרקן, שהתנגדותו $\Omega_{\text{הצרקן}} = 50$, מחובר למקור מתח, שההתנגדות הפנימית $\Omega_0 = 0.1\Omega$. הזרם בצרקן הוא $I = 239.5 \text{ mA}$. חשבו את הcapacitance של מקור המתח.

שאלות 8-85

הכ"מ של מקור מתח - V_3 , וההנגדות הפנימית – 0.2Ω . צרכן, שההנגדות 16Ω , מחובר למקור המתח. מה הזרם בצרכן?

שאלות 8-86

בailo מהמקרים הבאים, מתוך הבדיקות של המקור שווה לכא"מ?

- .א. אם שום צורך אין מחובר להדק' המקור.
 - .ב. אם התנגדות המקור שווה לאפס.
 - .ג. אם התנגדות ה策ן שווה לאפס.
 - .ד. אם התנגדות המקור שווה להתנגדות ה策ן.

שאלות 8-87

בבעל כ"א"מ של 1.5V והתנגדות פנימית של 0.1Ω . התנגדות העומס (הצעזע) היא 15Ω .

- .א. מהו הזרם שהסוללה מספקת?
.ב. חשבו את ההספק החשמלי שהצעזוע צורף.

שאלה 8-8

- א. נתונים 20 תאים זהים מחוברים בטור. קיבול כל תא הוא $h \cdot 2A$. מהו הקיבול השקול של התאים?
- ב. נניח שהתאים מחוברים במקביל. מה יהיה הקיבול השקול שלהם?

שאלה 8-9

- א. שישנה תאים מחוברים במקביל. הכא"מ של כל אחד מהתאים הוא $1.5V$, וההנגדות הפנימית של כל תא היא -0.1Ω . נגד של 100Ω מחובר להדק כל אחד מהתאים, בדומה למתרואר באירור 8-8א. מהו הזרם בנגד?
- ב. מחברים שוב את התאים ואת הרצן, והפעם כולם בטור. מהו הזרם בנגד?

שאלה 8-10

הראו כי חרם בצרוך R שבציוור 8-8 נתון על ידי המשוואה $\frac{2E}{R+\frac{2}{3}r} = I$ שבסוף דוגמה 8-24.

שאלה 8-91

חמש סוללות זהות מחוברות במקביל. כל סוללה כוללת שלושה תאים זהים מחוברים בטור. הכא"מ של כל תא הוא $1.5V$, וההנגדות הפנימית -0.2Ω . חשבו את הכא"מ השקול ואת ההנגדות הפנימית השקולת של הסוללות.

סיכום

- כאשר נגדים שנמצאים באותו חוג מחוברים זה לזה, קצהו לקצה, כמו בשרשרת – ואין צמתים ביניהם - הנגדים מחוברים בטור. מעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בטור, נקרא מעגל טורי.
- התנגדות שקופה במעגל היא התנגדות, שכאשר היא מחוברת במקום מערכת נגדים כלשהו במעגל, היא אינה משנה את תנאי המעגל. זרם המקור אינו משתנה; והמתוח בין הנקודות - שאליהן מחוברת ההתנגדות השקופה – נשאר אותו מתח.
- ההתנגדות השקופה של שני נגדים, המחוברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים. כאשר נגדים מחוברים בטור, היחס בין המתחים של הנגדים – שווה ליחס בין ההתנגדויות הנגדים.
- ההתנגדות התילים במעגל החסמי - נקראת ההתנגדות הקו.
- נגדים, המחוברים בין אותם שני צמתים במעגל, מחוברים במקביל. מעגל חסמי, שבו כל הנגדים מחוברים במקביל, נקרא מעגל מקבילי.
- ההתנגדות השקופה R_{eq} של שני נגדים, המחוברים במקביל, נתונה באמצעות כל אחד 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 השקופה R_{eq} של n נגדים המחוברים במקביל:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$
- כשרכנים מחוברים במקביל לרשת, אפשר לחבר זרcn נוסף לרשת – או לנתק זרcn – בלי להשפיע על יתר הזרכנים.
- במעגל מעורב מחוברים חלק מן הנגדים במקביל, וחילק – מחוברים בטור.
- מחלוקת הוא ה^תקן המאפשר לקבל מתח מוצא, שהוא רק חלק מתח המקור. יש מחלוקת מתח, הבוני משני נגדים קבועים.
- הפוטנציאומטר והרייאוסטט הם שני סוגי של נגדים משתנים.
- סכום הספקי הזרכנים במעגל מעורב שווה להספק המקור.
- הנצילות היא היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושך.

