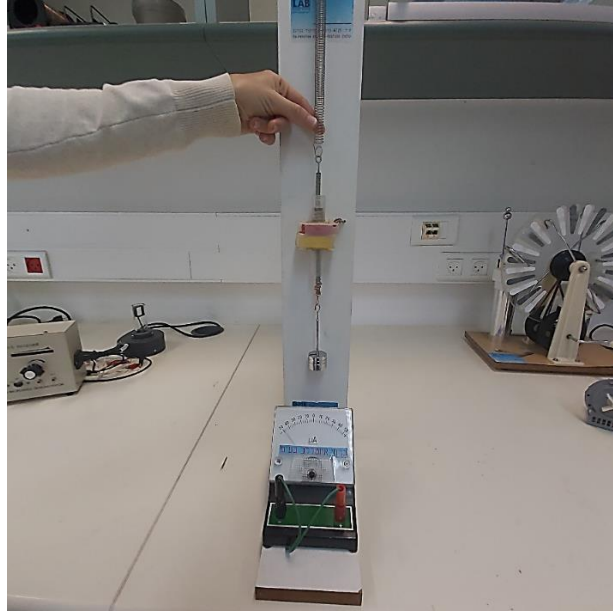


כוח אלקטרומניע מושרה – Electro Motif Force

ד"ר אמנון יוסף

1. מבוא

מייקל פרדיי (Michael Faraday) וג'וזף הנרי (Joseph Henry) – פרדיי פרסם ראשון, גילו בשנת 1831 באופן בלתי תלוי את תופעת הכא"מ המושרה. הם מצאו שאם משנים עוצמת זרמים חשמליים ואת מגמתם, פועל כוח על מחט של מצפן (מומנט כוח) והיא סוטה ממצבה המקורי (כיוון הצפון הגיאוגרפי של כדור הארץ). בנוסף, פרדיי הניח את קיומם של קווי השדה המגנטי כדי להימנע מפעולתו של כוח מרחוק – ללא מגע. אם כך, אם אנו מניחים סימטריה של התופעות, שינויים הקשורים לשדה המגנטי יכולים לגרום לזרמים חשמליים. ג'יימס קלרק מקסוול (James Clerk Maxwell) שהמשיך והרחיב את עבודתו של פרדיי, ניסח קשר זה המתואר על ידי התופעה למעלה, באמצעות ארבע משוואות מתמטיות שלאחר התפתחות בצורת כתיבתן נקראות "משוואות מקסוול" (בתחילה הן היו 20 משוואות ולאחר התפתחותן, הן נרשמות כ- 4 משוואות) והן מתארות את האינטראקציה האלקטרומגנטית (כולל את הקרינה האלקטרומגנטית). אחת ממשוואות אלו נקראת "חוק פרדיי". אנו נדבר על התופעה הקשורה להיווצרות מתח חשמלי – כא"מ מושרה, בעטיו של שינוי בשדה מגנטי או תנועה בתוך השדה המגנטי. באיור מספר 1 ניתן לראות את ההשפעה של הכא"מ המושרה, על ידי מדידת זרם חשמלי ("זרם חשמלי מושרה"). כפי שניתן לראות, מחט מד הזרם סוטה כאשר המגנט עובר דרך הסליל. אם נשנה את כיוון מעבר המגנט, הזרם ישנה את מגמתו והמחט תסטה לכיוון הנגדי. בנוסף, מהירות המגנט העובר דרך הסליל תשנה את מידת סטיית מחט האמפרמטר – ככל שהמהירות תהיה גדולה יותר, סטיית המחט תהיה גדולה יותר. ניתן לחזור על ניסוי זה ולגלות שהדבר הקובע את תוצאות הניסוי הוא המהירות היחסית בין הסליל והמגנט (העברת מגנט דרך סליל ניח, שוות ערך להעברת סליל סביב מגנט ניח) תופעה דומה תתקבל אם נקרב אחת לשנייה, שתי לולאות זרם ובאחת מהן נשנה את הזרם החשמלי על ידי פתיחה וסגירה של מפסק. בלולאה השנייה ניתן יהיה לראות קריאת זרם חשמלי, על ידי מד זרם, למרות שלולאה זו לא מחוברת למקור מתח חיצוני. נשים לב לכך שבמקרה של לולאות הזרם, אין אובייקטים נעים (חוץ מאשר ברמה המיקרוסקופית – אלקטרוני הולכה ותנועה תרמית של יוני החומר).

