

יסודות האלקטרו דינמיקה (המשך)

נמשיך בלימודי האלקטרו דינמיקה, ונכיר שדות מגנטיים שאינם משתנים בזמן. נכיר גם שדות מגנטיים ושדות חשמליים המשתנים בזמן. כזכור, בספרנו הקודם התוודענו לשדות חשמליים שאינם משתנים בזמן.

פרק 1. השדה המגנטי

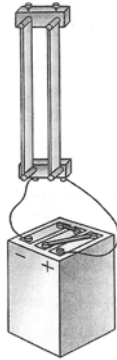
מטענים חשמליים נייחים יוצרים סביבם שדה חשמלי, ואילו מטענים חשמליים נעים יוצרים סביבם שדה מגנטי. נלמד את תכונותיו.

§1 פעולות גומלין בין הזרמים, השדה המגנטי

מטענים נעים מהווים את זרם החשמל; לכן השדה המגנטי, שנוצר על-ידי זרם חשמל, מהווה תווך שבו פועלים זרמים חשמליים הדדית זה על זה.

בין מטעני חשמל נייחים פועלים כוחות, המתוארים על-ידי **חוק קולון**. בהתאם לתורת הפעולה מקרוב יוצר כל אחד מהמטענים שדה חשמלי, הפועל על המטען האחר.

אולם בין המטענים יכולים לפעול גם כוחות מסוג אחר, ואפשר לגלותם באמצעות הניסוי הבא:



שני מוליכים מתיל גמיש תלויים אנכית ומחוברים בקצותיהם התחתונים למקור זרם (ראו ציור 1). התילים נטענים, אך משיכה או דחייה של המוליכים אינן ניכרות;¹ אך אם נחבר את הקצוות העליונים של התילים כך שיעברו בהם זרמים במגמות מנוגדות, יידחו המוליכים זה מזה (ראו ציור 2). אם יזרמו הזרמים באותה מגמה, יימשכו התילים זה לזה (ראו ציור 3).

ציור 1

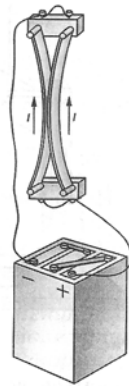
¹ המוליכים נטענים ממקור זרם, אך עבור הפרש הפוטנציאלים של כמה וולטים השורר ביניהם מטעניהם זניחים. משום כך גם כוחות קולון בין המוליכים זניחים ואינם ניכרים.

השדה המגנטי

פעולות הגומלין בין מוליכים, שעובר בהם זרם, מכונות פעולות מגנטיות, והכוחות הפועלים בין מוליכים נושאי זרם מכונים כוחות מגנטיים.



ציור 2



ציור 3

השדה המגנטי

בהתאם לתורת הפעולה מקרוב אין הזרם, העובר באחד המוליכים, יכול לפעול במישרין על הזרם שבמוליך האחר.

בדומה להיווצרות השדה חשמלי במרחב סביב מטעני חשמל נייחים, נוצר במרחב סביב הזרמים שדה, המכונה שדה מגנטי.

זרם החשמל שבאחד המוליכים יוצר סביבו שדה מגנטי, הפועל על הזרם שבמוליך האחר; וכך גם פועל השדה, הנוצר על-ידי הזרם העובר במוליך השני, על המוליך הראשון.

שדה מגנטי מהווה צורה מיוחדת של תורך, שבאמצעותו מתבצעות פעולות גומלין בין חלקיקים טעונים ונעים.

נמנה את התכונות הבסיסיות של השדה המגנטי, כפי שהן מתגלות באופן ניסויי:

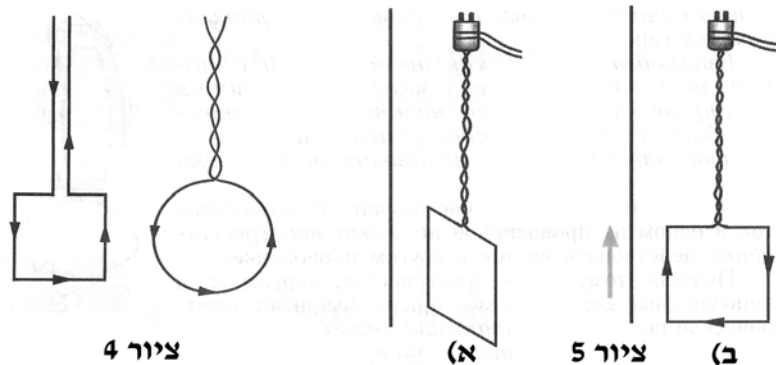
1. שדה מגנטי נוצר על ידי זרם חשמל (מטענים נעים).
2. השדה המגנטי מתגלה בפעולתו על זרם חשמל (על מטענים נעים).

לולאה נושאת זרם בשדה מגנטי

ניתן לחקור את השדה המגנטי באמצעות לולאה קטנה כמסגרת תיל קטנה ושטוחה בעלת צורה כלשהי (ראו ציור 4). יש למקם את החוטים המחוברים את הלולאה עם מקור הזרם קרובים זה לזה או ללפפם יחדיו, ואז יתאפס כוח השדה החשמלי השקול של התילים, ולא ישפיע על מערכת הניסוי.

השדה המגנטי

כדי לראות כיצד פועל השדה על הלולאה, נבצע את הניסוי הבא:
 נתלה מסגרת קטנה העשויה מכמה ליפופים של תיל והיכולה להסתובב בקלות.
 במרחק הגדול בהרבה מן הממד האורכי של המסגרת נקבע תיל אנכי (ראו ציור 5
 א). כאשר מעבירים זרם דרך התיל ודרך המסגרת, מסתובבת המסגרת ומתייצבת,
 כך שהתיל נמצא במישור המסגרת (ראו ציור 5 ב). אם נשנה את מגמת הזרם
 בתיל או בלולאה, תסתובב המסגרת ב- 180° .

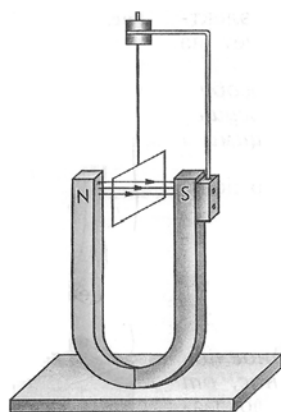


ציור 4

א

ציור 5

ב



ציור 6

ידוע לנו ששדה מגנטי נוצר לא רק על-ידי זרם
 חשמל, אלא גם על-ידי מגנטים קבועים. אם נתלה
 את הלולאה נושאת הזרם בין קטביו של מגנט,
 היא תסתובב עד שמישור הלולאה יתייצב במאונך
 לקו המחבר את קוטבי המגנט (ראו ציור 6).

אם כן, השדה המגנטי משפיע על כיוון
 המישור של לולאה הנושאת זרם.¹

¹ כפי שמראה הניסוי, מתבצעת בשדה אחיד על הלולאה פעולת כיוון בלבד. בשדה שאינו
 אחיד תנוע הלולאה ותימשך אל התיל נושא הזרם, או תידחה ממנו.

השדה המגנטי

מטענים נעים (זרם חשמל) יוצרים שדה מגנטי.
השדה המגנטי מתגלה בפעולתו על זרם חשמל.

?

1. אילו פעולות גומלין מכונות מגנטיות? מנו את התכונות העיקריות של השדה המגנטי.

§2 וקטור השדה המגנטי, קווי שדה

השדה החשמלי מתאפיין בעוצמתו, שהיא גודל וקטורי. נחוץ להגדיר גודל, המאפיין באופן כמותי את השדה המגנטי. הגדרה זו אינה פשוטה, מכיוון שפעולות מגנטיות מורכבות יותר מפעולות חשמליות. מאפיין השדה המגנטי מכונה **וקטור השדה המגנטי** ומסומן באות \vec{B} . נחקור את כיוונו של הוקטור \vec{B} .

המחט המגנטי

למדנו מהניסוי שלולאה קטנה נושאת זרם, התלויה על חוטים דקים (שאינם מפעילים כוחות פיתול אלסטיים על הלולאה בעת סיבובה) והנמצאת בשדה מגנטי, מסתובבת עד שהיא מתייצבת במצב מסוים. כך גם סובבת המחט המגנטית במצפן, שהוא מגנט קטן ומוארך בעל שני קטבים: דרומי S וצפוני N.

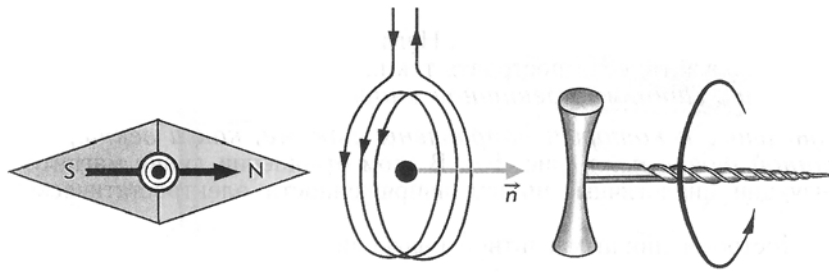
כיוון וקטור השדה המגנטי

הודות להשפעת השדה המגנטי על סיבוב המחט המגנטית או על סיבובה של לולאה נושאת זרם בשדה המגנטי, ניתן לגלות את קו הכיוון של וקטור השדה המגנטי ואת מגמתו על קו כיוונו.

את מגמת וקטור השדה מגדירים מהקוטב הדרומי S לצפוני N של המחט המגנטית, המתייצבת באופן חופשי בשדה. כיוון השדה המגנטי, הנוצר בקרבת לולאה נושאת זרם, אנכי למישור הלולאה נושאת הזרם (ראו ציור 7).

מגמתו החיובית של וקטור אנכי זה הוא מגמת התקדמות בורג בעל הברגה ימנית, כאשר מסובבים אותו במגמת הזרם העובר במסגרת (ראו ציור 7).

השדה המגנטי

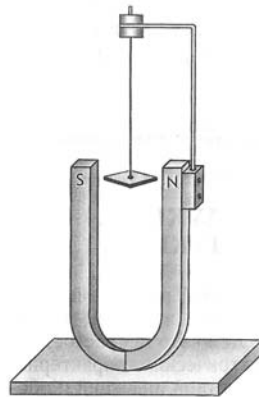


ציור 7

באמצעות לולאה נושאת זרם או באמצעות מחט מגנטית ניתן לגלות את כיוון וקטור השדה המגנטי ואת מגמתו בכל נקודה בשדה.

ציורים 8 ו-9 מתארים ניסויים באמצעות מחט מגנטית, הדומים לניסויים באמצעות לולאה נושאת זרם (ראו ציורים 5-6).

בשדה מגנטי של תיל ישר נושא זרם מתייצבת המחט המגנטית בכל נקודת שדה בכיוון המשיק למעגל (ראו ציור 9). מישור המעגל מאונך לתיל, העובר דרך מרכז המעגל. את מגמת וקטור השדה המגנטי מגלים בעזרת כלל הבורג: אם הבורג מתקדם במגמת הזרם במוליך, מראה מגמת הסיבוב של ידית הבורג את מגמת וקטור השדה המגנטי.



ציור 8



ציור 9

ציור 10

כל מי שמשותף בניווט לילי בסיוע מצפן מבצע ניסוי לגילוי הכיוון והמגמה של וקטור השדה המגנטי של כדור הארץ.

השדה המגנטי

קווי שדה מגנטי

כדי לקבל תמונה, הממחישה את השדה המגנטי, נשרטט מפה של קווי שדה מגנטי. קו שדה מגנטי הוא עקום, שבכל נקודותיו משיק לו הווקטור \vec{B} (ראו ציור 10). מבחינה זו דומים קווי השדה המגנטי לקווי השדה האלקטרוסטטי.

נשרטט את קווי השדה המגנטי של תיל ישר נושא זרם. מהניסויים המתוארים לעיל נובע, שקווי השדה המגנטי הם מעגלים בעלי מרכז משותף, הנמצאים במישור המאונך לתיל (ראו ציור 11), ומרכז המעגלים נמצא על ציר המוליך. החצים שעל הקווים מורים את מגמתו של וקטור השדה המגנטי, המשיק לקו השדה.

נתאר את מפת קווי השדה המגנטי של סילונית ישרה נושאת זרם. את מפת קווי השדה המגנטי, ששורטטה בסיוע מחט מגנטית או לולאות קטנות נושאות זרם, ניתן לראות בציור 12 (בחתך של הסילונית). אם אורך הסילונית גדול בהרבה מקוטרה, יהיה השדה המגנטי שבתוכה אחיד, וקווי השדה שבתוכה יהיו מקבילים זה לזה.

את מפת קווי השדה ניתן להמחיש באמצעות שבבי ברזל זעירים, כי כל שבב ברזל בשדה מגנטי מתנהג כמחט מגנטית קטנה. מספר רב של מחטים כאלה מאפשר לגלות את הכיוון (אך לא את המגמה) של השדה בנקודות רבות במישור, ולהבחין טוב יותר במהלך קווי השדה. כמה מפות של שדות מגנטיים נראות בציורים 13–16.

שדה מערבולת

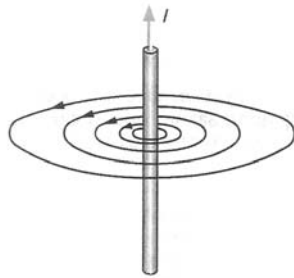
לקווי שדה מגנטי תכונה חשובה: אין להם לא התחלה ולא סוף; קווי השדה הם קווים סגורים.

בשדה האלקטרוסטטי מוצאם של קווי השדה במטען החיובי, וסיומם במטען השלילי.

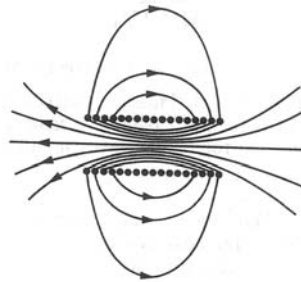
שדות בעלי קווי שדה סגורים מכונים **שדות מערבולת**. השדה המגנטי הוא שדה מערבולת.

קווי השדה המגנטי הסגורים מהווים תכונה בסיסית של השדה המגנטי. תכונה זו היא תולדה של העובדה, שלשדה מגנטי אין מקורות: לא קיימים בטבע מטענים מגנטיים הדומים למטענים חשמליים.

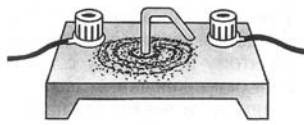
השדה המגנטי



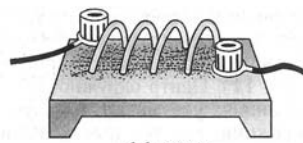
ציור 11



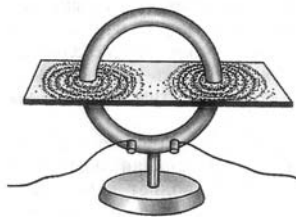
ציור 12



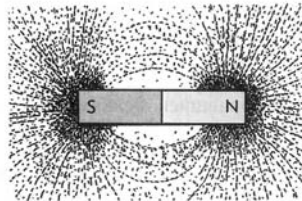
ציור 13



ציור 14



ציור 15



ציור 16

בסעיף זה למדנו כיצד לקשור לכל נקודה בשדה המגנטי כיוון ומגמה, שהם למעשה אלה של וקטור השדה המגנטי. בכיוון ובמגמה אלה מתייצבת מחט מגנטית או האנך למישור של לולאה קטנה נושאת זרם. למדנו שלשדה המגנטי אין מקורות; לא קיימים מטענים מגנטיים.

?

1. כיצד נעות לולאה סגורה נושאת זרם ומחט מגנטית בשדה מגנטי אחיד?
2. מנו שיטות לגילוי כיוונו ומגמתו של וקטור השדה המגנטי.
3. מהם קווי שדה מגנטי?
4. אילו שדות מכונים שדות מערבולת?

השדה המגנטי

§3 ערכו של וקטור השדה המגנטי, כוח אמפר

עד כה למדנו למצוא את כיוונו ומגמתו של וקטור השדה המגנטי; אך יש לדעת כיצד לחשב את הגודל B של השדה כדי לנסח חוק, המגדיר את הכוח הפועל על מוליך נושא זרם בשדה מגנטי.

