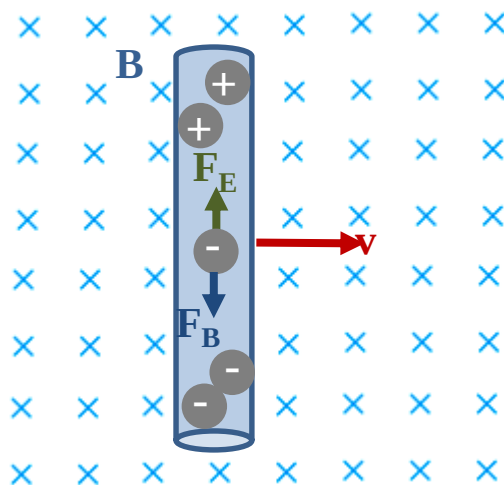


אלקטרודינמיקה

כא"מ מושרה



- ❖ במוליך נע החותך תוך כדי תנועתו קווי שדה מגנטי ובניצב להם, נוצר זרם השראה, שעוצמתו תלויה במהירות התנועה היחסית של המוליך, בעוצמת השדה המגנטי ובאורך המוליך החותך את קווי השדה.
- ❖ הפרש הפוטנציאלים המתפתח במוט מוליך כתוצאה מתנועתו בשדה מגנטי נקרא כא"מ מושרה. גודלו של הכא"מ המושרה בין קצות המוט הוא:

$$\mathcal{E} = vLB$$

- ❖ חיבור המוט למסגרת המוליכה כמוהו כחיבור סוללה למעגל. כתוצאה מכך נוצר זרם מושרה שגודלו:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{vLB}{R}$$

- ❖ על מוליך הנע בתוך שדה מגנטי פועל כוח שמפעיל השדה המגנטי B על הזרם I הזורם במוליך. כוח זה נקרא כוח מושרה, שכיוונו מנוגד לכיוון תנועת המוט, וגודלו:

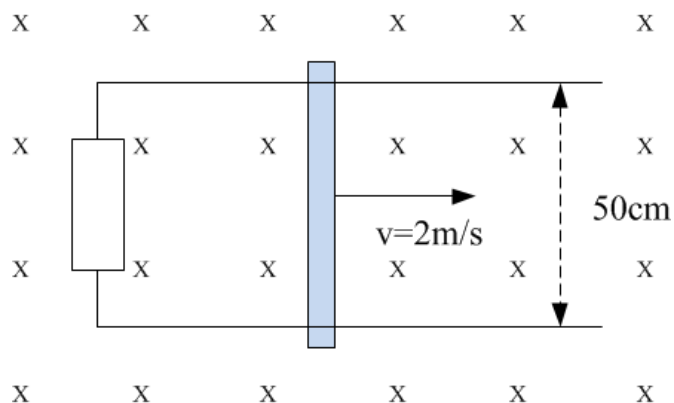
$$F = I \cdot L \cdot B = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot L \cdot B = \frac{vLB}{R} \cdot L \cdot B = \frac{vL^2 B^2}{R}$$

- ❖ עבודת הכוח החיצוני היא המקור לאנרגיה המתפתחת בנגד.

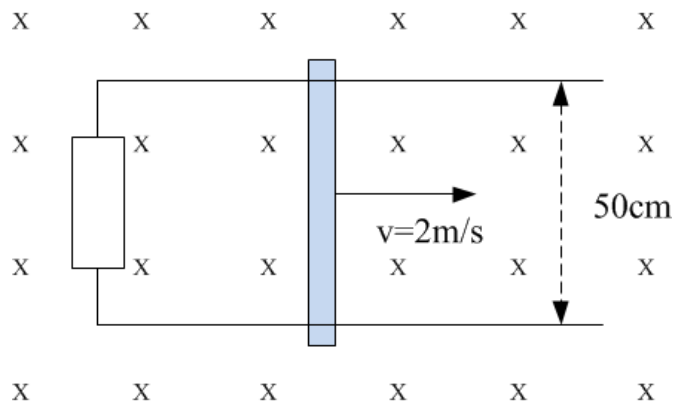
מוט מוליך מחליק במהירות קבועה על מסגרת מוליכה ויוצר מעגל סגור כמוראה באיור. עוצמת השדה המגנטי היא $B=0.15[T]$, וההתנגדות הכללית של המעגל היא 3 א.ו. .

א- מדוע נדרש כוח קבוע על מנת לקיים את התנועה?

ב- מהו הכוח הדרוש על מנת לקיים את התנועה הזאת?



מוט מוליך מחליק במהירות קבועה על מסגרת מוליכה ויוצר מעגל סגור כמוראה באיור. עוצמת השדה המגנטי היא $B=0.15[T]$, וההתנגדות הכללית של המעגל היא 3 אום.

