

הזרם החשמלי

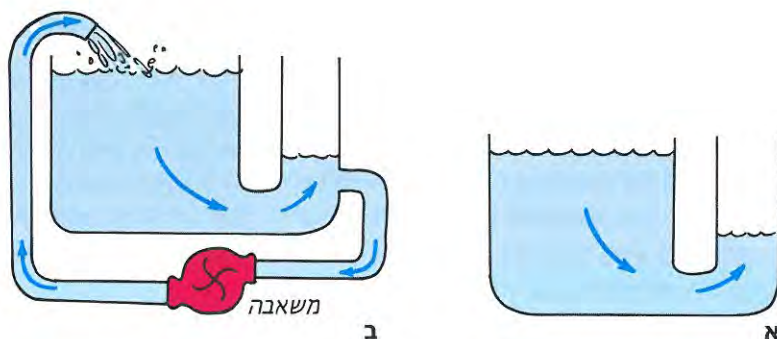


1 פרק הקודם הכרנו את הפוטנציאל החשמלי, הנמדד בוולטים. בפרק זה נראה שהפוטנציאל (או המתח) החשמלי פועל כמעין "לחץ חשמלי", שיכול ליצור שטף של מטענים, או זרם, הנמדד ביחידות אמפר (A). עוד נראה כי ההתנגדות שמרסנת את השטף הזה נמדדת באוהמים (Ω). נראה גם שכאשר הזרם הוא בכיוון אחד בלבד הוא מכונה זרם ישר (dc), ואילו אם הוא זורם הלך ושוב כינויו זרם חילופין (ac). הקצב שבו מועברת אנרגיה על ידי זרם חשמלי נקרא הספק, והוא נמדד בוואטים (W) או באלפי ואטים: קילוואט (kW). ישנם, איפוא, מונחים רבים שצריך ללמוד. יקל עלינו לעשות זאת אם נבין את הרעיונות הבסיסיים שהמונחים הללו מייצגים, וניתן להקל על הבנתם של הרעיונות הללו אם יודעים כיצד הם קשורים זה לזה. נתחיל בדיון בזרם של מטענים חשמליים.

נזכור את מה שלמדנו על חום וטמפרטורה. אז ראינו שכאשר שני קצותיו של מוליך נמצאים בטמפרטורות שונות, אנרגיה של חום זורמת מהטמפרטורה הגבוהה אל הנמוכה. הזרם נפסק כאשר בשני הקצוות שוררת אותה טמפרטורה. באופן דומה, כאשר קצותיו של מוליך חשמלי נתונים בפוטנציאלים חשמליים שונים - כאשר יש **מתח** או **הפרש פוטנציאלים** - מטען זורם מהפוטנציאל הגבוה אל הפוטנציאל הנמוך. זרם המטענים יימשך עד ששני הקצוות יהיו באותו פוטנציאל. באין הפרש פוטנציאלים, לא יהיה כל זרם

זרם של מטענים

חשמלי. כך למשל, אם תחברו קצה אחד של מוליך למחולל ון-דה-גראף טעון ואת קצהו השני לאדמה, זרם של מטען יזרום דרך המוליך. עם זאת, הזרימה תהיה קצרה, מפני שמהר מאוד ייווצר שוויון פוטנציאליים בין המחולל לאדמה. כדי שזרם של מטענים יתקיים במוליך לאורך זמן, יש להבטיח שהפרש המתחים יישאר בעינו בשעה שהמטען זורם מקצהו האחד של המוליך אל קצהו האחר. מצב זה דומה למצב שבו זרם של מים זורם ממאגר גבוה למאגר נמוך (איור 22.1א). מים יזרמו דרך הצינור שמחבר בין המאגרים - בדומה למטען הזורם ממחולל הון-דה-גראף אל האדמה - רק כל עוד הלחץ מתקיים. זרם רצוף יתקיים רק אם שומרים על הפרש קבוע בין גובה פני המים בשני המאגרים - ומכאן גם על הפרש קבוע בלחץ - בעזרת משאבה מתאימה (איור 22.1ב).



איור 22.1

מים זורמים מהמאגר שבו הלחץ גבוה יותר אל המאגר שבו הלחץ נמוך יותר.
(א) הזרם ייפסק כאשר הפרש הלחצים יתאפס.
(ב) המים ממשיכים לזרום, מפני שהפרש הלחצים נשמר באמצעות המשאבה.

בדיוק כפי שזרם מים הוא זרם של מולקולות H_2O , כך **זרם חשמלי** הוא זרם של מטענים חשמליים. במעגלים של תילי מתכת, האלקטרונים הם שזורמים. זאת משום שאלקטרון אחד או יותר של כל אטום חופשיים לנוע בסריג המתכתי. נושאי מטען אלה נקראים אלקטרונים הולכה. פרוטונים, לעומתם, אינם זזים, משום שהם קשורים בגרעיני האטומים, ואלו קבועים פחות או יותר במקומם. לעומת זאת, בנוזלים זרם המטענים יכול להיות מורכב מיונים חיוביים או שליליים, ולעיתים גם מאלקטרונים.

קצב הזרימה של מטען חשמלי נמדד באמפרים. אמפר הוא זרם של קולון אחד בשנייה. (להזכירכם, קולון אחד, שהוא יחידת המטען התקנית, הוא מטענם של 6.25 מיליארד מיליארדים של אלקטרונים.) במוליך הנושא זרם של 5 אמפרים, למשל, מטען של 5 קולון עובר דרך כל חתך של המוליך מדי שנייה - וזה הרבה אלקטרונים! במוליך הנושא זרם בן 10 אמפר עוברת בכל חתך כמות כפולה של אלקטרונים בשנייה.

מעניין לציין שמוליך הנושא זרם חשמלי אינו טעון במטען חשמלי. בתנאים רגילים, אלקטרונים הולכה שליליים נעים דרך הסריג המתכתי, שעשוי מיונים חיוביים. לפיכך, מספר המטענים החיוביים והשליליים במוליך שווה. בין שהמוליך נושא זרם ובין שאינו נושא זרם, המטען הכולל של המוליך הוא בדרך כלל אפס בכל רגע.

הזרם החשמלי



איור 22.2

לכל קולון של מטען המוזרם דרך המעגל המחבר את הדקויו של פנס בן 1.5 וולט, מוענקת בסוללה אנרגיה של 1.5 ג'ול.

מקורות מתח



איור 22.3

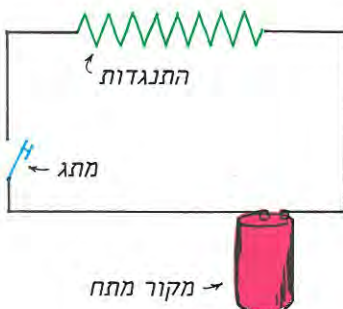
מקור מתח לא שגרתי. הפרש הפוטנציאלים בין ראשו לזנבו של "צלופח החשמל" (אלקטרופורוס אלקטריקוס) יכול להגיע עד 600 וולט.

איור 22.4

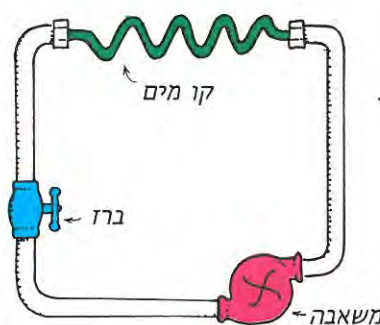
השוואה בין מעגל הידרולי פשוט (א) למעגל חשמלי (ב).

מטענים אינם זורמים מעצמם. לשם קיומו של זרם חשמלי יציב דרוש מתקן שאיבה הולם, שיבטיח הפרש פוטנציאלים - מתח חשמלי. "משאבה חשמלית" היא סוג כלשהו של מקור מתח. אם טוענים כדור מתכתי אחד במטען חיובי וכדור אחר במטען שלילי, אפשר ליצור הפרש מתחים גדול בין הכדורים. מקור מתח כזה אינו שימושי. זאת איננה משאבה חשמלית טובה, מפני שעם חיבור שני הכדורים ביניהם באמצעות מוליך, המתחים יושוו בן רגע - והזרם ייפסק. לעומת זאת, סוללות כימיות ומחוללים הם מקורות אנרגיה במעגלים חשמליים, והם מסוגלים לשמור על זרם מטענים קבוע.

סוללות ומחוללים מבצעים עבודה כדי להפריד מטענים שליליים מחיוביים. בסוללות כימיות עבודה זו נעשית על ידי הפירוק הכימי של אבץ או עופרת בחומצה, והאנרגיה האצורה בקשרים הכימיים הופכת לאנרגיה פוטנציאלית חשמלית*. מחוללים (גנרטורים) מפרידים בין מטענים על ידי השראה אלקטרומגנטית, תהליך שנתאר בפרק 24. העבודה שנעשתה בהפרדת המטענים (ואין זה משנה כיצד נעשתה) עומדת לרשותנו בהדקי הסוללה או המחולל. אנרגיה זו ליחידת מטען מספקת את הפרש הפוטנציאלים, שיוצר את "הלחץ החשמלי" המניע את האלקטרונים לזרום במעגל החשמלי שבין שני ההדקים. היחידה שבה נמדדים הפוטנציאל החשמלי והמתח היא הוולט. סוללה רגילה של מכונית מספקת מתח חשמלי של 12 וולט למעגל שמחובר בין שני קוטביה. כך מסופקים 12 גייל של אנרגיה לכל קולון של מטען המוזרם דרך המעגל. לעיתים קרובות מבלבלים בין זרם, שזורם דרך המעגל, לבין המתח שקיים בין קצותיו. נוכל להבין את ההבדל בין שני המושגים אם נחשוב על צינור ארוך מלא במים. מים יזרמו דרך הצינור אם יהיה הפרש בגובה פני המים בין שני קצותיו של הצינור. מים זורמים מהקצה שבו הלחץ הגבוה אל הקצה שבו הלחץ הנמוך. רק המים זורמים, לא הלחץ. באופן דומה, מטען חשמלי זורם** בשל הפרשי הלחצים (המתחים) החשמליים. מטענים זורמים במעגל משום שיש מתח בין קצותיו, אולם המתח עצמו אינו עובר לשום מקום. המתח יוצר זרם (אם קיים מעגל סגור).