- התנאי להעברת הספק מרבי לצריך במעגל טורי, הכולל מקור מתח ממשי וצריך, הוא שהתנגדות הצריך תהיה שווה להתנגדות המקור.
- האנרגיה, שמקורו מתח צריך להשקיע בהנעת יחידת מטען סיבוב המעגל החשמלי כלו, היא הכא"מ של מקור המתח. למקור המתח יש התנגדות פנימית. המתח שבין הדקי המקור - הוא מתח הבדיקה של המקור.
- קיבול של תא חשמלי הוא משך הזמן שבו התא יכול לספק לצריך במעגל – זרם בעל ערך קבוע.
- הנה המאפיינים של מקור מתח המורכב מ- n תאים זהים:

המאפיין של המקור	הזרק בחריבור טורי	הזרק בחריבור בודד	הזרק בחריבור טורי מקביל	הזרק בחריבור בודד מקביל
כא"מ שקול	nE	E	E	E
התנגדות פנימית שcolaה	z_0	$\frac{r}{n}$	r	r
קיבול שקול	Q	nQ	Q	Q

9. שיטות לפתרון מעגלים

עד כה למדנו לפתור מעגלים טוריים, מקבילים או מעורבים, כאשר כל מעגל המכיל מקור מתח יחיד. לצורך הפתרון, חישבנו את ההתנגדות השוקלה של הנגדים במעגל, ובאמצעות חוק אום מצאנו את הזרמים והמתחים השונים במעגל.

האם ד' בחוק אום ובחישוב ההתנגדות השוקלה כדי לפתור כל מעגל شمالי?

כדי לענות על שאלה זו, נתבונן תחילה במעגל המכיל מקור מתח יחיד, כמתואר באIOR 1-9. זהו מעגל מעורב, שבו הנגד R_1 מחובר בטור לצירוף של הנגדים R_2 ו- R_3 , המוחברים במקביל.

בAIOR 2-9 נתון שוב המעגל שבAIOR 1-9, ומוסמנים בו הזרמים במעגל. כאמור, השתמשנו בכלל הבא לסימון ציווני הזרמים:

הזרם המוסכם בנגד - זרם מנוקודה בעלת פוטנציאלי גבוה לנוקודה בעלת פוטנציאלי נמוך.

אם כן, הזרם הכללי I_1 במעגל יוצא מההדק החיבוי של המקור המתח, עבר בנגד R_1 , מגיע לצומת A, ומתרצל לזרמים I_2 ו- I_3 בנגדים R_2 ו- R_3 . כל ציווני הזרמים במעגל שבAIOR 2-9-מוסמנים בהתאם לכל סימון ציווני הזרמים.

עשינו נוסף למעגל שבAIOR 1-9 שני מקורות מתח, ונקבל את המעגל שבAIOR 3-9.

נניח שככל מקור מתח מזרים זרם,SCIIONO מההדק החיבוי של המקור – אל הנגד הסמוך לו,OCIIONI הזרמים הם כמתואר AIOR 4-9. נראה מיד שהדבר לא יתכן. כי הרי במקרה זה,LCOMA A היו נכנסים שלושה זרים I_1 , I_2 ו- I_3 , ואף זרם לא היה יוצא מהם. דבר זה עומד בסתייה לחוק הזרמים של קירכהוף, שלפיו סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.

המסקנה היא שלפחותSCIIONO של אחד הזרמים חייב להיות הפוך לכיוון המוסמן AIOR 4-9. אבל SCIIONO של איזה זרם מבין השלושה הוא הפוך? יתכן גם SCIIONIם של שניים מבין הזרמים I_1 , I_2 הפוכים מהמוסמן AIOR 4-9. ואם כך הדבר – אילו מארם?

לא די בחוק אום וביחסוב התנוגדיות שקולות כדי לענות על השאלות האלה ולמצוא פתרון לمعالים, כדוגמת המمعال שבאיור 5-9. אבל קיימות שיטות שבערתן אפשר לפתרוمعالים כאלה, ואף מעגלים מורכבים יותר. כל השיטות הללו מבוססות על שימוש בחוק אום ובחוק קירכהוף. נלמד עתה את אחת השיטות הללו.

9.1 שיטה דרמי הדוגים

שיטת זרמי החוגים לפתרון מעגלים פשוטים פותחה על ידי הפיזיקאי הבריטי מקסווול.

ג'יימס קלארק מקסווול

1879-1831

מקסווול 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.

מקסווול נחשב לאחד הפיזיקאים הגדולים בכל הדורות. מבין הפיזיקאים שחיו במאה ה-19, הוא היה בעל השפעה הגדולה ביותר על הפיסיקה המודרנית של המאה ה-20. רבים מהפיזיקאים בימינו רואים בו פיזיקאי מדרגתם של ניוטון ואיינשטיין. איינשטיין תיאר את עבודתו של מקסווול כעבודה המعمיקה ביותר והפורייה ביותר בפיסיקה מאז ניוטון.

מקסווול איחד את תורה החשמל ואת תורה המגנטיות לתורה אחת – התורה האלקטרומגנטיות, וניסח אותה באמצעות ארבע משוואות בלבד, הנקראות על שמו. משוואות אלה הן הבסיס המתמטי לכל התופעות החשמליות הקלאסיות.