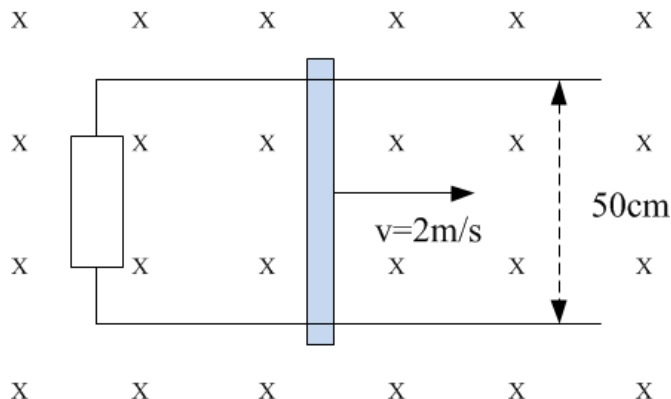


א- מדוע נדרש כוח קבוע על מנת לקיים את התנועה?

המוט מצוי בתנועה בכיוון ימין, והשדה המגנטי מכוון אל תוך הדף. לכן, על האלקטרונים החופשיים שבמוט יפעל כוח שכיוונו מטה.

כתוצאה מכך במעגל הסגור יזרום זרם של אלקטרונים בכיוון השעון. על האלקטרונים הנעים במוט יפעל כעת כוח שכיוונו שמאלה, כלומר כוח המתנגד לכיוון התנועה של המוט.

לכן, על מנת לקיים את התנועה הקצובה שבנתון, יש להפעיל על המוט כוח קבוע במגמה ימינה.



ב- מהו הכוח הדרוש על מנת לקיים את התנועה הזאת?

על מנת לקיים את התנועה במהירות קבועה, הכוח המניע את המוט ימינה צריך להשתוות לכוח המגנטי הפועל על המוט בכיוון שמאלה. נסמן ב- F' את הכוח הפועל ימינה:

$$F' = F_{\text{magnetic}} = ILB$$

נציב את הביטוי לזרם ולכא"מ ונציב:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

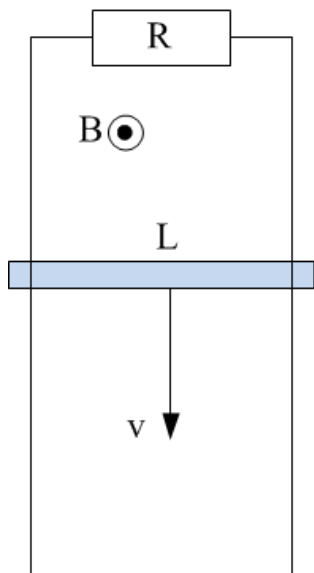
$$F' = F_{\text{magnetic}} = \frac{\mathcal{E}}{R} LB = \frac{vL^2 B^2}{R}$$

$$F' = \frac{2 \cdot 0.5^2 \cdot 0.15^2}{3} = 0.00375\text{N}$$

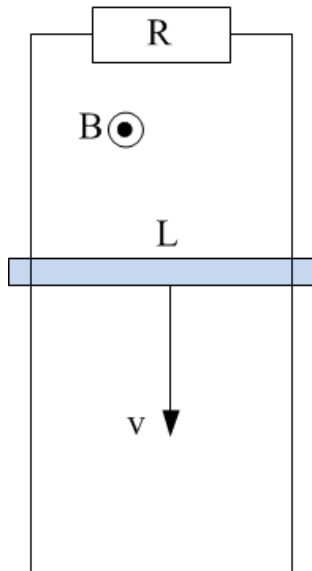
מוליך שאורכו L ומסתו m מחליק מטה על גבי מסגרת מוליכה בעלת התנגדות R , כמוראה באיור. בכל המרחב מצוי שדה מגנטי B שכיוונו החוצה מהדף. אפשר להזניח את כוח החיכוך.

א- מהו גודלו וכיוונו של הכוח המגנטי הפועל על המוליך?

ב- מהי המהירות המקסימלית אליה יגיע המוליך?



מוליך שאורכו L ומסתו m מחליק מטה על גבי מסגרת מוליכה בעלת התנגדות R , כמוראה באיור. בכל המרחב מצוי שדה מגנטי B שכיוונו החוצה מהדף. אפשר להזניח את כוח החיכוך.



א- מהו גודלו וכיוונו של הכוח המגנטי הפועל על המוליך?

