

השראה אלקטרומגנטית



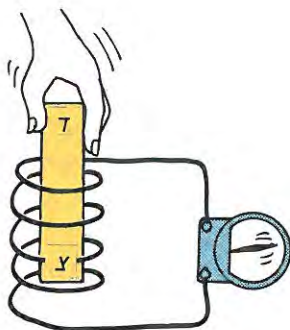
בראשית המאה התשע עשרה, ההתקנים היחידים לייצור זרמים חשמליים היו תאים וולטאיים, שיצרו זרמים חלשים תוך כדי המסת מתכות בחומצה. אלה היו אבות הסוללות שאנו מכירים כיום. בשנת 1820 גילה המדען הדני ארסטד שתילים נושאי זרם יוצרים שדה מגנטי. מכאן עלתה השאלה האם גם שדות מגנטיים מסוגלים ליצור זרמים. התשובה ניתנה בשנת 1831 בידי שני פיסיקאים, מיכאל פארדיי האנגלי וג'וזף הנרי מארה"ב, שפעלו, כל אחד באופן עצמאי, מבלי שידעו זה על זה. תגליתם שינתה את העולם; בעקבותיה הפך החשמל לנחלת הכלל - הוא מספק אנרגיה לתעשייה ביום ומאיר את הבתים בלילה.

פארדיי והנרי גילו כי אפשר לייצר זרמים חשמליים, פשוט באמצעות הזזה של מגנט לתוך סליל של תיל מתכת ובחזרה החוצה (איור 24.1). לא נדרשה סוללה או כל מקור מתח אחר, רק תנועה של מגנט בתוך לולאת תיל. הם מצאו שמתח נוצר או מושרה על ידי התנועה היחסית בין התיל לבין השדה המגנטי. מתח נוצר בין שהשדה המגנטי נע ליד מוליך נייח ובין שהשדה המגנטי נייח, והמוליך נע בקרבתו (איור 24.2). התוצאה תהיה שווה בין שרק אחד מהם נע ובין ששניהם נעים.

**השראה
אלקטרומגנטית**

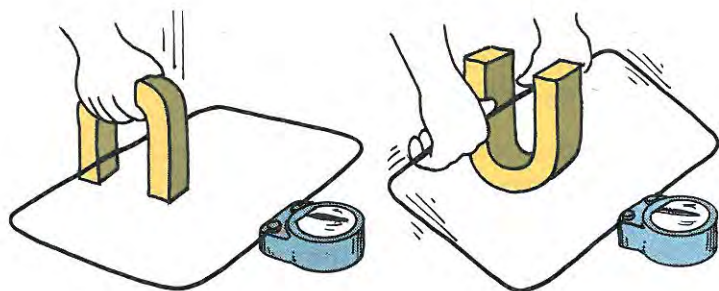
איור 24.1

עם הכנסת המגנט לסליל, המטענים בסליל מתחילים לנוע ומושרה בו מתח.



איור 24.2

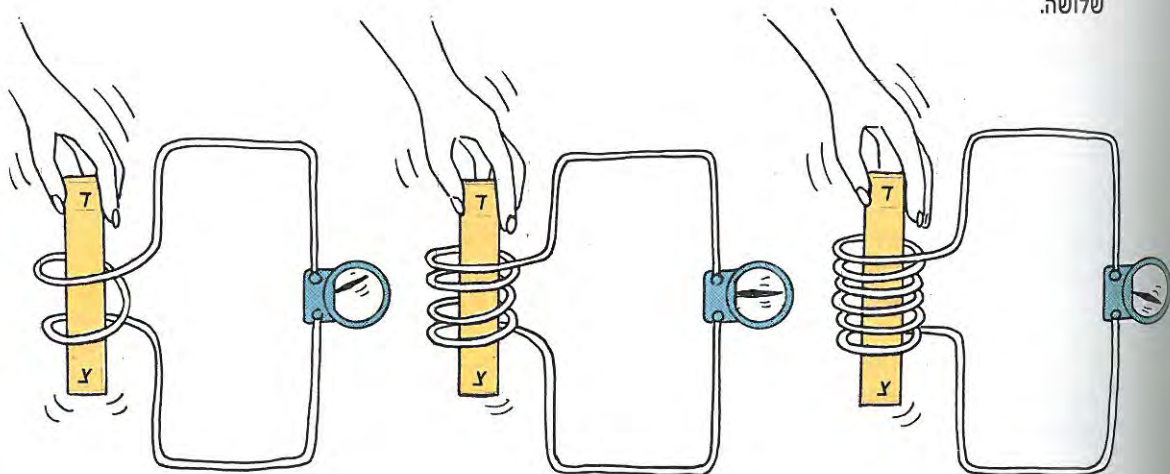
מתח מושרה בלולאת התיל בין שהמגנט מוזז ביחס ללולאה ובין שהמגנט נייח והלולאה זזה.



איור 24.3

הכנסת מגנט לתוך סליל שמספר הכריכות בו כפול לעומת מספרן בסליל אחר גורמת בו להשראת מתח כפול מהמתח המושרה בסליל האחר. אם מספר הלולאות גדול פי שלושה, גם המתח המושרה גדול פי שלושה.

ככל שרבים הליפופים בסליל התיל המוליך שבתוכו נע המגנט, כן גדול יותר המתח המושרה (איור 24.3). תזוזה של מגנט בתוך סליל שמספר הליפופים בו כפול תיצור מתח כפול, אם מספר הליפופים יהיה גדול פי עשרה, גם המתח המושרה יהיה גדול פי עשרה, וכך הלאה. לכאורה אנחנו מקבלים משהו (אנרגיה) בלא שניתן בעדו תמורה. למעשה, ככל שרב מספר הליפופים כך קשה יותר להזיז את המגנט בתוכם. זאת משום שהמתח המושרה יוצר זרם, שיוצר אלקטרומגנט, שדוחה את המגנט שבידנו. כך שלמעשה אנו עושים עבודה רבה



יותר כדי להשרות מתח גדול יותר (איור 24.4). גודלו של המתח המושרה תלוי במהירות שבה קווי השדה המגנטי נכנסים אל תוך הסליל או יוצאים ממנו. תנועה איטית מאוד כמעט שאינה יוצרת מתח. תנועה מהירה יוצרת מתח גדול יותר. תופעה זו, של יצירת מתח חשמלי על ידי שינוי השדה המגנטי בתוך סליל של תיל מוליך, נקראת **השראה אלקטרומגנטית**.



איור 24.4

קשה יותר לדחוף את המגנט לתוך סליל בעל כריכות רבות מפני שהשדה המגנטי שנוצר סביב כל אחת מהלולאות בסליל מתנגד לתנועת המגנט.

תופעת ההשראה האלקטרומגנטית מסוכמת בחוק פארדיי הקובע:

המתח המושרה בסליל נמצא ביחס ישר למכפלת מספר הלולאות בקצב השינוי של השדה המגנטי בתוך הלולאות הללו.

חוק פארדיי

עוצמת הזרם שנוצר עקב השראה אלקטרומגנטית אינה תלויה במתח המושרה בלבד, אלא גם בהתנגדותם של הסליל ושל המעגל שאליו הסליל מחובר*. כך למשל, אפשר להכניס מגנט אל תוך לולאת גומי ולהוציאו או להכניסו אל תוך לולאת נחושת ולהוציאו. בשני המקרים המתח המושרה שווה, בתנאי שכל לולאה חוצה אותו מספר של קווי שדה מגנטי. אך הזרמים יהיו שונים בתכלית. על האלקטרונים בגומי יפעל מתח שווה לזה שיפעל על האלקטרונים בנחושת, אך בגומי האלקטרונים קשורים למולקולות קבועות ואינם יכולים לנוע בחופשיות כפי שמסוגלים לנוע האלקטרונים בנחושת.

אם תוחבים מגנט לתוך סליל, כמתואר באיור 24.4, חשים בהתנגדות. מדוע ההתנגדות הזו גדולה יותר בסליל בעל ליפופים רבים יותר?