ב



א

* תוכלו ללמוד כיצד מתרחש תהליך זה כמעט בכל ספר כימיה.

** מבחינה מושגית קל יותר לומר שזרם זורם דרך המעגל, רק אל תאמרו זאת בקרבת מישהו שמקפיד בענייני דקדוק, בגלל הכפילות שבביטוי "זרם זורם". מדויק יותר לומר שהמטענים הנעים הם הזרם.

התנגדות

סוללה או מחולל (גנרטור) מסוג כלשהו הם המניע העיקרי ומקור המתח בכל מעגל חשמלי. אך הזרם במעגל תלוי לא במתח בלבד אלא גם בהתנגדות המעגל למעבר מטענים דרכו. הדבר דומה לקצב זרימת המים בצינור, התלוי לא רק בלחץ המים אלא גם בהתנגדות הצינור עצמו. התנגדותו של התיל המוליך תלויה במוליכות החומר שממנו הוא עשוי, וכן באורכו ובעוביו. מוליכים עבים הם בעלי התנגדות נמוכה יותר. ככל שהמוליך ארוך יותר כן גדולה התנגדותו, כמובן. נוסף לכך תלויה ההתנגדות החשמלית בטמפרטורה. ככל שתגדודות האטומים במוליך גדולות יותר, כך גדולה התנגדותו של המוליך למעבר זרם דרכו. ברוב המוליכים, טמפרטורה גבוהה יותר גורמת להתנגדות גדולה יותר*.

בטמפרטורות הקרובות לאפס המוחלט, מוליכותן של מתכות מסוימות הופכת אינסופית (התנגדות אפס למעבר מטען). חומרים אלה נקראים **מוליכי על**. עד אמצע שנות השמונים רווחה הדעה שהתנגדות חשמלית אפסית אפשרית רק במתכות, ובטמפרטורות נמוכות כאלה. פריצת דרך משמעותית נעשתה ב-1987, כאשר התגלו חומרים לא מתכתיים אחדים שאינם מגלים כל התנגדות חשמלית בטמפרטורות גבוהות בהרבה - מעל 100 קלווין. אם תזרימו זרם חשמלי במוליך על, הזרם יזרום בו לנצח. בשעת כתיבת ספר זה יש התעניינות עצומה בקהילת הפיסיקאים באשר לשאלה - מדוע בדיוק חומרים מסוימים הם מוליכי על. ההסברים קשורים בדרך כלל לאופי הגלי של החומר (מכניקת הקוונטים), והמחקר בהם ערני ביותר. גם חוקרים בישראל תרמו תרומות חשובות בתחום זה.

התנגדות חשמלית נמדדת ביחידות שנקראות אוהם. האות היוונית אומגה, Ω , היא הסימון המקובל ליחידת האוהם, הנקראת על שם הפיסיקאי הגרמני גיאורג סימון אוהם, שגילה ב-1826 קשר פשוט וחשוב בין המתח, הזרם וההתנגדות החשמלית.

הקשר בין מתח, זרם והתנגדות מבוטא ב**חוק אוהם**. אוהם גילה שכמות הזרם במעגל מתכונתית למתח שבין קצותיו, ומתכונתית הפוכה להתנגדות. ובקיצור:

חוק אוהם

$$\frac{\text{מתח}}{\text{התנגדות}} = \text{זרם}$$

ובמונחים של יחידות:

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

* פחמן הוא חריג מעניין. כשהטמפרטורה עולה, יותר אטומי פחמן משחררים אלקטרונים, הנעים באורח חופשי בסריג, כך שלמעשה התנגדותו החשמלית של הפחמן יורדת כשהטמפרטורה עולה. תכונה זו של הפחמן, בצירוף נקודת ההיתוך הגבוהה שלו, הן שתי התכונות העיקריות שבשלבן משתמשים בפחמן במנוורות קשת.



איור 22.5

נגדים. הסימן המוסכם של נגד במעגל חשמלי הוא $\sim$.

כך שעבור מעגל מסוים בעל התנגדות קבועה, הזרם והמתח מתכונתיים זה לזה*. פירוש הדבר הוא שאם נכפיל את המתח נקבל זרם כפול. ככל שהמתח גדול יותר, הזרם גדול יותר. אולם אם נכפיל את ההתנגדות במעגל, הזרם ירד למחצית מערכו. ככל שגדולה ההתנגדות, קטן הזרם. הגיוני, הלא כן? לפי חוק אוהם, הפרש מתחים של וולט אחד בין קצותיו של מעגל חשמלי בעל התנגדות של אוהם אחד ייצור זרם בן אמפר אחד. אם המתח בין קצות אותו מעגל יהיה 12 וולט, הזרם יהיה 12 אמפר. ההתנגדות של תיל חשמל אופייני קטנה בהרבה מאוהם אחד, ואילו לנווה רגילה יש התנגדות של כ-100 אוהם. ההתנגדות החשמלית של מנורה או של מצנע (טוסטר) חשמלי היא כ-15-20 אוהם. ההתנגדות הקטנה מאפשרת זרם חזק, שיוצר חום ניכר. בתוך מתקנים אלקטרוניים כמו מקלטי רדיו וטלוויזיה הזרם נשלט באמצעות רכיבים אלקטרוניים המכונים נגדים, שהתנגדותם החשמלית יכולה להיות בין אוהמים אחדים למיליוני אוהם.

שאלות

1. כמה זרם יעבור דרך מנורה בעלת התנגדות 60 אוהם כאשר היא מחוברת למקור מתח של 12 וולט?
2. מהי ההתנגדות של סיר טיגון חשמלי שעובר בו זרם בן 12 אמפר כאשר הוא מחובר למקור מתח של 120 וולט?

חוק אוהם ומכת חשמל

מה גורם למכת חשמל בגוף האדם: זרם או מתח? השפעותיה המזיקות של מכת חשמל הן תוצאה של מעבר זרם חשמלי דרך הגוף. מחוק אוהם אנחנו יכולים לראות שהזרם הזה תלוי במתח, ובהתנגדות החשמלית של גוף האדם. התנגדות הגוף תלויה בתנאים שונים, ועשויה להשתנות בין 1000 אוהם, אם הגוף ספוג במי מלח, ל-500,000 אוהם, אם העור יבש מאוד. אם ניגע בשני ההדקים של סוללה באצבעות יבשות, גופנו יתנגד למעבר זרם בהתנגדות של כ-100,000 אוהם. בדרך כלל לא נחוש דבר אם ניגע בסוללת 12 וולט, ואילו 24 וולט יגרמו לנו דגדג קל בלבד. אך אם עורנו רטוב, 24 וולט עלולים ליצור הרגשה בלתי נעימה בהחלט. טבלה 22.1 מציגה את השפעותיהם של זרמים בעוצמות שונות על גוף האדם.

מדי שנה נפגעים אנשים רבים פגיעה קטלנית מזרם חשמל, לאחר שנחשפו להפרש מתחים רגיל של 220 וולט. אילו נגעתם בידכם בחוט חשוף של מנורה בשעה שרגליכם על הקרקע (אל תעשו זאת, סכנה!), היה נוצר "לחץ חשמלי" בן

תשובות:

1. $\frac{1}{5}$ אמפר. ערך זה מחושב מחוק אוהם: 12 וולט / 60 אוהם = 0.2 אמפר.
2. 10 אוהם. סדרו מחדש את משוואת חוק אוהם ותקבלו

$$\text{התנגדות} = \frac{\text{מתח}}{\text{זרם}} = \frac{120 \text{ וולט}}{12 \text{ אמפר}} = 10 \text{ אוהם.}$$

* בספרים רבים מסמנים באות V את המתח, באות I את הזרם, ובאות R את ההתנגדות. כך מבוטא חוק אוהם בנוסחה: $V=IR$. מכאן: $I=V/R$, ו- $R=V/I$, כך שאם שניים מהמשתנים ידועים, ניתן בקלות למצוא את השלישי. היחידות מיוצגות באותיות V (וולטים), A (אמפרים) ו- Ω (אוהמים).

זרם (אמפר)	השפעה
0.001	ניתן לחוש
0.005	כואב
0.010	גורם התכווצויות לא רצוניות של השרירים (עוויות)
0.015	גורם לאובדן השליטה על השרירים
0.070	מגיע אל הלב, גורם הפרעות רציניות, ובדרך כלל קטלני אם נמשך יותר משנייה אחת.

220 וולט בין הידיים לבין הקרקע. ההתנגדות לזרם היא בדרך כלל מרבית בין כפות הרגליים לבין הקרקע, ולכן לא בהכרח יהיה הזרם חזק דיו כדי לגרום נזק רציני. אך אם הרגליים והקרקע שעליה אתם עומדים רטובות, ההתנגדות ביניכם לבין הקרקע קטנה במידה רבה. ההתנגדות הכוללת למעבר זרם יורדת עד כדי כך, שמתח של 220 וולט ייצור זרם שיהיה למעלה מכפי שהגוף מסוגל לסבול. טיפות מים המצטברות ליד מתג ההפעלה של מכשירים חשמליים, כגון מייבשי שיער, עלולות להוליך זרם אל המשתמש. אף על פי שמים מזוקקים הם מבודד טוב, היונים שבמים הרגילים מורידים את התנגדותם במידה ניכרת. חומרים מומסים נוספים, בעיקר כמויות קטנות של מלח, מורידים את ההתנגדות עוד יותר. בדרך כלל מצטברת על העור שכבת מלח דקה מזיעה שהתייבשה, ואם העור רטוב, המלח הזה מוריד את התנגדות הגוף לכדי מאות אחדות של אוהמים או פחות. התעסקות במכשירים חשמליים תוך כדי רחיצה באמבטיה אסורה באיסור חמור.