במהלך הנפילה נוצר במוט כאם מושרה כתוצאה מהכוח הפועל על האלקטרונים הנעים מטה. גודלו של הכא"מ המושרה הוא:

$$\mathcal{E} = vLB$$

הכא"מ המושרה יוצר זרם שכיוונו במוט הוא שמאלה, וגודלו:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

על הזרם הזה פועל כוח מגנטי שכיוונו מעלה, וגודלו:

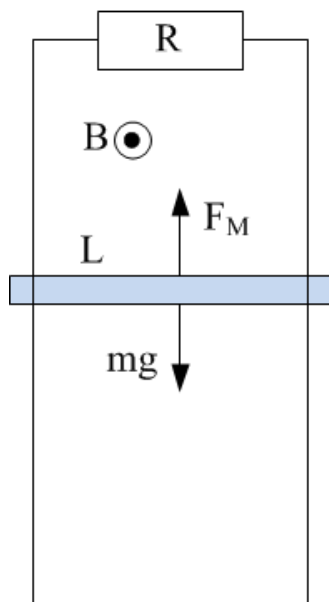
$$F_M = ILB = \frac{\mathcal{E}}{R} LB = \frac{vLB}{R} LB$$

$$F_M = \frac{vL^2 B^2}{R}$$

ב- מהי המהירות המקסימלית אליה יגיע המוליך?

במהלך תנועתו פועלים על המוט שני כוחות: כוח הכבידה שכיוונו מטה, והכוח המגנטי שכיוונו מעלה, אותו מצאנו בסעיף הקודם.

המהירות המקסימלית אליה יכול להגיע המוט תתקבל כאשר הכוח המגנטי יהיה שווה בגודלו לכוח הכבידה. במצב זה של ש"מ ימשיך המוט לנוע במהירות קבועה.



$$F_M = mg$$

$$\frac{vL^2 B^2}{R} = mg$$

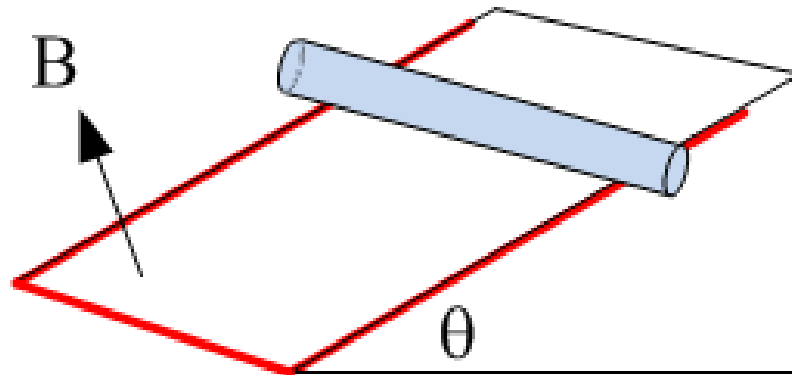
$$v = \frac{mgR}{L^2 B^2}$$

מוט מוליך שאורכו L , מסתו m והתנגדותו R , מחליק ממנוחה ללא חיכוך במורד מישור המשופע בזווית θ . המוט מחליק על גבי תיל מוליך חסר התנגדות (באדום, ראו תרשים), כך שנוצר מעגל סגור. שדה מגנטי B הניצב למישור המשופע וכיוונו מעלה, מצוי בכל המרחב.

א- מהו גודלו ומהי ומה כיוונו הכוח המושרה הפועל על המוט, כאשר הוא נע במהירות רגעית v ?

ב- מהי המהירות הסופית בה ינוע המוט? (בהנחה שהמישור המשופע ארוך דיו).

ג- מה צריך להיות גודלו של כוח חיצוני F הפועל במקביל למישור המשופע, בכדי שהמוט ינוע במהירות קבועה v במעלה המישור המשופע?



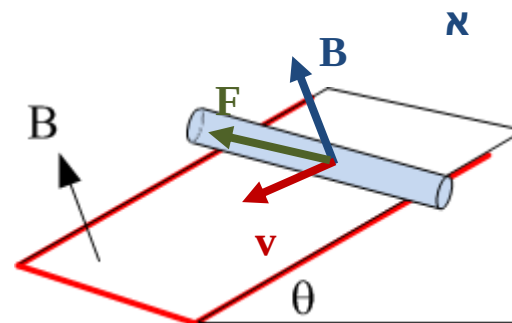
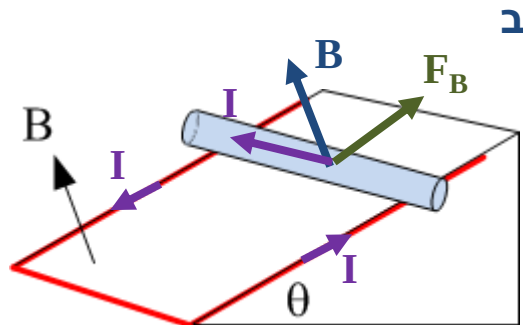
מוט מוליך שאורכו L מחליק ממנוחה ללא חיכוך במורד מישור המשופע בזווית θ . המוט מחליק על גבי תיל מוליך שהתנגדותו R (באדום, ראו תרשים), כך שנוצר מעגל סגור. שדה מגנטי B הניצב למישור המשופע וכיוונו מעלה, מצוי בכל המרחב.