שאלה

ניתן להשרות מתח בלולאת תיל בשלוש דרכים שנראות לכאורה שונות: בהזזת הלולאה ליד המגנט, בהזזת המגנט ליד הלולאה, או בשינוי הזרם בסליל סמוך. בכל מקרה מתקיים תנאי חשוב: חל שינוי בשטף השדה המגנטי שנכנס ללולאה.

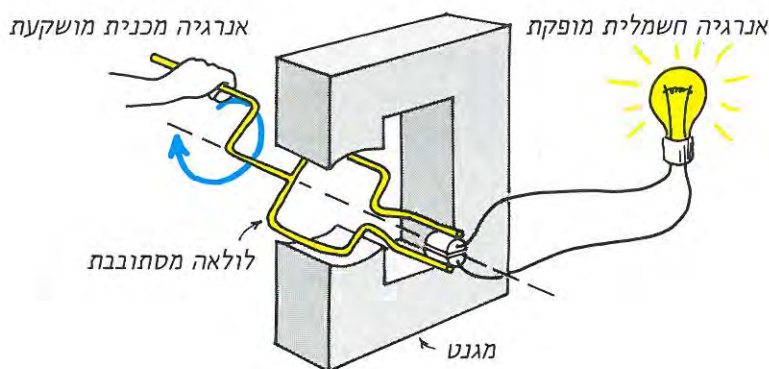
בפשטות, כדי להשרות מתח שווה על פני יותר ליפופים, נדרשת עבודה רבה יותר. אפשר להציג זאת גם כך: כאשר שני מגנטים (אלקטרומגנטים או מגנטים קבועים) סמוכים זה לזה, הם עשויים להימשך זה לזה או להידחות זה מזה. אם אחד המגנטים נוצר בהשראה עקב התנועה של משנהו, כיוון השדות יהיה תמיד כזה שהמגנטים ידחו זה את זה. זהו הכוח המתנגד שאתם חשים. השראת זרם גדול יותר בלולאות רבות יותר פשוט מגדילה את עוצמת השדה המגנטי המושרה, ולכן גם את הכוח המתנגד.

תשובה:

* הזרם תלוי גם ב"היגב" (ריאקטנס) של הסליל. ההיגב דומה להתנגדות; הוא חשוב במעגלי זרם חילופין ותלוי בין השאר במספר הכריכות שבסליל ובתדירות המקור של זרם החילופין. בספר זה איננו עוסקים בעניין מורכב זה.

מחוללים זורמי חילופין

כאשר מגנט נתחב לתוך סליל של תיל מלוכף ונמשך בחזרה החוצה, כיוון המתח המושרה מתחלף. כאשר עוצמת השדה המגנטי בתוך הסליל עולה (המגנט נכנס אל הסליל) המתח המושרה בסליל מכוון בכיוון אחד, ואילו כאשר עוצמת השדה יורדת (המגנט יוצא מן הסליל) המתח מושרה בכיוון ההפוך. ככל שגדלה תדירות השינוי של השדה המגנטי כן גדל המתח המושרה. תדירות השינוי של המתח המושרה בסליל שווה לתדירות השינוי בעוצמת השדה המגנטי בתוך הסליל. באופן מעשי קל יותר ליצור זרמים בהזזת הסליל מאשר בהזזת המגנט. ניתן לעשות זאת על ידי סיבוב הסליל בתוך שדה מגנטי קבוע (איור 24.5). התקן כזה נקרא **מחולל (גנרטור)**. מבנה המחולל זהה בעיקרון למבנהו של מנוע חשמלי, רק תפקידי התשומה והתפוקה מתחלפים. במנוע מושקעת אנרגיה חשמלית ומופקת אנרגיה מכנית, ואילו במחולל מושקעת אנרגיה מכנית ומופקת אנרגיה חשמלית. שני ההתקנים פשוט ממירים אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת.

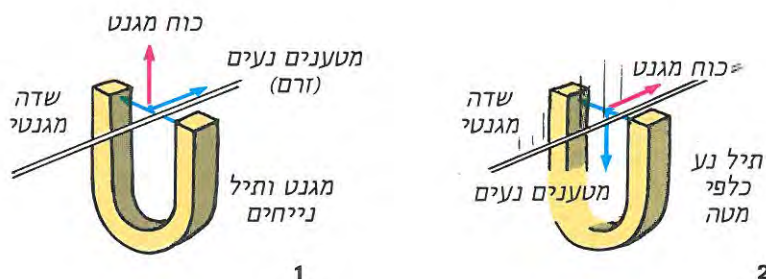


איור 24.5

מחולל פשוט. מתח מושרה בלולאה כאשר היא מסתובבת בשדה המגנטי.

מעניין לבחון את הפיסיקה של המנוע ושל המחולל, ולמצוא ששניהם פועלים על בסיס עיקרון משותף: על מטענים נעים פועל כוח המאונך הן לכיוון תנועתם והן לשדה המגנטי שבו הם עוברים (איור 24.6). את סטיית התיל שזורם בו זרם בשדה המגנטי מכנים לעיתים תוצא המנוע, ואילו לזרם שנוצר כתוצאה מחוק ההשראה קוראים תוצא המחולל. את סיכום התופעות האלה תמצאו בחלקים (1) ו-(2) של האיור. לימדו אותן! האם ברור לכם הקשר בין שני התוצאים?

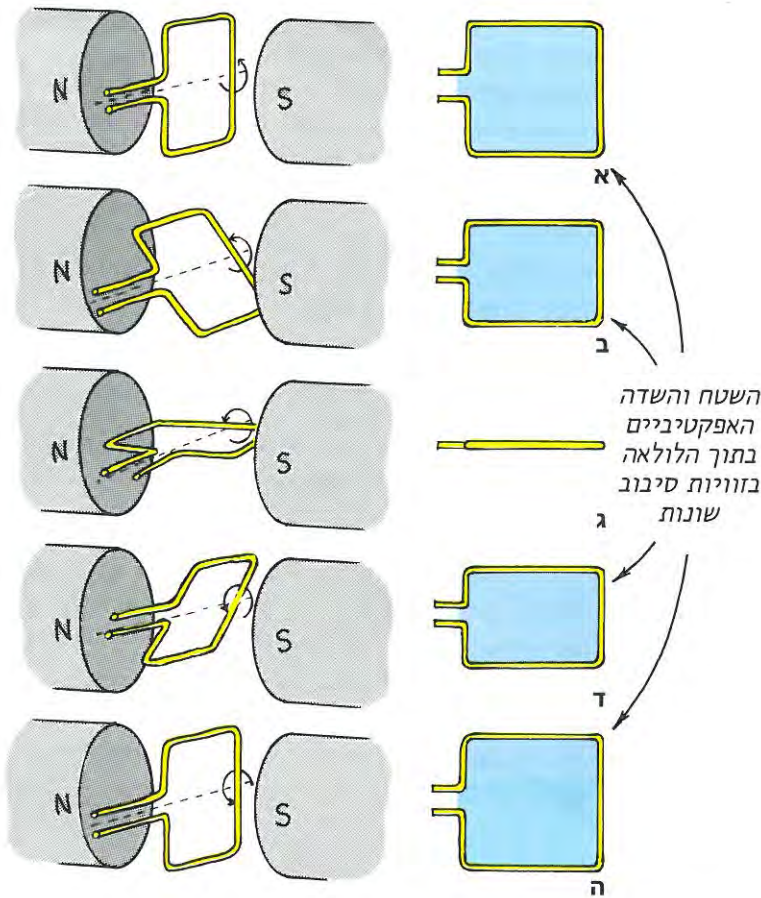
איור 24.6



(1) תוצא המנוע: כאשר הזרם החשמלי נע ימינה, פועל על האלקטרונים הזורמים כוח ניצב לכיוון זרימתם, ומגמתו כלפי מעלה. מכיוון שאין מסלול מוליך שהאלקטרונים יכולים לזרום בו כלפי מעלה, התיל נדחף כלפי מעלה עם האלקטרונים שבו.
(2) תוצא המחולל: כאשר תיל חשמל ללא זרם מוזז כלפי מטה, פועל על האלקטרונים שבו כוח במאונך לכיוון תנועתם. בכיוון זה קיים מסלול מוליך שהאלקטרונים יכולים לזרום בו (התיל עצמו) וכך נוצר בו זרם.