אנו נפתרו בשיטת זרמי החוגים את המمعال שבאיור 5-9א, אך תחיליה נסביר את המושג **זרם חוג**. לשם כך נחזור ונסביר מה הם הזרמים שעסוקנו בהם עד כה. כאמור, בכל קטע בمعال, המורכב מקבוצת רכיבים המוחברים בטור, זורם אותו זרם. לקבוצת רכיבים צאת קוראים ענף; ולזרם צזה קוראים **זרם ענף**. אם נחבר מד-זרם בטור לענף מסוים, ימדד מד-זרם את זרם הענף. בערך זה, זרם ענף - הזרם בענף אחד - יכול להיות שונה מזרם ענף הזרם בענף אחר.

בפרקם הקודמים עסקנו, למעשה, בזרמי ענפים (הן בمعالים טוריים והן בمعالים מעורבים), בלי שקראננו להם בשם זה. נתבונן, למשל, בمعال שבאיור 5-9א. זרמי הענפים בمعال זה הם הזרמים שבענפים הבאים:

(מקור המתח U_a והנגד R_1) BAF

(מקור המתח U_b והנגד R_2) BE

(מקור המתח U_c והנגד R_3) BCD

אם כן, במעגל שבאיור 5-9א, 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 5-9א. נסתכל על כל חוג בנפרד, ונשیر זרם אחד לחוג כולו. לחוג $ABEFA$ נשיר את זרם החוג I_1 , ולהוג $BCDEB$ נשיר את זרם החוג I_2 , כמתואר באיור 5-9ב.

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 . וכן הדבר לגבי החוג $BCDEB$, המורכב מענפים BCD ו- BE . בכל החוג הזה זורם אותו זרם חוג I_2 .

אם 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 ימדד 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 **השקל** של שני זרמי החוגים. נסביר זאת. אם רואים כי במעגל שבאיור 5-9ב, זרם החוג I_1 בענף BE – הפוך בכיוונו לזרם החוג I_2 בענף זה. لكن זרם הענף שווה להפרש בין שני זרמי החוגים הללו (להلن נדון בתנאי לכך, שההפרש יהיה $I_2 - I_1$ או $I_1 - I_2$). הפרש זרמים זה הוא הזרם השקל של שני זרמי החוגים הזורמים בענף BE , וכיוון בכיוון הזרם הגדל בין שניהם.

הכיווןים של זרמי החוגים, I_1 ו- I_2 , סומנו באיור 5-9ב בכיוון תנועת מחוגי השעון. כך מסמנים לעיתים קרובות את כיוון זרמי החוגים, אך לא תמיד.

סימון מתחים בענף שיש בו שני זרמי חוגים

חשוב להבין כי זרמי החוגים הם זרמים "מלאכוטיים", שאנו מכניםים כדי לפתור מעגלים באורה קלה יותר. אך הזרמים המשמשים במעגל הם זרמי הענפים. בענף שזורם בו רק זרם אחד, זרם החוג שווה לזרם הענף: כך הדבר לגבי הענף BAF שבאיור 5-9ב (זרם הענף שווה לזרם החוג I_1), וכן הדבר לגבי הענף BCD (זרם הענף שווה לזרם החוג I_2). בענף, שזורם בו יותר מזרים חוג אחד, זרם הענף הוא **השקל** 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 5-9ב. תחילת נתבונן בחוג השמאלי, שבו זורם זרם החוג I_1 . חוג זה מודגש באיור 6-9א. מפל המתח U' של הנגד R_2 , שזורם בו זרם החוג I_1 , הוא $I_1 R_2 = U'$. החץ המצביע על מקום הפוטנציאלי הגבוה ברכיב מסומן באיור זה, לפי ההסכם שקבענו, בכיוון הפוך לזרם החוג I_1 .

החוג הימני של המעגל שבאיור 5-9ב מודגש באיור 6-9ב. בחוג זה זורם זרם החוג I_2 . מפל המתח U'' של הנגד R_2 , שזורם בו זרם החוג I_2 , הוא $I_2 R_2 = U''$. גם במקרה זה סומן החץ ליד הרכיב, לפי ההסכם שקבענו.

אם כן, בשיטת זרמי החוגים, עבורים בנגד R_2 שני זרמים, ויש בו שני מתחים: U'_2 ו- U''_2 . באיור 7-9 נתוון שוב המעגל שבאיור 5-9ב, ומוסמנים בו שני המתחים U'_2 ו- U''_2 והחצים המתאים להם.

המתח U_2 , שמדד 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 הגדל מבין שני המתחים: U'_2 ו- U''_2 .