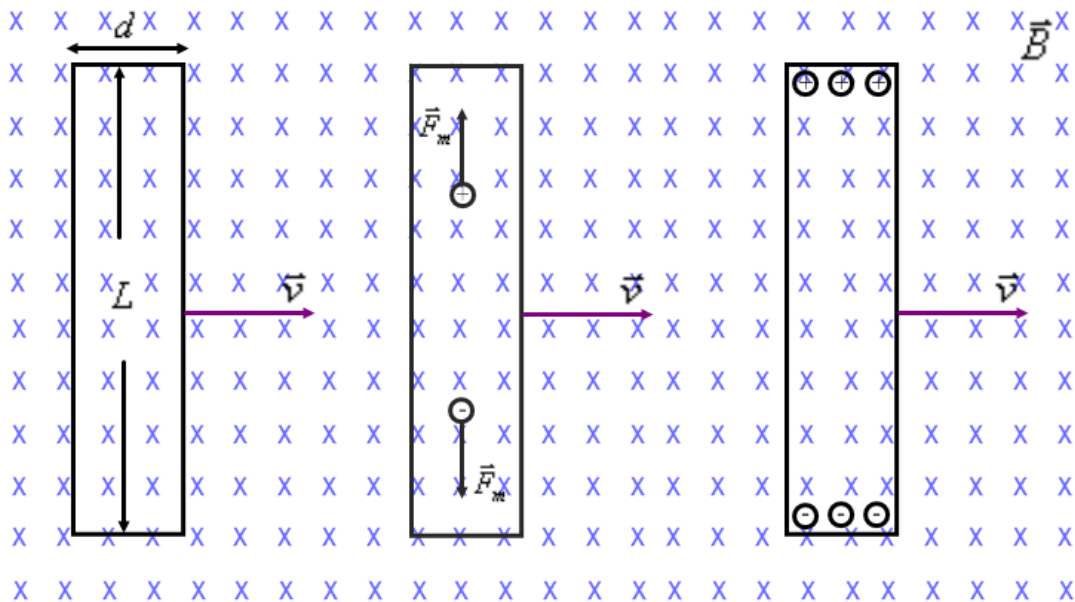


איור מספר 1: זרם מושרה בסליל בעטיו של מגנט העובר דרכו

2. כא"מ מושרה עקב תנועת מוט מוליך בשדה מגנטי

נדבר תחילה על יצירת כא"מ מושרה במוט הנע בשדה מגנטי אחיד – כא"מ תנועתי (כא"מ הקשור למהירות תילים). נסתכל על מוט מוליך שאורכו L ורוחבו d והם מקיימים את היחס $d \ll L$. המוט נע

במהירות \vec{v} בשדה מגנטי אחיד \vec{B} כמוראה באיור.



נושאי המטען הנמצאים במוט נעים עם המוט במהירות \vec{v} גם כן ולכן הם מרגישים את הכוח המגנטי (נניח לשם הפשטות שמהירות המוט ניצבת לשדה המגנטי). לפי כלל יד ימין, הכוח הפועל על נושאי המטען החיוביים הוא כלפי מעלה ואילו הכוח הפועל על המטענים השליליים הוא כלפי מטה. מכיוון שפועל עליהם כוח, על פי החוק השני של ניוטון, הם חווים תאוצה ובמקרה זה הם נעים בכיוון התאוצה. נוצרים ריכוזי מטען בקצות המוט ובעטיים נוצר שדה חשמלי בתוך המוט, כמראה באיור משמאל. הכוח



החשמלי הפועל על נושאי המטען מנוגד בכיוונו לכוח המגנטי הפועל עליהם. ריכוזי המטען בקצות המוט ימשיכו לגדול עד שהמערכת תגיע למצב של שיווי משקל.