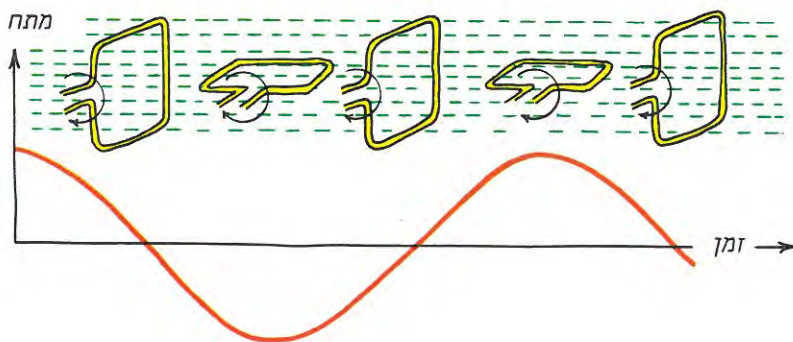
24.7 איור

עם סיבוב הלולאה משתנה מספרם של קווי השדה המגנטי שעוברים דרכה. מספר הקווים משתנה מהמקסימום ב-(א) למינימום ב-(ג) ושוב למקסימום ב-(ה) (השווה ל-(א)). השראת מתח מרבית מתרחשת ב-(ג), כאשר קצב השינוי מרבי.



פרטיה של תופעת ההשראה האלקטרומגנטית מתוארים באיור 24.7. שימו לב לכך שמספר קווי השדה המגנטי העוברים בתוך לולאת התיל משתנה כאשר מסובבים אותה בתוך השדה המגנטי. ב-(א) מספר קווי השדה העוברים בתוך הלולאה הוא מרבי. כאשר הלולאה מסתובבת ב-(ב), היא מקיפה מספר קטן יותר של קווי שדה, עד שב-(ג) הלולאה ניצבת לאורך קווי השדה ואינה מקיפה אותם כלל. כשנמשך הסיבוב, מספרם של קווי השדה שמקיפה הלולאה הולך וגדל (ד), עד למצב שבו היא מקיפה מספר מרבי של קווים (ה), זאת לאחר שהשלימה חצי סיבוב. בהמשך הסיבוב, השדה המגנטי בתוך הלולאה משתנה באורח מחזורי, כך שקצב השינוי במספר קווי השדה מגיע למקסימום כאשר מספר קווי השדה עובר דרך נקודת האפס. לפיכך, המתח המושרה הוא מרבי בנקודה זו (איור 24.8). מכיוון שהמתח שיוצר המחולל משתנה בגודלו ובכיוונו, הזרם שנוצר נקרא זרם חילופין (וסימונו ac)*. זרם

* בעזרת מברשות מתאימות ובאמצעים אחרים ניתן להפוך את הזרם לזרם ישר, וכך ליצור מחולל זרם ישר.



איור 24.8

עם סיבוב הלולאה, עוצמת המתח והזרם המושרים וכיוונם משתנים. סיבוב מלא אחד של הלולאה יוצר מחזור אחד של המתח (והזרם).

חילופין משנה את עוצמתו ואת כיוונו באורח מחזורי. זרם החילופין שמגיע אלינו הביתה מיוצר במחוללים המכוונים להפיק זרם שמשנה את כיוונו ואת עוצמתו 50 פעם בשנייה - זרם של 50 הרץ.

חמישים שנה לאחר תגלית ההשראה האלקטרומגנטית של פארדיי והנרי הצליחו ניקולא טסלה וג'ורג' ווסטינגהאוז, בארה"ב, להכניסה לשימוש מעשי. הם הראו לעולם שניתן לייצר חשמל בצורה אמינה ובכמויות מספיקות כדי להאיר ערים שלמות.

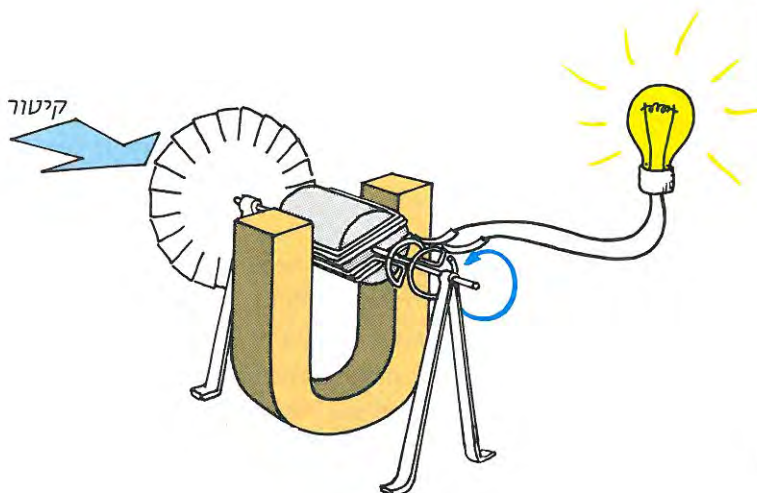
תחנות כוח

אנרגיה ממחוללי טורבו

טסלה בנה מחוללים דומים מאוד לאלה הנמצאים בשימוש כיום, שהם מורכבים בהרבה מהדגם הפשוט שתיארנו קודם. במחוללים של טסלה היו מוטות עשויים מצרורות של חוטי נחושת, שסוחררו באמצעות טורבינה בתוך שדות מגנטיים חזקים. את האנרגיה לסיבוב הטורבינה סיפקו מים נופלים או קיטור. לולאות התיל שהסתחררו במוטות חצו את השדה המגנטי של האלקטרומגנטים שמסביבם, וכך השרו מתח וזרם חילופין.



ניקולא טסלה



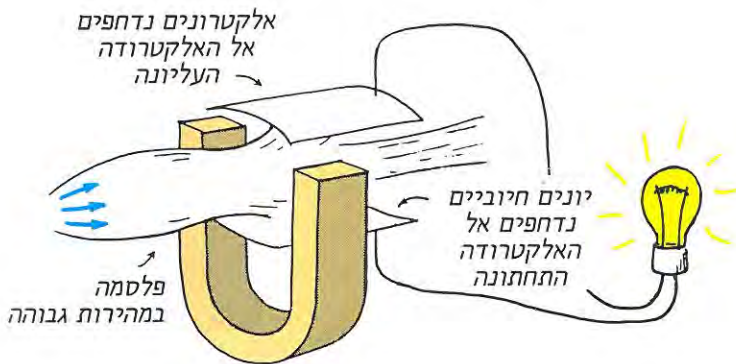
איור 24.9

קיטור מפעיל את הטורבינה המחוברת לציר המחולל.

הבה נתבונן בתהליך זה מנקודת המבט האטומית. כאשר התילים שבמוטות המסתחררים חוצים את השדה המגנטי, פועלים על המטענים השליליים והחיוביים כוחות אלקטרומגנטיים בכיוונים מנוגדים. בהשפעתו של הכוח האלקטרומגנטי זורמים האלקטרונים באופן חופשי למדי בכיוון אחד לאורך המבנה הגבישי של הנחושת. אטומי הנחושת, שהם למעשה יונים חיוביים, נדחפים לכיוון הנגדי, אולם הם קבועים למקומם בגביש וכמעט שאינם נעים. רק האלקטרונים זזים; הם זורמים הלך ושוב באופן מחזורי עם כל סיבוב של המוטות. את האנרגיה של זרימת האלקטרונים הזאת מפיקים באלקטרודות הקצה של המחולל.