עתה, לאחר שהסבירנו 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 7-9. את השלבים הראשונים בפתרון המעגל כבר עשינו: חילקונו את המעגל לשני חוגים, $ABEFA$ ו- $BCDEB$; שיכנו לכל

חוג - זרם חוג משלו, וקבענו כיון 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 באIOR 8-9.

עכשו נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגביו כל אחד מהחוגים במעגל. נקייף כל חוג בכיוון זרם החוג המתאים, ונקבל:

משוואת המתחים בחוג השמאלי ($ABEFA$):

$$U_a - \underbrace{U_1 + U_2'}_{\text{המתח על הנגד}} - U_b = 0$$

משוואת המתחים בחוג הימני ($BCDEB$):

$$U_b + \underbrace{U_2' - U_2''}_{\text{המתח על הנגד}} - U_3 + U_c = 0$$

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:

$$U_a - R_1 I_1 - R_2 I_1 + R_2 I_2 - U_b = 0$$

$$U_b + R_2 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_2 + U_c = 0$$

נכנו איברים (כלומר, נוציא את I_1 ואת I_2 מחוץ לסוגרים, בכל אחת מהמשוואות), נרכז את המתחים באגף אחד, ואת הזרמים וההנגדויות – 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 גורמים, I_1 ו- I_2 . (אנו מניחים שערci הנגדים ומקורות המתח במעגל ידועים לנו). אם נפתרו את המשוואות האלה, נדע מה זרם בכל נגד במעגל. באIOR 9-9 נתון המעלג שבIOR 5-9, כאשר רשומים בו ערכי הרכיבים במעגל.

נציב את ערכי הרכיבים בשתי המשוואות שקיבלנו:

$$(100 + 200)I_1 - 200I_2 = 45 - 30$$

$$-200I_1 + (200 + 400)I_2 = 30 + 10$$

נכנו איברים, ונתקבל:

$$300I_1 - 200I_2 = 15$$

$$-200I_1 + 600I_2 = 40$$

קיבלו שני משוואות פשוטות למד' בשני הנעלמים I_1 ו- I_2 . נפתרו אותן ונתקבל:

$$I_1 = 0.121A = 121 \text{ mA}$$

$$I_2 = 0.107A = 107 \text{ mA}$$

הכוונים של זרמי החוגים, I_1 ו- I_2 , נקבעו בהתאם לבחירתנו. אבל יכולנו לבחור את זרמי החוגים גם בכיוון הפוך לכיוון המסומן.

air נדע אם בחירת הכוונים של זרמי החוגים - נכונה?

ונכל לדעת זאת רק לאחר שנחשב את זרמי החוגים. כאשר מתקבל ערך חיובי של זרם, פירוש הדבר שכיוון הזרם במעגל הוא אכן כיוון שבחרנו מלכתחילה; ואילו כאשר מתקבל ערך שלילי של זרם, פירוש הדבר שכיוון הזרם במעגל - **הפוך לכיוון שבחרנו מלכתחילה**.

מה נוכל להסיק מהפתרונות שקיבלו?

- הזרם בנגד $\Omega = R_1 = 100\Omega$ הוא $A = I_1 = 0.121A$. לזרם I_1 יש ערך חיובי, لكن הכוון של זרם זה הוא כמתואר במעגל שבאיור 9-9.

- הזרם בנגד $\Omega = R_3 = 400\Omega$ הוא $A = I_2 = 0.107A$. גם לזרם I_2 יש ערך חיובי, אך גם הכוון של זרם זה הוא כמתואר במעגל שבאיור 9-9.

- הזרם בנגד $\Omega = R_2 = 200\Omega$ הוא הפרש בין שני זרמי I_1 ו- I_2 . כיוון הזרם בנגד זה הוא כיוון הזרם הגדול מבין השניים. מאחר שהזרם I_1 גדול מהזרם I_2 , כיוון הזרם בנגד R_2 הוא כיוון הזרם I_1 (כלומר, מהנקודה B לנקודה E).

$$I_1 - I_2 = 0.121 - 0.107 = 0.014A = 14 \text{ mA}$$

לאחר שיחסבנו את הזרם בכל ענף במעגל, נוכל לחשב את המתח של כל אחד מהנגדים במעגל, וכן את ההספק של כל נגד. בכך נסימן את פתרון המעגל.

9-1 דוגמה

חשבו את ההספק הנגד R_3 , אשר במעגל שבאיור 10-9.