מכת חשמל תיגרם רק אם יהיה הפרש מתחים בין שני חלקים של גוף. רוב הזרם יעבור בין שתי נקודות אלה במסלול שההתנגדות בו היא הנמוכה ביותר. נניח שנפלתם מגשר ונאחזתם בקו מתח גבוה כדי לעצור את נפילתכם. כל עוד אינכם נוגעים בשום דבר נוסף פרט לקו המתח, לא תספגו מכת חשמל. אפילו אם המתח בקו הוא כמה אלפי וולטים מעל למתח של הקרקע, ואפילו אם אתם אוחזים בו בשתי ידיים, לא תהיה זרימה משמעותית של מטען מיד אחת אל האחרת. אם, לעומת זאת, תושיטו אחת מידיכם ותיגעו בכבל הנתון במתח שונה... בזזז! לעיתים קרובות אנו רואים ציפורים יושבות על כבלי מתח גבוה. כל חלק מחלקי גופן שרוי באותו מתח גבוה כמו הכבל, ולכן הן אינן חשות בכל השפעה מזיקה (איור 22.6).



איור 22.6

הציפור יכולה לעמוד ללא כל חשש על תיל אחד של מתח גבוה, אבל מוטב לה שלא תנסה לגעת גם בתיל המקביל. מדוע?

שאלות

1. כמה זרם יעבור דרך גופכם אם התנגדותו היא 100,000 אוהם, ואתם אוחזים בשני ההדקים של סוללת 12 וולט?
2. כמה זרם יעבור דרך גופכם אם עורכם לח מאוד, כך שהתנגדותו ירדה ל-1000 אוהם בלבד, ואתם אוחזים באותם שני הדקים?

תשובות:

1. הזרם שיעבור דרך גופכם יהיה 12/100,000 אמפר (0.00012 אמפר).
2. הזרם שיעבור דרך גופכם במקרה זה יהיה 12/1000 אמפר (0.012 אמפר). איי, כואב!

כיום מחוברים רוב התקעים והשקעים החשמליים לשלושה תילים, ולא לשניים. שתי השניים העיקריות משמשות לנשיאת הזרם - אחת מהן מחוברת למגע "חי" והשנייה לניטרלי. השן השלישית מחוברת ישירות לאדמה (איור 22.7). מכשירים חשמליים כמו תנורים, מכונות כביסה ומדיחי כלים מחוברים בשלושה תילים כאלה. אם התיל החי יבוא במגע מקרי עם פני המתכת של המכשיר, יופנה הזרם אל האדמה ולא יגרום מכת חשמל למי שנוגע במכשיר באותו זמן.

מכת חשמל עלולה לחמם רקמות בגוף חימום יתר ולשבש את פעילותם התקינה של העצבים. כאשר מנסים להציל אנשים שנפגעו ממכת חשמל, ראשית כל יש לנתק אותם ממקור הזרם בעזרת מקל עץ יבש או חומר לא-מוליך אחר, כדי שאתם עצמכם לא תתחשמלו. אחר כך יש להנשימם בהנשמה מלאכותית.



איור 22.7

השן השלישית מקשרת את גוף המכשיר ישירות לקרקע. כך, כל מטען שמצטבר על המכשיר מוצא מיד את דרכו לאדמה.

שאלה

מה גורם מכת חשמל - זרם או מתח?

זרם חשמלי יכול להיות משני סוגים - זרם ישר (dc) או זרם חילופין (ac). הסימון dc הוא עבור **זרם ישר**, כלומר זרימת מטענים בכיוון אחד. סוללה יוצרת זרם ישר במעגל, משום שהסימנים של ההדקים - או הקוטביות שלה - אינם משתנים עם הזמן. אלקטרונים נעים מההדק השלילי, שדוחה אותם, אל ההדק החיובי, שמושך אותם, וכך הם נעים במעגל החשמלי תמיד בכיוון אחד. גם אם הזרם עובר בדפקים (פולסים) לא קבועים, הרי שכל עוד הוא זורם בכיוון אחד זהו זרם ישר, והוא יסומן ב-dc.

זרם חילופין (שסימונו ac) פועל כמשתמע משמו. אלקטרונים מוזרמים במעגל החשמלי תחילה בכיוון אחד ואחר כך בכיוון ההפוך. הם מחליפים כיוון הלך וחזור מסביב לנקודת ייחוס קבועה למדי. חילוף זה מושג על ידי שינוי הסימן של המתח בשני ההדקים של מקור האנרגיה. כמעט בכל מעגלי ac שנמצאים בשימוש מסחרי בישראל המתח והזרם מחליפים סימן 50 פעם בשנייה. זהו זרם של 50 הרץ. בארצות אחרות משתמשים בזרמים של 25, 30, או 60 הרץ. בכל העולם, רוב המעגלים החשמליים המסחריים והביתיים הם מעגלי ac (זרם חילופין), משום שבדרך זו ניתן להעביר את האנרגיה החשמלית למרחקים גדולים ולהשתמש בתחנות שנאים, המאפשרים פחות איבודי חום בכבלי ההולכה. בפרק 24 נדון בסיבה לכך. השימוש העיקרי בזרם החשמלי - ישר או חילופין - הוא להעברת אנרגיה ממקום אחד למשנהו בצורה שקטה, גמישה ונוחה.



איור 22.8

גרף עוצמת הזרם כנגד הזמן בזרם ישר (dc) ובזרם חילופין (ac).

המרת זרם חילופין לזרם ישר

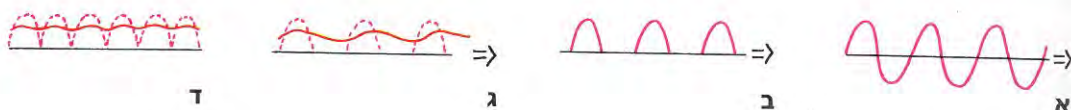
הזרם הביתי הוא זרם חילופין. מכשירים המופעלים באמצעות סוללות, כמו מחשבון כיס, פועלים על זרם ישר. תוכלו להפעיל מכשיר הצורך זרם ישר בחיבורו למקור זרם חילופין אם תשתמשו בממיר ac-dc. ממיר ac-dc נראה

איור 22.9

דיודות. כפי שהסימן $\rightarrow$ מרמז, דרך הדיודה עובר זרם בכיוון החץ בלבד ולא בכיוון ההפוך. דיודה פועלת כמו שסתום חד-כיווני, שבו יכולים האוויר או המים הנשאבים לעבור בכיוון אחד בלבד.



בדרך כלל כקובייה קטנה שמחוברת לשקע שבקיר. בתוך הממיר יש שנאי שמוריד את המתח (פרק 24). כמו כן יש בו דיודה, רכיב אלקטרוני קטן, שפועל כשסתום חד-כיווני ומאפשר לאלקטרונים לזרום בכיוון אחד בלבד (איור 22.9). מכיוון שזרם חילופין זורם בשני הכיוונים, רק מחצית מכל מחזור תעבור דרך הדיודה. התוצאה היא זרם ישר (בעוצמה לא קבועה) שמנותק מחצית מן הזמן. כדי להשיג זרם קבוע ולהחליק את הקפיצות, מוסיפים להתקן קבל (איור 22.10).



איור 22.10

- כאשר נכנס לדיודה זרם חילופין, (ב) יוצא ממנה זרם ישר בדפקים (פולסים).
- טעינה ופריקה איטית של קבל מחליקה את הזרם.
- למעשה משתמשים בזוג דיודות וכך אין הפסקות בזרם שנכנס לקבל. התוצאה היא היפוך קוטביות בכל חצי מחזור, וכך אין מאבדים מחצית מן המחזורים.

איור 22.11

גם כאשר מוסיפים את המים למאגר בצורה מקוטעת, עדיין הזרם שיוצא ממנו הוא חלק למדי. קבל פועל באופן דומה במעגל חשמלי.



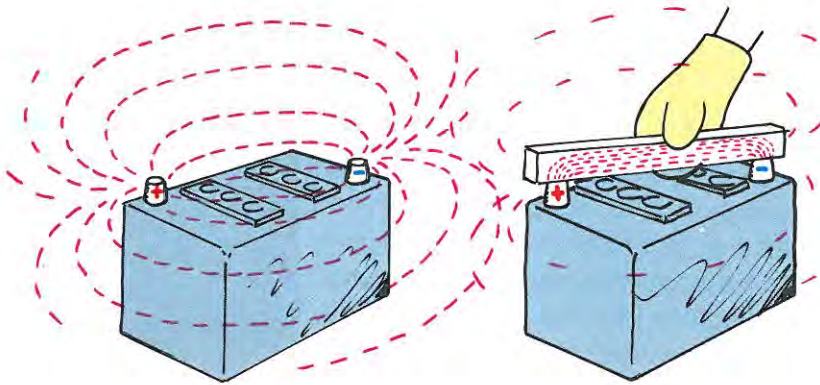
כאשר מעבירים מתג של מנורה למצב דולק ("יגע"), נראה לנו שהאור נדלק מיד. כאשר אנחנו מדברים בטלפון, נדמה לנו שהאותות המייצגים את הצלילים עוברים דרך חוטי הטלפון במהירות אינסופית. אותות אלו מועברים דרך המוליכים החשמליים במהירות הקרובה למהירות האור. אך לא האלקטרונים הם שנעים במהירות גדולה כל כך*. אף שמהירותם הממוצעת של האלקטרונים במתכת, בטמפרטורת החדר, היא כמה מיליוני קילומטרים בשעה, הם אינם יוצרים זרם אחיד, מפני שהם נעים בכל הכיוונים. אין כיוון מועדף לזרימתם.