שדה מגנטי פועל על כל חלקיו של מוליך נושא זרם. ידיעת הכוח, הפועל על כל קטע קטן של המוליך, מאפשרת לחשב את הכוח הפועל על כל המוליך. החוק, המגדיר את הכוח הפועל על קטע קטן של המוליך (על זרם אלמנטרי או על רכיב שזרם זורם בו), נתגלה בשנת 1820 על-ידי **אנדרה-מרי אמפר**¹. מכיוון שלא ניתן ליצור זרם אלמנטרי מבודד, ביצע **אמפר** ניסויים עם מוליכים סגורים. בשינוי צורתם ומקומם של המוליכים הסגורים הצליח לגלות את הביטוי לכוח, הפועל על רכיב זרם בודד.

אנדרה-מרי אמפר (1775–1836)

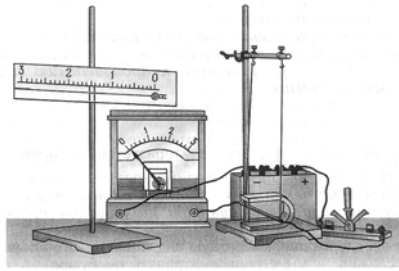


פיזיקאי ומתמטיקאי צרפתי, מאבות האלקטרודינמיקה. **אמפר** הציג לראשונה את המושג **זרם חשמל**, ופיתח את תורת המגנטיות, המבוססת על הנחת הזרמים המולקולריים. הוא גילה את הפעולות המכניות שבין זרמים חשמליים, וקבע את החוקים הכמותיים העוסקים בגודל הכוחות שביניהם. **מקסוול** כינה את אמפר "ניוטון של החשמל". **אמפר** שלח ידו גם למחקרים בתחומי המכניקה, תורת ההסתברות והאנליזה המתמטית.

¹ ליתר דיוק: **אמפר** ניסח חוק עבור כוח, הפועל בין שני קטעים קטנים של מוליכים נושאי זרם. הוא תמך בתורת הפעולה מרחוק, ולא השתמש במושג השדה; אך בהתאם למסורת וכאות הוקרה למדען הדגול מכונה הביטוי לכוח המגנטי, הפועל על מוליך נושא זרם בשדה מגנטי, **חוק אמפר**.

גודל וקטור השדה המגנטי

נבדוק באופן ניסויי במה תלוי הכוח, הפועל על מוליך נושא זרם בשדה מגנטי. כד נוכל להגדיר את ערכו של וקטור השדה המגנטי, ולאחר מכן למצוא את **כוח אמפר**. את הפעולה של השדה המגנטי על מוליך נושא זרם נלמד באמצעות המערכת המתוארת בציור 17.



ציור 17

המוליך תלוי חופשי ואופקית בין קוטבי מגנט קבוע, שצורתו כצורת פרסה. השדה המגנטי מתרכז וכלוא בין הקטבים, ולכן הכוח המגנטי פועל למעשה רק על קטע Δl של המוליך הנמצא בין הקטבים. הכוח נמדד בעזרת דינמומטר רגיש, הקשור למוליך באמצעות שני מוטות (אינם נראים בציור).

עוד נלמד שהכוח, שמפעיל השדה המגנטי על המוליך נושא הזרם, מכיוון אופקית ובניצב למוליך ולקווי השדה המגנטי.

כאשר נגדיל את עוצמת הזרם פי 2, ניווכח שהכוח הפועל על המוליך גדל גם הוא פי 2. אם נוסיף לצד המגנט הקיים מגנט זהה, נגדיל פי 2 את גודל האזור שבו קיים השדה המגנטי, וכך נאריך פי 2 את קטע המוליך, שעליו פועל השדה – ניווכח שוב שהכוח יגדל פי 2. כוח זה **כוח אמפר** הוא, ותלוי גם בזווית שבין הווקטור \vec{B} לבין כיוון המוליך. אפשר להוכיח זאת על-ידי שינוי שיפוע התומך, שבו מותקנים המגנטים, וכך תשתנה הזווית בין המוליך לבין קווי השדה. **כוח אמפר יגיע לערכו המרבי \vec{F}_m , כאשר כיוון השדה המגנטי יהיה ניצב לכיוון המוליך.**

אם כן, הכוח המרבי, הפועל על קטע של מוליך נושא זרם באורך Δl , נמצא ביחס ישר למכפלת עוצמת הזרם I באורך הקטע Δl : $F_m \sim I \Delta l$.

מעובדה ניסויית זו נגלה את גודלו של וקטור השדה המגנטי.

מאחר ש- $F_m \sim I \Delta l$, היחס $\frac{F_m}{I \Delta l}$ אינו תלוי בעוצמת הזרם, גם לא באורך הקטע של המוליך.

השדה המגנטי

כך ניתן להשתמש ביחס זה כמאפיין של השדה המגנטי במקום שבו נמצא הקטע המוליך.¹

גודל וקטור השדה המגנטי הוא היחס שבין הכוח המרבי שפועל מצדו של השדה המגנטי על קטע מוליך הנושא זרם, ללבין מכפלת עוצמת הזרם לאורך הקטע:

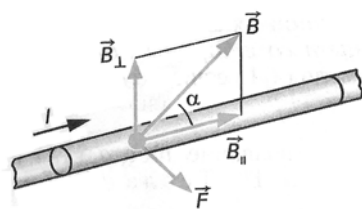
$$(1.1) \quad B = \frac{F_m}{I\Delta l}$$

שדה מגנטי מתאפיין במלואו על-ידי וקטור השדה המגנטי \vec{B} . בכל נקודה בשדה ניתן לגלות את כיוונו של וקטור השדה המגנטי, את מגמתו ואת שיעור גודלו, אם מודדים את הכוח הפועל על קטע של מוליך נושא זרם. החוק, המגדיר את השדה המגנטי של זרם אלמנטרי, הוא מורכב, ולפיכך לא נלמד אותו כעת.

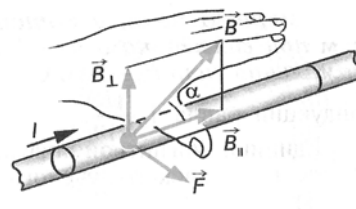
שיעור גודלו של כוח אמפר

נניח שווקטור השדה המגנטי \vec{B} יוצר זווית α עם כיוון קטע מוליך נושא זרם (ראו ציור 18). כיוון קטע הזרם הוא הכיוון, שבו זורם הזרם במוליך. הניסיון מלמד ששדה מגנטי, שווקטור השדה מכווון בו לאורך המוליך נושא הזרם, אינו משפיע על הזרם. לכן גודלו של הכוח תלוי בגודל הרכיב של וקטור \vec{B} הניצב למוליך, כלומר, בערך $B_{\perp} = B \sin \alpha$, ואינו תלוי ברכיב B_{\parallel} , המכוון לאורך המוליך. בהתאם ל-(1.1) שווה כוח אמפר המרבי:

$$F_m = I\Delta l B$$



ציור 18



ציור 19

¹ בדומה למסקנה זו, היחס שבין הכוח, הפועל על המטען מצדו של שדה חשמלי, לבין גודלו של המטען אינו תלוי בגודל המטען, ולכן מאפיין הוא את השדה החשמלי בנקודת המרחב הנתונה.

השדה המגנטי

זאת – עבור הזווית $\alpha = \frac{\pi}{2}$. עבור זווית α כללית הכוח אינו פרופורציונלי ל- \vec{B} , אלא לרכיב $B_{\perp} = B \sin \alpha$. לכן הביטוי לגודל הכוח F , הפועל על קטע קטן של מוליך Δl בשדה מגנטי \vec{B} , היוצר זווית α עם קטע המוליך שבו זורם זרם I , הוא:

$$(1.2) \quad F = B |I| \Delta l \sin \alpha$$

ביטוי זה מכונה **חוק אמפר**.

כוח אמפר שווה למכפלת וקטור השדה המגנטי בעוצמת הזרם, באורך קטע הזרם ובסינוס הזווית שבין כיוון השדה המגנטי לבין כיוון קטע המוליך.

מגמתו של כוח אמפר

בניסוי המתואר לעיל היה וקטור \vec{F} ניצב לקטע הזרם ולווקטור \vec{B} . כיוונו מוגדר לפי הכלל המכונה "כלל יד שמאל": אם נמקם את כף יד שמאל כך, שהרכיב הניצב של השדה המגנטי מכווון לכף היד, וארבע האצבעות מכוונות בכיוון הזרם, תצביע הבוהן, המתוחה הצידה ב- 90° , בכיוון הכוח הפועל על הקטע (ראו ציור 19).

יחידת השדה המגנטי

הגדרנו גודל חדש: עוצמת השדה המגנטי. עתה יש להגדיר עבורו את היחידה. יחידת עוצמת השדה המגנטי נקבעה כשיעורה של עוצמת שדה מגנטי הפועלת על קטע מוליך שאורכו 1 מטר, ושעוצמת הזרם העובר דרכו היא 1 אמפר, בכוח מרבי ששיעורו 1 ניוטון. בהתאם לנוסחה (1.1) יחידת עוצמת השדה המגנטי היא:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{A}\cdot\text{m}}$$

יחידה פיזיקלית זו מכונה **טסלה (T)** על שמו של המדען היוגוסלבי **ניקולא**

טסלה (1856–1943).

בהתבסס על מדידת הכוח, הפועל בשדה מגנטי על קטע של מוליך נושא זרם, הגדרנו את שיעור גודלו של וקטור השדה המגנטי. לאחר מכן ניסחנו את חוק אמפר עבור הכוח הפועל על קטע מוליך נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי.

השדה המגנטי

?

1. כיצד נגדיר את שיעור גודלו של וקטור השדה המגנטי?
2. מהו ערכו של גודל הווקטור של כוח אמפר?
3. נסחו את הכלל לגילוי הכיוון והמגמה של כוח אמפר.
4. באילו יחידות פיזיקליות מבוטאת עוצמת השדה המגנטי?

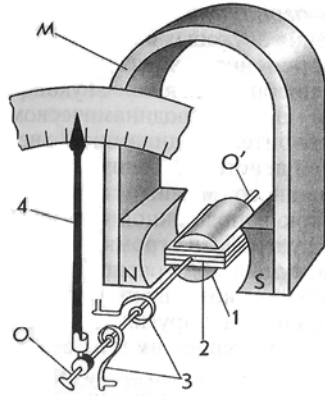
§4 מכשירי מדידה חשמליים

השימוש במכשירי מדידה מגנטו-אלקטריים – אמפרמטרים ו-וולטמטרים – מתבסס על ההשפעה של השדה המגנטי על סליל סגור הנושא זרם (סעיף 2).

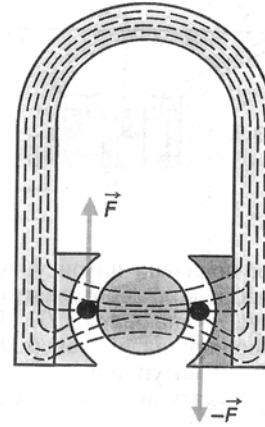
מכשיר מדידה אלקטרו-מגנטי בנוי כך (ראו ציור 20): על מסגרת מלבנית קלה, העשויה מאלומיניום (2), מורכב מחוג (4), וסליל כרוך סביבה. המסגרת מוחזקת בשני חלקי צירים 'OO'. במצב של שיווי-משקל מחזיקים אותה שני קפיצים ספירליים דקים (3).

המומנטים האלסטיים, הפועלים מצדם של הקפיצים, מייצבים את המסגרת במצב שיווי-משקל, ושיעור המומנט שהם מפעילים על המסגרת פרופורציונלי לזווית הסיבוב של המחוג ממצב שיווי-משקלו. הסליל נמצא בין קוטבי מגנט קבוע, שצורתו מיוחדת כנראה בציור. בתוך המסגרת והסליל נמצאת ליבה גלילית (1) מברזל רך. מבנה כזה מבטיח כיוון רדיאלי של קווי השדה המגנטי באזור שבו נמצא הסליל (ראו ציור 21).

כתוצאה מכך אף בסטיית המחוג יהיו הכוחות, הפועלים על הסליל מצדו של השדה המגנטי, מרביים, וגודלם יהיה קבוע עבור זרם שאינו משתנה. הווקטורים \vec{F} ו- $-\vec{F}$ הם כוחות אלה; מקורם בשדה המגנטי, והם מפעילים מומנט כדי לשוב את הסליל. הסליל מסתובב עד שהכוחות האלסטיים, שמקורם בקפיצים, מפעילים מומנט, המאזן את המומנט שמפעילים הכוחות שמקורם בשדה המגנטי. אם נגדיל את עוצמת הזרם פי 2, ניווכח שהמחוג יסתובב לזווית הגדולה פי 2, משום שהכוחות הפועלים על הסליל מצדו של השדה המגנטי פרופורציונליים לעוצמת הזרם: $F_m \sim I$.



ציור 20



ציור 21

הודות לעובדה זו ניתן למדוד את עוצמת הזרם על-פי זווית הסיבוב של הסליל, אך קודם לכן יש לכייל את המכשיר: יש לקבוע אילו זוויות סיבוב של המחוג מתאימות לערכי זרם ידועים.

מכשיר דומה עשוי למדוד מתח, אך יש לכיילו כך שזווית סיבוב המחוג תתאים לערכי המתח הידועים. עם זאת יש לזכור, שהתנגדות הוולטמטר גדולה בהרבה מהתנגדות האמפרמטר.

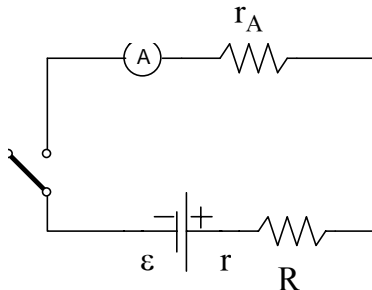
מומלץ מאוד להתבונן בקרביים של המכשיר ולזהות את רכיביו המתוארים כאן.

?

1. אילו הם המומנטים, המתאזנים בתום סטיית המחוג של מכשיר מדידה אלקטרומגנטי?
2. מדוע הכוחות המגנטיים, הפועלים על תילי הסליל של המכשיר, אינם תלויים בזווית הסטייה של הסליל?
3. במה שונה הוולטמטר מהאמפרמטר?

מכשירי מדידה

§ 4 מכשירי מדידה, הרחבת תחום המדידה



כדי למדוד זרם במקטע של מעגל, מחברים למקטע זה מכשיר למדידת זרם בטור: אמפרמטר. עוצמת הזרם במעגל פשוט, הכולל מקור זרם בעל כא"מ ε ונגד חיצוני R , שווה ל:

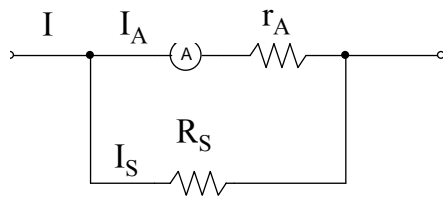
$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}$$

כאשר: r – ההתנגדות הפנימית של המקור. אבל כאשר מחברים את האמפרמטר, עוצמת הזרם העובר במעגל משתנה:

$$I_A = \frac{\varepsilon}{R + r + r_A}$$

מהשוואת שני הביטויים לעוצמת הזרם במעגל הטורי ברור ששיאת המדידה תהיה קטנה ביותר, כאשר ההתנגדות הפנימית של האמפרמטר תהיה קטנה מאוד בהשוואה להתנגדות החיצונית של המעגל.

ניח שבעזרת אמפרמטר נתון, בעל התנגדות פנימית r_A , אפשר למדוד זרם מרבי I_A (עוצמת זרם גדולה יותר תשרוף את סליל האמפרמטר). האם אפשר לעשות שימוש באמפרמטר זה כדי למדוד זרמים גדולים יותר? מסתבר שאפשר – אם נחבר למכשיר נגד נוסף R_S , במקביל, המכונה שאנט (מהמילה האנגלית shunt – פיצול).