אנרגיה ממחולל מגנטו-הידרו-דינמי (מה"ד)

התקן מעניין, הדומה למחולל הטורבו, הוא המה"ד - מחולל מגנטו-הידרו-דינמי, שאינו נזקק כלל למוטות ולטורבינות. כאן אין מזיזים מטענים בשדה מגנטי על ידי סיבוב של מוטות, אלא גורמים לפלסמה של אלקטרונים ומטענים חיוביים להתפשט דרך נחיר ולנוע במהירות על-קולית דרך שדה מגנטי. בדומה למוטות של מחולל הטורבו, תנועת המטענים דרך השדה המגנטי יוצרת כוח אלקטרו-מניע וזרם בהתאם לחוק ההשראה של פאראדיי. לעומת המחולל הקונבנציונלי, שבו "מברשות" נושאות את הזרם למעגל העומס החיצוני, במחולל המה"ד ממלאות את התפקיד הזה אלקטרודות (איור 24.10). שלא במחולל הטורבו, מחולל מה"ד מסוגל לפעול בכל טמפרטורה שאפשר להביא



איור 24.10

דגם פשוט של מחולל מה"ד. כא"מ מושרה בין האלקטרודה התחתונה לבין העליונה בשל תנועתם המהירה של החלקיקים הטעונים שבפלסמה, הזורמים דרך שדה מגנטי. הכוחות המנוגדים שפועלים על המטענים החיוביים והשליליים שבפלסמה מתבטאים בסופו של דבר בזרם של אלקטרונים מהאלקטרודה התחתונה, דרך הפלסמה אל האלקטרודה העליונה, ומשם, דרך המעגל החשמלי, בחזרה אל האלקטרודה התחתונה. אין במתקן חלקים נעים: הפלסמה בלבד נמצאת בתנועה. בפועל משתמשים באלקטרומגנטים מחומרים מוליכי-על.

אליה את הפלסמה, בין שהיא מחוממת על ידי שריפת דלק ובין באמצעות תהליכים גרעיניים. הטמפרטורה הגבוהה מאפשרת יעילות תרמודינמית מרבית, ופירושו של דבר הספק רב יותר תמורת כמות שווה של דלק, ופחות חום מבוזבז. יעילות רבה עוד יותר מושגת כאשר החום ה"מבוזבז" מנוצל ליצירת קיטור, שמניע מחוללי טורבינה רגילים.

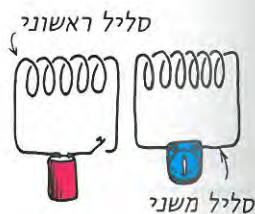
היכולת להחליף את סלילי הנחושת המסתובבים במחוללים בשטף של פלסמה הושגה רק לאחרונה, מפני שהטכנולוגיה לייצור פלסמה בטמפרטורה

גבוהה דיה היא טכנולוגיה חדשה. תחנות כוח משתמשות כיום בפלסמה בטמפרטורות גבוהות, שנוצרת משריפה של חומרי דלק באוויר או בחמצן*. מחוללים מכל הסוגים אינם מייצרים, כמובן, אנרגיה. הם רק ממירים אנרגיה מצורה אחת לאנרגיה חשמלית. אנרגיה מהמקור, לרוב דלק מסוג כלשהו, הופכת לאנרגיה מכנית המנוצלת להנעת הטורבינה או משמשת לייצור הפלסמה, ומחוללים הופכים את רובה לאנרגיה חשמלית. החשמל המיוצר בדרך זו פשוט מסוגל לשאת את האנרגיה ליעדים רחוקים. יש אנשים הסבורים שהחשמל הוא מקור ראשוני לאנרגיה. זו טעות. החשמל הוא צורת אנרגיה, שחייב להימצא לה מקור.

מעניין לראות שאנרגיה חשמלית עשויה לעבור בחלל הריק ממתקן אחד למשנהו בעזרת ההתקן הפשוט המתואר באיור 24.11. שימו לב לכך שסליל אחד מחובר לסוללה, בעוד השני מחובר לגליונומטר. מקובל לכתוב את הסליל המחובר למקור הכוח סליל ראשוני (מבוא) ואת הסליל האחר סליל משני (מוצא). ברגע סגירת המתג, כשהמעגל הראשוני נסגר זרם זורם בסליל שבמעגל זה, זרם מתחיל לזרום גם בסליל המשני. זאת למרות העדר כל מגע פיסי בין הסלילים. עם זאת, פרץ הזרם בסליל המשני נמשך זמן קצר מאוד. כאשר המתג הראשי נפתח, שוב נרשם זרם חולף וקצר בסליל המשני, והפעם בכיוון ההפוך.

וזהו ההסבר למתרחש: כשזרם מתחיל לזרום דרך הסליל הראשוני, מתחיל להיבנות בו שדה מגנטי. פירוש הדבר הוא שהשדה המגנטי מסביב לסליל הראשוני גדל (כלומר משתנה), ומכיוון שהסלילים סמוכים זה לזה, שינוי השדה מתפשט אל הסליל המשני ומשרה בו מתח. מתח מושרה זה הוא זמני בלבד, מפני שעם התייצבות המתח והשדה המגנטי בסליל הראשוני, כלומר, כאשר השדה המגנטי אינו משתנה עוד, לא מושרה מתח נוסף בסליל המשני. אולם עם פתיחת המתג, הזרם בסליל הראשוני יורד לאפס. השדה המגנטי שמסביב לסליל נעלם, ובכך הוא משרה מתח על הסליל המשני, החש בשינוי. אנו רואים שמתח מושרה בסליל המשני כל אימת שהשדה המגנטי העובר דרך הסליל משתנה, ולא משנה מהי סיבת השינוי.

שנאים



איור 24.11

בכל פעם שהמתג הראשי נפתח או נסגר, מושרה מתח במעגל המשני.

שאלה

עם פתיחת המתג בסליל הראשוני באיור 24.11 או עם סגירתו, הגליונומטר בסליל המשני מראה מעבר זרם. אולם כאשר המתג נותר סגור, לא נרשם בגליונומטר כל זרם. מדוע?

תשובה:

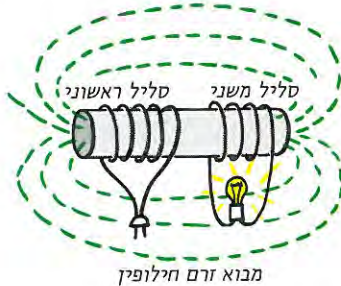
כאשר המתג נשאר סגור, זרם בסליל הראשוני זרם קבוע ושדה מגנטי קבוע שזור סביבו. השדה הזה מגיע אל הסליל המשני, אולם כל עוד אין שינוי בשדה המגנטי, השראה אלקטרומגנטית אינה מתרחשת.

* תחנת הכוח היחידה המייצרת כיום חשמל בכמויות מסחריות בשיטת המה"ד נמצאת ברוסיה. התחנה היא פרי שיתוף פעולה בין מדענים אמריקניים ורוסיים.

אם מכניסים ליבה מברזל לתוך הסליל הראשוני והמשני במעריך המתואר באיור 24.11, השדה המגנטי שמסביב לסליל הראשוני מחוץ בשל ההתארגנות המסודרת של התחומים המגנטיים. השדה גם מתרכז בליבה, ומתפשט בתוכה לעבר הסליל המשני, אשר "חותך" חלק גדול יותר של השינויים בשדה המגנטי. עתה, כאשר נפתח את המתג או נסגור אותו, יראה הגליונומטר זרם גדול יותר משהראה במקרה הקודם. נניח עתה כי במקום לפתוח ולסגור את המתג כדי ליצור שינוי בשדה המגנטי, נזרים בסליל הראשוני זרם חילופין. במקרה כזה, הקצב שבו ישתנה השדה המגנטי בסליל הראשוני (ולכן גם במשני) ישווה לתדירותו של זרם החילופין. קיבלנו **שנאי** (איור 24.12). מעריך יעיל יותר מודגם באיור 24.13.

איור 24.12

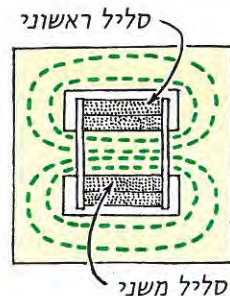
שנאי פשוט.