על פי החוק הראשון של ניוטון, אם נושאי המטען בשיווי משקל, מתקיים:

$$\sum \vec{F} = 0$$

נשמיט סימני וקטורים מכיוון שהם כולם על קו ישר ונקבל, $q\vec{E}$ ו- $q\vec{E}$

$$\vec{F}_{el} - \vec{F}_m = 0$$

כאשר \vec{F}_m הוא הכוח המגנטי ו- \vec{F}_{el} הוא הכוח החשמלי הפועלים על נושאי המטען. נציב את הביטויים עבור הכוח החשמלי והכוח המגנטי ונקבל את המשוואה,

$$qvB - qE = 0 \quad (\alpha = \angle(\vec{B}, \vec{v}), \alpha = 90^\circ)$$

מלימוד נושא החשמל, אנו מכירים את הקשר בין השדה החשמלי לבין המתח החשמלי (הפרש הפוטנציאלים).

$$E = -\frac{\Delta\phi}{\Delta x}$$

במקרה שלנו הביטוי עבור השדה החשמלי מקבל את הצורה: $E = \frac{V}{L}$

כאשר L הוא אורכו של המוט המוליך ו- V הוא המתח הנוצר בין קצותיו. נציב זאת במשוואה המתקבלת מהחוק הראשון של ניוטון,

$$qvB - q\frac{V}{L} = 0$$

נחלק את שני האגפים במטען q ונקבל,

$$vB - \frac{V}{L} = 0$$

נחלץ את V ונקבל את המשוואה עבור הכא"מ המושרה,

$$V = vBL$$

אם ישנה זווית α בין מהירות המוט לבין השדה המגנטי, מקבלים את הביטוי:

$$V = vBL \sin\alpha$$

כאשר, $\alpha = \angle(\vec{B}, \vec{v})$.

3. שטף מגנטי

נגדיר את השטף המגנטי להיות (מספר קווי השדה העוברים דרך יחידת שטח):

$$\Phi = B \cdot A_{\parallel} = B \cdot A \cdot \cos\alpha$$

כאשר, B - עוצמת השדה המגנטי.

$$[B] = T$$

A - אלמנט השטח דרכו נמדד או מחושב השטף המגנטי.

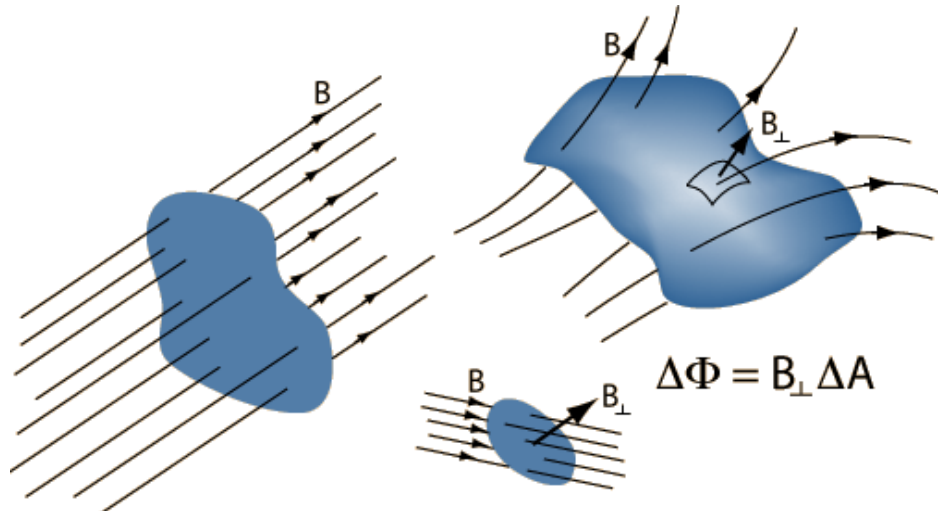
$$[A] = m^2$$

α - הזווית בין וקטור השטח לשדה המגנטי.