נמצא מה צריכה להיות התנגדותו של הנגד הנוסף R_S , כדי שהזרם הנמדד יוכל להיות גדול מהזרם המקסימלי I_A . לפי חוקי קירכהוף נקבל:

$$I = I_A + I_S$$

$$I_A r_A = I_S R_S$$

מכאן נחלץ את הזרם הנמדד I :

$$I = I_A \frac{R_S + r_A}{R_S} = I_A \left(1 + \frac{r_A}{R_S} \right)$$

מכשירי מדידה

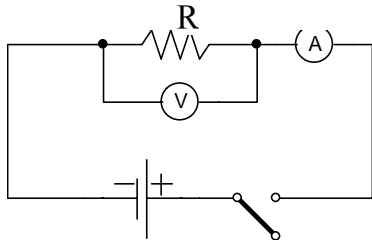
כלומר: ניתן למדוד זרם, שעוצמתו גדולה מהזרם המרבי היכול לעבור דרך האמפרמטר. הוא מוגדר בתלות ההתנגדות הפנימית של האמפרמטר ובתלות התנגדות הנגד הנוסף (השאנט), שאותה ניתן לחשב על-פי הנוסחה:

$$R_S = r_A \cdot \frac{I_A}{I - I_A}$$

כך, לדוגמה, אם באמצעות אמפרמטר, המיועד למדידת זרמים עד 10 A, יש צורך למדוד זרם עד 100 A, יש להשתמש בנגד בעל ההתנגדות של:

$$R_S = r_A \cdot \frac{10}{100 - 10} = \frac{1}{9} r_A$$

מאחר שההתנגדות הפנימית של האמפרמטר צריכה להיות קטנה, ברור הקושי בשימוש בנגדים נוספים: התנגדותם צריכה להיות קטנה עוד יותר מההתנגדות הפנימית של האמפרמטר עצמו – ועם זאת יש לחשב את ערכה במדויק.

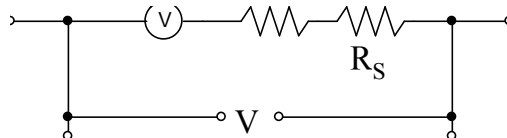


כדי למדוד מתח משתמשים בוולטמטר, המחובר במקביל למקטע המעגל, שבין קצותיו יש למדוד את הפרש הפוטנציאלים.

ההתנגדות הפנימית של הוולטמטר צריכה להיות גבוהה, כדי שהזרם שיעבור דרכו יהיה

קטן בהשוואה לזרם שעובר דרך הנגד R, שבין קצותיו יש למדוד את הפרש הפוטנציאלים: $R \ll r_V$.

בדומה לשימוש בשאנט באמפרמטר אפשר להרחיב את תחום המדידה של הוולטמטר באמצעות הוספת נגד נוסף **בטור**. נניח שבאמצעות וולטמטר בעל התנגדות פנימית r_V , המיועד למדידת מתח מרבי V_0 – השווה למכפלת הזרם המרבי I_0 בהתנגדות הפנימית r_V : $V_0 = I_0 \cdot r_V$ – יש למדוד מתח גבוה יותר. מחברים לוולטמטר נגד נוסף **בטור** בעל התנגדות R_S :



מכשירי מדידה

אם צריך למדוד מתח $V_0 < V$, יש אפוא להשתמש בנגד הנוסף, ואת התנגדותו

$$V = (r_v + R) \cdot I_0$$

מחלצים את R :

$$R = \frac{V}{I_0} - r_v = \frac{V}{V_0} r_v - r_v = r_v \cdot \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right)$$

בצורה זו אפשר להרחיב באופן משמעותי את תחום המדידה, המוגבל על-ידי גודל הזרם המרבי דרך המכשיר.

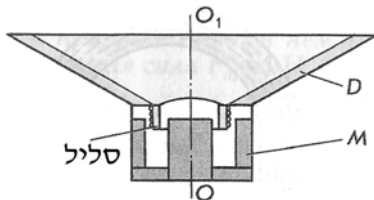
§5 שימוש בחוק אמפר, רמקול

אם ידועים הכיוון והגודל של הכוח, הפועל על כל קטע של מוליך נושא זרם בשדה מגנטי, ניתן לחשב את הכוח, הפועל על המוליך הסגור כולו במציאת שקול הכוחות, הפועלים על כל אורכו של הקטע המוליך.

נעזרים בחוק אמפר לחישוב הכוחות, הפועלים על מוליכים נושאי זרם בשדה מגנטי. מוליכים כאלה נמצאים במכשירים אלקטרוניים רבים, ובפרט במנועי חשמל. עתה נבחן כיצד בנוי ופועל רמקול.

רמקול משמש ליצירת גלי קול בהשפעת זרם חשמלי משתנה (זרם חלופין) בתדר של גלי הקול. בבניית רמקול אלקטרודינמי מיושמת השפעת השדה המגנטי של מגנט קבוע על זרם משתנה בסליל נייד.

המבנה הסכמטי של הרמקול מתואר בציור 22. הסליל הקולי (1) נמצא במרווח בתוך מגנט טבעתי M . לסליל קשור חרוט קטום העשוי מנייר עבה – הדיאפרגמה D . הדיאפרגמה מותקנת על תומכים אלסטיים, המאפשרים לה לרטוט עם הסליל הנייד.



ציור 22

דרך הסליל עובר זרם, המשתנה בתדר גלי הקול. מקורו של זרם זה ממיקרופון או ממקלט הרדיו או מכל מכשיר אחר, הממיר גלים, שמקורם בגלי קול, לזרמים חשמליים.

בהשפעת כוח אמפר רוטט הסליל לאורך

רמקול

ציר הרמקול OO_1 (ראו ציור 22) בהתאם לרטט תנודות הזרם. התנודות מועברות לדיאפראגמה, והמשטח הקוני שלה יוצר גלי קול.

רמקולים איכותיים משחזרים ללא עיוותים משמעותיים גלי קול בתחום התדרים בין 40 ל-15,000 הרץ; אך מכיוון שמערכות כאלה מורכבות מאוד, נהוג להשתמש במערכות המורכבות מכמה רמקולים, שכל אחד מהם יוצר קול בתחום תדרים משלו.

החיסרון הכללי של כל הרמקולים הוא נצילותם הנמוכה: הם פולטים בין 1% ל-3% מכלל האנרגיה הנכנסת לרמקול.

הקול, הבוקע ממקלט הרדיו ומכל מכשיר המשמיע קול, נוצר בשל הרטט של סליל נושא זרם, הנמצא בשדה של מגנט קבוע.

?

1. ציינו את כיווני וקטור השדה המגנטי, הזרם החשמלי וכוח אמפר בסכמה של רמקול.

§6 פעולת השדה המגנטי על מטען נע, כוח לורנץ

זרם החשמל הוא אוסף של חלקיקים טעונים, הנעים באופן מסודר. השפעת השדה המגנטי על מוליך נושא זרם היא תולדה של פעולת השדה המגנטי על חלקיקים טעונים, הנעים בתוך המוליך. נמצא את הכוח הפועל על חלקיק טעון אחד.

הכוח, הפועל על חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי, מכונה **כוח לורנץ** – לכבודו של הפיזיקאי ההולנדי **הנדריק לורנץ** (1853–1928), אבי התורה האלקטרונית של מבנה החומר. את הכוח הזה ניתן למצוא באמצעות חוק אמפר.

גודלו של **כוח לורנץ** שווה ליחס בין הכוח, הפועל על קטע מוליך שאורכו Δl , לבין מספר החלקיקים הטעונים N , הנעים באופן מסודר בקטע זה של המוליך:

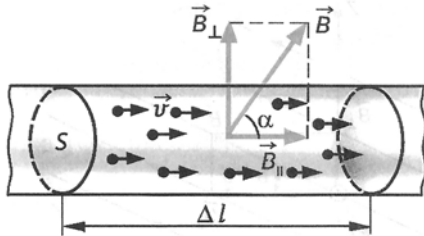
$$F_L = \frac{F}{N}$$

נתבונן בקטע של מוליך דק, ישר ונושא זרם (ראו ציור 23).

יהיו אורך הקטע Δl ושטח חתך המוליך S קטנים מאוד, כך שווקטור השדה



המגנטי \vec{B} אינו משתנה בין גבולות קטע זה. עוצמת הזרם I במוליך תלויה במטען



ציור 23

החלקיקים q, בריכוז החלקיקים הטעונים (מספר המטענים ביחידת נפח) ובמהירות תנועתם המסודרת v, והיא מוגדרת על-ידי הנוסחה הבאה:

$$(1.4) \quad I = qnvS$$

גודל הכוח, הפועל על קטע הזרם הנבחר בשדה המגנטי, הוא:

$$F = |I| \Delta l B \sin \alpha$$

נציב כאן את הביטוי (1.4) לעוצמת הזרם:

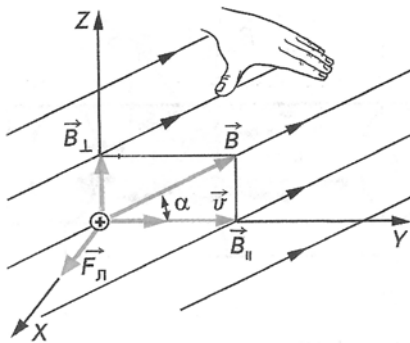
$$F = |q| nvS \Delta l B \sin \alpha = v|q|NB \sin \alpha$$

כאשר: $N = nS \Delta l$ – מספר החלקיקים הטעונים בנפח הנתון.

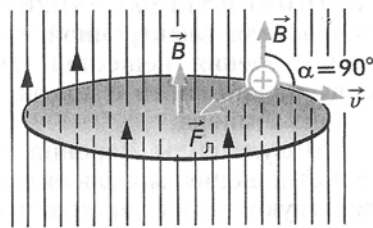
לכן על כל מטען, הנע בשדה מגנטי, פועל כוח לורנץ השווה:

$$(1.5) \quad F_L = \frac{F}{N} = |q| v B \sin \alpha$$

כאשר: α – הזווית בין וקטור מהירות המטענים לבין וקטור השדה. כוח לורנץ ניצב לווקטורים \vec{B} ו- \vec{v} , וכיוונו ומגמתו מוגדרים על-ידי "כלל יד שמאל" – הכלל הקובע את כיוונו של כוח אמפר: אם כף יד שמאל מוחזקת כך שרכיב וקטור השדה \vec{B} , הניצב למהירות המטען, מכווון אל תוך כף היד, וארבע האצבעות מצביעות למגמת התנועה של מטען חיובי (כנגד מגמת התנועה של מטען שלילי), תראה הבוהן המתוחה הצידה ב- 90° את כיוון כוח לורנץ \vec{F}_L הפועל על המטען (ראו ציור 24).



ציור 24



ציור 25

כוח לורנץ

אם גם שדה חשמלי פועל על המטען q בכוח $\vec{F}_E = q\vec{E}$, הרי בנוכחות שני שדות – שדה חשמלי ושדה מגנטי – הכוח השקול, הפועל על המטען, שווה:

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_L$$

מכיוון שכוח לורנץ מכוון בניצב למהירות החלקיק, אין הוא מבצע עבודה. על-פי משפט האנרגיה הקינטית (ראו ספר פיזיקה 10), אין כוח לורנץ משפיע על מידת האנרגיה הקינטית האצורה בחלקיק, ולכן גם לא על גודלו של וקטור המהירות. בהשפעת כוח לורנץ משתנה רק הכיוון של וקטור המהירות החלקיק.

גילוי תופעת כוח לורנץ

ניתן לגלות את השפעת כוח לורנץ על אלקטרונים נעים, אם נקרב אלקטרומגנט (או מגנט קבוע) אל מסך הטלוויזיה. בהשפעת שינוי הזרם באלקטרומגנט ניתן לראות כיצד סוטה אלומת האלקטרונים (עיוותים על המסך), וכי הסטייה גדלה ככל שגדלה עוצמת השדה המגנטי. כאשר משנים את מגמת הזרם באלקטרומגנט, משנה העיוות את מגמתו.

ניתן לגלות את תלותו של **כוח לורנץ** בזווית α שבין הווקטורים \vec{B} ו- \vec{v} , במידת הסטייה המשתנה של אלומת האלקטרונים על מסך הטלוויזיה, כאשר משנים את הזווית בין ציר המגנט לציר השפופרת.

תנועה של חלקיק טעון בשדה מגנטי אחיד

נסתכל בתנועת חלקיק בעל מטען q בשדה מגנטי אחיד \vec{B} . וקטור השדה המגנטי מכוון בניצב למהירות ההתחלתית \vec{v} של החלקיק (ראו ציור 25). כוח לורנץ תלוי במטען החלקיק, בגודל מהירות החלקיק ובעוצמת השדה המגנטי. מכיוון שהשדה המגנטי אינו משנה את גודל מהירותו של החלקיק הנע, גם גודלו של כוח לורנץ אינו משתנה. כוח זה מאונך למהירות, ולכן הוא הקובע את שיעור התאוצה הצנטריפטלית של החלקיק. אם לחלקיק מהירות קבועה בגודלה ותאוצה צנטריפטלית שאינה משתנה בגודלה, הוא נע במעגל בתנועה קבועה. נמצא את רדיוס המעגל r .

על-פי החוק השני של ניוטון נקבל (ראו ציור 25):

$$\frac{mv^2}{r} = |q|vB$$



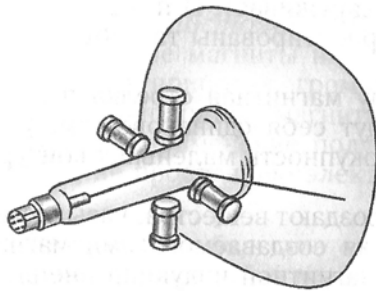
מכאן מחלצים את r :

$$(1.6) \quad r = \frac{mv}{|q|B}$$

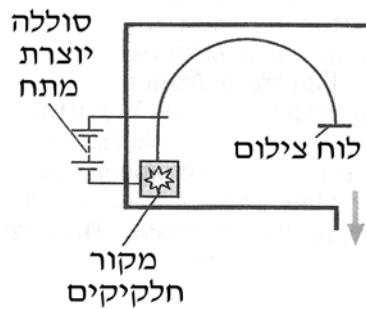
יישומי כוח לורנץ

לפעולת השדה המגנטי על מטען נע יש יישום רחב בתעשייה ובמדע. נזכיר את שפופרות הטלוויזיה, שבהן מוסטים האלקטרונים מתנועתם בקו ישר על-ידי שדה מגנטי, הנוצר באמצעות סלילים מיוחדים (ראו ציור 26).

שימוש אחר בשדה המגנטי נעשה במכשיר, המאפשר למיין חלקיקים טעונים על פי מטענם הסגולי, כלומר על-פי היחס שבין מטענם למסתם, וכך לגלות במדויק את מסתם של החלקיקים. מכשיר כזה מכונה **ספקטרוגרף מסות**. בציור 27 מתואר המבנה הסכמטי של ספקטרוגרף מסות פשוט:



ציור 26



ציור 27

התא מרוקן מאוויר ונמצא בשדה מגנטי (וקטור השדה \vec{B} ניצב לדף). החלקיקים הטעונים (אלקטרונים או יונים) מואצים בשדה חשמלי, ונעים בקשת מעגלית תחת השפעת השדה המגנטי. בסוף המסלול פוגעים החלקיקים בלוח צילום ומשאירים בו סימן, המאפשר למדוד בדיוק רב את רדיוס המעגל r . על-פי רדיוס זה ניתן למצוא את המטען הסגולי של החלקיק, ובהתאם לכך את מסתו.

על חלקיק טעון, שנע בשדה מגנטי, פועל **כוח לורנץ**. הכוח הזה מאונך לכיוון מהירות חלקיק נושא המטען, ואינו מבצע עבודה.

?

1. מה גודלו של כוח לורנץ?