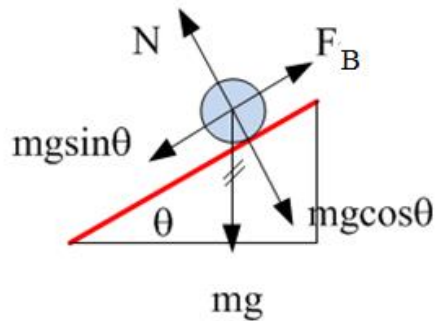
א- מהו גודלו ומהי ומה כיוונו הכוח המושרה הפועל על המוט, כאשר הוא נע במהירות רגעית v ?

גודלו של הכוח המושרה הפועל על המוט:

$$F = ILB = \frac{\varepsilon}{R} \cdot LB = \frac{vLB}{R} \cdot LB = \frac{vL^2 B^2}{R}$$

כאשר המוט נע במהירות שגודלה v וכיוונו כלפי מטה, מטענים חיוביים יצטברו בקצהו השמאלי של המוט, על פי כלל יד ימין (תרשים א). במוט יזרום זרם נגד כיוון השעון, על כן יפעל על המוט כוח מושרה שכיוונו מעלה במקביל למישור המשופע (תרשים ב).





ב- מהי המהירות הסופית בה ינוע המוט? (בהנחה שהמישור המשופע ארוך דיו).

על המוט פועלים הכוחות כמוראה בתרשים. הכוחות המשפיעים על התנועה הם הכוחות המקבילים למישור. המהירות המקסימלית תתקבל כאשר יתקיים:

$$F_B = mg \sin \vartheta$$

נחשב את הכוח המגנטי (הזווית בין המוט לשדה B היא 90 מעלות):

$$F_B = ILB = \frac{\varepsilon}{R} \cdot LB = \frac{v' LB}{R} \cdot LB = \frac{v' L^2 B^2}{R}$$

$$\frac{v' L^2 B^2}{R} = mg \sin \vartheta$$

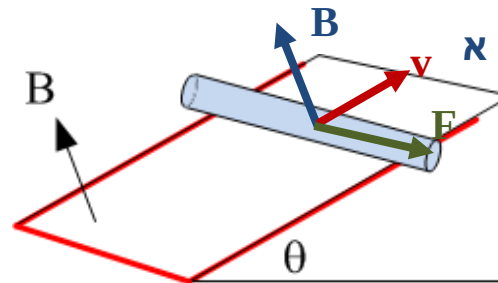
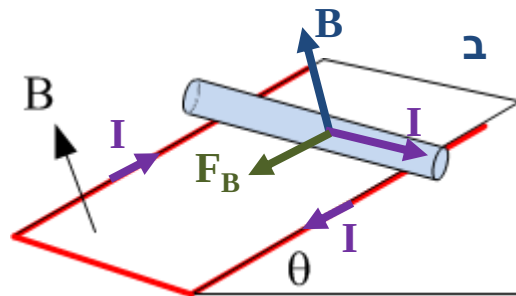
והמהירות המקסימלית:

$$v' = \frac{R \cdot mg \sin \vartheta}{L^2 B^2}$$

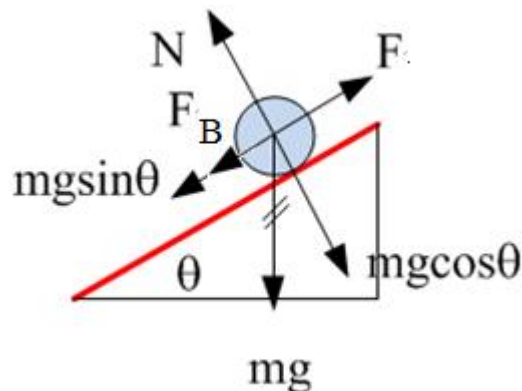
ג- מה צריך להיות גודלו של כוח חיצוני הפועל במקביל למישור המשופע, בכדי שהמוט ינוע

במהירות קבועה v במעלה המישור המשופע?

כאשר המוט נע במהירות שגודלה v וכיוונה כלפי מעלה, מטענים חיוביים יצטברו בקצה הימני של המוט, על פי כלל יד ימין. במוט יזרום זרם בכיוון השעון, על כן יפעל על המוט כוח מושרה שכיוונו מטה במקביל למישור המשופע.



על המוט פועלים הכוחות כמוראה בתרשים. הכוחות המשפיעים על התנועה הם הכוחות המקבילים למישור.