פתרון

באיור 11-9 מסומנים החיצים ליד רכיבי המעגל, בהתאם להסכמה. כיוון זרמי החוגים נקבעו כרצוננו. נקייף כל חוג בכיוון זרם החוג המתאים, ונשתמש בחוק המתחים של קירכהוף, כדי לרשום את משוואות המתחים בחוגים. המשוואות הן:

$$(החוג השמאלי) \quad U_a - U_1 - U'_3 - U''_3 = 0$$

$$(החוג) \quad U_b - U_2 - U'_3 - U''_3 = 0$$

(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:

$$U_a - R_1 I_1 - R_3 I_1 - R_3 I_2 = 0$$

$$U_b - R_2 I_2 - R_3 I_1 - R_3 I_2 = 0$$

נכנו איברים, ונרכז את המתחים באגף אחד, ואת הזרמים וההנגדויות - 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, لكن הכוון של זרם זה הפוך לכיוון המתואר במעגל שבאיור 11-9. ואילו לזרם I_2 יש ערך חיובי, אך כיוון זרם זה הוא כמתואר באיור. במעגל שבאיור 12-9 מסומנים כיווני הזרמים כך, שכל אחד מהם יש ערך חיובי.

כיוון הזרם I_1 בנגד Ω_3 (איור 12-9) הפוך לכיוון הזרם I_2 בנגד זה. לאחר שהזרם I_2 גדול מהזרם I_1 , הרי שכיוון הזרם I_3 בנגד Ω_3 – הוא כיוון 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 12-9. המתח U_3 והחץ שלו מוסומנים גם הם. כיווני החצים נקבעו לפי הסכם הסימונים של זרם ומתח בנגד. הספק נגד R_3 נתון על ידי $P_3 = I_3^2 R_3 = \left(\frac{18.18}{1,000}\right)^2 \times 3,000 = 0.99 \text{ W}$

קיבלה מידית של משוואות בשיטת זרמי החוגים

למדנו לכתוב את משוואות המתיחסים 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.

התהילך של קבלת משוואות המתיחסים – כלל כמה וכמה שלבים. ניוקח עכשו כיצד אפשר לקבל באופן מיידי את המשוואות. לשם כך נחזיר ונרשום את משוואות המתיחסים בחוגי המעגל שבאיור 6-9. מטעמי נוחות חזרנו והבאנו באיור 13-9.

משוואות המתיחסים בחוג A , שבו זורם זרם החוג I_1 (המשוואة הראשונה):

$$(R_1 + R_2)I_1 - R_2I_2 = U_a - U_b$$

משוואות המתיחסים בחוג B , שבו זורם זרם החוג I_2 (המשוואة השנייה):

$$-R_2I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b + U_c$$

נתחיל במסוואת הראשונה. אגד ימין של המשוואת – הוא סכום מתכי המקורות בחוג $ABEFA$. הסימן ליד כל אחד ממתכי המקורות במסוואת זו נקבע לפי הכלל שלמדנו בסעיף .7.3

כיוון החץ ליד מקור המתה a הוא בכיוון זרם החוג I_1 , ולכן רושמים משמאלי ל- a את הסימן "+" (או שלא רושמים שום סימן); וכיון החץ ליד מקור המתה של b , הפוך לכיוון של זרם החוג I_1 , ולכן רשם משמאלי ל- b הסימן "-".

אגף שמאל של המשוואה הראשונה הוא סכום מפלי המתה בחוג $ABEFA$. סכום זה מבוטא באמצעות מכפלות של התנגדויות - בזרמי החוגים. נפרט זאת.

- מכפילים את סכום ההתנגדויות של החוג – בזרם החוג. סכום ההתנגדויות של החוג $ABEFA$, שהוא $R_1 + R_2 \cdot R_1$, והוא מכפלה שלם היא $(R_1 + R_2)I_1$. מכפלה זו מופיעה במשוואה הראשונה.
- אם בחוג יש נגד, המשותף לחוג נוסף, מכפילים כל ההתנגדות משותפת – בזרם החוג של החוג הנוסף. הנגד R_2 משותף לחוג $ABEFA$ ולחוג הנוסף $BCDEB$. זרם החוג הנוסף, הזרם בנגד זה, הוא I_2 . لكن מופיעה במשוואה הראשונה המכפלה $R_2 I_2$.
- משמאלי 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 "+" משמאלי למכפלה השנייה (מכפלת ההתנגדות המשותפת – בזרם החוג הנוסף). ואם לשני זרמי החוגים יש כיוונים הפוכים בנגד המשותף, רושמים את הסימן "-" משמאלי למכפלה זו.

באופן דומה מקבלים במשוואה השנייה את הביטויים המתאים לחוג $BCDEB$. כיוני החצים ליד מקורות המתה c והם בכיוון זרם החוג I_2 , ולכן מתחימים אלה מופיעים בקבוקיות חיובית – באגף ימין של המשוואה.

באגף שמאל של המשוואה השנייה מופיעה המכפלה של זרם החוג I_2 בסכום ההתנגדויות של החוג: $(R_2 + R_3)I_2$. משמאלי למכפלה זו, מופיע הסימן "+". הנגד R_2 משותף לחוג $ABEFA$ ולחוג הנוסף $BCDEB$, וזרם בו זרם החוג הנוסף I_1 . لكن במשוואה השנייה מופיעה המכפלה $I_2 I_1$. הואיל ושלני זרמי החוגים, יש כיוונים הפוכים בנגד המשותף, רושמים את הסימן "-" משמאלי למכפלה זו.