כוח לורנץ

2. כיצד נע חלקיק טעון בשדה מגנטי אחיד, אם המהירות ההתחלתית שלו מכוונת בניצב לקווי השדה?
3. כיצד נמדד כיוונו של כוח לורנץ?
4. מדוע משנה כוח לורנץ את כיוון המהירות – אך לא משפיע על גודלה?

§7 התכונות המגנטיות של החומר

השדה המגנטי נוצר על-ידי זרמי חשמל וגם על-ידי מגנטים קבועים. מדוע וכיצד קורה הדבר? מהם היישומים של המגנטים?

מגנט החומר

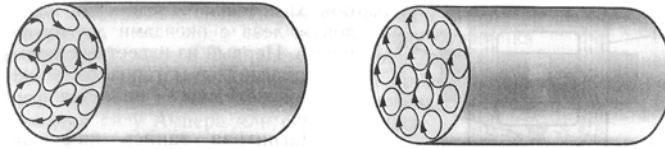
אפשר לייצר מגנטים קבועים מחומרים מעטים בלבד. כאשר אלה נמצאים בשדה מגנטי, הם מתמגנטים, כלומר, יוצרים שדה מגנטי בעצמם. מכיוון שכך, שונה וקטור השדה המגנטי בנוכחות חומר ממוגנט מוקטור השדה בריק.

הנחת אמפר

את הסיבה להופעת התכונות המגנטיות בחומר גילה המדען הצרפתי **אמפר**. הוא התרשם מניסויי **ארסטד**, בהם התגלתה השפעת הזרם העובר דרך תיל על מחט מגנטית, והניח שמקור המגנטיות של כדור הארץ בזרמי חשמל העוברים בתוכו. כך נעשה הצעד העיקרי: **את התכונות המגנטיות של חומר ניתן להסביר על סמך הזרמים הקיימים בתוכו**. בהמשך הגיע **אמפר** למסקנה כללית: **תכונות מגנטיות של כל חומר נובעות מזרמי חשמל סגורים קיימים בתוכו**. המעבר המכריע – מהסבר התכונות המגנטיות של גוף באמצעות הזרמים אל הטענה המוחלטת, שכל התופעות המגנטיות הן תוצאות של פעולות גומלין בין זרמים – היה צעד מדעי אמיץ של **אמפר**.

לפי תורתו של **אמפר** קיימים בתוך המולקולות והאטומים זרמי חשמל זעירים (עתה ידוע שזרמים אלה נוצרים עקב תנועת האלקטרונים באטומים). מעגלי זרמים זעירים וסגורים אלה מתוארים כעיגולים או כאליפסות קטנות. אם המישורים, שבהם מתקיימים הזרמים, אינם מסודרים, אלא נמצאים במצב של אי-סדר עקב תנועה תרמית של המולקולות (ראו ציור 28א), מתקזזות התופעות המגנטיות שלהן, והגוף איננו מגלה תכונות מגנטיות; ואילו במצב הממוגנט מכוונים הזרמים

הזעירים כך שפעולותיהם המגנטיות מסתכמות (ראו ציור ב28).



ציור א28

ציור ב28

המודל של **אמפר** מסביר מדוע מחט מגנטית ומסגרת (סליל) נושאת זרם מתנהגות באופן דומה בשדה מגנטי (ראו סעיף 2): את המחט אפשר להציג כאוסף של מסגרות נושאות זרם זעירות, המכוונות בצורה דומה.

את השדות החזקים ביותר יוצרים חומרים המכונים **פרומגנטיים**. עוצמת השדה הנוצרת על-ידיהם עשויה להיות גדולה בהרבה מעוצמת השדה המגנט החיצוני. השדה המגנטי בחומר פרומגנטי נוצר עקב סיבוב האלקטרונים סביב הגרעין, ובנוסף עקב ה**סיבוב העצמי** של האלקטרונים. האלקטרונים מסתובבים סביב צירם העצמי, ומכיוון שהם טעונים הם יוצרים שדה מגנטי נוסף לזה שהם יוצרים עקב סיבובם סביב הגרעין.¹

טמפרטורת קירי

כאשר טמפרטורת החומר הפרומגנטי עולה מעבר לטמפרטורה מסוימת עבור החומר הנתון, נעלמות תכונותיו הפרומגנטיות. טמפרטורה זו מכונה **טמפרטורת קירי** (על שם המדען הצרפתי שגילה את התופעה). אם נחמם מסמר ממוגנט, הוא יאבד את יכולתו למשוך גופים מברזל. טמפרטורת קירי עבור ברזל היא 753°C , עבור ניקל – 365°C , ועבור קובלט – 1000°C . קיימות תרכובות מתכת פרומגנטיות, שעבורן טמפרטורת קירי נמוכה מ- 100°C .

¹ אלקטרון אינו דומה לכדור קטן מאוד. תנועתו מתוארת על-ידי חוקי המכניקה הקוונטית – ולא על-ידי המכניקה הניוטונית. התנע הסיבובי העצמי של האלקטרון מכונה **ספין** (Spin).

שימושי הפרומגנטים

בטבע אין חומרים פרומגנטיים רבים, אך בטכנולוגיה רב השימוש בהם: ליבה מברזל או מפלדה, המוכנסת לתוך סליל שדרכו זורם זרם, מגבירה עשרות מונים את השדה המגנטי בלא הגברת הזרם, וכך נחסך חשמל. הליבות של שנאי, גנרטור, מנוע חשמלי וכדומה מיוצרות מחומרים פרומגנטיים.

כאשר מנתקים את השדה המגנטי החיצוני, נשאר החומר הפרומגנטי ממוגנט, כלומר הוא יוצר שדה מגנטי במרחב שמסביבו. במילים אחרות: הסידור המכוון של הזרמים הזעירים איננו נעלם עם השדה החיצוני. **משום כך קיימים מגנטיים קבועים.**

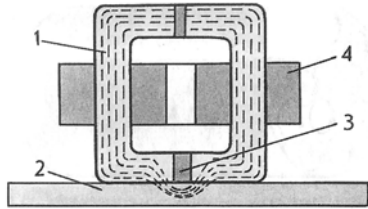
השימוש במגנטיים קבועים רווח במכשירי מדידה אלקטרומגנטיים, ברמקולים ובטלפונים, במקלטי קול, במצפנים מגנטיים ועוד.

שימוש רב נמצא לפְּרִיטִים (Ferrits) – חומרים פרומגנטיים שאינם מוליכים זרם חשמל. אלה הם תרכובות כימיות של אוקסידים של ברזל עם אוקסידים של חומרים אחרים. הראשון מבין הפרומגנטיים הידועים לבני-אדם – עֶפְרַת ברזל – הוא פְּרִיט.

הקלטה מגנטית של מידע

בחומרים פרומגנטיים מצפים סרטים מגנטיים בשכבה מגנטית דקה. בסרטים מגנטיים משתמשים במכשירי רשמקול ווידיאו. בסיסו של הסרט המגנטי עשוי מפוליכלורוויניל אלסטי או מחומר אלסטי אחר, מצופה בלקה מגנטית שבה מחטים זעירות מברזל או מחומר פרומגנטי אחר.

את הקלטת הקול מבצעים באמצעות אלקטרומגנט. השדה המגנטי שלו משתנה בהתאם לתנודות הקול, וכאשר מחליק הסרט ליד הראש המגנטי, מתמגנטים בו אזורים שונים של הציפוי. ציור 29 ממחיש את המבנה של ראש קליטה מגנטי: 1 – ליבה של אלקטרומגנט; 2 – סרט מגנטי; 3 – מרווח עבודה; 4 – סליל של אלקטרומגנט. התהליך הפוך כאשר משחזרים את הקול המוקלט: הסרט המגנטי גורם ליצירת אותות חשמליים בראש המגנטי, והאותות המוגברים נכנסים לרמקול של המכשיר.



ציור 29

שכבות מגנטיות דקות מורכבות משכבה של חומר פרומגנטי בעובי 0.03 עד 10 מיקרון. התקליטורים המגנטיים (שכמעט יוצאים מהשימוש) משמשים לרישום המידע הדיגיטלי במחשבים. עקרונות ההקלטה והשחזור שלהם דומים לאלה שברשמקול רגיל.

כל החומרים הנמצאים בשדה מגנטי יוצרים שדה משלהם. את השדות החזקים ביותר יוצרים חומרים פרומגנטיים. מהם יוצרים את המגנטים הקבועים, מכיוון שהשדה של פרומגנט אינו נעלם לאחר ניתוק השדה הממגנט. השימוש בחומרים פרומגנטיים רווח בתעשייה ובמדע.

?

1. אילו חומרים מכונים פרומגנטיים?
2. לאילו מטרות משתמשים בחומרים פרומגנטיים?
3. כיצד נרשם מידע במחשב?

דוגמאות לפתרון תרגילים

בפתרון תרגילים העוסקים בשדה מגנטי, הנוצר על-ידי זרם חשמל, יש למצוא את כיוונו ומגמתו של **כוח אמפר** בעזרת "כלל יד שמאל", כאשר מוגדרים הכיוונים והמגמות של הזרם ושל וקטור השדה המגנטי, וכך גם את כיוונו ומגמתו של **כוח לורנץ**. מגמתו של וקטור השדה המגנטי מוגדרת על-פי כלל הבורג.

בתרגילים העוסקים ב**חוק אמפר** וב**כוח לורנץ** נוקטים את הכללים הנהוגים בפתרון תרגילים במכניקה: מלבד הכוחות המכניים יש להביא בחשבון את **כוח אמפר** או **כוח לורנץ**.

1. מוליך ישר, שאורכו $l = 0.2 \text{ m}$ ומסתו $m = 10 \text{ g}$, תלוי אופקית על שני חוטים נטולי מסה, ונמצא בין קוטבי מגנט. וקטור עוצמת השדה המגנטי מכוון בניצב למוליך כלפי מעלה, וגודלו: $B = 49 \text{ mT}$. מה תהיה זווית הסטייה מהאנך של החוטים, המחזיקים את המוליך, אם מעבירים בו זרם $I = 2 \text{ A}$?

חכונות מגנטיות של חומר

פתרון

על המוליך פועלים הכוחות הבאים: כוחות המתיחות של שני החוטים \vec{F}_e , כוח הכבידה mg וכוח \vec{F} מצדו של השדה המגנטי (ציור 30). גודלו של כוח זה שווה ל- $F = BIl$. במצב שיווי משקל של המוליך שווה סכום ההיטלים של הכוחות על שני הצירים לאפס:

$$mg - F_e \cos \alpha = 0$$

$$F - F_e \sin \alpha = 0$$

מכאן:

$$\tan \alpha = \frac{F}{mg} = \frac{BIl}{mg} \approx 0.2$$

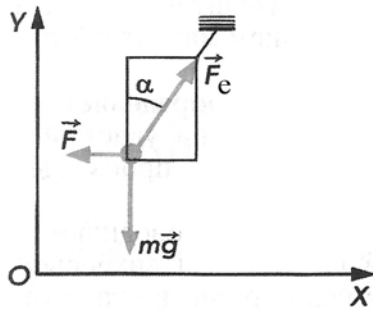
והזווית שווה ל- $\alpha = 11.3^\circ$.

2. במרחב, שקיימים בו בו-זמנית שדה חשמלי אחיד וקבוע ושדה מגנטי אחיד וקבוע, נע פרוטון במסלול ישר. עוצמת השדה החשמלי \vec{E} . מהי עוצמתו \vec{B} של השדה המגנטי?

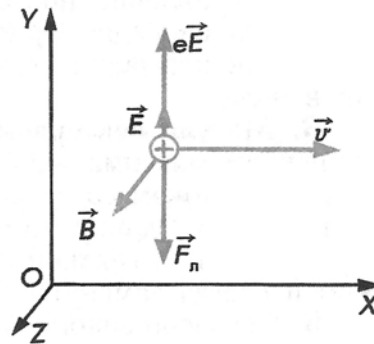
פתרון

תנועה הפרוטון בקו ישר אפשרית בשני מקרים:

1. הווקטור \vec{E} מכוון לאורך מסלול התנועה של הפרוטון, והווקטור \vec{B} גם הוא מכוון לאורך המסלול. עוצמתו עשויה להיות כלשהי, מכיוון שבמקרה זה אין השדה המגנטי משפיע על החלקיק.



ציור 30



ציור 31

2. הווקטורים \vec{E} , \vec{B} ו- \vec{v} מאונכים זה לזה, והכוח הפועל על הפרוטון מצדו של

הכוחות מגנטיים של חומר

השדה החשמלי שווה בגודלו ובכיוונו, אך מנוגד במגמתו לכוח לורנץ, הפועל על

הפרוטון מצדו של השדה המגנטי (ציור 31). מכיוון ש:

$$e\vec{E} + \vec{F}_L = 0$$

מקבלים:

$$eE - evB = 0,$$

$$B = \frac{E}{v}$$

מקבץ תרגילים 1

1. בעזרת כלל הבורג ו"כלל יד שמאל" הראו שזרמים מקבילים שווי-מגמה נמשכים זה לזה, וזרמים מנוגדים במגמתם – נדחים זה מזה.

2. בשני מוליכים ישרים, המאונכים זה לזה, מעבירים זרמים I_1 ו- I_2 (ציור 32).

כיצד ישתנה מצב המוליכים בעקבות כך?

3. מוליך שאורכו $l = 0.15 \text{ m}$ ניצב

לוקטור שדה מגנטי אחיד שגודלו

$B = 0.4 \text{ T}$. עוצמת הזרם במוליך

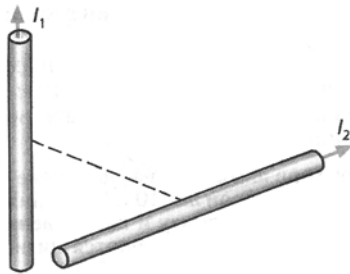
$I = 8 \text{ A}$. מצאו את העבודה שבוצעה

במהלך העברת המוליך ב- 0.025 m

בכיוון הפעולה של כוח אמפר ובמגמתו.

4. מצאו את כיוונו ומגמתו של וקטור השדה המגנטי בחלקה הצר של שפופרת

האלקטרוניס (ראו ציור 26).



ציור 32

תקציר פרק 1

1. פעולות בין זרמי חשמל מתבצעות באמצעות השדה המגנטי. האפיון הבסיסי של

השדה המגנטי הוא וקטור עוצמת השדה \vec{B} .

2. כיוון וקטור השדה \vec{B} זהה לכיוון האנך למסגרת נושאת זרם, התלויה חופשית

בשדה מגנטי. מגמת וקטור השדה זהה למגמת המחט המגנטית בשדה.

3. גודל וקטור השדה מוגדר כיחס בין הכוח המרבי, הפועל מצדו של השדה על קטע

מוליך נושא זרם, לבין מכפלת עוצמת הזרם באורך הקטע.

4. קווי השדה המגנטי עוקפים מוליכים נושאי זרם, והם תמיד סגורים. שדות מסוג

זה מכונים שדות מערבולת.

5. לפי **חוק אמפר**, על קטע מוליך נושא זרם, שאורכו Δl , פועל מצדו של שדה מגנטי כוח השווה $F = B |I| \Delta l \sin \alpha$, כאשר α היא הזווית בין הקטע המוליך לבין הווקטור \vec{B} . כיוון הכוח ומגמתו מוגדרים לפי "כלל יד שמאל".
6. על חלקיק טעון הנמצא בתנועה פועל **כוח לורנץ**, השווה ל- $F_L = |q| v B \sin \alpha$, כאשר α – הזווית בין מהירות החלקיק לבין הווקטור \vec{B} . **כוח לורנץ** מאונך למהירות החלקיק, ולכן אינו מבצע עבודה.
7. כל גוף המוכנס לשדה מגנטי מתמגנט, כלומר יוצר שדה מגנטי בעצמו. לרוב החומרים תכונות מגנטיות חלשות. רק חומרים **פרומגנטיים** (ביניהם הברזל) מסוגלים ליצור שדה חזק מאוד. אף-על-פי שמספר חומרים אלה אינו גדול, הם שימושיים מאוד, מכיוון שבאמצעותם ניתן להגדיל את השדה המגנטי עשרות מונים ללא השקעת אנרגיה נוספת.