אם לסליל הראשוני ולסליל המשני מספר שווה של כריכות, הרי שמתח החילופין של המבוא וזה של המוצא יהיו שווים. אולם אם בסליל המשני ליפופים רבים יותר מאשר בסליל הראשוני, יושרה בסליל המשני מתח גדול יותר מזה שבסליל הראשוני. במקרה זה אומרים על המתח שהוא הוגבר. אם מספר הכריכות בסליל המשני כפול ממספרן בסליל הראשוני, המתח בסליל המשני יהיה כפול מהמתח בסליל הראשוני.

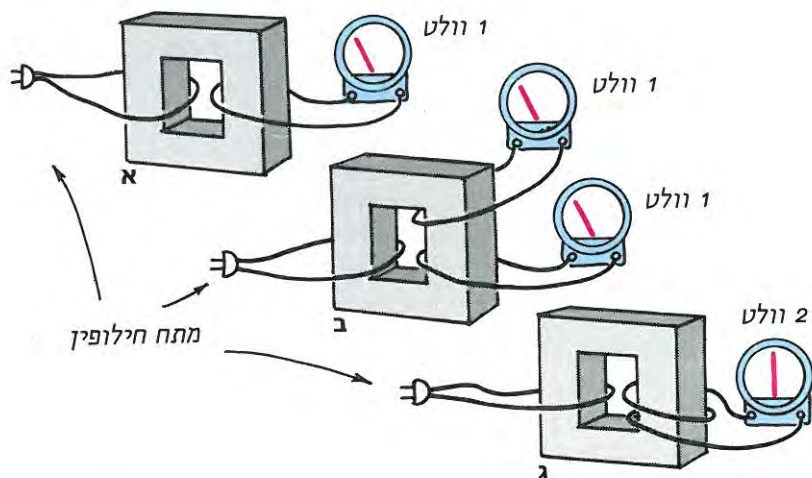
נדגים זאת בעזרת המעריך הניסויי המתואר באיור 24.14. תחילה נדון במקרה הפשוט, שבו כריכה ראשונית אחת מחוברת למקור מתח חילופין של וולט אחד וכריכה משנית יחידה מחוברת לוולטמטר (א). השדה המגנטי של הסליל הראשוני עובר בסליל המשני, ומתח של וולט אחד מושרה בו. אם מלפפים כריכה נוספת סביב הליבה, באופן שלשנאי יש עתה שני ליפופים משניים נפרדים (ב), כריכה זאת מושפעת מאותו שדה מגנטי משתנה ממש. לפיכך יושרה גם בה מתח של וולט אחד. אין כל צורך להפריד בין שני הליפופים המשניים. אפשר לצרפם (ג), ולקבל מתח של וולט אחד + וולט אחד, שהם שני וולטים. מצב זה שקול למצב שבו מתח של שני וולטים מושרה בסליל משני יחיד שמספר הכריכות בו כפול מזה של הסליל הראשוני. אם הסליל המשני מלופף במספר כריכות הגדול פי שלושה ממספר הכריכות שבסליל הראשוני, הרי שהמתח שיושרה עליו יהיה גדול פי שלושה מהמתח שעל הסליל הראשוני. מתח מוגבר מסוגל להדליק נורת ניאון, להפעיל את שפופרת המסך במקלט טלוויזיה, או להעביר חשמל למרחקים ארוכים.

אם מספר הכריכות בסליל המשני קטן ממספרן בראשוני, מתח החילופין שנוצר בסליל המשני נמוך יותר מהמתח שבסליל הראשוני. אומרים על המתח שהוא הורד. בעזרת שנאי מוריד מתח אפשר להפעיל בבטחה רכבת צעצוע או מכשיר רדיו נייד. אם בסליל המשני יש מחצית ממספר הכריכות שיש בסליל



איור 24.13

שנאי מעשי ויעיל יותר. קווי השדה המגנטי המשתנים מונחים לאורך ליבת הברזל.



איור 24.14

(א) המתח בן 1 וולט המושרה בכריכה המשנית שווה לזה של הכריכה הראשונית. (ב) מתח של וולט אחד מושרה גם בכריכה המשנית הנוספת, מפני שגם היא חותכת בדיוק אותו שדה מגנטי משתנה שמקורו בסליל הראשוני. (ג) שני המתחים של וולט אחד, שהושרו בשתי הלולאות המשניות, מושרים עתה על סליל משני יחיד, בעל שתי לולאות.

הראשוני, מושרה בו רק מחצית המתח שהיה בסליל הראשוני. לפיכך, ניתן לספק לסליל הראשוני אנרגיה חשמלית במתח חילופין מסוים, ולקבל מהמשני מתח חילופין גבוה יותר או נמוך יותר, לפי היחס בין מספר הכריכות בסליל הראשוני למספרן במשני.

הקשר בין המתח הראשוני למשני בהתאם למספר הכריכות בשני הסלילים נתון ביחס הבא:

$$\frac{\text{מתח ראשוני}}{\text{מס' לולאות בראשוני}} = \frac{\text{מתח משני}}{\text{מס' לולאות במשני}}$$

לכאורה נדמה שהגברת המתח באמצעות השנאי יוצרת יש מאין, ואין זה כך. כאשר המתח מוגבר, בסליל הראשוני זורם זרם חזק יותר. למעשה, השנאי מעביר אנרגיה מסליל אחד למשנהו. הקצב שבו האנרגיה מועברת נקרא הספק. ההספק שמנוצל בסליל המשני מסופק על ידי הסליל הראשוני. הסליל הראשוני אינו מספק יותר מכפי שהסליל המשני צורך, זאת בהתאם לחוק שימור האנרגיה. אם נזניח את הפסדי האנרגיה הקטנים שנגרמים עקב חימום, הרי שמתקיים:

ההספק המסופק לסליל הראשוני = ההספק המופק מהסליל המשני

הספק חשמלי שווה למכפלת המתח בזרם, לכן ניתן לומר כי:

$$(\text{מתח} \times \text{זרם})_{\text{ראשוני}} = (\text{מתח} \times \text{זרם})_{\text{משני}}$$

הקלות שבה ניתן להגביר או להוריד מתחים בעזרת שנאים היא הסיבה העיקרית לכך שרוב ההספק החשמלי שאנו משתמשים בו הוא מזרם חילופין ולא מזרם ישר.

שאלות

1. אם מפעילים מתח חילופין בן 100 וולט על סליל ראשוני בן 100 כריכות של שנאי, מה יהיה מתח המוצא של השנאי, אם בסליל המשני 200 כריכות?
2. נניח שהתשובה לשאלה הקודמת היא 200 וולט, ושהסליל המשני מחובר לזרקור בעל התנגדות של 50 אוהם, מה יהיה זרם החילופין במעגל המשני?
3. מהו ההספק בסליל המשני?
4. מהו ההספק בסליל הראשוני?
5. מהו זרם החילופין שזורם בסליל הראשוני?
6. המתח הוגבר והזרם הוקטן. חוק אוהם אומר שהגברת המתח מובילה להגברת הזרם. היש סתירה בין חוק אוהם לבין מה שראינו כאן, או שמא חוק אוהם אינו תקף במעגלים הכוללים שנאים?