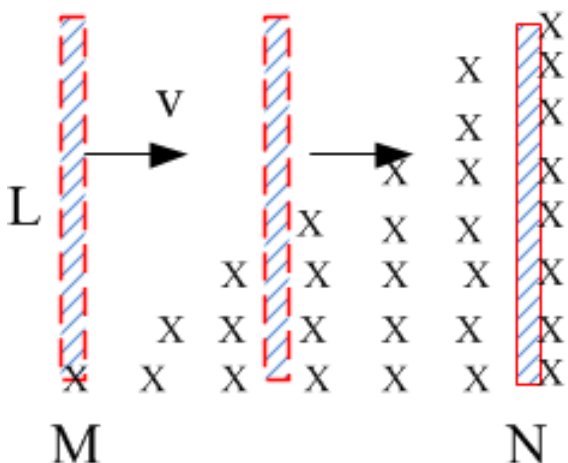
$$\sum F_x = 0$$

$$F - F_B - mg \sin \theta = 0$$

$$F = F_B + mg \sin \theta$$

$$F = \frac{\varepsilon}{R} LB + mg \sin \theta = \frac{vLB}{R} LB + mg \sin \theta$$

$$F = \frac{vL^2 B^2}{R} + mg \sin \theta$$



מוט מוליך באורך L נע ימינה במהירות v ובניצב לשדה מגנטי כמוראה בתרשים.

צורת השדה היא משולש ישר זווית כשהזווית בקדקוד M היא 30° .

א- חשבו את כא"מ המתפתח במוט כתלות בזמן החולף מתחילת התנועה (נקודה M).

ב- בדקו את נכונות התוצאה שקיבלתם עבור שני המקרים הקיצוניים ($N \rightarrow M$)

מוט מוליך באורך L נע ימינה במהירות v ובניצב לשדה מגנטי כמוראה בתרשים. צורת השדה היא משולש ישר זווית כשהזווית בקדקוד M היא 30° .

א- חשבו את כא"מ המתפתח במוט כתלות בזמן.

▲ אורך המוט המצוי בתוך השדה המגנטי (האורך האפקטיבי) משתנה כל הזמן, ולכן הכא"מ המתפתח במוט גם הוא משתנה עם הזמן.

▲ לכן:

$$\varepsilon(t) = v \cdot l(t) \cdot B$$

▲ נחשב את התלות בזמן של האורך האפקטיבי. לצורך זה נתבונן במצב המוט ברגע t מסוים. האורך האפקטיבי l ברגע זה הוא:

$$\frac{l}{x} = \tan 30^\circ$$

$$l = x \tan 30^\circ$$

▲ הואיל והמוט נע במהירות v נקבל:

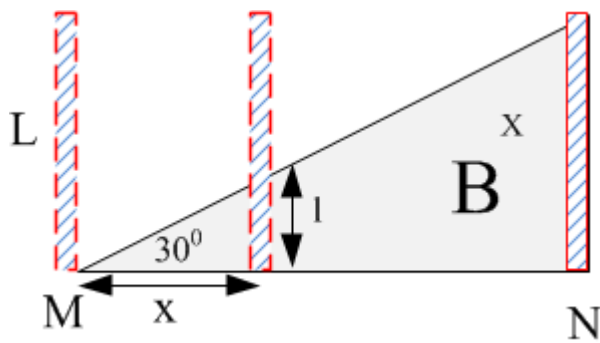
$$l = x \tan 30^\circ$$

$$l(t) = vt \cdot \tan 30^\circ$$

▲ לכן, הכא"מ המתפתח במוט כתלות בזמן הוא:

$$\varepsilon(t) = v \cdot (vt \cdot \tan 30^\circ) \cdot B$$

$$\varepsilon(t) = v^2 B \cdot \tan 30^\circ \cdot t$$



ב- בדקו את נכונות התוצאה שקיבלתם עבור שני המקרים הקיצוניים (N ו-M)

בנקודה M מתקיים $t=0$, ולכן, כצפוי: ◀

$$\varepsilon(t) = v^2 B \cdot \tan 30^\circ \cdot t$$

$$\varepsilon(0) = 0$$

המוט יגיע לנקודה N כעבור פרק זמן t' : ◀

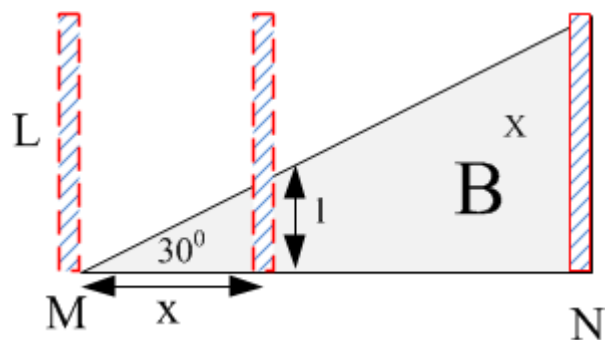
$$MN = \frac{L}{\tan 30^\circ}$$

$$t' = \frac{L}{v \tan 30^\circ}$$

$$\varepsilon = v^2 B \cdot \tan 30^\circ \cdot \left(\frac{L}{v \tan 30^\circ} \right)$$