פרק 2. השראה אלקטרומגנטית

עד כה עסקנו בשדות חשמליים ובשדות מגנטיים שאינם משתנים בזמן. הסקנו שהשדה האלקטרוסטטי נוצר על-ידי חלקיקים טעונים נייחים, והשדה המגנטי – על-ידי חלקיקים נייחים, כלומר על-ידי זרם חשמל. עתה נכיר שדות חשמליים ושדות מגנטיים המשתנים במהלך הזמן.

גילוי חשוב ביותר הוא הקשר ההדוק בין השדה החשמלי לבין השדה המגנטי. שדה מגנטי המשתנה בזמן יוצר שדה חשמלי, ושדה חשמלי המשתנה בזמן יוצר שדה מגנטי. ללא קשר הדוק זה בין השדות לא היתה קיימת הקשת הרבגונית של תופעות אלקטרומגנטיות, כפי שהיא מתגלה בטבע.

§8 גילוי השראה האלקטרומגנטית

בשנת 1821 כתב **פאראדיי** ביומנו: "המשימה: להפוך את המגנטיות לחשמל". עשר שנים מאוחר יותר עמד **פאראדיי** במשימה.

לא במקרה נעשה הצעד הראשון והמכריע בגילוי התכונות של הפעולות האלקטרומגנטיות בידי "אבי תורת השדה האלקטרומגנטי", **מייקל פאראדיי**.

השראה אלקטרומגנטית

ניסוייו לאישוש הנחתו – שקיים מקור משותף לתופעות החשמל ולתופעות המגנטיות – הביאו לתגלית, שעליה מתבססים מחוללי החשמל, ההופכים את האנרגיה המכנית לאנרגיה חשמלית.

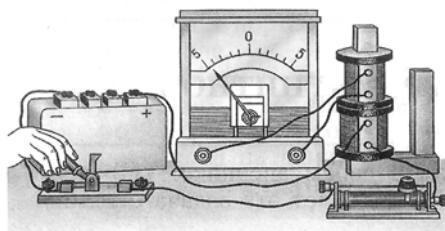
הלך מחשבותיו של **פאראדיי** היה כדלקמן: מאחר שזרם החשמל יכול למגנט ברזל, האם יכול גם המגנט לגרום להופעת זרם חשמל? זמן רב לא הצליחו לגלות את הקשר הזה, משום שהיה קשה לנחש את התנאי העיקרי: המגנט חייב לנוע! רק מגנט נע או שדה מגנטי המשתנה בזמן יכולים לעורר זרם חשמל בסליל. הסיפור הבא מדגים כיצד יכולה מקריות להשפיע על תגלית: במקביל לעבודתו של **פאראדיי** ערך הפיזיקאי השווייצרי **קולאדון** ניסוי כדי לעורר זרם חשמלי בסליל באמצעות מגנט.

קולאדון השתמש בגליונומטר שבו מחט מגנטית קלה מברזל. כדי למנוע את ההשפעה של המגנט, הנע לתוך הסליל שבמערכת הניסוי, על המחט הברזלית של הגליונומטר, הוא הוציא את קצות החוטים הסוגרים את המעגל ואת הגליונומטר לחדר אחר. לאחר שהכניס את המגנט לסליל, עבר לחדר האחר כדי לבדוק את קריאת הגליונומטר. אילו היה שוהה באותו חדר, היה רואה את תנועת המחוג של הגליונומטר במהלך הכנסתו של המגנט לסליל, וייתכן שהיה מגלה זאת לפני **פאראדיי**; אולם זה לא קרה, משום שמגנט ניח אינו מעורר הופעת זרם בסליל.

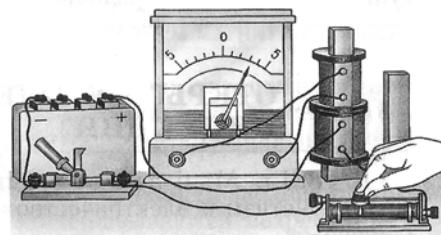
ההשראה האלקטרומגנטית מתגלה בהופעת זרם חשמל בסליל מוליך, הנמצא במנוחה בשדה מגנטי המשתנה בזמן – או בסליל הנע בשדה מגנטי קבוע, כאשר במהלך תנועתו משתנה מספר קווי השדה העוברים דרכו. התופעה נתגלתה ב-29 באוגוסט 1831 – מקרה נדיר שבו ידוע התאריך המדויק של הגילוי.

תחילה נתגלתה ההשראה האלקטרומגנטית במוליכים הנייחים זה יחסית לזה, כאשר פותחים וסוגרים את המעגל. לאחר מכן הוכיח **פאראדיי** באמצעות ניסויים, שזרם החשמל מופיע בסליל, כאשר סליל אחר שזורם בו זרם נע לעברו. **פאראדיי** הכיר את העבודות של **אמפר** – שמגנט הוא אוסף של זרמים זעירים הזורמים במולקולות.

ב-17 באוקטובר 1831 כתב **אמפר** ביומן מעבדתו על גילוי זרם ההשראה בסליל במהלך הכנסתו של מגנט אל הסליל או במהלך הוצאתו ממנו.

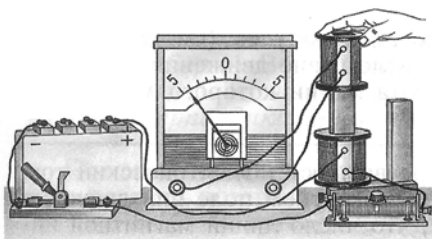


ציור 33א

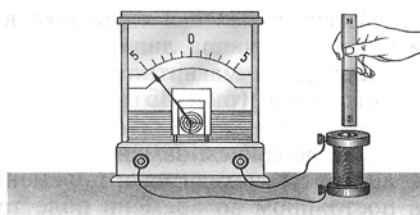


ציור 33ב

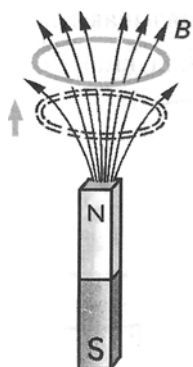
במהלך חודש אחד גילה פאראדיי באופן ניסויי את כל התכונות המשמעותיות של תופעת ההשראה האלקטרומגנטית. כיום יכול כל אחד לבצע ניסויים אלה, וכל שנדרש הם שני סלילים, מגנט, סוללה וגליונומטר רגיש דיו. במערך המתואר בציור 33א מופיע זרם ההשראה בסליל האחד ברגע פתיחת המעגל או ברגע סגירתו בסליל האחר, הנייח יחסית לסליל הראשון. זרם השראה מופיע גם במהלך שינוי עוצמת הזרם באחד הסלילים בעזרת נגד משתנה (ראו ציור 33ב), וכך גם בזמן תנועה יחסית בין הסלילים (ראו ציור 34א) או בזמן הכנסת מגנט קבוע לסליל (ראו ציור 34ב) ובזמן הוצאתו ממנו.



ציור 34א



ציור 34ב



ציור 35

פאראדיי גילה את המכנה המשותף להופעת זרם ההשראה בניסויים השונים:
זרם מופיע בסליל מוליך וסגור, כאשר משתנה מספר קווי השדה המגנטי העוברים דרך המשטח המוקף על-ידי הסליל. ככל שמספר הקווים משתנה מהר יותר, כך גדלה מהר יותר עוצמת זרם ההשראה. עם זאת, סיבת השינוי של מספר קווי השדה אינה חשובה; זו עשויה להיות שינוי מספר קווי השדה המגנטי, העוברים דרך משטח של סליל מוליך ניח עקב שינוי הזרם בסליל

השראה אלקטרומגנטית

האחר (ראו ציור 33ב), או שינוי מספר קווי השדה עקב תנועת הסליל בשדה מגטי לא אחיד, כאשר משתנה צפיפות הקווים במרחב (ראו ציור 35).

לסיכום: בסליל מוליך סגור מופיע זרם חשמל, אם הסליל נמצא בשדה מגנטי משתנה בזמן, או כאשר הוא נע בשדה מגנטי קבוע בזמן, כשמספר קווי השדה העוברים דרך הסליל משתנה בזמן.

?

1. מהו ההבדל העיקרי בין שדה מגנטי ושדה חשמלי המשתנים בזמן לבין אלה הקבועים בזמן?
2. מהי תופעת ההשראה האלקטרומגנטית?
3. כיצד צריך לנוע סליל מוליך סגור בשדה מגנטי אחיד שאינו משתנה בזמן, כדי שיופיע בו זרם ההשראה: במקביל לעצמו או בתנועה סיבובית?

§9 השטף המגנטי

כדי לנסח באופן כמותי את חוק ההשראה האלקטרומגנטית של פאראדיי, יש להגדיר גודל חדש: השטף המגנטי.

וקטור השדה המגנטי \vec{B} מאפיין את השדה בכל נקודה במרחב. אפשר להגדיר ערך נוסף, התלוי בערך הווקטור \vec{B} , אך לא בנקודה אחת, אלא בכל נקודות משטח הכלוא בלולאת זרם.

נסתכל על מוליך בצורת לולאה סגורה בעלת שטח S , הנמצאת בשדה מגנטי אחיד. האנך \vec{n} למשטח הלולאה יוצר זווית α עם כיוון וקטור השדה \vec{B} (ראו ציור 36). הגודל המכונה שטף מגנטי Φ (שטף השדה המגנטי) דרך משטח בעל שטח S הוא הערך השווה למכפלת ערך וקטור השדה \vec{B} בשטח S ובקוסינוס הזווית α בין הווקטור \vec{B} לבין הווקטור \vec{n} :

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (2.1)$$

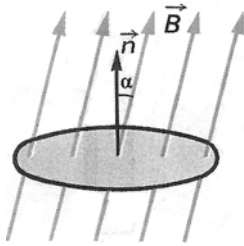
המכפלה $B \cdot \cos \alpha = B_n$ מהווה היטל וקטור השדה על האנך למישור הלולאה.

השראה אלקטרומגנטית

לכן:

(2.2)

$$\Phi = B_n S$$



ציור 36

את השטף המגנטי אפשר לפרש באופן ויזואלי כערך הפרופורציונלי למספר קווי השדה, החודרים דרך המשטח ששטחו S .

יחידת השטף המגנטי מכונה וֶבֶר. השטף המגנטי של 1 ובר (1 Wb) נוצר על-ידי שדה מגנטי אחיד שעוצמתו 1 Tl, החודר דרך משטח בעל שטח 1m^2 , המוצב במאונך לוקטור השדה המגנטי.

שטף השדה המגנטי מאפיין את התפלגות השדה במשטח המוקף על ידי לולאה סגורה.

§10 כיוון זרם ההשראה, חוק לֶנֶץ

נעסוק בסוגיית כיוונו ומגמתו של זרם ההשראה.

כאשר מחברים לגליונומטר סליל, שנוצר בו זרם השראה, רואים שמגמת זרם ההשראה תלויה במגמת התנועה של המגנט: אל הסליל עם הקוטב האחד, למשל, או ממנו והלאה (ראו ציור 34ב).

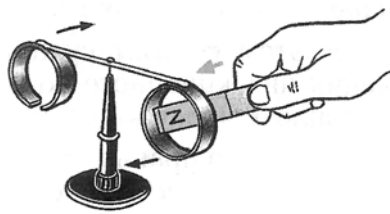
זרם ההשראה, הנוצר במגמה זו או אחרת, פועל על המגנט שמחולל אותו, שהרי סליל נושא זרם דומה למגנט בעל שני קטבים, ומגמת זרם ההשראה בסליל קובעת את טיבו של הקוטב בקצהו. בהסתמך על חוק שימור האנרגיה ניתן לנבא באילו מקרים ימשוך הסליל את המגנט, ובאילו מקרים ידחה אותו.

הפעולה ההדדית בין זרם השראה למגנט

אם נקרב מגנט אל הסליל, יופיע בסליל זרם השראה במגמה שתדחה את המגנט; שהרי לא מעצמו יזרום זרם בסליל – יש להשקיע עבודה חיובית לשם כך. הסליל מתחיל להידמות למגנט, וזה מפנה למגנט המתקרב קוטב מאותו סוג, ולכן נדחים הם זה מזה.

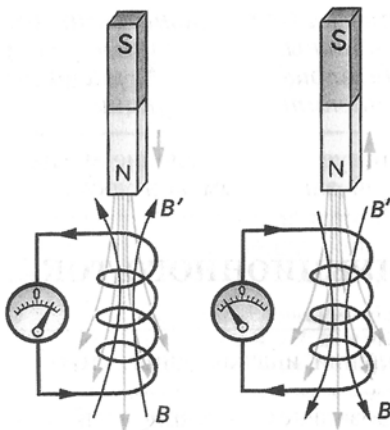
השראה אלקטרומגנטית

נבהיר זאת היטב בהצגת הבלתי אפשרי: נניח שכאשר מקרבים מגנט אל סליל, ומעוֹכֵר בו זרם השראה והם היו נמשכים זה לזה; אז היתה גדלה האנרגיה הקינטית של המגנט. אם כך, היו האנרגיה הקינטית של המגנט ואנרגיית הזרם נוצרות מלא כלום, ללא השקעת אנרגיה, וכזאת עדיין לא מצאנו מעולם. בהתרחקות המגנט קורה ההפך: חוק שימור האנרגיה דורש שיופיע כוח משיכה.



ציור 37

ניתן להיווכח באמור מעלה בסיוע המכשיר המתואר בציור 37. המוט עשוי להסתובב חופשית סביב ציר אנכי, ובקצותיו מותקנות שתי טבעות אלומיניום מוליכות, שאחת מהן חתוכה. אם נקרב מגנט לטבעת השלמה, יופיע בה זרם השראה, והוא יהיה מכוון כך שהטבעת תידחה מהמגנט, והמוט יסתובב. אם נרחיק את המגנט מהטבעת – אזי להפך: הטבעת תימשך אל המגנט.



ציור 38א

ציור 38ב

על הטבעת החתוכה אין המגנט פועל כלל, מכיוון שהחתך מונע היווצרות זרם השראה. משיכת הטבעת השלמה את המגנט או דחייתו ממנה תלויות במגמת זרם השראה שנוצר בה. לכן מאפשר חוק שימור האנרגיה לנסח כלל, המגדיר את מגמת זרם השראה. מהו ההבדל בין שני הניסויים – התקרבות המגנט אל הסליל והתרחקותו? במקרה הראשון גדל מספר קווי השדה החודרים אל בין ליפופי הסליל, המייצגים את השטף המגנטי (ציור 38א), ובמקרה השני – קטן (ציור 38ב). במקרה הראשון יוצאים קווי השדה B' , הנוצרים בסליל על-ידי זרם השראה מהקצה העליון של הסליל, והסליל דוחה את המגנט; ובמקרה השני קורה ההפך: קווי השדה B' נכנסים לקצה זה.

קווי שדה אלה מתוארים בציור במודגש.

השראה אלקטרומגנטית

חוק לנץ

עתה נגיע אל העיקר: כאשר גדל השטף המגנטי החודר דרך הסליל, גורמת מגמת זרם ההשראה שנוצר לכך, שהשדה המגנטי, הנוצר על-ידי זרם ההשראה, מונע את הגדלת השטף דרך הסליל: קווי השדה \vec{B}' מכוונים נגד קווי השדה \vec{B} , שחולל את הזרם החשמלי. אם השטף המגנטי הולך וקטן, יוצר זרם ההשראה שדה מגנטי \vec{B}' , המגדיל את השטף המגנטי דרך ליפופי הסליל. זה הכלל לגילוי מגמת זרם ההשראה, המתקיים בכל המקרים. כלל זה התגלה ונוסח בידי הפיזיקאי היינריך לנץ.

בהתאם לחוק לנץ, זרם ההשראה, הנוצר בסליל סגור, מקטין את שינוי השטף המגנטי שגורם להיווצרותו באמצעות השדה המגנטי שהוא יוצר.