* מאמצים ומשאבים רבים מושקעים בעולם בבניית מאיצי חלקיקים, המאיצים אלקטרונים ופרוטונים למהירויות הקרובות למהירות האור. אילו היו אלקטרונים נעים מהר כל כך בכל מעגל חשמלי פשוט, כל שהיינו נדרשים לעשות כדי לקבל שטף של אלקטרונים מואצים, דוגמת זה שאנו מקבלים מהמאיצים, היה להזרים זרם במוליך ולכופף אותו בזווית ישרה. תאוצתם של האלקטרונים היתה אז כה גדולה, שהם לא היו מצליחים לעקוב אחר הכיפוף במוליך, והיו יוצאים ממנו ויוצרים אלומת אלקטרונים דומה לזו שמיוצרת למעשה במאיצים.

מקור האלקטרונים במעגל החשמלי ומהירותם

איור 22.12

קווי השדה החשמלי בין הדקי הסוללה מכוונים לאורכו של מוליך המקשר בין ההדקים. באיור מוצג מוט מתכת, אך בדרך כלל המוליך הוא מעגל חשמלי. (אם תעשו זאת לא תספגו מכת חשמל, אך המוט יתחמם מהר ואתם עלולים להיכוות בידכם!)

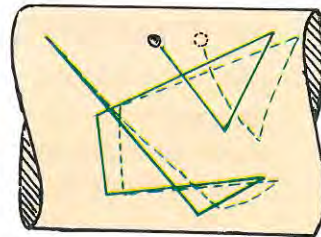


ואולם, כאשר המוליכים מחוברים לסוללה או למחולל, נוצר בתוך המוליך שדה חשמלי. האלקטרונים ממשיכים לנוע בתנועתם האקראית, ובו בזמן הם נדחים על ידי השדה הזה. השדה החשמלי הוא שני בחוטים במהירות הקרובה למהירות האור. המוליך החשמלי משמש כמנחה לקווי השדה החשמלי שנוצרים במקור המתח (איור 22.12).

אם המקור הוא של מתח ישר, כמו הסוללה שבאיור 22.12, קווי השדה החשמלי שומרים על כיוון אחד בתוך המוליך. אלקטרוני ההולכה מואצים על ידי השדה החשמלי בכיוון המקביל לקווי השדה. אך עוד בטרם הם מגיעים למהירות של ממש, הם נתקלים ביוני המתכת, הקבועים כמעט במקומם ועומדים בדרכם של האלקטרונים. בהתנגשויות אלו מאבדים האלקטרונים חלק מהאנרגיה הקינטית שלהם. זו הסיבה לכך שמוליכים נושאי חשמל מתחממים. ההתנגשויות הללו מפריעות לתנועתם של האלקטרונים, כך שמהירות הסחיפה הממשית שלהם (כלומר המהירות נטו שבה נעים אלקטרונים בכיוון שאליו דוחף אותם מפל המתחים) היא קטנה ביותר. במעגל זרם ישר אופייני, למשל בסוללה של מכונית, מהירות הסחיפה של האלקטרונים היא כעשירית המילימטר בשנייה. במהירות כזו דרושות לאלקטרון כשלוש שעות כדי לעבור על פני מטר אחד של תיל חשמלי! וכך, אף שהאות החשמלי מתקדם בחוטים במהירות הקרובה למהירות האור, האלקטרונים שזזים כתגובה לאות החשמלי נעים במהירות של צב עיף.

במעגל זרם חילופין, אלקטרוני ההולכה אינם מתקדמים כלל. הם מתנדנדים בקצב, הלך ושוב, סביב נקודות קבועות במרחב. כאשר אתם משוחחים עם חבר או חברה בטלפון, תבנית התנודות היא שנישאת בתילים וחוצה את העיר במהירות האור. האלקטרונים שבחוטים רק "רוקדים" לפי הקצב של תבנית התנודות שנישאת דרכם.

רבים סוברים בטעות שזרם חשמלי נישא דרך המוליכים החשמליים באמצעות אלקטרונים שמתנגשים זה בזה, בדומה לאבני דומינו העומדות זו בסמוך לזו. הדברים פשוט אינם כך. רעיון הדומינו הוא מודל המדגים היטב כיצד מועבר קול, אך לא ניתן להדגים בעזרתו העברה של אנרגיה חשמלית. האלקטרונים החופשיים לנוע בתוך המוליך מואצים על ידי השדה החשמלי, אבל לא מפני שהם דוחפים זה את זה. הם אכן נתקלים זה בזה ובאטומים



איור 22.13

הקווים המלאים מייצגים מסלול אקראי אפשרי של אלקטרון הנתקל באטומים במהלך תנועתו בסריג מתכתי. מהירותו האופיינית (לאורך כל אחד מהקווים) היא כ- $\frac{1}{200}$ ממהירות האור. הקווים המקוטעים מייצגים באופן מוגזם את השינוי שיחול במסלול כזה בהשפעת שדה חשמלי. האלקטרון נסחף ימינה במהירות הקטנה ממהירותו של צב. (איור זה מציג מצב אידיאלי ביותר: למעשה האלקטרון לא יחזור על מסלול כזה דומה כשהוא נתון לסחיפה. שימו לב גם לכך, שהמרחק הממוצע בין ההתנגשויות הוא כמיליונית המילימטר.)

אחרים, אבל מגנון זה מאט את תנועתם ומתנגד לה. אלקטרונים לכל אורכו של המעגל החשמלי מגיבים בעת ובעונה אחת לשדה החשמלי.

וכאן אנו מגיעים לטעות נפוצה אחרת בקשר לחשמל. רבים סבורים ששקעי החשמל שבבתיים הם מקור לאלקטרונים, ואלקטרונים זורמים ממקור האנרגיה דרך קווי הזרם של חברת החשמל אל השקעים שבקיר. זוהי טעות. המתח הביתי הוא מתח חילופין. לכן האלקטרונים רק מתנדנדים הלך ושוב סביב נקודות קבועות. כשמחברים מנורה לזרם החשמל, אנרגיה היא שזורמת מהשקע אל תוך המנורה, לא אלקטרונים. האנרגיה נישאת על ידי השדה החשמלי וגורמת לתנודות של האלקטרונים שנמצאו מלכתחילה בנימת הלהט של הנורה. רוב האנרגיה החשמלית הזאת הופכת לחום, ומעט ממנה הופך לאור. חברת החשמל אינה מוכרת אלקטרונים. היא מוכרת אנרגיה. אתם מספקים את האלקטרונים.

כאשר אדם סופג מכת חשמל, מקורם של האלקטרונים שיוצרים את הזרם בגופו הוא בגוף עצמו. האלקטרונים אינם נכנסים אל הגוף מתיל החשמל ואינם עוברים דרך גופו אל הקרקע. האנרגיה היא שעוברת את המסלול הזה. האנרגיה פשוט גורמת לאלקטרונים החופשיים שבגוף לנוע באופן מתואם. תנועות קטנות גורמות תחושת דגדוג. תנועות גדולות עלולות להיות קטלניות.

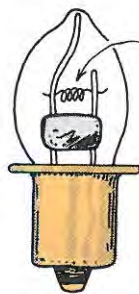
המטענים שנעים במעגל חשמלי עושים עבודה. עבודה זו יכולה, למשל, לחמם את המעגל או להפעיל מנוע. הקצב שבו נעשית העבודה - כלומר הקצב שבו הופכת אנרגיה חשמלית לצורות אנרגיה אחרות כמו חום, אנרגיה מכנית או אור - נקרא **ההספק החשמלי**. ההספק החשמלי שווה למכפלת הזרם במתח*.

$$\text{הספק} = \text{זרם} \times \text{מתח}.$$

כזכור, המתח מבוטא בוולטים והזרם באמפרים. את ההספק מבטאים בוואטים.

$$\text{ואט} = \text{אמפר} \times \text{וולט}$$

מכאן שבנורה בת 220 ואט המחוברת למקור מתח של 220 וולט יזרום זרם של אמפר אחד (220 ואט = 220 וולט $\times$ 1 אמפר). בנורה בת 110 ואט המחוברת למקור מתח של 220 וולט יזרום זרם של חצי אמפר. יחס זה מקבל משמעות מעשית אם רוצים לחשב את עלות האנרגיה חשמלית שאנו צורכים - שהיא בדרך כלל כמה עשרות אגורות לקילוואט-שעה (קוט"ש). קילוואט הוא אלף ואט, וקוט"ש מייצג את כמות האנרגיה הנצרכת במשך שעה אחת כאשר



איור 22.14

אלקטרוני ההולכה שנעים הלך ושוב בנימת הלהט של הנורה אינם באים ממקור המתח. הם נמצאים בתיל מלכתחילה. מקור המתח פשוט מספק להם את האנרגיה הדרושה.

הספק חשמלי



איור 22.15

ההספק והמתח שרשומים על הנורה הם: "100 ואט, 120 וולט". כמה אמפר יעבור דרך הנורה?

* ניזכר בפרק 6, שבו למדנו כי הספק = עבודה/זמן; ואט אחד = ג'ול/שנייה. שימו לב שהיחידות להספק חשמלי ולהספק מכני תואמות (הן עבודה והן אנרגיה נמדדות בג'ולים).

$$\text{הספק} = \frac{\text{מטען}}{\text{זמן}} \times \frac{\text{אנרגיה}}{\text{מטען}} = \frac{\text{אנרגיה}}{\text{זמן}}$$

ההספק הוא קילוואט אחד*. לכן, במקום שבו האנרגיה עולה 30 אגורות לקילוואט-שעה, ניתן להפעיל מנורה של 100 וואט במשך עשר שעות בעלות של 30 אגורות, כלומר שלוש אגורות לשעה. מצנן או מגהץ צורכים זרם חזק הרבה יותר, ולכן גם משתמשים באנרגיה רבה יותר (במשך אותו הזמן), לפיכך עלות ההפעלה שלהם גבוהה בהרבה.