השראה עצמית

כריכות של סליל נושא זרם מגיבות לא רק למה שקורה בכריכות של סלילים אחרים אלא גם למתרחש בכריכות האחרות באותו סליל. כל כריכה בסליל מגיבה עם השדה המגנטי שיוצר הזרם העובר בכריכות אחרות של אותו סליל. זו תופעת ההשראה העצמית. כתוצאה מההשראה העצמית נוצר מתח. כיוונו של מתח זה מנוגד תמיד לשינוי המתח שיצר אותו, והוא נקרא "כוח אלקטרו-מניע נגדי", או בקיצור "כא"מ נגדי". לא נעסוק כאן בהשראה עצמית ובכא"מ נגדי, אך נציין תופעה שכיחה ומסוכנת הנובעת מהם. לסליל בעל כריכות רבות השראה עצמית גדולה. נניח שסליל כזה משמש כאלקטרומגנט ומופעל באמצעות מקור חלש של מתח ישר, למשל סוללה קטנה. במקרה כזה הזרם בסליל מלווה בשדה מגנטי חזק. אם ננתק את הסוללה בפתיחת המתג, מן הראוי שנתכוון להפתעה. עם פתיחת המתג, הזרם במעגל נופל במהירות לאפס והשדה המגנטי שבסליל עובר שינוי מהיר (איור 24.15). מה קורה כאשר שדה מגנטי משתנה בפתאומיות בסליל, גם אם זהו הסליל שיצר אותו? התשובה היא: מושרה מתח. השדה המגנטי שנחלש במהירות, על האנרגיה הרבה שאצורה בו, עשויים ליצור מתח אדיר - גדול דיו כדי ליצור ניצוץ שיעבור את המתג ויגיע אליכם, אם איתרע מזלכם ופתחתם את המתג! מסיבה זו מחברים

תשובות:

1. מ-100 וולטים|100 כריכות ראשוניות = (?) וולטים|200 כריכות משניות, קל לראות שמתח המוצא בסליל המשני הוא 200 וולט.
2. לפי חוק אוהם, 200 וולט|50 אוהם = 4 אמפר.
3. הספק = 200 וולט $\times$ 4 אמפר = 800 וואט.
4. לפי חוק שימור האנרגיה, ההספק בסליל הראשוני גם הוא 800 וולט, כמו בסליל המשני.
5. 800 וואט = 100 וולט $\times$ (?) אמפר, כך שהזרם בסליל הראשוני הוא 8 אמפר. (שימו לב שהמתח מוגבר מ-100 ל-200 וולט, בעוד הזרם מוקטן מ-8 ל-4 אמפר.)
6. חוק אוהם עדיין תקף, ואין כאן כל סתירה. המתח המושרה במעגל המשני חלקי ההתנגדות של מעגל זה שווה לזרם הזורם בו. הזרם יורד ביחס לזרם הגדול יותר הזורם במעגל הראשוני.

* העובדה שההשראה מנוגדת תמיד בכיוונה לשינוי המחולל אותה נקראת חוק לנץ והיא תוצאה של חוק שימור האנרגיה.



איור 24.15

עם פתיחת המתג, השדה המגנטי שבסליל נעלם. השינוי הפתאומי הזה עלול להשרות מתח עצום.

אלקטרומגנטים למעגלי זרם, ואלה סופגים את עודף המטען ומונעים ירידה פתאומית מדי של הזרם. כך מוקטנת ההשראה העצמית. זאת, אגב, גם הסיבה לכך שאסור לנתק מכשירי חשמל במשיכת התקע מהשקע, אלא יש קודם כל לכבותם באמצעות כפתור המתג. לעיתים הכפתור מחובר למעגל שמאפשר שינוי לא-פתאומי של הזרם.

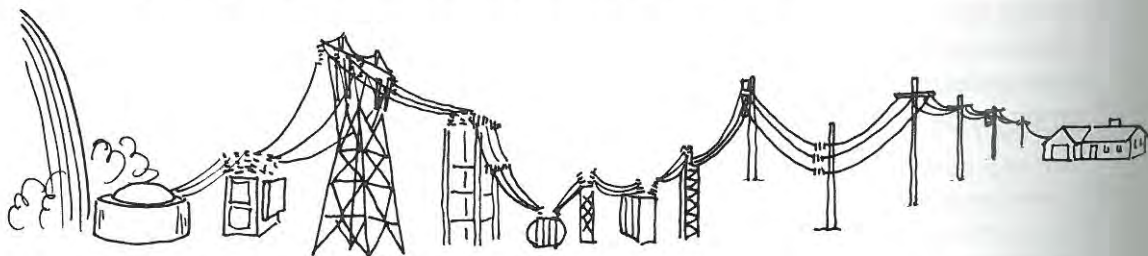
האנרגיה החשמלית הנמכרת כיום משווקת, כמעט כולה, כמתח חילופין, בעיקר בשל הקלות שבה ניתן לשנות מתח כזה באמצעות שנאים*. זרמים חזקים הזורמים בכבלי החשמל מחממים אותם, וכך מתבזבזת אנרגיה. לכן מועבר ההספק למרחקים גדולים במתח גבוה ובזרם נמוך (הספק = מתח $\times$ זרם). ההספק מועבר מתחנות הכוח לערים במתח עליון של כ-160,000 וולט, הוא מורד בשנאים עירוניים למתח גבוה של כ-24,000 וולט, ולבסוף הוא מורד לערך שבו הוא מגיע לבתינו - 220 וולט.

האנרגיה מועברת איפוא ממערכת אחת של תילי הולכה אל מערכת אחרת בהשראה אלקטרומגנטית. צעד קטן בלבד מפריד בין תהליך זה לבין הוויתור על התילים מכל וכל, והעברת האנרגיה ישירות ממשדרי רדיו למקלטי רדיו הרחוקים מהם קילומטרים רבים, ומכאן רק עוד צעד קטן נוסף מוביל להעברת האנרגיה של תנודות אלקטרוניים בשמש ולהפיכתה לאנרגיה של החיים על פני כדור הארץ. להשראה האלקטרומגנטית השפעות מרחיקות לכת ביותר.

הובלת חשמל

איור 24.16

הובלת חשמל.



* כיום ניתן לשנות מתח ישר תוך שימוש בטכנולוגיה של מוליכים למחצה. שימו לב להתפתחויות המתרחשות ללא הרף בטכנולוגיות הקשורות למוליכי-על ולהשפעותיהן של התפתחויות אלה על העברת אנרגיה חשמלית למרחקים.

שדות מושרים

עד כה עסקנו בהשראה אלקטרומגנטית בהקשר של השראת מתחים וזרמים. למעשה, הגדלים היסודיים יותר שבבסיס המתחים והזרמים הם השדות. ההשקפה כיום על השראה אלקטרומגנטית היא ששדות חשמליים ומגנטיים הם המושרים, והם שיוצרים את המתחים והזרמים שבהם דנו. השראה מתרחשת אם קיימים בסביבה תילי חשמל או תווך חומרי כלשהו ואם לאו. חוק פארדיי קובע במקרה הכללי:

שדה חשמלי מושרה בכל מקום שבו שדה מגנטי משתנה עם הזמן. עוצמתו של השדה החשמלי המושרה מתכונתית לקצב השינוי של השדה המגנטי. הכיוון של השדה החשמלי המושרה ניצב לכיוונו של השינוי בשדה המגנטי.

תופעה נוספת, המשלימה את חוק פארדיי, זהה לחוק פארדיי בניסוחה, אלא שתפקידיהם של השדה המגנטי ושל השדה החשמלי מתחלפים. זו אחת מהסימטריות הרבות שקיימות בטבע. את התופעה תיאר הפיסיקאי הבריטי ג'יימס קלרק מקסוול בשנת 1860 לערך, והיא מוכרת בשם **המקבילה של מקסוול לחוק פארדיי**:

שדה מגנטי מושרה בכל מקום שבו שדה חשמלי משתנה עם הזמן. עוצמתו של השדה המגנטי המושרה מתכונתית לקצב השינוי של השדה החשמלי. הכיוון של השדה המגנטי המושרה ניצב לכיוונו של השינוי בשדה החשמלי.

חוקים אלה הם שניים מהחשובים שבחוקי הפיסיקה. הם עומדים ביסוד הבנתנו את טבעו של האור בפרט ואת טבעם של הגלים האלקטרומגנטיים בכלל.