כדי למצוא את מגמת זרם ההשראה I_i בסליל בעזרת חוק לנץ, יש לעשות כדלקמן:

1. למצוא את מגמת קווי השדה המגנטי החיצוני \vec{B} .
2. לבדוק אם גדל שטף שדה זה דרך המשטח המוקף על-ידי הסליל ($\Delta\Phi > 0$), או שהוא הולך וקטן ($\Delta\Phi < 0$).
3. למצוא את מגמת קווי השדה המושרה \vec{B}' , הנוצר מזרם ההשראה I_i . בהתאם לחוק לנץ, צריכים קווים אלה להיות מכוונים במגמה הפוכה לקווי השדה \vec{B} , כאשר $\Delta\Phi > 0$; ולהיות בעלי אותה מגמה כאשר $\Delta\Phi < 0$.
4. כאשר יודעים את כיוון קווי השדה \vec{B}' , אפשר למצוא את כיוון זרם ההשראה I_i בעזרת כלל הבורג.

מגמת זרם ההשראה נקבעת על-ידי חוק שימור האנרגיה. באמצעות השדה המגנטי המושרה מקטין זרם ההשראה את שינוי השטף המגנטי, הגורם להיווצרות זרם ההשראה.

?

1. כיצד נמצא את מגמת זרם ההשראה?
2. מהי מגמת זרם ההשראה בכל הדוגמאות המובאות לעיל?

השראה אלקטרומגנטית

ננסח את חוק ההשראה האלקטרומגנטית באופן כמותי. ניסויי פאראדיי הוכיחו, שעוצמת זרם ההשראה I_i במסגרת מוליכה סגורה משתנה פרופורציונלית לקצב שינוי מספר קווי השדה B , החודרים דרך המשטח המוקף על-ידי המסגרת. אפשר לדייק בניסוח משפט זה באמצעות השימוש במושג **שטף מגנטי**.

אפשר להמחיש את המושג **שטף מגנטי**: מספר קווי השדה החודרים דרך משטח בעל שטח S . לכן קצב שינוי מספר זה הוא **קצב שינוי השטף המגנטי**.

אם בפרק זמן קצר Δt משתנה השטף המגנטי ב- $\Delta\Phi$, שווה קצב שינוי השטף המגנטי ל- $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. לכן ניתן לנסח את המשפט, הנובע במישרין מהניסוי, כך: **עוצמת זרם ההשראה פרופורציונלית לקצב השינוי של השטף המגנטי, החודר דרך המשטח המוקף על-ידי המסגרת:**

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.3)$$

כא"מ (כוח אלקטרו-מניע) מושרה

ידוע שזרם חשמל מעורר במעגל, כאשר על המטענים החופשיים, הנמצאים במוליך, פועלים כוחות זרים. עבודת כוחות אלה בהעברת יחידת מטען חיובית במעגל סגור מכונה **כוח אלקטרו-מניע**. לכן שינוי השטף המגנטי דרך המשטח, המוקף על-ידי המסגרת, מעורר הופעת כוחות זרים, ופעולתם מאופיינת על-ידי כא"מ, המכונה **כא"מ מושרה**. נהוג לסמנו באות ε_i .

לפי חוק אום למעגל סגור: $I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}$; התנגדות המוליך אינה תלויה בשינוי השטף המגנטי. לכן הביטוי (2.3) מתקיים, מפני שכא"מ מושרה פרופורציונלי ל- $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

חוק ההשראה האלקטרומגנטית

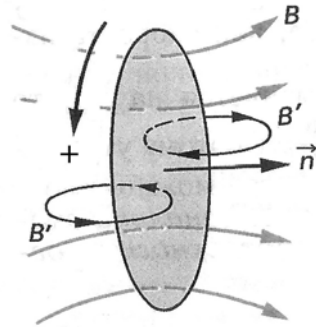
חוק ההשראה האלקטרומגנטית מנוסח עבור כא"מ – ולא עבור עוצמת הזרם. בניסוח כזה מבטא החוק את מהות התופעה, שאינה תלויה בתכונות המוליך שבו נוצר זרם ההשראה. על-פי חוק ההשראה האלקטרומגנטית, **גודלו של הכא"מ, המושרה במסגרת סגורה, שווה לקצב שינוי השטף המגנטי דרך המשטח, המוקף**



על-ידי המסגרת:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$$

כיצד נבחן ונקבע את מגמת זרם ההשראה האלקטרומגנטית (או את מגמת הכא"מ) בהתאם לחוק לנץ?



ציור 39

בציור 39 מתואר מעגל סגור. נקבע כמגמת הקפה חיובית את המגמה כנגד מגמת מחוגי השעון. האנך למישור המעגל \vec{n} מתקדם כבורג ימני בסיבובו עם מגמת ההקפה. נניח שהשדה החיצוני \vec{B} מכיוון לאורך האנך למישור המעגל והוא גדל עם הזמן. אזי:

$$\Phi > 0 \text{ וגם } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$$

לפי חוק לנץ, זרם ההשראה יוצר שטף מגנטי $\Phi' < 0$. קווי השדה המגנטי B' של הזרם המושרה מתוארים בציור 39 במודגש. לכן בהתאם לכלל הבורג מכיוון הזרם המושרה I_i במגמת מחוגי השעון (נגד כיוון הקפה חיובי), והכא"מ של ההשראה שלילי. לכן בחוק ההשראה האלקטרומגנטית צריך להיות סימן "מינוס" המצביע על כך של- ε_i ו- $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ סימנים שונים:

$$(2.4) \quad \varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

חשוב לזכור את חוק ההשראה האלקטרומגנטית (2.4) ולהבין את מהות הקשר בין כא"מ מושרה לבין השטף המגנטי.

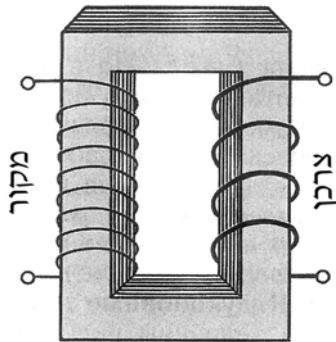
?

1. מהו שטף מגנטי (שטף שדה מגנטי)?
2. מדוע מנוסח חוק ההשראה האלקטרומגנטית עבור כא"מ – ולא עבור עוצמת זרם?
3. מהו חוק ההשראה האלקטרומגנטית?
4. מדוע יש סימן מינוס בחוק ההשראה האלקטרומגנטית?

חוק ההשראה האלקטרומגנטית

כא"מ מושרה מופיע במוליך נייח, הנמצא בשדה המשתנה בזמן, או במוליך הנוע בשדה מגנטי – אף אם אין השדה המגנטי משתנה בזמן. בשני המקרים מוגדר ערכו של הכא"מ על-פי החוק (2.4) – אף שמקור הכא"מ שונה. נתמקד תחילה במקרה הראשון.

נסתכל בשנאי, המורכב משני סלילים שבתוכם ליבה מחומר פרומגנטי (ראו ציור 40). אם נחבר סליל אחד לרשת חשמל של זרם חילופין, יופיע זרם בסליל האחר – אם יהיה סגור: האלקטרונים בחוטי הסליל האחר ינועו. אילו כוחות מניעים אותם? השדה המגנטי עצמו, הקיים בליבת השנאי, אינו יכול לעשות זאת, מכיוון ששדה מגנטי פועל על מטענים נעים בלבד (בוה הוא שונה מהשדה החשמלי), והרי המוליך והאלקטרונים בתוכו נייחים!



ציור 40

שדה חשמלי פועל על מטענים נייחים, כמו גם על נייחים. מאחר שאין השדה המגנטי פועל על מטענים נייחים, אין מפלט מהמסקנה שאלקטרונים נייחים במוליך נייח מונעים על-ידי שדה חשמלי, שנוצר על-ידי שדה מגנטי משתנה.

זאת תכונה בסיסית חדשה ואותה גילה ג'יימס קלרק מקסוול: שדה מגנטי שמשתנה בזמן גורם להופעת שדה חשמלי.

עתה נראית תופעת ההשראה האלקטרומגנטית בעינינו באור אחר: העיקר בה הוא תהליך היצירה של השדה החשמלי על-ידי השדה המגנטי המשתנה. אי-הימצאותו של מעגל מוליך, לדוגמה סליל, אינה משנה את עובדת עירורו של שדה חשמלי על-ידי שדה מגנטי משתנה; אם כן, מוליך בעל מאגר של אלקטרונים חופשיים (או של חלקיקים טעונים אחרים) מאפשר לגלות את השדה החשמלי המעורר: השדה מניע את האלקטרונים במוליך, וכך נחשף. אם כך, מהות תופעת ההשראה האלקטרומגנטית במוליך נייח אינה בהופעת זרם מושרה, אלא ביצירת שדה חשמלי, המניע את המטענים החשמליים.

השדה החשמלי, הנוצר עקב השדה המגנטי המשתנה, שונה לחלוטין מהשדה

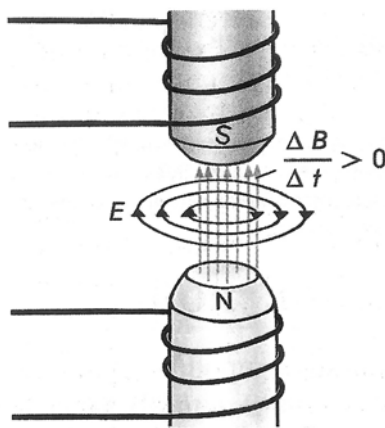


האלקטרוסטטי. הוא אינו קשור במטעני חשמל, וקווי שדה חשמלי זה אינם מתחילים או מסתיימים במטענים חשמליים. קווי שדה אלה אינם מתחילים ואינם מסתיימים, אלא דומים לקווים הסגורים של קווי השדה המגנטי. שדה חשמלי זה מכונה **שדה המערבולת** (ראו ציור 41).

ככל שמשנתנה מהר יותר עוצמת השדה המגנטי, כך גדלה עוצמת השדה החשמלי.

בהתאם ל**חוק לנץ**, כאשר השדה המגנטי גדל בזמן $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0\right)$, יוצרת מגמת וקטור עוצמת השדה החשמלי \vec{E} תנועת סיבוב של בורג ימני נגד מגמתו של וקטור \vec{B} .

ול הפך: כאשר השדה המגנטי הולך וקטן $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0\right)$, יוצרת מגמת וקטור עוצמת השדה החשמלי \vec{E} תנועת סיבוב של בורג ימני עם מגמת וקטור \vec{B} .



ציור 41

מגמת קווי השדה \vec{E} היא כיוון זרם ההשראה. הכוח הפועל מצדו של שדה המערבולת החשמלי על המטען q (הכוח הזר) אומנם שווה ל- $\vec{F} = q\vec{E}$; אולם עבודת שדה המערבולת במסלול סגור – להבדיל מעבודת השדה האלקטרוסטטי – אינה שווה לאפס, משום שבמעבר מטען לאורך קו סגור של שדה חשמלי יש לכוח שמפעיל השדה ולמסלול המטען לאורך כל קטעי המסלול אותו כיוון ואותה מגמה. לכן **בהעברת מטען חיובי יחיד לאורך מוליך ניח סגור שווה עבודת שדה המערבולת מספרית לכא"מ המושרה במוליך זה**.

זרמי מערבולת במוליכים בעלי מסה גדולה

זרמי מערבולת גדולים במיוחד נוצרים בגושים מוליכים, מכיוון שהתנגדותם החשמלית קטנה. בזרמים אלה, המכונים **זרמי פוקו** (על שם המדען הצרפתי שחקר אותם), ניתן להשתמש לצורך חימום מוליכים. על עיקרון זה בנויים תנורים אינדוקציוניים (induction – השראה). שימוש נפוץ במיוחד של תנורים אלה הוא בהיתוך מתכות בריק, אך אפשר למצוא אותם גם במטבח.



היווצרות זרמי פוקו במכשירים רבים גורמת לאיבודי אנרגיה ולפליטת חום. לכן אין מייצרים את ליבת הברזל בשנאי, במנוע החשמלי, בגנרטור ובדומיהם כגוף אחד, אלא מלוחות נפרדים המבודדים זה מזה, כאשר משטחי הלוחות מאונכים לכיוון וקטור שדה המערבולת. במצב כזה תהיה התנגדות הלוחות לזרם חשמלי מרבית, ופליטת החום – מזערית.

שימושי פְּרִיטִים

מכשירי רדיו ותקשורת פועלים בתחום תדרים גבוה מאוד (מיליוני תנודות בשנייה), ושימוש בליבה, העשויה מלוחות מבודדים, כבר אינו מביא לתוצאה הנדרשת, מכיוון שזרמי פוקו נוצרים בכל לוח בנפרד.

בסעיף 7 צוין שקיימים מגנטים מבודדים: פְּרִיטִים. במהלך שינוי מגמת השדה המגנטי הפנימי לא נוצרים בפְּרִיטִים זרמי פוקו, ואיבוד האנרגיה בהם מזערי. משום כך מייצרים מהפריטים ליבות של שנאים, הפועלים בתדרים גבוהים, לאנטנות של מקלטי רדיו למשל. את ליבת הפריט מייצרים מתערובת של אבקות חומרים מתאימים, והתערובת עוברת תהליך של כבישה ושל עיבוד תרמי.

במהלך שינוי מהיר של שדה מגנטי בליבת מגנט רגיל נוצרים זרמי השראה. אלה יוצרים שדה מגנטי מושרה, המתנגד לשינוי השטף המגנטי שבליבת הסליל. משום כך כמעט לא משתנה השטף המגנטי, והליבה אינה מתמגנטת מחדש. בפריטים זרמי מערבולת קטנים מאוד, ולכן אפשר למגנט אותם במהרה.

לצד שדה חשמלי פוטנציאלי (שדה קולון) קיים שדה מערבולת חשמלי. קווי השדה זה סגורים. שדה המערבולת נוצר על-ידי שדה מגנטי משתנה.

?

1. מה מקור הכוח הזר, הגורם להופעת זרם השראה במוליך ניח?
2. מה ההבדל בין שדה מערבולת חשמלי לבין שדה אלקטרוסטטי?
3. מהם זרמי פוקו?
4. מה היתרונות של פְּרִיטִים לעומת פרומגנטים רגילים?

שדה מערבולת חשמלי

אם מוליך נע בשדה מגנטי הקבוע בזמן, אין שדה מערבולת מעורר בו כא"מ, אלא גורם אחר.

בתנועתו של מוליך נעים עמו המטענים החופשיים שבתוכו. עקב כך מפעיל עליהם השדה המגנטי **כוח לורנץ**, הגורם לתנועת המטענים בתוך המוליך. המקור לכא"מ המושרה הוא אפוא השדה המגנטי.

בתחנות חשמל רבות **כוח לורנץ** הוא המניע את האלקטרונים במוליכים נעים.

נחשב את הכא"מ המושרה, הנוצר במוליך הנע בשדה מגנטי אחיד (ציור 42). נניח שצלע המעגל MN, שאורכה l , גולשת במהירות קבועה \vec{v} לאורך הצלעות NC ו-MD, בעודה נשארת מקבילה לצלע CD. וקטור השדה המגנטי האחיד \vec{B} מאונך למוליך ויוצר זווית α עם כיוון המהירות.

גודל הכוח על חלקיק טעון שנע במרחב, בו פועל השדה המגנטי, שווה ל:

$$(2.5) \quad F_L = |q| vB \sin \alpha$$

כוח זה מכיוון לאורך המוליך MN. עבודת **כוח לורנץ** על פני הדרך l חיובית ושווה:¹

$$A = F_L l = |q| vBl \sin \alpha$$

על-פי הגדרתו, ישווה הכוח האלקטרו-מניע ההשראתי במוליך MN ליחס בין

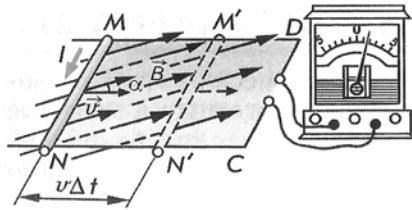
העבודה בהעברת מטען q לבין גודל המטען:

$$(2.6) \quad \varepsilon_i = \frac{A}{|q|} = vBl \sin \alpha$$

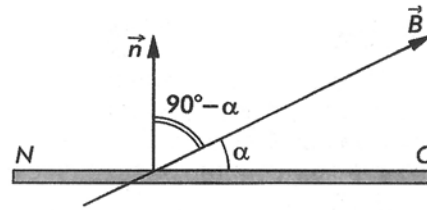
נוסחה זו מתקיימת עבור כל מוליך שאורכו l הנע במהירות \vec{v} בשדה מגנטי אחיד.