$$\varepsilon = vLB$$

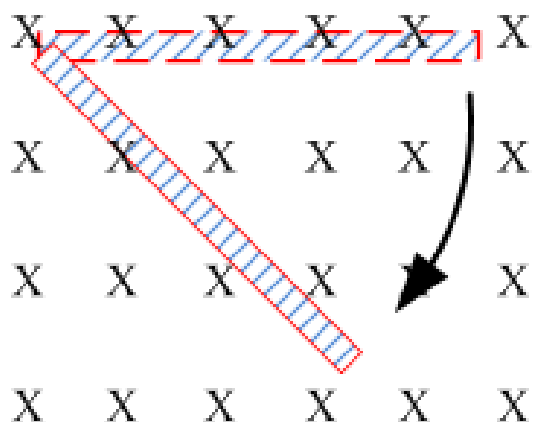
◀ ואכן קיבלנו את אותה תשובה, כצפוי.

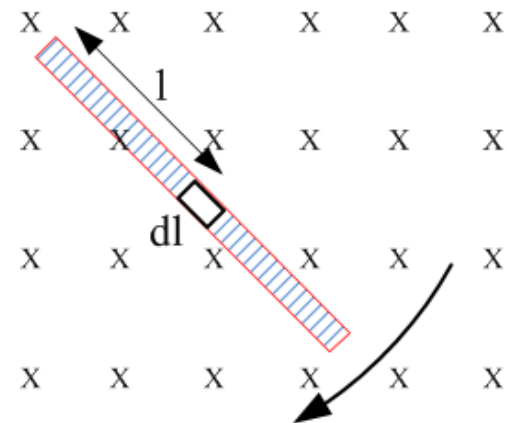


מוט מוליך שארכו L מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω סביב ציר שבקצהו, בניצב לשדה מגנטי אחיד B (ראו תרשים).

א- חשבו את הכא"מ המתפתח במוט.

ב- הסבירו את התוצאות שקיבלתם.





מוט מוליך שארכו L מסתובב במהירות זוויתית קבועה ω סביב ציר שבקצהו, בניצב לשדה מגנטי אחיד B (ראו תרשים).

א- חשבו את הכא"מ המתפתח במוט.

המוט מצוי בתנועה בשדה מגנטי ולכן יתפתח בו כא"מ.

הואיל וכל אחת מהנקודות המצויות לאורך המוט נעה במהירות קווית שונה, התרומה של כל אחת מהן לכא"מ המתפתח במוט תהייה שונה.

נתבונן בקטע קטן מאוד של המוט, שארכו dl , והמצוי במרחק l מהציר.

המהירות של קטע זה היא:

$$v = \omega l$$

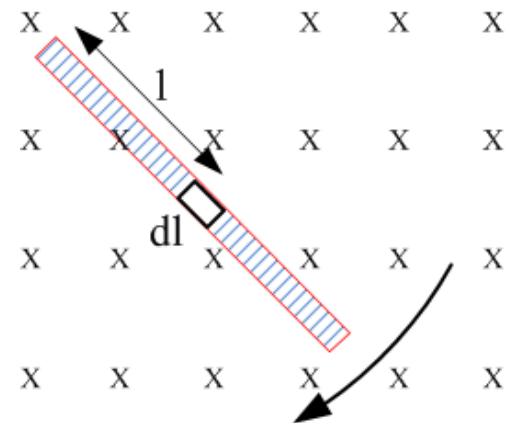
לכן, בהתאם לנוסחת הכא"מ עבור מוליך בתנועה $\varepsilon = vB$ התרומה של קטע זה לכא"מ המתפתח במוט היא:

$$d\varepsilon = \omega l \cdot dl \cdot B$$

על מנת לקבל את התרומה הכוללת של כל המוט, נסכם את התרומות של כל אחד מהחלקים הקטנים:

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_{l=0}^{l=L} B \cdot \omega l \cdot dl$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} B \cdot \omega L^2$$



ב- הסבירו את התוצאה שקיבלתם.