בגישה, שבה השתמשנו לקבללה מידית של המשוואות בשיטת זרמי החוגים, אפשר להשתמש לגבי כל מעגל חשמלי, ולא רק לגבי המעגל שבאיור 5-9ב. בדוגמה הבאה נשתמש בגישה זו – לגבי מעגל נוסף.

9-2 דוגמה

רשמו באופן מיידי את משוואות המתיחסים של המעגל שבאיור 11-9.

פתרון

סכום המתיחסים בחוג השמאלי, הוא U_a ; וסכום ההתנגדויות בחוג זה, הוא $R_3 + R_1$. מכפלת סכום ההתנגדויות של החוג – בזרם החוג, היא $I_1(R_1 + R_3)$. הנגד R_3 משותף לחוג השמאלי ולהוג הימני. זרם החוג הנוסף, הזורם בנגד זה, הוא I_2 . לכן מופיעה במשווהה הראשונה המכפלה $R_3 I_2$.

כיון זרם החוג I_2 בנגד המשותף הוא כיוון זרם החוג I_1 , ולכן יופיע הסימן "+" משמאלי למכפלה $R_3 I_2$. מכאן שמשוואת המתיחסים של החוג השמאלי היא:

$$(R_1 + R_3)I_1 + R_3 I_2 = U_a$$

סכום המתיחסים 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 "+" משמאלי למכפלה $R_3 I_1$. מכאן שמשוואת המתיחסים של החוג הימני היא:

$$R_3 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b$$

תרגול

9-1 שאלה

בכל אחד מהמעגלים שבאיור 14-9 מסומנים זרמים. באילו מעגלים אלה – לא ניתן שכל כיווני הזרמים הם כמסומן באיזור זה?

9-2 שאלה

חשבו את הזרם בנגד R_3 במעגל שבאיור 15-9.

9-3 שאלה

A. נחזיר למעגל המקורי שבאיור 15-9. חשבו את הזרם בנגד R_3 למעגל זה.

שאלה 4-9

A. נחזיר למעגל המקורי שבאיור 15-9. מגדילים כפלים את המתח של כל אחד מקורות המתח שבאיור 15-9. חשבו את הזרם בנגד R_3 .

B. מגדילים כפלים גם את כל אחת מהה Tangent Voltages שבאיור 15-9. מה יהיה עכשו הזרם בנגד R_3 ?

שאלה 5-9

A. הפכו את הכוון של כל אחד מהזרמים המסומנים למעגל שבאיור 9-9, וחשבו את המתח של הנגד R_2 .

B. חשבו את המתח של הנגד R_2 למעגל המקורי שבאיור 9-9. האם קיבלתם אותה תוצאה?

שאלה 6-9

חשבו את הספק הנגד R למעגל שבאיור 16-9.

שאלה 7-9

A. חשבו את הזרם בנגד R_1 אשר למעגל שבאיור 17-9, תוך שימוש בתנודות שוקולה בטורי ובמקביל.

B. חזו וחשבו את הזרם בנגד R_1 , תוך שימוש בשיטת זרמי החוגים.

C. איך שיטה تعدיפה לגבי מעגל זה? נמקו את תשובהכם.

9.2 משפט תבוני

עד כה רأינו שאפשר לקבלת מעגל שקווי למעגל נתון באמצעות התנודות שוקולה בטורי, או במקביל. הייצוג השוקול, שנלמד בסעיף זה, מיועד להחליף הן מקורות והן נגדים למעגל המקורי - ברכיבים שוקולים. ייצוג זה מבוסס על משפט תנין (*Thevenin's theorem*). משפט תנין תקף לגבי מעגליים שטכליים רק רכיבים ליניאריים (*linear components*). לצורך דינונו, רכיב ליניארי הוא רכיב שהקשר בין המתח שלו, לבין הזרם העובר דרכו, מתואר באמצעות קו ישר. דוגמאות לרכיבים ליניאריים: נגדים; ומוקורות מתח (אידיאליים וממשיים). מעגל ליניארי הוא מעגל שטכלי רק רכיבים ליניאריים.

בטרם נביא את משפט תבנין, נתבונן בשני המוגלים המתוארים באIOR 18-9א נטען מגל ליניארי כלשהו שמכיל מקורות מתח. למוגל זה, המסומן במלבן האפור שבאיור, יש שני הדק'י מוצא, A ו-B, וצרוך R_{L} המחבר בין הדק'ים אלה. באIOR 18-9ב מייצג המלבן האפור את חלק המוגל הליניארי. חלק זה כולל מקורות מתח. בהמשך הסעיף ניוכח שיש מקורות חשמל נוספים - ולא רק מקורות מתח.