Φ - השטף המגנטי דרך אלמנט השטח.

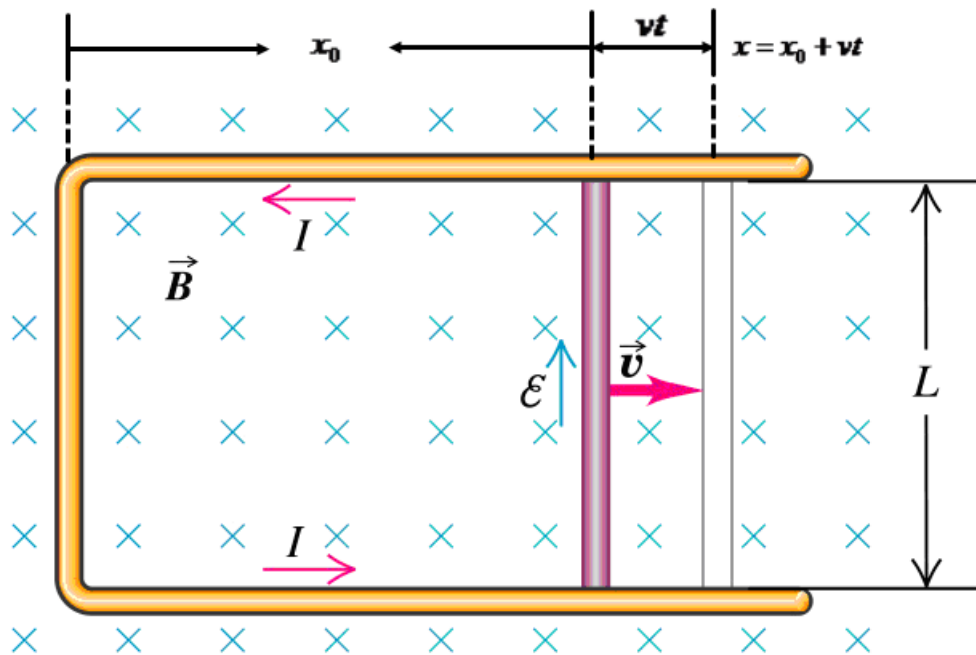
$$[\Phi] = T \cdot m^2 = Wb \text{ (Weber)}$$

ננסה להבין את משמעותו של השטף המגנטי באמצעות האיור בעמוד הבא. כפי שניתן לראות, השטף המגנטי נקבע רק על ידי רכיב השטח המאונך לשדה המגנטי או ניתן לומר גם, על ידי רכיב השדה המאונך לאלמנט השטח.



4. כא"מ מושרה בכריכה סגורה

נתון מוט מוליך אשר מתחיל לנוע במהירות קבועה \vec{v} ימינה במרחק x_0 מהקצה השמאלי של הכריכה (לולאה). כל הכריכה עשויה מחומרים מוליכים. נחשב את השטף דרך הכריכה (נציין שנוסחה זו עבור השטף המגנטי נכונה, רק אם השדה המגנטי קבוע בגודלו והזווית אותה הוא יוצר עם ווקטור אלמנט השטח, קבועה גם כן):



$$\Phi = B \cdot A_{\parallel}$$

$$S = L(x_0 + vt) = Lx_0 + Lvt$$

$$\Phi = B(Lx_0 + Lvt) = BLx_0 + BLvt$$

נחשב את הנגזרת לפי הזמן של השטף דרך הכריכה.

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(BLx_0 + BLvt)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = vBL$$

זהו הביטוי שקבלנו בסעיף (1) עבור הכא"מ המושרה. לפי כלל המעבר נקבל את החוק הנקרא "**חוק פרדיי**".

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

סימן המינוס בחוק פרדיי נקרא "**חוק לנץ**" ומשמעותו היא **שהזרם הנוצר כתוצאה מהכא"מ המושרה, מתנגד לסיבת יצירתו**. את מגמת הזרם, כמוראה באיור למעלה, ניתן לקבוע על פי כלל היד וחוק לנץ.