◀ קיבלנו כי:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} B \cdot \omega L^2$$

◀ נרשום את הביטוי בצורה מעט אחרת:

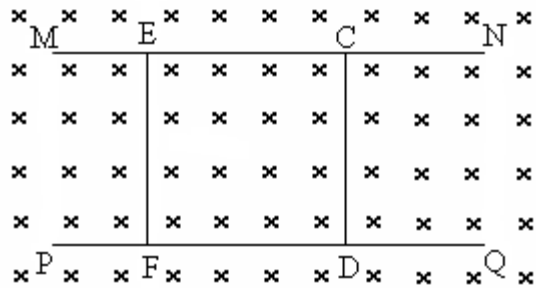
$$\varepsilon = \frac{1}{2} B \cdot \omega L^2 = B \cdot \left(\frac{\omega L}{2} \right) \cdot L$$

$$\varepsilon = B \cdot v_{middle} \cdot L$$

◀ נזכור כי כל אחד מחלקי המוט נע במהירות קווית שונה.

◀ התוצאה שקיבלנו מראה שהכא"מ המתפתח במוט שווה בגודלו לכא"מ שהיה מתפתח באותו מוט אם היה נע במהירות אחידה השווה למהירות הממוצעת של כל חלקי המוט הקטנים (או מהירותה של הנקודה האמצעית):

$$v_{middle} = \omega \frac{L}{2}$$

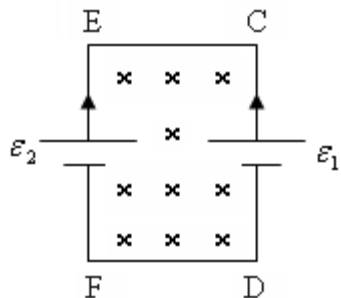


לאורכן של שתי מסילות מוליכות ארוכות מאוד ומקבילות, PQ ו- IMN , נעים בלי חיכוך שני מוטות מוליכים, CD ו- EF , כך שהם ניצבים למסילות (ראה תרשים). כל המערכת מצויה בשדה מגנטי אחיד B , שכיוונו ניצב למישור $MNQP$ (ראה תרשים). נתון: $CD = EF = 20 \text{ cm}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $R_{EF} = 1\Omega$, $R_{CD} = 1\Omega$ התנגדות המסילות זניחה.

בכל אחד מהמקרים הבאים (סעיפים א – ג) מצא את עוצמת הזרם במוט EF , וציין את כיוונו:

א- המוטות CD ו- EF נעים ימינה במהירות קבועה $v = 5 \text{ m/s}$. נמק את תשובתך

ב- המוט CD נע ימינה במהירות קבועה של $v = 5 \text{ m/s}$, והמוט EF נע שמאלה במהירות קבועה של $u = 3 \text{ m/s}$.



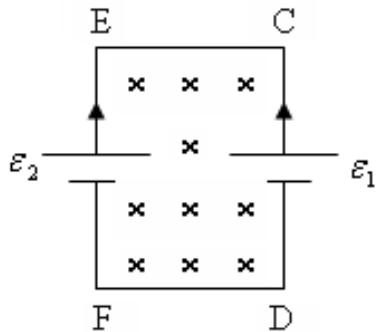
לאורכן של שתי מסילות מוליכות ארוכות מאוד ומקבילות, MN ו-PQ, נעים בלי חיכוך שני מוטות מוליכים, CD ו-EF, כך שהם ניצבים למסילות (ראה תרשים). כל המערכת מצויה בשדה מגנטי אחיד B, שכיוונו ניצב למישור MNQP (ראה תרשים). נתון: $CD = EF = 20 \text{ cm}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $R_{EF} = 1\Omega$, $R_{CD} = 1\Omega$, התנגדות המסילות זניחה. בכל אחד מהמקרים הבאים (סעיפים א – ג) מצא את עוצמת הזרם במוט EF, וציין את כיוונו:

א- המוטות CD ו-EF נעים ימינה במהירות קבועה $v = 5 \text{ m/s}$. נמק את תשובתך

כאשר שני המוטות נעים ימינה באותה המהירות, נוצרים במוטות CD ו-EF כא"מ שווים ובעלי אותו כיוון, לכן לא יזרום זרם (הזרמים שווים ומנוגדים זה לזה).

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \Rightarrow I = 0$$

ב- המוט CD נע ימינה במהירות קבועה של $v = 5\text{m/s}$, והמוט EF נע שמאלה במהירות קבועה של $u = 3\text{m/s}$.



במוט CD נוצר כא"מ בכיוון מעלה, השווה בגודלו ל:

$$\mathcal{E}_{CD} = v \cdot B \cdot \lambda = 5 \cdot 0.5 \cdot 0.2 = 0.5V$$

במוט EF נוצר כא"מ בכיוון מטה השווה בגודלו ל:

$$\mathcal{E}_{EF} = v \cdot B \cdot \lambda = 3 \cdot 0.5 \cdot 0.2 = 0.3V$$

מתקבל המעגל הטורי הבא, שכיוונו מ-E ל-F והזרם בו:

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{r_1 + r_2} = \frac{0.5 + 0.3}{1 + 1} = 0.4A$$

רכבת מהירה נעה כשהיא מרחפת מעל המסלול שלה. הרכבת מרחפת בגלל תנועתה בשדה מגנטי אופקי אחיד B, כמתואר בתרשים (חתך אנכי לאורך הקרון). השדה המגנטי נוצר על-ידי מגנטים חזקים המוצבים לאורך שני צדי המסלול, כך שכיוון השדה "יוצא מהדף" ועוצמתו 2 T .