משפט תבנין טוען שככל חלק של מגל ליניארי, שמכיל מקור חשמל אחד לפחות (למשל: איור 19-9א), ניתן לייצוג באמצעות מגל שוקול המורכב ממוקור מתח אידיאלי U_{Th} , שאליו מחבר בטור נגד R_{Th} (איור 19-9ב). המוגל השוקול נקרא לעיתים גם **מוגל תבנין**; U_{Th} נקרא **לפעמים מתח התבנין**, ו- R_{Th} – **התנגדות התבנין**. מוגל התבנין כולל רק את U_{Th} ואת R_{Th} , אך לא את הצרוך.

כדי למצאו מוגל התבנין, علينا למצוא את U_{Th} ואת R_{Th} . אפשר להוכיח (אך ההוכחה חורגת מסגרת הלימוד) שהמתוך U_{Th} הוא מתח המוגל הפתוח – בין שני הדק'ים A ו-B – בмагל המקורי (כלומר, המוגל הליניארי הכלול מקורות).

כלומר, אם ננטק את הצרוך R_{L} במוגל, המתואר באIOR 18-9, המתוך U_{Th} יהיה כמפורט באIOR 20-9; וההתנגדות R_{Th} היא ההתנגדות ש"רואה" הצרוך בין שני הדק'ים A ו-B – בмагל (וליתר דיוק: בחלק המוגל הליניארי הכלול מקורות), כאשר כל המקורות במוגל זה – **מושותקים (kill'd)**.

מה זה מקור מושותק? כדי להסביר את המושג מקור מתח **מושותק**, נחזור תחיליה על הקשר שבין מקור ממשי למקור אידיאלי. כאמור, אפשר לייצג מקור מתח ממשי באמצעות מקור מתח אידיאלי שאליו מחבר נגד, אשר התנגדותו שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח. מקור מתח מושותק הוא מקור שאינו פועל. מקור מתח **מושותק** הוא מקור מתח המיוצג על ידי התנגדותו הפנימית בלבד, כשהמקור המתוך האידיאלי – מוקוץ.

שאלה לדין

מה המשמעות של "...כאשר כל המקורות במוגל זה – מושותקים?" האם יש מקור מושותק, שאיןו מקור מתח?

כ. יש התקנים המשמשים כמקורות אנרגיה במעגל, ומספקים זרם שאינו תלוי ברכיבי המעגל האחרים, או במתח של הדקי המוקור. אופיין מתח-זרם מסוים של התקן זה – הטרנזיסטור – נתון באIOR 21-9א. באופיין זה יש תלות-מה של הזרם במתח.

אפשר לתאר לעצמו התקן אידיאלי, אשר האופיין מתח-זרם שלו יהיה כמפורט באIOR 21-9ב. מקור מתח זה נקרא **מקור זרם אידיאלי** (*ideal current source*). מקור זה מספק זרם קבוע, ללא תלות במתח של הדקי המוקור. באIOR 21-9ג נתונים סימונים מקובלים של מקור זרם אידיאלי.

בדומה למקור מתח גם למקור זרם עשויה להיות, עקרונית, התנגדות פנימית. באIOR 21-9 נתונים שני מעגלים: מקור מתח המחבר לצרक; ומקור זרם המחבר לצרक. מקור מתח ממש, שהተנגדותו הפנימית R , ניתן לתיאור באמצעות מקור זרם אידיאלי שאותו נגד R מחובר אליו במקביל - אם הזרים, שיוצר מקור הזרם האידיאלי, נתון על ידי $\frac{U}{r} = I_s$ – הכא"מ של מקור המתח האידיאלי).

דוגמה 3-9

- חשבו את מתח תבנין U_{Th} בין הנקודות A ו-B במעגל המתואר באIOR 21-9.
- חשבו את התנגדות תבנין, שאויה "רואה" הצרך במעגל זה.
- שרטטו את מעגל תבנין השקול של מעגל זה.

פתרון

- ננטק את הצרך R_L , ונקבל את המעגל המתואר באIOR 21-9.
- לפי חוק המתיחסים של קירכהוף בחוג $EACDFE$, 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 אפשר 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 יוצג על ידי התנגדות הפנימית שלו בלבד. נקבל את המעגל המתואר באIOR 21-9. ההתקנות, ש"רואה" הצרך R_L במעגל זה היא ההתקנות השקולת ארבעת הנגדים: R_1, R_2, r_1, r_2 . ההתקנות שקולת זו היא ההתקנות תבנין (R_{Th}). נקבל אףו:

$$R_{Th} = (R_1 + r_1) \parallel (R_2 + r_2) = \frac{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2)}{R_1 + r_1 + R_2 + r_2} = \frac{100.1 \times 300.2}{400.3} \approx 75\Omega$$

ג. מעגל תבנין השקול מתואר באיור 9-26. המעגל, השקול לזה המתואר באיור 9-23, מתואר באיור 9-26.