¹ מלבד כוח לורנץ (2.5) קיים רכיב הכוח (1.2), המכוון נגד מגמת התנועה של המוליך. רכיב זה בולם את המוליך ומבצע עבודה שלילית, וכך שווה מכלול העבודה של **כוח לורנץ** לאפס.

במוליכים אחרים של המעגל ישווה הכא"מ לאפס, מכיוון שהמוליכים נייחים.
 לכן ישווה הכא"מ בכל המעגל MNCD ל- ϵ_i , ויישאר קבוע כל עוד מהירות
 התנועה \vec{v} נשארת קבועה.



ציור 42



ציור 43

תוך כדי התנועה יגדל זרם החשמל במעגל, מכיוון שבתנועת המוליך MN ימינה
 מתקצרים מוליכי המעגל, והתנגדותו הולכת וקטנה.

ניתן גם לחשב את הכא"מ המושרה בסיוע חוק ההשראה האלקטרומגנטית
 (2.4). נרשום את הביטוי לשטף המגנטי העובר דרך המעגל MNCD:

$$\Phi = BS \cos(90^\circ - \alpha) = BS \sin \alpha$$

כאשר: $90^\circ - \alpha$ – הזווית בין הוקטור \vec{B} לבין האנך \vec{n} למישור המעגל (ציור
 43); S – שטח המעגל MNCD. אם נניח שברגע ההתחלתי ($t = 0$) נמצא המוליך
 MN במרחק NC מהמוליך CD (ראו ציור 42), משתנה במהלך התנועה השטח S
 בזמן באופן הבא:

$$S = l(NC - vt)$$

בזמן Δt משתנה שטח המעגל ב- $\Delta S = -lv\Delta t$. הסימן מינוס מצביע שהשטח

הולך וקטן. שינוי השטף המגנטי בזמן זה שווה ל- $\Delta\Phi = -Blv \Delta t \sin \alpha$.

לכן:

$$\epsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv \sin \alpha$$

אם כל המעגל MNCD ינוע בשדה מגנטי אחיד וישמור על כיוונו יחסית
 לוקטור \vec{B} , יהיה הכא"מ המושרה במעגל שווה לאפס, מכיוון שהשטף Φ דרך

כא"מ מושרה במוליכים נייחים

המשטח המוקף על-ידי המעגל אינו משתנה. ניתן גם להסביר זאת כך: בזמן התנועה נוצרים במוליכים MN ו-CD כוחות (2.5), הפועלים על האלקטרונים בכיוונים מ-N ל-M ומ-C ל-D. העבודה הכוללת של כוחות אלה בהקפת המעגל שווה לאפס, והרי לא יזרום זרם במעגל ללא השקעת עבודה!

במוליכים, הנעים בשדה מגנטי קבוע, נוצר כא"מ מושרה הודות לפעולת כוח לורנץ על מטענים חופשיים במוליך.

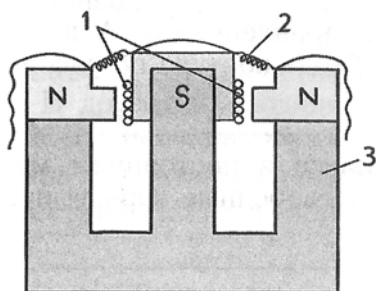
?

1. מהו ערכו של כוח לורנץ וכיצד הוא מכון?
2. במה תלוי הכא"מ המושרה הנוצר במוליך, הנע בשדה מגנטי המשתנה בזמן?

§14 מיקרופון אלקטרודינמי

בפרק 1 הכרתם רמקול אלקטרודינמי, ההופך את תנודות זרם החשמל לתנודות קול. התהליך ההפוך – המרת תנודות קול של אוויר לתנודות של זרם חשמל – מתבצע בעזרת המיקרופון.¹

מיקרופונים מצאו שימוש רחב בשידורי רדיו, טלוויזיה, מערכות להגברת קול, הקלטת קול, במערכות טלפונים ועוד. פעולת אחד המיקרופונים הנפוצים ביותר – המיקרופון האלקטרודינמי – מתבססת על השראה אלקטרומגנטית. מיקרופון זה בנוי באופן הבא: דיאפראגמה 2, העשויה מסרט פולימרי דק או מסרט אלומיניום, קשורה באופן קשיח לסליל קולי 1, העשוי מתיל דקיק (ציור 44). הסליל נמצא במרווחים של מגנט חזק קבוע 3, כמתואר. קווי השדה מאונכים לליפופי הסליל.



ציור 44

גלי קול גורמים לתנודות של הדיאפראגמה ושל הסליל הקשור אליה. ליפופי הסליל נעים בשדה מגנטי, ונוצר בהם כא"מ מושרה. על הדקי הסליל מופיע מתח משתנה, והוא גורם לתנודות זרם חשמלי במעגל המיקרופון.

¹ מהמילים היווניות מיקרוס – קטן, פונה – קול.

מיקרופון

לאחר הגברתן מועברות תנודות אלה לרמקול או למכשיר הקלטה.

למיקרופונים אלקטרודינמיים מבנה פשוט, והם קטנים ואמינים. תחום התדרים שבו הם פועלים הוא בין 50 ל-10,000 הרץ, ועיוותי התנודות בהם אינם גדולים.

במכשירי טלפון משתמשים במיקרופונים, הבנויים על בסיס התנגדות אבקת פחם. אלה פחות משוכללים, אך זולים. במיקרופונים מסוג זה לוחצת הדיאפראגמה על אבקת פחם ודוחסת אותה בהתאם לתנודותיה. הדחיסות המשתנה משנה את התנגדות האבקה, וכך משתנה עוצמת הזרם במעגל החשמלי של המיקרופון.

ברמקול גורם **כוח אמפר** להיווצרות תנודות של סליל ודיאפראגמה הקשורה אליו. במיקרופון מועברות תנודות הדיאפראגמה לסליל נייד, ונוצר בו זרם השראה.

?

1. האם ניתן להשתמש באחד מלוחותיו של קבל, המתנודד בהשפעת גל קול,

כרכיב הרגיש של המיקרופון? כיצד ומדוע?

§15 השראה עצמית, השקאות

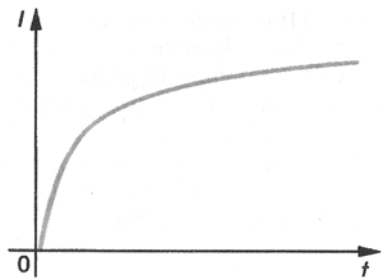
כאשר עובר בסליל זרם משתנה, משתנה בו גם השטף המגנטי. לכן נוצר כא"מ מושרה במוליך שעובר בו הזרם. תופעה זו מכונה **השראות עצמית**.

השראות עצמית

השראות עצמית נובעת משני אירועים המתרחשים במוליך: זורם בו זרם הגורם להשראה; ולכן מופיע בו כא"מ מושרה \mathcal{E}_s . לפי **חוק לנץ**, ברגע הופעת הזרם מכוונת עוצמת שדה המערבולת החשמלי נגד הזרם ומונעת את הגדלת עוצמתו. ולהפך: ברגע הפחתת עוצמת הזרם תומך בה שדה המערבולת ומנסה להגדילה.

כל זה גורם לכך שברגע סגירת מעגל, הכולל מקור כא"מ קבוע, אין ערך עוצמת הזרם מתייצב באופן מיידי, אלא בהדרגתיות במהלך הזמן (ציור 45). כאשר מנתקים את המקור, אין הזרם במעגל הסגור נפסק באופן מיידי. בנייתוק המעגל ייתכן שכא"מ ההשראות העצמית הנוצר יהיה גדול יותר מכא"מ המקור בשל שינוי מהיר בעוצמת הזרם, ובעקבותיו – שינוי בעוצמת השדה המגנטי.

השראה עצמית

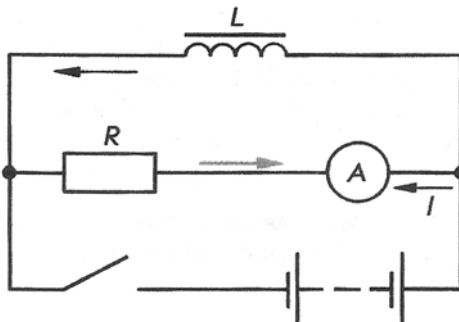


ציור 45

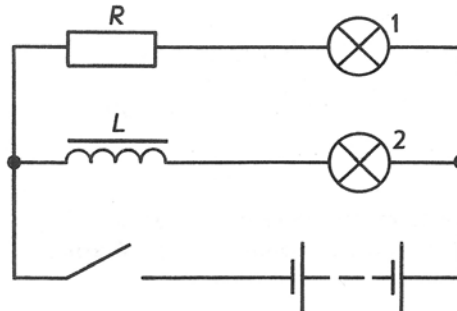
ניתן להיווכח בתופעת ההשראות העצמית בניסויים פשוטים. בציור 46 מתואר מערך חיבור במקביל של שתי נורות זהות. אחת מהן מחוברת למקור דרך הנגד R, והאחרת – בטור עם סליל L בעל ליבת ברזל.

כאשר סוגרים את המפסק, נדלקת הנורה הראשונה באופן מיידי, והשנייה – באיחור רב. כא"מ ההשראה העצמית במעגל נורה זו הוא גדול, ועוצמת הזרם מגיעה לערכה המרבי בהדרגה.

את הופעת הכא"מ המושרה במהלך הניתוק ניתן לראות בניסוי במעגל המתואר בציור 47. כאשר מנתקים את המפסק, מופיע בסליל L כא"מ מושרה, המחזק את הזרם ההתחלתי, ודרך הגליונומטר יעבור זרם (החץ האפור) המכוון נגד הזרם שהיה לפני הניתוק (החץ השחור). בעת ניתוק המעגל עשויה עוצמת הזרם להיות גדולה יותר מעוצמת הזרם העובר דרך הגליונומטר כאשר המפסק סגור, מכיוון שהכא"מ המושרה \mathcal{E}_{is} גדול יותר מכא"מ סוללת המקורות \mathcal{E} .



ציור 47



ציור 46

הקבלה בין השראות עצמית לבין התמד

תופעת ההשראות העצמית דומה לתופעת ההתמד במכניקה. התמד מסת הגוף מונע ממנו לקבל באופן מיידי מהירות מסוימת בפעולת כוח עליו, אלא באופן הדרגתי; כך גם אי-אפשר לבלום גוף בן-רגע, ולו בהפעלת כוח רב. בדומה לזאת, עקב ההשראה העצמית אין עוצמת הזרם מקבלת את הערך המרבי מיד בסגירת המעגל, אלא גדלה בהדרגתיות. ניתוק המקור אינו גורם להפסקה מיידי של הזרם במעגל, משום שההשראות העצמית תומכת בו זמן-מה למרות התנגדות המעגל.

השראה עצמית

בהתאם לחוקי המכניקה, כדי להאיץ גוף יש לבצע עבודה נגד כוחות החיכוך. במהלך הבלימה מבצע הגוף בעצמו את אותה עבודה. בדומה לכך, כדי ליצור זרם במוליך יש לבצע עבודה נגד שדה המערבולת החשמלי; וכאשר הזרם הולך ונעלם, השדה – הוא המבצע את אותה עבודה. ערכה האלגברי הכולל של העבודה בשני המקרים ישווה לאפס.

השראות

הגודל B של וקטור השדה המגנטי, הנוצר על-ידי הזרם, פרופורציונלי לעוצמת הזרם. מכיוון שהשטף המגנטי Φ פרופורציונלי ל-B, אזי: $\Phi \sim B \sim I$. אפשר אפוא לטעון ש:

$$(2.7) \quad \Phi = LI$$

כאשר L – מקדם פרופורציה בין הזרם במעגל מוליך לבין השטף המגנטי העובר דרך מעגל זה. הגודל L מכונה **השראות המעגל** או **מקדם ההשראה העצמית**. נשתמש בחוק ההשראה האלקטרומגנטית ובביטוי (2.7), ובהניחנו שצורת המעגל נשארת קבועה, ושהשטף משתנה עקב שינוי עוצמת הזרם בלבד, נקבל את השוויון:

$$(2.8) \quad \varepsilon_{is} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

מהנוסחה (2.8) נובע **שההשראות היא גודל פיזיקלי, השווה לכא"מ של ההשראה העצמית המופיעה במעגל עקב שינוי הזרם ב-1 אמפר בזמן 1 שנייה**. בדומה לקיבול תלויה **ההשראות** בגורמים גיאומטריים, כגון מידות המוליך וצורתו, ואינה תלויה בעוצמת הזרם במוליך. מלבד בגיאומטריית המוליך תלויה ההשראות בתכונות המגנטיות של התווך שבו נמצא המוליך.

יחידת **ההשראות** במערכת היחידות SI מכונה **הנרי (H)**. ההשראות של מוליך שווה ל-1 הנרי, אם מופיע בו כא"מ מושרה של 1 וולט, כאשר הזרם משתנה ב-1 אמפר בזמן של 1 שנייה:



$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V}}{1 \frac{\text{A}}{\text{sec}}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{sec}}{\text{A}}$$

תופעת ההשראות העצמית חשובה ביותר בהנדסת חשמל ובהנדסת רדיו. ההשראות של מעגל משפיעה באופן משמעותי בהעברת זרם חילופין. נדון בכך מאוחר יותר, בפרק 4.

כאשר משתנה עוצמת הזרם העובר במוליך, נוצר שדה מערבולת חשמלי. שדה זה בולם את האלקטרונים כאשר הזרם גדל, ומאיץ אותם כאשר הוא פוחת.

?

1. מהי השראות עצמית?
2. כיצד מכוונים, יחסית לזרם, קווי שדה המערבולת החשמלי במוליך, כאשר הזרם גדל, וכאשר הוא קטן?
3. מהי ההשראות של מוליך?
4. מהי יחידת ההשראות במערכת SI?
5. למה שווה הכא"מ של ההשראות העצמית?

S16 אנרגיית השדה המגנטי של זרם החשמל

נמצא את האנרגיה של זרם חשמל במוליך. בהתאם לחוק שימור האנרגיה, שווה אנרגיית השדה המגנטי, הנוצר על-ידי הזרם, לאנרגיה שהשקיע מקור הזרם (תא גלווני, מחולל בתחנת חשמל וכד') כדי ליצור את הזרם. כאשר נפסק הזרם, נפלטת אנרגיה זאת בצורה זו או אחרת.

נבדוק מדוע נחוצה השקעת אנרגיה, דהיינו ביצוע עבודה, כדי ליצור זרם.

בעת סגירת המעגל, כאשר הזרם מתחיל לגדול, נוצר במוליך שדה מערבולת חשמלי הפועל נגד השדה החשמלי, שנוצר במוליך על-ידי מקור הזרם. כדי שעוצמת הזרם תגיע לערכה I, חייב מקור הזרם לבצע עבודה נגד כוחות שדה המערבולת; עבודה זו מושקעת באנרגיית השדה המגנטי של הזרם.

כאשר נפתח המפסק ונפסק הזרם, מבצע שדה המערבולת עבודה: האנרגיה הנאגרת בזרם נפלטת ומתגלה בניצוץ, שנוצר בעת ניתוק מעגל בעל השראות גדולה.

אנרגיית השדה המגנטי של זרם חשמל

אפשר לרשום ביטוי לאנרגיית הזרם I, העובר במעגל בעל השראות L (דהיינו, לאנרגיית השדה המגנטי של הזרם), בהתבסס על הדמיון בין ההתמד המכני לבין ההשראות העצמית, עליו הרחבנו בסעיף 15.