שאלות

1. אם קו חשמל של 120 וולט מוגבל באמצעות נתיך הבטיחות לאספקה של 15 אמפר, האם ניתן להפעיל בו מייבש שיער שעובד בהספק של 1200 וואט?
2. במחיר 25 אגורות לקוט"ש, כמה עולה להפעיל תנור חימום בהספק של 2000 וואט למשך שעה אחת?

מעגלים חשמליים

כל מסלול שבו יכולים לנוע אלקטרונים נקרא מעגל. כדי שתתקיים תנועה רצופה של אלקטרונים, המעגל חייב להיות סגור, ללא נתקים. נתק נוצר בדרך כלל עקב הפעלה של מתג חשמלי, שניתן לסגור או לפתוח אותו כדי לאפשר את זרימת האנרגיה במעגל או להפסיקה. רוב המעגלים החשמליים מכילים יותר מהתקן אחד הצורך אנרגיה חשמלית. על פי רוב מחוברים התקנים אלו במעגל באחת משתי דרכים: במקביל או בטור. כאשר הם מחוברים בטור, הם יוצרים מסלול אחד למעבר האלקטרונים בין שני הדקי הסוללה, המחולל או השקע שבקיר (שהוא פשוט שלוחה של מחולל). כאשר התקנים מחוברים במקביל הם יוצרים ענפים, שכל אחד מהם הוא מסלול נפרד למעבר האלקטרונים. לכל אחד מסוגי החיבורים (במקביל או בטור) יש מאפיינים משלו. נתאר מאפיינים אלה בקצרה.

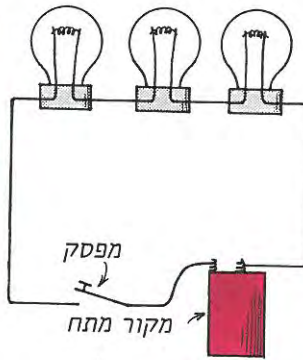
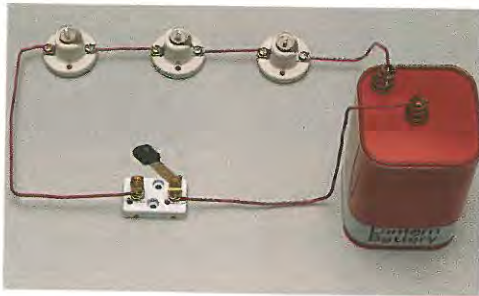
מעגלים טוריים

מעגל טורי פשוט מוצג באיור 22.16. שלוש נורות מחוברות בטור לסוללה. אותו זרם קיים, כמעט מיידית, בכל שלוש הנורות ברגע סגירת המתג. הזרם אינו "נעדר" באף אחת מהנורות, אלא זורם דרך כל אחת מהן. האלקטרונים המהווים את הזרם הזה עוזבים את ההדק השלילי של הסוללה, עוברים דרך כל אחד מתילי הלהט, בזה אחר זה, וחוזרים אל ההדק החיובי של הסוללה (אותה כמות של זרם זורמת גם דרך הסוללה). זה המסלול היחיד שבו יכולים אלקטרונים לעבור במעגל. נתק במקום כלשהו לאורך המעגל גורם לפתיחתו ומפסיק את זרימת האלקטרונים בו. נתק כזה יכול להיווצר, למשל, אם נשרפת אחת הנורות, או כאשר המתג נפתח.

תשובות:

1. מהבטי וואט = אמפר $\times$ וולט, אנו רואים שהזרם = 1200 וואט / 120 וולט = 10 אמפר, ולכן מייבש השיער יפעל כשיחובר למעגל. אבל שני מייבשי שיער שיחוברו לאותו שקע ישרפו את הנתיך.
2. חצי שקל (2000 וואט הם 2 קילוואט. 2 קילוואט $\times$ שעה = 2 קוט"ש. 2 קוט"ש $\times$ 25 אג' / קוט"ש = 50 אג'. זול למדי. חשבונות החשמל שלנו יקרים יותר בעיקר משום שאנו מפעילים מכשירי חשמל רבים כל כך לפרקי זמן ארוכים.

* הואיל והספק = אנרגיה/זמן, החלפת אגפים פשוטה נותנת אנרגיה = הספק $\times$ זמן. כך ניתן לבטא אנרגיה ביחידות של קילוואט-שעה.



איור 22.16

מעגל טורי פשוט. סוללה של 6 וולט גורמת לכל נורה להימצא במפל מתח של 2 וולט.

המעגל המוצג באיור 22.16 מדגים את המאפיינים החשובים הבאים של מעגל טורי:

1. לזרם החשמלי יש רק מסלול אחד לאורך המעגל. פירושו של דבר שדרך כל אחד מהמכשירים זורם אותו זרם.
2. זרם זה צריך להתגבר על ההתנגדות של המכשיר הראשון, של המכשיר השני ושל המכשיר השלישי כאחד. לכן ההתנגדות הכללית במעגל היא סכום ההתנגדויות שמצויות לאורך המעגל.
3. הזרם במעגל שווה למתח שמספק מקור האנרגיה חלקי ההתנגדות הכללית במעגל. עובדה זו נובעת ישירות מחוק אוהם.
4. המתח הכולל שבין שני קצותיו של מעגל טורי מתחלק בין המכשירים השונים המחוברים ביניהם בטור כך שסכום "מפלי המתחים" על כל ההתנגדויות שווה למתח הכולל שמופעל על ידי מקור המתח. זאת עקב העובדה שכמות האנרגיה המסופקת למעגל שווה לסכום האנרגיות המסופקות לכל אחד מהמכשירים.
5. מפל המתח על כל אחד מהמכשירים מתכונתי להתנגדותו של אותו מכשיר. זאת עקב העובדה שאנרגיה רבה יותר מתבזבזת כשזרם עובר דרך התנגדות גדולה מאשר בזמן שאותו זרם עובר דרך התנגדות קטנה יותר.

שאלות

1. אם תיל הלהט באחת הנורות נשרף, מה קורה לזרם בנורות האחרות?
2. מה קורה לעוצמת האור של כל אחת מהנורות במעגל טורי כאשר מתוספות למעגל נורות נוספות?

תשובות

1. אם אחת הנורות נשרפת, יהיה נתק במסלול היחיד שמוליך את הזרם בין שני הדקי הסוללה, והזרם ייפסק. כל הנורות תכבינה.
2. הוספה של עוד נורות למעגל טורי גורמת לעליית ההתנגדות של המעגל כולו. עקב כך קטן הזרם במעגל, ולכן קטן גם הזרם בכל אחת מהנורות, מה שגורם לירידה בעוצמת ההארה שלהן. האנרגיה מתחלקת בין יותר נורות, ולכן מפל המתח על כל נורה יפחת.

קל להבחין בחסרונות העיקריים של מעגל טורי: אם מכשיר אחד יוצא מכלל פעולה, הזרם בכל המעגל נפסק. שרשראות הנורות שמדליקים לקישוט ביום העצמאות מחוברות לעיתים בטור. כשאחת הנורות נשרפת, הרי זה משחק משעשע (או מתסכל) לגלות איזו מהן נשרפה.

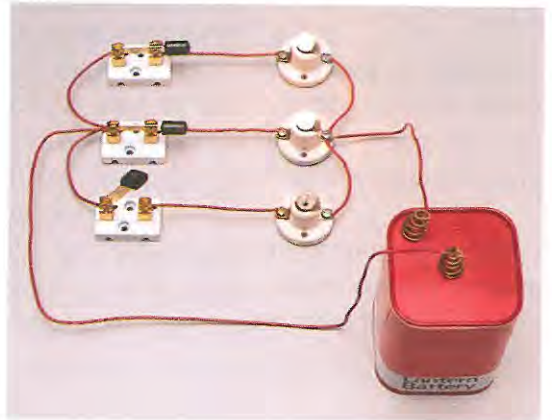
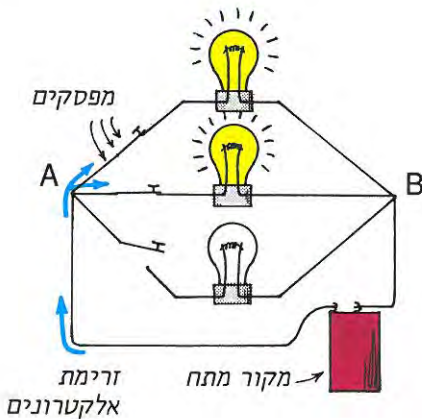
רוב המעגלים מחוברים בדרך המאפשרת להפעיל כמה מכשירים באורח בלתי תלוי, כך שגם אם אחד מהם חדל מלפעול הדבר אינו מפריע לפעולתם של האחרים. נורה בביתכם, למשל, יכולה להישרף מבלי להפסיק את פעולתם של כל שאר מכשירי החשמל בבית. זאת משום שמכשירי החשמל בביתכם מחוברים במקביל ולא בטור.

מעגלים מקבילים

מעגל מקביל פשוט מוצג באיור 22.17. שלוש נורות מחוברות לאותן שתי נקודות: A ו-B. על מכשירים חשמליים שמחוברים לאותן שתי נקודות במעגל החשמלי אומרים שהם מחוברים במקביל. אלקטרונים שעוזבים את ההדק השלילי של הסוללה חייבים לנוע דרך תיל להט אחד בלבד בטרם יחזרו להדק החיובי של הסוללה. בדוגמה זו הזרם מסתעף לשלושה מסלולים שונים בין הנקודות A ו-B. נתק בכל אחד מהמסלולים אינו מפריע לזרם לזרום במסלולים האחרים. כל מכשיר פועל באופן בלתי תלוי במכשירים האחרים.