היוונים הקדמונים גילו כי אם משפשפים ענבר (מינרל טבעי דמוי פלסטיק), הוא מושך אליו פיסות פפירוס קטנות. הם מצאו אבנים מוזרות על האי מגנוזה, שמשכו ברזל. קרוב לוודאי שאקלימה הלח של יוון מנע מהם לחקור את התופעות הקשורות לחשמל סטטי, המורגשות בעיקר באקלים יבש. ההתפתחות הבאה בהבנתנו את תופעות החשמל והמגנטיות אירעה לפני 400 שנה בלבד. ככל שהוספנו ללמוד על החשמל והמגנטיות הלך עולמנו והתכווץ. תחילה נוצרה האפשרות להעביר שדרים למרחקים גדולים בעזרת הטלגרף. אחר כך נתאפשר לשוחח עם אדם אחר הנמצא במרחק קילומטרים רבים מאיתנו דרך תילים, ולבסוף יכולנו לא רק לדבר אלא גם לשדר תמונות ממרחק של אלפי קילומטרים, ובלי כל קשר פיסי בין המשדר לקולט.

במבט רחב*

* עפ"י: The Feynman Lectures on Physics, Vol. II, Chap. I, pp. 1-10 and 1-11, by R. P. Feynman, R. B. Leighton & M. Sands. Copyright 1964 by Addison-Wesley, Reading, Mass. באישור המו"ל ריצ'רד פיינמן, חתן פרס נובל לפיסיקה, פרופסור לפיסיקה בטכניון של קליפורניה (Cal Tech), נחשב בעיני מדענים רבים לאחד הפיסיקאים המבריקים ורבי ההשראה של המאה העשרים. ללא ספק הוא היה אחד המרתקים שבהם. פיינמן נפטר ב-1988.

לראשונה נוצרה האפשרות להעביר אנרגיה, החיונית כל כך לתרבות האנושית, למרחק מאות קילומטרים. אנרגיה של נהרות ומפלים הועברה בצינורות, שהזינו "גלגלי מים" ענקיים. גלגלים אלו נקשרו לצרורות של תילי נחושת מפותלים שסבבו סביב גושי ברזל מעוצבים - מפלצות ברזל מסתובבות המכונות מחוללים. מתוכם נשאבה האנרגיה דרך מוטות נחושת בעובי הזרוע, והועברה לסלילי ענק, כרוכים מסביב לליבות של שנאים. כאן מעלים את האנרגיה למתח גבוה, כדי להעבירה ביעילות על פני מרחקים גדולים אל הערים. קווי המתח הגבוה מתפצלים לענפים... ולעוד שנאים... ואחריהם לעוד ענפים והתפצלויות, עד שלבסוף נפוצה האנרגיה של הנהר על פני כל הערים - מסובבת מנועים, מייצרת חום, יוצרת אור, מפעילה מכשירים. התחולל נס ההפקה של אור וחום ממימיו הקרים של הנהר הזורם במרחק מאות קילומטרים מהעיר, נס שהתאפשר הודות לפיסות נחושת וברזל שתוכננו בקפידה ופעלו מפני שרוח האדם הצליחה לחשוף את חוקי האלקטרומגנטיות.

חוקים אלו התגלו בערך בתקופת המהפכה הצרפתית, מלחמת האזרחים האמריקנית ותקופת ההשכלה בעם היהודי. במבט לאחור על תולדות האדם, דומה שמאורעות כמלחמת האזרחים האמריקנית יחווירו כמאורעות מקומיים ושוליים לעומת המאורע המשמעותי יותר של המאה התשע-עשרה - גילוי חוקי האלקטרומגנטיות.

תקציר מונחים

השראה אלקטרומגנטית

השראה של מתח באמצעות שדה מגנטי המשתנה עם הזמן. אם שדה מגנטי בתוך לולאה משתנה באופן כלשהו, מושרה בלולאה מתח:

$$\text{המתח המושרה} = (-) \times \text{מספר הלולאות} \times \frac{\text{השינוי בשדה המגנטי}}{\text{זמן}}$$

זהו ניסוחו של חוק פאראדיי. השראת המתח היא למעשה תוצאה של תופעה בסיסית יותר - השראה של שדה חשמלי, כפי שמוגדר להלן במקרה הכללי יותר.

חוק פאראדיי

שדה חשמלי מושרה בכל מקום שבו שדה מגנטי משתנה עם הזמן. עוצמת השדה החשמלי המושרה מתכונתית לקצב השינוי בעוצמתו של השדה המגנטי. כיוונו של השדה המושרה מאונך לכיוון ההשתנות של השדה המגנטי.

מחולל

התקן לייצור זרם חשמלי באמצעות סיבוב של סליל בתוך שדה מגנטי קבוע.

שנאי

התקן להעברה של הספק חשמלי מסליל אחד למשנהו באמצעות השראה אלקטרומגנטית.

המקבילה של מקסוול לחוק פאראדיי

שדה מגנטי מושרה בכל מקום שבו שדה חשמלי משתנה עם הזמן. עוצמת השדה המגנטי המושרה מתכונתית לקצב השינוי בעוצמתו של השדה החשמלי. כיוונו של השדה המגנטי המושרה מאונך לכיוון ההשתנות של השדה החשמלי.

שאלות חזרה

השראה אלקטרומגנטית

- מה בדיוק גילו מיכאל פאראדיי וג'וזף הנרי?
- כאשר מגנט נתחב במהירות לתוך סליל של תיל חשמל, מושרה בתיל מתח, וכך נוצר בו זרם. האם במצב זה כל לולאה נושאת-זרם בסליל היא למעשה אלקטרומגנט?
- איזו תגובה הדדית מתרחשת בין המגנט שנדחף לתוך הסליל לבין האלקטרומגנט שנוצר מהסליל בשל כך? (דחייה או משיכה?)
- מה בדיוק צריך להשתנות כדי שתיווצר השראה אלקטרומגנטית?

חוק פארדיי

5. מהם שני הגורמים שהזרם הנוצר בהשראה אלקטרומגנטית תלוי בהם?

6. מהן שלוש הדרכים שבהן ניתן להשרות מתח בחוט חשמלי?

מחוללים וזרם חילופין

7. מה היחס בין התדירות שבה מגנט נכנס אל סליל ויוצא ממנו לבין תדירות זרם החילופין המושרה על ידי כך?

8. מהו ההבדל הבסיסי בין מחולל לבין מנוע חשמלי?

9. מהו הדמיון הבסיסי בין מחולל לבין מנוע חשמלי?

10. באיזה שלב במהלך הסיבוב של מחולל פשוט משתנים קווי השדה במהירות הגדולה ביותר? לפיכך, באיזה שלב של הסיבוב מושרה המתח הגדול ביותר?

11. מדוע משתנה כיוונו של המתח המושרה במחולל?

ייצור כוח חשמלי

12. מי גילה את ההשראה האלקטרומגנטית, ומי הפך את הגילוי להמצאה שימושית?

מחוללי טורבו

13. מה בדרך כלל מספק את האנרגיה לטורבינה?

מחוללי מה"ד

14. מהם ההבדלים העקרוניים בין מחוללי מה"ד לבין מחוללים רגילים?

שנאים

15. מה בדיוק משנה השנאי, או ליתר דיוק, מה הוא מעביר?

16. מדוע דרוש לשנאי זרם חילופין?

17. האם שנאי יעיל יכול להגביר אנרגיה? הסבירו.

18. אם סליל ראשוני נתון להפרש מתחים של 10 וולט, כמה מתח מושרה על הסליל המשני, אם יש בו פי חמישה יותר לולאות והוא מחובר למעגל חשמלי?

19. כיצד נקרא הקצב של העברת אנרגיה?

20. מהו היתרון העיקרי של זרם חילופין על פני זרם ישר?

השראה עצמית

21. כאשר שדה מגנטי משתנה בסליל של תיל חשמל, בכל אחת מלולאות הסליל מושרה מתח. האם תתרחש התופעה גם אם המקור לשדה המגנטי המשתנה הוא הסליל עצמו?

הובלת חשמל

22. מדוע הספק חשמלי מועבר למרחקים גדולים במתחים גבוהים?

23. האם לצורך העברה של הספק חשמלי דרושים מוליכים חשמליים לאורך הדרך? נמקו!

שדות מושרים

24. מה מושרה עקב שינוי מהיר של שדה מגנטי?