נניח שננתן מעגל, שבו מחברים בכל פעם נגד שונה (או נגד משתנה) בין שתי נקודות A ו-B, יש לחשב את הזרם (או המתח) בנגד בכל אחד מהמקרים. במעגל זה בולט במיוחד יתרון השימוש במשפט תנין, בהשוואה לשיטות אחרות לפתרון מעגליים (למשל: שיטת זרמי החוגים). נבהיר זאת.

כל אחד מהצרכנים "ראה" את אותו מעגל תנין, כי מתח תנין (U_{Th}) והתנגדות תנין (R_{Th}) אינם תלויים בצרוך. לכן די אם נחשב פעם אחת את U_{Th} ואת R_{Th} . אז נוכל למצוא את הזרם I_L בצרוך על ידי פתרת מעגל טורי פשוט, הכלול מתח U_{Th} ושני נגדים R_{Th} ו- R_L (איור 9-9ב), כולם:

$$I = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_L}$$

הזרמים בנגדים השונים, שנחבר למעגל, יתקבלו על ידי הצבת הערכים המתאימים של התנגדויות הצרוך R – במסווה זה. כאמור, מחשבים רק פעם אחת את U_{Th} ו- R_{Th} ומשתמשים בערכים אלה לכל אחת מהתנגדויות הצרוך.

דוגמה 9-4

- א. השתמשו במשפט תנין, וחשבו את הזרם I בנגד R_4 (איור 9-27).
- ב. חזרו על סעיף א, אלא שהנגד R_4 הוחלף בנגד שהתנגדותו $\Omega 25$.

פתרון

- א. לצורך חישוב מתח תנין U_{Th} , ננטק את R_4 , ונקבל את המעגל, המתואר באיור 9-28.

לפי חוק המתיחסים 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 אףו).

את המתח U_{CD} נחשב לפי כלל מחלק המתיחס:

$$U_{CD} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} E_1 = \frac{10}{10 + 15} \times 6 = 2.4V$$

ומכאן:

$$U_{Th} = U_{CD} - E_1 = 2.4 - 6 = 3.6V$$

כדי לחשב את R_{Th} , נקצר את מקורות המתח E_1 , $-E_2$. הtantגדות ש"ראה" הנגד R_4 בין הנקודות A ו-B, מתוארת באIOR 9-29. התאנגדות זו נתונה על ידי:

$$R_{Th} = (R_1 \parallel R_2) + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \frac{15 \times 10}{15 + 10} + 20 = 26\Omega$$

בAIOR 9-30 מתואר המנגד הטורי השקול למעגל, המתואר באIOR 9-27. המנגד 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 שעילינו לעשות עתה הוא להחליף במעגל שבAIOR 9-30 את R_4 בנגד, שהtantגדותו 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

9-8 שאלה

חשבו את מתח תבנין ואת התאנגדות תבנין של המנגד, המתואר באIOR 9-31.

9-9 שאלה

הנגד R_L במעגל המתואר באIOR 9-32 הוא נגד משתנה.

חשבו – בעזרת משפט תבנין – את הזרם בנגד זה:

א. כאשר $\Omega = 250\Omega$

ב. כאשר $\Omega = 500\Omega$.

9-10 שאלה

חשבו את הזרם בכל אחד מהנגדים במעגל המתואר באIOR 9-33. השתמש לשם כך בשיטת זרמי החוגים ובמשפט תבנין.

איזה משתי השיטות לחישוב זרמים עדיפה לדעתכם? נמקו.

9-11 שאלה

הפכו את מקור המתח, הנתון באיור 9-34, למקור זרם שקול, וشرطו מקור זה.

9-12 שאלה

הפכו את מקור הזרם, הנתון באיור 9-35, למקור מתח שקול, וشرطו מקור זה.

סיכום

- כדי לפתור מעגליים הכוללים חוגים אחדים, לא די – בדרך כלל – להשתמש בכללי החיבור של נגדים, ובשיקולים פיזיקליים פשוטים לגבי כיווני הזרמים וחולוקתם בין נגדי המעגל. חוקי קירכהוף וחוק אום הם היסוד לשיטות השונות של פתרון מעגליים חשמליים. בפרק זה עסקנו בלמידה שיטות אלה. בפרק זה למדנו שיטות אחדות לפתרון מעגליים:
 - שיטת זרמי החוגים.
 - משפט תבנין.
- שיטת זרמי החוגים מאפשרת לכתוב את משוואות המתיחסים במעגל בצורה קלה ומהירה. אין צורך לשקל מהו הסימן של כל איבר במשוואות אלה.
- משפט תבנין נוח מאד לפתור מעגל שמחברים בו, בכל פעם, נגד שונה (או נגד משתנה) בין שתי נקודות במעגל, וכשיש לחשב את הזרם (או המתח) בנגד בכל אחד מהמקרים.