איור 22.17

מעגל מקביל פשוט. סוללה של 6 וולט גורמת לכל נורה להימצא במפל מתח של 6 וולט.



המעגל המוצג באיור 22.17 מדגים את המאפיינים העיקריים הבאים של חיבור במקביל:

1. כל המכשירים קשורים לאותן שתי נקודות A ו-B שעל המעגל. לכן המתח על כל אחד מהמכשירים שווה.
2. הזרם הכללי במעגל מתחלק בין הענפים המקבילים. הואיל והמתח על הענפים השונים שווה, כמות הזרם בכל ענף מתכונתית הפוכה להתנגדותו של אותו ענף.
3. הזרם הכללי במעגל שווה לסכום הזרמים בענפים השונים של המעגל.
4. ככל שמספר הענפים המקבילים גדל, ההתנגדות הכללית של המעגל קטנה.

שאלות

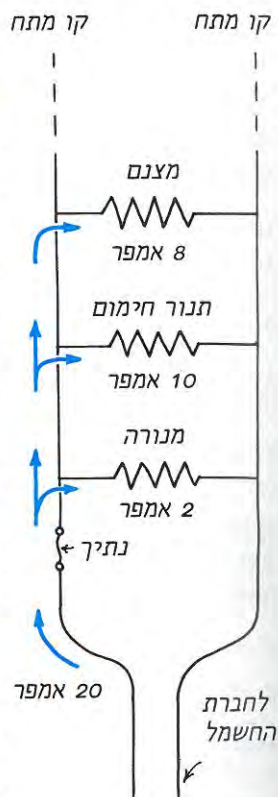
1. אם נורה אחת נשרפת, מה קורה לזרם בנורות אחרות שמחוברות אליה במקביל?
2. מה קורה לעוצמת האור של כל נורה במעגל מקביל כאשר מוסיפים עוד נורות במקביל למעגל?

ההתנגדות הכללית קטנה עם כל ענף נוסף (מפני שכל ענף נוסף מוסיף מוליכות למעגל). פירושו של דבר שההתנגדות הכללית של המעגל קטנה מהתנגדותו של כל ענף בפני עצמו.

מעגלים מקבילים ועומס יתר

בדרך כלל מוזן החשמל לבתים בשני חוטים ראשיים הנקראים קווים. התנגדותם של קווים אלו נמוכה ביותר, והם מחוברים לנקודות החשמל בכל חדר. מתח של כ-220 וולט נוצר ביניהם על ידי תחנת הכוח. המתח הזה מופעל על המכשירים בכך שמחוברים אותם במקביל (באמצעות תקעים) אל הקווים. ככל שגדל מספר המכשירים המחוברים לקווים במקביל, נפתחים יותר מסלולים למעבר זרם, וכך יורדת ההתנגדות הכללית של המעגל. עקב כך זורם בקווים זרם חזק יותר. כאשר זורם בקווים זרם ששיעורו עולה על סף בטיחות מסוים, אומרים כי שורר בהם עומס יתר.

נוכל ללמוד כיצד נוצר עומס יתר אם נתבונן באיור 22.18. קווי האספקה מחוברים למצנן חשמלי שזורם בו זרם של 8 אמפר, למיחם חשמלי שהזרם בו הוא בן 10 אמפר, ולנורה חשמלית המושכת 2 אמפר. כאשר פועל המצנן בלבד, בזרם של 8 אמפר, הזרם הכללי בקו הוא 8 אמפר. כאשר גם המיחם פועל, הזרם הכללי בקו הוא 18 אמפר (8 אמפר למצנן ו-10 למיחם). אם נדליק עתה גם את הנורה, יעלה הזרם שבקו ל-20 אמפר.



איור 22.18

תרשים של מעגל חשמלי המתאר את האופן שבו מכשירים ביתיים מחוברים במקביל לקו המתח.

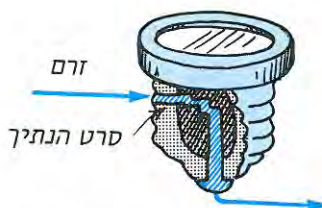
תשובות:

1. אם נורה אחת תישרף, שאר הנורות לא יושפעו מכך. לפי חוק אוהם, הזרם בכל אחד מהענפים שווה למתח חלקי ההתנגדות, ומכיוון שבענפים האחרים לא השתנה המתח וגם לא ההתנגדות, הזרם בענפים אלו יישאר ללא שינוי. לעומת זאת, הזרם הכללי במעגל כולו (שהוא הזרם העובר בסוללה) יקטן בשיעורו של הזרם שזרם בנורה שנשרפה – לפני שריפתה. אולם הזרם בכל אחד מהסעיפים האחרים יוותר ללא שינוי.
2. עוצמת האור בנורות השונות אינה משתנה בעקבות הוספת נורות למעגל (או הסרתן). רק הזרם הכללי וההתנגדות הכללית של המעגל כולו משתנים, ופירושו של דבר שהזרם בסוללה משתנה. (גם לסוללה יש התנגדות פנימית; אנו מניחים כאן שהיא זניחה). כאשר מוסיפים נורות נפתחים מסלולים חדשים שדרכם יכולים האלקטרונים לעבור, ועקב כך קטנה ההתנגדות הכללית של המעגל. הקטנה זו של ההתנגדות מלווה בהגדלת הזרם הכללי, שכעת צריך להזין גם את הנורות הנוספות. אף שההתנגדות והזרם במעגל הכללי משתנים, הרי שלא חל שום שינוי בזרם בהתנגדות בכל אחד מהענפים השונים של המעגל.

אם יחוברו מכשירים נוספים למעגל, הזרם יגדל עוד יותר. חיבור מכשירים רבים מדי לקו יגרום עומס יתר ובעקבותיו התחממות שעלולה להביא לשריפה.

נתיך הבטיחות

כדי למנוע עומס יתר במעגלים חשמליים, מחברים אל קווי האספקה נתיכים בטור. בדרך זו כל הזרם העובר בקו צריך לעבור בנתיך. הנתיך המוצג באיור 22.19 עשוי מסרט מוליך המתחמם וניתך כשעובר דרכו זרם מסוים. אם הנתיך הוא של 20 אמפר, הוא יצליח לשאת 20 אמפר, אך לא יותר. זרם מעל 20 אמפר יתוך את הנתיך (ומכאן שמו), הנתיך "יישרף", וייווצר נתק במעגל. לפני החלפת נתיך שרוף יש לבדוק את הסיבה לעומס היתר ולטפל בה. לעיתים קרובות, העטיפה המבודדת בין התילים מתפוררת והתילים החשופים נוגעים זה בזה. במקרה כזה, המסלול שעל האלקטרונים לעבור לאורך המעגל מתקצר בהרבה ואנו אומרים על המעגל שהוא מקוצר, או שיש בו קֶצֶר.



איור 22.19
נתיך בטיחות.

ניתן להגן על מעגלים חשמליים גם באמצעות מפסקים אוטומטיים, שבהם משתמשים במגנטים או ברצועות דו-מתכת לפתיחת המתג. חברת החשמל משתמשת במפסקים אוטומטיים כדי להגן על קווי האספקה לאורך כל הדרך מתחנת הכוח ועד בית הצרכן.

מוליך על חומר שבו ההתנגדות החשמלית מתאפסת בתנאים מסוימים, לרוב בטמפרטורה נמוכה ביותר.

חוק אוהם הקביעה שזרם חשמלי במעגל נמצא ביחס ישר למתח וביחס הפוך להתנגדות:

$$\text{זרם} = \frac{\text{מתח}}{\text{התנגדות}}$$

הפרש מתחים של וולט אחד על פני התנגדות של אוהם אחד יוצר זרם של אמפר אחד.

זרם ישיר (dc) זרם חשמלי שנע בכיוון אחד.

זרם חילופין (ac) זרם חשמלי שמשנה את כיוונו ללא הרף. המטען החשמלי מתנווד סביב נקודות קבועות למדי. בישראל קצב התנודות הוא 50 הרץ.

הספק חשמלי קצב העברת האנרגיה, או קצב עשיית העבודה; כמות האנרגיה ליחידת זמן. במערכות חשמליות הוא נמדד באמצעות המכפלה של זרם במתח:

$$\text{הספק} = \text{זרם} \times \text{מתח}$$

תקציר מונחים

הפרש פוטנציאלים או מתח הוא ההבדל

בפוטנציאל החשמלי בין שתי נקודות, הפרש שנמדד בוולטים. ניתן להשוות זאת להפרש הלחצים בין שני מכלי מים: אם מחברים בצינור שני מכלים שלחץ המים בכל אחד מהם שונה, מים מהמאגר בעל הלחץ הגבוה יזרמו אל המאגר בעל הלחץ הנמוך עד להשתוות הלחצים. בדומה לכך, אם מחברים באמצעות מוליך שתי נקודות שלכל אחת מהן פוטנציאל חשמלי שונה, מטען יזרום מהנקודה בעלת הפוטנציאל הגבוה אל הנקודה בעלת הפוטנציאל הנמוך יותר עד להשתוות הפוטנציאלים.

זרם חשמלי זרימה של מטען חשמלי המעבירה אנרגיה ממקום אחד למשנהו; נמדדת באמפרים. אמפר אחד הוא זרם של 6.25×10^{18} אלקטרונים בשנייה.

התנגדות חשמלית התכונה של חומר הגורמת לו להתנגד למעבר של זרם חשמלי דרכו. נמדדת באוהמים.

חוק אוהם

14. כיצד משפיעה הכפלת המתח על הזרם במעגל אם התנגדות המעגל אינה משתנה? ומה יקרה אם נכפיל הן את המתח והן את ההתנגדות?
15. כמה זרם יזרום דרך רמקול של רדיו שהתנגדותו 8 אוהם ומופעל עליו מתח של 12 וולט?
16. מהו בדרך כלל תפקידם של נגדים במעגלים חשמליים?