25. מה מושרה עקב שינוי מהיר של שדה חשמלי?

במבט רחב

26. כיצד ייתכן שחלק מהאנרגיה של נהר צונן הופכת לאור ולחום במרחק של מאות קילומטרים מן הנהר?

תרגילים

1. מדוע מגדילה ליבת ברזל את ההשראה המגנטית בסליל של תיל נחושת?

2. מדוע מלפפים את כריכות החלק הקבוע והחלק הנע של מנוע חשמלי סביב ליבות ברזל?

3. מדוע קשה יותר לסובב את הציר של מחולל כאשר הוא מחובר למעגל ומספק לו חשמל?

4. האם יגיע רוכב אופניים רחוק יותר אם יכבה את הפנס הקשור למחולל הזרם? הסבירו.

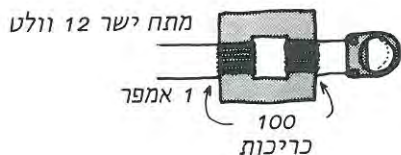
5. אם תסעו במכונית מתכת על גבי לולאה סגורה ורחבה של תיל חשמלי הטמון בתוך הכביש, האם ישתנה השדה המגנטי של כדור הארץ העובר בסליל? האם יגרום הדבר לדופק (פולס) של זרם? התוכלו לחשוב כיצד אפשר ליישם תופעה זו בצמתים?

6. בבדיקות הביטחוניות בשדה התעופה עוברים דרך שדה מגנטי חלש השורר בתוך סליל של חוטי חשמל. מה יקרה אם תחזיקו בכיסכם פיסת ברזל לא ממוגנטת?

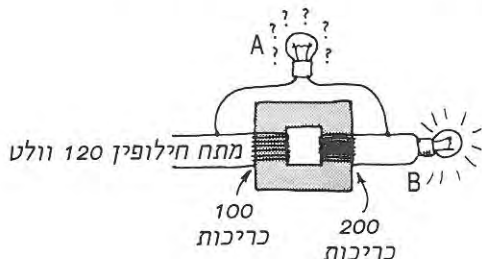
7. גלאי-רעידות-אדמה מסוימים מורכבים מתיבה קטנה ובה מגנט חזק המורכב על קפיצים רגישים. המגנט מוקף בסלילים חשמליים נייחים הצמודים לתיבה. התיבה מחוזקת היטב לקרקע. על סמך שני עקרונות פיסיקליים חשובים, שאחד מהם נלמד בפרק 4 והשני בפרק זה, הסבירו כיצד פועל המתקן.

8. מהו ההבדל העיקרי בין מחולל לבין מנוע חשמלי?

20. במעגל שבאיור, מהו הפרש המתחים בין שני הדקיו של מכשיר המדידה וכמה זרם זורם בו?



21. האם תדלק הנורה A במעגל שבאיור? נמקו!



22. חברכם טוען שלפי חוק אוהם מתח גבוה יוצר זרם חזק. אם כך, שואל החבר, כיצד מועבר החשמל מתחנות הכוח בקווי החשמל במתח גבוה ובזרם נמוך? מה תשיבו לו?

23. כאשר מגנט נופל דרך צינור נחושת, מהירות נפילתו איטית במידה ניכרת מהמהירות שבה היה נופל דרך צינור פלסטיק. מדוע?

24. מדוע אין הרעיון הבא מעשי? - כדי לייצר חשמל ללא דלק, נחבר מנוע למחולל; המחולל ייצר חשמל, שיוגבר באמצעות שנאי, כך שחלק מהחשמל ישמש להנעת מנוע המחולל והיתר ישמש לצרכים אחרים.

25. האם ניתן היה ליצור גלים אלקטרומגנטיים אילו שדה מגנטי משתנה היה יוצר שדה חשמלי, אולם שדה חשמלי משתנה לא היה יוצר שדה מגנטי? הסבירו.

9. כיצד ניתן להשתמש במחולל שבאיור 24.5 כבמנוע?

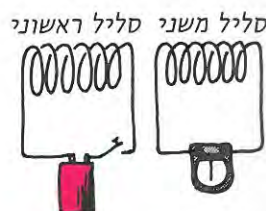
10. האם גדל מתח היציאה של מחולל כאשר הוא מסתובב מהר יותר? הסבירו.

11. האם ניתן להציב סליל נושא זרם בתוך שדה מגנטי באופן שהסליל לא יסתובב? הסבירו.

12. אם תציבו טבעת מתכת במקום ששורר בו שדה מגנטי המשתנה במהירות, הלוך ושוב, היא עשויה להתחמם. מדוע?

13. תיל מתכת מכופף לצורת לולאה סגורה, ומגנט מוחדר לתוכה. המגנט משרה מתח, וכתוצאה מכך גם זרם. תיל מתכת שני, שאורכו כפול, מכופף לשתי לולאות, ומגנט מוחדר גם לתוכו. נוצר מתח כפול, אולם הזרם שווה בדיוק לזה שבלולאה היחידה. מדוע?

14. שני סלילים נפרדים אך דומים מוצבים בסמיכות זה לזה, כמודגם באיור. הסליל האחד מחובר לסוללה, וזרם ישר זורם דרכו. הסליל השני מחובר לגליונומטר. מה מראה הגליונומטר כאשר הזרם בסליל הראשון מתחזק? כאשר הוא נחלש? כשהוא נשאר קבוע?



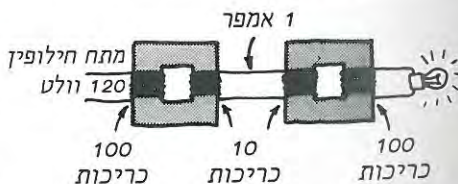
15. מדוע יזרום במתקן שבאיור למעלה זרם חזק יותר אם הסלילים ילופפו סביב ליבת מתכת?

16. המתח בסליל המשני של שנאי הוגבר פי שניים. האם השתנה היחס בין הזרם שזורם בסליל המשני לבין זה שזורם בראשוני? אם כן, כיצד?

17. באיזה מובן ניתן לראות את השנאי כמנוף חשמלי?

18. מדוע לרוב מלווה פעולת השנאי בזמזום?

19. במעגל שבאיור, מהו הפרש המתחים בין שני הדקיי המנורה וכמה זרם זורם בה?



בעיות

1. הסליל הראשוני של שנאי מגביר עובד בהספק של 100 וואט. מהו ההספק בסליל המשני?

2. נתון שנאי אידיאלי, העשוי מ-50 כריכות בסליל הראשוני ומ-250 כריכות בסליל המשני. הסליל הראשוני מחובר לספק שיוצר מתח חילופין בן 12 וולט. חשבו: (א) מהו מתח

של השנאי לבין מספרן בסליל המשני, הדרוש להדלקת שלט הניאון במתח של 120 וולט.

5. סליל ההשראה במכונת (ה"קויל") פועל במידה רבה

כשנאי המשתמש במתח נמוך כדי להפיק מתח גבוה.

הסוללה מספקת מתח ישר של 12 וולט, ולכן קיים התקן

המכבה ומדליק את הסוללה לסירוגין כך שנוצר מתח

הדומה למתח חילופין. חשבו את היחס בין מספר

הליפופים בסליל הראשוני למספרם בסליל המשני בסליל

ההשראה של המכונת, אם דרוש מתח של 24,000 וולט

למצתים.

החילופין על הסליל המשני? (ב) מהו הזרם שעובר דרך נגד של 10 אוהם, המחובר לסליל המשני? (ג) מהו ההספק בסליל הראשוני?

3. להפעלת רכבת צעצוע דרוש מתח חילופין של 6 וולט.

השנאי של הרכבת מחובר למתח חילופין של 120 וולט,

ובשנאי 240 ליפופים בסליל הראשוני. כמה ליפופים בסליל

המשני?

4. להדלקת שלט ניאון דרוש מתח חילופין של כ-12,000

וולט. חשבו את היחס בין מספר הכריכות בסליל הראשוני