אם ההשראות העצמית דומה להתמדה, דומה תפקיד ההשראות בתהליך יצירת הזרם לתפקיד המסה במהלך הגברת מהירות הגוף. באלקטרו דינמיקה מקבילה מהירות הגוף לעוצמת הזרם I, המאפיינת את תנועתם של מטענים חשמליים.

את האנרגיה של הזרם W_M ניתן אפוא להשוות לאנרגיה הקינטית $\frac{mv^2}{2}$ במכניקה, ולרשום אותה בצורה:

$$(2.9) \quad W_M = \frac{LI^2}{2}$$

ביטוי זה לאנרגיית הזרם מתקבל גם כתוצאה מחישובים מדויקים.

אנרגיית הזרם (2.9) תלויה באפיון L של המוליך ובעוצמת הזרם I העובר דרכו; אולם את אותה אנרגיה אפשר לבטא גם באמצעות מאפייני השדה. החישובים מראים שצפיפות האנרגיה של שדה מגנטי (האנרגיה של יחידת נפח) פרופורציונלית לריבוע עוצמת השדה המגנטי – בדומה לצפיפות האנרגיה של שדה חשמלי, הפרופורציונלית לריבוע עוצמת השדה החשמלי.

שדה מגנטי, הנוצר על-ידי זרם חשמל, אוצר אנרגיה הפרופורציונלית לריבוע עוצמת הזרם.

?

1. כדי ליצור זרם ממקור הזרם נחוץ להשקיע אנרגיה.

מדוע?

2. למה שווה אנרגיית הזרם החשמלי?

אנרגיית השדה המגנטי של זרם חשמל

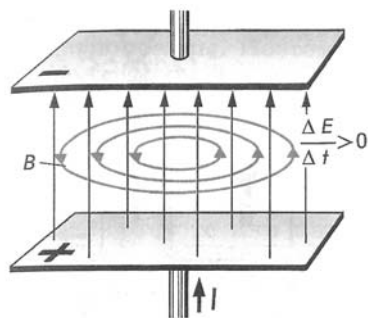
במהלך חקירת תכונות השדה האלקטרומגנטי העלה **מקסוול** את ההשערה הבאה: אם שדה מגנטי משתנה יוצר שדה חשמלי, צריך להתקיים בטבע תהליך הפוך: שדה חשמלי משתנה יוצר שדה מגנטי. האמונה במבנה ההרמוני של חוקי הטבע ובשלמותם היא הרקע להשערה של **מקסוול**.

היווצרות שדה מגנטי בעת שינוי השדה החשמלי

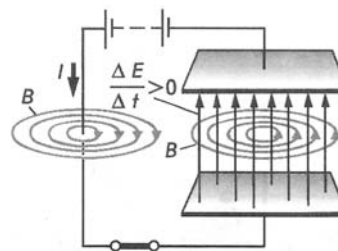
מקסוול הניח שתהליך זה אכן מתרחש בטבע. בכל המקרים **כאשר השדה החשמלי משתנה בזמן, הוא יוצר שדה מגנטי**. קווי השדה המגנטי הנוצר עוקפים את קווי השדה החשמלי, כפי שקווי השדה החשמלי עוקפים את קווי השדה המגנטי; אולם כעת, כאשר השדה החשמלי גדל $\left(\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0\right)$, סובב וקטור השדה המגנטי \vec{B} במגמת התקדמות בורג הברגה ימנית עם מגמת השדה \vec{E} (ראו ציור 48).

כאשר השדה החשמלי הולך וקטן $\left(\frac{\Delta E}{\Delta t} < 0\right)$, סובב וקטור השדה \vec{B} במגמת סיבוב הפוכה להתקדמות בורג הברגה ימנית במגמת הווקטור \vec{E} .

בהתאם לרעיון של **מקסוול**, מקורו של השדה המגנטי, הנוצר בעת סגירת מעגל הקבל, אינו רק הזרם העובר במוליך, אלא גם השדה החשמלי המשתנה, הקיים במרחב בין לוחות הקבל (ראו ציור 49); השדה החשמלי המשתנה יוצר את אותו שדה מגנטי, שיוצר הזרם החשמלי העובר בין הלוחות, והוא שווה בגודלו לזרם העובר במוליך. הרעיון של **מקסוול** הוכח באופן ניסויי, כאשר גילו את הגלים האלקטרומגנטיים. גלים אלה קיימים הודות לשדה מגנטי משתנה, היוצר שדה חשמלי משתנה, שבתורו יוצר שדה מגנטי משתנה וכו'.



ציור 48



ציור 49

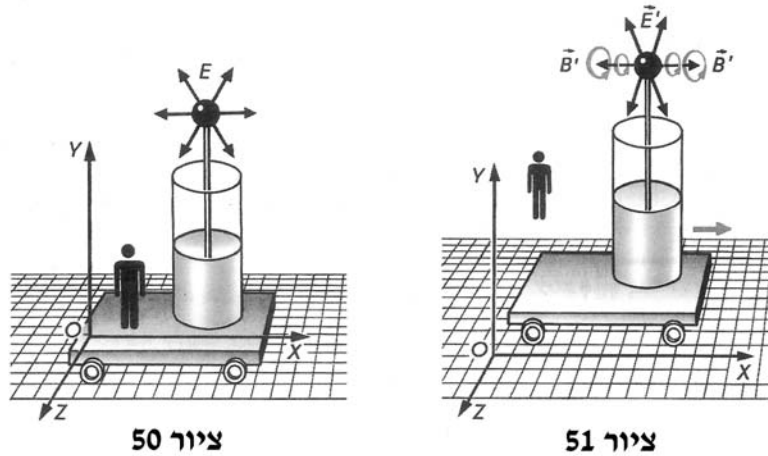
השדה האלקטרומגנטי

לאחר גילוי הקשר ההדדי בין השדה החשמלי המשתנה לשדה המגנטי המשתנה, ברור היה ששדות אלה אינם יכולים להתקיים בנפרד ובאופן בלתי תלוי זה בזה.

אי-אפשר ליצור שדה מגנטי משתנה בלא שבו-זמנית ייווצר במרחב שדה חשמלי; ולהפך: שדה חשמלי משתנה לא יכול להתקיים ללא שדה מגנטי משתנה.

אכן שדה חשמלי יכול להתקיים בלא שדה מגנטי, ושדה מגנטי יכול להתקיים בלא שדה חשמלי – אבל במערכת ייחוס מסוימת בלבד. כך, לדוגמה, מטען נייח יוצר שדה חשמלי בלבד (ראו ציור 50), כאשר הוא נייח במערכת ייחוס מסוימת; אם ינוע, ייווצר גם שדה מגנטי יחסית לכל מערכת אחרת (ראו ציור 51).

לדוגמה: במערכת ייחוס, הקשורה למגנט קבוע, נוצר שדה מגנטי בלבד; אולם צופה, הנע יחסית למגנט, יגלה גם שדה חשמלי, משום שבמערכת ייחוס, הנעה יחסית למגנט, משתנה השדה המגנטי במהלך הזמן שהצופה מתקרב אל המגנט או מתרחק ממנו, ושדה מגנטי המשתנה בזמן יוצר שדה מערבולת חשמלי.



ציור 50

ציור 51

הקביעה, שבנקודה מסוימת של המרחב קיים שדה חשמלי בלבד או שדה מגנטי בלבד היא אפוא חסרת משמעות, אם לא נציין באיזו מערכת ייחוס מתוארים השדות. העדר שדה חשמלי במערכת ייחוס, שבה נמצא מגנט נייח, אינו מלמד ששדה חשמלי איננו קיים; בכל מערכת, הנעה יחסית למגנט, קיים השדה החשמלי.

השדה החשמלי והשדה המגנטי הם התגלות שדה אחד ושלים: **השדה**

השדה האלקטרומגנטי

האלקטרומגנטי, והוא צורה מיוחדת של תווך, המעביר פעולות הדדיות בין חלקיקים טעונים. במערכות ייחוס, שבהן נחקרים תהליכים אלקטרומגנטיים, מתגלה פן זה או אחר של השדה המאוחד: **השדה האלקטרומגנטי**.

לפי הרעיון של **מקסוול**, שדה חשמלי משתנה יוצר שדה מגנטי. השדה האלקטרומגנטי מאוחד ושלם, אך במערכות ייחוס שונות מתגלות תכונות שונות של השדה האלקטרומגנטי.

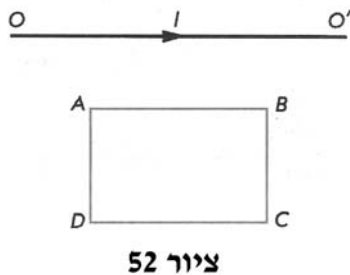
?

1. כתוצאה מאילו תהליכים נוצר שדה מגנטי?

2. הטענה: "בנקודה נתונה של המרחב קיים שדה חשמלי בלבד"

אינה מדויקת. מדוע?

דוגמאות לפתרון תרגילים



1. מעגל מלבני ABCD נע בתנועת העתקה בשדה מגנטי, הנוצר על-ידי זרם הזורם בתיל ישר וארוך (ראו ציור 52). מצאו את כיוונו של הזרם המושרה במעגל, כאשר הוא מתרחק מהתיל. אילו כוחות פועלים על המעגל?

פתרון

וקטור השדה המגנטי \vec{B} , הנוצר על-ידי הזרם I, מכיוון בניצב למישור המעגל ואל תוך הדף. כאשר המעגל מתרחק מהתיל, הולך וקטן השטף המגנטי דרך המעגל ABCD ($\Delta\Phi < 0$). לכן וקטור השדה המגנטי \vec{B} , הנוצר על-ידי הזרם המושרה I_i , מכיוון, על-פי **חוק לנץ**, במגמת הווקטור \vec{B}' אל תוך הדף. נשתמש בכלל הבורג הימני ונמצא שהזרם, המושרה במעגל, מכיוון במגמת מחוגי השעון.

ההשפעה ההדדית של הזרמים העוברים במעגל ובתיל הישר גורמת להופעת כוחות, הפועלים על מוליכי המעגל. בעזרת "כלל יד שמאל" ניתן להסיק, שהכוחות האלה מותחים את המסגרת כדי להגדיל את שטח המעגל, ויוצרים כוח שקול על התיל הישר למניעת התרחקותו מהמעגל. **שתי פעולות אלה מועילות למניעה של הקטנת השטף המגנטי דרך המעגל.**

השדה האלקטרומגנטי

2. טבעת על-מוליכה נמצאת בשדה מגנטי אחיד, כאשר עוצמתו גדלה מאפס ל- B_0 . מישור הטבעת ניצב לקווי השדה. מצאו את עוצמת הזרם המושרה בטבעת. רדיוס הטבעת – r , וההשראות – L .

פתרון

מכיוון שהתנגדות הטבעת שווה לאפס, צריך להתאפס גם ערכו של הכא"מ הכללי – אחרת, על-פי חוק אום, תהיה עוצמת הזרם אינסופית. לכן שינוי השטף המגנטי של השדה חיצוני ישווה בגודלו ויהיה נגדי בסימנו לשינוי השטף הנוצר על ידי הזרם המושרה:

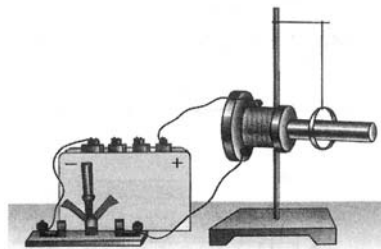
$\Delta\Phi = L \Delta I$. נביא בחשבון שהשטף Φ_0 גדל מ- 0 עד ל- $\pi r^2 B_0$, והזרם המושרה השתנה מ- 0 עד I , ונקבל: $\pi r^2 B_0 = LI$. ומכאן התשובה:

$$I = \frac{\pi r^2 B_0}{L}$$

מקבץ תרגילים 2

1. במעגל המתואר בציור 33 סגרו את המפסק וגילו, שמגמת הזרם בסליל התחתון כנגד מגמת השעון במבט-על. מהי מגמתן הזרם בסליל העליון כשהוא ניח?
2. מוציאים את המגנט מהסליל (ראו שרטוט 34). מצאו את מגמת הזרם המושרה בסליל.
3. מצאו את מגמת הזרם המושרה בטבעת שלמה שמקרבים אליה את המגנט (ראו ציור 37).
4. עוצמת הזרם במוליך OO' הולכת וקטנה (ראו ציור 52). מצאו את מגמת הזרם המושרה במעגל הניח $ABCD$, ואת כיווני הכוחות הפועלים על כל צלע מצלעות המעגל.

5. טבעת מתכתית עשויה לנוע חופשית על גבי ליבת סליל, המחובר למעגל זרם ישר (ציור 53). מה יקרה בסגירה המעגל ובפתיחתו?



ציור 53

השדה האלקטרומגנטי

6. עוצמת הזרם במעגל גדלה ביחס ישר לזמן. מהי תלות עוצמת הזרם בזמן בסליל אחר, הקשור באופן השראתי לסליל הראשון?
7. באיזה מקרה דועכות מהר יותר תנודות המחוג של מכשיר מדידה מגנטואלקטרי: כאשר הדקי המכשיר מקוצרים, או כאשר הם פתוחים?
8. השטף המגנטי דרך מעגל מוליך, בעל התנגדות $3 \cdot 10^{-2} \Omega$, השתנה במהלך 2 שניות ב- $1.2 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$. מצאו את עוצמת הזרם במוליך, אם ידוע ששינוי השטף התרחש בקצב קבוע.
9. מטוס טס בכיוון אופקי במהירות 900 קמ"ש. מצאו את הפרש הפוטנציאלים בין קצות כנפי המטוס, אם גודל הרכיב האנכי של השדה המגנטי של כדור הארץ שווה ל- $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$, ואורך מוטת הכנפיים 12 מ'.
10. עוצמת הזרם, הזורם דרך סליל, בעל השראות 0.15 H והתנגדות קטנה מאוד r , היא 4 A. במקביל לסליל חיברו נגד בעל התנגדות $R \gg r$. מהי כמות החום שתיפלט בסליל ובנגד לאחר ניתוק מהיר של מקור הזרם?

תקציר פרק 2

1. תופעת ההשראות האלקטרומגנטית היא היווצרות של כ"מ מושרה במעגל סגור, המתרחשת בזמן שינוי השטף המגנטי דרך השטח המוקף במעגל זה. על תופעה זו מבוססת פעולת הגנרטורים בכל תחנות החשמל בעולם. על-פי חוק ההשראה האלקטרומגנטית, שווה כ"מ מושרה במעגל סגור לקצב שינוי השטף המגנטי בסימן מינוס:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

2. לפי חוק לנץ, זרם מושרה הנוצר במעגל סגור "מתנגד", באמצעות השדה המגנטי שהוא יוצר, לשינוי השטף המגנטי היוצר את הזרם.

3. הכוח החיצוני במוליך נייח פועל על המטענים מצדו של שדה מערבולת חשמלי, הנוצר על-ידי שדה מגנטי משתנה. במוליך נע הכוח החיצוני הוא כוח לורנץ, הפועל על המטענים הנעים עם המוליך.



4. מקרה חשוב של השראה אלקטרומגנטית הוא השראות עצמית: השדה המגנטי המשתנה יוצר כא"מ במוליך, שזורם בו זרם משתנה שיצר את השדה המגנטי. ערך הכא"מ המושרה נמצא ביחס ישר לקצב שינוי עוצמת הזרם במוליך:

$$\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

5. המקדם L מכונה השראות. ההשראות תלויה במידותיו ובצורתו של המוליך, וגם בתכונות התווך שבו הוא נמצא. יחידת ההשראות היא הנרי:

$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{sec}}{\text{A}}$$

6. אנרגיית השדה המגנטי שווה לעבודה, שצריך לבצע מקור הזרם, כדי ליצור את הזרם הנתון:

$$E_M = \frac{LI^2}{2}$$

7. ניתוח תופעת ההשראות האלקטרומגנטית הוביל את מקסוול למסקנה לגבי הינוצרות שדה מערבולת חשמלי על-ידי שדה מגנטי משתנה. הוא הניח שבאופן דומה יוצר שדה מערבולת חשמלי את שדה המערבולת המגנטי.