חוק אוהם ומכות חשמל

17. מתי יש לעורר התנגדות חשמלית גדולה יותר - כשהוא יבש או כשהוא רטוב?
18. מה קורה להתנגדות החשמלית של עורכם כאשר אתם מזיעים?
19. מדוע יהיה זה מאוד לא נכון (ומאוד מסוכן) להתעסק במכשירי חשמל כאשר נמצאים באמבטיה?
20. מתח גבוה כשלעצמו אינו גורם מכת חשמל. מה כן יוצר אותה?
21. מהו תפקידה של השן השלישית בתקע של מכשיר חשמלי?

זרם ישר וחילופין

22. מהו ההבדל בין זרם ישר (dc) לבין זרם חילופין (ac)?
23. היכן נוצר זרם ישר: בסוללה או במחולל פשוט? היכן נוצר זרם חילופין?
24. למה מתכוונים כאשר אומרים על זרם מסוים שהוא בו 60 הרץ?

המרת ac ל-dc

25. איזו תכונה של הדיודה מאפשרת לה להפוך זרם חילופין לדפקים של זרם ישר?
26. אחרי הפיכת זרם החילופין לדפקים של זרם ישר באמצעות דיודה, איזה התקן מחליק את הדפקים לזרם ישר אחיד?

מהירות האלקטרונים במעגל החשמלי

ומקורם

27. האם נכונה הטענה הבאה - "אלקטרונים במעגל חשמלי רגיל שמחובר לסוללה זורמים במהירות הקרובה למהירות האור"? נמקו את תשובתכם!
28. מהו בדיוק הדבר שזורם במעגל החשמלי במהירות הקרובה למהירות האור?
29. מדוע מתחמם תיל הנושא זרם חשמלי?
30. למה הכוונה במהירות סחיפה?
31. אבן דומינגו שנופלת גורמת לנפילה של אבנים העומדות

היחידה למדידת ההספק היא הוואט (או הקילוואט);
 $1 \text{ וואט} = 1 \text{ אמפר} \times 1 \text{ וולט}$.

מעגל טורי מעגל חשמלי ובו התקנים בעלי התנגדות חשמלית, המחוברים כך שאותו זרם חשמלי זורם דרך כולם.

מעגל מקביל מעגל חשמלי ובו שתי התנגדויות או יותר, מסודרות בלולאות, כך שכל אחת מהן משלימה מעגל ללא תלות באחרות.

שאלות חזרה

זרימת מטען

1. אילו תנאים צריכים להתקיים כדי שחום יעבור מקצהו האחד של מוט מתכת אל קצהו השני? וכדי לאפשר זרימת מטען חשמלי?
2. מהי המקבילה החשמלית לעובדה שמים זורמים ממקום גבוה למקום נמוך עד להשתוות גובה פני המים?
3. מהו התנאי לקיום זרם קבוע של מטענים דרך תווך מוליך?

זרם חשמלי

4. מדוע אלקטרונים ולא פרוטונים הם נושאי המטען העיקריים בתיל מתכת?
5. מהו בדיוק אמפר?
6. מדוע תיל נושא זרם אינו טעון במטען חשמלי?

מקורות מתח

7. ציינו שני סוגים של "משאבות חשמליות".
8. כמה אנרגיה מוענקת לכל קולון של מטען העובר דרך סוללה בת 6 וולט?
9. האם זרם שורר בין שתי נקודות במעגל חשמלי? האם מתח זורם במעגל חשמלי? הסבירו.
10. האם מתח יוצר זרם או שמא זרם יוצר מתח? מה הסיבה ומה התוצאה?

התנגדות חשמלית

11. האם מים יזרמו ביתר קלות דרך צינור רחב או דרך צינור צר? האם זרם חשמלי יזרום ביתר קלות דרך חוט רחב או דרך חוט צר?
12. האם חימום של חוט נחושת מגדיל את התנגדותו החשמלית או מקטין אותה?
13. במה שונה מוליך על ממוליך רגיל?

נתיך בטיחות

48. מה תפקידו של נתיך הבטיחות, ומדוע הרעיון להחליף נתיך שרוף במטבע של 10 אגורות הוא רעיון גרוע?

מטלות בית

1. תא חשמלי נוצר אם מכניסים שני לוחות העשויים חומרים שונים, שהם בעלי זיקה שונה לאלקטרונים, לתוך תמיסה מוליכה. תוכלו להכין תא פשוט של 1.5 וולט אם תכניסו רצועת נחושת ורצועת אבץ לצנצנת של מי-מלח. מתח התא תלוי בחומרים שבהם תשתמשו ובתמיסה שלתוכה תכניסו אותם, אך לא בגודל הלוחות. סוללה היא למעשה סדרה של תאים.

תא קל להכנה הוא תא לימון. נעצו לתוך לימון אטב נייר ("סיכה משרדית") ופיסת תיל נחושת. החזיקו את קצות החוטים סמוכים זה לזה, אך בלא שייגעו זה בזה, וגעו בהם בלשונכם.



הדגדגו הקל והטעם המתכתי שאתם חשים נובעים מזרם חשמלי חלש שנוצר מסגירת המעגל באמצעות הלשון הרטובה.

2. התבוננו במונה החשמל שבביתכם. קרוב לוודאי שהוא נמצא בחדר המדרגות, בקומת הכניסה או בחדר הכניסה לבית. תראו שבנוסף למחוגים ולספרות שמסכמות את הצריכה עד לרגע זה, יש במד-החשמל גם דיסקת אלומיניום, המסתובבת בין שני קטבים של מגנט כאשר זרם חשמלי נכנס הביתה. ככל שהזרם גדול יותר, הדיסקה מסתובבת מהר יותר. מהירות הדיסקה מתכוננת למספר הוואטים הנמצאים בשימוש; לדוגמה: כאשר תשתמשו ב-500 וואט, הדיסקה תסתובב פי חמישה מהר יותר משתסובב כשתשתמשו ב-100 וואט.

תוכלו להשתמש במד-החשמל כדי לקבוע בכמה וואט משתמש מכשיר חשמלי. תחילה ודאו שכל מכשירי החשמל בבית מנותקים (אל תשכחו את המקרר. אינכם צריכים לנתק שעונים חשמליים, מפני ששני הוואטים שהם צורכים בקושי יורגשו במונה). הדיסקה תפסיק לנוע. עתה, הדליקו נורה של 100 וואט, וסיפרו כמה שניות דרושות לדיסקה להשלמת חמישה סיבובים מלאים. הכתם השחור המסומן בקצה הדיסקה מקל על המלאכה. כבו את הנורה, והפעילו מכשיר שהספקו אינו ידוע לכם. שוב, סיפרו כמה שניות דרושות לדיסקה להשלמת חמישה סיבובים מלאים. אם הזמן שווה לזה שרשמתם קודם לכן, הרי שהמכשיר הוא בעל הספק של 100 וואט. אם הזמן הדרוש הוא כפול, ההספק הוא 50 וואט, ואם הפעם משלימה הדיסקה את

סמוך לה. האם אפשר להיעזר במודל זה כדי להסביר את אופן התקדמותו של זרם חשמלי? של גל קול? של שניהם?

32. מה בדיוק מגיע לביתכם דרך קווי אספקת החשמל?

33. כאשר נוגעים במוליך טעון, מהו מקור האלקטרונים שיוצרים את מכת החשמל?

הספק חשמלי

34. מהו הקשר בין הספק חשמלי, זרם ומתח?

35. מהן היחידות למדידת הספק?

36. מה ההבדל בין קילואט לבין קילואט-שעה?

מעגל חשמלי

37. מהו מעגל חשמלי?

מעגל טורי

38. אם במעגל של שתי נורות, המחוברות בטור, זרם זרם של אמפר אחד דרך נורה אחת, מהו הזרם שזורם דרך הנורה השנייה?

39. אם המעגל המתואר בשאלה הקודמת מחובר לסוללה של 6 וולט, ומפל המתח על הנורה הראשונה הוא 2 וולט, מהו מפל המתח על הנורה השנייה?

40. מהם חסרונותיו העיקריים של מעגל טורי?

מעגל מקביל

41. במעגל של שתי נורות המחוברות במקביל, אם מפל המתח על האחת הוא 6 וולט, מהו מפל המתח בין חיבורי הנורה השנייה?

42. אם דרך שתי לולאות במעגל מקביל עובר זרם שווה, מה אפשר ללמוד מכך על ההתנגדות בשתי הלולאות הללו?

43. מה הקשר בין הזרם הכולל שזורם בכל הלולאות של מעגל מקביל פשוט לבין הזרם הזורם בתוך מקור המתח?

44. ככל שרוב מספר הדלתות הנפתחות בחדר הוואט אדם, כן קטן לחץ האנשים היוצאים על כל אחת מן הדלתות. במה דומה מצב זה למצב שנוצר כאשר מתוספות לולאות למעגל מקביל?

45. האם מעגלים ביתיים מחוברים בדרך כלל בטור או במקביל?

מעגלים מקבילים ועומס יתר

46. במה שונה הזרם שעובר דרך קו האספקת הבית מהזרם שעובר דרך המנורה שלאורה אתה מכין כעת את שיעוריך?

47. לעיתים קרובות, כאשר יותר מדי מכשירים חשמליים פועלים בעת ובעונה אחת, הם גורמים לשריפת הנתיך. מדוע?

המוליכות החשמלית של מתכות שבהן המהלך החופשי הממוצע קטן מאשר במתכות אחרות? מה ניתן לעשות כדי להגדיל את המהלך החופשי הממוצע?