בעת תנועת הרכבת נוצר זרם מושרה בכבל RS המתוח לאורך רצפת הקרון. כבל זה הוא חלק מלולאה חשמלית PQESMU המאונכת לשדה, וכוללת גם כבלים שמתוחים לאורך מסלול הרכבת. בנקודות Q ו-M יש מגעים חשמליים ניידים הנעים עם הרכבת (הקטע PU הסוגר את הלולאה נמצא בקצה המסלול, והתרשים אינו בקנה-מידה אחיד). אורך הקטע SM הוא 50 cm, ומהירות הרכבת הנעה שמאלה היא 450 קמ"ש. הזנח את המתח המושרה בקטע QR.

המשך השאלה בשקף הבא.

- א- חשב את המתח המושרה בין קצות הקטע SM.
- ב- ברגע מסוים ההתנגדות של הלולאה PQRSMU היא 5Ω . חשב את גודל הזרם עובר בקטע RS, וקבע את כיוונו (שמאלה או ימינה).
- ג- חשב את הכוח המגנטי (גודל וכיוון) שמפעיל השדה המגנטי B על הכבל RS ברגע מתואר בסעיף ב. נתון כי אורך הכבל RS הוא 10 m .
- ד- לאורך הקרון מתוחים 40 כבלים כדוגמת הכבל RS, שכל אחד מהם הוא חלק מלולאה נפרדת כדוגמת הלולאה PQRSMU. על כל אחד מהכבלים פועל אותו כוח מגנטי שחישבת בסעיף ג. (הזנח את השדה המגנטי של כדור הארץ. מהי המסה של הקרון אם ידוע כי הוא מרחף בגובה קבוע מעל הקרקע.

- א- חשב את המתח המושרה בין קצות הקטע SM.
מהירות הרכבת ביחידות מ/ש

$$v = \frac{450 \cdot 1000}{3600} = 125 \frac{m}{sec}$$

הכא"מ המושרה:

$$\varepsilon = v \cdot B \cdot l = 125 \cdot 0.5 \cdot 2 = 125V$$

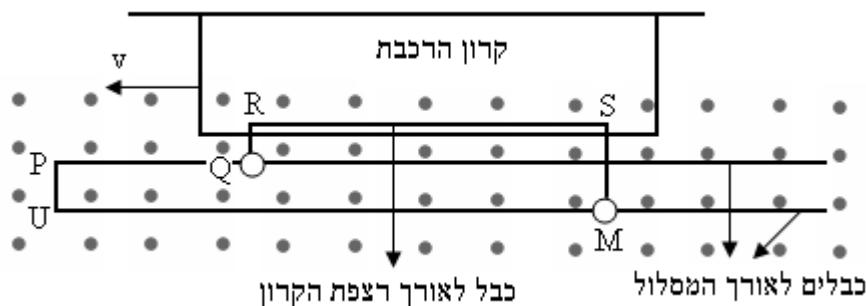


ב- ברגע מסוים ההתנגדות של הלולאה PQRS היא 5Ω . חשב את גודל הזרם עובר בקטע RS, וקבע את כיוונו (שמאלה או ימינה).

גודל הזרם: ◀

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{125}{5} = 25A$$

כיוון הזרם הוא מ-S ל-R, על פי כלל לנץ או על פי כוח לורנץ. ◀



ג- חשב את הכוח המגנטי (גודל וכיוון) שמפעיל השדה המגנטי B על הכבל RS ברגע מתואר בסעיף ב. נתון כי אורך הכבל RS הוא 10 m.

$$F = I \cdot B \cdot \lambda = 25 \cdot 2 \cdot 10 = 500 N$$

◀ כיוון הכוח הוא כלפי מעלה



ד- לאורך הקרון מתוחים 40 כבלים כדוגמת הכבל RS, שכל אחד מהם הוא חלק מלולאה נפרדת כדוגמת הלולאה PQRSMU. על כל אחד מהכבלים פועל אותו כוח מגנטי שחישבת בסעיף ג. (הזנח את השדה המגנטי של כדור הארץ. מהי המסה של הקרון אם ידוע כי הוא מרחף בגובה קבוע מעל הקרקע.

◀ בכיוון האנכי שקול הכוחות שווה לאפס, לכן:

$$mg = F \cdot 40$$

$$m = \frac{F \cdot 40}{g} = \frac{500 \cdot 40}{10} = 2000kg$$