11. גלאי שקר פשוט מורכב ממעגל חשמלי, שבו גופו של הנבדק (למשל האזור שבין האצבעות) מהווה חלק מהמעגל. מד-זרם רגיש מראה את הזרם הזורם במעגל כאשר הוא מחובר למקור מתח חלש. כיצד ניתן לגלות באמצעות שיטה זאת שאדם משקר? (ומתי השיטה נכשלת?)

12. חלק קטן בלבד מהאנרגיה החשמלית שנורת להט רגילה משתמשת בה הופך לאור. מה קורה לשאר האנרגיה?

13. מדוע משתמשים בתילי חשמל עבים לנשיאת זרמים חשמליים גדולים, ולא בחוטים דקים?

14. באיזו נורה יזרום יותר זרם: בנורה בעלת נימת להט דקה או בנורה בעלת תיל להט עבה? (הניחו ששני החוטים בעלי אורך שווה ועשויים מאותו חומר).

15. האם הזרם שעובר בנורה שמחוברת למתח 110 וולט גדול או קטן מהזרם שעובר באותה נורה כאשר היא מחוברת למתח 220 וולט?

16. מה גורם נזק רב יותר: חיבור מכשיר שמיועד לעבוד במתח 110 וולט למקור מתח של 220 וולט, או חיבור מכשיר שמיועד לעבוד במתח 220 וולט למקור מתח של 110 וולט?

17. האם ההתנגדות של נורת 100 ואט גדולה או קטנה מההתנגדות של נורת 60 ואט? בהנחה שאורך תילי הלהט בשתי הנורות שווה, איזה מהם עבה יותר?

18. אם זרם חשמלי של עשירית או שתי עשיריות אמפר יעבור בין שתי ידיכם, סביר להניח שתתחשמו. אולם אם הזרם ייכנס אל היד ויצא מהמרפק של אותה היד, תינצל, אפילו אם הזרם יהיה חזק דיו כדי לחרוץ את עורכם. הסבירו.

19. האם בנורה בבייתכם עובר זרם ישר או זרם חילופין? ומה בנורה שבמכונית?

20. הנזק שמסבה מכת חשמל נובע מהזרם החשמלי שעובר בגוף. מדוע אם כן נהוג לכתוב על שלטים: "זהירות, מתח גבוה!" ולא "זהירות, זרם גבוה!"?

21. מה תוכלו להעיר על שלט האזהרה שבאיור?



הסיכויים במחצית הזמן, הרי שהספק המכשיר הוא 200 ואט, וכן הלאה. כך תוכלו להעריך את הספקם של מכשירי חשמל בדיוק רב למדי.

תרגילים

1. אם תיל מוליך מחבר בין שני גופים נפרדים, הטעונים לאנרגיות פוטנציאליות חשמליות שונות, האם תוכלו לומר בוודאות באיזה כיוון יזרום המטען? ומה באשר לשני גופים שטעונים כך שלכל אחד מהם פוטנציאל חשמלי שונה?

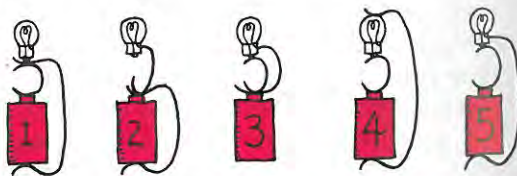
2. אם זרם חשמלי זורם מגוף אחד למשנהו, מה נוכל לומר על גודלו היחסי של הפוטנציאל החשמלי של שני הגופים?

3. דוגמה אחת למערכת העברת מים היא ממטרה שמשקה גינה. דוגמה אחרת היא מערכת הקירור של מכונית. איזו מהן דומה יותר בפעולתה למעגל חשמלי? מדוע?

4. מה קורה לעוצמת האור של נורה כאשר הזרם שעובר דרכה גובר?

5. חבר לכיתה אומר שלדעתו וולט ואמפר מודדים אותו דבר, והמושגים השונים הומצאו רק כדי לסבך את העניינים. נסו להעמיד אותו על טעותו (לפני שייכשל במבחן).

6. באילו מהמעגלים שבאיור קיים זרם הגורם להארת הנורה?



7. האם זרם חשמלי זורם מן הסוללה החוצה או דרך הסוללה? האם הוא זורם לתוך נורה או דרך נורה? הסבירו.

8. מעניקים אנרגיה למטען חשמלי בכך ששואבים אותו ממקום שבו הפוטנציאל החשמלי נמוך למקום שבו הפוטנציאל גבוה. כיצד מפיקים אנרגיה מחשמל?

9. לעיתים נוכל לשמוע מישהו אומר שמכשיר מסוים "צורך חשמל". מהו בדיוק הדבר שהמכשיר צורך, ומה קורה לו?

10. אלקטרון שנע בתוך תיל חשמלי נתקל שוב ושוב באטומים, ובין ההתנגשויות הוא עובר מרחק ממוצע שנקרא המהלך החופשי הממוצע. מה תוכלו לומר על

32. אם סוללה נתונה לעומס יתר, ההתנגדות הפנימית שלה גדלה, והיא תספק רק מתח נמוך יותר למעגל החיצוני. אם יחברו יותר מדי נורות במקביל לסוללה, האם תיחלש עוצמת ההארה שלהן? הסבירו.
33. מדוע כמעט אף פעם אין המכשירים שבשימוש ביתי מחוברים בטור?
34. אם נורה של 100 וואט ונורה של 60 וואט מחוברות בטור, על איזו מהן יהיה מפל המתח גדול יותר? ומה אם שתי הנורות תהיינה מחוברות במקביל?

22. מדוע מתחשבים במוטת הכנפיים של ציפורים כאשר קובעים את המרחק בין קווי מתח מקבילים?

23. העריכו את מספר האלקטרונים שחברת החשמל מעבירה מדי שנה לעיר ממוצעת בת 50,000 תושבים.

24. אם אלקטרונים זורמים לאט כל כך במעגלים החשמליים, מדוע לא עובר זמן רב יותר מרגע הלחיצה על המתג ועד להידלקות האור?

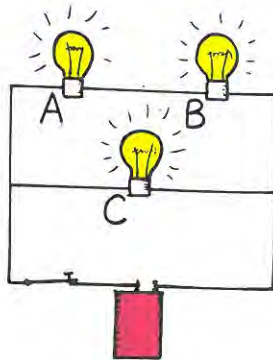
25. מדוע מהירותו של אות חשמלי גדולה במידה כה רבה ממהירות הקול?

26. אם תנוקב נורה חשמלית בעודה דולקת וידלוף לתוכה חמצן, הנורה תבער לרגע באור חזק במיוחד בטרם תישרף. גם הזרמה של זרם גבוה מדי דרך נורה תגרום לשריפתה. אילו שינויים פיסיקליים מתרחשים כאשר נורה נשרפת?

27. תארו לעצמכם שתי נורות פנסים המחוברות לסוללה אחת. האם יפיצו הנורות אור חזק יותר כאשר יחברו ביניהן במקביל או כאשר יחברו בטור? באיזה מקרה תיגמר הסוללה מהר יותר?

28. כאשר נורות רבות מחוברות בטור לסוללה, ייתכן מצב שבו הן יהיו חמות למגע, אך לא יפיצו אור. מהו ההסבר לתופעה זו?

29. במעגל שבאיור, מהן עוצמות ההארה היחסיות של הנורות השונות (אם הנורות עצמן זהות)? איזו נורה דולקת באור החזק ביותר? באיזו נורה זרם זרם מרבי? מה יקרה אם נוציא את נורה A מבית הנורה? ומה אם נוציא את נורה C?



30. ככל שרב מספר הנורות המחוברות בטור לסוללה של פנס, מה קורה לעוצמת ההארה של כל אחת מהנורות? בהנחה שההתחממות בתוך הסוללה זניחה, מה קורה לעוצמת ההארה של כל נורה כשנוספות נורות במקביל?

31. איזה שינוי מתרחש בזרם של הקו כאשר עוד ועוד מכשירים מחוברים למעגל בטור? במקביל? מדוע שונות התשובות?

בעיות

1. ההספק שמסומן על נורות חשמל אינו תכונה פנימית של הנורה, אלא תלוי במתח שאליו היא מחוברת (בדרך כלל 220 וולט בישראל ובאירופה, 110 או 120 וולט בארה"ב). חשבו את הזרם שעובר דרך נורת 60 וואט המחוברת למקור מתח של 120 וולט.
2. דרך מכשיר חשמלי המחובר למתח של 120 וולט עובר זרם של 20 אמפר. חשבו את התנגדות המכשיר (באוהמים).
3. בעזרת הנוסחה הספק = זרם $\times$ מתח, מציאו את הזרם שעובר דרך מייבש שיער שעובד בהספק של 1200 וואט, בשעה שהוא מחובר למקור מתח של 120 וולט. לאחר מכן חשבו את ההתנגדות של מייבש השיער.
4. מצבר של מכונית יכול להתרוקן אם הוא מזרים למעגל זרם גבוה במשך זמן קצר או זרם נמוך במשך זמן ארוך. מצבר אופייני, טעון לגמרי, מסוגל לספק כ-60 אמפר-שעה (60 אמפר למשך שעה אחת, 30 אמפר למשך שתיים, 15 אמפר למשך 4 שעות, וכן הלאה). לילה אחד החנית את מכוניתך ושכחת לכבות את שני הפנסים הראשיים, שצורכים 3 אמפר כל אחד. כמה שעות יעברו עד להתרוקנות המצבר?
5. נורת 4 וואט מחוברת למעגל של 220 וולט ופועלת שנה תמימה בלא הפסקה. חשבו את הגדלים הבאים: (א) הזרם שעובר דרכה, (ב) התנגדות נימת הלהט של הנורה, (ג) האנרגיה שנצרכה במהלך השנה, (ד) עלות הפעלתה של הנורה במשך שנה, במחיר של 30 אג' לקוט"ש.